

各種硬化促進材料を用いたコンクリートの強度発現性と発熱特性

三井住友建設(株) 技術研究所 ○恩田 陽介
 三井住友建設(株) 技術研究所 石澤 正大
 三井住友建設(株) 技術研究所 正会員 博士(工学) 佐々木 亘
 三井住友建設(株) 技術研究所 正会員 博士(工学) 谷口 秀明

1. はじめに

わが国では東京オリンピックに向けた大規模開発により急速施工は以前にも増して求められている。コンクリートの施工・製造の現場では、寒冷期の初期凍害を防止する場合やコンクリート二次製品の型枠の回転を早める場合には、硬化促進剤や早強剤¹⁾が用いられており、関心が高まっている。

本研究では、主としてPC上部工に用いるコンクリートに与える早強剤および各種混和材の適用性の基礎的検討として、初期材齢における強度発現性ならびに発熱特性について検討を行った。

2. 実験概要

表-1 使用材料

2.1 使用材料と配合

今回の実験で用いた材料を表-1、配合を表-2に示す。本実験では、コンクリートの初期強度発現性を高めるため、C-S-Hナノ粒子により水和反応が促進される液体系の化学混和剤としてカルシウムシリケート化合物のナノ粒子により水和反応を促進する早強剤¹⁾ (以下、MXS) と、粉体系のエトリンガイトの生成と水和促進作用により強度発現をする膨張性早期脱型混和材 (以下、FCN) , およびコンクリートパイル等に使用され、オートクレーブ養生の省略が可能な高強度コンクリート用混和材 (以下、SN) を用いた。

| 材料 | 記号 | 物性 |
|----------|-----|--|
| 水 | W | 水道水 |
| セメント | H | 密度3.13g/cm ³ |
| シリカフェューム | B | SF 比表面積16.5m ² /g,密度2.25g/cm ³ |
| | | FCN 膨張性早期脱型混和材,密度2.90g/cm ³ |
| | | SN 高強度コンクリート用混和材,密度2.55g/cm ³ |
| 混和材 | S | S1 千葉県富津市産山砂, 密度2.63g/cm ³ |
| | | S2 茨城県桜川市産砕砂, 密度2.63g/cm ³ |
| 細骨材 | S | S1 千葉県富津市産山砂, 密度2.63g/cm ³ |
| 粗骨材 | G | 砕石2005,茨城県桜川市産,密度2.66g/cm ³ |
| 混和剤 | SP | SP1 高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物) |
| | | SP2 高性能減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物) |
| | AE | AE1 (変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤) |
| | | AE2 空気量調整剤 (ポリアルキレングリコール誘導体) |
| | MXS | 早強剤 (カルシウムシリケート化合物) |

評価の対象は、PC部材に用いる設計基準強度が40~50N/mm²程度のコンクリート (H40シリーズ: H40, H40MXS, H40FCN, H40SN) と、厚さが薄いプレキャストPC部材を想定した設計基準強度80~100N/mm²程度の高強度繊維補強コンクリート²⁾から粗骨材と繊維を除いた高強度モルタル (HSFシリーズ: HSF22, HSF22MXS, HSF22FCN) 2種類とした。使用量はすべて標準使用量とし、MXSはベースとなるH40とHSF22の粉体比2%を単位水量の一部とした。混和材はいずれも結合材とみなし、FCNはH40FCNで20kg/m³, HSF22FCNで30kg/m³を、SNはH40SNで結合材中の15%をセメントに置換して用いた。

表-2 配合

| 配合名 | W/B | s/a | 単位量 kg/m ³ | | | | | | | | 混和剤 (B × wt%) | | | | |
|----------|------|------|-----------------------|-----|----|-----|----|-----|-----|------|---------------|-----|-----|------|------|
| | | | W | B | | | | S | | G | SP1 | SP2 | MXS | AE1 | AE2 |
| | | | | H | SF | FCN | SN | S1 | S2 | | | | | | |
| H40 | 40.0 | 43.0 | 160 | 400 | 0 | 0 | 0 | 302 | 453 | 1011 | 0.7 | 0 | 0.0 | 0.02 | 0 |
| H40MXS | 40.0 | 43.0 | 160 | 400 | 0 | 0 | 0 | 302 | 453 | 1011 | | 0 | 2.0 | | 0 |
| H40FCN | 40.0 | 43.0 | 160 | 380 | 0 | 20 | 0 | 302 | 453 | 1011 | | 0 | 0.0 | | 0 |
| H40SN | 40.0 | 42.7 | 160 | 340 | 0 | 0 | 60 | 298 | 447 | 1011 | | 0 | 0.0 | | 0 |
| HSF22 | 22.0 | - | 185 | 757 | 84 | 0 | 0 | 0 | 778 | 0 | 0 | 1.1 | 0.0 | 0 | 0.14 |
| HSF22MXS | 22.0 | - | 185 | 757 | 84 | 0 | 0 | 0 | 778 | 0 | 0 | | 2.0 | 0 | |
| HSF22FCN | 22.0 | - | 185 | 727 | 84 | 30 | 0 | 0 | 776 | 0 | 0 | | 0.0 | 0 | |

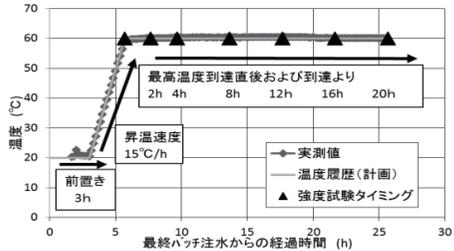
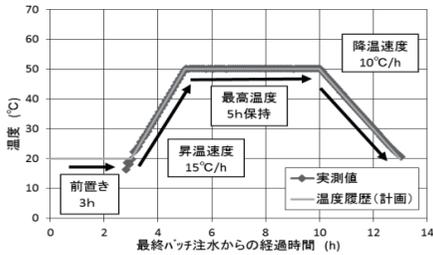


図-1 蒸気養生の温度履歴 (左: H40 シリーズ 右: HSF シリーズ)

表-3 養生条件

| 配合 | 養生方法 | |
|-----|---------------------------|-------------------|
| | 封緘 | 蒸気 |
| H40 | 12h, 18h, 24h, 1d, 3d, 7d | 終了直後, 3d, 7d, 14d |
| HSF | 12h, 18h, 24h, 1d, 3d, 7d | 図-1参照 |

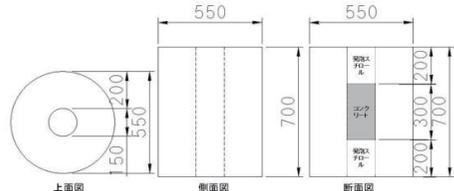


図-2 簡易断熱型枠(単位:mm)

2.2 試験内容

本研究では、コンクリートおよびモルタルの品質に関する試験として、凝結試験、圧縮強度試験、簡易断熱温度上昇試験を実施した。

凝結試験は、JIS A 1147に準拠して試験を行った。H40シリーズではウェットスクリーニングによりモルタル試料を採取した。HSFシリーズではウェットスクリーニングを行わず高強度モルタルをそのまま試料とした。

圧縮強度試験では、JIS A 1132に準拠して、供試体を作製し、JIS A 1108に準拠して試験を行った。供試体は、H40シリーズにφ100×200mm、HSFシリーズにφ50×100mmの円柱供試体を使用した。養生方法は恒温室(温度20±2℃)での封緘養生、および蒸気養生とした。養生の方法と試験材齢を表-3に示す。蒸気養生により与えた温度履歴および試験のタイミングを図-1に示す。蒸気養生後の供試体は封緘養生と同様に保管した。

簡易断熱温度上昇試験では、H40シリーズについて発熱性状の確認として、発泡スチロール製の簡易な断熱型枠(以下、簡易断熱型枠)を用いて、内部にコンクリートを打ち込み、コンクリート内部の中心と側面の温度測定を行った。簡易断熱型枠の寸法を図-2に示す。また、既往の研究³⁾を参考に、この簡易断熱型枠の熱損失について求めた。φ150×300mmの円柱供試体を、60℃にて存置し、内部温度が均一になるように十分加熱した後、簡易断熱型枠に挿入し、20℃60%の恒温室での経時変化を測定したのち放熱量を求めた。ここで、簡易断熱試験の気温との温度差に応じた温度降下勾配データに、測定時間間隔を乗じたものを降下温度として、簡易断熱温度上昇試験の実測値に加算することで、断熱温度上昇を推定した。

3. 実験結果と考察

3.1 凝結試験

H40シリーズとHSFシリーズの凝結試験結果を図-3に示す。MXSを用いた配合ではどちらの配合シリーズにおいても始発、終結時間はH40に対して65~75分程度早まった。また、始発から終結に至るまでの時間はHSF22MXSで50分と、HSF22に対して15分短くなった。既往の文献によると、C-S-H系早強剤では

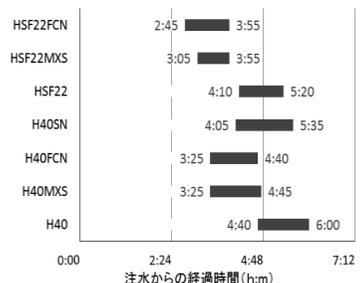


図-3 凝結試験結果

W/C40%の配合で添加量2%とした場合、始発時間が約1時間の短縮、始発から終結に至るまでの時間

も短くなる傾向があったとされており、本実験においてもその効果が確認された。FCNを用いた配合では、どちらのシリーズにおいても始発、終結時間はH40に対して75～85分程度早まった。H40SNでは、H40に対して、始発は35分早まったが、始発から終結に至るまでの時間は10分長くなった。

3.2 圧縮強度試験

(1) 封緘養生

図-4にH40シリーズ、図-5にHSFシリーズの試験結果をそれぞれ示す。図-4の左図から、H40MXSとH40FCNでは材齢24hまでの強度発現が、他配合に比べ大きく、強度比で約50%の強度発現があることがわかる。材齢24h以降、材齢3dまでにH40の強度増進が見られ、H40MXSやH40FCNと同程度の強度発現が得られていることがわかる。H40SNでは材齢7日以降に強度が増進した。図-4の右図から、材齢28日強度においてはどの配合も同程度の値となり、長期強度への影響は見られなかった。

図-5の左図より、HSF22MXSおよびHSF22FCNでは、初期材齢からHSF22より高い強度を発現し、材齢18hで約60%の強度発現があった。図-5の右図より、圧縮強度はHSF22MXSが最も高く、HSF22が最も低かった。各配合ごとに5N/mm²程度の差が材齢1dで現れて、材齢28dでもその傾向を示した。

(2) 蒸気養生

図-6の左図にはH40シリーズ、右図にはHSFシリーズの試験結果を示す。H40シリーズでは、どの配合も蒸気養生を行うことで蒸気養生終了直後で、40N/mm²程度の強度発現があった。蒸気養生終了後も強度が増進し、材齢14dで60～70N/mm²の強度が得られ、MXSとFCNを用いた配合ではH40およびH40SNより材齢14dの強度が高くなった。

図-6の右図は、蒸気養生の最高温度到達からの時間と圧縮強度の関係を示す。どの供試体も最高温度到達後8hまでは強度は増進したが、それ以降の圧縮強度はほぼ横ばいとなった。

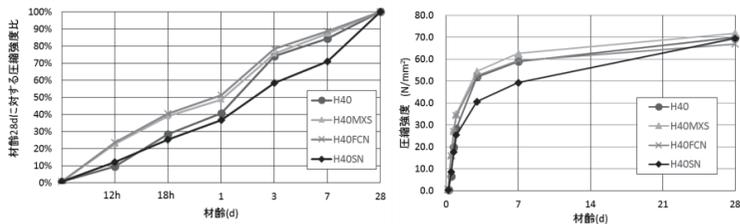


図-4 圧縮強度試験結果 (H40シリーズ 左図:材齢-材齢28dに対する強度比, 右図:材齢-強度)

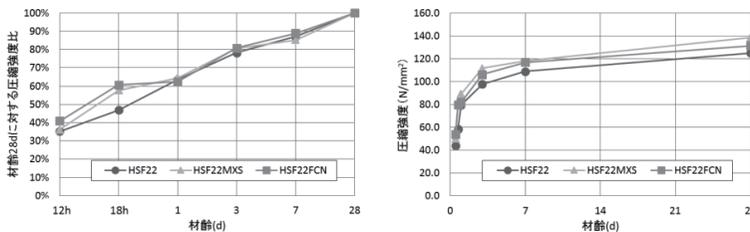


図-5 圧縮強度試験結果 (HSFシリーズ 左図:材齢-材齢28dに対する強度比, 右図:材齢-強度,)

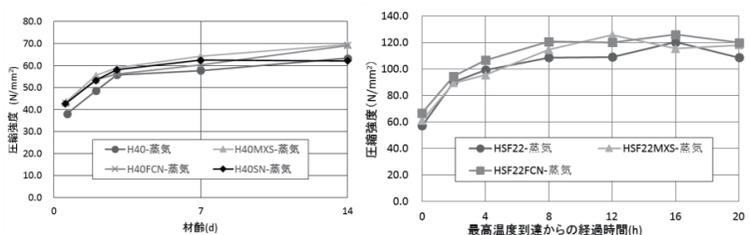


図-6 圧縮強度試験結果 (蒸気養生 右図:H40シリーズ 左図:HSFシリーズ)

表-4 最大温度と断熱温度特性

| 配合 | | H40 | H40MXS | H40FCN | H40SN |
|------|-------------------|-------|--------|--------|-------|
| 実測値 | T_{max} (°C) | 56.7 | 60 | 60.4 | 54.6 |
| | 時間 (T_{max}) | 16:50 | 14:20 | 14:00 | 17:30 |
| JCI式 | Q_{∞} (°C) | 68.0 | 68.0 | 65.2 | 59.8 |
| 推定値 | Q_{∞} (°C) | 65.1 | 68.4 | 66.4 | 64.0 |
| 誤差 | | -4.2% | 0.6% | 1.8% | 6.9% |

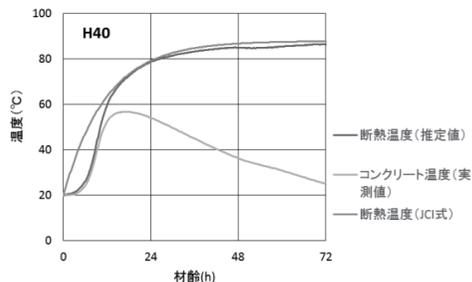


図-7 簡易断熱温度上昇試験結果 (一例)

3.3 簡易断熱温度上昇試験

図-7は簡易断熱温度上昇試験より測定されたコンクリート温度の実測値と推定した断熱温度およびJCI式⁴⁾による値の一例を示している。今回の方法で推定した断熱温度は、既往の文献³⁾と同じく、1d以前においては推定値とJCI式による値が一致しなかったが、それ以降はほぼ一致した。そのため、この推定値から終局断熱温度上昇量 Q_{∞} を求めた。表-4に最大温度とその到達時間、JCI式による Q_{∞} および Q_{∞} の推定値、両者の誤差を示す。

H40のJCI式による終局断熱温度上昇量と推定値を比較すると、推定値が約3°C低い値を示している。このため、今回用いた断熱型枠では終局断熱温度上昇量が3°C程度低く評価される可能性がある。

H40MXSおよびH40FCNの最大温度 T_{max} はH40に対して3.3~3.7°C高くなり、最大温度の到達時間は150分~170分早くなった。断熱温度上昇の推定値は、H40MXSが最も高く、H40MXSとH40との差は3.3°C、H40FCNとH40の差は1.3°Cであった。これらは、MXSとFCNが水和促進効果を有しており、セメントの水和を促進することで発熱速度が早まったためと考えられる。H40MXSとH40FCNの比較において、H40MXSの温度が高くなったのは、両者の水セメント比に違いがあるためと推察される。H40SNでは、最高温度はH40と比較して1.9°C低く、最高温度到達時刻は40分遅かった。これによりH40SNには水和反応の促進効果は見られなかった。

4. まとめ

早強剤および各種混和材を用いたコンクリートの初期材齢における強度発現と発熱特性を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 本実験の範囲で用いた早強剤および各種混和材では、凝結の始発、終結時間は短くなり、その効果が顕著であったのはMXSとFCNであった。
- (2) 材齢1dまでの強度は、MXSとFCNで高く早強剤および各種混和材は初期強度への影響は見られるが、長期強度においては影響が見られなかった。蒸気養生を行った場合、どの配合も同様に強度が増進し、HSF配合においては最大温度8時間を保持することで強度は横ばいとなった。
- (3) MXSとFCNでは水和反応の促進により、コンクリートの最大温度が高くなり、その到達時間、簡易断熱温度上昇量も大きくなった。

参考文献

- 1) たとえば、春日貴行, 大野誠彦, 井本晴丈, 矢口稔:C-S-H系早強剤を使用したコンクリートの基本性能, 土木学会第68回年次学術講演会, V-551, pp.1101-1102, 2013.9
- 2) 佐々木亙, 芦塚憲一郎, 出口宗浩, 谷口秀明:高強度コンクリートの力学特性に与える鋼繊維の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.277-283, 2013.7
- 3) 吉武勇, 中村秀明, 谷本俊夫, 浜田純夫:現場利用可能なマスコンクリートの簡易断熱温度上昇測定法の提案, 土木学会論文集, No.606, pp.103-110, 1998.11
- 4) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針2008, 4章, pp.47-56, 2008.11