

論文 鉄筋コンクリート柱の軸力保持限界に関する研究

竜 泰之*1・中村 孝也*2・芳村 学*3

要旨: 本研究では、せん断破壊型 RC 柱を対象とした、比較的低軸力下での水平加力実験を行い、柱が軸力保持限界に達するまでの挙動について考察した。ここで、軸力保持限界とは、破壊の進展に伴いついには軸力保持能力を喪失して軸方向に崩壊する状態を指す。実験パラメータは軸力比と載荷履歴とした。実験より、軸力比が 0.27 程度までであれば、せん断力がゼロ近くになるまで安定して軸力を保持できること、軸力比および載荷履歴が軸力保持限界に大きな影響を与えること、等、がわかった。

キーワード: 軸力保持限界, せん断力, 軸力比, 加力履歴, 破壊モード

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震では、RC 系建物中間層のある層において、柱がせん断破壊を起こしたあとついに軸力保持限界に達して軸方向に崩壊したものが数多く見られた(中間層崩壊)。このような崩壊の再発を防止する上で、RC 柱の軸力保持限界と、そこに至るまでの過程を知ることが重要であると考えられる。しかし、過去の実験においては、下層の柱を対象とした高軸力のものはあったが¹⁾、中間層のような比較的低軸力を受ける RC 柱が軸力保持限界に達するまでの実験は殆どなかった²⁾。

本研究では、せん断破壊型 RC 柱を対象とした、比較的低軸力下での水平加力実験を行い、

軸力保持限界に達するまでの挙動について考察する。

2. 実験概要

2.1 試験体と実験パラメータ

試験体一覧を表-1 に、試験体概要を図-1 に示す。試験体は兵庫県南部地震で中間層崩壊した RC 骨組中の柱を想定して、せん断破壊するよう設計した。試験体は両端固定形式とし、柱断面寸法を 300mm×300mm、内法高さを 900mm(シアスパン比 1.5)とした。

コンクリートは設計基準強度 23.5MPa の普通コンクリートとした。鉄筋は、主筋に SD345 相当の D16(降伏強度=380MPa)、横補強筋に SD345

表-1 試験体一覧

試験体名 ^①	断面	シアスパン比	軸力比 ^②	載荷履歴	せん断強度 ^③ (kN)	曲げ強度 ^④ (kN)	せん断/曲げ強度	付着割裂強度 ^⑤ (kN)
N18M	300mm × 300mm	1.5	0.18	単調	215	277	0.78	230
N18C				繰り返し				
N27M	0.27		単調	230	313			
N27C			繰り返し					

①N18(N27)は軸力比 0.18(0.27)を加えることを表し、M は単調(Monotonic)載荷、C は繰り返し(Cyclic)載荷を意味する。②圧縮軸力 / (柱断面積×コンクリート強度) ③荒川 mean 式によるせん断強度 ④RC 規準(日本建築学会, 1991)略算式による曲げ降伏時せん断力 ⑤靱性保証型指針(日本建築学会, 1999)による付着割裂強度 ※各強度は材料の設計基準強度を用いて計算した。

*1 YKK AP (株) 修士 (工学) (正会員)
 *2 東京都立大学大学院助手 工学研究科建築学専攻 修士 (工学) (正会員)
 *3 東京都立大学大学院教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)

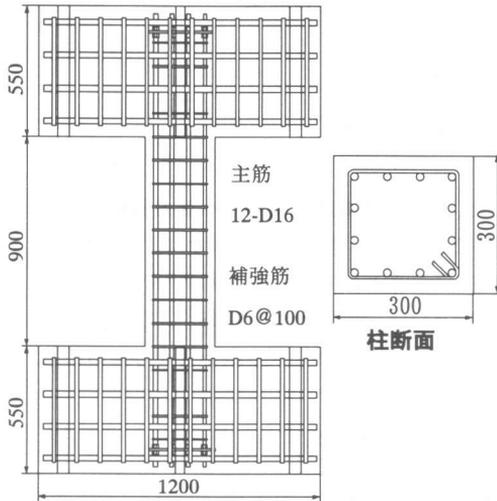


図-1 試験体配筋図

相当の D6 (降伏強度=375MPa)を用いた。引張鉄筋比は 1.32%，横補強筋比は 0.21%である。材料実験結果を表-2 に示す。加力前後(材齢 51 日, 81 日)に行った材料試験結果の平均として求めたコンクリート強度は 26.5MPa であった。

実験パラメータは軸力比と載荷履歴とした。軸力比は 0.18 と 0.27 の 2 種類とし、載荷履歴は、通常の繰返し載荷と、片振りに近い兵庫県南部地震特有の応答³⁾を想定した単調載荷の 2 種類とした。繰返し載荷の N18C(軸力比 0.18)では、水平変形±0.5%，±1.0%，±2.0%，±3.0%，±4.0%の加力をそれぞれ 1 回行ったあと、正方向に軸力保持限界に達するまで押し切った。繰返し載荷の N27C(軸力比 0.27)では、軸力比がやや大きいため、水平変形±0.5%，±1.0%の加力をそれぞれ 1 回行ったあと、正方向に軸力保持限界に達するまで押し切った。

なお、試験体名については表-1 の注を参照されたい。

2.2 加力概要

加力装置を図-2 に示す。加力には、パンタグラフにより上下スタブの平行が保持される逆対称加力装置を用いた。試験体上部に設置した、一端(加力フレーム側)にローラー、他端(試験体側)にピンを有する鉛直アクチュエーター(最大荷重 1000kN)により所定の鉛直力を加えた状態

表-2 材料特性

(1) 鉄筋

	降伏強度 (MPa)	降伏歪 (%)	ヤング係数 (MPa)
D16	380	0.24	1.8×10^5
D6	375	0.19	2.2×10^5

(2) コンクリート

材齢	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)
加力前(51 日)	25.0	2.0×10^4
加力後(81 日)	28.0	2.2×10^4
平均	26.5	2.1×10^4

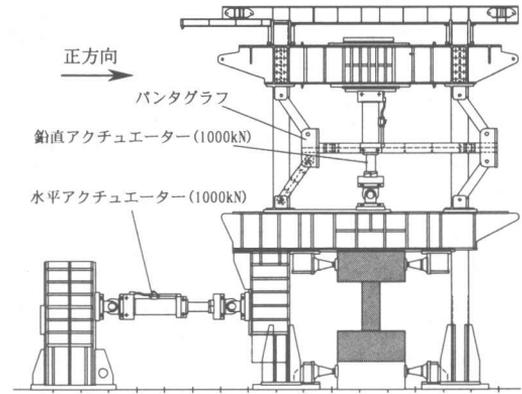


図-2 加力装置

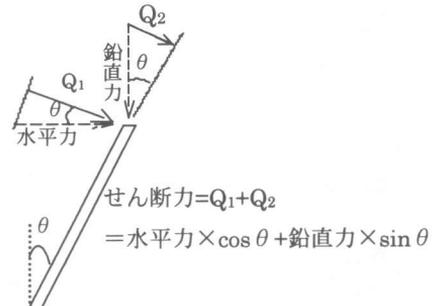


図-3 せん断力の求め方

で、水平アクチュエーター(最大荷重 1000kN)により水平力を加えた。水平アクチュエーターは変形制御としたが、鉛直アクチュエーターは荷重制御の状態とし、代わりに崩壊時に備えて鉛直変形に 50mm のリミットを設けた。軸力保持限界に達して崩壊すると、この鉛直変形リミッターが作動して実験が強制終了されるのである。

2.3 測定方法

柱にかかる水平力、鉛直力をロードセルにより測定し、柱に生じる水平変形、鉛直変形を変位計により測定した。なお、せん断力は柱に直交する方向に作用する力であり、水平変形が大きい場合には水平力との違いが無視できないことから、水平力と鉛直力から図-3の方法によりせん断力を求めた。またそれに伴い、せん断力方向の変形も水平変形と鉛直変形から求めた。

3. 実験結果

すべての試験体で、軸力保持限界に達した瞬間にそれまで安定して保持していた軸力が急に保持できなくなり、鉛直変形リミッターが作動して実験が強制終了された。リミッターがセットされていないければ、中間層崩壊のように完全に崩壊していたはずである。写真-1に崩壊状況を示す。N18MとN18Cでは崩壊前と崩壊後の写真を示す。N27MとN27Cでは崩壊後の写真のみを示す。図-4に水平力-水平変形関係を太線で、せん断力-せん断力方向変形関係を細線で示す。図-5に鉛直変形-水平変形関係を示す。ここで、水平変形と鉛直変形は柱高さ900mmで割った値である。また、図中の◆は最大せん断力時を示し、●は軸力保持限界を示す。なお、図-3の方法により修正した場合にも軸力保持限界付近で荷重が負になっているものがあるが、これは柱が直線型を保ったまま変形する(柱頭と柱脚とを直線で結ぶ)と仮定したことから生じる誤差であると考えられる。

3.1 破壊経過と水平力-水平変形関係

「N18M」：水平変形0.2%の時に初期曲げせん断ひび割れが発生したあと、0.8%の時に最大耐力263kN(最大せん断力は266kN)に達した。補強筋の降伏は0.8%の時に起った。1.0%の時にせん断ひび割れと主筋に沿った付着ひび割れが発生した。その後の水平変形の増大に伴いせん断ひび割れが顕著となり、水平変形が10.3%に達した瞬間に、それまで安定して保持していた軸力を急に保持できなくなり、大きな音とともに軸方

向に激しく崩壊した。せん断ひび割れ面に沿ってずれ落ちるような破壊であった。この時の水平力は-64kN(せん断力は-18.8kN)であった。

「N18C」：水平変形0.2%の時に初期曲げせん断ひび割れが発生したあと、0.5%の時に最大耐力264kN(最大せん断力は266kN)に達した。補強筋の降伏は0.7%のときに起った。1.0%の時にせん断ひび割れと主筋に沿った付着ひび割れが発生した。その後の繰り返し载荷により、次第にせん断ひび割れより付着ひび割れが顕著になり、水平変形が20.6%に達した瞬間に、それまで安定して保持していた軸力を急に保持できなくなり、大きな音とともに軸方向に激しく崩壊した。付着割裂破壊に特有な柱全体にわたる破壊であった(写真-1, N18C参照)。この時の水平力は-97kN(せん断力は-3.5kN)であった。

「N27M」：水平変形0.2%の時に初期曲げせん断ひび割れが発生したあと、0.8%の時に最大耐力288kN(最大せん断力は293kN)に達した。補強筋の降伏は0.8%のときに起った。1.0%の時にせん断ひび割れが発生した。その後の水平変形の増大とともにせん断ひび割れが進展し、水平変形が4.7%に達した瞬間に、それまで安定して保持していた軸力を保持できなくなり、音をたてながら緩やかに軸方向に崩壊した。せん断ひび割れに沿ったすべての主筋に座屈が見られ、せん断圧縮破壊であった。この時の水平力は-40kN(せん断力は-9.7kN)であった。

「N27C」：水平変形0.2%の時に初期曲げせん断ひび割れが発生したあと、0.5%の時に最大耐力263kN(最大せん断力は266kN)に達した。補強筋の降伏は0.6%のときに起った。1.0%の時にせん断ひび割れが発生した。その後の水平変形の増大とともにせん断ひび割れが進展し、水平変形が3.0%に達した瞬間に、それまで安定して保持していた軸力を保持できなくなり、音をたてながら緩やかに軸方向に崩壊した。せん断ひび割れ面に沿ってずれ落ちるような破壊であった。この時の水平力は-3.5kN(せん断力は15.2kN)であった。

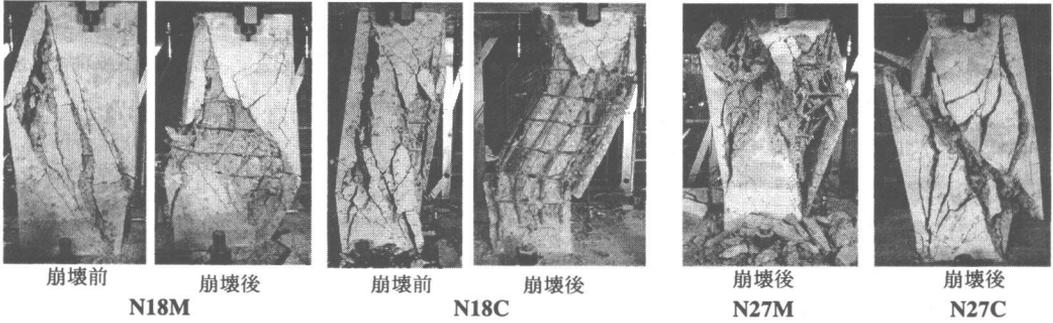


写真-1 崩壊状況

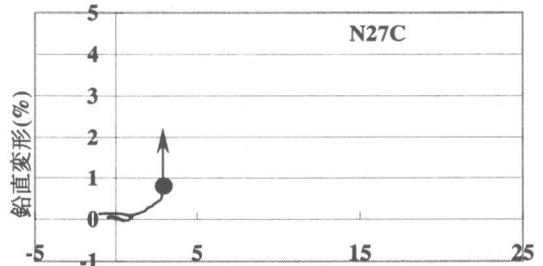
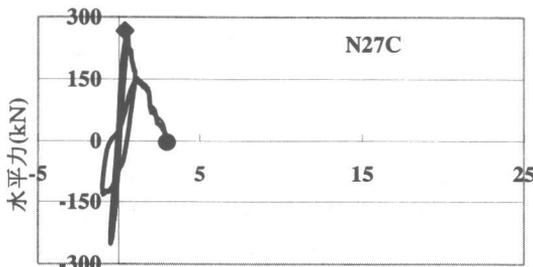
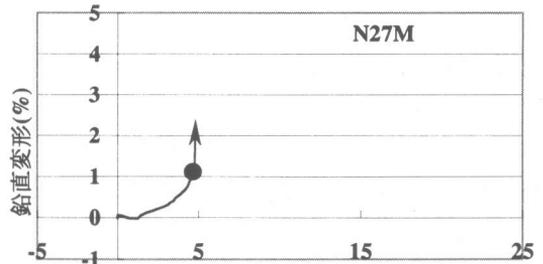
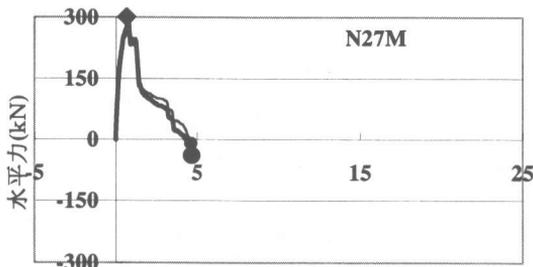
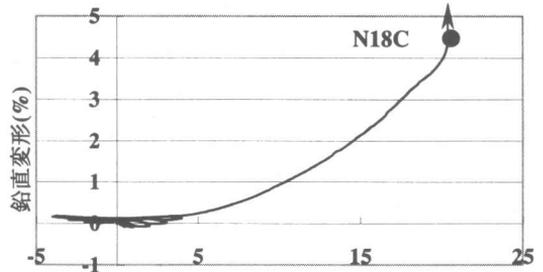
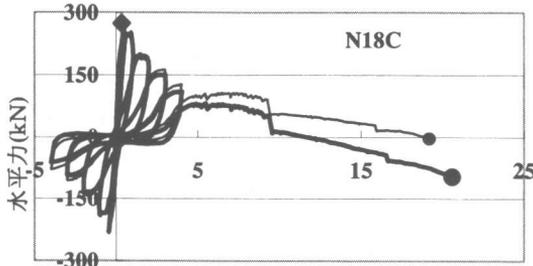
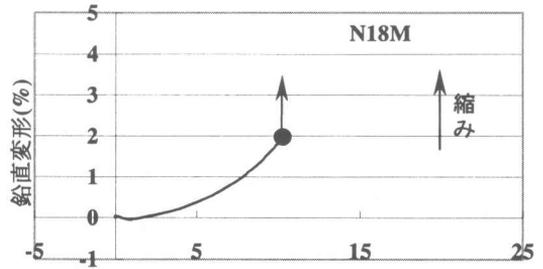
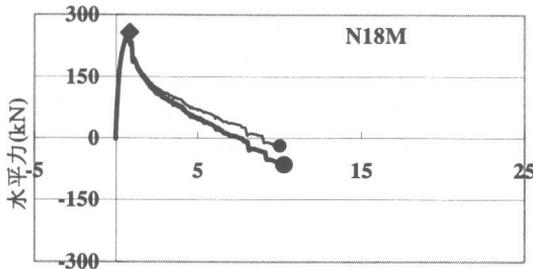


図-4 水平力-水平変形関係

図-5 鉛直変形-水平変形関係

3.2 鉛直変形 - 水平変形関係

軸力保持限界時に床レベルがどの程度沈下しているかを把握することが重要であると考えられるため、以下に鉛直変形について述べる。

「N18M」：水平変形の増大に伴い鉛直変形はほぼ単調に増大し、鉛直変形が2.0%に達した瞬間に崩壊した。

「N18C」：繰り返し载荷中の鉛直変形は最大でも0.1%であったが、最終载荷時に大きく増大し、鉛直変形が4.5%に達した瞬間に崩壊した。

「N27M」：水平変形の増大に伴い鉛直変形はほぼ単調に増大し、鉛直変形が1.1%に達した瞬間に崩壊した。

「N27C」：繰り返し载荷中の鉛直変形量は最大でも0.2%であったが、最終载荷時に大きく増大し、鉛直変形が0.8%に達した瞬間に崩壊した。

4. 考察

すべての試験体で、最大耐力に達するまでは殆ど同じ破壊の様子であった。しかし、その後は、軸力比と载荷履歴の違いによりそれぞれ異なる破壊の様子を示し、軸力保持限界時水平変形、鉛直変形には大きな違いが見られた。

4.1 崩壊性状について

破壊進展と崩壊性状を表-3に示す。

軸力比の影響：軸力比0.18の2体では、水平変形の増大に伴う破壊の進展は緩やかであったが、軸力保持限界に達した瞬間の崩壊は激しかった。一方、軸力比0.27の2体では逆に、水平変形の増大に伴う破壊の進展は激しかったが、軸力保持限界に達した瞬間の崩壊は緩やかであった。軸力比が高い場合、軸力保持限界における水平変形が小さいことが軸力保持能力の喪失を緩やかにしたのではないかと考えられる。

载荷履歴の影響：軸力比0.27では2体ともせん断破壊した。これに対して軸力比0.18では、単調载荷を受けるN18Mではせん断破壊したが、繰り返し载荷を受けるN18Cでは付着割裂破壊し、载荷履歴の違いにより破壊モードに変化が生じた。このようなことは過去の実験にも見ら

表-3 破壊進展と崩壊性状

	N18M	N18C	N27M	N27C
破壊進展	緩やか	緩やか	激しい	激しい
軸力保持限界時の崩壊	激しい	激しい	緩やか	緩やか
破壊モード	せん断	付着割裂	せん断	せん断

注) 破壊進展程度はコンクリートの落下やひび割れの開き具合から目視で判断した。軸力保持限界時の崩壊程度はRC柱が軸方向に潰れていく速度とそれに伴う音の大きさから判断した。

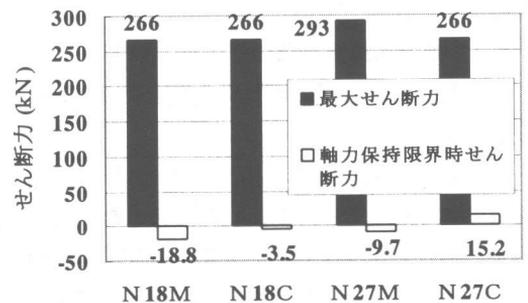


図-6 最大せん断力と軸力保持限界時せん断力

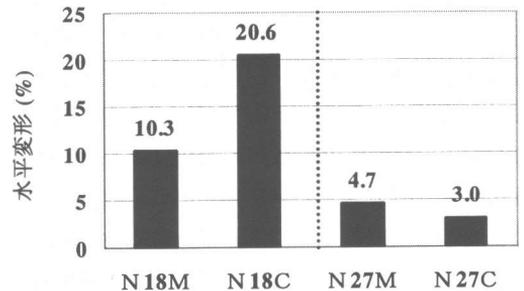


図-7 軸力保持限界時水平変形

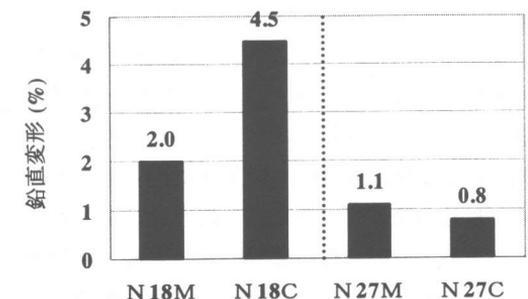


図-8 軸力保持限界時鉛直変形

れ^{例えば} 4), また, 付着割裂破壊に対しては繰り返し載荷作用の影響が大きいことも知られているので⁵⁾, 一般的に存在する現象であると考えられる。

4.2 軸力保持限界時のせん断力について

図-6 に最大せん断力と軸力保持限界時せん断力を示す。最大せん断力は計算値を少し上回る値であった。軸力保持限界時せん断力は、軸力比や載荷履歴に関わらずほとんどゼロであった。言い換えれば、軸力比が0.27程度までなら、せん断力がゼロ近くになるまで安定して軸力を保持することができると言える。

4.3 軸力保持限界時の変形について

図-7, 8 に軸力保持限界時の水平変形と鉛直変形を示す。

軸力比の影響: 軸力比 0.18 では水平変形約10%~20%, 鉛直変形約2%~4.5%であったのに対して、軸力比0.27では水平変形約3%~5%, 鉛直変形約1%であった。軸力比が大きくなると軸力保持限界時水平変形, 鉛直変形ともに小さくなった。

載荷履歴の影響: 軸力比0.27では、繰り返し載荷のN27Cのほうが単調載荷のN27Mより軸力保持限界時水平変形, 鉛直変形ともに小さかった。しかし、軸力比0.18では、繰り返し載荷のN18Cのほうが単調載荷のN18Mより軸力保持限界時水平変形, 鉛直変形ともに大きく、予想と逆の結果であった。これは、繰り返し載荷を受けることにより、N18Cでは付着割裂破壊を起こしたことが原因であると考えられる。写真-1より、せん断破壊を起こしたN18M(崩壊直後の写真)では破壊が柱中央部分に集中しているのに対して、付着割裂破壊を起こしたN18C(崩壊直後の写真)では破壊が柱全体にわたっていることがわかる。このような破壊モードの違いが軸力保持限界時変形に違いをもたらし、付着割裂破壊した場合のほうがせん断破壊した場合より軸力保持限界時水平変形, 鉛直変形ともに大きくなったのである。載荷履歴は軸力保持限界に大きな影響を及ぼすと言える。

5. まとめ

本研究では、せん断破壊型 RC 柱を対象とした、比較的低軸力下での水平加力実験を行い、軸力保持限界に達するまでの挙動について考察した。その結果、以下の見解を得た。

①軸力比0.27程度までの軸力であれば、せん断力がゼロ近くになるまで安定して軸力を保持することができる。

②軸力比が大きいほど、軸力保持限界時変形が小さい。軸力比0.18では水平変形約10%~20%、鉛直変形約2%~4.5%であったのに対して、軸力比0.27では水平変形約3%~5%、鉛直変形約1%であった。

③載荷履歴は軸力保持限界に影響を及ぼす。破壊モードが同じせん断の場合、繰り返し載荷のほうが単調載荷より軸力保持限界時水平変形, 鉛直変形が小さい。しかし、破壊モードが変化すると、この傾向が逆転することがある。

謝辞

本研究は、平成12年度日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究(C)(2)、「鉄筋コンクリート建物の中間層崩壊に関する研究」(課題番号:12650582, 研究代表者:芳村 学)の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) 日比純一ほか:高強度コンクリートを用いたRC柱の曲げ降伏後のせん断変形能に関する実験的研究, コンクリート工学年次報告集, pp.427-432, 1991
- 2) 山中憲行, 芳村学:低軸力下での曲げせん断型及びせん断破壊型RC柱の崩壊に関する研究, コンクリート工学年次報告集, pp.325-330, 2000.6
- 3) 芳村学, 山口悟, 山中憲行:鉄筋コンクリートの動的崩壊に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第20巻, 第3号, pp.1039-1044, 1998.7
- 4) 森田司郎, 藤井栄ほか2名:鉄筋コンクリート短柱の付着割裂破壊についての検討(その1 実験結果概要) 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2101-2102, 1983.9
- 5) 日本建築学会:建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 1990