

論文 超高強度コンクリート柱の動的復元力特性に関する実験的研究

最相元雄^{*1}・須田量哉^{*2}

要旨：耐震構造要素としての超高強度コンクリート柱の基礎的資料を得ることを目的とした動載荷実験を実施し、降伏曲げ強度、終局曲げ強度、履歴復元力特性、終局状態等の耐震設計要因とコンクリート高強度化との関連性を検討した。その結果、超高強度コンクリート柱には高強度材料の特性を活かした優れた耐震構造要素としての性能を期待できる可能性が示された。また、その動荷重時の履歴復元力特性を良好に近似できるモデルとして無次元化 Tri-Linear モデルを提案した。

キーワード：超高強度コンクリート、柱、降伏曲げ強度、終局曲げ強度、復元力特性

1 はじめに

圧縮強度 100MPa を越えるような超高強度コンクリートが比較的容易に製造、打設できるようになりつつあり、これが実用化されるならばコンクリート量の削減効果はもちろんのこと、構造設計の可能性は大きく拡がることが期待される。この超高強度コンクリート構造を実現するための構造設計上の課題は、強震動応答時の挙動、すなわち、各構造要素の終局耐力、変形能力および履歴復元力特性が設計条件と関連付けて規定されることが不可欠である [3]-[7]。本研究はこの目的のための基礎的研究として、基本構造要素である超高強度コンクリート柱の実験資料を求めるとともに履歴復元力特性モデルについて若干の検討を加えたものである。

2 実験概要

2-1 試験体

試験体寸法と配筋 試験体は剛節骨組の柱下半分を想定したもので図-1に示す片持柱である。実験変数はコンクリート強度と変形速度および変位履歴で、試験体は表-3に示す8体である。本研究は超高強度コンクリート実用化のための第一段階であり、まず超高強度コンクリート柱に普通強度の鉄筋を使用することの可能性と問題点を明らかにすることを目的とした。このため過剰な鉄筋量になることにかかわらず、鉄筋はコンクリート強度に関係なく普通強度の鉄筋(SD390)を使用した。鉄筋はコンクリート強度が異なるいずれの試験体も鈎合鉄筋比に対する割合が同じで、且つ、曲げ降伏先行型柱となる条件内でできるだけ鉄筋比を高くすることを目標に鉄筋量を

表-1 鉄筋の引張試験結果

鉄筋	P_y (KN)	P_u (KN)	ϵ_y (%)
D10	25.0	37.0	0.190
D13	44.9	73.6	0.189

ϵ_y : 降伏歪、 P_y : 降伏強度、 P_u : 引張強度

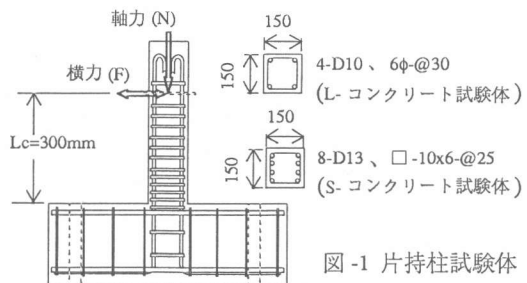


図-1 片持柱試験体

*1 熊本大学教授 工学部環境システム工学科、工博(正会員)

*2 熊本大学大学院自然科学研究科環境科学専攻・都城工業高等専門学校助教授 建築学科、工修(正会員)

決定した。その結果、各試験体の鉄筋比 (p_t) と帯筋比 (p_w) は普通強度コンクリート試験体で $p_t=0.63\%$ と $p_w=1.26\%$ 、超高強度コンクリート試験体で $p_t=2.26\%$ と $p_w=3.20\%$ となっている。帯筋については、せん断曲げ荷重下でいずれの試験体も曲げ降伏が先行するように十分にせん断補強することを設計条件とした。普通強度コンクリート試験体の帯筋は $6\phi\text{-}30$ で、超高強度コンクリート試験体では補強筋量を多くする目的で角形鋼管 $125\times125\times6$ (STKR400) を長さ 10mm で輪切りにしてこれを用いた。なお、各鉄筋の引張試験結果は表 -1 に示す。

コンクリート調合と圧縮強度 コンクリート打設可能な範囲で可能なかぎり高いコンクリート強度を実現することを目標とし、超高強度コンクリート (S-コンクリート) の調合を表 -2 の通りとした。セメントは普通ポルトランドセメントで混和材にシリカフュームを用いた。混和剤には高性能 AE 減水剤を用い、粗骨材は碎石で最大粒径 10mm である。比較のため実施した普通強度コンクリート (L-コンクリート) 試験体の調合も表 -2 に示す。各コンクリートの圧縮試験結果は表 -3 にある。なお、ここでは載荷速度効果を実験対象のひとつとしているため、材料試験においても載荷速度効果を取り除くことを目的とし、平均歪速度 $20\text{ }\mu\text{/秒}$ とかなり低速度で載荷した。

2-2 載荷方法

載荷は片持柱の自由端に一定軸力 (N) と横力 (F) を作用させるもので (図 -1)、その試験装置を図 -2 に示す。試験体の基礎を十分剛な骨組に水平に固定して載荷したが、軸力と横力の荷重が変形後も柱断面中心に作用するように、しかも加力点のどの軸まわりの回転も拘束しないように加力装置は工夫されている。軸力は柱の自由端を PC 鋼棒で柱軸方向に引張って与え、PC 鋼棒の引張力はてこを利用したおもりで加えた。なお、極端に柱軸力比の高い場合を実験対象から除いたため柱軸方向変形が小さくこれによって発生する試験面外の荷重成分と変形成分は無視できるものとした。また、試験体変形によって PC 鋼棒の引張力方向が変化するが、引張力の初期柱軸方向成分を柱軸力 (N) とし、柱軸直交方向成分は横力 (F) に加えた。

アクチュエータで載荷した横力作用点の変位時刻歴波形は定振幅交番繰返し (C)、漸増振幅交番

表 -2 試験体のコンクリート調合 (絶乾比重)

コンクリート名	W/ (C+SF) (%)	重量割合 (kg/m^3)					
		水 (W)	セメント (C)	シリカ フューム (SF)	細骨材	粗骨材	混和剤
超高強度コンクリート (S-コンクリート)	20	150	625	125	568	1010	22
普通強度コンクリート (L-コンクリート)	60	216	360	-	762	1063	-

表 -3 試験体と実験結果

試験体	σ_c (MPa)	p_t (%)	N (KN)	tMy	tMu	試験体名の表示
DI-S-15	112.4	2.26	433	53.3	53.9	S R-S-15.1 1 2-3- 4.5 1: 静載荷 (S)、動載荷 (D) 2: 変位履歴 (I, C, R) I: 漸増振幅交番繰返し変位 C: 定振幅交番繰返し変位 R: 不規則変位 3: コンクリート強度 (S, L) 4: 軸力比 (%) 5: 試験体番号
DR-S-15	"	"	"	47.5	58.7	
SR-S-15.1	134.3	"	467	48.6	49.5	
SR-S-15.2	112.4	"	433	46.7	49.9	
DC-L-30	35.8	0.63	298	20.6	25.3	
DR-L-30	"	"	"	19.2	25.7	
SC-L-30	35.8	"	"	18.4	20.9	
SR-L-30	"	"	"	19.1	21.7	

σ_c : コンクリート圧縮強度、 p_t : 鉄筋比、N: 柱軸力、tMy: 降伏曲げモーメント (KN.m)、tMu: 最大曲げモーメント (KN.m)

繰返し (I) 及び不規則波 (R) である。動載荷実験における各試験体の変位時刻歴は 図 -3 に示すとおりである。この場合、載荷点横方向変位 (δc) の速度は最大で 10cm/秒で、WSG より求めた柱脚断面の主筋歪速度は最大で約 0.1/秒となった。本実験の最大変形速度は試験機能力の制約によって決まった値であるが、既に報告した普通強度コンクリート柱の動載荷実験によると [1]-[2]、この値は載荷速度効果が充分現われる範囲の値となっている。載荷速度効果を決定する基準値として実施した静載荷実験では動載荷実験と同じ変位履歴をたどるように載荷したが、載荷速度の影響を除くため、微小強制変位増分を与えてからその強制変位を保ったまま 1 分間静止させて充分応力緩和させた後、次の微小強制変位増分を与えるというプロセスを繰り返して載荷した。

2-3 測定方法

横力載荷用アクチュエータの荷重はそのヘッドに取り付けた荷重計で測定したが、動載荷実験では試験体とアクチュエータとの接続装置の加速度を加速度計で測定し、装置が振動することによって発生する慣性力を求めてこれを横力 (F) に加えた。ただし、その値が横力に占める割合は微小であった。軸力載荷用 PC 鋼棒の引張力はおもりと加力ビームの重量と寸法の実測値から求めたが、動載荷実験では実験装置が振動することによって生じる引張力の変動成分を PC 鋼棒に貼った歪ゲージ (WSG) から求めこれを加えた。加力点変位 (δc) を試験体断面中心の変位を測定できるように工夫して設置した差動トランス (LVDT) で測定するとともに、柱の固定端断面内の主筋および固定端に最も近い帯筋の歪度を、各鉄筋の裏表に貼った WSG の平均値から求めた。これらの測定に際しては、動載荷実験においては 0.01 秒の間隔で荷重、変位、歪度、加速度を同時に測定し、静載荷試験では微小強制変位増分を与えて 1 分間静止させ、載荷速度の影響が取り除かれた後測定を開始した。

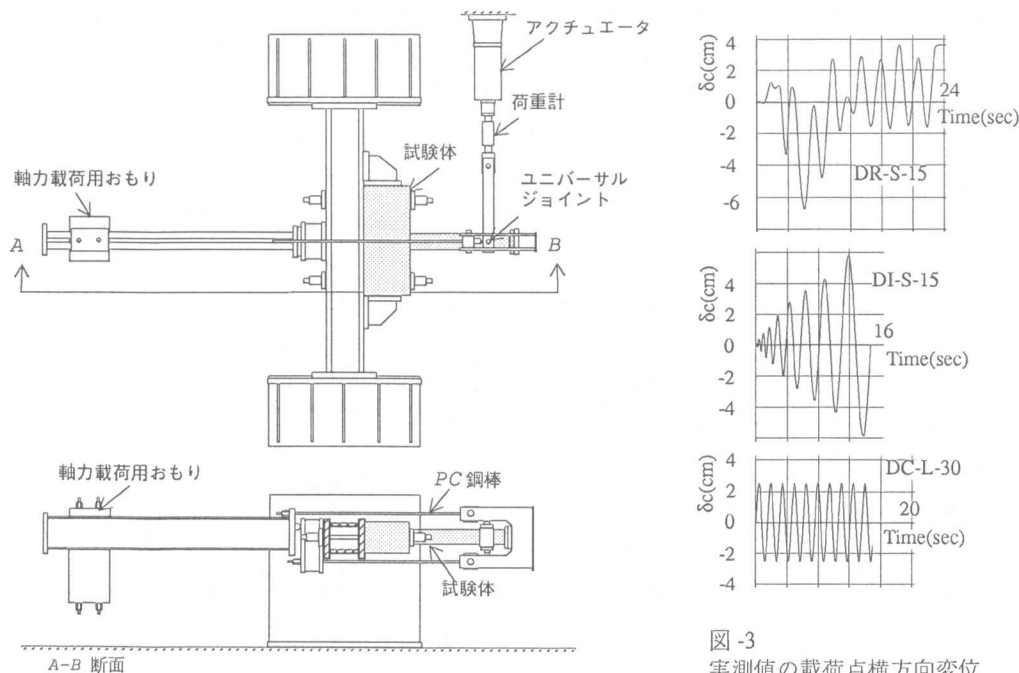


図 -3
実測値の載荷点横方向変位時刻歴

図 -2 試験装置

3. 実験結果

3-1 荷重変形関係と終局状態

柱脚の曲げモーメント $M_c (=F L_c + N \delta_c)$ と柱変形角 δ_c/L_c の関係を図-8に示す。図中、太線は実験値で3-2で説明する終局曲げモーメント (M_u) で無次元化した値である。載荷速度効果により動載荷実験値は静載荷実験値に較べて復元力が増加しているが、その増加量は変位履歴によって複雑に変化し、結果として復元力が片寄る挙動、すなわち、プラス側復元力とマイナス側復元力の大きさに顕著な差が現われた (DR-S-15)。これは普通強度コンクリート試験体の場合と共通しており [1]-[2]、とくに超高強度コンクリート試験体固有の挙動は認められなかった。終局状態まで試験するため極端に大きい変位振幅を与えたが、終局状態に至るまでいずれの試験体も顕著な耐力劣化は見られなかった。帯筋には大きな塑性変形が発生したが破断には至らず、主筋が破断して終局状態に至った。

3-2 終局曲げモーメントと降伏曲げモーメント

実験値と計算値を比較して、コンクリート圧縮強度の違いが終局曲げモーメントおよび降伏曲げモーメントに与える影響を検討する。

実験値については、変位履歴と荷重方向に関係なくいずれの試験体も柱脚曲げモーメント (M_c) の最大値を終局曲げモーメント (tM_u) とし、柱脚断面の主筋に貼った WSG の値から読み取った引張鉄筋が降伏した点を降伏曲げモーメント (tM_y) とする。また、計算値は次の条件から決定する。図-4の実線はコンクリート応力度歪度関係であるが、これを太い破線のように完全弾塑性の Bi-Linear モデルで近似する。L-コンクリートとS-コンクリートの終局歪度 (ϵ_u) を圧縮強度時の歪度 (ϵ_c) で表し、各々 $1.5\epsilon_c$ と ϵ_c とする。また、試験体のコンクリートの他に各種圧縮強度のコンクリート材料試験から得られたコンクリートのヤング係数は図-5の値となった。図に見られるように、高強度コンクリートおよび超高強度コンクリートまで含め図中の破線で近似できるため、コンクリートのヤング係数を図中の直線式で与えることにする。比較のため図には ACI 式 (ACI 363R-84) を同様に示す。ACI 式の適用範囲には超高強度コンクリートは含まれていないが、結果として両者は互いに近い値となっているのがわかる。鉄筋については、表-1の降伏歪度 (ϵ_y) と引張降伏強度 (P_y) の値から同様に応力度歪度関係を完全弾塑性の Bi-Linear モデルで近似する。これらの条

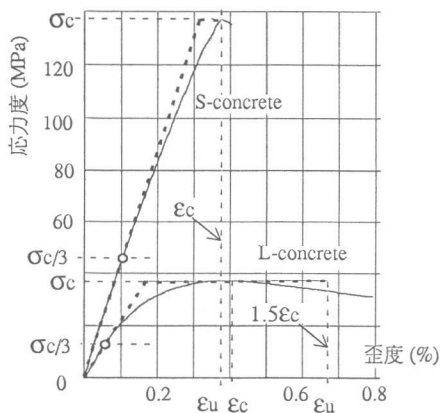


図-4
コンクリート応力度歪度関係の
完全弾塑性 Bi-Linear モデル

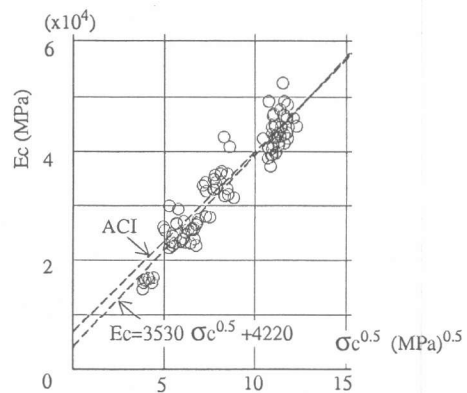


図-5
コンクリート圧縮強度 (σ_c) と
ヤング係数 (E_c)

件に基づいて各試験体の終局曲げモーメント (M_u) および降伏曲げモーメント (M_y) を計算し、実験値と比較したものを図-6に示す。載荷速度効果により動載荷実験値は高い値となり、また、 tM_u と tM_y 値は軸力変動による影響を受けているなどの問題があるが、コンクリート圧縮強度の違いに起因すると考えられる顕著な差は見られない。すなわち、上述の条件で計算するかぎり終局曲げモーメント (tM_u) および降伏曲げモーメント (tM_y) はコンクリート圧縮強度に支配されず、同程度の精度で両者を予測できる。

3-3 履歴復元力特性とモデル化

Tri-Linear モデル (Clough モデル) を使って履歴復元力特性のモデル化を試みる。図-7は動載荷実験で試験装置が振動することによって変動する柱軸力の時刻歴を示したものである。変位時刻歴によって差があるが、その柱軸力比変動量が比較的小さい場合であっても履歴復元力 (M_c) にはその影響が顕著に現われている。このため、モデル化に際しては Tri-Linear モデルが直接復元力 (M_c) を表すのではなくて、復元力 (M_c) を変動する軸力に応じて変化する各瞬間の終局曲げモーメント (vM_u) で無次元化した M_c/vM_u 値が Tri-Linear モデルで表せるものとする。また、復元力 (M_c) に及ぼす載荷速度効果は無視できないが、試験体が少なく詳細な検討ができないため、普通強度コンクリートを対象とした載荷速度効果式 [2] の平均値で復元力を単純に 15% だけ割増すことでその挙動をモデル化する。図-8は超高強度コンクリート試験体の実験値と無次元化 Tri-Linear モデルで計算した履歴復元力予測値とを比較したもので、細線がモデルの値で各試験体の変位 (δ_c) と軸力 (N) に対する復元力 (M_c) を計算した値である。載荷速度効果および柱軸力変動による柱脚曲げモーメントの複雑な変化が、しかも極めて大きな変形域まで良好に予測されているのがわかる。

4. まとめ

- i) 十分にせん断補強した超高強度コンクリート柱に極端に大きい繰返し変形を与えても、普通

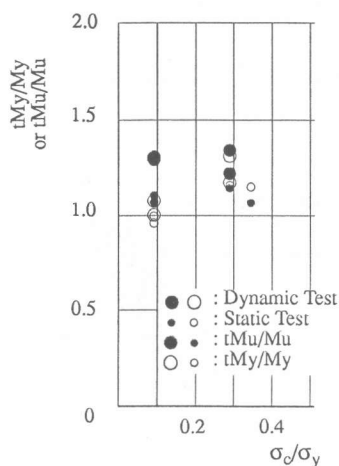


図-6
コンクリート圧縮強度と降伏曲げ
モーメントおよび終局曲げモー
メントの関係
(σ_y : 鉄筋の降伏応力度)

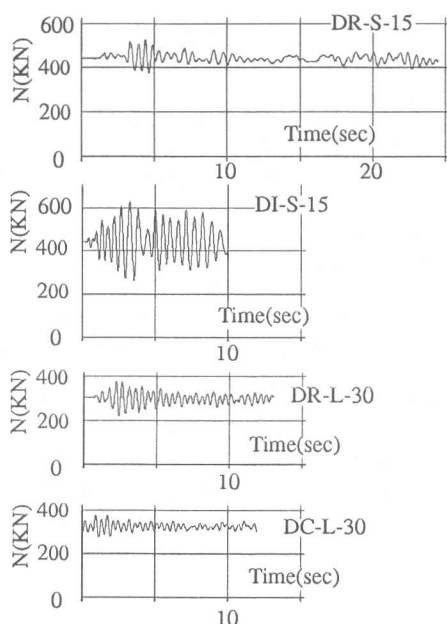


図-7 柱軸力の時刻歴

強度コンクリート柱の場合と比較してとくに不利な耐力劣化は現れず、良好な動的復元力を示した。その終局挙動は主筋の破断によって終局状態に至るもので、超高強度コンクリート柱を耐震構造要素として用いることの問題点は認められなかった。ただし、ここでは試験体の鉄筋量が比較的少ない場合に相当するため、鉄筋量が異なる場合については今後の課題である。

ii) コンクリート応力度歪度関係を完全弾塑性 Bi-Linear モデルで近似して計算した柱の降伏曲げモーメント (M_y) と終局曲げモーメント (M_u) は、普通強度コンクリートから超高強度コンクリートまでコンクリート圧縮強度に依らず実験結果の降伏曲げモーメント (tM_y) と最大曲げモーメント (tM_u) を同程度の精度で予測できる。

iii) 柱の履歴復元力特性は無次元化 Tri-Linear モデルで良好に予測できる。これは超高強度コンクリート柱が動荷重の横力と変動する柱軸力を受けるという条件下でも柱の履歴復元力特性を十分に近似できる。

謝辞 本研究の実験は光成和昭 (新井組)、福田孝次 (大林組)、永池興次、松尾隆一 (熊本大学大学院) 諸氏の協力によって遂行されたものである。記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Saisho, M. and Senba, K.: Dynamic Restoring Force Characteristics of Reinforced Concrete Members, 9WCEE(Tokyo), Vol. IV, Aug. 1988, pp.347-352.
- [2] Saisho, M. and Suda, K.: Dynamic Restoring Force of Reinforced Concrete Beam-Column Members under Seismic Load, 9SEE (India), Vol. 1, Dec. 1990, pp.453-460.
- [3] 村田耕司 他 4 名: Fc800 高強度コンクリートと高強度主筋 (SD490,685) を用いた RC 柱の曲げせん断実験 (その 1)(その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.167-170、1996.9
- [4] 竹中啓之 他 4 名: 超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造柱部材に関する実験研究 (その 1)(その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.171-174、1996.9
- [5] 但木幸男 他 5 名: HHRC 構造に関する研究 (その 15)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.175-176、1996.9
- [6] 高見信嗣 他 1 名: 超高強度コンクリートを用いた柱の 2 方向曲げせん断実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.177-178、1996.9
- [7] 福田孝次 他 3 名: 超高強度コンクリート柱の動的復元力に関する実験的研究 (その 1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.183-184、1996.9

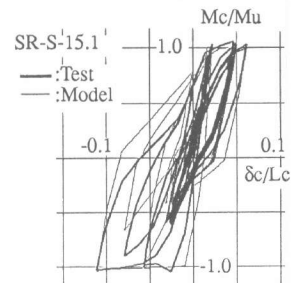
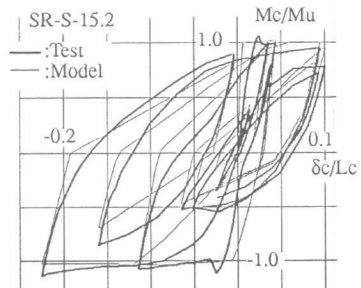
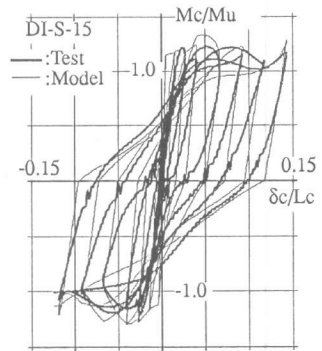
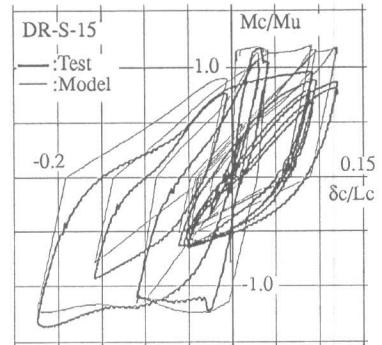


図-8
無次元化 Tri-Linear モデルの予測値と実験値の履歴復元力特性