

報告 高炉スラグ高含有セメントを用いた場所打ち杭用コンクリートの基礎的性質

依田 和久^{*1}・新谷 彰^{*2}・青木 雅路^{*3}・齊藤 和秀^{*4}

要旨: CO₂の排出量削減を目的として高炉スラグ微粉末(ブレン 4000cm²/g程度)の含有率を65%程度まで高めたセメント(以下HS)を用いたコンクリートの用途開発を行っている。有望な汎用的用途の一つとして、中性化の進行の懸念がなく、高炉セメントB種が現状多く用いられている場所打ち杭が挙げられる。ここではHSセメントを用いたコンクリートの場所打ち杭への適用を目指し、第一段階としてコンクリートの基礎的性質について検討した結果を示す。検討の結果、材料分離抵抗性や圧縮強度などの基礎的性質において目標とするコンクリートが得られた。

キーワード: CO₂, 高炉スラグ微粉末, 場所打ち杭, コンクリート, 基礎的性質, 材料分離抵抗性, 圧縮強度

1. はじめに

ポルトランドセメント製造時の焼成(1450℃)に要するエネルギーは、原料の石灰石から分離・排出されるものと合わせてCO₂換算で国全体の約4%を占める。一方、コンクリート構造体のエネルギー・CO₂原単位の60~70%がコンクリートに由来するものであり、そのほぼ全量がセメントに由来するなど、CO₂排出量に及ぼすセメントの影響は大きい。筆者らの研究グループではCO₂削減効果の向上を目的として高炉スラグ微粉末(ブレン4000~6000cm²/g程度)を65%程度含む新しいセメント(以下HS)を用いた構造部材への用途開発¹⁾を行っている。用途として既報の高強度コンクリート^{2,3)}に加え、有望なものの一つとして高炉セメントB種(以下BB)が多く用いられている場所打ち杭が挙げられる。場所打ち杭のコンクリートは、中性化の進行の懸念がなく、脱型時の初期強度の確保を考慮する必要がないことなどから用途として適当と言える。本研究では、セメントにHSを用いたコンクリートの場所打ち杭への適用を目指し、コンクリートの基礎的性質について検討した結果を示す。

2. コンクリートの目標性能

場所打ち杭用のコンクリートは、水中での打設となるため十分な流動性と材料分離抵抗性が必要なことや強度確保が課題として挙げられる。これらに関し、汎用のBBを使用したコンクリートと比較して、環境負荷低減の効果を上げるため単位セメント量を極力抑制した上で、材料分離抵抗性と強度確保を目指す。本報告の範囲である室内実験におけるコンクリートの目標性能を以下に示す。

(1) 材料分離抵抗性: BBを用いたコンクリート以上

(2) 圧縮強度: 構造体強度推定値 36N/mm²以上

3. 実験計画

3.1 実験概要

実験は、全て室内実験であり、実験の要因と水準を表-1に示す。実験はI~IIIに分けて実施した。実験Iでは、セメント種類をHSとBBとし、水セメント比を40, 50, 55%としたときのコンクリート基本的性状、ブリーディング量、凝結、圧縮強度、静弾性係数を調べた。実験IIでは、実験Iの結果を踏まえ、HSとBBで同程度の強度となる割合について基礎性状を比較した。セメント種類をHSとBBとし、水セメント比を34.7, 47.0, 58.3%(BBは37.0, 50.0, 62.0%)としたときのスランプおよび空気量の経時保持性(コンクリートを練舟に静置)、ブリーディング量およびL型フロー試験による材料分離抵抗性を主に調べた。実験IIIでは、実験I及びIIで課題となったブリーディング抑制を目的に、実験要因を細骨材

表-1 実験の要因と水準

実験	目的	実験要因	水準1	水準2	水準3
I	基本的性状の把握	セメント種類	HS	BB	—
		水セメント比(%)	40	50	55
II	基本的性状の把握	セメント種類	HS	BB	—
		水セメント比 ^{*1} (%)	34.7(37.0)	47.0(50.0)	58.3(62.0)
III	ブリーディング抑制効果検討	単位セメント量 ^{*2} (kg/m ³)	387(182)	394(185)	400(188)
		AE減水剤種類	KP103(HS専用)	EX20	EX60
		細骨材の粗粒率(FM)	2.61	2.57	2.54

*1. 実験Iの結果から()内のBBと同一強度が得られるHSのW/C
*2. ()は単位水量

*1 鹿島技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 博士(工学) (正会員)

*2 鹿島建設 東京建築支店 建築工事管理部 課長 (前・鹿島技術研究所) (正会員)

*3 竹中工務店技術研究所 建設技術研究部地盤・基礎部門 マネージャー

*4 竹本油脂 第三事業部 研究開発部 コンクリートグループ グループリーダー (正会員)

のFM, 単位セメント量, AE 減水剤の種類として実施した。細骨材の FM は 2.61 を標準とし, このほかに 2.57 と 2.54 の 2 水準設けた。試験項目及び方法を表-2 に示す。コンクリートの材料分離は一般的に水の分離と粗骨材の分離が挙げられる。前者について検討するためブリーディング試験, 後者のため単位粗骨材量の差を比較できる L 型フロー試験⁴⁾ を実施した。強度性状は圧縮強度と静弾性係数について調べた。L 型フロー試験では, 図-1 に示す通り, A 室にコンクリートを充填させた後, 棒状振動機 (8070r.p.m, 60V) を A 室断面中央部に深さ 700mm まで挿入し仕切り版を引き上げ, B 室の先端部 (流動距離 800mm) にコンクリートが到達するまで振動させ, この時のフロー速度を調べた。単位粗骨材量は, 「JIS A 1119 ミキサで練り混ぜたコンクリート中のモルタル量の差および粗骨材量の差の試験方法」を参考にして A 室下部と先端部から試料を採取し, 5mm ふるいでモルタル分を洗い流して粗骨材を採取し, 各部の粗骨材量の質量割合を求めた。この単位粗骨材量の差を, 粗骨材の材料分離抵抗性の指標とし, JIS A 1119 に示されている 5% 以下を目安の値として採用した。スランプおよび空気量は

経時変化についても最長 120 分まで調べた。コンクリートの種類と調合を表-3 に示す。単位水量は, 水中コンクリートとして JASS 5-2009 に示されている通り, 最大値 200kg/m³ とした。実験における練上り時のコンクリートの目標値を以下に示す。スランプおよび空気量の目標値は運搬時のロスを考慮して定めた。

- スランプ: 22.0±1.0cm (荷卸時 21.0cm)
- 空気量: 5.0±0.5% (荷卸時 4.5%)
- コンクリート温度: 20±1°C
- ブリーディング量: 0.3cm³/cm² 以下⁵⁾

表-2 試験項目及び方法

区分	試験項目	試験方法	実験		
			I	II	III
フレッシュ	基本的性状*1	脚注参照	○	○	○
	経時保持性 (120分まで)		—	○	—
	ブリーディング	JIS A 1123	○	○	○
	L型フロー試験	本文参照	—	○	—
強度	凝結	JIS A 1147	○	—	—
	圧縮強度*2	JIS A 1108	○	○	—
	静弾性係数*2	JIS A 1149	○	—	—

*1.スランプ (JIS A 1101), 空気量 (JIS A 1128),
コンクリート温度 (JIS A 1156), 練上り状態 (目視)
*2.標準養生とし, 材齢は3, 7, 28, 91日

表-3 コンクリートの種類と調合

実験	記号	セメント種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤		細骨材粗粒率 FM
					水	セメント	細骨材	粗骨材	種類	添加量 (C* × %)	
I	HS40	HS	40.0	46.8	185	463	760	866	KP103	0.70	2.61
	HS50		50.0	49.8	182	364	855	866		0.70	
	HS55		55.0	50.6	182	331	885	866		0.70	
	BB40	BB	40.0	44.6	200	500	696	866	EX20	0.30	
	BB50		50.0	48.3	195	390	805	866		0.20	
	BB55		55.0	49.3	194	353	840	866		0.20	
II	HS34.7	HS	34.7	44.3	187	539	687	866	KP103	1.00	2.61
	HS47		47.0	49.2	182	387	835	866		0.70	
	HS58.3		58.3	51.1	182	312	901	866		0.65	
	BB37	BB	37.0	43.4	200	541	661	866	EX60	0.75	
	BB50		50.0	48.3	195	390	805	866		0.20	
	BB62		62.0	50.4	193	311	878	866		0.20	
III	LK1	HS	47.0	49.2	182	387	835	866	KP103	0.70	2.61
	LK2									0.68	2.57
	LK3									0.65	2.54
	MK2			48.8	185	394	821	866	EX60	0.64	2.57
	ME2									0.70	
	HK2									0.62	
	HE2									0.65	
				48.3	188	400	808	866	EX60	0.65	

*単位セメント量 (kg/m³)

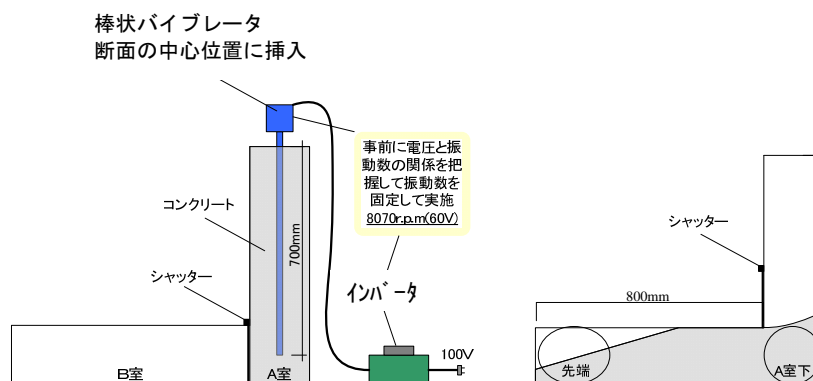


図-1 L 型フロー試験装置

3.2 使用材料

実験に使用したセメントの物理的・化学的性質を表-4に、その他の材料を表-5に示す。AE減水剤のうち、KP103はHS用でAE減水剤のJIS規格に適合する範疇にて、高炉スラグ高含有セメント特有の性質である流動保持性の低下を抑制するものとして開発した。細骨材において砕砂と山砂の混合比は質量比(%)で80:20を基本としたが、実験Ⅲでは、実験の目的に合わせて75:25、70:30についても検討を行った。

表-4 セメントの物理的・化学的性質

記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	化学成分(%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
HS	2.98	4000	28.2	11.0	48.8	5.0	3.4
BB	3.04	3850	26.1	9.2	54.1	3.6	2.3

表-5 使用材料

区分	種類	物性等
細骨材*	砕砂	東京都八王子産, 表乾密度: 2.64 g/cm ³ , 吸水率: 0.98%, 粗粒率: 3.04
	山砂	千葉県富津産, 表乾密度: 2.61 g/cm ³ , 吸水率: 1.35%, 粗粒率: 1.44
粗骨材	碎石	奥多摩産, 表乾密度: 2.65 g/cm ³ , 粗粒率: 6.64, 吸水率: 0.60%, 実積率: 61.1%
水	上水道水	調布市
AE減水剤	KP103	密度: 1.08 g/cm ³ , HSセメント専用多機能型AE減水剤
	EX20	密度: 1.29 g/cm ³ , 市販のAE減水剤
	EX60	密度: 1.09 g/cm ³ , 市販のAE減水剤(高機能タイプ)

*細骨材の混合比(質量) S1:S2=80:20 (FM 2.61)

4. 実験結果および考察

4.1 実験Ⅰの結果と考察

(1) フレッシュ時の性状

コンクリートの基本的性状に関する試験結果を表-6に示す。練上り時のスランプ、空気量、コンクリート温度は目標値を満足するものが得られた。ブリーディング量を図-2に示す。ブリーディング量は、BBが目標値 0.3cm³/cm²を全て下回ったが、HSはHS50が0.33cm³/cm²と目標値に対し10%大きい値となった。これはスラグの置換率やスランプが大きいことなどが影響しているものと考えられる。凝結試験における始発と終結時間を図-3に示す。HSの始発時間は、BBと同等であった。これに対しHSの終結時間は、水セメント比が大きいほど遅くなる傾向を示したが、次に述べる材齢3日の圧縮強度から実用上問題ない範囲と考えられた。

(2) 強度性状

材齢と圧縮強度の関係を図-4に示す。標準養生においてHSは水セメント比に関わらず、BBと同様に材齢とともに圧縮強度の増進が見られる。

同一材齢でのHSとBBの同一水セメント比の圧縮強度の比較を図-5に示す。50N/mm²程度の比較的高い強度領域ではBBはHSに比べ10%程度高くなった。HSは

BBに比べ、ポルトランドセメントのクリンカー分が少なく、水和に差があるためと考えられる。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6に示す。HSとBBの圧縮強度と静弾性係数の関係は、50N/mm²程度の高い強度領域ではHSはBBに比べ1.5kN/mm²程度高い傾向が見られるが、全般的にみると同等である。このことから、BBと同様にHSも圧縮強度から静弾性係数が推定できると言える。

表-6 フレッシュ時の性状(実験Ⅰ)

記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	状態
HS40	22.0	5.0	19	良
HS50	22.5	4.9	19	良
HS55	22.0	5.0	19	良
BB40	21.5	5.0	20	良
BB50	22.0	4.9	20	良
BB55	22.0	4.8	20	良

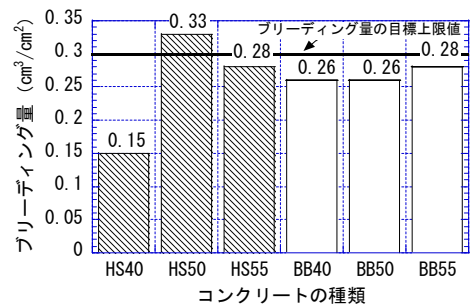


図-2 ブリーディング量(実験Ⅰ)

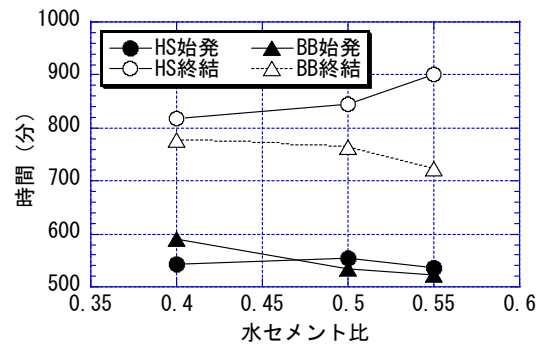


図-3 凝結時間

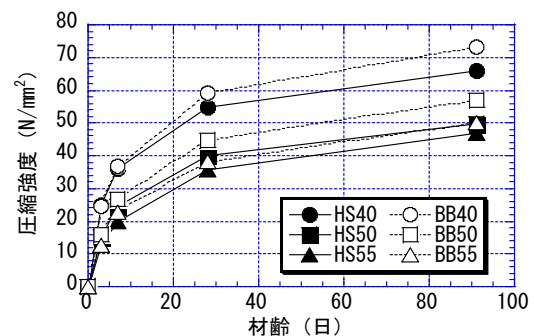


図-4 材齢と圧縮強度の関係

4.2 実験Ⅱの結果と考察

(1) フレッシュ時の性状

スランプ、空気量、コンクリート温度は目標値を満足するものが得られた。スランプの経時変化を図-7に示す。室内練りによるコンクリート試料を静置した試験であるが、HSはBBに比べスランプの経時変化が少なく、経時保持性に優れた結果が得られた。空気量の経時変化を図-8に示す。BBが水セメント比の水準で異なった傾向を示したため比較は難しいが、HSは3水準とも経時90分で1.0%程度の低下が見られ3.5%程度となった。受け入れ検査の管理値が $4.5 \pm 1.5\%$ であることから、実用上問題ない範囲の変動と考えられる。

ブリーディング量の試験結果を図-9に示す。実験Ⅰと同様に、BBはブリーディング量の目標値 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ を満足したが、HSは水セメント比が34.7%と低いものが $0.15\text{cm}^3/\text{cm}^2$ と目標値を満足する値であったが、残りの2つの試料は目標値を上回る結果となった。HSはBBに比べ、高炉スラグ微粉末の量が多く、ポルトランドセメントの量が少ないためセメントの保水性が低いことが原因と考えられる。このため、実験Ⅲで材料、調合的な観点からブリーディング量の低減手法については改めて検討することとした。

L型フロー試験におけるフロー速度と粗骨材量の差を図-10に示す。その結果、HSの単位粗骨材量の差は全て目標値の5%程度以下であり、BBは水セメント比37%の0.5%を除き、6.5~9.3%であった。また単位粗骨材量の差5%を越えるものは、フロー速度が 35cm/s を超える傾向を示し、このフロー速度からも材料分離が懸念される⁶⁾。これらのことからHSの粗骨材の分離抵抗性はBBに比べ、単位粗骨材量の差やフロー速度が小さいことから優れたものであったと言える。

(2) 強度性状

材齢28日の標準養生におけるセメント水比と圧縮強度の関係を図-11に示す。HSの圧縮強度は、実験Ⅱでは実験Ⅰに比べ、各セメント水比で $2 \sim 5\text{N}/\text{mm}^2$ 大きくなった。原因として日間変動のばらつきの影響などが考えられるが、データを蓄積して改めて検討したい。また、目標とする構造体強度推定値 $36\text{N}/\text{mm}^2$ を満足する水セメントを以下の通り試算した。構造体強度推定値 $36\text{N}/\text{mm}^2$ を設計基準強度 F_c とし、呼び強度 $39(36+3)$ 、調合強度は呼び強度に 2σ ($\sigma = 0.1 \times \text{呼び強度}$)を加算したものとすると $46.8\text{N}/\text{mm}^2(36+3+2 \times 3.9)$ になる。実験ⅠおよびⅡで得られた回帰式に安全率0.9を乗じた式から水セメント比を試算すると、実験Ⅰの水セメント比は41.5%、実験Ⅱでは44.6%となり、今回の実験範囲内であり、また、実用的な水セメント比と言える。

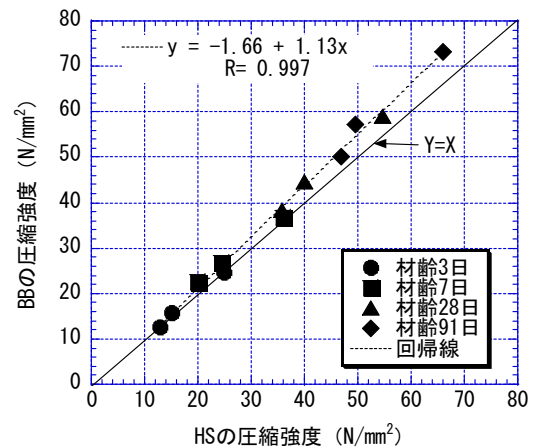


図-5 同一水セメント比の圧縮強度の比較

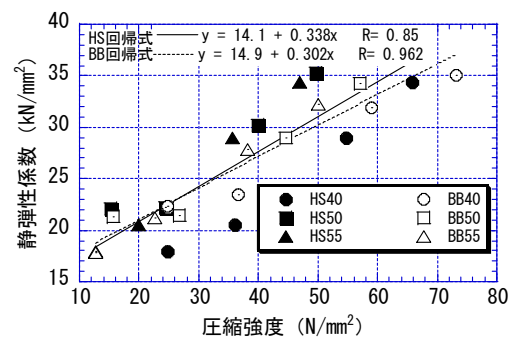


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

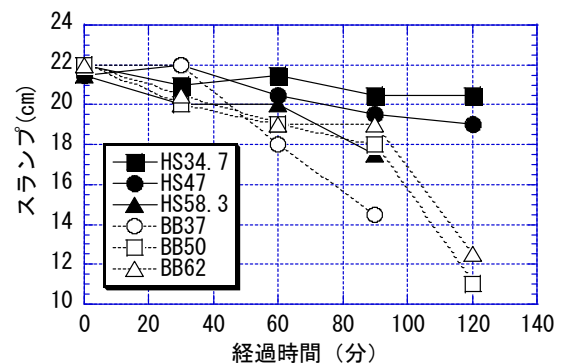


図-7 スランプの経時変化

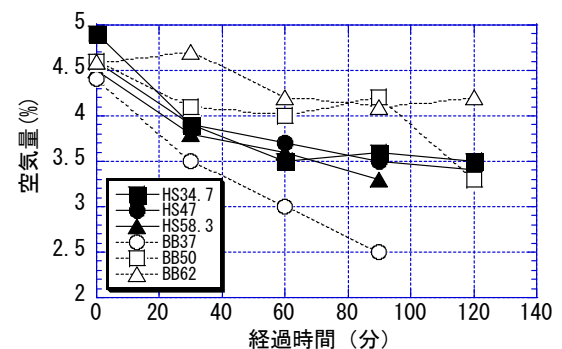


図-8 空気量の経時変化

4.3 実験Ⅲの結果と考察

(1) フレッシュ時の性状

コンクリートの基本的性状を表-7に示す。スランブ、空気量、コンクリート温度とも目標値を満足するとともに、コンクリートの状態は良好であった。

(2) ブリーディング量

ここではコンクリートの種類が7種類となったため、実験の簡略化のため、φ150×300mm（試料打込み高さ270mm、試料量4.8リットル、以降φ150容器という）を使用し、JIS A 1123で規定されている容器（内径250mm、内高285mm、試料量14リットル、以降JIS容器という）を比較のため一部併用した。コンクリートのブリーディング量を図-12に示す。JIS容器で実施したコンクリートのうち、LK1のみブリーディング量0.3cm³/cm²を上回っている。

容器の種類別ブリーディング量を図-13に示す。φ150容器とJIS容器によるブリーディング量の相関係数は0.99と高い。これより、φ150容器のブリーディング量からJIS容器のブリーディング量を推定することで、各コンクリートのブリーディング量を比較した。この結果を図-14に示す。推定ブリーディング量が0.3cm³/cm²を超えているのは、LK1のみであった。細骨材のFMはLK1の2.61に対し、LK2は2.57、LK3は2.54と、細骨材のFMを小さくしたものである。これにより保水性が向上しブリーディング量が抑制される結果となった。また、FM2.57一定とした場合、MK2<LK2<HK2となった。このときの単位セメント量はMK2が394kg/m³、LK2が387kg/m³、HK2が400kg/m³であるが、水セメント比一定のため単位水量もセメント量に追随し、単位セメント量だけで効果を説明するのは難しいが、ブリーディング量の抑制については単位セメント量と単位水量の組合せについても最適なものがあることが推察される。また、AE減水剤の種類の違いでも差が見られる。

ブリーディング量は0.3cm³/cm²以下を満足させるためには、例えば、細骨材のFMを小さくすれば良い。さらに、AE減水剤の種類や、単位セメント量や単位水量などの調合の影響も受けることから、これらも留意したブリーディング抑制対策が必要と言える。

5. まとめ

本実験の結果から高炉スラグ高含有セメント（記号HS）を用いた場所打ち杭用コンクリートについて次のことが言える。

- (1) HSの標準養生による圧縮強度はBBに比べ最大10%程度低くなった。
- (2) 粗骨材の分離についてL型フロー試験における単位粗骨材量の差から、高炉セメントB種と同等以上

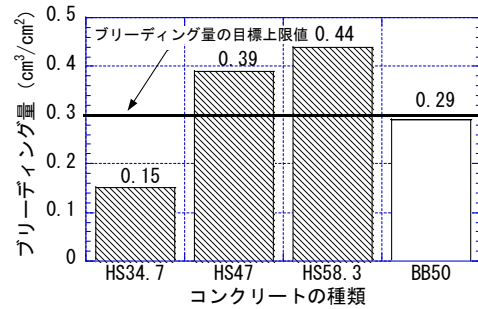


図-9 ブリーディング量（実験Ⅱ）

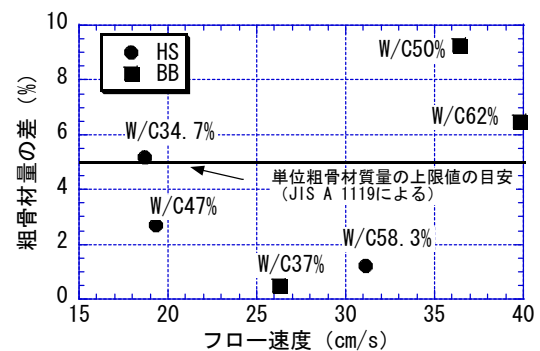


図-10 フロー速度と単位粗骨材量の差

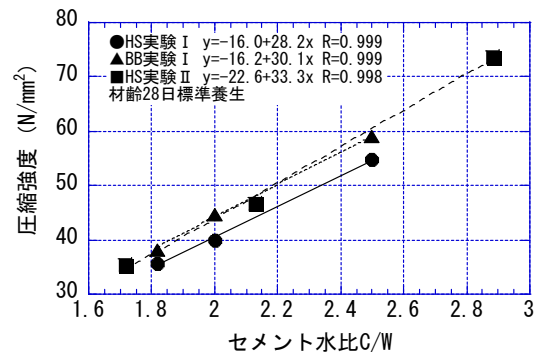


図-11 セメント水比と圧縮強度の関係

表-7 フレッシュ時の性状（実験Ⅲ）

記号	採取時点	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	状態
LK1	5分	22.5	4.8	20	良
	60分	22.0	4.4	19	良
LK2	5分	21.5	4.7	21	良
	60分	20.5	4.4	20	良
LK3	5分	22.0	5.0	21	良
	60分	21.0	4.4	20	良
MK2	5分	21.0	5.0	21	良
	60分	21.5	4.5	21	良
ME2	5分	22.5	5.0	21	良
	60分	21.5	3.8	20	良
HK2	5分	22.5	4.5	21	良
	60分	22.5	4.0	20	良
HE2	5分	22.5	4.5	21	良
	60分	22.0	4.2	21	良

の材料分離抵抗性を有している。

- (3) ブリーディング量を $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 以下とするためには、細骨材の FM を小さくすることは効果がある。ただし、AE 減水剤の種類や単位セメント量などがブリーディング量に影響を与えるため、材料、調査の影響も踏まえた総合的な対策が必要となる。
- (4) セメント水比とコンクリートの圧縮強度の回帰式から所要の強度を確保する水セメント比の試算が可能であり、目標とする構造体強度推定値 $36\text{N}/\text{mm}^2$ を確保することができる。
- (5) スランプや空気量の経時保持性は高炉セメント B 種のものと同等以上であった。

本実験を通じ、場所打ち杭用コンクリートとしての基礎的性質を把握し、高炉セメント B 種のものに比べ概ね同等以上であることを把握した。今後、水中下での挙動や安定液との相性などを検討の上、模擬試験体実験など実用化に向けた取組みを行っていく予定である。

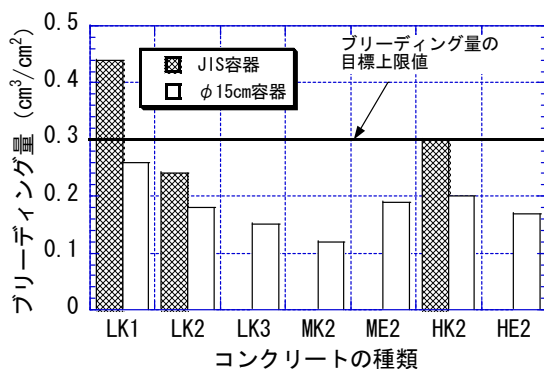


図-12 ブリーディング量 (実験Ⅲ)

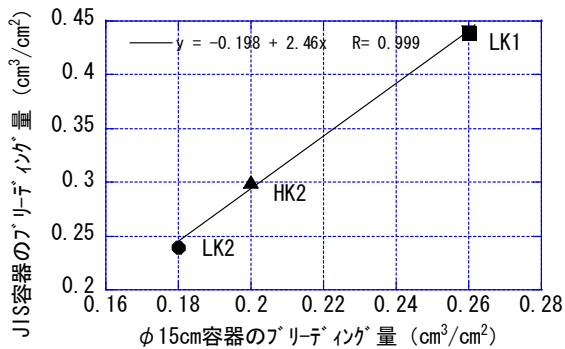


図-13 容器別ブリーディング量の比較

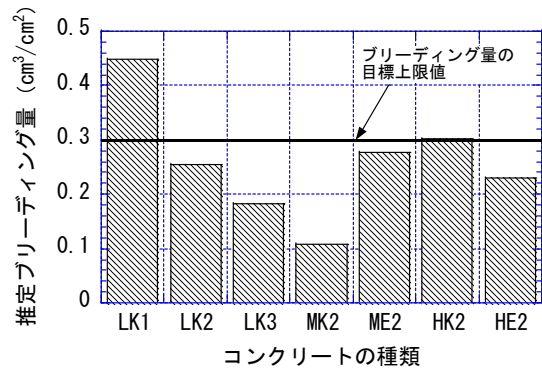


図-14 推定ブリーディング量の比較

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEEDO) の助成による「省エネルギー革新技術開発事業/実用化開発/エネルギー・CO2 ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステムの研究開発」の一環として実施した。共同研究者である東京工業大学 坂井悦郎教授をはじめ、(株) 竹中工務店、鹿島建設 (株)、(株) デイ・シイ、日鉄住金高炉セメント (株)、太平洋セメント (株)、日鉄住金セメント (株) および竹本油脂 (株) の関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 米沢敏男ほか：エネルギー・CO2 ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム，コンクリート工学，Vol.48，No.9，pp.69-73，22010
- 2) 辻大二郎ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性 (その1～3)，日本建築学会学術講演梗概集 (関東)，pp.205-210，2011
- 3) 黒田萌ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いた高強度コンクリートの基礎物性 (その1～3)，日本建築学会学術講演梗概集 (東海)，pp.857-862，2012
- 4) 依田和久，刑部知周，芦沢良一，市川裕嗣：流動化剤を用いた中流動コンクリートの開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.1249-1254，2005
- 5) 日本建築学会編：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案)・同解説，p.84，1991
- 6) 宮澤聡，中村好輝，小澤満洋男，森本博昭：高流動コンクリートに与える細骨材微粒砂の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.31，No.1，pp.1453-1458，2009