

論文 エネルギー入力速度概念に基づくRC造ピロティ建物の設計手法

向井智久^{*1}・衣笠秀行^{*2}・野村設郎^{*3}

要旨：本報では、地震動の入力特性と構造物の損傷に基づいた1スパンピロティ建物の設計手法の提案及びその手法の精度検証を行う。提案する設計手法は、対象とするピロティ建物から等価な1質点系を作成し、ある変形量を保証する1階柱耐力を決定する。その際、ピロティ層の柱は変動軸力を受け、圧縮柱が層せん断力を大きく負担することも別途検討する。また1階ヒンジ柱と1質点系との挙動の相関性も併せて示す。

キーワード：1質点系，エネルギー入力速度概念，ピロティ建物，ヒンジ柱挙動

1. はじめに

RC造ピロティ建物は、建築計画上多く建設される。しかしながら、構造上明らかに変形が集中する形式であり崩壊機構としても層崩壊型になるものと考えられる。これまでの地震被害においても、ピロティ建物が層崩壊に至る例が多く、設計時に十分考慮される必要性がある。考慮される点として第一に、想定している地震動に対して、ピロティ層の応答変形が設計限界変形内に保証されているかである。第二に、想定している地震動の繰り返し作用によって損傷を受ける1階柱の変形性能が保証されているかである。

ピロティ層の応答変形予測に関する既往の研究は近年少くない。ピロティ層の強度と他の層の強度比に着目しピロティ層の変形を制御する手法を提案した研究¹⁾、強度比に着目しピロティ層が片側でエネルギー吸収するものとしてピロティ層の応答を予測した研究²⁾、引張柱が降伏する際のピロティ層の剛性に応じて変形量推定の可能性を示唆した研究³⁾がある。またピロティ建物を1質点系に置換して、その1質点系とピロティ層との応答の関係を比較し、ピロティ建物の設計に反映させようとする研究⁴⁾などがある。

筆者らはこれまでに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を用いて、入力地震動に対して建物の変形量を保証するに必要な耐力の算出方法の提案及びその妥当性の確認⁵⁾を行った。また、ピロティ層と1質点系との相関性を示し、本手法をピロティ建物に適用することの妥当性を確認している⁶⁾。そこで本論ではピロティ建物が設計用地震動に対して応答変形量を保証できる設計手法の提案を行い、手法の妥当性を検証する。また、本手法は地震時の繰り返し挙動を考慮しているため、1階柱の繰り返し変形に対する損傷を把握する目的で1質点系との相関性を検討する。最後に、柱の変動軸力による曲げモーメントの変動を考慮できるMSモデルにおいても検討を行っている。ただし、本論で扱う1階柱部材は柱頭柱脚に曲げヒンジが発生してメカニズムに達するものを対象としており、他の破壊モード（せん断破壊等）は想定していない。

2. 解析モデルとパラメータ

解析対象とした建物は、梁間方向が11mの1スパン、桁行方向が6mの6スパンの5、10層建物で、解析対象は1層がピロティ層、2層以上が連層耐震壁となる梁間方向1スパンの平面フレ

* 1 東京理科大学助手 理工学部建築学科 工修 (正会員)
 * 2 東京理科大学助教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)
 * 3 東京理科大学教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)

ームである (図-1)。1層の柱部材断面は5層で700×700, 10層で900×900[mm]としている。2層以上の柱断面は1層と同断面を用い, 耐震壁厚は200 mm, 使用コンクリートは5層モデルは全層30, 10層モデルは1層で40, 2層以上で30 N/mm²を用いる。なお, これら建物の部材断面は文献4)を基に設定した。また1階の柱は 4 章にて材端剛塑性バネモデル (以後, 材端バネモデル) を, 5 章にて変動軸力によるモーメントの変動を考慮できる MS モデルを用いる。

ピロティ層の柱のモデル化について, 材端バネモデルの曲げバネは bi-linear とし, せん断バネは弾性とする。軸剛性は, 引張側は鉄筋降伏による剛性低下を表した bi-linear 型, 圧縮側は RC の剛性を有し弾性とした。

MS バネに使用するコンクリート, 鉄筋の復元力特性は文献7)に示されていたものを一部変更して用いている (図-2, 図-3参照)。コンクリートバネは圧縮側において, 圧縮強度 F_c の1/3で剛性低下し, 圧縮強度 F_c 以降は耐力低下するモデルとし, コアコンクリートでは降伏後の応力度低下率 λ を0.9とし, かぶりコンクリートでは0.7とする。鉄筋バネは tri-linear とし, 降伏歪みを $3.0d_{sy}$ (d_{sy} : 鉄筋の降伏変位)としている。MS バネの塑性ヒンジ領域長さは, 曲げの初期剛性が $6EI/L$ (E : コンクリートのヤング係数, I : 鉄筋を考慮した柱の断面2次モーメント, L : 柱のクリアスパン)となるように設定する (本論においては0.5D から1.0D の範囲となっている, D : 柱せい)。

2層以上の耐震壁は付帯柱も含めて曲げ剛性, せん断剛性を求め, 軸剛性は壁と付帯柱を個別に設定し, 壁に付帯する梁は剛とする。

入力地震動は, 実地震動を用い EL Centro-NS 成分, JMAKOBE-NS 成分, TAFT-EW 成分, H ACHINOHE-NS 成分の計4波を原波及び50kine (5 章では50kine のみ) に規準化したものを用いる。また建物の減衰種類は瞬間剛性比例とし, 減衰定数は0及び5%とする。以上の解析を CA NNY99[®]で行う。

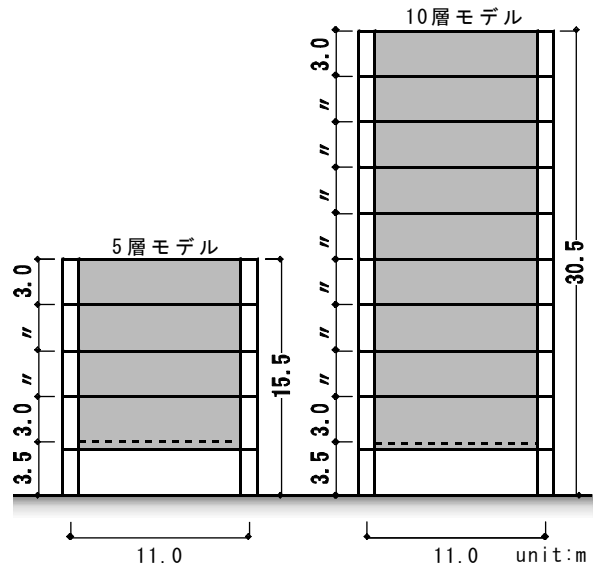


図-1 解析建物軸組図

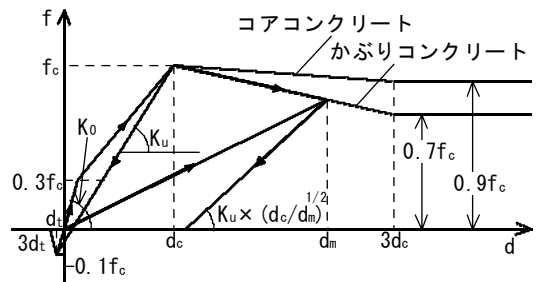


図-2 コンクリート材料特性

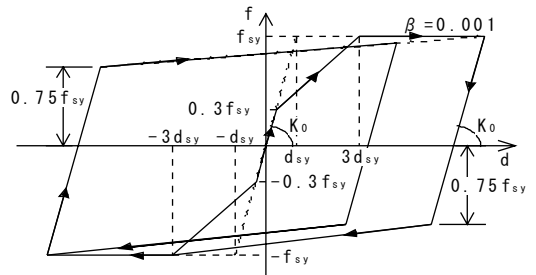


図-3 鉄筋材料特性

3. ピロティ建物設計手法

本論で対象とする建物は, 2層以上はほとんど損傷が生じないため, 変形が集中するピロティ層のみの設計手法について述べる。

図-4に本手法の基本概念を示す。本手法手順は, まずピロティ層を1質点系にモデル化する (縮約)。次に地震動と1質点系の変形量 (損傷) に応じた必要な耐力を決定し, その耐力から1階柱の耐力を決定する (展開)。さらに, その設計された1階柱は大きな軸力とせん断力

に加え、地震時特有の繰り返し挙動を受けることが想定されるため、それらに対する設計が適切に行われるよう1階柱部材の繰り返し下における損傷に対する設計を行う。

上記の設計手順において問題となるのが、

- ①簡易1質点系の作成（縮約）方法
- ②簡易1質点系の必要な耐力算出方法
- ③簡易1質点系により算出された耐力をピロティ層へ適用する方法（展開手法）
- ④1階柱部材の繰り返し下における損傷把握についてである。上記の各項目に対して以下で検討を行う。

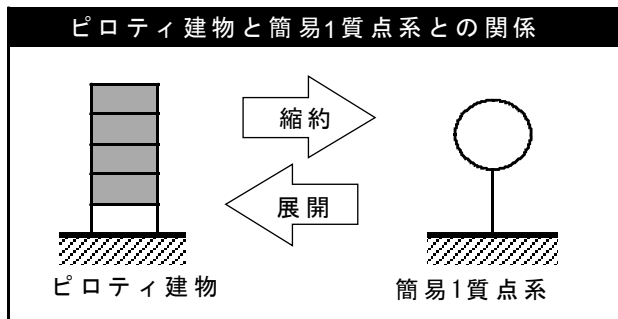


図-4 基本概念図

3-1 ①簡易な1質点系作成（縮約）方法

本論で1質点系を用いる理由は、ピロティ層の地震時の応答を簡便に把握するためである。地震時ピロティ層のエネルギー応答はピロティ層降伏時周期及び降伏耐力に大きく依存するものと考えられるため以下に示す方法で1質点化を行うこととする。

まず、ピロティ建物の層数、部材断面から重量及び初期剛性を決定する。次に、ピロティ層の降伏時剛性低下率（本論では0.3）を仮定し、ピロティ層降伏時周期 T_{ey-p} を固有値解析より算出する。また、1質点系の降伏時剛性はピロティ層の降伏時剛性 $Key-p$ を直接用いる。次に T_{ey-p} 及び $Key-p$ から、質量 M_1 を以下の式により算出する。

$$M_1 = \frac{T_{ey-p}^2 \cdot Key-p}{4\pi^2} \quad (1)$$

3-2 ②簡易1質点系の必要な耐力算出方法

筆者らは、既報において1質点系にモデル化

されたRC構造物を対象としてエネルギー入力速度概念に基づき、地震時にある変形量を保証するために必要な耐力の算出方法を示し、その妥当性を確認している。その算出法は、地震動の威力をエネルギー入力量及び繰り返し数で捉え、地震動のエネルギー入力量と構造物のエネルギー吸収量との釣り合いから、必要耐力 Py_1 の算出式を導いている。

$$Py_1 = \sqrt{\frac{ED \cdot Key}{0.5 + 2(\mu_{ave} - 1) + 4\xi(ND - 1)(\mu_{ave} - 1) + 2\pi h \mu_{ave} ND}} \quad (2)$$

ただし、ED:エネルギー入力量、Key:降伏時剛性
 μ_{ave} :平均塑性率、 ξ :ループ面積係数
 ND:繰り返し数、h:減衰定数

式中、エネルギー入力量 ED 及び繰り返し数 ND は減衰20%のスペクトルから推定し⁵⁾、降伏時剛性は $Key-p$ を用いている。平均塑性率は正負の最大塑性率の平均値である。ピロティ建物を1質点化する際、1質点系の減衰定数 h の設定手法が確立していないが、ここでは簡易的に対象となるピロティ建物と同じ値とする。

3-3 ③簡易1質点系により算出された耐力をピロティ層へ適用する方法（展開手法）

前項で得られた1質点系における Py_1 を、ピロティ層の降伏耐力 $Py-p$ とする。1階の柱が基礎固定及び2階の剛な梁と接続される条件から反曲点位置を考慮して、1階の Myc_1 を以下のように算出する。

$$Myc_1 = (Py-p \cdot H/2)/2 \quad (3)$$

ただし、Hは内法高さ

3-4 ④1階柱部材の繰り返し下における損傷把握

前節までの手法で、1階柱の耐力を決定することで想定した地震動に対してある変形量を制御可能である。しかしながら、1階柱はヒンジ部材で、かつ繰り返しによる大変形を受けエネルギーを吸収することで大きな損傷となることが予想される。過去の実験的研究においても、1方向載荷される柱部材と繰り返しを受けるそれとは変形性能が明らかに異なっており、ピロティ建物の設計時において想定した地震動に対

して1階柱部材が繰り返し下において損傷を受けているかを把握することは設計上有効な指標になると考えられる。そこで柱部材の繰り返し耐荷設計手法概念を示す(図-5)。この概念は、ヒンジ柱にどの程度の繰り返し変形が作用するかと、その作用に対して変形性能を保持できるかの両者を満足しなければならないが、本論では前者に重点を置いて以下に述べる。

まず前項までにピロティ層の最大層間変形は推定されているため、1階柱の最大回転角も把握(図-5左上)できる。次に、先ほど作成した簡易1質点系から1階柱の塑性時の正負の片寄り(正負の最大変位の比率)量(図-5左上)を直接動的解析から算出もしくは推定⁹⁾することで、柱部材の振幅 θ_p (図-5右上)が得られる。一方、地震動の威力を繰り返し数として捉えているため、直接繰り返し挙動を表現できる。本手法においては繰り返し数NDは、スペクトル(図-5左下)から求められるため、構造物の周期や塑性化する点が考慮されている。そこで、ND及び応答振幅 θ_p (繰り返し作用)は明確になるため、その作用に対して柱部材の変形性能が保たれていれば繰り返し耐荷設計が行われたこととなる。例えば作用が既知の段階で変形性能の確認は部材実験によって行えるが、簡易的に設計で用いるには図-5右下に示す定量的な関係を今後の研究で検討する必要がある。

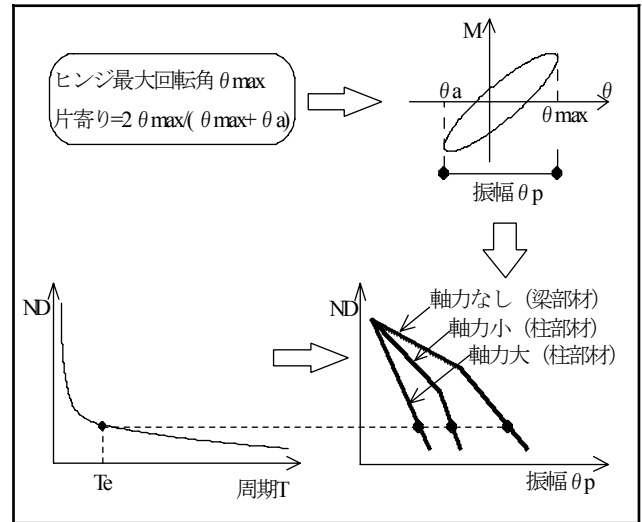


図-5 繰り返し耐荷設計概念図

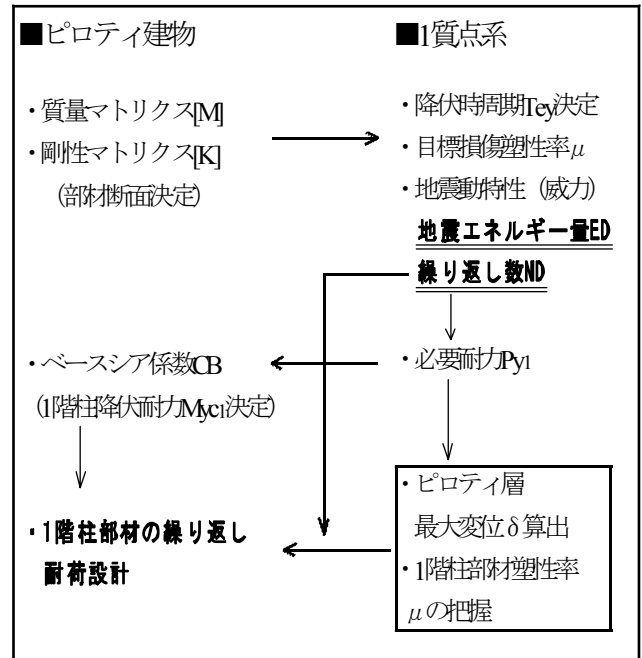


図-6 ピロティ建物設計フロー

3-5 設計フロー

図-6に本手法のピロティ建物の設計フローを示す。1質点系を設計過程に用いることで地震動特性を直接考慮して、部材耐力を決定する点や、繰り返し数を地震動の威力として考えるため部材の繰り返し耐荷設計を簡易的に行える点も本手法の特徴として挙げられる。

また図-7に示すように、ある設計用地震動に対してピロティ層の塑性率を定めて設計されたピロティ建物が、他の地震動においてどの程度の損傷となるかについて式2を介して確認することも可能であることから本手法の有用性が示された。

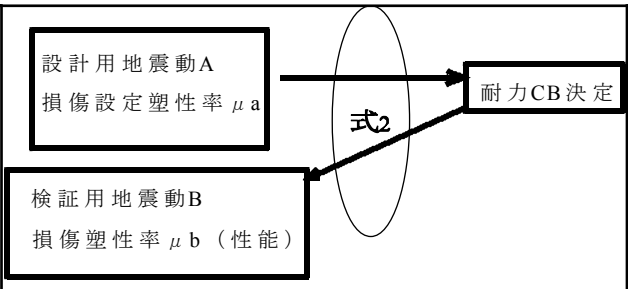


図-7 簡易な性能確認

4. 本設計手法の妥当性の検証

3章で示した手法を基に2章で示した材端バネでモデル化された建物を用いて本手法の妥当性を検証する。

図-8に、横軸に目標設定塑性率を縦軸にピロティ層の平均塑性率を、層数、減衰及び地震動別に示す。目標設定塑性率が5以上となるとピロティ建物の応答塑性率の方が小さい。既報において5%減衰の弾性エネルギースペクトルからの予測が精度が高いこと⁵⁾及び減衰が5%以上であればエネルギースペクトルの大きな違いはないこと¹⁰⁾から、非線形時の繰り返し数を弾性スペクトルから算出する際の精度に問題があると考えられ、繰り返し数スペクトルの減衰依存性が強いことを示唆している。しかしながら全般的にどの地震動に対しても設定塑性率に応じたピロティ層の変形が発生しており、本手法を用いることで設計用地震動に対して変形制御が可能としていることが確認された。

図-9は横軸にピロティ層の、縦軸に簡易1質点系の平均塑性率を減衰及び地震動別に示す。ピロティ層の平均塑性率が簡易1質点系で精度良く表せることが分かる。このことから3章で示した(3-1, 2, 3)手法の妥当性が確認され、設計用地震動の威力を既知とすれば最大応答変形は精度良く推定できることを示している。また、図-10にはピロティ層と簡易1質点系の時刻歴応答変位の一例(EL原波10層減衰5%)を示す。図から位相がほぼ一致していることより片寄り量の相関性が高いことが予想され、最大塑性率も精度良く表せるものと思われる。このことは他のケースにおいても同様の結果が得られた。また、1階柱の時刻歴回転角とピロティ層の時刻歴応答変位は強い相関性を有することが予想されることと図-10の結果を併せて考えると、簡易1質点系が柱の繰り返しや片寄り(正負の最大変形の比率)挙動を精度良く捉えることが可能であることを示唆しており、従って設計段階において地震動に応じたピロティ層の柱の繰り返し作用を把握するために3-4で示した手法を有効に用いることができるものと思われる。

5. MS パネモデルにおける検討

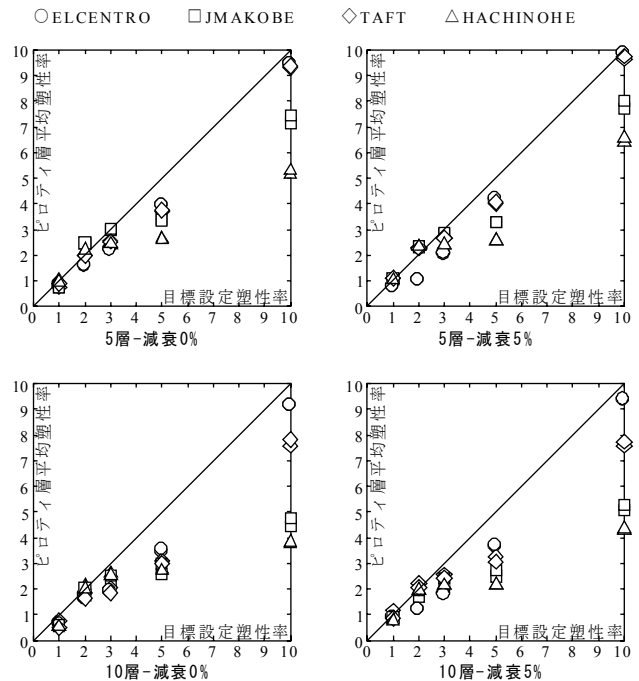


図-8 目標損傷塑性率及び応答平均塑性率

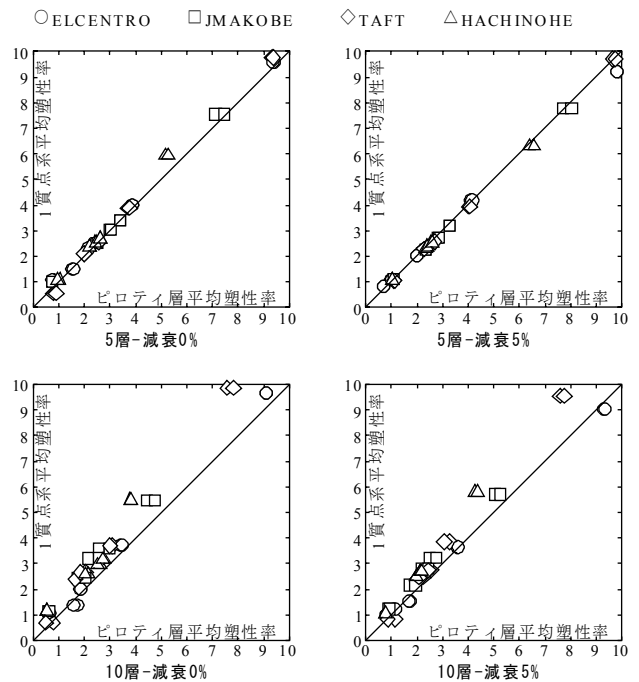


図-9 ピロティ層と1質点系の塑性率

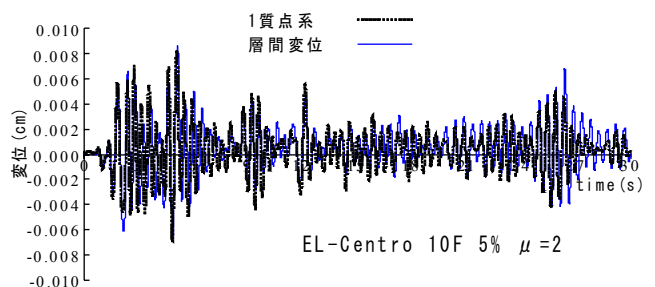


図-10 ピロティ層と1質点系の時刻歴応答

ピロティ層の柱は地震時大きな変動軸力を受け、引張側の柱が引張降伏した後、圧縮側の柱が大きなせん断力を負担すること³⁾が指摘されている。前章ではその現象を考慮できないため、5章において1層柱部材にMSモデル(2章図-2, 3)を用いて検討を行う。具体的に本論で提案する手法から得られた柱の降伏モーメントを負担せん断力の大きい圧縮柱の降伏モーメントとなるよう設定し検討を行う。ただしMSバネを用いる際に配筋を決定する必要があるが、本論では柱断面及びコンクリート強度を既に決定しているため、3章で決定した降伏モーメントを実現できない建物が存在する。そこで本章においては上記の条件を満たす配筋が可能であった建物に関してのみ検討する。また地震動は50kineに規準化したものを用いる。

図-11に横軸に材端バネモデルを用いたピロティ建物の平均塑性率、縦軸にMSモデルを用いた場合のそれを示す。塑性率の算出にあたり、静的非線形解析で得られる層せん断力-層間変形関係からトリリニア化し、その第2折れ点を降伏変形としている。ほとんどの場合において、MSモデルの値は材端バネモデルの値を上回ることにはなかった。この原因として、塑性化が小

○ELCENTRO □JMAKOBE ◇TAFT △HACHINOHE

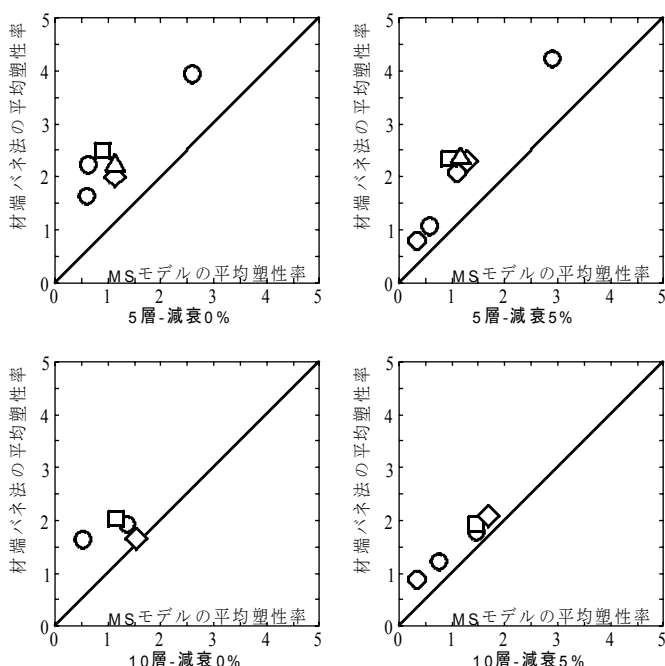


図-11 MSモデルと材端バネモデルの比較

さい範囲において、材端バネモデルに比べMSモデルは降伏点以前の繰り返し履歴吸収エネルギーが大きいことが挙げられる。以上より、今回解析に用いたピロティ建物では、4章で行った材端バネモデルを用いて安全性の検討を行うことは十分に妥当であると言える。

6. まとめ

本論では、RC造ピロティ建物を対象に想定した地震動に対して、ピロティ層の変形が制御可能な設計手法(エネルギー入力速度概念に基づく設計手法)の提案及び手法の妥当性の検討を行った。

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

参考文献

- 1) 芳村学, 木原祥智: ピロティを有する鉄筋コンクリート建物の地震時変形制御法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 19, No2., pp. 81-86, 1997
- 2) 花井伸明, 市之瀬敏勝, 神林宏之: 層降伏型RCピロティ建物の応答変位予測, コンクリート工学年次論文集, Vol. 21, No3., pp. 1153-1158, 1999
- 3) 松本和行, 倉本洋, 顧建華: 鉄筋コンクリート造ピロティ建築物の地震応答変形の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 21, No3. 2001, pp. 43-48, 1999. 9
- 4) 小室努, 川端一三, 小谷俊介: 2階以上に連層耐力壁を有するピロティ建物の地震応答性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 18, No2., pp. 755-760, 1996
- 5) 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報告集, 53 2号, pp. 137-143, 2000. 6
- 6) 織裳慎一郎, 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎: RC造ピロティ建物の1質点化に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2002. 3, pp. 225-228
- 7) 木村暁子, 前田匡樹: 梁の軸伸び変形が柱のせん断力及び降伏機構に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, No. 3, pp. 1393-1398, 2000
- 8) Li Kang-Ning: 「Canny99」, Three Dimensional Nonlinear Dynamic Structural Analysis Computer Program Package, October, 1996
- 9) 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎: RC構造物における塑性時の片寄りのメカニズムとその算出方法, 構造工学年次論文集, Vol. 47B, pp. 491-496
- 10) 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. 16, 1999