

論文 層崩壊型RC構造物の最大応答変形予測

菊本 衛*¹・向井 智久*²・衣笠 秀行*³・野村 設郎*⁴

要旨：本研究では，地震による入力エネルギーの大部分を特定層で吸収するRC構造物の応答特性を把握すると共に，崩壊層の最大応答変形を簡易的に予測する二つの手法の提案とその精度検証を行った。結果として，崩壊層におけるエネルギー入力と最大応答変形の強い相関性を確認した。また，エネルギー入力速度概念に基づく応答予測手法，及び等価1質点系の地震応答解析による予測手法の精度は各々良好であった。

キーワード：層崩壊，最大応答変形予測，等価1質点系，入力エネルギー量，繰り返し回数

1. はじめに

兵庫県南部地震では層崩壊した構造物が数多く報告¹⁾されており，当該構造物の地震時の挙動，特に最大変形量を把握することは重要であると考えられる。一般に，最大変形量は骨組にモデル化された構造物の地震応答解析から求められるが(図-1 手法1)，より簡易的な手法として強度分布を用いた応答変位予測手法²⁾が提案されている。筆者らも多質点系にモデル化された層崩壊型RC構造物を対象に，等価1質点系の地震応答解析を用いた応答予測手法(図-1 手法2)に関する基礎的検討³⁾を行い，崩壊層の応答予測に等価1質点系を用いる妥当性を確認した。そこで本報では，骨組にモデル化された層崩壊型RC構造物を対象に，その応答特性を把握し，かつ骨組モデルの地震応答解析を行わない簡易的予測手法(図-1 手法2, 3)の提案とその精度検証を行う。

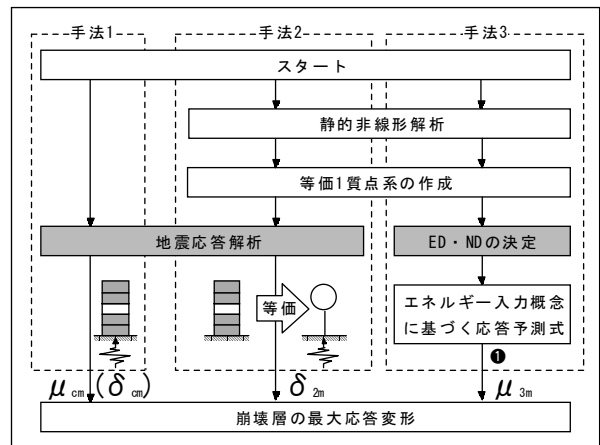
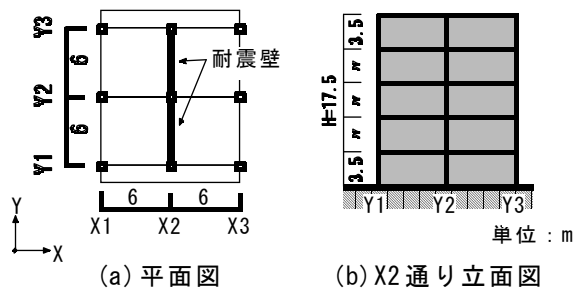


図-1 各応答予測手法の関係



(a) 平面図 (b) X2通り立面図

図-2 解析対象構造物

2. 解析概要

2.1 解析モデル

解析対象は図-2に示すようにX, Y方向共に2スパン(スパン長：6m)の平面で，X2構面に耐震壁を有する5階建てのRC構造物である。柱・壁

表-1 柱および壁の諸元

	コンクリート強度	30N/mm ²
	柱梁主筋	SD345
	壁筋	SD295
	壁厚	200mm
	壁筋	D13@200ダブル

- *1 東京理科大学院 (現 NTTファシリティーズ) (正会員)
- *2 東京理科大学 工学部建築学科 助手 工修 (正会員)
- *3 東京理科大学 工学部建築学科 助教授 工博 (正会員)
- *4 東京理科大学 工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

は全て同断面・同配筋とし、その諸元を表-1に示す。本研究では耐震壁を有するX2構面を取り出し、これを基本モデルとする。次に基本モデルの特定層(1層, 3層, 5層)において耐震壁を取り除いたものを層崩壊モデルとする(図-3)。ここで、耐震壁を取り除いた層は崩壊の可能性が高いことから、以後、「崩壊層」と呼ぶ。なお、本研究で対象とする崩壊層は、入力エネルギーを柱の曲げ降伏によって消費するものである。

2.2 解析手法

解析には李康寧博士の立体骨組解析プログラムCANNY99を使用した。図-4に(a)側柱付耐震壁(以後、耐震壁)と(b)崩壊層の柱のモデル化を示す。

耐震壁は文献4)を参考に側柱を考慮した曲げバネとせん断バネに置換し、軸バネは柱と壁の各々に設ける。なお、曲げバネとせん断バネの各剛性は、側柱を含めたものとし、曲げ耐力は両側柱付壁の曲げ終局強度、せん断耐力は耐震壁のI形断面を等価な長方形断面に置換したときのせん断耐力⁵⁾とする。軸剛性は、引張側において軸方向鉄筋の引張降伏による剛性低下を考慮したBi-linear型とし、圧縮側は弾性とする。なお、耐震壁に取り付く梁は剛梁とする。

崩壊層の柱は、曲げバネ、せん断バネ、軸バネを有する線材に置換する。軸バネは側柱と同様に設定し、せん断バネは弾性とする。また、曲げバネはひび割れ点の有無が層の最大変形に及ぼす影響が小さいと考え、図-5に示すBi-linear型とする。なお、同図中の K_c は鉄筋を考慮した初期剛性に降伏時剛性低下率を0.3として求めた降伏時剛性で、 M_y は曲げ終局強度⁵⁾である。ただし、崩壊層の最大変形量をパラメータとするために、 M_y 及び K_c に低減係数 β を乗じて変化させている(図-5)。

静的非線形解析では、 A_i 分布に基づく外力分布を用いる。地震応答解析では、最大速度50[cm/sec]に基準化したEl Centro NS(1940年Imperial Valley地震)、Kobe NS(1995年兵庫県南部

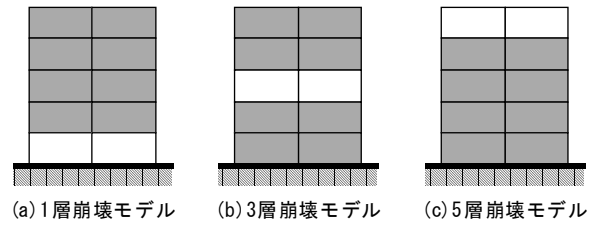


図-3 層崩壊モデル

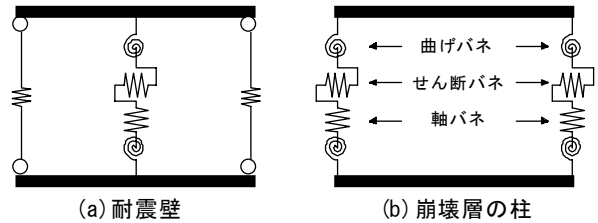


図-4 柱・梁・壁のモデル化

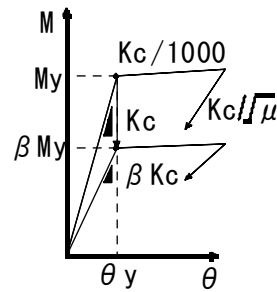


図-5 柱の曲げバネ

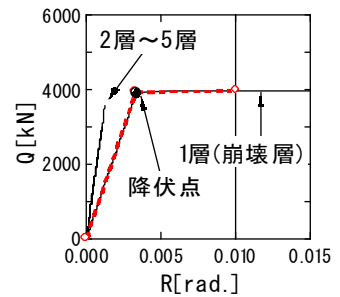


図-6 Q-R関係

地震神戸海洋気象台記録), Taft EW(1952年Kern Country地震)の3波(以後, ELCE50, KOBE50, TAFT50)を用いる。なお、本研究では構造物の減衰を考慮していない。また、地震応答解析の結果、崩壊層の曲げバネのみ降伏し、それ以外のバネは降伏しないことを確認している。

3. 層崩壊モデルの応答特性

3.1 静的非線形解析

図-6に静的非線形解析より得られた層崩壊モデルの層せん断力 Q と層間変形角 R の関係の一例(1層崩壊モデル)を示す。この図より変形は崩壊層に集中し、他の層の変形は小さいことがわかる。また、崩壊層は柱頭・柱脚の曲げ降伏により崩壊型が形成されるため、層の復元力特性がBi-linear型となる。ここで、層の降伏点を図-6中の●印で示し、初期剛性と $R=1/100$ における接線剛性の交点と定義する。後述する崩壊層の降伏耐力(せん断力係数)及び崩壊層の塑性率はこの降伏点に基づき算出している。なお、

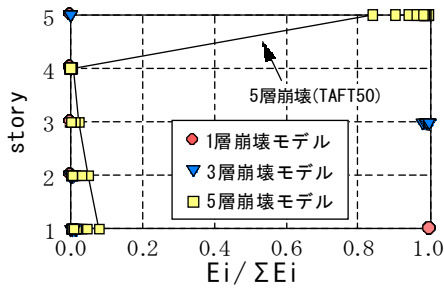
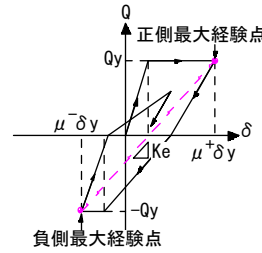


図-7 エネルギー吸収分布

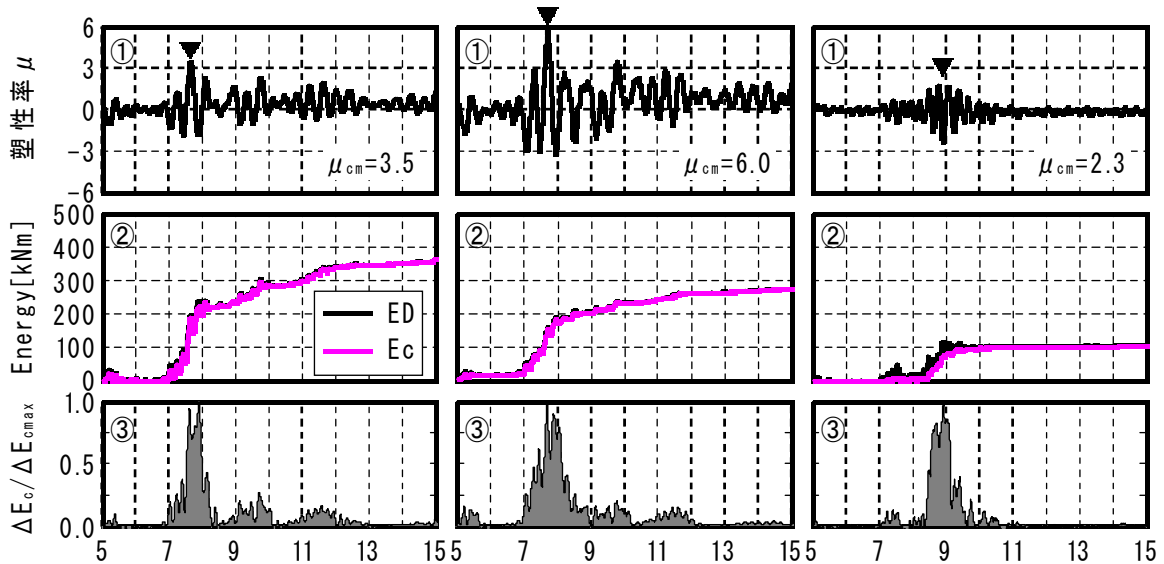


$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_e}} = T_{ey} \cdot \sqrt{\mu_a} \quad \text{式1}$$

$$\mu_a = \frac{|\mu^+| + |\mu^-|}{2} \quad \text{式2}$$

Ke : 等価剛性
M : 1質点系の質量
μa : 平均塑性率

図-8 等価剛性Keと等価周期Te



(a)1層崩壊モデル $T_{ey}=0.31s$ (b)3層崩壊モデル $T_{ey}=0.30s$ (c)5層崩壊モデル $T_{ey}=0.31s$

図-9 応答変形と ΔE_c の時刻歴

崩壊層が3層，5層の場合も同様に崩壊層に変形が集中し，層崩壊型が形成された。

3.2 弾塑性地震応答解析

3.2.1 エネルギー吸収分布 図-7に層崩壊モデルのエネルギー吸収分布を示す。横軸は地震終了時における各層のエネルギー吸収量Eiを全エネルギー吸収量ΣEiで除した値である。この図より，一部5層崩壊モデルにおいて，崩壊層以外の層(1, 2層)がエネルギーを吸収しているものの，全体的として入力エネルギーの大部分を崩壊層で吸収していることがわかる。従って崩壊層の吸収エネルギー量Ecと層崩壊モデルへの入力エネルギー量はほぼ等しいと考えられる。

3.2.2 等価周期Teの定義 一般に，建造物の周期は塑性化に伴って伸びることが知られており，筆者らは1質点系において，伸び周期(以後，等価周期Te)を図-8中式1のように等価剛性Keを用いて定義している⁹⁾。しかし，本論文で

対象とする層崩壊モデルは，崩壊層のみが柱の曲げ降伏によって塑性化する多層構造物であるため，崩壊層のKeと他層の初期剛性を用いた固有値解析から得られる1次固有周期を，層崩壊モデルの等価周期Teと定義する。

3.2.3 エネルギー入力と最大応答変形 図-9に崩壊層における①応答変形(塑性率μ)の時刻歴と②入力エネルギー量ED(=ΣEi)と崩壊層の吸収エネルギー量Ecの時刻歴及び③単位時間ΔT当たりの吸収エネルギー量ΔEcの時刻歴の例(KOBE50, 降伏時周期Tey=0.3s)を示す。③のΔEcはその最大値ΔEcmaxで基準化している。また，単位時間ΔTは等価周期Teを用いている。②よりEDとEcは時刻歴においても等しいことがわかる。また，①②③より崩壊層の位置によらず，瞬間的なエネルギー入力と最大応答変形に強い相関があることがわかる。これは1質点系と共通する応答特性⁹⁾であることから，1質点系と同

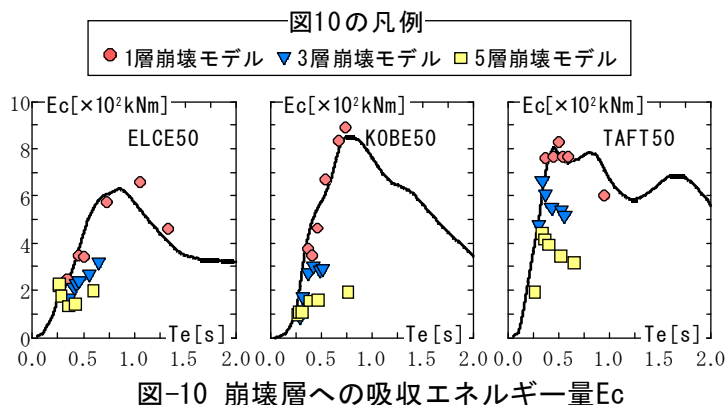


図-10 崩壊層への吸収エネルギー量Ec

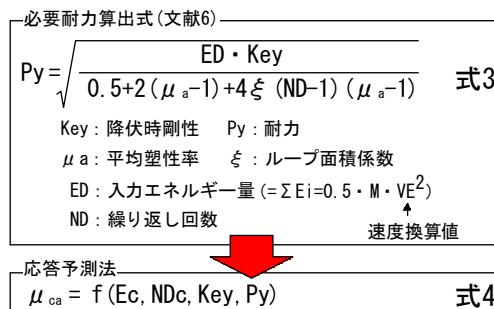


図-11 必要耐力算出式とその応用

様に、エネルギー入力速度概念に基づく崩壊層の応答予測が可能であると考えられる。

3.2.4 エネルギースペクトル 図-10に崩壊層の吸収エネルギー量Ecを地震動別に示す。縦軸はEc、横軸は等価周期Teである。ただし、図-7よりEcと層崩壊モデルへの入力エネルギー量はほぼ等しい。また、図-10には層崩壊モデルの全質量を有する1質点系の弾性応答解析(減衰20%)から得られる入力エネルギー量スペクトル(以後、弾性スペクトル)を実線で示す。一般に構造物への入力エネルギー量は、その全質量と1次固有周期を有する1質点系の入力エネルギー量とほぼ等しい⁷⁾と考えられており、1層崩壊モデルのEc(○印)は弾性スペクトルとの相関性が認められる。しかし、3層、5層(▽□印)が崩壊する場合には、弾性スペクトルより小さい値となっている。したがって、Ecは、崩壊層の位置により変動することがわかる。

4. 応答予測手法の提案と精度検証

4.1 必要耐力算出式とその応用(図-11)

筆者らは、1質点系にモデル化されたRC構造物を対象に、エネルギー入力速度概念に基づく設計手法⁶⁾を提案している。その手法は、地震動を入力エネルギー量ED(=ΣEi)と繰り返し回数NDで表し、構造物の変形量(平均塑性率μa(図-8))をある値以下にするための必要耐力を算出するもので、図-11の式3で表される。そこで、式3をμaについて解き(図-11の式4)、これを崩壊層の応答予測に応用する。ただし、式4中のμcaは崩壊層の平均塑性率、Ecは崩壊層の

吸収エネルギー量、NDcは崩壊層の繰り返し回数を示す。また、本論で扱う層の応答変形量(塑性率等)は崩壊層の床面に対する垂線より計測した層間変形角に階高を乗じたもので、下層の軸変形分を取り除いたものである。

4.2 エネルギー入力速度概念に基づく

応答予測(図-11)

通常、EcとNDcは等価周期Teと弾性スペクトルを用いて簡易的に決定するが、ここでは式3が崩壊層の応答予測に応用できるか否かを確認するため、応答値Ec・NDc・μcaを式3に代入して必要耐力を算出し、これと崩壊層の降伏耐力を比較する。図-12に式3の予測精度を地震動及び崩壊層別に示す。■が崩壊層の降伏耐力を支持重量で除したせん断力係数Ccと崩壊層の最大塑性率μcmの関係(応答値)を、□が式3より推定したPyを支持重量で除した値とμcmの関係(推定値)を示す。この図より、エネルギー入力速度概念を用いて、崩壊層の応答を予測することは非常に有効であることがわかる。

4.3 手法3の提案と精度検証

図-13にエネルギー入力速度概念に基づく崩壊層の最大応答変形予測手法のフローを示す。本手法は、等価1質点系の作成と応答予測の2部構成となっており、その予測精度はEcとNDcの値に大きく左右される(図-13中⑧⑨)。既往の研究において、1質点系の弾塑性応答時におけるEDとNDは、弾性スペクトルから予測可能であることが示されている⁶⁾が、本論では4.3.1で等価1質点系の作成手法を示し、4.3.2で層崩壊モデルと等価1質点系の弾塑性地震応答解析から

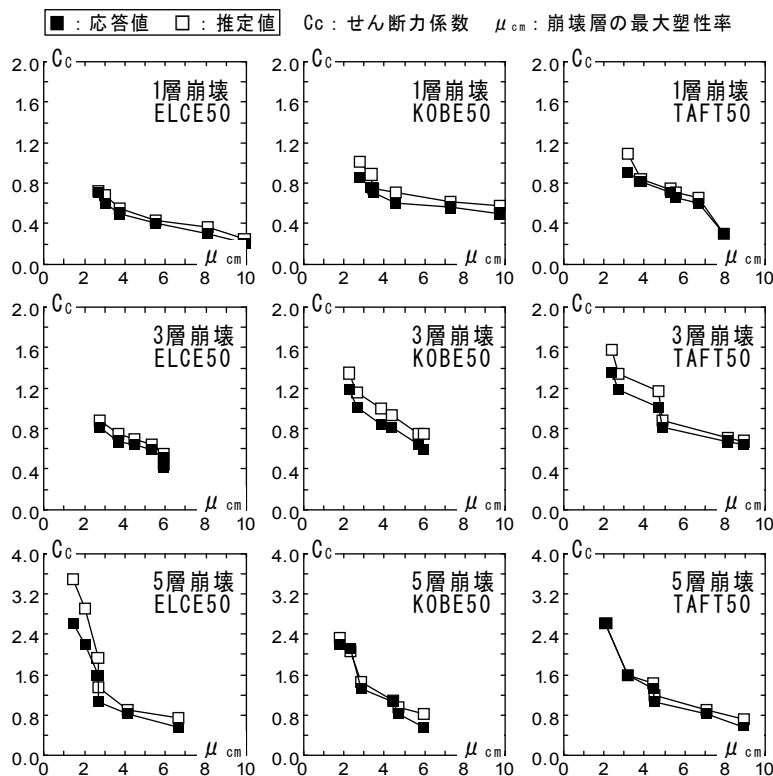


図-12 式3の推定精度

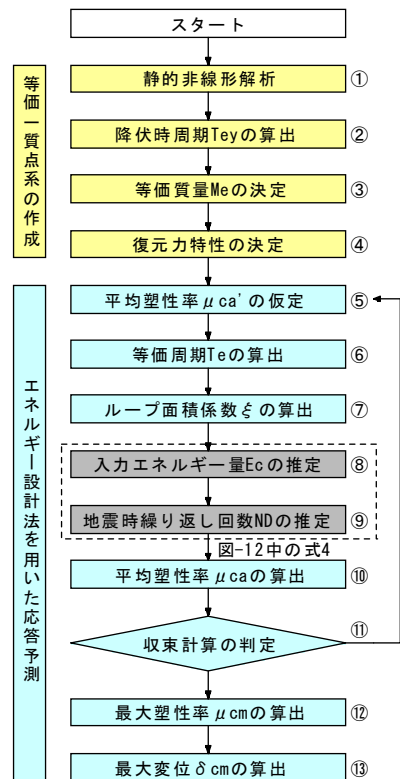


図-13 手法3の詳細なフロー

得られる各々の入力エネルギー量の速度換算値 VE_c と VE_s の関係と、各々の繰り返し回数 ND_c と ND_s の関係について示す。さらに、4.3.3で VE_s と ND_s を式4に代入して、手法3(図-13)の精度検証を行う。なお、 E_c を VE_c に換算する際の質量は、崩壊層の支持質量 M_c を用いている(図-14中式5)。

4.3.1 等価1質点系の作成手法(図-14) 文献3)では、等価1質点系を作成する際の等価条件として、層崩壊モデルの降伏時周期 T_{ey} と崩壊層のせん断力係数 C_c (文献3)中の C_{eq} が重要であることがわかっている。そこで本報では、 T_{ey} と C_c 及び崩壊層の降伏時剛性 Key を用いて等価1質点系を作成する(図-14)。ここで T_{ey} は静的非線形解析において崩壊層が降伏した際の各層の割線剛性(下層の軸変形分を考慮した割線剛性)を用いた固有値解析より得られる1次固有周期とする。また等価質量 M_e は式6を、降伏耐力 Q_y は式7を用いて算出する。なお、本研究では静的非線形解析より Key と C_c を得ているが(図-13①)、各値は降伏時剛性低下率と柱の剛性及び耐力から簡易的に求めることができると考えられる。

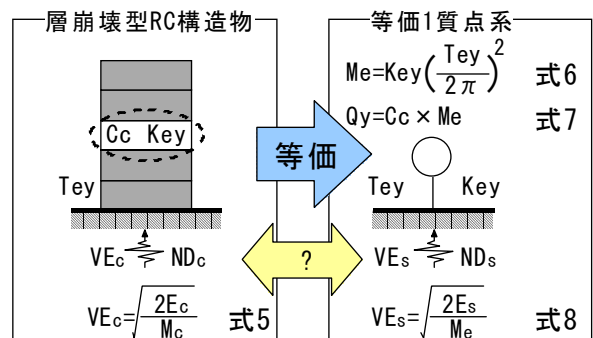


図-14 等価1質点系の作成方法(手法2, 3)

4.3.2 VE_c と VE_s の関係及び ND_c と ND_s の関係

図-15に VE_c と VE_s の関係を、図-16には ND_c と ND_s の関係を地震動別に示す。図-15より5層崩壊モデルを除き、 VE_c と VE_s には相関が認められ、図-16よりELCE50, KOBE50では ND_c と ND_s にも相関が認められる。これより、提案した等価1質点系が崩壊層(1層または3層)の VE_c と ND_c を予測する際に有効であることがわかった。ただし、崩壊層が1, 3層の場合に、崩壊層と等価1質点系の時刻歴応答変形における位相は一致したが、5層崩壊モデルでは一致しないことを確認している。したがって、5層崩壊モデルにおけるばらつきは、5層崩壊モデルの挙動を等価1質点系が表現できないことが原因であると考えられる。

4.3.3 VE_s・ND_sを用いた手法3の精度検証

図-13⑧⑨においてVE_s・ND_sを用いた手法3(図-1)の精度検証を行う。なお、手法3における最大塑性率(図-13中⑫)は、崩壊層の平均塑性率に、崩壊層の片寄り係数⁶⁾の応答値d_cを乗じて算出している。ここで、d_cとは崩壊層の最大塑性率μ_{cm}を崩壊層の平均塑性率μ_{ca}で除した値である。図-17に応答値μ_{cm}と予測値μ_{3m}の関係を示す。この図より、予測精度は概ね良好であることがわかる。ただし、前述したように5層崩壊モデルに対する等価1質点系は、5層崩壊モデルの挙動を適切に表現したいないため、等価1質点系の作成手法について検討の余地がある。

4.4 手法2の提案と精度検証

4.3.1で提案した等価1質点系を用いて手法2(図-1)の精度検証を行う。図-18に応答値δ_{cm}(崩壊層の最大変位)と予測値δ_{2m}(等価1質点系の最大変位)の関係を示す。この図より、最大変位が大きい5層崩壊モデルを除き、予測精度は概ね良好であることがわかる。

5. まとめ

本論文では、骨組にモデル化された層崩壊型RC構造物の地震応答解析を行い、その応答特性を把握した。また、骨組の地震応答解析を行わない手法として、二つの簡易的応答予測手法の提案(手法2と手法3)とその精度検証を行った。

結果として、3章では崩壊層が入力エネルギーの大部分を吸収していることと、崩壊層におけるエネルギー入力と最大応答変形に強い相関があることが確認された。4章では、エネルギー入力速度概念に基づく手法3と、等価1質点系の地震応答解析による手法2の各々の予測精度はほぼ良好であることがわかった。

以上の結果より、4.3.1で提案した等価1質点系は、手法3において崩壊層の入力エネルギー量の速度換算値VE_cと繰り返し回数ND_cを予測する際に有効であり、かつ手法2において崩壊層の最大変位δ_{cm}を予測する際に有効であることがわかった。今後は、建物階数が多いモデルや、

図15～18の凡例

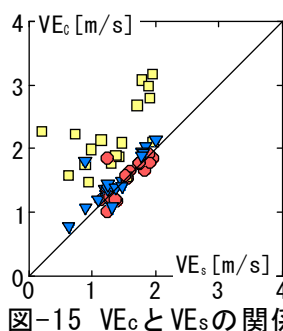
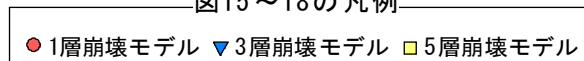


図-15 VE_cとVE_sの関係

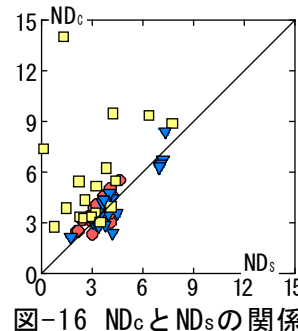


図-16 ND_cとND_sの関係

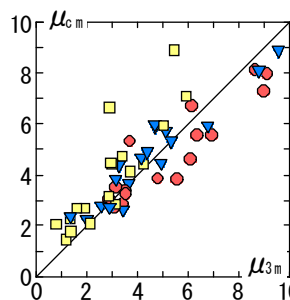


図-17 手法3の精度

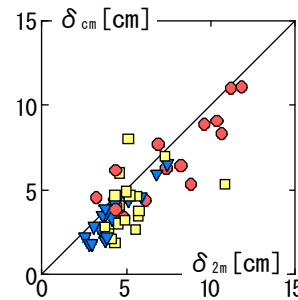


図-18 手法2の精度

変動軸力を考慮できるMSモデルを用いた検討が必要である。

謝辞 解析には李康寧博士の立体骨組解析プログラムCANNY99を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1)日本建築学会：阪神・淡路大震災と今後のRC構造設計，1998.10 2)神林宏之，市之瀬敏勝，花井伸明：層降伏型建物の応答変位予測型耐震診断法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.3，pp.1363-1368，2000.3 3)菊本衛，向井智久，衣笠秀行，野村設郎：層崩壊型RC構造物の最大応答変形予測に関する基礎的研究-崩壊層と等価1質点の関係-，構造工学論文集，Vol.47B，pp.503-510，2001.3 4)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999 5)日本建築防災協会：2001年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説，2000 6)向井智久，衣笠秀行，野村設郎：地震動を受けるRC構造物の限界応答変形量を保証するに必要な耐力算出法とその精度検証，日本建築学会構造系論文集，第532号，pp.137-143，2000.6 7)秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，p.41，1999