

高強度コンクリートを用いた RC 造柱部材の 復元力特性と損傷評価に関する実験的研究

前田匡樹¹⁾、曹炳玫²⁾、鈴木一希³⁾、迫田丈志⁴⁾、石川裕次⁵⁾、福山洋⁶⁾

1) 東北大学大学院工学研究科、教授 博士(工学)
e-mail : maeda@archi.tohoku.ac.jp

2) CHANGMINWOO Structural Consultants 修士(工学)
e-mail : bmcho@minwoo21.com

3) 金箱構造設計事務所 修士(工学)
e-mail : suzuki-k@kanebako-se.co.jp

4) 堀江建築工学研究所 博士(工学)
e-mail : sakuta@horieken.co.jp

5) 竹中工務店技術研究所 博士(工学)
e-mail : ishikawa.yuuji@takenaka.co.jp

6) 建築研究所、構造研究グループ長 工学博士
e-mail : fukuyama@kenken.go.jp

要 約

近年建設されている高層RC造集合住宅の柱部材には、大きな軸力が作用するため高強度コンクリートが使用されることが多い。しかしながら、既往の強度・変形性能の評価式は、高強度コンクリートに対する精度の検証が十分ではないのが現状である。また、高強度コンクリートの使用に伴い変形の進展に伴う損傷（ひび割れ長さ、ひび割れ幅など）も普通コンクリート部材の状況と異なることが考えられる。

そこで、高強度コンクリートを用いた柱部材における復元力特性評価式の精度を検証するとともに、部材の損傷量を適切に評価することを目的として、柱部材の静的加力実験を行い、復元力特性評価式の精度の検証を行った。さらに、実験変数である軸力、せん断余裕度、せん断スパン比の違いが柱部材に生じるひび割れ量(ひび割れ長さ、ひび割れ幅)に及ぼす影響について検討を行った。

キーワード： 鉄筋コンクリート、高層集合住宅、柱、高強度コンクリート、耐震性能、損傷評価

1. はじめに

近年建設されている高層 RC 造集合住宅の柱部材には、大きな軸力が作用するため、高強度コンクリートが使用されることが多い。しかしながら、既往の強度・変形性能の評価式は、高強度コンクリートに対する精度の検証が、特に変形性能の評価に関しては十分ではないのが現状である。また、高強度コンクリートの使用に伴い変形の進展に伴う損傷（ひび割れ長さ、ひび割れ幅など）も普通コンクリート部材の状況と異なることが考えられる。

そこで本研究では、中・高層 RC 造の建物を想定して高強度コンクリートを用いた柱部材の静的加力実験を行った。試験体の実験変数は軸力レベル、せん断余裕度、せん断スパン比とし、既往の復元力特性評価式の精度を検証するとともに、実験変数が柱部材に発生するひび割れ量（ひび割れ長さ、ひび割れ幅）などの損傷量に及ぼす影響について検討を行った。

2. 柱の静的加力実験

2.1 実験計画

高強度コンクリートの使用が想定される高層 RC 建物の中層階の柱部材を想定した静的加力実験を計画した。

試験体一覧を表 1 に、試験体配筋図を図 1 に示す。試験体は一様に断面 400mm 角、主筋材料は SD490、帯筋材料は SD685、コンクリート圧縮強度 σ_B は 60N/mm^2 を目標とした。実験変数は軸力比、せん断余裕度、せん断スパン比であり、それぞれの値が復元力特性、損傷量に与える影響を考察する。

加力は建研式加力装置を用い、上部の鉛直ジャッキで定軸力を加力し、反力壁に取り付けた水平ジャッキで正負交番繰り返し漸増载荷を行う。加力は、部材角 $\pm 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 \times 10^{-3}\text{rad}$. を各 2 サイクルずつ加力した。

表1 試験体一覧

試験体	軸力比	M/QD	主筋	$p_g(\%)$	帯筋	$p_w(\%)$	Q_{su}/Q_{mu}	破壊モード(想定→実際)	
I2-03	0.125	2	12-D16 (SD490)	1.51	SD685	2-D6@50	0.32	1.5	F→F
I2-02						2-D6@80	0.20	1.1	FS→FS
I2-01						2-D6@160	0.10	0.8	S→FBo
I2-03H	0.25	1.25			2-D6@50	0.32	1.2	FS→FC	
I2-03L	0						3.6	F→F	
I1-03	0.125						1.0	FS→S	
I1-06		4-D6@50	0.64	1.5	F→F				

※F：曲げ破壊、FS：曲げ降伏後せん断破壊、FC：曲げ降伏後コアコンクリート圧壊、
S：せん断破壊、FBo：曲げ降伏後付着割裂破壊

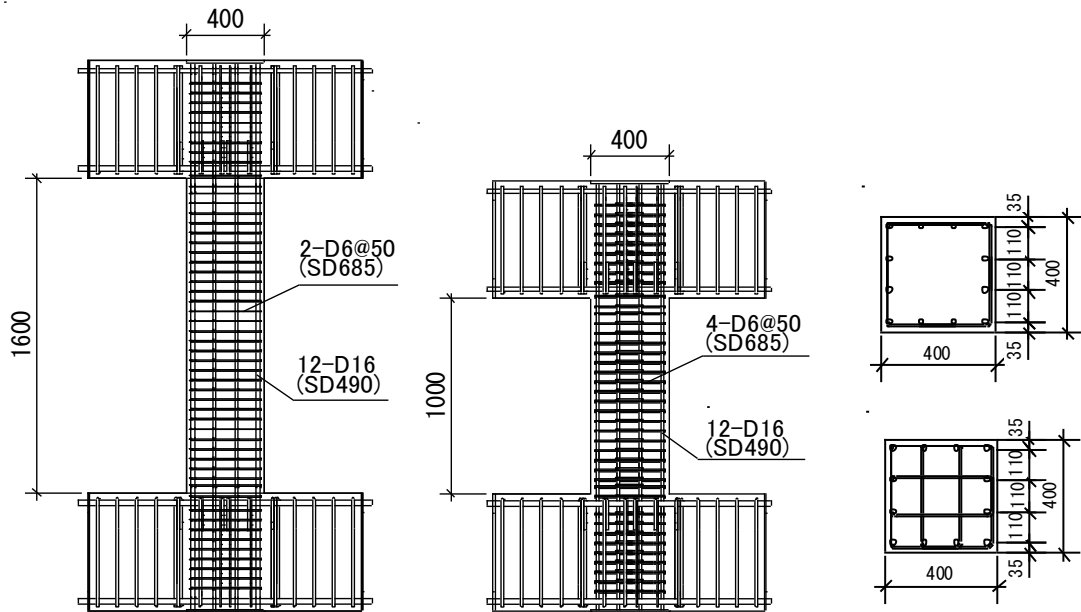


図1 試験体配筋図

2.2 復元力特性および損傷過程

図2に荷重-変形関係を示す。図2中には曲げ解析による曲げ強度 Q_{mu} 、日本建築学会の靱性保証型耐震設計指針(靱性指針)式¹⁾におけるせん断強度 Q_{su} を示した。いずれの試験体においても $1\sim 2 \times 10^{-3} \text{rad}$ で曲げひび割れが発生し、 $7.5\sim 10 \times 10^{-3} \text{rad}$ で主筋が引張降伏した。I2-03,02,01 試験体は $7.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ で主筋が降伏し、 $15 \times 10^{-3} \text{rad}$ で最大耐力を迎えた。最大耐力後 I2-03 は安定して軸力を保持したのに対し、I2-02 は間もなく降伏ヒンジ領域部でせん断破壊した。I2-01 は軸力を保持するものの付着破壊に至った。I2-03L は主筋降伏後も耐力低下せず $30 \times 10^{-3} \text{rad}$ で最大耐力を迎えそのまま加力を終了した。I2-03H は主筋降伏後間もなく最大耐力を迎え、耐力が低下し始めた。その後 $30 \times 10^{-3} \text{rad}$ でコア圧縮破壊が発生し加力を終了した。I1-03 試験体は想定通り $7.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ でせん断破壊に至った。I1-06 試験体は主筋降伏後 $15 \times 10^{-3} \text{rad}$ で最大耐力を迎えた。その後耐力が徐々に低下していき、既定のサイクルを終了後 $70 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで押し切ったところで最大耐力の80%に低下したため加力を終了した。

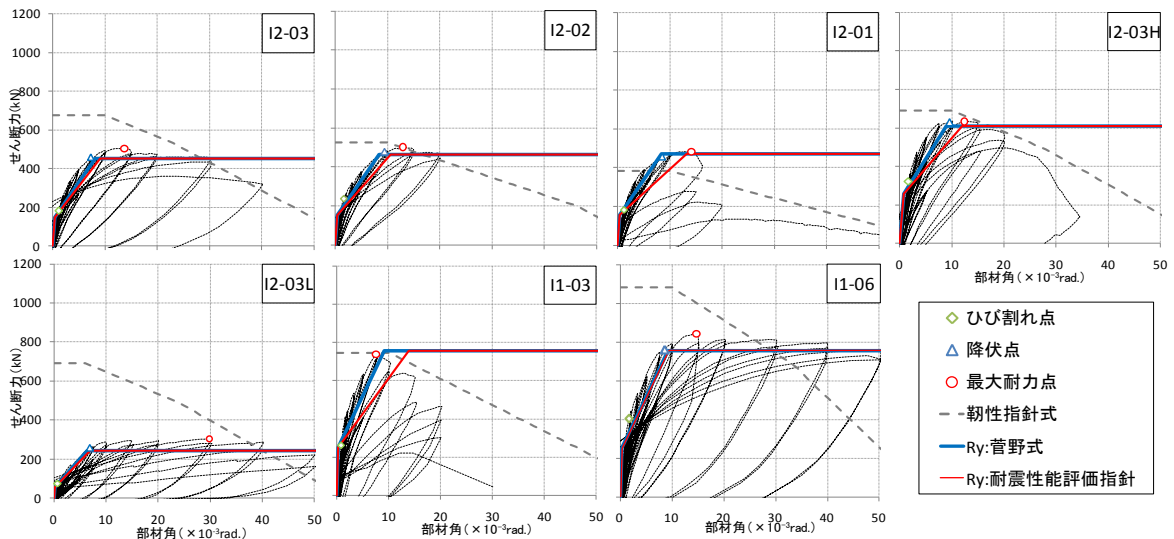


図2 荷重-変形関係

3. 復元力特性評価式の精度検証

3.1 降伏変形角 R_y

本研究における降伏変形角の定義は、柱主筋のいずれかが最初に降伏した点として検討を行った。また、降伏変形角計算値は、日本建築学会の鉄筋コンクリート造計算規準 (RC 規準)²⁾による菅野式、および、鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針 (耐震性能評価指針)³⁾による降伏変形角算定式で算定した値である。降伏変形角と各パラメータの関係を図 3 に示す。帯筋比 p_w の上昇とともに実験値 R_y は減少する傾向がある。菅野式での R_y は p_w の変化に対して値が変わらないのに対し、耐震性能評価指針による R_y は I2-01 試験体の計算値が実験値と大きく外れている。これは I2-01 試験体のせん断補強筋比が 0.1% と RC 規準で規定されている最小配筋量よりも少なく、耐震性能評価指針式ではせん断変形を過大に評価したためと推察される。適用範囲内である I2-02, 03 試験体に関しては p_w の上昇とともに R_y が減少する傾向を的確にとらえている。また、軸力比 η の上昇とともに実験値 R_y は上昇する傾向がある。これに対し計算値は、ばらつきがあるものの両式ともこの傾向をとらえており良好な値を与えているといえる。

図 4 に降伏変形角実験値-計算値関係を示す。菅野式による値は、正負にばらつくものの $\pm 10\%$ 程度に収まり、どの試験体でも良好な傾向を示している。耐震性能評価指針による値は、全体として実験値を過大に評価するものの I2-01 試験体を除き、そのばらつきは小さい。

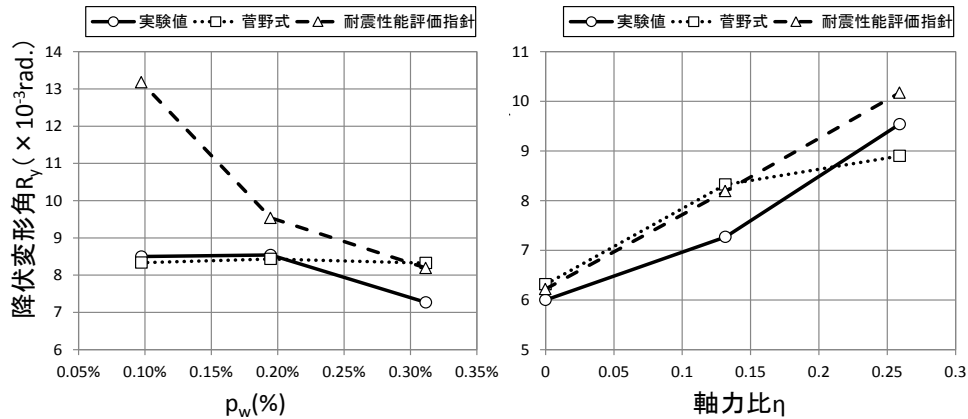


図 3 パラメータによる R_y への影響

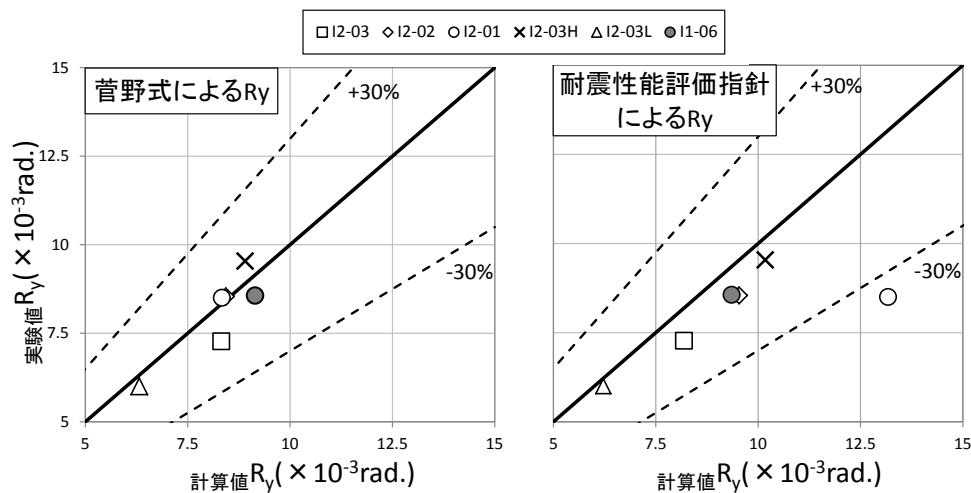


図 4 R_y 実験値-計算値関係

3.2 終局時塑性ヒンジ回転角 R_p

終局時の塑性ヒンジ回転角 R_p の実験値-計算値関係を図 5 に示す。実験における R_p は限界変形角 R_u から降伏変形角 R_y を引いたものである。 R_u の定義は、実験によって得られた荷重-変形関係において最大耐力の 80% まで耐力が低下した時点での変形角とした。

靱性指針によると R_p の計算値は、実験値の下限を評価する値として示されている。本実験でも、計算値は実験値の下限值に対応しており、安全側に評価している。また I1-06 においては、実験値を大きく過小評価しているが、これは既往の報告⁴⁾にもあるように中子筋を配している影響が出ているものと思われる。

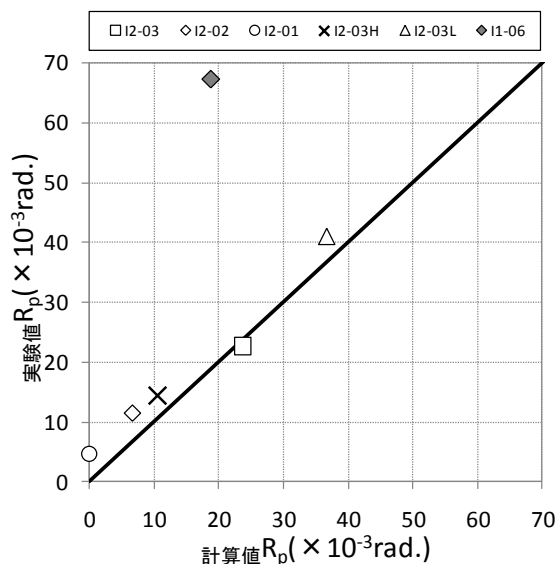


図 5 R_p 実験値 - 計算値関係

4. ひび割れ量計測方法

柱部材の損傷量を評価するために、発生したひび割れ長さ、及び、ひび割れ幅を計測した。ひび割れ長さの記録は各加力サイクルの除荷時（2 サイクル目のみ）に油性マジックで試験体に表面のひび割れを直接なぞって記録し、ひび割れ幅はクラックスケールを用いて目視により測定した。その後、ひび割れ量計測面（変位計を取り付けた東面を除いた 3 面）の写真を取り、写真の画像情報からひび割れ CAD 図面に書き写し、ひび割れ量データを得た。

ひび割れ量については、吉岡らの研究¹⁾を参考に危険断面からのヒンジ領域の長さ l_p を式(1)より算出しヒンジ領域と非ヒンジ領域に分類した。式(1)による I2 試験体(5 体)と I1 試験体(2 体)の l_p は、それぞれ 400mm と 250mm であり、残り部分が非ヒンジ領域となる。

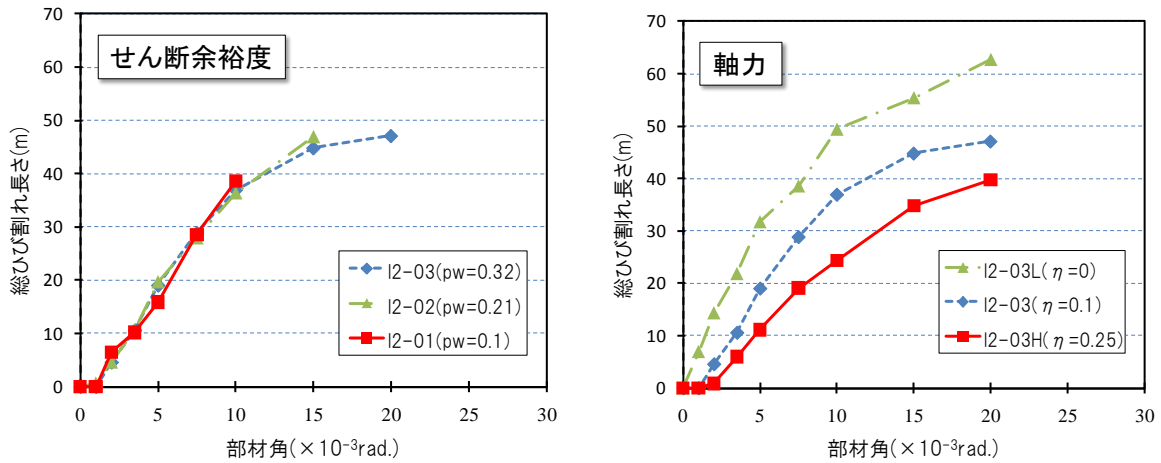
$$l_p = 0.5(M/QD)D \quad (1 \leq M/QD \leq 3) \quad (1)$$

5. 実験結果に基づくひび割れ量分析

総ひび割れ長さは、変位計を取りつけた裏面においてひび割れ量計測ができなかったため、同じ柱せい面である正面に生じたひび割れ量を 2 倍した量と両柱幅面のひび割れ量を加算して算出した。

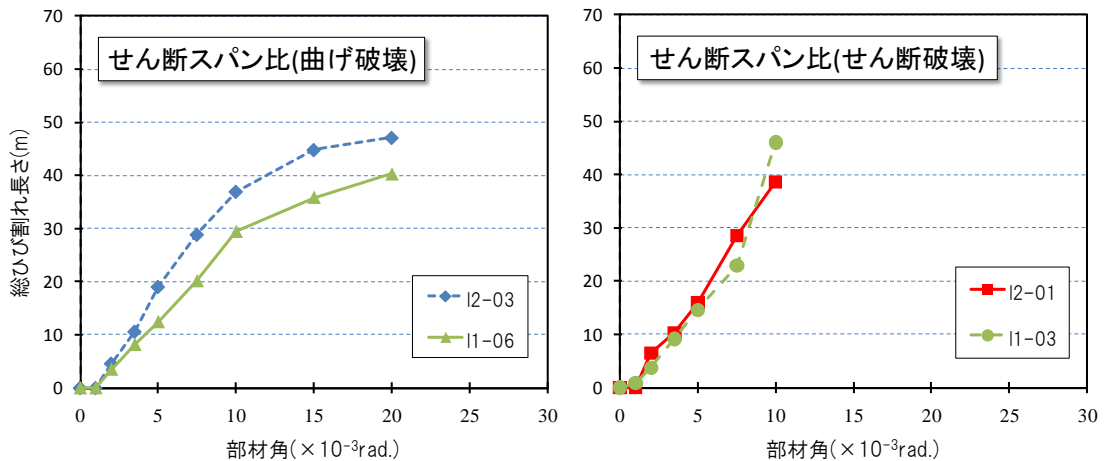
5.1 軸力の違いによるひび割れ量

図6に総ひび割れ長さ一部材角関係、図7に最終ひび割れ計測時のひび割れ状況を示す。図6(b)で軸力の異なる柱3体 (I2-03H,I2-03,I2-03L) においてひび割れが生じ始める部材角とその時の総ひび割れ長さを比較すると、軸力が高い試験体ほど最初のひび割れが遅く発生し、総ひび割れ長さも軸力が高い順で短くなっていることが判る。総ひび割れ長さの推移を見ると、曲げ降伏後のせん断破壊をした試験体 I2-03Hでは、総ひび割れ長さが一定の傾きで増加し破壊に至ったが、曲げ破壊をした試験体I2-03、I2-03Lでは、主筋が降伏した部材角 $10 \times 10^{-3} \text{rad}$ の付近までは一定の傾きで増加し、その後は段々小さくなり、総ひび割れ長さが頭打ちになる傾向が見られた。最終ひび割れ計測時の総ひび割れ長さは試験体I2-03H、I2-03、I2-03L各々40m、47m、63mであり、軸力が小さいほど同じ部材角における総ひび割れ長さは長かった。図8に総ひび割れ長さを100%とし、ひび割れ幅ごとにひび割れ長さを分類したひび割れ幅の構成割合一部材角関係を示す。図8を見ると、修復を必要とする0.2mm以上のひび割れ幅は、軸力が小さい試験体ほど早く生じていることが判る。また、各部材角におけるひび割れ幅分布のばらつきも軸力が小さいほど大きくなっている。これより、軸力が小さい試験体ほどひび割れ幅が開きやすいと考えられる。図9にヒンジ・非ヒンジ領域の総ひび割れ長さ一部材角関係を示す。図9を見ると、軸力が高い試験体ほど総ひび割れ長さがヒンジ領域に集中していることが判る。



(a) せん断余裕度（せん断補強筋比）の影響

(b) 軸力レベルの影響



(c) せん断スパン比の影響

図6 各柱部材の総ひび割れ長さ一部材角関係

5.2 せん断余裕度の異なる柱部材のひび割れ量比較

図6(a)のせん断補強筋比の異なる柱3体 (I2-03, I2-02, I2-01) においてひび割れが生じ始める部材角と各部材角における総ひび割れ長さにはほとんど違いが見られなかった。図8を見ると、せん断余裕度が小さい柱ほど破壊時におけるひび割れ幅分布はばらついたが、同じ部材角で比較するとほとんど違いが見られなかった。図9を見ると、せん断余裕度が小さい試験体ほど、非ヒンジ領域に生じるひび割れ長さが長いことが判る。

5.3 せん断スパン比の異なる柱部材のひび割れ量比較

図6(c)を見ると、せん断スパン比が1.25の試験体I1-06は曲げ破壊、試験体I1-03はせん断破壊をし、ひび割れ長さの推移は3.(1)と同様な傾向が見られた。一方で、試験体I1では、頭柱から脚柱まで繋がる大きなひび割れが多く生じ、非ヒンジ領域にも沢山のひび割れが生じた。図9を見ると、試験体I1-03では、非ヒンジ領域に生じるひび割れ長さの割合が非常に高く、最終ひび割れ計測時の部材角では、ヒンジ領域のひび割れ長さの割合より大きくなっていることが判る。

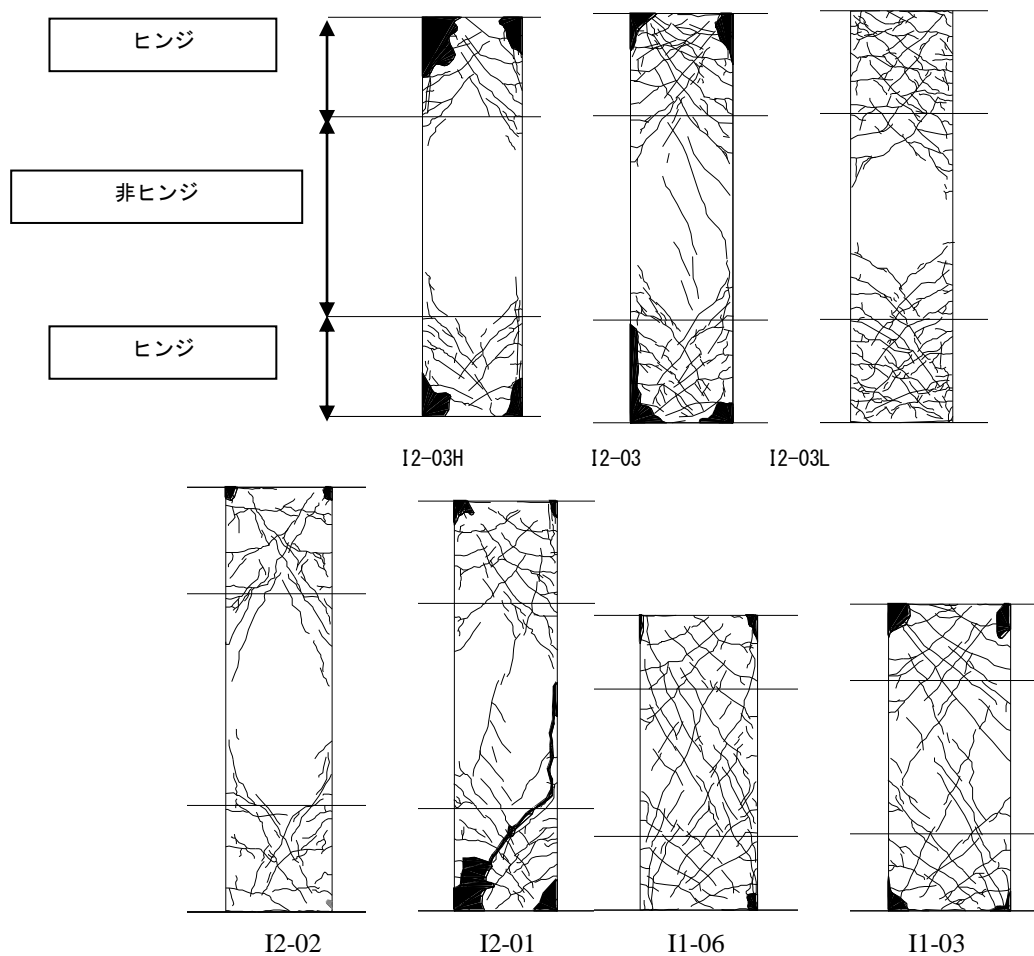


図7 各試験体の最終ひび割れ状況

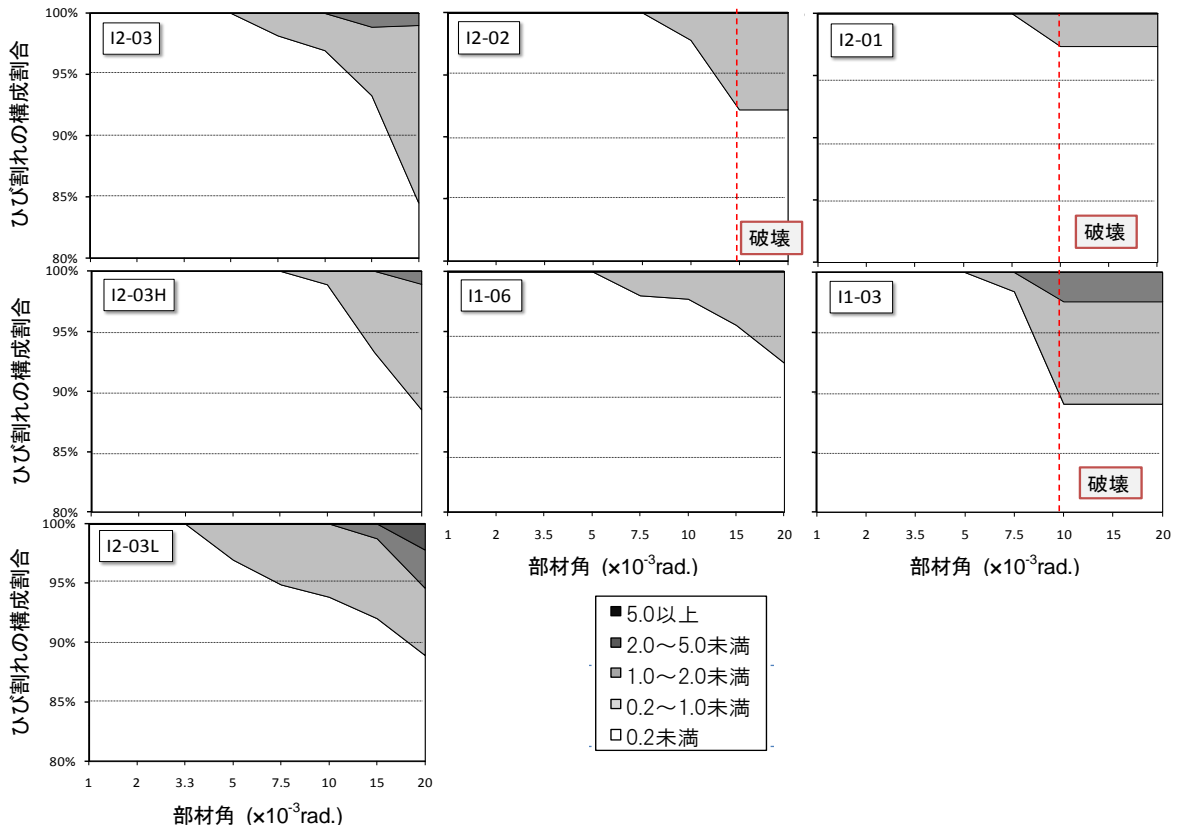


図8 各部材角におけるひび割れ幅の構成割合—部材角関係

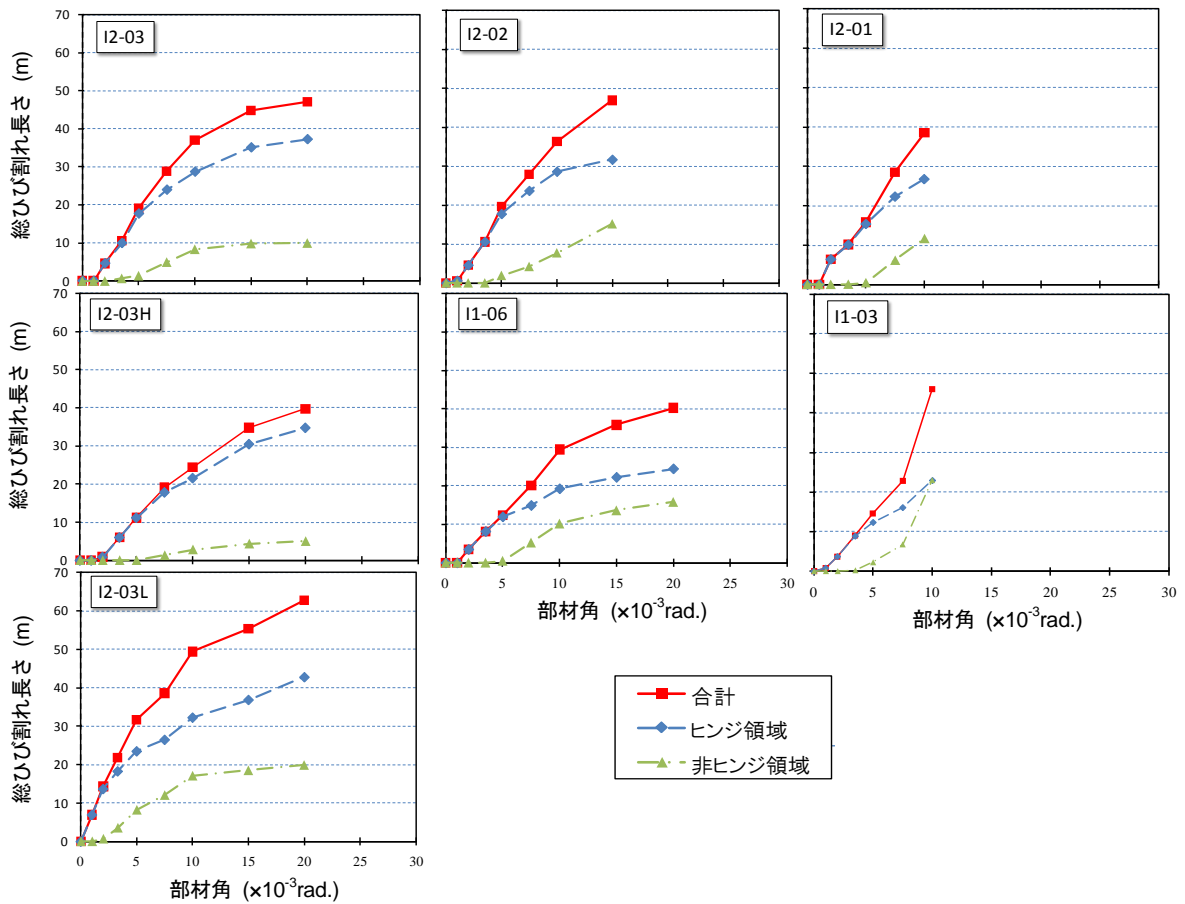


図9 各部材角におけるヒンジ・非ヒンジ領域の総ひび割れ長さ—部材角関係

6. まとめ

高強度コンクリートが使用される高層 RC 造建物柱部材を想定した静的加力実験を行い、復元力特性の評価法、及び、ひび割れ量に関する検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 降伏変形 R_y は、RC 規準の適用範囲内のせん断補強筋比では菅野式、耐震性能評価指針式により概ね良好に評価できる。
- (2) 終局時塑性ヒンジ回転角 R_p は、靱性指針内に記してある普通強度コンクリートを使用した実験値-計算値関係の傾向と一致し、高高度コンクリート柱に対しても安全側に評価できると思われる。
- (3) 軸力が高い試験体ほどひび割れがヒンジ領域に集中し、総ひび割れ長さは短かった。ひび割れ幅分布においてはばらつきが小さかった。
- (4) せん断余裕度の異なる試験体では、同様の部材角でひび割れ推移とひび割れ幅分布を比較すると大きな違いが見られなかった。しかし、せん断余裕度が小さい試験体ほどせん断ひび割れが増加し、非ヒンジ領域に占めるひび割れ長さの割合が大きかった。
- (5) せん断スパン比の違いによる総ひび割れ長さの推移の傾向に差異はあまり見られなかった。せん断スパン比の小さい柱では、ひび割れがヒンジ領域にだけ集中するのではなく柱全体に生じ、最終ひび割れ計測時にはヒンジ領域よりも非ヒンジ領域のひび割れ長さが占める割合が大きかった。

謝 辞

本研究は、平成22年度国土交通省建築基準整備促進事業として実施したものである。実験の実施に当たり、基準整備事業をはじめ、竹中工務店技術研究所の田邊裕介氏にご協力を頂いた。また、実験の実施にあたり、当時の東北大学大学院生・包蘇栄さんに実験計画、試験体作成、載荷実験、データ処理・分析を担当していただいた。関係各位に厚くお礼申し上げます。

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年7月。
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2010年2月。
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説、2004年1月。
- 4) 西村 公佑、野田聡、村瀬正樹、梅村恒、市之瀬敏勝：載荷履歴と中子筋の有無が RC 部材の耐力低下に及ぼす影響、(その1 実験概要と荷重-変形関係)、日本建築学会大会学術講演梗概集、Vol.229-230、2003年。
- 5) 吉岡研三ら：鉄筋コンクリートの変形性能の向上に関する研究 第2報破壊機構並びに補強筋の歪分布について、日本建築学会論文集 第282号、pp37-45、1979年8月。

Experimental Study on Structural Characteristics and Damage Evaluation of RC Columns using High Strength Concrete

MAEDA Masaki ¹⁾, CHO Byung-min ²⁾, SUZUKI Kazuki ³⁾,
SAKUTA Joji ⁴⁾, ISHIKAWA Yuji ⁵⁾ and Hiroshi Fukuyama ⁶⁾

1) Member, Professor, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

2) Architectural Research Institute, CHANGMINWOO Structural Consultants

3) Kanebako Structural Engineers

4) Member, Horie Engineering and Architectural Research Institute, Dr. Eng.

5) Member, Research Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

6) Member, Director, Department of Structural Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.

ABSTRACT

High strength concrete is widely used in the columns of high-rise reinforced concrete buildings. Applicability and accuracy of current formulas for estimation of resistance and ductility have not been examined enough. Moreover, progress of damage in columns using high strength concrete is expected to be different from those in columns using normal strength concrete. In this paper, static loading experiment for a series of RC columns using high strength concrete was conducted. Verification of current formulas predicting strength and deformation of columns were carried out. Effect of axial force, shear to flexural strength margin and aspect ratio of columns on damage such as crack lengths and residual crack widths was discussed.

Keywords: Reinforced concrete, High-rise building, Column, High strength concrete, Seismic performance, Damage evaluation