論文　高炉スラグ高含有セメントを用いた土木用コンクリートの施工性能に関する実験的検討

橋本　学[*1]・坂井吾郎[*2]・坂田　昇[*3]・辻大二郎[*4]

要旨：高炉スラグ高含有セメント（以下，BC と表記）を用い，スランプ 8cm の土木用コンクリートを対象とした実規模施工性実験により，バイブレータの締固めにおいてかぶり部の充填状況が悪く，十分な施工性能を有していないことが確認された。そこで，BC 配合の各種単位量を変えずに混和剤の添加量のみを増加させ，BC 配合による施工性実験を再度実施し，「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)」[1)]（以下，指針）において適切なスランプを選定することで良好な施工性能が得られること，それにより打込み上下での材料分離がないこと，表層部の出来栄えは良好で十分な緻密性を有することを確認した。

キーワード：高炉スラグ微粉末，高炉スラグ高含有セメント，施工性能，充填性，表面透気

1. はじめに

現在の建設工事では，高炉スラグ微粉末の含有率 40%程度の市販の高炉セメント B 種（以下，BB と表記）が広く使用されているが，CO_2 削減の観点から BB よりもさらに高炉スラグ微粉末の含有率を高めたセメントの使用が望まれる。しかし，高炉スラグ微粉末を多量に含有するセメントとして知られる高炉セメント C 種，高硫酸塩スラグセメント等[2)]は，ブリーディングが多い，初期強度が低い，収縮（自己収縮，乾燥収縮）が大きい，中性化速度係数が速く耐久性の確保が困難などの課題を有しており，現状ではほとんど使用されていない。

このような高炉スラグ高含有セメント特有の課題に対して，最近ではセメント中の SO_3 量を通常のセメントよりも高めることや水セメント比を調整することにより改善する研究がなされている[3),4),5)]。

著者らも，それらの既往の研究を踏まえ，高炉スラグ微粉末を 60～65%含有し，普通ポルトランドセメントと無水石膏の混合によりセメント中の SO_3 量を 3.59%まで高めた高炉セメント高含有セメント（以下，BC と表記）を用いた，スランプ 8cm の土木用コンクリートを対象とした検討を進めている[6),7)]。これまでに，水セメント比 55%の高炉セメント B 種を用いたコンクリートと同等の中性化抵抗性を得るために，水セメント比を 50%とした条件のもとでの検討を進めており，以下の知見を得た。

(1) BC 配合用に試製した混和剤を用いることで，単位水量を大幅に低減させた配合において目標スランプ 8cm のコンクリートを製造できることを確認した。
(2) BC 配合の水セメント比を 5%低減させたことで，圧縮強度は BB 配合と同程度となることを確認した。
(3) BC 配合では単位水量を大幅に低減していることからスランプ 8cm のコンクリートでは，施工性実験から施工性能が必ずしも良好でないことを確認した。

そこで，本論文では，著者らがこれまでに行った施工性実験の結果を「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)」[1)]（以下，指針）に示す材料分離抵抗性，振動締固め性照査図から考察するとともに，指針における適切なスランプの BC 配合によって再度施工性実験を行い，かぶり部の施工性，硬化性状および表層部の緻密性等について検討を行った。

2. これまでに実施した施工性実験の概要

2.1 コンクリートの配合

BB 配合および BC 配合を**表－1** に示す。BC 配合の中性化抵抗性を向上させるため，W/C は BB 配合の 55%に対し 50%と定める一方で，環境負荷低減の観点から単位セメント量については，BB 配合と同様の 300kg/m^3 と定めた。BC 配合について単位セメント量一定の条件のもと，水セメント比低減によって単位水量が少なくなったことで，所定のスランプが確保できなかったため，BC 配合用に試製した AE 減水剤[8)]を用いることで配合選定を行い，所定のフレッシュ性状を満足した。なお，この AE 減水剤は変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体からなるものである。

2.2 実規模モデルによる施工性実験

施工性実験で作製した試験体を**写真－1** に示す。BB 配合および BC 配合ともに図に示す壁部材の一部分を模擬

*1　鹿島建設(株)技術研究所　土木材料グループ　主任研究員　工修
*2　鹿島建設(株)技術研究所　土木材料グループ長　博(工)
*3　鹿島建設(株)土木管理本部　土木技術部長　博(工)
*4　(株)竹中工務店技術研究所　建設材料部　研究主任　工修

表－1　コンクリートの配合

セメント	W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	スランプ (cm)	単位量(kg/m³)						
					W	C	S1	S2	S3	G	混和剤
BB	55.0	20	48.0	8	165	300	262	306	305	955	C×0.7%
BC	50.0	20	48.0	8	150	300	267	311	311	974	C×1.1%

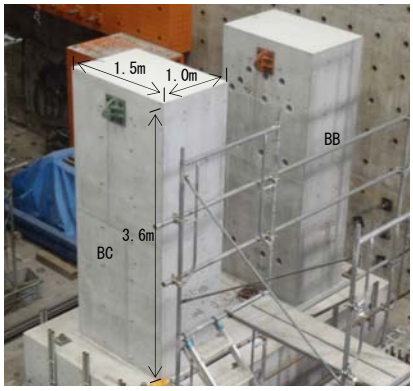
した試験体（幅 1.0m×奥行 1.5m×高さ 3.6m）とし，配筋は主筋および配力筋ともに D13 の 150mm ピッチとした。打込みに関しては，1 層の打上がり高さを 50cm として，計 7 層にて打込みを行った。型枠側面の一部分には，アクリル製の透明型枠を使用し，随時，打込み状況を確認できるようにした。

2.3 施工性実験の結果

スランプの試験結果を**表－2** に示す。また，1 台目の現場到着時のスランプを**写真－2** に示す。表より，出荷時，現場到着時および到着後 30 分経過のスランプを比較すると，BB 配合，BC 配合ともに出荷時から現場到着時までのスランプの低下は 2cm 程度であり，その後は現場到着後 30 分まで顕著な変化は認められない結果であった。また，BC 配合の現着時のスランプは BB 配合とほぼ同じ値であったが，スコップによる攪拌時の状況や目視観察では BC 配合のワーカビリティーが若干劣るように見受けられた。

実規模施工実験において BB 配合および BC 配合の施工性を確認するため，試験体側面のアクリル製の透明型枠からかぶり部へのコンクリートの打上がり状況を目視にて観察した。結果を**図－1** に示す。

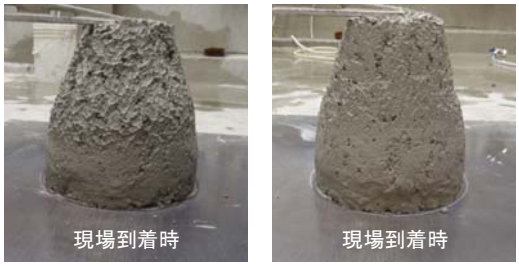
図－1 に示すように，BB 配合では，鉄筋の内側に打ち込まれたコンクリートがバイブレータの振動によってその場で沈み込んでいき，同時にかぶり部の下方から上方にコンクリートが回り込むように充填していく状況が確認された。一方，BC 配合はバイブレータによる振動を加えても鉄筋の内側でコンクリートの山ができ，鉄筋の間隙からこぼれるようにかぶり部へ落下したコンクリートがその後の振動により締め固められて充填していく状況が観察された。また，充填された後には，コンクリートの落下時に巻き込まれた空気泡が型枠表面に残る状況が確認された。



写真－1　実規模施工性実験試験体

表－2　フレッシュ性状試験結果（BB および BC 8cm）

試験項目	目標値	配合	ｱｼﾞﾃｰﾀ車	出荷	運搬後(分)	
					0	30
スランプ (cm)	8.0 cm	BB	1 台目	12.0	8.0	8.0
			2 台目	10.0	10.0	9.5
		BC 8cm	1 台目	10.0	8.0	8.5
			2 台目	10.5	8.5	8.0
空気量 (%)	4.5 %	BB	1 台目	4.5	4.5	3.8
			2 台目	4.1	3.3	3.7
		BC 8cm	1 台目	4.6	4.8	5.3
			2 台目	5.3	5.8	5.5
ｺﾝｸﾘｰﾄ温度 (℃)	－	BB	1 台目	12.0	12.9	13.1
			2 台目	12.0	12.5	13.1
		BC 8cm	1 台目	12.0	12.8	13.4
			2 台目	12.0	12.6	13.4



(a) BB 8cm　　(b) BC 8cm

写真－2　現着時スランプの状況

3. スランプ 8cm の BC 配合の施工性能に関する考察

前述の施工性実験の結果について，指針に示されている良好な施工性が得られる打込みスランプと単位セメント量の関係と対比することにより考察する。**図－2** は指針に示される壁部材における施工性能の照査図のうち，今回の施工性実験の条件に該当するものである。

指針では，「コンクリートの施工性能は，ワーカビリティーを満足するフレッシュコンクリートの代表指標であるスランプで一義的に決定されるのではなく，スランプと材料分離抵抗性に関する単位粉体量と構造条件，施工条件の組合せで定量的に評価できる性能と考えた」（**1.1 適用の範囲の解説**）と記述されている。また，材料分離抵抗性や振動締固め性の照査について，「そのメカニズムはきわめて複雑であるために，現時点ではまだ具体的な方法が整備されるに至っていない。そこで，当面の方法として，材料分離抵抗性や振動締固め性に対する影響の大きい単位セメント量を指標として，これらの性能を確認することとした」（**2.5.4　単位セメント量の解説**）とされている。すなわち，指針の照査図は，コン

クリートの施工性能において単位水量や単位セメント量，水セメント比，細骨材率，セメントの種類などの複数の要因が複雑に絡み合って影響することを踏まえた上で，照査範囲を色分けによって表し，照査結果にある程度の幅を設けることで，流動性および材料分離抵抗性に与える様々な要因を排除し，指標を打込みのスランプと単位セメント量のみに絞って評価することとした簡易的な手法として示されている。評価対象となる配合のスランプと単位セメント量の組合せが，照査図の色の濃い部分（青い太線で示した範囲）に位置する場合には，流動性と材料分離抵抗性のバランスが良好であり，使用材料やその他の配合要因の影響を受けにくく，一般的な振動締固めにより容易に充填することができるものと考えられる。

一方，実験における BB 配合と BC 配合は，ともにスランプ 8cm，単位セメント量 300kg/m^3（赤い円で示された付近）であり，**図－2** によれば同じ施工性能を有する配合と判断される。しかし，実際の施工状況では BB 配合では良好な充填性を示したが，BC 配合については振動締固めによる充填がしづらい状況が確認された。BB 配合と BC 配合の違いを考慮すると，これはスランプと単位セメント量の組合せが照査図の境界線上に位置する場合には，スランプと単位セメント量に加えてセメントの種類，単位水量，水セメント比などの影響が顕著となり，同じスランプであっても使用材料や配合によって振動締固めによる充填の容易さが異なる場合があることを示唆するものと考えられた。

4. 施工性能を改善した BC 配合による施工性実験

前述した BC 配合の振動締固めによる充填性の課題を克服するために，配合を変えずに混和剤の添加量のみを増加させ，**図－2** に示す照査範囲として色の濃い部分に該当する（黒い円で示した箇所）スランプを 14cm とした BC 配合によるかぶり部の施工性および硬化後の表層部の緻密性を評価するため実規模モデルによる施工性実験を行った。

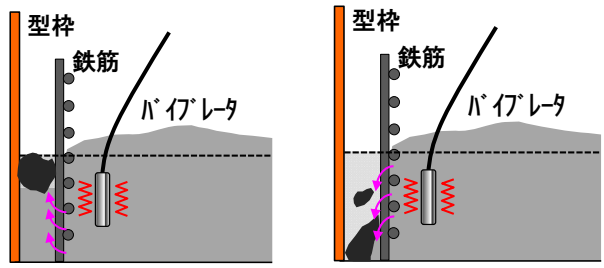
4.1 使用材料およびコンクリートの配合

表－3 に使用材料を，**表－4** にコンクリートの配合を示す。目標スランプ 14cm の BC 配合は，スランプを 8cm から 14cm に変更するために，混和剤の添加量のみをセメント質量に対して 1.1%から 1.45%にまで増加させ，所定のスランプを満足することを確認した。

4.2 試験体の概要および施工方法

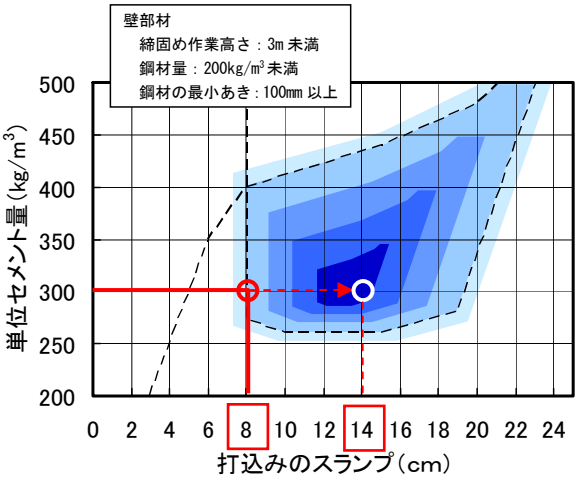
実規模試験では**図－3** に示す壁部材の試験体（幅 0.7m×延長 10.0m×高さ 2.0m）を用い，配筋は主筋を D25，配力筋を D19 でそれぞれ 125mm ピッチにて配置した。打込みは 4t 級のスクイズ式ポンプ（IHI 社製）を用い，

(a) BB の充填状況　(b) BC 8cm の充填状況



(a) BB の充填状況模式図　(b) BC 8cm の充填状況模式図

図－1　スランプ 8cm の充填状況の比較



図－2　材料分離抵抗性，振動締固め性の照査図

表－3　使用材料

項目	記号	種　別
水	W	上水道水(密度；1.00g/cm^3)
セメント	BB	高炉 B 種セメント(密度；3.04g/cm^3)
	BC	高炉スラグ高含有セメント(密度；2.98g/cm^3)
細骨材	S1	東京都西多摩郡奥多摩産砕砂 表乾密度；2.65g/cm^3，粗粒率；3.00
	S2	千葉県市原市万田野産山砂 表乾密度；2.58g/cm^3，粗粒率；2.00
	S3	埼玉県秩父郡横瀬町産砕砂 表乾密度；2.65g/cm^3，粗粒率；3.00
粗骨材	G	東京都西多摩郡奥多摩産砕石 表乾密度；2.66g/cm^3，実積率；60.0%
混和剤	AD-N	試製品 AE 減水剤 (変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体)

φ50mm バイブレータを用いて締固めを行った。養生については，材齢 7 日まで型枠を残置し，その後，シートにて封緘養生を行った。

表－4　コンクリートの配合

セメント	W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	スランプ (cm)	単位量(kg/m³)						
					W	C	S1	S2	S3	G	混和剤
BC	50.0	20	48.0	14	150	300	267	311	311	974	C×1.45%

※混和剤は AD-N を使用（**表－3**）

4.3 フレッシュコンクリートの性状試験項目

フレッシュコンクリートの性状試験項目を**表－5** に示す。スランプは JIS A 1101 に，空気量は JIS A 1128 に従い，コンクリート温度はデジタル温度計にて，それぞれ出荷時，現場到着時点で測定した。スランプについては１車目のみ筒先においても測定した。

また，施工性の確認については，バイブレータによる締固め性状として，打上がり状況をアクリル製型枠越しに目視にて確認を行った。

4.4 試験体における打込み後の確認試験項目

試験体における確認試験項目を**表－6** に示す。**図－3** に表面透気試験測定位置およびコア採取位置を示す。表面透気試験は，底版から高さ 250mm の位置で，それ以降については高さ方向に 500mm ピッチで 4 段とし，各段 2 箇所×4 段=計 8 箇所測定し，各段の 2 箇所の平均値を透気係数とした。コア採取に関しては，躯体中心位置および端から 600mm の位置にて，試験体天端から 200mm の位置より鉛直下向きにφ100mm×h200mm で各 6 本×2 箇所＝計 12 本のコアを採取した。採取したコアの表面部の周方向に 3 等分した箇所のそれぞれを画像として取り込み，画像より骨材径が 5mm 以上となるものを粗骨材として選定した。粗骨材面積の合計を全体の面積より除した値の平均値を粗骨材面積率と定義して，最上段，最上段より 3 本目のコア，最下段それぞれにて算出した。**図－4** に粗骨材面積率の算出方法を示す。さらに，採取したコアの密度の測定を行った後に圧縮強度試験を行い，コア 6 本のうち 2 本ずつを上段，中段，下段と分け，2 本の平均値をコアの圧縮強度として算出した。

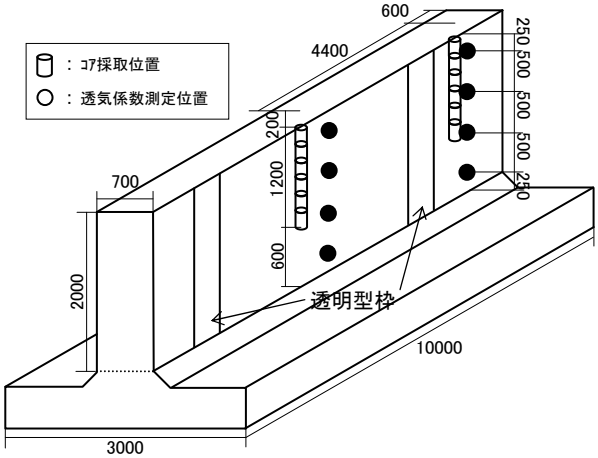
5. 試験結果および施工状況

5.1 フレッシュコンクリートの試験結果

スランプ，空気量およびコンクリート温度の試験結果を**表－7** に示す。また，１台目の現場到着時のスランプを**写真－3** に示す。表より，出荷時，現場到着時，筒先のスランプを比較すると出荷時から現場到着時までのスランプは，1 台目については 1.5cm 程度増加しており，3 台目については 1cm 程度の低下が認められた。筒先におけるスランプについても材料分離などの状況は確認されなかったことから，目標スランプ 14cm とした BC 配合のフレッシュ性状は良好であると判断された。

5.2 施工性の確認結果

目標スランプ 14cm の BC 配合においても鉄筋の内側に打ち込まれたコンクリートがバイブレータの振動によってその場で沈み込んでいき，**写真－4** に示すように，同時にかぶり部の下方から上方にコンクリートが回り込むような状況が確認され，前述した BB 配合と同様に良好な充填状況を示した。以上の結果より，照査図の最も色の濃い位置になるように，BC 配合をスランプ 14cm と変更することで，BC を用い，かつ単位水量，単位セメント量を低減した配合においても，前述のようなかぶ



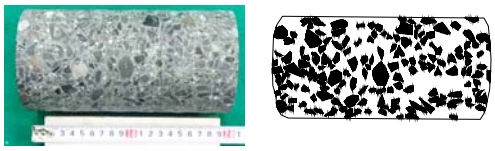
図－3　BC 14cm の試験体

表－5　フレッシュコンクリートの性状試験項目

試験項目	規準	目標値	備考
スランプ試験	JIS A 1101	8.0cm	出荷時，現着時
空気量試験	JIS A 1128	4.5%	出荷時，現着時
ｺﾝｸﾘｰﾄ温度	－	－	5℃以上,35℃以下

表－6　試験体における試験項目

試験項目	摘要	備考
コンクリートの表面状況	目視	材齢 28 日
表層の透気係数	Torrent 法	
コアによる圧縮強度	JIS A 1107	
粗骨材含有率	粗骨材面積による	—



粗骨材面積率(%)＝$\Sigma S_G / S_a \times 100$
S_G：5mm 以上の粗骨材の面積(mm²)
S_a：コア供試体の面積(mm²)

図－4　粗骨材面積率の算出方法

り部分の充填しづらい状況は認められなかった。このことから，**図－2** に示す照査範囲として良好な施工性が得られる色の濃い部分に位置する単位セメント量，スランプの場合には，他の配合条件の影響を受けず良好な施工性が得られるものと考えられる。

5.3 試験体における確認試験結果

(1) 表面透気性

脱型時点での表面透気試験にて得られた各段の平均透気係数を**図－5** に示す。報告[9] によれば，表面透気試験により得られた透気係数は５段階評価で，「優」，「良」，「一般」，「劣」，「極劣」に区分される。図より，BC で目標スランプ 8cm の配合は，目標スランプ 14cm の配合ともに「優」および「良」の範囲内であり，振動締固めによってかぶり部分が良好に充填されているものと考えられる。目標スランプ 8cm の配合と目標スランプ 14cm の配合を比較すると，目標スランプ 14cm の配合の方が透気係数が低くなっており，表層部が緻密であると考えられる。この理由としては，前述のように目標スランプを 14cm とすることで，表層部の充填が良好になったものと考えられる。また，透気係数は下層から上層に従い，「良」から「優」となる傾向が認められ，一般的な表面透気試験の傾向とは逆の結果であった。この理由については測定誤差等も考えられ，今後さらに検討を進める予定である。

(2) 粗骨材面積率

各段において算出した粗骨材面積率を**表－8** に示す。表より，各段ともに同程度の粗骨材面積率であったことから，目標スランプを 8cm から 14cm に変更したことによる材料分離は生じなかったものと考えられる。

(3) コアによる圧縮強度

コアによる圧縮強度の結果を**図－6** に示す。目標スランプ 14cm の BC 配合では，上段から下段にかけて強度が増加する傾向が認められた。この理由として，下層部では圧密（型枠の側圧）によって強度が増進するものと考えられ，スランプが大きくなるにつれて，その傾向がより顕著になるものと考えられる。

また，**図－7** に示すコアの密度からも下段となるに従い，密度が大きくなる傾向があることが確認された。

6. まとめ

BC セメントを用いた目標スランプ 8cm および目標 14cm の配合のコンクリートを用いた施工性実験により，以下の知見を得た。

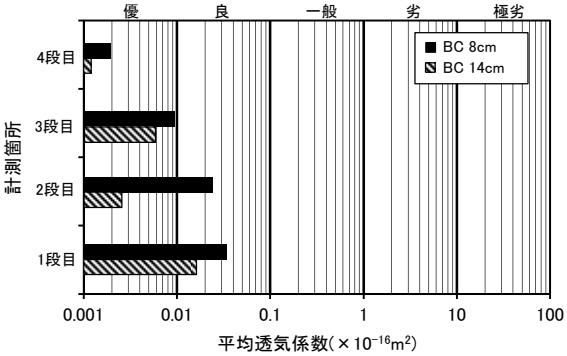
1) 同一のスランプであってもセメントの種類や配合の違いによって施工性能に違いが認められた。
2) BC 配合において単位量を変えず，混和剤の添加量のみでスランプを増大させた場合では，材料分離することなく，振動締固めによる充填性が向上することを確認した。

表－7　フレッシュ性状試験結果

試験項目	目標値	ｱｼﾞﾃｰﾀ車	出荷	運搬後(分)	
				0	筒先
スランプ (cm)	14.0 cm	1 台目	12.0	13.5	15.5
		3 台目	13.5	12.0	－
空気量 (%)	4.5%	1 台目	4.7	6.9	－
		3 台目	5.7	5.2	－
ｺﾝｸﾘｰﾄ温度(℃)	－	1 台目	28.0	28.4	－
		3 台目	27.0	28.4	－

写真－3　BC 14cm のスランプの状態

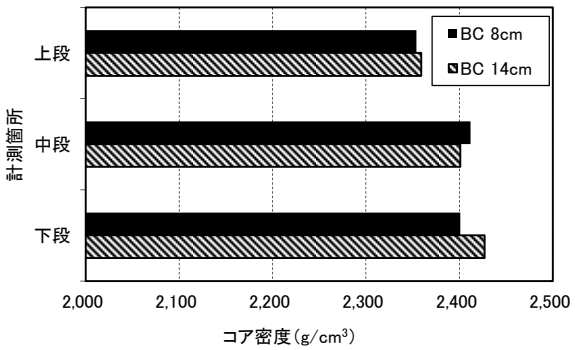
写真－4　BC 14cm の充填状況



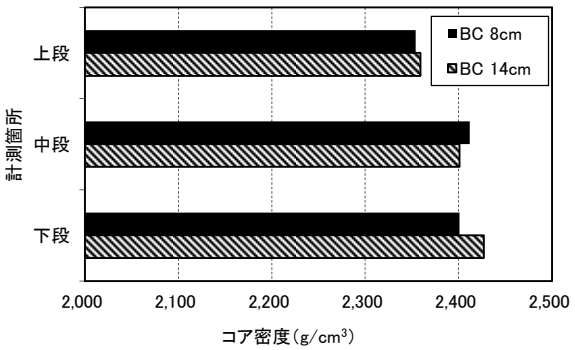
図－5　表面透気試験結果

表－8　各段における粗骨材面積率

測定位置	粗骨材面積率(%)			
	①	②	③	平均
上段	27.7	26.4	25.8	26.6
中段	26.6	25.8	26.8	26.4
下段	26.3	25.9	24.7	25.6



図－6　コアによる圧縮強度試験結果



図－7　コアの密度結果

3）施工性能評価において，配合が照査図の境界線上に位置する場合には，セメントの種類や単位水量の影響が顕著となり，配合によって振動締固めによる充填性の容易さが異なると考えられることから，打込みスランプと単位セメント量に加え，これらについても考慮する必要がある。一方で，照査図の色の濃い部分に位置する場合には，BC 配合においても十分な施工性能を有していることが実験的に確認された。

4）BC 配合において，目標スランプを 8cm から 14cm まで大きくすることで，表層部の出来栄えは良好で，十分な緻密性を有していることを確認した。

謝辞：本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構（ＮＥＤＯ）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）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）と実施した。本研究に関わられた関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

1）　土木学会：施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案），pp.58-73，2007

2）　近藤連一：セメント化学のシーズとニーズ，コンクリート工学，Vol.17，No.2，pp1～11，1979.2

3）　二戸信和ほか：高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度と SO_3 の影響，コンクリート工学年次論文集，30 巻，2 号，pp.121-126，2008.7

4）　金井亮ほか：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 2）SO_3 量と水セメント比がフレッシュ性状と圧縮強度に及ぼす影響，日本建築学会学術講演梗概集，pp.207～208，2011.8

5）　和地正浩ほか：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 3）SO_3 量と水セメント比が自己収縮，乾燥収縮，中性化に及ぼす影響，日本建築学会学術講演梗概集，pp.207～208，2011.8

6）　室野井敏之ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いた土木用コンクリートの基礎物性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集　Vol.35，pp.193-198，2013.7

7）　尾口佳丈ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いた土木用コンクリートの実規模モデルによる施工性実験，コンクリート工学年次論文集　Vol.35，pp.115-120，2013.7

8）　木之下光男ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリート用多機能混和剤の開発，コンクリート工学年次論文集 Vol.35，pp.121-126，2013.7

9）　R.J.Torrent：A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Material and Structures，25 pp.358-365，1992.11