

論文 超高強度グラウトの力学的性状に及ぼす養生温度の影響

澗田 安浩^{*1}・一瀬 賢一^{*2}・森岡 徹^{*3}

要旨: プレキャストコンクリート部材の接合部の一体注入に適用する超高強度のグラウトを開発した。このグラウトは、標準養生で 150N/mm² 以上の圧縮強度を確保できるものの、低温環境下では、強度発現が遅くなるという課題があった。本報では、このグラウトを用いて、養生方法および養生温度が力学的性状に及ぼす影響について検討し、低温環境下の施工においても圧縮強度 150N/mm² 以上が発現する方法を示した。

キーワード: 超高強度グラウト, 150N/mm², 低温環境, 養生

1. はじめに

近年、都心部の再開工事では、40層を超える超高層集合住宅が建設されることがある。この際に適用されるコンクリートは、居住性などの面から剛性を高めるため、鉄筋コンクリート造の採用が多い。また、設計基準強度 150N/mm² 級の超高強度コンクリートも使用されることがある。さらに、超高層建物であるにも関わらず、短工期を求められることが多く、施工性の面からプレキャストコンクリート部材 (PCa 部材) が適用され、タクト工程に基づいて躯体工事が行われる場合が多い。そのため、どの季節においても適用できる超高強度グラウトが求められる。

本報では、超高強度のグラウトを PCa 部材の目地・主筋貫通口および鉄筋継手部へ一体注入する際、低温環境下での課題を取り上げ、それらを解決することを目的とした。低温環境下では、材齢初期の膨張量が小さく、強度発現性状が遅くなるという課題があった。ここでは、室内試験で膨張率・練混ぜ性能およびフレッシュ性状を確認し、養生温度による圧縮強度への影響を考察した実験結果に基づいて、模擬試験体による養生方法の検討を行った。

2. 室内試験における検討

2.1 使用材料と組合せ

室内で、5・20・25℃の環境を設定し、膨張率、練混ぜ性能、フレッシュ性状および強度発現性状を確認した。

試験練りは、水結合材比 (W/B) 15.5~19.1%の範囲とした。グラウトの使用材料の組合せを表-1に示す。水およびアルミ粉末以外の材料はプレミックス材料とした。プレミックス材料の構成は、セメントに中庸熟ポルトランドセメント (C)・膨張材 (EX) および細骨材に Al₂O₃

系特殊骨材 (S) の使用をベースとしている。膨張材は、単位量 30kg/m³ として混和した。その他、ジルコニア起源シリカ質微粉末 (ZFF) および粉末タイプの高性能減水剤 (Ad) を混和した。ジルコニア起源シリカ質微粉末 (ZFF) は、電融ジルコニア製造における副産物であり、SiO₂ を主成分とし、その他はジルコニアを 3~5% 含み、MgO や SO₃ をほとんど含まない特徴を持つ。また、比表面積は 10m²/g 以下とシリカフェームより小さく、平均粒径は 1μm 程度でシリカフェームに比べて大きいことが特徴である¹⁾。

練混ぜは、実際の現場練混ぜ時に使用するハンドミキサーを用いて行った。ペール缶にプレミックス材料および水を投入し、練混ぜた。流動性のある状態まで約 60 秒、その後 60~180 秒練混ぜ、水投入からの合計練混ぜ時間を 120~240 秒程度とした。

グラウトの養生温度の組合せを表-2に、測定項目と目標値を表-3に示す。水量を調整することにより、水結合材比を調整した。養生温度は、室内温度を 5・20・25℃の恒温に制御することにより行った。プレミックス材料は、練混ぜ直前まで 24 時間以上、養生温度で設定した恒

表 - 1 グラウトの使用材料

| 種類 | 記号 | 品質 他 |
|---------|-----|--|
| セメント | C | 中庸熟ポルトランドセメント, 密度 3.21g/cm ³ |
| シリカフェーム | ZFF | ジルコニア起源シリカ質微粉末, 密度 2.30g/cm ³ |
| 膨張材 | EX | 石灰系, 密度 3.19g/cm ³ |
| 細骨材 | S | Al ₂ O ₃ 系特殊骨材, 表乾密度 3.39g/cm ³ , 2.5mm 以下を使用, 粗粒率 3.91 |
| 添加材 | Al | アルミニウム粉末 |
| 混和剤 | Ad | 高性能減水剤(粉末タイプ) |
| | 消泡剤 | 消泡剤(粉末タイプ) |

*1 (株) 大林組 技術本部技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 工修 (正会員)

*2 (株) 大林組 技術本部技術研究所 生産技術研究部 部長 博士 (工学) (正会員)

*3 (株) 大林組 東京本店建築事業部 第二特定工種工事事務所 所長 (正会員)

表 - 2 グラウトの養生温度の組合せ
(プレミックス 25kg 当り)

| W/B (%) | S/B | ZFF/B | W(ℓ) | 目標養生温度 (°C) |
|-----------|------|-------|---------|-------------|
| 15.5~19.1 | 0.54 | 0.11 | 2.6~3.0 | 5・20・25 |

表 - 3 測定項目と目標値

| 測定項目 | 測定方法 | 目標値 |
|-------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| モルタルフロー | JIS R-5201 に準ずる | 270±50mm |
| J ₁₄ ロート流下時間 | JSCE-F 541-2010 | 15~30 秒程度 (参考値) |
| 空気量 | JIS A 1128:2005 | 1~3% |
| 単位容積質量 | JIS A 1116 | 2.45~2.55kg/cm ³ 程度 |
| 練上り温度 | 棒状温度計 | 5~35°C |
| 経時変化 | 5・20・25°Cの恒温室に静置 | |
| 膨張率 | JSCE-F 533-2007 | 材齢 7 日で収縮しないこと |
| 圧縮強度 (標準・封かん) | JIS A 1108:2006 φ 50×100mm, 各 3 本 | 材齢 56 日で 150N/mm ² 以上 |

恒温室に保管し、練上り温度が養生温度と近くなるようにした。

練上り時の目標値は、モルタルフローを 270±50mm、空気量を 1~3%とし、J₁₄ ロート流下時間は参考として測定した。目標の硬化性状は、材齢 7 日で収縮しないことおよび材齢 56 日封かん圧縮強度を 150N/mm²以上とした。

2.2 練混ぜ性能およびフレッシュ性状

室内試験では、アルミ粉末添加量と膨張率の関係から材齢 7 日で収縮しない最適量を定めた。低温養生の場合には、材齢 7 日で収縮しない膨張率を確保するためには、養生温度を確保する必要があることがわかった。

練混ぜは、水投入から流動性のある状態までの練混ぜ時間および合計の練混ぜ時間で管理したが、材料温度の影響を受けにくいことがわかった。

モルタルフローと J₁₄ ロート流下時間の関係を図 - 1 に示す。モルタルフローの目標値 270±50mm の範囲では、モルタルフローが大きいほど J₁₄ ロート流下時間は小さくなった。モルタルフローが目標値より小さくなると粘性が急激に大きくなり、J₁₄ ロート流下時間が大きくなった。グラウトの可使時間を想定した練置き 60 分までの範囲では、モルタルフローはほぼ目標値の範囲の変化となった。

フレッシュ時の空気量と単位容積質量の関係を図 - 2 に示す。練上り温度が低いほど、空気量が大きくかつ単位容積質量が小さい傾向となった。調合上の単位容積質量の計算値と比較して小さいケースもあったが、概ね計算上の単位容積質量の値となった。

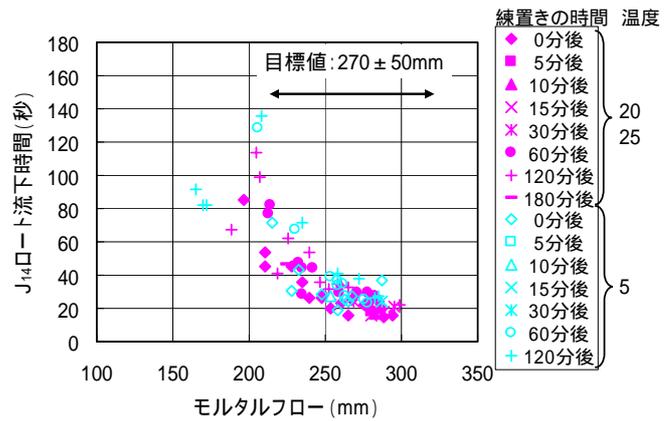


図 - 1 モルタルフローと J₁₄ ロート流下時間の関係

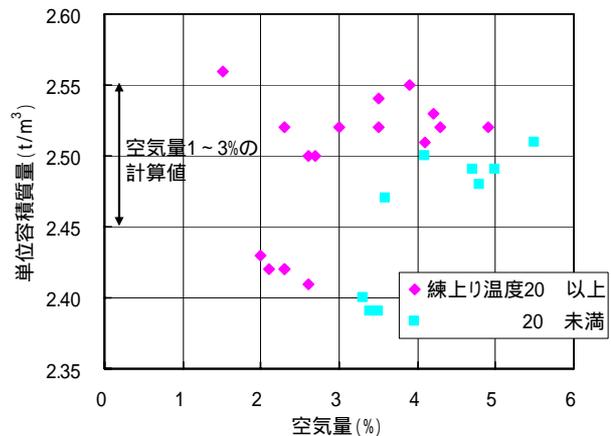


図 - 2 空気量と単位容積質量の関係

2.3 強度発現性状

練上り温度と標準養生圧縮強度の関係を図 - 3 に、結合材水比と標準養生圧縮強度の関係を図 - 4 に示す。プレミックス材料および練混ぜ水は、養生温度の恒温室内でほぼ養生温度としておいたが、練上り温度はいずれも上昇した。材齢 28 日強度で 150N/mm² を超える練上り温度の 20°C 以上および 150N/mm² 未滿の 20°C 未滿に分割して考察を行った。図 - 4 中には、材齢 56 日の結合材水比と圧縮強度の回帰線を記入したが、ここでも、材齢 56 日で、練上り温度が 20°C 以上の場合に圧縮強度 150N/mm² 以上が発現した。

図 - 5 に養生温度と封かん養生圧縮強度の関係および図 - 6 に結合材水比と封かん養生圧縮強度の関係を示す。図 - 6 中には、材齢 56 日の結合材水比と強度の回帰線を記入したが、練上り温度と標準養生強度の関係と同様に、材齢 56 日では、養生温度が 20°C 以上の場合に圧縮強度 150N/mm² 以上が発現することがわかった。

図 - 4 および 5 から、材齢 56 日で圧縮強度 150N/mm² 以上が発現するには、練上り温度・養生温度ともに 5°C では、低温すぎるということがわかった。

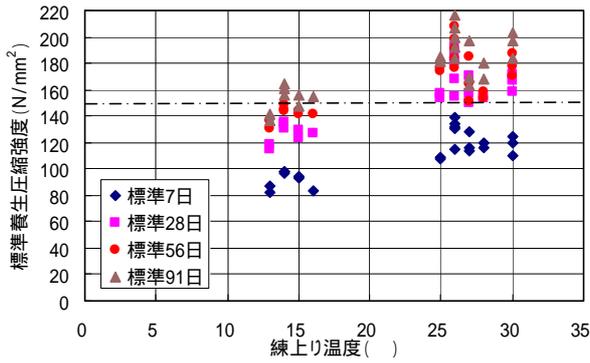


図 - 3 練上り温度と標準養生圧縮強度の関係

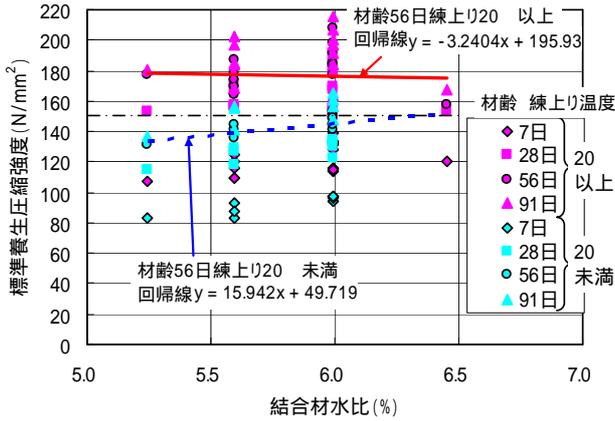


図 - 4 結合材水比と標準養生圧縮強度の関係

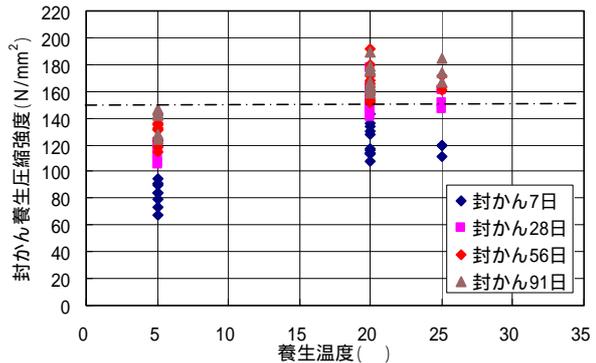


図 - 5 養生温度と封かん養生圧縮強度の関係

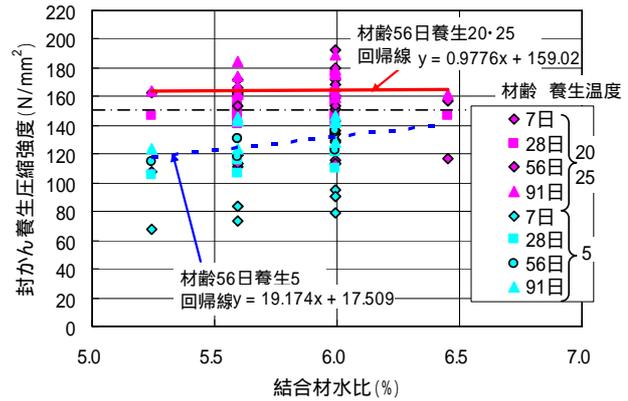


図 - 6 結合材水比と封かん養生圧縮強度の関係

3. 養生温度の検討

3.1 使用材料と組合せ

養生温度を、5・10・15・20・35°Cの5水準とし、現場養生を想定した封かん養生にて、強度発現性状の比較を行った。グラウトの調合および養生温度の組合せを表 - 4 に示す。調合は、室内試験による検討と同じプレミックス材料を使用し、プレミックス材料 25kg に対し水量は 3.0ℓ、アルミ粉末添加量は室内試験で定めた量とした。

練混ぜは、実際の現場練混ぜ時に使用するハンドミキサーを用いて行った。ペール缶にプレミックスグラウト材料および水を投入後、練混ぜを行った。流動性のある状態まで 60 秒、その後 120 秒練混ぜ、水投入からの合計練混ぜ時間を 180 秒とした。測定項目と目標値を表 - 5 に示す。室内試験による検討と同じ目標値を設定した。

3.2 フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験項目の一覧を表 - 6 に示す。いずれのバッチにおいても、モルタルフローの目標値 270 ± 50mm、空気量 1～3%を満足しており、良好なワーカビリティを示した。

3.3 強度発現性状および積算温度

封かん養生を行った場合の各養生温度の圧縮強度の経時変化を図 - 7 に、封かん養生温度と圧縮強度の関係を図 - 8 に示す。材齢 14 日まででは、養生温度が高いほ

表 - 4 グラウトの調合 (プレミックス 25kg 当り)

| W/B(%) | S/B | ZFF/B | W(ℓ) | 養生温度 |
|--------|------|-------|------|-----------------|
| 17.9 | 0.54 | 0.11 | 3.0 | 5・10・15・20・35°C |

表 - 5 測定項目と目標値

| 測定項目 | 測定方法 | 目標値 |
|-------------------------|--|------------------------------------|
| モルタルフロー | JIS R-5201 に準ずる | 270 ± 50mm |
| J ₁₄ ロート流下時間 | JSCE-F 541-2010 | 15～30 秒程度 (参考値) |
| 空気量 | JIS A 1128:2005 | 1～3% |
| 単位容積質量 | JIS A 1116 | 2.45～2.55kg/cm ³ 程度 |
| 練上り温度 | 棒状温度計 | 5～35°C |
| 圧縮強度 (封かん) | JIS A 1108:2006 φ 50 × 100mm, 各 3 本 | 材齢 56 日 150N/mm ² 以上 |

表 - 6 フレッシュ性状の試験項目と試験結果の一覧

| 測定項目 | 1 バッチ目 | 2 バッチ |
|-----------------------------|--------|-------|
| 室温 (°C) | 19 | 19 |
| 練混ぜ水温 (°C) | 20 | 20 |
| プレミックス材料温度 (°C) | 20 | 20 |
| 練上り温度 (°C) | 26 | 26 |
| 空気量 (%) | 2.6 | 2.6 |
| 単位容積質量 (t/m ³) | 2.4 | 2.4 |
| 目視による分離性状 | 分離なし | 分離なし |
| モルタルフロー (mm) | 268 | 260 |
| J ₁₄ ロート流下時間 (秒) | 20.6 | 22.7 |

ど強度発現が早かった。養生温度 35℃では、材齢 7 日で 150N/mm² を満足した。一方、低温養生では 150N/mm² を満足する材齢は、養生温度 10℃で 56 日、養生温度 5℃で 91 日となった。

積算温度と封かん養生圧縮強度の関係を図 - 9 に示す。積算温度は、下記の式により求めた。

$$\text{積算温度 (}^\circ\text{D}\cdot\text{D)} = (\theta + 10) \times T \quad (1)$$

ここに、 θ : 養生室温 (°C)

T : 材齢 (日)

図中には、養生温度毎の積算温度と圧縮強度の回帰線を示す。積算温度と圧縮強度の関係が片対数軸において、線形関係に近いことがわかった。

このことから、目標値の圧縮強度 150N/mm² を材齢 56 日で満足するには、150N/mm² を超える最小の積算温度である 1,120° D·D のときの養生温度を算出することにより、求められる。すなわち、式 (1) に積算温度=1,120° D·D、T=56 を代入し、下記のように求めた。

$$1,000 = (\theta + 10) \times 56 \quad (2)$$

$$\theta = 10 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3)$$

したがって、材齢 56 日で圧縮強度 150N/mm² が発現する養生温度は、10℃以上となる。実際の工事においては、平均気温が 10℃未満の場合には、保温養生等の手立が必要となる可能性がある。平均気温が 10℃以上の場合には、特に保温養生などをすることなく、材齢 56 日で 150N/mm² が発現するといえる。

4. 部材実験による検討

4.1 模擬部材の概要

低温環境下での施工を想定し、一体注入したグラウトにおいても、10℃以上の養生温度を確保できる養生方法を選定するため、実施工実験を行った。

模擬部材の形状および温度測定位置を図 - 10 に示す。模擬部材は、PCa 部材の目地・主筋貫通口および鉄筋継手を一度に注入（一体注入）する方式を想定しているため、圧入口は目地高さ、排出口は鉄筋継手天端高さとした。一体注入とは、鉄筋継手工法と PCa 部材の接合部分を一度のグラウト注入により行う施工方法である。グラウト温度測定箇所は、PCa 部材表面（1 点）、部材表面から 100mm および部材中心部（部材表面から 610mm）とした。部材表面から 100mm および部材中心部は、目地部分および PCa 部分とも部材表面から同じ位置に各 1 点とした。また、継手の鉄筋中心部、外気温および部材同一封かん養生供試体内部を各 1 点とした。

グラウトを一体注入した直後から目地グラウト周囲に保温効果のある養生シートを取り付けた。養生シート

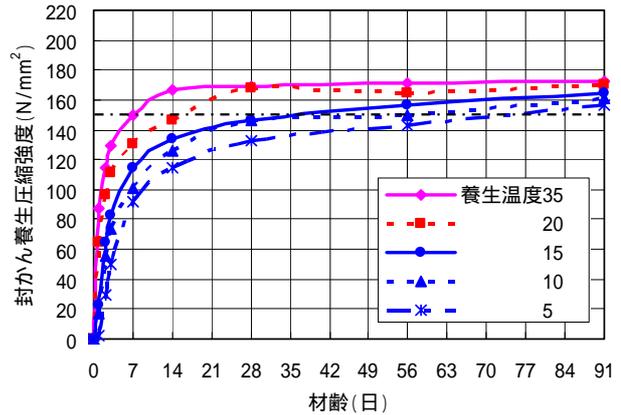


図 - 7 封かん養生圧縮強度の変化

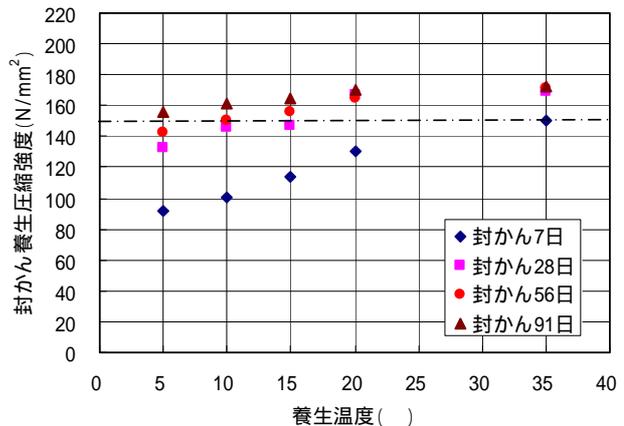


図 - 8 養生温度と封かん養生圧縮強度の関係

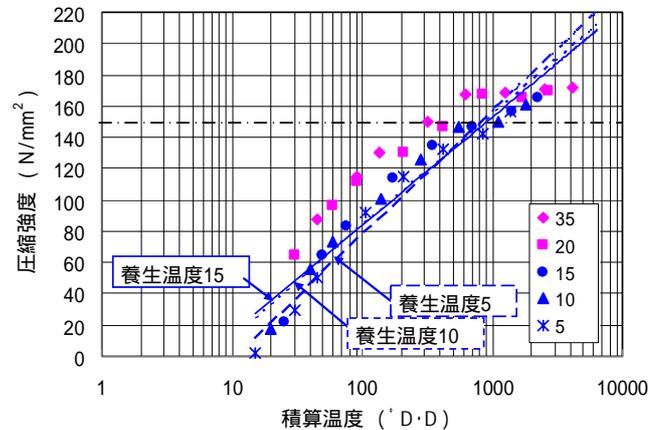


図 - 9 積算温度と封かん養生圧縮強度の関係

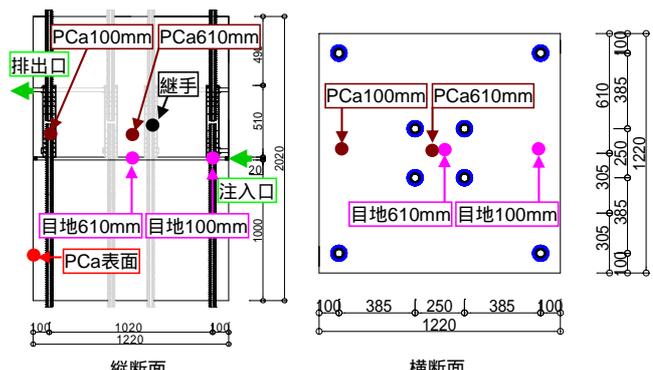


図 - 10 模擬部材の形状および温度測定位置

表 - 7 測定項目と目標値

| 測定項目 | 測定方法 | 目標値 |
|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| モルタルフロー | JIS R-5201 に準ずる | 270±50mm |
| 練上り温度 | 棒状温度計 | 5~35℃ |
| 履歴温度 | 自動計測 | |
| 圧縮強度 (標準・部材同一 封かん・現場水中) | JIS A 1108:2006 φ 50×100mm, 各 3 本 | 材齢 56 日で 150N/mm ² 以上 |

表 - 8 フレッシュ性状

| 測定項目 | 測定値 |
|----------------|------|
| 外気温 (℃) | 15.0 |
| 練混ぜ水温 (℃) | 33.0 |
| プレミックス材料温度 (℃) | 12.0 |
| 練上り温度 (℃) | 30.6 |
| 目視による分離性状 | 分離なし |
| モルタルフロー (mm) | 262 |

は、外寸 1.8×1.0m で、100V 電流による発熱体が組み込まれている。目地の上下に各 2 枚を横向きに巻き付けた。

測定項目と目標値を表 - 7 に示す。調合は、養生温度の検討と同じプレミックス材料を使用し、練混ぜ方法も同一とした。圧縮強度試験の養生方法を、標準養生・部材と同一の封かんおよび現場水中養生とした。部材と同一の封かんとは、封かん養生供試体を部材に使用した保温シートで包み込み部材と同一の養生を行う方法である。部材と同一の封かん養生は、材齢 7 日および 28 日までの 2 水準行い、以降は現場封かん養生とした。

4.2 フレッシュ性状

一体注入前の練上り時のフレッシュ性状を表 - 8 に示す。モルタルフローおよび空気量は、目標値の範囲内となり、良好なフレッシュ性状が得られた。

4.3 温度の変化

温度測定の変化を図 - 1 1 に、同一高さの部材内外の温度分布を図 - 1 2 に、部材等の温度の測定結果の一覧を表 - 9 に示す。外気温が日変動を繰り返すのに伴い、目地部分・PCa 部分および PCa 表面温度は、温度変化が生じた。目地部分・PCa 部分の部材中央部および鉄筋継手部の温度はほぼ同じ温度変化となった。

外気温と目地部分・PCa 部分の温度差は、材齢 0~7 日では、平均の温度で 13.0~19.4℃の温度差となった。また、目地部分および PCa 部分の最低温度でも、外気温の平均温度を下回ることなく保温養生ができていることを確認した。

4.4 強度発現性状

養生別の圧縮強度を図 - 1 3 に示す。材齢 28 日まで

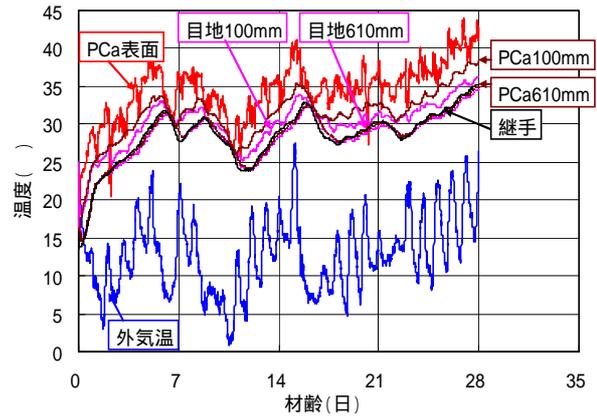
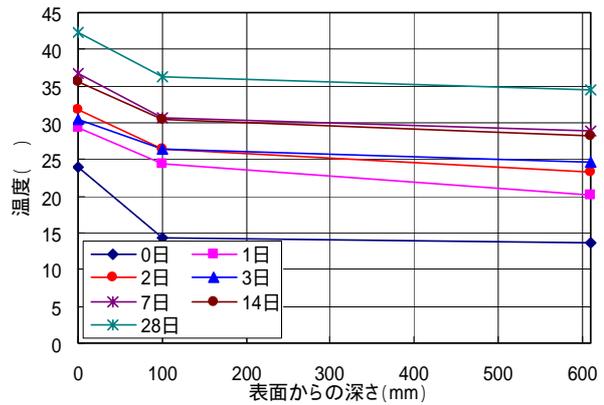
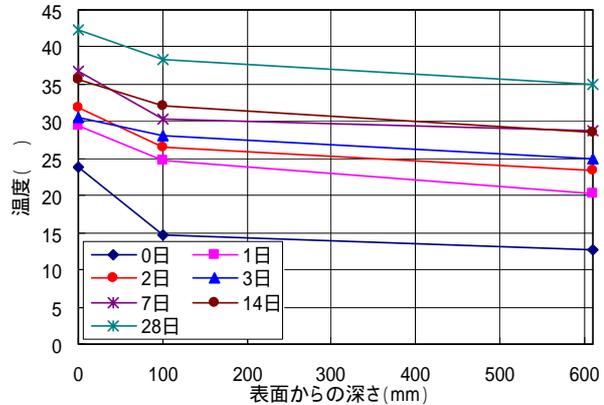


図 - 1 1 各部位の温度の変化



(a) 目地部分の温度分布



(b) PCa 部分の温度分布

図 - 1 2 各部位の温度分布

表 - 9 部材等の温度測定結果の一覧 (単位: °C)

| | 外気温 | PCa 部材 表面 | 目地部分 | | PCa 部分 | |
|-------------------|------|--------------|---------------|------|---------------|------|
| | | | 表面より 100mm | 中央 | 表面より 100mm | 中央 |
| 最高温度 | 23.8 | 39.7 | 33.0 | 31.2 | 33.7 | 31.5 |
| 材齢 7 日までの 平均温度 | 12.1 | 31.5 | 27.4 | 25.0 | 28.3 | 25.3 |
| 最低温度 | 3.0 | 19.3 | 14.4 | 13.7 | 14.6 | 12.8 |
| 外気温と 平均温度の差 | — | 19.4 | 15.3 | 13.0 | 16.2 | 13.2 |

部材と同一の養生を行った供試体強度は、以後の強度の伸びはなかった。材齢7日まで部材と同一の養生を行った供試体強度は、現場水中養生強度とほぼ同じ強度発現となった。材齢56日時点で、強度の大きい順に、28日まで部材と同一の養生・標準養生・7日まで部材と同一の養生・現場水中となった。したがって、材齢56日にて強度管理を行うにあたっては、標準養生強度(165N/mm²)よりも強度発現の小さい7日まで部材と同一の養生または現場水中養生にて行う必要がある。

その結果、保温養生を行うことにより、目地部分およびPCa部分の温度はともに、外気温より常時高い温度を保持することができた。したがって、実際の工事において、低温環境下で施工する場合、部材を保温し、強度管理を行う方法として有効であることが確認できた。

5. まとめ

本論文では、設計基準強度 150N/mm² 級の超高強度グラウトをPCa部材へ一体注入を行う場合、力学的性状に及ぼす養生温度等の影響について検討を行った。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) 練上り温度が 20℃以上の場合に、材齢 56 日で圧縮強度 150N/mm²以上となる。
- (2) 平均養生温度が 10℃以上の場合には、材齢 56 日で圧縮強度 150N/mm²が発現する。
- (3) PCa 部材に低温環境下で超高強度グラウトを施工する場合、部材を保温することは、グラウトの強度確保の手段として有効である。

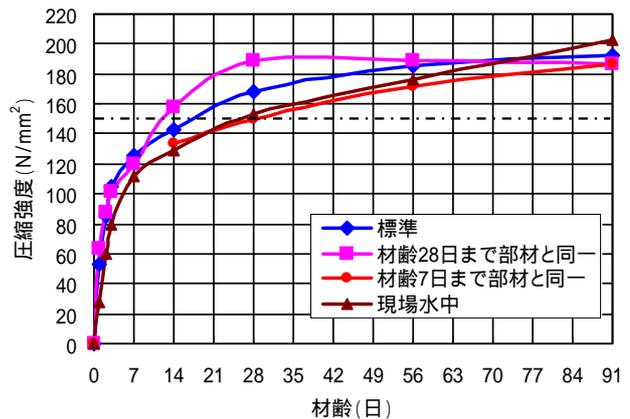


図 - 13 養生種類別の圧縮強度

参考文献

- 1) 神代泰道ほか：ジルコニア起源シリカ質微粉末混合セメントを用いた超高強度コンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1057-1062，2005.7
- 2) 湊田安浩ほか：超高強度グラウトの各種物性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1337-1342，2010.7
- 3) 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，(財)国土開発技術センター，1988～1992