

Dubai における C100 コンクリートの適用性試験

黒岩 秀介^{*1}・井上 善尊^{*2}・藤岡 健介^{*2}・並木 哲^{*1}

Keywords : *high-strength concrete, concrete strength in structure, durability, fire-resistance*

高強度コンクリート, 構造体コンクリート強度, 耐久性, 耐火性

1. はじめに

建設ブームが続くUAEのDubaiでは多数の鉄筋コンクリート造による超高層建物が建設されている。現在, Dubaiで使用されるコンクリートの強度はC60~80(設計基準強度 60~80N/mm²) クラスを主流としているが, さらなる高強度化は, さらに高い建物を可能とするだけではなく, 柱の断面積の縮小による有効面積の拡大や建物重量の低減など, 多くの利点をもたらすものと考えられる。

一方で, C100 クラスのコンクリートになると, 火災時に爆裂が生じやすくなること, コンクリートの自己収縮ひずみが無視できなくなるほど大きくなること, 圧縮強度の増加に対してヤング係数の上昇が小さいために軸方向の変形が大きくなるため, ヤング係数やクリープ係数などの正確な把握が重要になってくることなど, 対処すべき課題も多い。そこで, Dubai で調達できる材料で C100 クラスのコンクリートを製造し, フレッシュコンクリートの性状, 凝結時間, 立方体供試体による圧縮強度, ヤング係数, 自己収縮ひずみ, クリープ係数, 火災時の爆裂抵抗性などの基本物性を確認した。また, 中東では, 塩分や硫酸塩による劣化事例が多く, これらへの対応が求められる。シリカフェームを用いた高強度コンクリートの耐久性が優れていることは良く知られているが, Dubai で要求されることが多い急速塩化物イオン透過性試験, 吸水試験, 透水試験による耐久性評価も行った。

実際の柱部材では, 単位セメント量の増大に伴う高いセメント水と熱により, 柱内部温度が高温になり, 熱応力によるひび割れや長期材齢時の健全な強度発現

への悪影響なども懸念される。我国では, 設計基準強度 100N/mm²クラスのコンクリートの調合を定める際には, 必ず模擬柱部材を作製し, コア供試体による圧縮強度の確認を求められる。そこで, Dubaiにおいても, 実大断面の鉄筋コンクリート模擬柱部材への打込み実験を行い, 施工性, 充てん性, 水と熱による内部温度履歴, コア供試体による圧縮強度およびヤング係数の確認などを行った。なお, 打込み実験はDubaiとしては比較的気温の低い時期に行ったため, 高温環境での性状は確認できておらず, 今後の検討課題とした。

2. 実験概要

2.1 実験の構成

本実験は, C100 クラスのコンクリートのフレッシュ時および硬化後の基本物性を確認する実験#1と, 実大断面の鉄筋コンクリート模擬柱部材による打込み性状および構造体コンクリートの強度発現を確認する実験#2の2シリーズで構成した。

組織が緻密である高強度コンクリートは, 火災時において熱応力や水蒸気圧などが高まりやすく, 爆裂を生じやすいことが知られている。対策としては, 細径のポリプロピレン製などの有機繊維の混合が有効である。ただし, 爆裂抑制に必要な繊維の混入量は水結合材比や使用材料によって異なり, 一方で必要以上の繊維の混入はフレッシュコンクリートの性状を悪化させ, 圧縮強度への悪影響の懸念も生じてくる。そこで, 基本物性を確認する実験#1ではポリプロピレン繊維の混入量を実験パラメータとし, 火災時の爆裂抵抗性に加え, フレッシュコンクリートの性状, 圧縮強度などの力学性状や耐久性への影響などについて調査を行った。

実大模擬柱部材による実験#2は, 実験#1の結果

*1 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室

*2 国際支店アルマスタワー建築工事作業所

から選定したポリプロピレン繊維混入量の C100 コンクリート 1 調合を用いて行った。前述のように、単位セメント量の大きい高強度コンクリートで製造した柱は、セメント水和熱が大きいために、高温履歴を経験する。この高温履歴は、使用材料によっては、管理用供試体の強度に対する構造体コンクリートの強度の比を、大きく低下させることがある。そこで、実大断面の模擬柱部材からコアボーリングにより供試体を採取し、コア供試体による構造体コンクリートの強度発現の確認等を行った。

2.2 C100 コンクリートの使用材料、調合、練混ぜ

コンクリートの使用材料を Table 1 に示す。使用材料は、いずれも現地で通常使用できるものとした。セメント系材料は、フレッシュコンクリートの粘性低減およびポンプ圧送性の改善を目的に、普通ポルトランドセメントにフライアッシュおよびシリカフェームを混合するものとした。骨材は、最大寸法 10mm の石灰石砕石、洗浄された石灰石砕砂および天然砂の組合せとした。石灰石骨材を採用した理由は、他の骨材を用いたコンクリートと比較して、線膨張係数および乾燥収縮率が小さく、ヤング係数が大きいなど、寸法安定性に優れるコンクリートを期待したためである。また、石灰石骨材の密度が高強度コンクリート用骨材としてのもう一方の選択肢である Gabbro 骨材と比較して小さいことと、骨材の最大寸法を 10mm に設定することによって、ポンプ圧送性やコンクリートの材料分離抵抗性にも配慮したものとした。化学混和剤は、水結合材比の低いコンクリートの製造に不可欠なポリカルボン酸系高性能減水剤を使用した。火災時の爆裂対策として用いるポリプロピレン繊維は、長さ 12mm、直径 18 μm の細径のものとした。

コンクリートの調合を Table 2 に示す。コンクリートの種類は、いずれも水結合材比を 0.209 とし、基本物性を確認する実験 # 1 では、ポリプロピレン繊維を混入しないもの（以下、PP0%）、コンクリート容積の 0.1% にあたる 0.91kg/m³ 混入するもの（PP0.1%）、0.15% にあたる 1.37kg/m³ 混入するもの（PP0.15%）の 3 種類とし、打込み性状およびコアによる強度発現を確認する実験 # 2 では 0.91kg/m³ 混入する（PP0.1%）1 種類とした。目標スランプフローは、繊維を混入しないものを 750mm、混入するものを 650mm と大きめに設定したため、細骨材率は 50% を超えるものとした。

コンクリートの練混ぜは、いずれもレディーミクストコンクリート工場の容量 3 m³ のパン型実機ミキサを用いて行った。1 バッチあたりの練混ぜ量を 1.5 m³ とし

て 2 バッチ練混ぜ、1 調合あたりの製造量を 3 m³ とした。同工場の製造設備は、シリカフェーム、フライアッシュなどの複数の材料を同時に扱えるなど、高強度コンクリートに十分対応できるものである。ポリプロピレン繊維の混入は、コンクリートをミキサからアジテータ車に排出後、アジテータ車にて投入し、高速攪拌することで行った。

3. 基本物性の確認実験

3.1 実験計画

実験項目の一覧を Table 3 に示す。

1) フレッシュコンクリートの試験項目は、コンクリート温度、スランプフローおよび 500mm フロー到達時間、空気量、単位容積質量、凝結時間とし、このうち前三者については練上がりから 120 分後までの経時変化を 30 分毎に計測した。

2) 圧縮強度試験は、150mm の立方体の供試体を用い、材齢 1, 3, 7, 28, 56, 90 日に BS 1881 Part 116 の方法で実施した。

Table 1 Materials

| Material | Details | |
|--------------------|---------------------------------|---|
| Cement | Ordinary portland cement | d= 3.15 g/cm ³ , S= 320 m ² /kg |
| Mineral admixture | Fly ash | d= 2.17 g/cm ³ , S= 320 m ² /kg |
| | Silica fume | d= 2.20 g/cm ³ , S= 21 m ² /g |
| Fine Aggregate | Washed crashed sand (limestone) | d= 2.7 g/cm ³ , A= 1.0 % |
| | Natural dune sand | d= 2.65 g/cm ³ , A= 0.9 % |
| Coarse Aggregate | Crushed stone (limestone) | d= 2.7 g/cm ³ , A= 0.6 %, Maximum size :10 mm |
| Chemical admixture | Superplasticizer | Polycarboxylic ether polymers |
| Fiber | Polypropylene fiber (PPF) | Length: 12 mm, Thickness: 18 microns |

d : Specific gravity, S : Blaine fineness, A : Absorption

Table 2 Mixture proportions

| | PP0% | PP0.1% | PP0.15% |
|---|-------|--------|---------|
| air content, % | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Water, kg/m ³ | 133 | 133 | 133 |
| OPC, kg/m ³ | 500 | 500 | 500 |
| Fly ash, kg/m ³ | 90 | 90 | 90 |
| Silica fume, kg/m ³ | 45 | 45 | 45 |
| Fine Agg.(Washed crashed sand), kg/m ³ | 600 | 650 | 650 |
| Fine Agg.(Natural dune sand), kg/m ³ | 310 | 260 | 260 |
| Coarse Agg.(Crushed stone), kg/m ³ | 790 | 800 | 800 |
| Polypropylene fiber, kg/m ³ | 0 | 0.91 | 1.37 |
| Superplasticizer, mL | 11000 | 14000 | 15250 |
| Series of Experiments | # 1 | # 1 | # 2 |

3) ヤング係数は、 $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ の円柱供試体を用い、材齢 56 日に ASTM C 469 の方法で行った。

4) 自己収縮ひずみは、打込み直後から測定可能なひずみ計 (KM100BT) を $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の角柱中央部に埋設し、PP0.1%のコンクリートについて測定を行った。測定方法は、日本コンクリート工学協会の自己収縮試験方法を参考に、型枠の底面に厚さ 1mm のテフロンシート、両側面の端部内側に厚さ 3mm のポリスチレンシートを設置し、さらに側面、端面、底面の内側に厚さ 0.1mm テフロンシートを入れ、コンクリートの自己収縮が型枠からの拘束を受けないようにした。打込み後は水分の逸散を防ぐために直ちに仕上げ面を厚さ 0.1mm のテフロンシートで覆った。型枠の脱型は翌日に行い、脱型後直ちに厚さ 0.5mm のアルミ箔粘着テープでシールし、乾燥を防止した。材齢 4 日以降の雰囲気温度は 20°C 一定としたが、それ以前は温度制御が出来なかったため、試験体の内部温度から後述する線膨張係数に基づき温度ひずみを算定し、実測のひずみを補正して自己収縮ひずみとした。

5) 線膨張係数の測定は、材齢 100 日まで自己収縮ひずみ測定を行った試験体 (アルミ蒸着テープによる封かん状態) を使用して行った。雰囲気温度の範囲は $5 \sim 80^\circ\text{C}$ とし、 15°C ずつステップ状に変化させる温度上昇および降下サイクルを 3 回繰り返した。1 ステップは、最初の 30 分間に雰囲気温度を 15°C 変化させ、その後 4.5 時間保持するものとした。なお、線膨張係数は 2 および 3 サイクル目に測定された温度とひずみの関係から算出した。

6) 圧縮クリープは PP0.1%のコンクリートについてのみ測定した。供試体の寸法は $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 、載荷材齢は 28 日とし、載荷までの供試体の養生は封かん養生とした。載荷荷重は、クリープ用供試体と同時に作製および養生を行った $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の供試体における 28 日圧縮強度の $1/3$ とした。この圧縮強度を測定した供試体にはひずみゲージを貼付して応力ひずみ関係を記録した。クリープひずみの測定は、乾燥を伴う気乾供試体と、アルミ箔テープでシールして乾燥を防いだ封かん供試体の 2 種類、各 3 本、について行った。また、気乾供試体のクリープひずみを求めるには、乾燥収縮ひずみを差し引く必要があるため、無載荷の気乾供試体の収縮ひずみを別に 3 本測定した。クリープ試験

の雰囲気温度は 20°C 、湿度は 60% 一定とした。

7) 火災時の爆裂抵抗性の試験体は、中心に M22 の全ネジボルトを貫通させる $\phi 250 \times 500\text{mm}$ の円柱とした。加熱試験時の材齢は 3.5 か月とし、試験体は加熱試験直前まで封かん養生とした。加熱試験は、上面のみセラミックブランケットを貼り付けて断熱した円柱試験体を耐火炉に設置し、全面から加熱する方法を採用した。加熱温度曲線は ISO834、加熱時間は 1 時間とした。

8) 耐久性の試験項目としては、ドバイで要求されることが多い急速塩化物イオン浸透性試験 (ASTM C 1202)、透水試験 (BS EN 12390 part 8)、吸水試験 (BS 1881 part 122) を行った。急速塩化物イオン浸透性試験は、立方体供試体から、直径 95mm、厚さ 51mm の円盤状供試体を切り出し、側面にエポキシを塗り、乾燥等の前処理後、塩化物イオン透過セルに供試体を設置し、電圧発生装置の正極となる側に 0.3N NaOH 水溶液を、負極となる側のセルに 3%NaCl 水溶液を満たして、60 ボルトの電圧で供試体に電流を流し、6 時間後のクーロン量 (電流を時間で積分した値) を求める方法である。

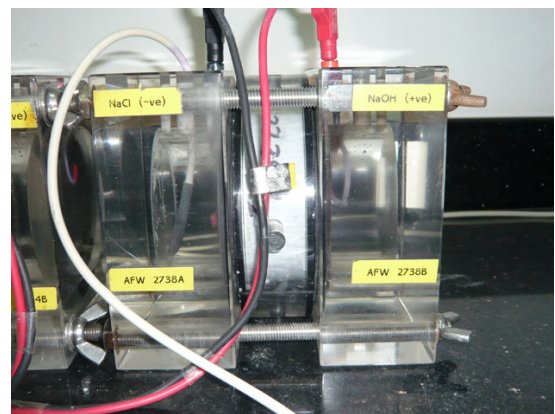


Fig.1 Test for resist chloride ion penetration (ASTM C 1202)

Table 3 Test items

| #1 | PP0% | PP0.1% | PP0.15% |
|--|------|--------|---------|
| 1) Fresh properties and workability retention | | | |
| a. Concrete temperature: ASTM C 1064 | | | |
| b. Workability by slump flow & T50: BS 1881 Part 102 | ○ | ○ | ○ |
| c. Air content; BS 1881 Part 106 | | | |
| d. Fresh concrete density: BS 1881 Part 107 | | | |
| e. Initial and final setting times: ASTM C 403 | | | |
| 2) Cube compressive strength: BS 1881 Part 116 | ○ | ○ | ○ |
| 3) Elastic modulus: ASTM C 469 | ○ | ○ | ○ |
| 4) Autogenous shrinkage | — | ○ | — |
| 5) Thermal expansion coefficient | — | ○ | — |
| 6) Compressive creep | — | ○ | — |
| 7) Resistance to spalling in fire | ○ | ○ | ○ |
| 8) Durability | | | |
| a. Rapid chloride permeability: ASTM C 1202 | ○ | ○ | ○ |
| b. Water absorption: BS 1881 Part 122 | | | |
| c. Water permeability: BS EN 12390 Part 8 | | | |

透水試験は、供試体の一面に一定圧力の水を作用させ、一定時間内に供試体に圧入した水の浸透深さを測定し、コンクリートの水密性を評価するものである。

吸水試験は、直径 75mm、長さ 75mm 程度の供試体を 105℃で 72 時間乾燥し、冷却後、20℃の水に 30 分浸漬して吸水率を測定するものである。耐久性関係の試験はいずれも試験材齢を 28 日とした。

3.2 実験結果

1) フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの実験結果をTable 4 およびFig.2 に示す。実験の結果、①ポリプロピレン繊維の混入量が増えるほど、スランプフローは小さく、500mm フロー到達時間 (T50) は長くなること、②混入量 0.91 kg/m³までの範囲であれば、コンクリート温度 25~30℃の条件においてもスランプフロー600 mm以上を 120 分

Table 4 Results of fresh concrete tests

| Test | Time | PP0% | PP0.1% | PP0.15% |
|---|---------|-------|--------|---------|
| Concrete temperature (deg C) | 5 min | 26.0 | 26.0 | 28.0 |
| | 30 min | 25.5 | 28.5 | 29.0 |
| | 60 min | 27.0 | 28.0 | 29.0 |
| | 90 min | 28.0 | 27.0 | 29.5 |
| | 120 min | 26.5 | 28.0 | 29.5 |
| Slump flow (mm) | 5 min | 795 | 670 | 580 |
| | 30 min | 790 | 635 | 590 |
| | 60 min | 720 | 620 | 575 |
| | 90 min | 705 | 640 | 565 |
| | 120 min | 695 | 620 | 555 |
| Time to 500 mm flow T50 (s) | 5 min | 4.8 | 9.1 | 15.0 |
| | 30 min | 6.2 | 9.7 | 14.4 |
| | 60 min | 7.3 | 12.1 | 16.7 |
| | 90 min | 7.8 | 13.0 | 17.7 |
| | 120 min | 9.1 | 15.9 | 21.8 |
| Air content (%) | 5 min | 1.2 | 1.5 | 1.6 |
| | 60 min | 1.3 | 1.8 | 1.8 |
| | 120 min | 1.9 | 2.0 | 1.8 |
| Fresh concrete density (kg/m ³) | 5 min | 2490 | 2490 | 2460 |
| Initial and final setting times (h:m) | Initial | 9:10 | 13:40 | 19:20 |
| | Final | 10:45 | 15:25 | 21:45 |

Table 5 Compression test results

| Test | Age (days) | PP0% | PP0.1% | PP0.15% |
|---|------------|------|--------|---------|
| Compressive strength (N/mm ²) | 1 | 45.7 | 38.7 | 23.5 |
| | 3 | 77.5 | 74.2 | 66.5 |
| | 7 | 100 | 103 | 89.5 |
| | 28 | 116 | 123 | 107 |
| | 56 | 125 | 123 | 119 |
| | 90 | 123 | 129 | 122 |

Table 6 Elastic modulus

| Test | Age (days) | PP0% | PP0.1% | PP0.15% |
|--------------------------------------|------------|-------|--------|---------|
| Elastic modulus (N/mm ²) | 56 | 52100 | 53300 | 52400 |

まで確保できること、③混入量 1.37 kg/m³では 600 mm 以上のスランプフローを得ることが困難なこと、などが分かった。また、繊維混入コンクリート特有のスランプフローの端部からモルタルが先走るような分離傾向は見られず、いずれも良好な性状を示した。凝結時間に関しては、ポリプロピレン繊維を増やすとスランプフローを確保するための高性能減水剤の添加量も増えるため、遅延する傾向を示した。高性能減水剤の種類の変更により凝結時間は改善できると思われるが、ジャンピングフォームやスリップフォームを採用する場合には配慮が必要になると思われた。

2) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果をTable 5 およびFig.3 に示す。材齢 1 週までの強度発現に凝結遅延の影響が顕著にみられ、繊維量の多いもののほど強度が低い傾向を示した。繊維量の最も多いPP0.15%の強度は材齢 56 日、91 日においてもやや低いが、材齢 56 日の時点でいずれの調査も 120 N/mm²にほぼ達していることから、C100 としての強度を確保できることが確認できた。

3) ヤング係数

材齢 56 日におけるφ150×300 mm円柱供試体で測定したヤング係数をTable 6 に示す。日本建築学会JASS 5

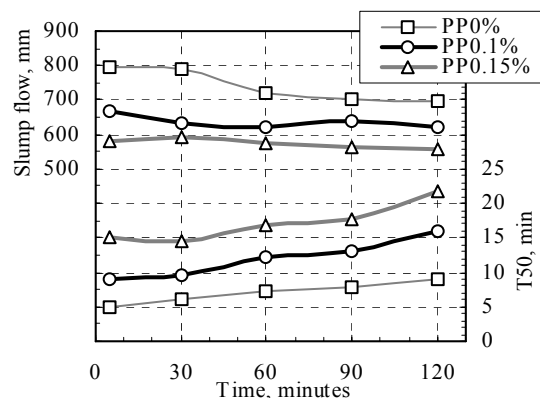


Fig. 2 Slump flow, time to 50 cm flow T50 and change over time

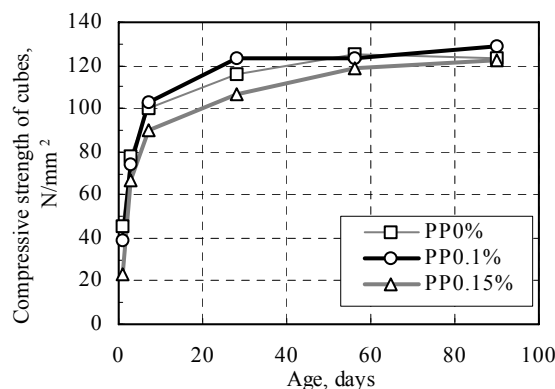


Fig. 3 Compressive strength development

によれば、強度 120 N/mm^2 、密度 2.5 g/cm^3 、石灰石骨材使用の場合、ヤング係数の予測値は $1.2 \times 33.5 \times (2.5/2.4)^2 \times (120/60)^{1/3} = 55.0 \text{ kN/mm}^2$ となる。ここで、係数 1.2 は石灰石骨材による割増し係数である。石灰石骨材を用いているためにやや高めのヤング係数であるが、JASS 5 の式で概ね評価できることが分かった。

4) 自己収縮

PP0.1%のコンクリートの自己収縮をFig.4 に示す。材齢 91 日における自己収縮ひずみは 500μ 程度に達している。宮澤らの研究¹⁾によれば、設計基準強度 100 N/mm^2 クラスの普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみは材齢 91 日に 600μ 程度に達することがあること、シリカフュームの混和は自己収縮ひずみを同等か大きくする傾向にあることから、今回の結果は比較的小さい傾向にあり、ヤング係数の高い石灰石骨材を使用した効果がみられたと考えられる。筆者らの経験によれば、 500μ 程度の自己収縮ひずみでは、通常の鉄筋コンクリート柱にひび割れを生じさせることはほとんどない。そこで、この調合にて#2の実験を行うこととした。なお、温度変化に伴うひずみは、後述する熱膨張係数を用いて補正した。

5) 熱膨張係数

PP0.1%のコンクリート供試体で測定した温度とひず

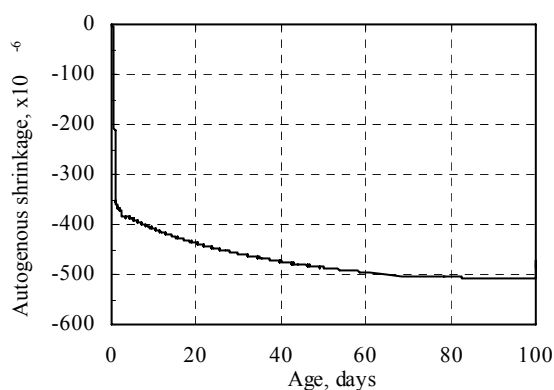


Fig. 4 Autogenous shrinkage (PP0.1%)

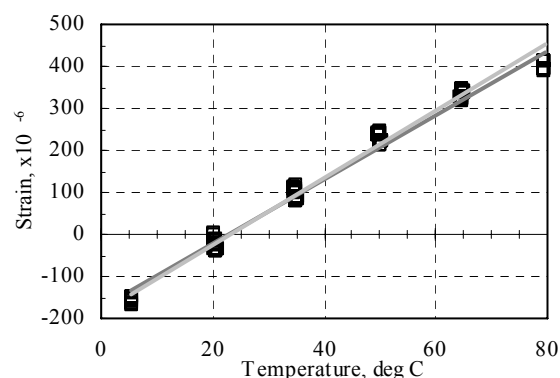


Fig. 5 Temperature-strain relationship (PP0.1%)

みの関係をFig.5 に示す。コンクリートの熱膨張係数は一般に $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 程度とされるが、線膨張係数の小さい石灰石骨材を使用しているため、コンクリートとしての熱膨張係数も $7.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ とやや小さいものとなった。これは、硬化過程の水和熱に起因する熱応力を低減できる点、供用開始後の気温変化に伴う変形を低減できる点などから好ましいといえる。

6) 圧縮クリープ

クリープ試験開始材齢にあたる材齢 28 日に $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の供試体で測定した圧縮試験における応力ひずみ関係をFig.6 に示す。圧縮強度は 128 N/mm^2 、ヤング係数は 52500 N/mm^2 、ポアソン比は 0.24、密度 2520kg/m^3 であった。これらの結果は、前述の 150mm 立方体による材齢 28 日圧縮強度 123 N/mm^2 (密度 2510

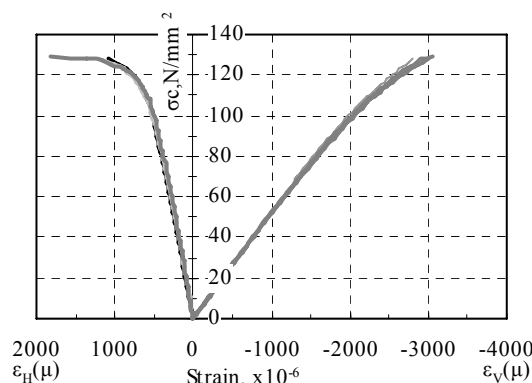


Fig. 6 Stress-strain relationship (PP0.1%)

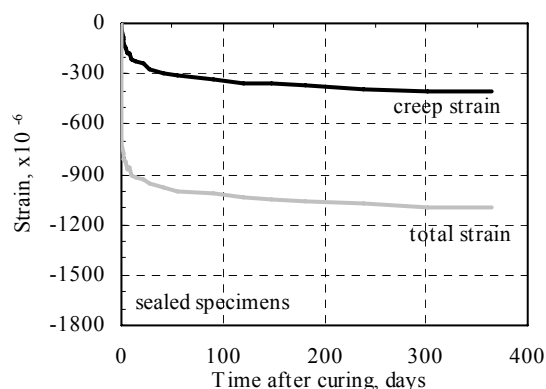
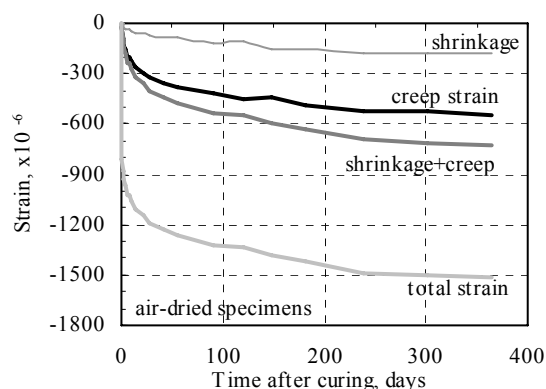


Fig. 7 Compressive creep (PP0.1%)

kg/m³),あるいはφ150×300 mmの円柱供試体による材齢56日のヤング係数53300 N/mm²とほぼ同等であり、この強度クラスでは、強度試験結果に及ぼす供試体形状の影響は小さい結果となった。

PP0.1%のコンクリートの圧縮クリープの測定結果をFig.7に示す。載荷時の材齢は28日、載荷荷重は圧縮強度の1/3相当とした。クリープひずみは、全ひずみから載荷時の弾性ひずみと無載荷供試体で測定した乾燥収縮ひずみを差し引いたものとした(クリープひずみ=全ひずみ-載荷時弾性ひずみ-乾燥収縮ひずみ)。載荷と乾燥を同時に始めた気乾供試体のクリープひずみは、載荷後材齢240日で500μに達している。一方、表面にアルミテープを貼付し、乾燥を受けない状態とした封かん供試体によるクリープひずみは400μ程度となっている。両者の差は、乾燥による影響が単なる乾燥収縮ひずみ以上であることを示しており、超高層建物の柱は大断面で乾燥しにくいことからこれらの影響も考慮すべきものと考えられた。

7) 火災時の爆裂抵抗性

ISO834加熱温度曲線による1時間加熱試験の結果をFig.8に示す。ポリプロピレン繊維を混入していないPP0%は、加熱後7分から散発的な爆裂を生じ、20分程度で一旦収まったが、55分に生じた大きな爆裂のため

に最終的には原形をとどめなかった。一方、繊維を混入したPP0.1%およびPP0.15%は爆裂を生じなかった。加熱前後の質量残存率は前者が94.3%、後者が94.0%とほぼ同様なものであった。我国では、加熱試験や載荷加熱試験の結果から設計基準強度100N/mm²の爆裂対策を概ね繊維混入量1.0kg/m³程度で行う例が多く、今回の試験結果はそれらと同等なものと判断できる。

8) 耐久性試験

耐久性試験結果をTable 7に示す。塩化物イオン透過性は、ASTM C 1202によれば、100~1000をvery low, 1000~2000をlow, 2000~4000をmoderate, 4000~をhighと分類しており、本試験結果は極めて低い塩化物イオン透過性を有していることがわかる。BSEN 12390 part 8による透水抵抗性およびBS 1881 part 122による吸水性に関しても、いずれも繊維の混入の増加に伴いやや悪くなる傾向は認められるが、十分に高い耐久性を示すことが確認できた。

4. 実大模擬柱部材による実験

4.1 実験計画

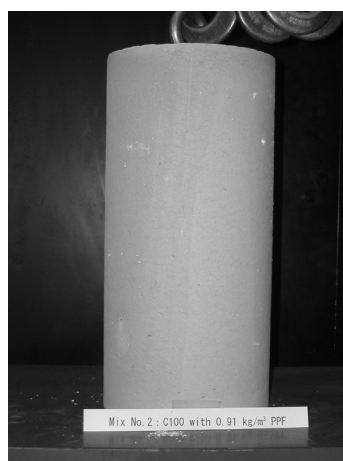
PP0.1%のコンクリートについて、実大鉄筋コンクリート模擬柱部材の打込み実験を行った。コンクリートはレディーミクストコンクリート工場で製造し、約30分かけて試験ヤードまで運搬し、模擬柱部材への打込みを行った。模擬柱部材の概要を図.9に示す。模擬柱部材は断面1000mm×1000mm、高さ2000mmとし、直径40mmの柱主筋を16本、直径12mmの帯筋を100mmピッチに配し、かぶり厚さは60mmとした。型枠は厚さ50mmの発泡ポリスチレンと厚さ18mmのブライウッドで構成し、コンクリート内部と表層部の温

Table 7 Durability test results

| Test | | Age (days) | PP0% | PP0.1% | PP0.15% |
|-----------------------------|--------------------------------|------------|----------|----------|----------|
| Rapid chloride permeability | Total charge passed (Coulombs) | 28 | 146 | 163 | 161 |
| | Chloride penetrability | | Very Low | Very Low | Very Low |
| Water permeability (mm) | | 28 | 6 | 7 | 9 |
| Water absorption (%) | | 28 | 0.4 | 0.5 | 0.5 |



PP0%



PP0.1%



PP0.15%

Fig. 8 Results of 1-hour heating testing following heating curve specified in ISO 834

度差が小さくなるように配慮した。打込みは、ブリーディングがほとんどないコンクリートの打重ね部にひび割れが生じやすい傾向があるため、模擬柱部材の中段位置で打設を一旦中断し、30 分後に残りの柱上部の打込みを再開する方法とし、脱型後に打重ね部のひび割れの有無を確認することとした。フレッシュコンクリートは十分な流動性を有しているが、打重ね部の処理や繊維混入コンクリートの巻き込み空気の脱泡などを目的に、バイブレータによる締め固めを行った。試験項目の一覧を Table 8 に示す。

1) フレッシュコンクリートの試験項目は、コンクリート温度、スランプフローおよび 500mm フロー到達時間、空気量とし、レディーミクストコンクリート工場で製造直後、試験ヤードで到着時、および柱上部への打込み再開時に測定を行った。

2) 模擬柱部材の内部温度は、fig.9 に示すように柱断面の中心部、隅角部から 50mm 内部の位置、およびその中間点の 3 点について、高さ方向 3 箇所で測定した。測定には T 型熱電対を用いた。

3) 硬化コンクリートの試験としては、150mm の立方体の供試体を用い、材齢 7, 28, 56, 91 日に BS 1881 Part 116 の圧縮強度試験を行うとともに、柱模擬部材からコアボーリングにより供試体を採取し、材齢 28, 56, 91 日に圧縮強度並びにヤング係数を測定した。コアの採取位置は、fig.9 に示すように、各材齢について断面の内側 A および外側 B の 2 箇所とし、それぞれ高さ方向の位置が異なる 5 本を 1 回の試験で使用した。内側 A から採取した 5 本の供試体は ASTM C39 による圧縮強度の測定に用いた。外側 B から採取した 5 本の供試体は ASTM C469 によるヤング係数の測定に使用した。なお、ヤング係数測定の際に用いる強度の 40% 相当の応力は、同じ材齢および同じ高さの内側 A の圧縮強度試験結果を参考に定めた。また、ヤング係数を測定した外側 B の供試体についても、ヤング係数測定後に圧縮試験を行い、圧縮強度の確認を行った。

なお、打込み実験を比較的気温の低い時期に行ったため、高温環境下に関する性状は確認できていない。また、Dubai の超高層建築に適用する場合は、コンクリートポンプによる高所圧送が通常行われるが、今回の実験では圧送性の確認を行っていない。これらの項目に関しては、今後の検討課題にしたい。

4.2 実験結果

1) フレッシュコンクリートの性状

コンクリート製造直後のスランプフローは 650mm、500mm フロー到達時間は 10.0 秒、空気量は 1.9%、コ

ンクリート温度は 26.8℃であった。試験ヤード運搬後に行った荷卸し時のスランプフローは 645mm、500mm フロー到達時間は 10.0 秒、空気量は 2.1%であり、運搬中の 50 分間のフレッシュ性状の経時変化はほとんどない。また、コンクリートの充てんに関する問題はなく、十分な施工性を有することを確認した。

2) 内部温度履歴

模擬柱部材の内部温度履歴図を fig.10 に示す。高性

Table 8 Test items of experiment using mock-up column

| | |
|---|---|
| 1) Fresh properties and workability retention | a. Concrete temperature: ASTM C 1064 b. Workability by slump flow & T50: BS 1881 Part 102 c. Air content: BS 1881 Part 106 d. Fresh concrete density: BS 1881 Part 107 |
| 2) Internal temperature | |
| 3) Hardened concrete properties | a. Compressive strength of cubes: BS 1881 part 116 b. Compressive strength of core: ASTM C 39 c. Modulus of elasticity of concrete in compression: ASTM C 469 |

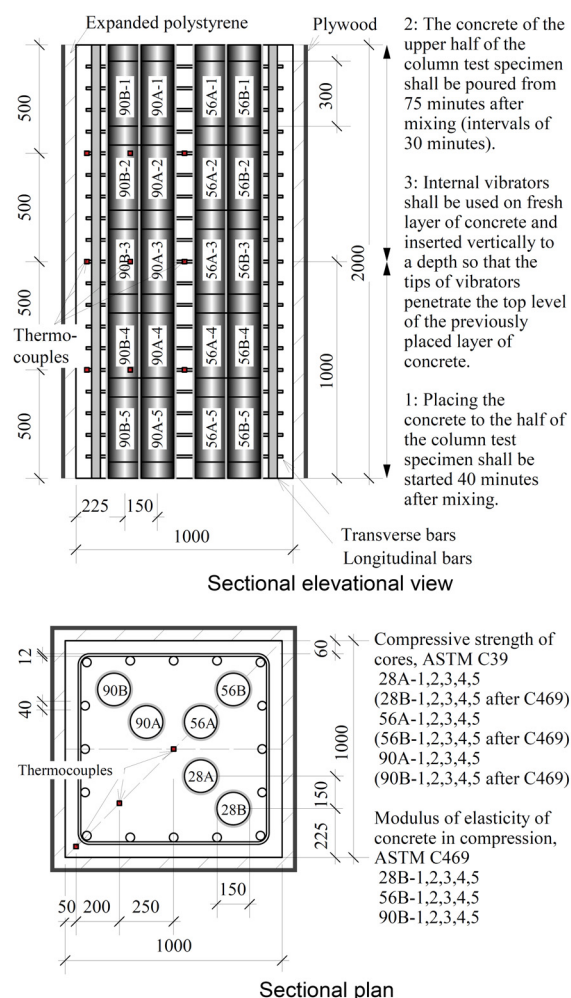


Fig. 9 Outline of mock-up with cross section of 1,000 by 1,000 mm and height of 2,000 mm

能減水剤の添加量が多量なために凝結が遅延したため、コンクリート温度の上昇が加速するのは24時間以降となった。中心部の温度は打込み2日後に最高70℃まで達したが、側面を50mmのポリスチレンフォームで断熱しているため、中心部とコーナーから50mmの位置の温度差は6℃程度に収まった。一方で、ポリスチレンフォームにより温度降下も緩やかになり、1週間においても中心部の温度と気温との温度差が25℃もあった。超高層建築ではジャンピングフォームなどの使用により早期にせき板が取り外されるが、温度ひび割れには十分な配慮が必要であることを予想させた。

3) 硬化コンクリート

硬化コンクリートの試験結果をTable 9に示す。立方体による強度は材齢28日に112N/mm²、材齢56日に115N/mm²、材齢90日に120N/mm²に至り、概ねC100クラスのコンクリートが製造できることが確認できた。

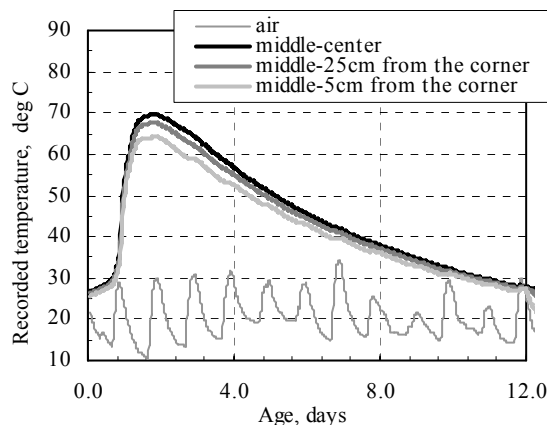


Fig. 10 Internal temperature histories of mock-up column

Table 9 Hardened concrete test results

| Age (days) | Compressive strength of cubes (N/mm ²) | Extracted cores | | | |
|------------|--|-----------------|---|--|---|
| | | No. | Compressive strength of core A (N/mm ²) | Elastic modulus of core B (N/mm ²) | Compressive strength after elastic modulus of core B (N/mm ²) |
| 7 | 81.5 | — | — | — | — |
| 28 | 112 | 1 | 91.4 | 45700 | 91.4 |
| | | 2 | 93.9 | 48600 | 98.9 |
| | | 3 | 98.4 | 48000 | 99.4 |
| | | 4 | 94.6 | 49700 | 94.2 |
| | | 5 | 95.8 | 48100 | 95.7 |
| 56 | 115 | 1 | 95.6 | 46400 | 93.4 |
| | | 2 | 102 | 47400 | 101 |
| | | 3 | 104 | 48900 | 103 |
| | | 4 | 105 | 47300 | 99.7 |
| | | 5 | 107 | 47900 | 101 |
| 90 | 120 | 1 | 102 | 47100 | 100 |
| | | 2 | 110 | 47300 | 107 |
| | | 3 | 112 | 48700 | 109 |
| | | 4 | 110 | 48300 | 111 |
| | | 5 | 112 | 47700 | 110 |

一方で、模擬柱部材の中心付近Aから採取したφ150×200mmのコアによる強度は材齢28日において91.4～98.4N/mm²、材齢56日において95.6～107N/mm²、材齢90日において102～112N/mm²となり、立方体の強度と比べてやや低い。ヤング係数測定後に強度試験を行った外側Bは、材齢28日において91.4～99.4N/mm²、材齢56日において93.4～103N/mm²、材齢90日において100～111N/mm²となり、内側Aと外側Bの強度差はほとんどなく、ポリスチレンフォームによって内外温度差を小さくした効果が認められた。しかし、模擬柱部材の高さ方向には強度差が認められ、とくに最上部のコアの強度は他と比べて4%程度低いものとなった。

なお、コア供試体によるヤング係数は材齢90日において47100～48700N/mm²の範囲となった。

5. まとめ

Dubaiの現地材料で製造したC100コンクリートについて、フレッシュ性状や硬化後の基本物性、実大鉄筋コンクリート柱試験体への打込み性状や構造体コンクリートの強度発現性などを調査し、その適用性を検討した。実験から得られた知見を以下にまとめる。

1) Dubaiで入手可能な材料で製造した高強度コンクリートは、ポリプロピレン繊維を立米あたり0.91kg混入しても、練り上がり120分後まで600mm以上のスランプフローを確保できること、BS1881 part116によるコンクリートの圧縮強度は、材齢56日において120N/mm²に達していること、ポリプロピレン繊維を混入していないものはISO834による加熱で爆裂を生じるものの、繊維を0.91kg/m³混入することにより爆裂を低減できることなど、C100としての要求性能を満足できることを確認した。

2) ただし、凝結時間は、繊維混入後のスランプフロー確保のために高性能減水剤の添加量が増加して遅延し、10時間以上になった。高性能減水剤の種類の変更により改善できると思われるが、ジャンピングフォームやスリップフォームを採用する場合には配慮が必要になると思われる。

3) 石灰石骨材を使用した高強度コンクリートは、ASTM C 469によるヤング係数は材齢56日において50N/mm²を超えること、硬化時に生じる自己収縮は低水結合材比にもかかわらず材齢91日において500～600μ程度であること、熱膨張係数は平均7.8×10⁻⁶/℃程度であることなど、高い寸法安定性を示した。

4) 気乾供試体のクリープひずみは載荷後240日で

500 μ に達した。一方、封かん状態の供試体のクリープひずみは 400 μ 程度となった。両者の差は、乾燥による影響が単なる乾燥収縮ひずみ以上であることを示しており、乾燥しにくい超高層建物の大断面柱にもこの傾向がみられるものと考えられた。

5) ASTM C 1202 による急速塩化物イオン透過性試験, BSEN 12390 part 8 による透水抵抗性試験, BS 1881 part 122 による吸水性試験によれば、耐久性能は、繊維の混入量の増加に伴いやや低下傾向を示すが、いずれも十分に高いものであることが確認できた。

6) 断面寸法 1000mm \times 1000mm の模擬柱部材の内部の温度は、高性能減水剤の添加量が多く凝結が遅延したためか、打込みの 24 時間経過以降から上昇した。中心部の温度は打込み 2 日後に最高 70℃まで達したが、側面を厚さ 50mm のポリスチレンフォームで断熱したため、コーナーから 50mm の位置と中心部との温度差は 6℃程度に収まった。

7) C100 コンクリートを打ち込んだ模擬柱部材の中心

付近から採取した $\phi 150 \times 200$ mm のコアによる強度は、材齢 91 日において 100 \sim 112N/mm²となり、立方体の強度 120N/mm²と比べてやや低いものの、概ね C100 クラスのコンクリートが製造できることが確認できた。内側のコアと外側のコアとの強度差は、断熱材により内外温度差を小さくしたため、ほとんどなかったが、高さ方向の強度差は最上部のコアの強度が 4%程度ほかより低いものとなった。

参考文献

- 1) Miyazawa, S and Tazawa, E, "Prediction Model for Autogenous Shrinkage of Concrete with Different Types of Cement", Proceedings of the Fourth International Seminar on Self-Desiccation and Its Importance on Concrete Technology, pp.125-139, 2005