

上町断層帯の予測地震動に対する超高層建物の平面骨組モデルによる解析

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS BY PLANE FRAME MODEL OF HIGH-RISE BUILDINGS SUBJECTED TO GROUND MOTIONS PREDICTED FOR UEMACHI FAULT

蘇 鐘鈺 — * 1 佐藤浩太郎 — * 1
川辺秀憲 — * 2 吹田啓一郎 — * 3
林 康裕 — * 4 佐藤篤司 — * 5

Zhongyu SU — * 1 Kotaro SATO — * 1
Hidenori KAWABE — * 2 Keiichiro SUITA — * 3
Yasuhiro HAYASHI — * 4 Atsushi SATO — * 5

キーワード：
超高層建物, 上町断層帯, 最大層間変形, 平面骨組, 地震応答解析

Keywords:
High-rise building, Uemachi Faults, Maximum story drift, Plane frame, Seismic response analysis

Seismic response of two high-rise buildings, 75m and 150m height, subjected to ground motions predicted for Uemachi Fault was investigated by numerical analysis to estimate plastic deformation demand on steel structural members. From the result, the inelastic response of the structure under Uemachi Fault was larger than the response of conventional ground motions. The maximum ductility factor and cumulative plastic rotation of the story and the plastic hinges at beam ends are obtained. These values are same or more than maximum response obtained from predicted long-period ground motions for Tonankai earthquake.

1. はじめに

上町断層帯を震源とする地震による大阪平野周辺の地震動が予測され, 長周期パルス波の特徴的な特性を有することが指摘されている。最近の予測によれば, 予測手法や地点により地震動レベルや周波数特性のばらつきは大きい, 予測波の中には固有周期2秒程度以上を中心に現行の設計用地震荷重を上回る場合があり, 建築物の応答や損傷を精度よく把握する取り組みが重要であると指摘されている¹⁾。

本研究では上町断層帯地震の予測地震動を受ける長周期建物の応答の一例として, 仮想の超高層建物を模したモデルを対象に動的応答解析を行い, 層レベルから部材レベルまでの応答や損傷を検討する。高さの異なる2つの建物の骨組モデルを使い, 3次元差分法とハイブリッド法²⁾により計算した2種類の予測地震動を用いて, 層レベルの応答について検討する。次に, ハイブリッド法による地震動を用いた応答解析から, 個々の部材レベルの応答の大きさと履歴挙動, 骨組の損傷分布などを詳細に分析する。また, 既往の研究で実施された南海地震の予測地震動や従来観測波による応答解析結果と比較し³⁾, 地震動特性の相違が部材レベルの応答や損傷に及ぼす影響についても考察する。

2. 応答解析手法

2.1 超高層建物の対象モデル

検討の対象として, 図1に示す高さの異なる2棟の超高層建築物のモデルを作成した³⁾。高層評定の評価シートなどから1964～1979年に建設された高さ60m以上の鋼構造による超高層建物107棟

の建設諸元を参考にし, 外周構面を純ラーメン構造, コアを含む内部構面を軸ブレース付ラーメン構造とした。高さのひとつは当時の多数を代表する規模として75mとし, さらにこれより固有周期が長いモデルを高さ150mとした。75mモデルの設計用地震波は当時関西で多く採用された例に倣って, El Centro NS (1940), Taft EW (1952), Osaka205 EW (1963)の3波を使い, 入力加速度はレベル1で200gal, レベル2で300galを採用した。また150mモデルでは, 当時の関西に実例が少ないので, 主に関東で多く採用された例に倣ってEl Centro NS (1940), Taft EW (1952), Tokyo101 NS (1956)の3波を使い, 入力加速度はレベル1で250gal, レベル2で400galとした。

設計クライテリアは, レベル1で弾性かつ層間変形角 R を0.005rad以下, レベル2では R を0.01rad以下, 柱とブレースは弾性にとどめて梁だけを塑性化させ, 塑性率は2.0以下とした。表1に主要断面を示す。鋼種はSM50を主体に一部にSS41を使用した。固有周期は75mモデルが1次2.34s, 2次0.74s, 150mモデルは1次4.58s, 2次1.39sである。

2.2 解析モデル

解析モデルは図1の各部材を線要素としてモデル化し, 要素端部に設けた塑性ヒンジによって部材の塑性化を表した平面骨組である。履歴特性はバイリニア型で歪硬化係数は0.02としている。また, 接合部パネルは考慮せず, スラブの合成梁効果は梁の曲げ剛性に考慮している。鋼材の座屈や破断などの破壊による劣化を考えず, 安定した履歴特性を有することを前提に解析モデルを設定している。減衰は初期剛性比例型で減衰定数を2%とし, 解析には幾何剛性行列(初

¹⁾ 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-2 棟)
²⁾ 京都大学原子炉実験所 助教・博士 (工学)
³⁾ 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博士 (工学)
⁴⁾ 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士 (工学)
⁵⁾ 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 助教・博士 (工学)

¹⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ.
²⁾ Assistant Prof., Research Reactor Institute, Kyoto Univ., Dr. Eng.
³⁾ Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.
⁴⁾ Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.
⁵⁾ Assistant Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.

期応力行列)を考慮し、変形後の幾何状態に対して力の釣合を考慮することで幾何非線形を考慮した弾塑性平面骨組解析プログラム CLAP⁴⁾を用いた。

レベル1地震波の予備応答解析で得られた層せん断力分布による水平力で静的増分解析を行い、得られた各層の層せん断力 Q と層間変形角 R の関係を図2に示す。図中には各層の弾性限界と、設計用地震波で最も応答が大きいレベル1、レベル2の応答を重ねて示す。レベル1の応答は全て R が0.005rad以下で弾性範囲に収まる。レベル2の応答では R が0.01radよりも十分に小さく、中間層の梁が降伏して柱とブレースは弾性にとどまっている。初期の設計では地震動のレベルが現在と比較して低い場合もあるが、クライテリアに対する余裕度が十分に大きい場合もあり、本モデルでは図2に示す程度の余裕のある設計となっている。

2.3 予測地震動

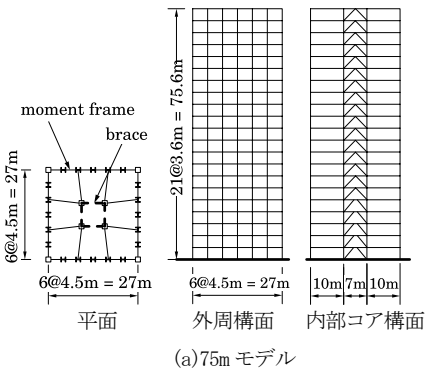
上町断層帯地震の予測地震動として、川辺・釜江による予測地震動(川辺波)を用いる²⁾。震源モデルの異なる3種類の予測地震動

のうち、アスペリティの面積の最も大きいCase011(文献2)による。桜川撓曲と住之江撓曲を含む)を用いる。検討に用いた地震動を表2に一覧にし、また予測地点を図3に示す。上町断層帯地震の予測手法は2種類あり、一つは3次元有限差分法、もう一つはハイブリッド法で、接続周期を1.25sとして長周期地震動と短周期地震動を足し合わせたものである。25地点で作成された予測波の中から、Case011の擬似速度応答スペクトルを参照して検討モデルの1次固有周期における応答が特に大きい、FKS、OSK003、JMAE8Fの3地点を選択した。いずれも入力レベルの高いEW方向の成分を用いた。

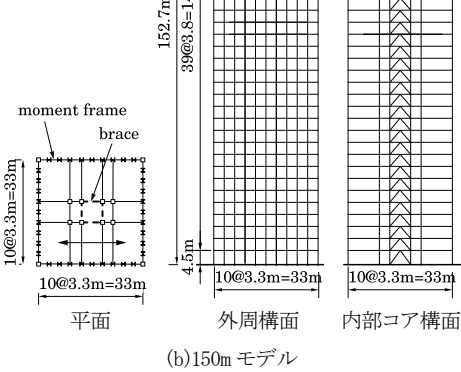
比較のために用いた東南海地震による予測地震動(鈴木・岩田波)は、Suzuki et al.⁵⁾により経験的グリーン関数法で予測されたものである。大阪府周辺の64地点の予測波から、検討モデルの応答が特に大きいOSKS02(此花)、応答が大きくてしかも上町断層帯地震の予測地点のひとつと同一であるFKS(福島)の2点を選択した。従来観測波はEl Centro NS(1940)、Taft EW(1952)の観測波を最大速度50cm/sに設定したものである。

表1 検討モデルの主要部材断面

75m モデル	柱	H-502 × 470 × 20 × 25 ~ H-522 × 470 × 20 × 35 □ -550 × 550 × 16 ~ □ -650 × 650 × 95
	外周梁	H-650 × 250 × 12 × 19
	コア梁	H-650 × 200 × 12 × 19 ~ H-650 × 250 × 16 × 28
150m モデル	柱	H-532 × 490 × 40 × 40 ~ H-562 × 490 × 40 × 55 □ -650 × 650 × 16 ~ □ -650 × 650 × 65
	外周梁	H-800 × 200 × 12 × 19 ~ H-800 × 250 × 12 × 22
	コア梁	H-800 × 200 × 12 × 19 ~ H-800 × 300 × 14 × 28



(a)75m モデル



(b)150m モデル

図1 検討モデルの構造骨組

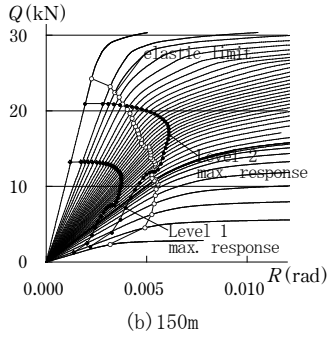
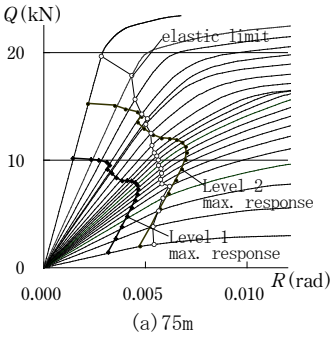


図2 骨組モデルの増分解析結果

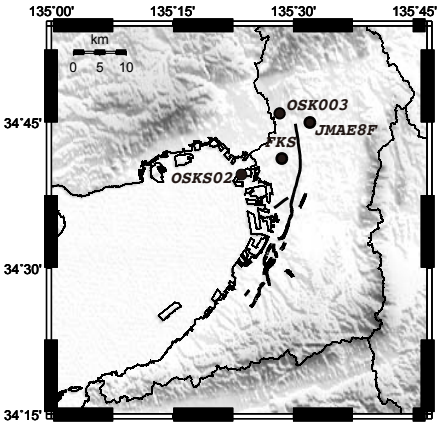


図3 検討に用いた地震動の予測地点

表2 検討に用いた地震動

種類		地点（方向）	最大加速度	最大速度
			(cm/s ²)	(cm/s)
上町断層帯地震 予測波 （川辺波）	差分法	FKS (EW)	590	179
		OSK003 (EW)	439	170
		JMAE8F (EW)	299	103
	ハイブリッド法	FKS (EW)	805	165
		OSK003 (EW)	1139	177
		JMAE8F (EW)	1552	162
東南海地震予測波 （鈴木・岩田波）		FKS (NS)	156	48
		OSKS02 (EW)	120	64
従来観測波		El Centro (NS)	511	50
		Taft (EW)	497	50

3. 差分法とハイブリッド法の比較

上町断層帯地震による予測地震動について、差分法とハイブリッド法の予測手法による違いを FKS, JMAE8F の 2 地点を用いて、75m, 150m のモデルによる層間変形角の最大応答により比較する。図 4 は層間変形角の高さ方向の分布を示す。図中の○は差分法で、●はハイブリッド法である。図 4(a), (b) の 75m モデルを見ると、FKS は差分法の応答が大きく、JMAE8F ではハイブリッド法の応答が大きい。図 4(c), (d) の 150m モデルを見ると、両者の応答はほぼ等しいか、或いはハイブリッド法の応答がやや大きい。図 5 は図 4 の比較に用

いた入力地震動の擬似速度応答スペクトルを示す。図中の縦線は各モデルの固有周期を示し、破線は 75m モデル、実線は 150m モデルを表す。ハイブリッド法における短周期成分の接続周期は 1.25s であるため、1 次固有周期における応答は予測地点やモデルによらず、ハイブリッド法と差分法はほぼ同じである。予測法による応答の違いは 2 次モードによる応答の違いが現れていると見られる。75m モデルの 2 次固有周期とそれよりやや長周期の応答を見ると、FKS では差分法が大きく、JMAE8F ではハイブリッド法が大きい。同様に、150m モデルの 2 次固有周期の応答を見ると、差分法とハイブリッド

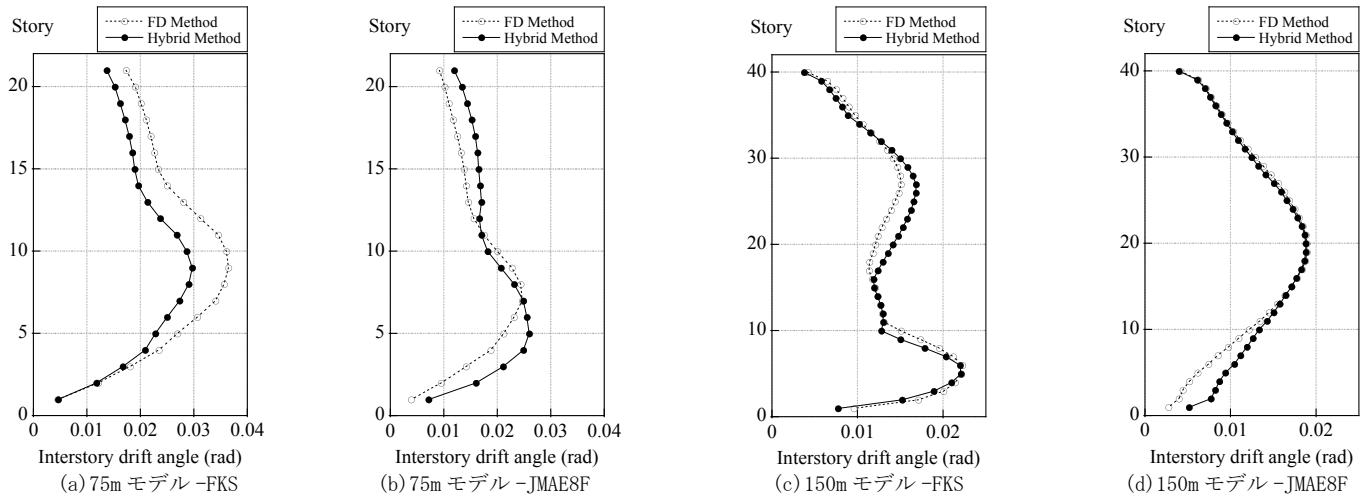


図 4 予測法の異なる地震動による最大層間変形角の比較

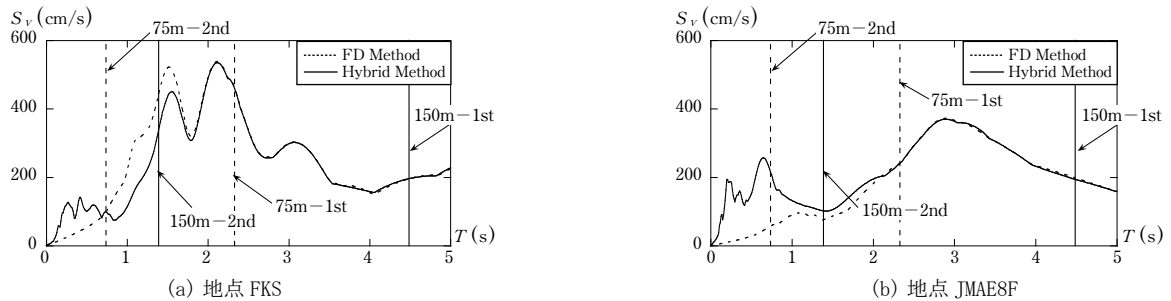


図 5 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 $h = 0.05$)

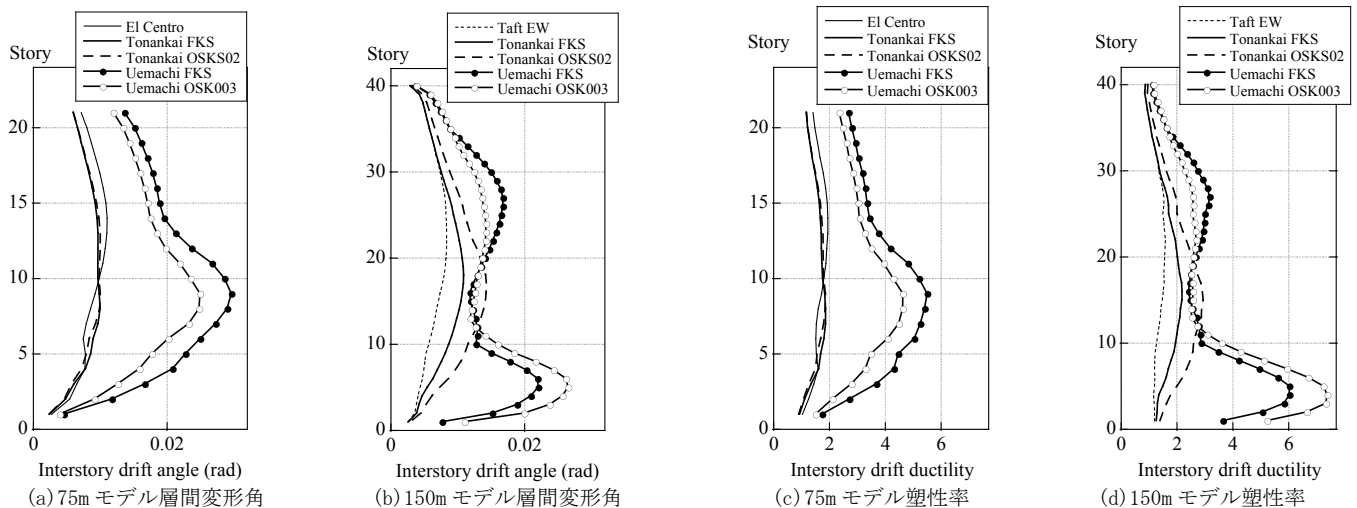


図 6 特性の異なる地震による最大応答の比較

法がほぼ等しい。全体的に見ると、1次モードによる応答はいずれの予測法でもほぼ同じであるが、2次モードによる応答の違いが影響して、多少の差が生じている。なお、以降の検討では、より広い周波数成分を含むハイブリッド法による地震動を用いる。

4. 地震動の特性の違いによる影響

長周期成分の大きさと継続時間の長さの2点において特性が異なる上町断層帯地震と東南海地震の予測地震動、従来観測波の3種類の地震動による応答を比較する。比較する地震動は、上町断層帯地震のFKS, OSK003の2波と、表2に示す東南海地震の2波、従来観測波2波のうちいずれか1波（75mモデルはEl Centro NS, 150mモデルはTaft EW）の5波である。

図6に層間変形角と層の塑性率の最大応答を示す。細い実線、破線は従来観測波の応答で、その最大値は層間変形角が0.01rad、塑性率は2.0程度であり、元の設計のクライテリアを満足する程度の応答に収まっている。太い実線、破線は東南海地震の応答で、75mモデルでは従来観測波とあまり変わらず、150mモデルでは従来観測波より1.5倍ほど大きくなっている。これに対して上町断層帯地震の応答は75m, 150mいずれのモデルでも従来観測波の応答より3倍ほど大きい。図6の比較に用いた入力地震動の擬似速度応答スペクトルを図7に示す。図中の縦線は各モデルの固有周期を示し、破線は75mモデル、実線は150mモデルを表す。75mモデルでは、従来観測波と

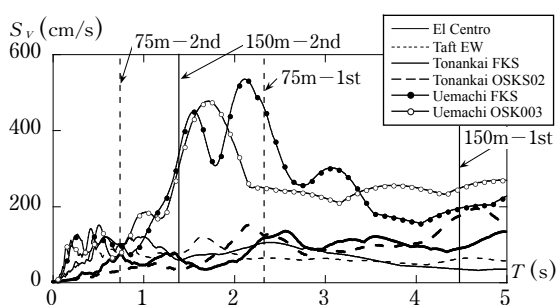


図7 擬似速度応答スペクトル（減衰定数 $h=0.05$ ）

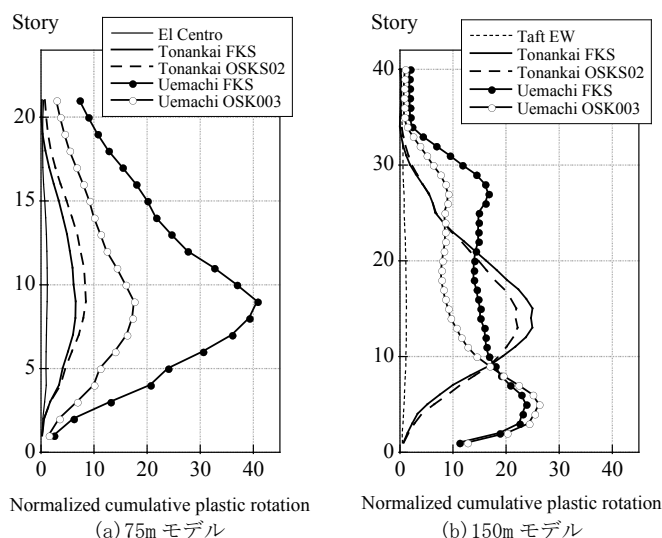


図8 特性の異なる地震動による累積塑性変形倍率の比較

東南海地震の応答がほぼ同じであるが、1次固有周期で、上町断層帯地震の応答は従来観測波と東南海地震より3倍以上大きい。150mモデルでは、1次固有周期で、東南海地震の応答は従来観測波よりやや大きくなり、2次固有周期では、両者の応答がほぼ同じである。これに対して上町断層帯地震の応答は、いずれの周期でも従来観測波と東南海地震よりもかなり大きい。これらの影響が図6に表れていると考えられる。

図8に層の累積塑性変形倍率を比較して示す。75mモデルでは、いずれの地震動でも5～10層あたりが最大となり、図6に示される層間変形角および塑性率応答の分布がそのまま反映された形となっている。継続時間の長い東南海地震では、最大応答が小さくても累積塑性変形倍率が大きくなると予想されるが、それより上町断層帯地震の方が大きい結果となっている。これは上町断層帯地震での応答が格段に大きいことにより、繰返し数が東南海地震より少なくてもかなり大きな累積値になったと考えられる。一方、150mモデルでは、従来観測波と比較して、上町断層帯地震、東南海地震による2つの予測地震動ともに累積塑性変形倍率が大きく、両者の差はわずかである。ただし、いずれも最大値は25程度であり、75mモデルほどではない。上町断層帯地震では応答の最大値が大きいことにより、東南海地震では繰返し数が多いことにより、それぞれ従来観測波よりも相当に大きい値になったと考えられる。

ここで示した地点の内、FKSは上町断層帯地震と東南海地震に共通する地点であり、サイトの地盤特性は同じであるが、それでも応答特性はかなり異なっていて、これは震源域からサイトの基盤に到達する地震動の特性の違いが反映されていると考えられる。

図9に、FKSにおける応答が最大となった層の層間変形角の時刻歴を示す。上町断層帯地震では、最初の1波で往復の層間変形角が0.03radを超える大きな繰返し変形を経験し、75mモデル、150mモデルのいずれも0.01rad以上の残留層間変形角を示している。また、その後も1分以上にわたり、大きな振幅による応答が残っている。75mモデルでは最大変形の大きさと、1分ほど続く繰返しにより図8に示す大きな累積塑性変形倍率に至ったと考えられる。また、図

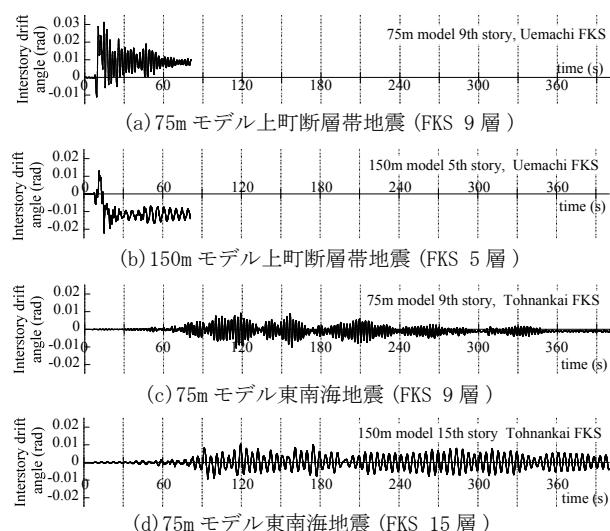


図9 層間変形角が最大となる層の応答時刻歴

9(c), (d) の東南海地震による時刻歴を見ると、いずれのモデルも5分以上の長時間に亘って大きな応答を繰り返しており、これが大きな累積塑性変形倍率になる理由と考えられる。

これらの結果を見ると、上町断層帯地震は最大応答が大きいことに加えて、累積塑性変形倍率も相当に大きく、その大きさは東南海地震と同等以上の結果となっている。

5. 部材レベルの応答

前節までの上町断層帯地震の予測波による応答解析で層レベルの応答が大きい層について、部材レベルの応答を分析する。対象とするのは梁部材端部における挙動で、曲げモーメント-回転角関係から得られる塑性率および累積塑性変形倍率を調べる。図8に示す層の累積塑性変形倍率が最も大きい層を中心とする上下3層分について、各層に含まれる外周構面にある梁端部回転角に関する塑性率を図10に示し、累積塑性変形倍率を図11に示す。両図の横軸は梁端の位置を順に並べたもので、縦軸はそれぞれの応答値である。いずれも構面の中央に近いスパンで応答が大きく、両端のスパンでは小さくなる傾向がある。両図の(a)は層の累積塑性変形倍率が最も大きかった75mモデルの上町断層帯地震FKSの結果で、塑性率は9以上、累積塑性変形倍率は最大80をやや超える程度に達している。両図の(b), (c)は150mモデルの結果である。両図の(b)は上町断層帯地震OSK003で塑性率は最大9以上と大きい、累積塑性変形倍率は30程度である。一方、両図の(c)は東南海地震FKSで塑性率は3程度であるが、累積塑性変形倍率は100近くに達しており、上町断層帯地震と東南海地震の予測地震動の相違が顕著に表れている。

図10, 11に示した部材端の塑性率、累積塑性変形倍率と、対応する層の塑性率、累積塑性変形倍率の関係を図12に示す。図12(a)は塑性率を示していて、大局的に見れば梁の塑性率は層の塑性率と比

例関係にあり、梁の塑性率は層の塑性率を1〜2上回る程度となっている。地震動による違いを見ると上町断層帯地震は東南海地震よりも圧倒的に大きい結果となっている。図12(b)は累積塑性変形倍率を示している。層の値は20〜40の範囲にあるのに対して、梁の値は0〜100までの広範囲にばらついている。上町断層帯地震の場合は、75mモデルのFKSは層の値が30〜40に対して部材は30〜80と最大約2倍になり、150mモデルのOSK003は層の値が20〜30に対して部材もほぼ同じ15〜30の間にある。この2つのケースから見ると、ばらつきは大きいものの梁の累積塑性変形倍率は層の値の1〜2倍程度の関係である。一方、東南海地震の方では層の値が20〜25に対して梁の値は0〜100にばらついていて、両者の間の定量的な関係は見だしにくい。その理由は継続時間が長い中で、塑性領域での繰り返し数が梁によって異なるためと考えられる。

図13に、部材レベルの塑性率、累積塑性変形倍率がともに大きい例として、75mモデルの上町断層帯地震FKSによる応答から9層の梁端(図10(a), 図11(a)の梁端番号2, 5)の履歴と梁回転角の時刻歴を示す。履歴に見られる梁回転角の最大振幅は梁端5が大きく、累積塑性変形倍率は梁端2が33、梁端5が81で2.5倍ほどの差がある。図13(c), (d)の時刻歴から判るように最大振幅での繰り返しは高々2〜3回であるが、最大塑性率で決まる振幅が大きく、またそれより小さい振幅でもかなりの回数を繰り返すことから大きな累積塑性変形倍率となっている。図12(a)に示すように最大塑性率は7〜9程度あり、これは時刻歴が示すように応答初期に一方向へ大きな変位を経験したサイクルで発生しており、長周期パルス波の特性を有する上町断層帯地震の予測地震動の特徴である。また、その後続く繰り返し変形はこれほど大きな塑性率で受けることはない。

本解析で示した結果は、2棟の比較的初期の超高層を模した骨組を対象に、予測地震動の一部を使って実施したものに過ぎないが、そ

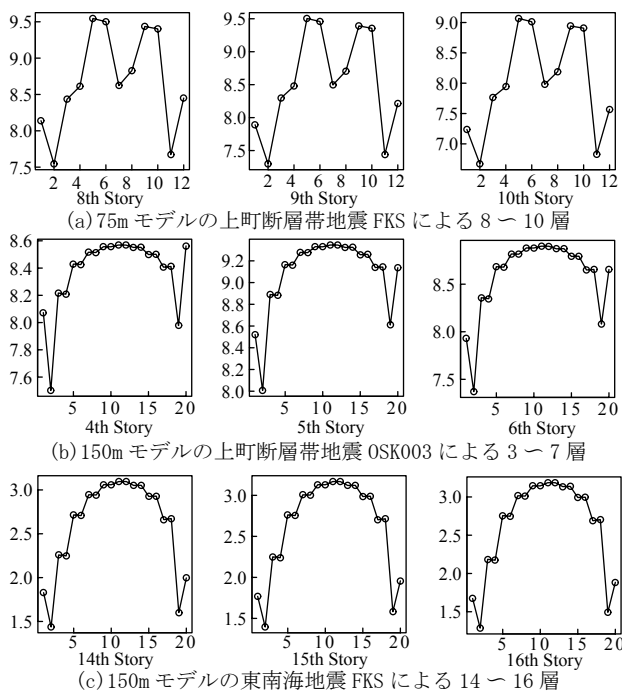


図10 外周構面にある梁端部回転角に関する塑性率の分布

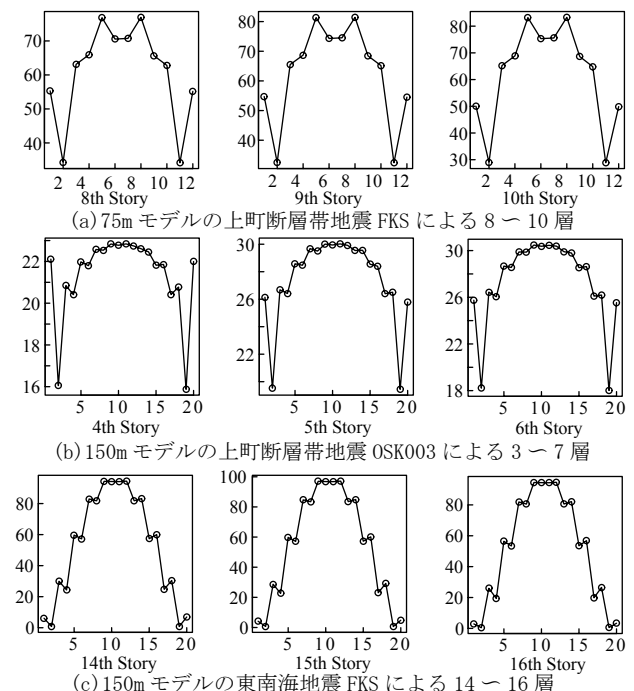
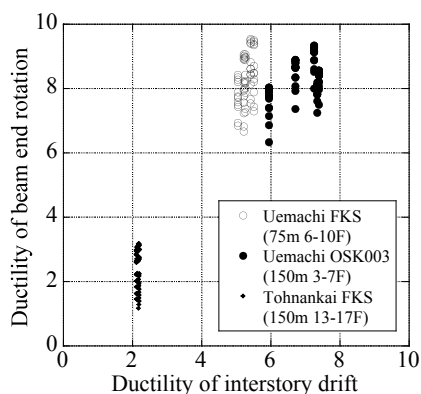
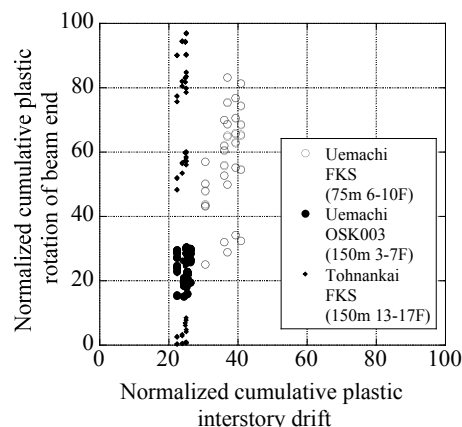


図11 外周構面にある梁端部回転角に関する累積塑性変形倍率の分布

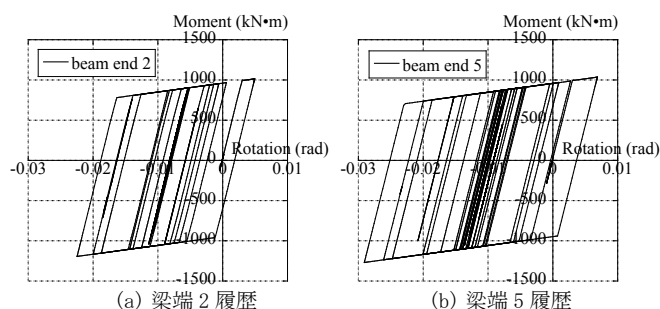


(a) 塑性率



(b) 累積塑性変形倍率

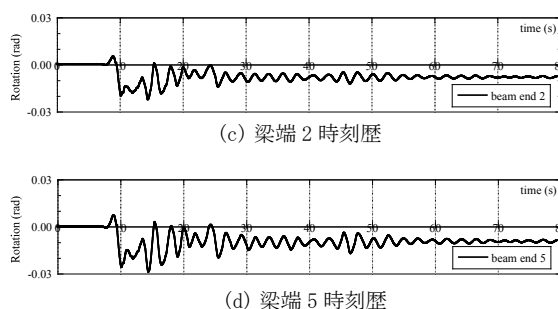
図 12 層レベルと部材レベルの応答の比較



(a) 梁端 2 履歴

(b) 梁端 5 履歴

図 13 梁端の履歴曲線 (75m モデル 9 層, 上町断層帯地震 FKS)



(c) 梁端 2 時刻歴

(d) 梁端 5 時刻歴

ここで予想される応答は現在の設計クライテリアと比較して遙かに大きな値である。超高層建物に使用される大断面部材の柱梁接合部が本解析で示されるような大振幅多数回繰返しを受けた場合の塑性変形能力については、定量的に検証する実験は極めて少ない。今後、実大実験などの手法で検証を進める必要がある。

6. まとめ

上町断層帯地震の予測地震動に対して、高さ 75m と 150m の超高層建物の検討モデルによる応答解析を行い、応答の特性と骨組の部材レベルにおける詳細な損傷を調べた。特定の予測波と建物モデルに限定され、地盤と建物の相互作用を考慮していない条件での結果であるが、本解析から得られた知見は以下の通りである。

①上町断層帯地震の差分法とハイブリッド法の予測地震動による応答の違いを最大層間変形角について比較した結果、全般的にほぼ同じ応答である。応答スペクトルを見ると、1 次固有周期ではほとんど同じであり、2 次固有周期の周辺で差が見られることにより、全体の応答にも若干の差が生じている。

②上町断層帯地震の予測地震動による応答解析の結果、層レベルの応答をみると、最大の塑性率は 8 程度、累積塑性変形倍率は 40 程度であった。また、部材レベルの梁端の最大塑性率は 9 以上、累積塑性変形倍率は 80 程度であり、従来の観測波に対する応答よりもかなり大きい。

③部材端の塑性変形履歴は、初期に長周期パルス波により一方向に大きな変形を経験し、その後も、しばらく大きな振幅の繰返しを

受ける。このような特徴的な挙動に対する骨組の塑性変形能力に関する検証が望まれる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金・基盤研究 (A) (No. 21246087, 多様な巨大地震動に対する超高層鋼構造骨組の塑性変形性能向上技術の開発, 研究代表者: 吹田啓一郎) の助成を受けた。骨組モデルの応答解析には、橋田勇生君 (当時, 京都大学大学院生) の協力を得た。これらの協力に対して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 林康裕, 森井雄史, 川辺秀憲: 予測地震動に対する建物応答と設計用地震荷重, 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会シンポジウム資料, pp. 25-34, 2009. 1.
- 2) 川辺秀憲, 釜江克宏: 上町断層帯の地震を想定した強震動予測, 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会シンポジウム資料, pp. 17-24, 2009. 1.
- 3) 吹田啓一郎, 北村有希子, 五藤友規, 岩田知孝, 釜江克宏: 高度成長期に建設された超高層建物の長周期地震動に対する応答特性 - 想定南海トラフ地震の関西地域における予測波を用いた検討 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 611 号, pp. 55-61, 2007. 1.
- 4) 小川厚治, 多田元英: 柱・梁接合部パネルの変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発, 第 17 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp. 79-84, 1994. 12.
- 5) W. Suzuki, T. Iwata, K. Asano, N. Yamada: Estimation of the source model for the foreshock of the 2004 off the Kii Peninsula earthquakes and strong ground motion simulation of the hypothetical Tonankai earthquake using the empirical Green's function method, Earth Planets Space, No. 57, pp. 345-350, 2005.

[2009 年 6 月 17 日原稿受理 2009 年 8 月 28 日採用決定]