

異種セメント混合による高炉セメントA種相当のコンクリート

ー長谷工式H-BAコンクリートの開発とその製造ー

Portland blast-furnace slag cement type A concrete by blending ordinary portland cement and blast-furnace slag cement type B.

金子 樹*1、大倉 真人*2

1. はじめに

近年、大手ゼネコンなどを中心に環境配慮型のコンクリートの開発や実用化が進められている^{例え1)、2)}。これらのコンクリートの多くは、混合セメントC種やこれに相当する混和材料を添加したもので、ポルトランドセメントの代替として高炉スラグ微粉末やフライアッシュといった混和材を用いたものである。これらの混和材は、製鉄産業などの副産物であることから、製造時に発生する二酸化炭素がポルトランドセメントよりも少ないため、コンクリートに有効に用いることで環境配慮性を謳うものとなる。

混合セメントは、セメント中の混和材の分量により、表-1のようにA～C種に分類される。近年の環境配慮型コンクリートの主は、セメントの一部を混和材料と置き換えることで、二酸化炭素の排出量を削減することから、混和材の分量が多い高炉セメントが対象となり易く、とりわけ高炉セメントC種ではポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも60%超の二酸化炭素が削減可能となり、その効果は大きい。

表-1 JISにおける混合セメントの混和材の分量

種 類	規 格	混和材の分量 (%)			生産量 ³⁾ (%)
		A種	B種	C種	
高炉セメント	JIS R 5211	5を超え 30以下	30を超え 60以下	60を超え 70以下	20.88
フライアッシュセメント	JIS R 5213	5を超え 10以下	10を超え 20以下	20を超え 30以下	0.16

*ポルトランドセメントの生産量は78.96%

混合セメントの使用にあたっては、さまざまな課題も生じる。コンクリートの製造においては、生産・流通する混合セメントは、そのほぼ全量がB種であり、A種やC種は一般への流通は見られない。そのため、レディーミクストコンクリート工場において、これらの混合セメントを使用する場合には、混合セメントや混和材のためのサイロの確保や日程調整など、受入れのための負担は小さくない。

また、コンクリートの性状としては、混合セメントB種およびC種では、凝結や初期の強度発現の遅延や中性化による耐久性能の低下が懸念される。これにより、現場での打込み後の均し（抑え）といった上面の仕上げに掛かる時間や脱型時期の延長、耐久性確保のための仕上材の選定やかぶり厚さの割増しなどの対策が必要になる。このため、建築分野では環境配慮型コンクリートの使用は、地下躯体のみに限定されることがほとんどである。

このような背景から、経済産業省では、混合セメントの利用拡大についての調査結果を報告⁴⁾しており、ここでは、2013年度の混合セメントの利用率22.1%を2030年度には25.7%へと拡大することを目標として、混合セメントの普及拡大に関する方策を検討している。

これは、国際的な社会問題として温暖化などの気候変動への対策がされるなかでの対応である。2015年のCOP21ではパリ協定が採択され、日本も批准した。日本では、パリ協定および国連に提出した「日本の約束草案」を踏まえた「地球温暖化対策計画⁵⁾」を閣議決定し、2030年度までの目標と取り組むべき対策や施策を明らかにし、このうち非エネルギー起源の二酸化炭素の削

*1 KANEKO Tatsuki：株式会社長谷工コーポレーション 技術研究所 博士（工学）

*2 OKURA Mahito：株式会社長谷工コーポレーション 技術研究所 副所長

減として、混合セメントの利用拡大を最初に掲げ、廃棄物焼却量の削減などと合わせて2013年度比から510万t-CO₂の削減を目標として示している。

これにより、経済産業省では、前述の混合セメントの利用率の拡大目標を示しているが、建築物における混合セメントの用途は、基礎や地下構造物がすべてであり、将来的にもこれらへの利用拡大の促進が対象となっている。一方で、上部構造物への適用については、今後の拡大方策の進展や技術開発の促進により、使用が増大する可能性が期待されている。

そこで、本報では、一般のコンクリートと同様に上部躯体にも適用が可能で、かつ、コンクリートの製造や性状、施工性能などに制限が生じないような汎用的な環境配慮型コンクリートとして、異なる種類のセメントを混合した高炉セメントA種相当のコンクリートについて検討した結果および製造における注意点などを報告する。

2. 技術の概要

2.1 概要

高炉セメントA種は、表-1に示したとおり、JIS R 5211「高炉セメント」において、セメント中の混和材（高炉スラグ）の分量が5を超え30%以下としたセメントで、JASS 5の解説においては特性・用途ともに普通ポルトランドセメントと同様であるとされている。

従って、一般のコンクリートと同様に地上部分を含めた建築物の全般への適用が可能であると考えられる。しかし、前述のとおり現在では高炉セメントA種の生産・流通はほとんどない。

そのため、本報で検討を行う高炉セメントA種相当のコンクリートは、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を混合したものとした。

2.2 セメント混合による適用性

JIS R 5211では、高炉セメントの構成はa) ポルトランドセメント（JIS R 5210）+高炉スラグ、またはb) クリンカー+せつこう+少量混合成分+高炉スラグの2通りが規定されている。鉄鋼スラグ協会の資料⁶⁾によれば、現在の高炉セメントの製造は図-1のように①～③のラインが示されているが、いずれもJISにおけるa)に該当する。

また、セメントメーカおよび鉄鋼スラグメーカへのヒアリングによれば、一般的な高炉セメントB種は普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末4000を混合して製造すると回答された。

すなわち、高炉セメントB種に対し、普通ポルトランドセメントを混合し、セメント中の高炉スラグの分量を調整することで、高炉セメントA種と同様の性質を有するコンクリートの製造が可能であると考えられる。

2.3 二酸化炭素の低減効果

本技術の適用による二酸化炭素の削減効果を試算すると表-2のようになる。ここでは、2014年度の（株）長谷工コーポレーションの生コンクリートの使用実績⁷⁾より、本技術を適用した場合の二酸化炭素の削減量を合せて示す。セメントの混合によりセメント中の高炉スラグの分量を約10%とした場合には8.2%、約20%とした場合には18.5%の二酸化炭素の削減率を示し、これを使用

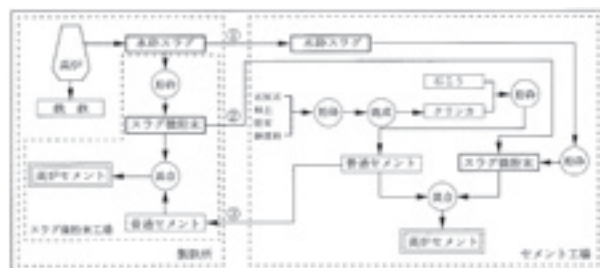


図-1 高炉セメント製造の概要⁶⁾

表-2 本技術の適用による二酸化炭素の削減効果の試算 (t-CO₂)

セメント	セメント中の 高炉スラグの分量 (質量%)	二酸化炭素の 削減率 (%)	適用コンクリートの使用量		
			30% (521,700m ³)	50% (869,500m ³)	100% (1,739,000m ³)
NP	0～5	0	—	—	—
NP + BB	約10	8.2	11,617	19,361	38,722
	約20	18.5	26,138	43,563	87,125
	約30	28.9	40,658	67,764	135,528
BB	40～45	41.2	58,083	96,806	193,612

* インベントリデータ⁸⁾ による二酸化炭素の排出量は、NP：771.7kg-CO₂、BB：453.6kg-CO₂とした

するコンクリートの割合を50%に適用することで、年間約19,000～43,000tもの二酸化炭素の削減が見込まれる。

また、本技術による二酸化炭素の削減率は、日本建築学会の高炉スラグコンクリート指針⁹⁾において、CO₂削減等級の等級1または等級2に値する。なお、同指針においては、地上部分の構造物に高炉セメントA種を用いることは地下部分に高炉セメントB種またはC種を用いる以上のCO₂削減率が得られるとしていることから、本技術の有効性が伺える。

3. 室内実験

3.1 実験の要因と水準

セメントを混合した高炉セメントA種相当のコンクリートの性状を確認するため、表-3に示す要因と水準による実験を行った。

本実験では混合後のセメント中の高炉スラグの分量がJIS R 5211における高炉セメントA種の範囲である、約10%（記号、BA10）、約20%（BA20）、約30%（BA30）として行った。

なお、日本建築学会の指針⁹⁾では、NPにBF4000を20以上30%以下含有した結合材を高炉セメントA種相当と定義しているが、本報ではJIS R 5211に倣い、セメント中のスラグの分量の範囲（5を超え30%以下）を総じて高炉セメントA種相当（BA）と呼ぶこととしている。

実験は、高炉セメントA種相当となるように、市販品の普通ポルトランドセメント（NP）と高炉セメントB種（BB）を混合した「C混合シリーズ」とNPに高炉スラグ微粉末（BF）を内割りで混合した「BF混合シリーズ」について実施した。

C混合シリーズでは、セメント中のBFの分量について、NPではJIS R 5210「ポルトランドセメント」でセメント中の少量混合成分として質量の5%以下で用いられる可能性があることから2%と仮定した。また、BBではJIS R 5211ではセメント中の高炉スラグは表-1のとおり30を超え60%以下とされているが、実際に流通しているBBについては各セメントメーカーがセメント試験成績書でいずれも40～45%と明記していることから42%と仮定してNPとBBの混合率を設定した。

また、セメントメーカーによる影響について検討を行うため、メーカー3社製のNPおよびBBを用いて、それぞれ同一のメーカーのセメントを混合して実験を行った。

BF混合シリーズでは、図-1に示したように高炉セ

表-3 実験の要因と水準

要 因	水 準
BF混入率	2%（N）、10%、20%、30%、42%（BB）
セメントメーカー ^{*1}	A社製、B社製、C社製
BF比表面積 ^{*2}	BF3000、BF4000、BF6000
結合材中のSO ₃ 量 ^{*2}	2.0%以下、2.2%（市販品相応）、3.0%
W/C（W/B）	40%、50%、60%

*1 C混合シリーズのみ

*2 BF混合シリーズのみ

表-4 高炉スラグの塩基度に関する調査結果

調査年	調査数	塩基度	
		範 囲	平 均
1989年 ¹⁰⁾	15種類	1.84～2.00	1.91
1990～1991年 ¹¹⁾	9工場	1.82～1.92	1.86
1991～1992年度 ¹²⁾	14種類	1.78～1.93	1.87
2009年度 ¹³⁾	10工場の年間データ	1.71～1.99	1.87
	各工場の平均	1.80～1.95	—

ントがNPとBFの混合により製造されることから、BBの強度発現性に影響すると考えられるBFの比表面積およびBBのSO₃量の変動を要因とした。

BBの強度発現性については、これらの要因のほか、BFの塩基度も影響するとされている。しかし、国内で製造されるBFの塩基度は表-4に示すように、30年程度の間で大きな変動はなく、概ね1.8～2.0であり、この範囲においては圧縮強度におよぼす影響が小さい¹⁴⁾との報告から実験要因からは除外した。

3.2 使用材料および計画調合

実験に用いたセメントは、表-5に示す品質のセメントメーカー3社のNPおよびBBとし、いずれもJIS R 5210「ポルトランドセメント」およびJIS R 5211「高炉セメント」に適合するものである。C混合シリーズでは同一メーカーのセメントを混合し、BF混合シリーズではA社製のNPを使用した。なお、本報においては、特別な記載がない限り、A社製のセメントを用いたコンクリートについて検討を行っている。

混和材は、同一のメーカーの同一工場で製造された、JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に適合する高炉スラグ微粉末を用い、一般的なBF4000（比表面積4300cm²/g）のほか、BF3000（3170cm²/g）およびBF6000（6440cm²/g）を用い、いずれもせっこうの添加がないものとした。

そのため、BF混合シリーズには、SO₃量の調整として無水せっこう（記号CS、粉末度3840cm²/g、SO₃

表-5 使用したセメントの品質

種 類	メーカ	密 度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	三酸化硫黄 SO ₃ (%)	
				平均値	最大値
NP	A	3.16	3300	2.10	2.44
	B	3.16	3270	2.32	2.84
	C	3.15	3330	2.05	2.34
BB	A	3.04	3810	2.20	2.39
	B	3.04	3740	1.96	2.24
	C	3.04	3830	1.77	2.20

表-6 使用した骨材の品質

種 類	岩 種	混合率 (%)	最大寸法 (mm)	絶乾密度 (cm ³ /g)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率
細骨材	陸砂	50	5	2.56	1.57	66.5	2.33
	山砂	50	5	2.56	1.77	66.0	2.39
	混合	—	5	2.56	1.67	66.3	2.36
粗骨材	硬質 砂岩	50	20	2.65	0.50	60.4	7.13
		50	13	2.63	0.66	59.3	6.24
	混合	—	20	2.64	0.58	59.9	6.67

表-7 コンクリートの計画調合

・C混合シリーズ（セメントメーカ：A）									
記号	C混合率 (%)		W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
	NP	BB			W	NP	BB	S	G
NP-50	100	0	50	47.6	165	330	0	850	954
BA10-50	80	20	50	47.8	163	261	65	856	954
BA20-50	55	45	50	47.9	161	177	145	862	954
BA30-50	30	70	50	48.0	160	96	224	864	954
BB-50	0	100	50	47.9	16	0	320	861	954
・BF混合シリーズ（BF4000、SO ₃ 量2.2%）									
記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	NP	BF	S	G	CS*	
BA20-40	40	45.9	161	330	72	795	954	3.32	
BA20-50	50	47.9	161	264	58	862	954	2.65	
BA20-60	60	49.0	171	234	51	883	938	2.35	

* CSはBFの内割り置換とした

58.0%、CaO 40.3%）を添加した。

骨材は、表-6に示す品質の君津産陸砂と児玉産山砂の混合砂および青梅産硬質砂岩碎石を使用した。化学混和剤は、W/C (W/B) 60%ではAE減水剤（高機能タイプ、標準形）を、40および50%では高性能AE減水剤（標準形）を使用し、また、練混ぜ水は上水道水を使用した。

コンクリートの調合は、いずれも目標スランプ18±1.5cm、目標空気量4.5±1.0%とし、化学混和剤の使用量はセメント質量×0.8%で一定、粗骨材かさ容積はW/C (W/B) 40および50%では0.60m³/m³、60%では0.59m³/m³とした。計画調合の例として代表的なものを表-7に示す。本実験では、市販品混合シリーズで25調合、BF混合シリーズで22調合の計47調合を行った。

なお、BF混合シリーズにおけるSO₃量の2.0%以下は、結合材にCSを加えないものとし、計算値ではBA10では1.93%、BA20では1.72%、BA30では1.51%となった。

3.3 試験方法

コンクリートは、温度20℃、湿度60%R.H.の恒温恒湿室において調整した材料を使用し、容量100Lの水平パン型ミキサで、モルタルを60秒練り混ぜた後、粗骨材を投入し90秒練り混ぜた。

練混ぜ後のコンクリートは、フレッシュコンクリート試験として、スランプ（JIS A 1101）、空気量（JIS A 1128）およびコンクリート温度（JIS A 1156）を測定し、各種試験体の採取を行った。また、一部の調合については凝結試験（JIS A 1147）を実施した。硬化コンクリート試験は、強度試験として圧縮強度（JIS A 1108）および静弾性係数（JIS A 1149）を、耐久性試験として促進中性化試験（JIS A 1153）を実施した。

圧縮強度試験は、供試体の寸法をφ10×20cmとし、標準養生および20℃封かん養生で、それぞれ材齢7、28、56、91日に実施し、静弾性係数試験は、材齢28日以降の圧縮強度試験時に実施した。また、促進中性化試験は、供試体の寸法を10×10×40cmとし、コンクリートの打込み時に側面となる2面を試験面とした。促進試験は、前養生を標準4週+20℃気中4週とし、温度20℃、湿度60%R.H.、二酸化炭素濃度5%の促進環境下で促進期間4、8、13および26週にJIS A 1152に準じて中性化深さを測定した。

3.4 実験結果

図-2にC混合シリーズにおける標準および封かん養生のBF混入率と圧縮強度の関係を示す。標準養生における圧縮強度はBF混入率の増加に伴い、材齢7日では低下したものの、28日では同程度、91日では大きくなり、それぞれの材齢においてBF混入率に伴い圧縮強度は連続的に変化した。これは、高炉スラグ微粉末による潜在水硬性が圧縮強度に寄与したものと考えられる。

BF混入率とNPを基準とした圧縮強度比との関係では図-3に示すように、材齢7日および28日では、BF混入率による圧縮強度への水セメント比による影響は見ら

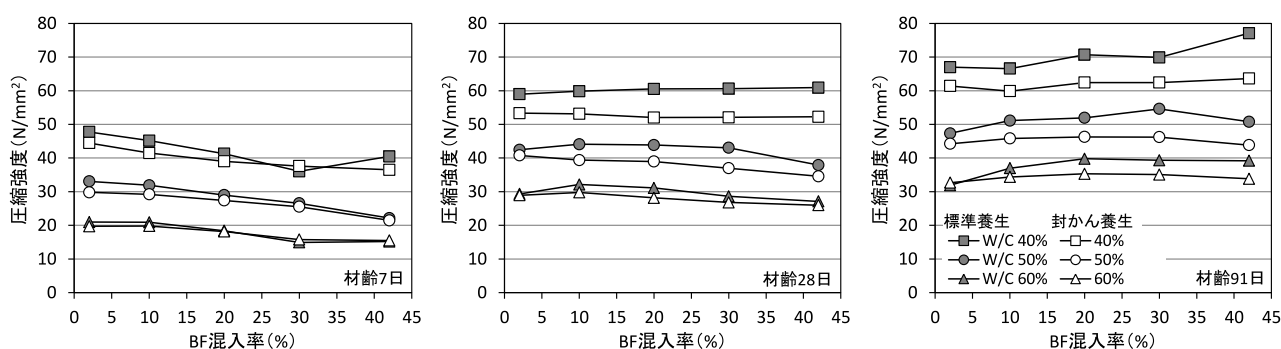


図-2 BF混入率と圧縮強度

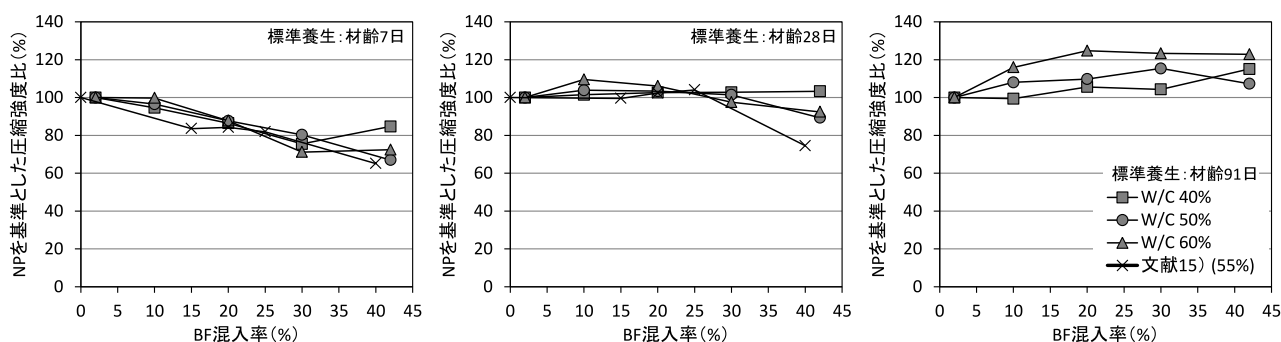


図-3 BF混入率とNPを基準とした圧縮強度比

れずに同程度であり、図中に示した斎藤¹⁵⁾による試験高炉セメントA種とも同様な結果であった。

封かん養生における圧縮強度の発現性は、標準養生と比べて、材齢7日以降の強度増進が小さいものの、およその傾向は同様であった。

また、促進中性化試験では、図-4に示すように、促進期間26週のBF混入率と中性化深さの関係から、BF混入率の増加に伴い中性化深さは増加したものの、BA10およびBA20ではその程度は小さく、NPと同程度であった。一方で、BB（BF混入率42%）の中性化深さは顕著に大きかった。

C混合シリーズとBF混合シリーズにおける各種試験結果の関係では、図-5に示すように、圧縮強度は標準養生、封かん養生ともに、いずれのBF混入率、水セメント比であっても両シリーズの圧縮強度はおおよそ1:1の関係であり、その差は±10%以内程度であった。また、全データの回帰による傾きでは、標準養生で0.98、封かん養生で0.96と僅かにセメント混合の方が小さいものの、大きな差は見られなかった。

中性化においても、図-6に示すように、C混合シリーズとBF混合シリーズの関係はおおよそ1:1の関係であり、圧縮強度と同様に大きな差は見られなかった。

すなわち、NPとBBを混合し、高炉セメントA種相

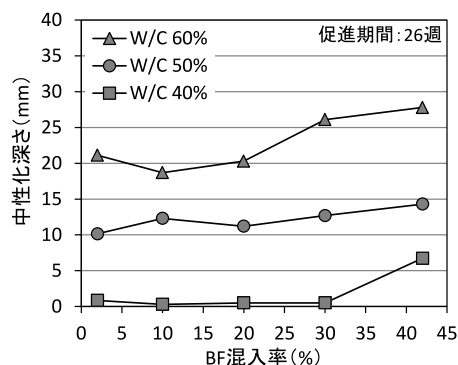


図-4 BF混入率と中性化深さ

当のコンクリートとした場合においても、NPにBFを添加した場合とでは、同一のBF混入率では強度発現性や中性化抵抗性に違いは見られなかった。

4. セメント混合による高炉セメントA種相当のコンクリートの製造

4.1 レディーミクストコンクリート工場の選定

本技術を適用するレディーミクストコンクリート工場の選定では、JASS 5などに示される一般的な条件に加えて以下のような項目が必要となる。

①製造設備

セメントを計量することができる計量器を2器以上有

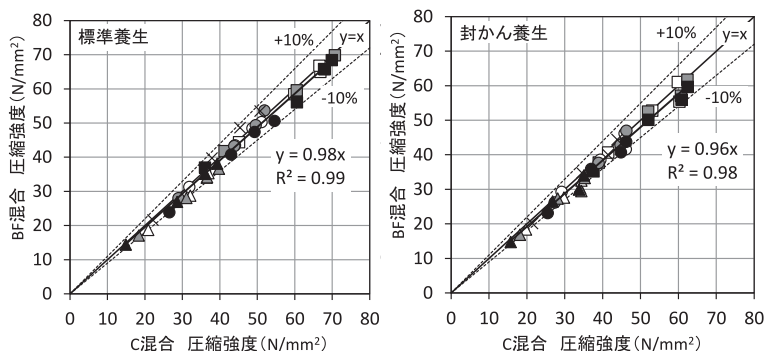


図-5 C混合とBF混合の圧縮強度の関係

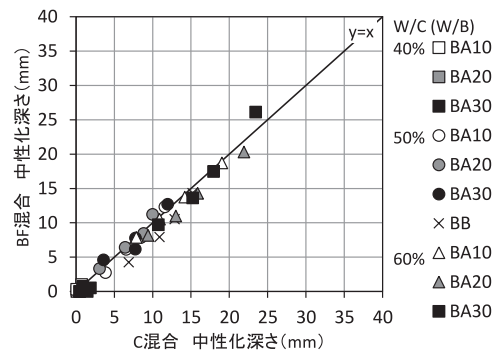


図-6 C混合とBF混合の中性化深さの関係

していること、かつ配合計画書および納入書にNPおよびBBの両方のセメント量の記載が可能であること。

②使用するセメントの種類および製造業者

使用するセメントはNPおよびBBの両方が同一のセメントメーカ（製造業者）であること。また、BBにおいてはセメント中の高炉スラグの分量が40～45%であること。

①については、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」において、セメントや混和材の累加計量が認められないことから、NPおよびBBをそれぞれ別で計量することとする。そのため、セメントを計量可能な計量器が2器以上必要であり、計量値はそれぞれが±1%の許容差で計量されることとなる。なお、セメントの混合率の設定によってはNPまたはBBのどちらかのセメントの使用量が少なくなるため、計量器の目量の関係から、計量値の許容差を十分に満足できない可能性が考えられる。そのため、コンクリートの調合および練混ぜ量から、セメントの計量器が許容差に対して十分な計量値を示すことができるか、事前に確認することが重要となる。

また、一般的な配合計画書や納入書では、セメントの量を示す欄がひとつである。そのため、各セメントの記載欄を作成する（表-8中、絶対容積欄）ことや、注書として、混和材欄を使用してNPまたはBBを示す（表-8中、単位量欄）など、両セメントの値が明確に読み

取れるよう対応する必要がある。

②については、JIS Q 1011「適合性評価－日本工業規格への適合性の認証－分野別認証指針（レディーミクストコンクリート）」附属書Aにおいて、「同一バッチに異なる製造業者のセメントを用いて練り混ぜてはならない。」という品質管理体制に倣うものであり、不具合が生じた際の原因究明を速やかに行うためにも重要となる。また、BBにおけるセメント中の高炉スラグの分量については、使用するセメントや試験成績書から詳細な値を求めることが容易ではないことから、JIS R 5211の範囲ではNPとの混合率および混合後のBA中のスラグの分量が算出できないため、40～45%であることが条件となる。

4.2 コンクリートの使用材料

本技術に使用するセメントは前項のとおり、同一のセメントメーカのNPおよびBBを用いることとする。そのため、表-3で示したように、C混合シリーズでは国内のセメントメーカ3社についてそれぞれ実験を行った。その結果、図-7に示すように、標準養生および封かん養生ともに、BF混入率と圧縮強度の関係はセメントメーカによる違いは小さく、いずれも同様な強度発現性であった。

また、表-9に示すように、BBやBBに用いられるBFの品質の違いによる凝結時間におよぼす影響は小さい。

表-8 計画調合の表し方の例

品質基準強度 (N/mm ²)	調合管理強度 (N/mm ²)	調合強度 (N/mm ²)	スラン プ (cm)	空気 量 (%)	水セ メント 比 (%)	細 骨 材 率 (%)	単 位 水 量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)				単位量* (kg/m ³)				化学混 和剤の 使用量 (ml/m ³) または (C×%)	計画調 合上の 最大塩 化物イ オン量 (kg/m ³)
								ラ ン ド セ メ ン ト	普 通 セ メ ン ト	高 炉 セ メ ン ト B 種	細 骨 材	粗 骨 材	セ メ ン ト	混 和 材	細 骨 材	粗 骨 材	

* 単位量におけるセメント欄は普通ポルトランドセメント、混和材欄は高炉セメントB種の値をそれぞれ示す。

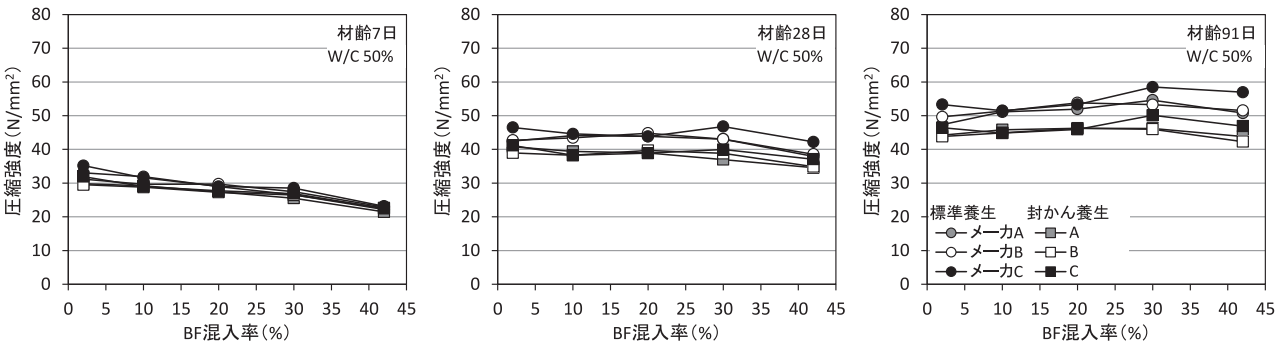


図-7 各セメントメーカーによるBF混入率と圧縮強度

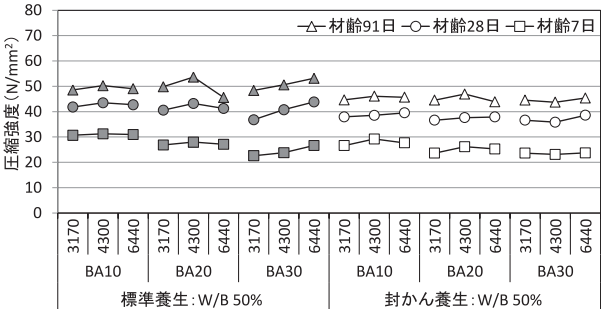


図-8 圧縮強度におよぼすBFの比表面積の影響

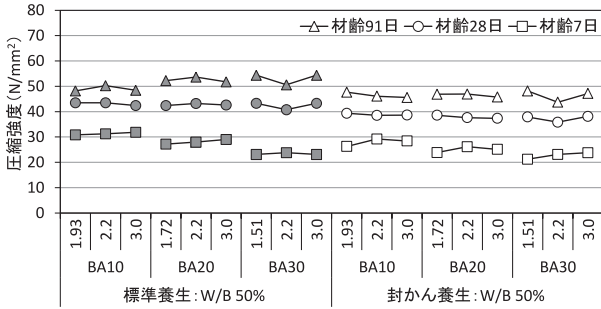


図-9 圧縮強度におよぼす結合材中のSO₃量の影響

これらが圧縮強度におよぼす影響については、図-8および図-9に示すようにBA30の標準養生ではBFの比表面積の増加に伴う圧縮強度が増加する傾向が見られたものの、その他の要因においては明確な傾向は見られず、いずれの条件においても圧縮強度は同程度であった。そのため、BBにおけるこれらの品質が想定される範囲内で変動しても、NPと混合して高炉セメントA種相当とした場合では、凝結や圧縮強度におよぼす影響は小さいものと考えられる。

4.3 コンクリートの調合設計

本技術を用いたBAコンクリートの調合は、一般のコンクリートと同様に、所定のワーカビリティや強度、耐久性が得られるように定めなければならないが、大きく異なる点はない。

コンクリートの計画調合は、試し練りによって求められることとなるが、図-10に示すように、化学混和剤の使用量をセメント質量に対して一定とした場合、BF混入率の増加に伴い、同程度のスランプとするために必要となる単位水量は小さくなる。

また、圧縮強度については、図-11に示すようにC混合シリーズの実験結果から、強度管理に供する材齢28日の標準養生におけるセメント水比との関係が一般のコンクリートと同様に直線的であり、かつBAコンクリー

表-9 凝結時間(BF混合シリーズ、W/B 50%)

結合材	結合材 SO ₃ 量 (%)	BF 比表面積 (cm ² /g)	凝結時間 (h-min)	
			始発	終結
BA10	2.2	BF4000	6-16	8-05
BA20	2.2	BF4000	5-53	8-05
BA30	2.2	BF4000	5-38	7-59
BA20	2.0以下	BF4000	5-48	7-45
BA20	3.0	BF4000	5-43	8-02
BA20	2.2	BF3000	5-51	8-05
BA20	2.2	BF6000	5-55	7-52

トはNPと同程度である。

すなわち、試し練りにおいて、セメント水比と圧縮強度の関係が使用するBAコンクリートの条件で普通コンクリートと同様であることが確認できれば、レディーミクストコンクリート工場が有する強度算定式を適用することができると考えられる。

また、圧縮強度のばらつきについては、図-12に示すように、実際の製造設備で実験的にBAコンクリートを製造した結果では、圧縮強度の標準偏差は普通強度レベルにおいて、呼び強度に係らず3N/mm²以下であった。これは、いずれも実験に使用したレディーミクストコンクリート工

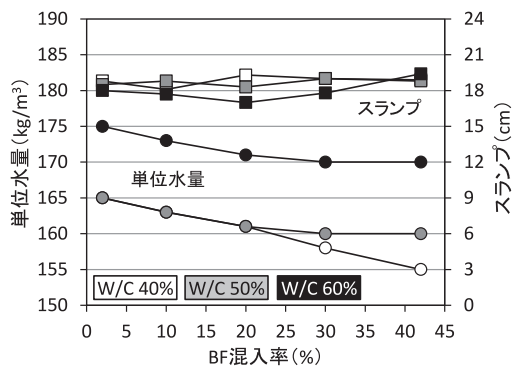


図-10 単位水量とスランプの関係(混和材使用量一定)

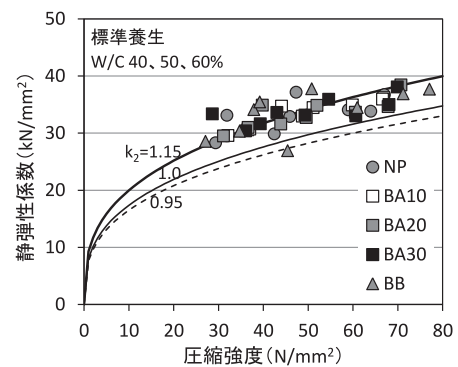


図-13 圧縮強度と静弾性係数

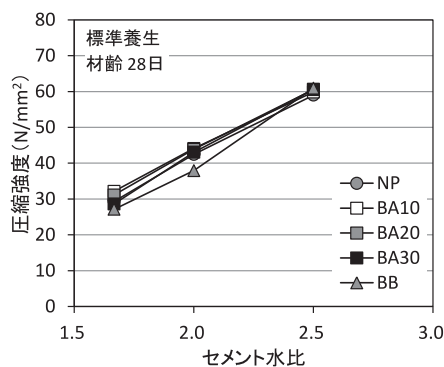


図-11 セメント水比と圧縮強度

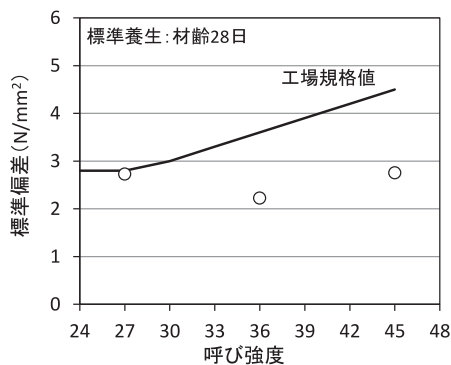


図-12 実機によるコンクリートの圧縮強度の標準偏差

場が普通コンクリートの製造に適用している標準偏差の値よりも小さい。そのため、調合強度に算出する際に用いる使用するコンクリートの標準偏差についても、一般のコンクリートと同様に設定できると考えられる。

このように、本技術を適用するBAコンクリートにおいては、一般のコンクリートと同様に、調合設計について、JIS A 5308やJASS 5と同じ手法が適用でき、これによりフレッシュ性状や圧縮強度の制御が可能である。

5. 本技術によるコンクリートの特徴

5.1 静弾性係数

C混合シリーズにおける圧縮強度と静弾性係数の関係

表-10 静弾性係数の推定式によける k_2 の値

セメント	k_2 (NPを基準)		
	標準養生	封かん養生	平均
NP	1.14 (1.00)	1.16 (1.00)	1.15 (1.00)
BA10	1.13 (0.99)	1.13 (0.98)	1.13 (0.99)
BA20	1.15 (1.01)	1.15 (0.99)	1.15 (1.00)
BA30	1.15 (1.01)	1.15 (0.99)	1.15 (1.00)
BB	1.13 (0.99)	1.15 (0.99)	1.14 (0.99)

を図-13に示す。図中には式(1)に示す静弾性係数の推定式であるRC構造計算規準式を併記し、計算において γ は実験値から 2.33t/m^3 とした。

$$E = 33.5 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma}{60}\right)^3 \quad (1)$$

ここに、 E :コンクリートの静弾性係数(kN/mm^2)、 γ :コンクリートの単位容積質量($=2.33\text{t/m}^3$)、 σ :コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)、 k_1 :粗骨材の種類により定まる修正係数($=1.0$)、 k_2 :混和材の種類による修正係数

圧縮強度と静弾性係数の関係では、静弾性係数は推定式の上側に分布したものの、推定式に従って推移した。

推定式では、混和材の種類により定まる修正係数(k_2)として、BFを用いる場合は0.95としているが、NPを基準として算出すると表-10のようになり、いずれのBAおよびBBにおいても、標準養生および封かん養生ともにNPと同程度であった。

5.2 中性化抵抗性の寄与率 α

図-4に示した促進中性化試験の結果から、中性化抵抗性の寄与率 α を求めた。中性化抵抗性の寄与率 α は、混和材がNPの代替として中性化抵抗性に寄与する割合を表し、“結合材量=NP量+ α ×混合物(混和材)量”

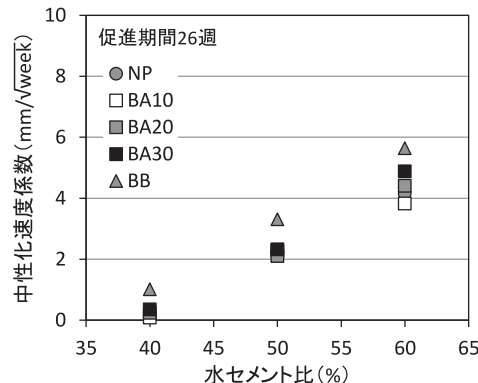


図-14 水セメント比と中性化速度係数

表-11 中性化速度係数の回帰式

セメント	回帰式：A=a・W/C+b		
	a	b	R ²
NP	0.203	-7.875	0.999
BA10	0.187	-7.287	0.990
BA20	0.209	-8.182	0.996
BA30	0.226	-8.805	0.994
BB	0.231	-8.249	1.000

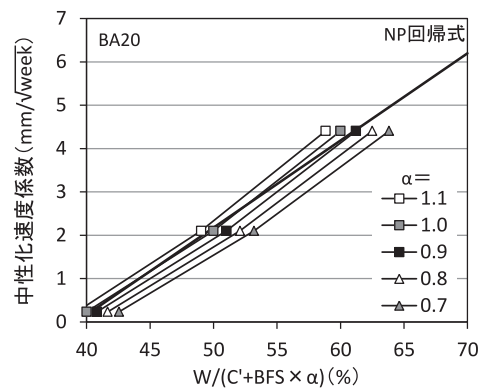


図-15 中性化抵抗性の寄与率 α を変化させた場合の例

表-12 中性化抵抗性の寄与率 α の一覧

セメント (結合材)	水セメント比 (水結合材比) (%)			
	40	50	60	平均
BA10	0.97	1.11	1.21	1.10
BA20	0.99	0.95	0.93	0.96
BA30	0.97	0.90	0.88	0.91
N+BF (30%) ¹⁶⁾	1.04	1.06	1.07	1.06
BB	0.78	0.76	0.75	0.76
N+BF (50%) ¹⁶⁾	0.84	0.84	0.83	0.84

と定義される。¹⁶⁾

一般に水セメント比と中性化速度係数の関係は図-14に示すように直線的であり、BAコンクリートにおいても同様に、表-11のように回帰できる。この関係から、図-15を例とするように任意の水セメント（結合材）比におけるNPの回帰式との交点を持つ α を逆算することで中性化抵抗性の寄与率 α が求められる。

C混合シリーズより求められた、中性化抵抗性の寄与率 α を表-12に示す。寄与率 α は、辻らの報告¹⁶⁾ より小さいものの、セメント中のBF混入率が大きくなるに伴い、その値は小さくなった。

住宅の品質確保の促進等に関する法律（品確法）における劣化対策等級では、混合セメントを用いる場合に、高炉セメントではセメント中の混合物（混和材料）の10分の3を除いた部分をセメント量としてコンクリートの水セメント比を求めるとされている。これは、混合セメントの使用による中性化抵抗性の低下を補うためであり、これにより集合住宅などの建築においてはBBであっても合理的・経済的な調査設計が難しいのが実状である。

ここで、品確法における混合物の10分の3の除外とは、中性化抵抗性の寄与率 $\alpha = 0.7$ と同義である。すなわち、本実験で求められたBAの中性化寄与率 α は、平均で0.91～1.10であるため、BAでは品確法による耐久性確保のための水セメント比の算出方法において、セメント量として除外される混合物の割合を低減できる可能性が示唆される。

6. おわりに

本報では、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を混合することにより、高炉セメントA種相当としたコンクリートについて、室内実験の結果と製造に関する注意事項について報告した。

従来、環境配慮型コンクリートは、製造時に多大な二酸化炭素を排出するセメントの使用量を減らし、混和材に置き換えることで環境負荷の低減を謳うものが主であった。しかし、セメントの製造においては、さまざまな処理困難な廃棄物を天然資源の代替として受入れている一面もある。そのため、廃棄物の活用などを含めた統合化評価ではポルトランドセメントは高炉セメントC種よりも環境負荷への貢献は大きい¹⁷⁾ との報告もある。

一方で、最近では地下構造物には高炉セメントB種およびC種相当、上部構造物には高炉セメントA種相当のコンクリートを使用して建物全体に環境配慮コンクリートを適用できるような技術も紹介されている。^{18)、19)}

本報でも示したように、高炉セメントA種相当のコンクリートについては、その性状は一般のコンクリートと同様であり、環境配慮性を示す二酸化炭素の削減においては、単位コンクリート量あたりの効果は小さいが、高炉セメントB種やC種と比べ、上部躯体を含めて汎用的に適用できることで相当量の二酸化炭素が削減できる。また、本技術で使用する普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種は、いずれも全国の生コン工場の98%以上が常備しているとのアンケート調査²⁰⁾も報告される一般的なセメントである。

すなわち、「1.はじめに」で述べたように、製造、施工およびコンクリートの性状などの影響から、適用においては制限が付きやすい高炉セメントC種相当のコンクリートと比べても現場や、生コン工場への負担も生じにくいものとなる。

このように、建設分野における環境問題への取り組みはその社会への影響も大きく、将来的には強度や耐久性などに加え、環境負荷低減への効果も評価した適材適所なコンクリートについて、様々なメニューの中から選択することの重要性が浸透することは考え易い。

当社では、このような社会に向け、環境配慮型コンクリートのメニューのひとつとして、本報で紹介した技術について（一財）日本建築総合試験所より建築技術性能証明を取得した²¹⁾。今後は一般建築物への適用も含めて展開し、持続可能な社会の発展への一助となるよう努める所存である。

【参考文献】

- 1) 小林利充ほか：低炭素型のコンクリート「クリーンクリート」の開発、大林組技術研究所報 No.75, pp.1-8, 2011
- 2) 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性質、コンクリート工学年次論文集 Vol.32 No.1, pp.485-490, 2010
- 3) セメント協会：セメントの LCI データの概要, 2017
- 4) 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課：セメント産業における省エネ製造プロセスの普及拡大方策に関する調査－混合セメントの普及拡大方策に関する検討－報告書, 2016.3
- 5) 環境省：地球温暖化対策計画, 2016.5.13
- 6) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用 (2017 年版), 2017
- 7) (株) 長谷工コーポレーション：環境・社会報告書 2015
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の環境配慮施工指針 (案)・同解説, p.59, 2008.9
- 9) 日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針 (案)・

同解説, 2017.9

- 10) 長尾之彦ほか：我が国水砕スラグ及びこれを加工した高炉スラグ微粉末の品質、コンクリート工学年次論文報告集 11-1, pp.343-348, 1989
- 11) 日本建築学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの技術の現状, p.7, 1992.6
- 12) 依田彰彦：資源の有効利用とコンクリート 第5回 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート, コンクリート工学, pp.72-82
- 13) セメントジャーナル社：コンクリート用高炉スラグ活用ハンドブック, p.69, 2011.2
- 14) 小林一輔ほか：コンクリート混和材としての高炉水砕スラグ微粉末の品質がコンクリートの圧縮強度ならびに乾燥収縮に及ぼす影響, コンクリート工学 Vol.17 No.5, pp.87-95, 1975.5
- 15) 齋藤尚ほか：環境負荷低減のための高炉セメント使用コンクリートに関する一検討, セメントコンクリート論文集 Vol.64 No.1, pp.3309-315, 2010
- 16) 辻大二郎ほか：混合セメントを用いたコンクリートの耐久性状 (その7 中性化抵抗性の寄与率), 日本建築学会大会学術講演梗概集 材料施工, pp.49-50, 2016.8
- 17) 星野清一ほか：日本版被害算定型影響評価手法によるセメントの環境影響評価, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.639-640, 2015.9
- 18) 並木憲司ほか：環境配慮型のコンクリートの建築構造物への全面的な適用, コンクリート工学 Vol.55 No.12, pp.1049-1054, 2017.12
- 19) 環境コン適用を拡大：コンクリート新聞, 2017.9.17
- 20) 田村友法ほか：レディーミクストコンクリート工場を対象としたアンケート調査, その1 アンケート調査の概要, 日本建築学会大会講演梗概集, pp.603-604, 2013.8
- 21) (一財) 日本建築総合試験所：建築技術性能証明評価シート「長谷工式 H-BA コンクリート－異種セメント混合による高炉セメント A 種相当コンクリートの製造および施工－」, 2017.10.16

【執筆者】



*1 金子 樹
(KANeko Tatsuki)



*2 大倉 真人
(OKURA Mahito)