

超高強度構造部材の高耐久・高じん性化に関する研究

浅野工専 ○殿廣 泰史・加藤 直樹 元日大生産工 木田 哲量・近藤 勉・今野 誠
 K・S マスターズ 清水 健介 日大理工 須藤 誠 ケイコン 長谷川 光弘
 中日本 Hwy Eng. 高野 真希子 防衛大 加藤 清志

1. まえがき

近年の巨大地震に伴う鉛直および水平方向の2,000gal超というキラーパルスは、社会基盤構造物に甚大被害を生起させている。このような外部からの想定外のエネルギーを多く吸収し、材料の衝撃強さを知る重要な物性値がひずみエネルギーである。このような視点から、本報では高品質材料を用い、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している。

2. 使用材料の特性

2.1 超高強度コンクリートの概要

粗骨材最大寸法は 20 mm, W/C=13%, s/a=40%; 以下は単位量で, 特殊混和剤 16.436 kg, W=152.6 kg, C=1,174 kg, S=434.7 kg, G=655.0 kg とした。供試体寸法は 150×150×530 (mm); 柱・梁モデルは各 6 体, 計 12 体; 管理供試体はφ100×200 (mm), 28 日圧縮強度は 6 本の平均 126 N/mm² である。

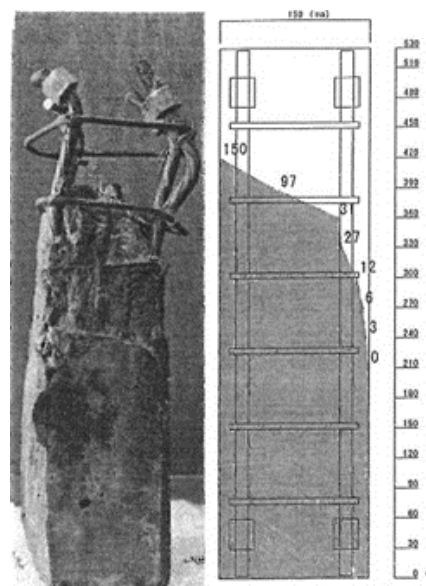
2.2 鉄筋かご

主筋はすべてSBPD 1275 / 1420, U13; 帯筋は同上でU6。ピッチは図5に示す拘束カテゴリーの中拘束の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ケースである(図1, 2)。

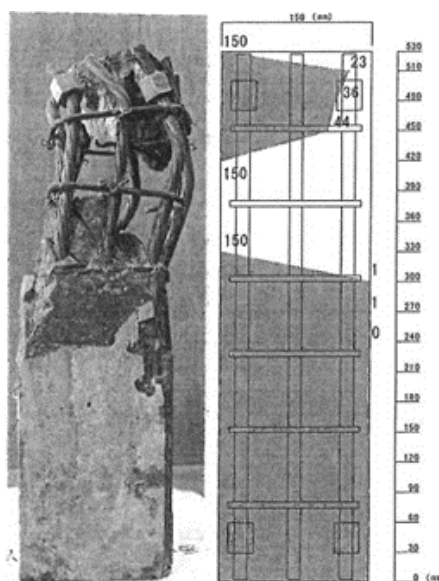
3. 柱・梁モデルの破壊特性

3.1 測定法

万能圧縮試験機は 3,000 kN で, 載荷重の検出は内部油圧により, 測定データは4秒ごとひずみ・変位等はデータロガーに収録した。超高強度コンクリートの爆裂状況はハイスピードカメラ (3,200 コマ/s) で動画記録した。



(a) 4 U13



(b) 8 U13

図1 柱破壊モードの例

Development of High Durability and Toughness of Structural Members Consisting of Ultrahigh Strength

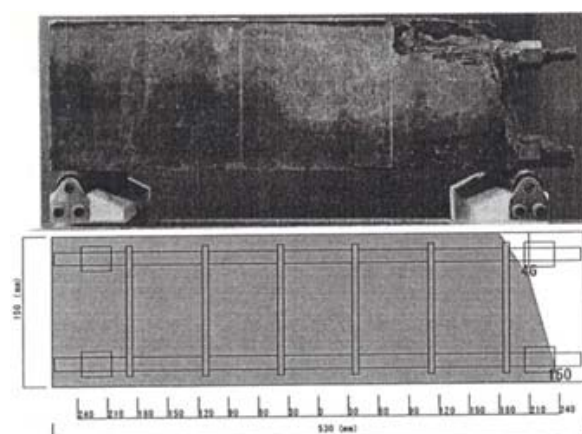
Yasufumi TONOHIO, Naoki KATO, Tetsukazu KIDA, Tsutomu KONDO, Makoto IMANO, Kensuke SHIMIZU, Makoto SUDO, Mitsuhiro HASEGAWA, Makiko TAKANO, and Kiyoshi KATO

3.2 柱・梁モデルの破壊状況の例

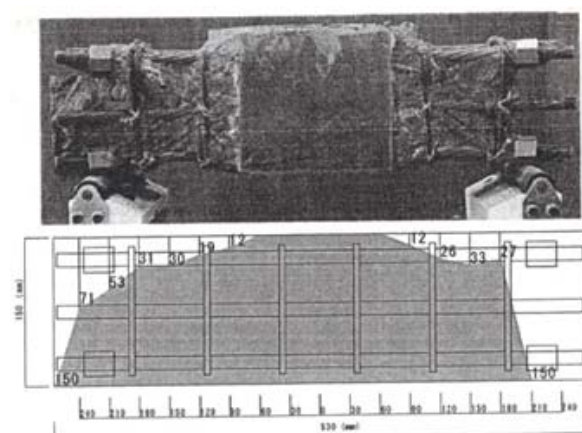
図1は主筋4本、8本の場合の一例で、それぞれ破損のデジタル表示を併記した。

柱の場合、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していることがわかる。

梁に関しては、支点近傍のせん断が卓越している。主筋4U13はぜい性破壊的であるが、8U13ではかぶりがはく落してもコアコンクリートRC柱に再生し抵抗する特性をもつ（図2）。



(a) 4 U13



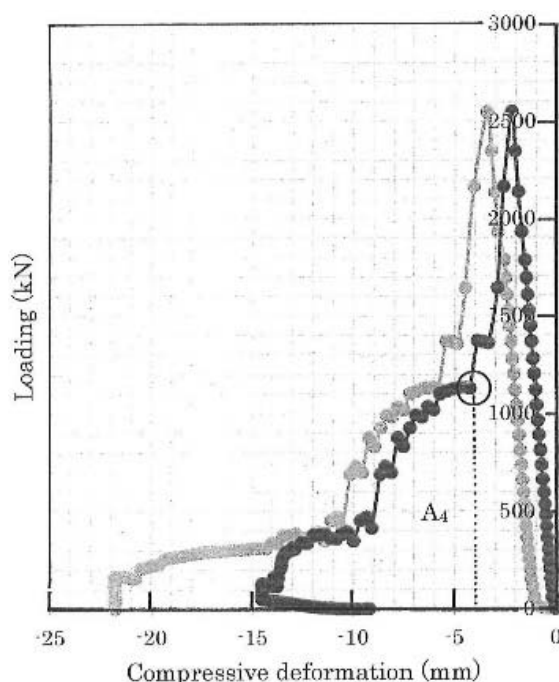
(b) 8 U13

図2 梁破壊モードの例

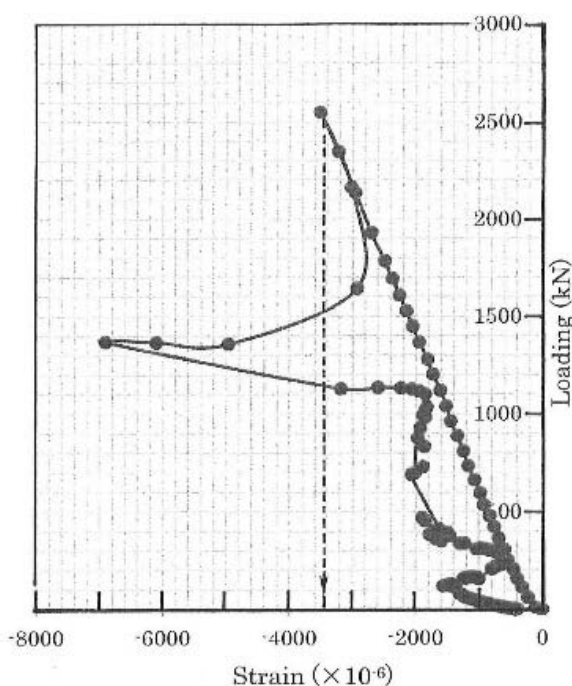
4. 主筋座屈に関する考察

4.1 RC柱と主鉄筋の挙動

図3,4にそれぞれ4U13, 8U13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ること、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



(a) Behavior of RC Column



(b) Behavior of Compressive Primary Rebar

図3 高強度RC柱の格子効果
(4 U13 : $p=2.22\%$)

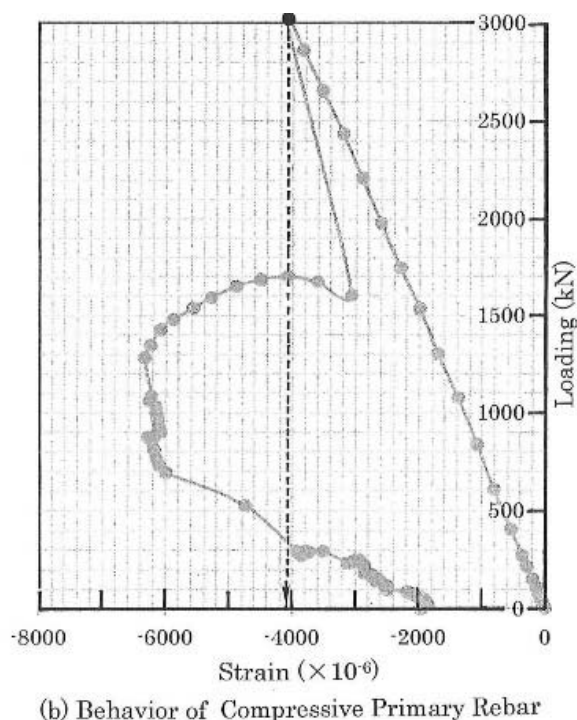
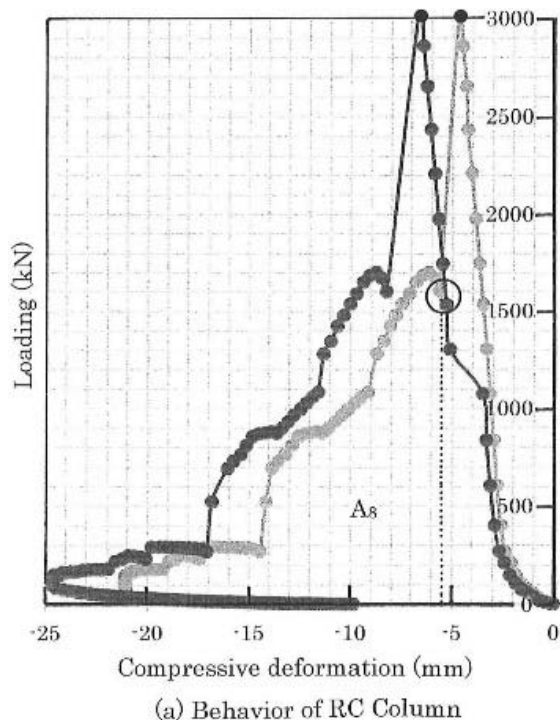


図4 高強度RC柱の格子効果
(8 U13 : p=4.44%)

は弾性と塑性変形ひずみエネルギーとの和である。図3, 4の塑性変形ひずみエネルギー量 A_4, A_8 (○印以降) 量の多いほど危機管理上有利で、カタストロフィ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依存する。

4.2 主筋座屈に関する考察

図5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)ータイバーピッチ(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

$\sigma_k = n \pi^2 E (k / \ell)^2$ {ここに、 n は (a) 1/4, (b) 1, (c) 4 に対応。 ℓ / k : 細長比, k : 二次半径}。

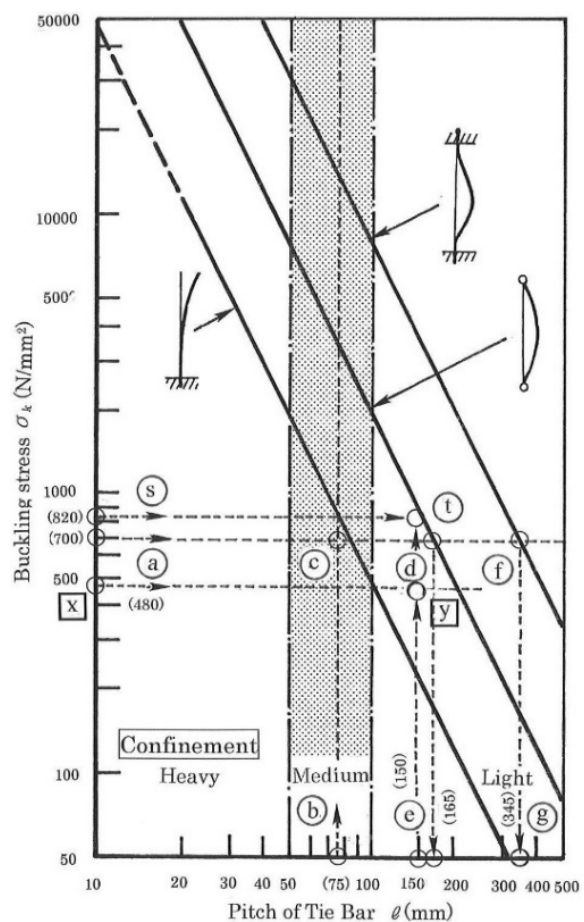


図5 RC柱の座屈モード推定図と
拘束カテゴリー

〔Case 1〕 主筋量最少の場合

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

図1(a)で柱頭部の主筋は約 700 N/mm^2 で座屈し、図5で、点@ $700 \text{ N/mm}^2 \cdot$ ピッチ点@ 75 mm との交点@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
($p=4.44\% \leq \max.6\%$)

図1(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4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1(b)で、2ピッチ $l = 2 \times 75 = 150 \text{ (mm)}$ であり、図5の座屈応力 $\sigma_k = 820 \text{ N/mm}^2$ 点⑤とピッチ 150mm 点⑥との交点①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、図6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。



図6 柱の爆裂状況 (動画の1コマ)

5. ひずみエネルギーに関する考察 (図3, 4参照)

5.1 柱モデル

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、

$${}_eA_4 = 0.235, {}_eA_8 = 0.314 (\text{N} \cdot \text{mm} / \text{mm}^3);$$

図7は各種材料の弾性限度と ${}_eA$ との関係を示す。塑性ひずみを加味すると

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

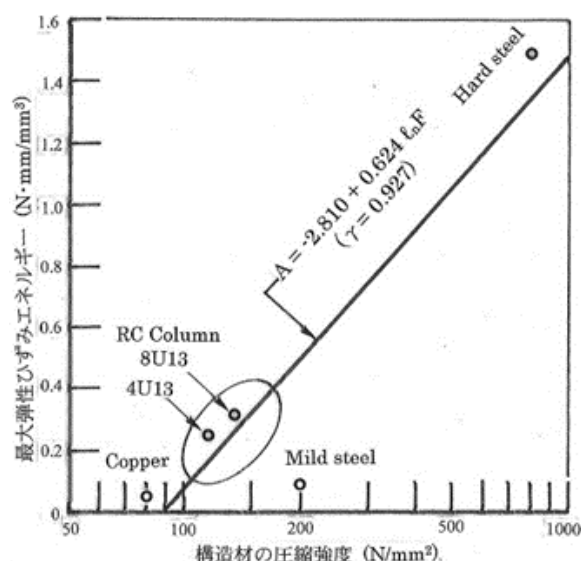


図7 構造材料の最大ひずみエネルギーと弾性限度との関係

5.2 梁モデル

図2で曲げ耐力が十分でも支点近傍でのせん断力に対し、重拘束を必要とすることを示している。曲げ載荷重 P とたわみ δ との関係から最大吸収エネルギー ${}_b\bar{A}$ は、一般に ${}_b\bar{A} = P \delta / 2$ で与えられる。よって、

$${}_b\bar{A}_8 / {}_b\bar{A}_4 = 8,863 / 4,956 (\text{kN} \cdot \text{mm}) = 1.70 \text{ (柱と整合性あり。)}$$

謝 辞

本研究には、ネツレン 若松勝豊課長および浅野工専 千葉 稜, 中野裕介学生諸氏のご協力に謝意を表する。

6. 結 論

当該構造材料の高品質化は、対数的に吸収エネルギーを増大させること、また、主鉄筋・帯鉄筋の格子効果向上は人命・財産の保全上、最重要である。

参考文献

- 1) 殿廣泰史・加藤直樹・増田泰之・加藤清志：超高強度構造材からなるRC柱・はりの破壊特性と高じん性化に関する研究，土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集，pp.1221-1222 (2016.9)
- 2) 樋口盛一・斎藤秀雄：弾性および材料力学，養賢堂 (1966)