

超高強度コンクリートを用いた RC 造短柱の短期の 力学的挙動に及ぼす硬化性状の影響

佐々木 仁 高森 直樹
佐藤 幸博^{*1} 林 和 也
片寄 哲務 西田 浩和

概 要

本稿は、コンクリート圧縮強度 $\sigma_B=60\text{N/mm}^2$ を超える高強度コンクリートを対象として、それを用いた RC 造短柱の地震時における短期の力学的挙動に与える硬化性状の影響について、定性的、定量的な評価を試みたものである。

本稿では、まず RC 造短柱の短期性状として、①曲げひび割れ耐力、②せん断ひび割れ耐力、③曲げ耐力、④荷重変形関係とかぶりコンクリートの剥落状況、⑤正負両荷重時の最大耐力差、を採り上げ、それらの力学特性について実験データを提示し論じている。次いで、硬化性状の影響に関し、RC 柱の硬化過程から長期材齢にわたり生じる内部応力、硬化コンクリートの特性及び調合といった観点から、先に示した RC 造短柱の短期性状における力学特性を考察している。また、コンクリートの高強度化の追求には、硬化コンクリートの特性の点で限界が存在することを示すとともに、実用化のための方策について提言している。

Influence of Residual Stress and Mechanical Properties of Concrete on Seismic Behaviors of Reinforced Concrete Short Columns using Super High Strength Concrete

Abstract

This research was carried out to evaluate the qualitative and quantitative influence of long-term mechanical properties on the short-term seismic behavior – of short R/C columns using the super high-strength concrete with a compressive strength of more than $\sigma_B=60\text{N/mm}^2$.

In this report we firstly look at the short-term seismic performance of short R/C columns including: 1) the flexural crack occurring strength, 2) the shear crack occurring strength, 3) the flexural strength, 4) the relationship between load and deformation and damage to the covering concrete, and 5) the differences of the ultimate strength under positive and negative loadings

Secondly, we examined the influence of long-term properties on the measured short-term seismic performance of short span R/C columns. In particular we looked at the internal stresses caused by hydration over the lifespan of the columns, the characteristics of the concrete curing process, the mixing process, and so on.

In addition, in order to give technical guidance on the practical application of high strength concrete, strength limitations of high strength concretes were explained in terms of the characteristics of the concrete curing process. Technical measures for practical use of the high strength concrete were also proposed.

キーワード: 高強度コンクリート, 短柱, 若材齢,
残留応力, 材料力学特性, 構造特性

*1 東京支店

§1. はじめに

近年、設計基準強度 $F_c=130\text{N/mm}^2$ のコンクリートを下層階の柱に用いた超高層 RC 造共同住宅が建設されるようになり、最近では $F_c=150\text{N/mm}^2$ のコンクリートが実用化されつつある。一方、研究分野では、この種のコンクリートを用いた RC 柱の各種強度などについて、既往の評価式との適合性を統計的に整理し再検討するにとどまり、RC 柱の硬化過程から長期材齢にわたるまでの力学的挙動の影響といった観点から、超高強度コンクリートを用いた RC 柱の地震時の挙動を解明しようとする研究は殆どみられない。この種のコンクリートの健全な実用化・発展のためには、RC 柱の地震時、すなわち短期荷重を受ける RC 柱の力学的挙動と、柱部材及び素材コンクリート自体の製造・硬化過程から硬化後における長期性状やコンクリートの力学特性との関係を明らかにしていくことが重要と考える。

本稿は、このような観点からコンクリート圧縮強度 $\sigma_B=60\text{N/mm}^2$ を超える高強度コンクリートを対象として、それを用いた RC 造短柱の地震時の短期性状に与える硬化性状の影響について、特に RC 柱の硬化過程から長期材齢にわたり生じる内部応力、硬化コンクリートの特性及び調合に着目し定性的、定量的な評価を試みたものである。また、コンクリートの高強度化の追求には、硬化コンクリートの特性の点で限界が存在することを示すとともに、実用化のための方策について提言する。

§2. RC 造短柱の短期性状の特性

$\sigma_B>60\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた RC 造短柱の地震時の性状として、①曲げひび割れ耐力、②せん断ひび割れ耐力、③曲げ耐力、④荷重変形関係とかぶりコンクリートの剥落状況、⑤正負両荷重時の最大耐力差、を採り上げ、それらについての実験データの事例を提示する。ここで、提示する実験データ²⁾の範囲は、圧縮強度が $\sigma_B>60\text{N/mm}^2$ 、クリアスパン比 (L/D) が $2 \leq L/D \leq 3$ 、部材断面寸法 ($B \times D$) が $200 \times 200\text{mm}$ 以上である。

2.1 曲げひび割れ耐力

曲げひび割れ耐力に関し、実験値と下式を用いた計算値との対応を図 1 に示す。

$$M_{cr} = (\sigma_t + \sigma_{0e}) \cdot Z_e \quad (1)$$

ここで、 Z_e : 鉄筋を考慮した断面係数

σ_t : コンクリートの引張強度 (= 割裂引張強度)

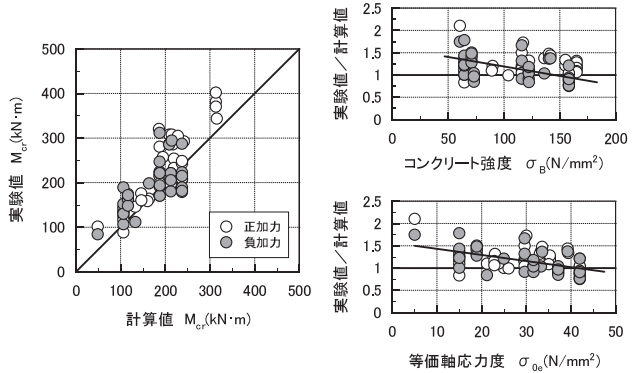


図 1 曲げひび割れ耐力の実験値と計算値との対応

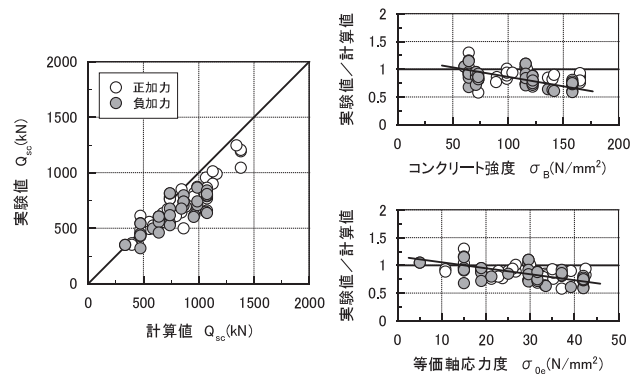


図 2 せん断ひび割れ耐力の実験値と計算値との対応

σ_{0e} : 鉄筋を考慮した等価軸応力度

図 1 より、曲げひび割れ耐力は、式(1)中のコンクリートの引張強度に素材試験による割裂引張強度を用いた算定値で概ね良好な予測が可能である。しかしながら、 σ_B と σ_{0e} が大きいほど、実験値と計算値との比が小さくなる傾向がみられる。

2.2 せん断ひび割れ耐力

せん断ひび割れ耐力に関し、実験値と主応力度式による下式を用いた計算値との対応を図 2 に示す。

$$Q_{sc} = B \cdot D \cdot \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_{0e} \cdot \sigma_t} / \kappa \quad (2)$$

ここで、 κ : 断面形状係数 (=1.5)

σ_t : コンクリートの引張強度 (= 割裂引張強度)

σ_{0e} : 鉄筋を考慮した等価軸応力度

図 2 より、せん断ひび割れ耐力は、割裂引張強度を用いた主応力度式による計算値を下回り、計算値は過大評価となっている。加えて、曲げひび割れ耐力と同様、 σ_B と σ_{0e} が大きいほど、実験値と計算値との比が小さくなる傾向がみられる。また、軸力比 $\eta_0 (N/BD \sigma_B)$ が $0.1 \sim 0.4$ の範囲における実験値 τ_{sc} とコンクリート強度 (σ_B) との関

係を図 3 に示す。 $\sigma_B \leq 100 \text{ N/mm}^2$ では、コンクリート強度が高いほどせん断ひび割れ耐力は大きくなるが、それ以上では頭打ちとなる。

2.3 曲げ終局耐力

主筋量が同程度で、コンクリート強度をパラメータとした一定軸力載荷下の短柱(アスペクト比 $M/QD=1.17 \sim 1.33$, $\eta_0=0.3$)の曲げ終局耐力の実験値(Q_{mu})とコンクリート強度(σ_B)との関係を図 4 に示す。同図の実験結果では、 $\sigma_B \leq 100 \text{ N/mm}^2$ 程度では、コンクリート強度が高いほど曲げ終局耐力は大きくなるが、それ以上では耐力が上らず頭打ちとなっている。

2.4 荷重変形関係とかぶりコンクリートの剥落状況

筆者らが行った RC 造短柱の実験結果³⁾の一例として、せん断力(Q)・部材角(R)関係の包絡線と、曲げ圧縮降伏が先行した試験体のかぶりコンクリートの剥落状況をそれぞれ図 5、写真 1 に示す。写真 1 に示す試験体 2 体は、 $\sigma_B=120 \text{ N/mm}^2$ 程度で、それぞれ定軸力・一定アスペクト比、変動軸力・変動アスペクト比とした試験体であり、 $R=10 \times 10^{-3} \text{ rad}$ の繰り返し加力終了時のひび割れ状況である。

図 5 の結果では、 $R=7.5 \times 10^{-3}$ で耐力の最大値を示す第 1 ピークが現れ、その後 $R=10 \times 10^{-3} \text{ rad}$ の加力中にかぶりコンクリートが大きく剥落し荷重が低下する。かぶりコンクリートの剥落后、コアコンクリートの圧縮靱性により荷重が再上昇し、やがて耐力の第 2 ピークに至る。このことは、短柱に比べて長柱の試験体でより顕著に現れる。このように、 $\sigma_B=120 \text{ N/mm}^2$ 級のコンクリートを用いた柱部材の荷重変形関係は、かぶりコンクリートの剥落に起因した耐力の第 1 ピークと第 2 ピークが出現することが特徴である。また、写真 1 に示すように、かぶりコンクリートの剥落は、柱端隅角部から各個撃破的にほぼ全長にわたって生じる。

2.5 正負荷重時の最大耐力差

$\sigma_B \geq 100 \text{ N/mm}^2$ のコンクリートを用いた RC 造短柱の特筆すべきもう一つの特徴は、正負荷重時のせん断ひび割れ耐力及び最大耐力に顕著な差が生じることである^{2,4)}。このうち、最大耐力について、負荷重時の最大耐力を正荷重時の最大耐力で除した値(耐力比)と、せん断補強係数($p_w \cdot \sigma_y / \sigma_B$)及びクリアスペクトル比(L/D)との関係について整理した結果を図 6 に示す。同図より、耐力比は、せん断補強係数及び L/D が小さくなるほど、また σ_B 、軸力比が大きくなるほど小さくなる傾向にある。この傾向は、曲げ破壊型の試験体に比べ、せん断破壊型の試験体で

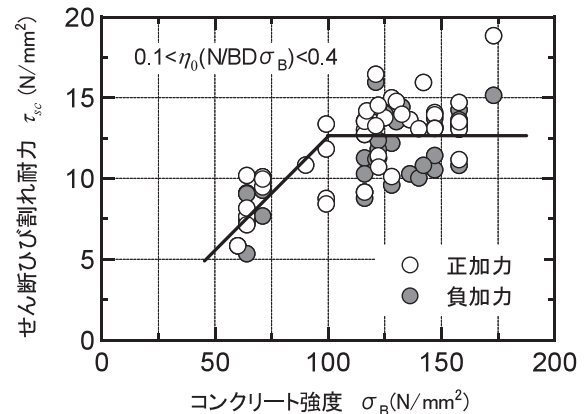


図 3 せん断ひび割れ耐力と σ_B との関係

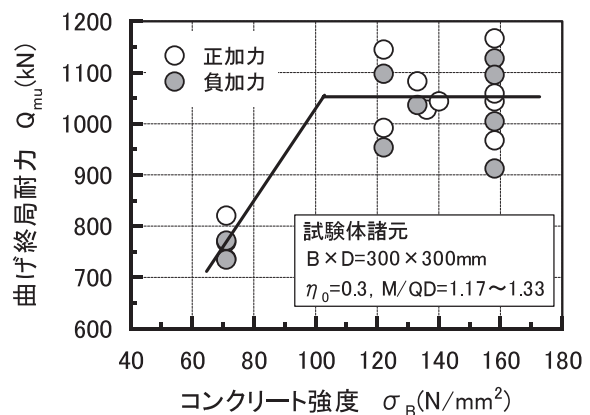


図 4 曲げ終局耐力と σ_B との関係

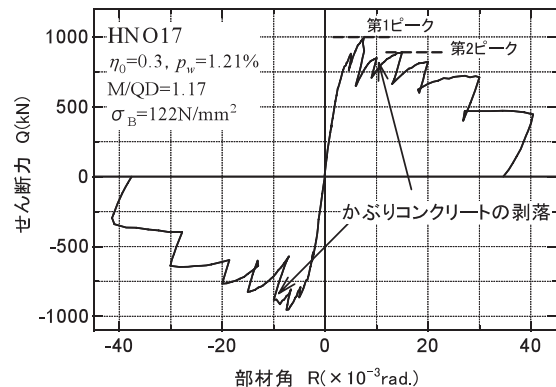


図 5 Q-R 関係包絡線

より顕著になる。

以上に $\sigma_B > 60 \text{ N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた短期荷重を受ける RC 造短柱の力学的挙動の特性を示した。以下、これらの短期特性に与える硬化性状の影響要因として、3 節では RC 柱の硬化過程から長期材齢にわたり生じる内部応力の影響、4 節では硬化コンクリート及び調合の影響に着目し考察する。

§3. RC 柱の硬化時に生じる内部応力の影響

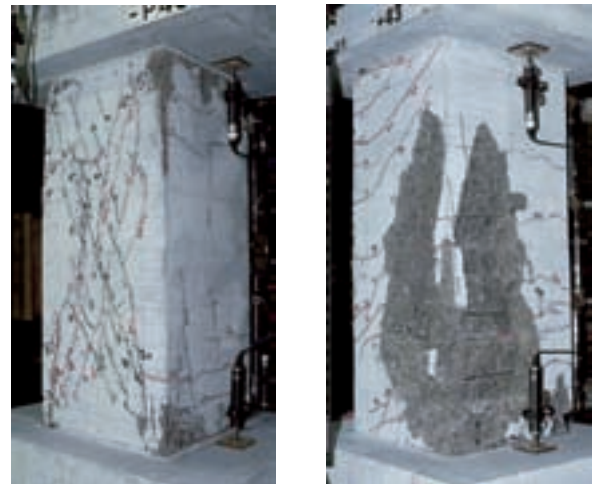
3.1 ひび割れ耐力に与える影響要因

曲げひび割れ耐力及びせん断ひび割れ耐力は、 σ_B と σ_{0e} が大きいほど、実験値と計算値との比が小さくなる傾向がみられたこと、特に、せん断ひび割れ耐力は、 $\sigma_B=100\text{N/mm}^2$ 程度で頭打ちになることを示した。この原因を探るために、割裂引張強度 (σ_{st}) と圧縮強度 (σ_B) との関係、RC 柱の硬化過程から生じる内部拘束応力度の経時変化について調べた。その結果を図 7、図 12 にそれぞれ示す。なお、図 12 の試験体諸元は、4 節で後述する。図 7 より、割裂引張強度は、 $\sigma_B \leq 100\text{N/mm}^2$ では、コンクリート強度が高いほど大きくなるが、それ以上では頭打ちになっている。このことが、ひび割れ耐力に影響していることが分かる。一方、 σ_{st} と σ_B との関係は、既往の評価式と良好には対応していない。

また、図 12 より、部材断面寸法 $B \times D=300 \times 300\text{mm}$ 、水結合材比 $W/B=15\%$ 、膨張材無添加とした 15P 試験体の内部拘束応力度は、断面中心部で最大 2N/mm^2 程度の引張応力となっている。一方、硬化過程における内部拘束応力度は、主筋量が多いほど、コンクリート強度が高いほど、部材断面が大きくなるほど大きくなることが報告されている⁵⁾。これらの点を踏まえると、ひび割れ耐力は、残留応力を考慮した算定値で適切に予測できるものと考えられる。

3.2 最大耐力とかぶりコンクリートの早期剥落現象に与える影響要因

$\sigma_B=100\text{N/mm}^2$ 以上の RC 造短柱では、曲げ終局耐力などの最大耐力が上がらず、また、かぶりコンクリートが早期に各個撃破的に大きく剥落することを示した。これに対する影響要因は、部材内部の残留応力のみならず、加力前からのかぶり部分とコア部分との一体性にあると思われる。このことを確認するために、別途製作した試験体を硬化後、材軸方向及び材軸直交方向に切断し、内部のひび割れ状況について目視観察した。その結果を図 8 に示す。図 8 の試験体は、実寸法の $B \times D=1000 \times 1000\text{mm}$ 、水結合材比 $W/B=13\%$ 、膨張材無添加とした RC 柱である。ひび割れは、断面周辺の主筋位置のみならず、コア部分にも生じ最も大きいもので幅 0.4mm であった。これは、硬化過程において、鉄筋による拘束応力及び温度応力が発生し、概ねコア部分では引張応力、かぶり部分では圧縮応力の状態となり、ひび割れが発生したものと推察される。このように硬化過程に生じる内部応力や硬化後の残留応力により、 $\sigma_B=100\text{N/mm}^2$ 以上の RC 造短柱では、最大耐力、ひび割れ性状、破壊性状が



(a) 一定軸力 (b) 変動軸力・変動シアスパン比
写真 1 かぶりコンクリートの剥落状況 ($\sigma_B=120\text{N/mm}^2$)

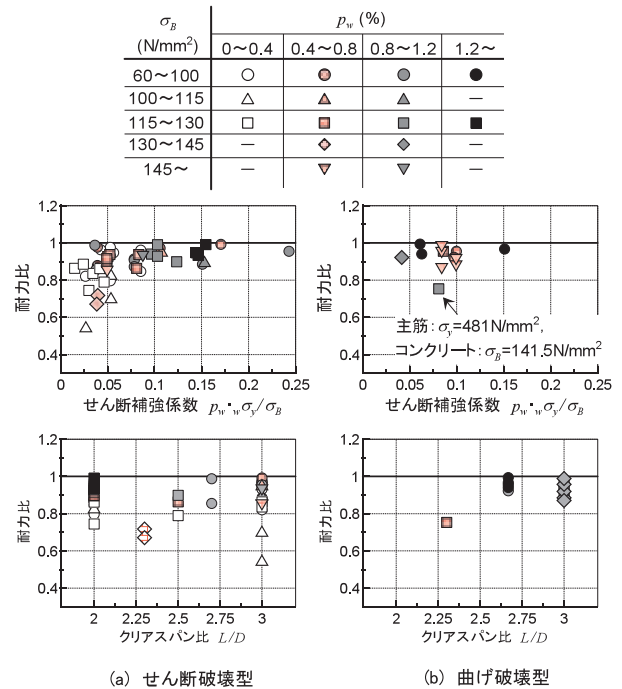


図 6 耐力比と主要な要因との関係

大きく影響を受け、硬化過程に生じる内部応力の低減を図る必要があろう。

3.3 正負両荷重時の最大耐力差に与える影響

$\sigma_B \geq 100\text{N/mm}^2$ のコンクリートを用いた RC 造短柱の最大耐力は、正負両荷重時で顕著な差が生じることを示した。この原因について考えてみる。図 5 に示した試験体 HNO17 のせん断ひび割れの発生状況とひび割れ幅の挙動を調べたデータを図 9 に示す。図中の①~⑦は、セ

ん断ひび割れの発生ステップにそれぞれ対応し、同図(c)のひび割れ幅の測定位置は、同図(a)に示す○印位置(最初に発生した負荷重時のせん断ひび割れ)である。

後で発生したせん断ひび割れ(実線の正荷重時)は、最初(点線の負荷重時)に生じたせん断ひび割れの影響を受け、柱軸に対する角度が大きく、ひび割れ長さも短く、また発生荷重も小さい。さらに、点線で示した最初のひび割れは、荷重を反転させた正加力時側でも閉じることなく、ひび割れ面に沿ってずれていく。このことにより、部材の一体性が次第に保持できなくなり、正負両荷重時でのせん断ひび割れの発生角度、最大耐力に差が生じたものと考えられる。

以上に示したように、とりわけ $\sigma_B \geq 100 \text{ N/mm}^2$ のコンクリートを用いた RC 造短柱のひび割れ耐力、最大耐力、ひび割れ・破壊性状は、硬化過程における内部応力や硬化後の残留応力、ひび割れ面の挙動の影響を強く受ける。

§4. 硬化コンクリートの特性と調合計画の影響

超高強度コンクリートを用いた RC 造短柱に限らず、部材の短期性状は、硬化コンクリートの特性に左右される。さらに、硬化コンクリートの特性は、使用骨材、調合の影響を受ける。そこで、硬化コンクリートの特性及び調合計画の影響として、圧縮強度とヤング係数及び圧縮強度時ひずみの関係を図 10 に、圧縮強度と結合材水比(B/W)との関係を図 11 にそれぞれ示す。なお、圧縮強度と割裂引張強度との関係は、既に図 7 に示している。図 7 及び図 10 より、割裂引張強度、ヤング係数、圧縮強度時ひずみの各値は、 $\sigma_B = 100 \text{ N/mm}^2$ を境に殆ど大きくはならない。また、図 11 より、圧縮強度は、 $B/W \leq 5$ では、 B/W が大きいほど大きくなるが、それ以上では殆ど上昇しない。これらのことより、通常の調合計画では、 $\sigma_B = 180 \text{ N/mm}^2$ 程度が限界のようである。

一方、 $\sigma_B \geq 100 \text{ N/mm}^2$ のコンクリートを用いた RC 造短柱の短期性状は、硬化過程における内部応力や硬化後の残留応力の影響を受けることを示した。ここでは、内部応力の低減効果を期待して膨張材と収縮低減剤とを添加し、RC 柱に生じる内部拘束応力の挙動について求めた結果を図 12(引張応力が正)に示す。同図の試験体は、断面寸法 $B \times D = 300 \times 300 \text{ mm}$ 、主筋比 $p_g = 2.9\%$ 、横補強筋比 $p_w = 1.2\%$ 、水結合材比 $W/B = 15\%$ を共通とし、無添加の 15P 試験体、膨張材と収縮低減剤とを添加した 15EH 試験体である。膨張材と収縮低減剤とを添加することにより、拘束応力の最大値が約 30%程度低減されており、その効果は実大柱でも十分に期待できる。

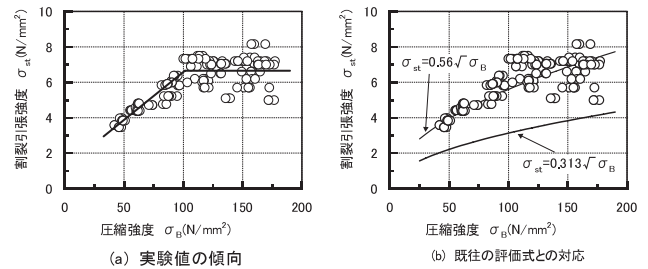


図 7 割裂引張強度と圧縮強度との関係

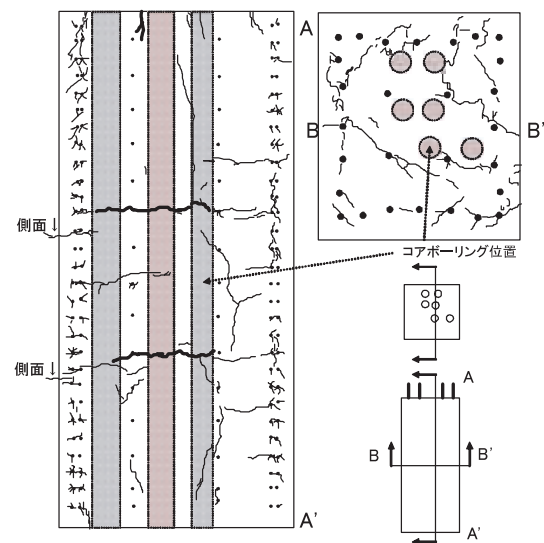


図 8 実大寸法の RC 柱内部のひび割れ状況

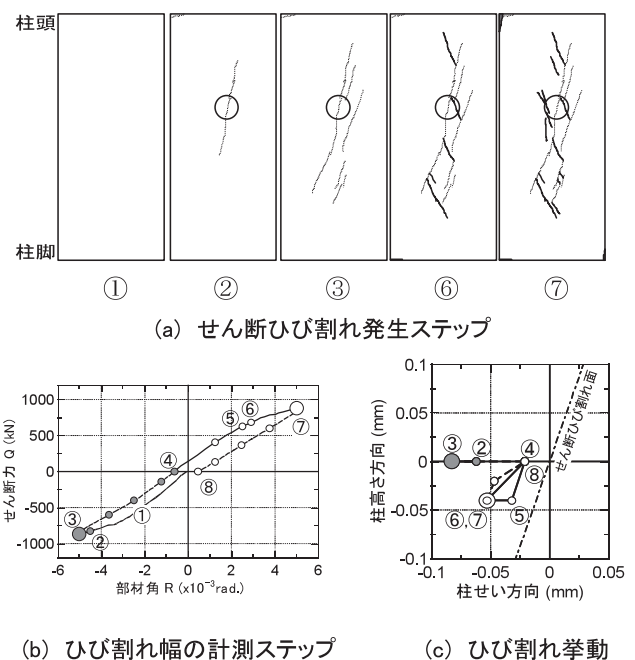


図 9 せん断ひび割れ発生状況(HNO17)

§5. まとめ

$\sigma_B > 60 \text{ N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた RC 造短柱の短期性状に与える硬化時内部応力、硬化コンクリートの特性及び調合の影響について、定性的、定量的な評価を行った。その結果は、次のようにまとめられる。

(1) RC 柱の硬化時内部応力の影響について

- 1) $\sigma_B \geq 100 \text{ N/mm}^2$ のコンクリートを用いた RC 造短柱のひび割れ耐力、最大耐力、ひび割れ性状、破壊性状は、硬化過程における内部応力、硬化後の残留応力、ひび割れ面の挙動の影響を受ける。また、ひび割れ耐力は、残留応力の影響を考慮することで適切に評価できると考えられる。
- 2) 水結合材比 $W/B=13\%$ の実大の RC 柱では、自己収縮応力及び温度応力により、部材内部にひび割れが発生した。
- 3) 高強度コンクリートは、ひび割れ面での一体性を確保するために、普通強度のコンクリートに比べ最小鉄筋量を多くする必要がある。

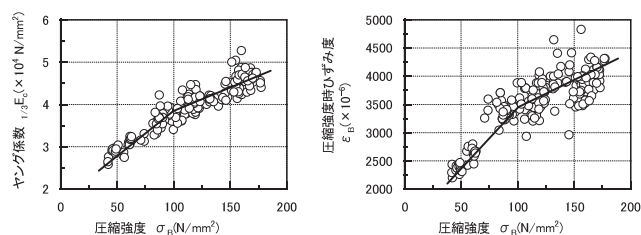
(2) 硬化コンクリートの特性、調合の影響について

- 1) ヤング係数、割裂引張強度、圧縮強度時ひずみは、 $\sigma_B = 100 \text{ N/mm}^2$ 以上の範囲では殆ど大きくはならない。
- 2) 調合に関して、水結合材比 (W/B) が 20% 以上になると圧縮強度の上昇度合いが緩慢となり、 $\sigma_B = 180 \text{ N/mm}^2$ 程度が通常の調合計画の限界である。
- 3) 内部応力や残留応力の低減には、膨張材や収縮低減剤の使用が有効である。

謝 辞 本研究に貴重なご意見、ご協力をいただいた呉工業高等専門学校 寺岡勝教授 (元フジタ)、京都大学 渡邊史夫教授に深謝いたします。

参考文献

- 1) 黒岩秀介, 河合邦彦, 小田切智明, 嵐山正樹: $\text{Fc}130 \text{ N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた超高層集合住宅の施工, コンクリート工学, Vol.42, No.10, pp.44~49, 2004.10
- 2) 佐藤幸博, 高森直樹, 佐々木仁, 寺岡勝: 超高強度材料を用いた RC 短柱の耐力と変形性能に関する調査・検討, フジタ技術研究報告 第 40 号, pp.51-56, 2004
- 3) 佐藤幸博, 佐々木仁, 高森直樹, 林和也, 寺岡勝, 渡邊史夫: 超高強度材料を用いた RC 短柱の耐震性能に関する実験的研究(その 5), 日本建築学会大会



(a) ヤング係数と圧縮強度との関係 (b) 圧縮強度時ひずみと圧縮強度との関係

図 10 硬化コンクリートの特性

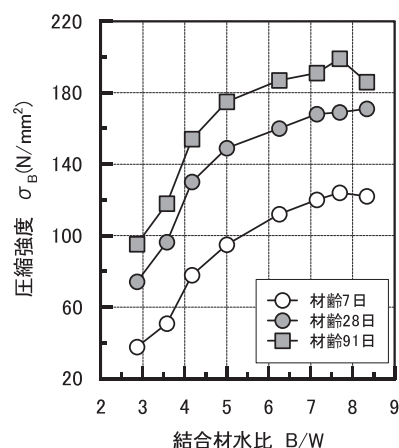


図 11 結合材水比と圧縮強度との関係

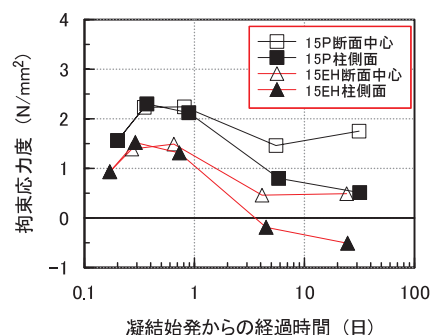


図 12 内部拘束応力の経時変化

学術講演梗概集, pp.177-178, 2005.9

- 4) 寺岡勝, 高森直樹, 佐藤幸博, 佐々木仁: 鉄筋コンクリート構造の耐震設計と部材性能評価についてのいくつかの疑問, コンクリート工学, Vol.41, No.4, pp.37-46, 2003.4
- 5) 片寄哲務, 高森直樹, 西田浩和, 寺岡勝: 高強度コンクリートの若材齢時における力学特性と自己収縮挙動, フジタ技術研究報告 第 41 号, pp.25-30, 2005



佐々木 仁

ひとこと

超高強度コンクリートの実用化・発展のためには、若材齢時からの硬化性状と素材自体の力学特性との関係を明らかにしていくことが重要と考えます。