

別紙 4

報告番 -	※ -	第
----------	--------	---

主 論 文 の 要 旨

論 文 題 目 : 多層骨組の最大変位応答に基づく実用的な耐震性能設計法の構築 (Practical Performance-Based Seismic Design Method Based on Maximum Displacement Response of Multi-Story Frame)

氏 名 古川 大志

論 文 内 容 の 要 旨

現行の建築基準法では、最低限の耐震性能水準を「大地震に対して建物に重大な損傷がなく崩壊しないこと」としている。しかしながら、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震といった規模の地震後でさえも建物の継続使用性や財産価値の保持を望む建築主もおり、今後のさらなる設計体系の発展には、社会からの様々な要望に適宜応えていくことが重要である。これを実現するためには、目標とする耐震性能水準への要求を建築主と設計者とが協議の上定め、これを満たすように設計する「性能設計法」の構築が必要不可欠となり、このことは近年の耐震工学における最重要課題の一つである。

一方、大地震動に対しても建物にほぼ損傷がなくその継続使用性や財産価値の保持を実現するためには、地震時における建物の損傷制御を行う必要がある。これを可能とするものの一つに履歴ダンパー等を有する制振構造様式があり、近年におけるその建設実績は急速に増加していることから、一般的な構造物だけでなく制振構造物にも適応可能な汎用性の高い性能設計法の構築が重要である。2005年に施工された「エネルギーの釣合いに基づく耐震計算等の構造計算」によれば、これまでは設計時に時刻歴応答解析を必要としていた履歴ダンパーを有する構造物（以下、制振構造物）の静的設計を行うことができ、この手法は、汎用性の高い性能設計の実現に貢献し得るとされている。しかしながらその一方で、この方法は許容応力度設計法等の従来設計法と同様、建物の安全性をある基準値を満たしているかどうかで判断する確定

論的手法であり，不確定な未来の事象に対し確定的に性能を示すことはリスクが大きいという指摘もある。

確定論的手法に残る問題点を踏まえつつ性能設計を実現し得る有力な設計法の一つに、「信頼性理論に基づく限界状態設計法」がある。これは，建物に将来作用する荷重やその耐力といった不確かさを確率・統計論に基づき考慮しつつ，供用期間中に建物が好ましくない状態となる確率である「限界状態超過確率 P_f 」という定量的な尺度によって建物の性能水準を制御する設計法である。この設計法によれば，統計的性質の異なる地盤構造物や上部構造，さらには制振構造様式を含む新たな構造様式を採用した建物を統一的な理念の上設計することができ，非常に汎用性の高い性能設計法の実現が可能となり得る。

P_f の算定には一般に煩雑な計算を要するが，これを回避する実用的な手法として荷重・耐力係数設計法や部分係数法が提案され，欧米州諸国等の多くの国々における規基準に採用されている。一方で，これらの規基準において定められる性能はほとんどが部材レベルであり，建物全体としての性能水準を規定するには至っていない。これを解決したものとして，米国の設計規基準の一つである ASCE7 では，建物全体の耐震性能水準を 50 年間での倒壊確率が 1%となるように定められた想定最大地震動を設計荷重とすることで制御しているが，想定最大地震動の算定に用いた建物倒壊の被害率曲線は所定の設計用地震動を用いて設計された建物群の解析結果に基づいているため，個々の建物の特性は考慮されていない。

一方，時刻歴応答解析によって構造物の耐震性能を評価する方法もあるが，ある特定の地震動に対する結果は一つの特解に過ぎず，性能評価の際に地震の発生や地震動特性の不確定性および構造特性を考慮するためには，建設地点での地震環境や地盤特性を考慮した数多くの地震波に対する応答解析が必要となり，棟数で全体の約 90%を占める静的設計法で設計可能な規模の建物の耐震性能を評価する上では実用的ではない。

以上のことを踏まえ，本研究の目的は，制振構造物への展開も念頭に置きつつ，一般的な構造物を主な対象として，地震ハザードや地震動特性の不確定性および個々の構造物の特性を考慮しつつ，構造物全体としての耐震性能を P_f として評価する枠組みを示した上で，そこに残る

課題を明らかにし（後記の(1)~(3)）、その解決策を提案することにある。 P_f は想定する限界状態により評価方法が異なるが、本論では構造物の耐震性能が地震時に生じる構造物の変形量とよく対応することから、 P_f を最大変形量が定数あるいは確率変数としたある許容値を超える確率として評価することを目指す。

上記の目的を達成する上で必要となる弾塑性多層骨組の最大変位応答の評価手法についてはこれまでにいくつか提案されている。その代表的なものには、2000年に仕様規定に代わる新たな構造安全性の検証法として導入された「限界耐力計算」における上部構造の応答評価法や、応答スペクトルによるモーダルアナリシスの適応範囲を塑性域まで拡張し、弾塑性多層骨組と等価な一質点系の最大変位応答 $S_{D,1}^I$ に加え、降伏後の振動モード形の変化をも考慮した Inelastic Modal Predictor (IMP)、Modal Pushover Analysis (MPA) 等がある。

上記の一般的な構造物を対象とした応答評価法では、構造物と等価な一質点系の復元力特性を一つの弾塑性バネで表現しているが、同様の方法で制振構造物と等価な一質点系の復元力特性を評価する場合、通常互いに大きく異なるダンパーと多層骨組の復元力特性を一つの弾塑性バネで評価する必要があり適切な評価は難しい。そこで Kang & Mori は制振構造物の復元力特性を多数の弾塑性バネで表現した等価一質点系を提案すると共に、それを IMP に用いることで制振構造物の応答評価法を構築することを検討している。

限界耐力計算や IMP, MPA, さらには制振構造物の応答評価法を信頼性理論に基づく実用的な限界状態設計法へと展開するには以下の3つの課題が残り、本論ではこれらに関する提案手法を示す。

- (1) 多層骨組と同様な汎用性の高い制振構造物の最大応答評価法の検討
- (2) 多層骨組や制振構造物と等価な弾塑性一質点系の最大変位応答 $S_{D,1}^I$ の供用期間中の最大値の確率分布の評価
- (3) 降伏後の一次振動モード形 $\phi_{1,i}^I$ の変化をも考慮した最大変位応答に基づく荷重・耐力係数設計式に準ずる設計条件式の検討

(1)について、Kang & Mori の手法では、制振構造物の高次モード応答を弾性として評価しているが、ダンパーは一般に骨組と比べて早期に降伏することから、骨組が降伏する以前にも制振構造物の見かけ上の固有周期や振動モード形、また履歴減衰は変化しており、これらの影響を無視した高次モード応答を用いる応答評価法の評価精度には疑問が残る。またこの手法では、制振構造物と等価な一質点系の固有周期が制振構造物そのものの一次固有周期と必ずしも一致しない。そこで本論ではこれらの解決法を示すと共に、Pushover 解析に用いる外力分布を再検討することで、制振構造物の新たな簡易最大変位応答評価法を提案した。

Kang & Mori の手法では、制振構造物の上層部での過小評価の傾向や特に履歴ダンパーが下層部にのみ設置されたモデルでの精度悪化を示したが、提案手法ではこれらはほぼ解消されており、すべての解析モデルで比較的良好な評価精度が得られた。

(2)の $S_{D,1}^I$ の評価には地震動強さ指標の適切な選定が重要となる。北原・伊藤は、 $S_{D,1}^I$ と安定して強い相関を有する指標として固有周期依存型スペクトル強さ $SI_{n,p}$ を提案すると共に $SI_{n,p}$ を用いた $S_{D,1}^I$ 推定法を示している。 $SI_{n,p}$ は弾性速度応答スペクトルの $sT_1 \sim tT_1$ (T_1 : 構造物の弾性一次固有周期, s, t : 定数)の積分値として評価されるが、適切な積分区間は地震動のスペクトル特性や一質点系の復元力特性の形状等に依存するため、 s, t を定数とすることの妥当性・汎用性には疑問が残る。そこで、本論では積分区間を T_1 から一質点系の弾塑性挙動により増大した見かけ上の固有周期までとして新たなスペクトル強さ SI_μ を定義し、 SI_μ と $S_{D,1}^I$ の一般的な関係を、Bi-linear, Bi-linear-slip, Tri-linear 型復元力特性を対象に、一質点系の時刻歴応答解析結果に基づいて復元力特性毎に明らかにした上で、この関係に基づく $S_{D,1}^I$ 評価法を提案した。

エネルギー一定則や等価線形化手法等の既往手法による評価の偏りは T_1 等によって大きく変化したのに対し、提案手法の偏りはすべての解析モデルで非常に小さい。また提案手法による評価のばらつきは、既往手法のものよりほとんどのモデルで小さい。

最後に(3)について、森・中尾は、構造物の応答が弾性範囲に留まる使用限界状態を対象に、SRSS により求めた各次モード応答の二乗の線形和を荷重の組み合わせとみなすことで荷重・耐力係数設計式に準ずる設計条件式を導き、その荷重・耐力係数の略算法を示している。森・

中尾の手法に SRSS ではなく限界耐力計算や IMP, MPA を用い、それと課題(2)に対する提案手法とを統合することで終局限界状態を対象とした実用的な設計条件式を示すことが可能となる。ただし、これらの弾塑性応答評価法ではいずれも、 $\phi_{1,i}^I$ を $S_{D,1}^I$ に対応した Pushover 解析における各層の変位分布から地震動毎に評価しているため、 $S_{D,1}^I$ の供用期間中の最大値の確率分布が与えられたとしても、振動モード形が不変である弾性的場合とは異なり、一次モード応答 D_{1st} の確率分布を確率変数とした $S_{D,1}^I$ の定数倍として単純に取り扱うことで評価することはできない。さらに、 D_{1st} の確率分布をモンテカルロ法等により精度良く評価できたとしても、この分布は $S_{D,1}^I$ の複雑な関数となり得るため、荷重・耐力係数の評価等に難がある。そこで、本論では、 $S_{D,1}^I$ が増加するにつれ常に $\phi_{1,i}^I$ を用いた D_{1st} も増加すると想定する、すなわち、ある $S_{D,1}^I$ の超過確率がそれに対応する D_{1st} の超過確率と一致するという想定の上、 D_{1st} の確率分布を移動対数正規確率分布に近似する手法を提案した。

5つの多層骨組モデルに対して、提案手法による結果が、モンテカルロ法による結果と概ね一致し、 D_{1st} の確率分布を移動対数正規近似ではなく対数正規近似した場合は、大きな評価誤差が生じ得ることを確認した。