

強震を受ける鋼構造ラーメン骨組の柱脚に生じる塑性変形

Plastic Deformation of Column Base in Steel Moment Frames

Subjected to Strong Earthquakes

中原 寛章^{*1}

小川 厚治^{*2}

Hiroaki NAKAHARA

Koji OGAWA

ABSTRACT This paper is concerned with the demand for ductility of column base in steel moment frames. Numerical response analysis was carried out for 15 frames against a variety of ground motions. In this paper, the magnitude of plastic deformation introduced into column base is described. Maximum plastic rotation, maximum increment of plastic rotation during a half-cycle of vibration, and the range of variable plastic rotation are considered as the parameters that represent the magnitude of plastic deformation. The results are summarized as formulas to predict those parameters based on maximum story drift angles.

Key Words: 地震応答, 最大層間変位角, 最大塑性回転角, 必要変形性能, 性能設計
earthquake response, maximum story drift, maximum plastic rotation, ductility demand, performance-based design

1. 序

1995年の兵庫県南部地震によって、鋼構造骨組は莫大な被害を被った。この反省から、梁端接合部や柱脚が保有する変形性能の評価およびその改善に関しては精力的な研究が進められてきている。しかし、梁端や柱脚に要求される変形性能に関する研究は少ない。筆者らは既に、梁端に要求される必要塑性変形性能については報告しており^{1,2)}、本研究は、柱脚に要求される必要塑性変形性能の解明を目的とするものである。

既往の研究³⁻⁵⁾によれば、最下層の耐力・弾性剛性が同じであれば、柱脚の復元力特性（完全弾塑性型、スリップ型、除荷点指向型など）や柱脚の耐力が違って、最大層間変位角応答に及ぼす影響は小さいことが報告されている。したがって、どのような柱脚を採用するにしても、最下層の弾性剛性や耐力を適切に確保しておけば、最下層の層間変位角が他の層に比べて大きくなることはなく、他の層と同様に最下層の最大層間変位角も予測可能と考える。

最下層の最大層間変位角は、骨組の弾性剛性・

終局耐力・柱梁耐力比などの構造特性や入力地震動によって、当然変動する値である。しかし、性能設計の考え方の普及や「限界耐力計算」の施行によって、設計の最初の段階で、設計条件として地震時の最大層間変位角の上限値が指定されるなど、既知であることが今後一般化するものと考えられる。したがって、最大層間変位角と柱脚に生じる塑性変形との関係を明確にできれば、最大層間変位角が指定された段階で柱脚の必要変形性能も既知となる。

本研究では、現行の耐震規定を満たすように設計された鋼構造ラーメン骨組の一般化ヒンジ法を

表1 解析骨組

名称	N	柱梁耐力比		C _B	T ₁ (s)
		最小値 ~ 最大値	2階床		
AR02	2	2.202 ~ 2.202	2.202	0.572	0.606
AR04	4	2.054 ~ 2.310	2.054	0.425	0.820
AR08	8	1.812 ~ 2.592	1.812	0.405	1.173
AR12	12	1.938 ~ 3.015	2.037	0.284	1.625
BR02	2	1.275 ~ 1.275	1.275	0.813	0.541
BR04	4	1.329 ~ 1.405	1.405	0.526	0.800
BR08	8	1.513 ~ 1.906	1.513	0.492	1.148
BR12	12	1.564 ~ 2.219	1.887	0.345	1.576
CR02	2	2.070 ~ 2.070	2.070	0.501	0.629
CR04	4	1.928 ~ 2.648	1.928	0.404	0.841
CR08	8	1.480 ~ 3.051	1.480	0.365	1.159
BRI3A	3	2.897 ~ 3.032	2.897	0.557	0.638
BRI3B	3	2.367 ~ 2.398	2.398	0.506	0.688
BRI9A	9	1.789 ~ 2.976	1.789	0.209	1.882
BRI9B	9	1.722 ~ 2.384	1.722	0.227	1.834

*1 熊本大学大学院自然科学研究科 大学院生
(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

*2 工博 熊本大学工学部環境システム工学科 教授
(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

用いた広範な地震応答解析結果に基づいて、最大層間変位角の関数として柱脚に生じる塑性変形を予測する方法を検討する。

2. 解析の概要

解析の内容は基本的に、文献1, 2)と同じである。解析骨組は、表1に示す15の骨組であり、いずれも現行の耐震規定を満たすように設計された鋼構造ラーメン骨組で、柱は角形鋼管、梁はH形鋼を用いている。表1中の N は層数、 C_B は終局ベースシア係数、 T_1 は基本固有周期である。

各床レベルについて求めた柱の節点塑性モーメント和とフロアーモーメントの比を柱梁耐力比と定義して、その最小値と最大値及び2階床レベルでの値を表1中に示している。低層大スパンのBR02, BR04は、相対的に柱梁耐力比が小さいが、他の骨組の柱梁耐力比は1.5程度以上となっている。

入力地震動としては、文献9)において提案されたロサンゼルスでの50年間の発生確率が10%の20波の地震(10/50地震群)および、50年間の発生確率が2%の20波の地震(2/50地震群)を用いた。

10/50地震群の擬似速度応答スペクトルの2乗平均値の平方根は限界耐力計算の安全限界で想定されている設計用擬似速度応答スペクトルと近い値である。一方、2/50地震群の擬似速度応答スペクトルの2乗平均値の平方根は、10/50地震群のおよそ2倍程度である。

地震応答解析には、複合非線形解析プログラムclub.fを用いた。歪硬化係数は部材・接合部パネル共に0.02とした。数値積分の時間刻みは基本固有周期の1/500以下になるように設定している。

柱脚の最大塑性回転角は、塑性回転角の絶対値の最大値(図1の $\theta_{p \max}$)と定義する。その他、図1に示す1回の变形で生じる塑性回転角増分の最大値 $\Delta\theta_{p \max}$ や、履歴全体の塑性回転角の全変動幅 $\bar{\theta}_p$ 、累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ を、塑性変形の大さを表す指標として用いている。ただし、各解析において、最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ が最も大きい柱脚について、柱脚の塑性変形の大さを表す上記の指標は整理している。

3. 柱脚固定とした時の塑性変形

この章では、文献1)と全く同じ柱脚固定の骨組を対象とする。したがって、ここで柱脚の塑性変形とは、最下層柱下端の塑性変形のことである。

3.1 最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$

図2は、柱脚の最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ の最大値

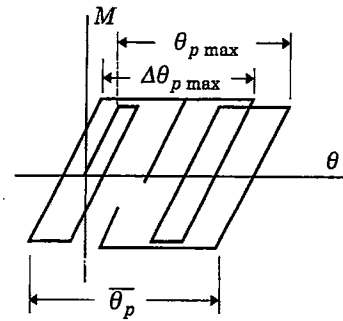
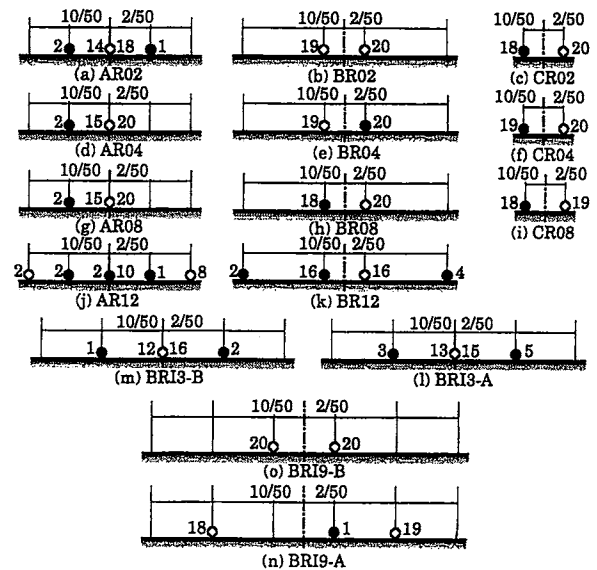


図1 柱脚の塑性変形指標



- : $\theta_{p \max}$ の最大値の発生位置
(横の数字 : 発生した地震数)
- ◇ : 静的解析において、最初に塑性ヒンジが形成される位置

図2 $\theta_{p \max}$ の最大値の発生位置

の発生位置を●印で示したもので、すべて左右対称の骨組であるので、各図の左側には10/50地震群を入力した場合を、右側には2/50地震群を入力した場合を示している。●印の横に示した数字は、その位置で最大値が発生した地震の数である。片側の数字の合計が20に満たない場合があるのは、塑性ヒンジが全く生じない地震があることを示している。さらに、図2中の◇印は設計用地震荷重を比例載荷したときに、最初に塑性ヒンジが形成される柱脚の位置である。

図2から、以下のことがわかる。

- (1) 全体的には、最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ の最大値は、中柱の柱脚で生じることが多い。

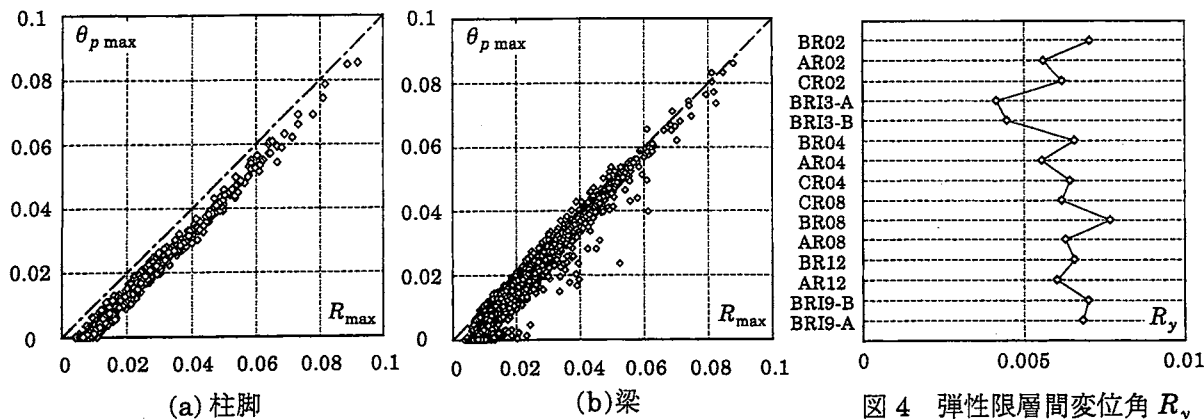


図3 $\theta_{p \max} - R_{\max}$ 関係

図4 弾性限層間変位角 R_y

(2) 最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ の最大値が生じる位置は、◇印で示した静的解析で最初に塑性ヒンジが形成される位置であることが多い。

中柱の柱脚の降伏が先行するのは、外柱は一つの梁からの曲げモーメントしか負担しないのに対して、中柱は二つの梁からの曲げモーメントを負担するので、中柱の方が外柱より曲げモーメントが大きくなるからである。

ここでは、柱脚を固定としたときの最下層柱下端に生じる塑性変形を、文献1, 2)において検討した梁端に生じた塑性変形と比較しながら検討する。まず、最大層間変位角 R_{\max} と柱脚の最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ の最大値との関係を検討する。本論では、設計時には最大層間変位角 R_{\max} が既知であることを前提としている。 R_{\max} と $\theta_{p \max}$ との関係が明確になれば、部材レベルの詳細な地震応答解析なしに、最大層間変位角 R_{\max} から柱脚に生じる最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ を予測することが可能になる。

柱脚の最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ と最下層の最大層間変位角 R_{\max} との関係を図3(a)に示す。なお、参考のため、梁端の最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ と最大層間変位角 R_{\max} との関係を図3(b)に示す。図3(a)によると、 $\theta_{p \max}$ は R_{\max} より概ね一定値だけ小さくなる傾向が認められる。

柱脚が降伏するときには、2層床梁も既に降伏していると考えれば、柱脚降伏後は塑性ヒンジ回転角と層間変位角の増大量は等しくなるので、柱脚に生じる最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ の近似値 $pre 1 \theta_{p \max}$ は、最大層間変位角 R_{\max} を用いて次式で仮定できる。

$$pre 1 \theta_{p \max} = R_{\max} - R_y \quad (1)$$

上式で R_y は、設計用地震荷重を载荷した弾性解析結果から算定した最下層の弾性限層間変位角で

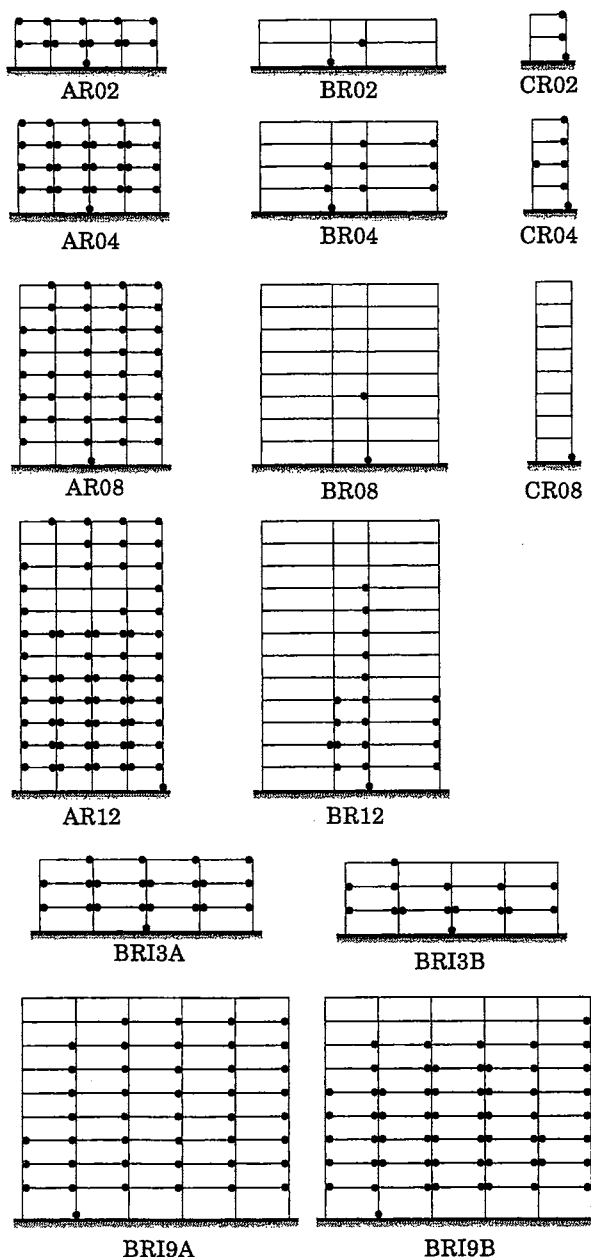
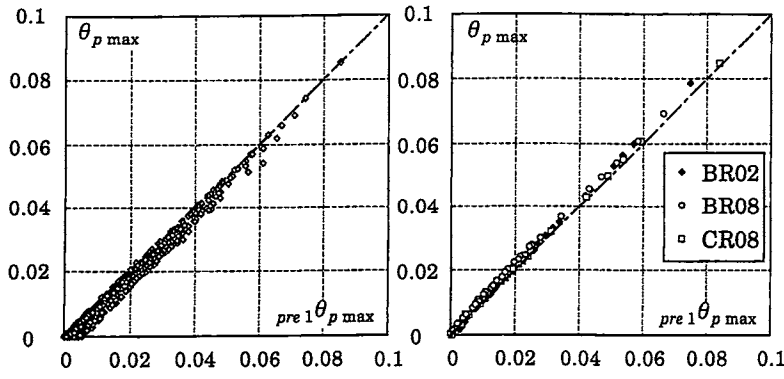


図5 柱脚より前に梁端に生じる塑性ヒンジ



(a) 梁の降伏が先行する骨組 (b) 柱脚の降伏が先行する骨組

図6 $\theta_{p \max}$ と $pre\ 1\theta_{p \max}$ の関係

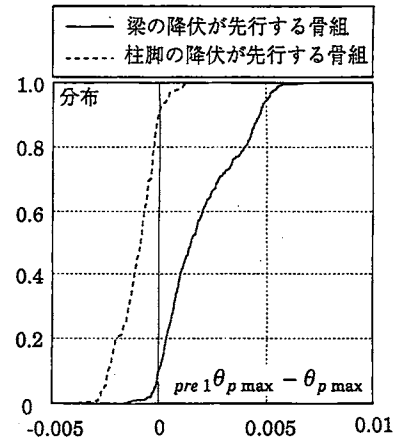


図7 $pre\ 1\theta_{p \max} - \theta_{p \max}$ の分布

あり、その値を図4に示しておく。

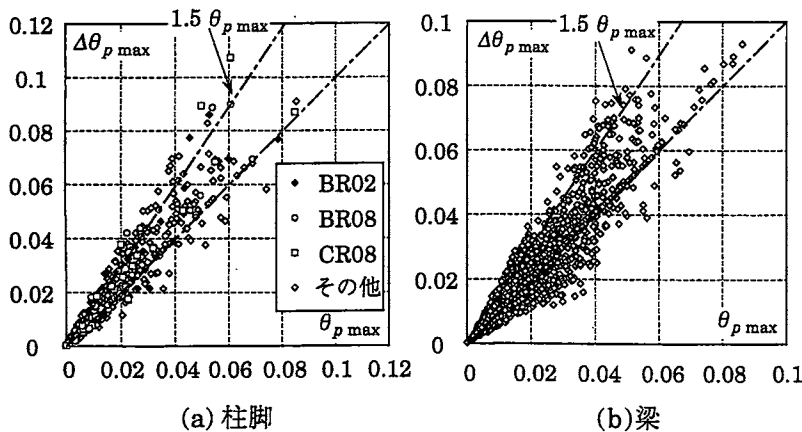
図5には、設計用地震荷重を静的に比例荷重したとき、最初に柱脚に形成される塑性ヒンジと、それ以前に梁端に形成された塑性ヒンジを●印で示す。

図5より、大部分の骨組では、柱脚に塑性ヒンジができるまでに、梁端には多数の塑性ヒンジが生じている。しかし、CR08骨組では最初に塑性ヒンジが生じるのは柱脚であり、BR08骨組も2層床梁(1層上部の梁)に塑性ヒンジが形成される前に、柱脚に塑性ヒンジが生じている。また、BR02骨組も柱脚に塑性ヒンジが生じる前に梁端に形成される塑性ヒンジは、3本の2層床梁のうち1箇所だけである。これら3つの骨組以外は、柱脚に塑性ヒンジが形成される前に、2層床梁の少なくとも半分以上の端部に塑性ヒンジが形成されており、柱脚より梁の降伏が先行する性質を持っている。BR02、BR08、CR08の3骨組は柱脚の

降伏が先行する骨組、他は柱脚より梁の降伏が先行する骨組である。

図6は、(1)式による最大塑性回転角の近似値 $pre\ 1\theta_{p \max}$ と応答値 $\theta_{p \max}$ との関係を、梁の降伏が先行する骨組と、柱脚の降伏が先行する骨組に分けて示したものである。図6の(a),(b)図のいずれにおいても、(1)式による近似値 $pre\ 1\theta_{p \max}$ と応答値 $\theta_{p \max}$ との関係は、少しのばらつきはあるが狭い帯域に収まっており、 $pre\ 1\theta_{p \max}$ は $\theta_{p \max}$ を近似する値となっている。

図7は(1)式による近似値 $pre\ 1\theta_{p \max}$ と応答値 $\theta_{p \max}$ との差の累積度数分布を、梁の降伏が先行する骨組と柱脚の降伏が先行する骨組とに分けて示したものである。図6,7によると、梁の降伏が先行する骨組については、(1)式による近似値 $pre\ 1\theta_{p \max}$ は応答値の上限を近似する値となっている。一方、柱脚の降伏が先行する骨組については、応答値の大部分が(1)式の近似値 $pre\ 1\theta_{p \max}$



(a) 柱脚

(b) 梁

図8 $\Delta\theta_{p \max} - \theta_{p \max}$ 関係

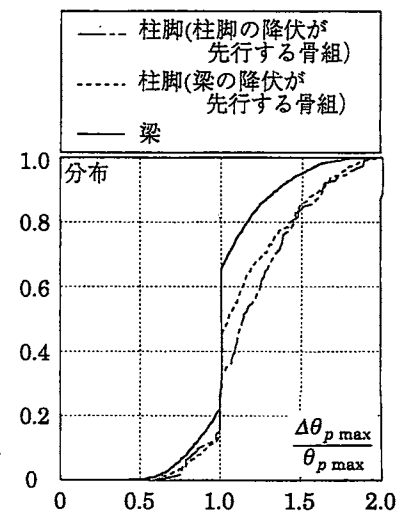


図9 $\Delta\theta_{p \max} / \theta_{p \max}$ の分布

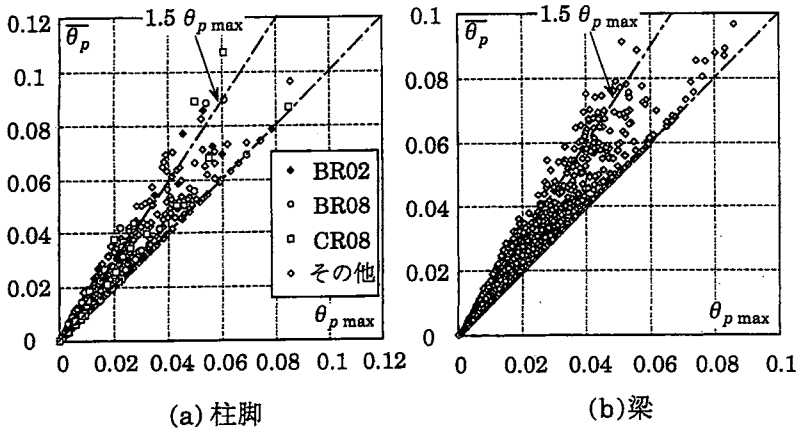


図10 $\bar{\theta}_p - \theta_{p \max}$ 関係

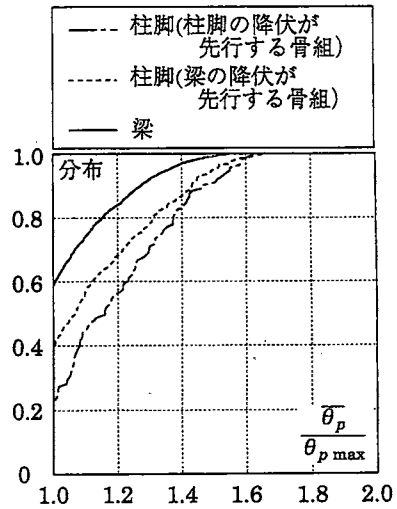


図11 $\bar{\theta}_p / \theta_{p \max}$ の分布

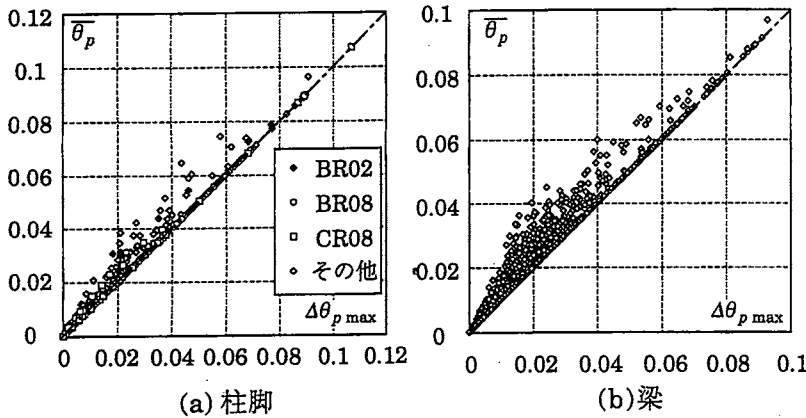


図12 $\bar{\theta}_p - \Delta\theta_{p \max}$ 関係

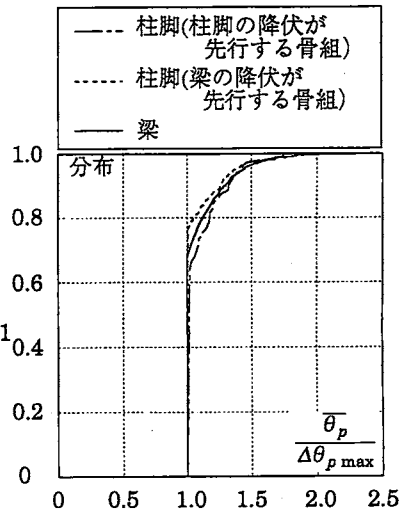


図13 $\bar{\theta}_p / \Delta\theta_{p \max}$ の分布

を超えている。ここでの解析骨組については、応答値が予測値を超えてもその差異は小さいので、(1)式は最大層間変位角から柱脚に生じる最大塑性回転角を予測するのに利用できる。これは、対象としている解析骨組の柱梁耐力比がいずれも1.5程度以上であるため、柱脚の降伏が先行する骨組であっても、柱脚降伏後は早期に梁も降伏するためであろう。しかし、柱脚の降伏が先行する骨組では、応答値が(1)式を超える傾向が認められることは、柱脚が相対的に弱い骨組では柱脚の最大塑性回転角が更に大きくなる可能性があることを示唆するものとして注目される。

3.2 最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p \max}$

最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p \max}$ と最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ との関係を図8に示す。さらに、図9は $\Delta\theta_{p \max} / \theta_{p \max}$ の累積度数分布を示したもので、柱脚の降伏が先行する骨組の柱脚、梁の降伏が先行する骨組の柱脚、梁の3つに分けて示し

ている。梁については、 $\Delta\theta_{p \max}$ は $\theta_{p \max}$ と近い値を取ることを報告している¹⁾が、図9からも分かるように、柱脚においては、半数以上の柱脚で $\Delta\theta_{p \max}$ が $\theta_{p \max}$ より大きくなっている。特に柱脚の降伏が先行する骨組の柱脚については、 $\Delta\theta_{p \max}$ が $\theta_{p \max}$ より大きくなる傾向がより明確になっている。 $\Delta\theta_{p \max} / \theta_{p \max}$ は梁に比べ柱脚の方が大きくなる傾向がある。

3.3 塑性回転角の全変動幅 $\bar{\theta}_p$

塑性回転角の全変動幅 $\bar{\theta}_p$ と最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ との関係を図10に示す。図11には、 $\bar{\theta}_p$ と $\theta_{p \max}$ との比の累積度数分布を、柱脚の降伏が先行する骨組の柱脚、梁の降伏が先行する骨組の柱脚、梁の3つに分けて示している。梁については、 $\bar{\theta}_p$ は $\theta_{p \max}$ の1~1.5倍程度であると報告してい

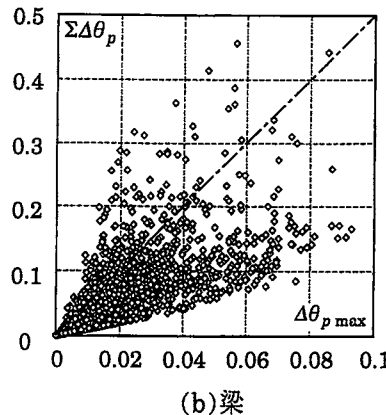
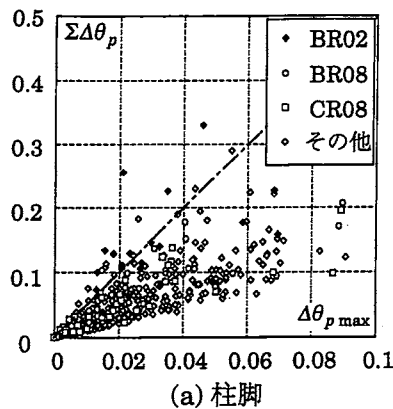


図 14 $\Sigma\Delta\theta_p - \Delta\theta_{p \max}$ 関係

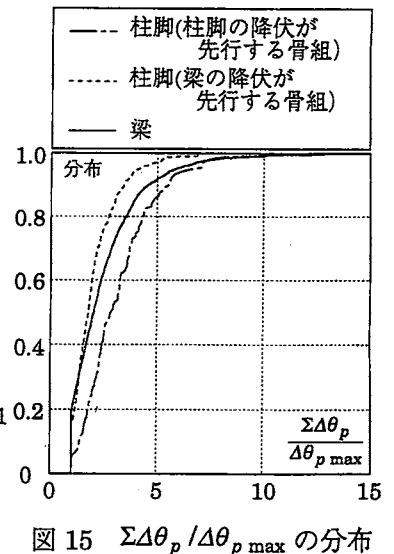


図 15 $\Sigma\Delta\theta_p / \Delta\theta_{p \max}$ の分布

るが、図 11 より柱脚に関する $\bar{\theta}_p$ と $\theta_{p \max}$ との比は、梁より大きくなる傾向がある。柱脚の方が梁よりも左右に等しい変形を生じ、片寄りの少ない履歴挙動をとる傾向が認められる。さらに、柱脚の降伏が先行する骨組の柱脚においては、 $\bar{\theta}_p$ と $\theta_{p \max}$ との比は、梁の降伏が先行する骨組の柱脚より大きくなる傾向がある。

図 12 は、最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p \max}$ と塑性回転角の全変動幅 $\bar{\theta}_p$ の関係を示したものである。図 12 より、大部分のデータが一点鎖線で示した直線上にあることが分かる。一方、 $\Delta\theta_{p \max} = \bar{\theta}_p$ とならないデータは図 9、図 11 を比べても分かるように、ほとんどが $\Delta\theta_{p \max} / \theta_{p \max}$ が 1 より小さい時の $\Delta\theta_{p \max}$ と $\bar{\theta}_p$ の関係によるものと推測できる。図 13 には、 $\bar{\theta}_p$ と $\Delta\theta_{p \max}$ との比の累積度数分布を、柱脚の降伏が先行する骨組の柱脚、梁の降伏が先行する骨組の柱脚、梁の 3 つに分けて示す。図 13 より、梁、柱脚ともに最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p \max}$ は塑性回転角の全変動幅 $\bar{\theta}_p$ と近い値を取ることが分かる。7 割程度の柱脚では、一方の最大塑性回転角の状態から逆方向の最大塑性回転角の状態に一回の塑性変形増分で移行している。

図 14 には、最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p \max}$ と累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ の関係を示し、 $\Sigma\Delta\theta_p$ と $\Delta\theta_{p \max}$ との比の累積度数分布を柱脚の降伏が先行する骨組の柱脚、梁の降伏が先行する骨組の柱脚、梁の 3 つに分けて図 15 に示す。梁については $\Sigma\Delta\theta_p / \Delta\theta_{p \max}$ は 5 程度が上限となると報告しているが、図 15 から分かるように柱脚と梁の $\Sigma\Delta\theta_p / \Delta\theta_{p \max}$ の分布は似ており、柱脚においても $\Sigma\Delta\theta_p / \Delta\theta_{p \max}$ は 5 程度が上限となる。ただし、

柱脚の降伏が先行する骨組の柱脚については、 $\Sigma\Delta\theta_p / \Delta\theta_{p \max}$ の値は梁よりも大きくなる傾向があり、梁の降伏が先行する骨組の柱脚は梁よりも小さくなる傾向がある。

4. 柱脚の耐力が塑性変形に及ぼす影響

4.1 解析の概要

前章で検討した柱脚の塑性変形は柱下端の塑性変形であり、柱脚の耐力は柱自体の耐力である。解析骨組の柱梁耐力比はすべて 1.5 程度以上であるので、前章の結果は柱脚の耐力が比較的大きい場合に限定した解析例である。しかし、前章の解析例においても、静的解析において 2 層床梁が柱脚より早期に降伏する骨組と柱脚の降伏が先行する骨組とでは、最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ と最大層間変位角 R_{\max} との関係に明確な違いが認められた。前章の結果では、この差は無視できる程度に小さいが、柱脚の耐力がさらに小さくなると柱脚に生じる塑性変形が前章の結果よりも大きくなる可能性がある。本章では、柱脚の耐力が柱脚に生じる塑性変形に与える影響を検討する。

柱脚の耐力を柱断面と無関係に変動させるために最下層柱下端に回転バネを挿入した。柱脚の塑性変形はこの回転バネに代表させ、柱下側材端は常に弾性として解析している。回転バネは、移動硬化型の復元力特性を持たせており、スリップなどは考慮していない。回転バネの荷重-変形関係は弾性域を持つバイリニア型であるが、柱の曲げ剛性の 1000 倍の弾性剛性を持たせることで、剛塑性に近い特性を与えている。歪硬化係数は 0.00002 とし、柱-バネ系としては、歪硬化係数

表2 各骨組の終局ベースシア係数 C_B

	柱脚固定骨組		柱脚回転バネ骨組の C_B					
	R_y	C_y	$r_B=0.2$	$r_B=0.4$	$r_B=0.6$	$r_B=0.8$	$r_B=1.0$	$r_B=1.2$
AR02	0.0056	0.323	0.359	0.387	0.416	0.443	0.471	0.498
AR04	0.0056	0.302	0.350	0.365	0.379	0.392	0.404	0.416
AR08	0.0063	0.329	0.366	0.384	0.393	0.400	0.407	0.414
AR12	0.0060	0.254	0.270	0.276	0.282	0.287	0.292	0.297
BR02	0.0070	0.560	0.515	0.582	0.649	0.715	0.773	0.825
BR04	0.0066	0.368	0.397	0.436	0.469	0.491	0.513	0.534
BR08	0.0070	0.404	0.420	0.454	0.480	0.493	0.512	0.525
BR12	0.0066	0.271	0.318	0.328	0.336	0.344	0.351	0.358
CR02	0.0062	0.359	0.338	0.368	0.399	0.429	0.460	0.490
CR04	0.0064	0.345	0.338	0.355	0.371	0.387	0.403	0.418
CR08	0.0062	0.299	0.319	0.346	0.367	0.381	0.390	0.397
BRI3A	0.0041	0.275	0.394	0.413	0.432	0.451	0.470	0.489
BRI3B	0.0045	0.303	0.358	0.376	0.394	0.412	0.430	0.447
BRI9A	0.0068	0.162	0.154	0.172	0.187	0.196	0.203	0.209
BRI9B	0.0070	0.176	0.176	0.191	0.202	0.210	0.216	0.223

が0.02程度となるようにした。回転バネの曲げ耐力は、設計用地震荷重を静的に比例载荷したとき、2層床梁と回転バネが同時に降伏するときの耐力を基準として、その r_B 倍として与えている。 r_B の値は、0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 の6種とした。なお、本論の解析骨組では、 r_B の値を小さくしても他の部材の耐力は全く変更していない。

r_B と終局ベースシア係数 C_B との関係を表2に示す。ただし、頂部水平変位が骨組高さの1/50になるまで設計用地震荷重を比例载荷したときの最大値として、 C_B は求めている。また、表2中には、前章で解析した柱脚固定の骨組について、最下層が弾性限に達したときの層間変位角 R_y とベースシア係数 C_y を示している。柱脚に回転バネをもつ骨組についての R_y と C_y の値は、 r_B が1以下の骨組では、表2の値の r_B 倍となる。なお、 r_B が1.2のときの R_y と C_y の値は、 r_B が1のときと同じ値になる。 C_B と r_B との関係は図16にも示している。弾性限ベースシア係数 C_y に比べると、終局ベースシア係数 C_B は r_B を小さくしてもあまり低下しない。図16において r_B の減少に伴って C_B が急激に小さくなっているBR02についても、 r_B を1から0.2に減少させたときの C_B の低下量は0.3程度であるが、 C_y の低下量は0.56の0.8倍で0.45程度となる。

4.2 最大塑性回転角

図17は、最大塑性回転角 $\theta_{p\max}$ と最大層間変位角 R_{\max} との関係を示したものである。図17よ

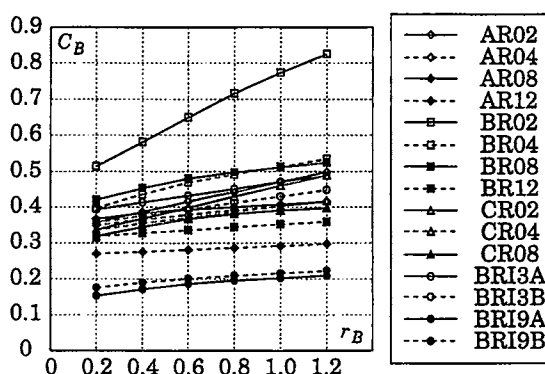


図16 $r_B - C_B$ 関係

り、 r_B の値毎に示したいずれの図においても、最大塑性回転角 $\theta_{p\max}$ は、最大層間変位角 R_{\max} と近い値をとっている。ただし、 r_B が0.2の時には $\theta_{p\max}$ は R_{\max} より大きくなる傾向があるのに対して、 r_B が1.2の時には、 $\theta_{p\max}$ は R_{\max} より小さくなる傾向が認められる。

なお、図17の(a)～(c)などでは0.1radを超える極端な変位角が多く現れている。これは本論の解析骨組では、 r_B の値を小さくしても他の部材の耐力は全く変更していないため、 r_B の値を小さくし柱脚の回転バネを弱くすると、最下層の耐力が低下し、最下層の層間変位角が増大し、それに伴って柱脚の塑性変形が大きくなるからである。しかし、実際の骨組では、1次設計時の骨組各部の応力を許容応力以下に収めることや各層のせん断耐力分布を適切に保つために、柱脚が弱くても最下層の耐力は必要値が確保されているはずであり、

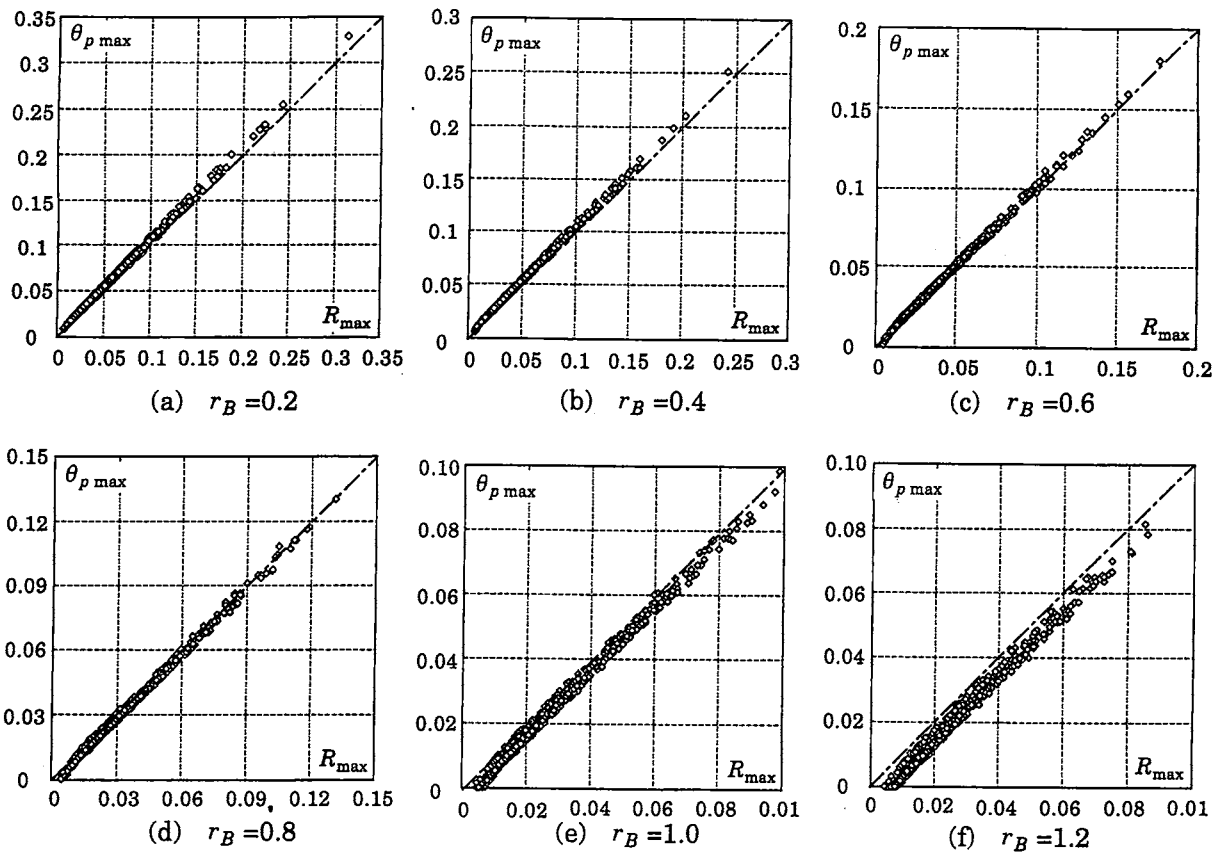


図17 最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ - 最大層間変位角 R_{\max} 関係

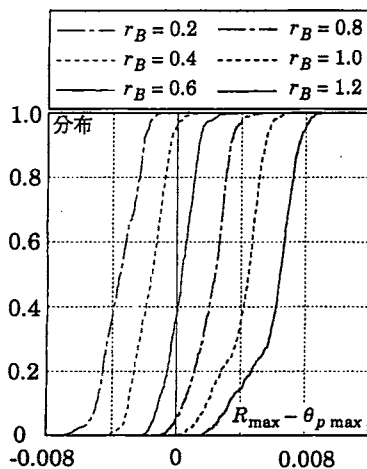


図18 $R_{\max} - \theta_{p \max}$ の累積度数分布

ここでの解析骨組のような最下層の層間変位角の増大や柱脚の塑性変形の増大は生じないはずである。そこで本論では、最大層間変位角と柱脚に生じる塑性変形との関係を検討する。

図18は、 R_{\max} と $\theta_{p \max}$ との差の累積度数分布を示したものである。ただし、耐震設計上興味ある範囲として、 R_{\max} が0.05以下の応答値だけを対象に、この章以降の累積度数分布は整理している。

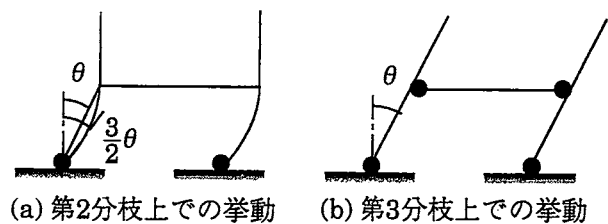


図19 柱脚の塑性変形

図18によると、 r_B が0.2小さくなる毎に、 R_{\max} と $\theta_{p \max}$ との差は0.002程度ずつ小さくなる傾向がある。すなわち、 r_B が小さくなると、最大層間変位角 R_{\max} に比べて、最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ が大きくなる傾向がある。

r_B が1より小さく柱脚が他の部材より早期に降伏すると、最下層の柱は、図19(a)に示すように変形し、柱脚の塑性回転角増分は層間変位角の増分より大きくなる。これが、 r_B が1より小さい骨組では、最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ が最大層間変位角 R_{\max} より大きくなる理由である。

柱脚だけが降伏しているときの最下層の変形増分を図19(a)に示すように考えて、梁や接合部バ

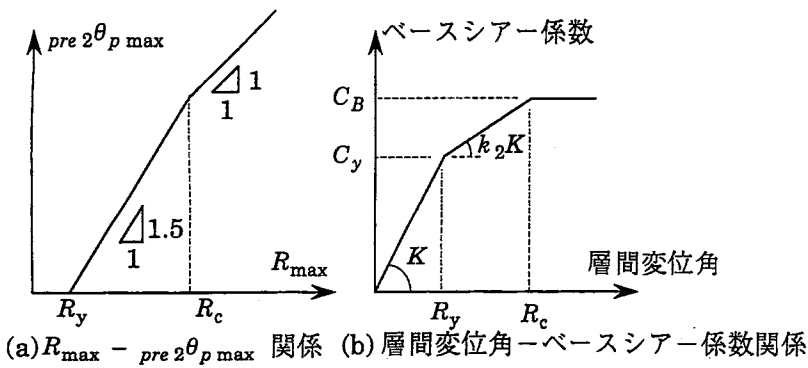


図 20 柱脚の塑性変形の予測

ネルなどの変形を無視すると、柱脚の塑性回転角の増分は、層間変位角の増分の1.5倍となる。変形が進行して、図19(b)に示すように、最下層柱頭部(梁や接合部パネルなど)が降伏すると、その後の柱脚の塑性回転角の増分は、層間変位角の増分と等しくなる。したがって、柱頭部が降伏するときの層間変位角を R_c とすると、最大塑性回転角の予測値 $pre\ 2\theta_{p\ max}$ と最大層間変位角 R_{max} との関係は図20(a)のように表される。すなわち、

$$pre\ 2\theta_{p\ max} = \min \left\{ 1.5(R_{max} - R_y), 1.5(R_c - R_y) + R_{max} - R_c \right\} \quad (2)$$

最下層の層間変位角とベースシア係数との関係を図20(b)のようにTrilinear形とし、機構を形成し終局ベースシア係数に到達した時の層間変位角を R_c とすると、 R_c は次式で表される。

図 21 $pre\ 2\theta_{p\ max} - \theta_{p\ max}$ の累積度数分布

$$R_c = \left(\frac{C_B - C_y}{k_2 C_y} + 1 \right) R_y \quad (3)$$

上式で k_2 は、最下層の層間変位角-ベースシア係数関係の第2分枝剛性比である。

第2分枝の状態では、図19(a)に示すように、柱脚だけが降伏していると考えている。このとき、柱の変形による層間変位と層せん断力との剛性は、弾性時の1/4となる。したがって、最下層の弾性変形に占める柱の弾性変形の割合を γ_c とすると、第2分枝剛性比 k_2 は次式で表される¹⁰⁾。

$$k_2 = \frac{1}{4\gamma_c + (1 - \gamma_c)} = \frac{1}{1 + 3\gamma_c} \quad (4)$$

ここで、 γ_c を0.5とすると、第2分枝剛性比 k_2 は0.4となる。

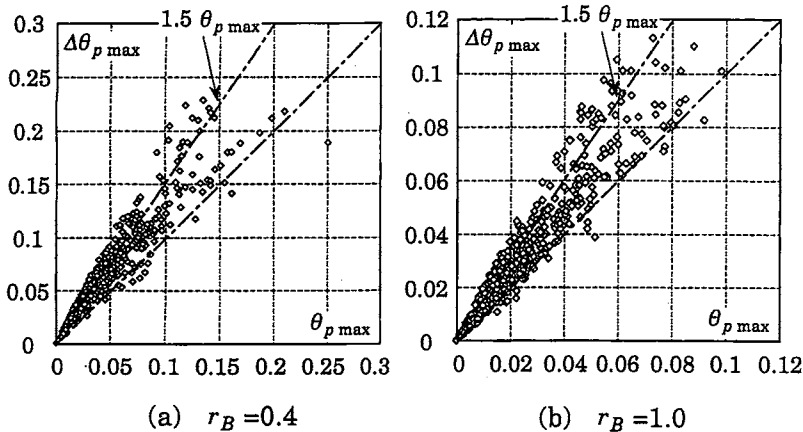


図 22 $\Delta\theta_{p\ max} - \theta_{p\ max}$ 関係

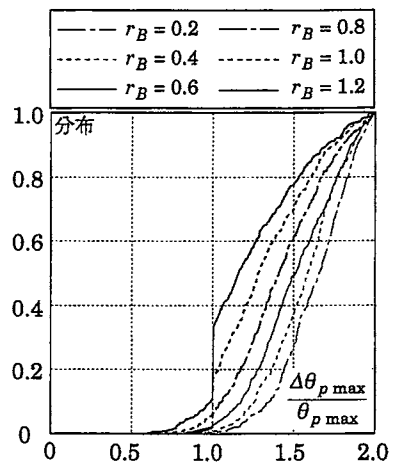
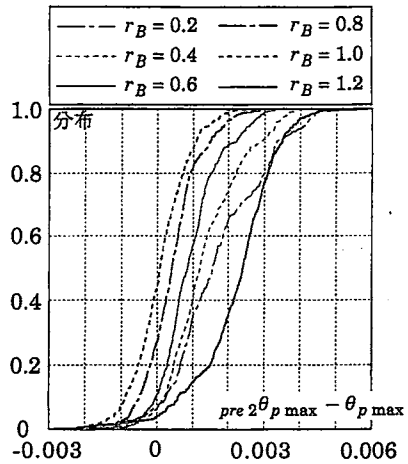


図 23 $\Delta\theta_{p\ max} / \theta_{p\ max}$ の分布

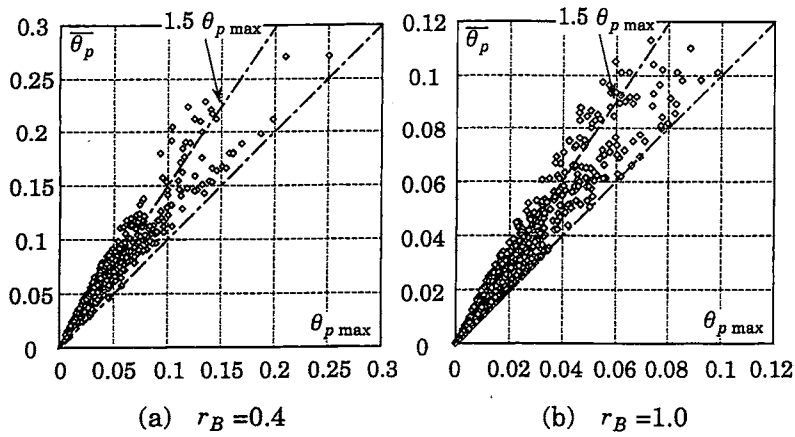


図 24 $\bar{\theta}_p - \theta_{p \max}$ 関係

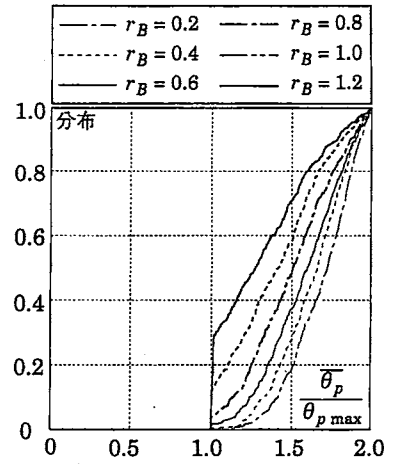


図 25 $\bar{\theta}_p / \theta_{p \max}$ の分布

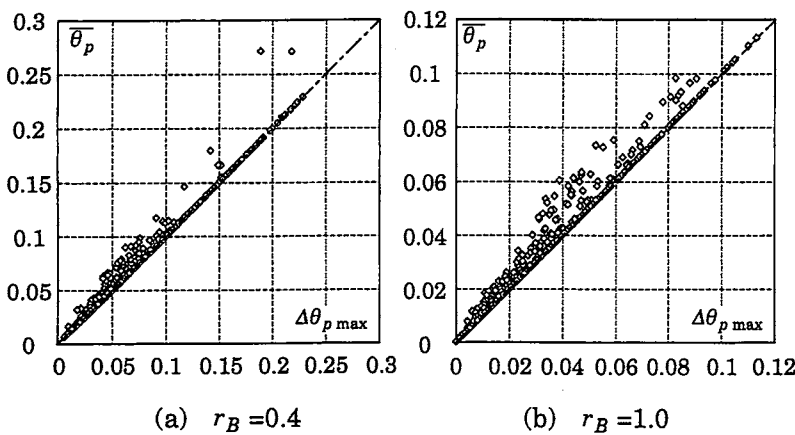


図 26 $\bar{\theta}_p - \Delta\theta_{p \max}$ 関係

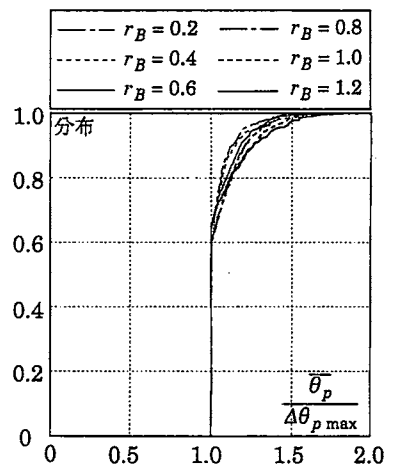


図 27 $\bar{\theta}_p / \Delta\theta_{p \max}$ の分布

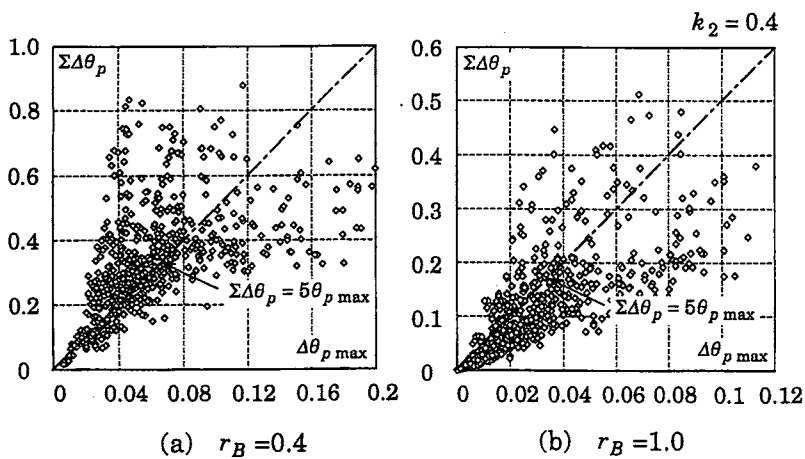


図 28 $\Sigma\Delta\theta_p - \Delta\theta_{p \max}$ 関係

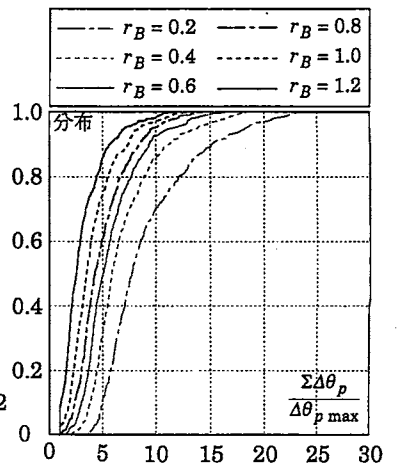


図 29 $\Sigma\Delta\theta_p / \Delta\theta_{p \max}$ の分布

$$k_2 = 0.4 \quad (5)$$

(3), (5) 式の値を用い, (2) 式で算定した最大塑性回転角の予測値 $pre\ 2\theta_{p\ max}$ と $\theta_{p\ max}$ との差の累積度数分布を図21に示す. 図21から分かるように, r_B の値に関わらず, (2)式の $pre\ 2\theta_{p\ max}$ によって最大塑性回転角が近似できる.

4.3 その他の塑性変形指標

図22には, 最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\ max}$ と最大塑性回転角 $\theta_{p\ max}$ の関係を $r_B = 0.4, r_B = 1.0$ の場合について示し, $\Delta\theta_{p\ max}$ と $\theta_{p\ max}$ との比の累積度数分布を図23に示す. r_B の値が小さくなるほど $\Delta\theta_{p\ max} / \theta_{p\ max}$ の値は大きくなる傾向がある.

図24には, 塑性回転角の全変動幅 $\bar{\theta}_p$ と最大塑性回転角 $\theta_{p\ max}$ の関係を $r_B = 0.4, r_B = 1.0$ の場合について示し, $\bar{\theta}_p$ と $\theta_{p\ max}$ との比の累積度数分布を図25に示す. r_B の値が小さくなるほど $\bar{\theta}_p / \theta_{p\ max}$ の値は大きくなる傾向があり, 柱脚が弱くなるほど左右に等しい塑性変形を受ける傾向が強くなる.

図26には, 最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\ max}$ と塑性回転角の全変動幅 $\bar{\theta}_p$ の関係を $r_B = 0.4, r_B = 1.0$ の場合について示し, $\bar{\theta}_p$ と $\Delta\theta_{p\ max}$ との比の累積度数分布を図27に示す. r_B の値が小さくなるほど, $\Delta\theta_{p\ max}$ と $\bar{\theta}_p$ が等しくなる割合は増える傾向にある.

図28には, 累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ と最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p\ max}$ の関係を $r_B = 0.4, r_B = 1.0$ の場合について示し, $\Sigma\Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\ max}$ の累積度数分布を図29に示す. $\Sigma\Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\ max}$ の値は, r_B の値が小さくなると急激に大きくなる. 柱脚の耐力に条件を設

けない限り, $\Sigma\Delta\theta_p / \Delta\theta_{p\ max}$ の上限を設定することもできない.

5. 柱脚の復元力特性が異なる時の塑性変形

5.1 解析の概要

前章では, 剛塑性回転バネを用いて解析を行ったが, 本章ではバイリニア型モデルとスリップ型モデルの2つのモデルの回転バネを柱脚に用い, 柱脚の復元力特性の違いによる柱脚の塑性変形の影響を検討する. 回転バネの弾性剛性は, 両モデルとも反曲点位置を柱の材長の1/2と仮定したときの柱の弾性剛性とし, 回転バネの曲げ耐力は, 前章の場合と同じように, 設計用地震荷重を静的に比例載荷したとき, 2層床梁と同時に回転バネが降伏するときの耐力の r_B 倍として与えている. r_B の値は, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2の6種とした. なお, r_B の値を小さくしても他の部材の耐力は全く変更していない.

各骨組の終局ベースシア係数 C_B , 最下層が弾性限に達したときの層間変位角 R_y とベースシア係数 C_y を表3に示しておく.

5.2 最大層間変位角

バイリニア型の柱脚をもつ骨組の最大層間変位角とスリップ型の柱脚をもつ骨組の最大層間変位角との関係を図30に示す. 図31には, スリップ型の柱脚をもつ骨組の最大層間変位角とバイリニア型の柱脚をもつ骨組の最大層間変位角との比の累積度数分布を示す. ただし, この図でも, バイリニア型の柱脚をもつ骨組の最大層間変位角が

表3 各骨組のベースシア係数

	柱脚固定骨組		柱脚回転バネ骨組の C_B					
	R_y	C_y	$r_B = 0.2$	$r_B = 0.4$	$r_B = 0.6$	$r_B = 0.8$	$r_B = 1.0$	$r_B = 1.2$
AR02	0.0060	0.294	0.352	0.374	0.396	0.418	0.439	0.461
AR04	0.0060	0.268	0.346	0.358	0.370	0.380	0.390	0.400
AR08	0.0067	0.288	0.362	0.377	0.387	0.394	0.400	0.405
AR12	0.0064	0.221	0.269	0.274	0.278	0.282	0.287	0.291
BR02	0.0078	0.484	0.500	0.551	0.603	0.654	0.705	0.753
BR04	0.0072	0.322	0.388	0.419	0.449	0.471	0.489	0.507
BR08	0.0083	0.355	0.412	0.440	0.464	0.483	0.497	0.508
BR12	0.0070	0.236	0.315	0.324	0.331	0.338	0.344	0.349
CR02	0.0068	0.306	0.331	0.354	0.378	0.402	0.425	0.449
CR04	0.0069	0.300	0.332	0.348	0.360	0.373	0.385	0.398
CR08	0.0066	0.301	0.312	0.335	0.353	0.369	0.380	0.388
BRI3A	0.0044	0.259	0.389	0.405	0.419	0.434	0.449	0.464
BRI3B	0.0048	0.236	0.360	0.374	0.388	0.402	0.415	0.428
BRI9A	0.0073	0.142	0.153	0.172	0.187	0.196	0.203	0.209
BRI9B	0.0074	0.154	0.176	0.191	0.202	0.210	0.216	0.222

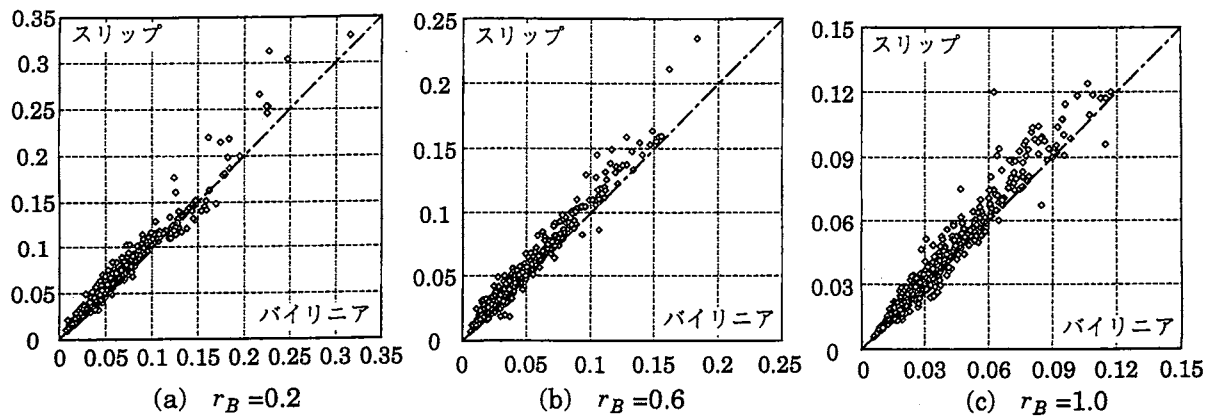


図 30 最大層間変位角 R_{max} の比較

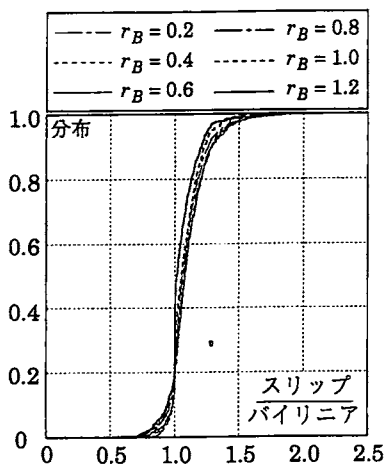


図 31 R_{max} の比の累積度数分布

0.05以下の応答値だけを対象にしている。図30、図31より、最大層間変位角の比は大部分が1から1.3程度の範囲にあり、スリップ型の方が最大層間変位角が大きくなる傾向はあるが、極端に大きくなるわけではない。この比の単純平均は、 r_B が1.2のときは1.05、 r_B が1のときは1.07、 r_B が1より小さいときは1.11程度である。

5.3 最大塑性回転角

図32には、バイリニア型の柱脚の最大塑性回転角とスリップ型の柱脚の最大塑性回転角との関係を示す。図33には、スリップ型の柱脚の最大塑性回転角とバイリニア型の柱脚の最大塑性回転角との比の累積度数分布を示す。ただし、この図でも、

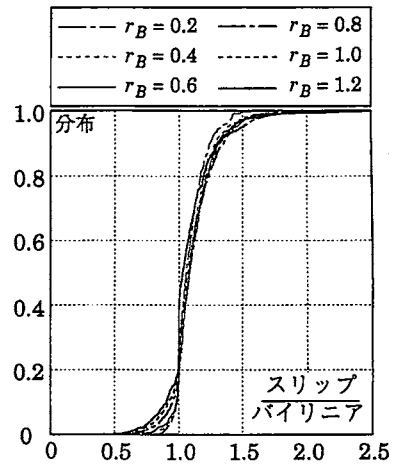


図 33 $\theta_{p \max}$ の比の累積度数分布

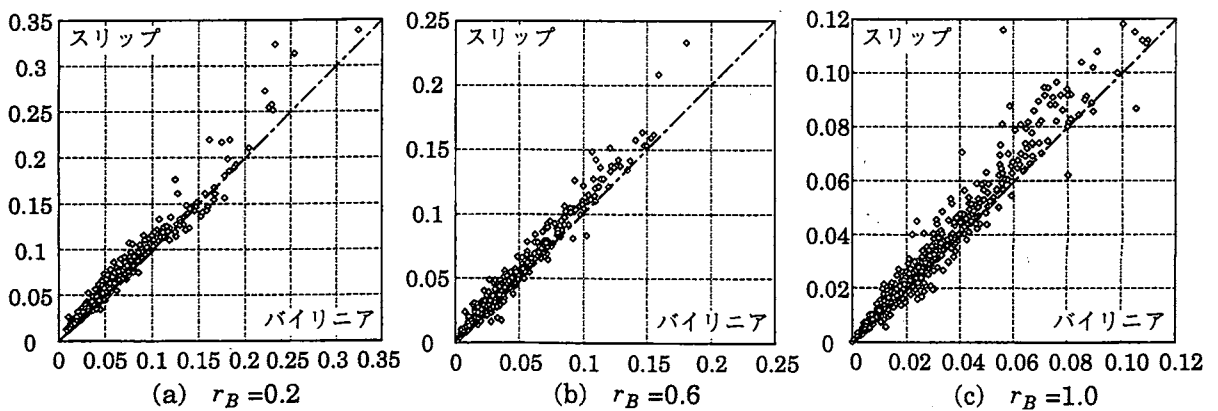


図 32 最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ の比較

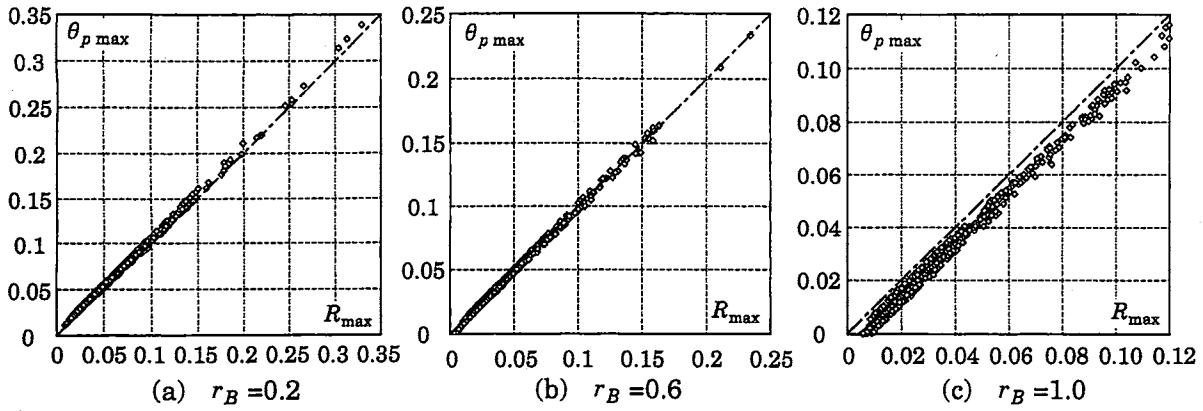


図 34 $\theta_{p \max} - R_{\max}$ 関係

バイリニア型の柱脚をもつ骨組の最大層間変位角が 0.05 以下の応答値だけを対象にしている。図 32 より、最大層間変位角と同様に、柱脚の最大塑性回転角についてもスリップ型の方が若干大きくなる傾向が認められる。図 33 によると、最大塑性回転角の比も大部分が 1 から 1.3 程度の範囲にあり、この比の単純平均は r_B が 1.2 のとき 1.08, r_B が 1 のときは 1.10, r_B が 1 より小さいときは 1.12 程度である。

5.4 スリップ型柱脚の塑性変形

図 34 には、スリップ型の復元力特性をもつ柱脚の最大塑性回転角と最大層間変位角との関係を示す。柱脚の最大塑性回転角は最大層間変位角と近い値をとる。

図 35 には、最大層間変位角と最大塑性回転角との差の累積度数分布を示す。なお、この図でも最大層間変位角が 0.05 以上の応答値は除外している。柱脚が弱くなるにしたがって、最大層間変位角と最大塑性回転角との差は小さくなる傾向がある。 r_B が 0.2 ずつ小さくなる毎に、最大層間変位角

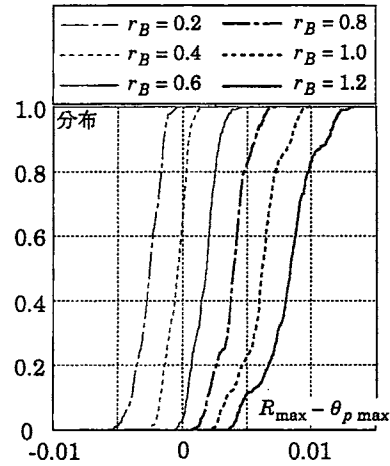


図 35 $R_{\max} - \theta_{p \max}$ 関係

と最大塑性回転角との差は 0.002 程度小さくなっている。

(2) 式の最大塑性回転角の予測値 $pre\ 2\theta_{p \max}$ と応答値 $\theta_{p \max}$ の関係を図 36 に示す。また、図 37 には $pre\ 2\theta_{p \max}$ と $\theta_{p \max}$ との差の累積度数分布を示す。図 36, 37 より、前章で述べた剛塑性型の復元力特性をもつ柱脚と同様に、スリップ型の復

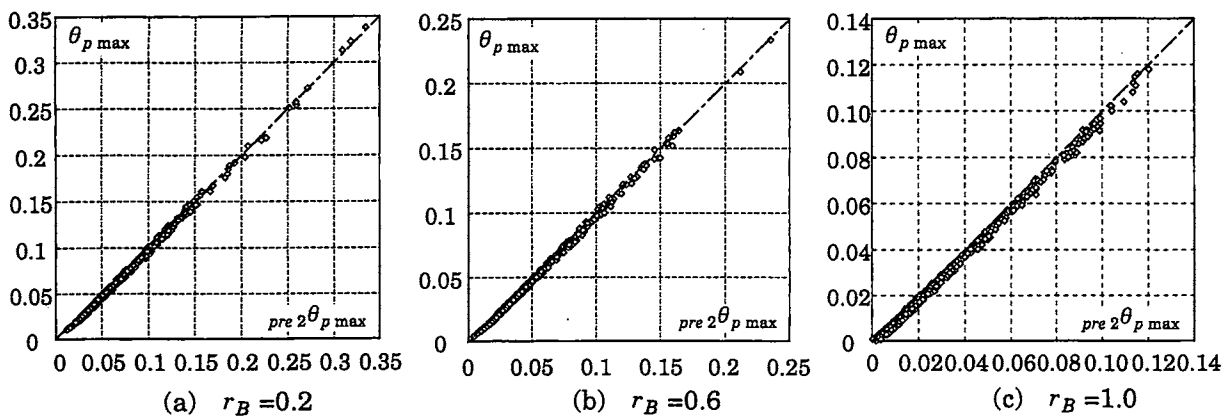


図 36 $\theta_{p \max} - pre\ 2\theta_{p \max}$ 関係

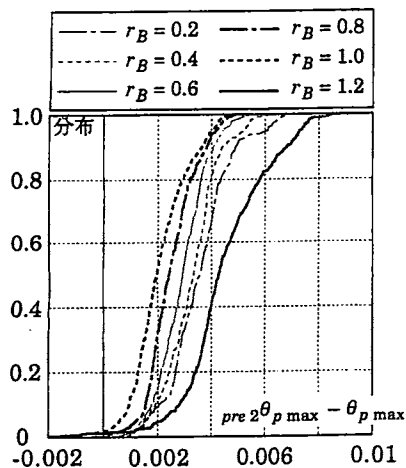
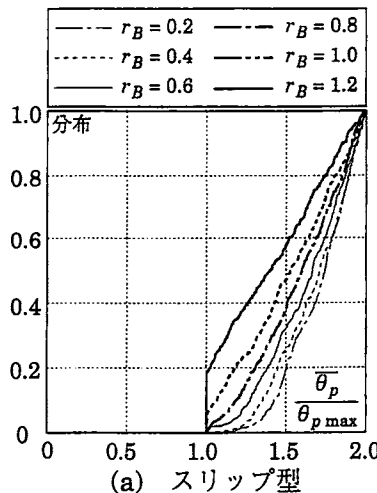
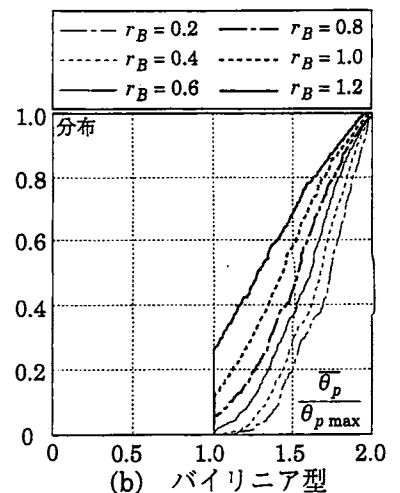


図 37 $pre\ 2\theta_{p\ max} - \theta_{p\ max}$ 関係



(a) スリップ型



(b) バイリニア型

図 38 $\bar{\theta}_p / \theta_{p\ max}$ の分布

元力特性をもつ柱脚の最大塑性回転角も $pre\ 2\theta_{p\ max}$ で近似できることがわかる。

図 38 には、スリップ型とバイリニア型について、塑性回転角の全変動幅 $\bar{\theta}_p$ と最大塑性回転角 $\theta_{p\ max}$ との比の累積度数分布を示す。ただし、この図でも、バイリニア型の最大層間変位角が 0.05 以下の応答値だけを対象にしている。図 38 より、 $\bar{\theta}_p / \theta_{p\ max}$ の値は、スリップ型、バイリニア型とも r_B が小さくなるにしたがって大きくなる傾向がある。すなわち、 r_B が 1.2 のとき、スリップ型では、 $\bar{\theta}_p / \theta_{p\ max}$ が 1.5 以下が 60% 程度で、バイリニア型では、 $\bar{\theta}_p / \theta_{p\ max}$ が 1.5 以下が 70% 程度である。一方、 r_B が 0.2 のときは、 $\bar{\theta}_p / \theta_{p\ max}$ が 1.5 を超えるものは、スリップ型、バイリニア型とも 80% 程度ある。

図 39 には、スリップ型の柱脚の $\bar{\theta}_p / \theta_{p\ max}$ とバイリニア型の柱脚の $\bar{\theta}_p / \theta_{p\ max}$ との比の累積度数分布を示す。この図でも、バイリニア型の柱脚をもつ骨組の最大層間変位角が 0.05 以下の応答値だけを対象にしている。図 39 によると、スリップ/バイリニアが 1 となるときの分布は、0.45 程度であり、スリップ型の方がバイリニア型の柱脚より、 $\bar{\theta}_p / \theta_{p\ max}$ の値は若干大きくなる傾向がある。スリップ型の柱脚の $\bar{\theta}_p / \theta_{p\ max}$ とバイリニア型の柱脚の $\bar{\theta}_p / \theta_{p\ max}$ との比の単純平均は、 r_B が 0.2 のとき 1.01、 r_B が 0.4 のとき 1.04、 r_B が 0.6 のとき 1.06、 r_B が 0.8 のとき 1.08、 r_B が 1.0 のとき 1.10、 r_B が 1.2 のとき 1.11 程度である。

6. 結論

本論では、設計の最初の段階で、設計条件として地震時の最大層間変位角 R_{max} が指定された時

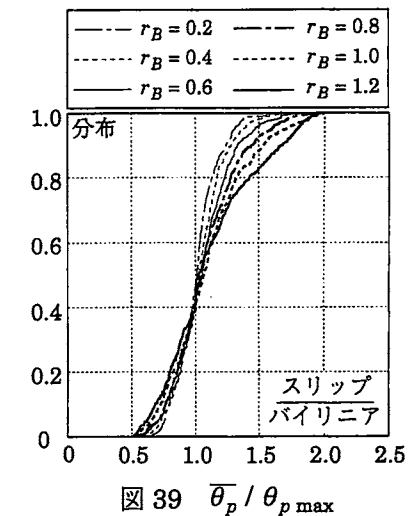


図 39 $\bar{\theta}_p / \theta_{p\ max}$

点で、柱脚に要求される必要塑性変形性能を評価する方法を確立することを目的とした。現行の耐震規定にしたがって設計された標準的な 15 の鋼構造ラーメン骨組の 40 波の強震記録に対する地震応答解析結果に基づいて、柱脚に生じる塑性変形と最大層間変位角 R_{max} との関係を検討した。その結果は、最大層間変位角 R_{max} を用いて近似値が得られるように、以下のように纏めている。

3章では、柱脚固定の条件で、最下層柱の下端に生じる塑性変形について検討した。柱脚が比較的強い骨組であり、柱脚より梁の降伏が先行する骨組が多い。その結果を纏めると以下ようになる。

(1) 柱脚の最大塑性回転角 $\theta_{p\ max}$ は最大層間変位角 R_{max} と最下層の弾性層間変位角 R_y との差で上限が近似できる。

$$\theta_{p\ max} \approx R_{max} - R_y \quad (6)$$

(2) 柱脚の最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p \max}$ は最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ の1から1.5倍程度の範囲にある。

$$\theta_{p \max} < \Delta\theta_{p \max} < 1.5\theta_{p \max} \quad (7)$$

(3) 柱脚の塑性回転角の全変動幅 $\bar{\theta}_p$ は最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ の1から1.5倍程度の範囲にある。

$$\theta_{p \max} < \bar{\theta}_p < 1.5\theta_{p \max} \quad (8)$$

(4) 柱脚の塑性回転角の全変動幅 $\bar{\theta}_p$ と最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p \max}$ は、ほぼ等しい。

$$\bar{\theta}_p = \Delta\theta_{p \max} \quad (9)$$

(5) 柱脚の累積塑性回転角 $\Sigma\Delta\theta_p$ と柱脚の最大塑性回転角増分 $\Delta\theta_{p \max}$ との比 $\Sigma\Delta\theta_p / \Delta\theta_{p \max}$ は5程度が上限となる。

以上のように、柱脚に生じる最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ とその他の塑性変形指標との関係は、前報^{1, 2)}で述べた梁とあまり変わらない。

4章では、柱脚が比較的弱く、梁より柱脚の降伏が先行する骨組について検討した。その結果を纏めると以下ようになる。

(6) 柱脚の耐力に関わらず、最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ は次式で近似できる。

$$\theta_{p \max} = \min \left\{ 1.5(R_{\max} - R_y), 1.5(R_c - R_y) + R_{\max} - R_c \right\} \quad (10)$$

上式で R_c は最下層柱頭部（梁や接合部パネルなど）が降伏するときの層間変位角であり、終局ベースシア係数 C_B と弾性限ベースシア係数 C_y を用いて次式で近似できる。

$$R_c = \left(\frac{C_B - C_y}{0.4 C_y} + 1 \right) R_y \quad (11)$$

(7) 柱脚の $\Delta\theta_{p \max} / \theta_{p \max}$ の値は、柱脚の耐力低下に伴い大きくなる傾向がある。

(8) 柱脚の $\bar{\theta}_p / \theta_{p \max}$ の値は、柱脚の耐力低下に伴い大きくなる傾向がある。

(9) 柱脚の $\bar{\theta}_p / \Delta\theta_{p \max}$ の値は、柱脚の耐力低下に関わらず一定である。

$$\bar{\theta}_p \approx \Delta\theta_{p \max} \quad (12)$$

(10) 柱脚の $\Sigma\Delta\theta_p / \Delta\theta_{p \max}$ の値は、柱脚の耐力低下に伴い急激に大きくなる傾向がある。

柱脚が弱い時の $\Sigma\Delta\theta_p / \Delta\theta_{p \max}$ の値は、前報^{1, 2)}で述べた梁と大きく異なっている。

5章では、柱脚の復元力特性（バイリニア型、スリップ型）の影響について述べた。その結果を纏めると以下ようになる。

(11) 最下層の最大層間変位角 R_{\max} 、柱脚の最大塑性回転角 $\theta_{p \max}$ はいずれも、バイリニア型よりもスリップ型の方が若干大きくなる傾向があるが、

その差は小さい。

(12) R_{\max} と $\theta_{p \max}$ などの柱脚に生じる塑性変形との関係については、復元力特性の影響は小さい。

<参考文献>

- 1) 小川厚治・中原寛章：強震を受ける鋼構造ラーメン骨組の梁に生じる塑性変形（その1：最大変形），日本鋼構造協会鋼構造論文集，第10巻，第39号，pp.89-104，2003.9
- 2) 小川厚治・中原寛章：強震を受ける鋼構造ラーメン骨組の梁に生じる塑性変形（その2：履歴挙動），日本鋼構造協会鋼構造論文集，第10巻，第39号，pp.105-120，2003.9
- 3) 河野昭雄・松井千秋：柱脚の復元力特性の違いが降伏型鉄骨ラーメンの地震応答性状に与える影響について，日本建築学会構造系論文報告集，第507号，pp.139-146，1998.5
- 4) 河野昭雄・高木由紀子・松井千秋：多層鉄骨ラーメンの地震応答性状に及ぼす柱脚の復元力特性の影響，鋼構造年次論文報告集，Vol.7，pp.301-308，1999.11
- 5) 河野昭雄・松井千秋・高木由紀子：柱脚の降伏耐力が異なる多層鉄骨ラーメンの地震応答挙動，鋼構造年次論文報告集，Vol.6，pp.319-326，1998.11
- 6) 加藤勉・佐藤邦昭・鎌形修一・田上淳：鋼構造露出型柱脚の復元力特性が上部架構に与える影響について（その1：スリップ型モデルの応答解析），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.867-868，1986年8月
- 7) 加藤勉・佐藤邦昭・鈴木周衛・前田祥三：鋼構造露出柱脚の復元力特性が上部架構に与える影響について（その2：完全弾塑性型モデルの応答解析），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.869-870，1986年8月
- 8) 山田哲・秋山宏・貞許美和：スリップ型の復元力特性を有する柱脚の弾塑性挙動が鋼構造多層骨組の終局耐震性能に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，第502号，pp.141-147，1997.12
- 9) P.Somerville, et al.: Development of Ground Motion Time Histories for Phase 2 of the FEMA/SAC Steel Project, SAC Background Document, Report No.SAC/BD-97-04, SAC Joint Venture, 555 University Ave., Sacramento, CA, 1997
- 10) 小川厚治・井上一朗・中島正愛・澤泉紳一：梁降伏型鋼構造ラーメン部材の必要塑性変形性能に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第537号，pp.121-128，2000.11