

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360245

研究課題名(和文) 高レベル地震動に対する既存超高層建物の各種劣化要因を考慮した耐震性評価と高耐震化

研究課題名(英文) Evaluation and improvement of seismic performance for existing high-rise buildings subjected to high-level earthquake ground motions

研究代表者

上谷 宏二 (Uetani, Koji)

摂南大学・理工学部・教授

研究者番号：40026349

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円、(間接経費) 4,500,000円

研究成果の概要(和文)：近年設計で考慮すべき地震動のレベルが増大しており、これらの地震動に対する既存超高層建物の耐震性の評価と向上が大きな社会的要請となっている。本課題では各種劣化要因を考慮した既存超高層建物の耐震性評価、既存超高層建物に適した耐震性向上システムの開発、建物の倒壊時に変形が下層部の複数層に集中するメカニズムの解明を行った。

研究成果の概要(英文)：In recent years, the level of earthquake ground motions increased significantly that should be considered in structural design. There is a strong demand for evaluating and improving seismic performance for existing high-rise buildings subjected to high-level earthquake ground motions. In this research project, we have assessed the seismic performance of existing high-rise buildings by taking a variety of degradation effects into account. Also we have developed techniques suitable for improving their seismic performances. Furthermore, we have examined a mechanism of deformation concentration in lower stories in the process of building collapse.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：超高層建物 倒壊余裕度 高レベル地震動 長周期地震動 パルス性地震動

1. 研究開始当初の背景

近年、従来の設計で考慮されていたレベルを大きく上回る地震動が国内外で多数観測されている。我国に限っても、1995年兵庫県南部地震などの直下地震では、2秒以上の比較的長周期の周期帯において従来の設計の想定を大きく上回る長周期パルス地震動が観測されている。また、東海・東南海・南海地震などの海溝型巨大地震により、東京・名古屋・大阪などの大都市圏において、数秒から十数秒の間の特定の周期帯において従来の設計の想定を大きく上回り継続時間が数分にわたる、長周期長継続時間地震動が発生する危険性が高いことが指摘されている。

このような状況の下、高レベル地震動(本研究では、(1)数秒程度の卓越周期帯で告示波の2~3倍程度のレベルの長周期長継続時間地震動、(2)数秒程度の卓越周期帯で告示波の3~5倍程度のレベルの長周期パルス地震動、(3)全周期帯で告示波の1.5~2倍程度のレベルの地震動を高レベル地震動と呼ぶ)に対する超高層建物、特に既存超高層建物の耐震性確保が重要な社会的要請となっており、その耐震性評価に関する研究が活発化している。通常、高レベル地震動の下では1/50を超える大きな層間変形角を想定する必要があるため、特に既存超高層建物では柱梁の局部座屈やブレースの曲げ座屈などの劣化要因が建物全体の応答に及ぼす影響を評価することが重要になる。しかし既往の研究では劣化要因が耐震性に及ぼす影響は十分に検討されていない。

2. 研究の目的

- (1) 各種劣化要因を考慮した既存超高層建物の耐震性評価
- (2) 既存超高層建物に適した耐震性向上システムの開発
- (3) 下層部変形集中現象の発生メカニズムの解明

3. 研究の方法

- (1) 各種劣化要因を考慮した既存超高層建物の耐震性評価

各年代・構造形式の既存超高層建物の代表的な解析モデルを作成し、劣化構成則を導入した一次元FEMプログラムを用いて時刻歴応答解析を行い、劣化が応答に及ぼす影響を評価する。また、パラメトリックスタディを行い、構造形式(S造、RC造など)や構造特性(耐力・剛性など)が応答に及ぼす影響を検討する。

- (2) 既存超高層建物に適した耐震性向上システムの開発

既存の材料・デバイスの組合せによる汎用耐震性向上システムと新規開発中のデバイスを用いた高性能耐震性向上システムの両方について性能確認実験を行う。また、提案耐震性向上システムの総合的設計法を提案する。

- (3) 下層部変形集中現象の発生メカニズムの解明

動的モードや、静的弾塑性座屈モードの各モードが、増分変位にどのように寄与しているかについての検討を行う。また、多様な地震動が作用した場合の位相平面上の構造物挙動を調べ、どのような場合に変形累積が起こるかを目的とした解析を行う。

4. 研究成果

- (1) 各種劣化要因を考慮した既存超高層建物の耐震性評価

従来のS造、CFT造、RC造、SRC造、RC造の部材実験データベースに海外の実験を追加してデータベースの強化を行い、劣化特性を再現できる応力ファイバー用応力ひずみ関係モデルの精度向上を行った。さらに、この応力ファイバーモデルによる部材の耐力劣化ならびにPA効果を考慮した骨組解析法を使用して、1970~1980年代の典型的な20層から40層のS造、CFT造、RC造、SRC造、RC造の超高層建築物骨組モデルについて時刻歴応答解析を行った。骨組モデルの設計クライテリアは、標準三波を入力し、レベル1(PGV=0.25m/s)では短期許容応力度以下、最大層間変形角が1/200以下、レベル2(PGV=0.50m/s)では柱は柱脚以外短期許容応力度以下、梁は塑性率4以下、最大層間変形角は1/100以下とするものである。サイト波の長周期地震動[WOS-EW(西大阪)、C-San-EW(名古屋三の丸)等]に対して、最大層間変形角応答と梁端の累積塑性変形倍率は大きく増大することはないが、場合によっては、レベル2設計クライテリアを超える。特に部材ランクが低い場合は大きく超えることがある。

上町断層に代表される長周期成分を含むパルス状地震動に対して、最大層間変形角応答も梁端の累積塑性変形倍率も、レベル2の設計クライテリアを大幅に超える場合がある。

Art-Hachinoheを用いたIDA(Incremental Dynamic Analysis)による倒壊探索の結果は次のとおりである。

- (a) 鉄骨造の場合、部材ランクがFAの場合は、下層部変形集中現象は原波レベルの3倍から出現する。柱と梁の部材ランクがFBの場合は、原波レベルの2倍で、下層部変形集中現象発生前に最下層柱が耐力劣化し倒壊した。部材ランクがFAの場合は、極限強度がレベル2の数倍以上あり、地震動レベルの増大に対して最大層間変形角は漸増する。部材ランクがFBの場合は、極限強度はレベル2の2倍余りで、部材の耐力劣化がすぐに倒壊に結びつく。

- (b) CFT造の場合，部材ランクがFAの時は，CFT造も鉄骨造もほぼ同じ耐震性を持つ。部材ランクがFBの時は，CFT造は鉄骨造より耐震的で，地震動レベルの増大に対して急激な変形増大もない。下層部変形集中現象は鉄骨造の場合とほぼ同じで，原波レベルの3倍から始まる。
- (c) RC造の場合，せん断補強筋比 p_w が小さいと，下層部変形集中以前に最下層柱の鉛直支持力喪失が生じ，脆性的倒壊となる。 p_w が大きいと，耐力劣化が原波レベルの1.5倍から発生し，それに伴って下層部変形集中現象が発生するが，直ちに倒壊することはない。
- (d) SRC造の場合，内蔵鉄骨量にも影響されるが，一般に，RC造に比較して，極限強度は高い。耐力劣化は原波レベルの1.5倍から現れ，それに伴ってそれ以上の地震動レベルでは下層部変形集中現象が発生するが，急激な変形増大はない。
- (2) 既存超高層建物に適した耐震性向上システムの開発
下層部変形集中現象の発生には，骨組の耐力よりもその剛性や地震時変形の大きさの方が大きな影響を与える。骨組の剛性を高めたり，変形集中を分散するための心棒架構を設置することは直接的で有効な対策であるが，構造物の減衰を高めて全体的な変形を低減することも有効である。しかしながら，一般に固有周期が長くなる傾向にある高層骨組の減衰を高めることは困難を伴う場合がある。履歴型ダンパーでは，構造物変形の増大に伴い，等価減衰が低下する場合があります。速度依存型ダンパーでは変位低減に有効な周期帯の応答速度が相対的に小さくなるため大きな減衰力を得にくい。これに対して，同調型制振システムでは，構造物の固有周期に同調する付加的な振動系に減衰を介在させることで，長周期の振動における小さな応答速度を増大させて大きな減衰力を得ることができるので，速度依存型ダンパーの弱点を補うことができると期待される。本研究課題では，50層程度の超高層骨組みに対して同調型制振システムが有効であることを解析検討に基づいて示し，当該システムの最適諸元設計法や最適配置設計法を提案した。
- 高層骨組において，レベル2程度の地震時には層間変形角分布が一様となる骨組においても，地震規模がさらに増大すると高次振動モードや PA 効果の影響により局所層に変形が集中する場合がある。変形集中は局所層の耐力劣化を引き起こす恐れがある。そのような高層骨組の耐震補強として，低振幅時にはブレースが作用せず大振幅時にブレースが作用するという特徴を持つ変位制御型ブレースによる補強を検

討した。鋼構造20層骨組の地震応答解析を実施し，変位制御型ブレースの適用により局所数層への変形集中が効率よく抑止されること，補強に伴う柱軸力増大が軽減できることを明らかにした。また，変位制御型ブレース適用時のエネルギー吸収部材としての適用が考えられるスリットダンパーを有するシーソー制振システムを検討した。繰返し載荷実験を行い十分な制振効果を発揮することを明らかにした。時刻歴応答解析より観測された最大級に相当するパルス性地震動に対して，心棒架構により最大応答が数十%低減できること，梁降伏型の崩壊機構を実現できること，既存骨組の地震負担力を抑制できることを実証した。また，各層の心棒架構の部材断面を柱と同程度とすることで，ごく一部に心棒架構を配置した場合でも，490N級鋼材により心棒架構を構築できることを実証した。

耐震性向上システムを設計支援プログラムとして実装するためには，多峰性・非平滑性が強いシミュレーション・ベースの最適化問題を安定して解くことが求められる。このような問題に対し，静的弾塑性解析を条件に含む設計問題に対しては凸緩和により大域的最適性の精度保証を行える構造最適化手法を提案し，時刻歴応答解析を含む問題に対しては局所解への大域的収束性を確率的に保証できる手法を提案した。

(3) 下層部変形集中現象の発生メカニズムの解明
以下の下層部変形集中メカニズムを提示した。「幾何非線形を考慮した場合，接線剛性行列を用いた振動固有値解析で得られる振動固有モードにおいて，梁端の塑性ヒンジが中立負荷となる高さには上限がある。塑性化領域がこの上限を超えると，上限より上の層では除荷が生じる。そのため，上限より下層部に塑性化領域と変形集中領域が限定される。このことが下層部に変形が集中するメカニズムである。」また，塑性化領域を1層から順次増加させた振動固有値解析と，初期速度に対する応答の時刻歴応答解析を通して，提案メカニズムの妥当性を例証した。

上記の提案メカニズムに基づき，変形集中領域を予測するための修正座屈条件式を提示した。既往座屈条件式では変形集中領域頂部の水平変位を拘束していたのに対し，修正座屈条件式では頂部の回転角を拘束している点が特徴である。この修正は，頂部の梁端塑性ヒンジが中立負荷となっていることに対応する。座屈固有値解析により，中間荷重を考慮した場合，修正座屈条件式では既往座屈条件式より低い座屈荷重係数を与えることを例示するとともに，振動固有値解析と周期地動に対する時

刻歴応答解析結果との比較により,修正座屈条件式の妥当性を例示した.

PI 効果を考慮した一自由度構造物について,自由振動時の変位 - 速度の位相平面を描くと,振動の安定領域と不安定領域の境界を明示することができる。構造物に片方向への変形累積が生じることと地震時に振動状態が位相平面場の不安定領域に進入することの関連は既に指摘されている。本研究課題では,多様な地震動が作用した場合の位相平面上の構造物挙動を調べ,どのような場合に变形累積が起こるかを目的とした解析を行った。变形累積が生じるのは,地震動の作用時に状態量が不安定領域に入ることが条件であるが,地震動の特性によっては累積現象が生じないことがあることも確認した。今後,地震動特性が变形累積にどのような影響を与えているかについて更なる検討を進める必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計14件)

- [1] 五十子幸樹, 杉村義文, 斉藤賢二, 井上範夫: 同調粘性マスダンパー付き多質点系せん断型構造物のモード応答特性一付加質量分布が主系剛性分布に比例する場合の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第697号, pp.367-374, 2014年3月, 査読有
- [2] 荒木慶一, 金紋廷, 西本篤史, 五十子幸樹, 上谷宏二: 長周期地震動を受ける座屈拘束ブレース付超高層鋼構造骨組における下層部変形集中現象, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第686号, pp. 743-752, 2013, 査読有
- [3] 白涌滔, 河野昭彦, 松尾真太朗: 巨大地震に対する既存鉄骨造およびCFT造超高層建築物の応答性状に及ぼす部材耐力劣化の影響, 鋼構造論文集, 第20巻第78号, 2013年6月 pp.1-14, 査読有
- [4] 山川誠, 大崎純, 満田衛資: 弾塑性時刻歴応答を考慮した鋼構造建物の設計問題のための部分的感度情報を用いた最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第683号, pp.91-99 (2013), 査読有
- [5] Kohju Ikago, Kenji Saito, Norio Inoue: Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 41, No. 3, pp.453-474., doi:10.1002/eqe.1138, 2012.3., 査読有
- [6] Kohju Ikago, Yoshifumi Sugimura, Kenji Saito, Norio Inoue: Modal Response Characteristics of a Multiple-Degree-Of-Freedom Structure

Incorporated with Tuned Viscous Mass Dampers, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 11 No. 2, pp. 375-382, 2012.11. [JAABE Best Paper Award 2012], 査読有

- [7] 山川誠: 時刻歴応答解析における微分不可能性を考慮した大域的直接探索法, 構造工学論文集, 第58B巻, pp.319-326 (2012), 査読有
- [8] 宋昶, 山川誠, 上谷宏二: 鋼構造骨組の最小重量設計問題における凸緩和, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第673号, pp.369-377 (2012), 査読有
- [9] Yongtao Bai, Masayuki Fujii, Shoichi Egashira, Shintaro Matsuo, and Akihiko Kawano: Accuracy Verification Based on Experimental Database on Structural Member Components Covering the Post Peak behavior (Reinforced Concrete Members and H-shaped Steel Members), Journal of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No. 22, July, 2012, pp. 135-144, 査読有り (DOIなし)
- [10] Yongtao Bai, Masayuki Fujii, Shoichi Egashira, Shintaro Matsuo, and Akihiko Kawano: Collapse Criteria of RC High-Rise Moment-Resisting Frames Incorporating Strength Deterioration under Severe Ground Motions, Journal of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No. 22, July, 2012, pp. 123-134, 査読有り (DOIなし)
- [11] Yongtao Bai, Akihiko Kawano, Keita Odawara, and Shintaro Matsuo: Constitutive Models for Hollow Steel Tubes and Concrete Filled Steel Tubes Considering the Strength Deterioration, Journal of Structural and Construction Engineering (AIJ), Vol. 77, No. 677, July, 2012, pp. 1141-1150, 査読有り (DOIなし)
- [12] 藤井雅之, 白涌滔, 江頭翔一, 河野昭彦, 松尾真太朗: 既存の鉄骨造およびCFT造超高層建築物の巨大地震に対する損傷特性, 構造工学論文集, Vol.59B, 2013, pp.181 - 190, 査読有り (DOIなし)
- [13] Araki, Y., Kim, M., Okayama, S., Ikago, K., Uetani, K.: Dynamic instability in high-rise SMRFs subjected to long-period ground motions, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 59, pp. 2496-2503, 2011., 査読有
- [14] 宋昶, 山川誠, 上谷宏二: 必要保有水平耐力における構造特性係数の不連続性を考慮した鋼構造骨組の最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第667号, pp.1665-1673 (2011), 査読有

[学会発表](計21件)

- [1] 荒木慶一, 大野正人, 佐藤陽介, 山川誠, 田川浩之: 長周期パルス地震動

- に対する超高層建物の崩壊モード制御，鋼構造年次論文報告集，Vol. 21，pp. 672-678，2013.
- [2] K. Ikago, Y. Sugimura, K. Saito, N. Inoue: Modal Response Characteristics of a Seismic Control Multi-Story Shear Building using a Tuned Viscous Mass Dampers, Proceedings of the 14th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Sardinia, Italy, paper 41, 2013.9.
- [3] K. Ikago: Modal Response Characteristics of Seismic Control Multi-Story Shear Building using Apparent Mass Dampers, Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Jeju, Korea, pp4110-4125, 2013.9.
- [4] N. Inoue, K. Ikago: Displacement Control Design Concept for Long-period Structures - Design Strategies for High-rise and Seismically Isolated Buildings Subjected to Strong Ground Motions, Proceedings of 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Sendai, Japan, paper 900494, 2013.9.
- [5] K. Ikago, N. Inoue: Seismic Control of Buildings Using Apparent Mass Dampers with Rotational Amplifying Mechanisms - A Review of the State of the Art, Proceedings of 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Sendai, Japan, paper 900564, 2013.9.
- [6] K. Ikago, N. Inoue: Fundamental Modes of Seismic Controlled Multi-Story Shear Building Using Tuned Viscous Mass Damper – An analytical study on a case in which the secondary mass distribution is proportional to that of primary stiffness, Proceedings of 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Sendai, Japan, paper 900718, 2013.9.
- [7] 林晃平、江頭翔一、藤井雅之、松尾真太郎、河野昭彦：既存鉄骨鉄筋コンクリート造超高層建築物の部材の耐力劣化を考慮した終局耐震性能評価，第 10 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム、日本建築学会・土木学会、pp.26-1 ~ 26-8、2013 年 11 月 21 日 ~ 22 日
- [8] 山川誠，上谷宏二：塑性崩壊荷重制約条件下の鋼材量最小設計問題における凸緩和を用いた局所解の精度評価，日本建築学会第 35 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集（論文），R10，pp.49-54（2012）
- [9] 清水亜久里，山川誠，大崎純：弾塑性時刻歴応答制約下の設計問題に対して部分的感度情報により拡張された直接探索法，日本建築学会第 35 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集（報告），H30，pp.231-234（2012）
- [10] K. Ikago, Y. Sugimura, K. Saito, N. Inoue: Simple Design Method for a Tuned Viscous Mass Damper Seismic Control System, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Paper ID 1575, 2012.9.
- [11] H. Kida, K. Ikago, N. Inoue, Applicability of Force-Restricted Tuned Viscous Mass Damper to High-Rise Buildings Subjected to Long-Period Ground Motions, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Paper ID 0235, 2012.9.
- [12] Yongtao Bai, Akihiko Kawano, and Shintaro Matsuo: Member Damages of High-Rise Building Structures under Severe Earthquakes [Effect of Member Deterioration], Proceedings of 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, March 1, 2012, pp.945-952. 査読有り（DOIなし）
- [13] Yongtao Bai, Akihiko Kawano, and Shintaro Matsuo: Seismic Behavior and Collapse of Existing High-Rise Steel Frame Buildings Subjected to Long Period Ground Motions Considering Strength Deterioration, The 10th International Conference on Advances in Steel Concrete Composite and Hybrid Structures, Singapore, July 3, 2012, pp.978-985, 査読有り（DOIなし）
- [14] Yongtao BAI, Keita ODAWARA, Akihiko Kawano and Shintaro MATSUO: Stress-Strain Model of Structural Members by Considering Strength Degradation (Part.1 Concrete Filled Steel Tube Members), Proceedings of the 9th Symposium on Research and Application of Hybrid and Composite Structures, pp.184-192, November 10-11, 2011
- [15] 小俣慶太、白涌滔、河野昭彦、松尾真太郎：耐力劣化要因を考慮した構造部材の応力 - 歪関係（その 2 . 鋼構造及び鉄筋コンクリート構造部材）第 9 回複合・合成構造に関するシンポジウム講演集、pp.193-202、2011 年 11 月 10 日-11 日、査読有り（DOIなし）
- [16] 小俣慶太、河野昭彦、松尾真太郎、白涌滔：部材の耐力劣化を考慮した超高層建築物の終局耐震性能，鋼構造年次論文報告集 第 19 巻、pp.819-826、2011 年 11 月、査読有り（DOIなし）
- [17] Makoto Yamakawa and Fred van Keulen: Compromise between derivative-based and derivative-free optimization for nonsmooth and noisy dynamic responses Proceedings of 6th European Congress on

Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Pres. No.2250 (2012)

- [18] Makoto Yamakawa and Fred van Keulen: Derivative-free optimization reflecting the geometry of constraints for nonsmooth dynamic responses Proceedings of 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Paper No. 106_1 (2011)
- [19] Kohju Ikago, Yoshifumi Sugimura, Kenji Saito, Norio Inoue: Seismic displacement control of multiple-degree-of-freedom structures using tuned viscous mass dampers, Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2011, Leuven, Belgium, pp.1800-1807. (ISBN 978-90-760-1931-4), 2011.7.
- [20] Kohju Ikago, Kenji Saito, Norio Inoue: Optimum Multi-modal Seismic Control Design of High-rise Buildings using Tuned Viscous Mass Dampers, Proceedings of the 13th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Chania, Crete, Greece, Paper 170, doi:10.4203/ccp.96.170, 2011.9.
- [21] Kohju Ikago, Yoshifumi Sugimura, Kenji Saito, Norio Inoue: Seismic control design of tall buildings using tuned viscous mass dampers, Proceedings of the CTBUH2011 World Conference, Paper ID TS31-03, Seoul, Korea, 2011.10.

〔図書〕(計2件)

- [1] 荒木 慶一(分担執筆): 鋼構造物の座屈に関する諸問題, 第10, 11章, 日本建築学会, 2013
- [2] 井上範夫, 五十子幸樹: 建築物の変位制御設計—地震に対する免震・長周期建物の設計法, 丸善出版, 2012年12月

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:

取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

上谷 宏二 (UETANI, Koji)
摂南大学・理工学部・教授
研究者番号: 40026349

(2)研究分担者

河野 昭彦 (KAWANO, Akihiko)
九州大学・人間・環境学研究所・教授
研究者番号: 60136520

(3)研究分担者

五十子 幸樹 (IKAGO, Kohju)
東北大学・災害科学国際研究所・教授
研究者番号: 20521983

(4)研究分担者

田川 浩 (TAGAWA, Hiroshi)
広島大学・工学研究科・教授
研究者番号: 70283629

(5)研究分担者

荒木 慶一 (ARAKI, Yoshikazu)
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 50324653

(6)研究分担者

山川 誠 (YAMAKAWA, Makoto)
東京電機大学・未来科学部・准教授
研究者番号: 50378816