

京都大学	博士 (工学)	氏名	明橋 弘樹
論文題目	弾塑性極限外乱法と制振システムを用いたレジリエント建築の設計法		

日本の都市部における高層建物は長周期長時間地震動やパルス性地震動を経験する可能性がある。幅広い特性を有する地震動に対して高層建物の安全性を確保するには、構造設計において入力地震動の不確実性を合理的に扱う必要がある。本論文は、弾塑性建築構造物に対する極限外乱法を構築し、大振幅レベル地震動を含む多種多様な性質とレベルの地震動に対してレジリエントな建築（レジリエント建築）を実現するダンパーの設計法を展開している。本論文の各章は、その内容に応じてI~IV部に大別している。各章の要旨を以下に示す。

第1章「序」では、本研究の背景と目的について述べた後、既往の研究の調査を行い、本論文との関係について論じている。さらに、本論文の構成と概要を示している。

第2~4章は極限的ダブルインパルス（DI）を受ける弾塑性多層建物に対する粘性ダンパー及び構造体とダンパーの最適設計法を扱っており、I部を構成している。

第2章では、断層近傍地震動の fling-step 入力を模擬した「極限的 DI」を受ける弾塑性多層建物モデルに対する粘性ダンパーの最適設計法を展開している。極限的 DI とは、入力エネルギーを最大化する時間間隔を有する DI を指し、第1層の層せん断力が0に等しい時刻に2つめのインパルスが入力する場合であることを明らかにしている。また、極限的 DI 及び記録地震動による1次モードへの入力エネルギーの等価性に基づく入力速度調整法を提案している。入力速度を調整した極限的 DI を用いることで、地震応答の上限値を低減する信頼性の高い粘性ダンパーの設計が効率的に得られることを示している。

第3章では、付加減衰分布の違いが多層建物の弾塑性応答に及ぼす影響を検討している。そこでは、Incremental Dynamic Analysis (IDA) の概念を極限的 DI へと拡張した Double Impulse Pushover (DIP) を提案している。また、1-3次モードのそれぞれに有効な伝達関数に基づくダンパー配置及び第2章で提案した極限的 DI に対するダンパー最適配置を、伝達関数、IDA 及び DIP により比較し、極限的 DI を用いたダンパー配置は幅広い振動数域で有効性が高く、弾性応答及び弾塑性応答を有効に低減することを示している。

第4章では、極限的 DI を受ける弾塑性多層構造物に対する剛性とダンパー減衰分布の数値感度解析に基づく同時最適化手法を提案している。入力レベルの設定が剛性と減衰分布に及ぼす影響を分析し、設計時入力レベルと塑性変形特性の関係を明らかにしている。

第5~6章は従来の地動加速度としての DI を等価水平外力へと変換した「極限的擬似 DI」に関する理論を扱っており、II部を構成している。

第5章では、影響ベクトルに非減衰1次刺激関数を採用することにより従来の DI を拡張し、1次モード応答を主に励起する擬似 DI を提案している。ここでは、DI 及び擬似 DI に対する1自由度系、比例減衰多自由度系及び非比例減衰多自由度系の弾性変位応答、速度応答及びエネルギー応答の数式表現を導出している。DI、擬似 DI 及び1サイクル正弦波に対する弾性、弾塑性系の変位、加速度及びエネルギー応答の比較を時刻歴応答解析により行い、擬似 DI 及び1サイクル正弦波に対する応答が良好に対応することを示している。また記録地震動に対する応答との比較も行っている。

第6章では、変位制御解析手法である Updated Mode-controlled Energy-based Approach (UMEA) を提案し、UMEA とエネルギー平衡則に基づき、擬似 DI に対するバイリニア型復元力特性を有する

京都大学	博士 (工学)	氏名	明橋 弘樹
<p>非減衰多自由度系の最大層間変形の近似閉形表現を導出している。これにより弾塑性せん断質点系及び弾塑性平面骨組に対して、良好な精度での予測が可能であることを示している。</p> <p>第7～10章は記録地震動及び伝達関数に対するダンパー設計法を扱っており、III部を構成している。</p> <p>第7章では、マルチレベル地震動に対するロバストなダンパー設計を数理的に得る方法を展開している。ダンパー量一定下での理想的変形性能を表す Ideal Drift Response Curve (IDRC) の概念を提案し、IDRC を基準としたダンパー設計問題を解くことにより、幅広いレベルの地震動に対して層間変形がほぼ一様となる設計が得られることを示している。また、入力地震動のレベルの設定がダンパー最適配置に与える影響や IDRC の特性を数値例題により明らかにしている。</p> <p>第8章では、下限伝達関数の概念と幅広い振動数領域で有効性の高いダンパー配置を得る方法を提案している。下限伝達関数は、ダンパー総コスト一定下での理想的応答制御性能を振動数領域で表現している。下限伝達関数に基づくダンパー設計法により、変形及び床加速度応答を有効に低減する設計が得られることを示している。また、設計の過程では構造物の塑性化が直接的には考慮されないにもかかわらず、弾塑性応答時の変形も有効に低減可能であることも示している。</p> <p>第9章では、大振幅レベル地震動を受ける弾塑性平面骨組に対する粘性ダンパーの最適設計法を提案している。せん断質点系に対する層方向最適化を介することにより、効率的な最適化を可能としている。せん断質点系のダンパー付加減衰を平面骨組へと逆置換する際、地震時最大層間変位と密接に関係する1次減衰定数の略算値が最大化されるようにダンパーの-span方向分布を決定している。また、最適設計後のモデルに対する IDA 解析により、設計に用いる地震動のレベルと塑性変形特性の関係を明らかにしている。</p> <p>第10章では、弾塑性多層建物モデルに対する履歴ダンパーの最適設計法を提案し、実数値遺伝的アルゴリズム (GA) と局所探索の組み合わせにより、効率的で精度の高い設計を可能としている。実数値 GA の交叉においては、ダンパーの総剛性量を一定とする制約を有効活用している。</p> <p>第11～12章は、I～III部の理論を拡張して建物のレジリエンス評価及びレジリエント設計法を扱っており、IV部を構成している。</p> <p>第11章では、建物のレジリエンスと復旧時間の評価モデルを提案し、それを指標とした粘性ダンパー最適設計法を展開している。評価モデルでは、建物構成要素 (構造躯体、非構造及び設備) を機能の観点から種々の系統に分類している。復旧時間の正確な予測ではなく構造設計への適用を主な目的としており、作業遅延時間やインフラの被害等は考慮していない。また、復旧シナリオの不確実性を非確率的に表現しつつ、この不確実性をダンパー設計に反映する方法を提案している。</p> <p>第12章では、長周期長時間地震動を模擬したマルチインパルス (MI) を等価水平外力に拡張し、影響ベクトルに非減衰1次刺激関数を採用した「擬似 MI」を提案している。極限的擬似 MI 及び等価マルチサイクル正弦波に対する弾塑性モデルの最大応答が良好に対応することを示し、入力エネルギー及び累積塑性変形倍率について検討している。また、2次モードに共振する場合の取り扱いも可能としている。さらに、極限的擬似 MI を用いた弾塑性高層建物モデルのレジリエンス評価を行い、ダンパー付加、設備システムの冗長性及び復旧人員数の不確実性がレジリエンス性能に及ぼす影響を明らかにしている。</p> <p>第13章「結論」では、本論文で得られた成果を要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、弾塑性建築構造物に対する極限外乱法を構築し、大振幅レベル地震動を含む多種多様な性質とレベルの地震動に対してレジリエントな建築（レジリエント建築）を実現するダンパーの設計法を展開したものである。得られた主な成果は次の通りである。

1. 弾塑性せん断質点系及び弾塑性平面骨組に対するダンパーの最適設計法を構築し、提案設計法が良好な精度を有することを明らかにした。また、最適化に用いる入力地震動のレベルが設計に及ぼす影響を明らかにした。さらに、Ideal Drift Response Curve 及び下限伝達関数の概念を提案し、ダンパー設計による弾塑性応答低減性能及び振動数領域での応答制御性能が把握可能であることを明らかにした。
2. 断層近傍及び長周期長時間地震動の地動加速度をダブルインパルス及びマルチインパルスとして簡略化して表現し、これらを用いて弾塑性多層構造物に対する極限外乱法を構築した。その際、第1層の層せん断力が0となる時刻に第2インパルスが作用するとき入力エネルギー増分が最大となることを明らかにした。また、インパルス入力を地動加速度としてではなく、等価な水平衝撃外力として扱う方法を提示し、インパルス入力の有する多モード励起特性を制御可能とした。これにより、弾塑性多自由度系の最大層間変形及び最大床加速度を良好な精度で推定可能とした。特に、弾塑性応答に起因するモーダルカップリングを考慮した変位制御解析法により、弾塑性多自由度系の最大層間変形の近似閉形表現を誘導した。
3. 1次モードへの入力エネルギーの等価性に基づくレベル調整により、極限的ダブルインパルスに対する層間変形が、選択した地震動に対する層間変形を上回ることを明らかにした。また、レベル調整された極限的ダブルインパルスのみを用いることで、信頼性の高い粘性ダンパー設計が効率的に得られることを明らかにした。
4. 建物のレジリエンスと復旧時間の簡易評価モデルを構築し、復旧時間の上下限となる2つの復旧シナリオを提示した。これら2つのシナリオを用いた多目的最適設計により、復旧シナリオの不確実性を近似的に取り扱うことを可能とした。さらに、長周期長時間地震動を模擬した擬似マルチインパルスによるレジリエンス評価を行い、ダンパーの有無、復旧作業人員数の不確実性、ライフラインや設備システムの冗長性がレジリエンス性能に及ぼす影響を明らかにした。

以上の内容を要約すると、本論文は、弾塑性建築構造物に対する地震時最適設計法及びインパルスを用いた極限外乱法を構築し、入力地震動の不確実性を考慮したレジリエント建築のためのダンパー設計法を提案したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年12月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。