

平成 21 年 4 月 1 日 現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560569
 研究課題名（和文） 構造特性の不確定性を考慮した最大変位応答に基づく多層骨組の耐震性能評価法の構築
 研究課題名（英文） Reliability-Based Design of SMRF Buildings based on Maximum Displacement
 研究代表者
 森 保宏 (MORI YASUHIRO)
 名古屋大学・大学院環境学研究科・教授
 研究者番号：30262877

研究成果の概要：

本研究では、耐震信頼性設計法の包括的な枠組みを確立することを目的とし、部材耐力の不確定性が骨組の最大変位応答に及ぼす影響について検討し、入力地震波の特性や層の位置によって最大変位応答のばらつき傾向は異なるものの、層間変形角が $=1/75\sim 1/50$ 付近では変動係数は $0.05\sim 0.20$ 程度であることを示した。さらに、荷重・耐力設計式への展開のしやすさを考慮して、二乗や平方根を含まない簡易応答評価法を提案し、その評価精度について、部材耐力の不確定性をも考慮して検討し、十分実用的であることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：構造設計，性能評価

1. 研究開始当初の背景

阪神・淡路大震災では、建築技術者と建物の所有者・使用者との間の安全に対する認識の乖離が顕在化した。その後、東海地震の想定震源域や地震災害防災対策強化地域の見直しもあり、耐震性能に対する社会の関心が高まっている。また、非関税貿易障壁の解消や技術者の相互認証の必要性から技術規準の国際化・標準化が望まれている。共通の尺度で客観的に構造性能を明示する性能設計

への期待は大きく、これを実現していくためには、適切な性能評価手法の確立が急務である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、荷重および耐力の不確定性を適切に考慮しながら、耐震信頼性設計法の実用的かつ包括的な枠組みを構築することにある。

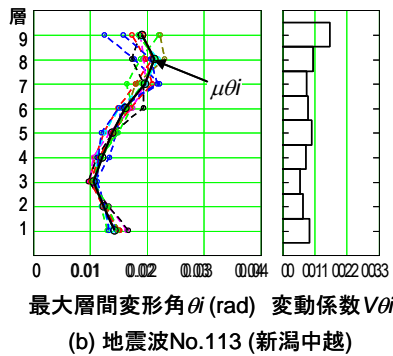
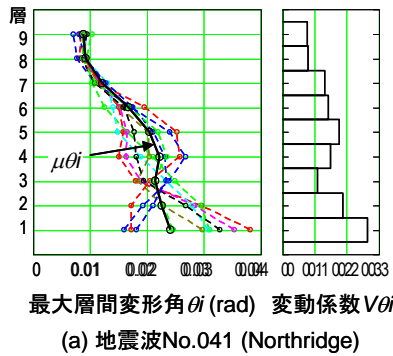


図1：骨組サンプルの最大変位応答

3. 研究の方法

(1) まず様々な構造特性のうち部材の終局耐力の不確実性が骨組の最大変位応答に及ぼす影響について検討する。

(2) 限界耐力計算における上部構造の応答評価法（以下，限界耐力計算と略記）や Inelastic Modal Predictor¹⁾（以下，IMPと略記）といった簡易応答評価法の評価精度について検討する。

(3) 荷重・耐力設計式への展開のしやすさを考慮して，二乗や平方根を含まない簡易応答評価法を提案し，その評価精度について，部材耐力の不確実性をも考慮して検討する。

4. 研究成果

(1) 部材耐力の不確実性が最大変位応答に及ぼす影響

ここでは，各部材の終局耐力の不確実性の影響について検討するために，日本の耐震基準に基づいて設計された9層鋼構造骨組の魚骨モデル JP9 の各部材耐力に，変動係数 0.10 のばらつきを考慮した骨組モデル JP9-U について，100 個の骨組サンプルを生成し，それらの時刻歴応答解析を行った。入力地震波には主に日本およびアメリカで観測された 128 波を用いている。

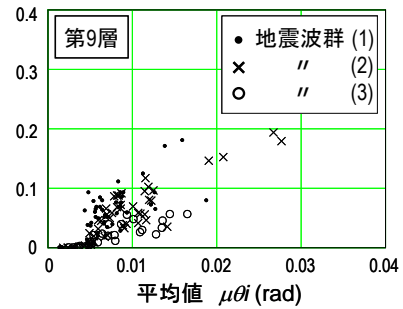
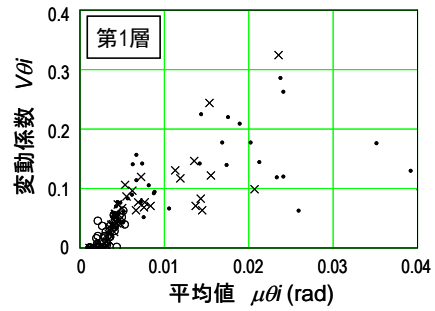


図2：変動係数—平均値

図1は，典型的な応答を示した2つの地震波に対する骨組サンプルの各層の最大変位応答の平均値 $\mu\theta_i$ および変動係数 $V\theta_i$ を示したものである。図中には，100 個のうち 10 個の骨組サンプルの最大変位応答 θ_i も示している。図1(a)は1次モードが支配的となる地震波であり，第1層や中間層における変動係数が大きくなる。図1(b)は1次モードに加え2次モードの影響も大きい地震波であり，上層における応答や変動係数が大きい。図2は，128 波に対する最大変位応答の平均値と変動係数の関係を層ごとに表したものであり，1次モードが支配的な地震波(地震波群(1))，2次モードの影響も大きい地震波(地震波群(2))，さらに3次モードの影響も大きい地震波(地震波群(3))の3つの地震波群に分けてプロットしている。ここでは第1層と第9層の応答のみを示すが，全層ともプロット点がほぼ右上がりに分布しており，最大変位応答が大きいほどそのばらつきも大きくなる傾向にある。また，高次モードの影響が表れやすい第8層や第9層では，地震波群(1)，(2)，(3)の順に，変動係数の小さい範囲にプロット点が集中する傾向にあるが，これは，応答に寄与するモードの数が多いほど，それらの組み合わせで評価される応答のばらつきが抑えられるためと考えられる。

入力地震波の特性や層の位置によって最大変位応答のばらつきの傾向は異なるものの，鋼構造骨組で安全限界とされる $\theta_i=1/75$

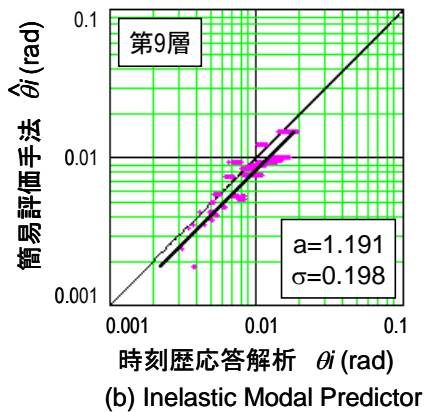
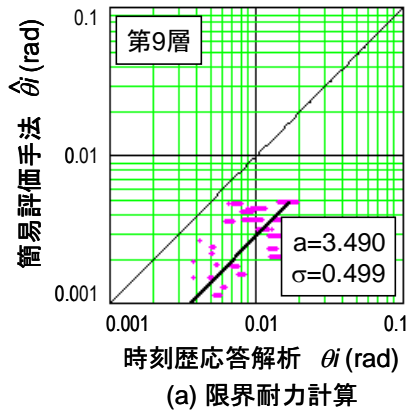


図 3：評価精度(地震波群(3)，第 9 層)

～1/50(=0.013～0.02)付近ではおおむね $V_{\theta_i} = 0.05 \sim 0.20$ 程度である。なお、本稿には示していないが、他の骨組モデルについても同様の傾向がみられた。

(2) 多層骨組の簡易最大変位応答評価法の評価精度

① 既往の簡易評価手法

IMP は二乗和平方(SRSS)に基づくモーダル解析の 1 次モードにのみ塑性化の影響を考慮した手法であり、第 i 層の最大層間変形角を(1)式により近似評価する。

$$\hat{\theta}_i = \sqrt{\left(PF_{1,i}^I \cdot S_{D,1}^I \right)^2 + \sum_{j=2}^s \left(PF_{j,i}^E \cdot S_{D,j}^E \right)^2} \quad (1)$$

ここに、 $PF_{j,i}^*$ は j 次の層間変形角の刺激関数であり、 $S_{D,j}^*$ は j 次の 1 質点系の最大変位応答である。また、右肩の E または I は、1 質点系の復元力特性およびモード形がそれぞれ弾性、弾塑性であることを示す。1 次振動モードは Pushover 解析によって得られる各層の絶対変位分布で近似できると仮定し、1 次モードと等価な弾塑性 1 質点系の復元力特性は骨組頂部の荷重-変形関係に基づい

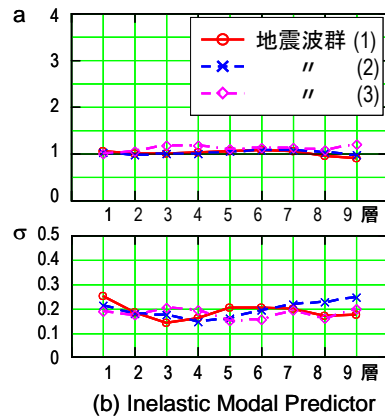
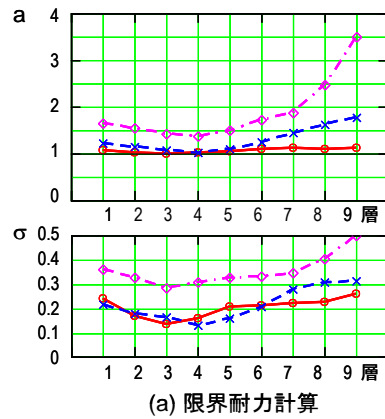
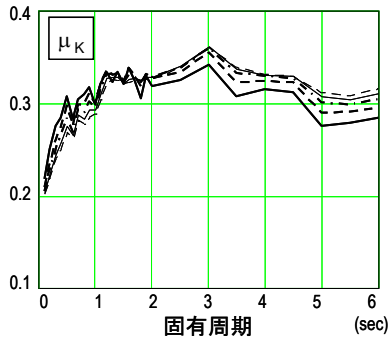


図 4：限界耐力計算と IMP の精度

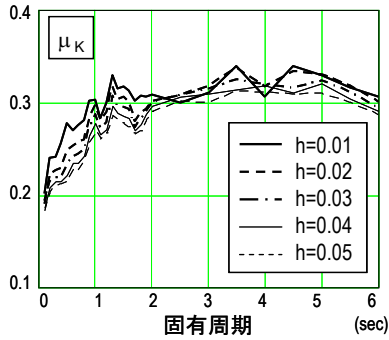
て設定する。また、1 次モードと等価な弾塑性 1 質点系の復元力特性は Trilinear 型とし、Pushover 解析では A_i 分布に基づく外力分布を用いる。

本節では、限界耐力計算および IMP によって前述の 128 の入力地震波に対する JP9 の各層の最大層間変形角を評価し、JP9-U の骨組サンプルの時刻歴応答解析結果と比較することにより、それぞれの評価精度について検討する。なお、ここでは $S_{D,1}^I$ は時刻歴応答解析によって評価する。両対数座標上に時刻歴応答解析結果(横軸)と簡易評価手法による評価値(縦軸)をプロットして傾き 1 の回帰直線を求め(図 3 参照)、 $\hat{\theta}_i = \theta_i$ の直線からの回帰直線の偏り a およびプロット点の回帰直線まわりの対数標準偏差 σ を算出する。 σ は評価精度の変動係数に相当し、小さいほど評価精度のばらつきが小さいことを表す。

図 3 に、限界耐力計算と IMP の精度の差が最も大きかった地震波群(3)に対する第 9 層の評価結果を示す。限界耐力計算(図 3(a))では回帰直線が $\hat{\theta}_i = \theta_i$ の直線から大きく外れ、 $a=3.490$ と大きく過小評価となっている。一方、IMP(図 3(b))では $a=1.191$ と比較的精



(a) 活断層型地震



(b) 海溝型地震

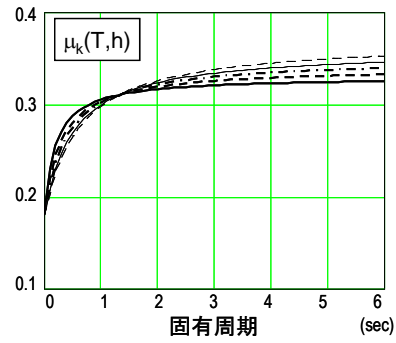
図 4: K の平均値 μ_K

度が良い。全層における評価精度を図 4 に地震波群ごとに示す。限界耐力計算では 1 次モードのみを考慮しているため、1 次モードが支配的である地震波群(1)に対しては精度が良いが、2 次モードや 3 次モードの影響も大きい場合は、特に高次モードの影響が表れやすい上層における精度が良くない。一方、高次モード応答も考慮している IMP では、いずれの地震波群に対しても比較的精度が良い。

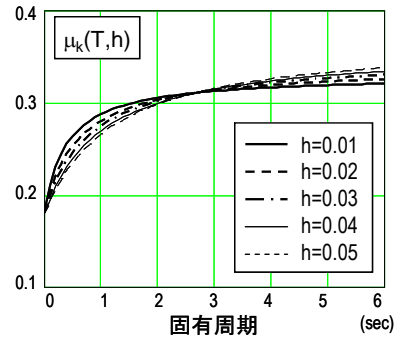
② Turkstra's rule に基づくモード合成による簡易最大変位応答評価手法

IMP は地震動のスペクトル特性によらず多層骨組の最大変位応答を精度良く評価できる手法であるが、SRSS を用いてモード合成をしているため、応答評価式には二乗や平方根が含まれ、荷重・耐力係数形式の簡易な設計式への展開が難しい。ここでは、モード合成に Turkstra's rule を適用することで、最大変位応答を各次モードの単純な和として評価する応答評価式を提案する。

Turkstra's rule とは「2 つ以上の荷重の組み合わせ時系列における最大値は、1 つの荷重(主の荷重)の最大値と他の荷重(従の荷重)の平均的な値との和で近似的に評価される」とする経験則である。これをモード合成



(a) 活断層型地震



(b) 海溝型地震

図 5: μ_K の回帰曲線

に適用すると、骨組の最大層間変形角 θ_i は、あるモードの最大応答と他のモードの平均的な応答の和として評価されることになり、最大応答から平均的な応答を推定するための係数 k_j を用いて(2)式で近似評価される。

$$\hat{\theta}_i = \max \left\{ \begin{array}{l} X_{1,i}^I + k_2 \cdot X_{2,i}^E + k_3 \cdot X_{3,i}^E + \dots \\ k_1 \cdot X_{1,i}^I + X_{2,i}^E + k_3 \cdot X_{3,i}^E + \dots \\ k_1 \cdot X_{1,i}^I + k_2 \cdot X_{2,i}^E + X_{3,i}^E + \dots \\ \dots \end{array} \right\} \quad (2)$$

ただし $X_{j,i}^* = |PF_{j,i}| \cdot S_{D,j}^*$ (3)

(2)式では、IMP に倣って 1 次モードのみに塑性化の影響を考慮しており、弾塑性 1 質点系の復元力特性や降伏後の振動モード形の求め方は IMP と同様とする。

係数 k_j は、 j 次の固有周期や減衰定数、さらに地震動の継続時間に依存するものと考えられる。ここでは、前述の 128 の地震波それぞれについて、弾性 1 質点系の時刻歴変位応答の絶対値から最大値 D_{\max} と平均値 D_{mean} を算出し、その比 $K = D_{\text{mean}} / D_{\max}$ をもとに k_j を評価することを検討する。なお、弾性 1 質点系の固有周期は $T = 0.1 \sim 6.0$ 秒、減

減衰定数は $h=0.01\sim 0.05$ とする。

図5は、活断層型地震(全109波)、海溝型地震(全19波)それぞれについて、 K の平均値 μ_K を固有周期、減衰定数の関数として示したものである。全体として μ_K は $0.3\sim 0.35$ 程度であるが、固有周期が短いほど小さくなる。活断層型地震(図5(a))では、短周期領域では減衰定数が小さいほど μ_K は大きいが、 $T=1.2$ 秒付近を境に逆転し、長周期領域では減衰定数が大きいほど μ_K は大きくなる傾向が見られる。一方、海溝型地震(図5(b))についても、解析に用いた地震波の数が少ないため不明瞭ではあるものの、同様の傾向があり、 μ_K の大小が逆転する位置は、活断層型地震よりも長周期側にずれた $T=2.5$ 秒付近にみられる。

以上の分析結果に基づき μ_K の回帰関数を求めると、(4)式のように T と h の関数として表される。

$$\mu_K(T, h) = \frac{-c \cdot T(h + 0.14)}{c \cdot T + 20(h + 0.01)} + 0.18 \quad (4)$$

ここに、活断層型地震では $c=1$ 、海溝型地震では $c=2$ とする。 $T=0\sim 6$ 秒、 $h=0.01\sim 0.05$ における $\mu_K(T, h)$ の値を図6に示す。ここでは、(2)式中の k_j を(4)式により評価することを提案する。

図7は、前節と同様の方法により a 、 σ を評価したものである。なお、ここでは活断層型地震と海溝型地震に分けて評価しており、SRSSに基づく手法であるIMPの結果も比較のため示している。海溝型地震は活断層型地震に比べて用いた地震波の数が少ないため、図7(b)では精度が劣る層もあるが、全体として、本提案手法はIMPと同程度あるいは若干良好な精度を有する。

参考文献

1) 森, 山中, 中島: 降伏によるモード形を考慮した鋼構造骨組の変位応答評価法, 構造工学論文集, Vol. 50B, pp. 425-434, 2004. 3.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

① 大場麻弥, 森 保宏: Turkstra's rule に基づくモード合成による多層骨組の簡易最大変位応答評価法, 日本建築学会東海

支部研究報告集, 第 47 号, 2009.2, pp.129-132. 査読なし

② 蛭川慎也, 森 保宏, 大場麻弥: 応答スペクトルの固有周期間の相関を考慮した弾塑性一質点系の最大変位応答評価に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 47 号, 2009.2, pp.141-144. 査読なし

③ 大場麻弥, 森 保宏: 地震動のスペクトル特性と部材耐力の不確定性を考慮した鋼構造骨組の最大変位応答および簡易応答評価手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集. 第 628 号, 2008.6, pp.859-866. 査読あり

④ 大場麻弥, 森 保宏: 部材耐力の平均値及び 5% 下限値を用いた鋼構造骨組の最大変位応答評価に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 46 号, 2008.2, pp. 113-116. 査読なし

⑤ Mori, Y. and M. Maruyama, "Seismic Structural Demands Taking Accuracy of Response Estimation into Account," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol.36, 2007, pp1999-2020. 査読あり

⑥ Mori, Y., and M. Oba, "A Study On Seismic Structural Demands On Frames Considering Variability In Strength Of Structural Components," *Proc. 8th Pacific Conf. on Earthquake Engineering*, 2007, 9pp. 査読あり

[学会発表] (計 2 件)

① 大場麻弥, 森 保宏: Turkstra's rule に基づくモード合成による鋼構造骨組の簡易最大変位応答評価法, 日本建築学会大会(中国) 2008/9/20, 広島大学

② 大場麻弥, 森 保宏: 部材耐力の不確定性を考慮した鋼構造骨組の最大変位応答に関する研究, 日本建築学会大会(九州) 2007/8/29, 福岡大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 保宏 (MORI YASUHIRO)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号: 30262877