

# 超高強度コンクリートの開発 (Fc 100N/mm<sup>2</sup>)

## Development of High-Strength Concrete (Fc 100N/mm<sup>2</sup>)

|                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| 小林 利充*               | 和田 高清*             |
| Toshimitsu Kobayashi | Takakiyo Wada      |
| 西山 直洋*               | 宮下 剛士*             |
| Naohiro Nishiyama    | Takeshi Miyashita  |
| 飯塚 信一*               | 小林 康之**            |
| Shinichi Iizuka      | Yasuyuki Kobayashi |

### 要 約

近年、首都圏における高層集合住宅の需要が拡大し、その建設は増加傾向にある。本論では、最大設計基準強度が 100N/mm<sup>2</sup> の超高層鉄筋コンクリート (RC) 造建築物の施工技術を確認することを目的に、低熱ポルトランドセメントおよび特殊結合材を用いて実機実験を行い、フレッシュ性状および模擬試験体などによる強度性状を検討している。また、その結果をもとに、実大施工実験を行い、超高強度コンクリートの各種性状および施工法を検討している。さらに、建築基準法第 37 条第二号による大臣申請を行っており、その概要を報告する。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 材料実験
- § 3. 施工実験
- § 4. 大臣申請
- § 5. おわりに

### § 1. はじめに

近年、首都圏を中心に、高層集合住宅の需要が拡大し、各種のタワー型マンションの建設が相次いでいる。一般に、高層 RC 造建築物を建設する場合、設計基準強度の要求も非常に高いものとなり、その要求を満たすため、高強度コンクリートを適用することが必須条件となっている。本論では、最大設計基準強度が 100N/mm<sup>2</sup> の超高層 RC 造建築物の施工技術を確認することを目的に、高強度結合材を用いて実機実験を行い、フレッシュ性状および強度性状を検討している。また、その結果をもとに、実大施工実験を行い、各種性状を検討している。さらに、建築基準法第 37 条第二号による大臣申請の概要を報告する。

ここで、高層 RC 造建築物における設計基準強度（以下、Fc と言う）の変遷を図-1 に示す<sup>1)</sup>。この図からも分かるように、確立期（～1989）には Fc 48N/mm<sup>2</sup> が、

展開期（1990～1994）には Fc 60N/mm<sup>2</sup> までは使用されている。さらに、1995 年以降は、加速期として Fc 100 N/mm<sup>2</sup> が実用化され、飛躍的に設計基準強度が向上している。このように、この 30 年の間に、設計基準強度は、3 倍以上に引き上げられていることが分かる。

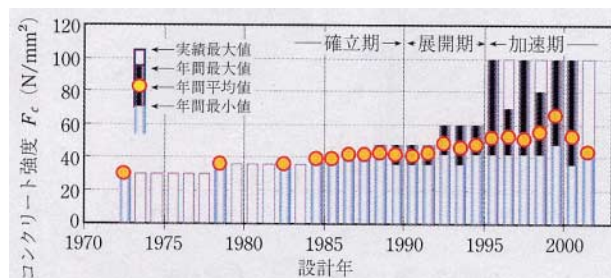


図-1 高層 RC 造建築物の設計基準強度の変遷<sup>1)</sup>

### § 2. 材料実験

#### 2-1 実験概要

##### (1) 使用材料および調合条件

コンクリートの使用材料を表-1 に、調合条件を表-2 に示す。なお、結合材の選定に関しては、強度レベルと施工性を考慮し、設計基準強度 50～70N/mm<sup>2</sup> 程度までは低熱ポルトランドセメント（以下、LC と言う）とし、設計基準強度 80～100N/mm<sup>2</sup> の範囲は特殊結合材（以下、VKC と言う）を使用した。

##### (2) コンクリートの製造および実施時期

実機プラント（最大練混ぜ量：3m<sup>3</sup>）によるコンクリー

\* 技術研究所技術研究部建築技術研究課

\*\*技術研究所技術研究部

トの製造は、ミキサーにかかる負荷および練混ぜ効率を考慮し、モルタル先行練り方式を採用した。なお、練混ぜ時間は、調合によって異なるが、空練り 10 秒、モルタル練り 30～80 秒、本練り 90～120 秒とした。また、本実験は、3 シーズン（標準期・夏期・冬期）行っているが、本論では、夏期（7 月）および冬期（1 月）の結果を示す。

### (3) 試験項目

フレッシュ性状および硬化性状に関する試験項目を表一3および表一4に示す。なお、簡易断熱養生供試体および模擬試験体の概要を図一2および図一3に示す。

表一1 使用材料

| 分類      | 種類                                        |
|---------|-------------------------------------------|
| 結合材(B)  | 低熱ポルトランドセメント（密度：3.22）                     |
|         | 特殊結合材（密度：2.99）<br>構成 [N:SG:SF=7:2:1（質量比）] |
| 細骨材(S)  | 陸砂・山砂                                     |
|         | 混合砂（表乾密度：2.62，粗粒率：2.70）                   |
| 粗骨材(G)  | 砂岩碎石（表乾密度：2.67，粗粒率：6.74）                  |
| 水(W)    | 地下水                                       |
| 混和剤(Ad) | 高性能 AE 減水剤（LC 用）ポリカルボン酸系                  |
|         | 減水剤（VKC 用）ポリカルボン酸系                        |

[注] N：普通ポルトランドセメント，SG：スラグ石膏微粉末  
SF：シリカフューム，密度：g/cm<sup>3</sup>

表一2 調合条件

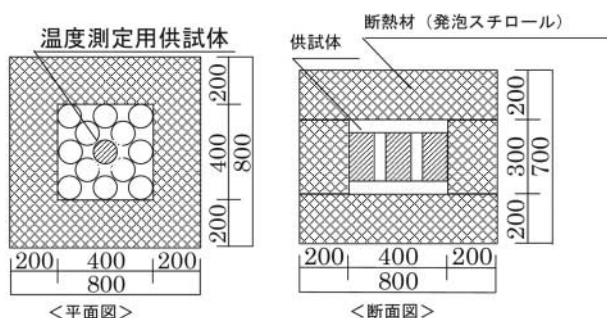
| 結合材種類 | W/B (%) | S/a (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     | Ad. B×%   |
|-------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|-----------|
|       |         |         | W                        | B   | S   | G   |           |
| LC    | 25      | 43.8    | 165                      | 660 | 684 | 899 | 1.00～1.45 |
|       | 30      | 46.9    | 165                      | 550 | 772 | 899 | 0.90～1.40 |
|       | 35      | 48.9    | 165                      | 471 | 837 | 899 | 0.92～1.60 |
| VKC   | 18      | 35.6    | 160                      | 889 | 458 | 899 | 1.30～1.60 |
|       | 25      | 44.4    | 160                      | 640 | 699 | 899 | 1.20～1.38 |
|       | 30      | 47.4    | 160                      | 533 | 793 | 899 | 1.20～2.05 |

表一3 試験項目（フレッシュ時）

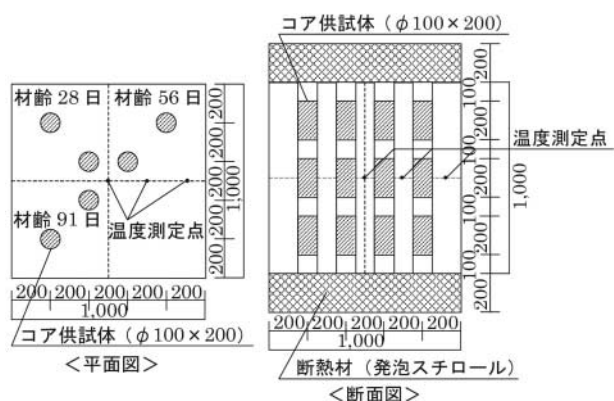
| 試験項目                 | 経時変化 (min) |    |    |     |
|----------------------|------------|----|----|-----|
|                      | 0          | 60 | 90 | 120 |
| スランプフロー (JIS A 1150) | ●          | ●  | ●  | ●   |
| 空気量 (JIS A 1128)     | ●          | ●  | ●  | ●   |
| 塩化物量 (JASS 5 T-502)  | —          | ●  | —  | —   |
| コンクリート温度（棒状温度計）      | ●          | ●  | ●  | ●   |
| 圧縮強度試験用供試体の作製        | —          | ●  | —  | —   |
| 模擬試験体の作製             | —          | ●  | —  | —   |

表一4 試験項目（硬化時）

| 試験項目         | 材 齢 (d)          |
|--------------|------------------|
| 標準水中養生強度     | 7, 28, 56 および 91 |
| 簡易断熱養生強度     | 28, 56 および 91    |
| 模擬試験体によるコア強度 | 28, 56 および 91    |
| コンクリートの温度履歴  | 10 (1h 間隔)       |



図一2 簡易断熱養生供試体の概要

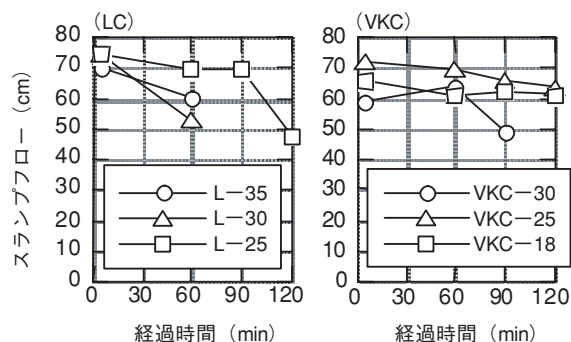


図一3 模擬試験体の概要

(単位：mm)

## 2-2 フレッシュ性状に関する実験結果

図一4および図一5には、スランプフローと経過時間の関係を示す。低熱ポルトランドセメントの場合、単位結合材量が少ない W/B 30% および W/B 35% の夏期において、スランプロスが認められた。これは、コンクリート温度が一定値以上に上昇すると、水結合材比が高い調合について、スランプロスが顕著になることを示唆するものであり、混和剤の性質と温度条件をあらかじめ検討する必要がある。なお、図一6には、前述したことを裏付けるデータ (W/B 30%) として、30℃ 前後の温度 [図中の (○～○) は C.T を示す] における混和剤の種類ごとのスランプフローと経過時間の関係を示す。一方、特殊結合材の場合も同様に、結合材量が少ない W/B 30% の夏期において、スランプロスの傾向が認められた。しかしながら、それ以外は、概ね 120 分まで目標値 (60±10cm) を満足し、良好な性状を保持することが可能であった。



図一4 スランプフローと経過時間の関係（夏期）

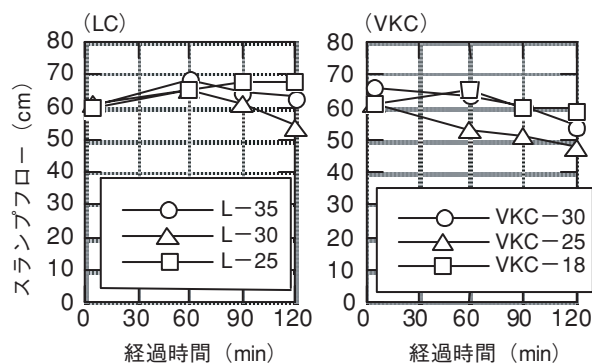


図-5 スランプフローと経過時間の関係 (冬期)

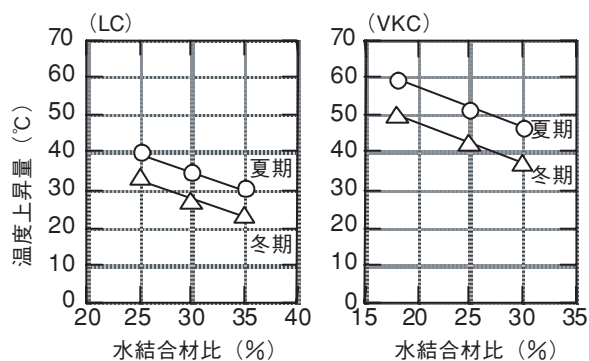
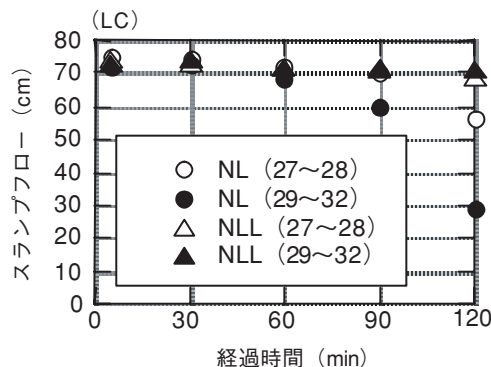


図-8 温度上昇量と水結合材比の関係



[注] NL・NLLは混和剤の種類

図-6 混和剤の種類と経時変化の関係 (LC)

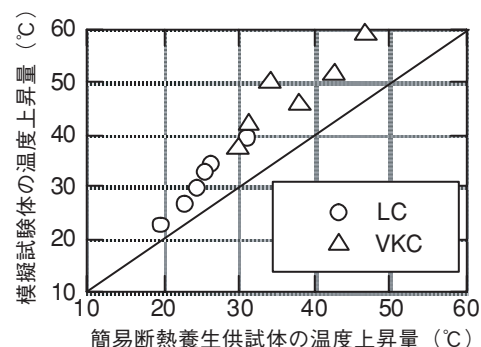


図-9 模擬試験体と簡易断熱養生供試体の温度上昇量の関係

## 2-3 硬化性状に関する実験結果

### (1) 温度性状

図-7 および図-8 には、模擬試験体の温度性状 (測定位置: 中央部) を示す。試験結果からも分かるように、模擬試験体の最高温度および温度上昇量は、結合材の種類および季節にかかわらず、水結合材比の減少に伴って高くなる傾向にあり、特に、W/B 18%-夏期仕様の特殊結合材による模擬試験体の最高温度および温度上昇量は、94.3°C および 59.4°C と非常に高い。また、図-9 には、模擬試験体と簡易断熱養生供試体の温度上昇量 (測定位置: 中央部) の関係を示す。結合材の種類、水結合材比および季節にかかわらず、模擬試験体の温度上昇量は、簡易断熱養生供試体のそれに比べて高くなる傾向を示し、両者の間には高い相関性が見られる。

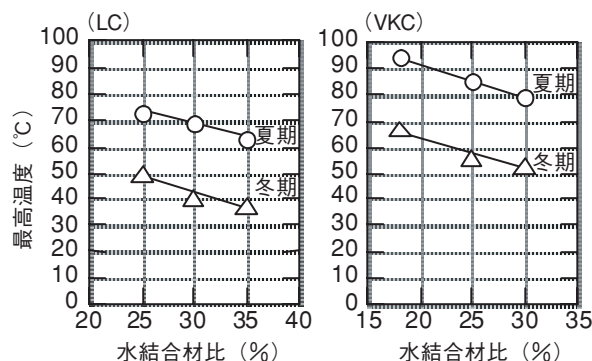


図-7 最高温度と水結合材比の関係

### (2) 各種養生による強度性状

図-10 には、各種養生を施した強度性状を示す。低熱ポルトランドセメントの強度発現性は、いずれの養生の場合でも、材齢の経過に伴って強度が増進する傾向が見られる。一方、特殊結合材の強度発現性も同様に、養生条件にかかわらず、材齢に伴う強度の増進は見られるものの、低熱ポルトランドセメントに比べると、その割合は小さい。つまり、特殊結合材の場合は、材齢 28 日または 56 日程度で、ポテンシャル強度が、ある程度得られるものと考えられる。

図-11 には、模擬試験体によるコア強度と簡易断熱養生供試体の圧縮強度の関係を示す。一般に、強度補正值を検討する際には、標準水中養生強度と模擬試験体によるコア強度の関係をもとに検討を行っている。本実験では、模擬試験体に代わる養生として、簡易断熱養生を実施した。その結果、結合材の種類、材齢および水結合材比にかかわらず、簡易断熱養生強度は、コア強度と類似した強度発現性が見られる。ただし、夏期の場合に限って、コア強度よりも、簡易断熱養生強度の方が若干高くなる傾向を示している。なお、本論は、限られたデータ数で検討を行っているため、今後さらなるデータの蓄積を行い、その相関性について検討したい。

### (3) 強度補正值と結合材水比の関係

図-12 には、強度補正值 [標準水中養生強度と模擬試験体により採取したコア強度の差 (S 値)] と結合材水比の関係を示す。

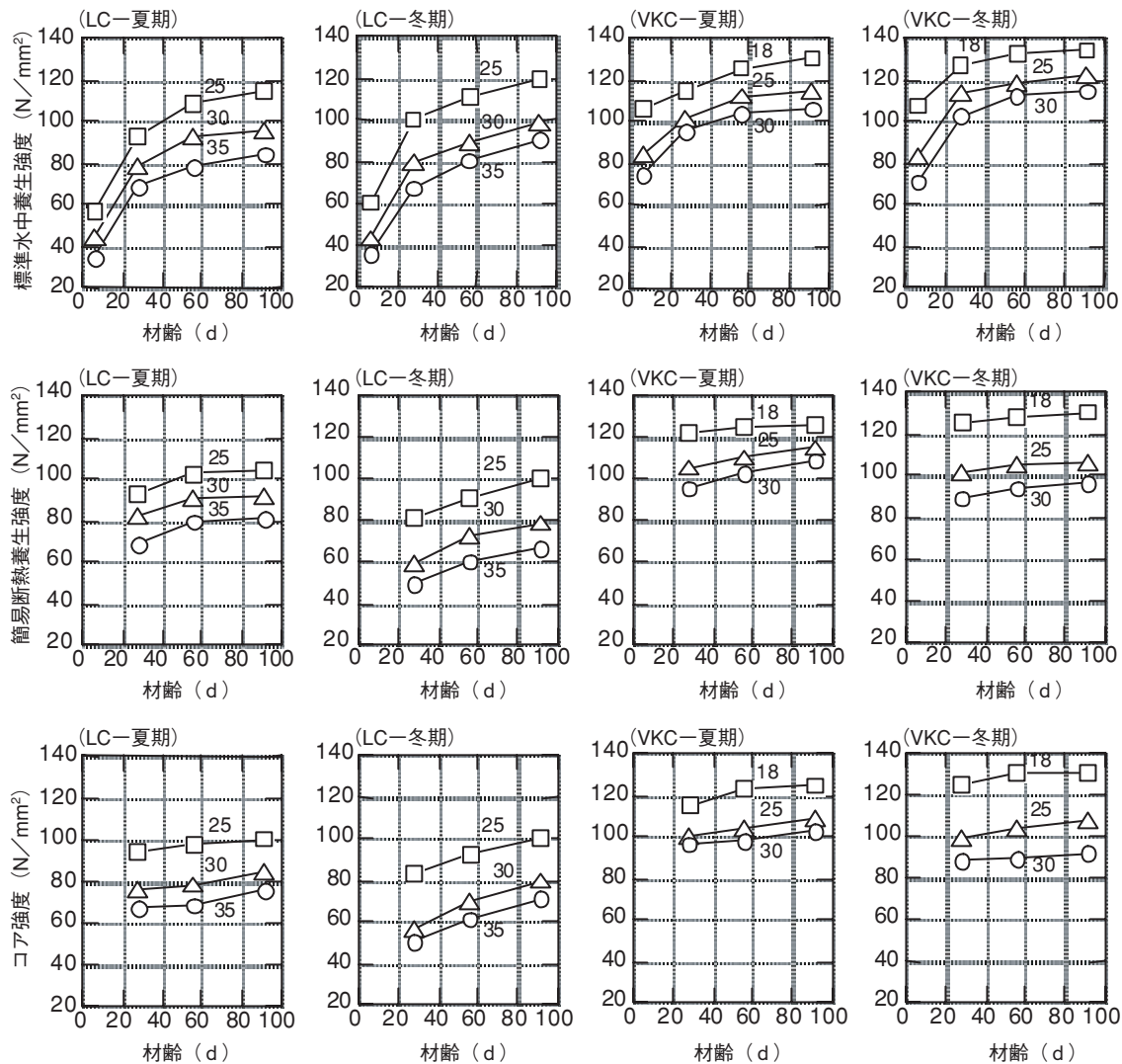


図-10 各種養生を施した強度性状

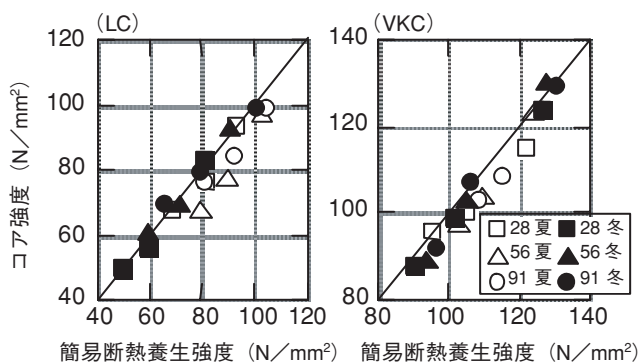


図-11 模擬試験体によるコア強度と簡易断熱養生強度の関係

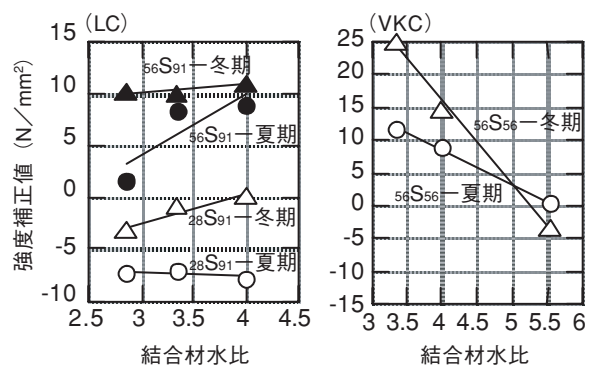


図-12 強度補正值と結合材水比の関係

試験結果からも分かるように、その傾向は、結合材の種類によって異なり、低熱ポルトランドセメントの場合は、結合材水比の増加に伴って概ね増大するのに対し、特殊結合材の場合は、結合材水比の増加に伴って減少する傾向にあり、既往の結果<sup>2)</sup>と同様の傾向を示した。特に、W/B 18%の特殊結合材における強度補正值 ( $_{56}S_{56}$ ) は、

夏期が  $0.5\text{N/mm}^2$ 、冬期が  $-3.4\text{N/mm}^2$  となる。ここで、前述した温度結果を考慮すると、特殊結合材の場合には、水和熱による高温履歴が部材に生じても、強度の増進が認められる結果が得られた。

図-13には、特殊結合材を用いた強度補正值と模擬試験体(中央部)の温度上昇量の関係を示す(標準期も含む)。試験結果からも分かるように、強度補正值と温

度上昇量との間には高い相関性が見られる。これは、強度補正値が内部温度に依存することを示唆するものであり、今後は、データの蓄積を行うことで、その相関性を高め、強度補正値の妥当性の検証および大臣申請用実験の簡略化に繋がるものとする。

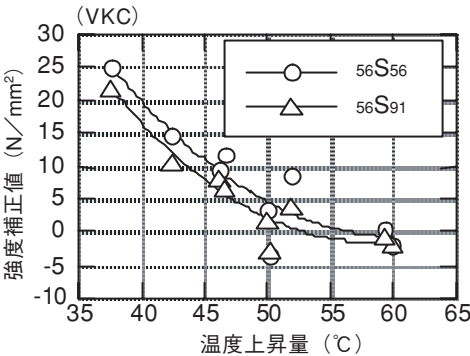


図-13 強度補正値と温度上昇量の関係 (VKC)

§ 3. 施工実験

3-1 建物概要

実大施工実験に際しては、実際の建物を試設計する必要がある。そこで、上部構造については、RC造60階建ての集合住宅を計画している。また、実施工においては、プレキャスト工法（以下、PCa工法と言う）となることが想定されるため、柱・梁部材には、PCa工法の利用を踏まえた実験とした。なお、実大施工実験の概要および調査条件を表-5および表-6に、また、実大柱の断面および施工実験の状況を図-14および写真-1に示す。

表-5 実大施工実験の概要

|       |                                                                       |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|
| 施工場所  | 西松建設(株)愛川衝撃振動研究所敷地内                                                   |
| 施工時期  | 9月から11月(全体工程)                                                         |
| ディテール | 平面: 6.0m×12.0mの1×2スパン<br>階高: 3.15m<br>柱断面: 1.0×1.0m<br>梁断面: 0.6×0.95m |
| Fc    | 柱: 70から100N/mm <sup>2</sup><br>梁: 54N/mm <sup>2</sup>                 |
| 仕様    | PCa(比較として在来工法を一部適用)                                                   |
| 打設方法  | ポッパー打設・サニールース使用                                                       |

表-2 調査条件

| 設定条件 |     |      |     | 調査条件    |         |     | 部位 | 工法    |
|------|-----|------|-----|---------|---------|-----|----|-------|
| Fc   | 種類  | 目標性能 |     | W/B (%) | S/a (%) | W   |    |       |
|      |     | SF   | Air |         |         |     |    |       |
| 100  | VKC | 65   | 2   | 18      | 35.6    | 160 | 柱  | PCa   |
|      |     | 60   | 2   | 20      | 42.0    | 160 |    | PCa/C |
| 80   |     | 60   | 2   | 27      | 45.7    | 160 |    | PCa/C |
| 70   | LC  | 60   | 3   | 27      | 44.7    | 165 |    | PCa   |
| 54   |     | 60   | 3   | 33      | 47.7    | 165 | 梁  | PCa/C |

[注] SF許容値: ±10cm, Airの許容値: ±1.0%  
PCa: プレキャスト工法, C: 在来工法

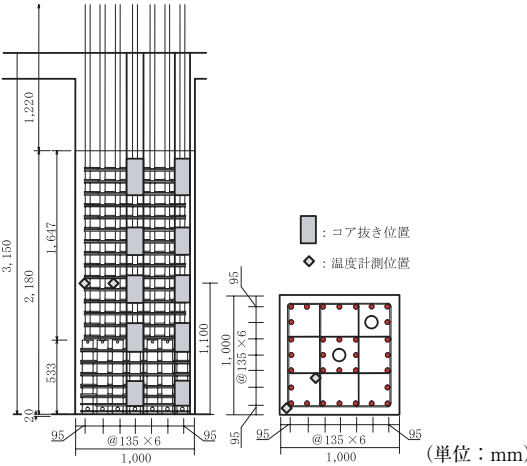


図-14 実大柱の断面



写真-1 施工実験の状況

3-2 フレッシュ性状に関する実験結果

表-7には、経時60分後(打設時)のフレッシュ性状を示す。試験結果からも分かるように、経時60分におけるフレッシュ性状は、目標性能をすべて満足する結果が得られた。ただし、W/B 18%に関しては、粘性があり(50cm到達時間を参照)、施工が非常に困難であった。

表-7 フレッシュ性状

| Fc  | 種類  | W/B (%) | ワーカビリティ |         | Air (%) | C.T (°C) |
|-----|-----|---------|---------|---------|---------|----------|
|     |     |         | SF(cm)  | 50cm(s) |         |          |
| 100 | VKC | 18      | 64.0    | 18.1    | 1.2     | 24.0     |
| 100 |     | 20      | 68.0    | 8.6     | 1.1     | 22.0     |
| 80  |     | 27      | 61.0    | 8.8     | 1.7     | 20.5     |
| 70  | LC  | 27      | 64.0    | 7.6     | 2.9     | 19.0     |
| 54  |     | 33      | 65.0    | 4.5     | 2.5     | 18.0     |

3-3 硬化性状に関する実験結果

(1) 温度性状

表-8には、温度性状の一例として、W/B 20%における特殊結合材の結果〔実大柱、模擬試験体(比較用: 1.0×1.0×1.0mの無筋柱)および簡易断熱養生〕を示す。試験結果からも分かるように、実大柱の中心温度は、模擬試験体の中心温度よりも低い傾向にあった。これは、模擬試験体の場合は、熱を伝達する鉄筋がなく、また、上下端が完全に発泡スチロールにより断熱されているためと考える。また、実大柱の外周部温度は、簡易断熱養生供試体(中央部)とほぼ同様の温度性状が得られた。

表-8 温度性状

| 温度性状<br>(℃) | 実大柱  |      | 模擬試験体 |      | 簡易   |
|-------------|------|------|-------|------|------|
|             | 中心   | 外周   | 中心    | 外周   |      |
| 最高温度        | 71.5 | 58.8 | 82.5  | 78.5 | 60.5 |
| 温度上昇量       | 49.5 | —    | 60.5  | —    | 38.2 |

## (2) 各種養生による圧縮強度および強度分布

図-15 には、特殊結合材 (W/B 20%) を用いた各種養生による圧縮強度を示す。いずれの養生の場合でも、材齢 28 日から 56 日まで強度増進は見られるものの、それ以降の強度増進はほとんど見られなかった。

図-16 には、材齢 164 日に採取した実大柱 (特殊結合材, W/B 20%) における強度分布を示す。鉛直方向については、中心部と外周部の平均値で評価した場合、そのバラツキは小さいと言える (最大差: 6N/mm<sup>2</sup> 程度)。また、水平方向については中心部の方が、外周部より強度が高くなる傾向や、実大柱コア強度の方が、模擬試験体コア強度よりも高いという傾向が見られた。

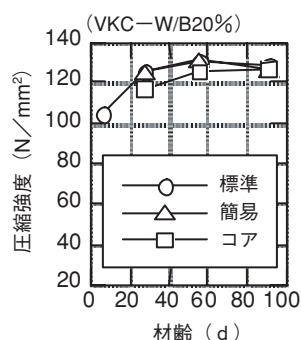


図-15 各種養生

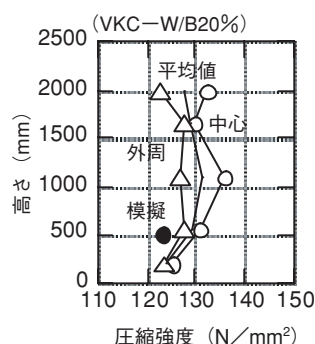


図-16 強度分布 (コア)

## 3-4 施工性に関する所見

打設したすべての調査に関して、流動性が良好であり、ホッパーやサニーホース内での閉塞はなかった。また、コンクリート天端のコテ押さえについては、高強度であるため、非常に粘性があった。さらに、全般的な特徴として、単位水量が少ないため、ブリージングはほとんどなく、特に、特殊結合材による W/B 18% および 20% では、表面の乾燥が早く、適切な処理 (柱: マット敷, スラブ: 散水や表面養生剤) を施さないとひび割れが発生することに留意する必要がある。

## § 4. 大臣申請

## 4-1 建築基準法第 37 条の改正

建築基準法第 37 条 (以下、法 37 条と言う) は、「建築材料の品質」について規定した条項であり、指定建築材料として、コンクリートもその中に含まれている。法 37 条の第一号では、国土交通大臣が指定する日本工業規格に適合するコンクリートは従来通りに使用することができることを、法 37 条の第二号では、第一号の規定

に外れるコンクリートを使用する場合、対象となるコンクリートは国土交通大臣の認定を得る必要があることを規定している。なお、本論で扱う超高強度コンクリートは、法 37 条第二号が適用されるため、国土交通大臣の認定を得る必要がある。

## 4-2 性能評価の概要

超高強度コンクリートの性能評価に関する具体的な内容を表-9 に示す。申請にあたり、当社のこれまでの申請実績および材料・施工実験内容が評価され、最大設計基準強度が 100N/mm<sup>2</sup> という超高強度コンクリートであるにもかかわらず、短時間で大臣認定 (認定番号: MCON-0634) を取得することができた。なお、大臣申請は、本社建築設計部構造課 (高強度コンクリート担当責任者: 平石課長) と技術研究所が行った。

表-9 性能評価の概要

| 項目            | 内容                                                                                                                        |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 性能評価機関        | (財)日本建築総合試験所                                                                                                              |
| 件名            | 西松建設-厚木レミコン式<br>高強度レディーミクストコンクリート                                                                                         |
| 申請者           | 西松建設株式会社・厚木レミコン株式会社                                                                                                       |
| 圧縮強度の基準値 (Fc) | 低熱ポルトランドセメント: 48~70N/mm <sup>2</sup><br>特殊結合材: 80~100N/mm <sup>2</sup>                                                    |
| 申請図書          | [国土交通大臣・性能評価機関]<br>(1)別添資料, (2)別表資料, (3)付表資料<br>[性能評価機関]<br>(1)技術図書, (2)添付資料                                              |
| 申請日程          | 2003. 5. 29: 事前打合せ<br>2003. 6. 17: 第 1 回性能評価委員会<br>2003. 7. 1: 第 2 回性能評価委員会<br>2003. 8. 5: 性能評価書の交付<br>2003. 9. 9: 認定書の発行 |

## § 5. おわりに

本論では、高強度結合材を適用した材料実験および実大施工実験を実施することで、最大設計基準強度 100N/mm<sup>2</sup> の超高層 RC 造建築物の施工技術確立し、これらの成果をもとに、法 37 条第二号による大臣認定を取得した経緯を述べた。

謝辞: 本実験を遂行するにあたり、厚木レミコン株式会社、株式会社デイ・シー、太平洋セメント株式会社、株式会社ボゾリス物産の関係諸氏にご協力頂いた。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 石川裕次: 高層 RC 造建物の構造特性データ分析, コンクリート工学, Vol. 40, No. 3, pp. 8-18, 2002, 3.
- 陣内浩ほか: 設計基準強度 100N/mm<sup>2</sup> の高強度コンクリートを用いた超高層建物の施工, 日本建築学会技術報告集, No. 9, pp. 7-12, 1999, 12.