

超低収縮・低発熱型設計基準強度 50MPa 級コンクリートの開発

Development of Ultra-low Shrinkage and Low Heat Generation Concrete with a Design Strength around 50MPa

R & Dセンター 基 哲義 AKIYOSHI DAI
 R & Dセンター 佐々木 亘 WATARU SASAKI
 土木設計部 恩田 陽介 YOUSUKE ONDA
 R & Dセンター 松田 拓 TAKU MATSUDA

現場での施工を目的として、橋梁上部工で用いられる設計基準強度 50MPa 級のコンクリートを対象に、フェロニッケルスラグ細骨材と複数の産業副産物を使用した超低収縮・低発熱コンクリートを開発した。早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末の質量比を変化させ、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮および発熱特性を確認した。その結果、早強セメントと膨張材の結合材中の質量比を 30%程度とすることで、材齢 3 日での圧縮強度を一般的な 50MPa 程度の早強コンクリートと同程度にできることが分かった。また、この配合条件で乾燥収縮ひずみが極めて低減され、水和発熱による発熱量も大きく低減されることが分かった。

キーワード：混和材，フェロニッケルスラグ細骨材，低収縮，低発熱

For the purpose of on-site casting, ultra-low shrinkage and low heat generation concrete for bridge superstructure with design strength around 50MPa using ferronickel slag sand and several types of industrial by-products was developed. Changing the mass ratio of high-early-strength portland cement and blast furnace slag, compressive strength, elastic modulus, drying shrinkage and heat generation characteristics were examined. As a result, it was found that by adjusting the mass ratio of high-early-strength portland cement containing expansive additive in the binder to around 30%, the compressive strength at 3 days of age can be made comparable to conventional concrete with design strength around 50 MPa using high-early-strength portland cement. Furthermore, these mixture proportions realized a significant reduction in drying shrinkage and heat generation due to hydration.

Key Words: Supplementary cementitious materials, Ferronickel slag sand, Low shrinkage, Low heat generation

1. はじめに

筆者らはこれまでに産業副産物を大量に使用することで環境負荷を低減し超低収縮、かつ高強度なコンクリートを開発している¹⁾²⁾。このコンクリートは超高強度コンクリートの技術をベースとしており、非常に高い圧縮強度を発現するものの、水和熱が小さく、収縮ひずみも小さいことから、ひび割れの発生リスクを大きく低減している。しかし、一般的に使用されているコンクリートと比較すると、非常に高い圧縮強度が過剰となる場合がある。そこで、本検討では現場での施工を目的として、設計基準強度 50MPa 級で広く使用されている一般的なコンクリートと、同程度の強度発現性や性状が確保でき

るかを実験により検討した。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

試験に使用した材料を表-1 に示す。物性値にはそれぞれの材料の代表的な値を示す。結合材には早強ポルトランドセメントのほか、銘柄の異なる 2 種類の高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェームなど多くの産業副産物を使用した。細骨材は空隙構造が粗大で吸水率の大きいフェロニッケルスラグ³⁾ (以下、FNS) を用いた。本検討においても FNS は既報²⁾と同様に気乾状態 (以下、気乾 FNS) で使用した。使用した気乾 FNS の

表-1 使用材料

種類	物性, 主成分等	密度 [g/cm ³]	記号	
セメント	早強ポルトランドセメント	3.14	H	
膨張材	石灰系, 早強タイプ (ブレン比表面積5,000cm ² /g程度)	3.19	Ex1	Ex
	石灰系	3.16	Ex2	
高炉スラグ微粉末	4000ブレン	2.88	BF1	BF
	4000ブレン	2.89	BF2	
フライアッシュ	JIS I種	2.40	FA	
シリカフェーム	BET比表面積17.0m ² /g	2.25	SF	
細骨材	フェロニッケルスラグ細骨材 吸水率2.70%, <u>気乾状態</u>	2.83	FNS	
	鹿沼産硬質砂岩砕砂	2.63	S1	
	佐野産石灰砕砂	2.73	S2	
粗骨材	鹿沼産硬質砂岩砕石2005	2.63	G1	
	佐野産石灰砕石2005	2.74	G2	

種類	物性, 主成分等	密度 [g/cm ³]	記号
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	-	SP
消泡剤	エステル系	-	DF
AE剤	ラウリル酸イミダゾリン誘導体	-	AE1
	ノニオン系特殊界面活性剤 カルボン酸系活性剤	-	AE2
	変性ロジン酸化合物系陰 イオン界面活性剤	-	AE3

注) 砕砂, 砕石の密度は表乾密度, 各材料の密度・物性値は一例

表-2 配合の条件および化学混和剤の使用量

種類	配合名	配合の条件								使用した膨張材と高炉スラグ微粉末および骨材の種類				化学混和剤の使用量 [B × wt%]				
		単位水量 [kg/m ³] W	水結合材比 W/B	結合材の質量比率 [%]				単位粗骨材絶対容積 [L/m ³]	空気量 [%]	EX	BF	S	G	SP	DF	AE1	AE2	AE3
				H+EX	BF	FA	SF											
検討 配合	HE20BF35	130	0.30	20	35	30	15	350	4.5	EX1	BF1	FNS	G1	1.45	0.0045	0.002	-	-
	HE25BF30	130		25	30	30	15	350	4.5	EX1	BF1	FNS	G1	1.45	0.0045	0.002	-	-
	HE30BF25	130		30	25	30	15	350	4.5	EX1	BF1	FNS	G1	1.45	0.0045	0.002	-	-
	HE40BF15	130		40	15	30	15	350	4.5	EX1	BF2	FNS	G2	1.25	0.0045	-	0.002	-
比較 配合	34HE	165	0.34	100	-	-	-	350	4.5	EX2	-	S2	G1	1.00	-	-	-	0.001
	40HE	165	0.40	100	-	-	-	375	4.5	EX2	-	S1	G1	0.50	-	0.008	-	-

含水率の実測値は 0.1%以下であり, 配合計算上は絶乾状態として取り扱った。粗骨材は一般的な砕石を用いた。

検討した配合条件と化学混和剤の使用量を表-2 に示す。より一般性の高い性状を得る目的で, 水結合材比は既報²⁾より大きい 0.3 とし, 結合材のうち強度に与える影響が大きい早強ポルトランドセメントの比率を変化させ確認した。本検討において, 膨張材は 20kg/m³ でフライアッシュおよびシリカフェームは結合材中の質量比率でそれぞれ 30%と 15%とし, 早強ポルトランドセメントを比表面積が比較的近い高炉スラグ微粉末 4000 で置換した。単位水量は 130kg/m³, 粗骨材の絶対容積は 350L/m³ とし, 空気量は 4.5%とした。化学混和剤の使用量は同一種類の材料を使用した配合は 1.45%とした。比較対象のコンクリートは橋梁上部工等で用いられる圧縮強度の特性値が 50MPa 程度を想定した配合 (34HE, 40HE) とし, 結合材には早強ポルトランドセメントおよび膨張材を使用した。細骨材は硬質砂岩砕砂または石灰砕砂とし, 粗骨材には硬質砂岩砕石 2005 を用いた。

(2) 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは一部の配合を除き公称容量 55 リットルの強制二軸ミキサにより行い, 1 バッチ当たりの練混ぜ量は 40 リットルとした。練混ぜは, 水と粗骨材を除いた材料による空練りを 30 秒間行った後, 水を投入してモルタル練りを 90 秒間行い, 掻き落とし後,

粗骨材を投入しコンクリート練りを 90 秒間行った。排出後は速やかにフレッシュ性状の確認と各試験用試料の採取を行った。

(3) 試験項目および方法

強度発現性の確認として, すべての配合で圧縮強度試験 (JIS A 1108) および静弾性係数試験 (JIS A 1149) を実施した。供試体は材齢 1 日で脱型して標準水中養生を行なった。試験材齢は表-3 に示すように一部の配合を除き 1 日, 3 日, 7 日, 28 日, 91 日とした。

収縮特性試験は 34HE を除く配合において「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」⁴⁾を参考に, 100×100×400 mm 角柱供試体の中央に埋め込み型ひずみ計を設置して行った。供試体は打込み直後よりポリエステルフィルムにより封緘状態とし, 環境温度 20℃で存置した。その後, 材齢 7 日で脱型し, 環境温度 20℃湿度 60%の恒温恒湿室内で 6 面乾燥状態とし測定を行った。

発熱特性検討は HE25BF30 と 34HE の 2 配合について簡易断熱試験を行い, 温度依存型の水和発熱速度式⁵⁾を求め, 打込み温度 20℃における断熱温度上昇曲線を算出して比較した。算出に使用した密度は配合値とし, 比熱はコンクリート標準示方書に示されている式⁴⁾を用いて密度より算出した。熱伝導率は試験³⁾により求めた。熱拡散率はコンクリート標準示方書に示されている式を用いて算出した。

表-3 圧縮強度と静弾性係数の試験材齢

	配合名	圧縮強度試験				
		材齢1日	材齢3日	材齢7日	材齢28日	材齢91日
検討 配合	HE20BF35	○	○	◎	◎	◎
	HE25BF30	○	○	◎	◎	◎
	HE30BF25	○	○	◎	◎	◎
	HE40BF15	◎	◎	◎	◎	◎
比較 配合	34HE	-	-	-	◎	-
	40HE	◎	◎	◎	◎	◎

◎は静弾性係数試験も実施

表-4 化学混和剤の添加量とフレッシュ性状

	配合名	化学混和剤の使用量 [B×wt%]					スランプ [cm]	空気量 [%]
		SP	DF	AE1	AE2	AE3		
検討 配合	HE20BF35	1.45	0.0045	0.002	-	-	12.5	5.0
	HE25BF30	1.45	0.0045	0.002	-	-	16.5	5.4
	HE30BF25	1.45	0.0045	0.002	-	-	5.5	5.5
	HE40BF15	1.25	0.0045	-	0.002	-	23.0	5.5
比較 配合	34HE	1.00	-	-	-	0.001	22.5	3.9
	40HE	0.50	-	0.008	-	-	13.5	3.5

温度依存型の水和発熱速度式は、練り上がったコンクリートのほかに温水を用いて練上り温度+10℃程度に加温したものと、冷水を用いて練上り温度-10℃程度に冷却したものの簡易断熱試験⁵⁾より求めた。

3. 実験結果

(1) フレッシュ性状

化学混和剤の添加量とフレッシュ性状の試験結果を表-3に示す。検討配合の HE40BF15 を除く同一高炉スラグ微粉末を使用した配合では、早強ポルトランドセメントと膨張材の質量比率を高めるとスランプが低下していることが分かる。質量比率25%と30%を比較すると同じ化学混和剤の使用量でもスランプが 10cm 以上低下した。しかし、HE40BF15 のように高炉スラグ微粉末や粗骨材ならびに化学混和剤の種類によっては、早強ポルトランドセメントと膨張材の質量比を40%まで高めても大きいスランプが得られることを確認した。

検討配合と比較配合とを比べると、単位水量や水結合材比を低減しているため、同程度のスランプを得るためには化学混和剤の使用量を増やす必要があることが分かる。

(2) 圧縮強度

材齢 91 日までの材齢と圧縮強度の関係を図-1に示す。検討配合では早強ポルトランドセメントと膨張材の質量比率を高めると圧縮強度が高くなり、材齢 91 日まで緩やかに強度増進していることが分かる。一方、比較配合においては材齢 28 日以降の強度増進は小さい。図-2の

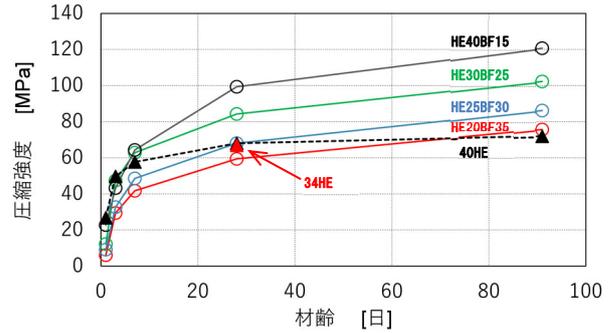


図-1 材齢と圧縮強度の関係 (材齢 91 日まで)

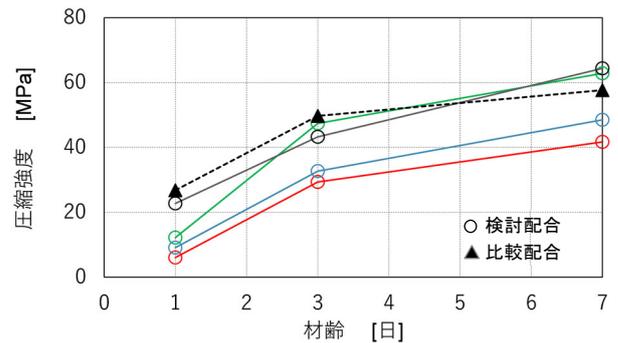


図-2 材齢と圧縮強度の関係 (材齢 7 日まで)

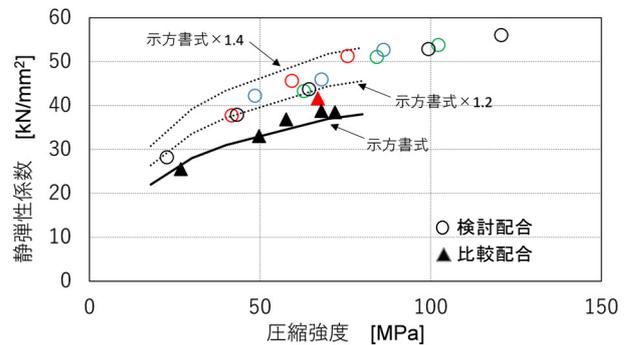


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

材齢 7 日までの材齢と圧縮強度の関係をみると、初期の強度発現が検討配合で若干遅いことが分かる。例えば、材齢 3 日での圧縮強度を比較配合と同程度にするためには、早強セメントと膨張材の質量比が30%程度必要であることが分かる。

(3) 静弾性係数

圧縮強度の測定時に併せて測定した静弾性係数を圧縮強度との関係として図-3に示す。図中には参考として、コンクリート標準示方書に示される圧縮強度とヤング係数の関係式から求められる値、ならびにその値を1.2倍および1.4倍した値も併せて記載した。この図から検討配合の静弾性係数は、一般的なコンクリートに比べて高く、示方書式の1.2~1.4倍程度になることが分かる。

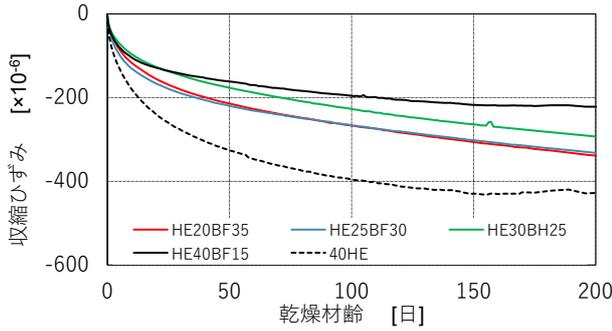


図-4 材齢と収縮ひずみの関係

ただし、早強ポルトランドセメントの質量比率による差は小さい。静弾性係数は配合要因のなかで骨材の影響を大きく受け、本コンクリートは FNS の特性により高い静弾性係数を示したものと考えられる³⁾。

(4) 収縮特性

材齢7日の乾燥開始を起点とした材齢と収縮ひずみの関係を図-4に示す。検討配合の早強セメントと膨張材の質量比率を大きくすると収縮ひずみが小さくなるのが分かる。これは乾燥開始時の圧縮強度の関係と一致する。乾燥開始時の強度が高く組織が緻密となることで乾燥収縮が小さくなったと考えられる。

材齢28日の圧縮強度が同程度のHE25BF30と40HEの収縮ひずみを比較すると、HE25BF30が材齢200日後の約半年時点で 300×10^{-6} 程度であるのに対して40HEは約 430×10^{-6} であり、HE25BF30の収縮ひずみが小さいことが分かる。このことより、検討配合のようにFNSを使用し複数の産業副産物を使用することで収縮ひずみが低減できることが確認できた。

(5) 発熱特性

HE25BF30と34HEの2配合について、温度依存型の水和発熱速度式により計算した断熱温度上昇曲線を図-5に示す。比較配合の34HEと比べ、検討配合のHE25BF30は断熱温度上昇量が半分以下であることが分かる。FNSを使用し複数の産業副産物を使用することで、圧縮強度を確保しながら発熱量を抑えられることが確認できた。

4. まとめ

現場での施工を目的として、FNSと複数の産業副産物を使用し、早強ポルトランドセメントを使用した設計基準強度50MPa級で広く使用されている一般的なコンクリートと同程度の強度発現性や性状を有する超低収縮・

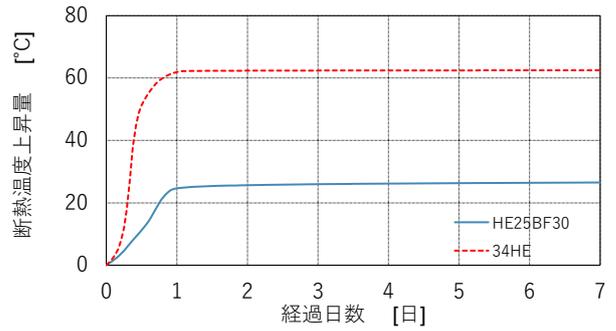


図-5 温度依存型の水和発熱速度式により計算した断熱温度上昇曲線

低発熱コンクリートを開発した。本実験における検討配合において、以下の知見が得られた。

- ① 早強ポルトランドセメントと膨張材の質量比率を高めるとスランブが低下するが、高炉スラグ微粉末や粗骨材ならびに化学混和剤の種類によってはスランブを確保することが可能である。
- ② 早強セメントと膨張材の結合材中の質量比を30%程度とすることで、材齢3日での圧縮強度を一般的な設計基準強度50MPa級の早強コンクリートと同程度とすることができる。
- ③ 一般的な設計基準強度50MPa級のコンクリートと同程度の初期強度を確保しつつ、収縮ひずみおよび発熱量を低減することが可能である。

参考文献

- 1) T.Matsuda, T.Noguchi, M.Kanematsu, R.Mine: Ultralow Shrinkage and High Strength Concrete without Portland Cement, Proceedings of the fib congress 2018.
- 2) 恩田陽介, 佐々木亘, 基哲義, 松田拓: 乾燥したFNSを用いた超低収縮高強度繊維補強コンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.351-356, 2021.10
- 3) 松田拓, 蓮尾孝一, 野口貴文: 細骨材の違いが超高強度コンクリートの性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp. 1117-1122, 2015. 7
- 4) 日本コンクリート工学協会: 超流動コンクリートの研究委員会(II), pp.209-210, 1994.5
- 5) 基哲義, 樋口正典, 梶貢一, 澤本武博: 簡易断熱試験による温度依存性を考慮した発熱速度推定に関する研究, 第27回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.543-548, 2018.11