

設計基準強度 $130\text{N}/\text{mm}^2$ の超高強度コンクリートの適用

黒岩 秀介^{*1}・渡邊 悟士^{*1}・陣内 浩^{*2}・並木 哲^{*1}・河合 邦彦^{*3}・寺内 利恵子^{*4}・飯島 真人^{*4}

Keywords : high-strength concrete, quality control, unit water content, strength of concrete in structure, spalling

高強度コンクリート, 品質管理, 単位水量, 構造体コンクリート, 爆裂

1. はじめに

近年、都市部を中心に、多くの超高層集合住宅が建設されている。超高層集合住宅は、強風時に揺れにくい、振動音が伝わりにくい、経済的であるなどの理由から、鉄筋コンクリート造で建てられることが多い。また、最近の超高層集合住宅には、長期の耐久性とともに、世代を超えての利用を可能とする可変性が求められており、柱の断面を小さく、柱の間隔を大きくすることが要求される。そこで、大きな軸力を支えることになる下層階の柱に、高強度コンクリートが採用されている。

わが国における高強度コンクリートの開発は、1988～1992年の5年間に亘って実施された建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」(総プロ「NewRC」)により促進され、設計基準強度(F_c) $60\text{N}/\text{mm}^2$ までの技術指針が取り纏められた。当社においても、1997年から $F_c100\text{N}/\text{mm}^2$ の高強度コンクリートを超高層集合住宅の建設に適用し、これまでに高さ150m級の建物を6棟完成させている。また、2002年12月には $F_c150\text{N}/\text{mm}^2$ までのコンクリートの大臣認定を取得し、実施適用を待つ段階になっていた¹⁾。このような状況の中で、前例のない $F_c130\text{N}/\text{mm}^2$ の超高強度コンクリートを超高層集合住宅に適用する機会を得たので、品質管理結果を中心に、概要を紹介する。

2. 建物および工事の概要

$F_c130\text{N}/\text{mm}^2$ の超高強度コンクリートを使用した建築

- *1 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室
- *2 技術センター技術企画部企画室
- *3 東京支店建築工事作業所
- *4 建築本部技術部建築技術部

物は、(仮称)太平四丁目錦糸町開発計画新築工事住宅棟である。工事概要を表-1に示す。当建築物は、地上45階地下2階建の超高層集合住宅で、JR 錦糸町駅の至近に位置する敷地面積約 $27,300\text{m}^2$ のなかに、超高層オフィスビル、商業施設とともに現在建設中のものである。完成後は東京東部エリアの新しいランドマークとなることが期待されている。

図-1に基準階平面図、図-2に断面図とコンクリート

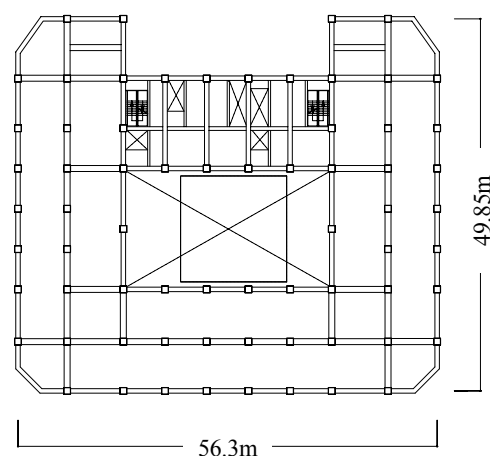


図-1 基準階平面図
Typical floor plan

表-1 工事概要
Construction outline

工事名	:(仮称)太平四丁目錦糸町開発計画新築工事住宅棟
発注者	: 東京建物(株), 三井物産(株), 昭栄(株)
設計監理	: (株)久米設計
施工	: 大成建設(株)東京支店
工期	: 平成14年12月～平成18年6月 (42ヶ月)
建築面積	: $2,654.14\text{m}^2$, 延床面積: $90,523.95\text{m}^2$
構造	: 鉄筋コンクリート造
階数	: 地下2階, 地上45階, 塔屋1階
軒高	: 150.2m, 最高高さ: 159.4m

強度区分を示す。Fc130N/mm² のコンクリートは1～3階の柱に使用されている。コンクリートの高強度化によって、図-1 のような柱配置でも、代表的な柱の断面寸法は 95cm 角以下に収まっている。4階から上の柱には Fc100N/mm² のコンクリートが使われ、さらに上階にいくと強度は 80、70、60、48、36、30N/mm² と順次低いものとなっている。梁には Fc48N/mm² 以下のコンクリートが使用されている。なお、Fc130N/mm² のコンクリート総量は約 700m³、打込み時期は1～3月である。

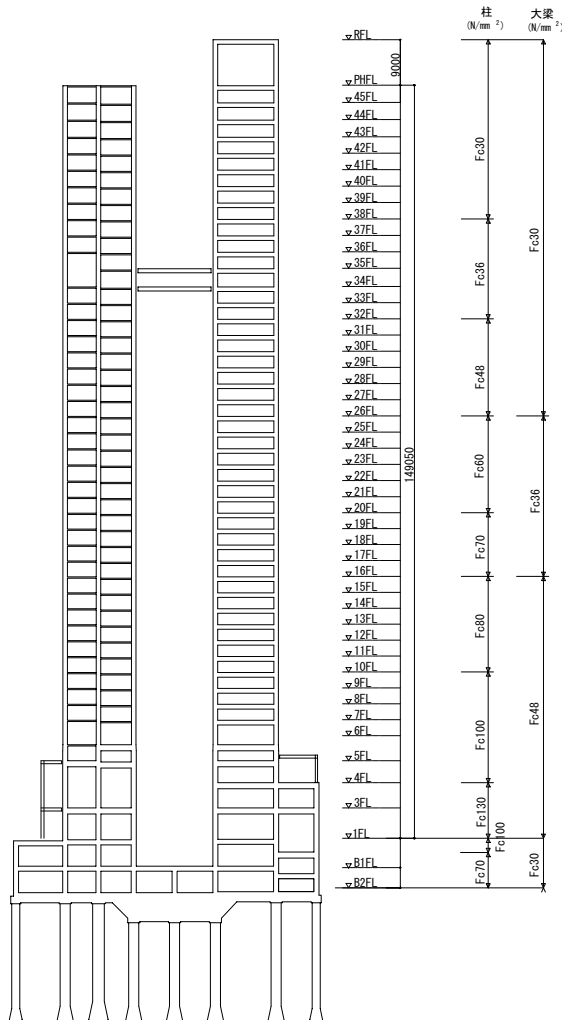


図-2 断面図およびコンクリートの強度区分
Elevation and division of design strength of concrete frame

3. コンクリートの要求性能と特徴

高強度コンクリートの主要要求性能と検証方法を表-2に示す。ワーカビリティが現場打込み可能なものであること、構造体コンクリート強度が設計基準強度を満足すること、ヤング係数が構造設計で採用した値の 0.9 倍を満足すること、水和発熱や自己収縮が構造体に有害なひび割れを生じさせないものであることなどの検証は、実大模擬柱の施工実験と、夏期、中間期および冬期に作製した模擬柱から採取したコア供試体の圧縮試験などによって行った^{2、3)}。

耐火性能の検証は、鉄筋コンクリート短柱試験体による荷重加熱実験によって行った。高強度コンクリートは、通常のコンクリートに比べて組織が緻密であることから、火災時に表面が爆裂しやすく、部材の耐力低下を生じる可能性が大きいと指摘されている。そこで、火災時の爆裂対策として、写真-1 に示すエチレンビニルアルコール共重合体からなる有機繊維を混入することとした。荷重加熱実験により、有機繊維の混入量を 2.5kg/m³ とすれば、3時間耐火を大きく上回る5時間以上の荷重支持能力があることを確認している³⁾。

耐久性の検証は、各種耐久性の促進試験によって行った。また、Fc130N/mm² のコンクリートに用いた結合材



写真-1 爆裂対策用有機繊維
Organic fiber used for improving spalling resistance of high-strength concrete

表-2 コンクリートの要求性能と検証方法
Required performance and inspection methods of concrete

項目	要求性能	検証方法
ワーカビリティ	密実に打込み可能で分離がないもの	鉄筋を配した実大模擬柱（高さ 4 m）の施工実験
構造体コンクリート強度	設計基準強度を満足すること	模擬柱から抜き取ったコアの圧縮強度試験（夏、冬、中間期）
ヤング係数	構造設計における値の 0.9 倍以上	試し練りで採取した供試体の圧縮試験時に測定
水和発熱，自己収縮	有害なひび割れが生じないこと	鉄筋を配した実大模擬柱（高さ 4 m）の施工実験
耐火性	耐火構造としての性能確保	鉄筋コンクリート短柱試験体の荷重加熱実験
耐久性	耐久性が確保されること	各種耐久性試験，長期材齢の構造体コンクリート強度の確認

は、ポルトランドセメントにシリカフュームと石膏スラグ微粉末を混合したものであるが、同種の結合材を用いたコンクリートの模擬柱（断面寸法 800×800mm）を保存し、長期材齢における構造体コンクリート強度の確認も実施した。結果の一例を図-3 に示すが、材齢 10 年に採取したコア供試体の圧縮強度は、材齢 91 日、1 年の強度を上回るものであることを確認している。

4. コンクリートの材料と調合

コンクリートの使用材料を表-3 に示す。結合材は、前述の普通ポルトランドセメント、石膏スラグ微粉末、シリカフュームを 7:2:1 で混合した高強度用 3 成分セメントとした。シリカフュームは、 $Fc80N/mm^2$ 以上の高強度コンクリートには欠かせないが、非常に細かい粉体であるために、既存のレディーミクストコンクリート工場の設備では、粉体の移動、計量、ミキサへの投入、

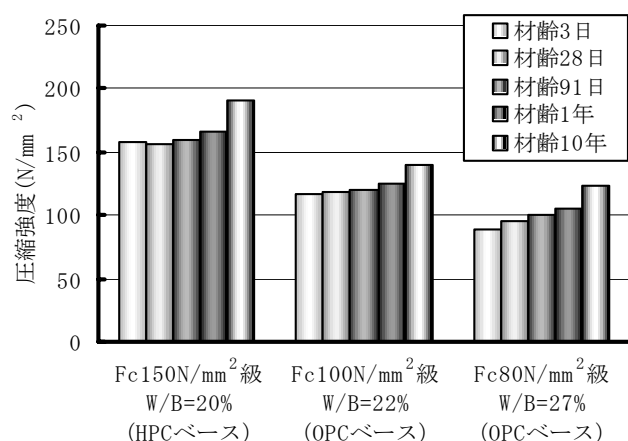


図-3 構造体コンクリートの長期強度発現
Strength development in the concrete structure placed ten years ago

表-3 コンクリートの使用材料
Materials for concrete

結合材	シリカフューム混合高強度用 3 成分セメント(密度 2.99g/cm³)
細骨材	大月産安山岩砕砂 (表乾密度 2.63g/cm³)
粗骨材	大月産安山岩碎石 (表乾密度 2.65g/cm³)
化学混和剤	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤
爆裂対策用	エチレンビニルアルコール共重合体繊維
有機繊維	(密度 1.14g/cm³, 径 0.05mm, 長 10mm)

表-4 調合
Mix proportion

Fc N/mm²	目標値		補正值 $_{56}S_{56}$ N/mm²	判定 強度 N/mm²	水結合材 比 %	単位量, kg/m³					
	スランプ フロー cm	空気量 %				水	結合材	細骨材	粗骨材	高性能 減水剤	有機 繊維
130	65	1.0	0	130	18.0	150	834	647	835	12.9	2.5

均一な練混ぜが困難である。そこで、高強度用 3 成分セメントは、あらかじめセメント工場で 3 種類の結合材を混合したものとしている。

骨材は、高強度コンクリート用に選定した安山岩碎石・砕砂とし、混和剤はポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤とした。また、火災時の爆裂対策として前述の有機繊維を使用した。

調合を表-4 に示す。調合を定める材齢、構造体コンクリートの強度管理材齢はいずれも 56 日とし、調合強度算定式は式(1)を採用することとした。

$$_{56}F \geq Fc + _{56}S_{56} + 2\sigma \quad (1)$$

ここで、 $_{56}F$ は材齢 56 日における調合強度、 $_{56}S_{56}$ は標準養生した管理用供試体（ $\phi 100 \times 200mm$ ）の材齢 56 日における圧縮強度と、模擬柱から採取した構造体コンクリート（ $\phi 100mm$ コア供試体）の材齢 56 日における圧縮強度の差による強度補正值である。実機ミキサによる試し練りの結果^{2, 3)}から、材齢 56 日において、コア供試体の圧縮強度が標準養生した管理用供試体の圧縮強度を上回ることを確認したので、 $_{56}S_{56}$ はゼロとした。つぎに、管理用供試体の圧縮強度の標準偏差 σ は、過去の $Fc80$ 、 $100N/mm^2$ の施工管理結果から、設計基準強度 Fc と強度補正值 $_{56}S_{56}$ との和の 5% の値とした。これは、水中質量法による単位水量の測定を行い、その結果を製造管理にフィードバックさせた場合、強度が安定し、変動係数を 5% 以下に収めることができるという実績⁴⁾から採用した値である。式(1)にこれらの値を代入して調合強度を定め、実機ミキサによる試し練りから求めた水結合材比と強度の関係式から、 $Fc130N/mm^2$ のコンクリートの水結合材比は 18% とした。なお、強度管理用供試体の養生は標準養生とし、構造体コンクリートの判定強度は、2003 年版 JASS 5 に準ずる $Fc + _{56}S_{56}$ とした。

5. コンクリートの製造・輸送および施工

コンクリートの製造は、 $Fc100N/mm^2$ の実績を持つレディーミクストコンクリート工場で行った。同工場では、細骨材の表面水率を安定させるために、製造開始前の早朝に、骨材サイロ内の細骨材を循環させるなどの対策を

採っている。コンクリートの練混ぜは容量 3.3m³ の強制 2 軸ミキサを使用し、練混ぜ時間は実機試験のミキサ負荷電流および目視観察の結果からモルタル 90 秒、碎石投入後 90 秒の合計 180 秒とした。コンクリートの製造においては、全バッチについて、練混ぜ時のミキサ負荷電流を確認し、変化が見られたときには練上がりのスランプフローや後述する単位水量試験結果との照合、骨材の表面水率の測定などを行い、次バッチに反映させるなどの対策を採った。爆裂対策用の繊維は、アジテータ車にコンクリートを積込み後、アジテータ車に消泡剤とともに投入し、3 分間の高速攪拌により混合した。

工場から現場までの輸送時間は 30 分程度である。現場では、まず梁下端までコンクリートを打ち込み、後日、ハーフ PCa の梁とスラブを取り付けた後、柱梁接合部を打ち込む VH 分割打設方式を採用した。場内運搬には、写真-2 に示すように、容量 2.8m³ のコンクリートバケットを用いた。Fc130N/mm² のコンクリートは粘性が高く、バケットからの排出に時間を要したが、柱の中に打ち込まれたコンクリートは十分な流動性を有しており、パイププレートによる締固めにより柱内の隅々までの充填が可能であった。せき板の取り外しは打込み日の翌々日以降とし、せき板取り外し後の湿潤養生はシートの巻き付けによって行った。コンクリート表面の仕上がり状態は、気泡、欠陥、ひび割れなどもなく、良好なものであった。

6. コンクリートの品質管理

6.1 単位水量

単位水量の過大なものが構造体へ打ち込まれることのないように、全アジテータ車について、工場で試料を採取し、現場までの輸送の間に単位水量の測定を行った。測定結果は、製造管理にフィードバックさせ、製造の安定に役立てた。水中質量法による単位水量の測定結果を図-4 に示す。単位水量は、計画値の 150kg/m³ に対してやや小さいものの、許容範囲の上限である 160kg/m³ を超えるものはなく、安定したものであった。

6.2 スランプフローおよび空気量

施工実験から受入れ検査におけるスランプフローは目標値を 65cm、管理値を 55～70cm とし、空気量は目標値を 1.0%、管理値を 0.5～2.0% とした。受入れ検査は、1～5 および 10 台目について行うこととし、その他必要に応じて実施した。受入れ検査の状況を写真-3、受入れ時のスランプフローを図-5、空気量を図-6 に示す。現場で減水剤を添加するなどの調整を行わずに、スランプフロー、空気量のいずれも許容範囲内に収まっており、フ

レッシュ性状は安定したものであった。

6.3 構造体コンクリートの強度

構造体コンクリート強度の検査ロットは、打込み日毎に、1、5、10 台目を基本とする任意の 3 台から各 3 個



写真-2 1階柱の打設状況
Placing of concrete of column

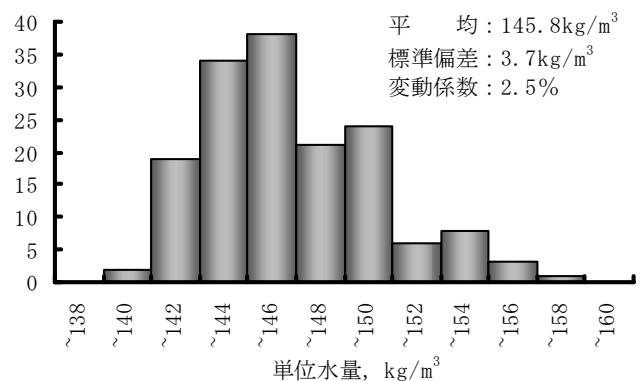


図-4 全車の単位水量
Unit water content of the concrete measured for every truckload

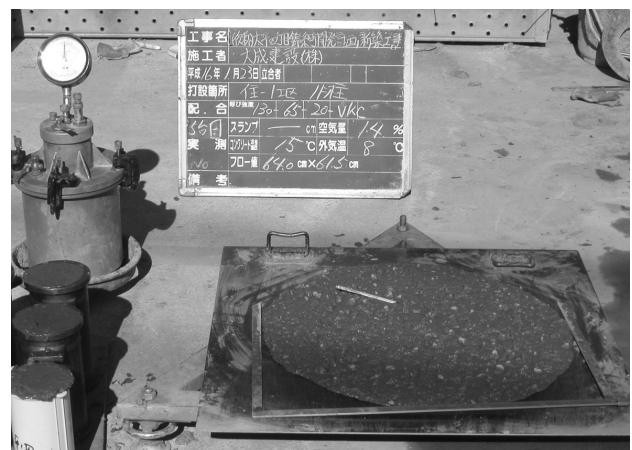


写真-3 受入れ検査の状況
Field quality tests at time of delivery

ずつ採取し、合計 9 個の供試体で構成した。図-7 に、圧縮強度の変動係数を確認するために、1 台から採取した供試体 3 本の平均強度を 1 回として整理して示す。管理材齢にあたる 56 日強度の変動係数は 2.0% となり、調合強度を定める際に想定した変動係数 5.0% に対して充分安全側の値となった。

日内の変動を把握するために、1 日に使用する全てのアジテータ車から供試体を採取し、圧縮強度を調査した。表-5 に全体の検査結果と合わせて日内変動の調査結果を示す。日内変動の調査は 2 回行ったが、日内変動の変動係数が全体の変動係数とほぼ同等であることから、日間の変動は十分に小さいものであったことが分かる。

6.4 コア供試体による構造体コンクリート強度

実際の柱の打込み日に図-8 に示す模擬柱を作製し、模擬柱から抜き取ったコア供試体の圧縮強度を調査した。模擬柱は、打込み日を変えて 2 体作製した。図-9 に模擬柱の中心温度の履歴を示す。調査日 A に打ち込んだ柱の中心部の最高温度は 57℃、調査日 B の最高温度は 62℃に達した。図-10 にコア供試体の圧縮強度を示す。材齢 56 日および 91 日は、内側、中間、外側の 3 本のコアを抜き取り、合計 15 本の圧縮強度試験を行った。調査日 A に打ち込んだ柱の材齢 56 日における平均強度は 159N/mm²、調査日 B の柱の平均強度は 156N/mm²に達し、構造体においても設計基準強度を充分満足していることが確認できた。

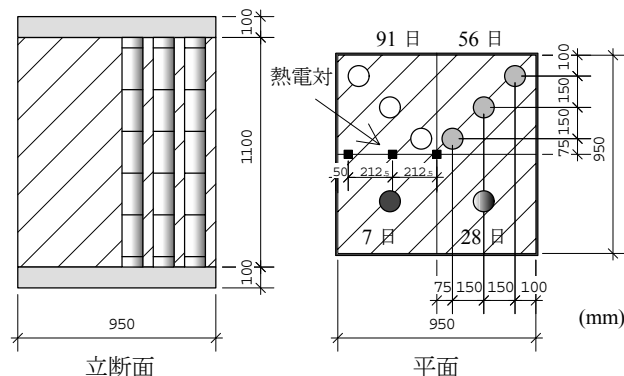


図-8 構造体コンクリート強度調査用模擬柱
Specimen for estimation of concrete strength in structure

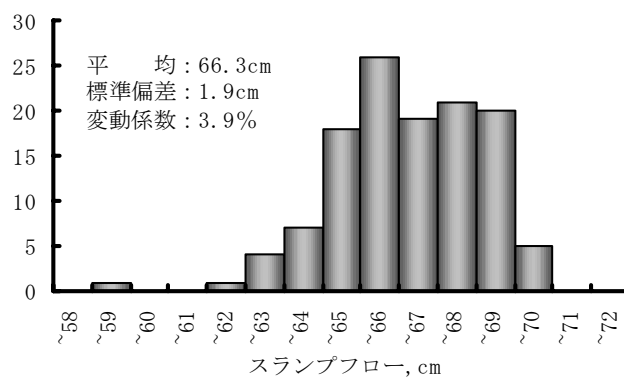


図-5 受入れ時のスランプフロー
Slump flow test results at time of delivery

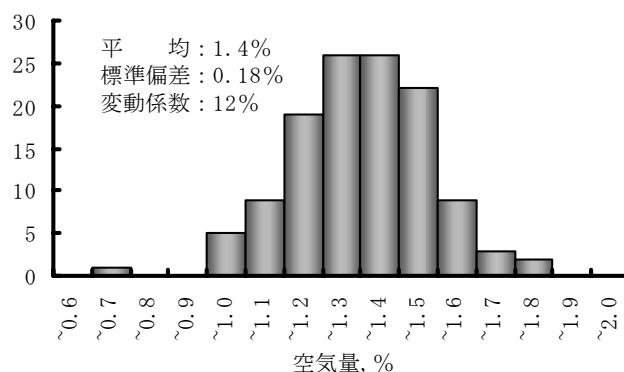


図-6 受入れ時の空気量
Air content test results at time of delivery

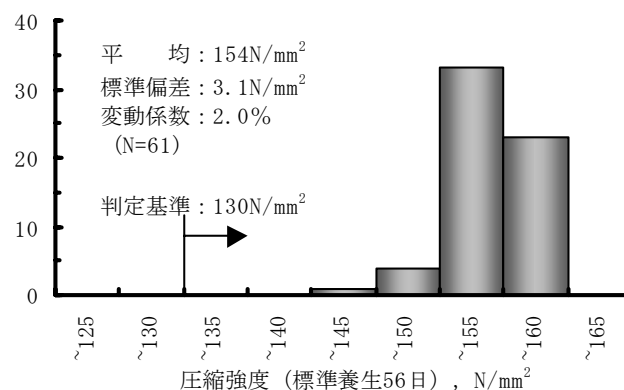


図-7 管理用供試体の圧縮強度
Strength test results for quality control

表-5 品質管理試験結果一覧 (全検査結果と日内変動)
List of quality control test results

	単位水量 (kg/m ³)			スランプフロー (cm)			空気量 (%)			圧縮強度(標準養生 56 日) (N/mm ²)		
	全車	調査日 A	調査日 B	全検査	調査日 A	調査日 B	全検査	調査日 A	調査日 B	全検査	調査日 A	調査日 B
回数	156	7	10	122	7	10	122	7	10	61	7	10
平均	145.8	143.1	147.9	66.3	66.6	68.5	1.4	1.5	1.0	154	159	158
標準偏差	3.7	2.4	2.7	1.9	1.6	1.7	0.18	0.38	0.23	3.1	4.8	2.3
変動係数	2.5%	1.7%	1.8%	3.9%	2.4%	2.4%	12%	25%	22%	2.0%	3.0%	1.8%

6.5 爆裂対策の効果の確認

有機繊維混入による火災時爆裂対策の妥当性を確認するために、現場で試験体を2体採取し、ISO834 標準加熱曲線による1時間の加熱試験を実施した。比較用として、同一材料を用い、水結合材比 17%とした繊維無混入の試験体と、繊維量 2.5kg/m³の試験体（前述の荷重加熱実験の仕様）の加熱試験も実施した。試験体は中心軸にφ22mmの全ねじボルトを通した外形φ250×500mmとし、加熱材齢は前述の荷重加熱実験にあわせて3ヶ月とした。結果を写真-4に示す。繊維無混入の試験体は、連続的に爆裂を生じ、最終的に完全に破壊した。一方、事前の実験で5時間以上の荷重支持能力を有した水結合材比 17%、繊維量 2.5kg/m³の試験体は表層部の爆裂に留まった。現場で作製した水結合材比 18%、繊維量 2.5kg/m³の試験体の爆裂はさらに軽微で、1体には全く爆裂が認められなかった。よって、当工事のFc130N/mm²の柱は十分な耐火性能を有しているものと推察できる。

7. おわりに

Fc130N/mm²のコンクリートを実構造物に適用し、単位水量、スランプフロー、空気量、管理供試体強度などの品質管理データから、安定した品質のコンクリートが製造可能であることを実証した。また、柱構造体モデルから採取したコアの強度から、構造体においても設計基準強度を充分満足する強度に達していることを確認した。

謝辞

東京建物、久米設計、その他多くの関係者の皆様に御指導、御協力を頂きました。製造に関して、アサノコンクリート深川工場、ポゾリス物産の方々には多大なる御協力を頂きました。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 小室努, 黒岩秀介, 渡辺英義, 陣内浩: 150N/mm²級の超高強度コンクリートを用いたRC柱の実用化研究、コンクリート工学, Vol.39, No.10, pp.9-16, 2001.10
- 2) 陣内浩, 黒岩秀介, 早川光敬, 並木哲, 飯島真人, 原孝文, 小田切智明, 井上善尊: 設計基準強度 150N/mm²クラスの高強度

- コンクリートによる実大RC柱の施工性と構造体強度発現性状の検討, 日本建築学会技術報告集第17号, pp.1-5, 2003.6
- 3) 黒岩秀介, 小林裕, 陣内浩: Fc100N/mm²を超えるコンクリートの爆裂対策: 大成建設技術センター報第36号, pp.11.1-6, 2003
 - 4) 並木哲, 早川光敬, 陣内浩: Fc80~100N/mm²の高強度コンクリートの品質管理: 日本建築学会大会A-1, pp.959-956, 2003.9

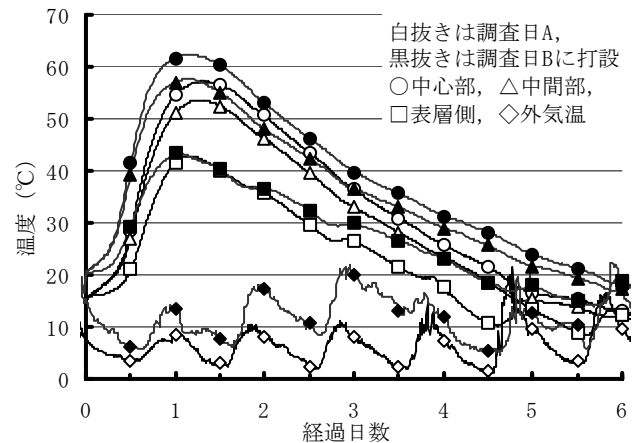


図-9 模擬柱の中心温度の履歴
History of temperature of concrete test specimens

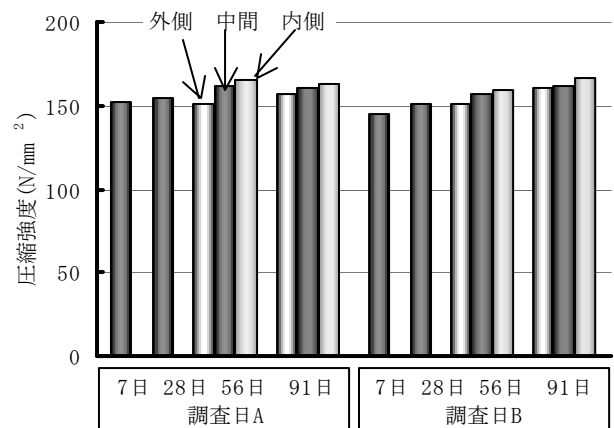


図-10 模擬柱から採取したコア供試体の強度
Strength of core specimens

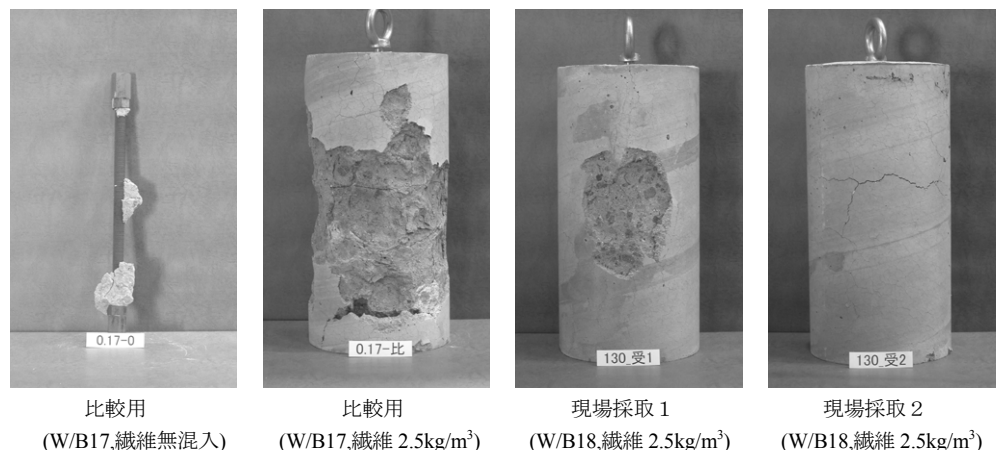


写真-4 加熱試験後の状況
Specimens after spalling resistance tests