

論文 部材の履歴特性における耐力低下及びスリップ形状が RC 構造物の地震応答に及ぼす影響

鄭 文淑*¹・前田 匡樹*²・長田 正至*³

要旨:本研究では、梁曲げ降伏先行型の全体降伏機構を形成するように設計された6層5スパンRC造平面骨組を対象にして弾塑性地震応答解析を行い、降伏ヒンジを想定した部分の耐力低下及びスリップ形状が建物の応答性状に及ぼす影響について検討した。耐力低下及びスリップの程度、またそれらの発生位置を変化させ、耐力低下及びスリップが生じない場合と比較し、その最大層間変形角、ヒンジ部の最大応答塑性率がどのように変化するか検討した。また、それぞれの応答増分の定量化を行い解析結果との比較検討を行った。

キーワード:骨組地震応答解析, 耐力低下, スリップ, 最大層間変形角, 最大塑性率

1. はじめに

韌性に依存した鉄筋コンクリート造建築物の耐震設計¹⁾では、建物全体の降伏ヒンジで塑性変形による履歴エネルギーの消費を期待するため、いわゆる梁降伏型の全体降伏機構を形成するように設計する。しかし、部材が曲げ降伏した後、せん断強度や塑性変形能力が充分ではないときには、柱・梁接合部あるいは部材内での主筋の付着劣化やひび割れなどにより履歴エネルギー消費が劣化するスリップ性状や、繰り返し载荷によって耐力劣化が生じる。既往の研究によると、スリップ性状による地震応答の増大効果はあまり大きくないと指摘されている²⁾のに対して、繰り返しによる耐力低下は地震応答の増大効果に大きく影響を与えると報告されている³⁾。しかし、それらのいずれの影響も、応答の増大効果に関して定量的に十分に明らかにはされておらず、建物を設計する際に、どの程度のスリップや耐力低下が許容しうるかについては必ずしも明らかではない。

本研究では、部材の復元力モデルに耐力低下及びスリップを考慮した骨組モデルを設定し、耐力低下及びスリップの程度、それらの発生位置を変化させた弾塑性地震応答解析を行い、耐力低下及

びスリップがない場合の応答に対して、建物の最大応答に及ぼす影響を検討する。また、応答増分を設計に合理的に反映させるために、簡略に推定する手法について検討した。

2. 解析方法

2.1 解析対象構造物

解析対象構造物は図1に示す6層5スパンのRC平面骨組とし、スパンは6m、階高は1階で4.0m、2階～6階まで3.6mとした。部材断面は表1とした。コンクリート設計基準強度は27 N/mm²、コンクリート弾性係数は 2.35×10^4 N/mm²、鉄筋はSD390と設定した。積載荷重を含む単位重量は12 kN/m²と仮定した。建物の設計時に想定した降伏機構を図1に示す。すなわち1階柱脚と6階柱頭、2階～6階梁の両端を降伏ヒンジ領域に設定し、メカニズム時に梁曲げ降伏先行型の全体降伏機構を形成するように設計した。設計用外力分布は、震度逆三角形分布とし、鉄筋コンクリート造建築物の韌性保証型耐震設計指針⁴⁾に伴い降伏機構形成時のベースシア係数 C_0 が0.25になるように主筋を配筋した。この際には、最小配筋の規定は無視した。(6階柱柱頭のみ最小配筋の規定を下回る。)

*1 横浜国立大学大学院 工学研究科 計画建設学専攻 (正会員)
 *2 東北大学大学院 助教授 工学研究科、博士(工学) (正会員)
 *3 横浜国立大学 教授 工学部 建設学科、工学博士 (正会員)

2.2 解析モデル

解析では剛床を仮定し、柱・梁部材は線材に置換して両端に塑性変形のすべてが集中する材端曲げバネモデルとした。せん断変形は弾性とし、軸変形は無視した。曲げバネの復元力特性は図2に示すようにトリリニア型とし、ひび割れモーメントは $M_c = 0.56\sqrt{F_c} \cdot Z + ND / 6$ (Z : 断面係数) により計算し、降伏点の割線剛性は弾性剛性の1/3倍、降伏後の剛性低下率は初期剛性の0.001倍とした。震度逆三角形分布の水平力による静的漸増载荷における層せん断力-層間変形角関係を図3に示す。但し、梁の耐力にはスラブ筋効果を無視した。

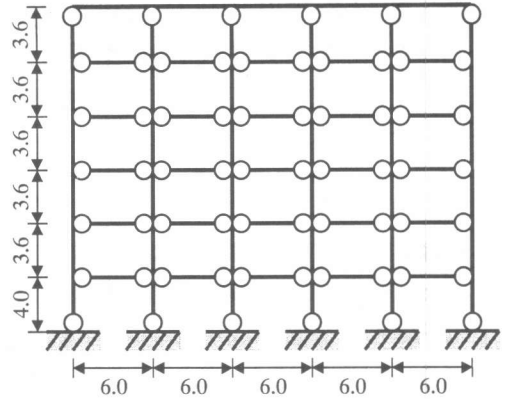


図1 解析対象構造物 (単位:m)

3. 部材の履歴特性及び応答増分の定式化

3.1 部材の履歴モデル

柱・梁部材の履歴特性は耐力低下及びスリップを考慮した CANNY Sophisticated モデル⁹⁾を使用した(図5, 図6)。その繰り返しルールを以下に要約する。除荷剛性 K_u は式(1)により設定するが、除荷剛性低下係数 η は図5のように反対側の初期剛性の延長線上で降伏強度に達する点を指すように η を1.0とした。(ただし, $\eta \geq 1$)

$$K_u = \frac{\eta M_y + M_m}{\eta M_y / K_0 + \theta_m} \quad (1)$$

耐力低下モデル(図5)は、式(2)に示すように再载荷時の指向点の耐力 \bar{M}_m を直前の最大応答点の耐力 M_m に耐力低下率 α を乗じて $\bar{M}_m = \alpha \cdot M_m$ に低下させる。塑性率と耐力低下率の関係を図5に示す。耐力低下率 α は式(3)のように、最大塑性率 μ と耐力低下係数 λ_μ により算定する。

$$\bar{M}_m = \alpha \cdot M_m \quad (2)$$

$$\alpha = 1 - \lambda_\mu (1 - 1/\mu) \quad (3)$$

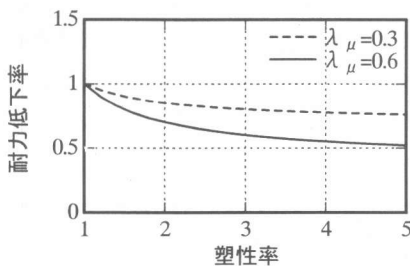


図4 塑性率と耐力低下率の関係

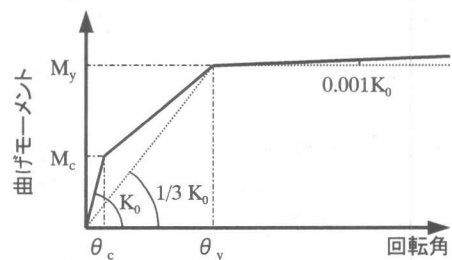


図2 部材端モーメント-回転角関係

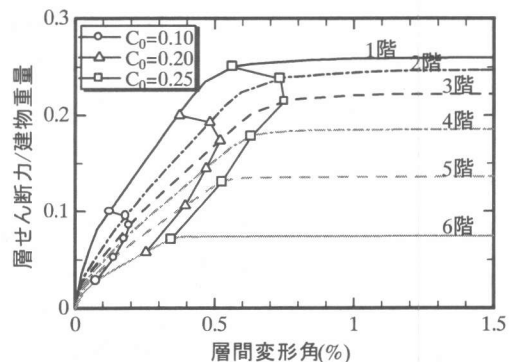


図3 層せん断力-層間変形角関係

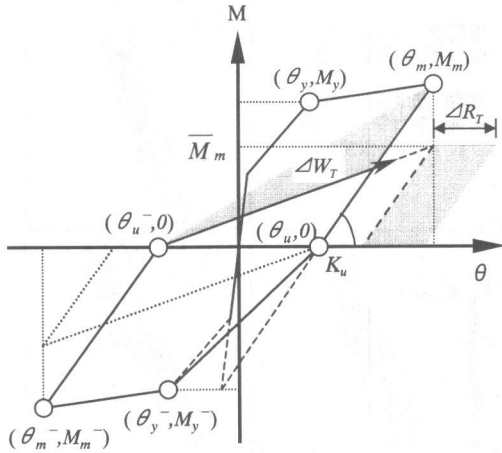


図5 耐力低下型モデル

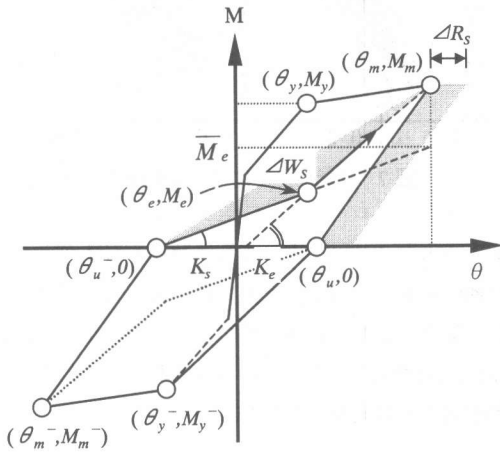


図6 スリップ型モデル

スリップモデルは除荷が完了して再載荷時に式(4), (5)で与えられるスリップ域の剛性 K_s , K_e によってスリップの程度が変化する。ここで、スリップ剛性 K_s は直前の最大応答点の耐力にスリップ低下係数 λ_s をかけて低下した新しい耐力を目指して剛性を決めるので、 λ_s を変化させることによりスリップの程度を変化させることができる。

$$K_s = \frac{\bar{M}_e}{\theta_m + \theta_u^-} \quad (4)$$

$$K_e = \frac{M_m - \bar{M}_e}{\theta_m - \theta_e} \quad (5)$$

$$\bar{M}_e = \lambda_s \cdot M_m \quad (6)$$

3.2 応答増分の簡略推定

図5, 図6に示した耐力低下及びスリップにより減少した履歴面積 ΔW_T と ΔW_S と等しい履歴面積の分だけの応答が増加すると仮定すると、変位の増分 ΔR_T , ΔR_S はそれぞれ式(7)(8)で評価できる^[5]。

$$\Delta R_T = \Delta W_T / \bar{M}_m \quad (7)$$

$$\Delta R_S = \Delta W_S / M_m \quad (8)$$

応答増分は最大応答が発生する半サイクルでのみ生じると仮定し、反対側の最大応答及び除荷剛性はスリップ及び耐力低下が生じない場合と等しいと考える。また、等価粘性減衰定数 ΔHeq の減少分 $s\Delta Heq$, $t\Delta Heq$ と ΔW_s , ΔW_T には式(9), (10)の関係が成り立つ。

$$t\Delta Heq = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\Delta W_T}{\theta_m \cdot M_m} \quad (9)$$

$$s\Delta Heq = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\Delta W_S}{\theta_m \cdot M_m} \quad (10)$$

以上を仮定すると、応答増分は式(11), (12)で表される。

$$\Delta R_T = \pi \cdot \theta_m \cdot t\Delta Heq \quad (11)$$

$$\Delta R_S = \pi \cdot \theta_m \cdot s\Delta Heq \quad (12)$$

3.3 解析モデルの設定

履歴モデルのパラメータを表2に示す。すなわち、耐力低下及びスリップが生じない場合 ($\lambda_s=0.0$, $\lambda_u=0.0$) を CASE0 とした。CASE0 の Heq を基準に耐力低下させず ($\lambda_u=0.0$) スリップ低下係数 λ_s をそれぞれ 0.7, 0.4 とし、履歴面積の減少分 $s\Delta Heq$, $t\Delta Heq$ が Heq の 22.5% と 45% になるようにしたモデルを CASE1, CASE2 とした。また、スリップさせず ($\lambda_s=0.0$) 耐力低下係数 λ_u を 0.3, 0.6 とし、同様に履歴面積の減少分 $s\Delta Heq$, $t\Delta Heq$ が Heq の 22.5% と 45% になるようにしたモデルを CASE3, CASE4 とした。

耐力低下及びスリップの発生位置が建物の最大応答値に及ぼす影響を検討するため、すべての降伏ヒンジ位置が同じように耐力低下またはスリップする場合の解析とある階の梁のみ、あるいは、柱のみが耐力低下またはスリップする場合につい

ても解析を行った。

表 2 履歴モデルのパラメータ

ケース	パラメータ	Heq ^{*1}
CASE0	$\lambda_s = 0.0$ $\lambda_\mu = 0.0$	0.143
CASE1	$\lambda_s = 0.7$ $\lambda_\mu = 0.0$	0.111
CASE2	$\lambda_s = 0.4$ $\lambda_\mu = 0.0$	0.079
CASE3	$\lambda_s = 0.0$ $\lambda_\mu = 0.3$	0.111 ^{*2}
CASE4	$\lambda_s = 0.0$ $\lambda_\mu = 0.6$	0.079 ^{*2}

*1 塑性率 $\mu = 4$ の値

*2 CASE0 の Heq に耐力低下率 α をかけた値

4. 骨組の弾塑性地震応答解析

4.1 入力地震波及び計算方法

入力地震動は El Centro 波(1940)の NS 成分, 宮城県沖地震(1978)において東北大学で観測された地震波(略称, Tohoku)の NS 成分, 及び兵庫県南部地震(1995)の神戸海洋気象台(略称, Kobe)の NS 成分の 3 種類を用いた。地震波倍率については, 耐力低下及びスリップが生じない場合(CASE0)の梁端部の塑性率の最大値が 4 になるように原波形の倍率を調整した(表 3)。数値計算には Newmark の β 法を用い($\beta = 0.25$), 0.01 秒刻みで計算した。減衰は瞬間剛性比例型で初期弾性時の 1 次モードの減衰定数 5%とした。解析には李康寧博士の 3 次元解析プログラム CANNY99⁶⁾を用いた。

表 3 入力地震波

地震波	倍率	最大加速度 (gal)	継続時間 (sec)
El Centro(NS)	2.66	909	0~20
Tohoku(NS)	1.57	405	0~20
Kobe(NS)	0.76	624	0~10

4.2 梁端の最大塑性率

図 7 に El Centro 地震波の解析結果である 6 階梁端部の塑性率 μ と曲げモーメント $M(\text{kN}\cdot\text{m})$ の関係をしめす。各パラメータによる応答塑性率の増分を比較すると, 耐力低下及びスリップが生じない場合(CASE0)の最大塑性率 4 に対して $\lambda_s = 0.7$ の時は 1.23 倍, $\lambda_s = 0.4$ の時は 1.30 倍, $\lambda_\mu = 0.3$ の時は 1.35 倍, $\lambda_\mu = 0.6$ の時は 2.28 倍となっている。これより, 履歴面積が同程度減少したとき, 耐力

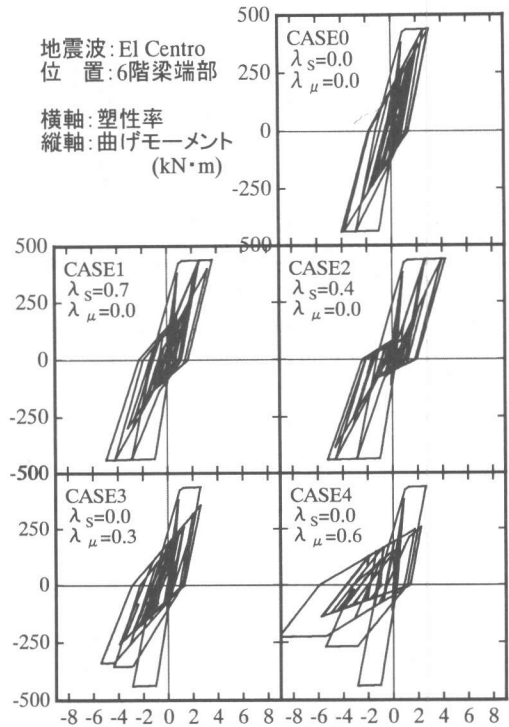


図 7 パラメータによる応答履歴形状

低下の方がスリップより応答に及ぼす影響が大きい傾向がある。また, 復元力特性をスリップ型とした場合は正側と負側が共に応答の増大が見られるが, 耐力低下型とした場合は片側に集中して応答が増える傾向が見られた。

4.3 最大層間変形角

すべての柱・梁, および特定階の柱・梁のみを耐力低下又はスリップさせた場合の各層の最大層間変形角の解析結果を図 8 に示す。すべての柱・梁ヒンジ部を耐力低下あるいはスリップさせた場合の最大層間変形角を地震波別に比較すると, 繰り返し回数が多い El Centro 波や Tohoku 波ではスリップの影響より耐力低下の影響が大きい。一方, 繰り返し回数が少なくパルス的な地震動である Kobe 波では, 耐力低下した場合, スリップした場合と比べ同程度かまたは多少大きい程度であった。

ある特定階のみに耐力低下あるいはスリップさせた場合の解析結果を見ると, その階と直上階, 直下階付近の応答が増加するが, それ以外の階に

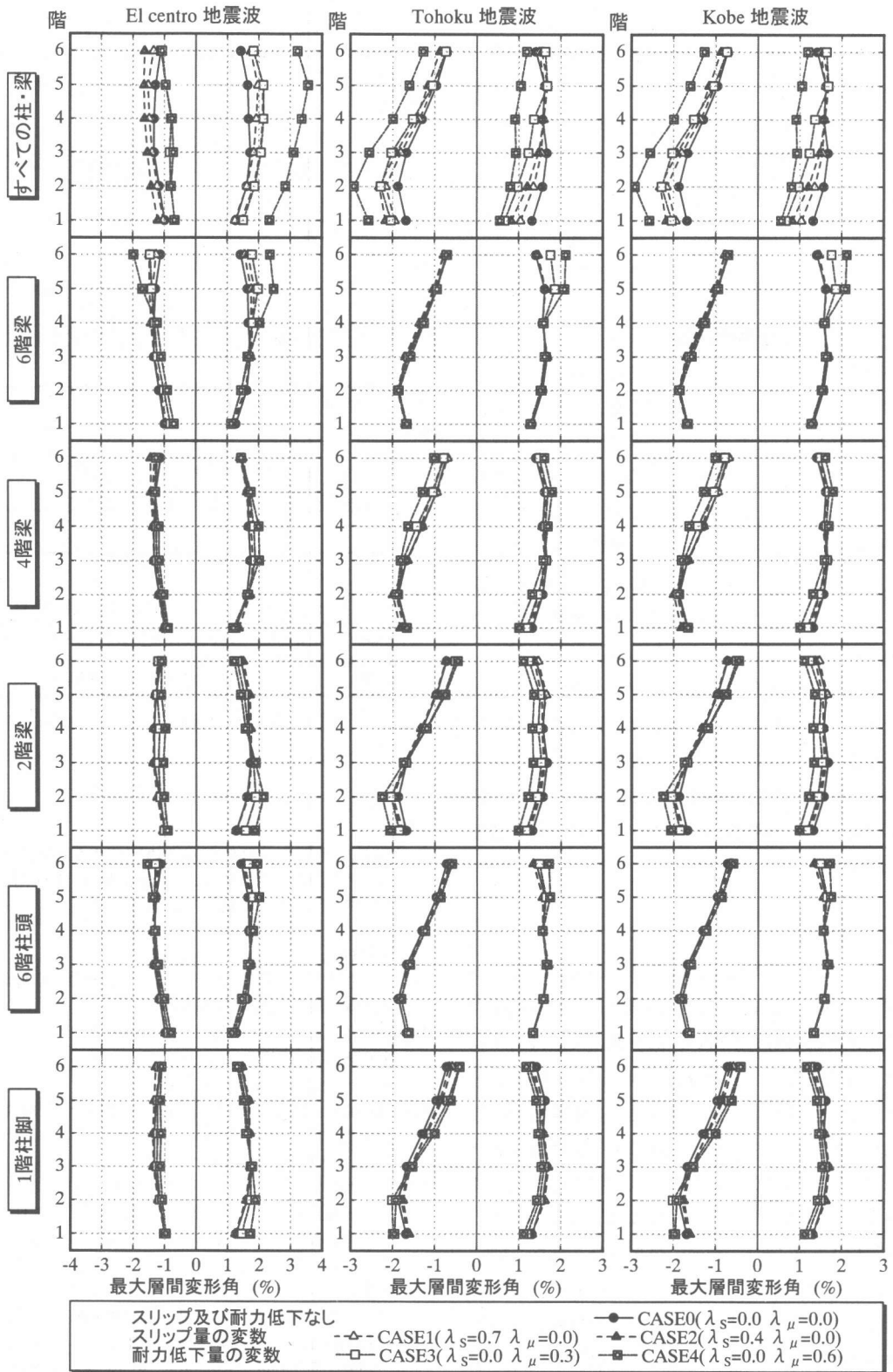


図8 各階の最大層間変形角

の応答にはあまり影響が見られなかった。また、特定層でのスリップと耐力低下の影響を比較すると、スリップさせた場合は建物全体に与える影響は少なく、耐力低下させるとその層で応答が増えると共に他の層にも影響を与え、層間変形角が大きくなるか、逆に減る場合もあった。また、柱より特定層の梁がスリップ・耐力低下した方が建物の応答に与える影響が大きくなる傾向を示した。

4.4 応答増分の解析結果

すべての柱・梁がスリップまたは耐力低下した場合の応答増分の傾向を検討した。スリップまたは耐力低下した場合の各階の最大層間変形角 R_{max} をスリップ・耐力低下しない場合(CASE0)の最大層間変形角 R_0 で割った値を層間変形角の応答増分率 (R_{max} / R_0) と定義し、その傾向を階ごとに図9に示した。図9の中には式(11), (12)から求められる ΔR_T , ΔR_S による応答増分率も示した。地震波の性質によって多少差はあるが、上階に行くほど層間変形角の応答増分率は大きくなる傾向を示した。また、式(11), (12)により簡略に推定した応答増分率と応答解析を比較すると、スリップの場合はある程度よい評価をしているが、耐力低下の場合は応答解析結果の方が大きく上回る結果を示した。

5. まとめ

柱・梁ヒンジ部に耐力低下あるいはスリップの履歴を有する6層5スパンの純フレーム構造を対象に地震応答解析を行い、耐力低下またはスリップの程度による応答増分の傾向に関して検討した。その結果、部材のスリップは建物の応答増分に与える影響が小さく、その程度による影響も大きい差は見られないが、耐力低下は建物の応答増分に与える影響は大きく、その程度によっても大きくなるほど応答増分も顕著に見られた。また、推定した応答増分率と応答解析結果を比較すると、スリップはある程度評価できるが、耐力低下は応答解析値が大幅に大きいので今後の検討課題とする。

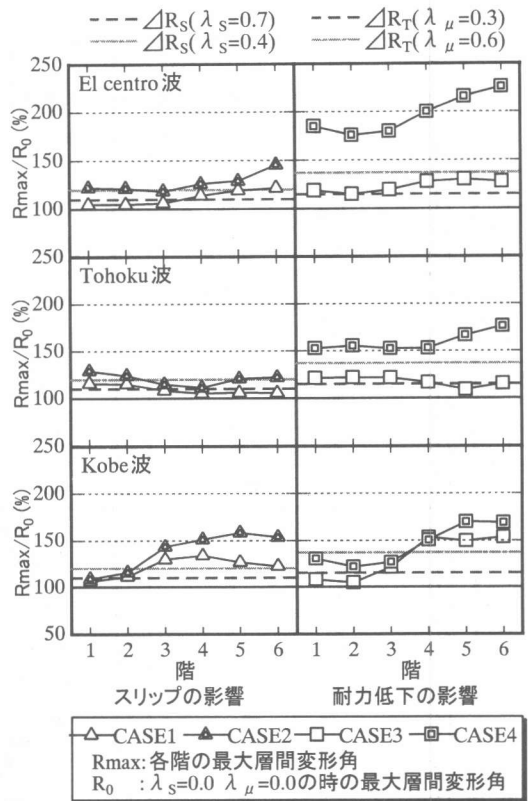


図9 スリップ及び耐力低下の比較

【謝辞】

本研究の地震応答解析には李康寧博士が開発された立体骨組解析プログラム「CANNY99」を使用させて頂いた。ここに記して謝意を表する。

【参考文献】

- [1] 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(案)・同解説，1997
- [2] Oscar Lopez・小谷：骨組の非線形応答に及ぼす部材履歴形状の影響，コンクリート工学年次論文報告集，1990年，pp.113～118.
- [3] 北山和宏：鉄筋コンクリート柱・梁接合部の耐震設計に関する研究，第9回日本地震工学シンポジウム，1994年，pp.2047～2052.
- [4] 境 有紀：繰り返しによる耐力低下が鉄筋コンクリート構造の地震応答に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集，1998年，pp.1021～1026.
- [5] 堀井良浩・壁谷澤：RC建物の地震応答に及ぼす履歴エネルギー吸収性能の影響，コンクリート工学年次論文報告集，1999年，pp.13～18.
- [6] Li Kang-Ning：「CANNY99」，Three Dimensional Nonlinear Dynamic Structural Analysis. Computer Program Package, October 1996.