

論文 鉄筋の座屈を考慮した縮小ならびに実大 RC 柱のポストピーク FEM 解析

伊藤 誠^{*1}・水野 英二^{*2}・川瀬 瞳^{*3}・畑中 重光^{*4}

要旨：本研究では，RC 柱の主鉄筋の座屈現象を考慮することにより，縮小サイズならびに実大 RC 柱のポストピーク挙動を解析的に考察する。ここでは，筆者らが提案するメッシュサイズに依存しない有限要素解析手法およびコンクリートの寸法効果を考慮した応力 - ひずみ関係を用いて，寸法比の異なる RC 柱のポストピーク領域までの破壊進展挙動を主鉄筋の座屈ならびにコンクリートの圧縮破壊の観点から検証する。

キーワード：寸法効果，ひずみ軟化型モデル，最適限界ひずみ，圧縮破壊領域

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の有限要素解析において，変形の局所化やポストピーク挙動の解明は重要な研究課題である。これまでに，筆者らはコンクリートにひずみ軟化型モデル，鉄筋にはバウシinger効果などが再現できる修正二曲面モデル，さらには構造特性としての主鉄筋の座屈現象を考慮できるモデルを採り入れることにより，繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリート (RC) 柱のポストピーク挙動の解明に取り組んできた¹⁾。

本研究では，文献 1) で採り挙げた RC 柱の断面・形状寸法を寸法比 0.5 ~ 4.0 と変化させた縮小ならびに実大 RC 解析モデルを対象として，部材寸法の効果をコンクリートの一軸圧縮強度に反映し，主鉄筋の座屈挙動を考慮した解析を実施し，断面寸法の違いがポストピーク挙動に及ぼす影響をコンクリートの圧縮破壊の観点から検証する。

2. 解析手法，構成モデル，鉄筋の座屈モデルの概要

2.1 解析手法

本研究では，鉄筋に修正二曲面モデルおよびコンクリートにひずみ軟化型モデルを組み込んだ

だけのエレメントサブルーチン (ファイバー法) を汎用プログラム FEAP²⁾ に用いて有限要素法に基づき解析を行う。

2.2 修正二曲面モデル (鋼材)

鋼材の構成モデルとして修正二曲面モデル³⁾ を用いた。修正二曲面モデルは，降伏棚を有する鋼材の一般応力状態での繰り返し挙動を精度よく再現することができる構成モデルである。

2.3 ひずみ軟化型モデル (コンクリート)

コンクリートの構成モデルとして，図 - 1 に示すようなひずみ軟化型の一軸応力 - ひずみ関係を採用した。本研究では，圧縮領域においてコンクリートは一軸圧縮強度まで硬化し，その後ある程度の拘束効果を受けて軟化挙動を示すものと仮定した。図中の ϵ_f は限界ひずみとし

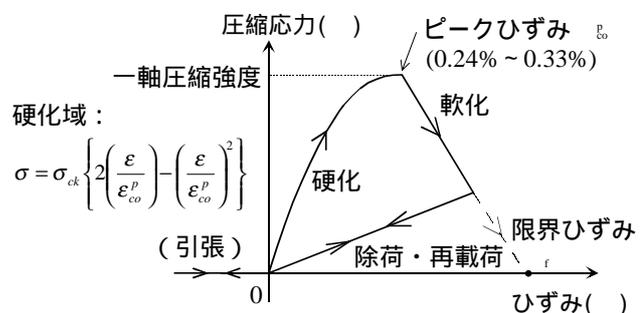


図 - 1 ひずみ軟化型モデル (コンクリート)

*1 中部大学大学院 工学研究科博士課程後期課程 建設工学専攻 修士 (正会員)

*2 中部大学教授 工学部土木工学科 Ph.D. (正会員)

*3 ヤマト設計 企画開発部

*4 三重大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

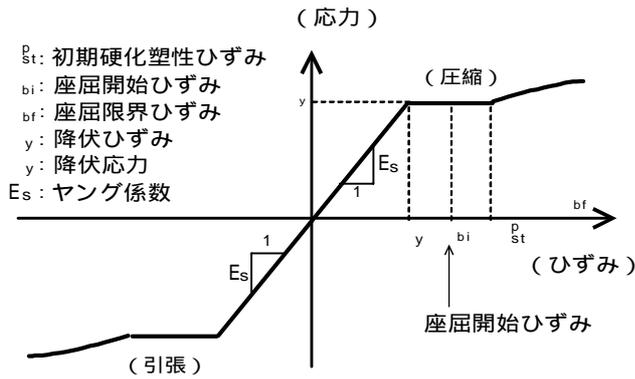


図 - 2 鋼材の応力 - ひずみ関係

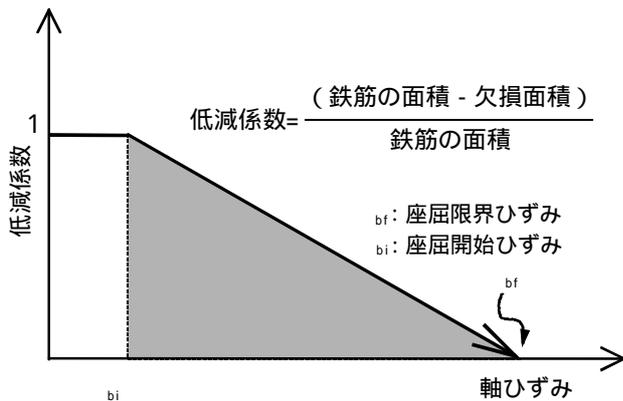


図 - 3 低減係数

で定義され¹⁾、この限界ひずみの値は RC 柱のポストピーク挙動解析結果に大きく影響するため、分割する要素長さに応じて最適な限界ひずみを定義する必要がある。筆者らは RC 柱のパラメトリック解析を通して、要素長さに応じた最適限界ひずみを評価し、要素長さと最適限界ひずみとの関係を示した¹⁾。この関係を組み入れることによって解析結果に及ぼす要素サイズ依存性をほぼ解消することができる。なお、本解析では、文献 1) の結果を用いる。

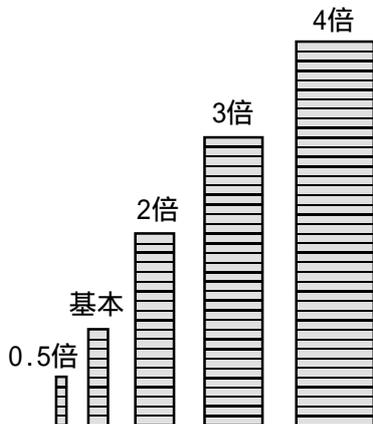


図 - 4 寸法比の異なる解析モデル

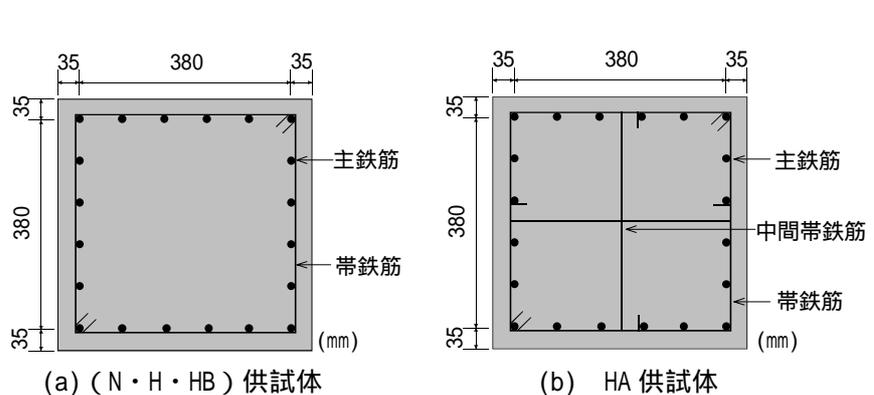


図 - 5 基本供試体の断面形状および寸法

2.4 鉄筋の座屈モデル

主鉄筋の座屈モデルは以下の仮定に基づく。

- 1) 図 - 2 に示すように、鉄筋の座屈は圧縮領域の降伏ひずみ以降に発生する。
- 2) 座屈開始ひずみ b_i 以降、鉄筋の応力を低減させる代わりに鉄筋の断面積を欠損させることにより、算定すべき断面力を低減させる。図 - 3 に示すような低減係数を座屈開始ひずみおよび最終的な座屈限界ひずみ b_f の間で設定し、これにより欠損後の断面積を算出する。本解析では、解析対象となった RC 柱供試体の P - 関係との比較から、 $b_i = 1\%$ 、 $b_f = 15\%$ と設定し解析を行った。

3. 寸法比の異なる縮小ならびに実大 RC モデルの FEM 解析

本章では、文献 1) で採り挙げた RC 供試体を基本サイズとして、図 - 4 に示すような寸法比 (0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0) の異なる 5 解析モデルを対象にポストピークを含むプッシュオーバー解析を行い、各解析モデルのポストピーク挙動および破壊進展領域の違いについて考察する。

3.1 基本供試体の概要

基本供試体モデル (柱高さ H : 2,250 mm) は普通強度からなる N 供試体と高強度材料からなる H 供試体, HA 供試体, および HB 供試体である⁴⁾。基本供試体の断面形状・寸法を図 - 5 に、材料諸強度を表 - 1 に示す。また、解析に使用したコンクリートの一軸圧縮強度および最適限界ひずみ¹⁾を表 - 2 に示す。なお、一軸圧

表 - 1 材料諸元⁴⁾

	N 供試体	H 供試体	HA 供試体	HB 供試体
コンクリート強度 (MPa)	37.1	65.7	66.8	64.3
主鉄筋	SD345 D13	USD685 D13	USD685 D13	USD685 D13
主鉄筋比	1.25 %	1.25 %	1.25 %	1.25 %
主鉄筋降伏強度 (MPa)	399	795	795	795
主鉄筋引張強度 (MPa)	587	998	998	998
帯鉄筋	SD295A D6 @40mm	SD490 D6 @40mm	SD490 D6 @40mm	SD490 D6 @80mm
帯鉄筋降伏強度 (MPa)	335	571	571	571
面積帯鉄筋比	0.372 %	0.372 %	0.558 %	0.186 %

USD：高強度鉄筋コンクリート用棒鋼

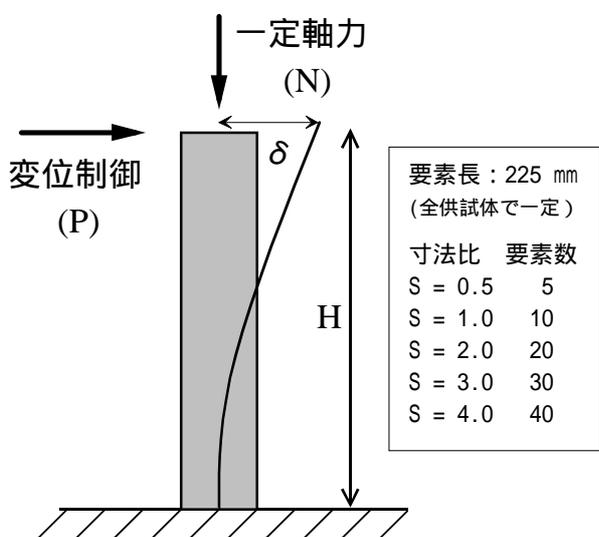


図 - 6 解析モデル

縮強度は、文献 5) に示す供試体幅の影響を考慮した圧縮強度の寸法効果式を用いて評価した。

3.2 解析モデル

解析モデルを図 - 6 に示す。本解析では、1 要素長さを 225 mm とし、寸法比 S が 0.5, 1.0 (基本), 2.0, 3.0, 4.0 までの解析モデルに対して、柱軸方向にそれぞれ 5, 10, 20, 30, 40 均等分割する (図 - 4 参照)。一定軸力 (累加軸圧縮耐力の 12 % ~ 14 %) 下で柱頂点に横方向変位を与えることによるプッシュオーバー解析を実施した。

3.3 解析結果の比較および考察

寸法比の異なる解析モデルの解析結果 (水平力 - 水平変位関係) に対して相対的な比較が行えるように、以下に示す図 - 7 ~ 図 - 9 では、水平力は $[1 / \text{寸法比}^2]$ を、水平変位は $[1 /$

表 - 2 解析に使用したパラメータ^{1), 5)}

供試体名	サイズ	コンクリート強度 (MPa)	最適限界ひずみ
H 供試体	基本	62.5	2.90 %
	S = 0.5	66.0	2.95 %
	S = 2.0	60.3	2.87 %
	S = 3.0	59.4	2.86 %
	S = 4.0	59.0	2.85 %
HA 供試体	基本	65.3	3.87 %
	S = 0.5	69.1	3.94 %
	S = 2.0	62.9	3.83 %
	S = 3.0	61.9	3.81 %
	S = 4.0	61.4	3.80 %
HB 供試体	基本	59.5	1.83 %
	S = 0.5	62.6	1.86 %
	S = 2.0	57.4	1.80 %
	S = 3.0	56.7	1.79 %
	S = 4.0	56.3	1.79 %
N 供試体	基本	39.8	2.02 %
	S = 0.5	40.0	2.03 %
	S = 2.0	39.6	2.02 %
	S = 3.0	39.6	2.02 %
	S = 4.0	39.5	2.02 %

寸法比) を乗ずることにより補正を施してある。

(1) 水平力 - 水平変位関係

寸法比に基づいて補正した各供試体の水平力 - 水平変位関係を図 - 7 に示す。ここで、横軸は [水平変位 / 寸法比]、縦軸は [水平力 / 寸法比²] である。なお、図中には各線種を用いて寸法比の異なる解析結果を示してある。

各供試体とも、寸法比が大きくなるに従い、ピーク後の軟化勾配は急になり脆性的な挙動を示す。さらに、寸法比が大きい供試体 (寸法比 3.0 および 4.0) ではスナップバック現象がピーク耐力後に生じていると推測できるが、本解析は変位制御で行っているため、図 - 7 に示すように軟化曲線は急激に低下する挙動を示す。

まず、面積帯鉄筋比の影響について考察する。H 供試体の面積鉄筋比を基準とすれば、HA 供試体では 1.5 倍、HB 供試体では 0.5 倍である。帯鉄筋量が多いほど内部コンクリートに作用する拘束圧が大きくなるので、ポストピーク挙動は面積帯鉄筋比が大きい供試体ほどより延性的な挙動を示す。ここで、ポストピーク領域の変位量をピーク水平力時からの相対変位量で考えてみよう。基本タイプ ($S = 1.0$) 供試体の相対

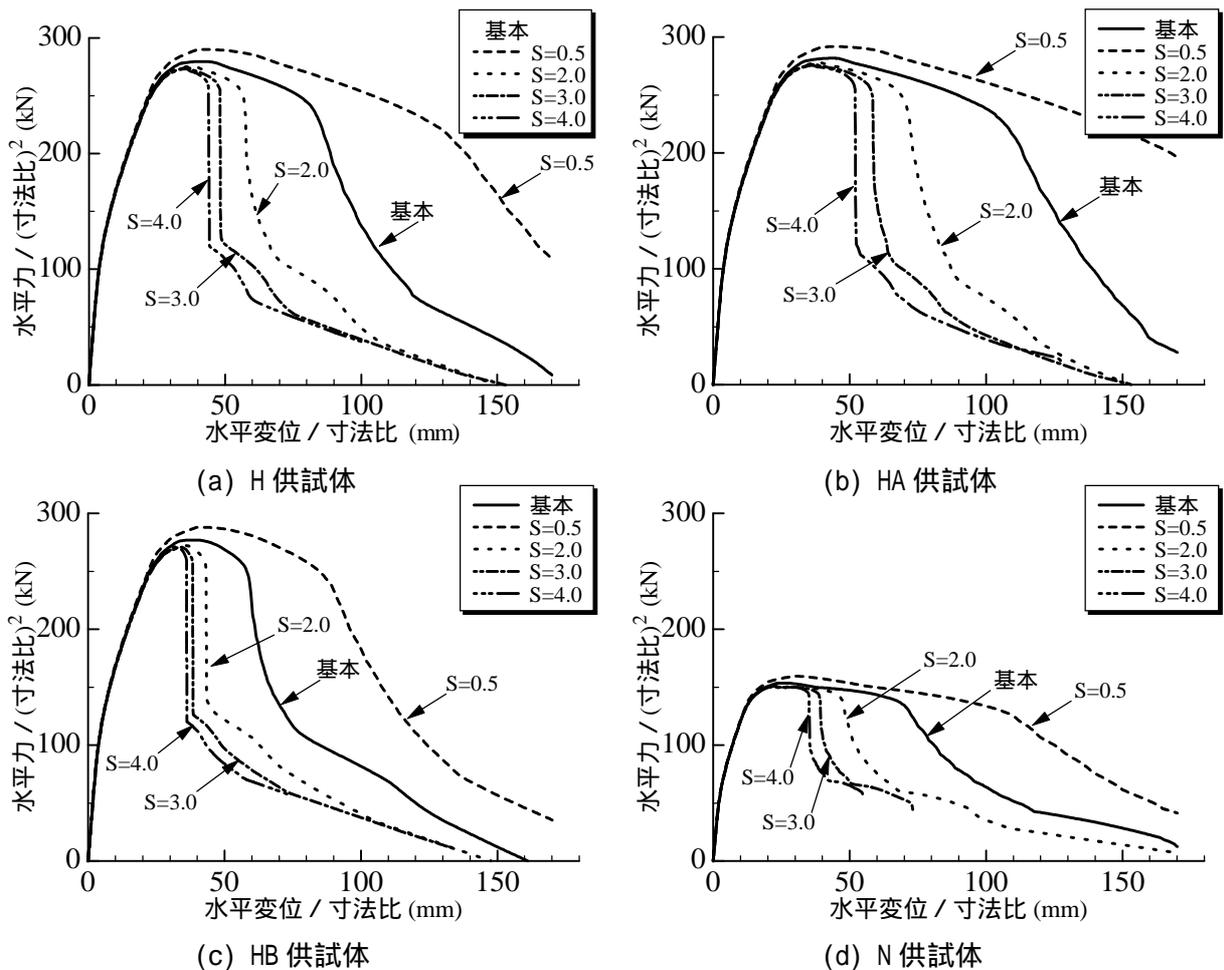


図 - 7 寸法比で補正した水平力 - 水平変位関係の比較

変位量を基準として寸法比が異なる供試体の相対変位量を比較すると、各供試体とも寸法比に応じてほぼ同じ割合で相対変位量は小さくなる傾向にある。すなわち、面積帯鉄筋比の違いがポストピーク挙動の寸法効果に及ぼす影響は小さいと思われる。

次に、材料強度の違いについて考察する。N 供試体は主鉄筋比、面積帯鉄筋比など H 供試体と同じであるが、使用材料が普通強度であるので、最大水平力は H 供試体の半分程度である。基本タイプ供試体 ($S = 1.0$) の相対変位量と比較すると、面積帯鉄筋比の考察と同様に寸法比に応じてほぼ同じ割合で相対変位量は小さくなる。すなわち、材料強度の違いがポストピーク挙動の寸法効果に及ぼす影響についても小さいと思われる。

(2) 座屈の影響について

主鉄筋の座屈の影響を考察するために、H 供

試体に対して主鉄筋の座屈を考慮しない場合の解析を実施した。主鉄筋の座屈を考慮した場合としない場合の解析結果の比較を図 - 8 に示す。図中、破線は鉄筋の座屈を考慮しない場合の解析結果、および実線は鉄筋の座屈を考慮した解析結果を示す。

座屈を考慮した解析結果は寸法比が大きくな

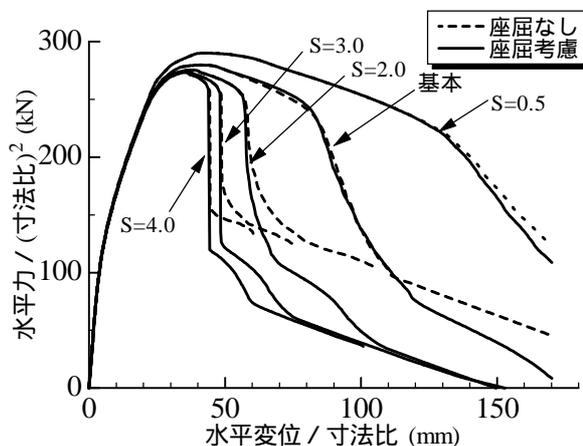


図 - 8 座屈の影響 (H 供試体)

るに従い軟化域での勾配がわずかに急になる。寸法比が 3.0 および 4.0 と大きい場合にはスナップバック現象を解析上再現できないため、勾配的には顕著な差になって現れていない。

一例として、H 供試体（基本サイズ）の解析結果を図 - 9 に示す。図中、破線はひずみ硬化 + 座屈考慮なし、実線はひずみ硬化 + 座屈考慮、一点鎖線は完全弾塑性 + 座屈考慮の解析結果である。ピーク後の曲線において軟化勾配が変化する 2 箇所の点（図中の点 A および点 B）について以下に考察する。

水平力が約 240 kN 付近（図 - 9 の点 A）では、RC 柱基部の圧縮軟化が著しくなる。その結果、引張側の鉄筋において除荷が生じ、急激に水平力（外力）が低下したと考えられる。

一方、水平力が約 90 kN 付近（図 - 9 の点 B）

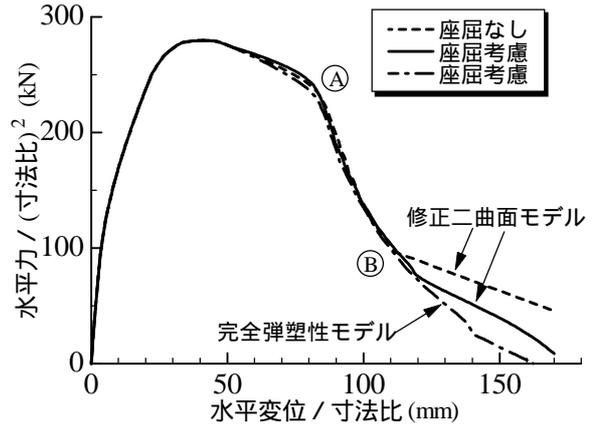


図 - 9 座屈およびひずみ硬化の影響
(H 供試体・基本サイズ)

では、軟化勾配が緩やかになる。修正二曲面モデルでは鋼材のひずみ硬化を考慮しているため、ひずみ（鉄筋）の降伏棚域からひずみ硬化域への移行により鉄筋の耐力が大きくなるため、軟

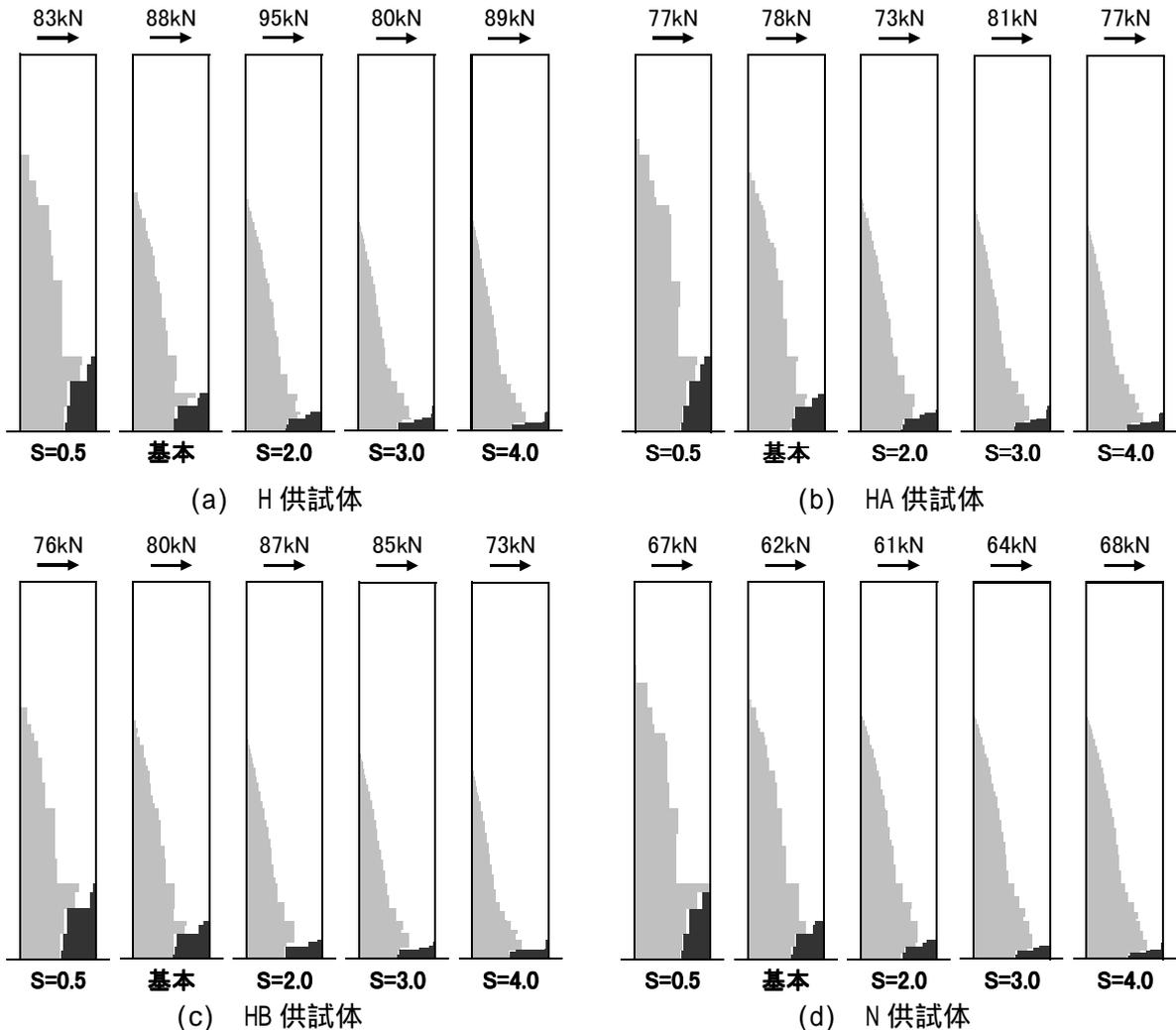


図 - 10 寸法比の異なる供試体の破壊領域の比較（寸法比で換算した同一横方向力時での比較）

化勾配は緩やかになったと推測される。

(3) ポストピーク域における圧縮軟化領域

各供試体の破壊領域を比較した結果を図 - 10 に示す。比較は、圧縮破壊領域が供試体断面の中心部付近まで進展している解析ステップで行った。図中、黒色の部分は圧縮軟化域にある状態、灰色の部分は引張域にある状態を示す。図から、各供試体とも寸法比が大きくなるに従い相対的な圧縮軟化領域は小さくなり、エネルギー吸収能が相対的に小さいことが分かる。圧縮軟化領域の局所化は供試体寸法比が大きいくほど顕著になり、ポストピーク挙動も脆性的になる。

(4) 曲げ強度の寸法効果

各供試体について、コンクリート強度の寸法効果を考慮しない解析も実施し、コンクリート強度の寸法効果を考慮した解析結果と比較した。両解析結果の最大荷重を比較し、その差と寸法比との関係を調べた。比較結果を図 - 11 に示す。ここで、横軸は寸法比、縦軸は図中に示す基本供試体の強度低下量を基準（-1 または 1：- は低下，+ は増加）とした低下量の比である。

図をみると、N 供試体を除く H シリーズ供試体では寸法比が大きくなるに従って、強度の低下がみられ寸法効果が現れている。また、面積帯鉄筋比の影響は少ないことが分かる。

5. まとめ

- 1) 寸法比が大きくなるに従い、RC 柱のポストピーク挙動が脆性的になるという寸法効果を解析的に示した。これは、寸法比が大きくなるに従い圧縮軟化領域が相対的に小さくなることに起因する。
- 2) 帯鉄筋量および材料強度の違いがポストピーク挙動の寸法効果に及ぼす影響は小さい。
- 3) 鉄筋の座屈は軸力比 12 ~ 14 % 程度の RC 柱のポストピーク挙動の曲げ解析結果にあまり影響を及ぼさない。
- 4) RC 柱 (H シリーズ) の曲げ強度は、寸法比 1.0 を基準に考えた場合、帯鉄筋量 (拘束圧) に関係なく寸法の増大に伴い、ほぼ同様の

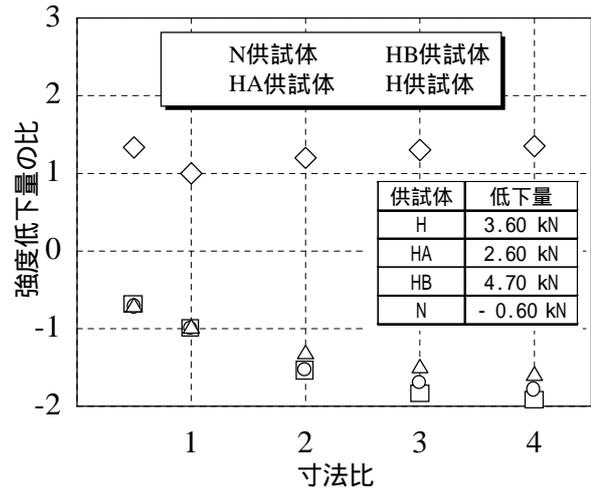


図 - 11 曲げ強度の寸法効果

低下傾向を示す。

謝辞：中部大学総合工学研究所の第 6 部門 B から研究費（平成 13 年度），中部大学奨励研究費（平成 13 年度），およびハイテクリサーチ研究費（文部科学省）をいただいた。ここに、心より感謝致します。

参考文献

- 1) 水野英二，神戸篤士，畑中重光：各種構成モデルを用いた RC 構造部材の繰返し変形挙動解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23-3，pp.19-24，2001.
- 2) Zienkiewicz, O.C：The Finite Element Method, Third Ed., (吉織雅夫，山田嘉昭 監訳「マトリックス有限要素法」), 培風館, pp.672-796, 1984.
- 3) 水野英二，沈赤ら：鋼素材に対する修正二曲面モデルの一般定式化，構造工学論文集，Vol. 40A, pp.235-248, 1994 年 3 月 .
- 4) 足立幸郎，運上茂樹，長屋和宏ら：高軸力下における高強度 RC 部材の変形性能に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No.3, pp.169-174, 1999.
- 5) 小池狭千朗，畑中重光，水野英二，谷川恭雄：高強度域を含むコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 538 号，pp.131-138, 2000.12.