

論文 RC 造建築物の耐震性能評価法に関する日米比較

熊谷 誠幸^{*1}・倉本 洋^{*2}・松本 和行^{*3}

要旨：1998 年の建築基準法の改正に伴い新たに導入された限界耐力計算法と米国の代表的な耐震性能評価法である ATC-40 および FEMA273 について、4 層および 12 層の純ラーメン鉄筋コンクリート造建築物に対する地震応答推定精度の比較検討を行い、限界耐力計算法の有効性を確認した。

キーワード：限界耐力計算法，ATC-40，FEMA273，時刻歴地震応答解析，応答値比較

1. はじめに

1995 年に米国で発表された Vision2000¹⁾や 1995～1997 年度にわが国で実施された建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」²⁾に代表されるように、近年、建築構造の分野においても性能を基盤とした工学の概念を取り入れた評価手法、設計法が世界的に主流となってきている。特に、米国では既存建築物に対する性能基盤型の耐震性能評価法として、1996 年に ATC-40³⁾が、続いて 1997 年に FEMA 273⁴⁾が提案され、日本においても 1998 年の建築基準法改正に伴い新たな性能評価型構造計算法として限界耐力計算法が導入された⁵⁾。

これらは何れも動的応答解析を要すことなく建築物の地震時応答を直接的に評価できる、いわゆる準静的耐震性能評価法である点で共通しており、従来慣用されてきた手法とは異なるものである。しかし、評価手法そのものは各方法で異なっており、ATC-40 および限界耐力計算法では等価線形化法⁶⁾の概念を応用した Capacity Spectrum Method⁷⁾を、FEMA 273 では耐力低減係数法の概念を取り入れた、いわゆる Displacement Coefficient Method をそれぞれ基本としている。

本研究では、建築基準法改正により採用された限界耐力計算法の有効性を把握することを主たる目的として、上記 3 つの準静的耐震性能評価法に関して評価手順および基本仮定等を整理

し、地震応答推定精度を比較検討する。具体的には、4 層および 12 層の純ラーメン鉄筋コンクリート造試設計建築物に対して各評価法による応答推定値と時刻歴地震応答解析結果とを比較し、予測精度の優位性を検討する。

2. 耐震性能評価法の概要

2.1 限界耐力計算法における評価手順

この方法は、図-1 に示すように、等価 1 自由度系に縮約された建築物全体の構造特性を表す耐力スペクトルと想定する地震動を表す要求スペクトルを重ね合わせて建築物の応答値を推定するものである。以下に手順の一例を示す。

- 1) 建築物の静的非線形増分解析を行い、各荷重ステップにおける i 層の床レベルに対する相対変形 δ_i 、 i 層に作用する外力 P_i 、ベースシア Q_B および i 層における質量 m_i を用いて、構造特性曲線 ($S_a - S_d$ 曲線) を次式によって求める。

$$S_a = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i \right)^2} Q_B \quad (1)$$

$$S_d = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i^2}{\sum_{i=1}^N P_i \cdot \delta_i} S_a \quad (2)$$

*1 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 豊橋技術科学大学助教授 工学教育国際協力研究センター 工博 (正会員)

*3 (株)藤木工務店 技術研究所 工博 (正会員)

- (2) 減衰 5% の応答加速度 - 応答変位曲線 (${}_R S_a - {}_R S_d$ 曲線) との交点 (以下, 試行応答評価点という) を基準に接線を引き, 等しいポテンシャルエネルギーを満たす 1 次勾配を描いてバイリニアに近似する。さらに, 構造形式に応じた減衰特性を表す係数 γ_l を用いて, バイリニア上での塑性率 μ に相当する建築物全体の等価粘性減衰定数 h を次式により求める。

$$h = \gamma_l (1 - 1/\sqrt{\mu}) + 0.05 \quad (3)$$

- (3) 想定地震動に対応する加速度応答スペクトルに次式で与えられる減衰補正係数を乗じることにより, 建築物の減衰特性を考慮する。

$$F_h = \frac{1.5}{1 + 10h} \quad (4)$$

- (4) (3) から得られる建築物の減衰特性を考慮した ${}_R S_a - {}_R S_d$ 曲線と(2)から得られるバイリニア近似した構造特性曲線を同一図表上で比較し, その交点から建築物の応答値を得る。

2.2 ATC-40 における評価手順

この方法は図-2 から明らかなように, 基本的な評価手順は限界耐力計算法と同様である。しかし, 等価 1 自由度系への縮約方法, バイリニア近似曲線の作成方法および等価粘性減衰定数の算定方法等が相違点として挙げられる。以下に手順の一例を示す。

- (1) 建築物の静的弾塑性増分解析を行い, ベースシア - 頂部変形関係 ($Q_B - \Delta_{roof}$ 関係), 建築物重量 W , 1 次有効質量比 ${}_1 \alpha$, 1 次の刺激係数 ${}_1 \beta$ および頂部における 1 次のモードベクトル ${}_1 u_{roof}$ を用いて, $S_a - S_d$ 曲線によって求める。

$$S_a = \frac{Q_B / W}{{}_1 \alpha} \quad (5)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{{}_1 \beta \cdot {}_1 u_{roof}} \quad (6)$$

- (2) $S_a - S_d$ 曲線における初期剛性を 1 次勾配とする直線を引き, 等しいエネルギーを満たし, 試行応答評価点 (a_{pi}, d_{pi}) を通る 2 次勾配

を画き, バイリニア近似曲線を作成する。また, 降伏点 (a_y, d_y) および減衰補正係数 κ を用いて次式から建築物の最大応答時の等価粘性減衰定数 β_{eff} (%) を求める。

$$\beta_{eff} = \frac{63.7 \kappa (a_y \cdot d_{pi} - d_y \cdot a_{pi})}{a_{pi} \cdot d_{pi}} + 5 \quad (7)$$

- (3) 加速度一定域, 速度一定域における減衰補正係数はそれぞれ(8)式, (9)式による。

$$SR_A \approx \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad (8)$$

$$SR_V \approx \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (9)$$

- (4) (3) から得られる建築物の減衰特性を考慮した ${}_R S_a - {}_R S_d$ 曲線と(2)から得られるバイリニア近似した構造特性曲線を同一図表上で比較し, その交点から建築物の応答値を得る。

2.3 FEMA273 における評価手順

この方法は, 図-3 に示すように, 耐力スペクトルの等価初期剛性から得られる等価弾性周期と想定地震動に対する弾性応答スペクトルを用

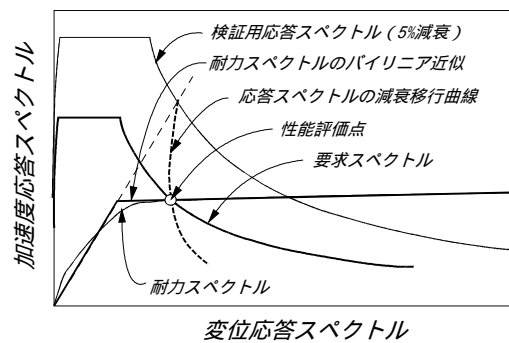


図-1 限界耐力計算法の推定地震応答値

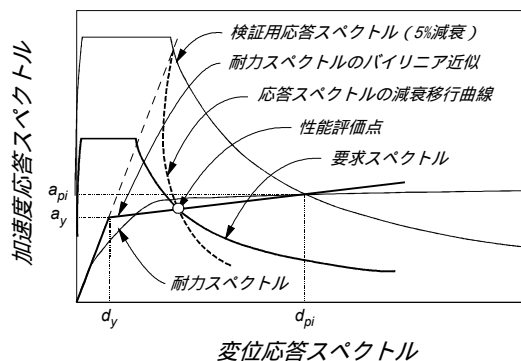


図-2 ATC40 の推定地震応答値

いて弾性応答変形量を求め、建築物の降伏強度と等価弾性周期の関数で与えられる係数を乗じて応答変形量を推定するものである。以下に手順を示す。

- (1) 建築物の静的弾塑性増分解析を行い、ATC-40 と同様にベースシアと頂部変形に関する荷重変形曲線を求める。
- (2) ベースシア - 頂部変形曲線を降伏後の平均剛性から得られる 2 次勾配と、ベースシア $0.6V_y$ に対応する点を通る 1 次勾配とを交差させバイリニア近似曲線を作成する。ただし、本研究ではベースシアと頂部変形に関する荷重変形曲線を ATC-40 の手法により等価 1 自由度系に縮約し、バイリニア近似に変換したものをを用いた。
- (3) 検証用地震波の弾性加速度応答スペクトルに対して、構造特性を考慮した係数を乗じて補正し、次式から建築物頂部における応答変形を求める。ただし、本研究では応答変形量を求める際に、ATC-40 の手法により等価 1 自由度系に縮約した耐力スペクトルを用いるため、補正係数 C_0 を 1.0 として算出した。

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} \quad (10)$$

ここに、

- C_0 : 変位応答スペクトルと建物頂部の変形を関係づける補正係数
- C_1 : 弾性応答で計算された変位に対する最大塑性変位の補正係数
- C_2 : 剛性の低下と最大変位における耐力低下に関する補正係数
- C_3 : 動的 P - 効果による変位増分を表す補正係数
- S_a : 建物の等価固有周期 T_e における加速度応答スペクトル S_a (G)
- T_e : 静的荷重増分解析による等価固有周期

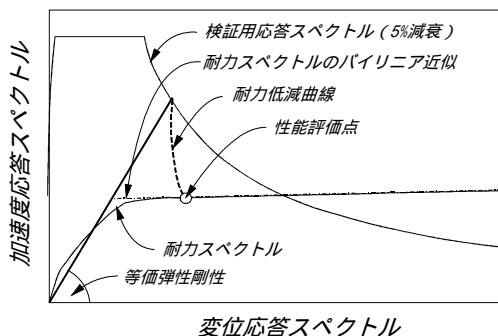


図-3 FEMA273 の推定地震応答値

3. 最大地震応答値の推定

3.1 検討対象建築物

対象とした建築物は、図-4 に示す X 方向および Y 方向ともに 3 スパン (スパン長: 6.0m) の 4 階および 12 階の純ラーメン RC 造骨組で、階高は 1 階で 4.0m、2 階 ~ 最上階まで 3.5m、建

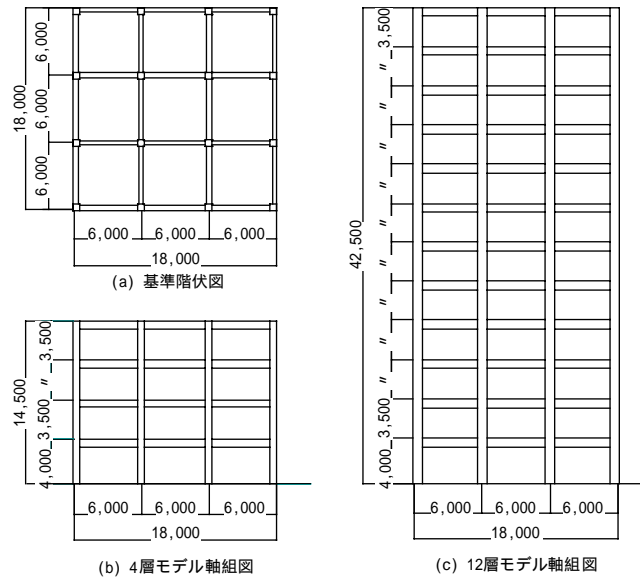


図-4 研究対象建築物

表-1 柱断面配筋リスト

層	階	断面 (mm)	鉄筋		
			C1	C2	C3
4	3~4	600 x 600	16-D25	12-D25	12-D25
	1~2	600 x 600	16-D25	16-D25	16-D25
12	9~12	850 x 850	16-D29	16-D29	16-D29
	8~5	850 x 850	16-D32	16-D32	16-D32
	2~4	850 x 850	20-D35	16-D35	16-D35
	1	850 x 850	20-D35	20-D35	20-D35

表-2 梁断面配筋リスト

層	階	断面 (mm)	引張鉄筋		
			上端筋	一段筋	二段筋
4	4~RF	400 x 700	上端筋	4-D25	-
			下端筋	4-D25	-
	3	400 x 700	上端筋	4-D25	1-D25
			下端筋	4-D25	-
	2	400 x 750	上端筋	4-D25	2-D25
			下端筋	4-D25	1-D25
12	RF	500 x 800	上端筋	4-D25	1-D25
	12	500 x 800	上端筋	4-D25	2-D25
			下端筋	4-D25	-
	11	500 x 800	上端筋	4-D29	1-D29
			下端筋	4-D29	1-D29
	10	500 x 800	上端筋	4-D29	2-D29
			下端筋	4-D29	1-D29
	8~9	500 x 800	上端筋	4-D29	3-D29
			下端筋	4-D29	2-D29
	5~7	500 x 800	上端筋	4-D32	4-D32
			下端筋	4-D32	2-D32
	2~4	500 x 800	上端筋	4-D35	4-D35
下端筋			4-D35	4-D35	

建築物の高さはそれぞれ4層モデルが14.5m, 12層モデルが42.5mである。表-1および表-2に対象建築物の柱断面, 梁断面の配筋リストを示す。

3.2 解析モデル

解析では, 対象建築物が整形であることから, 外側構面と中間構面を抜き出したモデルを設定した。また, 梁は材端バネモデル, 柱はMSモデルにそれぞれモデル化し, 1階柱脚は固定, 同一階の節点は剛床仮定とし, 剛域は部材端からD/4 (D: 部材せい) 入った位置とした。

時刻歴解析では, 入力地震波として慣用されている既往記録地震波 El Centro, Taft, Hachinohe, JMA Kobe および国土交通省建築研究所において作成された建築基準法相当の模擬地震波 (80kine 相当, ランダム位相) を用いた。表-3に本研究で用いた入力地震波を示す。

3.3 最大地震応答値の算定

図-5に限界耐力計算法による4層モデルの最大応答値の算定例を示す。対象とした地震波は El Centro 波の75kineである。図中の印は時刻歴解析において任意の層の変形が最大となった時点の応答値を表している。また, 印は限界耐力計算による応答推定値であり, バイリニア近似から得られる塑性率から等価周期毎の等価粘性減衰定数および減衰補正係数を算定し, 減衰移行曲線を求めることにより得たものである。

図-6に4層および12層モデルに対する静的弾塑性増分解析から得られた各層の層せん断力 - 層間変位関係上に75kineに基準化した El Centro 波に対する時刻歴応答値と各評価法による応答推定値を比較したものを示す。同図における時刻歴応答値は各層において変位応答が最大となる時のものであり, 各評価法による応答値は $S_a - S_d$ 曲線上で得られた応答値を静的増分解析結果に基づいてその荷重ステップに対応

表-3 入力地震波

地震波	方向	25kine	50kine	75kine	原波
El Centro	南北	○	○	○	-
Taft	東西	○	○	○	-
Hachinohe	東西	○	○	○	-
JMA Kobe	南北	○	○	-	○
模擬地震波	-	-	-	-	○

する各層の応答値に変換したものである。

また, 図-7には75kineに基準化した El Centro 波, Taft 波および Hachinohe 波, 並びに JMA 波および模擬波に対する検討結果を一例として示している。同図の縦軸は階数を, 横軸は各耐震性能評価法による各層の応答値を時刻歴応答値で除した比率をそれぞれ表している。

両モデルにおける全体的な傾向として, 以下のことが挙げられる。

すなわち, FEMA273 による推定値は, 時刻歴応答値に対して4層モデルでは良好な対応を示すが, 12層モデルでは地震動レベルが大きくなるにしたがって過大評価となる傾向がある。限

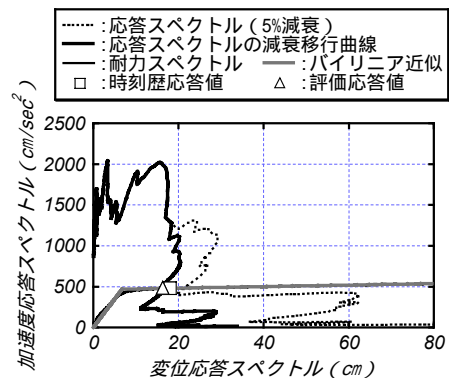


図-5 既往地震波を用いた最大応答値の算定

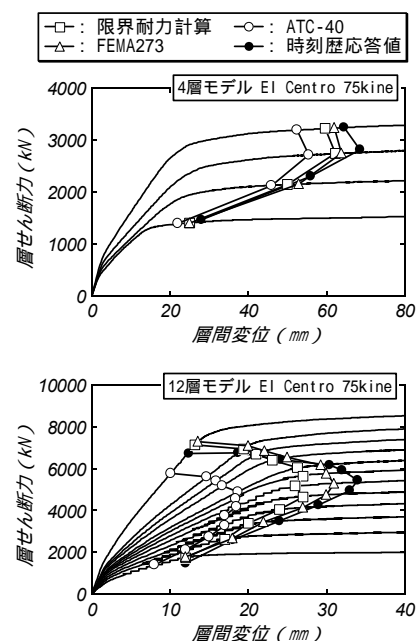


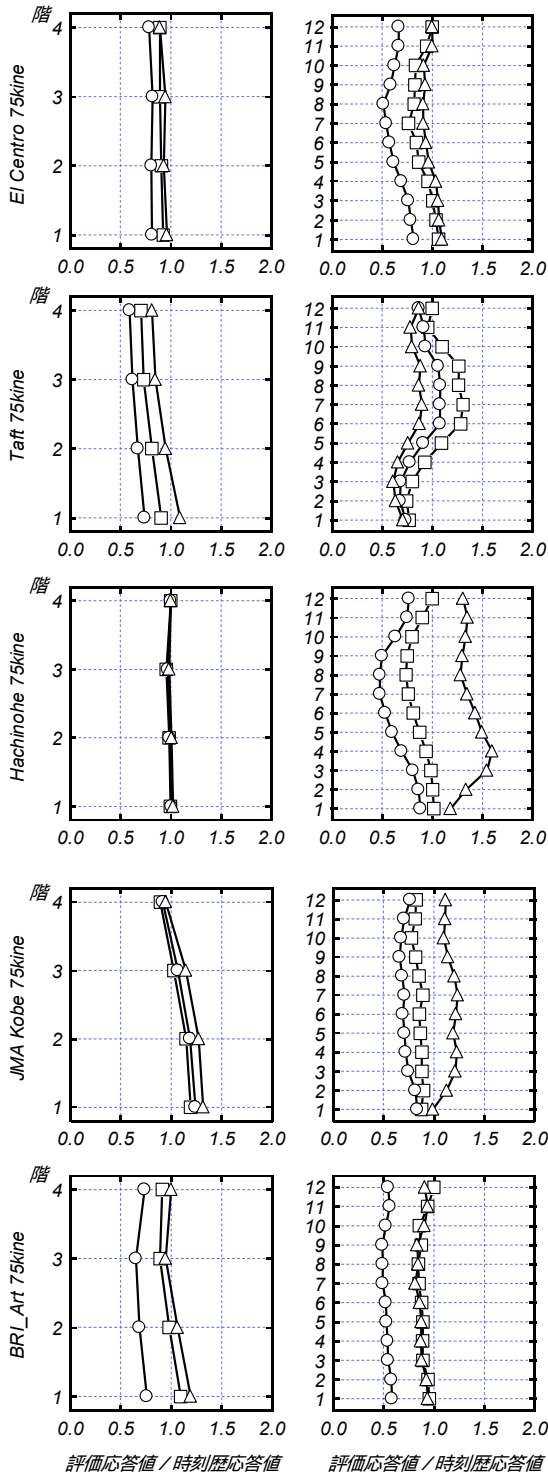
図-6 推定最大地震応答値

限界耐力計算法は、各層において比率1を境にばらつく傾向が認められるが、4層モデルにおけるTaftでは過小評価となっており、また、建築物の高さが高くなるほど、若干ばらつく傾向が

認められた。ATC-40では、全体的に限界耐力計算法よりさらに時刻歴応答値を過小評価する傾向があり、その傾向は建築物高さが高くなるほど顕著に現れてくる。

なお、本研究では実地震波を対象としているため、地震波の特性が応答推定精度に与える影響が懸念される。しかし、図-7に示されるように、地震波に拘わらず時刻歴応答値に対する評価応答値の比率は概ねATC-40、限界耐力計算法、FEMA273の順で大きくなっており、絶対値はともかく、応答推定精度の傾向に対しては影響が少ないものと考えられる。

□：限界耐力計算 ○：ATC-40 △：FEMA273



(a) 4層モデル (b) 12層モデル

図-7 各層の最大地震応答値

4. 地震応答推定精度の比較

4.1 4層モデル

図-8に、耐震性能評価手法による応答値（横軸）と時刻歴応答値（縦軸）との関係を示した。なお、図中には地震応答推定精度の全体的な傾向を示すことを意図して、最小2乗法による回帰直線を併せて示している。

4層モデルに対しては、入力地震動レベルが大きくなるにしたがって、何れの耐震性能評価手法も時刻歴解析に対して最大応答値を若干小さく（すなわち、安全側に）評価する傾向が認められる。時刻歴応答値に対する評価応答値の比率の平均値、変動係数および回帰直線勾配は、

□：限界耐力計算 ○：ATC-40 △：FEMA273
 - - -：回帰曲線（ATC-40） —：回帰曲線（限界耐力計算）
 - - -：回帰曲線（FEMA273）

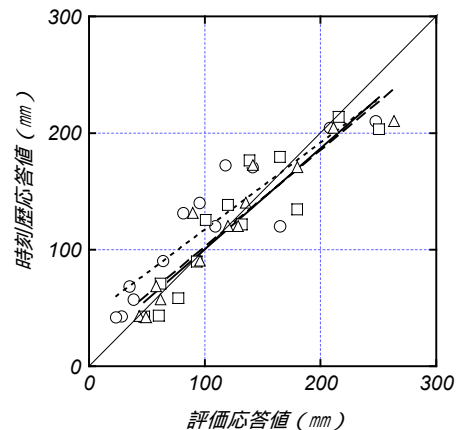


図-8 4層モデルの推定精度の比較

それぞれ限界耐力計算で 1.06 ,19.7%および 0.87 , ATC-40 で 0.80 ,31.8%および 0.75 ,FEMA273 で 1.01 ,14.9%および 0.83 となっている。FEMA273 が最も良好な結果となっているが、限界耐力計算法もほぼ同程度であり、両者は 4 層モデルに対して安定した推定精度を有すると判断できる。

4.2 12 層モデル

12 層モデルに対する検討結果を図-9 に示す。

FEMA273 では、4 層モデル同様に、入力地震動レベルの増加に伴って最大応答値を小さく評価する傾向が認められ、その度合いは 4 層モデルに比して大きい。ATC-40 では、入力地震動の大小に拘わらず、全体的に危険側の評価を与える傾向が認められる。一方、限界耐力計算法では、ATC-40 と同様に全般的に若干危険側の評価となる傾向があるものの、時刻歴応答値との対応は概ね良好なものとなっている。なお、時刻歴応答値に対する評価応答値の比率の平均値、変動係数および回帰直線勾配は、それぞれ限界耐力計算で 0.89 ,12.2%および 1.08 ,ATC-40 では 0.64 ,19.2%および 0.98 ,FEMA273 では 1.01 ,20.3%および 0.63 となっている。

以上の結果より 4 層モデルの場合と同様に、限界耐力計算法および FEMA273 による時刻歴応答値に対する推定精度は良好であると判断できる。

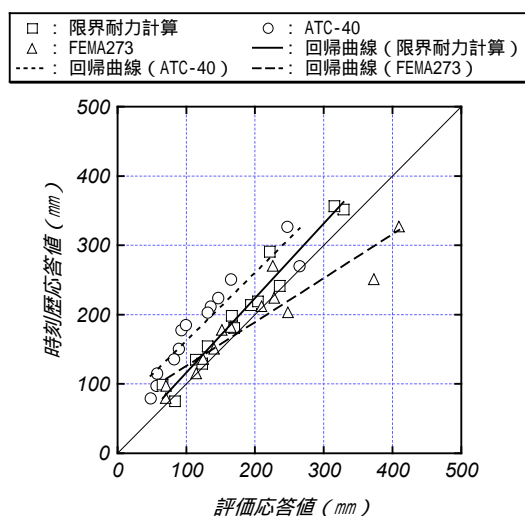


図-9 12 層モデルの推定精度の比較

5. まとめ

本研究では、純フレームで構成される 4 層および 12 層の鉄筋コンクリート造建築物を対象として、限界耐力計算法と米国における代表的な耐震性能評価法である ATC-40 および FEMA 273 との地震応答推定精度の比較検討を行った。

本検討の範囲では、Capacity Spectrum Method に基づく限界耐力計算法と Displacement Coefficient Method に基づく FEMA273 とでは応答推定精度に大差はなく、両者共に検証対象建築物の時刻歴応答値を良好に評価できている。一方、限界耐力計算法と同じ Capacity Spectrum Method に基づいた ATC-40 による応答推定精度は、他の 2 方法に比して劣るものであり、時刻歴応答値に対して危険側の評価を与える傾向がある。なお、限界耐力計算法は他の 2 方法に比べて、地震動レベルおよび建築物高さが推定精度に及ぼす影響が少ない。

以上の点から、限界耐力計算法は、耐震性能評価法として有効なものであると言える。

参考文献

- 1) SEAOC: Vision 2000, Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Structural Engineering Association of California, Sacramento, 1995.
- 2) (社)建築研究振興協会編：建築構造における性能指向型設計法のコンセプト - 仕様から性能へ - , 技報堂出版, 122pp., 2000 年 8 月
- 3) ATC : Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC40), Volume 1, Applied Technology Council, Redwood City, 1996
- 4) FEMA : NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA273), Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 1997
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課, 他 3 団体共編 : 2001 年版, 限界耐力計算法の計算例とその解説, 276pp., 2001 年 3 月
- 6) Shibata, A. and Sozen, M. A. : Substitute structure method for seismic design in R/C, Journal of the Structural Div., ASCE, 102, ST1, pp. 1-18, 1976.
- 7) Freeman S.A. : Prediction of Response of Concrete Buildings to Severe Earthquake Motion, Douglas McHenry International Symposium on Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1978, pp.589-605.