

論文 高炉スラグ専用硬化促進剤が高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの諸性状に及ぼす影響

守屋 健一^{*1}・田中 徹^{*2}・猪瀬 亮^{*3}・西 祐宜^{*4}

要旨：本研究では、セメント質量の 70%を高炉スラグ微粉末に置換し、特殊硫酸塩系化合物を主成分とした高炉スラグ専用硬化促進剤を添加したコンクリートの圧縮強度発現性、長さ変化および中性化抵抗性の把握を目的として検討試験を行った。この結果、促進剤添加により初期強度は改善され、模擬試験体において発熱履歴、強度発現ともに促進剤添加による悪影響がないことが確認された。また、収縮低減剤相当の高い収縮低減効果が認められ、その効果は長期に持続することを把握した。なお、中性化抵抗性は低下する傾向を示しており、炭酸ガスが流入しやすい組織構造になっている可能性が示唆された。

キーワード：高炉スラグ微粉末、硬化促進剤、圧縮強度、長さ変化、中性化

1. はじめに

近年、地球温暖化問題や環境負荷への関心が高まる中、建設分野における二酸化炭素（以下、CO₂）排出量の削減が喫緊の課題となっている。特に、コンクリートの主要成分であるセメントの製造過程では多量の CO₂が排出されるため、コンクリートの使用材料に起因する CO₂排出量削減を目的にセメントの一部を置き換える具体的な検討が行われている。セメントの代替として産業副産物を活用することが有効である。なかでも、高炉における銑鉄の製造過程で副産物として発生する高炉スラグ微粉末（以下、BFS）は、CO₂排出量原単位が少ないことから、セメントの代替材料として環境負荷の低減に寄与する材料として広く研究が進められている^{1), 2)}。しかしながら、BFSを大量に使用したコンクリートは初期強度発現が著しく遅れ、施工時の課題となることが多い。

筆者ら³⁾は、硫酸塩系化合物を主成分とする高炉スラグ専用硬化促進剤(以下、SA)の添加が初期強度発現性および中性化抵抗性に及ぼす影響を把握することを目的として、レディーミクストコンクリート工場で製造されたコンクリートを用いた検討試験を実施した。その結果、セメントの一部を BFS に置換したコンクリートに対し、現場到着時に粉体の SA をアジテータ車で添加することで、初期強度を改善できることを確認している。

本研究は、普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを使用し、セメント質量の 70%を BFS に置換したコンクリートに対し、出荷時に液体の SA を単位水量の一部として添加した場合の圧縮強度発現性、長さ変化、および中性化抵抗性への影響を検討することを目的として実施した。

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類	品質・主成分
セメント	N	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³ 比表面積:3320cm ² /g
	H	早強ポルトランドセメント	密度:3.14g/cm ³ 比表面積:4540cm ² /g
	BB	高炉セメント B 種	密度:3.04g/cm ³ 比表面積:3870cm ² /g
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末 4000(せっこう添加)	密度:2.89g/cm ³ 比表面積:4620cm ² /g
細骨材	S1	八王子市美山産 砕砂	表乾密度:2.63g/cm ³ F.M.:3.10
	S2	君津市久留里産 山砂	表乾密度:2.59g/cm ³ F.M.:1.70
粗骨材	G	八王子市美山産 碎石 2005	表乾密度:2.65g/cm ³ 実積率:59.0%
化学混和剤	Ad1	高性能 AE 減水剤（標準形 I 種）	ポリカルボン酸系化合物, リグニンスルホン酸塩
	Ad2	高性能 AE 減水剤（標準形 I 種）	ポリカルボン酸系化合物
促進剤	SA	硬化促進剤	特殊硫酸塩系化合物（液体）

*1 戸田建設株（株） 技術研究所 社会基盤再生部 修士（工学）（正会員）

*2 戸田建設株（株） 技術研究所 工学修士（正会員）

*3 （株）フローリック 技術本部 コンクリート研究所 修士（工学）（正会員）

*4 （株）フローリック 技術本部 コンクリート研究所 博士（工学）（正会員）

2. 試験概要

2.1 コンクリートの使用材料

表-1 にコンクリートの使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメント（以下、Nセメント）、早強ポルトランドセメント（以下、Hセメント）、および、高炉セメントB種（以下、BBセメント）を使用した。BFSはJIS A 6206に規定される比表面積が4620cm²/g、せっこうが添加されているものをを用いた。SAは特殊硫酸塩系化合物を主成分とした液体であり、アルカリ中で分解され硫酸イオンとなり、アルミン酸三カルシウムとの反応を促す効能を有する。

2.2 コンクリートの配(調)合

表-2 にコンクリートの配(調)合を示す。結合材の種類として、Nセメントの70%をBFSで置換したコンクリート（以下、N70）、Hセメントの70%をBFSで置換したコンクリート（以下、H70）、およびBBセメントのみを使用したコンクリート（以下、BB）の3種類とし、水結合材比は全て45%とした。単位水量は全ての配(調)合で175kg/m³とし、練混ぜに使用した化学混和剤はN70、およびH70は高炉スラグ高含有コンクリート用の高性能AE減水剤（以下、Ad1）を使用し、BBは汎用品の高性能AE減水剤（以下、Ad2）を用いた。また、N70およびH70の2配(調)合においてSAを添加した。なお、目標スランプは21±2.0cm、目標空気量は4.5±1.5%とし、目標

値となるよう化学混和剤の添加率にて調整した。

本試験で使用したSAは液体であり、単位水量の一部として添加することを想定している。本試験で使用したレディーミクストコンクリート工場にはSAの添加設備がなく、コンクリート練混ぜ時に添加ができなかったため、コンクリート製造時には単位水量から7.78kg/m³を差し引いて練混ぜを行い、SAはレディーミクストコンクリート工場出荷時にアジテータ車で添加した。

2.3 試験項目および試験方法

(1) フレッシュ試験

表-3 に試験項目および試験方法を示す。フレッシュ試験は試験体採取時にスランプ、空気量、コンクリート温度を測定した。

(2) 供試体による圧縮強度

供試体による圧縮強度の養生条件は、標準養生および20℃封緘養生とし、標準養生は材齢1, 4, 13週で、20℃封緘養生は材齢1, 3日, 1, 4, 13, 52週で試験を行った。なお、静弾性係数は材齢4, 13週の圧縮強度試験時に標準養生の供試体で測定した。

(3) 長さ変化

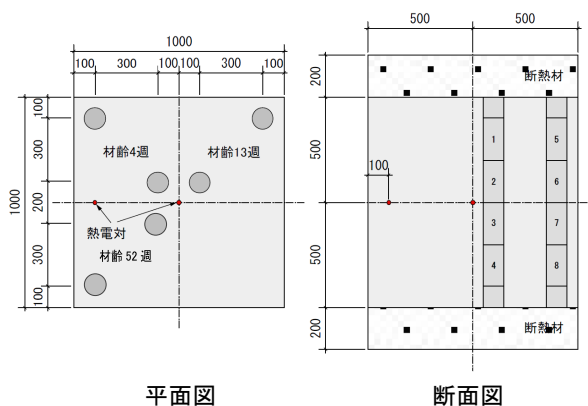
長さ変化試験はJIS A 1129-3に準拠し100×100×400mmの供試体を用いて実施した。供試体は1週間標準養生後、温度20℃、60%R.H.で保存し、乾燥期間1, 4, 8, 13, 26週において、長さ変化と質量変化の測定を行った。

表-2 コンクリートの配(調)合

No.	配(調)合	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)										SA (kg/m ³)
				W	N	H	BB	BFS	S1	S2	G	Ad1	Ad2	
1	N70-促進剤なし	45	50.5	175	117	-	-	272	559	301	851	4.28	-	-
2	N70-促進剤あり	45	50.5	175	117	-	-	272	559	301	851	4.28	-	7.78
3	H70-促進剤なし	45	50.5	175	-	117	-	272	559	301	851	4.28	-	-
4	H70-促進剤あり	45	50.5	175	-	117	-	272	559	301	851	4.28	-	7.78
5	BB-促進剤なし	45	47.5	175	-	-	389	-	529	284	909	-	3.21	-

表-3 試験項目および試験方法

概要	試験項目	試験方法	備考
フレッシュ試験	スランプ	JIS A 1101	試験体採取時
	空気量	JIS A 1128	試験体採取時
	コンクリート温度	JIS A 1156	試験体採取時
供試体による圧縮強度	圧縮強度(標準養生)	JIS A 1108	材齢1, 4, 13週
	静弾性係数(標準養生)	JIS A 1149	材齢4, 13週
	圧縮強度(20℃封緘養生)	JIS A 1108	材齢1, 3日, 1, 4, 13, 52週
長さ変化	長さ変化	JIS A 1129-3	第3部：ダイヤルゲージ方法
	質量変化		
中性化	促進中性化	JIS A 1153	4週水中⇒4週気中⇒促進試験
			1週封緘⇒促進試験
模擬体による試験 □1m×1m柱	模擬体温度測定	-	各模擬体で測定
	圧縮強度	JIS A 1107	材齢4, 13, 52週



平面図 断面図
図-1 模擬体の形状・寸法

(4) 促進中性化

促進中性化試験は、JIS A 1153 に準拠して実施した。前養生の条件が中性化速度に及ぼす影響を把握するために、材齢 4 週まで標準養生した後に温度 20℃、60%R.H. に材齢 8 週まで保管し、促進試験を開始する汎用的な方法および、材齢 1 週まで 20℃環境下で封緘養生し、脱型後直ちに、促進中性化試験を開始した 2 種類で試験を実施した。

(5) 模擬体による試験

模擬体は図-1 に示す 1m×1m の試験体とし、上下面を断熱材で挟み熱の伝達を遮断することにより、長大な柱部材の中央部を模擬した形状とした。コンクリートは 1 層 0.5m の 2 層でパイプレータを用いて打設し、材齢 1 週で脱型を行った。圧縮強度試験の試験体は材齢 4、13、52 週で模擬体から φ100mm のコアを中央部と外周部でそれぞれ 1 本コア試験体を採取し、φ100×200mm の試験体を成型し、圧縮強度試験を行った。また、図-1 に示す位置でコンクリート温度を測定し、外気温についても測定を行った。

3. 実機試験の結果および考察

3.1 フレッシュ試験

表-4 にフレッシュ試験結果を示す。スランプと空気量は現着時には出荷から 60 分程度経過していたが、スランプと空気量は全ての配(調)合で目標値を満足し、SA の影響も確認されなかった。

3.2 供試体による圧縮強度

図-2 に 20℃封緘で養生した材齢 1、3 日の圧縮強度を示す。20℃封緘の材齢 1 日の圧縮強度は、N70-無が 2.12N/mm²、N70-有では 3.46N/mm² となり、N70-無と比較して約 1.6 倍であった。また、H70-有では 6.01N/mm² となり、N70-無の約 2.8 倍であることが確認された。この結果、SA の添加により初期強度を大幅に改善できることを確認した。また、材齢 3 日においても、材齢 1 日

表-4 フレッシュ試験結果

配(調)合	フレッシュ結果		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	CT (℃)
N70-無	22.5	3.8	22
N70-有	21.0	4.1	23
H70-無	22.0	3.9	23
H70-有	21.5	4.2	22
BB-無	21.0	4.5	21

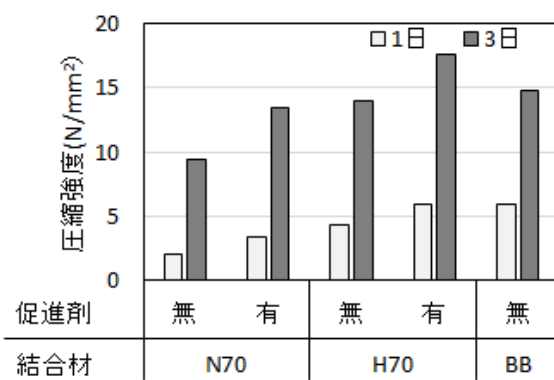


図-2 材齢 1, 3 日の圧縮強度 (20℃封緘養生)

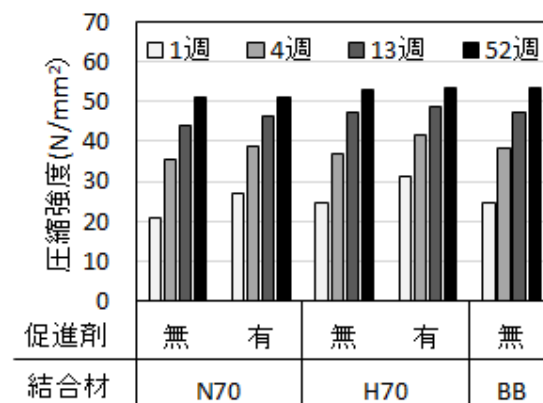


図-3 材齢 1, 4, 13, 52 週の圧縮強度 (20℃封緘養生)

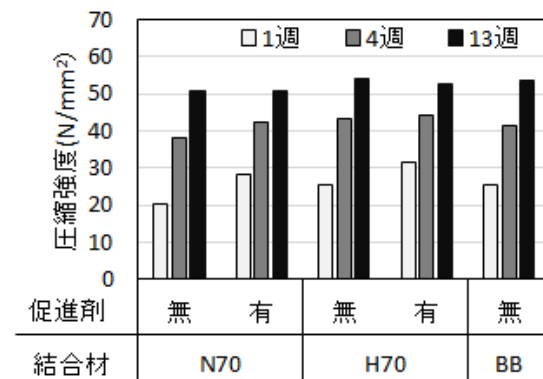


図-4 1, 4, 13 週の圧縮強度 (標準養生)

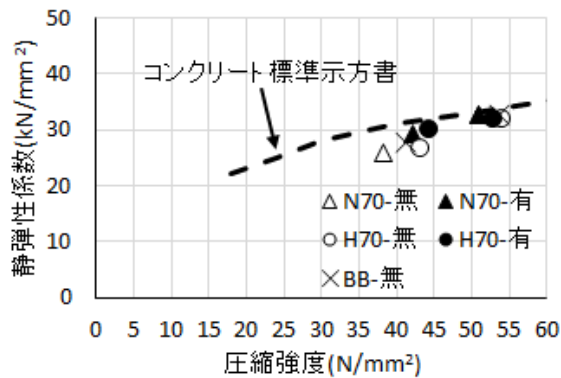


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係(標準養生)

と同様に SA の効果が確認され、H70-有は BB-無よりも圧縮強度が高くなった。

図-3 に 20℃封緘で養生した材齢 1, 4, 13, 52 週の圧縮強度を示す。20℃封緘養生の圧縮強度は、材齢 13 週までは、SA を添加することで強度は高くなる傾向を示し、H70-有が最も高くなった。SA を添加した N70-有および H70-有は材齢 52 週においても強度の増加が継続して確認された。

図-4 に標準養生の圧縮強度を示す。標準養生においても材齢 1, 4 週では SA を添加した N70-有および H70-有の圧縮強度は SA 無添加の N70-無および H70-無と比較して高くなり、SA の効果が確認されたが、材齢 13 週は SA を添加することで、4 週以降の強度増進が小さく、材齢 13 週の圧縮強度は低くなった。十分に水分が供給されるケースでは、SA の強度発現性の継続効果は消失するといえる。

図-5 に圧縮強度と静弾性係数の関係(標準養生)を示す。図中に土木学会コンクリート標準示方書の算出式⁴⁾をあわせて示す。標準養生の圧縮強度と静弾性係数の関係は、コンクリート標準示方書の算出式よりも全体的に小さい値を示したが、標準養生を行った供試体においては、SA 添加の影響はなかった。

3.3 長さ変化

図-6 に質量変化率と長さ変化率の関係、図-7 に乾燥期間と N70-無に対する収縮低減率を示す。SA を添加した N70-有および H70-有は無添加の N70-無および H70-無と比較して、質量変化率および長さ変化率が小さくなる傾向を示した。N70-無と BB-無の配(調)合は同様の傾向を示し、質量変化および長さ変化が大きくなった。

N70-無に対する収縮低減率は、SA を添加した N70-有は乾燥期間 13 週で 14.9%、26 週で 9.5%であり、H70-有は乾燥期間 13 週で 21.8%、26 週で 17.8%であった。SA は収縮低減剤相当の大きな収縮低減効果が発現するとともに、乾燥期間が長期になっても収縮低減効果が大きく

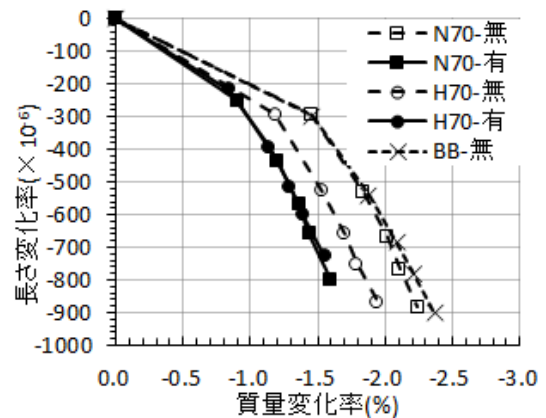


図-6 質量変化率と長さ変化率の関係

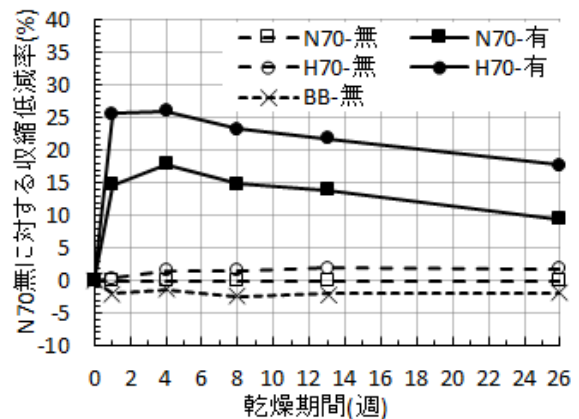


図-7 乾燥期間と N70-無に対する収縮低減率の関係

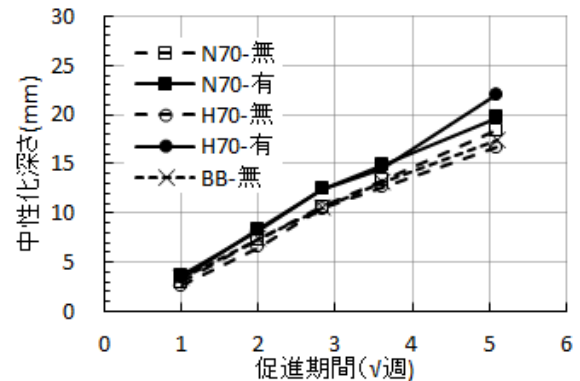


図-8 促進期間と中性化深さの関係(4 週標準)

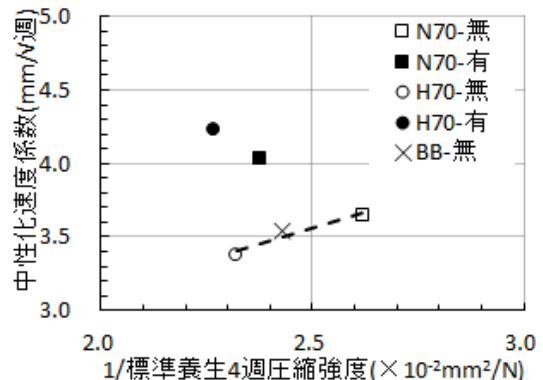


図-9 標準養生 4 週圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係(4 週標準)

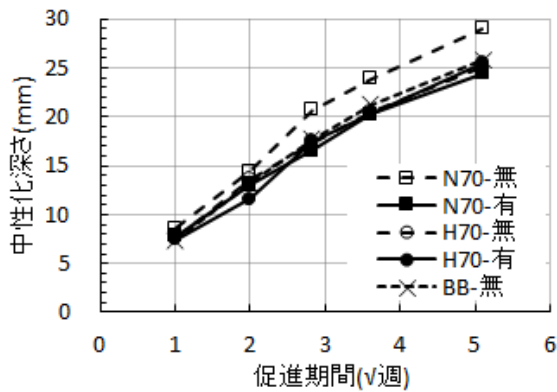


図-10 促進期間と中性化深さの関係(封緘1週)

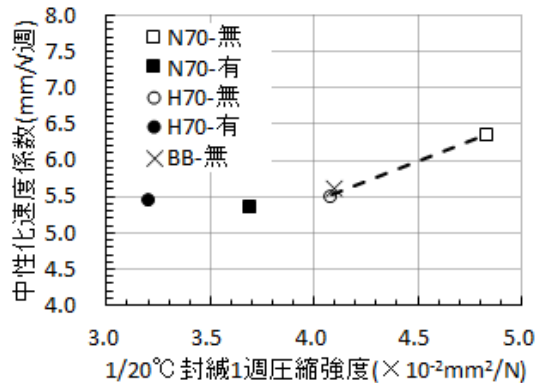


図-11 封緘1週圧縮強度の逆数と
中性化速度係数の関係(封緘1週)

減少することがない。

3.4 促進中性化

図-8に促進期間と中性化深さの関係(4週標準)、図-9に標準養生4週圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係(4週標準)、図-10に促進期間と中性化深さの関係(1週封緘)、図-11に封緘1週圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係(1週封緘)を示す。図-9、図-11に示すようにSA無添加の系は圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係に相関が見られるが、SAを添加した系は異なる傾向を示した。図-9に示すように、標準養生4週の圧縮強度が発現しているも、SAを添加した系は中性化速度係数がやや増加する傾向を示した。図-11に示すとおり養生中に水分供給がない封緘1週の前養生では、N70-無およびH70-無の圧縮強度の逆数と中性化速度の関係を考慮すれば、SA添加は実測された中性化速度係数よりも低い値を示すと考えられるが、圧縮強度が発現しているも中性化速度は抑制できない傾向を示している。これらの原因として、SA添加により水和プロセスが変化、SAの組成を考慮すれば、エトリンサイト生成量が増加し、強度発現を促す一方で、炭酸ガスの流入経路は増加している可能性が考えられる。この機構は収縮抑制にも関連し、エトリンサイト生成に伴う膨張が収縮抑制に寄与していると考えられる。

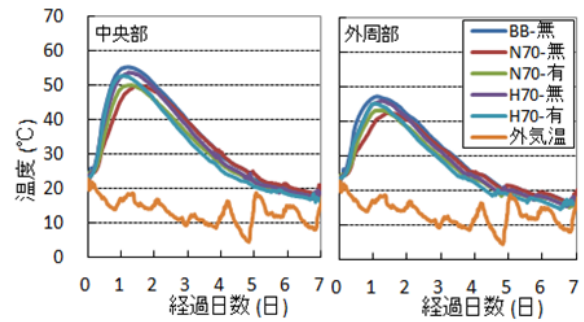


図-12 経過日数とコンクリート温度の関係(模擬体)

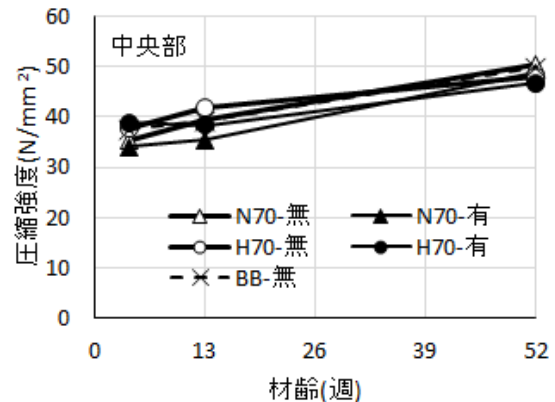


図-13 コア試験体の圧縮強度(模擬体中央部)

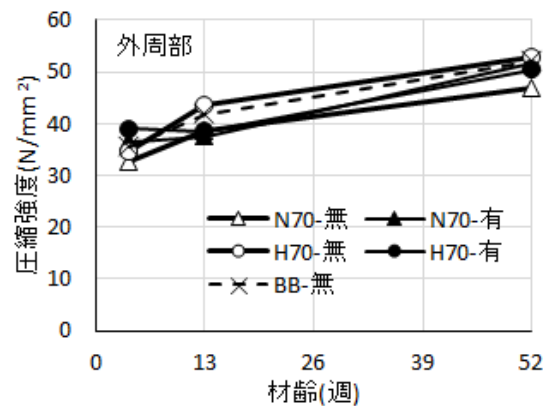


図-14 コア試験体の圧縮強度(模擬体外周部)

3.5 模擬体による試験

(1) 温度

図-12に経過日数と温度の関係を示す。模擬体外周部のコンクリートの温度はN70-無が最も低く、SAを添加することで、最高温度到達時間が若干早くなり、Hセメントを用いたH70-有とBBセメントを用いたBB-無は同程度の最高温度到達時間となった。また、模擬体中央部のコンクリートは、外周部と同様の関係性となり、最高温度は外周部と比較して6.9~8.1°C高くなった。発熱勾配に着目すれば、SAの有無による勾配の差異は少なく、この点は留意する必要がないと考えられる。

(2) 圧縮強度

図-13、図-14 に模擬体から採取したコア試験体の圧縮強度を示す。材齢 4 週の圧縮強度について、模擬体中央部では SA の有無による差はなかったが、模擬体外周部では SA の添加により圧縮強度の増進が確認された。材齢 13 週では試験体採取場所にかかわらず SA の添加により圧縮強度は若干低くなる傾向を示したが、材齢 52 週では SA を添加した N70-有および H70-有の配(調)合においても圧縮強度の増進が確認された。これらの結果および図-4 より、SA の強度増進作用は、若材齢から材齢 4 週までが顕著であり、材齢 13 週では低下するものの、材齢 52 週での長期強度には影響がないといえる。

4. まとめ

本研究は、普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを使用し、セメント質量の 70%を BFS に置換したコンクリートに対し、出荷時に液体の SA を単位水量の一部として添加した場合の圧縮強度発現性、長さ変化、および中性化抵抗性への影響を検討することを目的として実施した。

本検討で得られた結果を以下に示す。

- (1) 20℃封緘養生の条件では、SA の添加により、材齢 1 日、3 日ともに SA の強度促進効果が確認された。H70 に SA を添加した系は、BB よりも高い圧縮強度を示した。SA による強度増進効果は、材齢 13 週まで発現、材齢 52 週で収束した。
- (2) 標準養生では、材齢 1、4 週では SA の効果が確認されたが、材齢 4 週以降の強度増進が小さく、材齢 13 週の圧縮強度は若干低下した。SA による強度促進効果は養生方法により異なり、標準養生のように十分に水分が供給されるケースでは、SA の強度促進効果は初期材齢に認められるだけである。

- (3) SA は収縮低減剤相当の高い収縮低減効果を発現するとともに、乾燥期間が長期になっても収縮低減効果が継続する。
- (4) SA を添加した中性化抵抗性は、前養生条件に関わらず、圧縮強度発現に対して高い中性化速度を示す。強度が発現していても、炭酸ガスが流入しやすい構造になっている可能性が示唆された。
- (5) 模擬体による圧縮強度は、材齢 13 週では試験体採取場所にかかわらず SA の添加により圧縮強度は若干低くなる傾向を示したが、材齢 52 週では SA を添加した N70-有および H70-有では圧縮強度の増進が確認された。発熱履歴、強度発現ともに SA 添加による悪影響は認められなかった。

参考文献

- 1) 椎名貴快, 田中徹, 小池晶子, 中村英佑: 暑中環境下での高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの基本特性と施工品質評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.157-162, 2017
- 2) 大橋英紀, 土師康一, 田中徹, 椎名貴快: 高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの低温環境下でのフレッシュ性状と強度に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.159-164, 2018
- 3) 守屋健一, 田中徹, 猪瀬亮, 西祐宜: 硫酸塩系硬化促進剤と高炉スラグ微粉末を併用したコンクリートの強度発現性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.133-138, 2024
- 4) 土木学会: 2022 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, pp.45, 2023.3