

超高強度材を用いた RC 柱の破壊特性に関する研究

日大生産工(院) ○殿廣 泰史 日大名誉教授 阿部 忠
日大生産工 水口 和彦 浅野工専 加藤 直樹

1. はじめに

我が国を取り巻く自然環境は四季折り折りの美しさのほか、厳しきでせまり、国民を難渋に追い込んでいる。とくに平成7(1995)年1月17日の「兵庫県南部地震(M7.3, 震源: 淡路島付近)」は6434人もの死者を含む想定を超えた巨大直下型地震が発生した。その後も「天災は忘れないうちに来る」が常識化している。近年の巨大地震に対処するためには、国家的に人命の尊重・社会基盤構造物の強靱化は急務で、全世界的に強調して対策に真しに対応している。

筆者らりは従前より高強度鉄筋(以下, SBPD材)と高強度コンクリート(公称 30N/mm^2)とを用い, 柱の工学的特性について実験研究してきた。主筋SBPD 130/145, $\phi 13.1\text{mm}$ (U13); 帯筋SBPD 130/145, U6。および, 主筋SD295, $\phi 12.7\text{mm}$ (D13); 帯筋SBPD130/145, U6とし, ピッチは5 ~ 100 mm, 28日水中養生 (30N/mm^2), 供試体寸法は $150 \times 150 \times 530$ (mm) のRC柱をモデルとし, 載荷試験を行った結果, 以下が得られた。

(1) ピッチ s (mm) が40 mm以下で重拘束効果 (Heavy confinement effect) は大。

(2) 最大耐力 (P_c) は最大スポールオフの深さ (dm) に支配される。

図-1は拘束度のカテゴリーを示す。タイバー間隔 $d = 40$ (mm) 以下を重拘束 (Heavy confinement), $50 < d$ (mm) ≤ 100 を中拘束 (Medium confinement), $100 < d$ (mm) を軽拘束 (Light confinement) と定義し, とくに重要構造物には重拘束を推奨している。

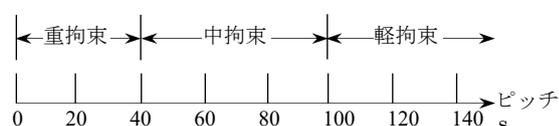


図-1 横拘束筋幅と拘束カテゴリー

また, 近年, 100N/mm^2 以上の高強度コンクリートに大きな関心もたれ, 特殊な混和材(剤)との併用により比較的容易に製造可能となっており, コンクリート技術の革命といえる。かくして, 構造材の高強度・高耐久化が可能となっている。

ここで本研究では, 超高強度コンクリートおよび高強度鉄筋といった高品質材料を用い, 高耐久の持続可能な構造物構築の基本を確立することを目的とする。

2. 超高強度コンクリートの作製

粗骨材の産地は東京都青梅市, 表乾密度 2.65g/cm^3 , 吸水率 0.61% の品質良好な硬質砂岩砕石 (2005) である。配合は $W/C=13\%$, $s/a=40\%$; 単位量は $W=152.6\text{kg}$, $C=1,174\text{kg}$, $S=434.7\text{kg}$, $G=655.0\text{kg}$, 超高強度用高性能減水剤(主成分: ポリカルボン酸エーテル化合物)はB社製で, 16.436kg , セメントはD社製超高強度用(普通ポルトランドセメント, 高炉石こう系混和材, シリカフェームのプレミックスタイプ)を使用した。平均値でスランプフローは 684mm , 空気量は 6.3% , コンクリート密度は 3.12kg/l である。管理供試体は $\phi 100 \times 200$ (mm), 28日圧縮強度は平均 115N/mm^2 である。

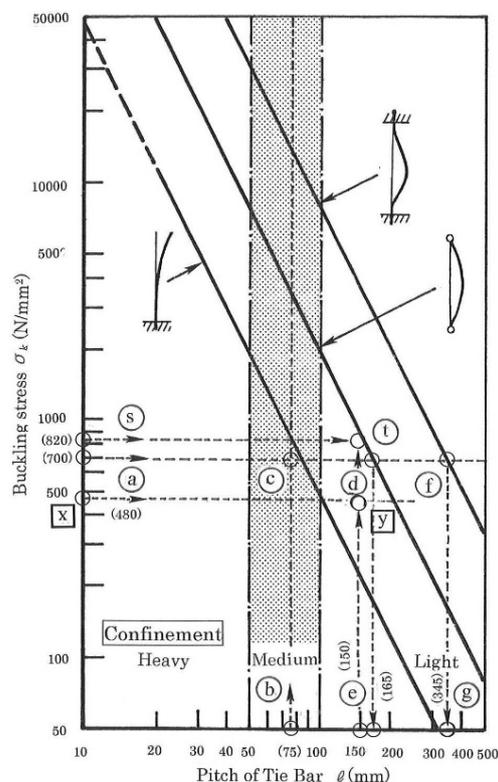


図-2 RC柱の座屈モード推定図と拘束カテゴリー

3. 柱構造材の座屈

古来よりオイラーの理論が用いられており、また、さまざまな実験公式がある。しかし、柱設計上には問題点もあり、とくに横拘束筋（フープ筋）間隔がコアコンクリートの内部拘束上きわめて重要である。図-2は、RC柱の座屈モード推定図と拘束カテゴリーを示す。

また、座屈長 l は材料力学上の l をそのまま使用すべきではなく、設計に当っては、モデル実験によりタイバー間隔のピッチ数から座屈長さを決定する必要がある。すなわち、実構造物の局部に座屈破壊が生じるのである。このコンセプトは破壊力学 (Fracture mechanics) 上の最弱リンク理論 (Weakest link theory) 上の位置づけにある。

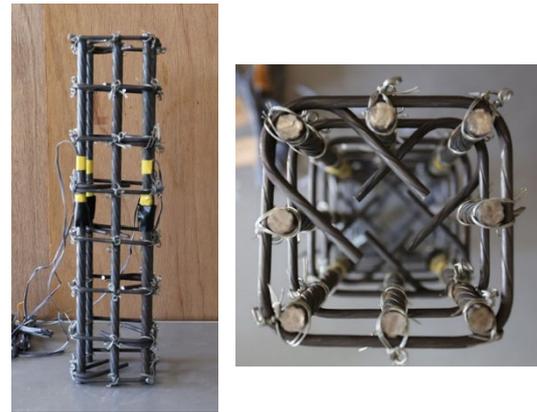
4. SD材柱・SBPD材柱の比較

4.1 鉄筋かご

(1) 主筋SBPD 1275/1420, U13 ; 帯筋 1275/1420, U6。および, (2) 主筋SD295, D13 ; 帯筋 1275/1420, U6とし、ピッチは図-1より「中拘束」の75mmとした。また、主筋本数は 8本 ($p=4.44\% \leq \max.6\%$) とした。従前の研究と同様、 $150 \times 150 \times 530$ (mm) のRC柱を作製し、圧縮載荷試験を行った。

4.2 実験結果

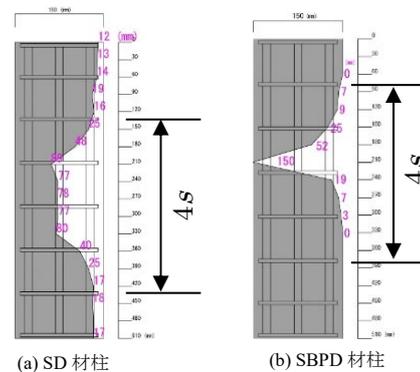
SD材・SBPD材柱の破壊モードをそれぞれ写真-3に示す。また、図-3に典型的な一例として、柱の最大耐力に達した試験体のスプールオフのデジタル表示を示す。SD材・SBPD材いずれの場合も4ピッチ $\times 75\text{mm}=300\text{mm}$ が座屈長さであることを確認し、理論耐力と実験耐力とを比較検討した。なお、SD材・SBPD材のそれぞれの鉄筋かごは同一品質からなり、一次弾性係数は $E_s=200\text{kN/mm}^2$ とした。座屈鋼棒の両端境界条件は破壊状態から判定し、両端擬回転端 (Hinge) とした。SBPD / SD耐力比 $=1275 / 295 \div 4.3$ 倍に留意する。



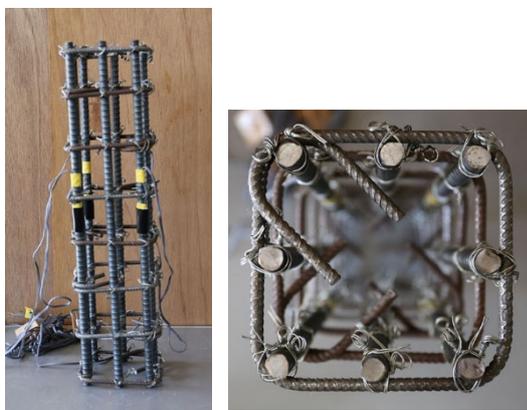
(a) 側面 (b) 断面
写真-2 SBPD 材柱 鉄筋かご



(a) SD 材柱 (b) SBPD 材柱
写真-3 破壊モード



(a) SD 材柱 (b) SBPD 材柱
図-3 スプールオフのデジタル表示



(a) 側面 (b) 断面

写真-1 SD 材柱 鉄筋かご

5. 主筋本数による耐久比

5.1 鉄筋かご

主筋はすべてSBPD 1275/1420, U13 ; 帯筋はSBPD 1275/1420, U6。ピッチは4.1と同様、中拘束の75 mmとした。主筋本数は4本 ($p=2.22\% \geq \min.0.8\%$) と8本 ($p=4.44\% \leq \max.6\%$) の2ケースとし、 $150 \times 150 \times 530$ (mm) のRC柱を作製し、圧縮載荷試験を行った。

5.2 柱モデルの破壊状況の例

図-4 (a), (b)はそれぞれ主筋4本, 8本の場合の一例で、それぞれ破損のデジタル表示を併記した。帯筋ピッチが同一であるので、主筋量の増加による格子効果が大きい。よって、主筋座屈の態様を異にし、じん性に影響を及ぼす。

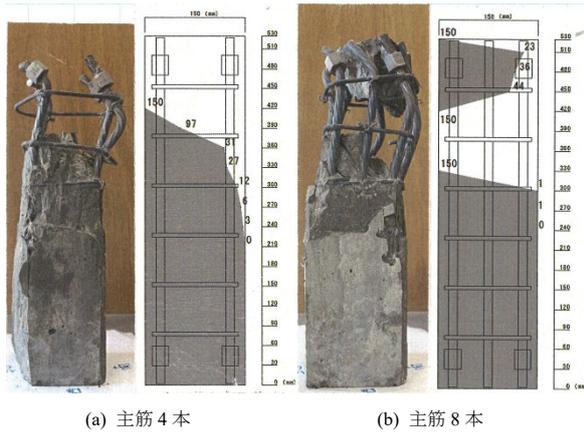


図-4 柱破壊モードの例

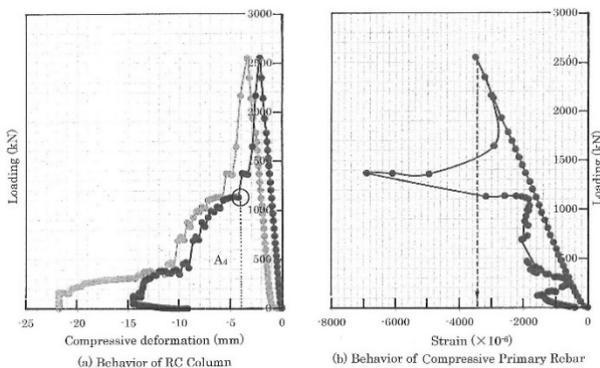


図-5 高強度RC柱の格子効果
(主筋4本 : p=2.22%)

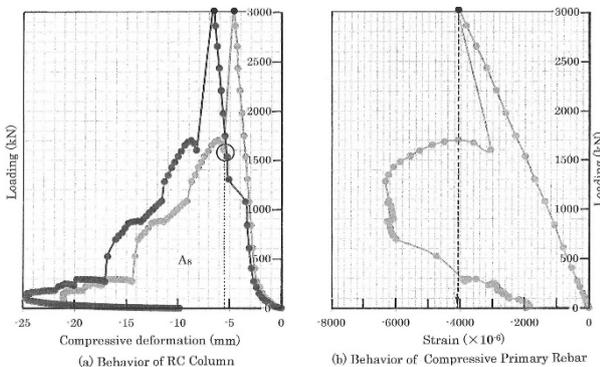


図-6 高強度RC柱の格子効果
(主筋8本 : p=4.44%)

5.3 主筋座屈に関する考察

(1) RC柱と主鉄筋の挙動

図-5, 6にそれぞれ主筋4本, 主筋8本のRC柱と主筋の载荷に伴う変形挙動を示す。いずれも最大耐力点まで線形的に挙動し、顕著な塑性変形なしに瞬時にしてコンクリート要素が爆裂し、耐力の50%程度まで急速に低下する。主筋は柱モデルの耐力まで弾性的であり、その後は鉄筋かごで拘束された残存コンクリートの変形挙動に依存する。柱の全吸収エネルギーは弾性と塑性変形ひずみエネルギーとの和である。図-5, 6の

塑性変形ひずみエネルギー量A4, A8 (○印以降)量の多いほど危機管理上有利で、カテゴリーに対する最後の砦といえ、ひとえに補強筋の格子効果による。

(2) 主筋座屈に関する考察

図-2にオイラー座屈理論による (a)一端固定・他端自由, (b)両端回転端, (c)両端固定端に関し、座屈応力 (σ_k) -タイバーピッチ (ℓ) との関係を、また横拘束のカテゴリーを併記した。座屈応力の一般式は

$$\sigma_k = n\pi^2 E(k/l)^2$$

{ n は (a) 1/4, (b) 1, (c) 4に対応。 ℓ/k : 細長比}。

[Case 1] 主筋量最少の場合

$$(p=2.22\% \geq \min.0.8\%)$$

図-4 (a)で柱頭部の主筋は約700N/mm²で座屈し、図-2で、点①700N/mm²・ピッチ点①75 mmとの交点①は「一端固定・他端自由」のケースにほぼ一致している。他の交点ピッチには合理性がない。

[Case 2] 主筋量最大の場合 (p=4.44% ≤ max.6%)

図-4 (b)は主筋8本のRCモデルで、破壊モードおよび欠損のデジタル表示であるが、致命的なダメージを受けていることがわかる。図-6より主筋座屈応力は $\sigma_k=820\text{N/mm}^2$ ($\ll \sigma_y=1,275\text{N/mm}^2$)である。図-4 (b)で、2ピッチ $\ell=2 \times 75=150$ (mm)であり、図-6の座屈応力 $\sigma_k=820\text{N/mm}^2$ 点③とピッチ150mm点③との交点③は、「両端回転端 (ヒンジ)」の座屈モードと一致している。なお、2ピッチ中間タイバーはコアコンクリートのポアソン効果により鋭角フックは機能を失う。理論的には「両端固定端」であるが、写真-4に示す爆裂型コンクリートの部材中では組織の緩み (Loosening)から「擬回転端」となる。以上から、タイバーはらせん筋や剛性継手が望まれる。また、爆裂に伴うデブリの飛散を防ぐためには、カーボンファイバー巻付工法が考えられる。利点として、三軸応力状態となり、強度向上につながる。



写真-4 柱の爆裂状況

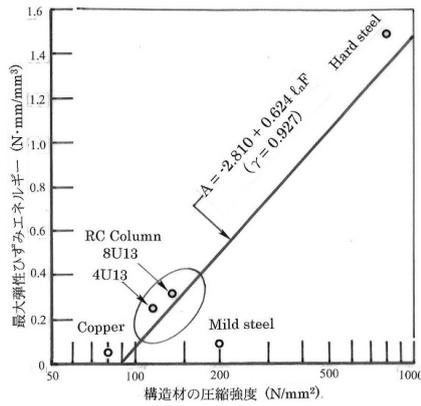


図-7 構造材料の最大ひずみエネルギーと弾性限度との関係

5.4 ひずみエネルギーに関する考察

弾性ひずみエネルギーAは一般に

$$A = \sigma^2 / (2E)$$

{ σ : 応力, E : 弾性係数} で与えられる。よって, $A_4 = 0.235$, $A_8 = 0.314$

($N \cdot mm / mm^3$)となる。図-8は各種材料の弾性限度とAとの関係を示す。

塑性ひずみを加味すると,

$$\bar{A}_8 / \bar{A}_4 = 20,563 / 11,956 \text{ (kN} \cdot \text{mm)} = 1.72$$

6. 繰り返し載荷時の挙動についての実験

6.1 鉄筋かご

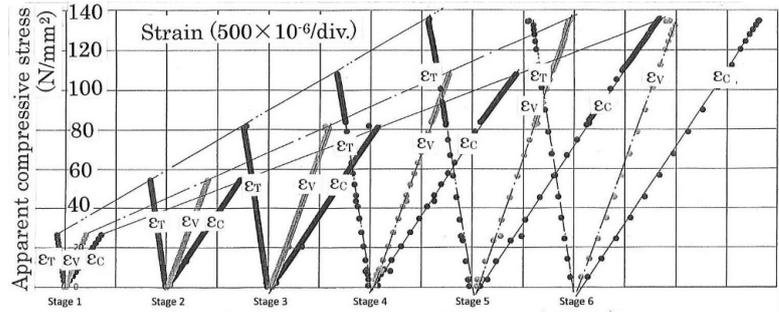
5.1と同様の条件で, 主筋4本と8本の2ケースを作製した。

6.2 RC柱の段階繰り返し漸増載荷の挙動特性

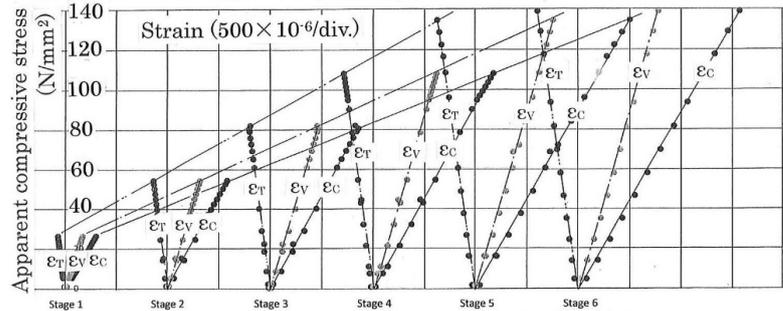
作製したRC柱に対し, $27N/mm^2$ ごとに圧縮載荷を行った。まず, $27N/mm^2$ に達したら除荷し, 次に $54 N/mm^2$ というように, 段階的に載荷を繰り返し行った。



写真-5 RC柱の典型的な圧縮破壊モード



(a) 主筋4本



(b) 主筋8本

図-8 柱の繰り返し載荷

写真-5に主筋4本および8本の破壊モードを, 図-8に繰り返し圧縮載荷の挙動を示す。図から明らかなように主筋比の大小にかかわらず, 圧縮応力度の増大とともに, 軸方向圧縮ひずみ・体積ひずみ・横ひずみも線形的に増大している。とくに, 3特性値のピーク値の連結線は一種の包絡線(Envelope)で, 段階ごとの残留変形の影響は顕著ではなく, 本件のような超高強度構造体では「使用限界状態設計法」の適用にきわめて有利である。

参考文献

- 1) 加藤清志・加藤直樹・岩坂紀夫: 重拘束されたRC柱の高耐久化に関する研究, コンクリート工学, Vol. 17, No. 2, pp. 375-380, 1995
- 2) コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2017
- 3) 樋口盛一, 齋藤秀雄: 弾性および材料力学, 養賢堂, 1966
- 4) 加藤清志, 研究開発四季報⑤土木・建築・環境編, 日本ビジネスレポート, pp.22-29, 1980