

地震時における室内被害と人体生理機能変化
に基づく建物機能損失

2016 年

吉澤 睦博

目次

第1章 序章	1
1.1 はじめに	1
1.2 論文の構成	2
第1章 参考文献	3
発表論文リスト	4
第2章 防災指標に基づく室内被災度評価	8
2.1 はじめに	8
2.2 気象庁における防災指標	8
2.3 建物内震度	12
2.4 緊急地震速報の高度利用による室内被害の軽減	23
2.4.1 建物内震度の予測機能	24
2.4.2 長周期地震動レベルの予測機能	29
2.4.3 超高層建物向け緊急地震速報システムの開発	35
2.5 まとめ	45
第2章 参考文献	45
第3章 大規模実験に基づく室内被災度評価	48
3.1 はじめに	48
3.2 実験概要	48
3.2.1 構造概要	49
3.2.2 家具・什器の概要	61
3.2.3 非構造部材の概要	68
3.2.4 建築設備と消防設備の概要	73
3.2.5 入力地震動	77
3.3 実験結果	83
3.3.1 構造躯体の応答	83
3.3.2 家具・什器の応答	96
3.3.3 天井の応答	99
3.3.4 建築設備の応答	106
3.4 室内被害状況とマクロな被災度指標	109
3.5 まとめ	119
第3章 参考文献	120
第4章 実被害データに基づく室内被害と建物機能損失	122
4.1 はじめに	122

4.2 建物概要	122
4.3 地震被害の概要	131
4.3.1 東北地方太平洋沖地震での被害概要	131
4.3.2 復旧工事の概要	137
4.3.3 2012 年 12 月 7 日の地震による被害	140
4.4 観測された地震動による建物応答	142
4.5 建物の揺れによる吊り設備の応答	144
4.6 復旧工事からみた機能損失評価	147
4.6.1 全体の損失率による評価	147
4.6.2 復旧工事費用からみた建物機能損失の特徴	148
4.6.3 既往の被害確率曲線からみた復旧工事の特徴	149
4.6.4 事業停止期間からみた復旧工事の特徴	151
4.7 まとめ	151
第 4 章 参考文献	152
 第 5 章 人の運動生理機能に対する建物の揺れの影響	 153
5.1 はじめに	153
5.2 長周期地震動の揺れが人に与える影響	153
5.2.1 ISO 2631-1 による快適性評価と船酔い指標	154
5.2.2 ISO 2631-1 による地震観測記録の評価	156
5.2.3 建物居住者への地震の揺れアンケートによる評価	165
5.3 人体生理機能維持を目的とした情報システム	170
5.4 まとめ	171
第 5 章 参考文献	171
 第 6 章 結論	 173
 謝辞	 177

第1章 序章

1.1 はじめに

1995 年兵庫県南部地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震により、大震災を二度受けた日本列島は、南海トラフを震源とする巨大海溝型地震の発生の危険性と合わせて、首都圏などの都市域での直下地震のリスクも高まっている。

1995 年兵庫県南部地震では多くの建物が大破・倒壊し、耐震設計の重要性が強く認識された。一方、1981 年に施行された「新耐震設計法」^{1.1)}で設計された建物における大破・崩壊は少なく、新耐震設計法による「大地震でも人命の安全を確保する」という役割が確認された。しかし、構造体の塑性変形能力により地震エネルギーを吸収しようとする「新耐震設計法」は原則的に損傷を許容する構造設計であり、建物被害程度などの性能レベルの検証の不十分さが問題点として顕在化した。すなわち、社会一般における建物の耐震性への期待は「人命の安全」はもとより、「地震直後も機能が維持される」「地震により財産価値が損なわれない」など、もっと高いレベルにあることが明らかになった。

内閣府中央防災会議では、1978 年の大規模地震対策措置法の成立以来、四半世紀経過した中で最新の知見により東海地震への対策を検討するために「東海地震に関する専門調査会」を 2001 年に設置、それ以降「東海地震対策専門調査会」「東南海・南海地震等に関する専門調査会」「首都直下地震対策専門調査会」等の専門調査会を立ち上げ、最新の知見に基づく地震被害想定の公表を進めている。それらの専門調査会で示された 1995 年兵庫県南部地震を上回る甚大な被害想定を受けて、減災のための「自助、共助、公助」の適切な役割分担に基づく防災対策の必要性が指摘されている^{1.2)}。2005 年には内閣府防災担当より「事業継続ガイドライン」が策定され、企業・組織に対して、地震に対する事業継続計画（Business Continuity Plan, BCP）を持つことの必要性が示された。BCP とは例えば大地震などの自然災害による不測の事態が発生しても、重要な事業を中断させない、または中断しても可能な限り短い期間で復旧させるための方針・体制・手順等を示した計画^{1.3)}のことであり、企業の自助および共助を実践するための計画である。

こうした中、2004 年新潟県中越地震における半導体工場の被災や、2007 年新潟県中越沖地震の自動車エンジンの基幹部品工場の被災によるサプライチェーンの途絶が発生した。これらの被災による企業の事業活動への影響の大きさから、地震による被災のダメージが改めて強く意識されるようになった。それまでの企業の立案する防災計画では「建物は耐震性があるので被害は無い」という前提が多かったが、これらの大地震時の被災状況や BCP 策定の観点から、「建物は耐震性があっても、建物の常時の機能を損失する」といった被害の発生を前提とした計画策定が行われるようになった。

2011 年東北地方太平洋沖地震の首都圏では、最大震度 6 強と広範囲に震度 5 弱以上の強い揺れが観測された。東北地方に比べて震度 6 強以上の強震域は限定的であったこともあるが、新耐震設計法の普及により構造躯体の耐震性が向上した都市を襲った強震動により、これまで構造躯体の被害に隠れていた非構造部材や建築設備機器の被害が、相対的に顕在化した。また家具・什器の転倒、落下等が非構造部材や建築設備の被害と連成することにより室内被害を拡大させた。さらに 2003 年十勝沖地震や 2004 年新潟県中越地震で注目されていた長周期地震動による長周期構造物の共振現象が顕在化し、首都圏をはじめとして、震源から 700km 以上離れた大阪平野内でも

超高層建物が大きな応答を示して、内装材などの被害が生じた。首都圏では構造躯体の重大な被害は無かったものの、低層建物から高層建物まで、多様な室内被害が発生し、建物の機能損失が発生した。さらにマグニチュード 9 クラスの巨大海溝型地震の後に太平洋岸を襲った大津波だけでなく、マグニチュード 7 クラスの余震の発生や首都圏の計画停電などは、本震の被害からの復旧活動を阻害し、マルチハザードによる建物機能のダウンタイムの長期化を引き起こした。

また長周期地震動による超高層建物の長時間の揺れは建物利用者に不安感を与え、船酔いによる動揺病のような運動生理機能不全を引き起こした^{1.4)}。さらに巨大海溝型地震の後の非常に活発化した余震活動による揺れはめまいの訴えを増加させ、本震から数か月後でもめまい患者の増加が報告されている^{1.5)}。これらの平衡感覚機能異常は「地震酔い」と呼ばれ、新聞などでも報道され、内陸型の地震で余震活動が活発であった 2016 年熊本地震の際にも発生した。これらの地震の揺れによる人体の機能低下は地震外力に依存するため建物側での対策は難しいものの、地震後の社会全体の機能維持の面から顕在化してきた課題である。

1995 年兵庫県南部地震から 2011 年東北地方太平洋沖地震までと、数多くの大地震により発生した多様な建物の被害に対して、社会の建物の耐震性能に対するニーズは、人命の安全確保から、地震後の建物の機能維持へと要求性能が変わりつつある。さらに想定される南海トラフ地震や首都直下地震による建物の構造被害を軽減し、建物機能を維持しながら事業継続を続けることが社会的にも求められている。そのためには建物の構造被害だけでなく室内被害の軽減を含めた対策が求められていると言える。そこで本論文では、以下の 2 つの課題について定量的かつ実践的な情報を提供することを目的とする。

- (1) 地震後の建物の機能維持を向上させるために、構造躯体－非構造部材－建築設備－家具什器の相互干渉によって生じる地震時の室内被害のメカニズムを実験結果や被害調査結果より示し、地震後にも機能維持できる室内空間を設計するための事項を明らかにする。
- (2) 地震後の建物の機能維持を向上させるために、地震時の室内にいる居住者の安全性や快適性を保つ上で必要となるリアルタイムに提供できる地震に関する情報を整理し、減災に資する情報量を提供するための事項を明らかにする。

1.2 論文の構成

本論文は 1 章から 6 章で構成されている。

本論文の目的、背景、構成を示した本章（第 1 章）に続く第 2 章では、国や自治体レベルで行われるマクロな被害想定で用いられる防災指標である「気象庁震度」について、個々の建物の室内被災程度の評価に用いるための検討を行う。気象庁震度は日本においては地震動の最大加速度や最大速度よりも広く認知された指標であり、大地震発生後の対応レベルを決定する条件として用いられることも多い。また 2007 年から運用が開始された緊急地震速報は、地震の揺れの来る前に震度情報を伝達して減災支援するシステムであるが、緊急地震速報の震度情報をより効果的に建物の減災システムとして用いる方法についての検討についても示す。

第 3 章では、建物の室内空間を実大規模でモデル化した振動実験の結果から、非構造部材、建築設備、家具什器の応答が室内被害に与える影響について検討する。大地震時に発生する建物の地震被害をより現実的に精度よく推定するために、非構造部材や設備機器をモデル化した実験研究が数多く実施されている。しかし、それらの多くは実験上の制約条件から要素実験である場合

が多く、非構造部材の一部分を取り出した静的載荷実験や、建築設備単体の振動実験などであり、実際の建物の室内空間の内部にモデル化されたものでは無かった。そこで実大三次元震動破壊実験施設「Eーディフェンス」を用いて実施されたオフィスビルの室内空間をモデル化した実験結果について詳述し、非構造部材や建築設備の耐震性が室内被災度に与える影響を整理する。そして建物の床応答加速度や応答速度、応答変位などの物理量から室内被災度評価について述べる。

第4章では、東日本大震災で震度6弱の揺れをうけたある公共施設について、その被害状況から復旧工事までの過程を詳述する。東日本大震災における企業の被災状況の分析によると、震度5強以上の揺れの地域では60%以上の事業所で何らかの設備被害が生じることが示されている。しかし、非構造部材や設備機器の被害事例については、構造体の被害に比べると情報開示される場合が少なく、また典型的に整理された事例の報告はほとんどない。そこで、調査対象としたある公共施設のRC造建物の被害から復旧工事の過程を追って入手したデータを基に、BCP策定のための損失評価の高精度化を目的として、地震時の建物機能損失評価に建築設備や非構造部材の被害が与える影響を検討し、被害軽減予測手法の高精度化のために今後考慮すべき点を同定する。

第5章では、建物の中で地震の揺れに応答する人への影響についての検討結果を述べる。地震後の建物の機能維持を保つためには、構造被害及び室内被害の軽減に加えて、その室内で人が健全に活動できることが求められる。そこで本章では、地震時の建物の揺れが人の運動生理機能に与える影響の分析を行い、建物利用者の機能低下の検討を行う。

第6章では、本論文から得られた成果を、各章毎に得られた知見としてまとめている。

第1章 参考文献

- 1.1) 建設省：建築基準法施行令改正（新耐震）、1981年6月
- 1.2) 内閣府（防災担当）：「4 新しい防災対策に向けて」、平成14年版防災白書、平成14年
- 1.3) 内閣府（防災担当）：事業継続ガイドライン、平成17年8月
- 1.4) 気象庁地震火山部：長周期地震動に関する情報のあり方 報告書 資料2：高層ビルにおけるアンケート調査票およびアンケート調査結果、平成24年3月
- 1.5) 本間元康，遠藤信貴，長田佳久，金吉晴，栗山健一：巨大地震後におこる平衡感覚異常，日本認知心理学会第10回大会，2012年

発表論文リスト

審査論文：

1. 吉澤睦博, 長江 拓也, 梶原 浩一, 中島 正愛：地震を受けた低層 RC 建物の非構造部材・建築設備の損傷と建物機能回復に至る過程の分析, 構造工学論文集 Vol.60 B, pp.521-528, 2014 年 3 月
2. 吉澤睦博, 大淵正博, 恒川裕史, 小林喜久二：高層建物向けの緊急地震速報システムの開発, 日本建築学会技術報告集 第 22 巻 第 51 号, pp.459-464, 2016 年 6 月
3. 吉澤睦博, 福山國夫, 井上 貴仁, 梶原浩一：大規模振動実験によるオフィスの室内被害に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, pp.2013-2023, 2016 年 12 月

会議論文：

1. 吉澤睦博：想定首都直下地震による建築物および室内の被害状況の検討, 特別シンポジウム 地震学と耐震工学の橋渡し ～想定地震動による建物応答～, pp.73-137, 2012 年 5 月 28 日
2. M. Yoshizawa, T. Nagae, K. Fukuyama, T. Inoue, K. Kajiwara, T. Saito, N. Fukuwa, H. Kitamura and M. Nakashima : “Seismic Loss of Functionality in High-Rise and Low-Rise Office Buildings: The 2011 E-Defense shaking table test”, The 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, September 24-28, 2012

本論文に関する口頭発表：

1. 吉澤睦博, 恒川裕史, 小林喜久二：長周期地震動予測を考慮した緊急地震速報システム, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.189-190, 2009 年
2. 吉澤睦博：緊急地震速報を用いた防災システムのための建物内震度予測の検討, 第 13 回日本地震工学シンポジウム, pp.4318-4323, 2010 年
3. 吉澤睦博, 長江拓也, 福山國夫, 井上貴仁, 梶原浩一, 齊藤大樹, 福和伸夫, 北村春幸, 中島正愛：E-ディフェンスによるオフィス建物の地震時機能損失に関する実験的研究, 日本建築学会 シンポジウム 東日本大震災からの教訓、これからの新しい国づくり, 一般講演 A6, pp.287-290, 2012 年 3 月
4. Mutsuhiro Yoshizawa, Takuya Nagae and Koichi Kajiwara : A study on human body sensitivity for building response subjected to long-period ground motions, The 20th Japan Conference on Human Response to Vibration, Osaka, September 4-6, 2012
5. 吉澤睦博, 長江拓也, 福山國夫, 井上貴仁, 梶原浩一, 齊藤大樹, 北村春幸, 福和伸夫, 中島正愛：地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究（その 1）実験概要, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.1039-1040, 2012 年
6. 福山國夫, 吉澤睦博, 長江拓也, 井上貴仁, 梶原浩一：地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究（その 2）試験体の構造概要とその応答, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.1041-1042, 2012 年
7. 小林俊夫, 荻原健二, 長江拓也, 吉澤睦博：地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究（その 3）システム天井, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.1043-1044, 2012 年

8. 平山昌宏, 吉澤睦博: 地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究 (その 4) 機械設備の応答, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.1045-1046, 2012 年
9. 永島茂人, 西井宏安, 吉田猷一, 千葉大輔, 吉澤睦博, 長江拓也: 地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究 (その 5) 情報通信機器類の実験結果, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.1047-1048, 2012 年
10. 安立直也, 吉澤睦博: 地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究 (その 6) 家具・間仕切壁試験体の応答, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.1049-1050, 2012 年
11. 孫海濤, 高橋徹, 中村友紀子, 斉藤大樹, 吉澤睦博: 地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究 (その 7) 強震動を受けるリビング・ダイニングキッチン空間の家具の挙動, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.1051-1052, 2012 年
12. 由井茜, 高橋徹, 中村友紀子, 斉藤大樹, 吉澤睦博: 地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究 (その 8) 地震時の室内変容に伴う動線の閉塞率に関する研究, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.1053-1054, 2012 年
13. 倉田和己, 松下卓也, 飛田潤, 護雅史, 福和伸夫, 長江拓也, 吉澤睦博: 地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究 (その 9) 室内被災状況のモニタリングとシミュレーション (360 度映像の活用), 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.1055-1056, 2012 年
14. 松下卓也, 倉田和己, 飛田潤, 護雅史, 福和伸夫, 長江拓也, 吉澤睦博: 地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究 (その 10) 室内被災状況のモニタリングとシミュレーション (家具転倒評価から安全対策へ), 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.1057-1058, 2012 年
15. Mutsuhiro Yoshizawa, Setsuo Maeda, Takuya Nagae, Takahito Inoue and Koichi Kajiwara : One Example of Results of Analyzing Vibration in Building of Earthquake Based on Human Response to Vibration Evaluation (Characteristics of building response), The 21st Japan Conference on Human Response to Vibration, Tokyo, August 27-29, 2013
16. Setsuo Maeda, Noriko Morishita, Mutsuhiro Yoshizawa, Takuya Nagae, Takahito Inoue and Koichi Kajiwara : One Example of Results of Analyzing Vibration in Building of Earthquake Based on Human Response to Vibration Evaluation (ISO 2631-1 and ISO 2631-2), The 21st Japan Conference on Human Response to Vibration, Tokyo, August 27-29, 2013
17. 吉澤睦博, 長江拓也, 福山國夫, 井上貴仁, 梶原浩一: 地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究 (その 11) 室内被害が人体に与える影響の評価, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.673-674, 2013 年
18. 前田節雄, 吉澤睦博, 長江拓也, 井上貴仁, 梶原浩一: 地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究 (その 12) 地震時の建屋内での揺れを人体振動評価(ISO2631-1)に基づいて解析した結果の一例, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.675-676, 2013 年
19. Mutsuhiro Yoshizawa, Koichi Kajiwara and Setsuo Maeda: A study on human body sensitivity for shaking from main shock of major earthquake to some aftershocks, The 22nd Japan Conference on Human Response to Vibration, Okinawa, August 25-27, 2014
20. Mutsuhiro Yoshizawa and Masashi Yamamoto: Development of questionnaire system for shaking of buildings caused by earthquakes, The 23rd Japan Conference on Human Response to Vibration,

Hiroshima, August 24 -26, 2015

21. 吉澤睦博, 大淵正博, 小林喜久二: 建物の振動特性を考慮した緊急地震速報システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.1053-1054, 2015 年 9 月
22. 吉澤睦博, 大淵正博: 高層建物内の地震観測記録から求めた計測震度に関する分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.1053-1054, 2016 年 8 月

その他の口頭発表など:

1. 吉澤睦博, 佐藤忠信, 土岐憲三: 杭基礎-地盤系の動的相互作用解析における S R モデルの構築, 第 27 回土質工学研究発表会, pp.1047-1050, 1992 年
2. 吉澤睦博, 塩見忠彦: 地震時液状化解析への Densification モデルの適用に関する一考察, 第 30 回土質工学研究発表会, pp.785-788, 1995 年
3. 吉澤睦博, 鬼丸貞友, 畑中宗憲, 内田明彦, 中澤明夫, 難波伸介: LPG タンク基礎および周辺地盤の地震による影響について, 土木学会地震工学委員会 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1149-1152, 1997 年 7 月
4. 吉澤睦博, 土屋富男, 福田秀樹, 田村修次, 船原英樹, 八幡夏恵子: R C 杭の大型せん断土槽実験による液状化地盤の地盤反力係数, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集 Vol.10-1, pp.43-48, 1998 年
5. 吉澤睦博, 鬼丸貞友, 佐治聡, 矢島淳二, 熊谷裕道, 内田明彦, 畑中宗憲: サンドコンパクションパイル工法で改良された地盤に建つ直接基礎構造物の地震時挙動, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集 Vol.10-1, pp.443-448, 1998 年
6. 吉澤睦博, 成川匡文, 土方勝一郎, 大島豊, 西村功, 内川祐一郎, 柳下文雄, 久保賀也, 塩見忠彦, 並河努: SR モデルによる杭基礎建築物の地震応答解析における液状化の考慮方法: その 7 三次元有限要素法による液状化時の地盤剛性の算定, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp.373-374, 1999 年
7. M. Yoshizawa, S. Onimaru, A. Uchida and M. Hatanaka: "A STUDY ON LIQUEFIED GROUND DISRUPTION EFFECTS ON LIQUID STORAGE TANK BEHAVIOR", The 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000
8. 吉澤睦博, 阿部秋男, 船原英樹, 鈴木康嗣: 大型せん断土槽中の液状化した地盤における模型鋼管杭の地盤反力係数, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅰ, pp.673-674, 2000 年
9. 吉澤睦博, 田中英朗, 上條直隆, 石田智昭, 間瀬辰也, 白井哲男: 深層混合処理工法を用いた山留め壁の長期物性に関する研究, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅰ, pp.701-702, 2001 年
10. 吉澤睦博, 田中英朗, 上條直隆, 石田智昭, 富井隆, 塩見忠彦: 深層混合処理工法によるブロックラップ式改良地盤の地震応答特性に関する研究, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅰ, pp.417-418, 2002 年
11. 吉澤睦博, 鬼丸貞友, 毛利栄征: 地盤-杭基礎-構造物系の多方向入力による振動実験の三次元シミュレーション解析, 日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅰ, pp.525-526, 2006 年
12. 吉澤睦博, 内田明彦, 濱田純次: 三次元有限要素法を用いた液状化地盤における模型杭の水平載荷実験の逆解析, 構造工学論文集 Vol.51 A, pp.579-584, 2005 年 3 月

13. 吉澤睦博，鬼丸貞友，佐藤正義，田端憲太郎：E-ディフェンスによる非液化化地盤中の杭基礎の震動実験（その3）事前解析による入力レベルの検討，日本建築学会 学術講演梗概集 構造 I，pp.639-640，2007 年
14. 吉澤睦博，佐藤正義，田端憲太郎：E-ディフェンスによる液化化地盤中の杭基礎の震動実験（その2）Densification モデルによる事前予測解析，日本建築学会 学術講演梗概集 構造 I，pp.707-708，2008 年
15. 吉澤睦博：特集 長周期地震動 4. 地震発生時の建物機能維持，竹中技術研究報告 No.71，pp.18-23，2015 年
16. 吉澤睦博：天井脱落被害再現実験を目視調査した学校施設管理者へのアンケート調査結果，学校施設における大空間建築物の実験研究 成果発表会，2015 年 2 月

第2章 防災指標に基づく室内被災度評価

2.1 はじめに

想定される大地震に対する建物の被害想定は、被害想定目的に応じて様々な手法が用いられる。手法としては想定地震の震源モデルから建物に入力される地震動を作成し、建物の地震応答解析を行い建物の損失評価を細かく評価する場合から、建物に入力される地震レベルを最大加速度や最大速度などの物理量の静的な値に置き換えて評価する場合などがある。

国や自治体レベルで行われる被害想定は、個々の建物を対象とせずにマクロな被害想定を行うため、想定地震に対する揺れの大きさは震度階で与えられる場合がほとんどである。また気象庁の震度速報により、大地震発生後でもリアルタイムに震度情報（震度階の情報）が配信されるため、震度階は実際の地震後の対応レベルを決定する条件として用いられることも多い。

そこで本章では、防災指標として用いられることの多い気象庁震度について、建物の室内被害を評価する目的で活用する場合について、建物内で観測された地震記録より考察を行う。また地震の揺れの来る前に震度情報を伝達して減災を支援するシステムとして、2007年から運用が開始された緊急地震速報について、緊急地震速報をより効果的に建物の減災システムとして用いる方法についての検討を行った。

2.2 気象庁における防災指標

地震動の強弱を表す尺度としての震度階級は、地震の揺れに対して10前後のレベルで表現され、世界では地域により定義の異なるいくつかの震度階級が用いられている。日本では気象庁震度階級が用いられ、アメリカ等では修正メルカリ震度階級^{2.1)} (MMI ; Modified Mercalli Intensity scale) が用いられている。アメリカ国内の震度はアメリカ地質調査所 (USGS ; U.S. Geological Survey) が情報の取りまとめを行っており、地震後の被災地の調査や揺れに対するアンケート調査で震度階級が決定される。近年は MMI の分布図を速報する Shakemap の作成では、MMI と地動加速度、地動速度との関係式^{2.2)}が使われている。

気象庁震度^{2.3)}は地震による揺れの強さを総合的に表す指標として防災対応の基準では最も多く利用されており、日本においては地震動の最大加速度や最大速度よりも広く認知された指標と言える。気象庁震度は日本独自の階級であり、かつては気象台の観測員の体感および周囲の状況から震度を決定して発表していた。しかし観測員の主観による精度不足、震度5以上の被害のばらつき、震度発表の迅速化などの課題が上がり、無人観測可能な計器による震度観測が検討され、1996年4月以降は、計測震度計により自動的に観測し速報している。

気象庁震度は、気象庁の設置基準に準拠して設置された震度計により、観測された加速度波形の3成分 (NS, EW, UD) から自動的に計測震度を算出し、その値から震度階級に区分されて震度として速報される。

ここで計測震度の算出方法について示す。公式の震度情報としては気象庁の検定を受けた地震計で観測された加速度波形の3成分を用いて算出される。まず観測加速度（単位 ; cm/sec^2 ）の各成分をフーリエ変換したスペクトルに、ハイカットフィルター $F_H(f)$ 、ローカットフィルター $F_L(f)$ 、周期特性補正フィルター $F_c(f)$ をかける。それぞれのフィルターの式を式 2-1～式 2-3 に、フィルター形状を図 2-1 に示す。

$$F_H(f) = \left(1 + 0.649X^2 + 0.241X^4 + 0.0557X^6 + 0.009664X^8 + 0.00134X^{10} + 0.000155X^{12}\right)^{-1/2} \quad \text{式 2-1}$$

ここで $X = f/f_c$ ($f_c = 10\text{Hz}$)

$$F_L(f) = \left(1 - \exp\left(-\left(f/f_0\right)^3\right)\right)^{0.5} \quad \text{ここで } f_0 = 0.5\text{Hz} \quad \text{式 2-2}$$

$$F_c(f) = (1/f)^{0.5} \quad \text{式 2-3}$$

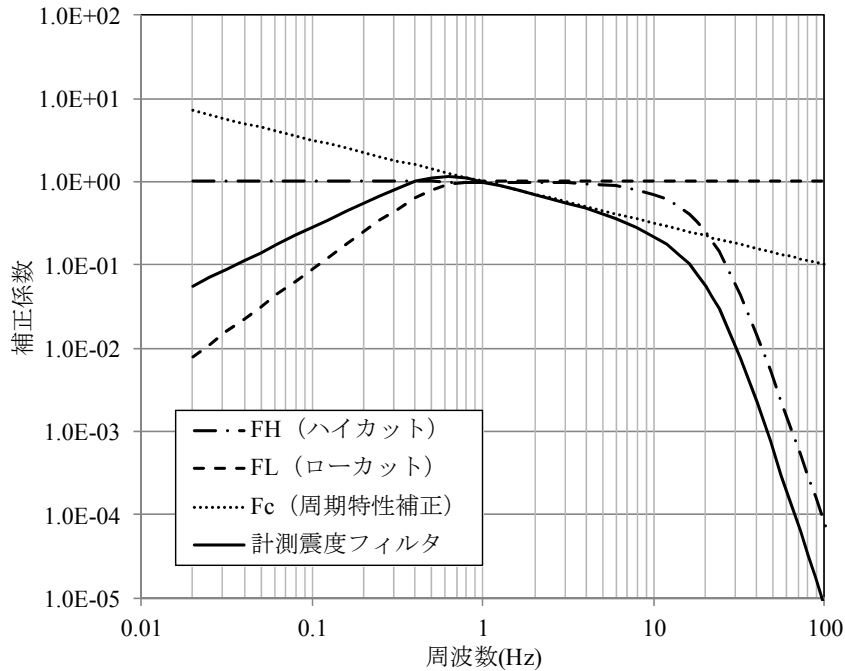


図 2-1 震度計算のためのフィルター特性

次に補正したスペクトルの逆フーリエ変換した時刻歴波形に対して、各成分の波形のベクトル合成和を計算する。ベクトル合成和した波形の絶対値がある値 a 以上となる時間の合計を計算したとき、これがちょうど 0.3 秒となるような a を求める。 a を式 2-4 に代入し、計測震度 I を計算し、計算された I の小数第 3 位を四捨五入し、小数第 2 位を切り捨てたものを計測震度とする。

$$I = 2 \log a + 0.94 \quad \text{式 2-4}$$

計測震度の値に対する震度階級と、震度階級における人や建物の状況を表 2-1 に示す。震度計による観測記録は地表面相当の加速度記録であるため、表 2-1 に示されている人の状況や屋内の状況は、建物の応答が暗黙的に含まれた記述となっている。

また、周期特性を補正する $F_c(f)$ は $f^{0.5} = (\omega/2\pi)^{0.5}$ で割ることになるので、計測震度は加速度波形に対して速度に近い特性を持たせることになる。また式 2-2 のローカットの $F_L(f)$ により、総合的には 0.3Hz (3.33 秒) より低振動数成分 (長周期成分) について、加速度成分を低減する。そのため、気象庁震度は長周期地震動の揺れを適切に評価できないことが指摘されている^{2.4)}。

表 2-1 気象庁震度階級関連解説表

計測震度	震度階	人間	屋内の状況	屋外の状況	鉄筋コンクリート造建物
0.5	0	人は揺れを感じない。	—	—	—
	1	屋内にいる人の一部が、わずかな揺れを感じる。	—	—	—
1.5	2	屋内にいる人の多くが揺れを感じる。眠っている人の一部が、目を覚ます。	電灯などのつり下げ物が、わずかに揺れる。	—	—
2.5	3	屋内にいる人のほとんどが、揺れを感じる。恐怖感を感じる人もいる。	棚にある食器類が、音を立てることがある。	電線が少し揺れる。	—
3.5	4	かなりの恐怖感があり、一部の人は、身の安全を図ろうとする。眠っている人のほとんどが目を覚ます。	つり下げ物は大きく揺れ、棚にある食器類は音を立てる。座りの悪い置物が、倒れることがある。	電線が大きく揺れる。歩いている人も揺れを感じる。自動車を運転していて、揺れに気付く人がいる。	—
4.5	5弱	多くの人が、身の安全を図ろうとする。一部の人は、行動に支障を感じる。	つり下げ物は激しく揺れ、棚にある食器類、書棚の本が落ちることがある。座りの悪い置物の多くが倒れ、家具が移動することがある。	窓ガラスが割れて落ちることがある。電柱が揺れるのがわかる。補強されていないブロック塀が崩れることがある。道路に被害が生じることがある。	耐震性の低い建物では、壁などに亀裂が生じるものがある。
5.0	5強	非常な恐怖を感じる。多くの人が、行動に支障を感じる。	棚にある食器類、書棚の本の多くが落ちる。テレビが台から落ちることがある。タンスなどの重い家具が倒れることがある。変形によりドアが開かなくなることがある。一部の戸が外れる。	補強されていないブロック塀の多くが崩れる。据付けが不十分な自動販売機が倒れることがある。多くの墓石が倒れる。自動車の運転が困難となり、停止する車が多い。	耐震性の低い建物では、壁、梁（はり）、柱などに大きな亀裂が生じるものがある。耐震性の高い建物でも、壁などに亀裂が生じるものがある。
5.5	6弱	立っていることが困難になる。	固定していない重い家具の多くが移動し、転倒する。開かなくなるドアが多い。	かなりの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。	耐震性の低い建物では、壁や柱が破壊するものがある。耐震性の高い建物でも、壁、梁（はり）、柱などに大きな亀裂が生じるものがある。
6.0	6強	立っていることができず、はわないと動くことができない。	固定していない重い家具のほとんどが移動、転倒する。戸が外れて飛ぶことがある。	多くの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。補強されていないブロック塀のほとんどが崩れる。	耐震性の低い建物では、倒壊するものがある。耐震性の高い建物でも壁や柱が破壊するものがある。
6.5	7	揺れにほんろうされ、自分の意志で行動できない。	ほとんどの家具が大きく移動し、飛ぶものもある。	ほとんどの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。補強されているブロック塀も破損するものがある。	耐震性の高い建物でも、傾いたり、大きく破壊するものがある。

気象庁では、震度情報の発表に加えて平成 25 年 3 月より長周期地震動階級をホームページで試行している。長周期地震動階級は、震度計で観測された加速度波形の絶対速度応答スペクトル（ $h=0.05$ ）の最大値から階級分けを行うものであり、1.6 秒から 7.8 秒までを 0.2 秒刻みで計算した絶対速度応答スペクトルの値を用いる。応答スペクトルであるため構造物の応答が固有周期により考慮されている。図 2-2 に長周期地震動階級の算出の概要^{2.5)}を、表 2-2 に絶対速度応答スペクトルの値と長周期地震動階級の関連解説表を示す。

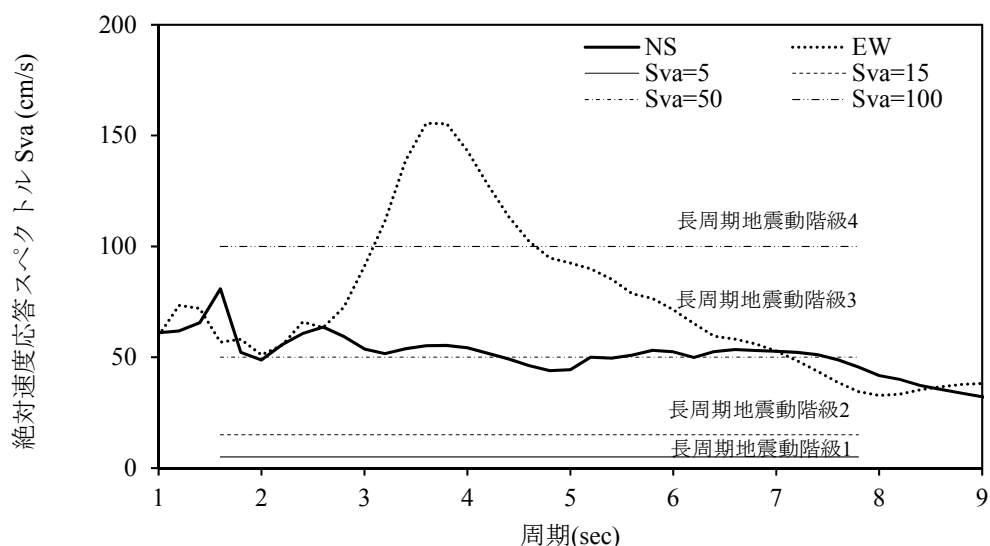


図 2-2 長周期地震動階級の概要

表 2-2 長周期地震動階級関連解説表

Sva [※] (cm/s)	長周期 地震動階級	人の体感・行動	室内の状況	備考
5	1	室内にいたほとんどの人が揺れを感じる。驚く人もいる。	ブラインドなど吊り下げものが大きく揺れる。	—
15	2	室内で大きな揺れを感じ、物に掴まりたいと感じる。物につかまらないうと歩くことが難しいなど、行動に支障を感じる。	キャスター付き什器がわずかに動く。棚にある食器類、書棚の本が落ちることがある。	—
50	3	立っていることが困難になる。	キャスター付き什器が大きく動く。固定していない家具が移動することがあり、不安定なものは倒れることがある。	間仕切壁などにひび割れ・亀裂が入ることがある。
100	4	立っていることができず、はわないと動くことができない。揺れにほんろうされる。	キャスター付き什器が大きく動き、転倒するものがある。固定していない家具の大半が移動し、倒れるものもある。	間仕切壁などにひび割れ・亀裂が多くなる。

※Sva：絶対速度応答スペクトル（減衰定数5%）の値

2.3 建物内震度

気象庁の震度階は地表面で観測された加速度波形による人や建物の応答状態で定義される防災指標である。そのため、例えば1階レベル（地表面相当）で震度5弱の揺れの場合に、建物の上層階の応答増幅により室内の被害状況が震度6弱レベルとなった場合でも、震度の定義としては震度5弱となる。建物の上層階と下層階とで揺れの違いが大きくなるような場合には、被害評価の指標として地表面の震度を用いると、評価精度が落ちると言える。

また、近年、新耐震設計の建築物の占める割合が増え、それに従い大地震時の建物の構造被害も減少してきた。そのため、これまで構造被害に隠れていた非構造部材の被害や、建築設備の被害に注目が集まるようになり、地震時の建物の室内被害評価が求められている。さらに地震に対する事業継続計画BCP（Business Continuity Plan）を策定する場合には、構造被害による建物の継続使用性だけでなく、建物の保有する機能維持に関する被害想定も求められるようになってきた。そこで近年、建物内の震度を防災目的で活用するケースが増えてきている。

気象庁の震度計は設置基準^{2,6)}により設置されるため、地表面相当の観測記録であるが、建物の防災目的で設置される地震計は、地震計のメンテナンスの容易さなどから地下階や最上階となる。そのため建物の振動特性の影響を受けた観測記録が得られることになる。

そこで建物内で観測された地震記録を用いて、気象庁の計測震度の計算と同様の手順を踏んで計測震度を計算し、その特徴の検討を行った。検討に用いた観測記録の建物情報を表2-3に示す。観測記録の年代は建物毎で異なるが、建物A～Dについては概ね2000～2010年までの観測記録であり、建物E・Fは2009年～2013年の観測記録である。

表 2-3 地震観測が行われている建物の概要

	建物A	建物B	建物C
階数	F7・P1	B4・F9・P4	B3・F12・P1
構造	S造/杭基礎	RC造/直接基礎	RC造/直接基礎
軒高	29.4m	29.45m	45m
固有周期(秒)	X=0.78/Y=1.1	X=0.63/Y=0.72	X=1.17/Y=1.35
地震計	加速度計	加速度計	加速度計
設置階	1・6階	B4・9階	B3・P1階
建築地	東京都区内	大阪市内	名古屋市内

	建物D	建物E	建物F
階数	B2・F20・P1	B4・23F・P1	B2・F32・P1
構造	S造/杭基礎	S造/直接基礎	S造/杭基礎
軒高	77.3m	99m	125.45m
固有周期(秒)	X=1.91/Y=2.04	X,Y=2.5	X=3.31/Y=3.43
地震計	加速度計	速度計	速度計
設置階	B2・7・13・19階	B4・16・P1階	B2・15・31階
建築地	東京都区内	東京都区内	大阪市内

式 2-1 より計測震度はフィルタ処理された加速度の常用対数で示されるため、例えば建物上層階での加速度 $a_{0,i}$ が、最下階の加速度 $a_{0,b}$ のスカラー倍 (α) で評価できる場合には、上層階の計測震度 I_i と最下階の I_b との差分は定数項で評価できる。

$$\Delta I = I_i - I_b = 2(\log(a_{0,i}) - \log(a_{0,b})) = 2\log(a_{0,i}/a_{0,b}) = 2\log(\alpha \cdot a_{0,b}/a_{0,b}) = 2\log(\alpha) \quad \text{式 2-5}$$

そこで建物内で観測された地震波形の分析として、建物最下階で観測された記録の最大値と上層階で観測された記録の最大値との相関を検討した。図 2-3 は水平 2 方向の加速度の最大値を建物の X 方向、Y 方向についてまとめたもので、図 2-4 は同様の処理を速度の最大値についてまとめた。また図 2-5 は 3 成分の加速度記録により計測震度（相当値）を計算したものである。それぞれ横軸に最下階の値をとり、縦軸に上層階の値をとっている。建物 D、E、F については中間階にも地震計が設置してあるため、それぞれの階で同様の処理を行った。考察のため、最大加速度、最大速度については上層階の応答値が最下階のスカラー倍として回帰した場合の回帰式とその決定係数を、計測震度については最下階の計測震度の増分として回帰した場合の回帰式を併記した。

最大加速度の応答倍率についてみると、中低層建物の建物 A～C では上層階加速度の応答倍率のばらつきが大きく、高層建物である建物 D～E ではばらつきが小さく、回帰式の決定係数の値も高い。また構造種別でみると RC 造の建物 B・C ではばらつきが大きい。一方、最大速度の応答倍率についてみると、応答倍率のばらつきは小さくなり、建物 B・C でも回帰式の決定係数が 0.6～0.7 程度に向上している。計測震度についてみると、応答増分のばらつきも小さく、回帰式の決定係数も 0.80～0.98 となった。計測震度の処理では加速度記録の 3 成分を用いるが、フィルタ処理などにより加速度波形が均されるため、加速度や速度の応答倍率よりもばらつきの小さい傾向がある。

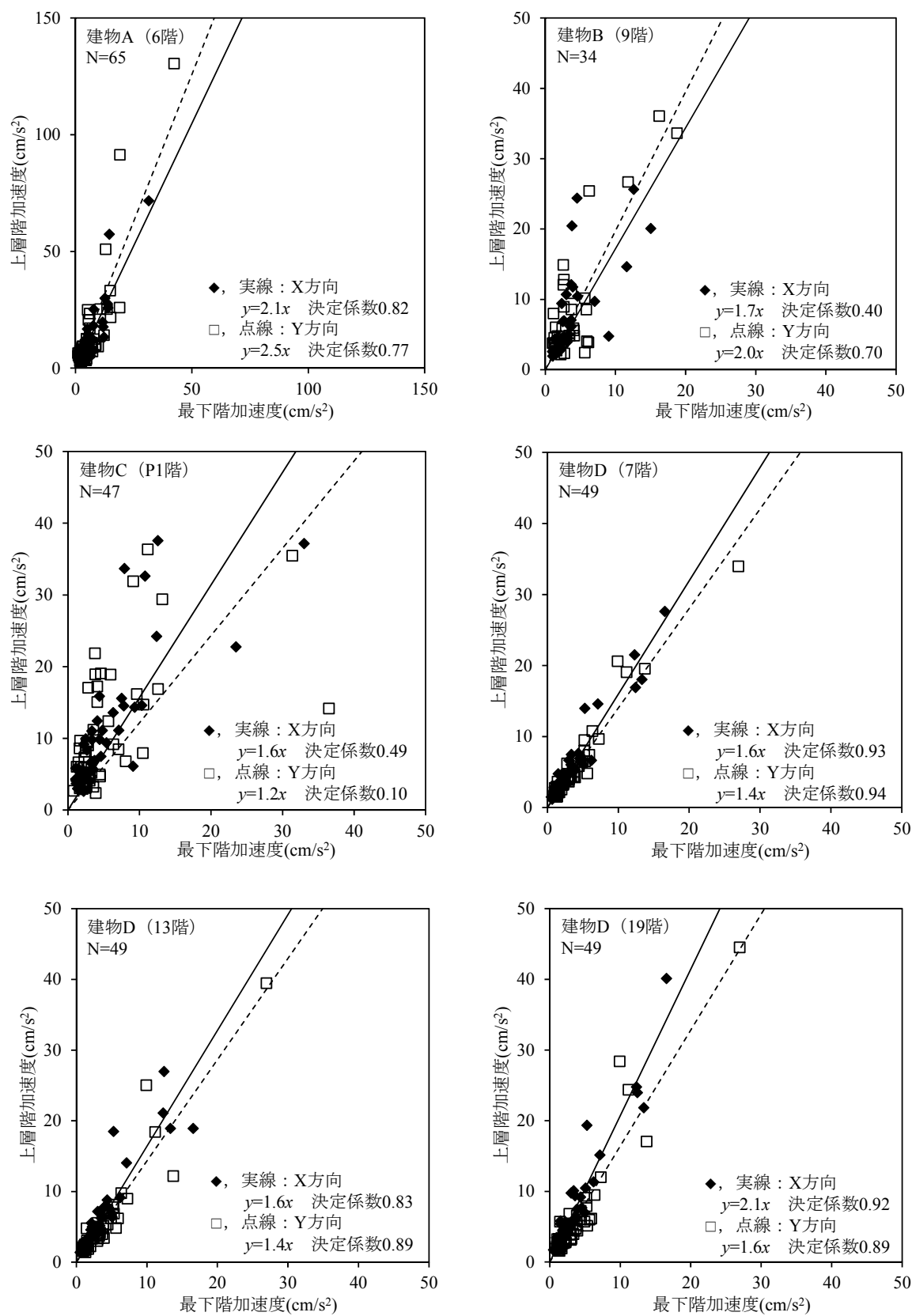


図 2-3 最下階と上層階の最大加速度の相関
(建物 A～D)

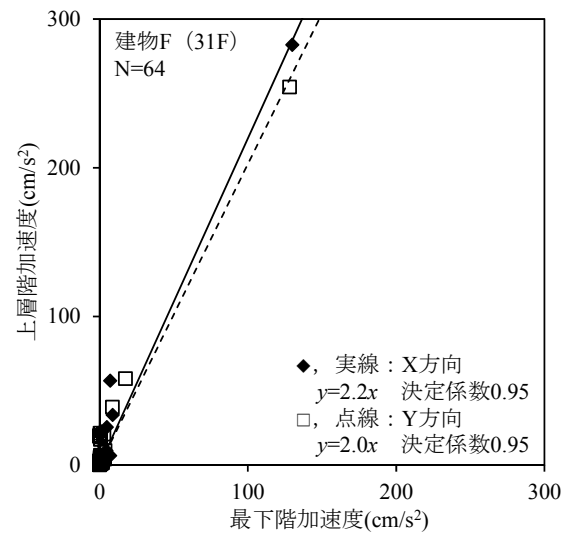
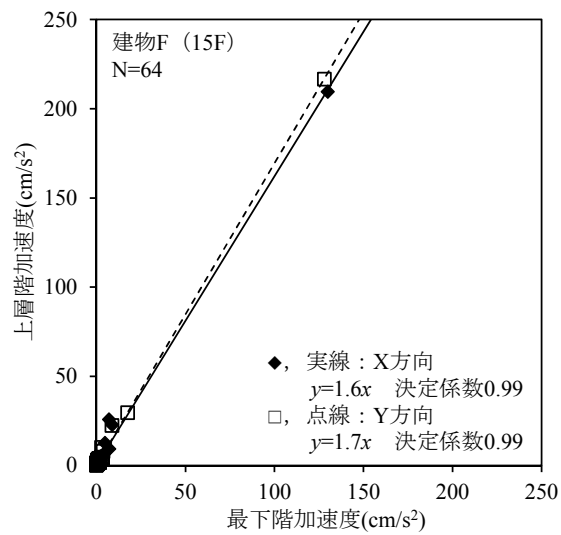
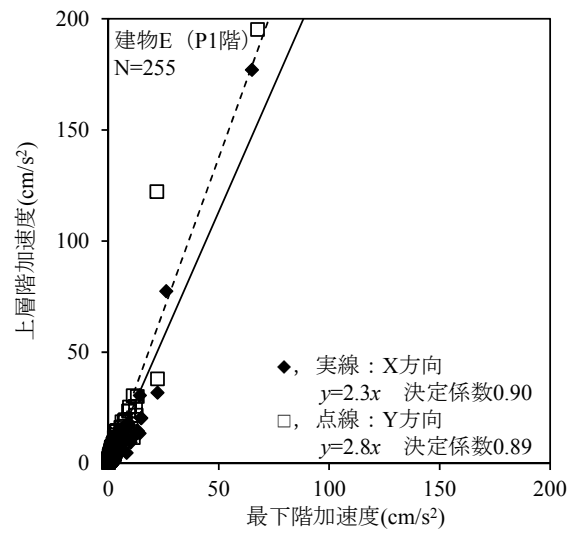
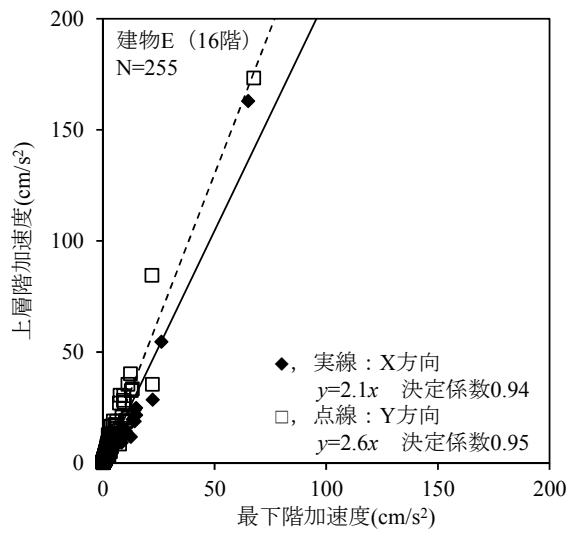


図 2-3 最下階と上層階の最大加速度の相関
(建物 E~F)

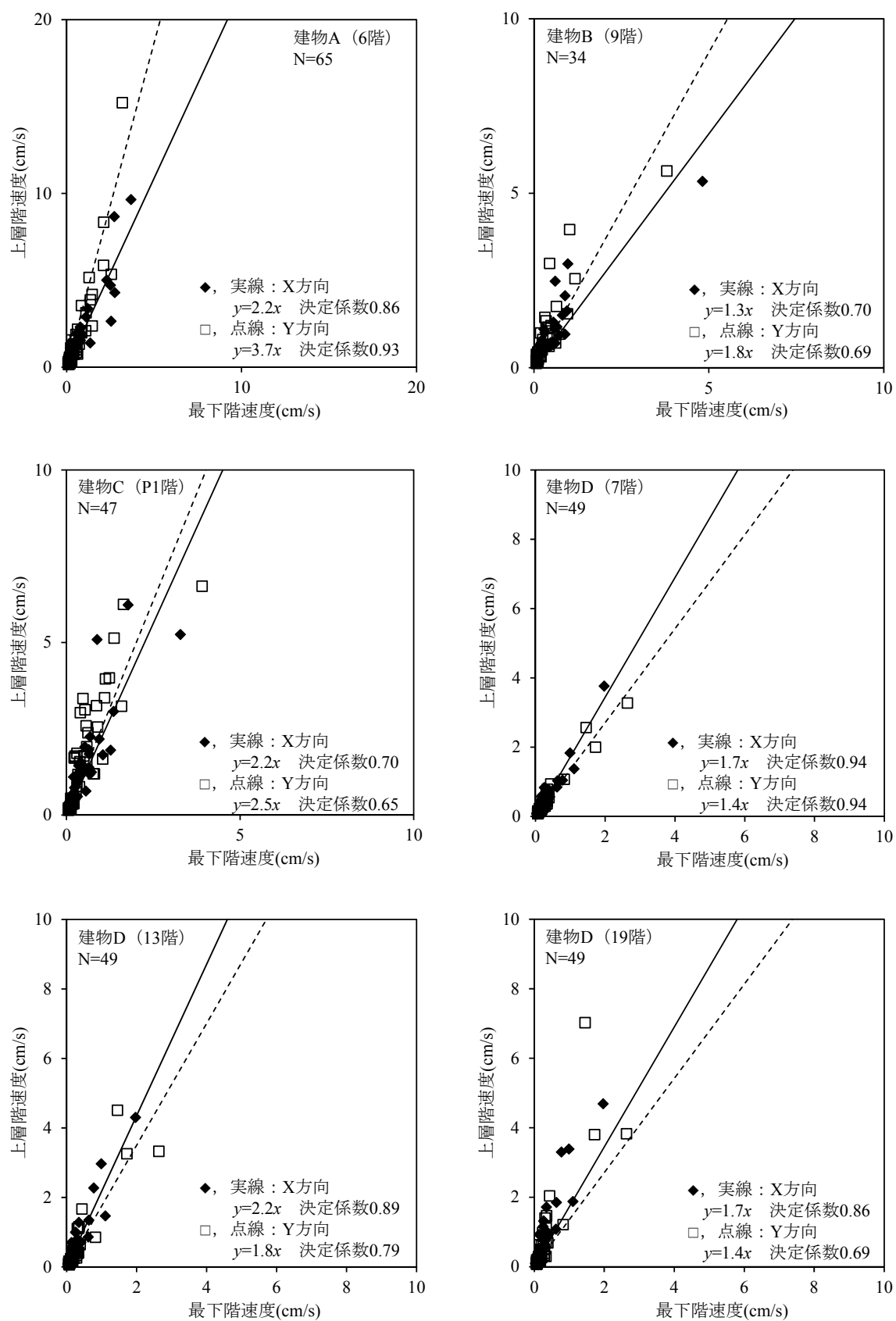


図 2-4 最下階と上層階の最大速度の相関
(建物 A～D)

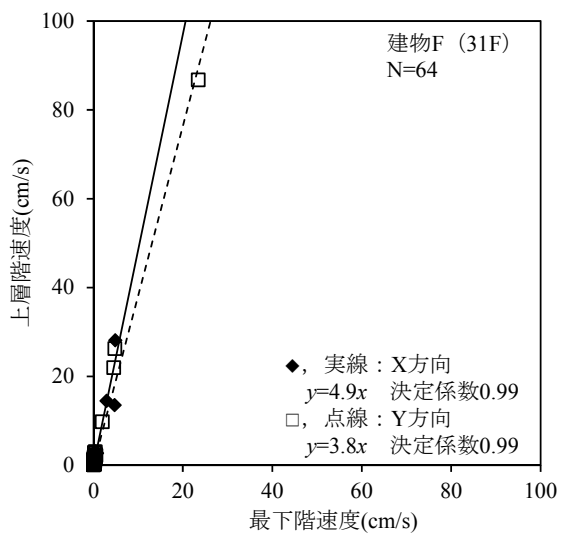
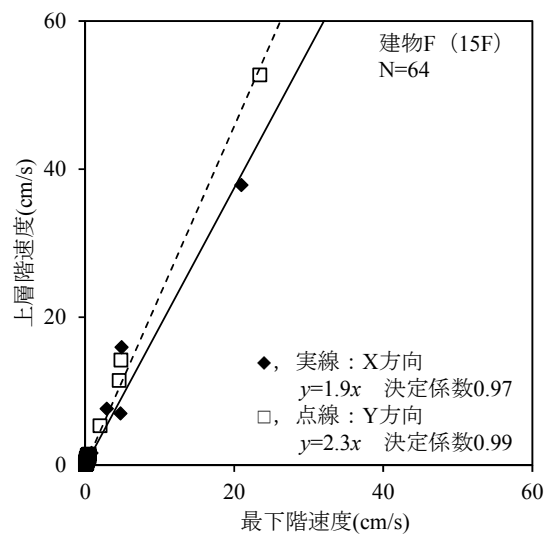
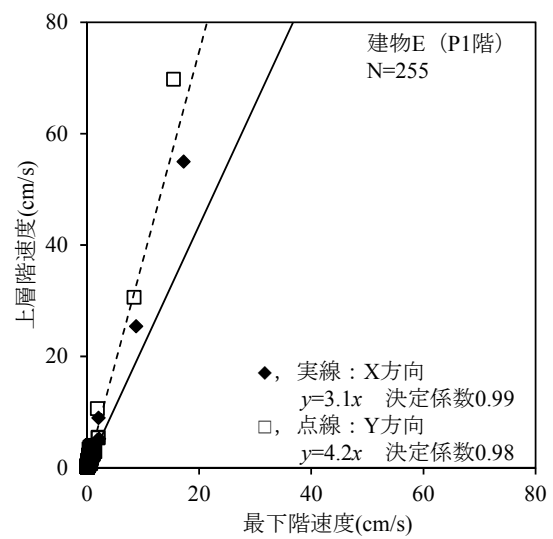
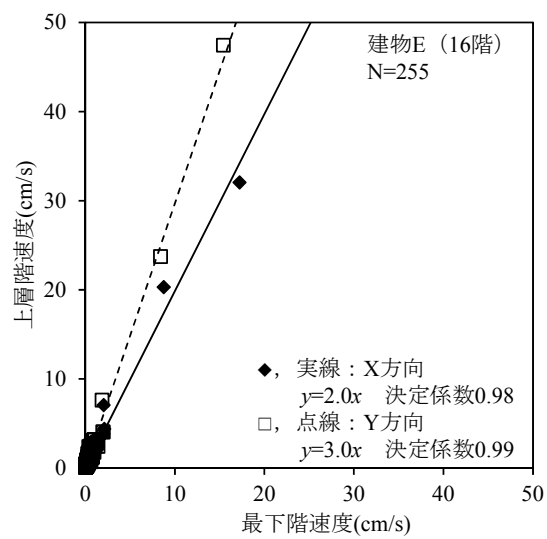


図 2-4 最下階と上層階の最大速度の相関
(建物 E~F)

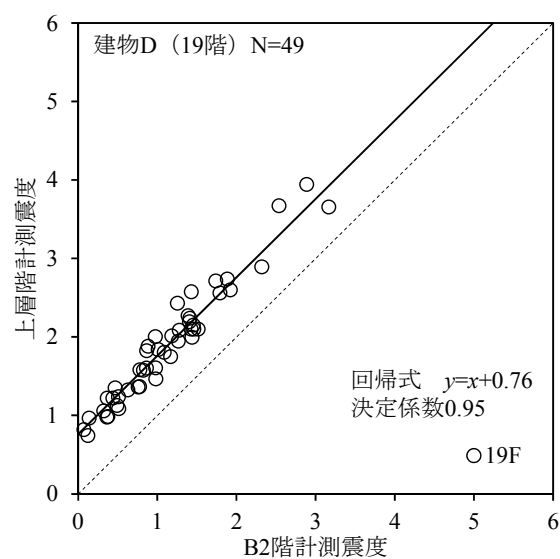
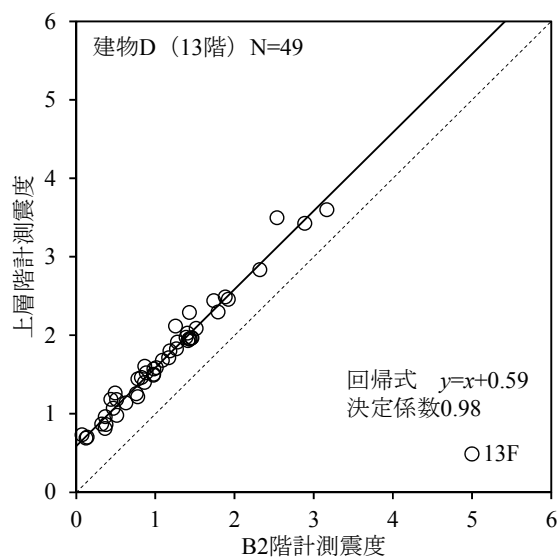
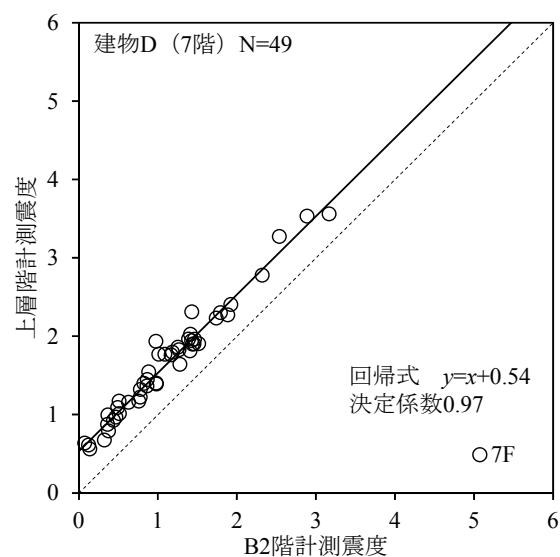
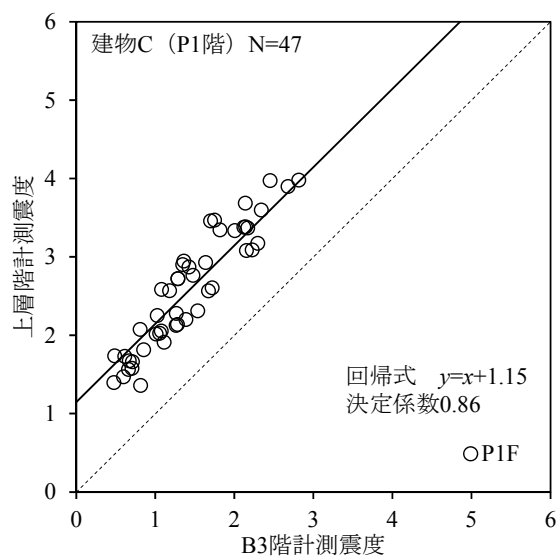
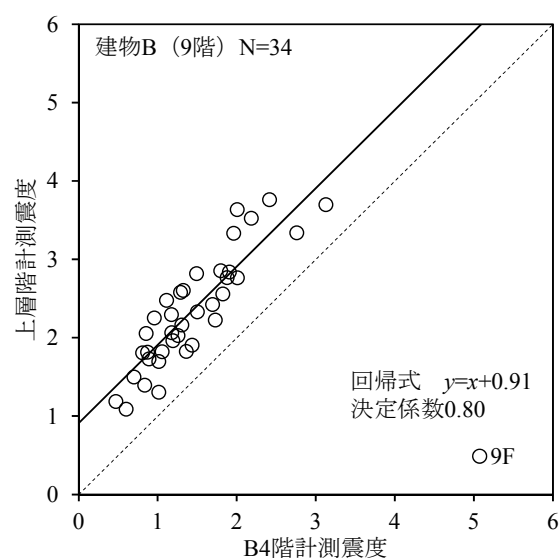
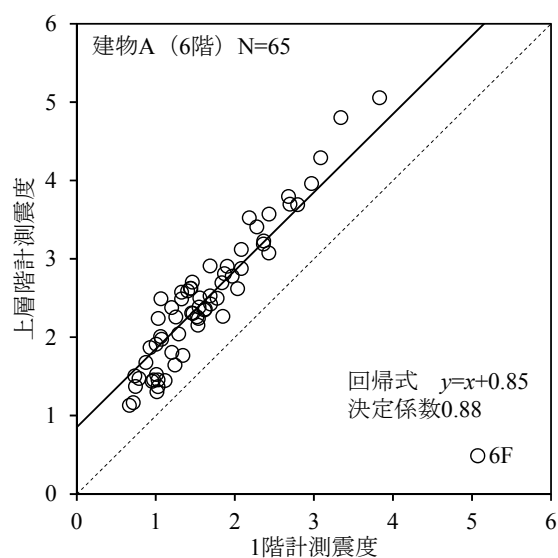


図 2-5 最下階と上層階の計測震度 (相当値) の相関
(建物 A~D)

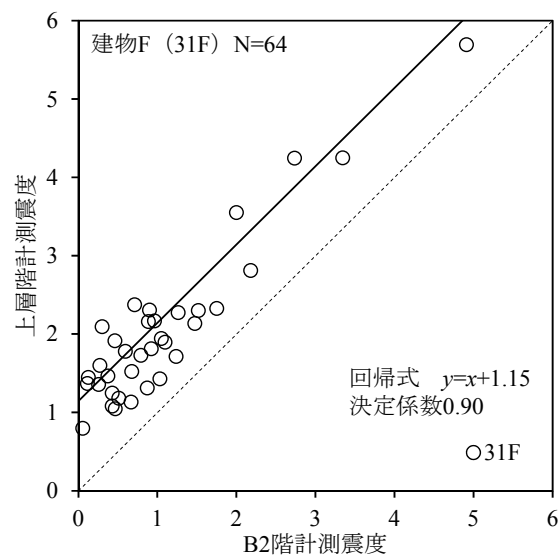
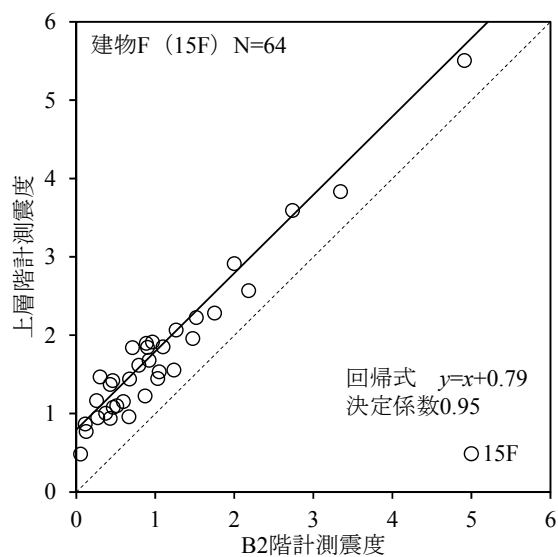
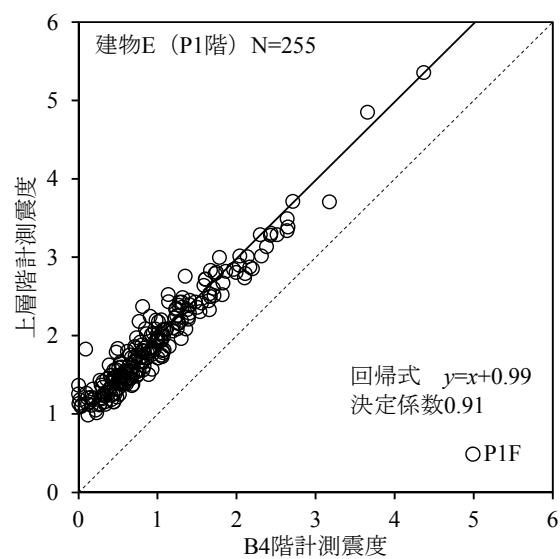
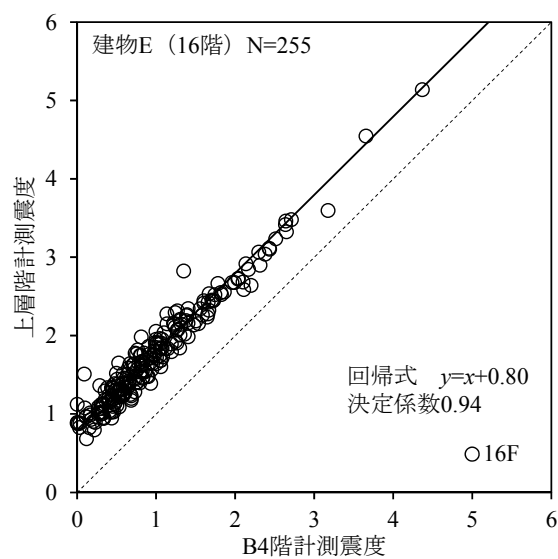


図 2-5 最下階と上層階の計測震度（相当値）の相関
(建物 E～F)

一般的な想定地震に対する簡易な被害評価では、地震外力を翠川らの最大速度の距離減衰式^{2.7)}により求め、計測震度 I については地表面最大速度 PGV (cm/sec) と I の回帰式^{2.8)}から設定している。

$$I = 2.68 + 1.72 \log PGV \quad (I = 4 \sim 7, \sigma = 0.21) \quad \text{式 2-6}$$

翠川らは式 2-6 の他にも、観測記録の最大加速度値 PGA (cm/sec²) や PGV から計測震度の回帰式^{2.6)}による評価を行っている。

$$I = 0.14 + 2.07 \log PGA \quad (I = 0 \sim 7, \sigma = 0.30) \quad \text{式 2-7}$$

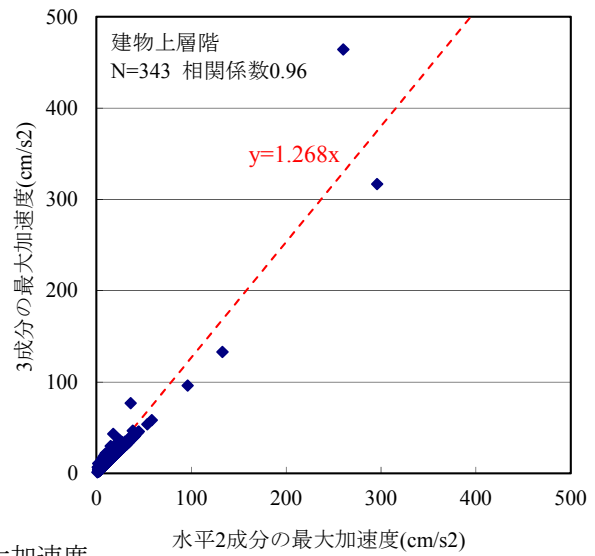
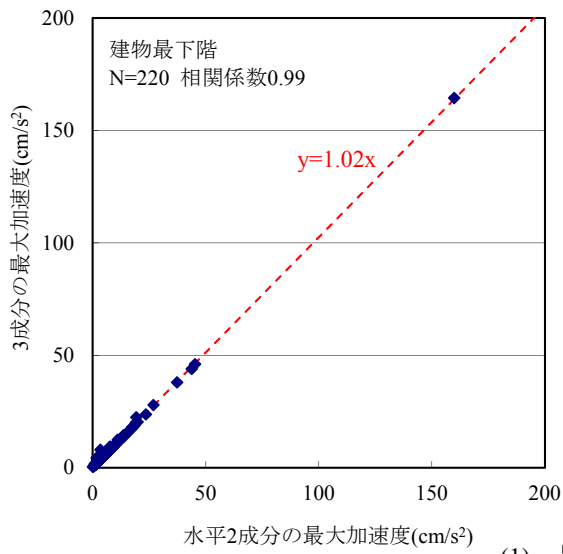
$$I = 2.54 + 1.82 \log PGV \quad (I = 0 \sim 7, \sigma = 0.19) \quad \text{式 2-8}$$

$$I = 1.38 + 1.00 \log(PGA \cdot PGV) \quad (I = 0 \sim 7, \sigma = 0.15) \quad \text{式 2-9}$$

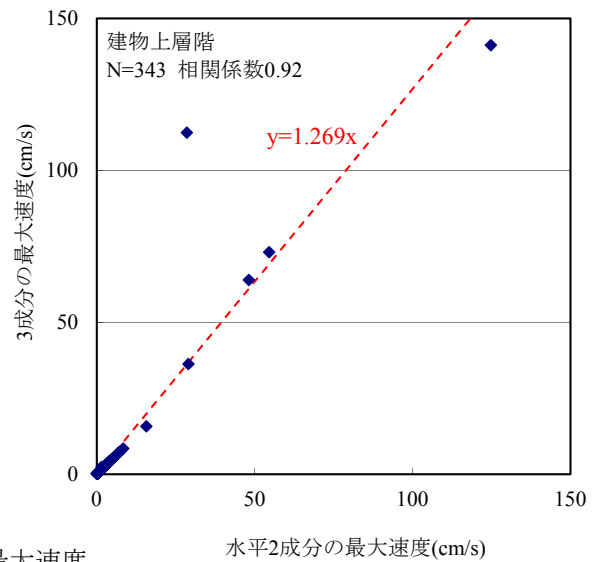
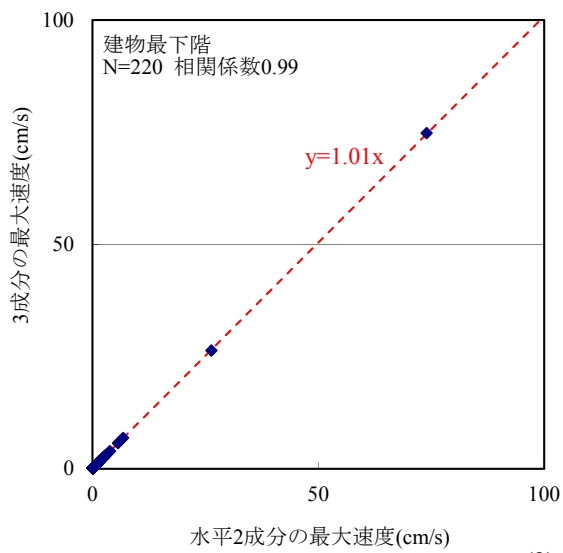
式 2-6～式 2-9 の検討では気象台等で観測された加速度記録・速度記録が用いられており、基本的には建物の振動の影響が含まれていない。また計測震度に及ぼす上下動成分の影響は一般に小さいとして、 PGA や PGV は水平 2 成分を合成した最大値で検討されている。そこで建物内での観測記録に関して、上下動成分の有無の影響や式 2-7～式 2-9 との整合性を検討した。

まず上下動の影響を評価するために、建物内の観測記録から、計測震度、最大加速度、最大速度を水平方向 2 成分から求めた場合と 3 成分から求めた場合との比較を行った。検討結果を図 2-6 に示す。それぞれ横軸が水平 2 成分から求めた値で、縦軸が 3 成分から求めた場合である。図中にはそれぞれ線形の回帰式を示した。最下階の記録では上下動成分の影響は小さいが、上層階の記録では上下動の有無による差異が大きい観測記録があった。これらは建物 C～F の高層建物で、上下方向が増幅して伝播したケースであった。分析に用いた観測記録数が少ないものの、計測震度が 4.0 以上測記録の水平 2 成分により求めた計測震度の場合には上下動の有無による差異は小さい。建物の機能にとって何らかの影響が発生する計測震度が 4.0 以上の場合には水平 2 成分で計測震度を評価できると考えられる。

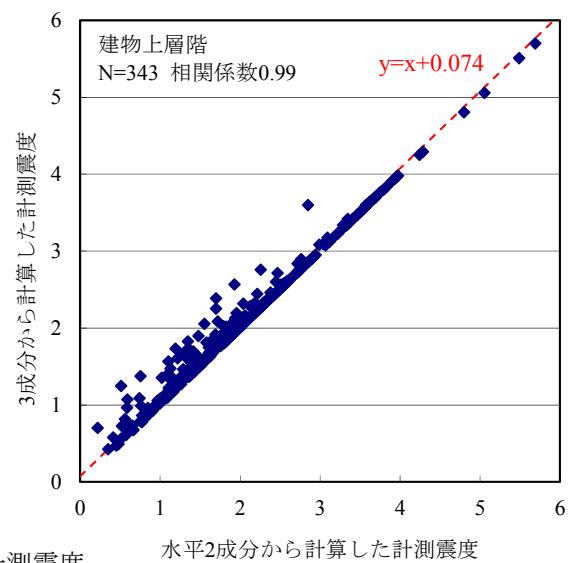
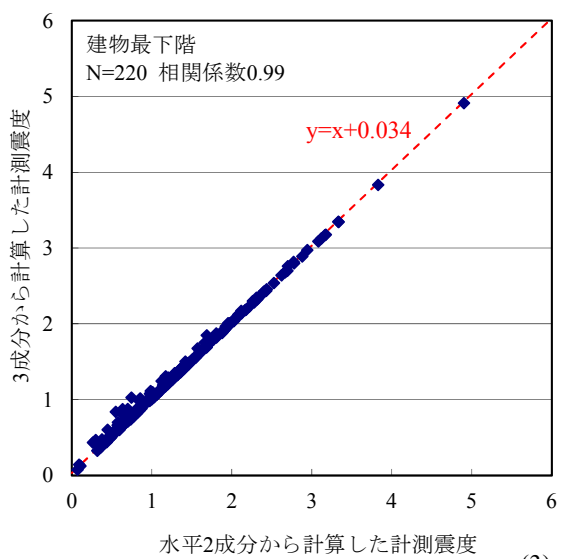
次に水平 2 成分から求めた PGA , PGV について、式 2-7～式 2-9 の適用性を検討した結果を図 2-7 に示す。式 2-7～式 2-9 での分析と同様に標準偏差は式 2-9 がもっとも小さい。ただし標準偏差は上層階で 0.16、最下階で 0.26 となった。回帰分析で用いられたデータ数の違いもあり、建物内での観測記録のばらつきはやや大きくなっているが、概ね建物内の観測記録でも既存の研究で提案されている回帰式が適用できると考えられる。



(1) 最大加速度

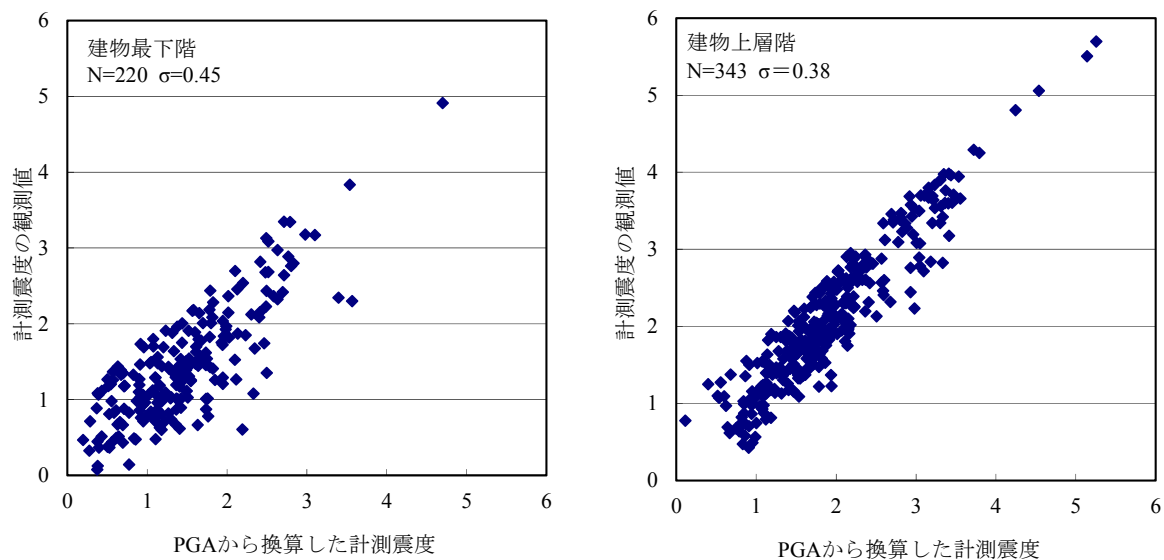


(2) 最大速度

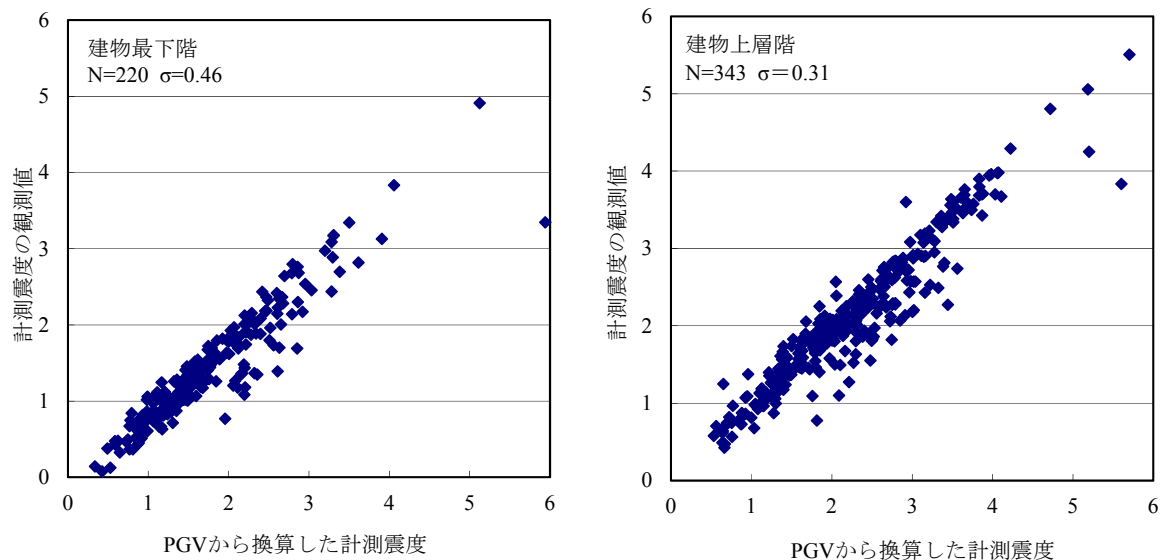


(3) 計測震度

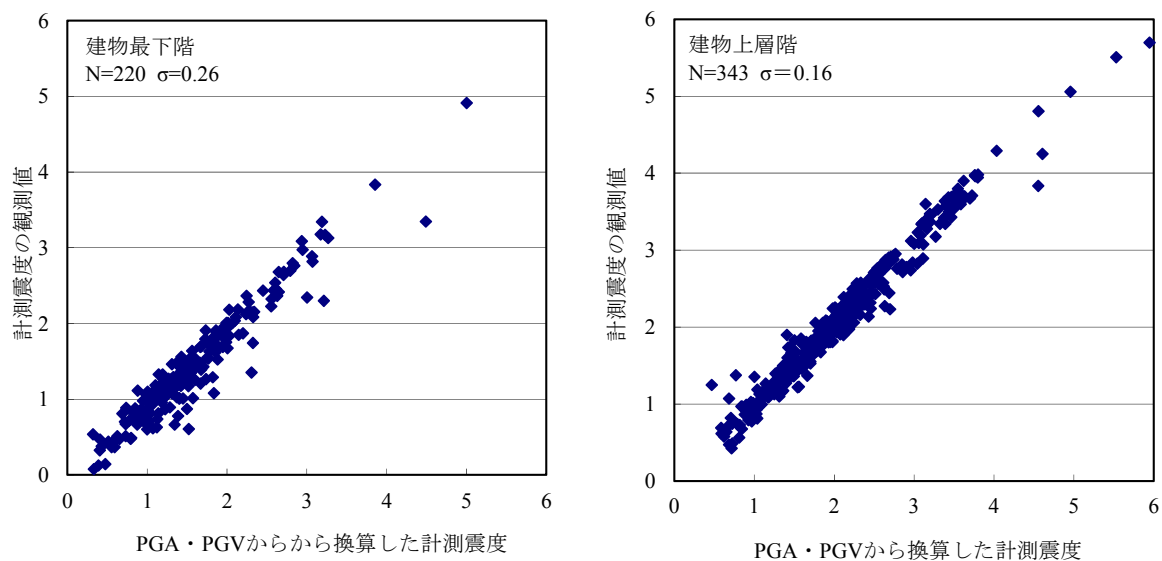
図 2-6 最下階の観測記録による水平2成分と3成分による比較



(1) 最大加速度と計測震度の相関



(2) 最大速度と計測震度の相関



(3) 最大加速度・最大速度と計測震度の相関

図 2-7 観測記録の PGA, PGV から換算した計測震度と計測震度の観測値の比較

2.4 緊急地震速報の高度利用による室内被害の軽減

2007 年より提供が開始された気象庁の緊急地震速報はテレビ放送や携帯電話でも配信されるようになり、強い揺れの来る前に警報を発報するシステムとして広く認知されている。緊急地震速報は、気象庁の地震観測網で検知した観測記録の情報から推定される地震の震源情報（震源位置、マグニチュード）の速報値から、最大速度を求める距離減衰式を基に計測震度を予測し、所定の震度階を超える揺れが予測される地域に警報を速報するものである。

緊急地震速報には一般利用者向けと高度利用者向けがあり、一般利用者向けは日本全国を約 200 箇所に区分した領域単位で発報され、どこか 1 つの領域で震度 6 弱以上が予測された場合に発報される。一方、高度利用者向けはマグニチュード 3.5 以上が予測された全ての地震に対して震源情報が配信される。高度利用者向けでは受信した震源情報をもとに、検討地点ごとに震度予測を行うシステムである。そのため高度利用者向けは予測する震度の大きさを利用者で設定したり、表層地盤の揺れ易さに検討地点の情報を反映する等、より細かい震度予測が可能となる。テレビ放送や携帯電話で配信される緊急地震速報は一般利用者向けを用いており、個々の建物の安全確保で用いられる緊急地震速報は高度利用者向けを用いることが多い。

気象庁の緊急地震速報では以下の手順により地表面の計測震度 I を求めている。

$$\log PGV_{600} = 0.58M_w + 0.0038d - 1.29 - \log(x + 0.0028 \times 10^{0.58M_w}) - 0.002x \quad \text{式 2-10}$$

$$PGV = ARV_i \times PGV_{600} \times 0.9 \quad \text{式 2-11}$$

PGV_{600} は震度を予測する対象地点において S 波の伝播速度が 600m/s に相当する硬質地盤上における地震動の最大速度振幅 (cm/s) で、 PGV は地表面最大速度である。

ここで $M_w = M - 0.171$

$x = s - L/2$ ただし $\log L = 0.5M_w - 1.85$ s は予想の対象とする地点から震源までの距離 (km)

d : 震源深さ (km) M : 気象庁マグニチュード ARV_i : 表層地盤増幅率

式 2-10 は司・翠川による距離減衰式^{2,7)}の震源距離に断層面の広がり考慮したものであり^{2,9)}, ARV_i は気象庁から全国を 1km メッシュ単位で公開されている値を用いる。式 2-10～式 2-11 により求められた PGV を式 2-6 に代入して計測震度 I が求められる。したがって気象庁の緊急地震速報による震度予測の適用範囲は、基本的に式 2-10 の適用範囲、および式 2-6 の適用範囲に準拠する。また、2.2 で述べたように、計測震度は地震動の 2 秒以上の長周期成分にフィルターをかける低減処理を行っているため、長周期地震動の揺れを適切に評価してない。そのため、緊急地震速報でも長周期地震動は予測できない。

緊急地震速報は、強い揺れの到着する前に警報を発するシステムであるため、緊急地震速報を導入しても建物の耐震性が向上する訳ではない。しかし、建物内居住者に対して地震に対する安全確保を喚起したり、エレベータを揺れの前に停止させてエレベータ内の閉じ込めを図るなどの安全確保作業ができる。すなわち建物内で発生する室内被害を軽減させることに有効利用できると考えられる。ところが緊急地震速報は、地表面での揺れの予測を行ない、震度階の大きさにより警報を発報するため、建物の応答は考慮されていない。そのため緊急地震速報を建物での減災システムとして活用する場合、例えば超高層建物の居住者は、上層階であろうと下層階であろうと、緊急地震速報による同じ震度の予測情報を受けて対応することになる。また緊急地震速報で

は長周期地震動の揺れを評価していないため、上層階の居住者にとってはさらに揺れを過小評価している可能性がある。

そこで、緊急地震速報を建物での減災システムとしてより有効に活用するために、緊急地震速報により上層階での揺れを予測する機能と長周期地震動レベルを予測する機能とを検討した。

2.4.1 建物内震度の予測機能

2.3 では、建物内での地震観測記録の分析により、上層階の計測震度の値は下層階の計測震度の値の増分で評価できることを示した。例えば建物最下階での計測震度を緊急地震速報により予測すると考えれば、建物上層階での安全確保のために緊急地震速報を用いる場合には、下層階に対する震度増分を足し合わせて評価すればよい。

建物の最下層の計測震度に対する上層階での増分を求めるためには、建物内で地震観測記録がある場合には観測記録から回帰式を作成することが考えられる。観測期間中に震度 5 弱以上の大地震の記録が観測されることは多くはないため、小地震の記録による回帰式で大地震時を適切に評価することができるか？という懸念はあるが、基本的に増分で抑えられるため従来の緊急地震速報システムよりは安全側に抑えられると考えられる。

観測記録が無く、また建物の振動モデルも無い場合の概略設定方法として、建物 A～F の全観測記録を用いて、計測震度の増分を求めた結果を図 2-8 に示す。増分は 0.90 となり、上層階震度の予測値の標準偏差は 0.28 であった。最下階に対する計測震度の増分を 0.90 とした場合、震度階級では概ね 1 つ上がることとなる。図 2-8 は建物毎の振動特性による違いを考慮せずに回帰したものであり、実際には建物の振動特性によるその適用範囲があると考えられる。今回、整理を行った観測建物の高さは 30～125m、固有周期は 0.6 秒～3.5 秒の範囲であり、概ね中低層から高層までの建物で適用できると考えられる。ただし計測震度の計算で用いられる振動数領域でのフィルター^{2,3)}は 0.1 秒より短周期側、2.0 秒より長周期側での振動成分が低減される形状をしており、低減される周期帯に固有周期をもった建物の観測データは少ないため、それらの周期帯での観測記録による追加検証が必要である。

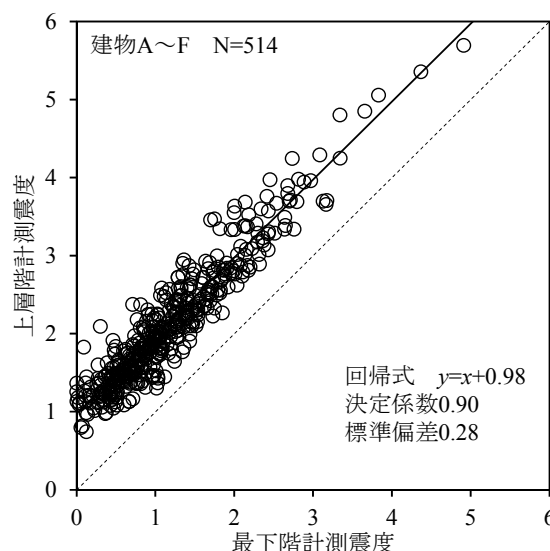


図 2-8 建物 A～F の全観測記録を用いた場合の最下階と上層階との計測震度の相関

地震観測記録が無い場合に上層階の計測震度の増分を予測するためには、計測震度と建物応答量との相関が求まれば、建物の振動モデルを用いた応答量の予測から、計測震度の増分の定式化が可能になる。田村ら^{2.10)}は高層建物の簡易応答評価式を多質点系の応答解析モデルの地震応答解析結果から、入力地震動の最大加速度 A と最大速度 V の比 A/V と建物階数 N をパラメータに作成している。山田ら^{2.11)}は地震動が建築物荷重指針^{2.12)} (93 年版) の地表面での加速度応答スペクトルで評価できるとした場合に、建物の等価 1 質点系にモデルから建物内での加速度増幅、速度増幅を求め、式 2-9 から建物内の震度増分を算定している。

入力地震動の応答スペクトルが与えられた場合に建物の床応答スペクトルを求める方法として、入力地震動のパワースペクトル密度関数を推定して確率論的手法から床応答スペクトルを求める方法^{2.13)}や、パワースペクトルからモード応答により床応答スペクトルを求める方法^{2.14)}がある。ここでは山田らの推定手法を参考に、建物内での計測震度を推定するために、最大加速度と最大速度による計測震度の回帰式 (式 2-9) を用いて検討を行うため、床応答スペクトルを求める方法は用いていない。

建物の最下階での値を I_b , A_b , V_b , 上層階での値を I_i , A_i , V_i とすれば、式 2-9 より建物での増分は式 2-12 となる。

$$\Delta I = I_i - I_b = \log_{10}(A_i \cdot V_i) - \log_{10}(A_b \cdot V_b) = \log_{10}(A_i/A_b) + \log(V_i/V_b) \quad \text{式 2-12}$$

最下階での入力加速度 A_b が荷重指針 (93 年版) での加速度応答スペクトル S_a で評価できると考え、 A_i , V_i を j 次の刺激係数 β_j , 固有モード ϕ_{ij} , 固有周期 T_j , モード減衰 h_j , 円振動数 ω_j により式 2-13 および式 2-14 で近似する。

$$A_i \cong A_{ij} = \sum_{j=1}^n \beta_j \phi_{ij} S_a(T_j, h_j) \quad \text{式 2-13}$$

$$V_i \cong V_{ij} = \sum_{j=1}^n \beta_j \phi_{ij} S_a(T_j, h_j) / \omega_j \quad \text{式 2-14}$$

$$S_a = \begin{cases} (1+3T/T_c)F_h \cdot PGA & (T < 0.5T_c) \\ 2.5F_h \cdot PGA & (0.5T_c < T < T_c) \\ 2.5(T_c/T)F_h \cdot PGA & (T > T_c) \end{cases} \quad F_h = 1.5/(1+10h) \quad T_c = 0.8 \times 2\pi PGV/PGA \quad \text{式 2-15}$$

式 2-15 で $PGA = A_b$, $PGV = V_b$ とし、 $S_a = f(T) \cdot A_b$ とおけば、

$$\Delta I = \log\left(\sum_{i=1}^n \beta_j \phi_{ij} f(T)\right) + \log\left(\sum_{i=1}^n \beta_j \phi_{ij} f(T) / \omega_j \cdot A_b / V_b\right) \quad \text{式 2-16}$$

2.3 の検討で用いた建物での最下階における観測記録から加速度応答スペクトルを計算し、応答加速度を最大加速度 A_b で、周期を等価卓越周期 $T_e = 2\pi V_b/A_b$ で正規化して、荷重指針 (93 年版) の加速度応答スペクトル S_a と比較した結果の一例を図 2-9 に示す。図中の黒太線は正規化した加速度応答スペクトルを周期毎に算術平均したもので、点線は式 2-15 による応答スペクトルである。全体として算術平均したスペクトル特性は式 2-15 の傾向に整合しており、建物の最下階で観測さ

れた地震動も概ね式 2-15 で評価できると考えられる。

そこで、式 2-15 を建物に入力される平均的な加速度応答スペクトルの分布と仮定し、建物の 1 次モードが建物内震度の増分の主要モードと考え ($n=1$)、1 次モードに対して V_b/A_b の値を 0.1～1.0 で変動させた場合の ΔI の算出例を図 2-10 に示す。水平 2 方向について A_i 、 V_i を式 2-9 から求め、自乗和平方根から上層階の応答値を設定して ΔI を求めた。入力地震動の卓越周期を $0.8 \times 2\pi V_b/A_b$ で評価すると、図 2-10 の値はそれぞれの建物の固有周期付近となる V_b/A_b 比で最大値をとっている。

図 2-11 は建物 E と F に対して、図 2-5 に示した上層階と下層階の計測震度の相関の図に、式 2-16 による予測式を追記したものである。予測式は 1 次～3 次モードまでを足し合わせて増分を評価した。予測式は回帰式よりも大きめに評価しており、安全側の評価を行っている。図 2-11 の予測式と回帰式による震度増分の差について、同じ建物の上層階と中間階とで比較をすると、建物 E および建物 F とともに、上層階では震度増分の差が大きく、中間階では震度増分の差が少ない傾向がある。上層階の予測式では一次モードの影響が大きいため、長周期成分が卓越した地震の場合とそうでない場合とで観測値による回帰式との差異が出たと考えられる。

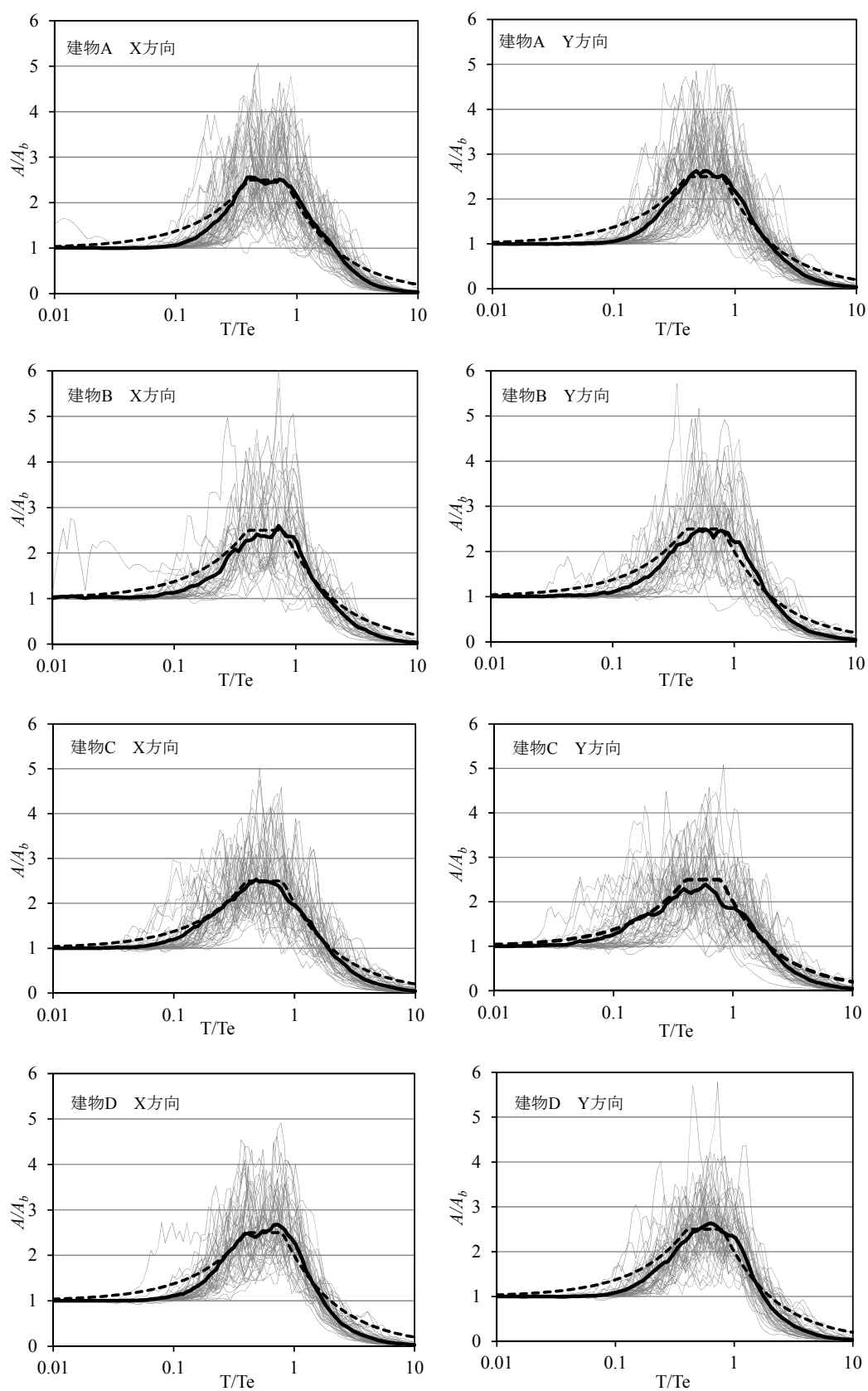


図 2-9 正規化した加速度応答スペクトルの例 ($h=0.05$)

(黒太線：観測記録の平均，点線：荷重指針)

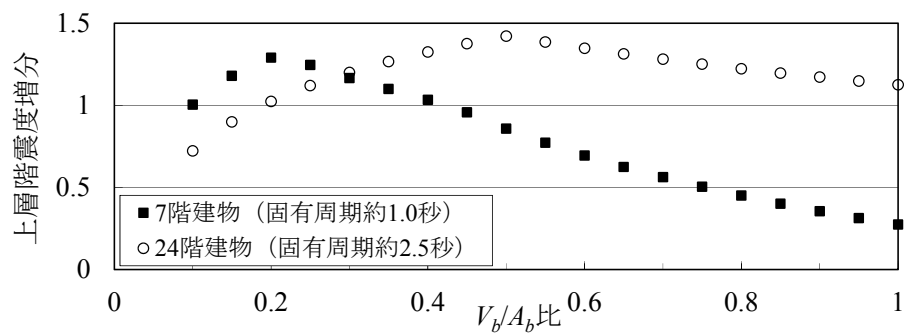


図 2-10 震度増分の計算結果 ($h=0.02$)

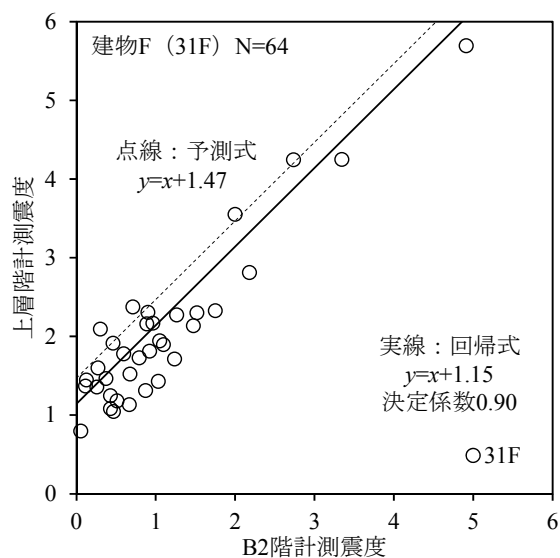
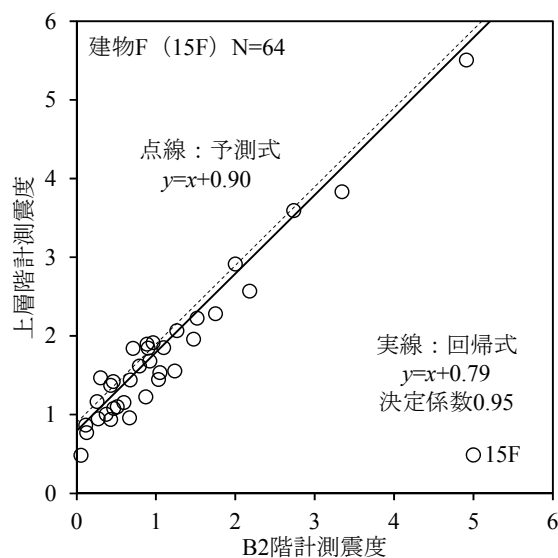
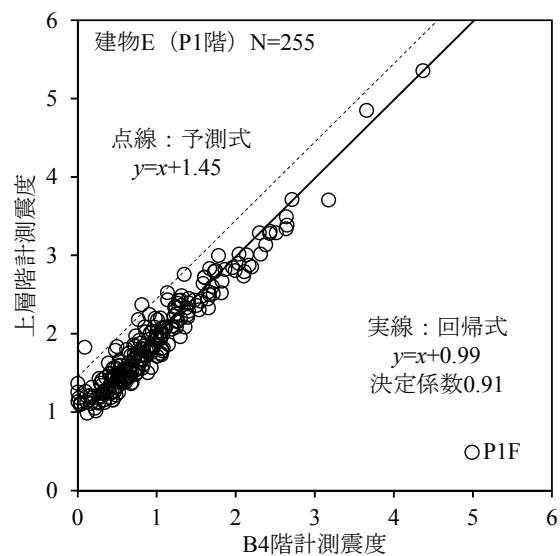
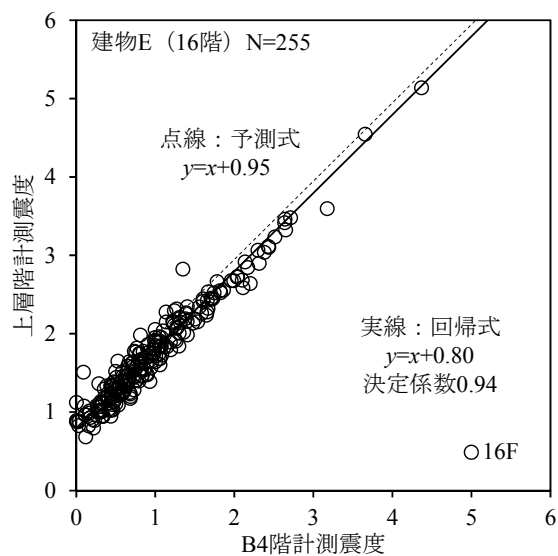


図 2-11 震度増分の予測式と観測記録・回帰式との比較

2.4.2 長周期地震動レベルの予測機能

長周期地震動を構成する波の特性として、震央に近い地域は実体波が優勢になること、震央から離れるにつれて表面波が優勢になることがある。すなわち、

- ・ 震央から遠くない地域は実体波が優勢 → 実体波の減衰は震源距離に依存
- ・ 震央から離れるにつれて表面波が優勢 → 表面波の減衰は震央距離に依存

これは長周期地震動の幾何減衰は前者では 3 次元的に、後者では 2 次元となることを示している。小林は長周期地震動の距離減衰式の構築を目的として、震央からの距離に応じて幾何減衰が変わる特性を考慮するために、見かけの入射角 θ を距離減衰式に導入した^{2.15)}。図 2-12 に長周期地震動の伝播特性の概念図と見かけの入射角の定義を示す。

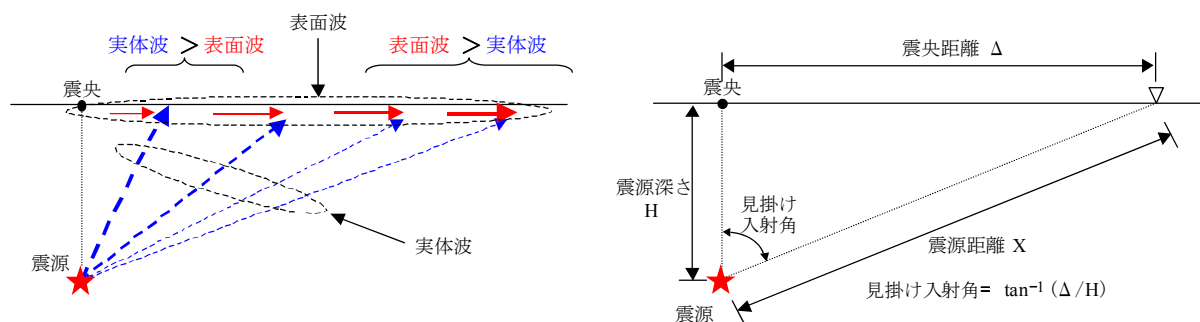


図 2-12 長周期地震動の伝播特性の概念図と見かけの入射角

小林は大阪平野、関東平野および勇払平野（苫小牧）で観測されたデータ^{2.16), 2.17)} ($M_j \geq 5.0$ かつ見かけの入射角 $\geq 60^\circ$ 以上、1994 年～2005 年に観測) に適用し、次式を提案した。

$$\theta = \tan^{-1}(\Delta/H) \quad \text{式 2-17}$$

$$\log R_{PV} = 1.06M_j - 6.21 - (0.67 \log X + 0.00096X) + \log(0.085(\theta - 68)^2 + 20) \quad \text{式 2-18}$$

ここで $\theta < 68^\circ$ のとき $\theta = 68^\circ$

M_j は気象庁マグニチュード、 X は震源距離(km)、 Δ は震央距離(km)、 H は震源深さ(km)であり、右辺第 1 項及び第 2 項は震源特性、第 3 項は幾何減衰特性、第 4 項は伝播経路特性、第 5 項は地盤特性を表している。 R_{PV} は距離減衰式で回帰する長周期地震動の振幅であり、堆積層の 1 次固有周期付近の擬似速度応答値($h=0.05$)の平均値である。 R_{PV} は、例えば関東平野では 7～9 秒、大阪平野では 5～6 秒を中心とする 2 秒区間での擬似速度応答スペクトルの平均値である。実際には長周期地震動の卓越周期は堆積層の 1 次固有周期付近で多少変動するため、式 2-18 の検討で R_{PV} を算出する際には個々の観測記録で卓越周期を読み取り、それを中心とする 2 秒区間において擬似速度応答スペクトルの平均値を算出した。図 2-13 に R_{PV} の大阪平野での評価例を示す。

小林らは、式 2-18 の震源距離 X の項にも見かけの入射角 θ を考慮することにより、長周期地震動の伝播特性を表現する距離パラメータ D を導入した改良式を提案^{2.18)}している。

$$\log R_{PV} = 1.05M_j - 0.5 \log D - 0.0018D + \log(0.044(\theta - 65)^2 + 20) - 6.38 \quad \text{式 2-19}$$

$$\theta < 65^\circ \text{ のときは } \theta = 65^\circ \quad D = (\Delta^2 + (\alpha H)^2)^{1/2} \quad \alpha = 1.0 - \theta/65^\circ (\theta \leq 65^\circ), \alpha = 0 (\theta > 65^\circ)$$

式 2-19 では $\theta = 0^\circ$ の直下から伝播する場合の D は震源距離とし、見かけの入射角 θ の増大とともに D が震央距離に推移していくように設定している。式 2-19 の回帰係数の設定では、式 2-18 の検討で用いた地震記録に加え、震源距離が 1000km を超える 2003 年十勝沖地震における大阪平野での観測記録や、1997 年～2007 年に発生したマグニチュード 6.4 以上の地震の観測記録を追加して行った。式 2-18 と式 2-19 による R_{PV} の予測結果を図 2-14 に示す。

図 2-14 は横軸に観測記録の擬似速度応答スペクトルから求めた R_{PV} の値を、縦軸に地震の震源諸元から式 2-18 と式 2-19 で求めた R_{PV} の値を示したものである。 R_{PV} の値は大阪平野、関東平野および勇払平野での観測記録で計算しているため、それぞれの平野における長周期地震動の卓越周期は違うが、一つの予測式で評価できることが判る。また図 2-14 の(1)と(2)を比較すると標準偏差は同程度であり、データ数の多い式 2-19 の予測誤差が小さくなっていることが解る。

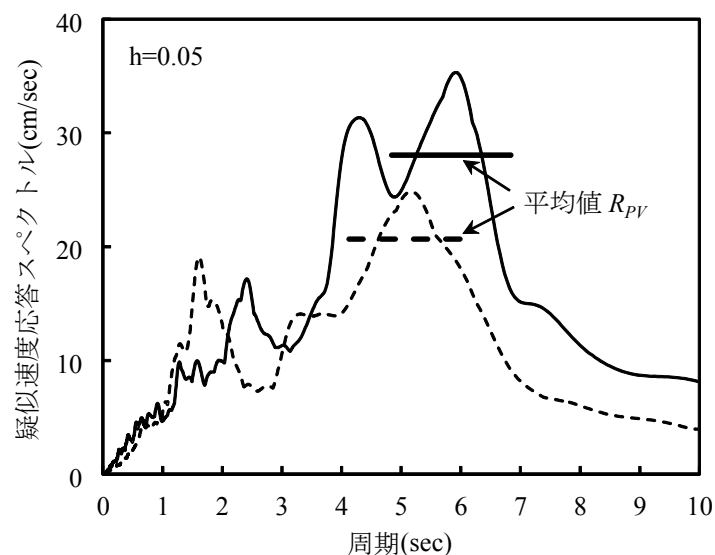


図 2-13 擬似速度応答スペクトル値 R_{PV} の評価

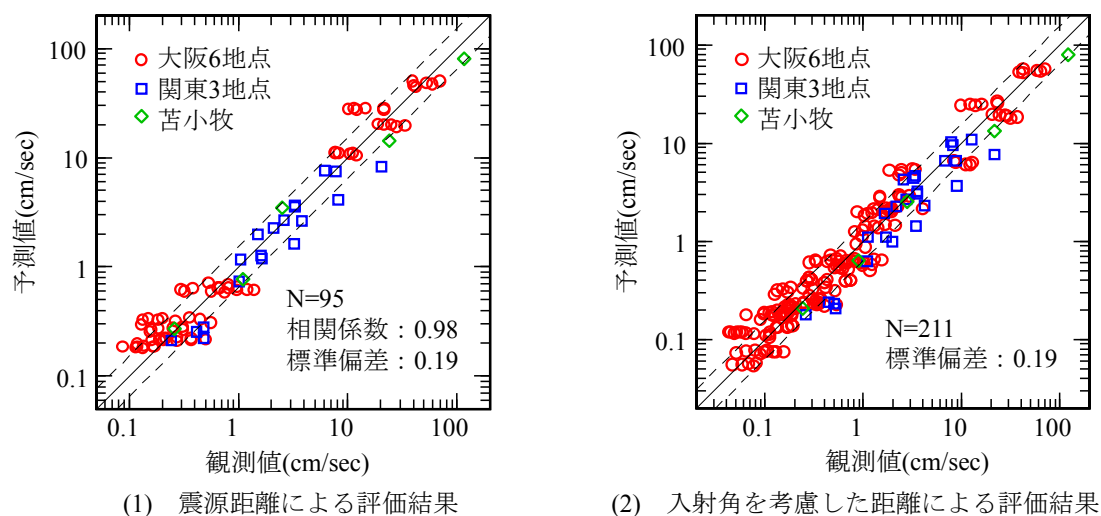


図 2-14 擬似速度応答スペクトル値 R_{PV} の評価結果

式 2-19により緊急地震速報から長周期地震動による擬似速度応答レベル R_{PV} が予測できるので、 R_{PV} から構造物側の応答が予測できれば、緊急地震速報から長周期地震動に対する安全確保処理が可能となる。そこで式 2-19 を導出した際の観測地震動を用いた 1 質点系の応答解析結果より、構造物の応答予測を設定した。大阪平野での観測記録を用いた結果を図 2-15～図 2-16 に、関東平野での観測記録を用いた結果を図 2-17～図 2-18 に示す。図の横軸は観測地震動における R_{PV} の値で、縦軸は固有周期毎で算出した最大応答加速度、最大応答変位である。ここで減衰は 2%で計算した。応答予測を行う構造物は長周期構造物を想定して、固有周期は 2 秒～10 秒（大阪平野の場合は 2 秒～7 秒）とした。 R_{PV} の値から応答を予測する長周期構造物としては、高層建物の応答やエレベーターロープ等の長尺物の応答が考えられる。図 2-15～図 2-18 の結果を参考に、緊急地震速報で制御の対象とする構造物の周期を設定すれば、 R_{PV} の値をもとに緊急地震速報による安全確保処理等が可能となる。ただし、長周期構造物の応答予測は各平野での観測記録を用いているため、関東平野、大阪平野以外の地域で検討する場合には、改めて検討地点での観測記録を用いた応答計算を行い、図 2-15～図 2-18 の相当の図を作成する必要がある。また同じ沖積平野内でも長周期地震動の卓越周期のばらつきがあるため、より精度のよい長周期地震動レベルの評価を行うためには、検討対象での観測記録をもとに式 2-19 の見直しを行うことが考えられる。

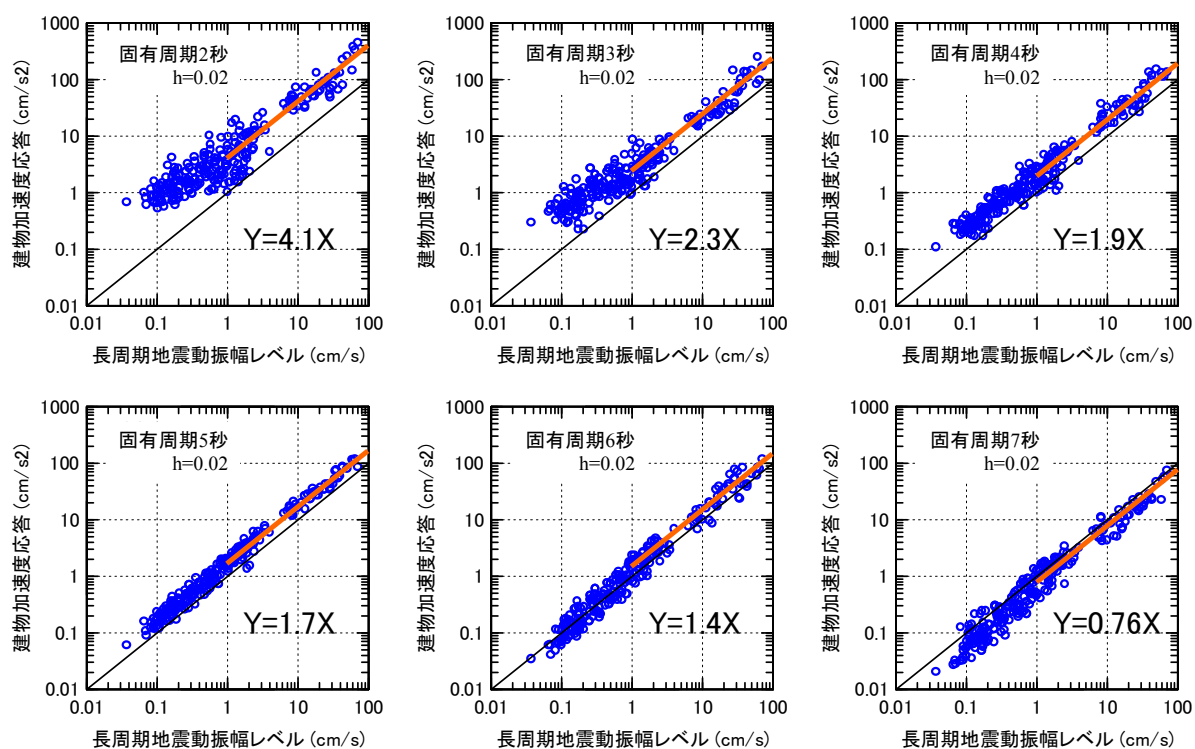


図 2-15 擬似速度応答スペクトル値 R_{PV} と最大応答加速度の相関 (大阪平野)

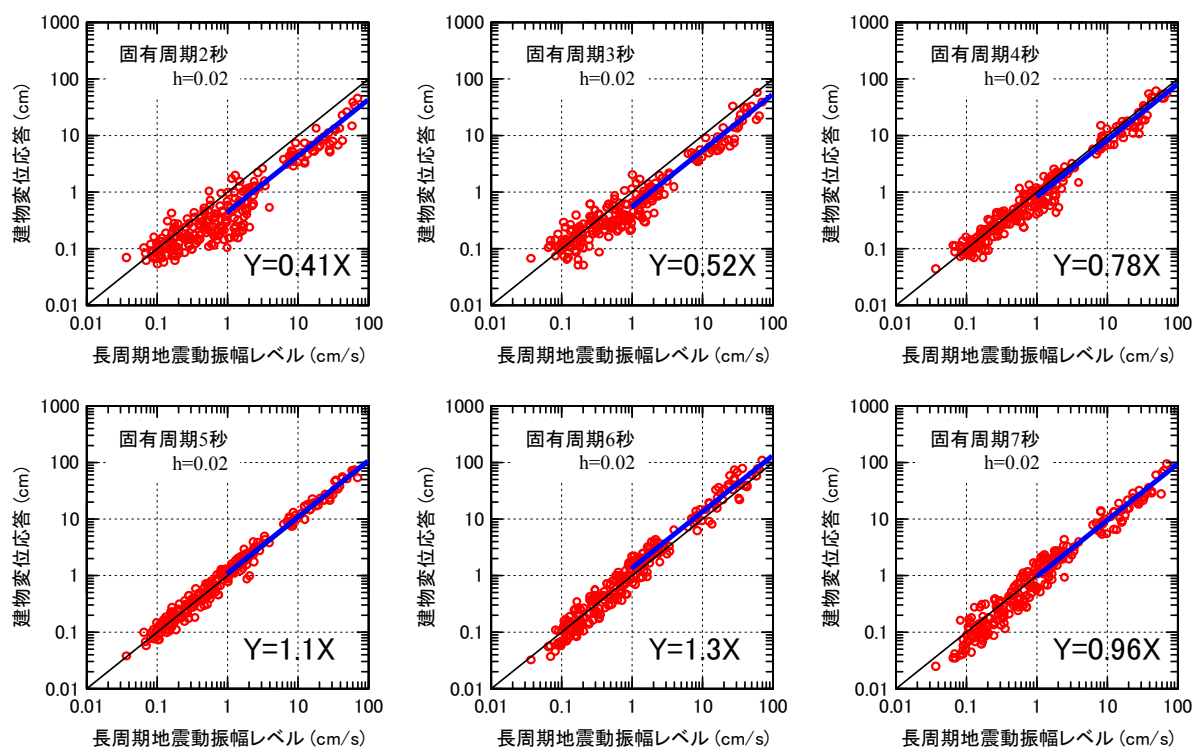


図 2-16 擬似速度応答スペクトル値 R_{PV} と最大応答変位の相関 (大阪平野)

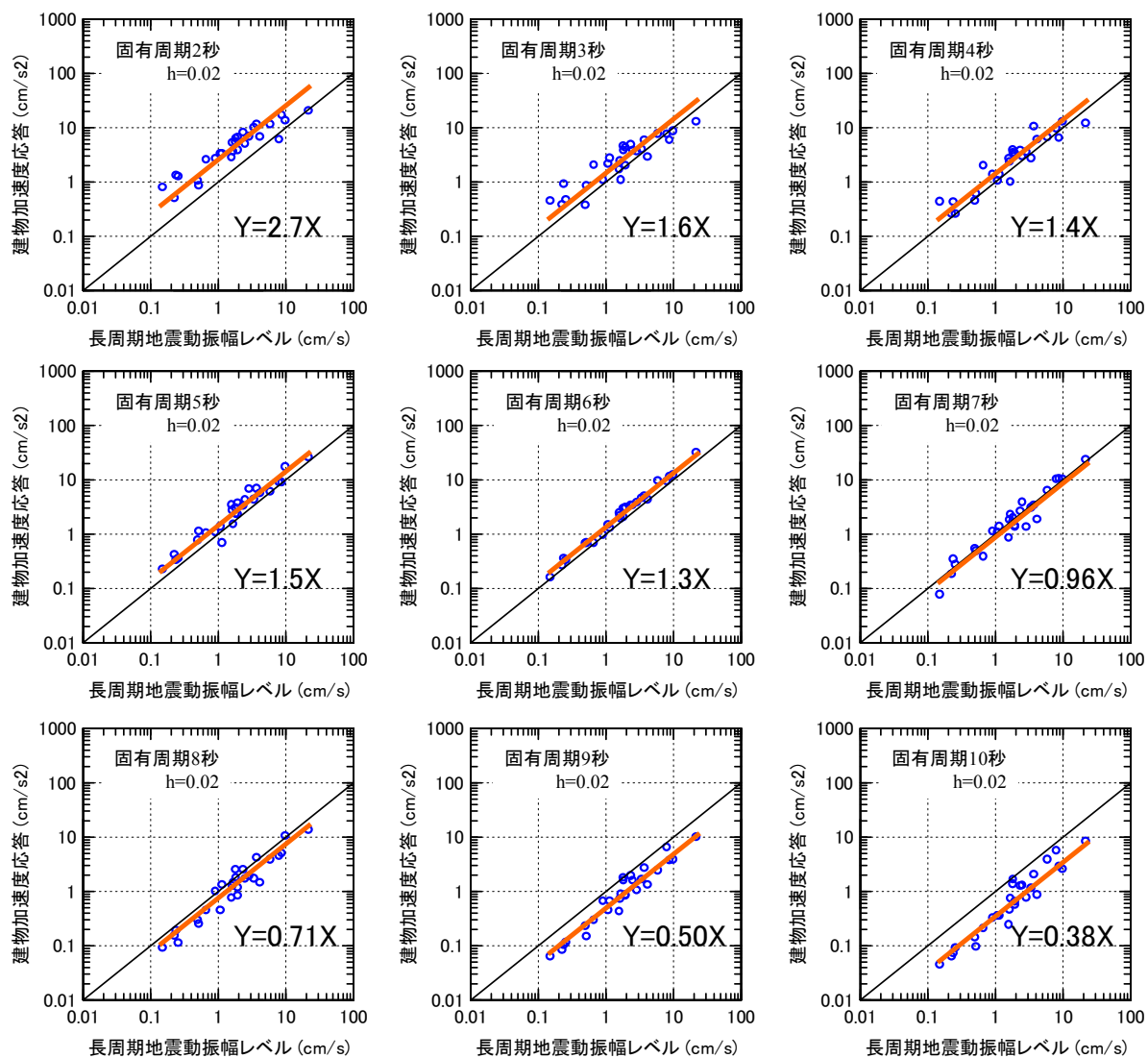


図 2-17 擬似速度応答スペクトル値 R_{PV} と最大応答加速度の相関 (関東平野)

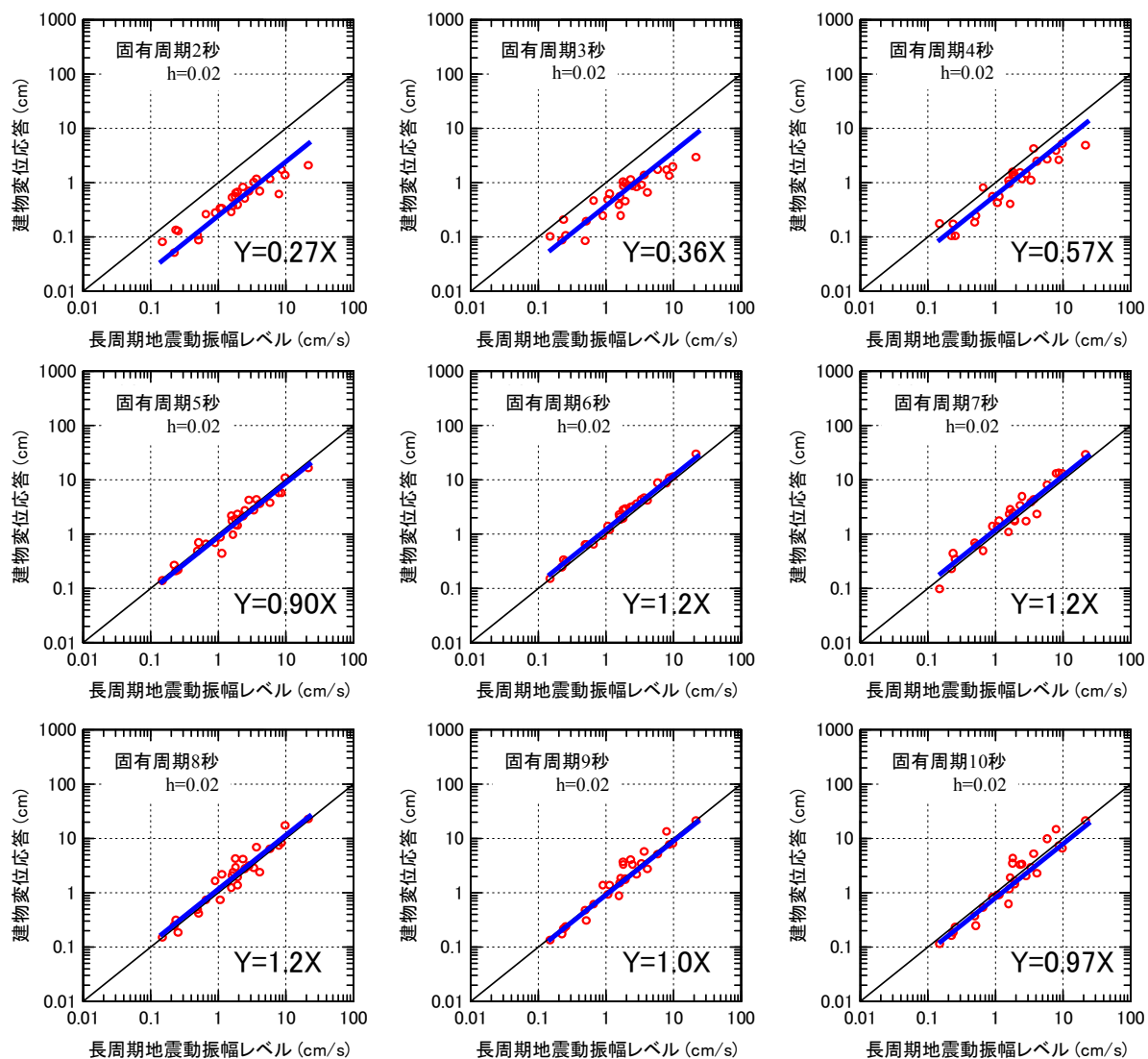


図 2-18 擬似速度応答スペクトル値 R_{PV} と最大応答変位の相関 (関東平野)

2.4.3 超高層建物向け緊急地震速報システムの開発

緊急地震速報を建物での減災システムとしてより有効に活用するための取り組みとして、対象建物周辺での観測記録の分析から地盤伝播特性を考慮した震度推定を高精度化した事例^{2.19)}や、建物外の前線地震観測網による観測記録と緊急地震速報を連動させた事例^{2.20)}がある。また、事前に解析的に評価した長周期地震動の到達時間と建物最大応答を用いて緊急地震速報の震源情報から長周期地震動に対するエレベータ制御を行う事例^{2.21)}、建物最下階に設置した地震計で検知した初期微動情報と緊急地震速報を併用して主要動を予測する事例^{2.22)}などが報告されている。

ここでは 2.4.1 で述べた上層階での揺れを予測する機能と、2.4.2 で述べた長周期地震動レベルを予測する機能を用いて、超高層建物向けの緊急地震速報システムを開発^{2.18)}し、運用してきた事例^{2.23)}を報告する。開発システムの技術概要を述べるとともに、これまでの地震観測記録の分析をもとに、開発システムの特徴について報告する。

(1) システムの概要

開発システムで安全確保処理を行う場合のフローを図 2-19 に示す。緊急地震速報の震源情報（マグニチュード、震源位置）から算出する震度予測に加えて、①建物内での揺れの増幅を考慮した建物内震度予測、および長周期地震動成分予測による②建物応答予測、③エレベータロープ等の長尺物応答予測を行う。それぞれの予測値がしきい値を超える場合に、館内一斉放送やエレベータの最寄り階停止措置などの安全確保処理を行う。また、建物内に設置した地震計の観測記録のリアルタイム処理により、緊急地震速報による予測値が過小評価した場合でも建築設備の制御信号を出すように設計した。

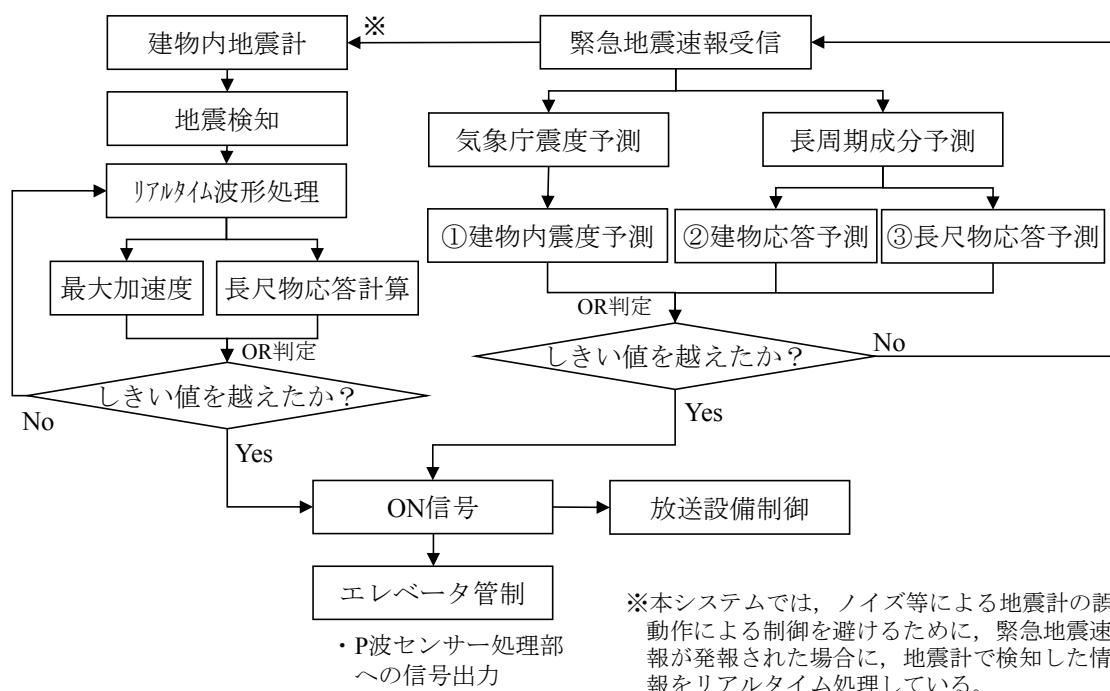


図 2-19 開発システムの処理フロー

建物内に地震計は最上階～中間階～最下階の 3 か所に設置し、それぞれの地震計で観測された最大値がしきい値を超えた場合、または最下階の記録を用いた 1 質点系の線形応答解析による応答結果がしきい値を超えた場合に、制御信号を出力する。1 質点系の線形応答解析の固有周期は、システムを導入する建物の 1 次固有周期、およびエレベータロープ等の長尺物の 1 次固有周期を設定する。また、本システムではノイズ等による地震計の誤動作による制御を避けるために、緊急地震速報が発報された場合に地震計で検知した記録を、地震記録として前述のリアルタイム処理を行うこととした。

緊急地震速報による安全管理は、館内一斉放送とエレベータの地震時管制運転とした。館内一斉放送の文言は次の 3 パターンとした。

- ・パターン A

「地震発生，地震発生。身の安全を確保して下さい。」

- ・パターン B

「地震発生，地震発生。強い揺れが来ます。身の安全を確保して下さい。」

- ・パターン C

「地震が発生しました。安全確認のためエレベータの運転を停止しております。運転が再開されるまでお待ちください。」

緊急地震速報は P 波と S 波の到達時間の差を利用して強い揺れが来る前に警報を鳴らすシステムであるため、強い揺れである S 波が到達するまでの時間をカウントダウンすることができる。そこで S 波の到達まで 20 秒以上の余裕時間がある場合にはパターン B のアナウンスを、20 秒未満の場合にはパターン A をアナウンスすることとした。またパターン C は、震度は小さくても長尺物の揺れが大きく予測されて安全確保処理を行う場合を想定しており、建物の揺れに関する情報は前面に出さない内容とした。

エレベータの地震時管制運転は、エレベータの P 波センサーの処理部分に緊急地震速報による制御信号入力することとした。これは緊急地震速報による安全確保処理が、緊急地震速報の予測精度により過大に安全側であった場合や、速報が誤報であった場合に、エレベータが地震時管制から自動復帰して平常運転に戻るようにするためである。図 2-20 に P 波センサーと S 波センサーによる一般的なエレベータの地震時管制のフローを示す。P 波センサーが検知した場合には、エレベータかごは最寄り階に停止して乗客を降ろす処理を行う。P 波センサーの信号が入力されてから 1 分後に S 波センサーが起動しない場合は、エレベータは自動復帰し平常運転に戻る。したがって P 波処理部分に緊急地震速報による処理を入力すれば、緊急地震速報による処理が不適切であった場合でも自動復帰することができる。緊急地震速報による S 波到達時間が 60 秒より長い場合に、緊急地震速報による安全確保処理からエレベータが自動復帰してしまうと意味が無いため、S 波到達の予測時間までは緊急地震速報からの信号入力を続ける仕様とした。同様に、長周期地震動予測によりエレベータの安全確保処理が必要となる場合は、長周期地震動の到達時間まで信号入力を続けるように設定した。長周期地震動の伝播は震源から沖積平野までの三次元構造の影響があるため、その到達時間の予測の定式化は難しい。そこで今回の開発システムでは信号入力継続時間をパラメータとして入力するようにした。なお、S 波センサーが検知した場合には、安全確保処理としては低ガル、高ガルで異なるが、エレベータの復旧には技術者の現地確認が必要となる。

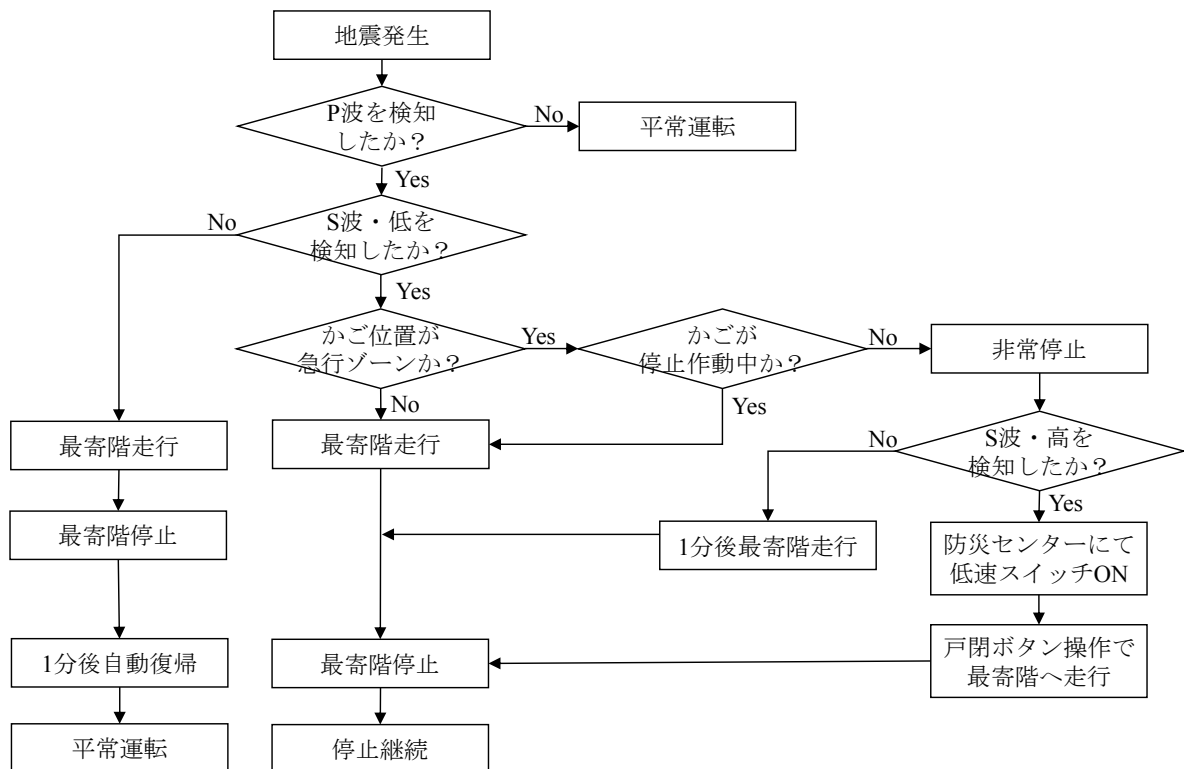


図 2-20 エレベータの地震時管制運転のフロー

(2) システム導入建物の概要

ここでは表 2-3 の建物 E（東京都千代田区），建物 F（大阪市北区）に導入した事例について記す。それぞれの建物概要を表 2-4 に示す。

表 2-4 システムを導入した建物の概要

建物名		建物 E	建物 F
建築地		東京都千代田区	大阪市北区
竣工年		1983 年	1987 年
階数	地上	24 階	32 階
	地下	4 階	2 階
	塔屋	1 階	1 階
最高部高さ		100m	125m
構造種別	地上	S 造	RC, S 造
	地下	RC, SRC 造	RC, S 造
設計時 固有周期	X 方向	2.63 秒	3.73 秒
	Y 方向	2.58 秒	3.41 秒
エレベータ	高層用	6 基	7 基
	低層用	6 基	7 基
	非常用	2 基	2 基
エレベータ 地震感知器の設定値	P 波	5cm/sec ² （上下方向）	
	S 波低	40cm/sec ² （水平方向）	
	S 波高	80cm/sec ² （水平方向）	

ともに 1980 年代に建設された高層建物であり、エレベータの地震時管制運転のために P 波センサーと S 波センサーが設置されている。2008 年にシステムが導入されて以来、それぞれの建物では最下階、中間階、最上階の 3 ヶ所で長期地震観測が行われている。

緊急地震速報による建築設備の制御は、図 2-19 に示したようにエレベータ制御と館内放送に対して実施している。緊急地震速報は地震波の S 波による計測震度を予測するので、エレベータの地震時管制のうち S 波に対する制御の応答レベルに準拠してしきい値を設定した。すなわち S 波の地震感知器が作動する加速度 40cm/sec^2 相当の計測震度を緊急地震速報から予測した場合に、制御信号を送ることとした。ここでは式 2-7 の PGA に 40cm/sec^2 を代入して求まる計測震度 $I=3.5$ (震度階 4) 以上とした。S 波感知器は上層階のエレベータ機械室に設置されているため、緊急地震速報による制御も建物上層階の計測震度の予測値が 3.5 以上となった場合に作動する。エレベータが地震時管制運転になった場合にはエレベータかご内に地震発生を伝える放送が流れるため、館内放送の制御も同じしきい値で作動している。

建物内震度の予測については、図 2-11 に示した観測記録による回帰式により予測を行う。また長周期地震動の擬似速度応答スペクトル値 R_{PV} を用いた長周期構造物の応答予測では、図 2-15～図 2-18 に示した結果から設定する。図 2-15～図 2-18 に示した回帰式の係数を固有周期ごとに比較した結果を図 2-21 に示す。

建物の応答加速度については、建物の 1 次固有周期相当の値に対して R_{PV} により高層建物の加速度応答を予測する。しきい値は、エレベータの S 波低の 40 cm/sec^2 を想定し、水平 2 方向入力した場合のベクトル合成値が 40 cm/sec^2 相当となる 30cm/sec^2 をしきい値に設定した。

エレベータロープなどの長尺物は応答変位で評価するが、エレベータロープの固有周期は、図 2-22 に示すようにエレベータかごの位置やロープの種類により固有周期が変動する^{2,24)}。そこで図 2-21 より最大応答変位の R_{PV} に対する倍率が最大となる固有周期で代表させた。すなわち関東平野の建物 E では固有周期 6～8 秒の場合の 1.2 倍を、大阪平野の建物 F では固有周期 6 秒の場合の 1.3 倍を応答変位の予測式とした。

応答変位の予測式によるエレベータの制御は、応答変位予測が 25cm となった場合に行うこととした。これは長周期地震動が大阪平野で励起した 2004 年 9 月 5 日の紀伊半島沖の地震（北緯 33.14 度，東経 137.14 度，深さ 44km，M7.4，大阪市内最大震度 4）において、エレベータの地震時対応が発生した建物 F での予測値 22cm を参考に設定した。ここでは R_{PV} からのエレベータロープの応答を考慮する簡易手法としての設定を提案したが、エレベータロープの固有周期や減衰の設定については、エレベータメーカーと調整して設定することが望ましい。

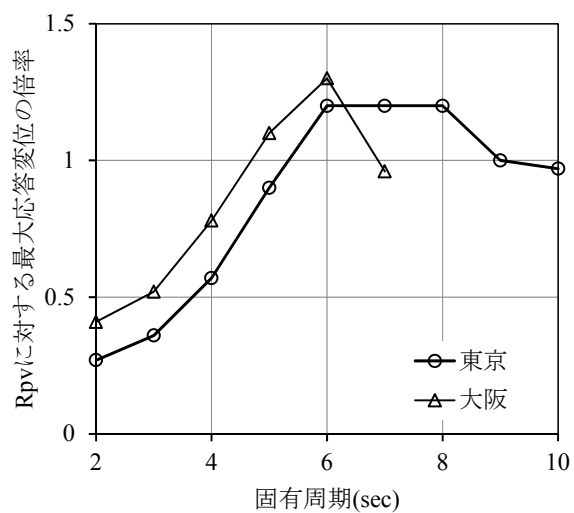
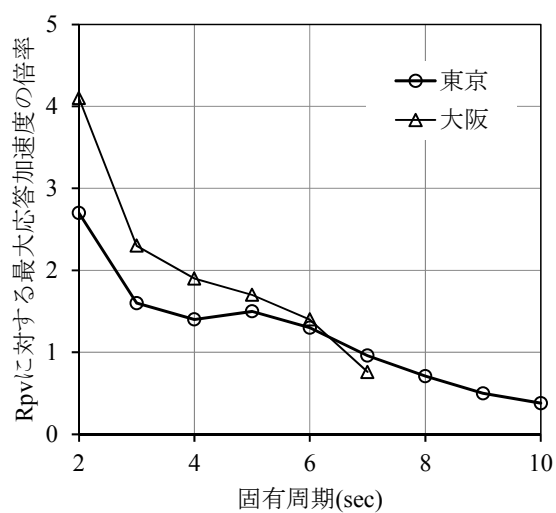


図 2-21 疑似速度応答スペクトル値から求めた最大応答の回帰式の係数の比較

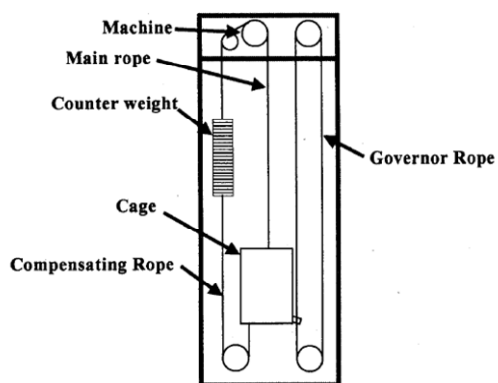
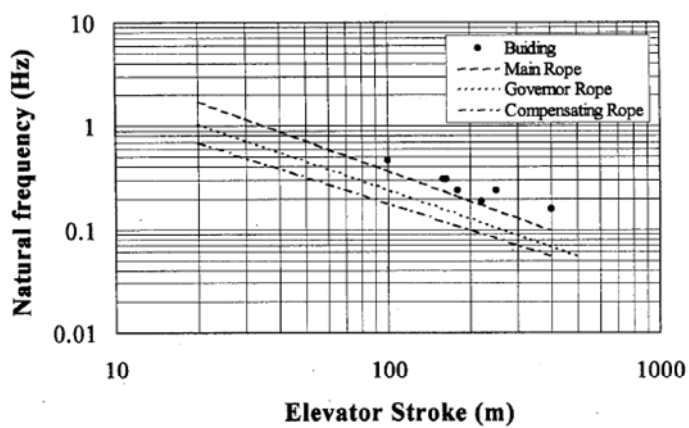


図 2-22 エレベーターロープの固有周期 (文献 2.24 から引用)

(3) 観測記録による予測式の精度検証

建物内震度の回帰式による予測結果は、図 2-11 に示した通りである。回帰式の決定係数は建物 E、F とともに 0.9 以上と相関性の高い式となり、震度増分による増幅予測の評価が可能であると考えられる。標準偏差は最上階でみると建物 E は 0.23、建物 F で 0.36 となり、中間階でみると建物 E は 0.19、建物 F は 0.25 であった。建物 F のばらつきが大きいものの、震度増分による増幅予測の評価が可能であると考えられる。

図 2-23 は地震観測結果の中から長周期地震動が卓越した地震動に対して、式 2-19 による長周期地震動の擬似速度応答スペクトル値 R_{PV} の予測値と観測値を比較したものである。検討に用いた地震を表 2-5 に示す。建物 E および F とともに 2009 年より地震観測を行っているため、2010 年～2011 年に発生したマグニチュード 6.0 以上の地震で検討した。図 2-23 は縦軸に観測記録から求めた擬似速度応答スペクトル値を、横軸に式 2-19 から求めた値であり、補助線として $y=0.5x \sim y=2x$ の線を引いた。建物 F（大阪平野）での結果は予測値が観測値の 0.5 倍～2 倍の範囲にばらついているが、建物 E（関東平野）では全体として式 2-19 による予測値の方が観測値より大きい傾向を示している。これは建物 E での地震観測は 2008 年 12 月以降であるため、長周期地震動が卓越した地震（2004 年新潟県中越地震など）の観測記録が無いことや、深部地盤構造の観点より長周期地震動の増幅が小さいと言われている岩手県沖～茨城県沖を震源とする地震^{2,25)}による関東地方での観測記録が、2011 年東北地方太平洋沖地震以降に多いことによると考えられる。

そこで建物 E に対して震源位置による式 2-19 の補正係数の検討を行った。建物 E は気象庁大手町観測点の近傍にあることから、2008 年以前の地震による検討は気象庁大手町観測点の地震記録^{2,26)}を用いることが考えられる。表 2-5 の(1)に示す地震に対して、建物 E と気象庁大手町の観測記録から求めた擬似速度応答スペクトル値 R_{PV} の観測値を比較した結果を図 2-24 に示す。 R_{PV} の値でみると両観測点の値はほぼ対応しており、長周期地震動成分であれば両観測点で大きな差異は無いと考えられる。

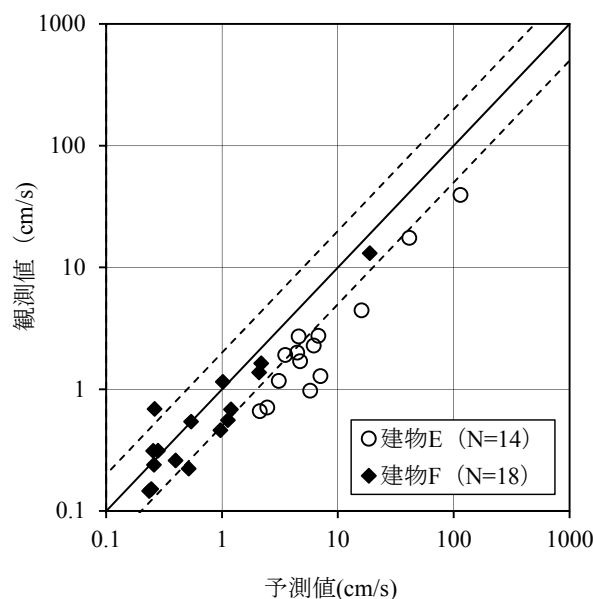


図 2-23 擬似速度応答スペクトル値 R_{PV} の予測値と観測値の比較

表 2-5 長周期地震動予測の検討に用いた地震

(1) 建物 E・関東平野

番号	観測開始時間	M _j ^{*1}	震源深さ (km)	震源距離 (km)	$\theta(^{\circ})$ ^{*2}	地震名
No1	2011年 03月 09日 11時 45分	7.3	8.3	429.4	88.9	三陸沖
No2	2011年 03月 11日 14時 46分	8.4	23.7	386.6	86.5	東北地方太平洋沖地震
No3	2011年 03月 11日 15時 12分	7.6	42.7	154.9	74.0	茨城県沖
No4	2011年 03月 12日 00時 12分	6.7	22.8	208.3	83.7	茨城県沖
No5	2011年 03月 12日 03時 58分	6.7	8.4	178.2	87.3	長野県北部
No6	2011年 03月 13日 10時 25分	6.6	11.2	201.3	86.8	茨城県沖
No7	2011年 03月 15日 22時 28分	6.4	14.3	104.6	82.1	静岡県東部
No8	2011年 03月 16日 12時 51分	6.1	10.0	105.7	84.6	千葉県東方沖
No9	2011年 03月 19日 18時 56分	6.1	5.4	142.2	87.8	茨城県北部
No10	2011年 04月 07日 23時 32分	7.2	65.9	347.3	79.0	宮城県沖
No11	2011年 04月 11日 17時 15分	7.0	6.4	162.3	87.7	福島県浜通り
No12	2011年 04月 12日 08時 07分	6.4	26.3	106.6	75.7	千葉県東方沖
No13	2011年 04月 12日 14時 07分	6.4	15.1	172.0	85.0	福島県中通り
No14	2011年 07月 10日 09時 57分	7.3	34.0	426.0	85.4	三陸沖

(2) 建物 F・大阪平野

番号	観測開始時間	M _j ^{*1}	震源深さ (km)	震源距離 (km)	$\theta(^{\circ})$ ^{*2}	地震名
No.1	2010年 11月 30日 12時 27分	7.1	494.0	1226.1	67.1	小笠原諸島西方沖
No.2	2011年 03月 09日 11時 47分	7.3	8.3	801.9	89.4	三陸沖
No.3	2011年 03月 11日 14時 47分	8.4	23.7	757.4	88.2	東北地方太平洋沖地震
No.4	2011年 03月 11日 16時 15分	6.5	20.0	692.0	88.3	福島県沖
No.5	2011年 03月 11日 16時 29分	5.9	27.0	594.9	87.4	福島県沖
No.6	2011年 03月 12日 03時 59分	6.7	8.4	376.9	88.7	長野県北部
No.7	2011年 03月 13日 10時 28分	6.6	11.2	599.6	88.9	茨城県沖
No.8	2011年 03月 14日 10時 04分	6.2	32.0	543.8	86.6	茨城県沖
No.9	2011年 03月 22日 18時 21分	6.1	10.0	506.3	88.9	千葉県東方沖
No.10	2011年 04月 07日 23時 33分	6.4	43.0	644.0	86.2	福島県沖
No.11	2011年 04月 07日 23時 33分	7.2	65.9	692.3	84.6	宮城県沖
No.12	2011年 04月 11日 17時 17分	7	6.4	527.8	89.3	福島県浜通り
No.13	2011年 04月 12日 08時 09分	6.4	26.3	495.4	87.0	千葉県東方沖
No.14	2011年 07月 10日 09時 59分	7.3	34.0	804.4	87.6	三陸沖
No.15	2011年 07月 31日 03時 55分	6.5	57.0	570.5	84.3	福島県沖
No.16	2011年 08月 01日 23時 58分	6.2	23.0	278.9	85.3	駿河湾
No.17	2011年 08月 19日 14時 38分	6.5	51.0	651.8	85.5	福島県沖
No.18	2011年 09月 15日 17時 01分	6.3	51.0	568.0	84.9	茨城県沖

*1 M_j : 気象庁マグニチュード *2 θ : 見かけの入射角

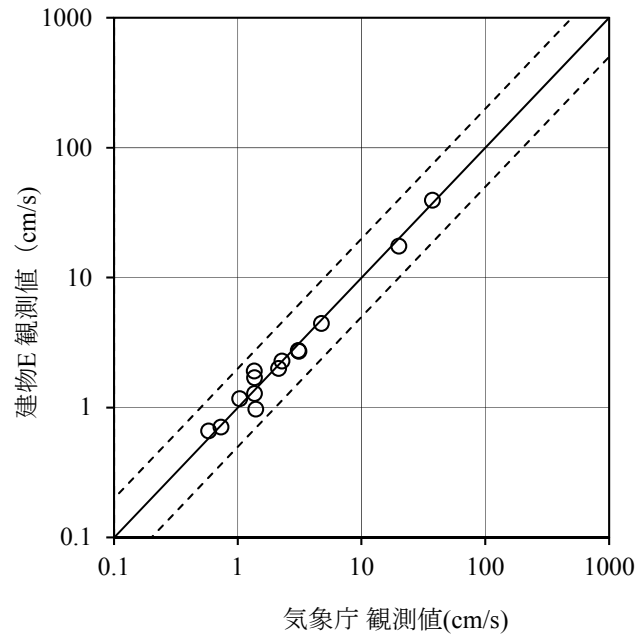


図 2-24 建物 E と気象庁大手町の観測記録から求めた擬似速度応答スペクトル値 R_{PV} の比較

次に 2004 年新潟県中越地震を含め 2003 年～2013 年までに観測された地震記録^{2.26)}の中から、気象庁マグニチュードが 5.0 以上の 82 個の地震を用いて R_{PV} の値の検討を行った。図 2-25 に震源位置と式 2-19 の残差による濃淡 (log 観測 R_{PV} - log 予測 R_{PV}) を示す。なお作図には GMT^{2.27)} を用いた。残差が 0 の場合は予測値と観測値が対応していることを示し、残差がマイナスの場合は予測値の方が大きめに評価していることを示す。表 2-6 に示す震源位置のエリア区分で概観すると、東エリアでは R_{PV} の残差はマイナス、北西エリアの残差は 0 程度である。

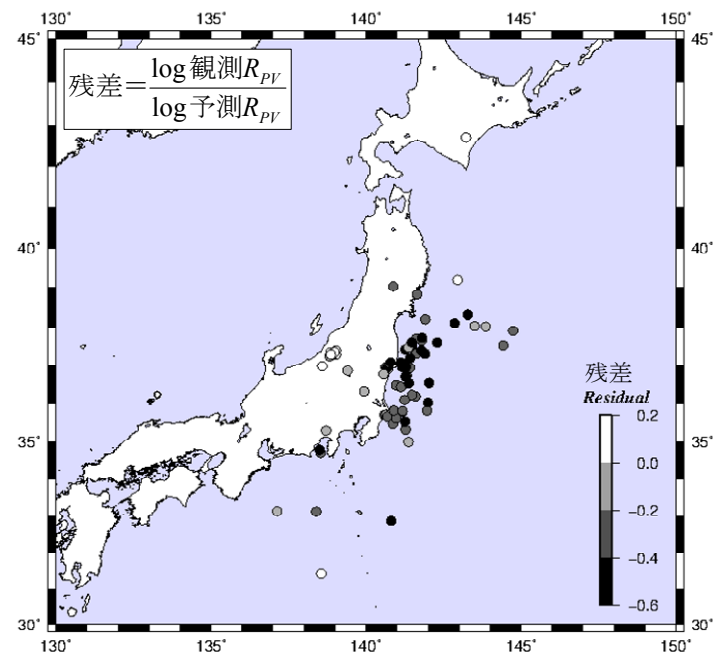


図 2-25 検討に用いた地震の震源位置と R_{PV} の観測値と予測値の残差 (気象庁大手町)

表 2-6 検討に用いた地震の震源位置によるエリア区分

エリア	定義	地震数（うち関東平野で長周期成分が卓越した数, その割合）
東	震源位置の東経が 140.5 度以上	63 (18, 28.6%)
北西	震源位置の東経が 140.5 度以下 かつ北緯が 35.5 度以上	12 (11, 91.7%)
南西	震源位置の東経が 140.5 度以下 かつ北緯が 35.5 度以下	7 (2, 28.6%)

表 2-6 の震源位置のエリアにより補正係数を算出した結果を表 2-7 に、補正係数による R_{PV} の値の予測値と観測値の比較を図 2-26 示す。対数標準偏差は補正前の 0.14 から補正後は 0.13 と予測値のばらつきも小さくなっており、予測値が観測値よりも過大評価する傾向が改善されている。

式 2-19 による予測式は、既往の長周期地震動成分を予測する距離減衰式^{2.28), 2.29)}と違い、検討地点での補正係数を設定していないが、観測記録をベースに震源位置に対して検討地点の補正を行うことで、より高精度な緊急地震速報システムでの利用が可能になる。

表 2-7 震源のエリア区分による R_{PV} の補正係数

震源位置 評価サイト	残差	$\text{Log}_{10}(\text{観測 } R_{PV} / \text{予測 } R_{PV})$	
	東エリア	北西エリア	南西エリア
気象庁 大手町	-0.35	0.00	-0.23

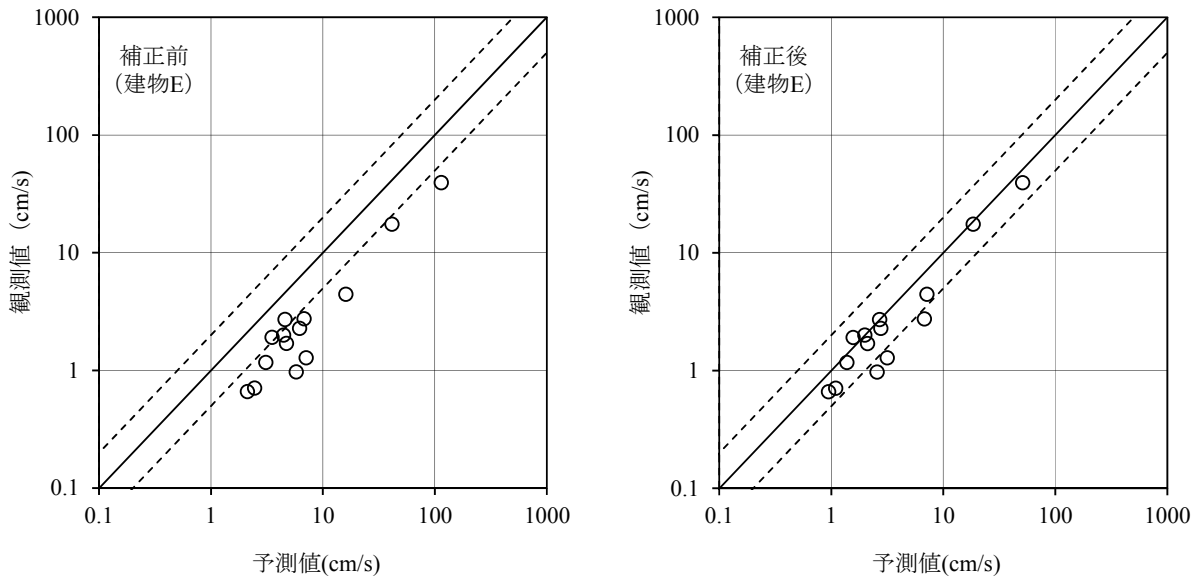


図 2-26 補正係数による R_{PV} の予測精度の向上

(4) システムの作動事例

建物Eでは2011年東北地方太平洋沖地震の際にシステムが作動し、安全確保処理が行われた^{2,23)}。表 2-8 に作動状況の時系列を示す。

緊急地震速報は気象庁から連続的に震源情報が更新されて伝達されるが、建物Eでは第9報で建物内震度4以上を予測してシステムが作動し、エレベータの地震時管制運転が行われた。これは気象庁が東京23区で震度4以上を予測（第12報）する43秒前、またエレベータ地震感知器でP波（トリガー設定5cm/s²）を検知する63秒前であり、建物が揺れ始める前にエレベータかごが最寄り階に停止して乗客を降ろし、閉じ込め等発生せずに安全を確保した。

本システムでは建物内の現地地震計の即時処理により、緊急地震速報が間に合わないような直下の地震に対する揺れの予測や建築設備の制御を行っていない。これは建物内の地震観測網を二重化していないため、地震計の誤作動による処理を避けるためである。ただし、緊急地震速報が発報され建物へS波が到達する時間内に検知した地震計の揺れは、地震として処理している。

今回の作動事例では地震計による建物の揺れのモニタリングにより、システム作動の約13分後に建物およびエレベータの長尺物の揺れの収束を確認して、制御が解除されている。

表 2-8 建物Eでの作動状況（2011年東北地方太平洋沖地震）

時刻	緊急地震速報	システム動作状況	システム作動からの時間
14:46:45	第1報	緊急地震速報受信開始	—
14:46:49	第4報	宮城県中部で震度4～震度5弱程度※	—
}			
14:47:02	第9報	システム作動（建物内予測震度4）	0:00
14:47:28		建物地震計 記録開始（地震検知）	0.26
14:47:45	第12報	東京23区で震度3から震度4※	0:43
14:48:05	第13報	既存のEV管制作動（P波センサー検知）	1:03
14:48:21		建物実測 震度4	1:19
14:48:37	最終報		1:35
14:49:08		建物実測最大震度5強	2:06
15:00:55		後揺れ収束・EV制御信号解除	13:53

※気象庁による予測結果

2.5 まとめ

防災指標として用いられる気象庁震度について、建物の室内被害を評価する目的で活用する場合を想定し、建物内で観測された地震記録より考察を行った。また震度情報を用いる緊急地震速報について、より効果的に建物の減災システムとして用いる方法についての検討を行った。以降に得られた知見を示す。

- ・建物最下階の観測記録に対する上層階の観測記録の応答増幅について、最大応答加速度、最大応答速度、計測震度により検討を行った。加速度、速度は下層階の値に対する応答倍率で評価できること、計測震度については下層階の値に対する応答増分で評価できることが判った。またそれぞれの物理量の応答増幅について回帰式を求めたところ、計測震度の増分形がばらつきも小さく、決定係数の値も高くなった。
- ・既往研究で得られている加速度、速度による計測震度の回帰式について、建物内での観測記録に適用したところ、既往の回帰式と同程度のばらつきのレベルで評価できることが解った。ただし建物の一次固有周期は0.6～3.5秒の範囲である。
- ・緊急地震速報を建物内の減災システムとしてより効果的に使うために、建物上層階の震度を予測する機能を開発した。上層階の震度は最下階の計測震度に対して震度増分を足し合わせることで簡単に実装できること、また震度増分の予測式を応答スペクトル法により提案した。提案した予測式は観測記録から求めた震度増分の回帰式よりも安全側に評価していることを確認した。
- ・緊急地震速報から長周期地震動レベルを予測する機能、および予測した長周期地震動レベルから高層建物の応答を予測する機能を提案した。長周期地震動レベルの予測機能の精度向上には、建物での観測記録の分析から、建設地域における補正係数を導入することが有効であることが判った。

第2章 参考文献

- 2.1) Richter, C.F. : Elementary Seismology. W.H. Freeman and Company, San Francisco, pp.135-149; 650-653, 1958
- 2.2) David J. Wald, Vincent Quitoriano, Thomas H. Heaton and Hiroo Kanamori : Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California, Earthquake Spectra, Volume 15, No.3, pp.557-564, August 1999
- 2.3) 気象庁：震度を知る－基礎知識とその活用－，ぎょうせい，1996年
- 2.4) 清野純史，藤江恵悟，太田裕：組合せ震度の提案・定式化とその応用について，土木学会論文集 No.612/I-46, pp143-151, 1999年1月
- 2.5) 気象庁地震火山部：長周期地震動に関する情報検討会 平成24年度報告書，平成25年6月
- 2.6) 気象庁：震度計設置環境基準，平成21年10月26日（改訂），pp.4-8.
- 2.7) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第523号，pp.63-70, 1999年
- 2.8) 翠川三郎，藤本一雄，村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの物理量との関係，地域安全学会論文集，No.1, pp.51-56, 1999年

- 2.9) 気象庁地震火山部：緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料，平成 20 年 7 月 29 日
- 2.10) 田村和夫，中村豊，金子美香，神原浩：高層建物内の地震時安全性評価技術の開発（その 1）全体概要と建物の簡易応答評価手法，日本建築学会 学術講演梗概集 構造Ⅱ，pp.623-624，2005 年
- 2.11) 山田真澄，宮地周吾朗，森井雄史，林康裕：即時被害予測のための建物内地震動増幅度の簡易推定手法，日本地震工学会論文集，第 9 巻，第 1 号，pp.83-93，2009 年
- 2.12) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，pp.406-409，1993 年
- 2.13) 渡部丹，福沢六朗，藤堂正喜：床応答スペクトルの解析手法に関する考察，日本建築学会 学術講演梗概集 B-2，pp.927-928，1981 年
- 2.14) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：高強度鋼等の革新的構造材料を用いた新構造建築物の性能評価手法の開発，国土技術政策総合研究所 プロジェクト研究報告，No.32，pp.191-193，2010 年 2 月
- 2.15) 小林喜久二：長周期地震動の距離減衰式に関する検討，日本建築学会 学術講演梗概集 B-2，pp.371-372，2007 年
- 2.16) 関西地震観測研究協議会：観測データ，1994 年～2005 年
- 2.17) 防災科学技術研究所：強震観測網 K-NET 観測データ，1998 年～2004 年
- 2.18) 吉澤睦博，恒川裕史，小林喜久二：長周期地震動予測を考慮した緊急地震速報システム，日本建築学会 学術講演梗概集 B-2，pp.189-190，2009 年
- 2.19) 那須正，宮村正光，神田克久：早期地震警報の適用方法：冷凍倉庫・ホテルの事例，日本建築学会 学術講演梗概集 B-2，pp.657-658，2007 年
- 2.20) 源栄正人，本間誠，セルダル クユク，フランシスコ アレシス：構造ヘルスマニタリングと緊急地震速報の連動による早期地震情報統合システムの開発，日本建築学会技術報告集 第 14 巻 第 28 号，pp.675-680，2008 年
- 2.21) 久保智弘，久田嘉章，堀内重木，山本俊六：緊急地震速報を活用した長周期地震動予測と超高層ビルのエレベータ制御への適用，日本地震工学会論文集 第 9 巻 第 2 号（特集号），pp.31-50，2009 年
- 2.22) 糸井達哉，内山泰生，高木政美，末田隆敏，長島一郎：緊急地震速報と現地地震計の初期微動情報を併用した地震防災システムの開発と性能評価，日本建築学会技術報告集 第 16 巻 第 33 号，pp.827-832，2010 年
- 2.23) 恒川裕史，芝崎良美：緊急地震速報システムと東日本大震災での作動事例，竹中技術研究報告 No.67，2011 年
- 2.24) 中山徹也，宮田弘市，中村秀広，関谷裕二，重田政之：長周期地震時のエレベーター長尺物の実時間予測，日本機械学会 昇降機・遊戯施設の最近の技術と進歩 技術講演会講演論文集，pp.19-22，2007 年
- 2.25) 古村孝志：関東平野の深部基盤構造と長周期地震動リスク，地学雑誌，123(4)，pp.434-450，2014 年
- 2.26) 気象庁：強震波形データ 2003 年～2013 年，平成 27 年 1 月改訂
- 2.27) Wessel, P. and W. H. F. Smith, New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS

Trans. AGU, Vol.79 (47), p.579, 1998

- 2.28) 佐藤智美, 大川出, 西川孝夫, 佐藤俊明 : 長周期地震動の経験式の改良と 2011 年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション, 日本地震工学会論文集第 12 巻, 第 4 号 (特集号), 2012 年
- 2.29) Nobuyuki Morikawa and Hiroyuki Fujiwara : A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, Journal of Disaster Research Vol.8 No.5, 2013

第3章 大規模実験に基づく室内被災度評価

3.1 はじめに

大地震時に発生する建物の地震被害をより現実的に精度よく推定するために、非構造部材や設備機器の被害に関する研究がおこなわれており、非構造部材や設備機器をモデル化した実験的な研究が数多く実施されている。しかし、それらの多くは実験上の制約条件から要素実験である場合が多く、非構造部材の一部分を取り出した静的載荷実験や、建築設備単体の振動実験などであり、実際の建物の室内空間にモデル化されたものでは無かった。そこで本章では、建物の室内空間を実大規模でモデル化した試験体の振動実験結果から、天井や建築設備、家具什器の振動特性および損傷状況の把握を行う。そして建物の床応答加速度や応答速度、応答変位などの物理量から、非構造部材や建築設備の損傷による室内被災度評価について考察する。

3.2 実験概要

防災科学技術研究所では、兵庫耐震工学研究センターにおいて、実大三次元震動破壊実験施設「Eーディフェンス」を保有しており、大きさ 20m×15m、最大搭載荷重 12MN (1200tf) の振動台を用いた実大規模の構造物の振動実験が行われている^{3.1)}。2005 年度～2011 年度の間に 53 シリーズの実験が実施されており、そのうち建物を対象とした実験は 30 シリーズにのぼる。これらの実験により、実物大規模の建築物の地震時挙動に関する各要素の詳細な応答データが取得され、建物の地震時安全性、継続使用性等に関する技術資料として蓄積されている。近年、アメリカでも実大規模の構造躯体と非構造部材をモデル化した試験体の振動実験も行われており^{3.2)}、構造躯体の被害だけではなく、建物内での安全確保や損失評価にも着目した実験研究が行われている。

本章で分析の対象とする実験は、独立行政法人防災科学技術研究所において、文部科学省受託研究「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」^{3.3)}の「サブプロジェクト2 都市施設の耐震性評価・機能確保に関する研究」の一環で平成 23 年度に実施された実験^{3.4)}である。

平成 23 年東北地方太平洋沖地震では非常に広範囲な強震域が発生し、地震時の都市機能の維持の必要性が改めて再認識された。首都圏では最大震度 6 強、東京 23 区では震度 5 弱～5 強の強い揺れを観測し、首都圏の非木造建物では、構造被害は少なかったものの、非構造部材や設備機器の損傷に伴う建物機能損失が広範囲に発生した。新宿周辺の超高層ビルでも、長周期地震動による共振により、高層階での天井板の落下、コピー機などキャスター付きの什器類の移動、室内での書籍等の落下・散乱等が発生した^{3.5)}。

中低層の建物でも数多くの室内被害が発生した。天井隠蔽型の空調設備のダクトの破損や落下による機能停止や、大空間の集客施設では吊り天井の脱落が発生した^{3.6),3.7)}。また、重量のある家具什器や情報機器が不適切な耐震支持によって転倒し、長期間にわたってオフィス機能を停止した例や、電算機器の稼働に重要な温度・湿度管理を行う空調設備の損傷により、電算機器の稼働ができずにオフィス機能が復旧できなかった事例などが報告されている^{3.8)}。構造被害が小さい場合であっても、非構造部材、建築設備、および家具什器などの損傷により室内被害が発生し、建物機能が損失することが改めて認識された。また非構造部材や建築設備、家具什器はお互いの相互干渉による被害が発生することが顕在化した。こうした背景を踏まえ、本研究の実験ではオフィスの地震時の建物機能維持（空調設備、消防設備）、地震時の人の安全確保（天井、壁、家具

什器)に着目し、オフィスビルの室内空間を説明力の高い実物大でモデル化した実験室を有する建物モデルの振動実験を行い、非構造部材、建築設備、家具什器の室内被害による建物機能損失に関するデータを取得した。建物モデルは、超高層建物の揺れを再現するとともに、より包括的な室内被害に関するデータを作成するために、低層建物の揺れも再現できるものとした。

3.2.1 構造概要

試験体の設計の基本コンセプトは、①高さ 120m レベルの 30 階建ての高層建物の揺れ（1 次固有周期 3～4 秒）を再現する、②上層階と下層階の揺れを同時に再現する、③低層建物の揺れも再現する、こととした。図 3-1 に試験体のモデル化の全体概要を示す。

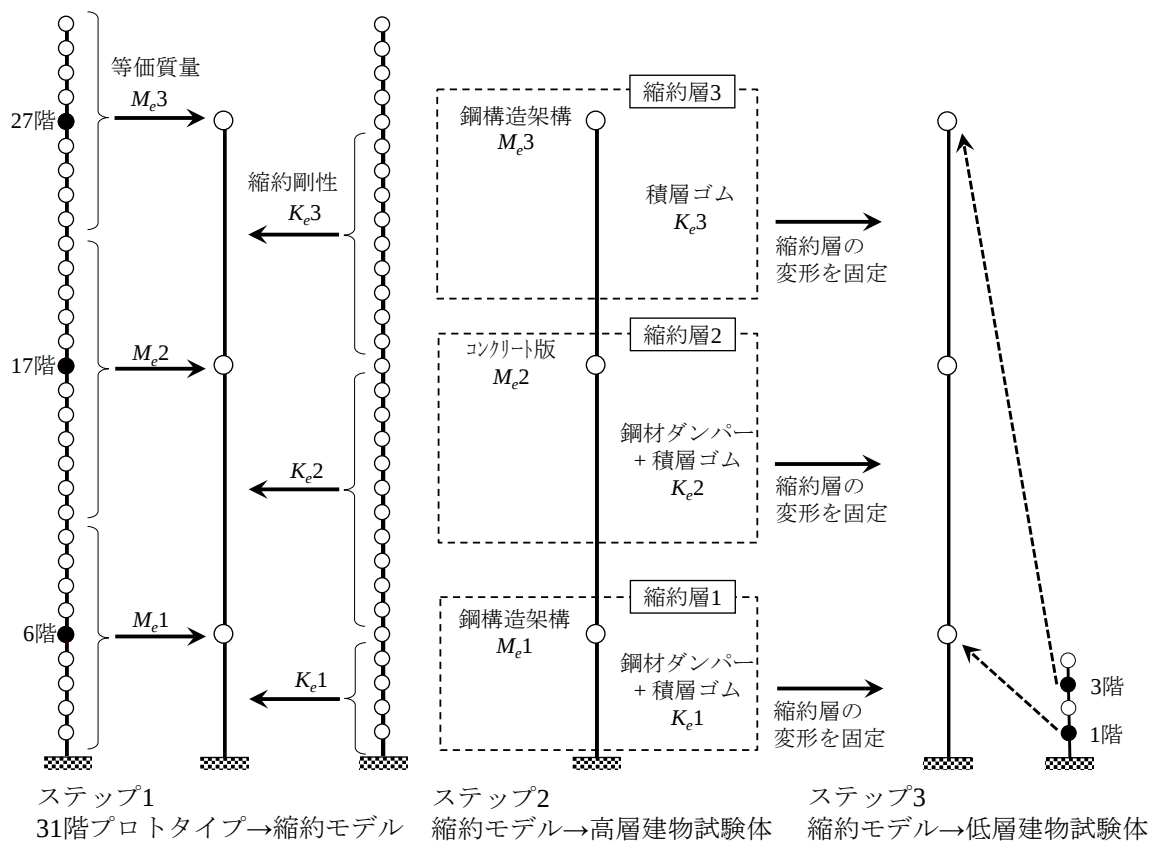


図 3-1 試験体のモデル化の全体概要

高層モデルの場合は 31 層を 3 層に縮約、縮約層の剛性は積層ゴムで表現し、上層階と下層階は鉄骨骨組みで作成した室内空間で、中間階はコンクリート錘で等価質量を表現した。振動台上には積層ゴムを用いた下層用の応答増幅層を設け、鋼構造架構 M_e1 （実験室 1）を載せる。構造架構には 6 階相当の揺れが生じる。さらにその上に積層ゴム 2 段+コンクリート錘 M_e2 +積層ゴム 2 段で構成される中層高層用の応答増幅層を配す。そして、試験体上部には 27～28 階相当の揺れが生じる 2 層の鋼構造架構 M_e3 （実験室 2 および 3）を載せる。これにより実験室 2 および 3 では片振幅で 100cm 程度の変形が可能となる。また縮約層に非線形特性を擬似的に与えるために鋼製 U 型ダンパーと積層ゴムを直列につないだ塑性化装置を、縮約層 1・2 とに設けた^{3.9)}。

低層建物の揺れを再現する場合には、縮約層の積層ゴムの動きを鋼板プレートにより拘束する

ことで、4 階相当の鉄骨造建物の揺れを再現した。試験体の全景写真を図 3-2、立面図を図 3-3 に、実験時の縮約層の境界条件の概要を図 3-4 に示す。

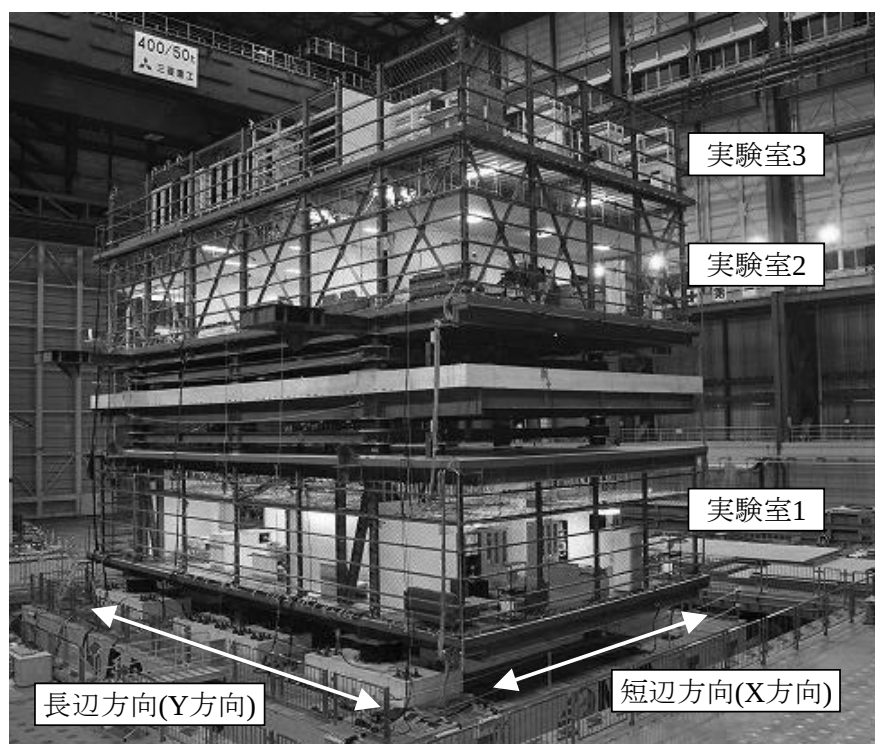
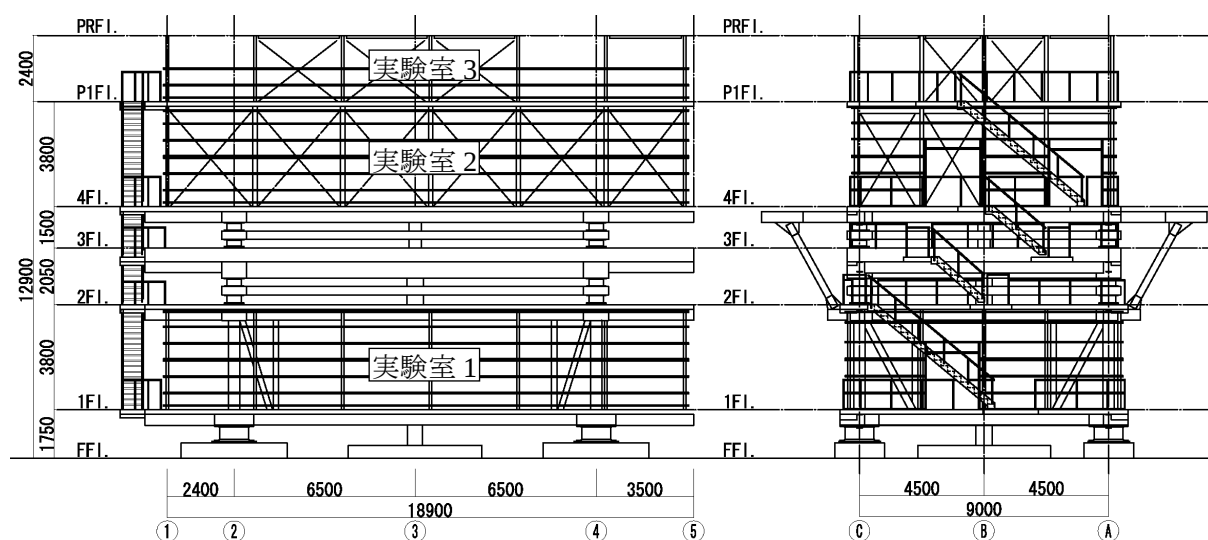


図 3-2 試験体の全景写真



(1) 長辺方向立面図

(2) 短辺方向立面図

図 3-3 試験体の立面図

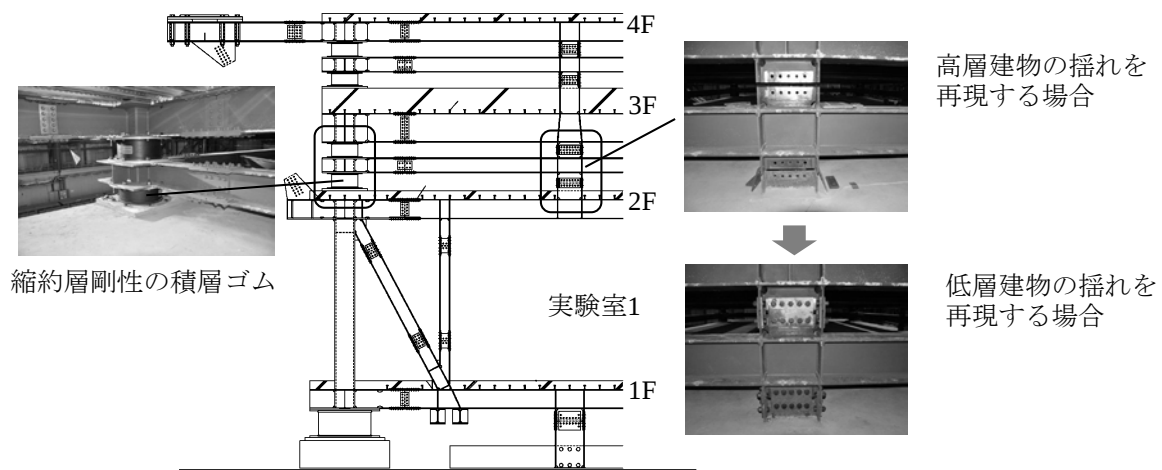


図 3-4 実験時の縮約層の境界条件

実験室は、実際のオフィスビルを再現できるように階高を 3.8m とした。また加振実験時の実験室の室内状況を観察しやすくするために外壁をモデル化していない。ただし実験時の安全性を考え、外周に横胴縁（C-75×45×15×1.6）を回している。

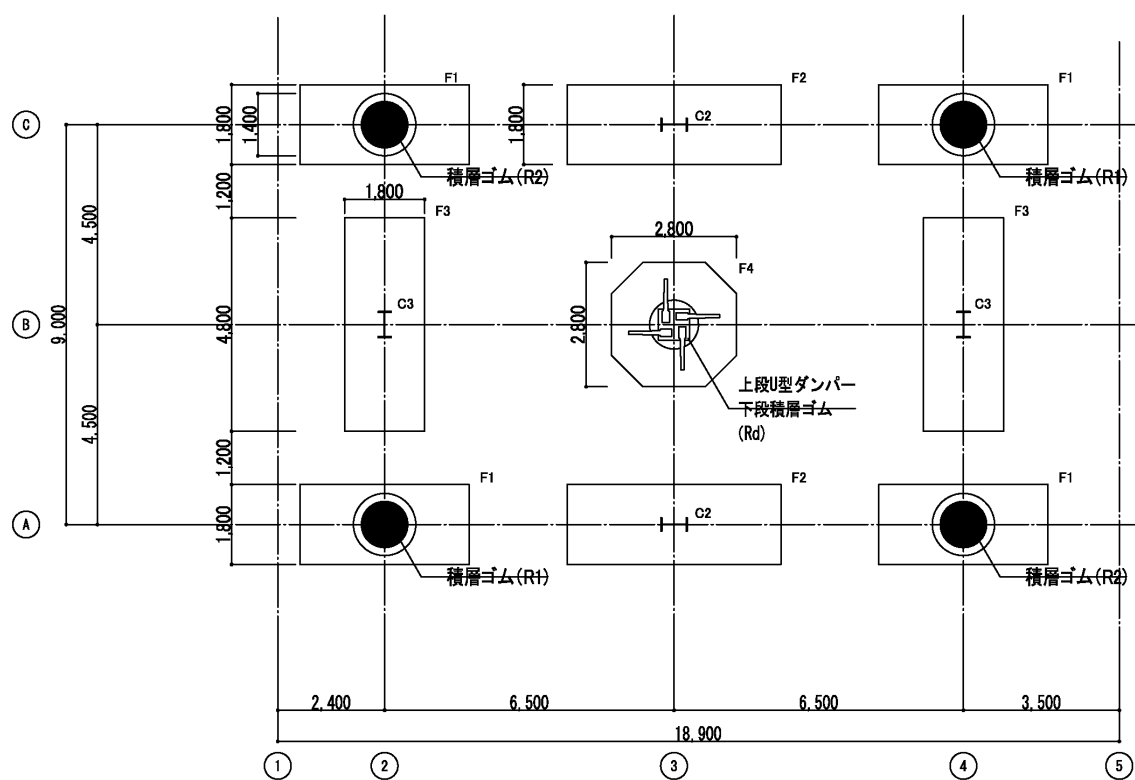
実験施設の制約から試験体総重量を約 6500kN とし、各階質量を等分布と仮定した 31 階プロトタイプを縮約するために、図 3-1 に示す配分で等価質量を等分布で設定した。

架構の部材断面は設計用ベースシア係数 C_b に対する A_i 分布による外力分布の許容応力度設計から算定した。高層建物の場合には標準せん断力係数 $C_0 = 0.3$ とし、建物の 1 次固有周期を 3.5 秒、第 2 種地盤として設定すると $C_b = 0.082$ となる。一方、低層建物の場合には $C_0 = C_b = 0.2$ とした。そのため架構部分の部材断面は低層建物の外力分布で決定した。したがって実験室 1・2 の骨組みは実際の超高層建物の骨組みよりも剛に構成されているため、高層建物が 100cm 変形した場合に骨組構造に発生する変形（層間変形角）は再現していない。図 3-5 に梁伏図、図 3-6 に軸組図、表 3-1 に部材リスト、表 3-2 に試験体の設計用重量と層剛性を示す。

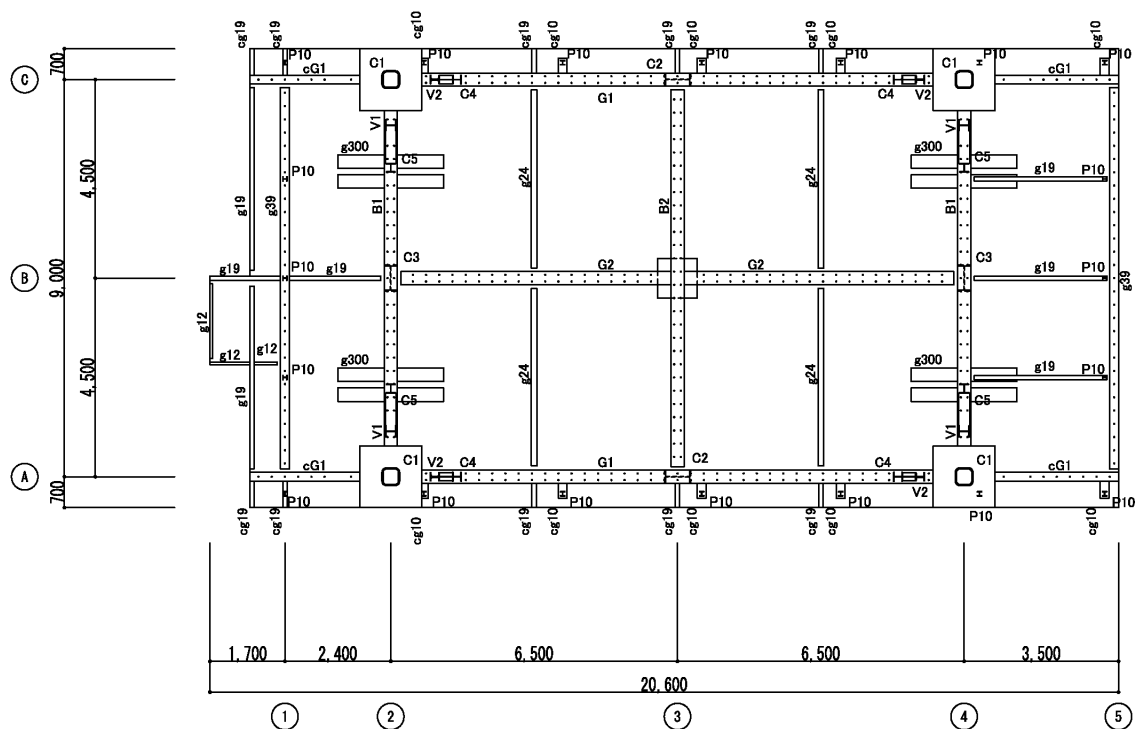
高層建物の場合の剛性分布は A_i 分布に基づいて設定し、積層ゴムを組み合わせることで剛性を近似した。高層建物の場合の縮約層のモデル化について図 3-7 に示す。応答増幅層の縮約層に非線形特性を擬似的に与えるために鋼製 U 型ダンパーと積層ゴムを直列につないだ塑性化装置を設けた。図 3-8 に縮約層 1 と縮約層 2 で設定した層せん断力-層間変形関係を示す。

高層モデルの試験体で再現される振動特性と、プロトタイプの高層建物（31 層）の振動特性を比較するために、プロトタイプと試験体の解析モデルの固有値解析から求められた刺激関数を比較して図 3-9 に示す。実験室 2 および 3 では、高層建物のプロトタイプの概ね 3 次までの応答を再現できると考えられる。また実験室 1 では 3 次モードがややプロトタイプより卓越する。

C2 および C3 のせん断柱をスプライスプレートで連結して、超高層モデルで設定した積層ゴムによる剛性を効かない状態に切り替え、低層モデルの骨組みを構築する。図 3-10 に低層建物モデルで設定した骨組みに対する静的増分解析により求めたせん断力-変形関係をトリリニアで近似した結果を示す。図中の○印は保有水平耐力時である。

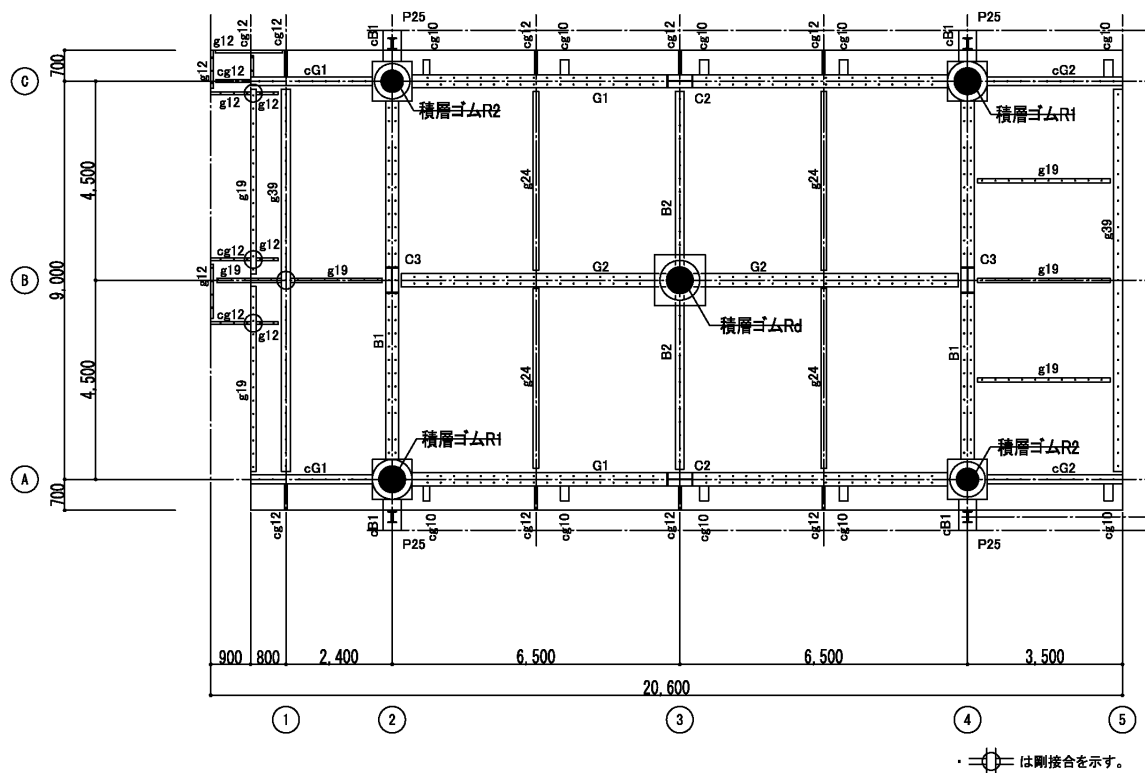


(1) B階 (基礎階)

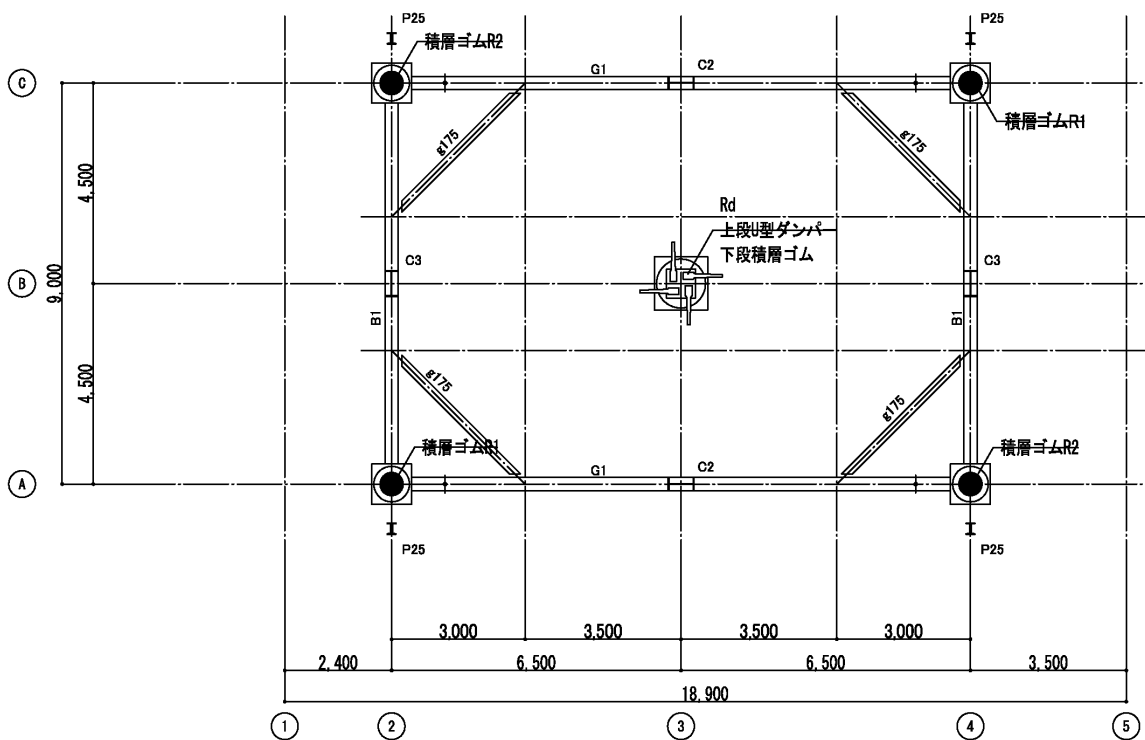


(2) 1階

図 3-5 梁伏図

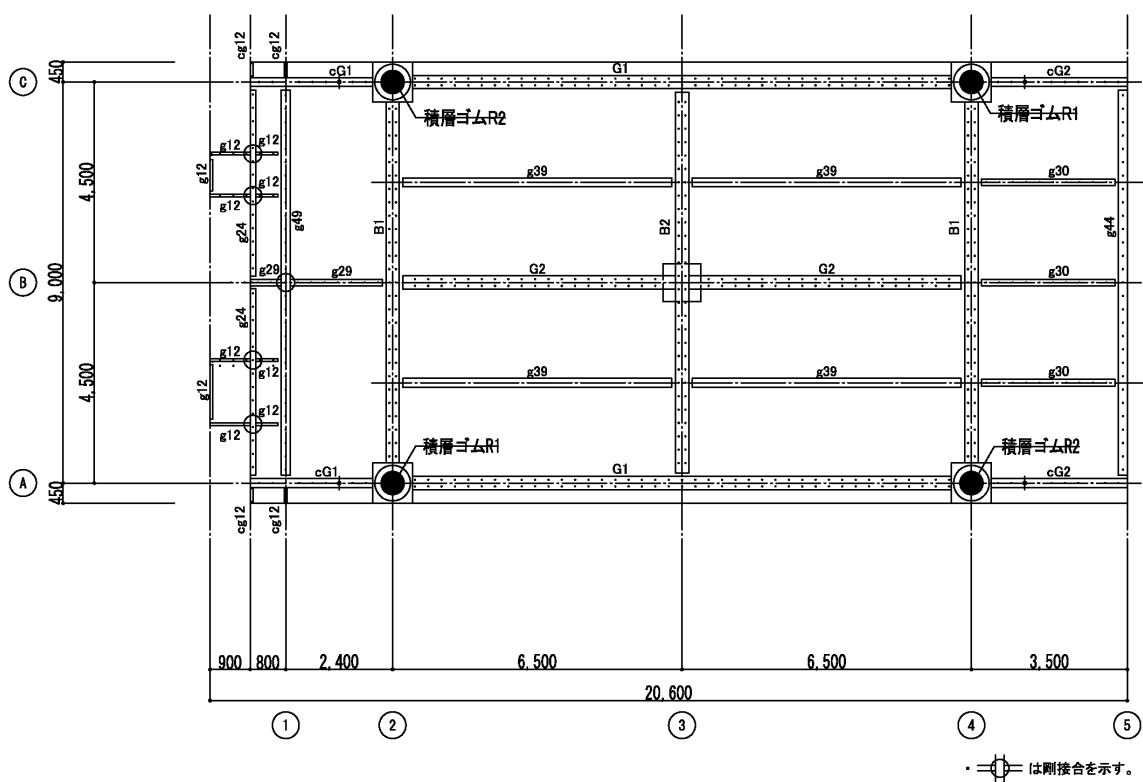


(3) 2 階

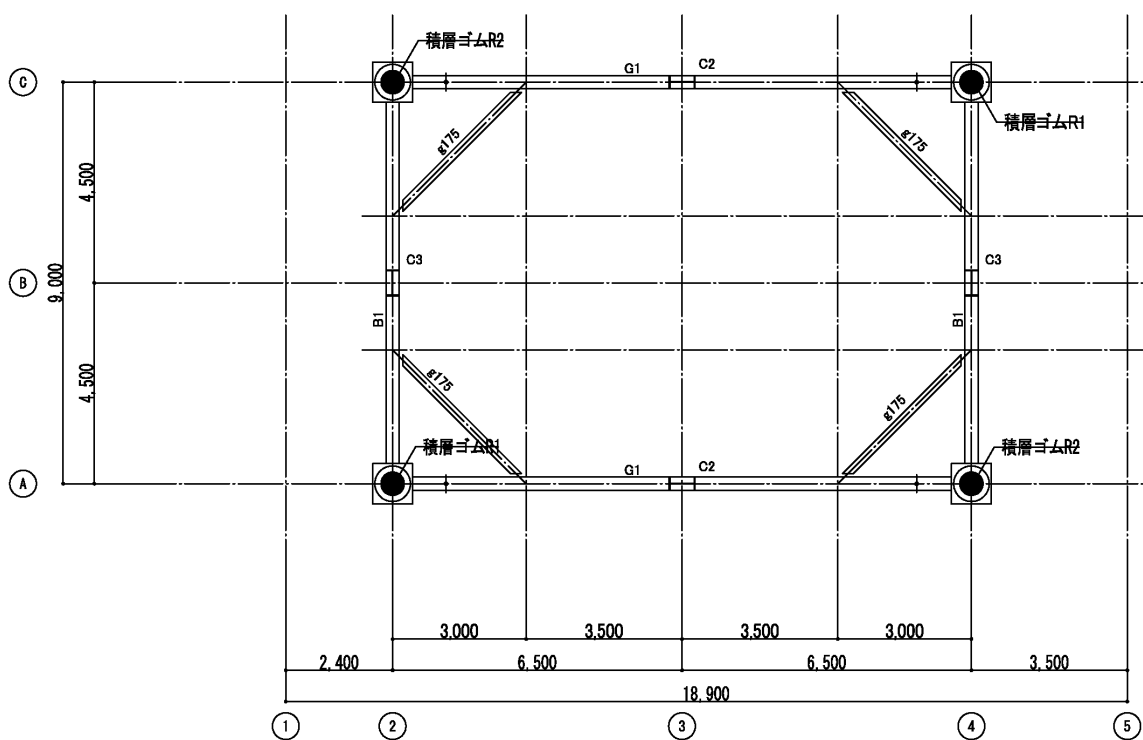


(4) 2m 階

図 3-5 梁伏図

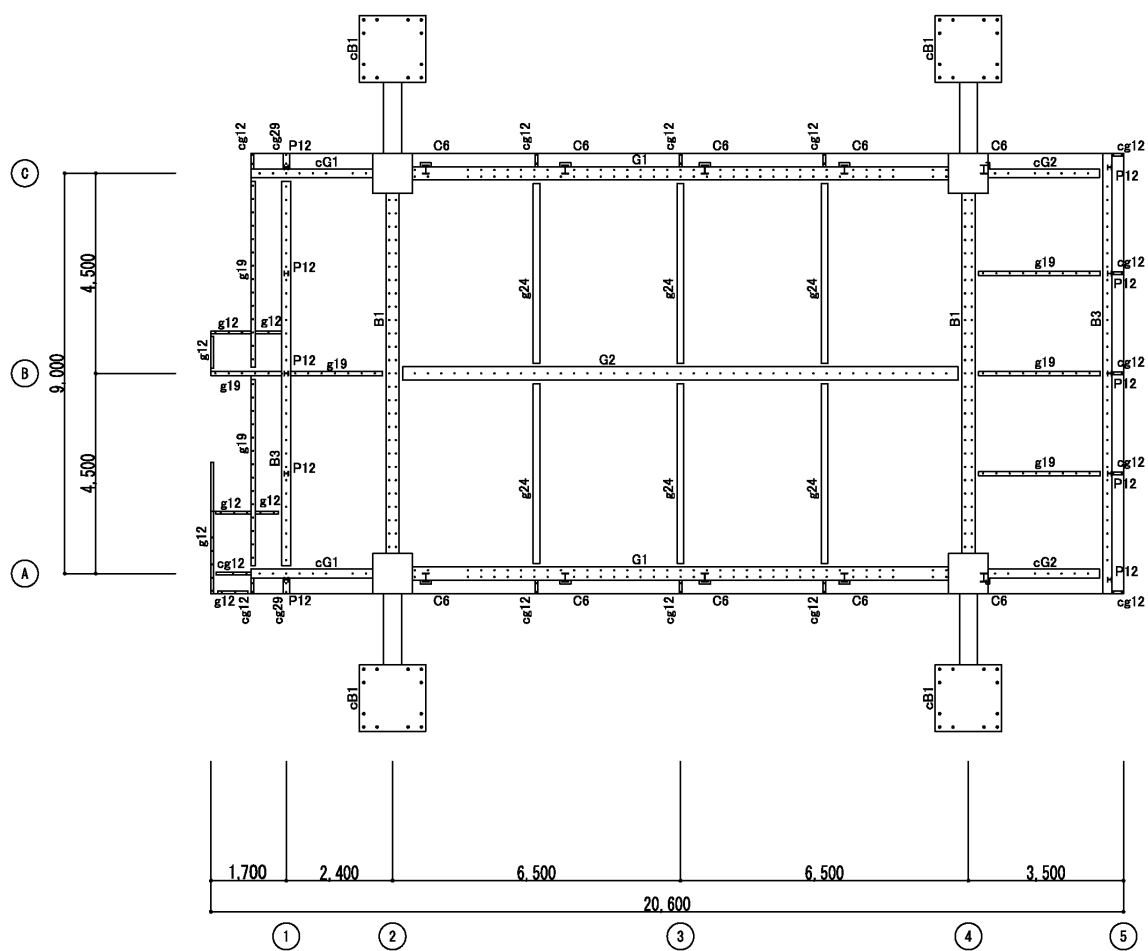


(5) 3 階

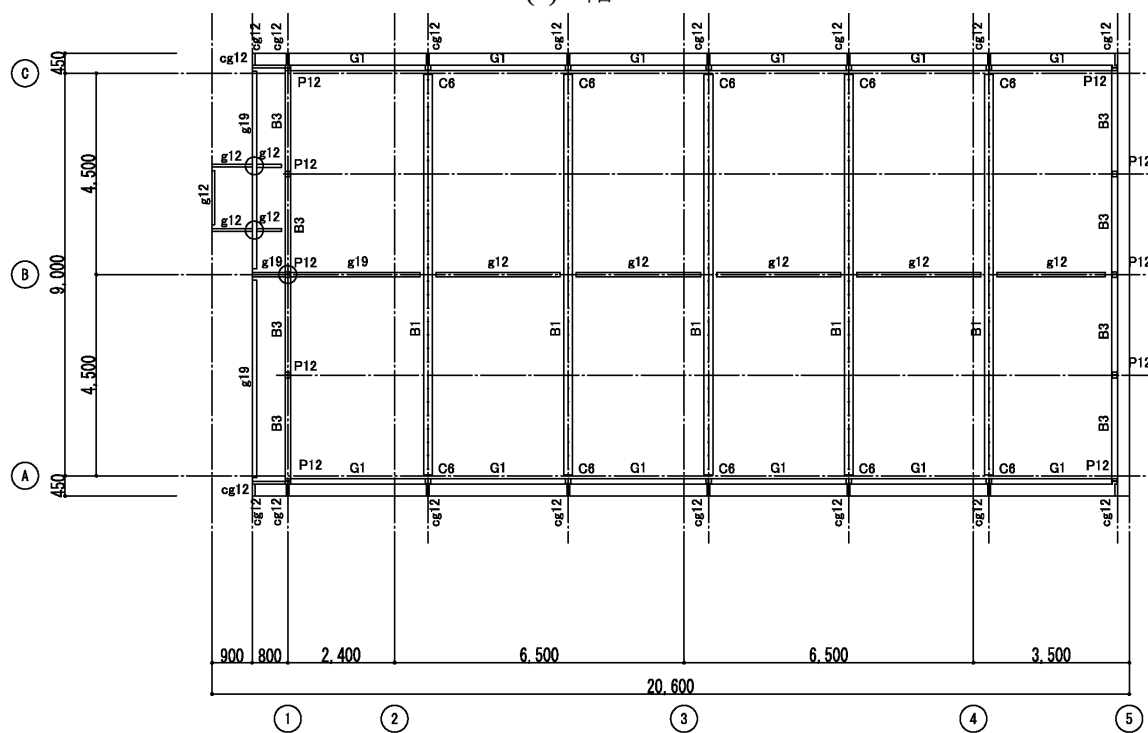


(6) 3m 階

図 3-5 梁伏図

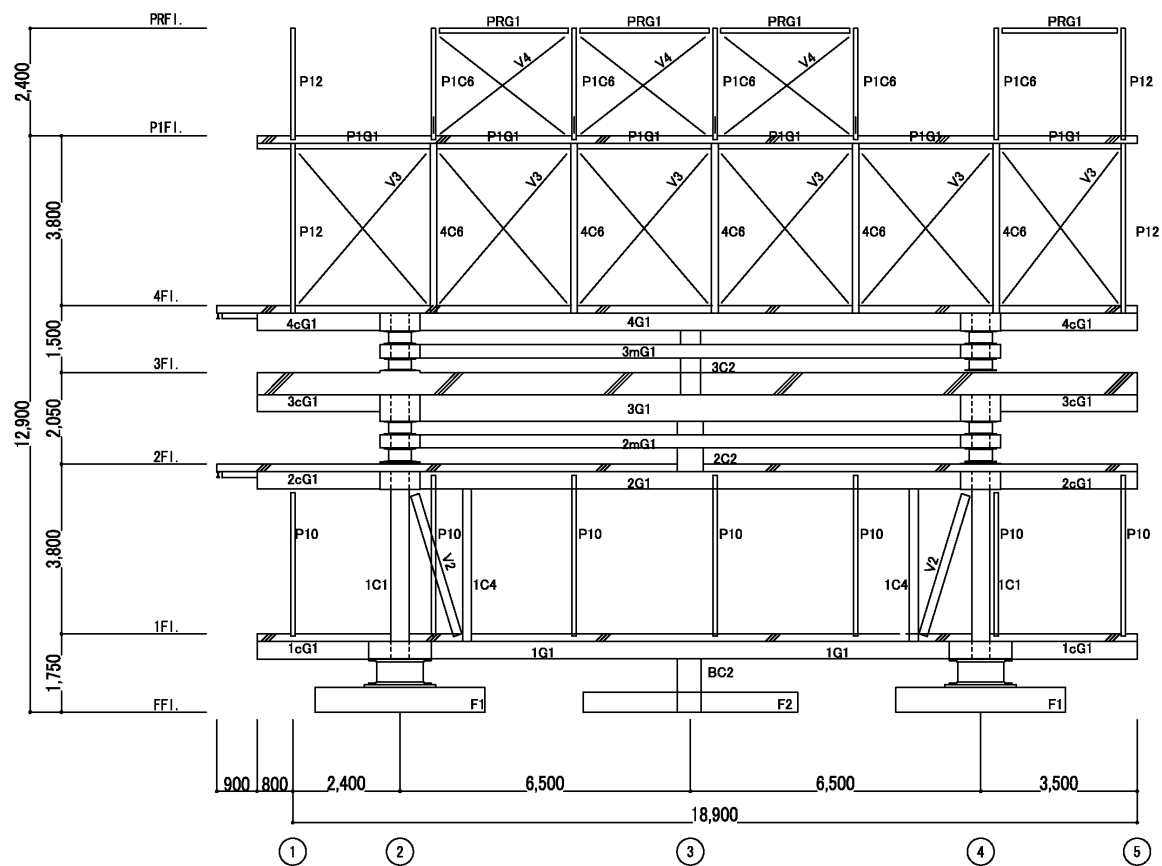


(7) 4階

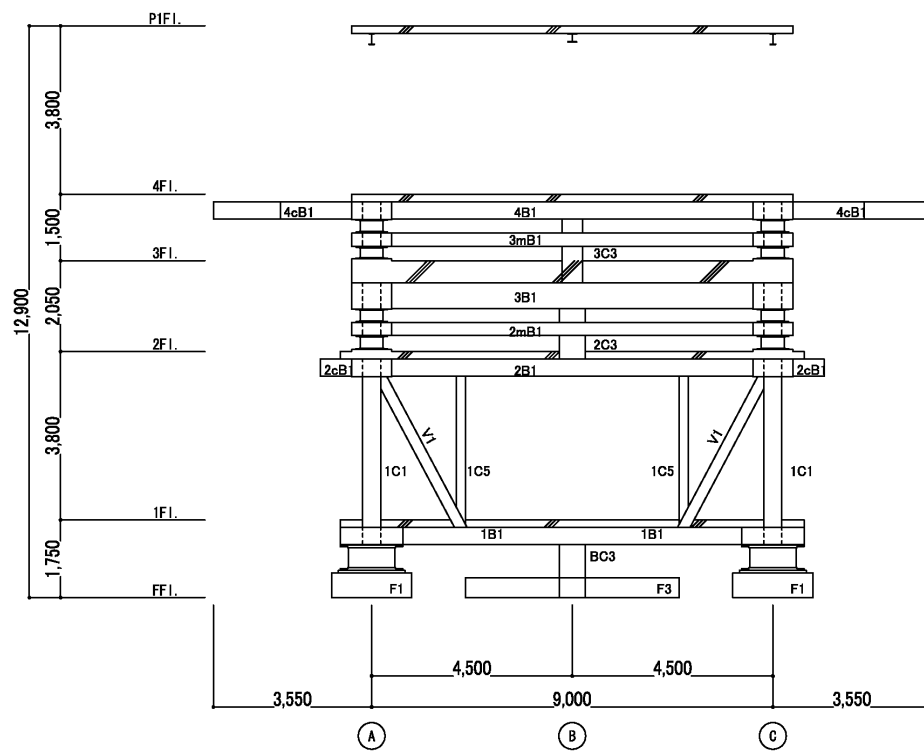


(8) 屋上階

図 3-5 梁伏図



(1) A・C 通り



(2) 2・4 通り

図 3-6 軸組図

表 3-1 部材リスト

(1) G 方向 大梁

階	cG1・cG2	G1	G2
PR		H-100×100×6×8	
P1		H-125×125×6.5×9	
4	BH-396×200×9×19	H-390×300×10×16	H-600×200×11×17
3m		H-300×300×10×15	
3	BH-590×200×12×19	H-588×300×12×20	H-440×300×11×18
2m		H-300×300×10×15	
2	H-396×199×7×11	H-390×300×10×16	H-400×200×8×13
1	H-396×199×7×11	H-390×300×10×16	H-390×300×10×16

(2) B 方向 大梁

階	cB1	B1	B2	B3
PR				H-100×100×6×8
P1		H-396×199×7×11		H-125×125×6.5×9
4	BH-396×400×12×19	H-390×300×10×16		H-396×199×7×11
3m		H-300×300×10×15		
3		H-582×300×12×17	H-440×300×11×18	
2m		H-300×300×10×15		
2	BH-396×400×32×25	H-390×300×10×16	H-400×200×8×13	
1		H-390×300×10×16	H-390×300×10×16	

(3) 柱

階	C1	C2	C3	記号	C4,C5,C6
4		H-400×200×8×13	H-400×200×8×13	PRC6	H-125×125×6.5×9
3m		H-400×200×8×13	H-400×200×8×13	P1C6	H-194×150×6×9
3		H-500×200×10×16	H-500×200×10×16		
2m		H-500×200×10×16	H-500×200×10×16	2C4	H-200×200×8×12
2	□-400×25			2C5	H-200×200×8×12
1		H-582×300×12×17	H-582×300×12×17		

(4) 小梁, 中柱, ブレース

記号		記号	
g12	H-125×60×6×8	V1	H-250×255×14×14
g19	H-198×99×4.5×7	V2	2[-200×90×8×13.5
g24	H-248×124×5×8	V3	2L -60×60×5
g39	H-390×199×7×11	V4	M-16
P10	H-100×100×6×8		
P12	H-125×125×6.5×9		

表 3-1 部材リスト

(5) 積層ゴム

階	名称	位置	本体ゴム					水平剛性 (kN/m)
			せん断剛性率 (N/mm ²)	外径 (mm)	厚さ (mm)	数量	総厚 (mm)	
3	R1	上段	0.39	500	3.75	33	124	630
	R2		0.59	600	4.5	30	135	1260
	R1,R2	下段	0.44	600	4.5	26	117	1090
2	R1,R2	上段	0.39	500	3.75	33	124	630
	R1,R2	下段	0.44	600	4.5	30	135	1260
	Rd		0.44	600	4.5	26	117	1090
B	R1	下段	0.44	1000	7.5	38	285	1210
	R2		0.29	1000	7.5	38	285	800
	Rd		0.59	800	6	15	90	3290

(6) 鋼材ダンパー

階	本数	板厚 (mm)	降伏せん断力 (kN)	初期剛性 (kN/m)	2次剛性 (kN/m)	弾性限度範囲 (mm)	限界変形 (mm)
2	4	40	232	8320	144	27.9	750
B	4	45	304	9600	160	31.7	850

表 3-2 試験体の設計用重量と層剛性

	階高 (m)	重量 (kN)	層剛性(kN/cm)			
			高層モデル		低層モデル	
PRFL	—	24	Y	X	Y	X
P1FL	2.4	880	(長辺)	(短辺)	(長辺)	(短辺)
4FL	3.8	1044	1110	408	1211	377
3mFL	0.88	101	37		4103	3932
3FL	0.62	2395			1775	1848
2mFL	1.36	119	32.5		7158	6817
2FL	0.66	909			4923	5420
1FL	3.8	1068	484	1105	705	1492
FFL	1.75	7	65		4097	4067

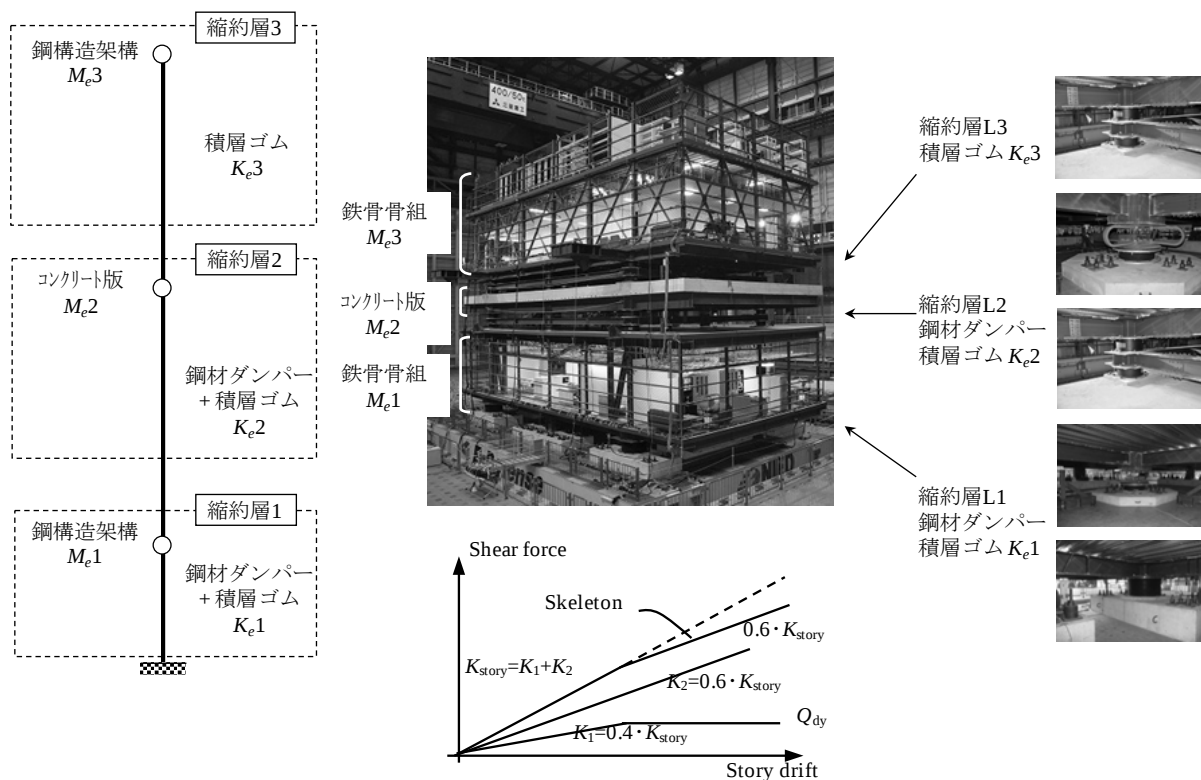


図 3-7 高層建物モデルの縮約層の概要

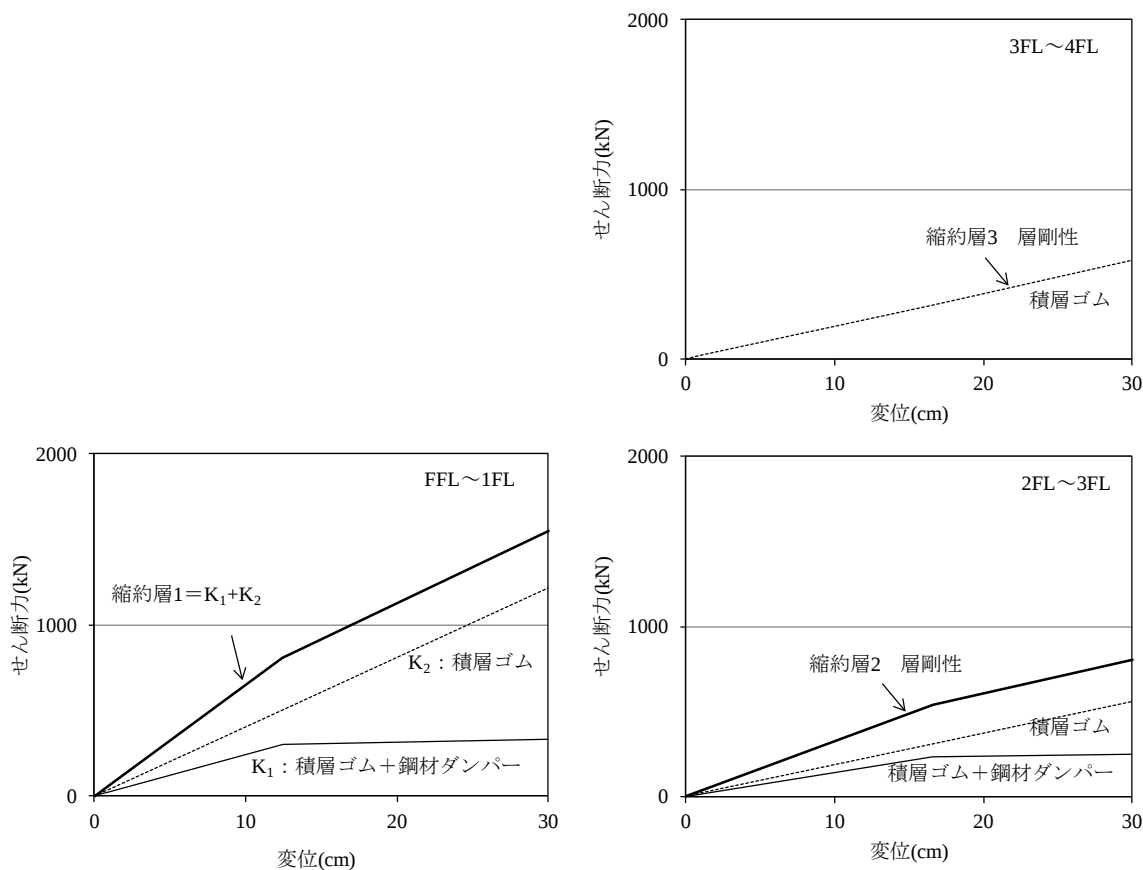


図 3-8 縮約層で設定したせん断力-変位関係

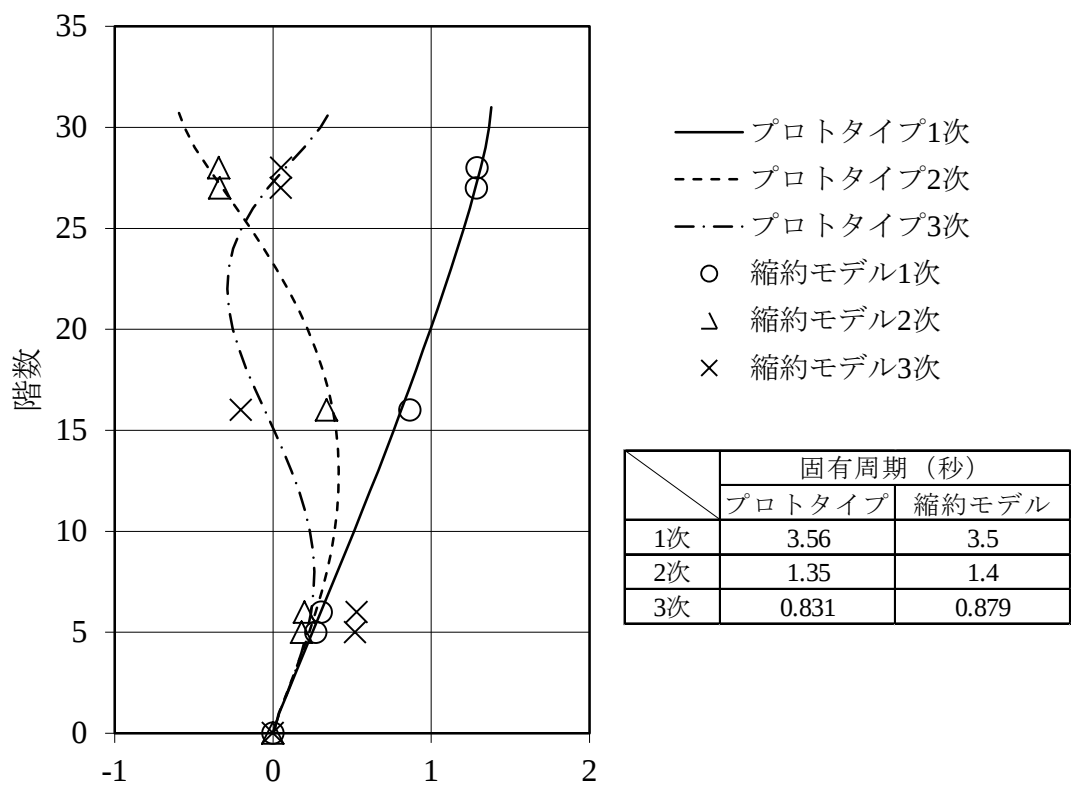


図 3-9 刺激関数の比較

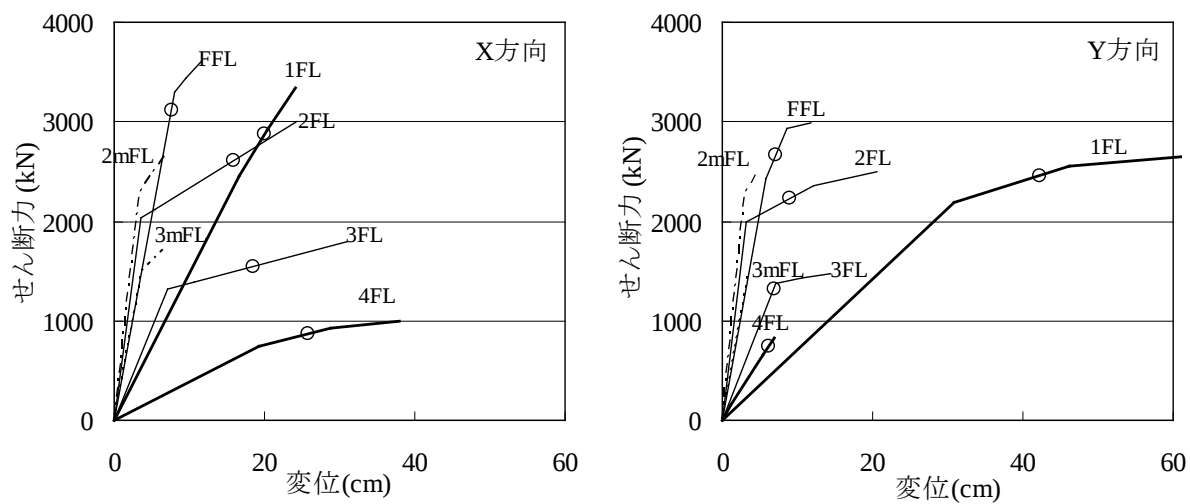


図 3-10 増分解析による低層モデルの層せん断力-変位関係

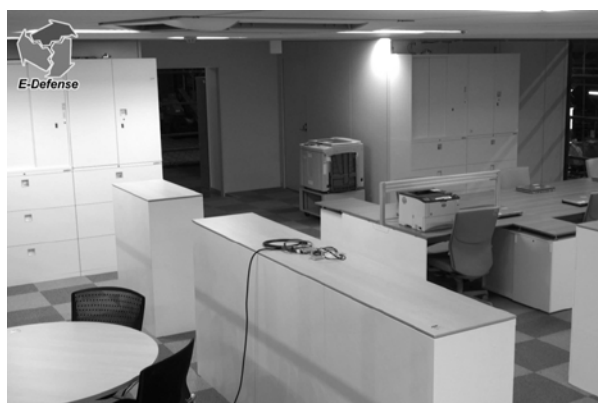
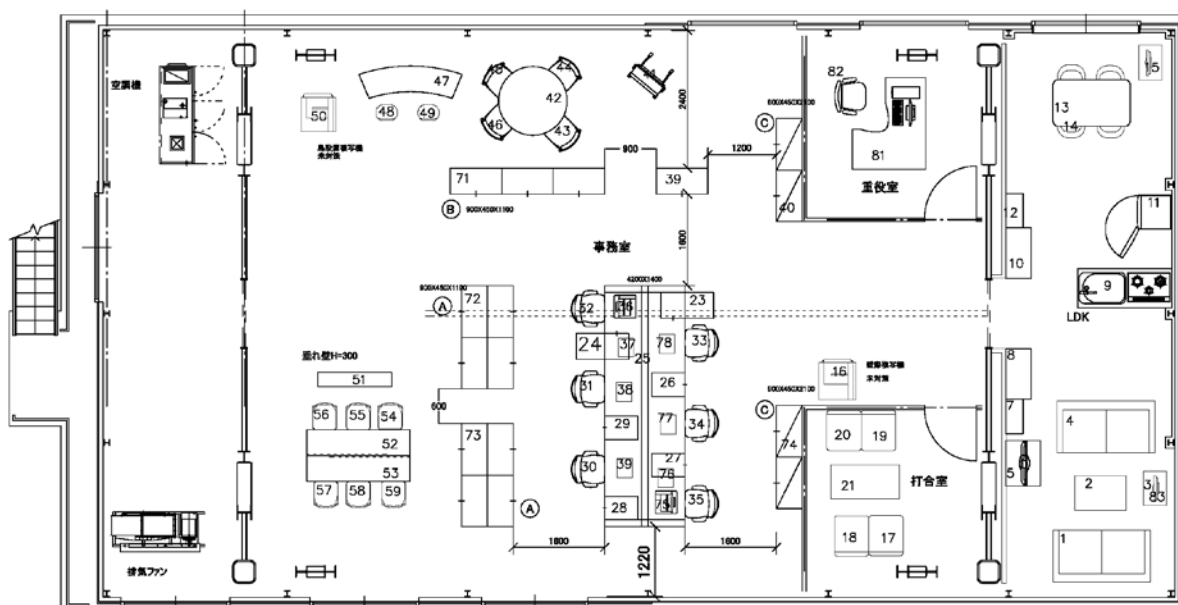
3.2.2 家具・什器の概要

実験室 1 と 2 は平面寸法 18.9m×9m、天井高 2.4m とし、実際に存在しうるオフィスの居室空間の規模を再現し、家具・什器を配置した。また超高層建物の上層階と下層階の揺れを同時に再現し、揺れの違いによる室内被害の違いの把握を目的として、実験室 1 と 2 とで家具・什器のレイアウトはほぼ同じ配置とした。さらに家具・什器の地震対策効果を検討するために、それぞれの実験室では移動・転倒防止対策を施したものと施さないものとを設置した。実験室 1 と 2 の家具の設置状況を図 3-11～図 3-12 に、設置リストを表 3-3～表 3-4 に示す。

実験室 1 と 2 では室内をオフィス用途部分と住宅用途部分とに分けてモデル化した。用途間の区切りには軽量鉄骨下地による間仕切り壁（④通り）を設置し、用途間同士の家具・什器が相互に干渉することが無いようにした。

オフィス用途部分の床はタイルカーペット（厚さ 6.5mm）仕上げとし、鋼製下地による OA 床（高さ 50mm）とした。また書棚等の収納什器については規定の最大積載荷重に相当する書籍を積載した。オフィス部分の家具の床固定設計用標準水平震度は 1.0 とし^{3.10)}、基本的に底面の四隅を床スラブにアンカーボルトで固定した。L字型レイアウトの間仕切壁を背にしたハイタイプの収納什器は床スラブ固定に加え、頂部を間仕切壁にビス固定した。またミドルタイプの収納什器のうち、不適切な転倒防止対策として OA 床にボルト固定した（表 3-3 および表 3-4 の家具番号 73）。コピー機は実験室 1、2 にそれぞれ 2 台設置した。実験室 1 に設置したコピー機は無対策とし、実験室 2 に設置したコピー機は 2 台とも粘着系のシートを用いた移動防止対策を施した。住宅用途部分の床はフローリング（厚さ 12mm）の直貼りとし、食器棚と書棚の転倒防止対策は、粘着系シートを貼った L 字型金具を用いて頂部を間仕切り壁に固定した。

屋上階の実験室 3 は一般的なオフィス部分と書庫ゾーンをモデル化した。床の仕上げはオフィス部分はタイルカーペットの直貼りとし、書庫ゾーンはビニルタイルの直貼りとした。オフィス部分の書棚はミドルタイプのものを配置し、転倒防止対策は間仕切壁への粘着シートによる固定とした。また書棚には最大積載荷重に相当する重量としてコンクリートブロックを積載した。書庫ゾーンの書庫はハイタイプのものを設置し、床固定設計用標準水平震度は 1.0 とし、底面の四隅を床スラブにアンカーボルトで固定した。また書庫には最大積載荷重に相当する書籍を積載した。図 3-13 に家具の設置状況を、表 3-5 に設置リストを示す。



オフィス部分

住宅部分

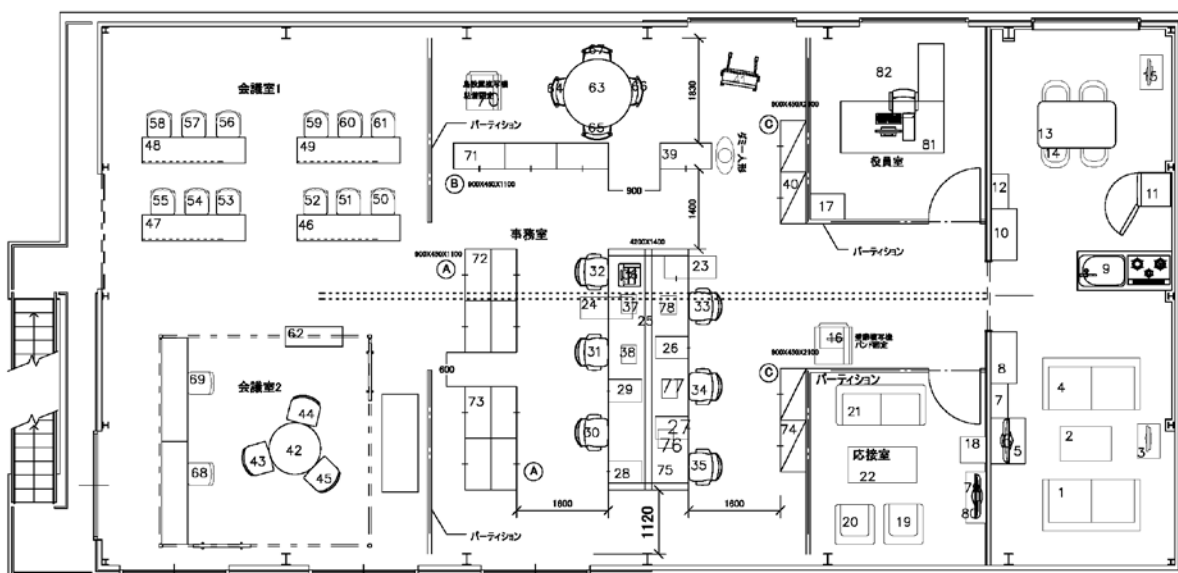
(2) 施工狀況

図 3-11 実験室 1 (1 階部分) の家具の状況

表 3-3 実験室 1 (1 階部分) に設置した家具の一覧

家具 番号	名 称	サイズ	備 考
		W*D*H*SH	
1	ソファ	900*1700*400*800	
2	ローテーブル	600*900*335	
3	PC台	600*400*1345	
4	ソファ	900*1700*400*800	
5	TV台	800*600*750	
6	TV	770*90*540	
7	棚	600*300*1750	
8	食器棚	880*440*1740	
9	キッチン	550*1655*800	
10	食器棚	880*440*1740	間仕切壁固定(粘着シート)
11	冷蔵庫	590*610*1600	
12	棚	600*300*1750	間仕切壁固定(粘着シート)
13	ダイニングテーブル	810*1350*700	
14	椅子 1	580*480*405*720	
	椅子 2	580*480*405*720	
	椅子 3	580*480*405*720	
	椅子 4	580*480*405*720	
15	PC台	600*400*1345	
16	コピー機	650*650*1000	
17	ソファ	700*600*900	
18	ソファ	700*600*900	
19	ソファ	700*600*900	
20	ソファ	700*600*900	
21	テーブル	600*1200*400	
23	ワゴン	390*900*650	
24	ワゴン	390*900*650	
25	机	4200*1400*720	
26	ワゴン	390*580*650	
27	ワゴン	390*580*650	
28	ワゴン	390*580*650	
29	ワゴン	390*580*650	
30	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
31	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
32	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
33	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
34	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
35	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
36	プリンタ	380*390*280	
37	ノートPC	330*270*40	
38	ノートPC	330*270*40	
39	棚	450*900*1200	
40	棚	1800*450*2150	
41	ホワイトボード	500*600*1700	
42	テーブル	1200*1200*720	
43	椅子(キャスター付)	480*480*450*850	
44	椅子(キャスター付)	480*480*450*850	
45	椅子(キャスター付)	480*480*450*850	
46	椅子(キャスター付)	480*480*450*850	
47	机	450*1650*1000	
48	椅子	280*380*680	
49	椅子	280*380*680	
50	コピー機	600*600*1080	
51	ホワイトボード	560*1290*1800	
52	机(キャスター解除)	450*1800*720	
53	机(キャスター解除)	450*1800*720	
54	椅子	420*440*430*800	
55	椅子	420*440*430*800	
56	椅子	420*440*430*800	
57	椅子	420*440*430*800	
58	椅子	420*440*430*800	
59	椅子	420*440*430*800	
71	棚	450*2700*1100	床スラブ固定
72	棚	1800*900*1100	床スラブ固定
73	棚	1800*900*1100	OA床固定
74	棚	1800*450*2150	床スラブ・間仕切壁固定
75	プリンタ	380*390*280	
76	ノートPC	330*270*40	
77	ノートPC	330*270*40	
78	ノートPC	330*270*40	
81	机	1200*1600*	
82	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	

※ハッチをかけた家具は転倒防止対策を施工



(1) 実験室 2 (4 階部分) の家具配置



オフィス部分



住宅部分

(2) 施工状況

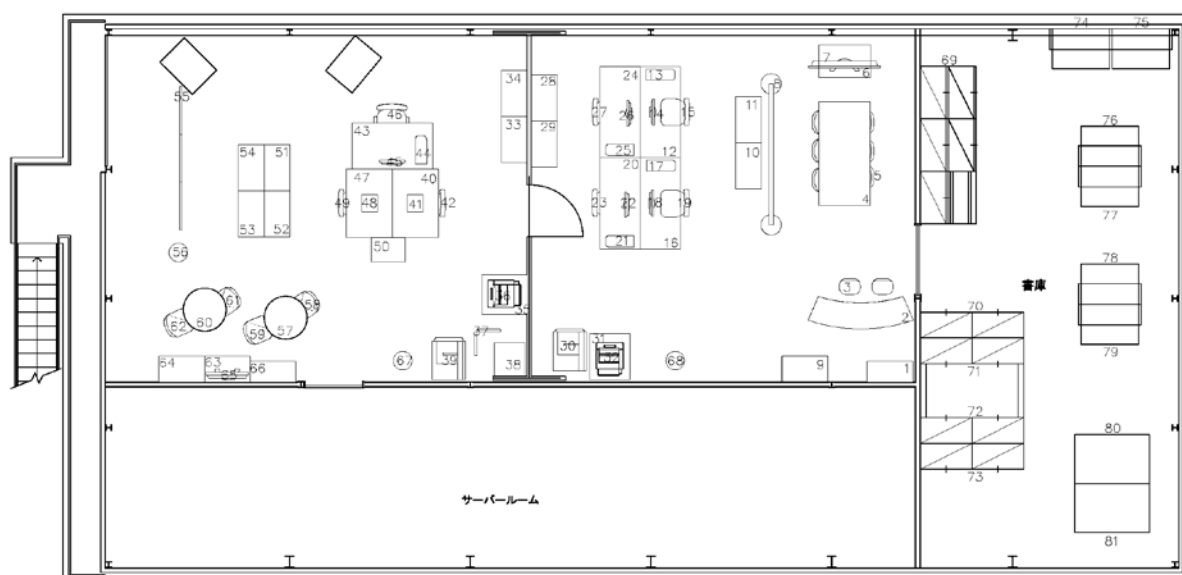
図 3-12 実験室 2 (4 階部分) の家具の状況

表 3-4 実験室 2（4 階部分）に設置した家具の一覧

家具 番号	名称	サイズ	備考
		W*D*H*SH	
1	ソファ	900*1700*400*800	
2	ローテーブル	600*900*335	
3	PC台	600*400*1345	
4	ソファ	900*1700*400*800	
5	TV台	800*600*750	
6	TV	770*90*540	
7	棚	600*300*1750	
8	食器棚	900*450*1810	
9	キッチン	550*1655*800	
10	食器棚	900*450*1810	間仕切壁固定(粘着シート)
11	冷蔵庫	590*610*1600	
12	棚	600*300*1750	間仕切壁固定(粘着シート)
13	ダイニングテーブル	810*1355*690	
14	椅子	580*480*405*720	
	椅子 2	580*480*405*720	
	椅子 3	580*480*405*720	
	椅子 4	580*480*405*720	
15	PC台	600*400*1345	
16	コピー機	650*650*1000	間仕切壁固定(粘着シート)
17	役員室棚	450*600*1800	
18	台	450*450*700	
19	ソファ	700*680*380*720	
20	ソファ	700*680*380*720	
21	ソファ	700*1560*380*720	
22	ガラステーブル	630*1200*400	
23	ワゴン	390*900*650	
24	ワゴン	390*900*650	
25	机	4200*1400*720	
26	ワゴン	390*580*650	
27	ワゴン	390*580*650	
28	ワゴン	390*580*650	
29	ワゴン	390*580*650	
30	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
31	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
32	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
33	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
34	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
35	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
36	プリンタ	380*390*280	
37	ノートPC	330*270*40	
38	ノートPC	330*270*40	
39	棚	450*900*1200	
40	棚	1800*450*2150	
41	ホワイトボード	500*600*1700	

家具 番号	名称	サイズ	備考
		W*D*H*SH	
42	テーブル	900*900*570	
43	椅子	530*450*480*790	
44	椅子	530*450*480*790	
45	椅子	530*450*480*790	
46	机(キャスター解放)	450*1800*720	
47	机(キャスター固定)	450*1800*720	
48	机(キャスター固定)	450*1800*720	
49	机(キャスター解放)	450*1800*720	
50	椅子	420*440*430*800	
51	椅子	420*440*430*800	
52	椅子	420*440*430*800	
53	椅子	420*440*430*800	
54	椅子	420*440*430*800	
55	椅子	420*440*430*800	
56	椅子	420*440*430*800	
57	椅子	420*440*430*800	
58	椅子	420*440*430*800	
59	椅子	420*440*430*800	
60	椅子	420*440*430*800	
61	椅子	420*440*430*800	
62	棚	350*1000*1985	
63	テーブル	1200*1200*720	
64	椅子(キャスター付)	480*480*450*850	
65	椅子(キャスター付)	480*480*450*850	
66	椅子(キャスター付)	480*480*450*850	
67	椅子(キャスター付)	480*480*450*850	
68	椅子	390*450*700*870	
69	椅子	390*450*700*870	
70	コピー機	600*600*1080	OA床固定(粘着シート)
71	棚	450*2700*1100	床スラブ固定
72	棚	1800*900*1100	床スラブ固定
73	棚	1800*900*1100	OA床固定
74	棚	1800*450*2150	床スラブ・間仕切壁固定
75	プリンタ	380*390*280	
76	ノートPC	330*270*40	
77	ノートPC	330*270*40	
78	ノートPC	330*270*40	
79	TV	770*90*540	
80	TV台	900*350*350	
81	机	1900*1800*720	
82	椅子(キャスター付)	500*520*450*920	
83	モニター	345*60*280	
84	タワー	90*330*310	
A	ホワイトボード	1700*630*1960	

※ハッチをかけた家具は転倒防止対策を施工



(1) 実験室3（屋上階部分）の家具配置



全景



オフィス部分

(2) 施工状況

図 3-13 実験室3（屋上階）の家具の状況

表 3-5 実験室3（屋上階）に設置した家具の一覧

家具 番号	名称	サイズ	備考
		W*D*H*SH	
1	オープン棚	355*800*1400	
2	机	450*1650*1000	
3	椅子 1	280*370*680	
	椅子 2	280*370*680	
4	机	1800*900*720	
5	椅子 1	420*430*440	
	椅子 2	420*430*440	
	椅子 3	420*430*440	
	椅子 4	420*430*440	
	椅子 5	420*430*440	
	椅子 6	420*430*440	
6	TV台	570*900*1130	
7	TV	120*1250*735	
8	パーテーション	2460*70*2150	
9	棚1	450*800*1200	
10	棚2	798*450*1207	
11	棚3	798*450*1207	
12	机	1590*695*700	
13	ハードディスク	200*500*430	
14	ディスプレイ	450*60*480	
15	椅子	470*470*860	
16	机	1590*695*700	
17	ハードディスク	190*440*420	
18	ディスプレイ	420*60*410	
19	椅子	470*470*860	
20	机	1590*695*700	
21	ハードディスク	190*440*420	
22	ディスプレイ	420*60*410	
23	椅子	470*470*860	
24	机	1590*695*700	
25	ハードディスク	200*500*430	
26	ディスプレイ	420*60*410	
27	椅子	470*470*860	
28	棚2	798*450*1207	間仕切壁固定(粘着シート)
29	棚1	450*800*1200	間仕切壁固定(粘着シート)
30	コピー機	580*670*1230	床スラブ固定(粘着シート)
31	机	795*695*690	
32	プリンター	510*480*270	
33	棚5	798*450*1207	
34	棚3	798*450*1207	
35	机	795*695*690	
36	プリンター	470*485*305	
37	パーテーション	400*50*1625	
38	金庫	545*570*900	
39	コピー機	580*670*1230	
40	机	1190*800*700	
41	ノートPC	305*270*260	
42	椅子	470*470*860	
43	机	800*1400*700	
44	ハードディスク	450*190*420	
45	ディスプレイ	160*420*400	
46	椅子	530*570*470*930	
47	机	1190*800*700	
48	ノートPC	365*270*285	
49	椅子	470*470*860	
50	台	420*600*640	
51	棚3	798*450*1207	
52	棚2	800*450*1180	
53	棚4	800*450*1180	
54	棚4	800*450*1180	
55	パーテーション	2500*40*1620	
56	観葉植物	320*320*1800	
57	テーブル	750*750*700	
58	椅子	400*400*440	
59	椅子	400*400*440	
60	テーブル	750*750*700	
61	椅子	400*400*440	
62	椅子	400*400*440	
63	棚1	450*800*1200	
64	棚1	450*800*1200	
65	TV	110*740*440	
66	オープン棚	355*800*1400	
67	観葉植物	320*320*1800	
68	観葉植物	320*320*1800	
69	移動書架	2740*970*1800	床スラブ固定
70	書棚	900*450*1800	床スラブ固定
71	書棚	900*450*1800	床スラブ固定
72	書棚	900*450*1800	床スラブ固定
73	書棚	900*450*1800	床スラブ固定
74	机	1000*700*600	
75	机	1000*700*600	
76	机	1000*700*600	
77	机	1000*700*600	
78	机	1000*700*600	床スラブ固定
79	机	1000*700*600	床スラブ固定
80	机	1300*850*600	床スラブ固定
81	机	1300*850*600	

※ハッチをかけた家具は転倒防止対策を施工

3.2.3 非構造部材の概要

これまでの天井は、室内の上面を仕切る仕上げ面としての役割が主であったのに対し、システム天井は、照明・空調・防災の諸設備とそれらの配管・ダクト類を系統的かつ高度に複合化した天井である。その構成部材もすべての工場加工部品で組み立てられるため施工性や経済性に優れ、超高層建物の増加とともに、工程管理が容易なことも起因して、システム天井は大規模オフィスビルはもとより、小規模オフィスビルまで採用されるようになった。そこで高層のオフィスビルの室内空間をモデル化した本実験では、試験体の実験室にはシステム天井をモデル化した。なお住宅用途部分は在来天井とした。図 3-14 にシステム天井のタイプ^{3.11)}を示す。

ラインタイプは設計モジュールによって設備ゾーンをライン状に配置しその中央部にアルミまたはスチール製の T バーラインを走らせ、厚さ 15mm の天井ボード（ロックウール化粧吸音板）に H バーを差し込みながら設備ゾーンと T バーのラインの間に乗せて張り上げる工法である。T バーは直交方向に配置される T バー受けチャンネルと軽鉄金具で連結される。設備ゾーンの点検口を設置する場合は、点検時に着脱可能となるように専用の軽鉄下地で取り付けられる。

ラインタイプの長尺タイプは、長尺の天井ボードで構成されるため仕上がりがすっきりとなるだけでなく、T バー受けチャンネルに直交して配置される H バー受けチャンネルが設置されるため、耐震性も向上する。

グリッドタイプは、天井ボードや照明器具、設備機器等を T バーで組まれた格子内に落とし込む工法であり、施工性が高い工法である。天井ボード（600mm 角）の全てが施工後も着脱可能であるため、設備機器の増設・移設・撤去なども容易にできる。また天井ボードの四辺が T バーにより支えられているため、1 方向で支えられるラインタイプよりも耐震性が高いとされている。

システム天井のタイプ別の地震被害の分布を図 3-15 に示す^{3.12), 3.13)}。1995 年の阪神淡路大震災の頃はグリッドタイプの施工件数が少なかったため被害事例は報告されていないが、2011 年東日本大震災の際には約 1 割がグリッドタイプとなっている。システム天井はこれまで意匠性の高さからラインタイプが多く用いられていたが、近年、設備機器や照明の施工性や耐震性の高さからグリッドタイプの施工が増えている。そこで実験室内にはラインタイプとグリッドタイプの 2 種類をモデル化した。

システム天井の地震被害は、T バー等の軽鉄下地材と天井ボードが一体のまま全面落下する被害は少なく、天井ボードのみが落下するケースが多い。そのため天井ボードの破損や落下は、①壁・柱際、②間仕切壁周辺、③空調機等の周辺での発生が多いことが報告されている^{3.12)}。そこで本実験では②③の影響に着目したモデル化を行った。

図 3-16 に実験室 1 および実験室 2 でモデル化した天井の区分を示す。A～B 通りはラインタイプ、B～C 通りはグリッドタイプとした。またラインタイプは③～④通りをライン長尺タイプとした。それぞれの天井タイプの境界となる B 通りには剛な垂れ壁を天井面まで設け、天井同士が干渉しない様にモデル化した。なお、天井面の外周部にはクリアランスは設定しておらず天井ボードは廻縁上に置かれている。④～⑤通り間は集合住宅の用途をモデル化したため、直貼り工法による在来天井とした。境界となる④通りには、LGS 下地による間仕切り壁（壁勝ち）で仕切られている。また、天井面の外周部の間仕切り壁以外に、天井面の下に設けられる天井勝ちタイプの可動間仕切壁として、オフィスで非耐力壁・中間仕切として用いられることが多い鋼製間仕切壁を配置した。③～④通り間に L 字型レイアウトを、②～③通り間に一直線レイアウトを設置した。

鋼製間仕切壁の上端は天井面に固定し、下端は床スラブにアンカーしたフリーアクセス床上の金具に固定した。

図 3-17 に実験室 2 の天井伏図を示す。天井のふところは 1.2m とり、オフィスビルの天井として実際に施工され得る高さを確保した。天井下地への振れ止めのブレースの有無による耐震性の比較を行うために、高層モデルの場合にはブレースを設置し、低層モデルの場合にはブレースを撤去して実験を行った。振れ止めブレースの設置は文献 3.14 の天井耐震基準に準拠し、1 対のブレースの分担面積の上限 18m^2 を考慮して 4 対設置した。ただし、長辺方向についてはブレース設置の最大間隔の制限^{3.14)}を考慮し 6 対のブレースを配置した。

なお、天井の耐震性に関する国などの動きは 2001 年芸予地震以降、国土交通省より主に大規模空間での天井の崩落対策に関する技術的助言が出されていた。しかし東日本大震災およびその余震における多数の施設における天井被害を受けて、平成 26 年 4 月 1 日に天井脱落対策に係る一連の技術基準告示（国土交通省平成 25 年告示第 771 号他）が施行された。この告示では脱落によって重大な危害を生じるおそれがある天井を特定天井とし、その天井の耐震性の検証方法が示されており、6m 超の高さにある面積 200m^2 超、質量 $2\text{kg}/\text{m}^2$ 超の吊り天井で、人が日常利用する場所に設置されているものが特定天井とされている。耐震性の検証方法のうち仕様規定では、天井面と壁との間に 6cm 以上のクリアランスを設けること、天井材に斜め部材（ブレース）を配置し振れ止めとすること、天井材はねじやボルト等により相互に緊結すること等の仕様が定められている^{3.15)}。さらに平成 28 年 5 月 31 日には新たな特定天井の技術基準として、壁との間のクリアランスを設けない隙間無し天井について関連告示の改正が行われ、平成 28 年 6 月 1 日より施行されている。平成 28 年の告示では、壁とのクリアランスを設けずに天井の地震力を壁等で負担する考え方となっており、振れ止め用の斜め部材も設けないものとなっている^{3.16)}。

本章で対象としている実験の天井は、面積や高さ等の規模から特定天井には入らず、また告示ではシステム天井は対象外とされているため、特定天井には相当しない試験体である。ただし、天井面と壁面との隙間の無い設計となっており、天井の地震力の分担については平成 28 年の告示に近い境界条件のモデルになっている。

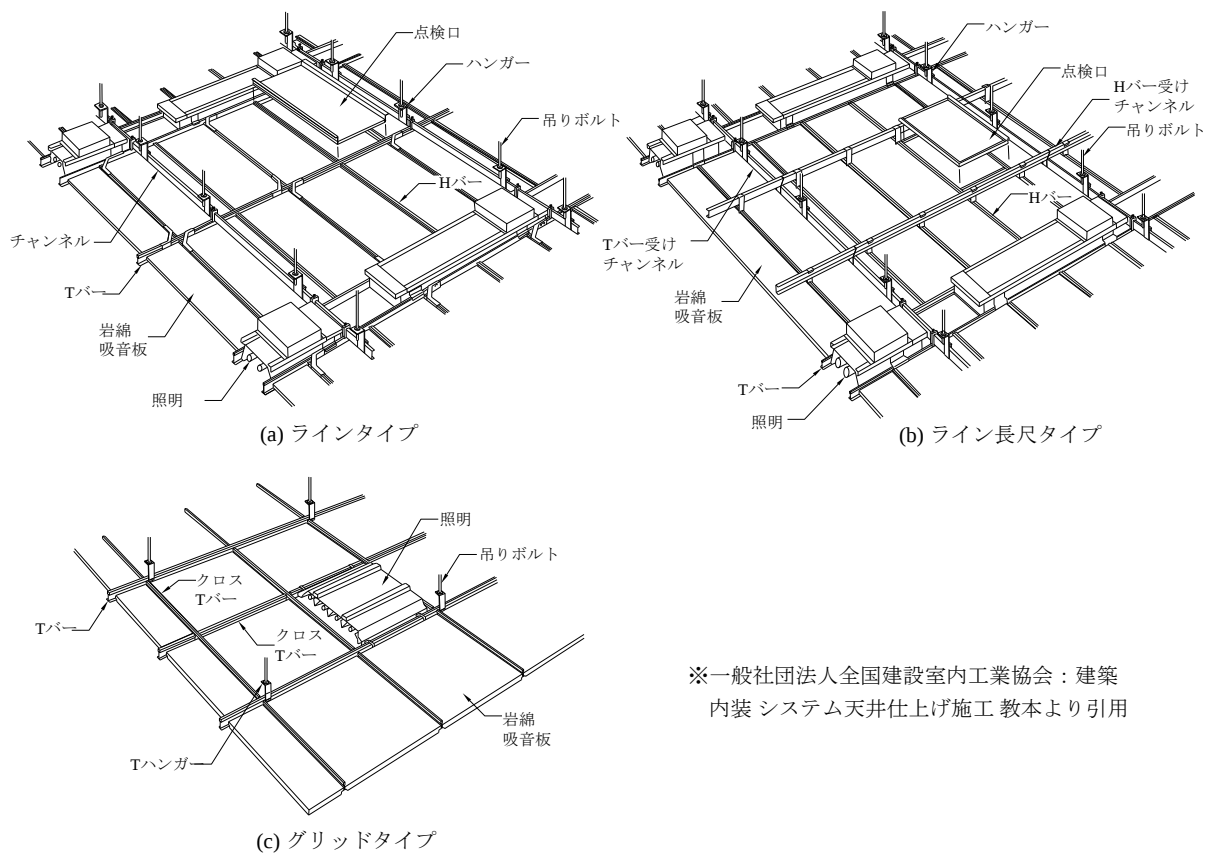


図 3-14 システム天井のタイプ

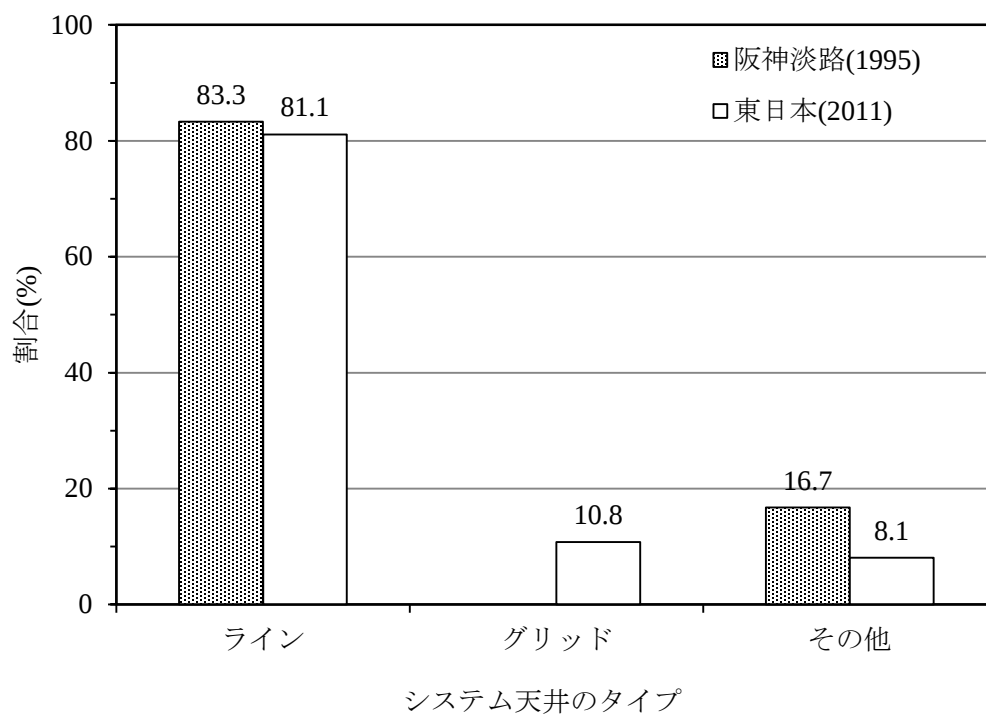
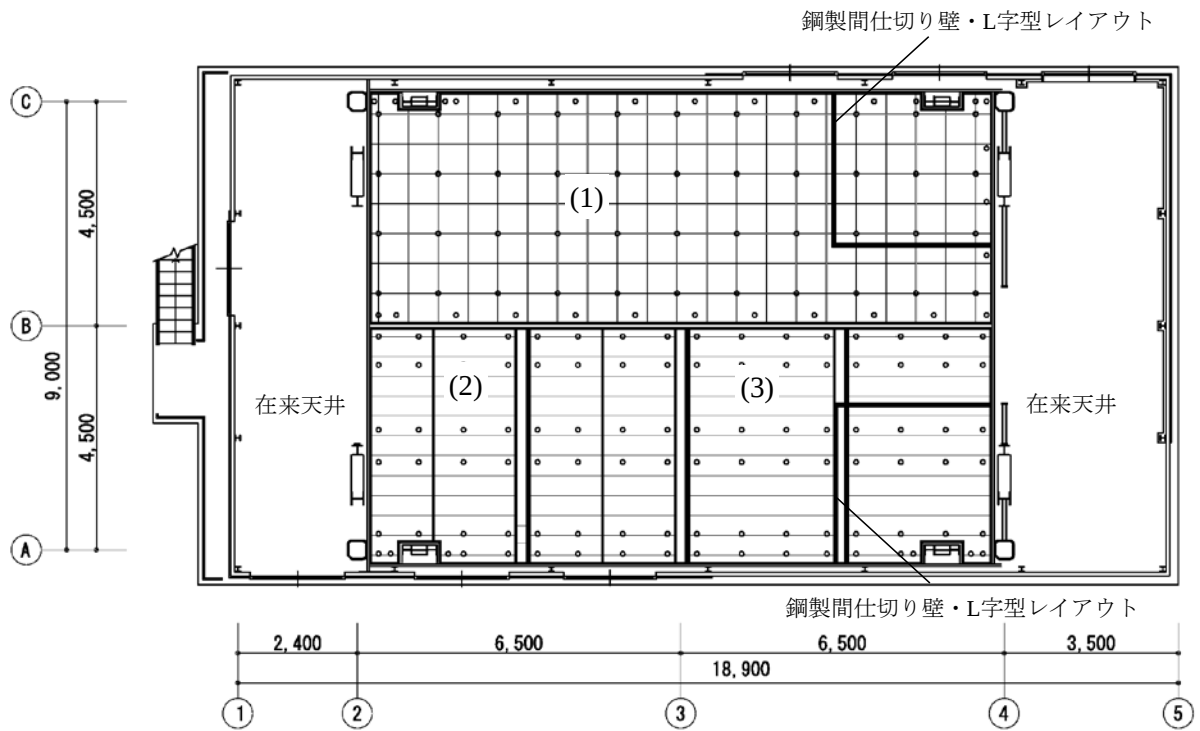
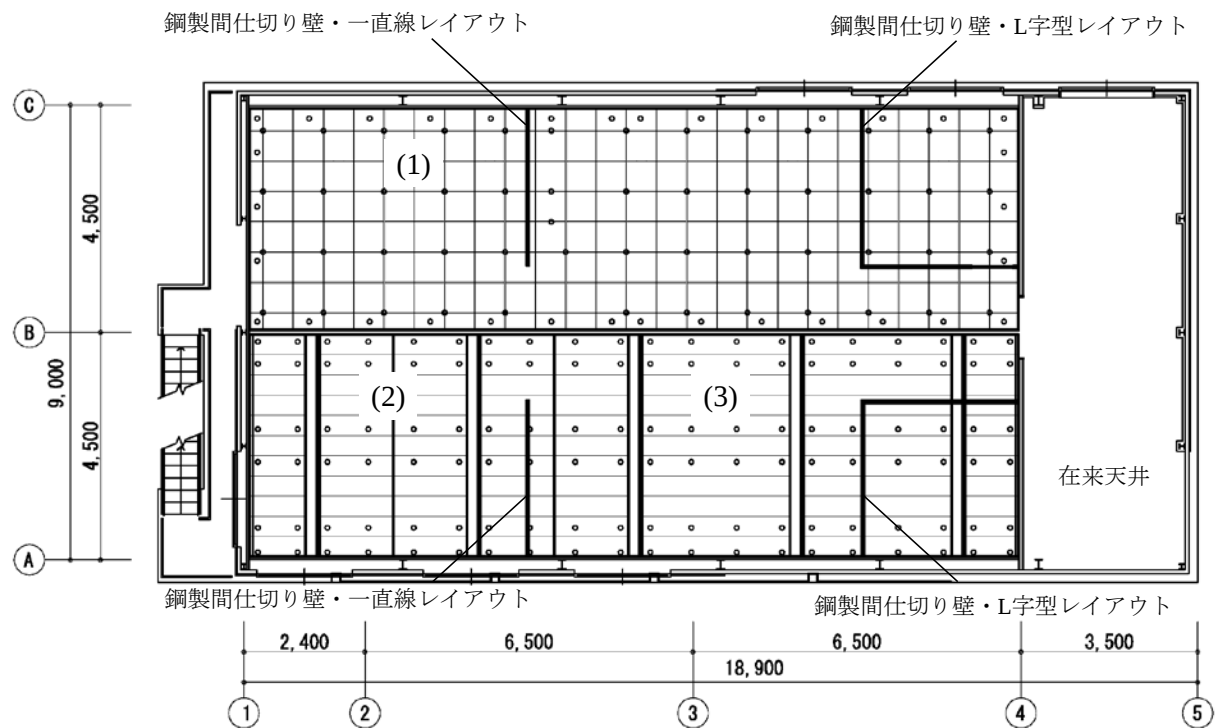


図 3-15 システム天井のタイプによる地震被害



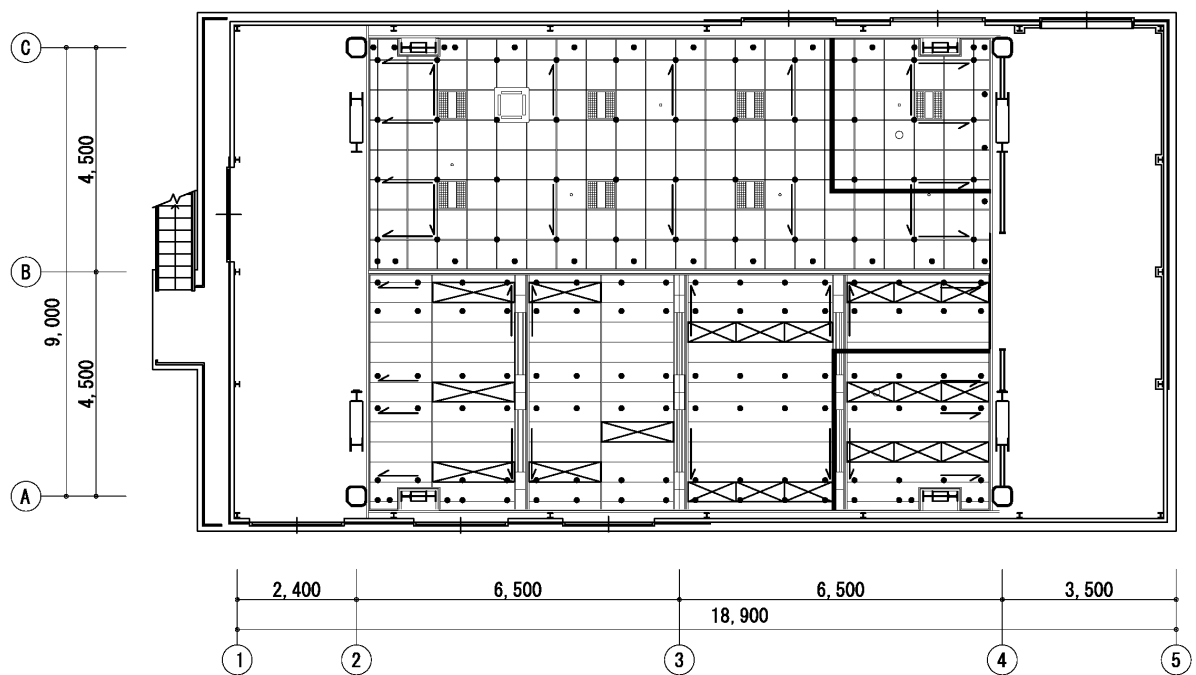
実験室 1 (1 階部分)



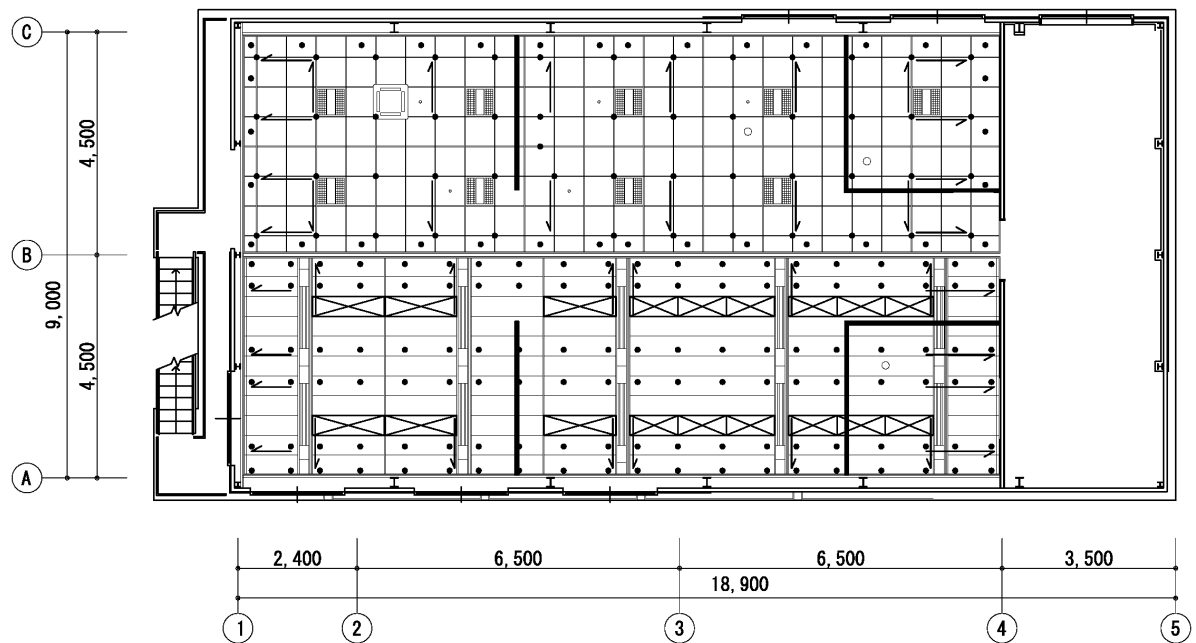
実験室 2 (4 階部分)

※図中、(1)はグリッドタイプ、(2)はラインタイプ、(3)はライン長尺タイプ

図 3-16 実験室にモデル化した天井のタイプ



実験室 1 (1 階部分)



実験室 2 (4 階部分)

 : ラインタイプ点検口
  : ブレース
 • : 吊りボルト

天井重量 ライン天井 8.4kg/m² グリッド天井 7.3kg/m²
 (ただし、天井面への埋め込み型の機械設備や電気の重量は含まず)

図 3-17 システム天井の天伏図

3.2.4 建築設備と消防設備の概要

オフィス建物の天井内には、空調関係の建築設備をはじめスプリンクラーなどの消防設備が躯体から吊り下げ式で配置されている。地震時にはこれらの吊り設備と天井下地材との相互干渉などにより室内被害が発生することは、これまでの震災調査の被害事例などでも報告されている。しかし、建築設備や消防設備を含めた天井の実大規模の振動実験の実施はほとんど無い。そこで本実験ではこれらの設備と実際にモデル化した振動実験を行った。

実験室 1 と実験室 2 の天井内には空調設備と消防設備をモデル化して配置した。実験室 1 に設置した設備の平面位置を図 3-18 に、表 3-6 に空調設備の一覧を示す。また実験室 2 に設置した設備の平面位置を図 3-19 に、表 3-7 に空調設備の一覧を示す。各種の小型空調機は四隅を吊りボルト（M10）で上層階の床から吊り下げ形式で天井内に配置されており、実際の施工状況をモデル化するために、各空調機はフレキダクトでシステム天井面の吹出口に接続されている。消防用設備としてスプリンクラーの横引き配管が天井内に、天井面にはスプリンクラーヘッドを設置した。横引き配管は 40A の鋼管（SGP）とし、スプリンクラーヘッドまでの巻き出し管は 25A とし鋼管（SGP）の場合、ステンレス製自在管（SUS）の場合、および樹脂管の場合の 3 タイプをモデル化した。樹脂管は近年、マンションなどの集合住宅での施工事例が多いことから、住宅用途をモデル化したエリアに設置した。なお試験体 4 階の SGP の横引き配管には耐震クラス S 相当の振れ止めを設置した。また実験室 1 には床置き排煙ファン、および床置き空調機ファンを設置した。消防設備として床置き排煙ファンは天井内に設置した排煙ダクトと接続しており、排煙ダクトからは在来天井面に 2 ヶ所の排気口が設置されている。床置き空調機ファンはフレキダクトによりシステム天井面に設置した 6 ヶ所の吹き出し口と接続させた。図 3-20 に建築設備および消防設備の施工状況を示す。

今回の振動実験では地震時の振動による機械設備の機能維持を検討するために、空調機を稼働させたまま、スプリンクラーは満水加圧状態として加振実験を行った。振動実験後には空調機の動作確認およびスプリンクラー設備からの漏水の有無と配管圧の変化を確認した。排煙ファンは実験後に稼働させて動作状況の確認を行い、地震発生以降の火災に対する機能維持を確認した。

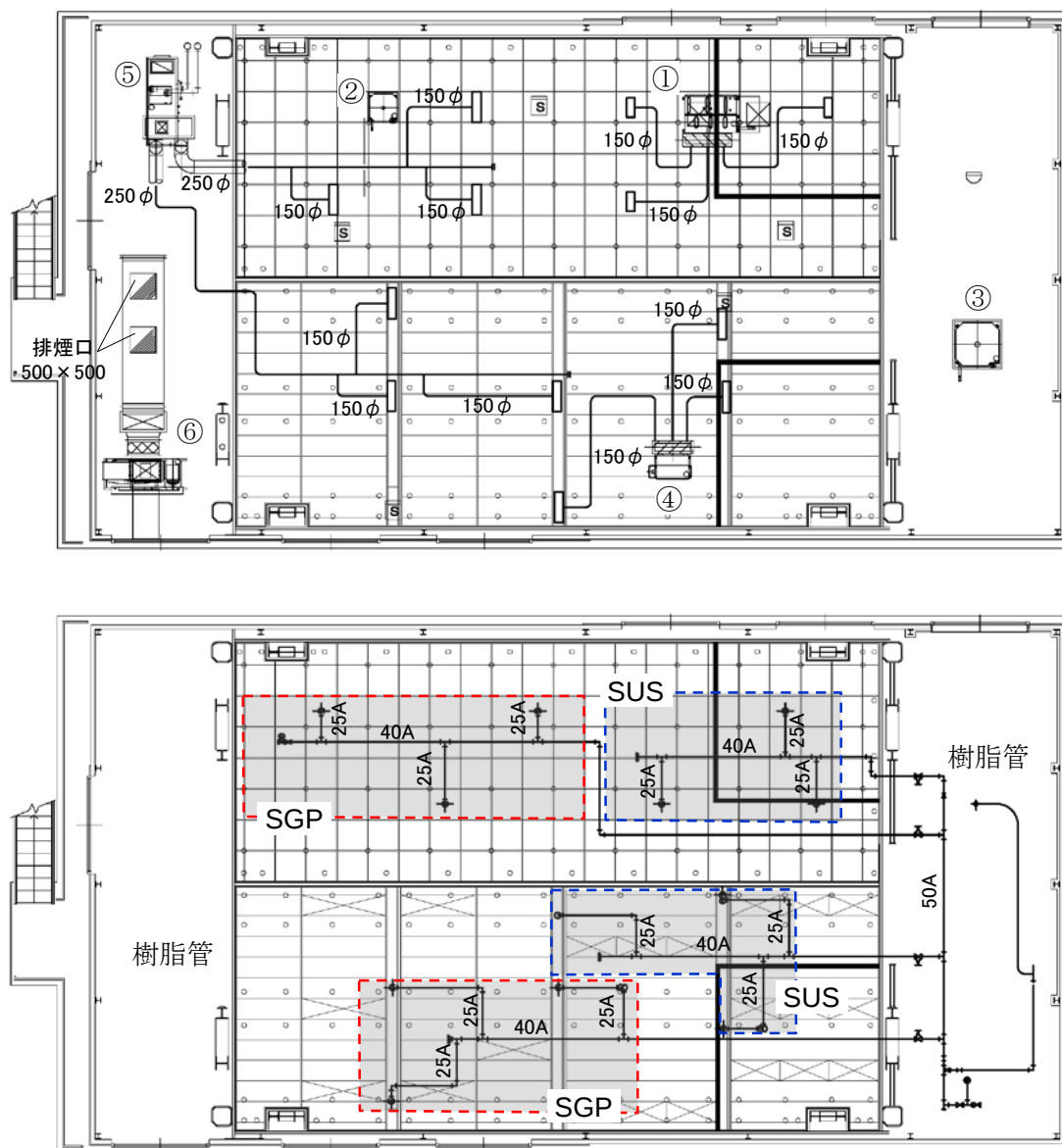


図 3-18 実験室 1 に設置した建築設備と消防設備

表 3-6 実験室 1 に設置した建築設備一覧

設置階	記号	機器名称	仕様能力	動力	防振	X 状振れ防止
1 階	①	天井隠蔽形室内機	7KW	40W	×	×
	②	600 角カセット形室内機	5KW	75W	×	×
	③	950 角カセット形室内機	7KW	56W	×	×
	④	天井隠蔽形 FCU	#300	51W	×	×
	⑤	床置き空調機（ファン）	2400CMH	1.5KW	○	—
	⑥	床置き排煙ファン	#3 1/2	2.2KW	○	—

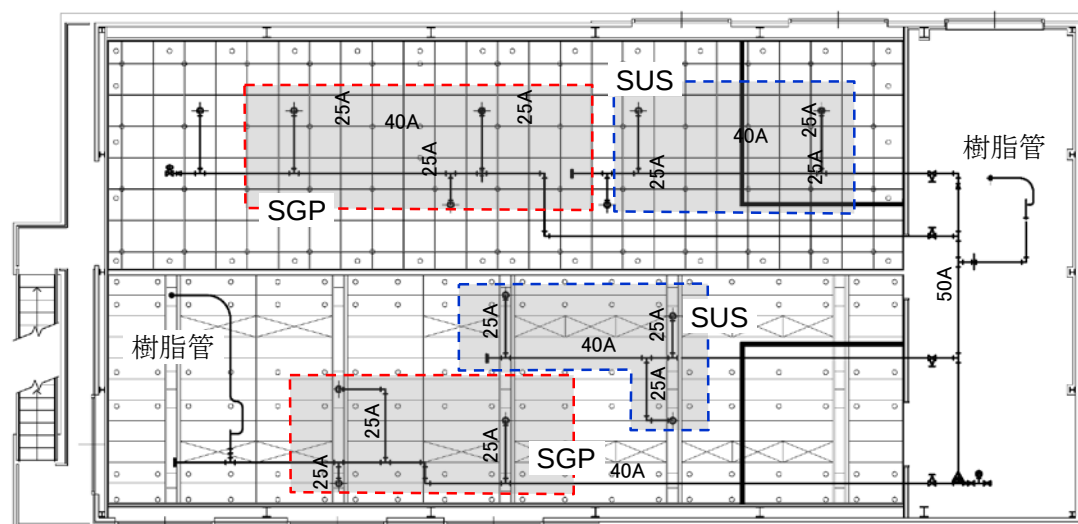
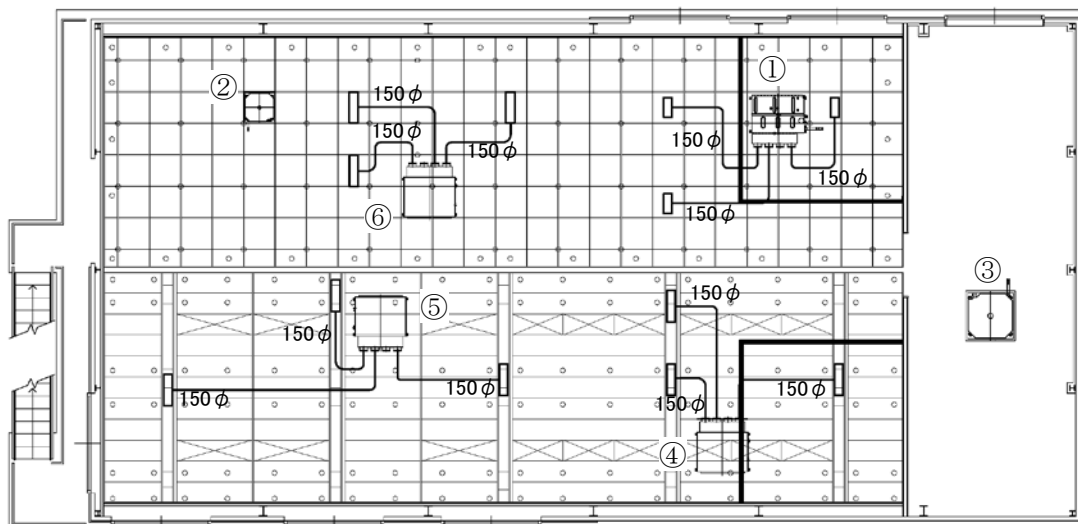


図 3-19 実験室 2 に設置した建築設備と消防設備

表 3-7 実験室 2 に設置した建築設備一覧

設置階	記号	機器名称	質量 (kg)	吊長さ (mm)	防振	X 状振れ防止
4 階	①	天井隠蔽形室内機	36	425	○	○
	②	600 角カセット形室内機	18	830	○	—
	③	950 角カセット形室内機	22	830	○	—
	④	天井隠蔽形ファンコイルユニット	34.5	480	○	○
	⑤	天井隠蔽形ファンコイルユニット	34.5	480	—	—
	⑥	天井隠蔽形ファンコイルユニット	34.5	480	—	—



(1) 1階・縦型空調機



(2) 1階・排煙機



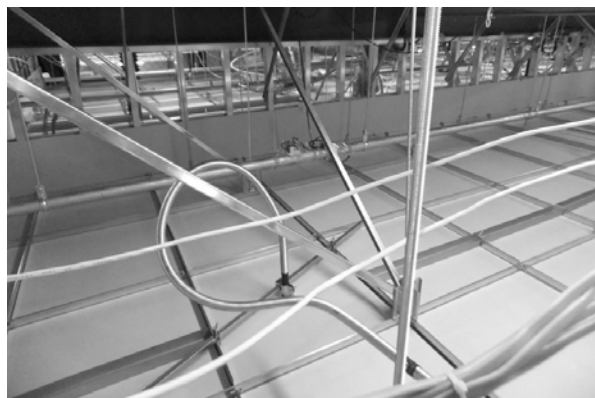
(3) 4階・天井隠蔽型空調機



(4) グリッド天井部分での配管



(5) スプリンクラーのSGP巻出し配管



(6) スプリンクラーのSUS巻出し配管



(7) スプリンクラーの樹脂管による配管



(8) 4階・振れ止め付きのスプリンクラー配管

図 3-20 設備関係の施工状況

3.2.5 入力地震動

振動実験における入力地震動の設定では、Eーディフェンス震動台実験で数多くの実験がある1995年兵庫県南部地震の気象庁神戸海洋気象台観測波（以降 JMA 神戸と記す）、首都圏地震観測網^{3.17)} MeSO-net において、平成 23 年東北地方太平洋沖地震の際に観測された地震動を用いた。

MeSO-net は首都直下地震防災・減災特別プロジェクトの「サブプロジェクト 1 首都圏におけるプレート構造調査・震源断層モデル構築等」で東京大学地震研究所が首都圏内に約 400 地点に設置した高密度な地震観測網である。MeSO-net の加速度計は地下 20m に設置され、24 時間の連続観測をしているため、地表面でのトリガー観測記録に比べて、主要動後の振幅レベルの小さい長周期地震動の取残しが無い記録を作成することができる。ただし MeSO-net の地震計は地下 20m であるため、表層 20m 分の地盤の増幅特性が含まれていない。そのため地表面における観測記録と比較すると、表層部分で励起される高振動数成分が減衰しており、地表面での観測記録よりもやや小さめの記録となっている。今回の実験対象は高層建物であり、一般に高層建物は地下階を有するため地中深くに支持されていることが多い。そこで実験では高層建物の地下階に MeSO-net の観測記録が入力されて上層階に伝達することを想定し、観測記録をそのまま用いた。

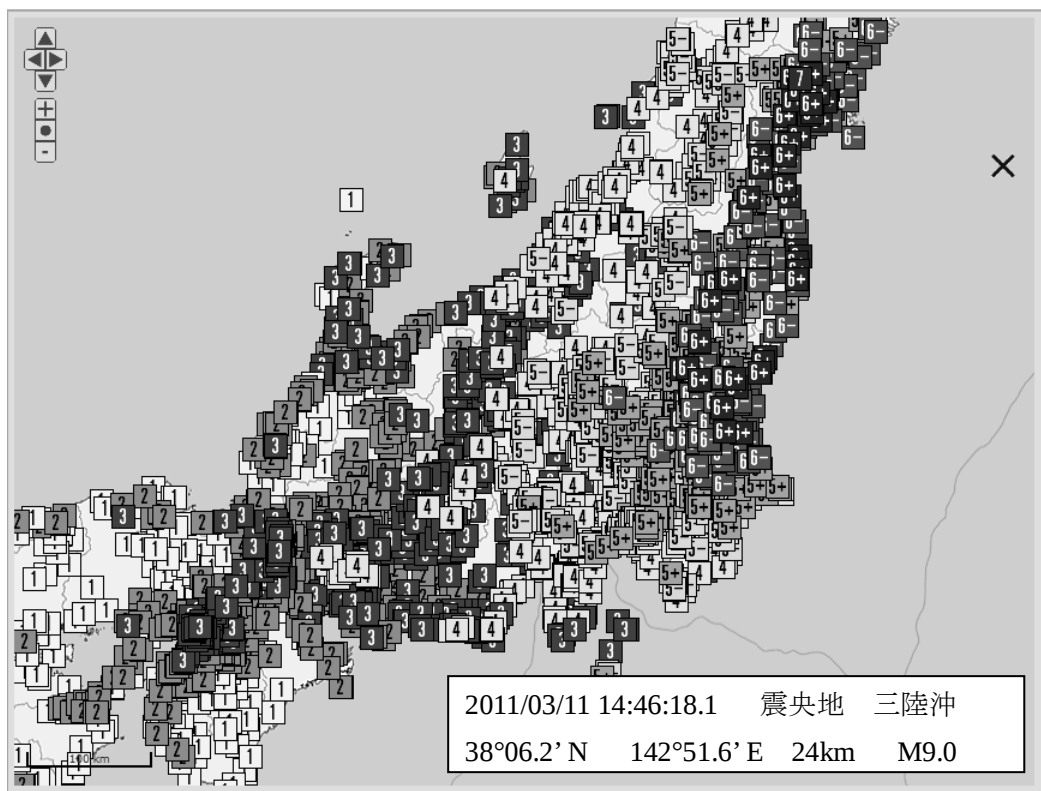
東北地方太平洋沖地震の本震記録は、巨大津波を発生させたマグニチュード 9.0 の地震としては長周期成分が大きく励起しなかったと言われている^{3.18)}。そこで実験では本震記録（以降、本震）に加えて本震の約 30 分後に、茨城県沖で発生した M7.6 の余震記録（以降、余震）を入力地震動として用いた。M7.6 の最大余震の観測記録には首都圏で想定される長周期地震動特性が含まれていると考えられるが、入力地震動の大きさとしては小さいため、余震記録の振幅を調整して、首都圏で想定される直下地震に備える検討用地震動とした。ここでは想定東京湾北部地震^{3.19)}レベルの速度振幅を持つことを想定して、余震記録の振幅を 330%に増幅した。

本震と余震の震央位置と震度分布を図 3-21 に示す。また入力地震動の加速度時刻歴波形を図 3-22 に、速度時刻歴波形を図 3-23 に示す。実験では NS 成分を短辺方向（X）に、EW 成分を長辺方向（Y）に入力した。

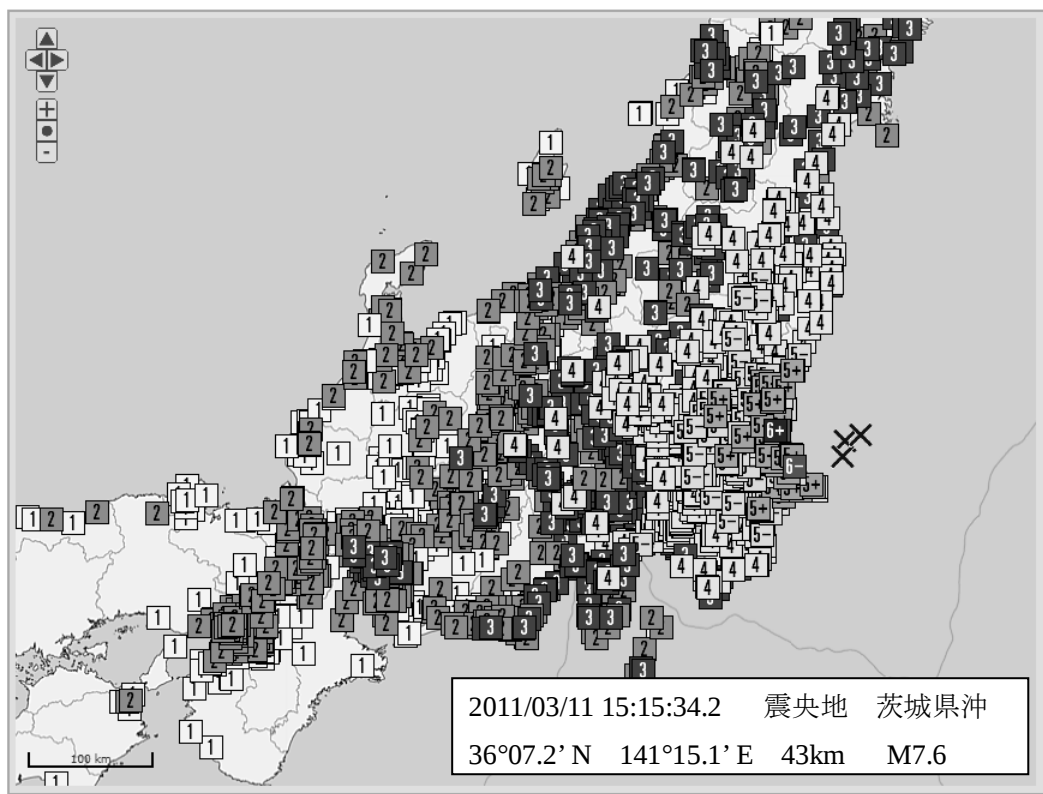
図 3-24 は入力地震動の最大加速度と最大速度について、これまでの大地震の観測記録をまとめた相関図に追記したものである。図中には震源近傍の強震動の構造物破壊能として大被害が生じる下限ラインである最大地動加速度 $PGA800(cm/s^2)$ 以上かつ最大地動速度 $PGV100(cm/s)$ 以上の領域^{3.20)}を網掛けして示した。過去の地震記録の被害程度と比較すると、入力地震動レベルは大被害に至るレベルでは無いと分類される。

入力地震動の速度応答スペクトルを図 3-25 に示す。図 3-25 には建設省告示 1461 号での地震力の疑似速度応答スペクトルを併記した。JMA 神戸 25%および本震 100%は告示スペクトルの稀な地震レベルであり、余震 330%は、周期 3~6 秒では告示スペクトルの極めて稀な地震を上回る地震力である。

表 3-8 に振動実験の工程と入力地震動の大きさを示す。試験体は高層モデルと低層モデルとがあるが、JMA 神戸 25%と西新宿余震 330%を両モデルに共通で入力した。なお、振動実験に当たり、振動台に入力する信号に対して振動台で再現される入力動に対する補償波作成は行っていない。表 3-8 は振動台で観測された最大値であり、試験体の振動特性の違いにより JMA 神戸 25%と西新宿余震 330%の最大値に若干の差異が発生している。

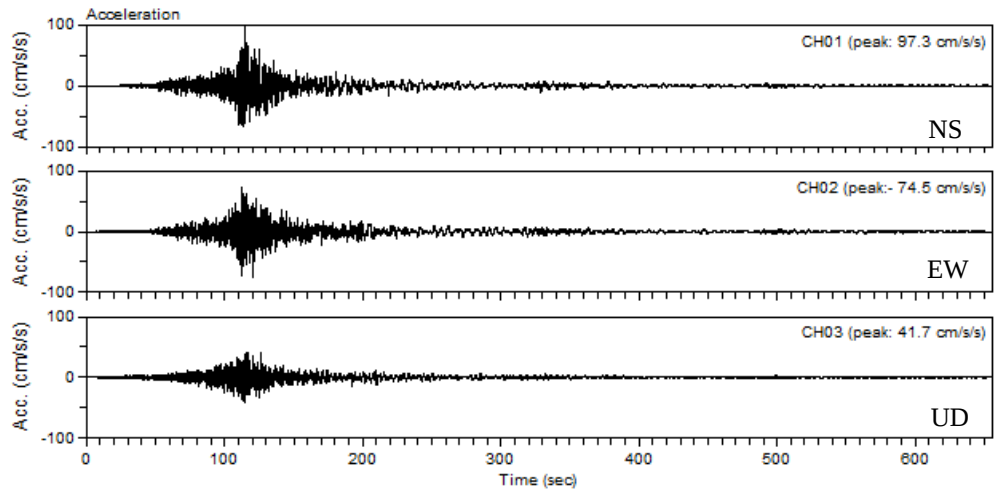


(1) 本震

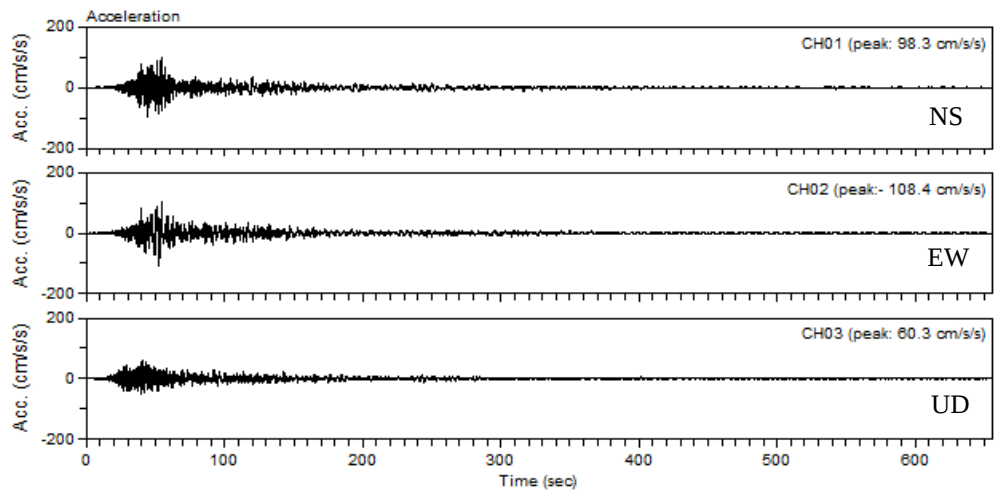


(2) 15:15 発生の余震

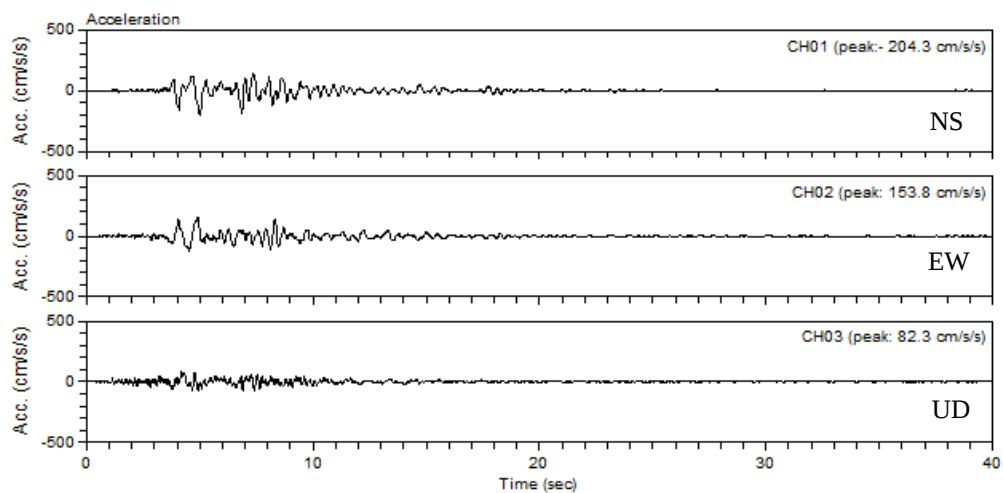
図 3-21 2011 年東北地方太平洋沖地震の震央位置と震度分布
(気象庁ホームページ 震度データベース検索 から転載)



(a) 西新宿観測波 本震 100%

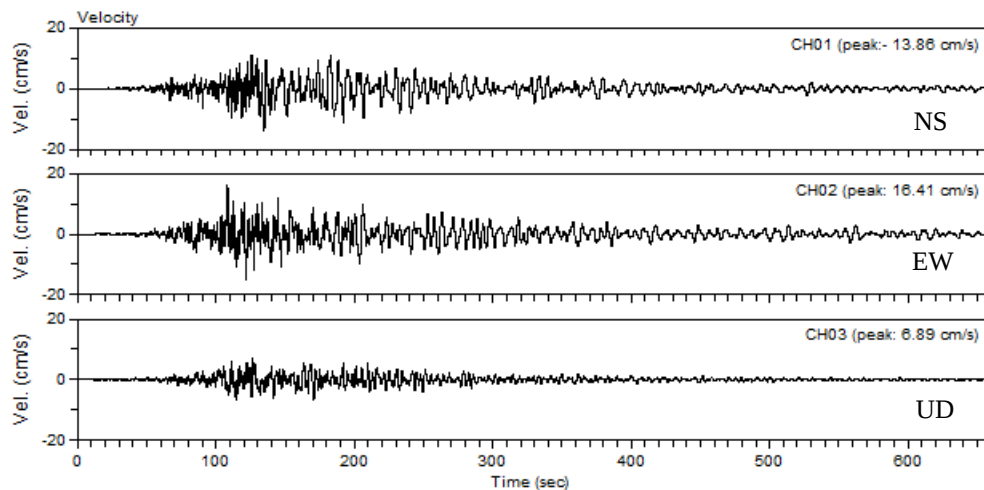


(b) 西新宿観測波 余震 330%

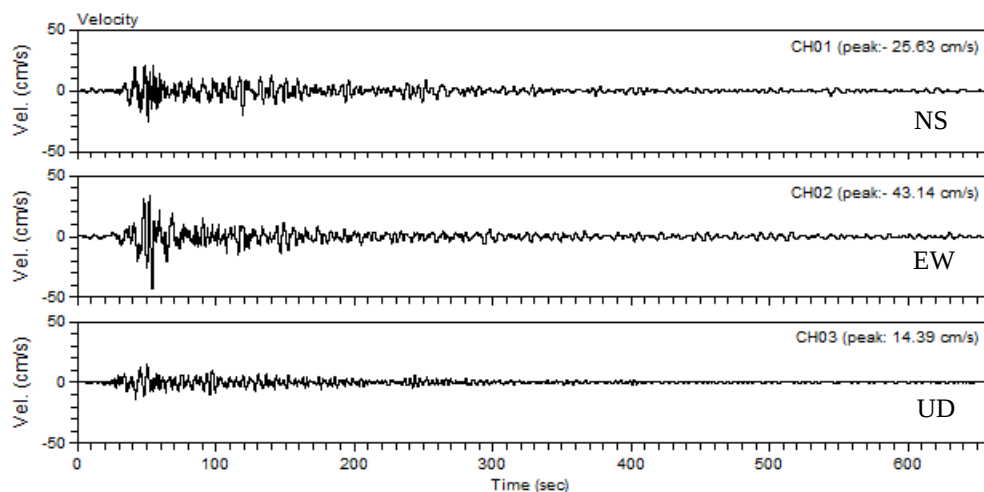


(c) JMA 神戸観測波 本震 25%

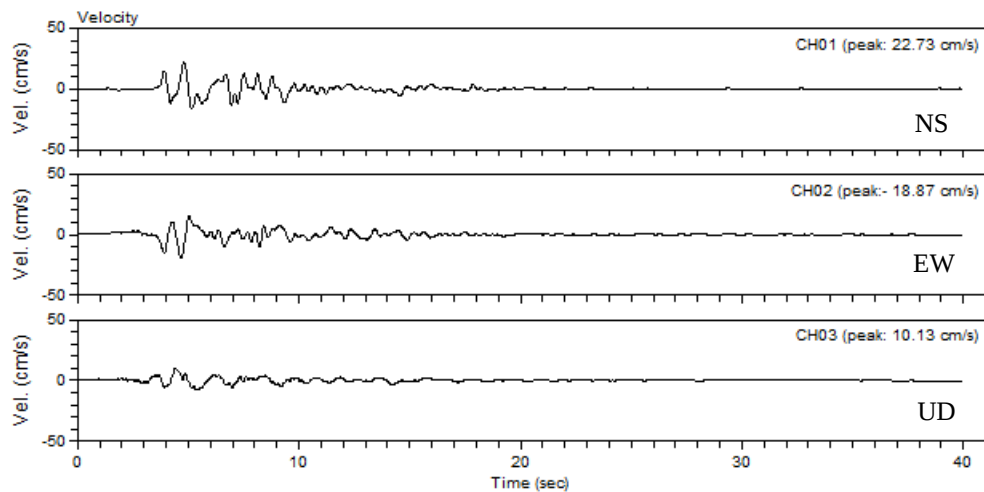
図 3-22 入力地震動の加速度時刻歴波形



(a) 西新宿観測波 本震 100%

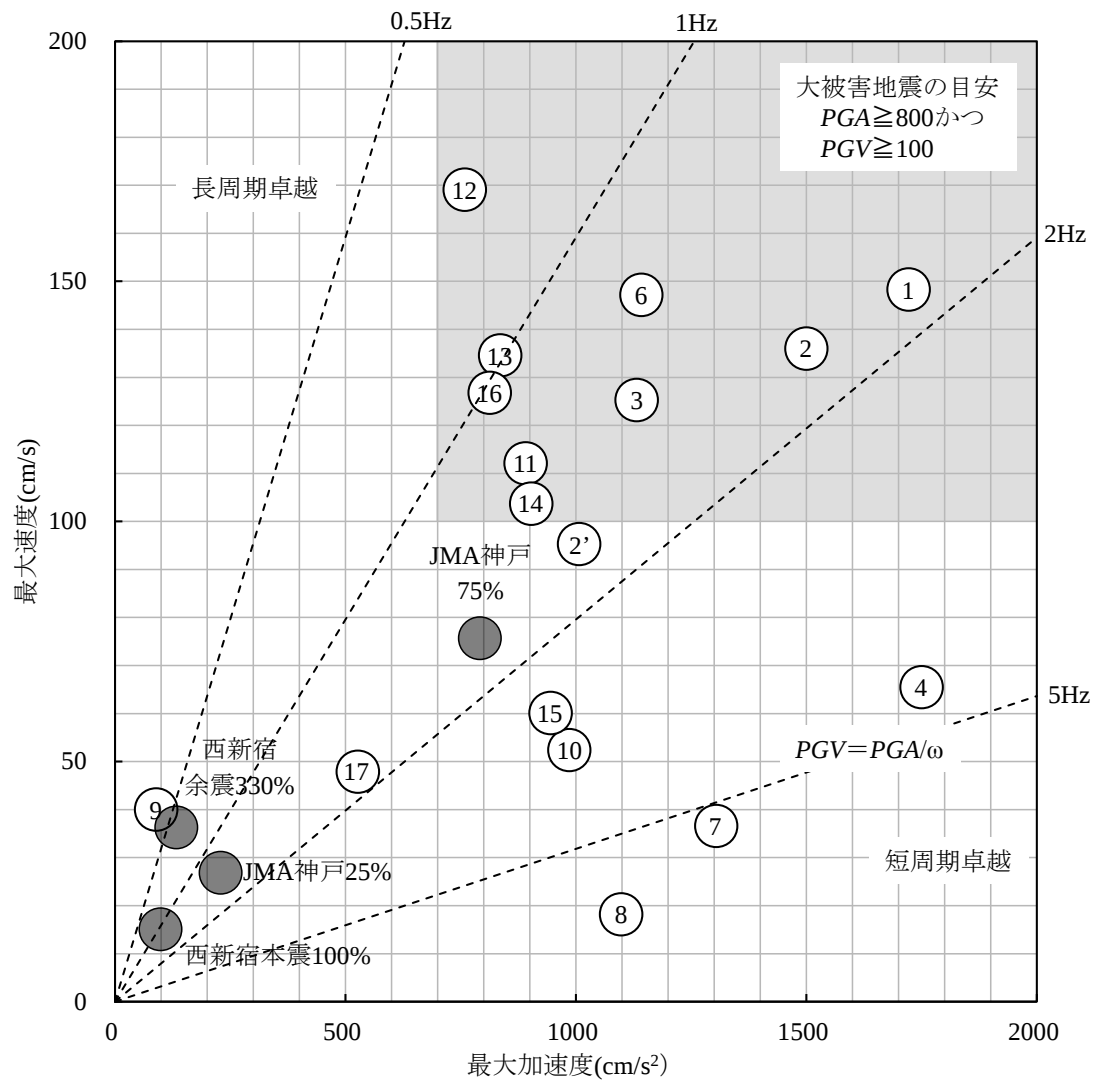


(b) 西新宿観測波 余震 330%



(c) JMA 神戸観測波 本震 25%

図 3-23 入力地震動の速度時刻歴波形



地震名		観測点	最大加速度 (cm/s²)	最大速度 (cm/s)
2004年新潟県中越地震	①	気象庁川口	1722	148
	②	K-NET小千谷	1500	136
	②'	気象庁小千谷	1007	95
	③	気象庁山古志	1132	125
	④	K-NET十日町	1750	66
2004年新潟県中越地震（余震）	⑤	気象庁川口	2516	68
2000年鳥取県西部地震	⑥	KiK-net日野	1142	147
2003年宮城県沖の地震	⑦	KiK-net住吉	1305	37
	⑧	KiK-net陸前高田	1098	18
2003年十勝沖地震	⑨	K-NET苫小牧	89	40
	⑩	K-NET広尾	986	52
1995年兵庫県南部地震	⑪	神戸海洋気象台	891	112
	⑫	JR鷹取	759	169
	⑬	葺合	836	135
2007年能登半島沖地震	⑭	K-NET穴水	903	104
	⑮	K-NET富来	945	60
2007年新潟県中越沖地震	⑯	K-NET柏崎	813	127
	⑰	K-NET小千谷	527	48

図 3-24 過去の大地震の最大加速度と最大速度の相関と入力地震動

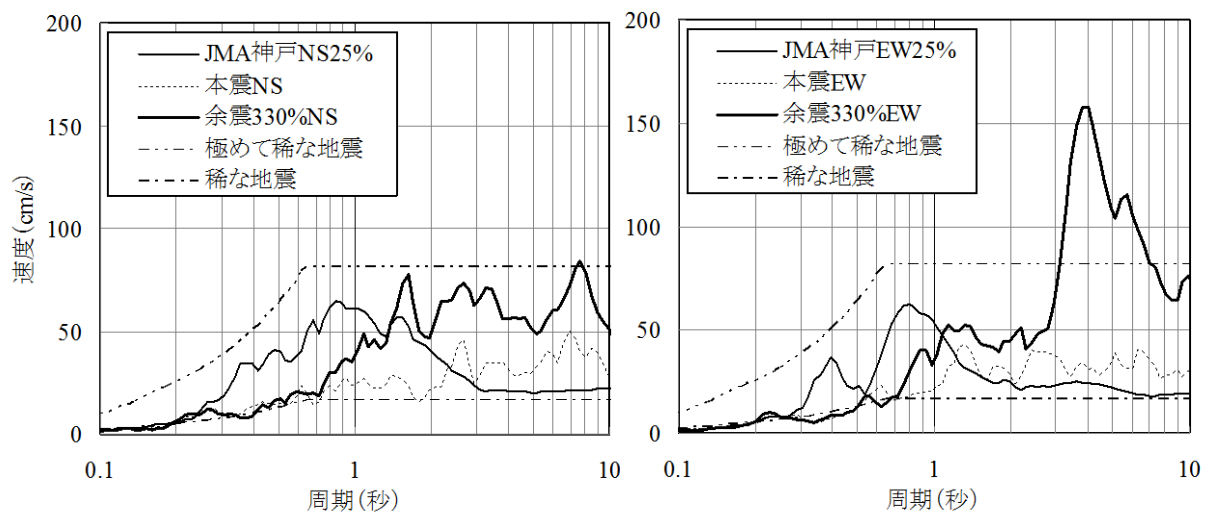


図 3-25 入力地震動の速度応答スペクトル (h=0.05)

表 3-8 実験工程と入力地震動

モデル	加振日	地震名	最大加速度(cm/s^2)	最大速度(cm/s)
高層	2011年 10月4日	JMA神戸25%	222	24
		本震50%	46	8
		本震100%	99	15
		余震150%	63	16
	2011年 10月7日	余震75%	37	8
低層	2011年 10月12日	余震330%	133	34
		余震330%	134	36
		JMA神戸25%	217	26
		JMA神戸50%	429	49
		JMA神戸75%	757	72

※加速度, 速度は水平2成分のベクトル合成値の最大

3.3 実験結果

3.3.1 構造躯体の応答

構造躯体の応答のうち、高層モデルの余震 330%入力時の加速度波形を図 3-26 に、速度波形を図 3-27 に示す。なお、速度波形はサーボ型速度計による観測記録であり、センサー数の制約から震動台上での記録は計測していない。水平方向の応答波形を見ると上層階に向けて応答が連続的に増幅して伝播しており、特に Y 方向では応答増幅が大きい。上下方向の応答を見ると、上層階に向けた増幅はあまり大きくない。高層モデルの最大応答値分布について図 3-28 に示す。最大応答速度、最大応答変位は絶対応答加速度に 0.1Hz のハイパスフィルターをかけてフーリエ積分して求めた値である。JMA 神戸 25%や本震 100%の入力の場合は実験室 2・3 では最大加速度 100cm/s^2 程度、最大速度 50cm/s 程度であるが、余震 330%入力の場合は最大加速度約 250cm/s^2 、最大速度約 180cm/s と大きく増幅している。

低層モデルの JMA 神戸 75%入力時の加速度波形を図 3-29 に、速度波形を図 3-30 に示す。水平方向の応答加速度波形を見ると、XY 両方向とも実験室 1～3 で $1000(\text{cm/s}^2)$ を超える大きな最大値を記録している。また上下方向についても震動台より増幅して伝播している。低層モデルの最大応答値分布について図 3-31 に示す。速度、変位の応答は高層モデルと同様のフーリエ積分より求めた。高層モデルと低層モデルとで共通の入力地震動として用いた余震 330%入力、および JMA 神戸 25%入力について比較して見ると、試験体の振動特性の違いにより上層階への応答増幅の傾向が違うことが判る。余震 330%入力では低層モデルの場合は上層階に向けての応答増幅はほとんどない。また JMA 神戸 25%入力では高層モデルでは中間階で応答が最大となり上層階の応答の方が小さくなったが、低層モデルでは上層階に向けての応答増幅が大きい。

また図 3-32 は、応答加速度のフーリエ積分から求めた応答変位から求めた実験室 1 と実験室 2 の最大層間変形である。高層モデルの余震 330%入力の場合は 1/100 未満、低層モデルの JMA 神戸 75%入力の場合は実験室 2 で 1/50 を超える大きな層間変形となった。試験体の架構断面の設計は低層モデルの場合の設計用外力で決まっているため、高層モデルの場合には全体的に安全側の設計になっている。そのため高層モデルの実験結果の層間変形はプロトタイプの応答よりも小さめに評価されている。また高層・低層の両モデルとも実験室 1 の層間変形が実験室 1 より小さめに示している。これは実験遂行の安全上、実験室 1 に設けている C1 柱と V1・V2 ブレースによる架構の剛性の影響と考えられる。

また実験結果の床応答加速度の 3 成分を用いて計測震度を計算した結果を表 3-9 に示す。計測震度による震度階は、基本は地表面における加速度から求めた計測震度に対して定義される区分であるため、建物内の応答加速度から求めた計測震度に対しては表 3-9 では震度階相当と記載した。

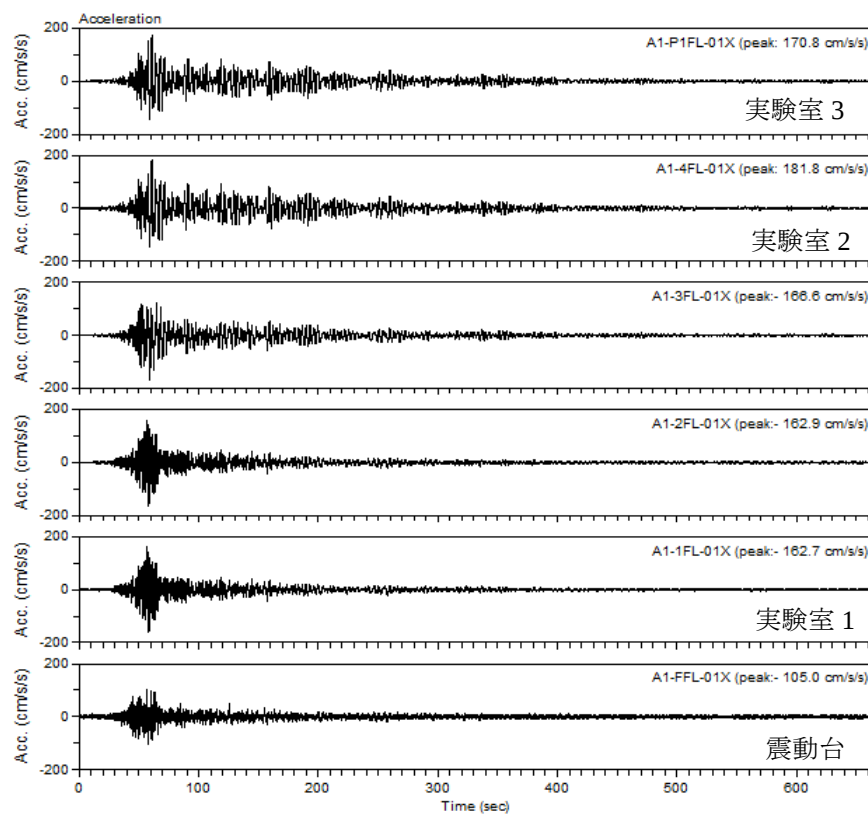
実験結果の床応答加速度から算出した試験体の伝達関数による固有周期を、設計モデル（縮約モデル）の固有値解析の結果と比較して表 3-10 に示す。高層モデルでは積層ゴムと鋼材ダンパーで作成した縮約層の剛性の変位依存性があるため、入力地震動のレベルによって固有周期が変わってくる。低層モデルでも縮約層の変形を固定に設置した鋼材プレートや実験室の骨組みの塑性化により、入力動の大きさによって固有周期が伸びている。

次に、今回の試験体の大きな特徴である高層モデルの応答について示す。まず、上層階の応答の再現を目標とした実験室 2 の Y 方向の変位波形を図 3-33 に示す。図 3-33 の変位波形は加速度

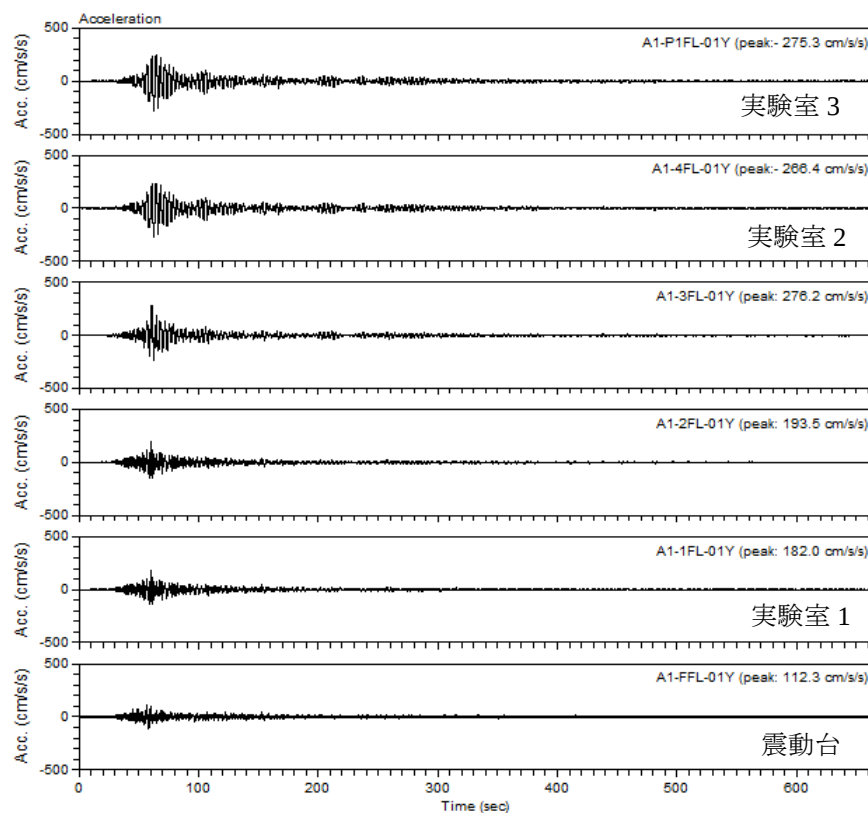
記録に 0.1Hz のハイパスフィルターをかけてフーリエ積分したものである。余震 330%では最大片振幅 90cm 程度、片振幅 50cm の揺れが 30 秒程度継続した。本震 100%の場合は最大片振幅 20cm 程度、JMA 神戸 25%では最大片振幅 12cm 程度の揺れとなった。

高層モデルの床応答が、設計時の縮約モデルの上層階の揺れを再現しているかを確認するために、余震 330%の加振結果の加速度記録から、表 3-10 に示した 1 次～3 次の固有周期成分をフーリエ積分して求めた変位波形より求めた振動モードを、縮約モデルの固有モードと比較したものを図 3-34 に示す。それぞれ最大変位で正規化して比較した。概ね試験体は縮約モデルで設計した振動モードを再現していると判断できる。

次に設計時に想定したプロトタイプの 30 階の建物の床応答を実験結果が再現しているかを検討するために、余震 330%を入力したプロトタイプの時刻歴応答解析結果と実験結果とを加速度応答スペクトルで比較した。ここでプロトタイプの層せん断力－層間変形の非線形特性はノーマルトリリニア型でモデル化し、第 1 降伏点を $1.4 \times C_b$ 、第 2 降伏点を $2.0 \times C_b$ 、第 2 剛性を $K_0 \times 0.4$ 、第 3 剛性を $K_0 \times 0.1$ とした。また瞬間剛性比例減衰を $h=0.02$ で与えた。結果を図 3-35 に示す。高層階の実験室 2 の応答を比較すると Y 方向は概ねプロトタイプのスペクトル特性を再現しているが、X 方向はやや 1 次周期成分が小さい。これは表 3-10 の 1 次固有周期の違いによると考えられる。低層階の実験室 1 は、Y・X の両方向とも 1 次固有周期の成分は概ね再現しているが 3 次成分はやや大きめに評価している。これは図 3-9 の刺激関数の比較で、プロトタイプよりも縮約モデルが 3 次で大きめにモデル化されていたこととも整合している。以上により、高層モデルの試験体では概ね試験体の設計時に想定したプロトタイプの床応答加速度を、特に実験室 2 で再現できたと考えられる。

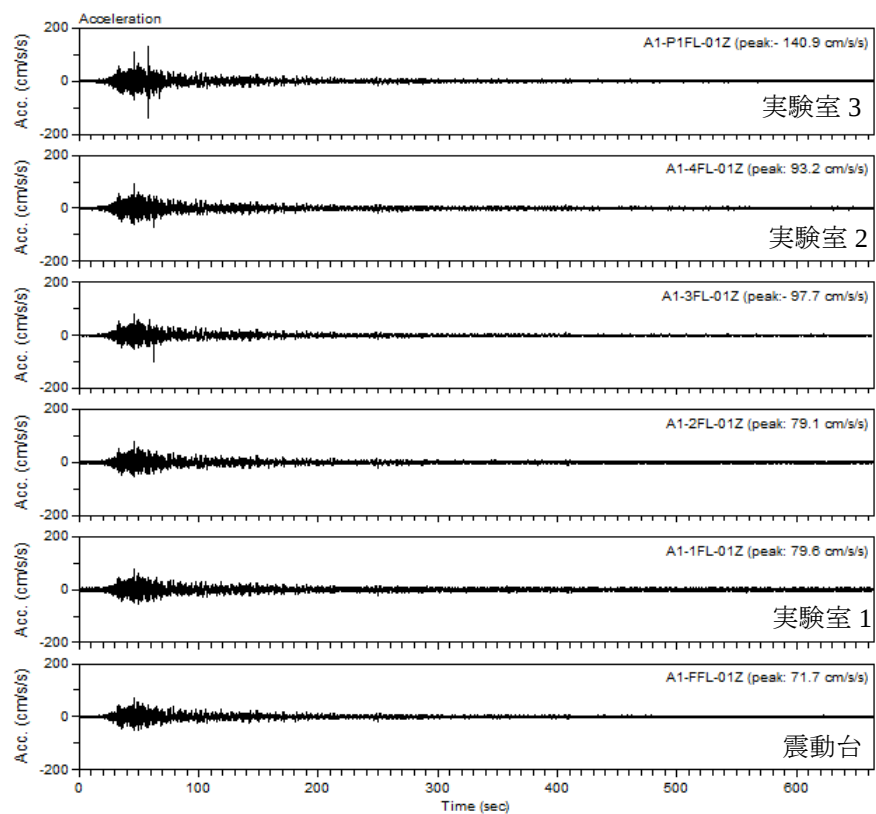


(1) X 方向



(2) Y 方向

図 3-26 高層モデルの加速度時系列 (余震 330%入力時)



(3) Z 方向

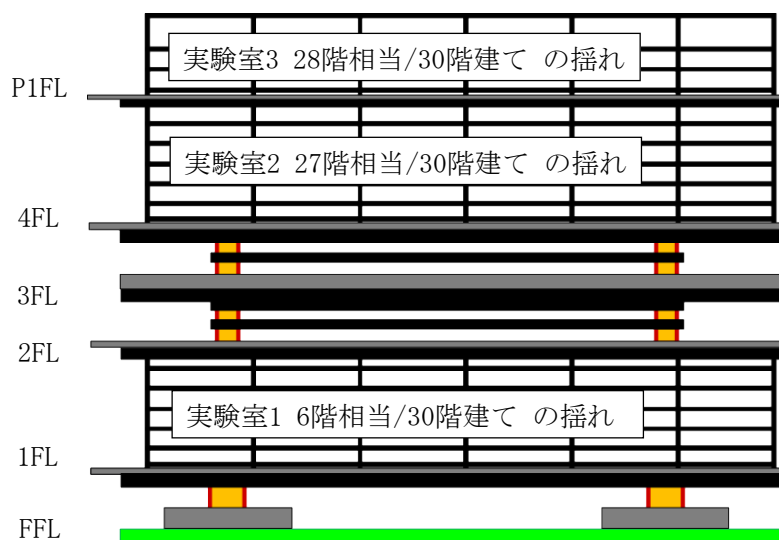
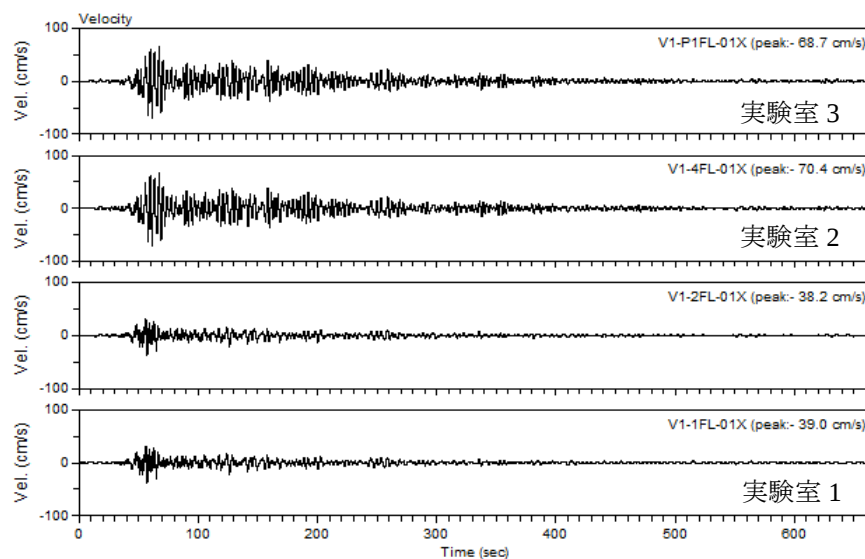
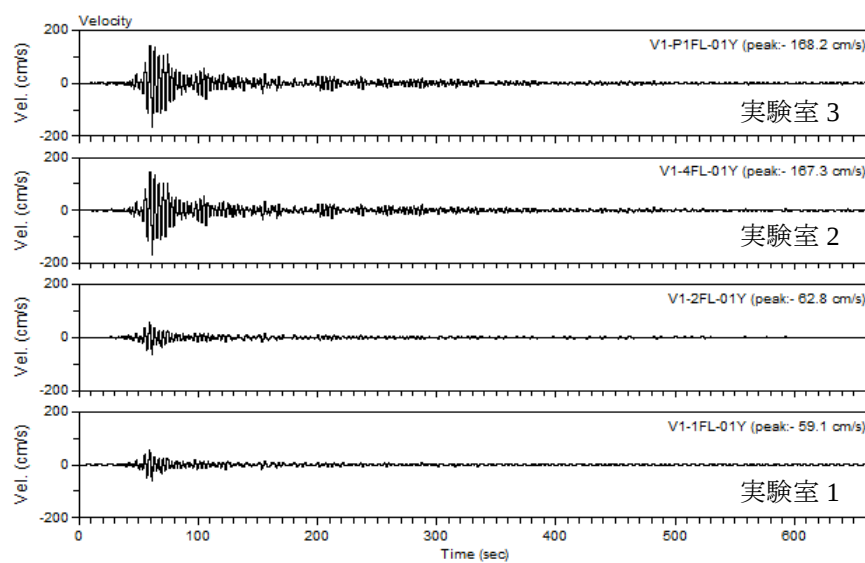


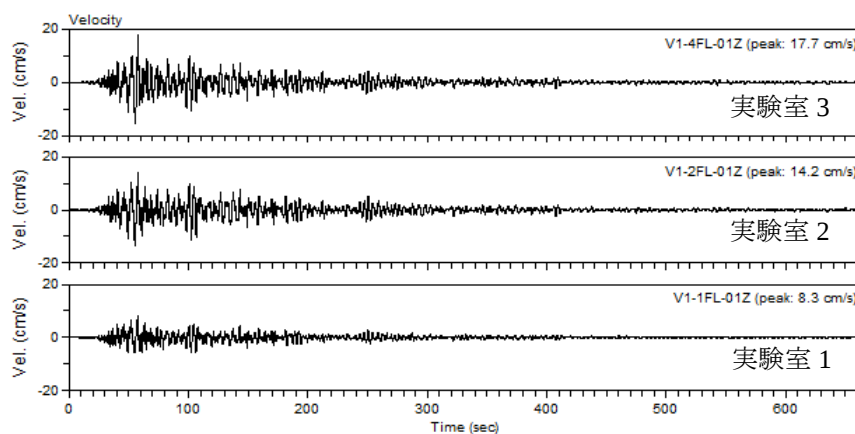
図 3-26 高層モデルの加速度時系列 (余震 330%入力時)



(1) X 方向

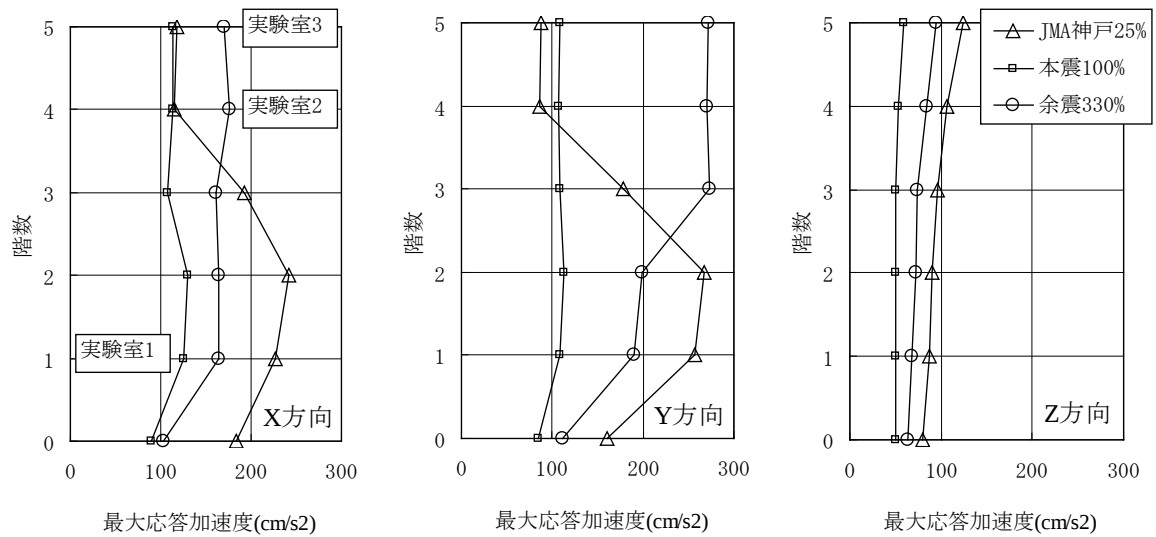


(2) Y 方向

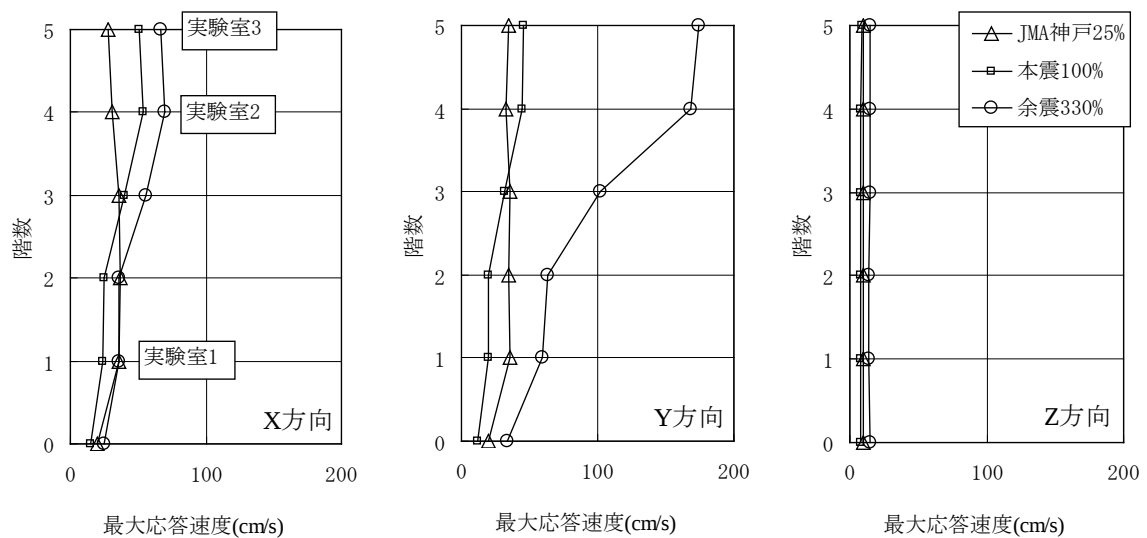


(3) Z 方向

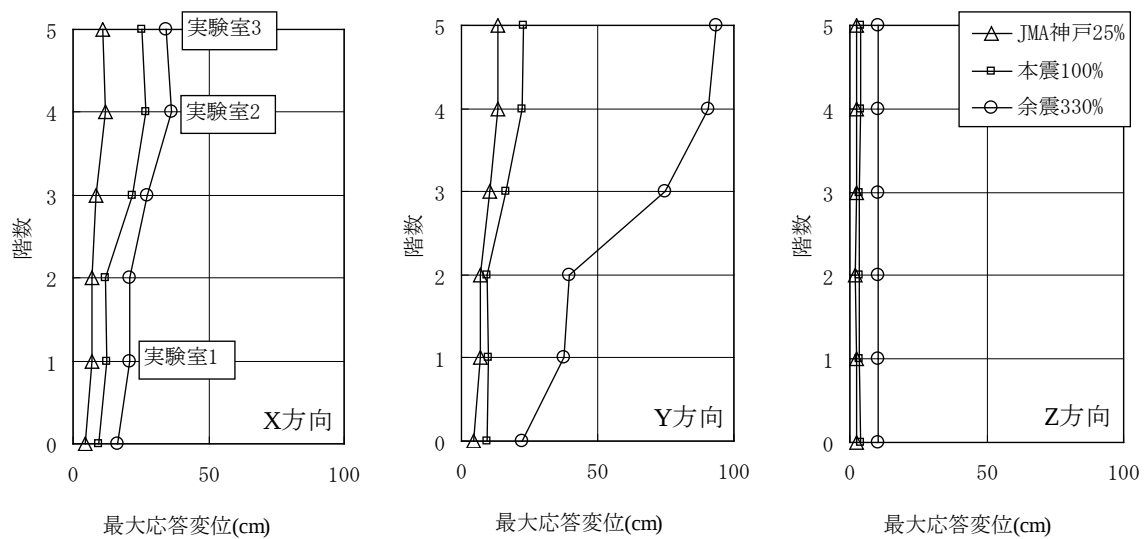
図 3-27 高層モデルの速度時系列 (余震 330%入力時)



(1) 最大加速度

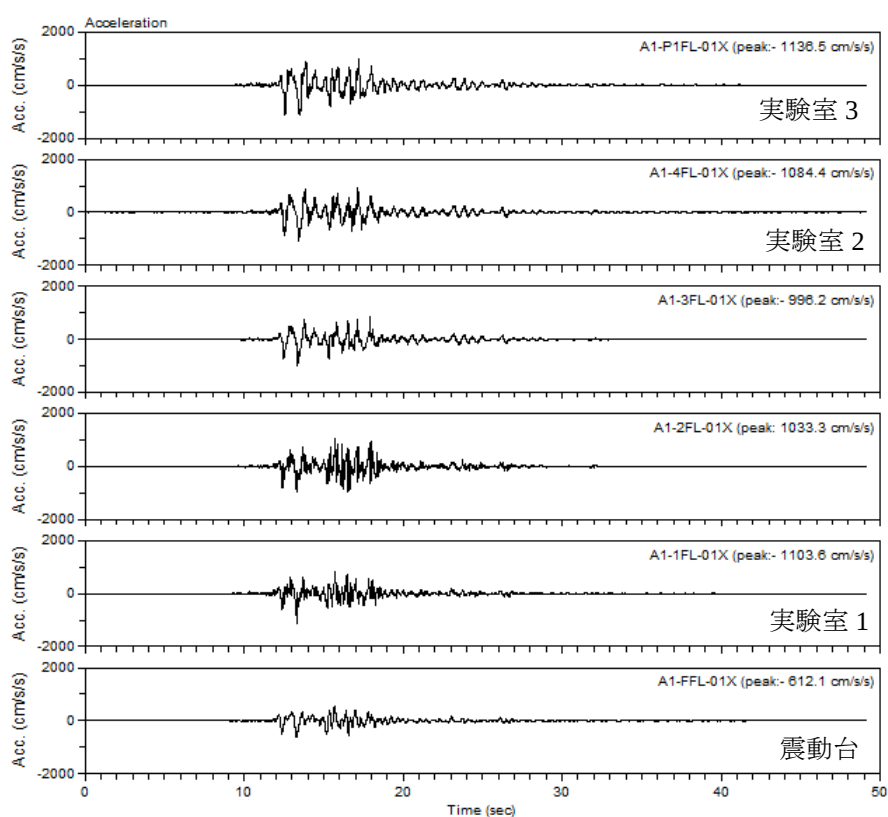


(2) 最大速度

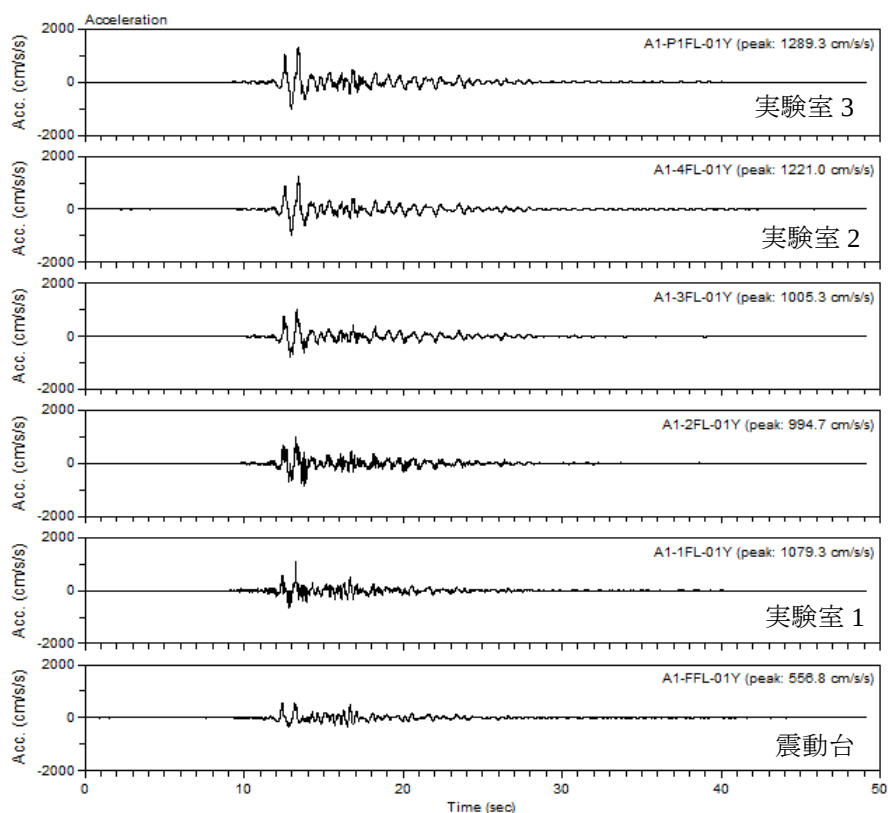


(3) 最大変位

図 3-28 高層モデルの最大応答値分布

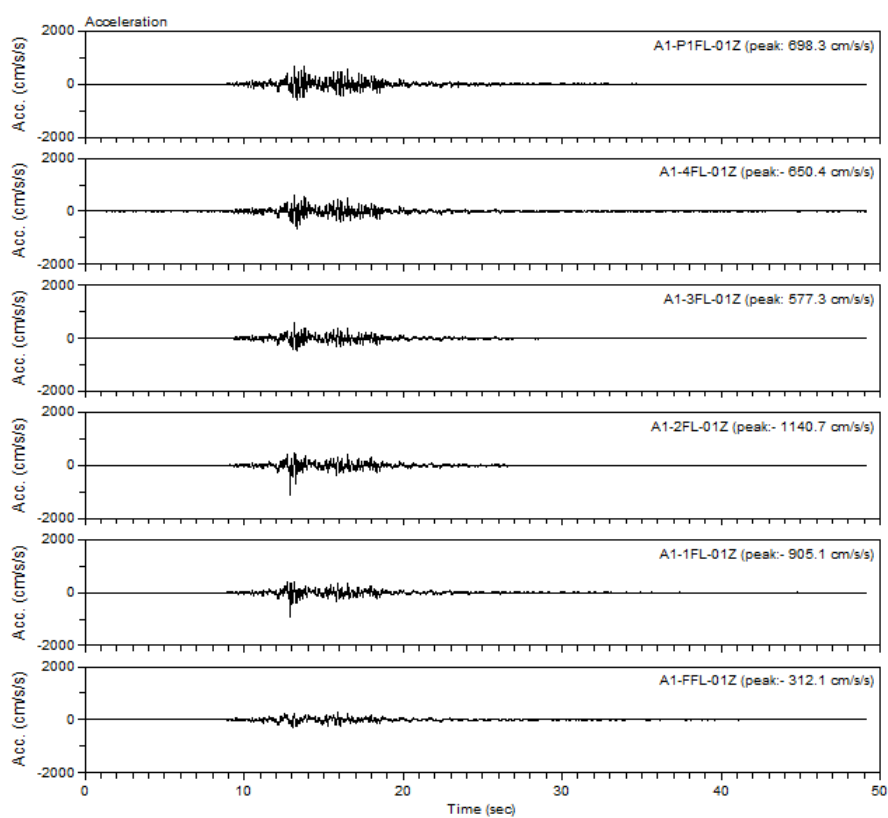


(1) X 方向



(2) Y 方向

図 3-29 低層モデルの加速度時系列 (JMA 神戸 75%入力時)



(3) Z 方向

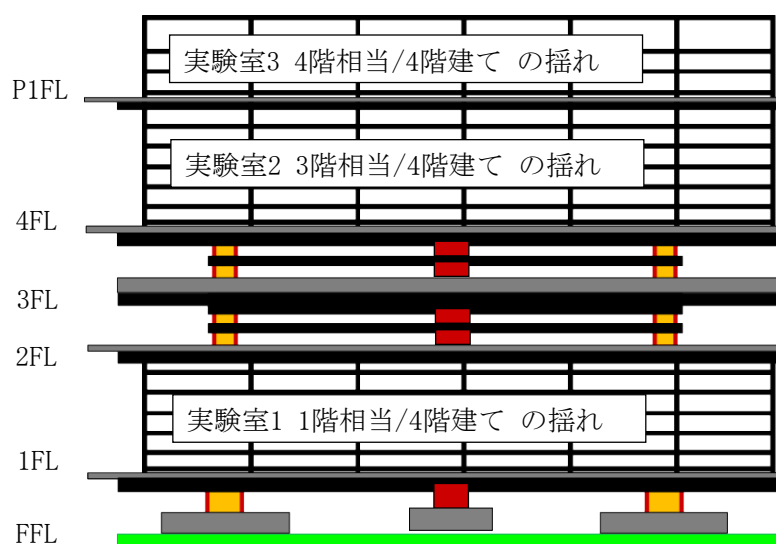
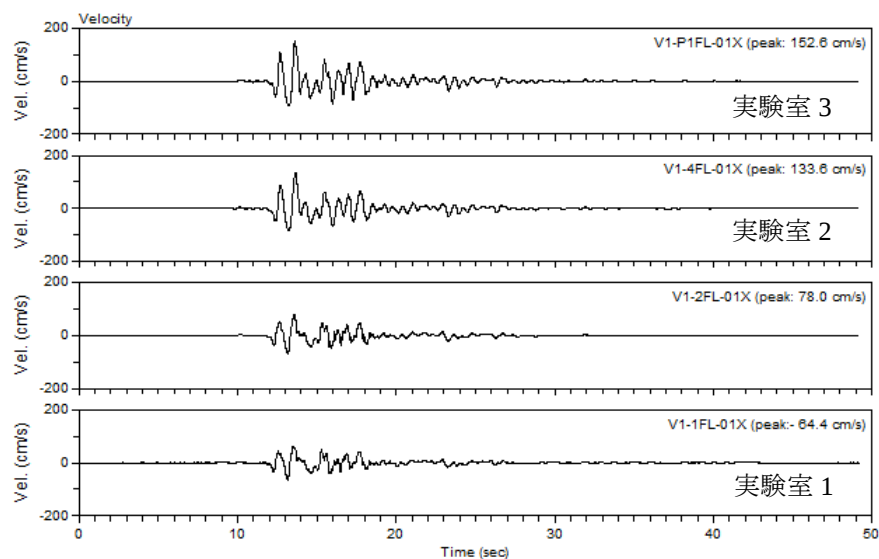
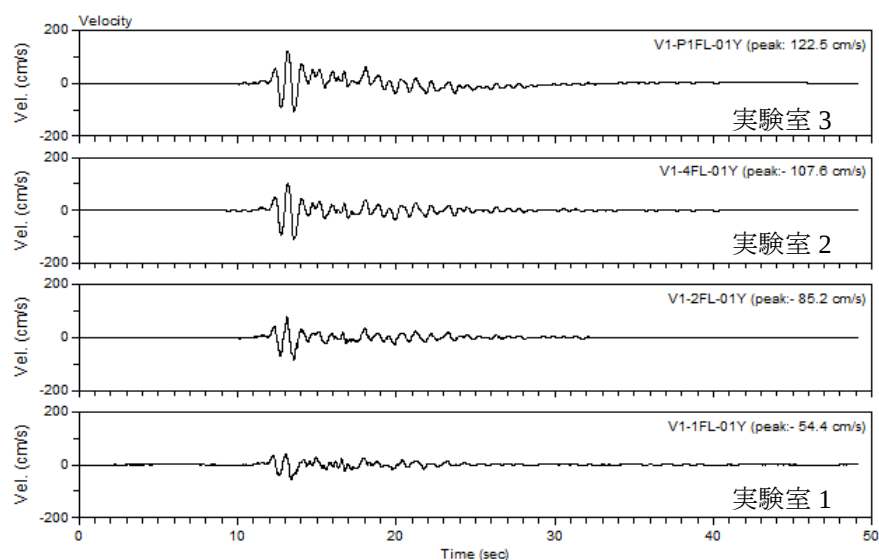


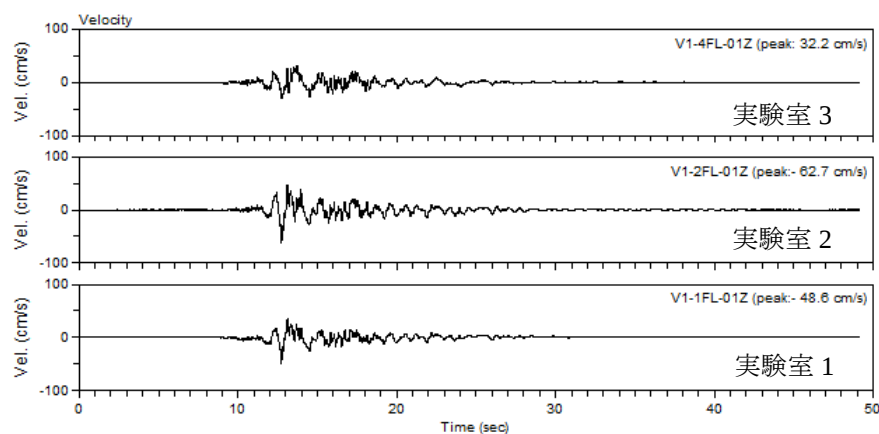
図 3-29 低層モデルの加速度時系列 (JMA 神戸 75%入力時)



(1) X 方向

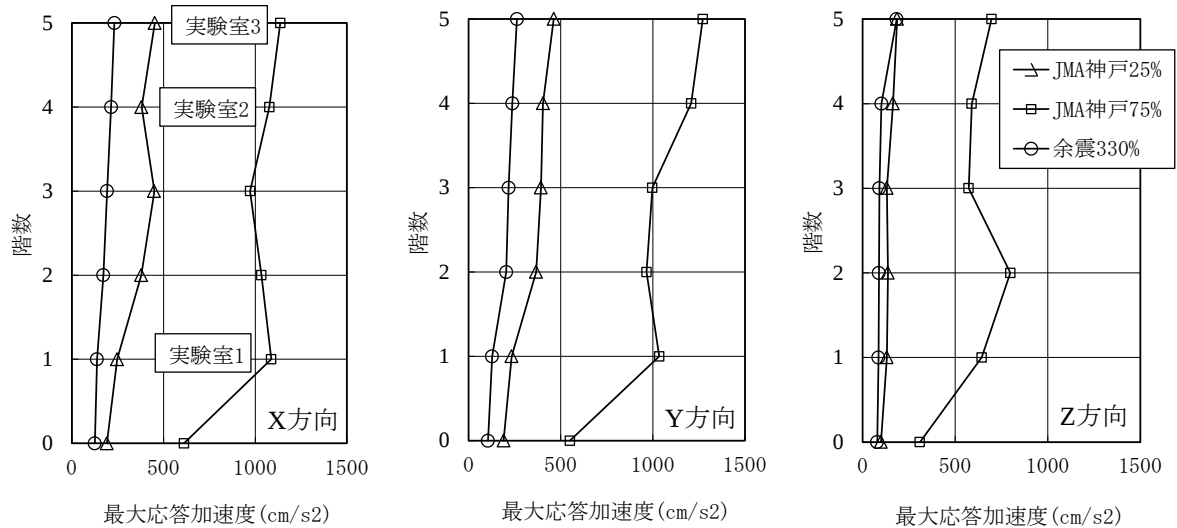


(2) Y 方向

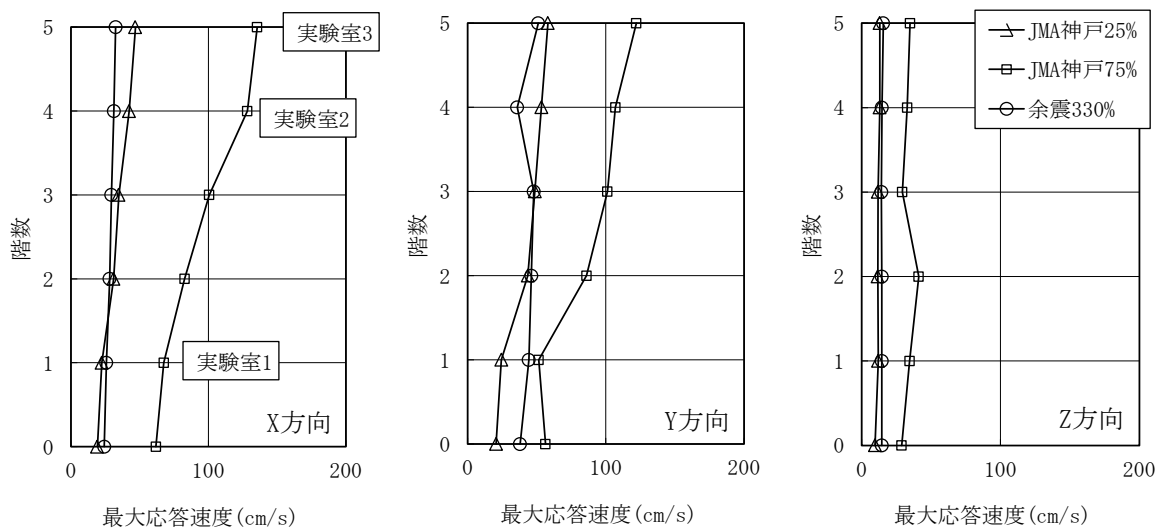


(3) Z 方向

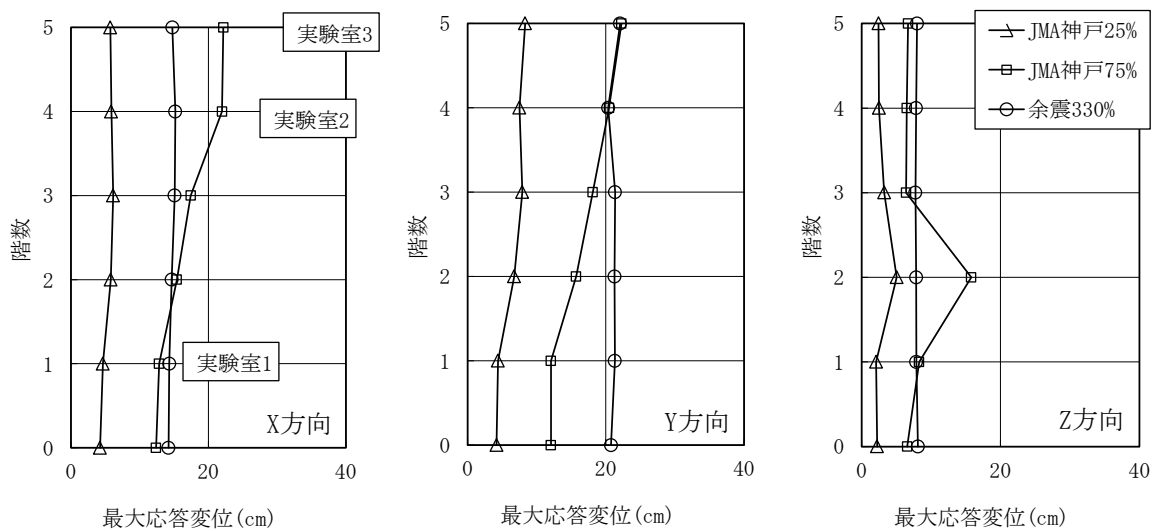
図 3-30 低層モデルの速度時系列 (JMA 神戸 75%入力時)



(1) 最大加速度



(2) 最大速度



(3) 最大変位

図 3-31 低層モデルの最大応答値分布

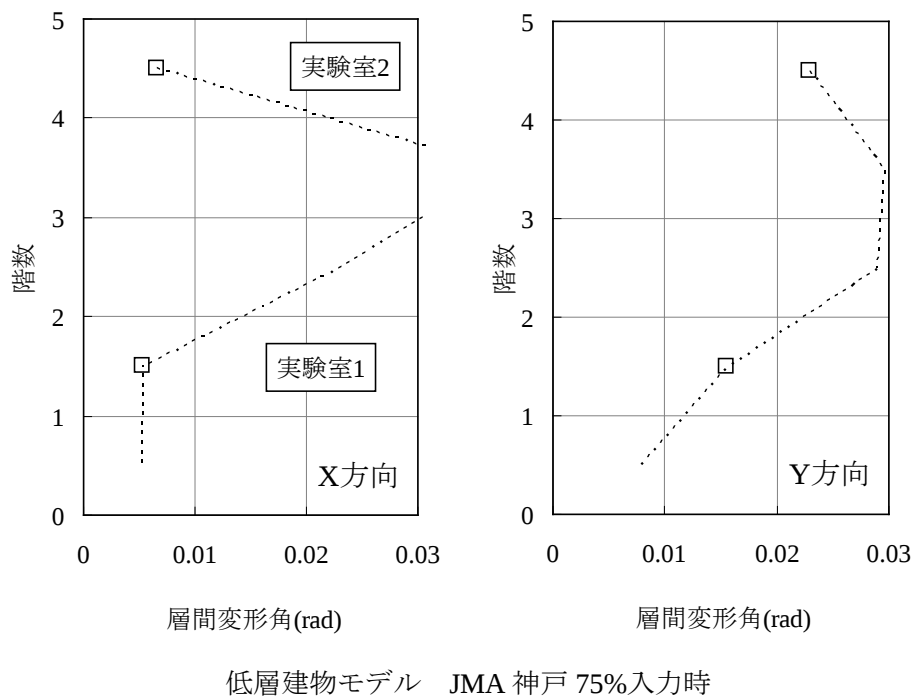
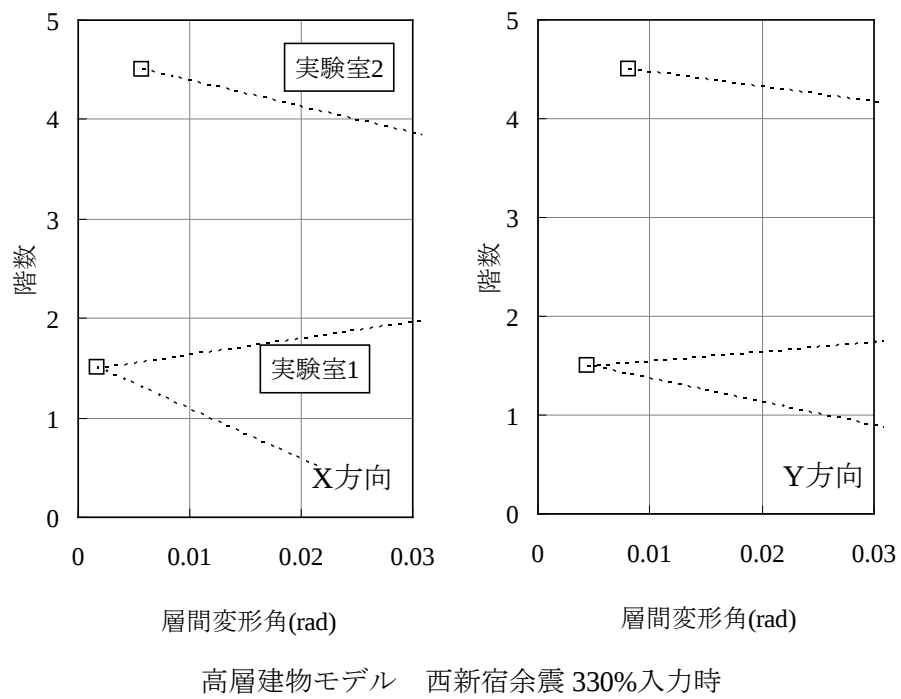


図 3-32 実験時に発生した最大層間変形角

表 3-9 床応答加速度から算出した計測震度の値

(1) 高層建物モデル

	震動台（1階相当）		1階（6階相当）		4階（27階相当）	
JMA神戸25%	5.2	震度5強	5.6	震度6弱相当	5.1	震度5強相当
本震100%	4.4	震度4	4.9	震度5弱相当	5.0	震度5弱相当
余震330%	4.8	震度5弱	5.3	震度5強相当	5.5	震度6弱相当

(2) 低層建物モデル

	震動台（1階相当）		1階（1階相当）		4階（3階相当）	
余震330%	4.9	震度5弱	4.9	震度5弱相当	5.3	震度5強相当
JMA神戸25%	5.2	震度5強	5.3	震度5強相当	5.9	震度6弱相当
JMA神戸75%	6.2	震度6強	6.2	震度6強相当	6.8	震度7相当

表 3-10 床応答加速度から算出した固有周期の比較

		長辺方向（Y方向）			短辺方向（X方向）		
		設計時	本震100%	余震330%	設計時	本震100%	余震330%
超高層 モデル	1次	3.50	3.13	3.57	3.47	3.13	3.13
	2次	1.40	1.20	1.28	1.40	1.22	1.23
	3次	0.88	0.78	0.77	0.88	0.77	0.78

		長辺方向（Y方向）			短辺方向（X方向）		
		設計時	神戸25%	神戸75%	設計時	神戸25%	神戸75%
低層 モデル	1次	0.65	0.62	0.83	0.52	0.52	0.74
	2次	0.21	0.17		0.28	0.19	
	3次	0.11			0.13		

単位：秒

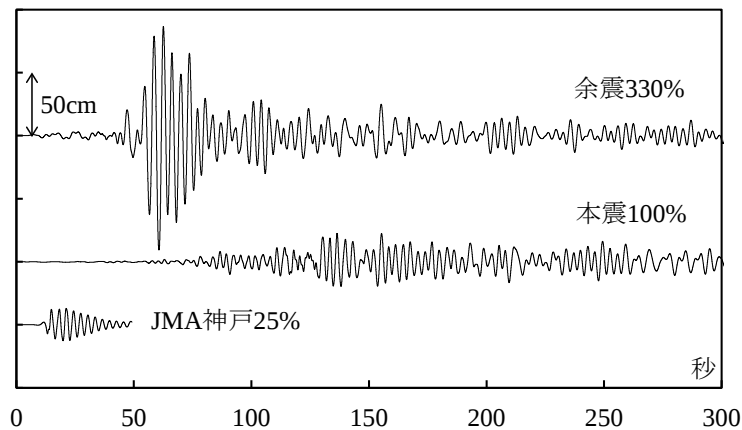


図 3-33 高層モデルの実験室 2 の応答変位時刻歴（Y 方向）

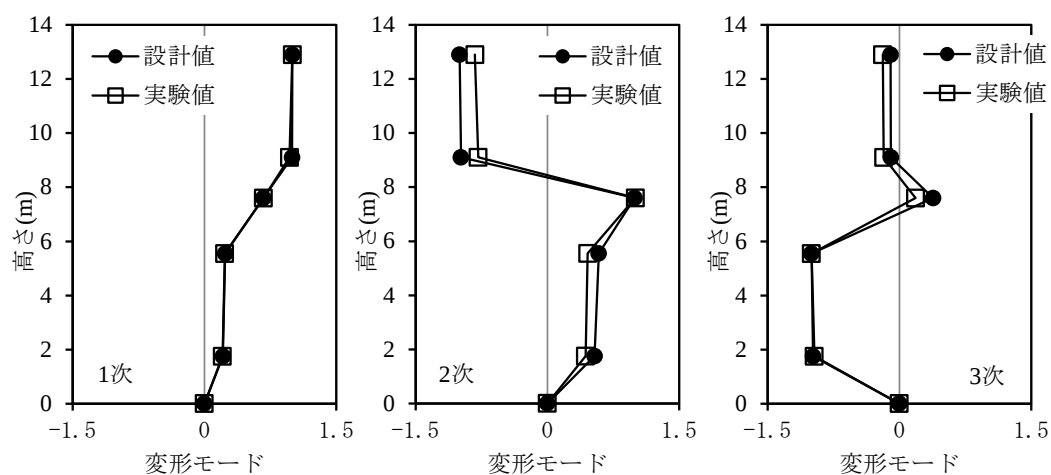


図 3-34 設計モデルと高層モデルの固有モードの比較

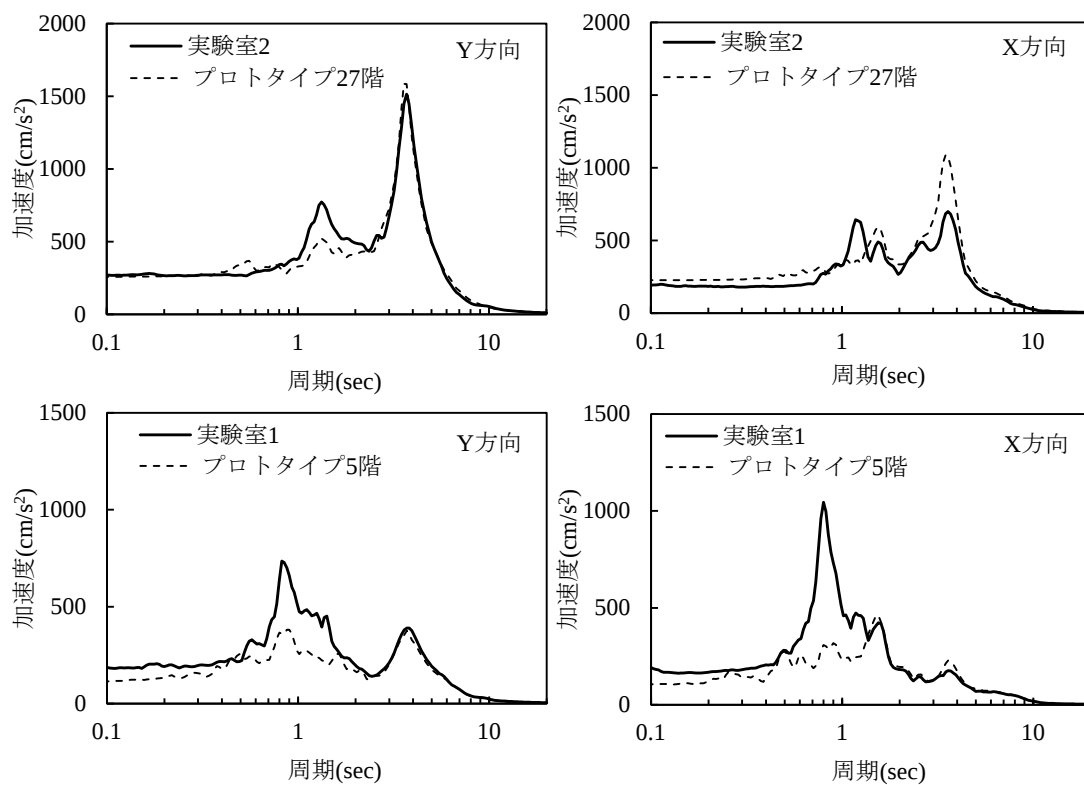


図 3-35 加速度応答スペクトルの比較 (h=0.05)

3.3.2 家具・什器の応答

前節で示した最大加速度，最大速度から，試験体内の書棚などの転倒の可能性を検討した結果を図 3-36 に示す。図 3-36 は金子・林による剛体の転倒率曲線^{3,21)}から転倒限界加速度と転倒確率 50%となる加速度と，床応答加速度の最大値を比較した。転倒限界加速度を求める際の剛体の奥行 B と高さ H については，試験体に設置した棚類の高さが 1800mm のハイタイプのもの，高さ 1200mm のミドルタイプのものに大別されるため，その 2 種類について設定した。実験室 1・2 はハイタイプの棚のみが，実験室 3 はミドルタイプの棚のみが対象数となっている。

図 3-36 中のグラフの横軸の床応答卓越振動数 F_e は，床応答の最大加速度 $A_{\max}$ と最大速度 $V_{\max}$ から， $F_e = A_{\max} / (V_{\max} 2\pi)$ で求めている。ここで最大加速度 $A_{\max}$ は棚の奥行き方向の加振方向である Y 方向の値を示した。データ横の数字は「転倒数／対象数」であり，転倒防止対策が施されている棚は対象数から除外した。

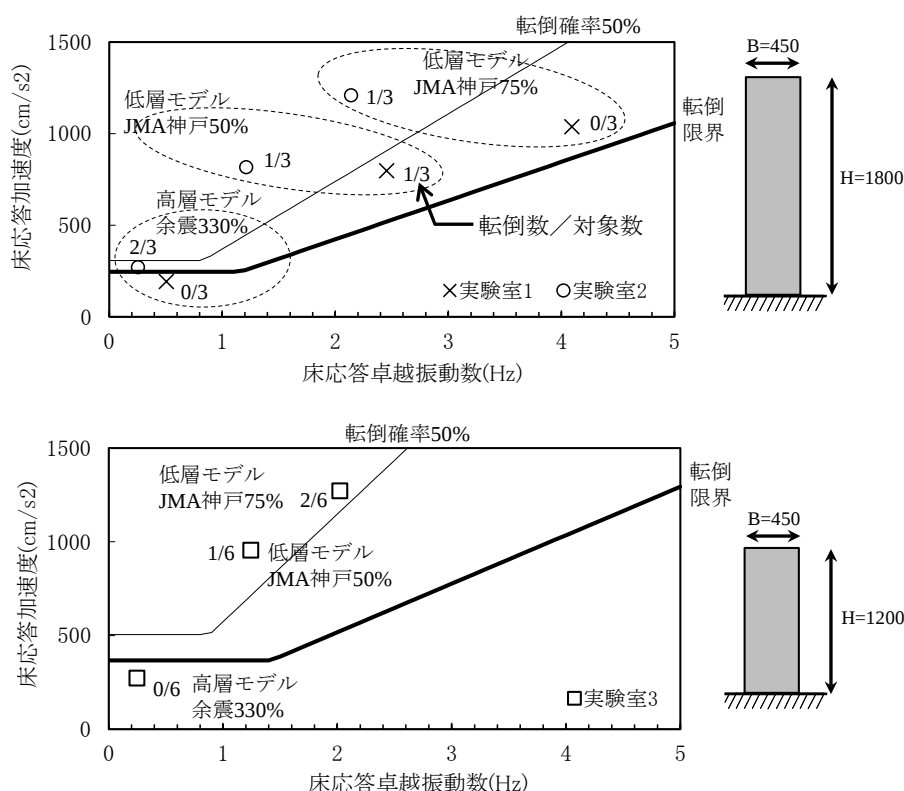


図 3-36 転倒限界加速度と最大応答値 (Y 方向)

図 3-36 より 0.2~0.3Hz 付近にプロットされている高層モデルの結果（余震 330%）は，転倒率曲線と整合的な結果となっている。一方，低層モデルの結果（JMA 神戸 50%，JMA 神戸 75%）は実験結果の転倒数の方が少ない結果となった。実験中の加振映像の観察によると，低層モデルで転倒していない棚は，底面での滑りや浮上り等の不安定挙動を示しており，棚の背面の壁やその他の棚との相互作用によっては転倒する場合もあると考えられる。

一方、書棚に転倒防止対策（床固定用設計用標準水平震度 1.0）でオールアンカーにより床固定した書棚は、床応答加速度が 1G を超えた JMA 神戸 75%加振までは有効に機能した。しかし、書棚中の書籍が飛散する現象が、JMA 神戸 50%と JMA 神戸 75%加振で発生した。飛散状況を図 3-37 に示す。図 3-37 は実験室 3 を上より撮影した写真である。図 3-38 は実験室 3 の転倒防止対策を行った書庫の頂部での加速度の観測値を、床応答加速度に対して示したものである。高層モデルでは床応答加速度の 2 倍程度の値であるが、低層モデルの場合は 6 倍程度となり、 $4000(\text{cm/s}^2)$ を超えると本棚の上段から一斉に書籍が飛散した。室内の機能維持、安全の確保の面から転倒防止対策を行った書棚であっても、入力される地震動の大きさによっては注意が必要である。



(1) 加振前



(2) 加振後

図 3-37 JMA 神戸 50%加振後の実験室 3 の書棚の状況（低層モデル）

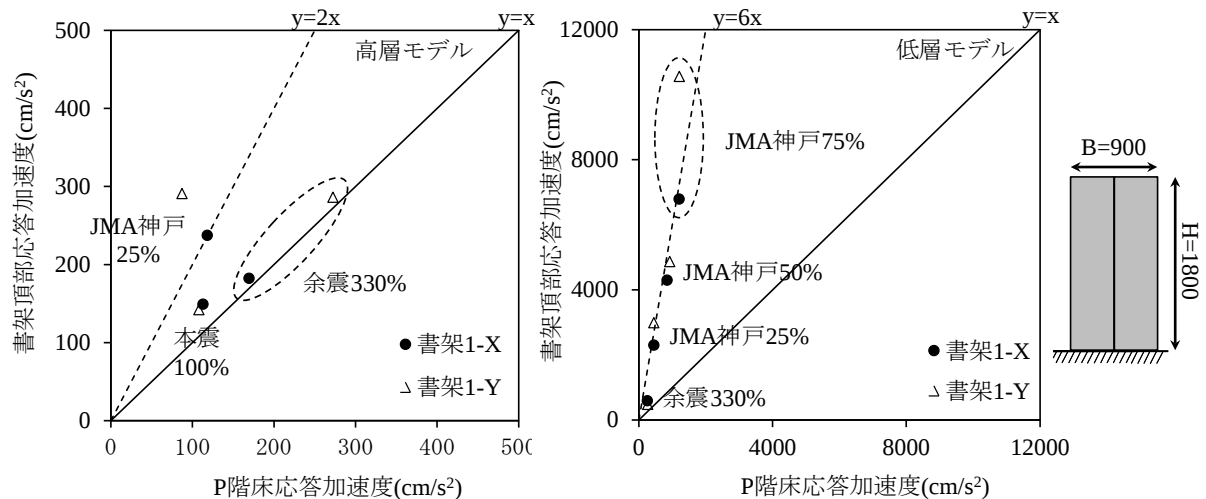


図 3-38 実験室 3 の転倒防止付書架頂部の応答加速度

なお、長周期構造物が長周期地震動により共振した際に、キャスター付の家具什器が室内を走り回り室内被害を増長させる現象が報告^{3.22), 3.23)}されている。図 3-39 は高層モデルの余震 330%加振時の映像であるが、実験室 2 ではキャスター付の椅子やキャビネットは室内を走り回ったが、間仕切り壁にバンド固定^{3.24)}したコピー機は移動防止による対策効果が発揮された。同じ加振時の実験室 1 のキャスター付の椅子等の家具、コピー機の変位は小さく残留変位も小さかった。なお、実験室 1 および 2 に設置したビデオカメラによる撮影映像からコピー機の滑り始める時点を推測し、その時点の水平方向の床応答加速度のベクトル合成値から摩擦係数を推定すると滑り始めは約 0.11、大きな変位を伴う場合は約 0.15 であった。既往のキャスターの摩擦係数^{3.25)}と比較すると、P タイルより大きく、じゅうたん相当の値であった。



図 3-39 実験室 2 の室内状況とコピー機の移動防止対策

3.3.3 天井の応答

天井面の応答のうち、図 3-40 に示す位置で計測した加速度と変位について示す。加速度計は天井の鋼製下地の T バー上に 3 成分のサーボ型加速度センサー（定格 $\pm 98.07\text{m/s}^2$ ）を設置した。変位計は天井面と躯体の相対変位を歪みゲージ型変位センサー（定格 $\pm 50\text{mm}$ ）で計測している。

図 3-41 は天井面と躯体の最大応答加速度の相関で、横軸に躯体の値を、縦軸に天井面の値の最大値を表示した。システム天井は図 3-14 に示すように天井ボード（岩綿吸音板）が軽鉄下地（T バー）の上に載っている状態であり、在来天井のように天井ボードが軽鉄下地にビス止めされていない。そのため天井面で観測された加速度記録の波形には、天井ボードと軽鉄下地材との微小なずれによる衝突で発生したと考えられる高振動数成分が観測されていた。このような高振動数成分により発生する最大加速度はシステム天井全体の耐力に影響する値ではないと考えられる。そこで高振動数成分を除去する目的で 20～25Hz の台形型のローパスフィルタ処理をして最大値を求めた。なお、天井面と躯体で観測された加速度のフーリエ振幅比から求めた 1 次固有振動数は、耐震対策を施した高層モデルの天井の場合に 5Hz 付近であり、ローパスフィルター処理による加速度は 1 次固有振動数の 4 倍以上までの成分を含んでいる。

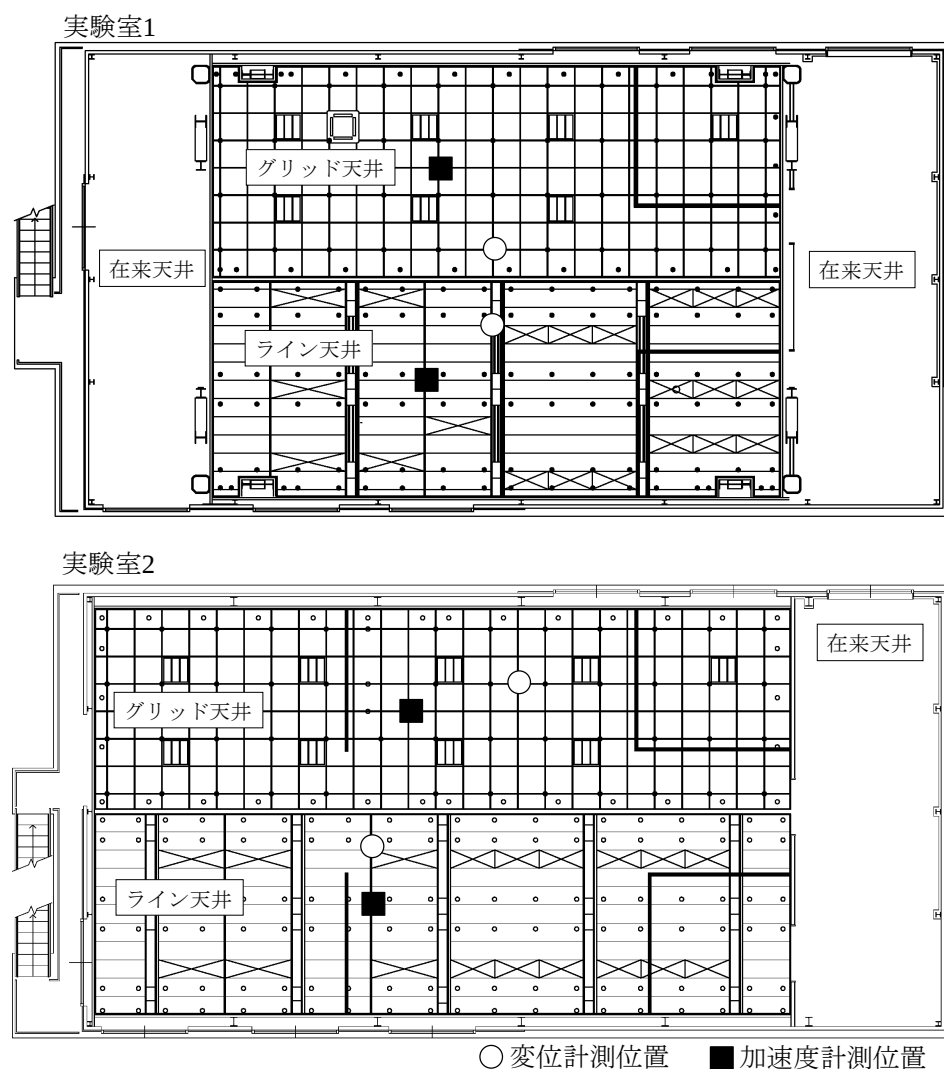
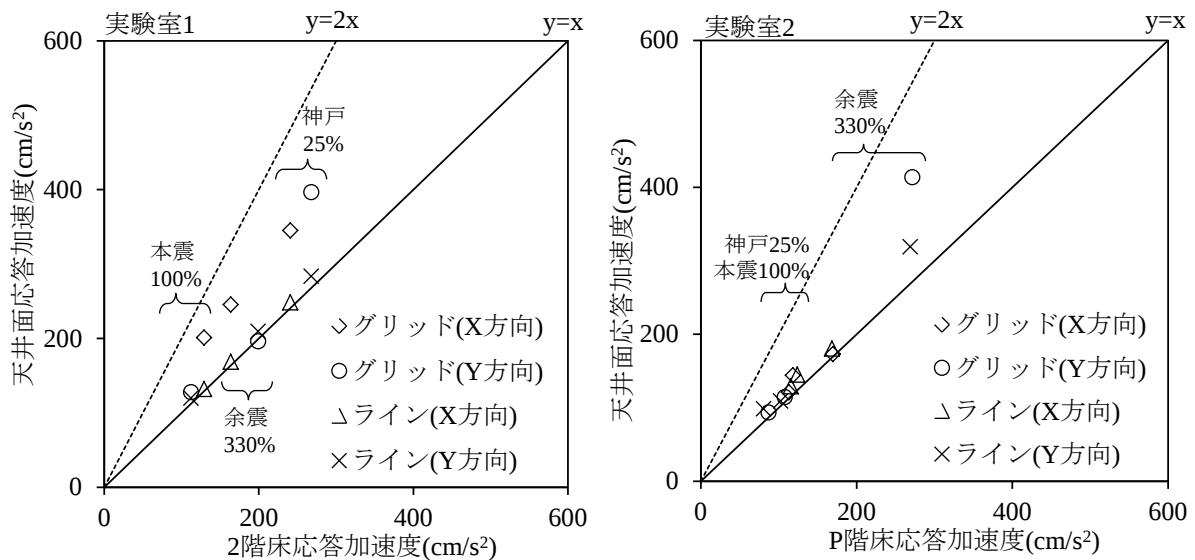
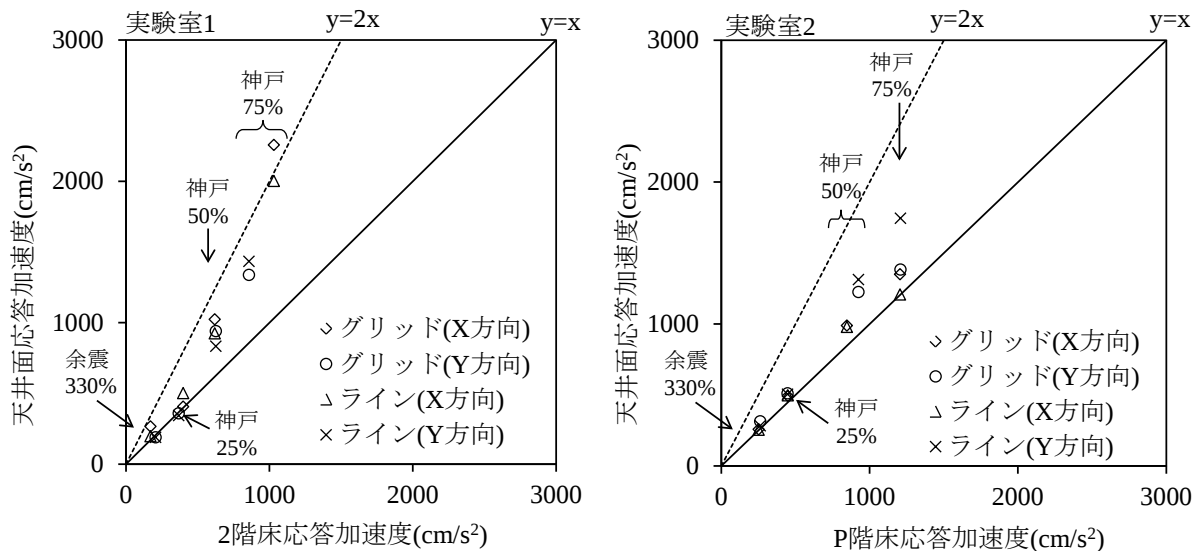


図 3-40 天井面の加速度と変位の計測位置



(1) 高層モデルの場合



(2) 低層モデルの場合

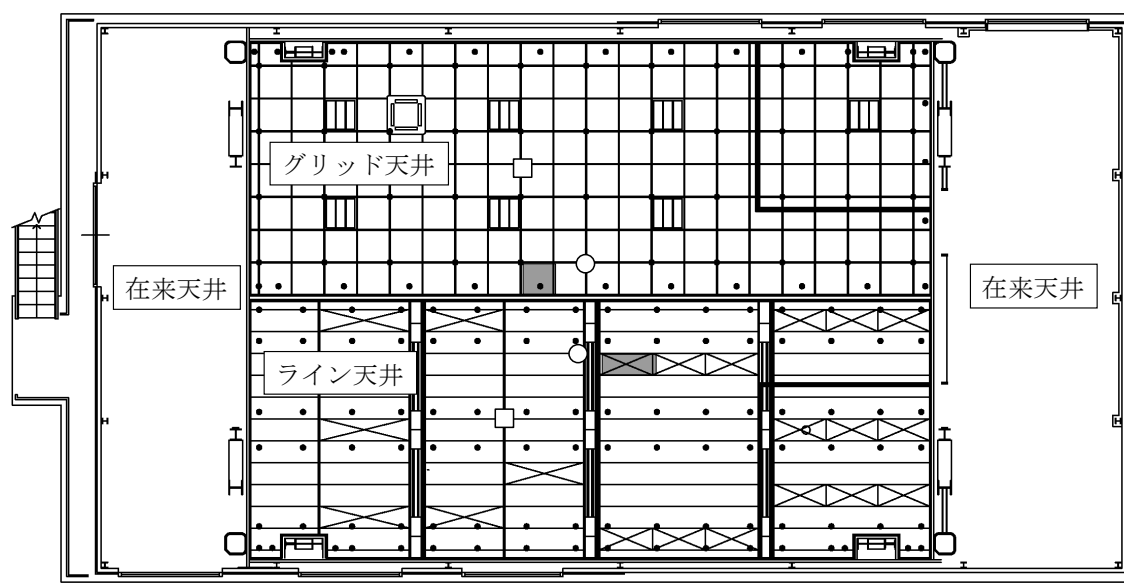
図 3-41 天井面と躯体の最大応答加速度

図 3-41 より構造躯体から天井面への応答増幅を見ると、高層モデルの場合も低層モデルの場合も約 1.0～2.0 倍の範囲に分布している。天井の種類による水平方向の加速度の応答倍率の違いは小さいが、グリッドタイプの方がやや大きい傾向がある。

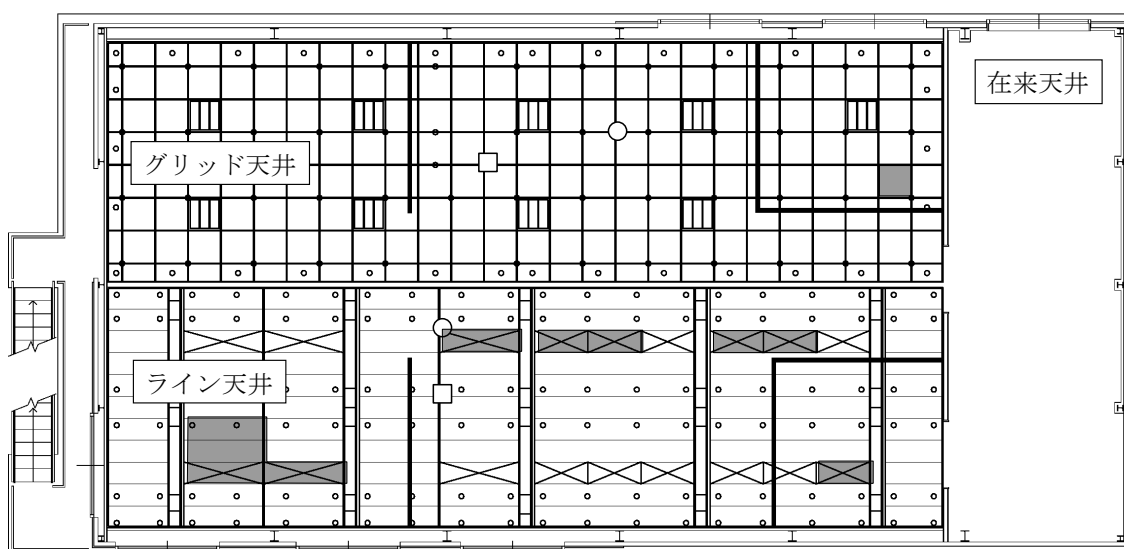
高層モデルの場合には天井下地に振れ止めブレースを設置していること、および天井に入力された加速度も小さかったことから、実験後の天井の損傷観察によると、ライン天井の一部の設備プレート等に損傷や天井ボードの位置ずれが発生したものの、天井ボードの落下や、天井下地・振れ止めブレースに損傷・変形は見られず、地震後の機能維持確保を確認した。

低層モデルの場合には振れ止めブレースを撤去して実験を行ったが、JMA 神戸 75%入力の際に、図 3-42 に示す位置の天井ボードの落下が発生した。ライン天井では取り外しができる点検口を中心に実験室で 1 か所、実験室 2 の 4 ヶ所で発生し、グリッド天井でも実験室 1 と 2 でそれぞれ 1

枚の落下が発生した。図 3-43 にライン天井の点検口の概要と、落下した点検口の写真を示す。ライン天井の点検口は専用の取付金具により、常時、着脱可能になっている。そのためライン天井のボードの中では天井面の変形や加速度により落下しやすいものとなっている。また落下した場合には取付金具と一緒に落下するため、落下した場合には室内の居住者の安全に与える影響は大きい。一方、グリッド天井の天井ボードは、設備部分以外は同じ仕様の岩綿吸音板で構成される。そのため落下した場合にはライン天井の点検口ボードよりは安全と言える。



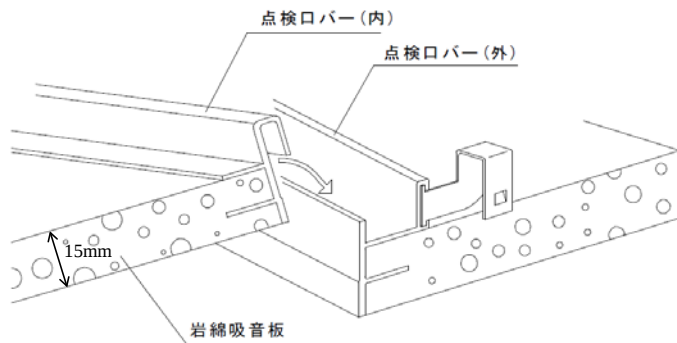
(1) 実験室 1



(2) 実験室 2

■ JMA神戸75%入力で脱落したボード ○ 変位計測位置 □ 加速度計測位置

図 3-42 JMA 神戸 75%入力で脱落した天井ボードの場所



脱落した点検口ボードとバー

図 3-43 ライン天井の点検口の概要と脱落した点検口の損傷状況

日本建築学会「地震防災総合研究特別調査委員会」では、地震後の機能確保の面では、構造躯体の耐震性のみならず総合的な耐震性の評価を目的として「耐震メニュー2001」^{3.26)}「耐震メニュー2004」^{3.27)}を出している。その中で落下防止の安全機能の観点から表 3-11 が提案されている。JMA 神戸 75%入力後のシステム天井を表 3-11 の被害の段階で評価すると、ライン天井部分では重損、グリッド天井部分ではボードの落下は発生しているものの、復旧の容易さを考慮すると軽損～中損と判断された。

表 3-11 建物の機能維持からみた落下防止に関する室内被害のランク

被害の段階	軽損	中損	重損
落下物による被害	・内外装部材の落下による被害はほとんどない	・軽量の内外装部材が落下し、人に軽傷を負わせる	・重い内外装部材やガラスが落下し、人に重軽傷を負わせる
部材の変形・亀裂、剥離・剥落等	・天井や壁の一部に微小な亀裂、変形、移動が生じる	・天井や壁の一部に変形や亀裂が生じ、一部のガラスにひびが入る	・天井や壁が大きく変形したり脱落する
室内での物品の散乱	・ほとんどない	・固定されていない家具等や、その収集物が転倒・散乱する	・建物の部材や瓦礫が散乱する ・固定された家具等も転倒・破損する
フリーアクセス床	・ほとんど被害はない	・床パネルの一部に破損・脱落、浮きが生じる	・床パネルに破損・脱落、浮きが生じる ・固定床部分が破損する
天井	・部材の落下はない ・従来工法では一部に目地ずれや変形が生じる ・システム天井では一部のボードがずれる	・従来工法では目地ずれや変形が発生し、破片が落下・散乱する ・システム天井のラインに曲がりやずれが発生する ・一部のパネルが落下するが設備の落下はない	・従来工法の天井が大きく破損し、部材が落下する ・システム天井の部材がずれ、変形、落下する ・重量部材が落下する
天井設備（照明器具等）	・吊下げ器具が揺れるが他の部位・部材への衝突はない ・落下するものはない	・吊下げ器具が揺れ、天井その他の部位・器具に衝突する ・一部の吹出口、ガラリ、スピーカー等がずれる ・器具の落下はない	・吊下げ器具が大きく揺れて天井その他の部位・器具に衝突する ・吹出口、ガラリ、スピーカー等がずれる、落下する

今回モデル化したシステム天井の損傷ランクについては、躯体の応答加速度、天井面での応答加速度だけでは評価が難しいと言える。とくに低層モデルの場合には耐震要素の振れ止めブレースが無い場合、天井面の外周を壁が支えること（本実験では LGS 壁と横胴縁のチャンネル材で構成される）で抵抗している効果が、どこまで揺れに対して抵抗しているかが判り難い。今回モデル化したシステム天井は、外周面を非構造部材の間仕切り壁相当の部材に対して廻り縁を介してクリアランスなく施工されている。そのため面全体で見ると構造体との相対変位は小さい。しかし、実際には天井面は構造躯体と比べても剛ではなく、また間仕切り壁を介して書架の地震時荷重が伝わったり、天井内の建築設備の慣性力が部分的に作用するため、天井面内でも一樣な変位とはならず、躯体との相対変位が発生していると考えられる。

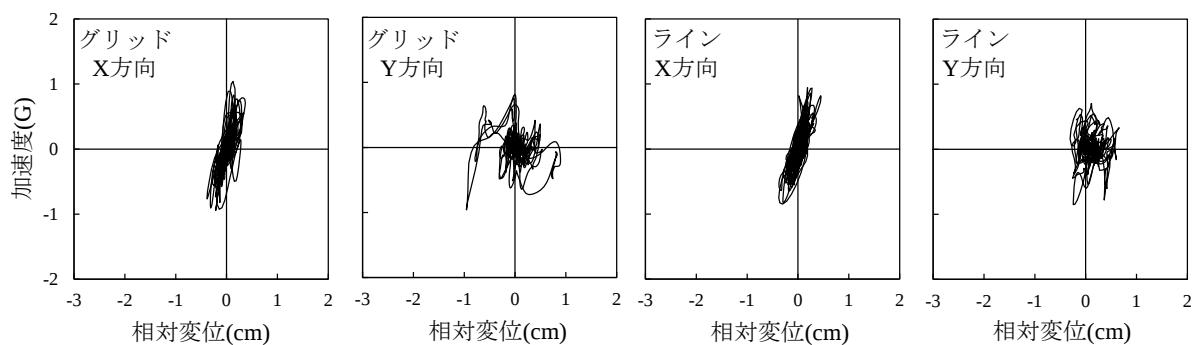
実験では上層階の構造床と天井面との相対変位を歪みゲージ型変位センサー（定格：±50mm）で計測を複数個所で行っており、天井面の加速度も複数個所で計測している。そこで天井面と構造躯体の相対変位について分析した。分析に用いた代表点の計測位置は図 3-40 である。応答加速度と相対変位関係を求めた結果を図 3-44～図 3-45 に示す。なお加速度は天井面の最大値を評価したときと同様に 20～25Hz の台形型のローパスフィルタ処理をした。

図 3-44 は実験室 1 の結果で、JMA 神戸 50%と JMA 神戸 75%入力の場合について示した。Y 方向についてはグリッド天井、ライン天井ともに履歴形状が膨らんでいる。一方、X 方向については片振幅 1cm 以内で、入力レベルによらずほぼ同様の傾きを持って振動している。両方向とも変位の時刻歴波形を見ると、有意な残留変形などは発生していないため、Y 方向については加速度と変位の位相のずれの影響と考えられる。

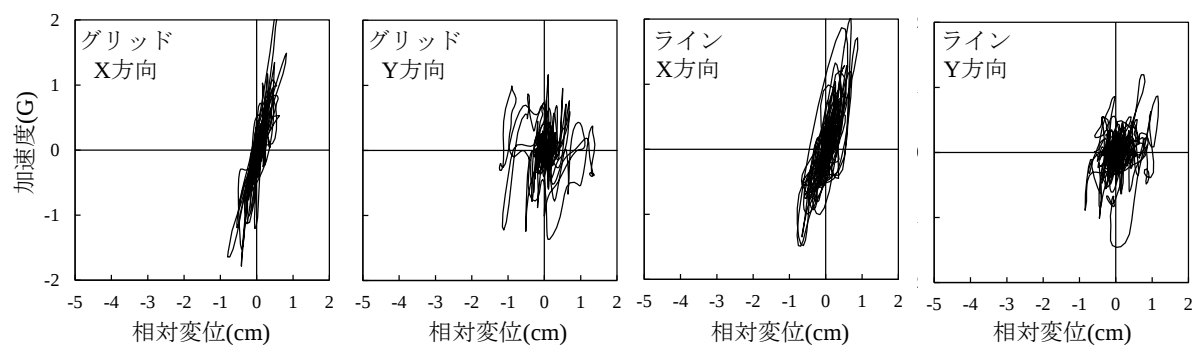
図 3-45 は実験室 2 の結果で、同様に JMA 神戸 50%と JMA 神戸 75%入力の場合について示した。天井面の外周が壁により変位拘束されるため、逆 S 字型の形状をとっており、ライン天井の Y 方向では変位量が特に大きく、JMA 神戸 75%入力時には 3～4mm の残留変形が残った。一方、グリッド天井の方は変位量が安定している。

加速度に天井の質量をかければ荷重となり応答加速度－相対変位関係は荷重変形関係となり、剛性評価や耐力評価が可能となる。しかし本実験では天井面が一体として評価できる領域の評価などが困難である。そこで加振毎に応答加速度－相対変位関係の等価剛性（傾き）を求め、その変化を評価した。ここでは履歴形状が安定して求められた実験室 2 の場合について整理した結果を図 3-46 に示す。各加振毎での等価剛性は最大相対変位、最小相対変位が発生時の応答加速度から求めた割線剛性を平均して定義し、横軸に上層階の床応答加速度の最大値をとった。また等価剛性は余震 330%の加振の等価剛性の値により正規化した。グリッド天井は大きく等価剛性が低減することではなく 0.7 程度となっている。一方、ライン天井では JMA 神戸 50%以上の加振で Y 方向が大きく低減している。ライン天井の Y 方向が振動中に変形しやすく、T バー間隔が広がり天井ボードの落下につながったと考えられる。

また実験室 2 の在来天井部分で、同様に加速度－相対変位関係を記したものを図 3-47 に示す。履歴形状は X 方向では片振幅 0.3～0.4cm で変位が頭落ちして逆 S 字型になっているが、Y 方向ではマイナス方向の変位が大きくなっている。在来天井の周囲の境界は Y 方向のマイナス方向に変位する場合のみ LGS 壁に面し、その他はチャンネル材に面している。Y 方向で変位の伸びは LGS 壁の剛性がチャンネル材よりも低かったためと考えられる。

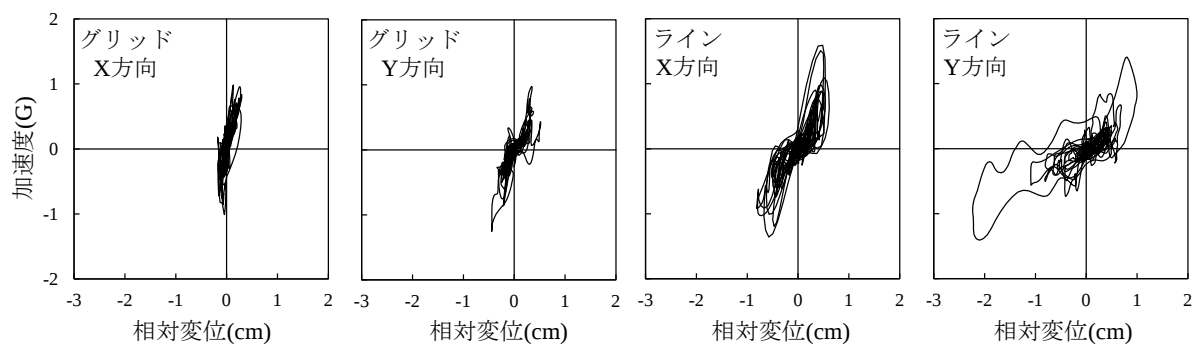


(1) JMA 神戸 50%

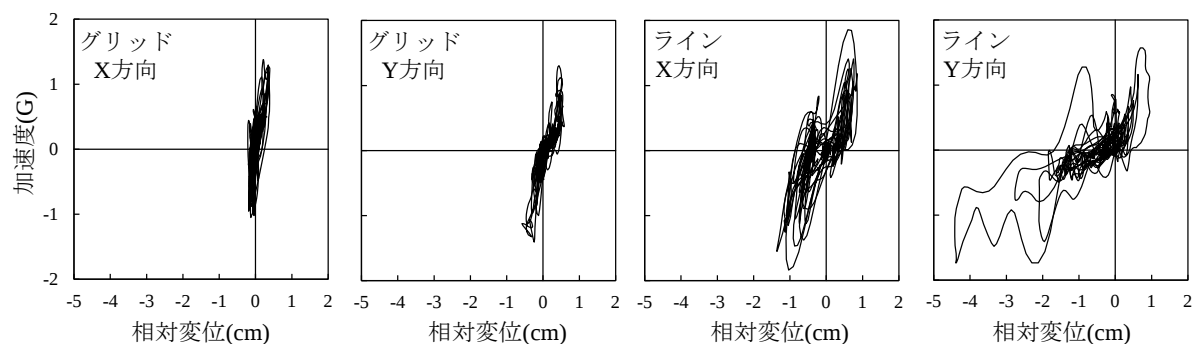


(2) JMA 神戸 75%

図 3-44 実験室 1 の天井面の応答加速度－相対変位関係



(1) JMA 神戸 50%



(2) JMA 神戸 75%

図 3-45 実験室 2 の天井面の応答加速度－相対変位関係

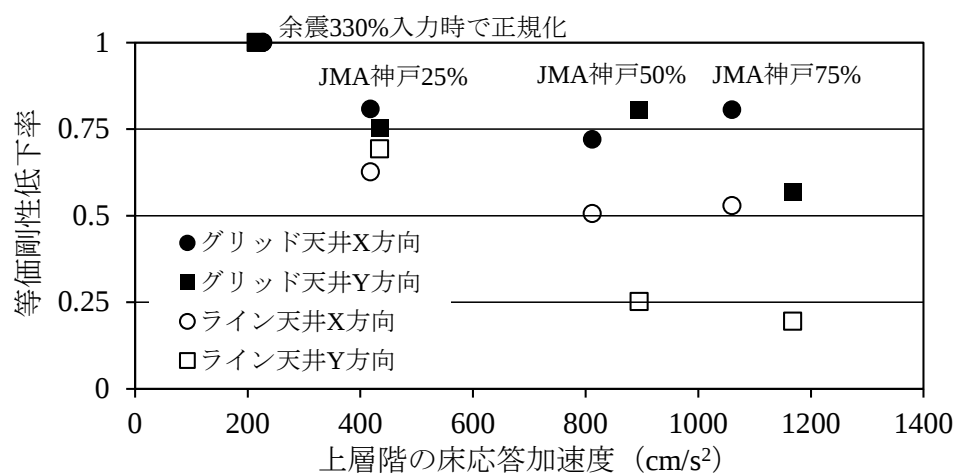
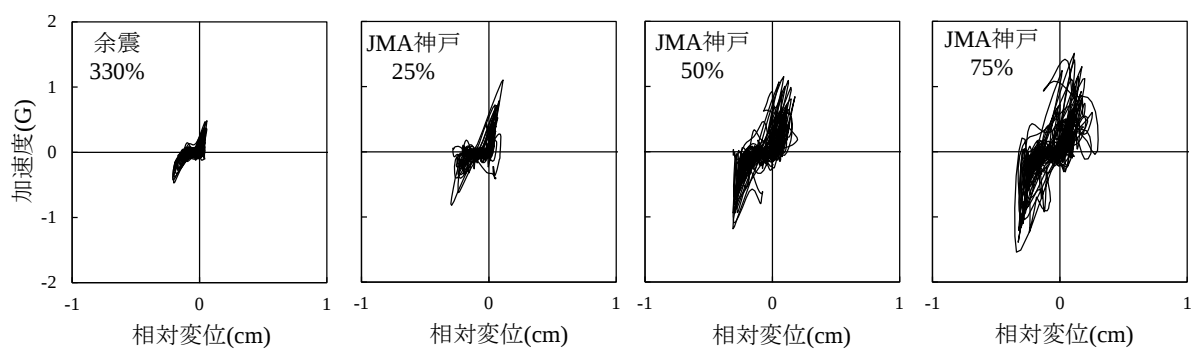
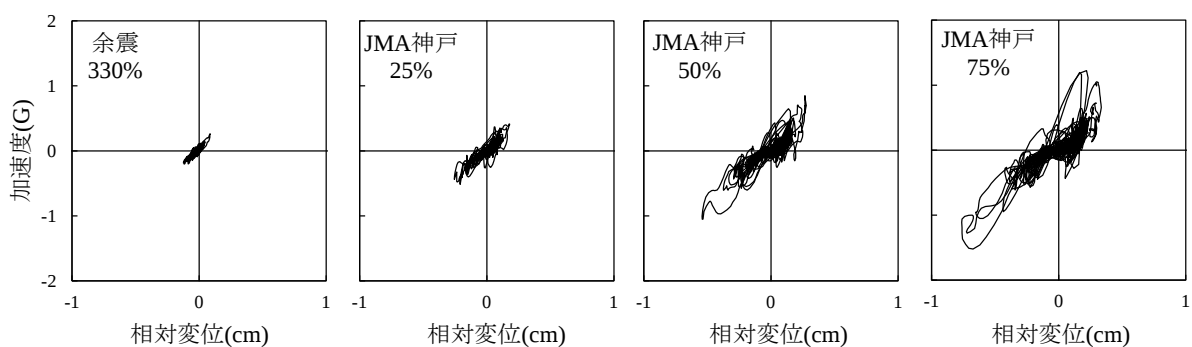


図 3-46 天井の等価剛性の低下率（低層モデル，実験室 2）



(1) X 方向



(2) Y 方向

図 3-47 実験室 2 の在来天井の天井面の応答加速度－相対変位関係

3.3.4 建築設備の応答

天井内に設置した設備機器の応答として空調機の最大応答加速度と躯体の最大応答加速度との関係を図 3-48～図 3-51 に示す。横軸に上層階の床の躯体の値を、縦軸に空調機の値を示した。空調機の地震時の機能維持を確認するために空調機を稼働状態のままに加振実験を行ったため、機器稼働による振動成分の除去を目的として機器の加速度には 20～25Hz の台形型のローパスフィルタを処理して最大値を求めた。なお設備機器を吊り下げた構造床と設備機器の応答加速度から求めた伝達関数より推測される 1 次固有振動数は 2～8Hz に分布している。

実験室 2 の空調機（表 3 の 4 階④、⑤）の応答を、吊りボルト間に X 字状に設置した振れ止めの有無により比較した。図 3-48 は高層モデルの場合であり、JMA 神戸 25%，本震 100%，余震 330%を入力した結果である。振れ止めが上下方向の加速度応答の低減にも効いていることが判る。図 3-49 は低層モデルの場合で、余震 330%，JMA 神戸 25%，50%，75%を入力した結果である。水平方向の応答は、振れ止めが無い場合は 2 倍程度の増幅になっているが、振れ止めがある場合は増幅が抑えられている。一方、上下方向の応答は加速度が小さい余震 330%では応答を抑えているが、JMA 神戸 25%以降の加振では応答低減効果はない。空調機の見視観察では、空調機④、⑤ともに JMA 神戸 25%入力時から吊りボルトの湾曲が報告されている。

図 3-50 および図 3-51 は実験室 1 の空調機①、空調機④の最大応答加速度である。実験室 1 の空調機 1 と 4 は、ともに振れ止めは施工されておらず、吊り設備の重量、吊り長さが異なるが、概ね躯体加速度の 2 倍程度に増幅されている。

なお、空調機の稼働状況を実験後に確認したところ異常音などの発生は無く、機器の回転数や電流値等の検査も正常範囲であり、2000(cm/s^2)以上の加速度を受けても機能維持した。

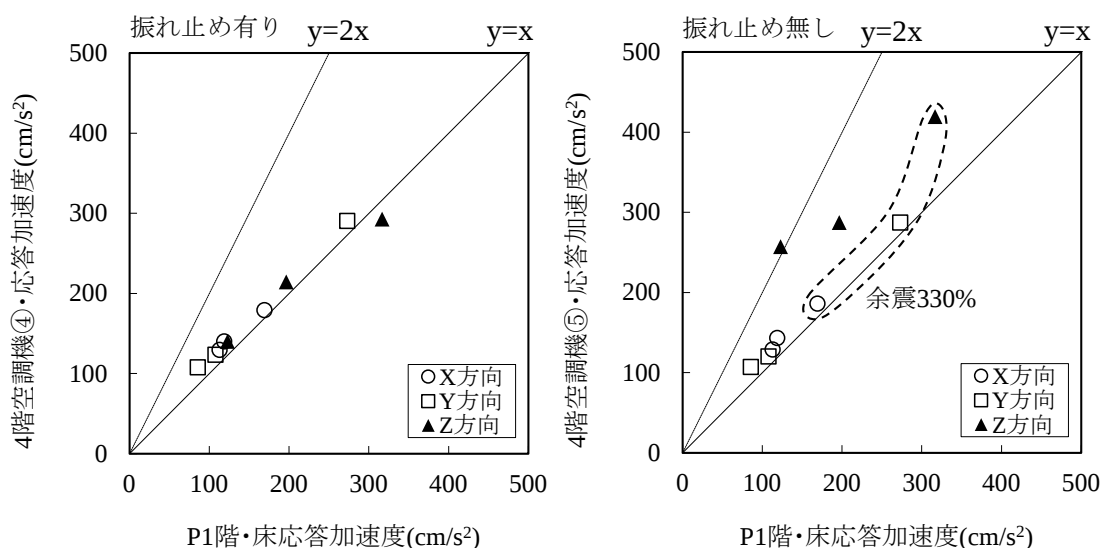


図 3-48 実験室 2 の空調機の最大応答加速度（高層モデル）

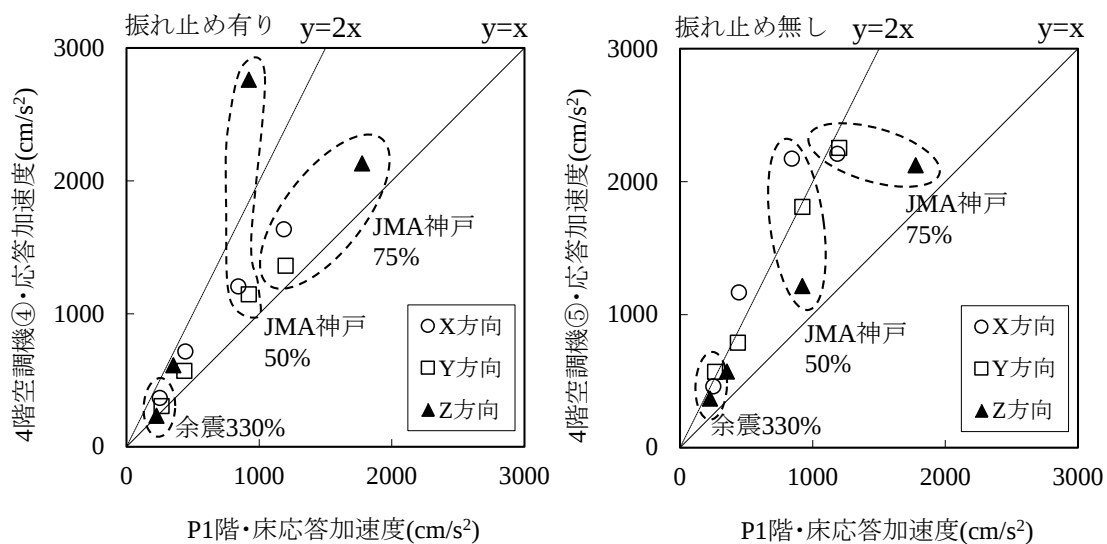


図 3-49 実験室 2 の空調機の最大応答加速度（低層モデル）

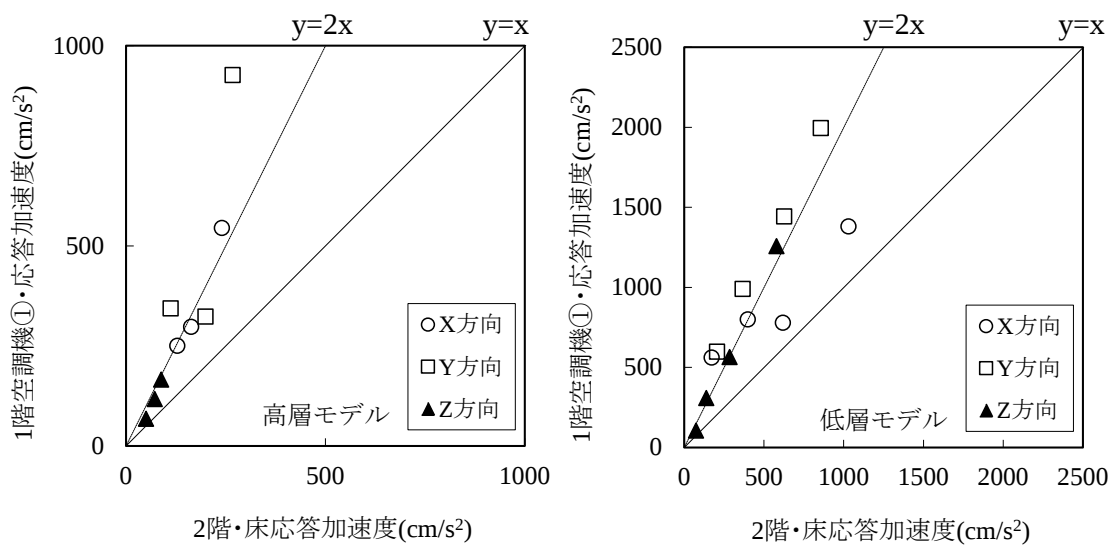


図 3-50 実験室 1 の空調機①の最大応答加速度

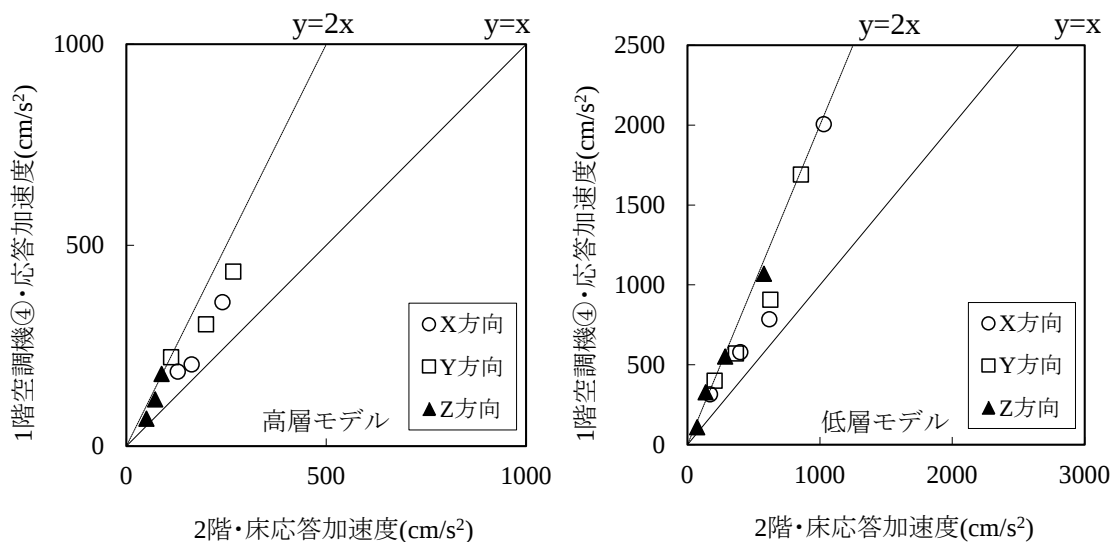
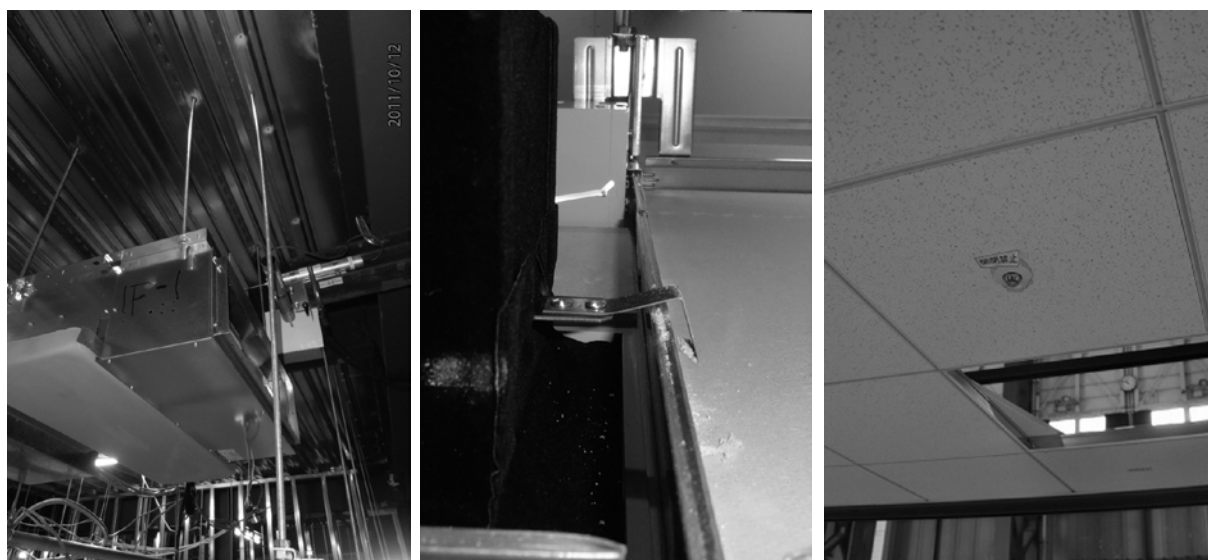


図 3-51 実験室 1 の空調機④の最大応答加速度

JMA 神戸 75%を入力した後の試験体の損傷観察の状況を図 3-52 に示す。(1)は天井隠蔽形空調機近傍の天井吊りボルトであるが、小型空調機の変位により湾曲している。(2)はグリッド天井のフレームに被せた吹出口の金属バネであり、加振後にやや開いた状態であり、固定具として締具が必要と判断される。(3)は試験体 1 階の鋼管 (SGP) 巻出し部のスプリンクラーであり、ヘッドが天井ボードを損傷させた。一方、ステンレス製自在管 (SUS) や樹脂管を用いた場合のヘッド部分の損傷は軽微～無被害であった。また振動実験前後でのスプリンクラーの配管圧の変化は無く、実験後に実施したスプリンクラーヘッドの耐圧試験でも空気の漏れは起こらず、所定の機能を保持していることを確認した。

全ての空調設備は稼働した状態で加振を行ったが、実験中の空調機器の停止や、実験後に機器の稼働が正常でなくなる等の状況は発生せず、また電流値にも変化は無く、所定の機能維持を確保した。排煙ファンも実験後の運転で正常に稼働した。排煙ファンの実験後の工場検査でも、排煙ファンとしての機能に影響は無かった。



(1) 空調機の吊りボルトへの干渉 (2) 吹き出し口の留め具の開き (3) スプリンクラーヘッド周り

図 3-52 設備関係の損傷状況

3.4 室内被害状況とマクロな被災度指標

前節までは振動実験結果による構造躯体の応答、非構造部材、家具什器、建築設備の応答について、個々の機能維持の面から評価し報告した。本節では実験結果から室内被害状況を総括的に判断し、震度階などの被害評価のマクロな指標との比較をおこなう。

まず実験結果のビデオ映像から、加振前～加振中～加振後の3段階でイメージをキャプチャしたものを図 3-53～図 3-59 に示す。加振中の切り出したステップは、概ね、試験体の最上層の応答変位が最大となった時点付近とし、実験室1～3まで同じ時刻での映像を切り出した。

図 3-53 は高層モデル・JMA 神戸 25%の場合である。低層階の実験室1の住宅部分で、キャスター付きのテレビ台の移動や固定していない棚の揺れが観察されるが、内容物の飛び出し等は発生していない。高層階では地震の揺れの影響はほとんどない。

図 3-54 は高層モデル・本震 100%の場合である。実験室1・住宅部分でテレビ台の移動、高層階・実験室3・オフィス部分でアスペクト比の大きい家具の転倒があったが、全体的には地震の揺れの影響は少ない。

図 3-55 は高層モデル・余震 330%の場合である。実験室1・住宅部分でテレビ台の大きな移動、実験室2・3のオフィス部分ではキャスター付き家具の大きな移動、植栽の転倒が見られる。また実験室2・住宅部分では固定の無い棚類が一斉に倒れている。

図 3-56 は低層モデル・余震 330%の場合である。実験室3のアスペクト比の大きい家具の転倒があったが、植栽の転倒もなく、全体的には地震の揺れの影響は少ない。

図 3-57 は低層モデル・JMA 神戸 25%の場合である。テレビ台等のキャスター付きの家具の若干の移動が観察され、実験室3のショートキャビネットのロッキング振動が確認され、残留変位が見られる。

図 3-58 は低層モデル・JMA 神戸 50%の場合である。実験室1の住宅部分では転倒する書棚が発生し、実験室2のオフィス部分でもハイキャビネットの転倒、書棚の内容物の飛び出しが発生した。実験室2の住宅部分では書棚の転倒は発生していないが、大きなロッキング振動が確認できる。また粘着シートにより間仕切壁に固定した書棚類では、粘着シートの固定が外れた。実験後の観察では粘着シートが間仕切壁より剥がれたためではなく、間仕切壁の仕上げ材のシートが剥がれたものであった。粘着シート系の耐震固定は家具や壁を傷めないため、近年、開発商品も増えてきているが、また実験室3のショートキャビネットでは転倒には至らないが、ロッキング振動や滑りによる残留変位が発生している。

図 3-59 は低層モデル・JMA 神戸 75%の場合である。JMA 神戸波による入力では一番レベルが大きいので、一番室内被害も大きく、大きな被害は実験室2, 3で発生している。実験室2, 3では耐震固定したキャビネットのアンカー抜けや、棚の転倒には至らないが内容物の飛び出しが確認された。3段の引き出しを持つショートキャビネットでは加速度が一番大きくなる最上段の引き出しが飛び出し、室内被害を増大させている。

上記したビデオ映像観察結果、および 3.3.2～3.3.4 で考察した試験体の応答から、表 2-1 に示した気象庁震度階級解説関連表の屋内の状況に関する記述をもと、各実験室の室内被害を震度階評価した結果を表 3-12 に示す。本来、震度階は地表面における地震の揺れによる人や構造物の応答を基に規定されるため、実験室1～3の室内被害状況は震動台（地表面相当）の揺れで定義される震度階になる。高層モデル・低層モデルともに、全体として上層階（実験室2）の方が下層階（実

験室 1) よりも被害程度が大きくなる傾向があるが、高層モデル、特に長周期成分が卓越した余震 330%の実験において、震動台と実験室の震度階の差異が大きい。また低層モデルでも試験体が大きな応答を示した JMA 神戸 50%、75%の場合には震度階の差異が大きい。これは構造物の共振により応答が入力よりも増幅するためで自明なことであるが、震度階によるマクロな被害予測を高度化するためには、地震動の周期特性と建物の周期特性を考慮する必要があると言える。

床応答加速度から算出される計測震度による震度階と、実験結果の観察から求めた震度階とを比較すると、全体的に計測震度から求めた震度階よりも実験結果の観察による震度階の方が小さい結果となった。計測震度よりも大きい震度階評価となったケースは、高層モデル・余震 330%入力の場合の実験室 2 の場合だけであった。これは、長周期地震動の卓越周期に建物の固有周期が近い場合には、計測震度を求める際の長周期成分を低減するフィルターの影響が大きく出てしまうことを示唆している。また、全体として観察による震度階が小さ目に評価される原因としては、本実験の構造躯体が鉄骨造のフレーム構造によるものであり、木造の低層家屋などと比べて剛な構造であることが考えられる。これは気象庁震度階級解説関連表の屋内の状況に関する記述は、木造の低層建物である住宅を含めて記述されている。そのため、全体的に実験結果の室内被害の状況が震度階級関連表よりも小さくなったと考えられる。

2 章でも述べたように、気象庁震度が長周期地震動の揺れに共振する長周期構造物の揺れの被害を適切に評価できないことを改善するために、気象庁は長周期地震動階級を試行している。長周期地震動階級は観測された地表面の加速度波形から減衰定数 5%の絶対速度応答スペクトルを固有周期 1.6 秒から 7.8 秒までで計算し、その最大値により階級が区分される。そこで高層モデルの実験の入力地震動から長周期地震動階級を算出した結果を表 3-13 に示す。長周期地震動階級は評価の対象とする周期帯の幅が非常に広いため、参考として試験体の固有周期帯の 3~4 秒での最大値も記載した。また、実験結果による室内被害の状況を、表 2-2 の長周期地震動階級関連解説表の室内の状況と合わせて、実験結果として記述した。

上層階の実験室 2 の室内被害は 3~4 秒の最大値による階級との整合性が高い。また低層階の実験室 1 の室内被害は建物の高次のモードの影響が大きいため、長周期地震動階級、3~4 秒の最大値による階級のいずれとの比較も課題がある。

なお、実験結果の震度階級および長周期地震動階級の状況の判断は、気象庁の解説表に準じてビデオ画像や実験後の写真の分析から行ったが、この判断は筆者一人で行ったものである。判断のばらつきは小さくなるが、被害判断にバイアスがかかっている可能性もある。この点を改善するためには、複数名による観察と判断が望ましい。アンケート調査による震度算定に関する研究は各種行われており^{3,28)}、例えばそれらの研究でのアンケート項目を考慮したチェックリストを作成し、複数名で実験結果をチェックすること等が考えられる。



(1)実験室1 オフィス部分



(2)実験室1 住宅部分



(3)実験室2 オフィス部分



(4)実験室2 住宅部分



(5)実験室3 オフィス部分

図 3-53 高層モデル JMA 神戸 25%入力の場合の室内状況
(左：加振前，中：21.23 秒付近，右：加振終了時)



(1)実験室1 オフィス部分



(2)実験室1 住宅部分



(3)実験室2 オフィス部分



(4)実験室2 住宅部分



(5)実験室3 オフィス部分

図 3-54 高層モデル 西新宿本震 100%入力の場合の室内状況
(左：加振前，中：136.45 秒付近，右：加振終了時)



(1)実験室1 オフィス部分



(2)実験室1 住宅部分



(3)実験室2 オフィス部分



(4)実験室2 住宅部分



(5)実験室3 オフィス部分

図 3-55 高層モデル 西新宿余震 330%入力の場合の室内状況
(左：加振前，中：64.93 秒付近，右：加振終了時)



(1)実験室1 オフィス部分



(2)実験室1 住宅部分



(3)実験室2 オフィス部分



(4)実験室2 住宅部分



(5)実験室3 オフィス部分

図 3-56 低層モデル 西新宿余震 330%入力の場合の室内状況
(左：加振前，中：57.32 秒付近，右：加振終了時)



(1)実験室1 オフィス部分



(2)実験室1 住宅部分



(3)実験室2 オフィス部分



(4)実験室2 住宅部分



(5)実験室3 オフィス部分

図 3-57 低層モデル JMA 神戸 25%入力の場合の室内状況
(左：加振前，中：13.28 秒付近，右：加振終了時)



(1)実験室1 オフィス部分



(2)実験室1 住宅部分



(3)実験室2 オフィス部分



(4)実験室2 住宅部分



(5)実験室3 オフィス部分

図 3-58 低層モデル JMA 神戸 50%入力の場合の室内状況
(左：加振前，中：13.35 秒付近，右：加振終了時)



(1)実験室1 オフィス部分



(2)実験室1 住宅部分



(3)実験室2 オフィス部分



(4)実験室2 住宅部分



(5)実験室3 オフィス部分

図 3-59 低層モデル JMA 神戸 75%入力の場合の室内状況
(左：加振前，中：13.4 秒付近，右：加振終了時)

表 3-12 室内被害状況から評価した各実験室の震度階

(1) 高層モデル

	震動台（地表面）		実験室1（6階相当）			実験室2（27階相当）		
	計測震度	震度階	計測震度	震度階※	実験結果	計測震度	震度階※	実験結果
JMA神戸25%	5.2	震度5強	5.6	震度6弱	震度5強	5.1	震度5強	震度5弱
本震100%	4.4	震度4	4.9	震度5弱	震度4	5.0	震度5弱	震度5弱
余震330%	4.8	震度5弱	5.3	震度5強	震度5弱	5.5	震度6弱	震度6強

(2) 低層モデル

	震動台（地表面）		実験室1（1階相当）			実験室2（3階相当）		
	計測震度	震度階	計測震度	震度階※	実験結果	計測震度	震度階※	実験結果
余震330%	4.9	震度5弱	4.9	震度5弱	震度4	5.3	震度5強	震度5弱
JMA神戸25%	5.2	震度5強	5.3	震度5強	震度5強	5.9	震度6弱	震度5強
JMA神戸50%	5.8	震度6弱	5.9	震度6弱	震度6弱	6.5	震度7	震度6強
JMA神戸75%	6.2	震度6強	6.2	震度6強	震度6強	6.8	震度7	震度7

※計測震度の値から相当する震度階

表 3-13 実験結果から求めた長周期地震動階級（高層モデルの場合）

地震名	計測震度	震度階	絶対速度応答スペクトル値(cm/s)				実験結果	
			1.6～7.8秒	階級*1	3～4秒	階級*2	実験室2	実験室1
JMA神戸25%	5.2	5強	42	2	18	2	1	2
本震100%	4.3	4	50	3	40	2	2	2
余震330%	4.8	5弱	156	4	156	4	4	2

*1 1.6～7.8秒の最大値から区分した長周期地震動階級

*2 3.0～4.0秒の最大値から区分した階級

3.5 まとめ

首都圏で想定される長周期地震動に対する超高層建物の室内被害の様相を明らかにするため、固有周期で約 3.5 秒の超高層建物の揺れを再現し、かつ実大規模の室内空間を模擬できる試験体を作成して振動実験を行った。またより包括的に室内被害を把握するために低層建物の揺れを再現した実験も行った。以下に本章で得られた知見を示す。

- ・高層建物の上層階の揺れと下層階の室内の揺れを同時に再現する実験装置を、積層ゴムと鋼製ダンパーで構成される縮約層により作成する手法を提案し、実大規模の振動実験により応答の再現を確認した。その結果、高層建物の揺れについてはプロトタイプの 1 次～3 次モードの揺れを再現できることを確認した。
- ・高層モデルおよび低層モデルの実験結果より、建物一次固有周期に対し極めて稀な地震動レベルの入力に対して、天井の鋼製下地の振れ止め、家具の転倒防止、コピー機の移動防止などの対策により、天井面の損傷や家具什器の移動・転倒が抑えられ室内被害軽減を確認した。
- ・高層モデルへの極めて稀な地震動レベルの入力（西新宿余震 330%入力）について、床応答加速度から計算した計測震度の値による室内被災度は震度 6 弱相当であったが、ビデオ映像、実験後の室内被害の観察から震度 6 強相当の被害であり、床応答加速度を用いた計測震度による震度階であっても高層建物の室内被害を過小評価する可能性がわかった。
- ・低層モデルへの極めて稀な地震動レベルの入力（JMA 神戸 50%）について、床応答加速度による計測震度は震度 6 強相当であり、震度 6 強相当の室内被害が発生した。低層建物の場合は床応答加速度を用いた計測震度による評価で十分といえる。さらに低層モデルの室内に震度 7 相当の揺れが入力された実験では、転倒防止対策などの設計値を上回る外力により、対策を施した家具什器でも移動・転倒し、室内被害を重損化した。
- ・耐震対策の無いシステム天井（鋼製下地の振れ止めを撤去した低層モデルの実験）の地震時性能について見ると、JMA 神戸 25%入力（震度 5 強、稀な地震レベル）までは天井ボードの落下等なく機能維持した。さらに JMA 神戸 50%入力（震度 6 弱）、床応答加速度 $1000(\text{cm/s}^2)$ までは天井ボードの落下等の機能損失は発生しなかった。JMA 神戸 75%入力（震度 6 強）の入力ではボードの落下、鋼製下地の損傷など重損レベルとなったが、グリッド天井ではボードの落下はあったものの下地の損傷は小さく、軽微～中損レベルの被害に留まり、ライン天井よりも地震時性能が高いことがわかった。
- ・天井ボードの落下が人に与える影響を見ると、ライン天井では主に点検口とその周辺のボードが落下し、点検口の取り付け金具と一緒に落下するため、室内の居住者の安全に与える影響が大きい。一方グリッド天井では岩綿吸音板の落下のみであったため、室内の居住者の安全に与える影響はやや小さいと考えられる。
- ・高層モデルから低層モデルまでの一連の実験結果により、既往研究の家具の転倒限界曲線について、実験結果との整合性を確認できた。また書棚等の重量物を収納する家具は、転倒対策が設計震度まで機能した場合でも収納物の飛び出しが発生することがある。人の安全確保の面からは、被害の想定事象として取り扱う必要がある。
- ・建築設備の地震時の機能維持を検討するために、振動実験中であっても建築設備は稼働した状態で、消防設備のスプリンクラーも水を注水加圧した状態で実験を行った。実験後の確認では全ての機器の稼働状況は問題なく、機器本体に最大 2G を超える加速度が作用しても機能維持

された。

- ・構造躯体の床応答に対して、建築設備、家具等はそれぞれの固有周期で振動し、非構造部材に影響を与えることが解った。構造－非構造－建築設備－家具の相互作用による室内被害を低減するためには、相互の振動特性を考慮する設計が考えられる。

第 3 章 参考文献

- 3.1) 松森泰造, 白井和貴, 壁谷澤寿海, 大型振動台による鉄筋コンクリート耐震壁フレーム構造の耐震性に関する研究－実大 6 層試験体と 3 次元振動台実験結果の概要－, 日本建築学会構造系論文集, No.614, pp.85-90, 2007 年 4 月
- 3.2) Elide Pantoli, Michelle C. Chen, Xiang Wang, Rodrigo Astroza, Hamed Ebrahimian, Tara C. Hutchinson, Joel P. Conte, Jose I. Restrepo, Claudia Marin, Kenneth D. Walsh, Robert E. Bachman, Matthew S. Hoehler, Robert Englekirk, and Mahmoud Faghihi : Full-Scale Structural and Nonstructural Building System Performance during Earthquakes : Part II – NCS Damage States, Earthquake Spectra, Vol.32, No.2, pp.771-794, May 2016
- 3.3) 東京大学地震研究所, 防災科学技術研究所, 京都大学防災研究所 : 文部科学省委託研究 首都直下地震防災・減災特別プロジェクト 総括成果報告書, 平成 24 年 3 月
- 3.4) 文部科学省研究開発局, 独立行政法人防災科学技術研究所 : 3.2 長周期地震動による被害軽減対策の研究開発, 科学技術振興費 首都直下地震防災・減災特別プロジェクト ②都市施設の耐震性評価・機能確保に関する研究 平成 23 年度成果報告書, pp.67-168, 平成 24 年 5 月
- 3.5) Hisada, Y., Yamashita, T., Murakami, M., Kubo, T., Shindo, J., Aizawa, K. and Arata, T. : SEISMIC RESPONSE AND DAMAGE OF HIGH-RISE BUILDINGS IN TOKYO, JAPAN, DURING THE GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE. Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, Tokyo, Japan, pp.1110-1119, 2012
- 3.6) 岡田誠之, 前田信治, 柴田明德 : 東北地方太平洋沖地震における建築設備被害概要, BE 建築設備 2011 年 12 月号, pp.8-16, 2011 年
- 3.7) 清家剛, 江口亨, 熊谷亮平, 佐藤考一, 名取発, 脇山善夫, 井上朝雄, 山田哲, 島田侑子 : 東北地方太平洋沖地震および余震による学校施設の校舎と体育館の非構造部材の震動被害, 日本建築学会技術報告集, Vol. 20, No. 44, pp.405-410, 2014 年 2 月
- 3.8) 吉澤 睦博, 長江 拓也, 梶原 浩一, 中島 正愛 : 地震を受けた低層 RC 建物の非構造部材・建築設備の損傷と建物機能回復に至る過程の分析, 構造工学論文集 Vol.60 B, pp.521-528, 2014 年 3 月
- 3.9) 長江拓也・鐘育霖・島田侑・福山國夫・梶原浩一・井上貴仁・中島正愛・斉藤大樹・北村春幸・福和伸夫・日高桃子 : 超高層建物の耐震性を検証する実架構実験システムの構築 E－ディフェンス振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, No.640, pp.1163-1171, 2009 年 6 月
- 3.10) 建設大臣官房官庁営繕部 : 官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説 (平成 8 年版), pp.38-40, pp.127-130, 1996
- 3.11) 一般社団法人 全国建設室内工業協会 : 建築内装 システム天井仕上げ施工 教本, 平成 23

年 6 月

- 3.12) ロックウール工業会：阪神大震災 システム天井被害状況調査及び原因と対策案報告書，1995.03
- 3.13) ロックウール工業会：平成 23 年東北地方太平洋沖地震によるシステム天井被害状況調査報告書，2012.09
- 3.14) ロックウール工業会：システム天井 新耐震基準，2011 年
- 3.15) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所，一般社団法人新・建築士精度普及協会：建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説，平成 25 年 10 月
- 3.16) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所，一般社団法人日本建築構造技術者協会，一般社団法人新・建築士精度普及協会，一般社団法人建築性能基準推進協会：平成 28 年基準（隙間なし天井の新基準）の解説，平成 28 年 7 月
- 3.17) 酒井慎一，平田直：首都圏地震観測網の設置計画，地震研究所彙報，Vol.84, pp.57-69, 2009 年
- 3.18) 古村孝志：関東平野の深部基盤構造と長周期地震動リスク，地学雑誌，123(4)，pp.434-450，2014 年
- 3.19) 中央防災会議「首都直下地震対策専門調査会」，首都直下地震対策専門調査会報告，pp.9-14，平成 17 年 7 月
- 3.20) 川瀬博：震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能ー1995 年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶー，第 10 回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集，pp.29-34，1998 年
- 3.21) 金子美香，林康裕：剛体の転倒率曲線の提案，日本建築学会構造系論文集，No.536，pp.55-62，2000 年 10 月
- 3.22) 榎田竜太，長江拓也，梶原浩一，紀暁東，中島正愛：大振幅応答を実現する震動台実験手法の構築と超高層建物の室内安全性，日本建築学会構造系論文集，No.637，pp.467-476，2009 年 3 月
- 3.23) 佐藤栄児，酒井久伸，福山國夫，古川幸，鎌田崇義，笥淳夫，小林健一，井上貴仁，中島正愛：医療施設の機能保持性能を検証するための実大震動台実験 震災時における都市施設の安全性・機能性評価，日本建築学会構造系論文集，No.650，pp.771-780，2010 年 4 月
- 3.24) 社団法人 ビジネス機械・情報システム産業協会 技術委員会安全小委員会 複写機の地震安全対策WG：複写機，複合機及びデジタル印刷機の耐震実験結果報告～移動・転倒リスクの低減方法について～，pp.20，平成 23 年 10 月
- 3.25) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領，pp.273-275，2003 年 1 月
- 3.26) 日本建築学会 地震防災総合研究特別研究委員会 総合耐震安全性小委員会：耐震設計における安全レベルの設定手法，公開シンポジウム資料，pp.7-12，2000 年 1 月
- 3.27) 日本建築学会 地震防災総合研究特別研究委員会 危険度・耐震安全性評価小委員会：「耐震メニュー 2004」報告書，pp.17-23，2004 年 3 月
- 3.28) 太田裕，小山真紀，中川康一：アンケート震度算定法の改訂ー高震度領域ー，自然災害科学，16-4，pp.307-323，1998 年

第4章 実被害データに基づく室内被害と建物機能損失

4.1 はじめに

近年、地震に対する事業継続計画（BCP, Business Continuity Plan）を策定する機関・企業も多く、想定地震に対する保有施設の被害想定が行われている。被害想定には、近年の大地震による被害調査結果等に基づいて作成された被害関数が使われ、主に構造体の被害を中心に整理されたものが多い。

一方、東日本大震災における企業の被災状況の分析によると、建築設備が被害を受けた事業所の割合は産業の種類によらずほぼ同じ割合であること、震度 5 強以上の揺れの地域では 60%以上の事業所で何らかの設備被害が生じることが報告されている^{4.1)}。また、建築設備を対象とした被害アンケート調査結果では、被災施設の竣工年の割合で一番多かった年代が 1998 年以降であり、比較的、新しい施設での被害が多かったという特徴も報告されている^{4.2)}。しかし非構造部材や設備機器の被害の評価については、被害事例が構造体に比べると情報開示される場合が少なく、また典型的に整理された事例の報告はほとんどない。

本章では、ある公共施設の RC 造建物を対象に、構造被害は軽微であったものの、建築設備および非構造部材の損傷により建物の常時機能を損失し建物使用が制限された事例について、その被害から復旧工事の過程を追って入手したデータを基に、BCP 策定のための損失評価の高精度化を目的として、地震時の建物機能損失評価に建築設備や非構造部材の被害が与える影響を検討するとともに、被害予測手法の高精度化のために今後考慮すべき点を同定する。

4.2 建物概要

対象建物は 2001 年に設計された、つくば市内に建つ研究施設の事務所建物である。図 4-1 に建物の全景写真を、表 4-1 に建物概要を示す。建物の立面図を図 4-2 に、平面図を図 4-3 に示す。建物の A 通り～B 通り部分は鉄筋コンクリート造で、1 階および 3 階は主に会議室、2 階は図書室として利用されている。B 通り～D 通りは鉄骨造で、カフェテリア・ホワイエ展示などを含むアトリウム形式のパブリックゾーンで構成されており、3 階床まで吹き抜けた構造となっている。

「官庁施設の総合耐震計画基準」^{4.3)}に参考に耐震安全性を考慮して、設計されている。表 4-2 に施設の目的による耐震安全性の分類を示す。また表 4-3 に構造体、建築非構造部材、建築設備での耐震安全性の分類に対する目標を、構造体の設計での目標に対する設計方法の概要を表 4-4 に示す。対象施設は、多数の者が利用する社会教育施設という用途を考え、構造体はⅡ類相当の保有水平耐力の重要度係数 $I=1.25$ が採用されている。ただし構造計算上の適用基準に官庁施設の総合耐震計画基準は含まれていない^{4.4)}。

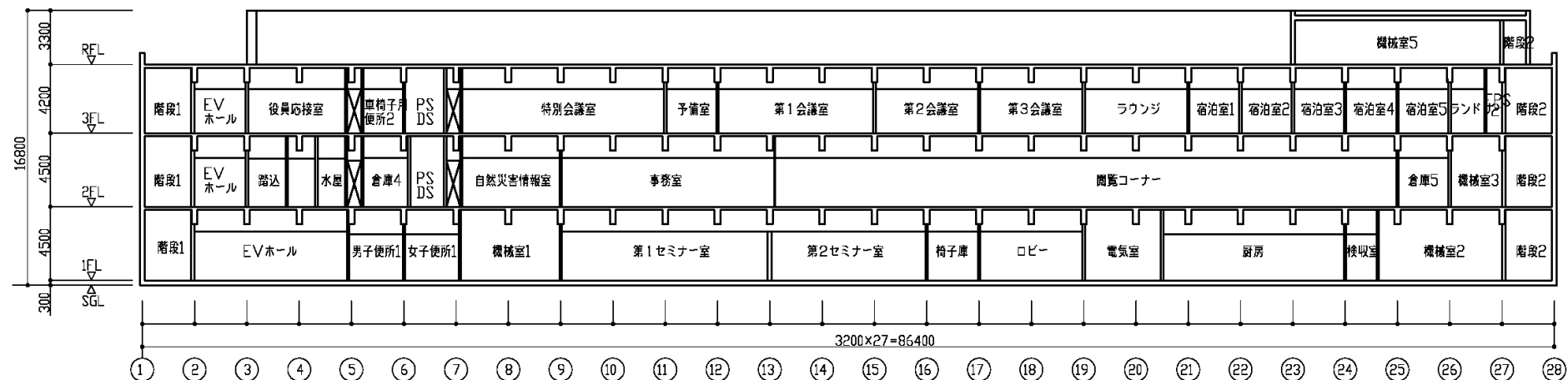
また表 4-2 の分類で「多数の者が利用する施設」を選択した場合、建築非構造部材は B 類、建築設備は乙類の耐震安全性となる。しかし、研究施設側では対象施設を災害発生時の対策の指揮や情報伝達のための施設として位置付けていたため、建築非構造部材は A 類、建築設備は甲類の耐震安全性を目標としていると分類されている。この点は、発注者側の要求性能と設計者側の設定した性能とで齟齬があった可能性がある。



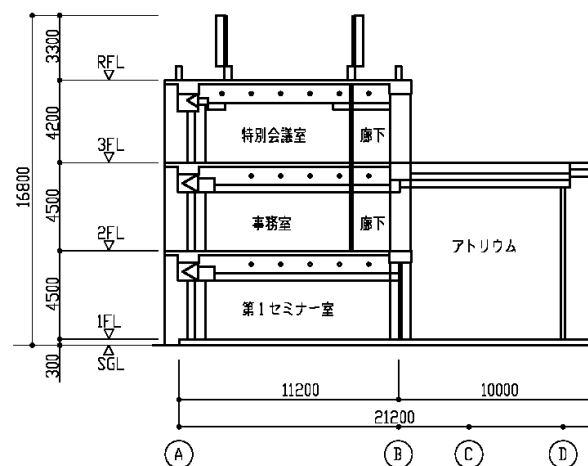
図 4-1 対象建物の全景

表 4-1 建築概要

構造・規模	鉄筋コンクリート造，一部鉄骨造 地上3階 塔屋1階		
建築面積	2486m ²	延床面積	4457m ²
地盤面高さ	SGL=TP+26.30m		
階高	1階床=SGL+300 1階4,500 2階4,500 3階4,200		
軒高	SGL+13,500	建物高	GL+16,800
標準スパン	梁間方向 11.2m，桁行方向3.2m		
建物用途	宿泊，会議，資料保管，食堂施設		
構造種別	鉄筋コンクリート造，一部鉄骨造		
構造形式	X方向：ラーメン構造，Y方向：ラーメン構造		
基礎種別	杭基礎（鋼管杭，500～600φ・既製杭）		
耐震安全性分類	一般官庁施設		
構造体	Ⅱ類	重要度係数	1.25
建築非構造部材	(A類)	建築設備	(甲類)

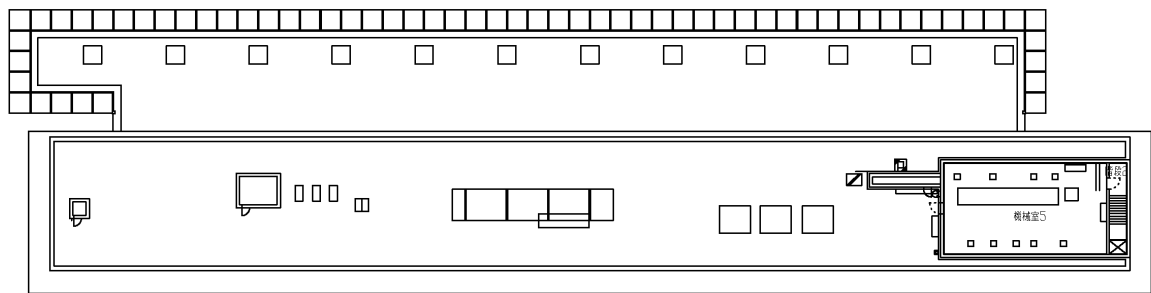


(a) 長辺方向 (A～B 通り)

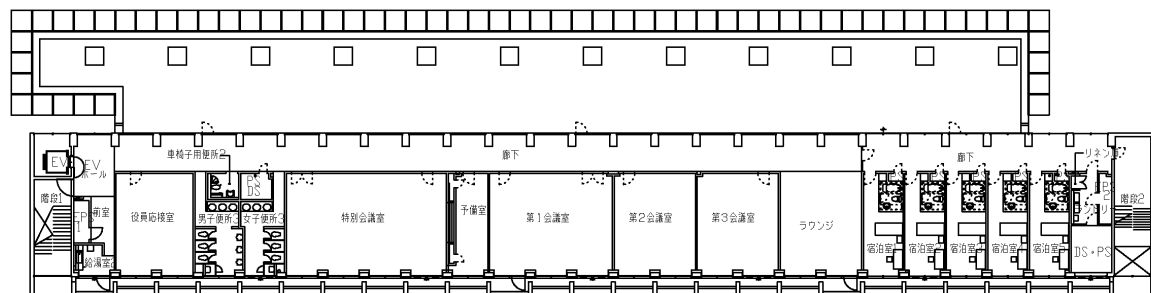


(b) 短辺方向 (10 通り)

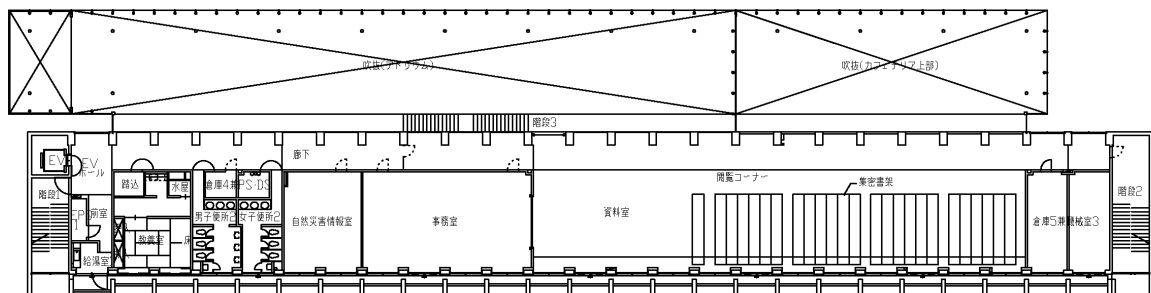
図 4-2 立面図と主な部屋の用途



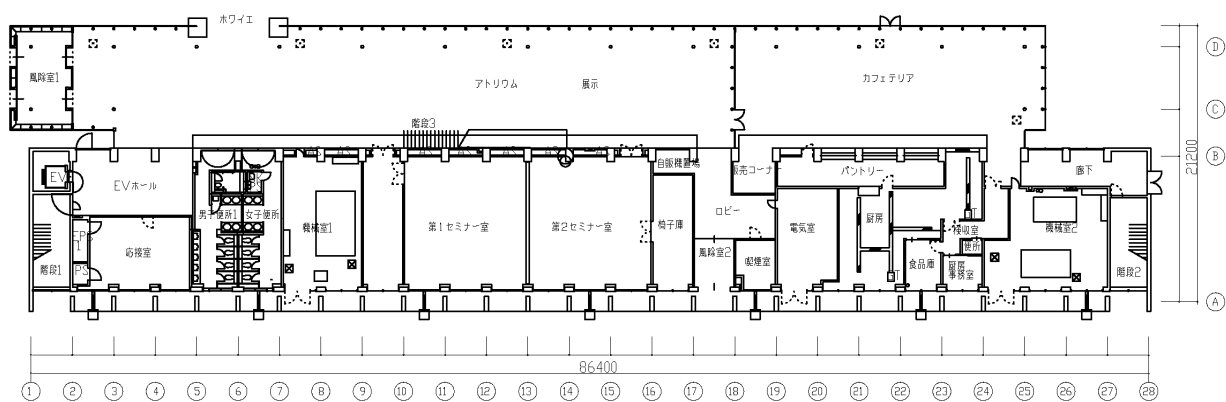
(a) 屋上階



(b) 3階



(c) 2階



(d) 1階

図 4-3 平面図

表 4-2 施設による耐震安全性の分類

分類		活動内容	対象施設	耐震安全性の分類		
				構造体	建築非構造部材	建築設備
災害応急対策活動に必要な施設	災害対策の指揮、情報伝達等のための施設	・災害時の情報収集，指令 ・二次災害に対する警報の発令 ・災害復旧対策の立案，実施 ・防犯等の治安維持活動 ・被災者への情報伝達 ・保健衛生及び防疫活動 ・救援物資等の備蓄，緊急輸送活動	・指定行政機関が入居する施設 ・指定地方行政機関のうち地方ブロック機関が入居する施設 ・指定地方行政機関のうち，東京圏，名古屋圏，大阪圏及び大震法の強化地域にある機関が入居する施設	I 類	A類	甲類
			・指定地方行政機関のうち上記以外のもの及びこれに準じる機能を有する機関が入居する施設	II 類	A類	甲類
	救護施設	・被災者の救援，救助及び保護 ・救急医療活動 ・消火活動等	・病院及び消防関係施設のうち災害時に拠点として機能すべき施設	I 類	A類	甲類
			・病院及び消防関係施設のうち上記以外の施設	II 類	A類	甲類
避難所として位置付けられた施設		・被災者の受け入れ等	・学校，研究施設のうち，地域防災計画において避難所として位置づけられた施設	II 類	A類	乙類
人命及び物品の安全性確保が特に必要な施設		・危険物を貯蔵又は使用する施設	・放射性物質若しくは病原菌類を貯蔵又は使用する施設及びこれらに関する試験研究施設	I 類	A類	甲類
			・石油類，高圧ガス，毒物，劇薬，火薬類等を貯蔵又は使用する施設及びこれらに関する試験研究施設	II 類	A類	甲類
		・多数の者が利用する施設	・文化施設，学校施設，社会教育施設，社会福祉施設等	II 類	B類	乙類
・その他			・一般官庁施設	II 類	B類	乙類

表 4-3 耐震安全性の目標

部位	分類	耐震安全性の目標
構造体	I 類	大地震動後、構造体の補修をすることなく建築物を使用できることを目標とし、人命の安全確保に加えて十分な機能確保が図られている。
	II 類	大地震動後、構造体の大きな補修をすることなく建築物が使用できることを目標とし、人命の安全確保に加えて機能確保が図られている。
	III 類	大地震動により構造体の部分的な損傷は生じるが、建物全体の耐力の低下は著しくないことを目標とし、人命の安全確保が図られている。
建築非構造部材	A 類	大地震動後、最大応急対策活動や被災者の受け入れの円滑な実施、または危険物の管理の上で、支障となる建築非構造部材の損傷、移動等が発生しないことを目標とし、人命の安全確保に加えて十分な機能確保が図られている。
	B 類	大地震動により建築非構造部材の損傷、移動等が発生する場合でも、人命の安全確保と二次災害の防止が図られている。
建築設備	甲類	大地震動後の人命の安全確保及び二次災害の防止が図られているとともに、大きな補修をすることなく、必要な設備機能を相当期間継続できる。
	乙類	大地震動後の人命の安全確保及び二次災害の防止が図られている。

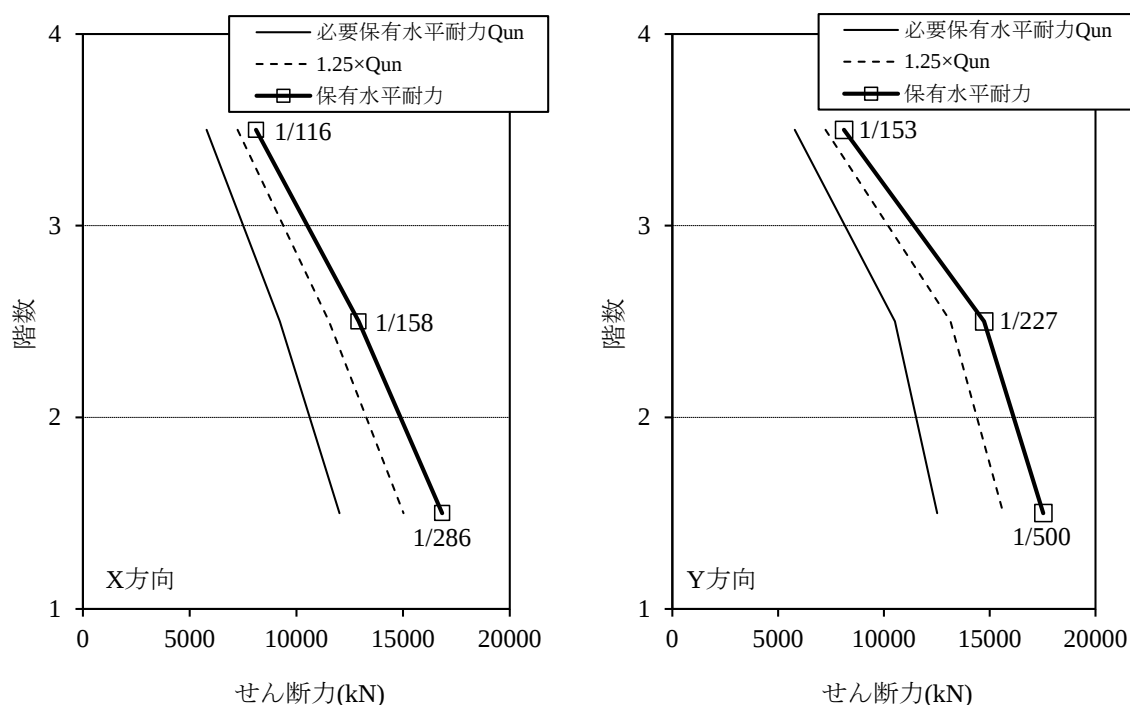
表 4-4 耐震安全性の目標及び設計方法の概要

建築物の種類			一般的な建築物
一次設計	中地震動に対する設計	地動と目標性能	$C_0=0.2$ 程度の入力地震動に対して、損傷を生じないことを目標とする。
		構造体の目標性能と設計方法	[上部構造及び基礎構造] 建築基準法、同法施行令及び建築構造設計基準に従った許容応力度設計を行う。
二次設計	大地震動に対する設計	地動と目標性能	$C_0=1.0$ 程度の入力地震動に対して、人命の安全に影響を与える著しい損傷を生じないことに加え、I 類の建築物では、地震動後補修をすることなく、また II 類の建築物では、地震動後大きな補修をすることなく建築物を使用できることを目標とする。
		構造体の目標性能と設計方法	[上部構造:地上階] 大地震動時の層間変形角が目標値以下であることを確認する。 鉄筋コンクリート造 1/200 鉄骨鉄筋コンクリート造 1/200 鉄骨造 1/100 I 類及び II 類の建築物では、重要度係数により割り増した必要保有水平耐力に対し、保有水平耐力を確保する。 I 類 $I=1.5$ II 類 $I=1.25$ III 類 $I=1.0$ [上部構造:地下階] I 類及び II 類の建築物では、重要度係数により割り増した必要保有水平耐力に対し、保有水平耐力を確保する。 [基礎構造] I 類及び II 類の建築物、高さが31mを超える建築物及び表層付近の地盤状況が悪い敷地の建築物は、保有水平耐力の検討を行い、基礎構造の損傷が上部構造の機能確保に有害な影響を与えないことを確認する。

構造設計の一次設計は、標準せん断力係数 $C_0=0.2$ 、地域係数 $Z=1.0$ 、地盤種別を第2種地盤、振動特性係数 $R_t=1.0$ とし、設計用一次固有周期を略算法により 0.27 秒とした A_t 分布より、許容応力度設計されている^{4.5)}。二次設計は、ルート3の計算法により保有水平耐力が検討されている。保有水平耐力検討時の条件を表 4-5 に、設定された保有水平耐力を図 4-4 に示す。図中には構造計算書に記載されている保有水平耐力時の層間変形角を併記した。X 方向 Y 方向ともに保有水平耐力 Q_u は必要保有水平耐力 Q_{un} の 1.4 倍を確保しており、重要度係数 1.25 を満たしている。また、層間変形については、表 4-4 に準拠し、必要保有水平耐力時に 1/200 を満たすことが確認されている^{4.5)}。

表 4-5 保有水平耐力の検討条件

解析手法	荷重増分解析
仮定外力分布	一次設計用外力分布
崩壊形成条件の仮定	X方向：全体崩壊系，Y方向：全体崩壊系
柱，梁群の種類	X方向，Y方向とも1階～3階でFA
Ds値	X方向，Y方向とも1階～3階で0.3
Fes値	X方向，Y方向とも1階～3階で1.0



※保有水平耐力時の層間変形角を併記

図 4-4 設定された保有水平耐力（文献 4.4 より作成）

非構造部材の耐震安全性の目標は、災害応急対策活動に必要な施設を想定して、A類のレベルが設定されている。建築非構造部材の耐震設計については、大地震動時の構造体の変形に追従するとともに、大地震動時の水平方向及び鉛直方向の地震力に対して、必要な安全性を確保することとされている。層間変形角の設定については、原則として鉄筋コンクリート造の場合 1/200 の層間変形に追従できるように検討する必要がある。地震力については、表 4-6 に非構造部材の設計用標準震度の値を示す。緊急時対策室が 3 階に設けられているため、対象建物での設計震度は 3 階 1.0、2 階が 0.6、1 階で 0.4 となる。

研究交流部分の居室部分の最低天井高さを 2.7m とし、集会的要素を持つ 1 階の会議室では 3.0m と設定されている。天井は捨張り工法による在来天井で、下張りは石膏ボード 9.5mm、上張りはロックウール化粧吸音板 9.0mm である。天井の軽鉄下地は吊りボルトのみであり、振れ止めブレースは設置されていない。

表 4-6 建築非構造部材の設計用標準震度

場所	耐震安全性の分類	
	機能停止が許されない室、A類施設の外部及び特定室	一般室およびB類施設の外部
上層階、屋上及び塔屋	1.0	1.0
中間階	1.0	0.6
1階及び地下階	0.6	0.4

建築設備の耐震設計では、

- ・設備機器・配管等は、大地震動時の水平方向および鉛直方向の地震力に対し、移動、転倒、破損等が生じないように固定する。
- ・配管については、大地震動時の構造体の変形及び地盤との相対変位に追従するとともに、所要の機能を確保する。

とされている。耐震安全の目標を甲類に設定した場合の設計用標準水平震度を、表 4-7 に示す。

表 4-7 建築設備の設計用標準水平震度

設置場所	重要機器	一般機器
上層階、屋上及び塔屋	2.0 (2.0)	1.5 (2.0)
中間階	1.5 (1.5)	1.0 (1.5)
1階及び地下階	1.0 (1.0)	0.6 (1.0)

() 内の数値は防振支持の機器の場合に適用する

重要機器は、次のいずれかに該当するものをいう。

- ・災害応急対策活動が必要な施設等において、施設目的に応じた活動を行うために必要な設備機器
- ・危険物を貯蔵又は使用する施設において、危険物による被害を防止するための設備機器
- ・避難、消化等の防災機能をたす設備機器
- ・火災、水害、避難の障害等の二次災害を引き起こすおそれのある設備機器

配管等は、鉄筋コンクリート造の場合には 1/200 の層間変形に追従できるよう配慮することとされている。設備機器への配管等の接続は、設備機器、配管等に過大な反力を生じさせない方法で行うこととされ、特に防振支持をした設備機器では十分な可とう性を有するもので変位吸収を行うこととされている。

また甲類の分類に応じた設備機能を確保するために、電力の途絶対策として自家発電設備及び直流電源設備の設置が必要となるため、非常照明用の電源として直流電源装置が 1 階電気室に、屋上に自家発電設備が設置されている。自家発電装置は断水等の非常時対策を考慮して、大がかりな冷却設備が不要なラジエータ冷却方式のキュービクル型ディーゼル発電機が設置されている。

空調建築設備で採用された方式を図 4-5 に示す。使用頻度が高く、高天井、大空間のアトリウム形式のパブリックゾーンのある 1 階部分を中央熱源空調方式、2～3 階は各室ごとに間欠運転や温湿度制御が必要な会議室、図書館などを個別熱源空調方式が採用されている。個別熱源空調方式の場合には、天井内埋め込み型の室内機が設置されており、3 階の会議室には全熱交換器（外形寸法 1810×1020×390H、重量 110kg）等が設置されている。吊り式の空調設備は 3～4 本の吊りボルトにより支持されており、振れ止めブレースは設置されていない。

なお、消防設備は、消防法に準じ屋内消火栓設備を設置し、厨房にのみ特殊消火設備が自主設置されている。スプリンクラー設備は設置されていない。

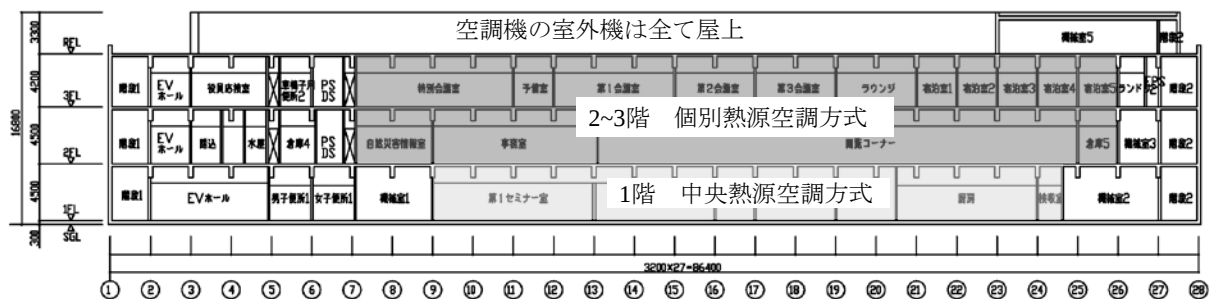


図 4-5 採用された空調設備の方式

4.3 地震被害の概要

本節では対象建物の東日本大震災における構造体、非構造部材、建築設備の被害、および復旧過程を概観する。また地震被災修復工事完了後に発生した震度 4 の地震により、修復した仕上げ工事部分の一部が再度、損傷した。その被害の概要も示す。

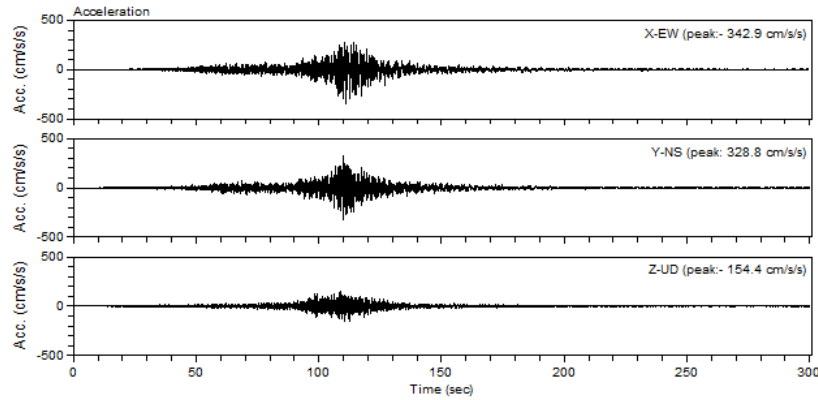
4.3.1 東北地方太平洋沖地震での被害概要

2011 年東北地方太平洋沖地震では、対象地域は震度 6 弱（計測震度 5.6）の揺れに見まわれた。地震発生時から対象建物の完全復旧までの過程の概要を表 4-8 に示す。建物利用者の人的な被害はなかったが、停電や天井からの落下物の危険性などから建物外のグラウンドに避難した。

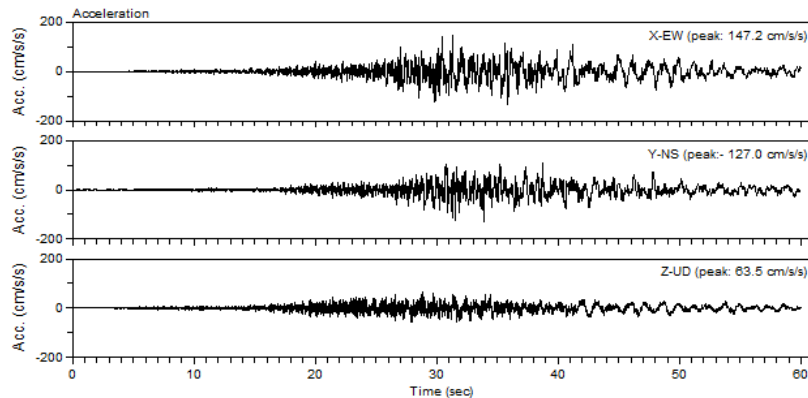
敷地内では長期の地震観測^{4,6)}が行われており、対象建物の約 200m 西方の自由地盤上に観測点がある。観測された地震波形を図 4-6 に示す。ただし対象建物内での地震観測は行われていない。

表 4-8 対象建物の地震直後から復旧過程の概要

時間等	項目	備考
◆発生直後	各自で安全確保	・緊急地震速報による館内放送の前に建物の揺れが大きくなり、各自が安全確保行動に努めた。 ・3階では揺れの最中に天井から制気口の落下や漏水等が発生した。 ・揺れの最中に全館停電、非常灯点灯
◆10分後	グラウンドへの避難行動開始	・防火扉が閉まっていたため避難路が限定された。 ・建物玄関の自動扉が歪んで開閉しなかったため、非常用扉を使用した。
◆30分後	茨城県沖の地震最大余震，M7.3	・余震が続くため、多くの人は座りこんでいた ・対象建物は東西に大きく揺れていた
◆1時間後	帰宅指示	・帰宅のための荷物整理を行うために建物内進入許可
3日後	出勤	<被災状況の確認> ・電動書架の全面破損・資料の大量落下 ・地図架の落下・破損，パソコン，ロッカー転倒 ・図書室の天井からの水漏れが発見されたため，電動書架の全面をブルーシートで養生 ・漏水が確認されたため，復電の見通しが立たない
5日後	執務場所を別棟へ移転	・停電・断水・ネットワークの不通など業務遂行ができない状況，および余震による心理的ストレスが大きいため，被害が軽微な別棟へ執務空間の一時移転を行なった。
10日後	応急危険度判定	・「要注意」と判定。
約1ヶ月後	別棟にて業務再開	
約2ヶ月後	対象建物での業務再開	・対象建物のネットワークの回復 ・大きな余震の減少 ・外気温の上昇による図書資料の保管状況悪化を防止するために，一時移転先からの復帰を決定。
約6ヶ月後	図書室の部分開放	
約10ヶ月後	電動書架修理完了	
約12ヶ月後	対象建物の修復工事完了	・工事の現地調査は約8ヶ月後に実施 ・施設整備事業費が確保されてから着手



(1) 2011年3月11日14:46 本震（震度6弱）



(2) 2011年3月11日15:15頃 茨城県沖の地震（震度5弱）

図 4-6 敷地内で観測された地震の加速度波形

(1) 構造体の被害の概要

目視による柱梁接合部の調査では、部材に大きな塑性変形を受けた形跡は認められず、柱と梁には残留ひび割れも確認されていない。鉄筋及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物等の応急危険度判定調査表に準拠して応急危険度判定が行われ、構造躯体に関する危険度はAランクの「調査済み」と判定された。

(2) 建築非構造部材の被害の概要

非構造部材の被害は、1階は間仕切り壁や柱の仕上げ材料のひび割れ、剥落が多く発生した（図4-7）。2階ではさらに間仕切り壁に設けた扉の建具枠からのひび割れが発生し扉の開閉がスムーズにいかなくなったが、開閉ができないレベルではなかった（図4-8）。3階では間仕切り壁の入隅や出隅のコーナー部分での破損が目立ち、また天井内の空調の制気口部分の脱落、空調設備のドレン配管の破断により配管内に残存した水分の漏水により、天井面にシミが発生した（図4-11）。

また、アトリウム形式のパブリックゾーンの3階屋根のアスファルト系の屋上防水が破断し、止水機能が低下した。建物の端部（東面、西面）には階段室が設けられているが、階段室の内壁を石膏ボードの直張り工法（GL工法）にて仕上げていたが、階段のササラ桁上に石膏ボードを載せて仕上げたため、1階から3階までササラ桁との取り合い付近で石膏ボードが剥落した。



図 4-7 1 階の仕上げ部材の損傷状況



図 4-8 2 階の非構造壁のひび割れ、損傷状況



図 4-9 3 階の天井の損傷状況および漏水が発生したアトリウムの屋上

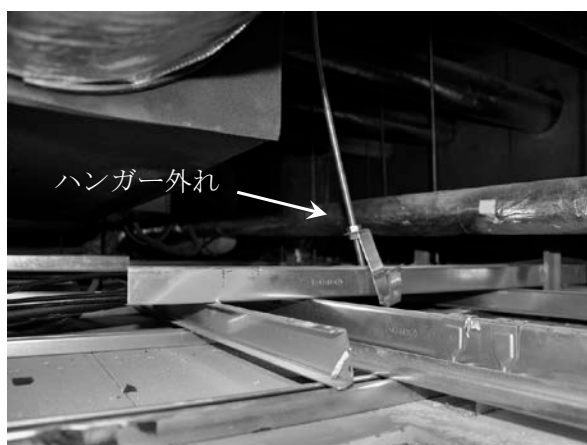


図 4-10 3階の天井の下地材の損傷状況



図 4-11 階段室の石膏ボードの直貼り仕上げの損傷状況（1～2階）

(3) 建築設備の被害の概要

建築設備の被害は、主に3階の天井内の空調設備、および屋上階の機械室内の配管で発生した。特に3階部分の被害が大きく、3階の会議室内に設置された8台の全熱交換器は、全台、ダクトが脱落した。また、加湿給水用の銅管やドレン配管が切断されたため、管内に残った水が漏水した。漏水によるボードの水損状況は図 4-9 に示した通りである。

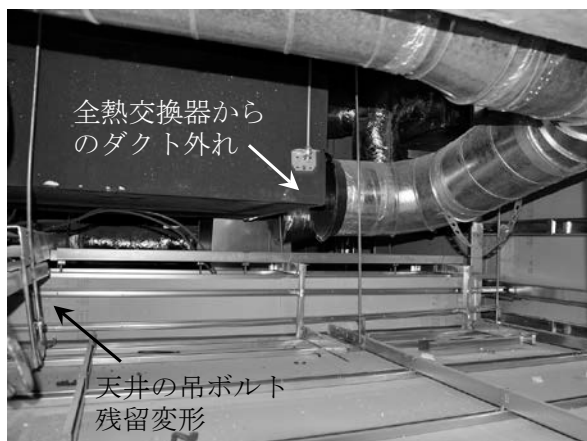


図 4-12 全熱交換器周辺のダクト破損状況（3 階）



図 4-13 天井内吊り設備の残留変形の状況（3 階）

(4) その他の被害

電気設備の被害として、天井の損傷により電灯が交換となった場合のほか、映像音響設備、防犯設備、火災報知機等は仕上げ材から取り外して再取り付けできる程度の被害であった。

また対象建物の 2 階は図書館となっているが、書棚類は転倒防止措置を施していたため転倒は免れたものの、内容物の書籍の落下が発生した。図 4-14 に地震直後の室内状況の写真^{4.7)}を示す。書類は散乱しているが、天井面に非常用電灯が点灯している状況が確認できる。また電動書架の損傷、資料の散乱などにより資料を取り出せない状況となり、仮復旧までに 2 か月を要した。また 2 階の天井内の空調設備はダクトの破損などの大きな損傷は発生しなかったが、3 階の配管損傷状況などを考慮して、配管の点検が済むまで稼働させないこととした。そのため気温湿度の高くなる夏場にかけて、書籍にカビが生えないよう、扇風機による 24 時間通気等が行われた。電動書架の修理工事は 2012 年 1 月に完了したため、図書館機能の全面復旧は約 11 ヶ月を要した。

以上、非構造部材、建築設備、家具の被害をまとめて図 4-15 に示す。



図 4-14 図書館内の被災状況（2 階）

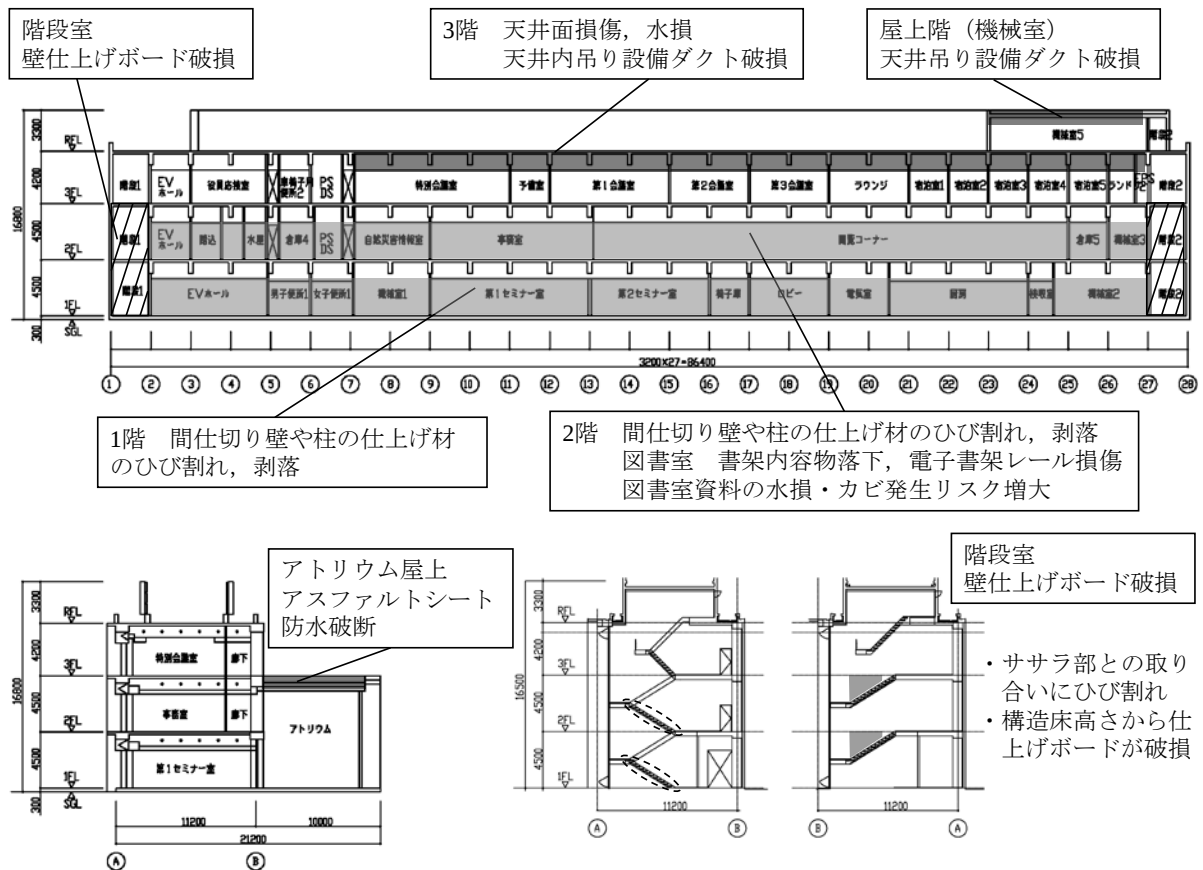


図 4-15 発生した非構造部材，建築設備の被害のまとめ

4.3.2 復旧工事の概要^{4.8)}

検討建物の復旧は、地震直後に職員による被害調査および、応急危険度判定が鉄筋及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物等の応急危険度判定調査表に準拠して行われた。構造躯体に関する危険度はAランクと判定され、「調査済み」とされた。落下危険物・転倒危険物に関する危険度では、特に3階での天井からの落下物の危険性が高いことから、看板・機器類による危険度がBランクと判定されたため、総合判定では「要注意」と判定された。

その後、室内被害が軽微であった1階から2階と、段階的に復旧し、職員食堂としてパブリックゾーン1階のカフェテリアが再開され、2階の図書室では半年後から外来の利用者の受け入れが再開された。3階部分については、被災復旧工事の設計のための被害状況調査を2011年11月に行い、その後、2012年1月19日～2012年3月30日の工期で地震被災修復工事が実施された。結果として対象建物の完全復旧には約1年間を要した。なお、対象建物の復旧工事は、文部科学省の東日本大震災に対する復興関連事業と位置付けられている。

図4-16に地震被災修復工事の概要を示す。1階～2階の壁の損傷の復旧は、損傷レベルに応じて仕上げ材を撤去して新たに仕上げ材を貼り直す場合と、ひび割れが小さい場合はパテによる補修のみによる場合とに分かれている。階段室の仕上げは躯体に石膏系接着剤を団子状に盛って、その上から石膏ボードを圧着させる工法であるため、1階～3階までの階段室の表面の仕上げ材と接着剤をすべて撤去し、新築時と同様に仕上げをやり直している。ただし、地震時に損傷が集中したササラ部との取り合いには見切り縁を、構造床高さには目地を追加して、ひび割れの集中する位置を設けた。2階の間仕切壁の復旧工事の状況を図4-17に、階段室の復旧工事の状況を図4-18に示す。

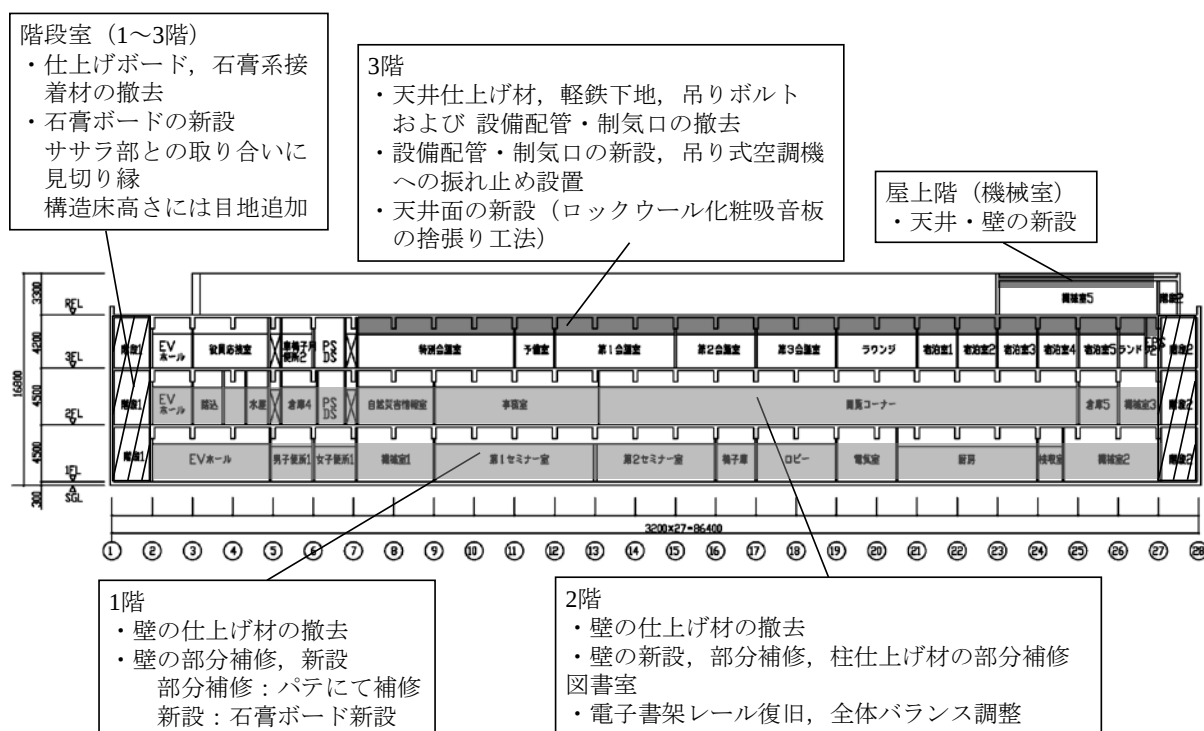


図 4-16 非構造部材、建築設備の復旧工事のまとめ



図 4-17 2 階・廊下部分の間仕切り壁の復旧状況



図 4-18 1～3 階・階段室の壁の復旧状況

建築設備の被害は、3 階、屋上階の天井内の吊り設備に集中したが、設備機器自身の機能は損失していないことを確認したため、設備はそのまま再使用されることとなった。そのため、設備機器を設置し直し、機器同士の接続配管の付け替えや機器の振れ止め防止を設置するため、復旧工事のためには天井の撤去が発生した。図 4-19 に復旧工事の過程を、天井面の撤去から仕上げまでの流れで示す。全熱交換器には防振ゴムが設置されていたが、復旧工事では防振ゴムは撤去され、M10 ボルトにより X 字状の振れ止めが施された。図 4-20 に振れ止めの施工状況を示す。実際には配管のダクトとの取り合いがあり、一様には施工できない中で収められている。

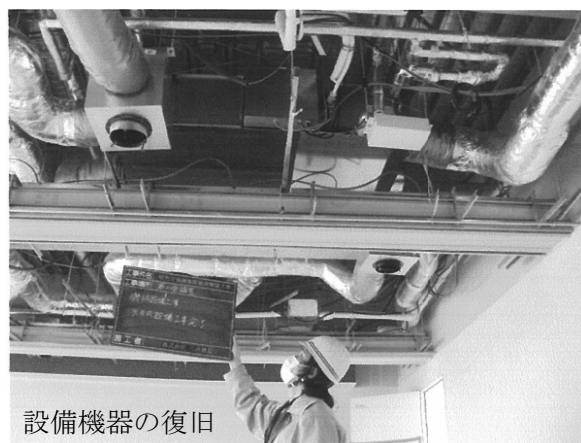


図 4-19 3階・会議室の天井，建築設備の復旧状況

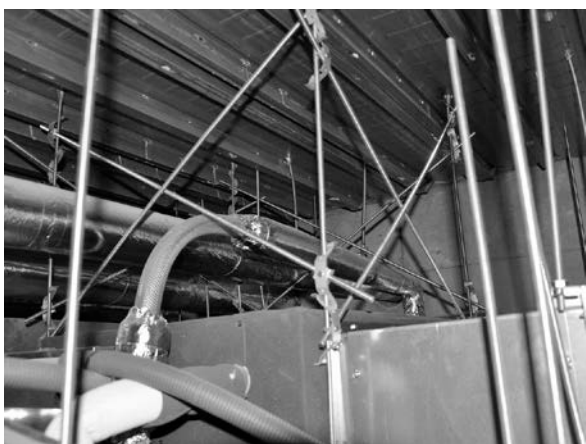


図 4-20 3階 天井内の全熱交換器の復旧状況

4.3.3 2012 年 12 月 7 日の地震による被害

修復工事以降に震度 4 以上の揺れを初めて観測した地震は、2012 年 12 月 7 日に発生した三陸沖の地震 (M7.3) であった。敷地内の観測点では震度 4 (計測震度 4.2) を記録し、対象建物の内壁の補修箇所にも再度、ひび割れやクロス材のずれや剥がれ等の被害が発生した。図 4-21 に観測された地震動の時刻歴波形を示す。

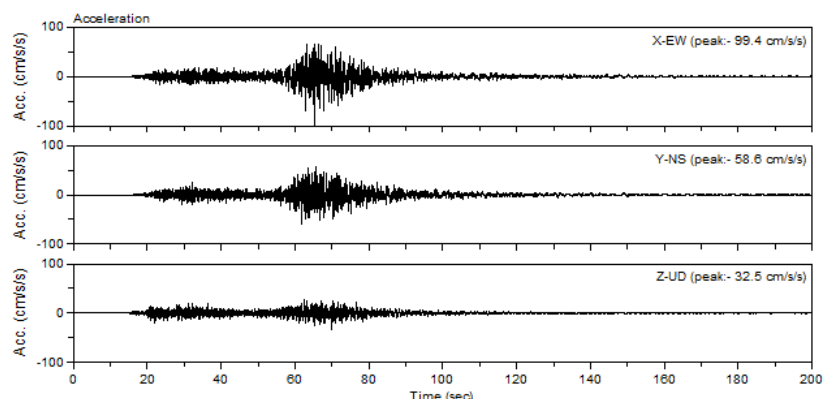


図 4-21 2012 年 12 月 7 日の地震の加速度波形 (震度 4)

修復箇所のうち、パテ補修後に仕上げを施した箇所では全てひび割れや仕上げ材のずれ等が発生した。図 4-22 に地震後の状況を示す。元々、発生していたひび割れ部分が、再度、開く結果となった。一方、石膏ボードを新設した箇所での損傷はほとんど発生しなかった。図 4-23 は石膏ボードを張り替えた箇所の損傷状況である。目地を設けて石膏ボードを新設した階段室では目地部分でのひび割れの発生に留まった。また石膏ボードを張り替えた軽鉄下地の間仕切り壁の三方枠では、地震後に残留変形が発生した。

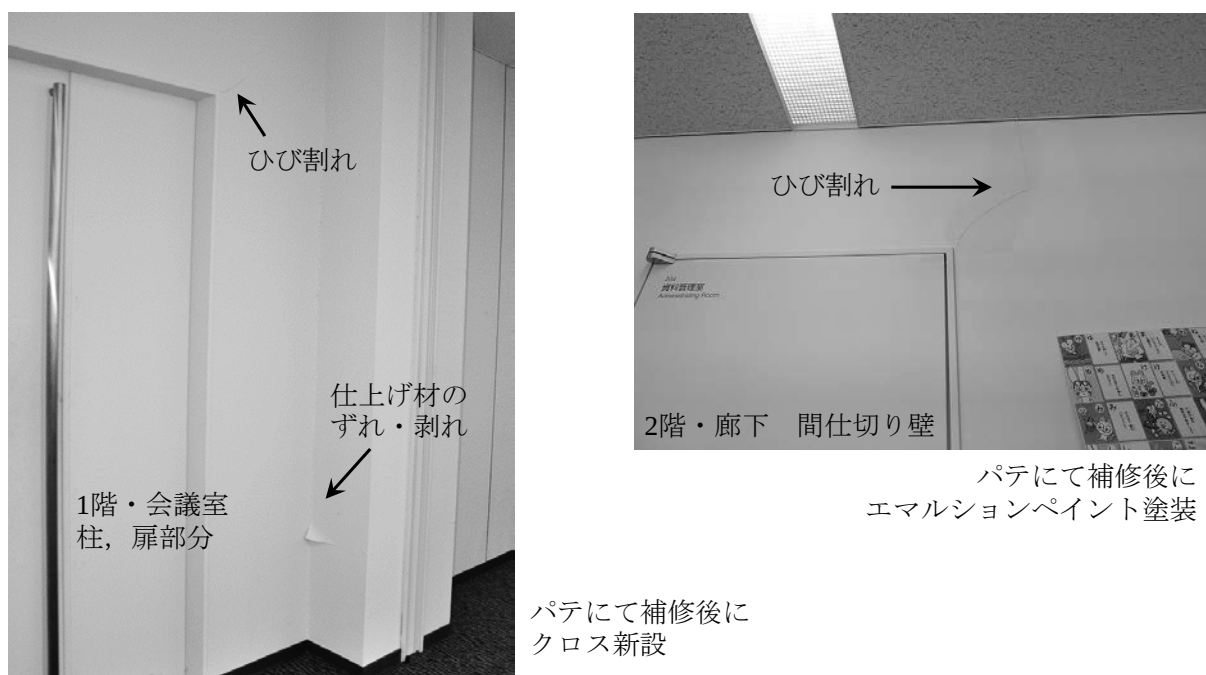


図 4-22 2012 年 12 月 7 日の地震による仕上げ材の損傷状況 (パテ補修箇所)



図 4-23 2012 年 12 月 7 日の地震による仕上げ材の損傷状況（仕上げの石膏ボード新設箇所）

図 4-24 に 3 階・会議室の天井面の状況と、空調の吹き出し口の制気口の取り付け状況を天井内で確認した状況を示す。制気口と天井面との間に隙間が発生しているが機能上は問題無かった。また天井内での取り付け状況は被災後と変わっておらず、制気口は消音ボックスを介して天井面とは別個に揺れるように施工されている。消音ボックスに取り付くダクトが、天井の吊りボルトに干渉している箇所もあり、東日本大震災クラスの揺れが発生した場合には制気口周りの損傷が再度発生する可能性が高い。

なお、パテ補修後に再度生じたひび割れなど、この地震で発生した被害については建物の機能維持に影響を及ぼさなかったことから、再度の補修工事は行われなかった。

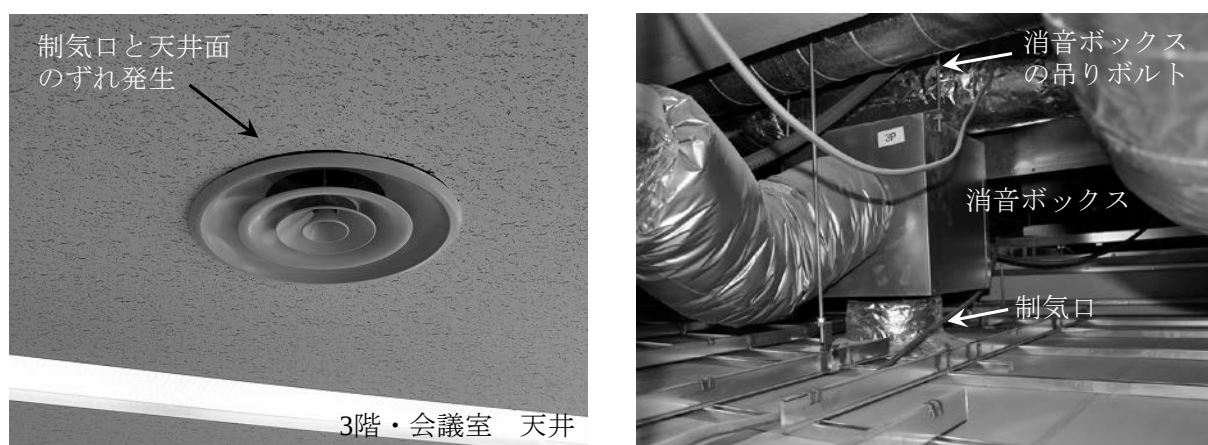


図 4-24 2012 年 12 月 7 日の地震による天井面および建築設備の状況（3 階）

4.4 観測された地震動による建物応答

2011 年東北地方太平洋沖地震（以降、本震と記す）、および 2012 年 12 月 7 日の三陸沖の地震で敷地内での観測記録の速度応答スペクトルを図 4-25 に示す。告示 1461 号による極稀に起こる地震動の速度応答スペクトルの工学的基盤での最大値は $0.8(\text{m/s})$ であるが、本震の観測記録の EW 成分には 1 秒付近に極稀地震の応答スペクトルを超える成分を含んでいる。また、2012 年 12 月 7 日の地震は稀に起こる地震動の速度応答スペクトルと同程度の成分を含んでいる。

そこで本震および 2012 年 12 月 7 日の地震による建物内での揺れの大きさを予測するために、構造設計計算書で計算されている一次設計および保有水平耐力検討時の層せん断力、層間変形を参考に質点系の時刻歴応答解析を行った。構造計算書には層せん断力と層間変形の関係が明示されていなかったため、層せん断力－層間変形の非線形特性をノーマルトリニア型でモデル化した。設計用ベースシヤ係数 C_b に対して、第 1 降伏点を $1.4 \times C_b$ 、第 2 降伏点を $2.0 \times C_b$ 、第 2 剛性を $K_0 \times 0.7$ 、第 3 剛性を $K_0 \times 0.01$ として骨格曲線を定義し、瞬間剛性比例減衰を $h=0.03$ で与えた。図 4-26 に設定したせん断力－変位関係を、また表 4-9 に弾性剛性から算出した固有周期を示す。表 4-9 には別途実施した常時微動計測結果から求めた一次固有周期も参考値として示した。

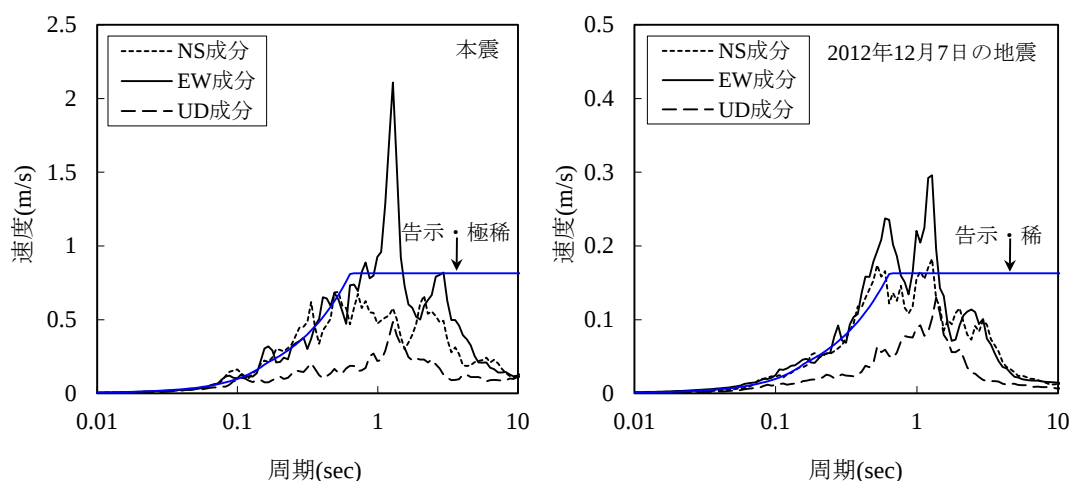


図 4-25 敷地内での観測記録の速度応答スペクトル ($h=0.05$)

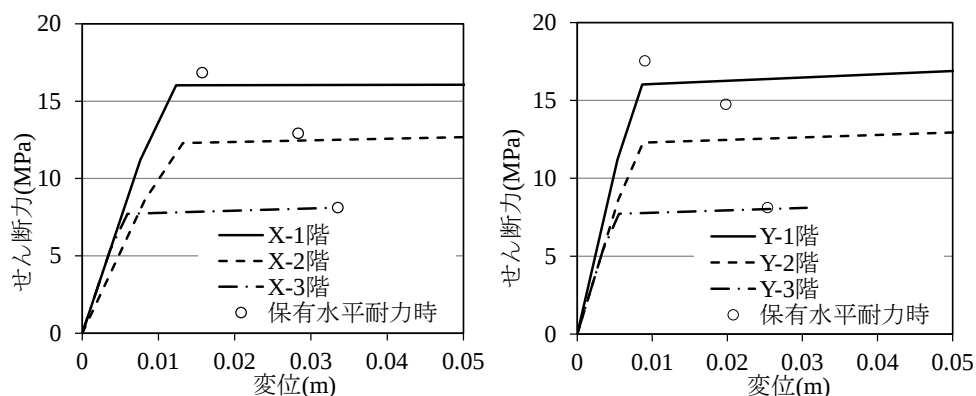


図 4-26 地震応答解析で設定したせん断力－変位関係

表 4-9 建物の固有周期

	X方向(秒)	Y方向(秒)
常時微動計測	0.435	0.385
許容応力度時・剛性 1次	0.459	0.387
〃 2次	0.159	0.142
〃 3次	0.114	0.100

検討建物は長辺方向（X 方向）がほぼ東西方向であることから、観測記録の EW 方向を建物の X 方向に、NS 成分を Y 方向にそれぞれ入力した。図 4-27 に最大応答加速度を、図 4-28 に最大層間変形角を示す。本震の応答解析結果の加速度は、表 4-6 および表 4-7 に示した非構造部材および建築設備の設計用水平震度以下の値となっている。最大層間変形角は、2 階の応答が 1/200 を超え 1/150 程度の値が発生しているが、この値を除けば、耐震安全目標レベルの上では、非構造部材や建築設備が追従すべき変形レベルの 1/200 内に収まっていると考えられる。

構造設計の立場から見ると、二次設計レベルの地震外力が建物に入力されたが応答は保有水平耐力以内に応答は抑えられ、表 4-3 の構造体の目標性能Ⅱ類の建築物として、地震後に大きな補修をすることなく使用できる目標を満たしたと言える。しかし、表 4-3 の建築非構造部材の A 類、建築設備の甲類の目標は満足できず、復旧までのダウンタイムや大規模な補修工事が発生した。この要因の一つとして、層間変形レベルが大きかったことが考えられる。保有水平耐力の検討は必要保有水平耐力の 1.4 倍以上あることを確認しているが、必要保有水平耐力を超えた場合の変形レベルについては 1/200 以下を確認していない。建築物の機能維持の面から構造設計を行う場合には、変形についても考慮する必要があると考えられる。

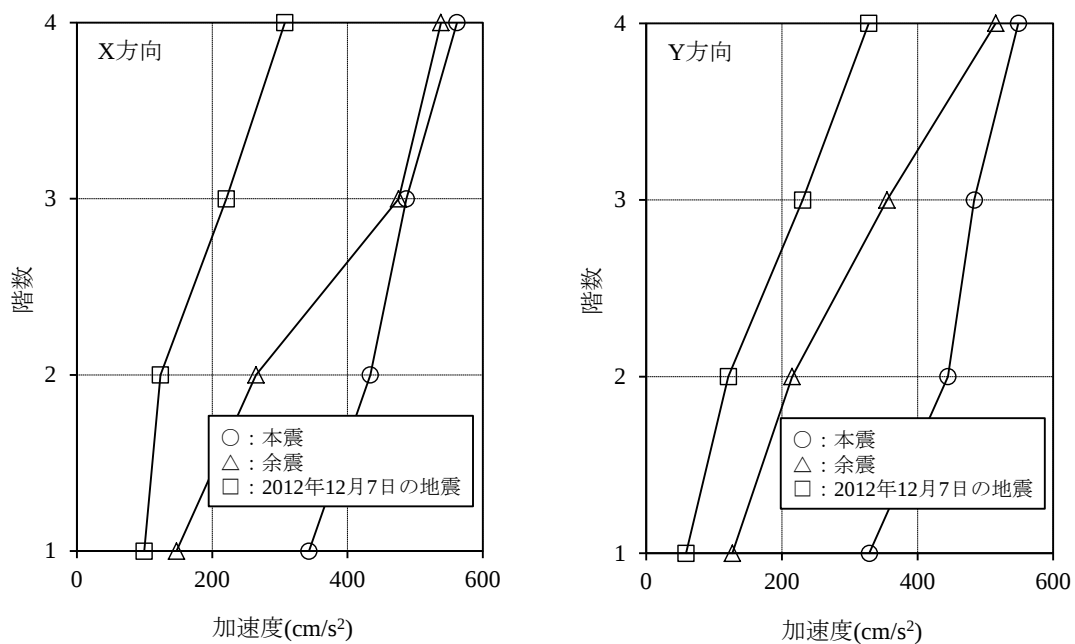


図 4-27 最大応答加速度分布

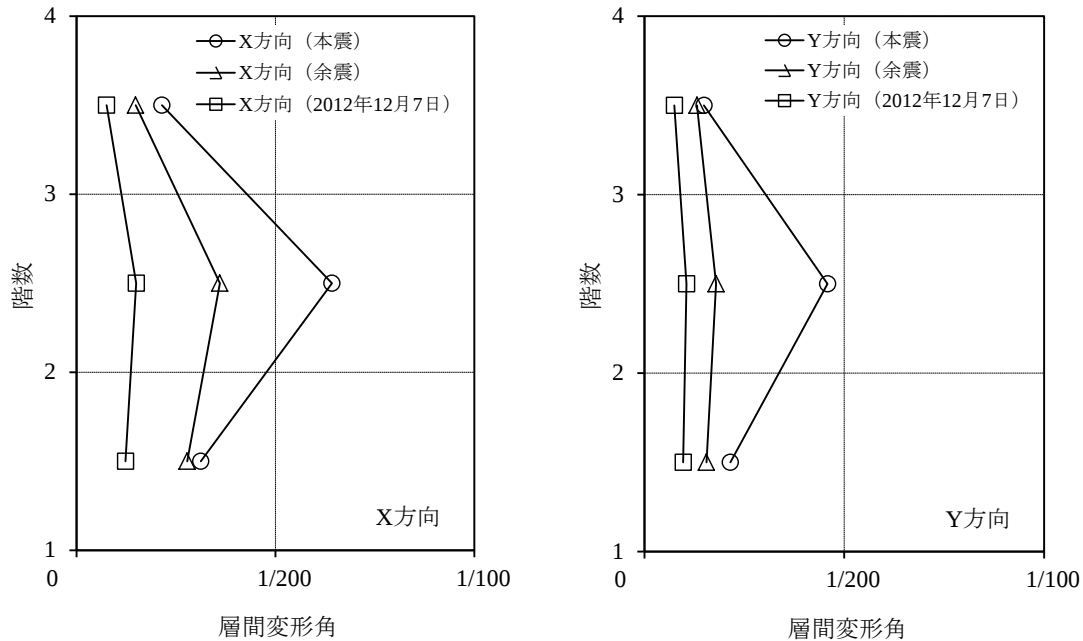


図 4-28 最大層間変形角

4.5 建物の揺れによる吊り設備の応答

前節では構造体の二次設計が、保有水平耐力が必要保有水平耐力を重要度係数により割増した値を上回っていることを確認しただけで、割増した必要保有水平耐力に対する変形制限は検討していないことが、建築非構造部材の被害要因である可能性を述べた。本節では、建築設備の耐震安全性に関して、設計用震度（応答加速度）や層間変形により評価できない、天井内の吊り設備の応答について検討する。

図 4-12 や図 4-13 に示すように、一般的に天井内の吊り設備はコンクリートスラブにアンカー固定した複数本の吊りボルトによりピン支持されている状態なので、先端に集中質量がある片持ち梁の固有周期で、固有周期が大まかに評価できると考えられる。そこで第 3 章で報告した振動実験結果のうち、振れ止め対策・防振ゴムが施されていない空調機器に対して、空調機を吊っている構造体の床応答加速度と空調機の応答加速度のフーリエ振幅比と、M10 の吊りボルト 4 本で支持されたとして概算した固有周期を比較した結果を図 4-29 に示す。概ね伝達関数で卓越する周期と対応している。そこで、対象建物の天井内の吊り式の建築設備として、制気口の消音ボックス（重量約 10kg）、および全熱交換器（重量約 110kg）の一次固有周期を推定するために、上記の方法で計算した固有周期を図 4-30 に示す。図中の吊元ピン支持は振り子の周期を計算したもので、吊りボルトの中間に防振ゴムで支持された場合の固有周期を概算することを想定している。消音ボックスの吊り長さ 600mm では約 0.42 秒、全熱交換器の吊り長さ 900mm では約 2.2 秒である。全熱交換器は天井の吊元から 400mm 下がった位置で防振ゴムにより支持されている（図 4-31）。防振ゴムの鉛直方向のばね値がわからなかったため、500mm の振り子の周期で固有周期を略算すると約 1.4 秒となる。

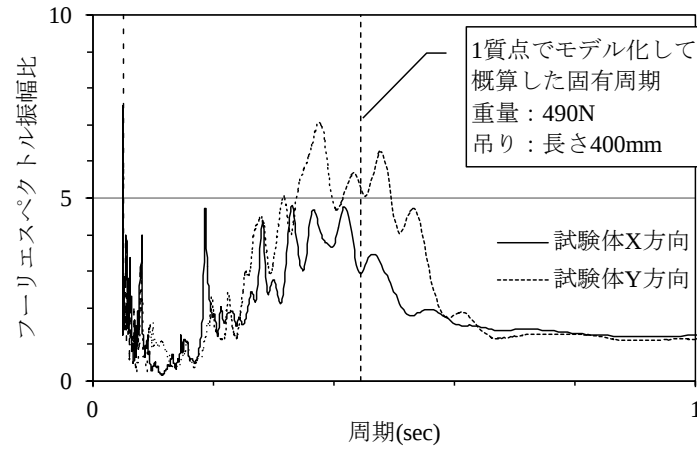


図 4-29 吊り設備の振動実験結果のフーリエ振幅比と概算した固有周期の比較

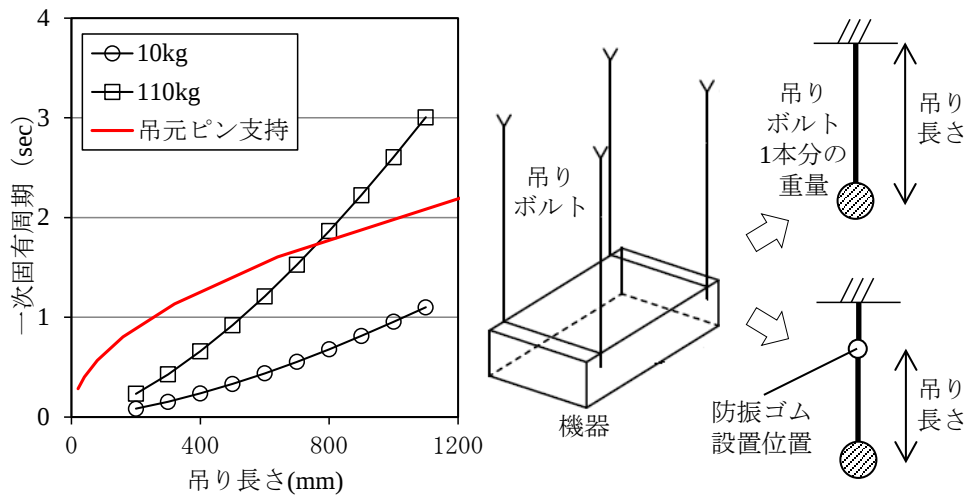


図 4-30 吊り長さに対する吊り設備の概算固有周期

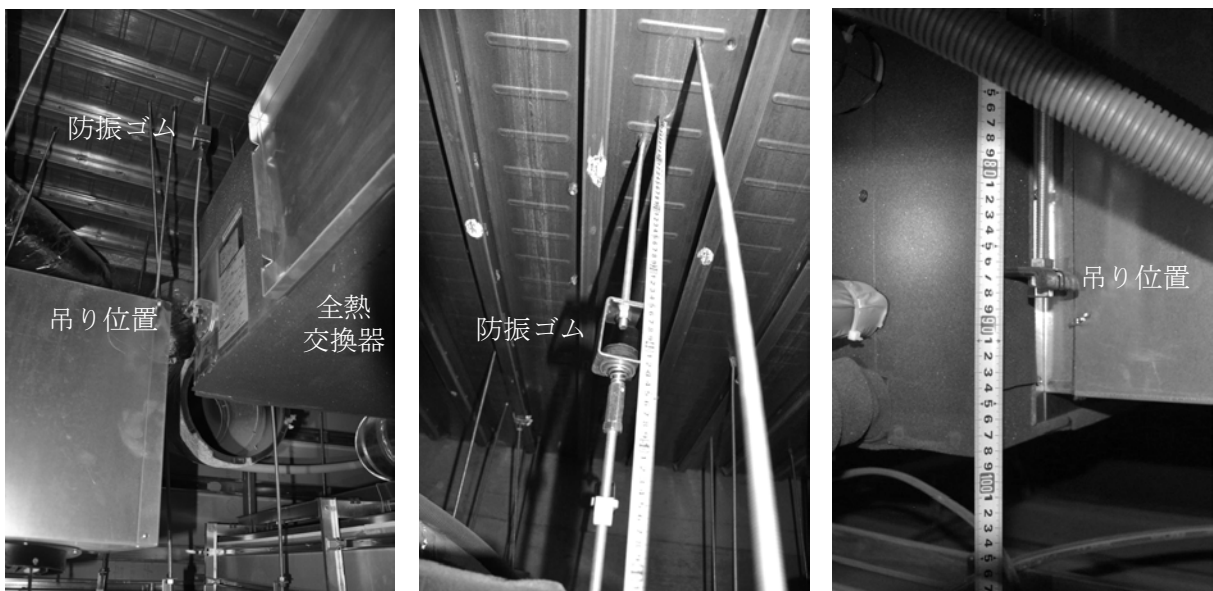


図 4-31 全熱交換器の防振ゴムの設置状況（3 階）

吊り設備の応答を評価するために、本震入力の場合の各階の床応答加速度（長辺方向）から計算した応答スペクトルを図 4-32 に示す。配管系の設計用減衰定数として 0.5～3.0%が使われる場合^{4,9)}もあるが、ここでは吊り設備とダクトとの干渉などの減衰効果が考えられるため減衰 5%で応答スペクトルを計算した。

建物の固有周期 0.45 秒と消音ボックスで想定される固有周期は近接しており、上層階では約 $20 \sim 30 \text{ m/s}^2$ の応答をした可能性を示している。消音ボックスは天井面の制気口に接続されているため、消音ボックスが建物の揺れに共振したことにより、制気口に大きな加速度が作用して天井面から多数個が脱落したものと考えられる。

一方、全熱交換器では固有周期 1.4～2.2 秒に固有周期が想定されるが、変位応答スペクトルを見ると 0.2～0.3m 程度の変位が想定される。今回の被害では 3 階に設置された全熱交換器について、接続していた横配管のダクトが全数脱落していた。設備配管の設計では、構造躯体の層間変形を考慮して追従性を持たせることが規定されているが、吊り設備の応答のように構造躯体の支持点からの応答増幅は考慮していない。建物の機能維持においては、従来仕様規定によって設置される建築設備の地震時応答評価が設計時に必要となると考えられる。

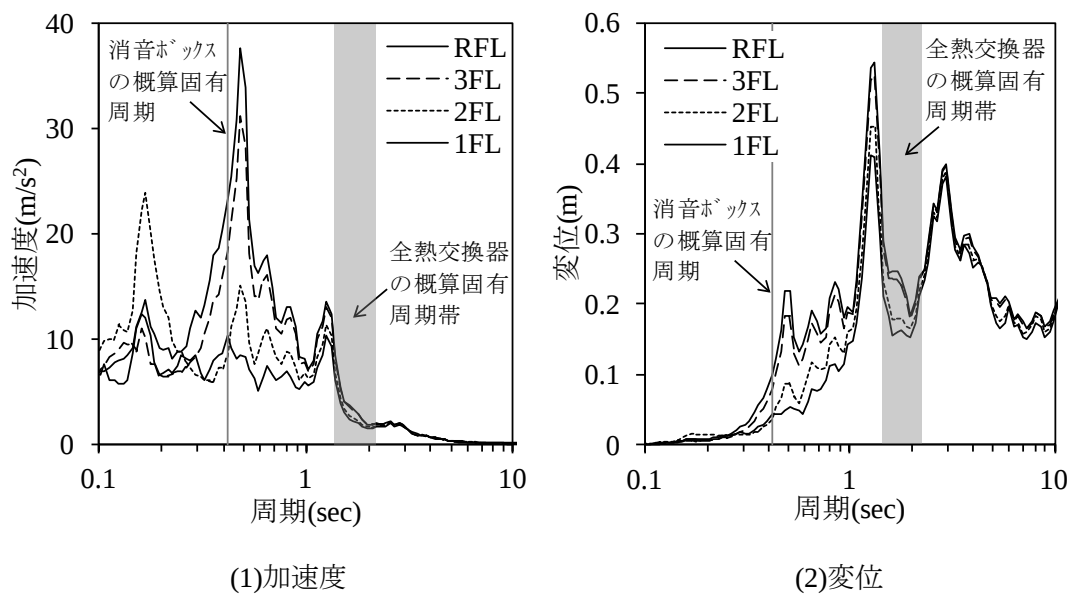


図 4-32 各階の床応答加速度から求めた応答スペクトル ($h=0.05$)

4.6 復旧工事からみた機能損失評価

検討建物の復旧は、地震直後に職員による被害調査および、応急危険度判定が鉄筋及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物等の応急危険度判定調査表に準拠して行われた。構造躯体に関する危険度は A ランクと判定され、「調査済み」とされた。落下危険物・転倒危険物に関する危険度では、特に 3 階での天井からの落下物の危険性が高いことから、看板・機器類による危険度が B ランクと判定されたため、総合判定では「要注意」と判定された。

その後、室内被害が軽微であった 1 階から 2 階と、段階的に復旧し、職員食堂としてパブリックゾーン 1 階のカフェテリアが再開され、2 階の図書室では半年後から外来の利用者の受け入れが再開された。3 階部分については、被災復旧工事の設計のための被害状況調査を 2011 年 11 月に行い、その後、2012 年 1 月～3 月の工期で地震被災修復工事が実施された。対象建物の完全復旧には約 1 年間に要した。なお、対象建物の復旧工事は、文部科学省の東日本大震災に対する復興関連事業と位置付けられている。

対象建物の機能回復に要した費用として、建物の復旧工事費用と 2 階の図書室の電動書架の修復工事費用を合算した場合の内訳を図 4-33 に示す。図書室の機能回復に不可欠である書架の修復費用は全体の 13%と比較的大きな割合を占めている。

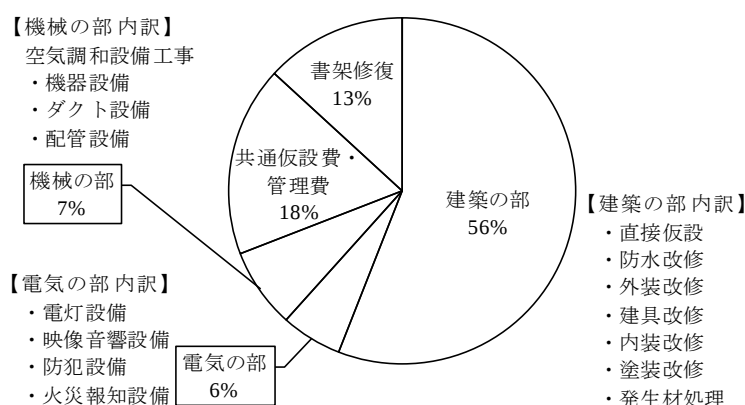


図 4-33 検討建物の復旧に要した費用全体の内訳（大型収容物含む）

4.6.1 全体の損失率による評価

建物の地震リスク評価は、主に原子力発電所関連施設の安全性を定量的に評価するために地震 PSA、(Probabilistic Safety Assessment) として行われてきたものであるが、近年、不動産証券化の流れの中で地震リスクを評価する指標として、地震予想最大損失率(PML: Probable Maximum Loss)として認知されてきている。最近では PML を新築建物の要求性能の指標として利用する動きもあり^{4.10)}、現在では多くの機関で建物の地震リスク評価が行われている。PML の定義は評価機関によって異なり^{4.11)}、50 年間での超過確率 10%の地震を特定して損失を定義する場合や、50 年超過確率 10%（再現期間 475 年）の地震動強さに対する損失で定義される場合があるが、いずれの損失評価も損失額の再調達価格に対する割合（損失率）で定義される。これらの損失評価では、主として建物の構造被害に対するデータをもとに作られており、天井や壁などの非構造部材の被害、空調設備などの被害に関するデータが不足している。そこで対象建物の復旧工事費用と新築時の

工事費用から、損失率を算出して、非構造部材の損傷が与える影響を概観する。

図 4-34 に新築工事と復旧工事の費用を比較して示す。工事価格は直接工事費（建築、電気、機械）と共通費（共通仮設費、現場管理費、一般管理費等）の和である。共通費の算出には公共建築工事積算基準^{4.12)}に従った。全体の工事価格で比較した損失率でみると約 2%となっている。

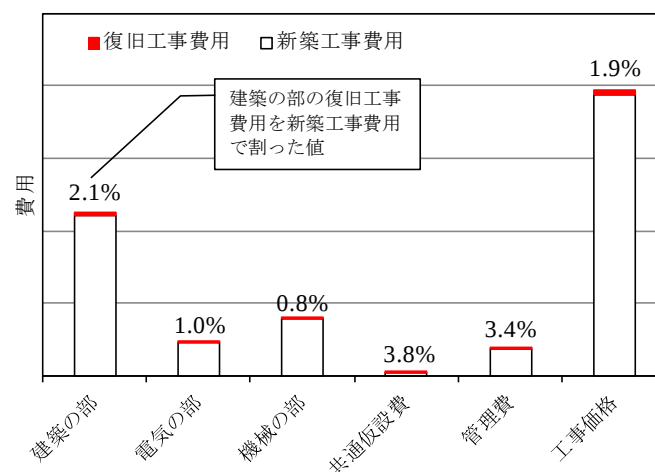


図 4-34 新築工事費用と復旧工事費用の比較

4.6.2 復旧工事費用からみた建物機能損失の特徴

図 4-35 は直接工事費に占める工事部類を比較したものである。機械設備の中では地震後も使用可能なものが大半であったため、復旧工事費用に機械工事が占める割合は小さい。復旧工事における建築工事の内訳を整理した結果を図 4-36 に示す。建築工事の内訳では防水改修工事が 50% 以上を占めるが、これは鉄骨造のアトリウム部の折板屋根部分の防水工事である。ついで内装改修工事が約 20% を占めるが、この工事の内訳を階数毎に整理した結果を図 4-36 に併記した。非構造部材は、変形の厳しい 1 階、2 階よりも 3 階が大半を示しており、その大半が天井の損傷に関する工事であった。

3 階部分の天井は壁勝ちの間仕切り壁で仕切られており、天井面の外周は廻り縁に固定はされていないが、壁との間にクリアランスはないため、地震時の水平方向の応答としては間仕切り壁と一体となって挙動する。実際に地震後の調査では、天井面の壁際での損傷は発生しておらず、一体となって挙動していたと考えられる。そのため、図 4-36 の内装改修工事の内訳で天井関係に分類される工事は、主に天井内の空調建築設備と天井との相互作用によって発生した損傷の復旧工事量である。

全熱交換器や制気口は、天井とは別の吊りボルトで支持されているため、それぞれの振動特性で応答する。そのため制気口は天井面との相対変位が大きくなり、周辺の天井ボードを損傷させたり、制気口自身の脱落を誘発したと考えられる。また、在来天井の場合には天井内の空調設備の補修を部分的に行うことが難しく、一つの空調機器の損傷の復旧工事であっても天井面を大規模に撤去する必要があるため、工事費用の増につながっている。

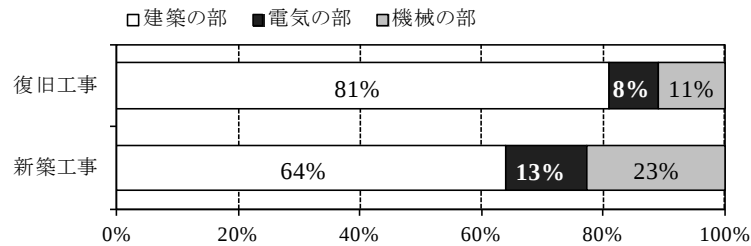


図 4-35 直接工事費用に占める工事部類の比較

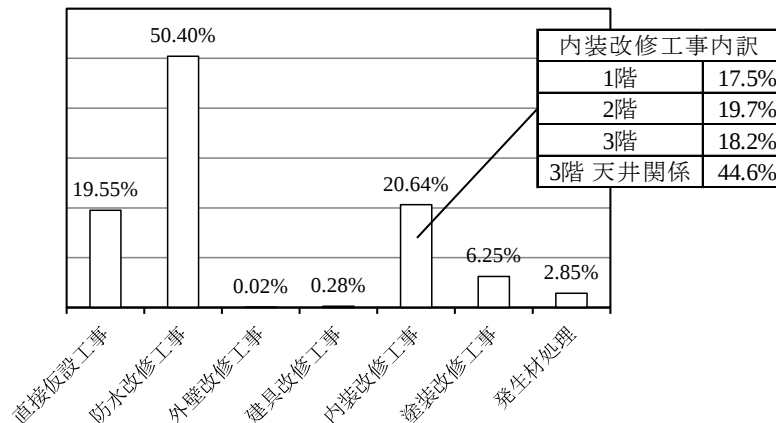


図 4-36 復旧工事の建築工事の内訳

4.6.3 既往の被害確率曲線からみた復旧工事の特徴

建物の地震リスク評価は多くの機関で行われているが、一般建物を対象とする場合には、評価機関によるノウハウが反映された簡易化した評価手法が適用される場合がほとんどである。そのため、評価結果のばらつきが指摘されており、評価法に対するガイドライン案^{4.11)}も提示されている。本報告では、外力である地震動は観測記録を用いたので、PML 評価ではなく、SL (Scenario Loss, 特定の想定地震による損失) 相当の評価となるが、外力評価のばらつきがない分、簡易損失評価の高精度化に資することができる。

米国の地震被害想定ツール HAZUS^{4.13)}では、Capacity Spectrum 法による応答予測の結果から被害確率曲線により復旧費用を算出している。また質点系の応答解析モデルによる応答予測結果から、同様に被害率曲線を用いて復旧費用を算出する事例^{4.11)}もある。ここでは前節で実施した応答解析結果をもとに、被害確率曲線から損傷費用率を求めて、それを対象建物が実際に要した復旧費用と比べてみる。HAZUS では被害確率曲線は対数正規分布で表しているが、表 4-10 に RC 造ラーメン構造の低層建物で設定されている被害確率曲線の中央値と標準偏差 β を示す。図 4-37 に応答解析結果から復旧費用を算出するフローを示す。

表 4-11 は応答の大きかった X 方向の応答解析結果の最大層間変形角、最大応答加速度より算出した被害確率から、復旧費用率の期待値を求めた結果である。平均被害率は変形依存で評価される構造躯体および非構造部材、加速度依存で評価される非構造部材について、それぞれで定義される被害確率曲線から各階の被害率を計算し、それを全階で平均した値である。非構造部材の被害率の計算では、変形依存で評価される非構造部材は間仕切り壁等を想定し、該当する階の最

大層間変形角を参照して計算した。一方、加速度依存で評価される非構造部材は天井を想定し、該当する階の一つ上の階の最大応答加速度を参照して計算した。

この平均被害率を、新築時の建築工事分に乗じて復旧工事費用を算出した。表 4-11 の復旧費用率①は、建築工事費用に関するもので、変形依存、加速度依存のそれぞれの復旧工事費用の総額を割った値で 2.84%となった。一方、復旧費用率②は、復旧工事費用の総額を工事費用全体（建築工事、電気工事と機械工事）で除した値であり、1.82%となった。

この算出結果を図 4-34 と比較するとオーダーとしては整合的な結果となった。ただし加速度依存の非構造部材の被害として算出された天井の損失は、今回の天井の被害調査では設備機器による干渉がなければ、ほぼ無被害で済んだと考えられる状況であった。天井被害については、2011 年東日本大震災で広範囲に発生した顕著な非構造部材の被害であり、被害メカニズムの解明はもとより、適切な被害関数の設定が必要である。

表 4-10 被害確率曲線の中央値と対数標準偏差 β

項目	β	中央値			
		軽微	小破	中破	大破以上
構造部材 (rad.)	0.4	0.005	0.01	0.031	0.075
非構造部材・変形依存(rad.)	0.5	0.004	0.008	0.025	0.05
非構造部材・加速度依存(G)	0.6	0.3	0.6	1.2	2.4
再調達費用率(%)	—	2	10	50	100

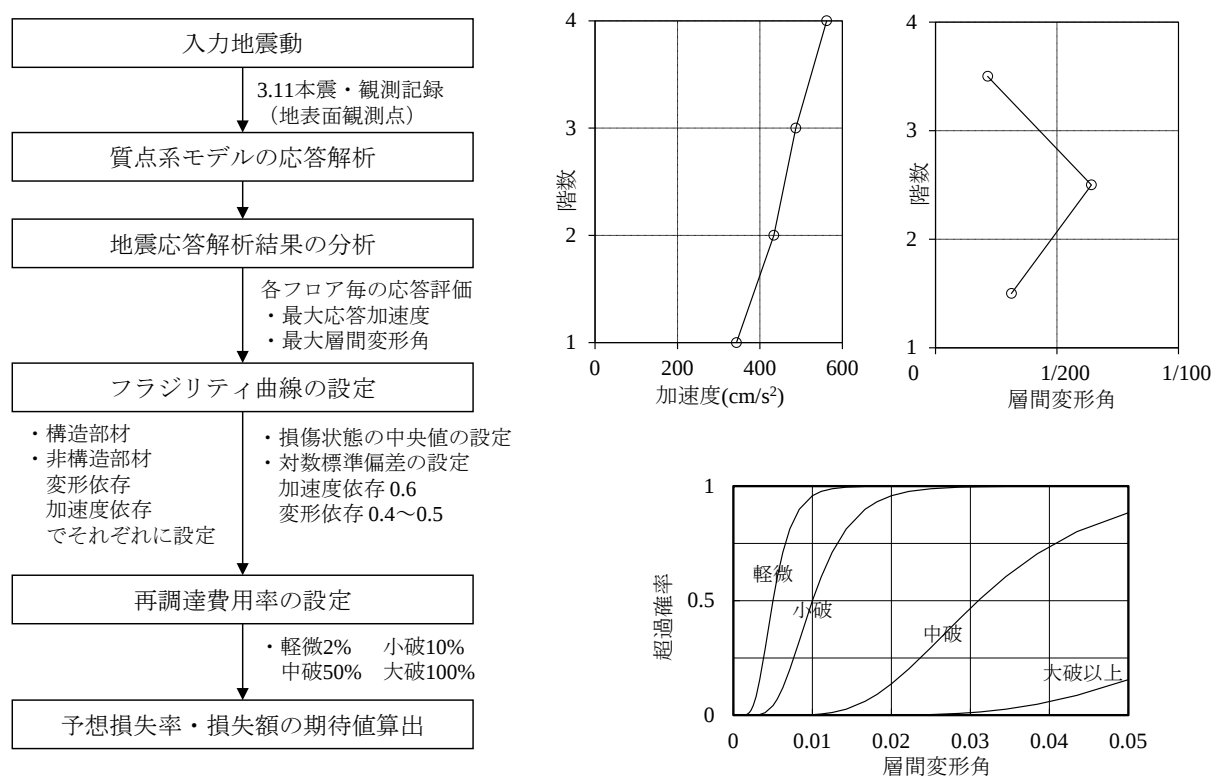


図 4-37 地震応答解析結果による損失率の算出フロー

表 4-11 本震の応答解析結果から算出した復旧費用率

	変形依存		加速度依存
	構造躯体	非構造部材	非構造部材
1階	0.25%	0.86%	—
2階	2.54%	4.42%	5.72%
3階	0.04%	0.25%	7.35%
屋上階	—	—	9.86%
平均被害率	0.94%	1.84%	7.64%
復旧費用率①	2.84%		
復旧費用率②	1.82%		

また、吊り式の建築設備を対象とした被害率関数も提案^{4.14,4.15)}されているが、その被害度は設備機器単体の機能に対して定義されている。そのため、今回の被害事例のように機器を取りまく非構造部材などに影響を与える場合の評価手法はまだ確立されておらず、被害事例の分類や実験結果の整理を通じて、被害の相互干渉が発生する設備機器の抽出が必要となる。

4.6.4 事業停止期間からみた復旧工事の特徴

対象建物の復旧過程の概要を示した表 4-8 にあるように、対象建物での事業再開は本震から 2 ヶ月後、全面的な機能復旧は 12 ヶ月かかった。復旧工事費用からみた被害は軽微と判断されるレベルであったが、建物の利用の立ち遅れは業務推進に多くの支障を来しており、その被害レベルを復旧費用と同等に評価することはできない。利用の立ち遅れは、数多く発生した余震の影響も要因にあるが、設備機器関係の機能回復が漏水等の影響から遅れたこと、および同じ建物内での天井や間仕切り壁の損傷が、速やかな利用への不安を募らせたことに依っている。

4.7 まとめ

2011 年東北地方太平洋沖地震で被災した低層 RC 建物の被害から復旧工事の過程の分析に基づいて、建物の構造被害は軽微であるものの非構造部材、建築設備の損傷により建物の使用が制限された事例の要因について同定した。また対象建物の地震応答解析結果、および復旧工事費用の分析から、既存の地震リスク評価による損失評価手法の妥当性を検討した。本章での主な知見は以下の通りである。

- ・対象建物は「官庁施設の総合耐震計画基準」の重要度係数を参考に、構造体の二次設計では重要度係数による必要保有水平耐力を割り増した値に対して保有水平耐力が上回ることを確認しているが、割り増した値に対する変形制限は確認していない。対象建物の近傍の観測点では 1 秒付近で極めて稀な地震動を上回るレベルが記録されており、必要保有水平耐力を上回る入力が入った可能性がある。そのため耐力には余裕があるが、変形については余裕が無かったために非構造部材や建築設備の被害が発生したと考えられる。建物の大地震後の用途の面から非構造部材や建築設備の機能確保が求められる場合には、層間変形を抑える設計が重要であることが、改めて確認された。
- ・非構造部材の天井で発生しうる損傷について、天井内に設置されている設備機器と天井材と

の相互干渉で発生する損傷を報告した。設備機器の落下による直接的な損傷に加えて、設備配管の破損による天井材の水損が顕著であった。また、天井内の設備機器の復旧工事のために天井面を全面撤去せざるを得ず、復旧工事費用が大幅に増えた。

- ・吊り式の設備機器の耐震設計では、設計用震度に対する検討だけでなく、振動特性を考慮した設計が必要であることが明らかになった。特に建物の固有周期と設備機器の固有周期が近い場合には、設備機器の共振により被害が増大する。
- ・既存の地震リスク評価手法による建物の損失率を、地震観測記録を用いた対象建物の応答解析結果を参照して評価した。天井の損失評価を加速度依存の非構造部材の被害確率曲線から算出すると、復旧工事費用からみた損失率と既存の評価法を用いた損失率は整合的な結果となった。

第4章 参考文献

- 4.1) 奈良岡浩二，高橋郁夫：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震における企業の被災状況分析，日本建築学会技術報告集，Vol.18，No.38，pp.91-94，2012年2月
- 4.2) 水谷国男：東日本大震災における建築設備の被害事例とその原因・対策に関する最近の研究，BE 建築設備 2012年10月号，pp18-25，2012
- 4.3) 建設大臣官房官庁営繕部：官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説（平成8年版），pp38-40，pp127-130，1996
- 4.4) 株式会社日建設計：防災科学技術研究所 研究交流棟 設計業務 業務報告書 研究交流棟構造計算書，平成14年3月
- 4.5) 株式会社日建設計：構造計算書 防災科学技術研究所 研究交流棟建築工事 研究交流棟編，平成14年2月
- 4.6) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：全国強震観測網 K-NET（Kyoshin Net）
- 4.7) 独立行政法人防災科学技術研究所：東日本大震災調査報告 付属 写真資料，防災科学技術研究所主要災害調査，第48号，付属-5，2012年
- 4.8) 株式会社三共建設：平成23年度研究交流棟地震被災修復工事 施工報告書，平成24年2月
- 4.9) 社団法人日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術規定 JEAC 4601 -2008，pp.364-376，平成21年12月
- 4.10) 損害保険料率算出機構：地震危険度指標に関する調査研究～地震 PML の現状と将来～，地震保険研究1，2002
- 4.11) 日本建築学会 建築にかかわる社会規範・法規範特別調査委員会：建築物の安全性評価ガイドライン小委員会報告書，pp.26-27，2010年3月
- 4.12) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：公共建築工事積算基準，平成23年版
- 4.13) Federal Emergency Management Agency, HAZUS99 Technical manual, Washington, D.C.,NY, 1999
- 4.14) 高橋雄司，正木信男，穴原一範，五十田博：地震危険度の高い地域の建物を対象とした地震リスク・マネジメント，日本建築学会構造系論文集，No.591，pp.25-33，2005年
- 4.15) 諏訪仁，神田順：兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建築設備の被害率曲線，日本建築学会構造系論文集，Vol.73 No.633，pp.1935-1941，2008年

第5章 人の運動生理機能に対する建物の揺れの影響

5.1 はじめに

地震後の建物の機能維持を確保するために、構造被害だけでなく室内被害も考慮した防災・減災対策が求められている中で、本研究の第3章、第4章では非構造部材・設備機器・家具什器による被害様相の分析を行ない、減災および建物の機能維持のために考慮すべき点を明らかにしてきた。しかし、建物の中で応答する人への影響については検討していなかった。実際に、地震後の建物の機能維持を保つためには、構造被害及び室内被害の軽減に加えて、その室内で人が健全に活動できることが求められる。

耐震構造よりも地震時の構造性能を高めるために免震建物や制震建物が開発され普及しているが、地震による建物の揺れは低減されるが、揺れそのものは不可避である。そこで本章では、地震時の建物の揺れが人の運動生理機能に与える影響の分析を行い、建物利用者の機能低下の面から、建物の機能維持について検討を行う。

5.2 長周期地震動の揺れが人に与える影響

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北地方から首都圏までの非常に広範囲に渡って震度6弱以上の強震域が発生した。またM9クラスの巨大海溝型地震により発生した長時間および長周期地震動は、首都圏の超高層建物から大阪平野の超高層建物までの建物を長時間、揺らし続けた。

気象庁が地震後に実施された超高層建物の居住者へのアンケート調査による結果^{5.1)}では、超高層建物の上層階では下層階に比較して、建物の揺れへの恐怖心や揺れによる行動難度が大きくなっていることが報告されている。また、長時間の揺れによりめまいや吐き気などの気分が悪くなる運動生理機能の不全が発生した。図5-1に気分の悪さに関するアンケート結果の一部を示す。

さらに巨大地震の本震後に発生した非常に多くの余震は、地震発生時以外でも揺れている感じがする「地震酔い」の現象が新聞などで報告されている。また本震から数か月後にめまい患者が増加したことも報告されており、長期に渡って繰り返された余震が人の平衡感覚機能に異常を生じさせたとされている^{5.2)}。

建築分野における建物振動に対する人の振動感覚に関する研究は、主に高層建物の風による水平振動に対する不快感などを対象にした研究が多く、地震による強振動に対する研究事例^{5.3,5.4)}は少ない。東日本大震災で発生した地震時の高層建物における長周期の揺れに対する評価について、日本建築学会環境工学委員会環境振動運営委員会でも、環境振動に関する居住性能評価指針を作成してきた成果をもとに、長周期地震動に対する検討を進めることが提言されている^{5.5)}。

全身振動を評価する国際規格ISO 2631^{5.6)}は、船の乗組員や建物居住者への適用が検討され、一般的要求事項としてISO 2631-1^{5.7)}の初版が刊行され、ISO 2631-1の考え方を基に建物振動に関するISO 2631-2^{5.8)}が刊行されている。ISO 2631-1は機械工学の分野で自動車や船等の乗り心地に関する評価に用いられており、人間の健康、快適性、振動知覚および動揺病を評価の対象としている。一方ISO 2631-2は建物内の環境振動や衝撃に対する快適性を評価するもので、運動生理機能に関する影響は対象としていない。そこで本節では、ISO 2631-1による評価を地震時の建物の床応答加速度に対して適用し、建物の揺れが人の運動生理機能に与える影響の評価を行う。

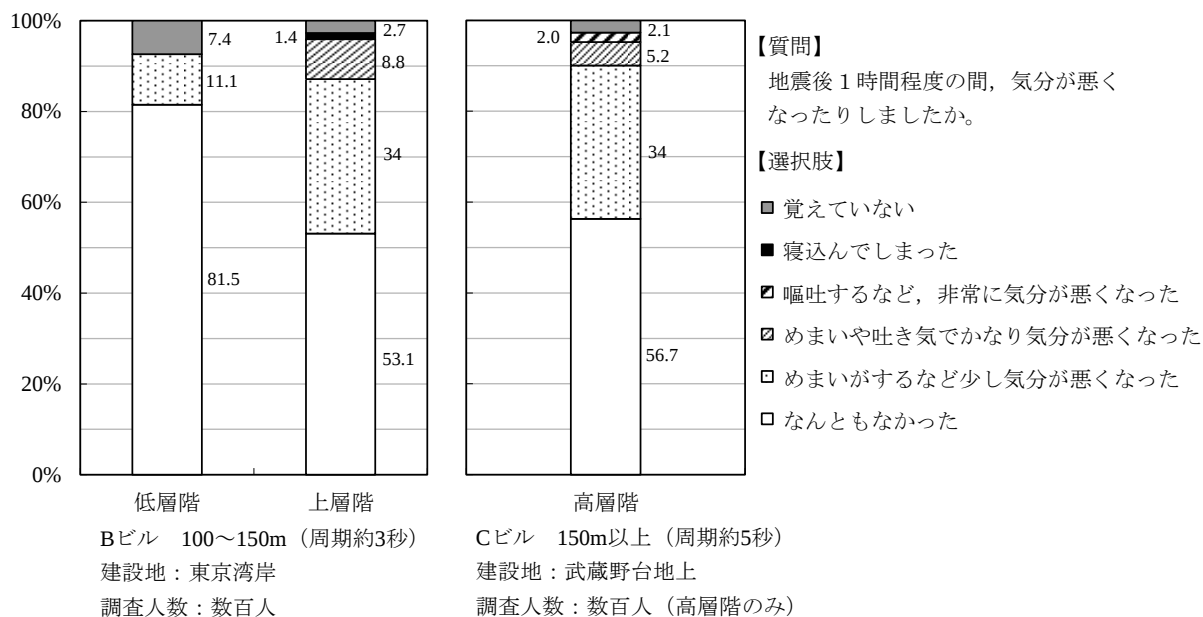


図 5-1 高層ビルにおけるアンケート調査結果（気象庁資料^{5.1)}から作成）

5.2.1 ISO 2631-1 による快適性評価と船酔い指標

ISO 2631-1 の規格^{5.9)}は、人間の健康、快適性、振動知覚および動揺病との関連で、周期的、不規則的または過渡的な全身振動を定量化するために規定されたものである。振動の影響が直接手足に伝わる（例えば動力工具）場合については除外している。ISO2631-1 には振動暴露制限を含んではないが、個々に基本的制限を設けることができるように評価方法が定義されている。評価する周波数範囲は次のように規定されている。ただし、乗物の衝突時に発生するような激しい単発衝撃の評価には適用しない。

0.5Hz～80Hz 健康、快適性、振動知覚

0.1Hz～0.5Hz 乗り物酔い（動揺病）

ISO2631-1 による振動評価は、周波数荷重振動加速度実効値 (m/s^2 r.m.s.) の測定を行うべきとされている。周波数荷重振動加速度実効値は、次式により計算される。

$$a_w = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right)^{1/2} \quad \text{式 5-1}$$

$$a_w(t) = \left(a_{wx}^2(t) + a_{wy}^2(t) + a_{wz}^2(t) \right)^{1/2} \quad \text{式 5-2}$$

ここで a_w は周波数補正加速度実効値(m/s^2)で、 $a_w(t)$ は X 方向、Y 方向、Z 方向の周波数補正加速度 $a_{wx}(t)$, $a_{wy}(t)$, $a_{wz}(t)$ の自乗和平方根の時刻歴である。また T は振動の暴露時間 (sec) である。座標系は人体を中心に置いて、図 5-2 に示すように規定されている。 $a_{wx}(t)$, $a_{wy}(t)$, $a_{wz}(t)$ は評価する項目ごとに周波数補正值が規定されている。各評価で用いるフィルタの形状を図 5-3 に、項目ごとに用いるフィルタを表 5-1 に示す。

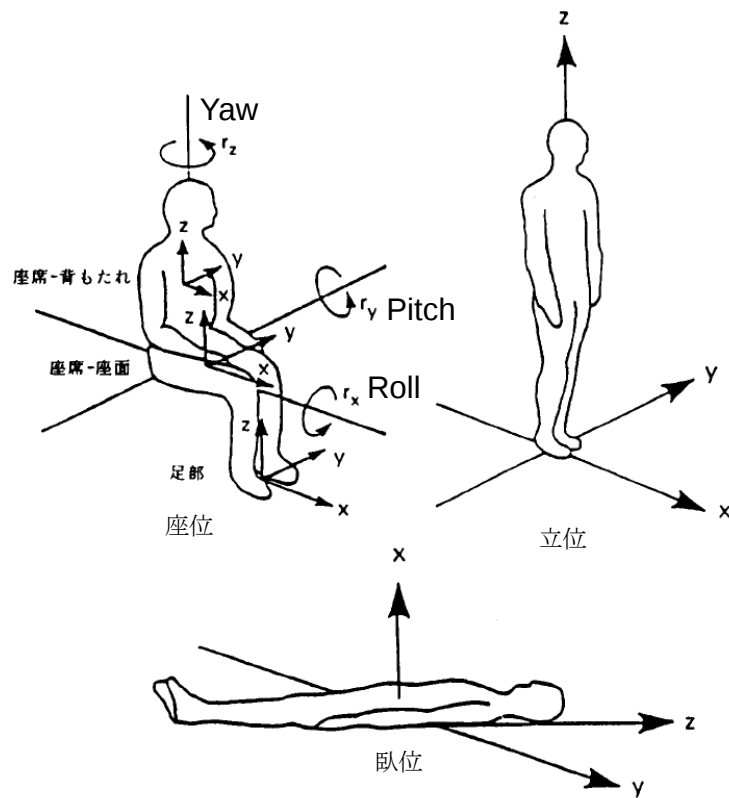


図 5-2 人体の基本振動軸

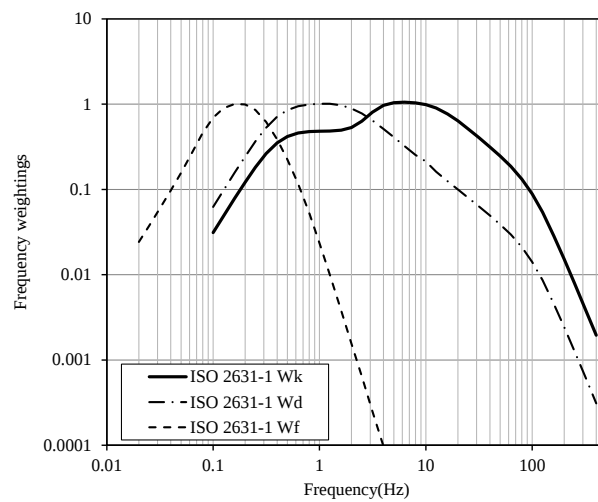


図 5-3 ISO 2631-1 で用いられているフィルタ

表 5-1 快適性評価と動揺病評価で用いるフィルタ

	快適性	動揺病
X 方向	Wd	—
Y 方向	Wd	—
Z 方向	Wk	Wf

Wd, Wk を用いて求めた周波数荷重振動加速度実効値 (m/s^2) による快適性の評価は、表 5-2 の区分により行う。

表 5-2 快適性に関する振動評価

周波数荷重振動加速度実効値	評価
0.315 m/s^2 未満	不快でない (not uncomfortable)
0.315～0.63 m/s^2	少し不快 (a little uncomfortable)
0.5～1 m/s^2	やや不快 (fairly uncomfortable)
0.8～1.6 m/s^2	不快 (uncomfortable)
1.25～2.5 m/s^2	かなり不快 (very uncomfortable)
2.0 m/s^2 以上	極度に不快 (extremely uncomfortable)

一方、乗り物酔い（動揺病）の評価では、Z 方向の加速度 (m/s^2) に対して Wf を用いた周波数荷重振動加速度の自乗和の積分値から、船酔い指標 MSDV (Motion Sickness Does Value) が式 5-3 で求められる。また嘔吐率は式 5-4 になるとされている。

$$MSDV_z = \left(\int_0^T a_{wz}^2(t) dt \right)^{1/2} \quad \text{式 5-3}$$

$$\text{嘔吐率(\%)} = K_m \cdot MSDV_z \quad \text{ここで } K_m = 1/3 \quad \text{式 5-4}$$

式 5-4 の関係は、継続時間が 20 分～6 時間の振動暴露において嘔吐率が約 70%まで上がった結果を元に設定されたと記載されている。ただし、振動ケースによっては a_w の値が 0.5(m/s^2)を超えると嘔吐する人が出てくる場合があることが注意書きとして記されている。

5.2.2 ISO 2631-1 による地震観測記録の評価

(1) 船酔い指標に関する検討

ISO 2631-1 の船酔い指標 $MSDV_z$ について、3 章で述べた大規模実験の試験体の床応答加速度に対して適用した結果を表 5-3 に示す。座位または立位を仮定して、振動台の上下方向加速度により $MSDV_z$ を計算した。振動台、実験室 1 および実験室 2 について計算したが、高層モデルの場合でもそれぞれの値に有意な差異は無い。これは試験体の振動特性のモデル化では水平方向だけをプロトタイプの高層建物を再現するように設定し、上下方向に対してはモデル化していなかったためと考えられる。

そこで実際に高層建物で観測された加速度波形のフーリエスペクトルを比較した結果を図 5-4 に示す。ここで、観測記録は国立研究開発法人建築研究所の強震観測で公開されているデータ^{5.10)}のうち、建物 SMD（東京都墨田区，S 造，地下 1 階・地上 20 階・塔屋 1 階）と建物 SKS（大阪市住之江区，S 造，地下 3 階，地上 55 階）の東日本大震災の本震での観測記録を用いた。高層モデルの試験体では振動台，実験室 1（1 階），実験室 2（4 階）の記録のフーリエスペクトルはほとんど一致しており，上下方向は 2Hz 付近までほぼ同一である。一方，観測記録のスペクトルでは

SMD では 0.5Hz 付近に、SKS では 0.1Hz～0.2Hz 付近に、上層階に行くほど増幅している成分がある。これは建物の水平方向の一次固有周期に近い成分であり、高層建物の曲げ変形や基礎のロッキング振動による回転変位から励起された上下動成分と考えられる。

表 5-3 振動実験結果を用いた船酔い指標の計算結果

(1)高層モデルの場合

高層モデル (31階相当)	振動台(地表面)		実験室1 (6階相当)		実験室2 (27階相当)	
	MSDV _z	嘔吐率	MSDV _z	嘔吐率	MSDV _z	嘔吐率
JMA神戸25%	5.205E-02	0.02%	5.164E-02	0.02%	5.160E-02	0.02%
西新宿本震100%	3.080E-01	0.10%	3.074E-01	0.10%	3.064E-01	0.10%
西新宿余震330%	5.579E-01	0.19%	5.533E-01	0.18%	5.573E-01	0.19%

(2)低層モデルの場合

低層モデル (4階相当)	振動台(地表面)		実験室1 (1階相当)		実験室2 (3階相当)	
	MSDV _z	嘔吐率	MSDV _z	嘔吐率	MSDV _z	嘔吐率
西新宿余震330%	5.577E-01	0.19%	5.551E-01	0.19%	5.561E-01	0.19%
JMA神戸25%	5.369E-02	0.02%	5.040E-02	0.02%	5.601E-02	0.02%
JMA神戸50%	1.083E-01	0.04%	1.136E-01	0.04%	1.102E-01	0.04%
JMA神戸75%	1.628E-01	0.05%	1.729E-01	0.06%	1.651E-01	0.06%

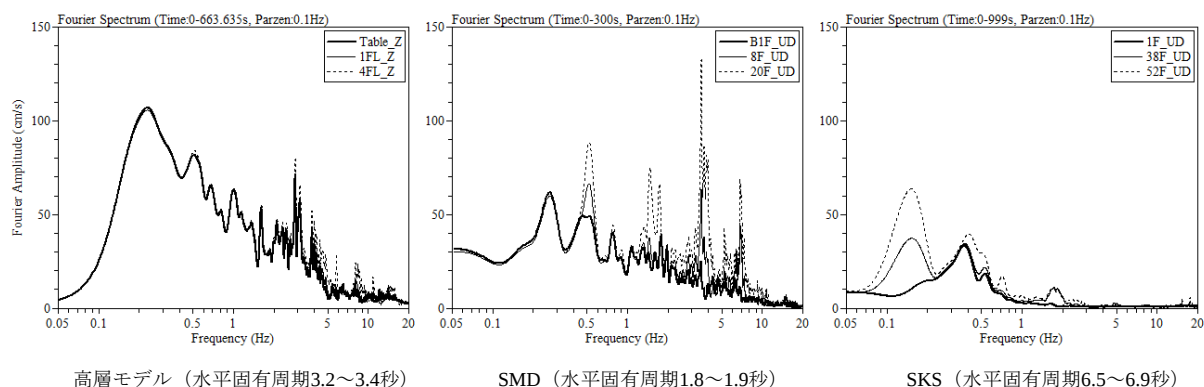


図 5-4 高層建物の床応答加速度の上下成分のフーリエスペクトル

実在の高層建物の上下方向の床応答加速度から船酔い指標 $MSDV_z$ 、および嘔吐率を計算した結果を表 5-4 に示す。計算に用いた地震は東日本大震災の本震である。結果として最下階～中間階～上層階で計算した $MSDV_z$ の値は大きく変わらないが、SKS のみ上層階の方が大きくなっている。SKS は建物の一次固有周期が 6.49～6.94 秒 (0.15Hz 付近) であり、 $MSDV_z$ の計算で用いるフィルタ W_f の重みのピークが 0.16Hz であるため、他の建物に比べて $MSDV_z$ の値に階毎の違いが出たと考えられる。

表 5-4 高層建物での観測記録を用いた船酔い指標の計算結果
(2011 年東北地方太平洋沖地震における観測記録)

建物名(固有周期)	最下階			中間階			上層階		
	階数	MSDV _z	嘔吐率	階数	MSDV _z	嘔吐率	階数	MSDV _z	嘔吐率
建物E(2.58～2.63)	B4	3.021E-01	0.10%	16	3.397E-01	0.11%	P1	3.385E-01	0.11%
SMD(1.79～1.94)	B1	2.633E-01	0.09%	8	2.564E-01	0.09%	20	2.700E-01	0.09%
建物F(3.41～3.73)	B2	7.525E-02	0.03%	15	7.733E-02	0.03%	31	8.284E-02	0.03%
SKS(6.49～6.94)	1	1.109E-01	0.04%	38	1.765E-01	0.06%	52	2.660E-01	0.09%

表 5-4 による嘔吐率と図 5-1 のアンケート結果とを比較すると、表 5-4 の嘔吐率の値はかなり小さい。また長時間および長周期の地震動により揺れ続けた高層建物の応答に対して、上下方向の応答加速度だけで嘔吐率を評価することは不十分であると考えられる。そこで、床応答加速度の 3 成分を用いる ISO 2631-1 の快適性評価の考え方を船酔い指標にも転用して評価を行う。

$$MSDV_x = \left(\int_0^T a_{wx}^2(t) dt \right)^{1/2} \quad \text{式 5-5}$$

$$MSDV_y = \left(\int_0^T a_{wy}^2(t) dt \right)^{1/2} \quad \text{式 5-6}$$

$$MSDV_{xyz} = \left(\int_0^T (a_{wx}^2(t) + a_{wy}^2(t) + a_{wz}^2(t)) dt \right)^{1/2} \quad \text{式 5-7}$$

ここで $a_{wx}(t)$ 、 $a_{wy}(t)$ の計算には、 $a_{wz}(t)$ の計算と同様に、Wf のフィルタを作用させる^{5.11)}こととした。計算結果を表 5-5 に示す。

水平 2 成分+上下の 3 成分の自乗和平方根で計算した $MSDV_{xyz}$ を見ると、関東地区の建物の上層階で 1% 台の値となっており、オーダーとして図 5-1 の B ビルと C ビルの上層階の「嘔吐する等、非常に気分が悪くなった」「寝込んでしまった」と言う回答を選んだ調査結果のオーダーと整合的な結果となった。

ISO 2631-1 では $MSDV_z$ と嘔吐率との関係について、 $MSDV_z$ を 1/3 倍することが例示されているが、この関係式は成人男性と女性の被験者に対して、20 分から 6 時間までの振動暴露により 70% の人が嘔吐するような状況から設定されたと記述されており、主に船酔いを対象とした条件下での実験結果によるものである。今回の分析より、ISO 2631-1 の規程のままでは地震時の建物揺れに対する動揺病の評価が難しいこと、および 3 方向成分を用いて加速度実効値を算出することにより、地震後のアンケート結果に整合的な動揺病の指標を出すことができることが判った。ただし、水平方向加速度に対して Wf のフィルタを作用させることの妥当性については、別途、被験者実験などによる検証が必要である。

表 5-5 船酔い指標の複数方向成分による計算結果
(2011 年東北地方太平洋沖地震における観測記録)

(1) 最下階

計算結果 建物名		X方向		Y方向		Z方向		XYZ方向	
		MSDV _x	嘔吐率	MSDV _y	嘔吐率	MSDV _z	嘔吐率	MSDV _{xyz}	嘔吐率
関東	建物E	4.821E-01	0.16%	5.136E-01	0.17%	3.021E-01	0.10%	7.665E-01	0.26%
	SMD	4.518E-01	0.15%	4.882E-01	0.16%	2.633E-01	0.09%	7.154E-01	0.24%
	高層モデル	5.361E-01	0.18%	5.466E-01	0.18%	3.080E-01	0.10%	8.253E-01	0.28%
大阪	建物F	1.831E-01	0.06%	1.396E-01	0.05%	7.525E-02	0.03%	2.423E-01	0.08%
	SKS	3.909E-01	0.13%	3.154E-01	0.11%	1.109E-01	0.04%	5.144E-01	0.17%

(2) 中間階

計算結果 建物名		X方向		Y方向		Z方向		XYZ方向	
		MSDV _x	嘔吐率	MSDV _y	嘔吐率	MSDV _z	嘔吐率	MSDV _{xyz}	嘔吐率
関東	建物E	2.132E+00	0.71%	2.338E+00	0.78%	3.397E-01	0.11%	3.182E+00	1.06%
	SMD	1.172E+00	0.39%	7.291E-01	0.24%	2.564E-01	0.09%	1.404E+00	0.47%
	高層モデル	7.510E-01	0.25%	8.135E-01	0.27%	3.074E-01	0.10%	1.149E+00	0.38%
大阪	建物F	8.357E-01	0.28%	6.904E-01	0.23%	7.733E-02	0.03%	1.087E+00	0.36%
	SKS	5.941E+00	1.98%	2.981E+00	0.99%	1.765E-01	0.06%	6.649E+00	2.22%

(3) 上層階

計算結果 建物名		X方向		Y方向		Z方向		XYZ方向	
		MSDV _x	嘔吐率	MSDV _y	嘔吐率	MSDV _z	嘔吐率	MSDV _{xyz}	嘔吐率
関東	建物E	2.898E+00	0.97%	3.301E+00	1.10%	3.385E-01	0.11%	4.405E+00	1.47%
	SMD	2.777E+00	0.93%	1.241E+00	0.41%	2.700E-01	0.09%	3.053E+00	1.02%
	高層モデル	2.059E+00	0.69%	2.473E+00	0.82%	3.064E-01	0.10%	3.232E+00	1.08%
大阪	建物F	1.714E+00	0.57%	1.393E+00	0.46%	8.284E-02	0.03%	2.210E+00	0.74%
	SKS	9.437E+00	3.15%	3.785E+00	1.26%	2.660E-01	0.09%	1.017E+01	3.39%

(2) 余震の影響による検討

2011 年東北地方太平洋沖地震では、マグニチュード 9 クラスの巨大地震が発生した場合には、マグニチュード 7 クラスの余震が発生したり、非常に多くの余震が発生することが、改めて認知された。また非常に多く発生した余震により、地震が発生していないのに揺れている気がしたりめまいがする等の平衡感覚異常を訴える「地震酔い」「後揺れ症候群」という現象が、新聞などで報道されている。地震酔いについては、余震活動が非常に活発である 2016 年熊本地震でも同様な報道がされている。これは余震による小さな揺れがさらに大きくなるのではないかという心理的な不安から揺れに過敏になった影響も指摘^{5.12)}されている。

ISO 2631-1 の船酔い指標 $MSDV_z$ は、式 5-3 に示されるように、周波数荷重振動加速度値の二乗を振動暴露時間で積分した値の平方根であるため、振動暴露時間に対して値が累積されていく指標である。そこで、本震から余震を含む 24 時間観測データに対して $MSDV_z$ を求め、地震酔いと言った運動生理機能異常が起こる可能性について検討した。

検討に用いた観測データは、首都圏地震観測網 MeSO-net^{5.13)}の記録を用いた。MeSO-net は首都圏内に約 400 地点に設置した高密度な地震観測網で、地下 20m に設置された加速度計の 24 時間の連続観測が行われている。そこで 2011 年 3 月 11 日 0 時～3 月 12 日 24 時までの連続記録を用いて $MSDV_z$ を求めた。分析に用いた MeSO-net の観測点位置を図 5-5 に示す。

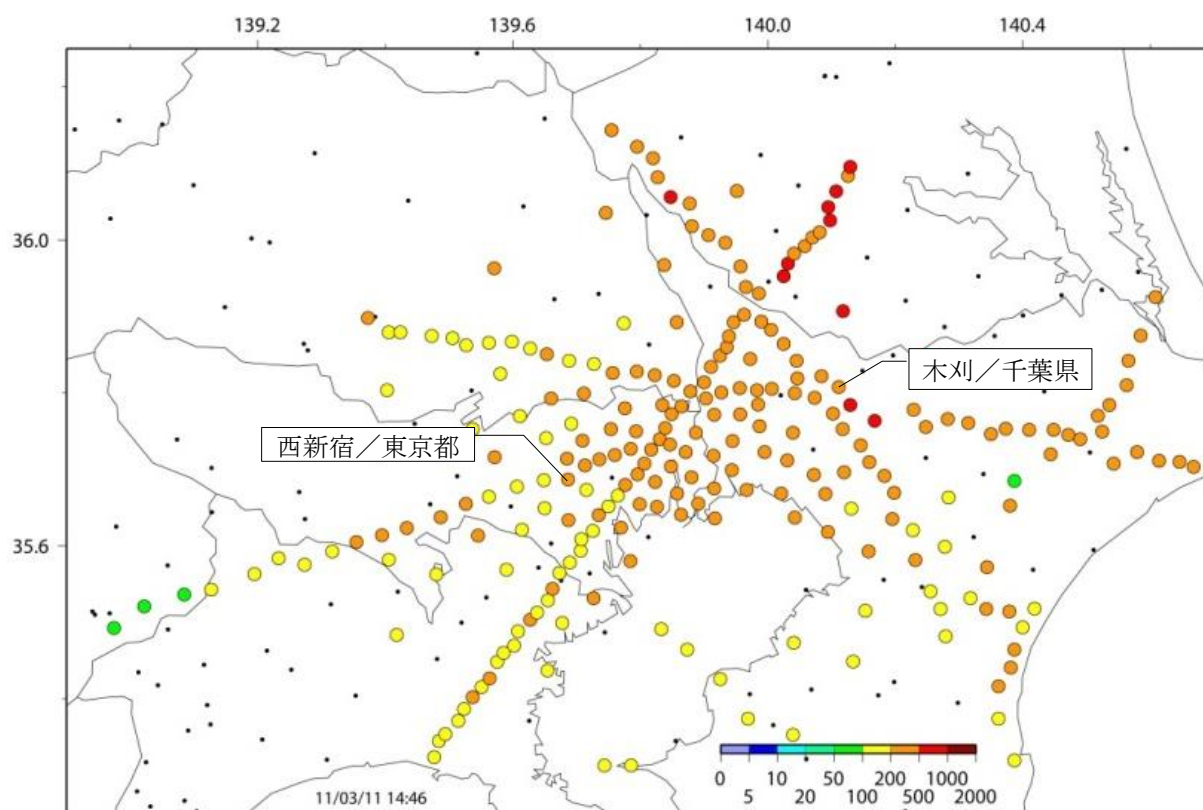


図 5-5 分析に用いた MeSO-net の観測点位置（文献 5.9 の資料に追記）

図 5-6 に西新宿観測点での 24 時間データの時刻歴波形の一部を示す。また表 5-6 に 2011 年 3 月 11 日 0 時～3 月 12 日 24 時までの間に、気象庁大手町の観測点での震度観測回数を示す。表 5-6 より震度 4 以上の大きなイベントは 2 回で、震度 5 強は本震、震度 4 は 3 月 11 日 15 時 15 分頃に発生した茨城県沖での最大余震の際に観測された震度である。

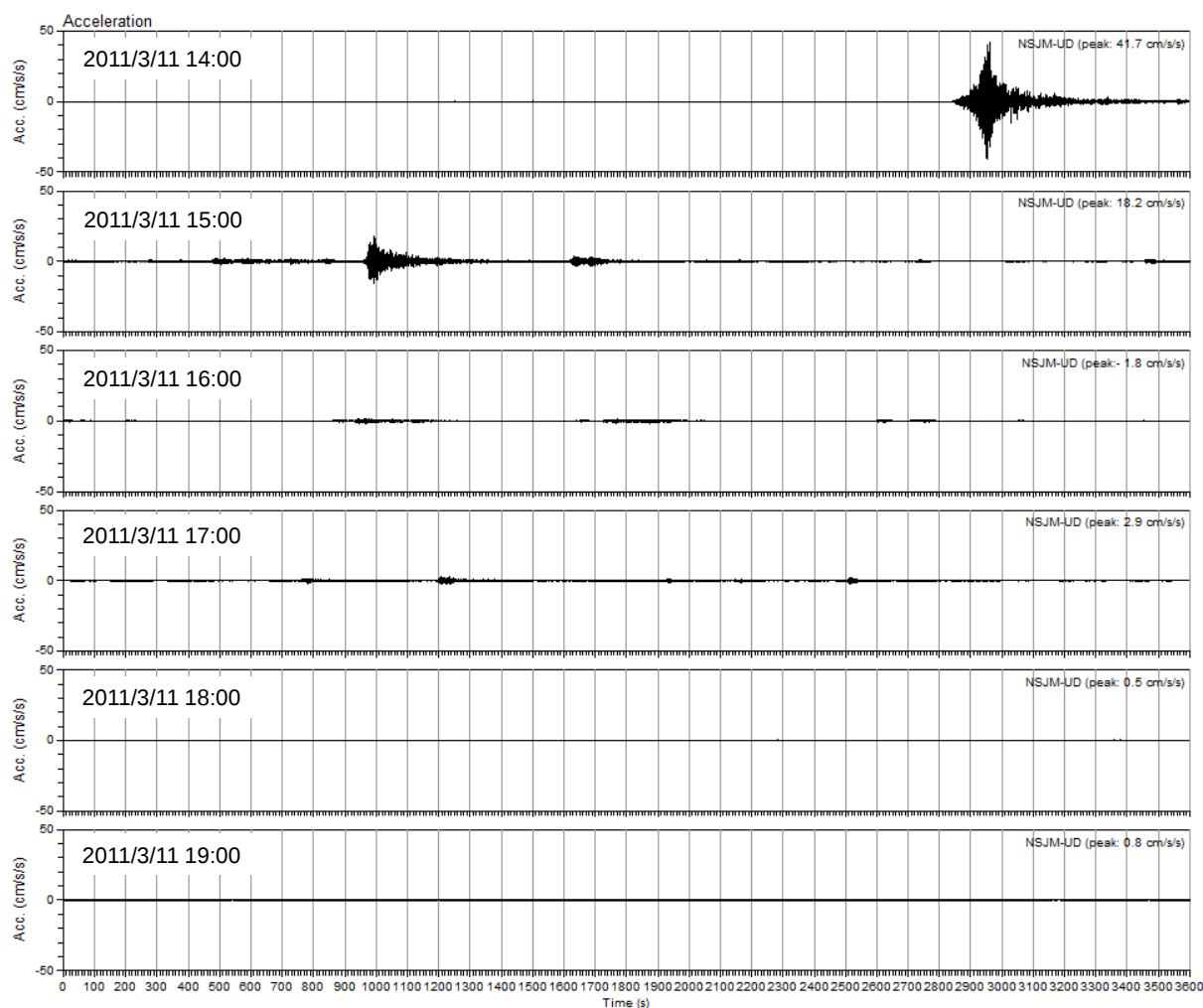


図 5-6 24 時間観測記録の時系列（西新宿・上下動成分）

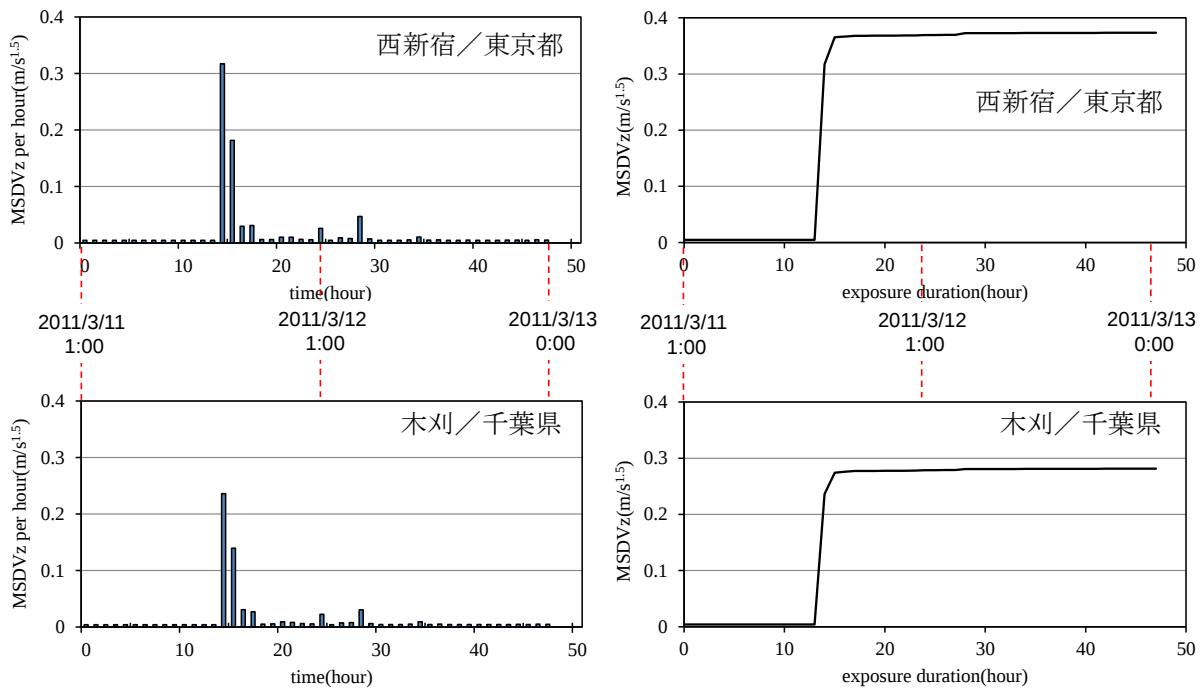
表 5-6 東京都千代田区大手町の気象庁観測点における震度階の回数

日時 \ 震度階	1	2	3	4	5-	5+	6-	6+	7	合計
2011/3/11	65	32	3	1	0	1	0	0	0	102
2011/3/12	37	11	1	0	0	0	0	0	0	49
合計	102	43	4	1	0	1	0	0	0	151

船酔い指標を 24 時間連続データとして処理するに辺り，ここでは振動被曝時間を 1 時間として式 5-3 により $MSDV_{z,i}$ を計算し，累積値 $MSDV_{z,c}$ を式 5-8 により求めた。

$$MSDV_{z,c} = \left[\sum MSDV_{z,i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{式 5-8}$$

計算結果を図 5-7 に示す。上下方向成分のみを用いて計算した $MSDV_{z,i}$ であるため，オーダーとしては前節で考察したように小さいが，相対的に時系列で比較すると本震と最大余震による値による割合が大きく，累積値で見てもその他の余震が占める割合は小さいことが解る。



(1) 振動被曝を 1 時間とした場合

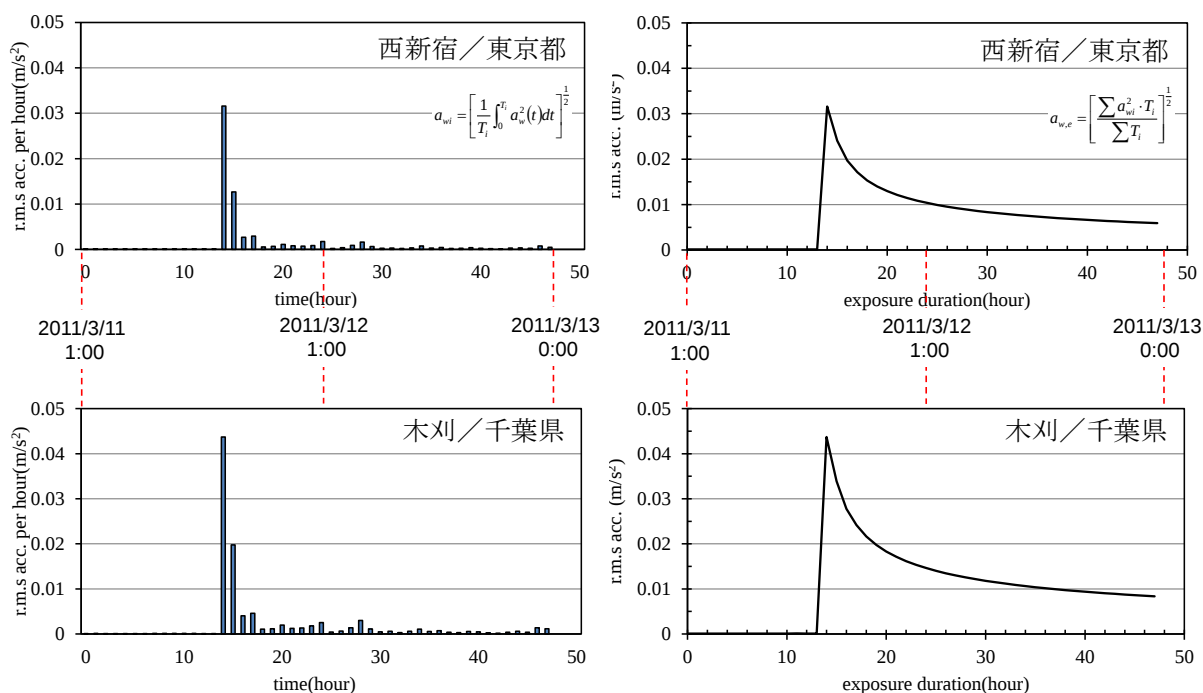
(2) 1 時間毎の値の累積値

図 5-7 24 時間観測記録を用いた船酔い指標の時系列（上下動成分）

次に快適性を評価する場合の周波数荷重振動加速度実効値は，振動被曝時間 T_i を 1 時間として式 5-1 より $a_{w,i}$ を計算し，1 時間ごとに足し合せた実効値は式 5-9 により，等価な実効値 $a_{w,e}$ として求めた。

$$a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{w,i}^2 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{式 5-9}$$

計算結果を図 5-8 に示す。 $a_{w,i}$ の値は最大でも $0.03 \sim 0.04$ (m/s^2) と小さいため，ISO 2631-1 による快適性評価値の表 5-2 と比較すると，不快ではないレベルである。



(1) 振動被曝を 1 時間とした場合

(2) 1 時間毎の実効値の等価値

図 5-8 24 時間観測記録を用いた快適性評価の周波数荷重振動加速度実効値の時系列

次に 24 時間連続記録が入力される建物内の応答により評価する場合を想定し、一質点系の線形応答解析による床応答加速度で同様の処理を行った。応答解析で設定したパラメータを表 5-7 に示す。なお減衰は 2%とした。

表 5-7 設定した建物階数と固有周期

階数	高さ (m)	固有周期 (秒)			
		水平		上下	
56	170	4.50	(0.22Hz)	0.54	(1.87Hz)
30	90	2.40	(0.42Hz)	0.32	(3.15Hz)
20	60	1.60	(0.63Hz)	0.23	(4.29Hz)
10	30	0.80	(1.25Hz)	0.15	(6.71Hz)

※固有周期 T は以下の経験式から設定 (N : 階数)

・ 水平方向

$$T=0.08N$$

・ 上下方向

$$T=0.0084N+0.065$$

船酔い指標の計算結果を図 5-9 に示す。船酔い指標では前節の検討を踏まえ、上下方向成分だけでなく水平成分、および 3 成分合成した場合を検討した。上下方向成分のみを用いた場合には建物の階数に寄らずほぼ同一の値であるが、3 成分合成した場合には累積値の差異が大きくなる。また 10 階モデルの場合は地表面の結果とほとんど同レベルの結果となった。

快適性評価の実効加速度の時系列の比較を図 5-10 に示す。本震時の実効値の大きさ及び値の減衰の傾向で見ると、20 階以上のグループと、地表面・10 階とに大別される。両者は最大値で 3 倍以上の差異があり、また減衰の傾向も違うことから、相対的には床応答加速度が人の快適性に与える影響は大きいと言える。ただし、実効値を表 5-2 の値と比較すると大きな問題は無いレベル

であった。

東日本大震災での西新宿における観測波形だけの検討事例であるが 48 時間分の連続記録を用いた応答解析結果による船酔い指標，および快適性評価の加速度実効値の検討より以下のことが判った。

- ・ 振動被曝の観点から見ると，本震時に受けた振動量が，その後の余震時の人の運動生理機能の不調の差異に大きな影響を与える。
- ・ ISO 2631-1 による評価手法により地震時の建物の床応答加速度が人に与える影響の違いを見ると，10 階以下の中低層建物と，20 階以上の高層建物とで人に与える影響が異なる可能性が高い。

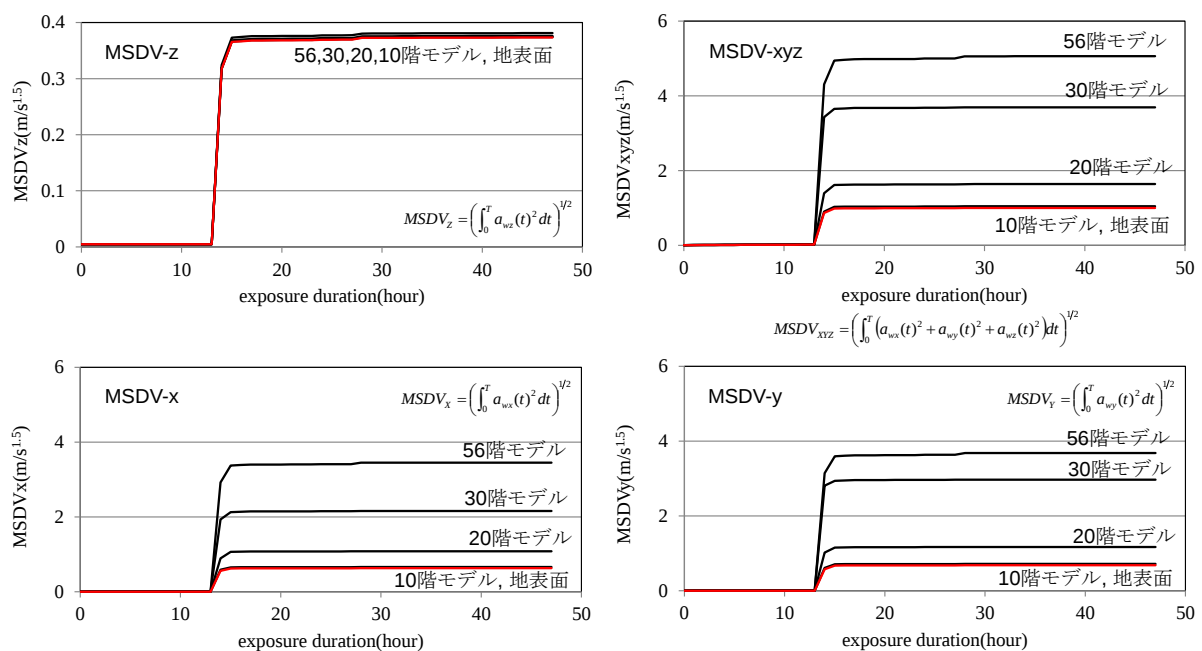


図 5-9 24 時間観測記録の応答解析結果による船酔い指標の時系列

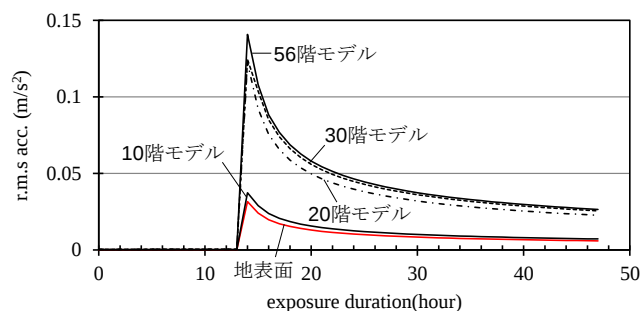


図 5-10 24 時間観測記録の応答解析結果による快適性評価の加速度実効値の時系列

5.2.3 建物居住者への地震の揺れアンケートによる評価

前節までは建物で観測された地震記録の分析結果を、既存の建物の利用者へのアンケート結果との比較により考察した。東日本大震災の際には気象庁のアンケート^{5.1)}以外にも、超高層建物の利用者を対象としたアンケート調査が実施されており^{5.14 5.15, 5.16)}、貴重な知見を与えている。しかし震災の規模から、地震発生直後のアンケート調査は不可能であったため、アンケートの実施が地震後から数か月経過してからであること、また対象とした建物で実際に観測された記録が無い場合があること等の制約条件がある。非構造部材や家具什器などの室内被害については不変であるが、人の運動生理機能に与えた影響や心理的な不安感については、事後の調査結果であるため、アンケート回答者の主観の影響が入る可能性がある。

そこで、大地震後のアンケート調査による建物の揺れが人の運動生理機能に与える影響の評価について基礎的なデータを蓄積するために、大地震だけではなく中小地震においても、建物利用者から揺れに対するアンケートを行うシステムの開発を検討している。対象建物は、建物内で地震観測が行われていることとし、web によるアンケートにより回答および集計の迅速性を高めている。ここでは 5.2.2(1)で検討した建物 F の建物利用者に対して、振幅レベルは小さいが長時間継続する長周期地震動により建物が応答した地震に対して、地震後に実施したアンケート結果について述べる。

(1) アンケートの概要

- ・アンケート対象 建物 F（大阪市北区）利用者
- ・アンケート内容 2016 年 4 月 1 日 11 時 40 分頃に発生した三重県南東沖の地震
- ・アンケート回答期間 2016 年 4 月 15 日～4 月 28 日
- ・アンケート回答者数 36 名（男性 29 名、女性 7 名）
- ・アンケート項目 表 5-8 の通り

(2) アンケート対象の地震

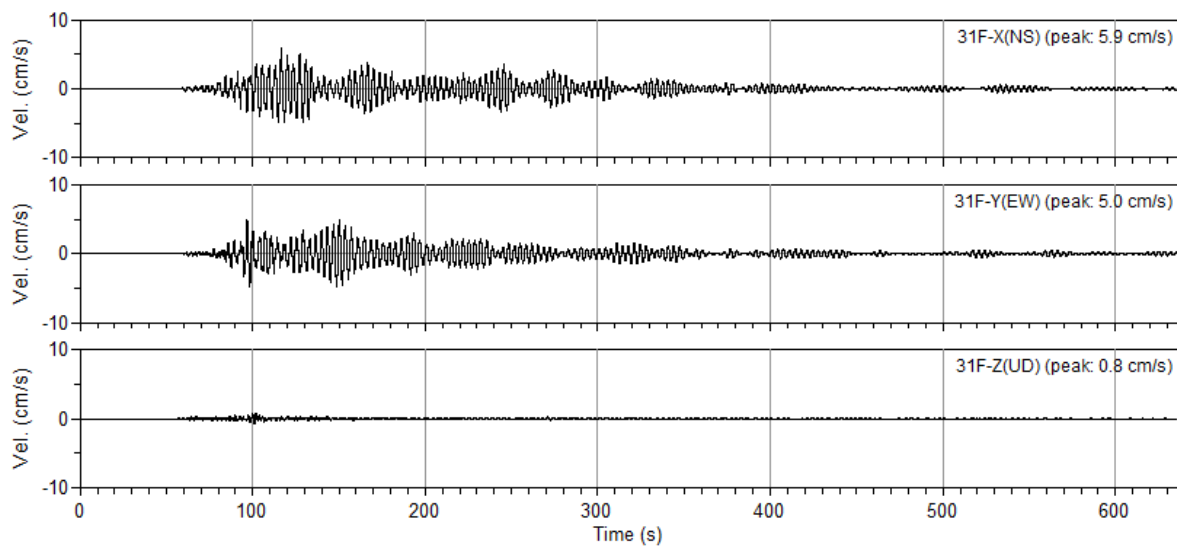
アンケートを実施した期間前後に建物 F で観測された地震を表 5-9 に示す。この中でアンケートを実施した地震は、建物内に利用者が最も多く滞在していた 4 月 1 日の三重県南東沖の地震とした。図 5-11 に観測された地震記録の時刻歴波形とフーリエスペクトルを示す。なお、建物 F では速度計による高感度な地震観測が行われている。

表 5-8 アンケート項目

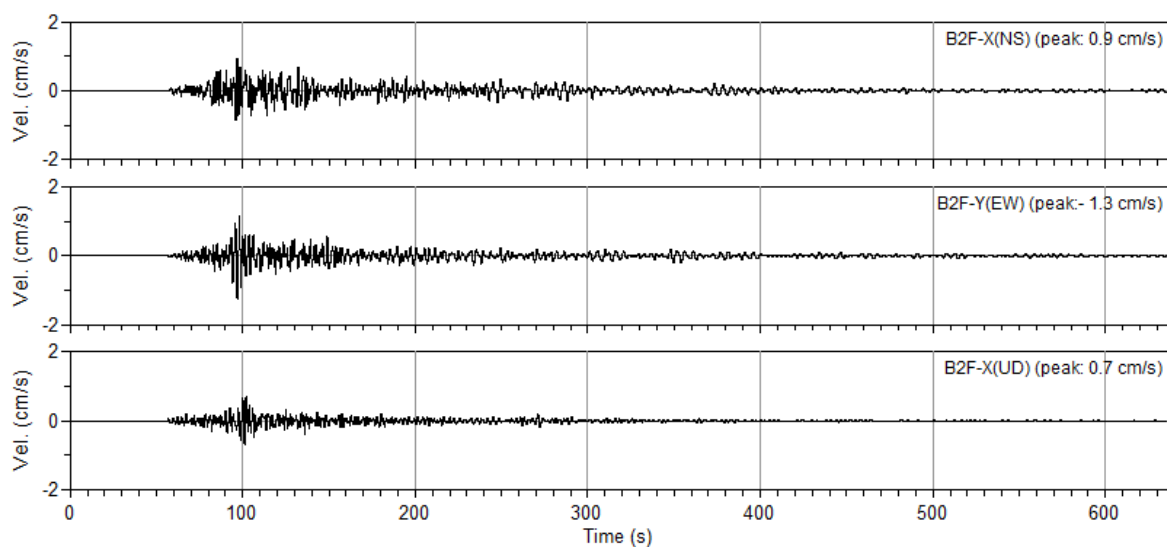
No.	質問	回答の選択肢
Q1	地震の揺れをどこで感じましたか？（感じなかった場合は地震の時にいた場所を選んで下さい）	・B2 階～31 階 ・建物に不在 ・憶えていない
Q2	地震の揺れを感じた時の状況を教えてください。（感じなかった場合は地震の時の状況を選んで下さい）	・座位 ・立位 ・歩行中 ・寝位 ・その他 ・わからない、あまり憶えていない
Q3	地震の揺れを感じて退避行動などを行いましたか？	・なにもしなかった ・机の下に潜った ・落下物などから体を守った（ヘルメット着用など） ・ドアを開けてすぐ退避できるようにした ・その他の行動 ・あまり憶えていない ・揺れを感じなかった
Q4	あなたが感じた地震の揺れの大きさは、どれくらいでしたか？	・わずかに揺れを感じた ・はっきりした揺れを感じたが、行動に支障はなかった ・歩いたり動いたりすることに、やや支障があった ・立っていることができなかった ・揺れに翻弄され、自分の意志で何も行動できなかった ・わからない、あまり憶えていない ・揺れを感じなかった
Q5	どのような揺れを感じましたか？複数回答可能です。	・ゆったりとした揺れ ・東西南北にぐるぐる回る揺れ ・ガタガタと細かく左右に動く揺れ ・上下に突き上げるような揺れ ・突然動きが大きくなる感じの揺れ ・揺れが小さくてわからない、あまり憶えていない ・あまりに揺れが大きくてわからない、憶えていない ・揺れを感じなかった ・その他
Q6	揺れの長さはどれくらいに感じましたか？	・10 秒未満 ・30 秒くらい ・1 分くらい ・2 分くらい ・2 分以上 ・わからない、あまり憶えていない ・揺れを感じなかった
Q7	あなたは地震の揺れている間、怖いと感じましたか？	・怖くなかった ・少し怖かった ・怖かった ・非常に怖かった ・わからない、あまり憶えていない ・揺れを感じなかった
Q8	地震の揺れに対して気分が悪くなりましたか？	・なんともなかった ・めまいがするなど、少し気分が悪くなった ・めまいや吐き気でかなり気分が悪くなった ・嘔吐するなど、非常に気分が悪くなった ・寝込んでしまった ・わからない、あまり憶えていない ・揺れを感じなかった
Q9	震度階ではどの程度の揺れと感じましたか？	・震度 1 未満 ・震度 1 ・震度 2 ・震度 3 ・震度 4 ・震度 5 弱 ・震度 5 強 ・震度 6 弱以上 ・わからない、あまり憶えていない ・揺れを感じなかった
Q10	よろしければ性別と年代を教えてください。	

表 5-9 建物 E で観測された地震

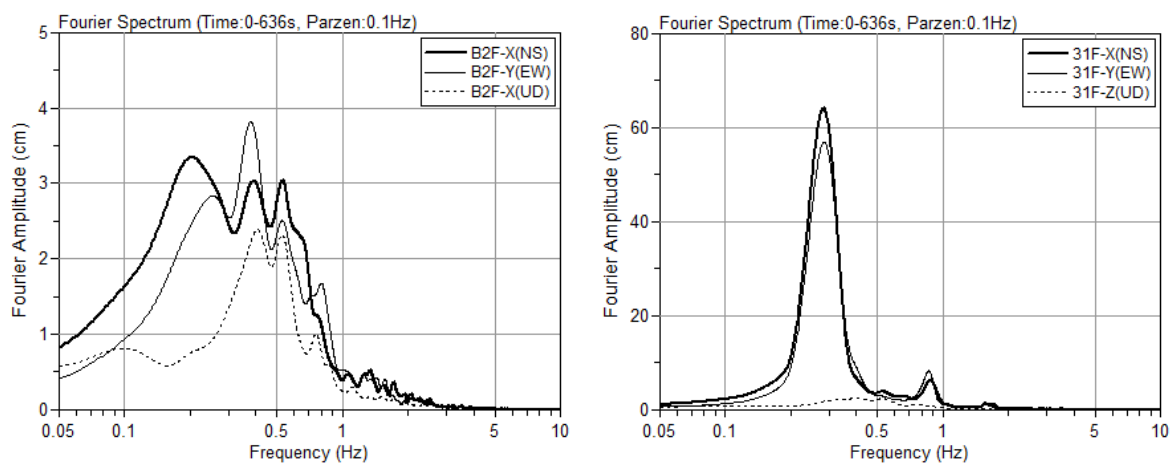
発生日時	震源地	階	計測震度	震度階	最大加速度 (cm/s^2)	長周期地震動階級 (絶対速度応答の最大値)
2016 年 4 月 1 日 11 時 40 分頃	三重県 南東沖	B2 階	2.3	震度 2	5.4	階級なし (4.5cm/s)
		15 階	2.9	震度 3	11.7	
		31 階	3.1	震度 3	14.6	
2016 年 4 月 14 日 21 時 30 分頃	熊本 地方	B2 階	0.4	震度 0	0.6	階級なし (1.4cm/s)
		15 階	1.3	震度 1	1.8	
		31 階	1.7	震度 2	3.0	
2016 年 4 月 16 日 1 時 25 分頃	熊本 地方	B2 階	2.3	震度 2	5.9	階級 1 (14.9cm/s)
		15 階	3.4	震度 3	23.8	
		31 階	4.0	震度 4	46.3	



(1) 31 階 速度時刻歴波形



(2) B2 階 速度時刻歴波形



(3) フーリエスペクトル

図 5-11 建物 F で観測された地震記録（速度記録）

(3) アンケート結果

表 5-10 に建物での観測記録から算出した計測震度, 最大加速度, 長周期地震動階級, および ISO 2631-1 による船酔い指標の計算結果を示す。震度階級としては最上階の記録を用いても震度 3 程度, 長周期地震動階級でも階級なしのレベルの地震であった。

アンケートの回答者数を表 5-11 に, アンケート結果のうち Q6~Q9 の結果について, 図 5-12 ~図 5-15 に示す。地震時に 16 階以上にいた回答者を上層階, B2 階~3 階にいた回答者を下層階としてグルーピングした結果である。下層階では揺れを感じなかった回答者が 8 名 (40%) いたが, 上層階では回答者全員が揺れを感知している。また揺れへの恐怖, 揺れによる気分の悪さは上層階の方が高い結果となっている。

表 5-10 の船酔い指標による嘔吐率は最大でも 0.15%と小さい値ではあったが, 図 5-14 に示すように, 上層階では「めまいがするなど, 少し気分が悪くなった」を選択した回答が出てきている。また観測記録から求めた震度階は下層階で震度 2, 上層階で震度 3 であり, 図 5-15 の回答は整合的な結果となっている。ただし上層階の回答は震度 1 未満~震度 5 弱までと幅広く分布している。アンケートの回答者数が多くはないが, 長周期地震動による建物揺れに対する人の感度に関するデータの取得ができた。

気象庁の計測震度や長周期地震動階級は, 揺れの継続時間による影響が大きく入ってこないため, 今回の地震のような継続時間の影響と思われる回答項目を評価できない。そのため人の運動生理機能に与える影響を評価する場合には, ISO 2631-1 の船酔い指標などのような継続時間を考慮した評価指標が有効であると考えられる。

表 5-10 建物の床応答波形から算出した値

(1) 計測震度, 最大加速度および長周期地震動階級

階	計測震度	震度階	最大加速度 (cm/s^2)	長周期地震動階級 (絶対速度応答の最大値)
31 階	3.1	震度 3	14.6	階級なし (4.5cm/s)
15 階	2.9	震度 3	11.7	
B2 階	2.3	震度 2	5.4	

(2) 船酔い指標

計算結果 階数	X方向		Y方向		Z方向		XYZ方向	
	MSDVx	嘔吐率	MSDVy	嘔吐率	MSDVz	嘔吐率	MSDVxyz	嘔吐率
31F	3.304E-01	0.11%	2.962E-01	0.10%	1.715E-02	0.01%	4.441E-01	0.15%
15F	1.556E-01	0.05%	1.437E-01	0.05%	1.527E-02	0.01%	2.124E-01	0.07%
B2F	2.883E-02	0.01%	2.748E-02	0.01%	1.530E-02	0.01%	4.266E-02	0.01%

表 5-11 アンケート回答者数

階数	男性	女性	各階計
30階	0	1	1
26階	1	0	1
19階	1	0	1
16階	6	3	9
3階	4	0	4
1階	9	3	12
B2階	2	0	2
B1階	2	0	2
憶えていない	1	0	1
建物に不在	3	0	3
合計	29	7	36

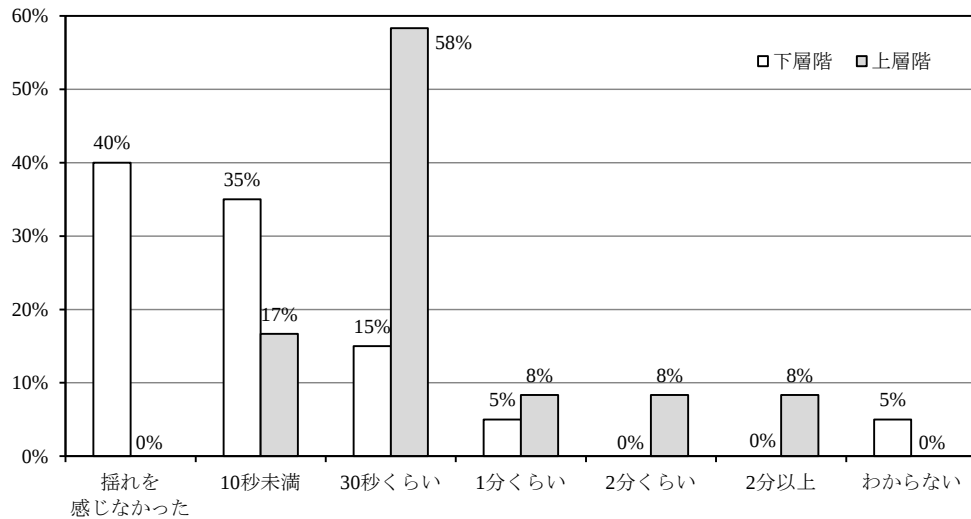


図 5-12 Q6「揺れの長さはどれくらいに感じましたか？」への回答

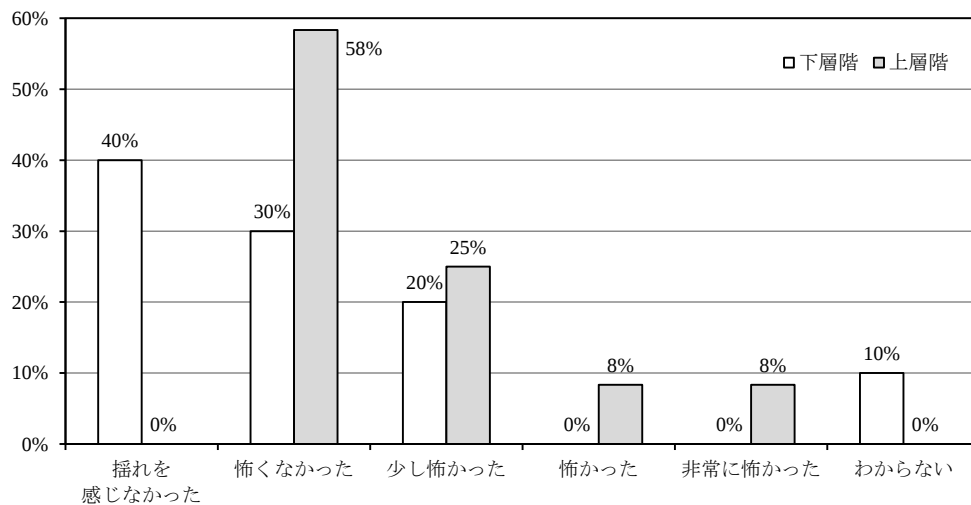


図 5-13 Q7「あなたは地震の揺れている間、怖いと感じましたか？」への回答

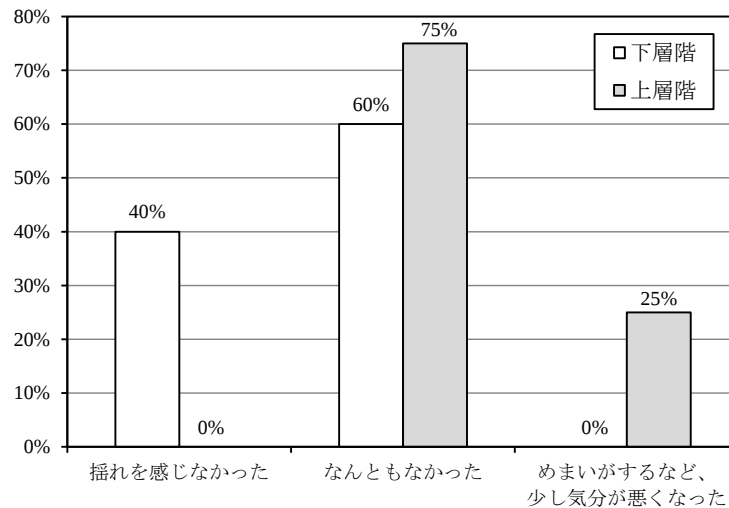


図 5-14 Q8「地震の揺れに対して気分が悪くなりましたか？」への回答

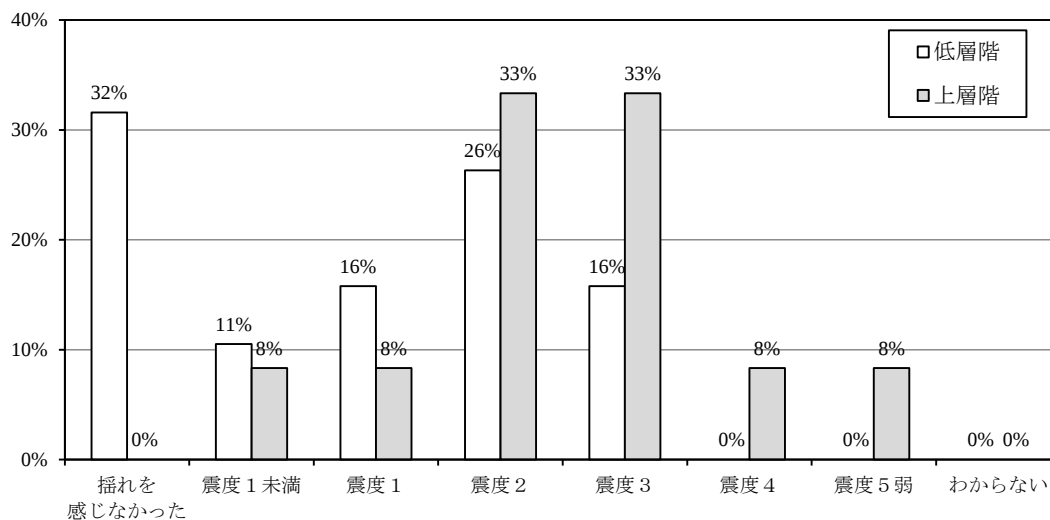


図 5-15 Q9「震度階ではどの程度の揺れと感じましたか？」への回答

5.3 人体生理機能維持を目的とした情報システム

前節までの検討で、主に高層建物を対象として、東日本大震災で観測された長時間継続する長周期地震動の揺れが人体生理機能に与える影響を ISO 2631-1 の指標により評価した。その結果、地震の揺れによる人体生理機能の変化は、揺れの最大値（最大加速度、最大速度、計測震度など）だけではなく、揺れの継続時間（振動の被曝時間）も考慮する必要があると言える。大地震発生直後には震度速報などにより建物地点付近の揺れの大きさはある程度把握できるものの、継続時間は把握できない。地震時の建物利用者の安全、快適性を考慮した施設管理を行うためには、各建物で地震計を設置して、建物の実際の揺れの観測値に基づき館内への情報提供や対策を講じる必要がある。また地震計の観測値の処理には揺れの最大値だけではなく、MSDV 値を出すなどの機能が必要となる。

また東日本大震災のように非常に活発な余震活動が発生した場合には、余震の小さな揺れが大地震になるのではないかと、との心理的な不安から揺れに敏感になり、心理ストレスから平衡感覚機

能の異常が生じ、めまいや様々な精神疾患が生じる原因になった可能性が指摘^{5.12)}されている。これに対して身体の揺れを抑える薬物療法やバランスコントロールのリハビリテーション等のアプローチが心理的サポートに結びつく^{5.12)}と提案している。建物側の情報提供としては、高度利用者向けの緊急地震速報の導入により、揺れの予測が小さい場合でも地震情報を提供することで余震の揺れの規模をできるだけ早く建物利用者にイメージさせることや、余震の場合にも観測された地震記録の大きさを正確に早く伝えることで、余震による心理的不安を軽減できる可能性がある。

5.4 まとめ

2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した長周期地震動により長時間応答した高層建物の揺れ、および、非常に多く発生した余震による揺れが人の運動生理機能に与える影響を評価するために、ISO 2631-1 による振動特性評価を行った。本章での主な知見は以下の通りである。

- ・自動車や船などの乗り物の中での全身振動被曝による運動生理機能への影響を評価する ISO 2631-1 の手法を高層建物の地震時の揺れに適用したところ、船酔いによる嘔吐率等の運動生理機能の不調を示す指数は非常に小さな値となった。東日本大震災の後に建物居住者に対して実施された揺れに対するアンケート結果と比較すると、ISO 2631-1 による評価結果は人への影響を過小評価している。
- ・ISO 2631-1 の船酔い指標の計算において、上下方向の加速度だけでなく水平方向の加速度を考慮した周波数荷重振動加速度実効値を求めることにより、嘔吐率のオーダーがアンケート結果と整合的になることが判った。ただし、水平方向加速度に周波数荷重（フィルタ）をかけて処理することの妥当性の検証が必要である。
- ・24 時間連続観測による地震記録を用いて、東日本大震災後に多発した余震が人に与える影響を評価した。その結果、本震時の強震時に被曝した振動量が、余震時の人の運動生理機能に与える影響が一番大きいことを確認した。
- ・建物の地震応答解析結果に ISO 2631-1 による快適性評価、船酔い評価を適用した結果、10 階以下の低層建物の場合には地表面での観測記録と同レベルの評価値となるが、20 階以上の高層建物では相対的に地表面よりも不快感、および嘔吐率が上がることが判った。
- ・人の運動生理機能維持を考慮した建物管理を行うためには、建物毎に地震計の設置を進め、建物の揺れの最大値だけでなく揺れの継続時間を考慮した情報提供が必要である。また緊急地震速報も余震に対する心理的ストレスを軽減できる可能性がある。

第 5 章 参考文献

- 5.1) 気象庁地震火山部：長周期地震動に関する情報のあり方 報告書 資料 2：高層ビルにおけるアンケート調査票およびアンケート調査結果，平成 24 年 3 月
- 5.2) M. Honma, N. Endo, Y. Osada, Y. Kim and K. Kuriyama：Disturbances in equilibrium function after major earthquake, Scientific Reports 2:749, pp1-8, 2012
- 5.3) 高橋徹，貞弘雅晴，斉藤大樹，小豆畑達哉，森田高市，野口和也，箕輪親宏：長周期地震動を考慮した人間の避難行動限界評価曲線の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集 B2，pp.497-498，2007.8

- 5.4) T. Takahashi, T. Suzuki, T.Saito, T. Azuhata and K.Morita : Shaking Table Test for Indoor Human Response and Evacuation Limit, 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering & 5th International Conference on Earthquake Engineering, pp.187-193, 2010. 3
- 5.5) 日本建築学会環境工学委員会 環境振動運営委員会：環境振動研究のあゆみ（Ⅱ）委員会活動報告 1996 年～2010 年，平成 24 年 1 月
- 5.6) ISO 2631 : Guide for the evaluation of human exposure to whole body vibration,1974
- 5.7) ISO 2631-1 : Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements, 1985
- 5.8) ISO 2631-2 : Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings(1 to 80Hz), 1989
- 5.9) ISO 2631-1 : Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements, 1997
- 5.10) 国立研究開発法人建築研究所の強震観測：<http://smo.kenken.go.jp/ja>
- 5.11) 松本瓦平，大西功祐：乗り物酔い評価のための計測および解析方法の検討，日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集（7），pp.239-240，2005 年 9 月
- 5.12) 本間元康：地震後に生じる心理ストレスと身体の揺れ，地域と職場で支える被災地支援－心理学にできること，第Ⅱ部 第 4 章，pp.52-65，2016 年 6 月
- 5.13) 酒井慎一，平田直：首都圏地震観測網の設置計画，地震研究所彙報，Vol.84，pp.57-69，2009
- 5.14) 田村和夫，金子美香，北村春幸，斉藤大樹：2011 年東北地方太平洋沖地震における東京の高層住宅での揺れと室内被害および対応行動に関するアンケート調査，日本建築学会技術報告集，第 18 巻，第 39 号，pp.453-458，2012 年 6 月
- 5.15) 肥田剛典，永野正行：アンケート調査と強震記録に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震時における超高層集合住宅の室内被害－不安度と行動難度および家具の転倒率の検討－，日本建築学会構造系論文集，Vol. 77，No. 677，pp.1065-1072，2012 年 7 月
- 5.16) 肥田剛典，永野正行：東日本大震災後の超高層集合住宅のアンケート調査による室内被害と強震記録との関係から推定される建物応答，日本建築学会構造系論文集，Vol.78，No.683，pp.51-60，2013 年 1 月

第6章 結論

1995 年兵庫県南部地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震により、大震災を二度受けた日本列島は、南海トラフを震源とする巨大海溝型地震の発生の危険性と合わせて、首都圏などの都市域での直下地震のリスクも高まっており、建物の耐震性能に対するニーズは、人命の安全確保から、地震後の建物の機能維持へと要求性能が変わりつつある。さらに大地震後も建物機能を維持しながら事業継続を続けることが社会全体の防災減災のために求められている中で、構造被害の軽減だけでなく建物の機能維持の観点から室内被害の軽減を含めた性能設計を進めるために、本論文では、以下の 2 つの課題について、定量的かつ実践的な情報を提供することを目的とした。

- (1) 地震後の建物の機能維持を向上させるために、構造躯体－非構造部材－建築設備－家具什器の相互干渉によって生じる地震時の室内被害のメカニズムを実験結果や被害調査結果より示し、地震後にも機能維持できる室内空間を設計するための事項を明らかにする。
- (2) 地震後の建物の機能維持を向上させるために、地震時の室内にいる居住者の安全性や快適性を保つ上で必要となるリアルタイムに提供できる地震に関する情報を整理し、減災に資する情報量を提供するための事項を明らかにする。

上記の内容は、第 2 章から第 5 章にわたって詳述されており、2 章では気象庁の震度階による室内被災度評価を、3 章では実大規模の振動実験に基づく非構造部材－建築設備－家具什器の連成による室内被害を、4 章では実際に被災した建物の被災から復旧過程を追った室内被害による建物機能損失を、そして 5 章では巨大地震による建物の揺れが人に与える影響をそれぞれ論じた。本研究から得られた主たる知見は以下の通りである。

防災指標に基づく室内被度評価

気象庁では観測された地震の強さを震度階により表し、防災指標として情報発信している。そこで気象庁震度について、建物の室内被害を評価する目的で活用する場合を想定し、建物内で観測された地震記録より考察を行った。

気象庁の計測震度は地表面で観測された加速度波形にフィルタ処理等により算出される値であり、震度階はその値に対する建物や人、室内の応答状況から被災程度を区分したものである。そのため震度は基本的には地表面での記録に対して適用される考え方である。しかし室内被害を考える場合には、建物の上層階と下層階の揺れの違いが大きい場合には、それぞれの階での揺れの強さで震度階を考える必要がある。そこで、既往研究で得られている加速度、速度による計測震度の回帰式について、建物の一次固有周期が 0.6～3.5 秒の範囲にある複数の建物での観測記録に適用したところ、既往の回帰式と同程度のばらつきのレベルで評価できることが解った。

また建物最下階の観測記録に対する上層階の観測記録の応答増幅について、最大応答加速度、最大応答速度、計測震度により検討を行ない、加速度、速度は下層階の値に対する応答倍率で、計測震度については下層階の値に対する応答増分での評価できることがわかった。またそれぞれの物理量の応答増幅の回帰式を求めたところ、計測震度の増分形がばらつきも小さく、決定係数の値も高くなり、建物下層階の記録から上層階の応答状態の推定に計測震度が活用できると考えられる。

気象庁が 2007 年より運用を開始した緊急地震速報を建物内の減災システムとしてより効果的に使うために、上層階の震度は最下階の計測震度に対して震度増分を足し合わせることで簡単に実装できること、また震度増分の予測式を応答スペクトル法により提案した。提案した予測式は観測記録から求めた震度増分の回帰式よりも安全側に評価していることを確認した。さらに、緊急地震速報の震源情報から長周期地震動レベルを予測する機能、および予測した長周期地震動レベルから高層建物の応答を予測する機能を提案し、超高層建物での室内被害評価の高精度化による減災システムの可能性を示した。

大規模実験に基づく室内被災度

建物の室内空間を実大規模でモデル化した振動実験の結果から、非構造部材、建築設備、家具什器の応答が室内被害に与える影響について検討を行った。

非構造部材や設備機器をモデル化した実験研究は数多くあるが、実験上の制約から要素実験である場合が多い。そこで平面寸法 18.9m×9m、階高 3.8m（天井高 2.4m）の鉄骨フレームからなる実験室を作成し、実験室内にオフィスビルの用途を想定した非構造部材、建築設備、消防設備、家具什器を配置した振動実験を行った。また室内被害の包括的なデータを取得するために、実験室は 31 階の高層建物の揺れと 4 階の低層建物の揺れを再現した。

高層モデルの実験では、上層階 27 階の揺れとして最大応答加速度約 270(cm/s²)、最大速度約 170 (cm/s)、計測震度 5.5（震度 6 弱相当）の揺れを最大で与えたが、システム天井の鋼製下地の振れ止め、家具の転倒防止、コピー機の移動防止などの対策を行えば、天井面の損傷や家具什器の移動・転倒は抑えられ、室内被害を軽減することを確認した。また転倒防止対策を行わなかった家具は転倒し、既往の転倒限界加速度の式と比較すると整合的な結果であることを確認した。計測震度の値による震度階は震度 6 弱相当であるが、ビデオ映像、実験後の室内被害の観察から震度 6 強相当の被害であり、床応答加速度を用いた計測震度による震度階であっても高層建物の室内被害を過小評価する可能性がわかった。

低層モデルの実験では、上層階 3 階の揺れとして最大応答加速度約 1200(cm/s²)、最大速度約 130 (cm/s)、計測震度 6.8（震度 7 相当）の揺れを最大で与えたところ、転倒防止対策などの設計値を上回る外力により、対策を施した家具什器でも移動・転倒し、震度 7 相当の室内被害が発生した。低層建物の場合は床応答加速度を用いた計測震度による評価で十分といえる。

システム天井はラインタイプとグリッドタイプをモデル化し、低層モデルの実験のシステム天井は鋼製下地の振れ止めに撤去したが、JMA 神戸 25%入力（震度 5 強、稀な地震レベル）までは天井ボードの落下等なく機能維持した。さらに JMA 神戸 50%入力（震度 6 弱）、床応答加速度 1000(cm/s²)までは天井ボードの落下等の機能損失は発生しなかった。JMA 神戸 75%入力（震度 6 強）の入力の場合にはボードの落下、鋼製下地の損傷など重損レベルの被害が発生したが、グリッド天井では、ボードの落下はあったものの下地の損傷は小さく、軽微～中損レベルの被害に留まり、ライン天井よりも耐震性能が高いことがわかった。

高層モデルから低層モデルまでの複数の実験結果により、既往研究の家具の転倒限界曲線について、実験結果との整合性を確認できた。また書棚等の重量物を収納する家具は、転倒対策が設計震度まで機能した場合でも収納物の飛び出しが発生することがある。人の安全確保の面からは、

被害の想定事象として取り扱う必要がある。また実験中の設備の地震時の機能維持を検討するために、振動実験中であっても建築設備は稼働した状態で、消防設備のスプリンクラーも水を注水加圧した状態で実験を行った。実験後の確認では全ての機器の稼働状況は問題なく、機器本体に最大 2G を超える加速度が作用しても機能維持された。

一連の振動実験により、構造－非構造－建築設備－家具・什器の相互干渉による重損な室内被害の発生は低層モデルの JMA 神戸 75% 入力の場合のみであったが、被害を軽減するためには構造躯体の床応答に対して応答する建築設備、家具等がどのような外力として非構造部材に作用するかを評価した設計が必要になる。

実被害データに基づく室内被害と建物機能損失

2011 年東北地方太平洋沖地震で被災した低層 RC 建物の被害状況から復旧工事の過程までの分析に基づいて、構造被害は軽微であったものの非構造部材・建築設備の被害により発生した建物の機能損失について、その要因を検討するとともに、既存の地震リスク評価による損失評価手法の妥当性を検討した。

対象建物は「官庁施設の総合耐震計画基準」を参考に、構造体、建築非構造部材、建築設備のそれぞれで大地震に対する耐震安全性を考慮して設計された。設定した耐震安全性に対するそれぞれの部位の性能は、必要保有水平耐力時の変形性能を照査することで確保されている。地震荷重に対する設計は、構造体では必要保有水平耐力を割り増した値に対して保有水平耐力を確保すること、および非構造部材・建築設備については重要度に応じた設計震度が設定されている。今回の地震では、EW 成分については極めて稀な地震動を上回るレベルの地震記録が近傍で観測されており、必要保有水平耐力を上回る入力が入った可能性がある。そのため保有水平耐力には十分余裕があるものの、変形については余裕が無かったために非構造部材や建築設備の被害が発生したと考えられる。建物の地震後の機能確保の面から設計するには層間変形を抑えることが重要であり、例えば構造体の設計では、必要保有水平耐力を割り増した値を、機能確保の面から求められる必要保有水平耐力と読み換えて、変形に対しても検討する必要性が指摘される。

非構造部材の天井の被害は、天井内の設備機器の落下による直接的な損傷に加えて、設備配管の破損による漏水が天井材に水損を与えたことを報告した。対象建物の地震応答解析結果より、天井内に設置されている設備機器と天井材との相互干渉で発生する損傷の要因は、設備機器と天井との揺れの違いによる相対変位であり、吊り式の設備機器の耐震設計では、設計用震度に対する検討だけでなく、振動特性を考慮した設計が必要であることが明らかになった。特に建物の固有周期と設備機器の固有周期が近い場合には、設備機器の共振により被害が増大する。

また、既存の地震リスク評価手法による建物の損失率を、地震観測記録を用いた対象建物の応答解析結果を参照して評価した。天井の損失評価を加速度依存の非構造部材の被害確率曲線から算出すると、復旧工事費用からみた損失率と既存の評価法を用いた損失率は整合的であることを確認した。ただし評価に用いた被害確率曲線はアメリカの評価機関のものを流用しており、日本の建物のリスク評価に用いるための被害関数の作成が求められる。

人の運動生理機能に対する建物の揺れの影響

2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した長周期地震動により長時間応答した高層建物の揺れ、および、非常に多く発生した余震による揺れが人の運動生理機能に与える影響を評価するために、自動車や船などの乗り物の中での全身振動被曝による運動生理機能への影響を評価する ISO 2631-1 の手法による振動特性評価を行った。

高層建物の地震時の揺れに ISO 2631-1 の手法を適用したところ、船酔いによる嘔吐率等の運動生理機能の不調を示す指数は非常に小さな値となった。東日本大震災の後に建物居住者に対して実施された揺れに対するアンケート結果と比較すると、ISO 2631-1 による評価結果は人への影響を過小評価している。そこで ISO 2631-1 の船酔い指標の計算において、上下方向の加速度だけでなく水平方向の加速度を考慮した周波数荷重振動加速度実効値を求めることにより、嘔吐率のオーダーがアンケート結果と整合的になることが判った。ただし、水平方向加速度に周波数荷重（フィルタ）をかけて処理することの妥当性の検証が必要である。

24 時間連続観測による 2 日間にわたる地震記録を用いて、東日本大震災後に多発した余震が人に与える影響を ISO 2631-1 による快適性評価、船酔い評価による検討を行った。その結果、本震時の強震時に被曝した振動量が、余震時の人の運動生理機能に与える影響が一番大きいことを確認した。また 24 時間連続記録を用いた建物の地震応答解析結果に適用した結果、10 階以下の低層建物の場合は地表面での観測記録と同レベルの評価値となること、また 20 階以上の高層建物では相対的に地表面よりも不快度、および嘔吐率が上がることが判った。

以上、本研究では、地震防災・減災の面から常に求められる、地震時の建物の機能維持について、室内被害の観点に焦点をあて、被害を軽減させるための非構造部材、建築設備、家具什器の設計に必要となる事項を明らかにした。また、建物利用者に地震時から地震後の安全・安心を提供し建物機能維持をサポートするために、リアルタイムに入手できる地震情報の提供方法について、整理した。

建物利用者へのリアルタイムな情報提供を行い減災に資するためには、一つは建物内での震度を軸とした室内被害程度の情報の活用を提案する。しかし震度は最大値による被害程度の指標であり、それだけでは人の生理機能の変化や心理的不安への対策を講じる情報にはならない。これらを満足する包括的な指標の構築には ISO 2631-1 の指標のように揺れの継続時間（振動被曝時間）を考慮することが必要である。またこの様な情報提供を実現するためには、建物毎で地震観測を行うことが必要と言える。

謝辞

筆者は2010年10月から2013年3月まで、防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターにて、研究員としてE-ディフェンスを用いた耐震実験研究に従事致しました。本論文は防災科学技術研究所において取り組んだ研究開発、および竹中工務店技術研究所での研究開発を、京都大学大学院工学研究科博士後期課程の学生として、とりまとめたものです。本研究を進めるにあたり、多くの方々の御指導、御支援を頂きました。

中島正愛先生（京都大学防災研究所教授）には多大なるご指導ご鞭撻を頂きました。大学でのご指導のみならず、研究当時の兵庫耐震工学研究センター所長の立場からも防災科学技術研究所の研究員としての御指導、御協力を頂きました。防災減災の切り口で本論文をまとめることができましたのも先生のご指導ご鞭撻の賜物であり、心より感謝申し上げます。

大崎純先生（京都大学教授）ならびに松島信一先生（京都大学防災研究所教授）には、本論文の審査にあたり、貴重なご意見とご助言を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

筆者が京都大学工学部および工学研究科 修士課程 土木工学専攻に在学中にご指導頂いた土岐憲三先生（京都大学名誉教授）、佐藤忠信先生（京都大学名誉教授）、清野純史先生（京都大学教授）には研究者としての礎を教えて頂きました。大学院修了後も、先生方のご講演や論文に触れるたびに心構えを新たにしております。

E-ディフェンスでの大規模振動実験では、首都直下地震防災・減災特別プロジェクトに参画する機会を頂き、梶原浩一氏（兵庫耐震工学研究所センター長）、井上貴仁氏（兵庫耐震工学研究所副センター長）、佐藤栄児氏（兵庫耐震工学研究所主任研究員）には大変お世話になりました。また試験体の設計から製作、実験実施に渡って長江拓也先生（名古屋大学准教授、元兵庫耐震工学研究所主任研究員）、福山國夫氏（兵庫耐震工学研究所客員研究員）には様々な議論を頂き、無事に実験を遂行することができました。ここに深く感謝の意を表します。また震動台実験の遂行には兵庫耐震工学研究センターの職員の皆様をはじめとする多くの方々にご支援を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

人体振動評価については、前田節雄先生（近畿大学教授）に多大なご指導を頂きました。医学から機械工学に渡る様々な研究領域から振動を考える機会を頂きましたこと、御礼申し上げます。

高層建物向けの緊急地震速報システムの研究につきましては、竹中工務店技術研究所地震工学部の小林喜久二氏、恒川裕史氏、大淵正博氏のご尽力、ご助言を頂きました。地震の揺れに対する人の感性については、竹中工務店技術研究所地震工学部の山本雅史氏にご助言を頂きました。また地震による建物被害損失については、竹中工務店エンジニアリング本部の芝崎良美氏にご助言を頂きました。ここに記して深く感謝致します。また本論文は通常業務を続けながら作成致しました。竹中工務店技術研究所地震工学部の皆様には様々な便宜を図って頂きました。

倉田真宏先生（京都大学防災研究所准教授）をはじめとする中島・倉田研究室の方々には、私を快く受け入れて頂き、大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

最後に、私が大学院修士課程を修了するまで育ててくれた両親、および博士後期課程の生活を支えてくれた妻と娘に、心より感謝いたします。

吉澤 睦博