普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種の混合使用により 高炉セメント A 種相当としたコンクリートに関する研究

ON THE TYPE A PORTLAND BLAST-FURNACE SLAG CEMENT CONCRETE DUE TO BLENDED
ORDINARY PORTLAND CEMENT AND TYPE B PORTLAND BLAST-FURNACE SLAG CEMENT

金子 樹^{*1}, 大倉 真人^{*2}, 梶田 佳寛^{*3}

Tatsuki KANEKO, Mahito OKURA and Yoshihiro MASUDA

This research studied on the environmental-conscious concrete of the type A portland blast-furnace slag cement concrete equivalent which was made to blend the ordinary portland cement and the type B portland blast-furnace slag cement.

As the result of experiments, this concrete that was 20% or less rate of blast-furnace slag showed equality properties, furthermore method of mixture proportion design, quality control and curing showed can treat same with ordinary portland cement concrete.

Accordingly, this concrete is considered can use above-ground structures as the environmental-conscious concrete, and CO₂ is reduced approximately 18.9% from the trial calculate.

Keywords : *Type A Portland Blast-Furnace Slag Cement, Mixing Rate of Blast-Furnace Slag, Strength Development, Mix Proportion Design, Curing, CO₂ Reduction*

高炉セメント A 種, 高炉スラグ混入率, 強度発現, 調合設計, 養生, 二酸化炭素削減

1. はじめに

1.1 背景

温暖化などの気候変動への対策が国際的な社会問題とされるなか、2015 年の COP21 ではパリ協定が採択され、日本も批准した。これにより日本では、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¹⁾」を閣議決定している。ここでは、2030 年度までの目標と取り組むべき対策や施策が示され、このうちの非エネルギー起源による二酸化炭素の削減項目として、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いる。

混合セメントは、セメントの構成に混合材を含んだものであり、そのセメント中の分量により A～C 種が日本産業規格 (JIS) に定められている。混合材は、二酸化炭素の排出量がポルトランドセメントよりも小さいため、コンクリート材料による由来する二酸化炭素の排出量が削減されることから、環境配慮が謳われるものである。

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²⁾しており、現状では土木分野で飽和状態、建築分野では基礎や地下構造物への利用がすべてであると示している。また、将来的にもこれらへの利用の維持や促進を対象とし、2013 年度の混合セメントの利用率 22.1%を 2030 年度には 25.7%とすることを目標に、混合セメントの普及拡大に関する方策を検討している。一方で、建

築分野では容積の約 8 割とされる上部構造物への利用は、今後の拡大方策の進展や技術開発による可能性は示されているものの、将来的にも現状と同様に試算モデルではゼロと設定されている。

1.2 環境配慮型コンクリートの動向

近年、環境配慮型コンクリートとして、さまざまな研究が行われているが、その主はセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュといった混和材に置き換えるもので、いわゆる混合セメント相当である。特に混和材を多量に使用することにより、単位あたり 60%超の二酸化炭素の排出量が削減となる高炉セメント C 種相当や、さらに混和材の量を多くすることで環境配慮性への効果が大きい技術の研究開発や実用化^{3)～6)}が報告されている。

しかし、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、中性化による耐久性能の低下があげられることから、前述のように建築分野では地下躯体のみの利用に限定されることがほとんどである。

コンクリートの製造面においても、現在では生産される混合セメントのほぼ全てが B 種であり、A 種や C 種の一般市場への流通がなく、レディーミクストコンクリート工場では、混合セメントや混和材のためのサイロや日程の確保、調整などの負担も小さくない。

本研究では、このような課題に対し、汎用的な環境配慮型コンク

¹⁾ ㈱長谷工コーポレーション 技術研究所 博士 (工学)

²⁾ ㈱長谷工コーポレーション 技術研究所 副所長

³⁾ 宇都宮大学 名誉教授・工博

HASEKO Corporation Technical Research Institute, Ph.D.

HASEKO Corporation Technical Research Institute, Deputy Director

Prof., Emeritus, Utsunomiya Univ., Ph.D.

リートの製造・施工を目的とし、建築分野において上部構造物への適用が可能となる高炉セメント A 種相当のコンクリートを対象に各種の実験より得られた諸性状について検討を行った。

なお、本研究は、筆者らが異なる種類のセメントを混合した BA コンクリートの諸性状に関する報告^{7), 8)}に新たな知見と考察を加えて再構成したものである。

2. 本研究の概要

2.1 セメント混合の適用性

高炉セメント A 種は、JIS R 5211 (高炉セメント) において、セメント中の高炉スラグの分量が 5 を超え 30% 以下とされており、日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 (以下、JASS 5 とする) では、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解説されている。そのため、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と考えられる。しかし、前述のように高炉セメント A 種の生産・流通はほとんどなく、また、コンクリートの性能に関する技術的な検討報告も少ないため、実現場への汎用的な利用がむずかしいのが実状である。

そこで、本研究では、一般的に流通されるセメントである普通ポルトランドセメント (記号 NP) と高炉セメント B 種 (BB) をコンクリートの製造時に混合使用することで、高炉セメント A 種相当 (BA) としたコンクリートについて検討を行った。

NP および BB は、いずれもセメントの生産量 (2018 年度) の約 68% と 21%⁹⁾ を占め、全国のレディーミクストコンクリート工場の 98% 以上が常備している¹⁰⁾ とされるセメントであることから、前述のようなサイロの調整といったレディーミクストコンクリート工場への負担の軽減にも繋がると考えられる。

高炉セメントの構成は、JIS R 5211 において、a) ポルトランドセメント+高炉スラグ、または、b) クリンカー+セッコウ+少量混合成分+高炉スラグの 2 通りが規定されている。実際の BB においては、含まれる高炉スラグの品質はセメント成績表からは読み取れないものの、鉄鋼スラグ協会の資料¹¹⁾によれば、高炉セメントの製造はいずれも上記の a) に該当することが示され、生産者へのヒアリングにおいても一般的な BB は NP と高炉スラグ微粉末 4000 を混合して製造されると聞かれた。すなわち、BB に対し、NP 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できるものと考えられる。

2.2 研究の概要

本研究は、NP および BB を混合した BA コンクリートについて、そのコンクリート性状と建築物の上部構造物を含む汎用的な適用性を明らかにするため、室内および実機実験を行った。室内実験では、混合前のセメントの生産者や高炉スラグの品質変動など、想定される BB の品質の変化や NP および BB の混合率の違いによる BA コンクリートの強度発現および耐久性能について検討を行った。

実機実験では実際のレディーミクストコンクリート工場で製造した BA コンクリートから、フレッシュコンクリートの経時変化や柱、床の模擬試験体を含む各種条件における強度発現性および調合設計や施工性能について、それぞれ検討を行った。

3. 室内実験

3.1 実験の概要

室内実験では、Table 1 に示す要因と水準で混合前のセメントの品質や、NP および BB の混合率が BA コンクリートの強度発現性や耐久性能におよぼす影響について実験を行った。

実験は、市販の NP および BB を混合した「C 混合シリーズ」と NP に高炉スラグ微粉末 (記号 BF) を内割置換した「BF 混合シリーズ」について、それぞれ水セメント比 (BF 混合シリーズでは水結合材比) 0.40~0.60 で実施した。

C 混合シリーズでは、セメント中の高炉スラグ量について、NP では JIS R 5210 (ポルトランドセメント) により少量混合成分として質量の 5% 以下で BF が用いられる可能性があることから 2% と、また、BB では JIS R 5211 で高炉スラグの分量が 30~60% とされるが各セメントメーカーではセメント試験成績表でいずれも高炉スラグの分量を 40~45% と明記していることから 42% と仮定し、混合後のセメント中の高炉スラグ量が約 10% (記号 BA10)、約 20% (BA20) および約 30% (BA30) となるようにした。

BF 混合シリーズでは、一般的に高炉セメントが NP と BF の混合により製造されることから、主に BB の強度発現性に影響するとされる BF の比表面積および BB の三酸化硫黄 (SO_3) 量を変動要因とした。なお、BB の強度発現性については、BF の塩基度も影響するとされているが、国内で製造される BF の塩基度が概ね 1.8 以上¹²⁾であり、また、1.8~2.0 においては圧縮強度におよぼす影響が小さい¹³⁾との報告より、本実験の要因からは除外した。

3.2 コンクリートの使用材料

実験に使用したセメントは、セメントメーカー 3 社 (記号 A~C) の NP および BB で、その品質は Table 2 に示すように一般に流通する JIS 適合品とし、C 混合シリーズにおいては同一メーカーの NP および BB を混合使用した。

BF は、JIS A 6206 (コンクリート用高炉スラグ微粉末) に適合するもので、一般的な高炉スラグ微粉末 4000 (記号 BF4000、比表面

Table 1 Factors and levels of indoor experiment.

Factors	Levels
Mix rate of BF	2%(NP), 10%(BA10), 20%(BA20), 30%(BA30), 42%(BB)
Water/Binder cement ratio	0.40, 0.50, 0.60
Manufacture of cement*1	Maker A, B, C
Types of BF*2	BF3000, BF4000, BF6000
SO ₃ content in binder*2	<2.0%, 2.2%, 3.0%

*1: Only cement mixing series.

*2: Only BF mixing series.

Table 2 Quality of cements.

Types	Makers of cement	Density (g/cm ³)	Specific surface area (cm ² /g)	SO ₃ content (%)	
				Mean	Max
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

積:4300cm³/g)のほか、高炉スラグ微粉末 3000 (BF3000、3170cm³/g) および高炉スラグ微粉末 6000 (BF6000、6440cm³/g) とし、いずれも同一のメーカ、工場で製造され、せっこうの添加がないものを使用した。そのため、BF 混合シリーズでは、SO₃ 量の調整として無水せっこう (CS、粉末度: 3640cm³/g、SO₃ 量: 58.0%) を用いた。

骨材は、君津産陸砂と児玉産山砂の混合砂(絶乾密度:2.56g/cm³、吸水率:1.67%、粗粒率:2.36) および青梅産硬質砂岩碎石 2005 (絶乾密度: 2.64g/cm³、吸水率: 0.58%、実積率: 59.9%) とし、練混ぜ水は上水道水を使用した。また、化学混和剤は、W/C (W/B) 0.40 および 0.50 では高性能 AE 減水剤 (標準形) を、0.60 では AE 減水剤 (高機能タイプ、標準形) を使用した。

3.3 コンクリートの調合

コンクリートの調合は、いずれも目標スランブ 18±1.5cm、目標空気量 4.5±1.0%とした。粗骨材かさ容積は W/C (W/B) 0.40 および 0.50 では 0.60m³/m³、0.60 では 0.59m³/m³、化学混和剤の使用量はセメント質量×0.8%で一定とし、コンクリートのスランブは単位水量により調整した。コンクリートは、C 混合シリーズではセメント単体を含む BF 混入率 5 水準について、セメントメーカ A では W/C 3 水準、セメントメーカ B および C では W/C 50%とした 25 調合、BF 混合シリーズでは BF4000、SO₃ 量 2.2%の W/C 3 水準のほか、W/C 50%において BF 種類または SO₃ 量を変化させた 22 調合の全 47 調合とした。コンクリートの計画調合の例として代表的なものを Table3 に示す。なお、BF 混合シリーズでは、セメントメーカ A の NP を使用し、SO₃ 量の 2.0%未満については、結合材に CS を添加しないものとした。そのため、計算による SO₃ 量は、BA10 では 1.93%、BA20 では 1.72%、BA30 では 1.51%となった。

3.4 試験項目および方法

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、容量 100L の水平パン型ミキサを用いて、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、スランブ (JIS A 1101)、空気量 (JIS A 1128) およびコンクリート温度 (JIS A 1156) を実施し、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時間試験 (JIS A1147) 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 (JIS A 1153) を実施した。

圧縮強度試験は、供試体の寸法を φ100×200mm 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、材齢 28 日以降の試験と同時に静弾性試験を実施した。

促進中性化試験は、供試体の寸法を 100×100×400mm 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 週に中性化深さを測定 (JIS A 1153) した。

3.5 フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの性状は、いずれの調合においても目標スランブ 18±1.5cm、目標空気量 4.5±1.0%を満足し、目視においても良好な状態であった。

(1) 単位水量とスランブ

Fig.1 に C 混合シリーズにおける BF 混入率と単位水量およびスランブの関係を示す。本実験では、化学混和剤の使用量を一定としており、スランブを調整した単位水量は、BF 混入率の増加に伴い小さく、BB (図中 X 軸で 42%) では NP (同 2%) よりも 5~10kg/m³ 減であった。また、BF 混合シリーズにおいても、図示等は割愛するが同様の傾向であり、BF の比表面積や結合材中の SO₃ 量による影響はなく、同一の BF 混入率であれば同じ単位水量で同程度のスランブであった。

(2) 凝結時間

C 混合シリーズにおける W/C 0.50 の経過時間と貫入抵抗値の関係を Fig.2 に示す。凝結の始発時間は BF 混入率にかかわらず同程

Table 3 Mixture proportions of concrete.

■ Cement mixing series. (Manufacture of cement was A)									
Types	Mixing rate of cements (%)		W/C	s/a (%)	Unit amount (kg/m³)				
	NP	BB			W	NP	BB	S	G
NP	100	0	0.50	47.6	165	330	0	850	954
BA10	80	20	0.50	47.8	163	261	65	856	954
BA20	55	45	0.50	47.9	161	177	145	862	954
BA30	30	70	0.50	48.0	160	96	224	864	954
BB	0	100	0.50	47.9	160	0	320	861	954
■ BF mixing series (Types of BF was BF4000, SO ₃ content was ≈2.0)									
Types	W/B (%)	s/a (%)	Unit amount (kg/m³)						
			W	NP	BF	S	G	CS*	
BA20	0.40	45.9	161	330	72	795	954	3.32	
	0.50	47.9	161	264	58	862	954	2.65	
	0.60	49.0	171	234	51	883	938	2.35	

*: CS was replacement with BF.

Fig.1 Unit water content, slump and mix rate of BF by C mixing series.

Fig.2 Penetration resistance and time

Fig.3 Setting time of BF mixing series

Fig.4 Compressive strength and mix rate of BF by Cement mixing series.

Fig.5 Differences in cement manufactures.
for compressive strength

Fig.6 Relationship of compressive strengths between C and BF mixing series.

度であった。一方で、終結時間はNP、BA10およびBA20では同程度であったものの、BA30およびBBではBF混入率の増加により遅延した。また、BF混合シリーズでは、Fig.3に示すように、同一の水セメント比においては結合材中の SO_3 量、BFの種類にかかわらず、始発・終結時間ともに同程度であった。

3.6 圧縮強度

(1) C混合シリーズ

一般に流通するNPおよびBBを混合したC混合シリーズについて、セメント中のBF混入率と圧縮強度の関係をFig.4に示す。標準養生におけるBAコンクリートの圧縮強度は、NPに対してBF混入率の増加に伴い、材齢7日では低下したが、28日では同程度、91日では大きくなった。封かん養生においても標準養生とおおよその傾向は同様であるが、材齢7日以降の強度増進は小さく、高炉スラグ微粉末による潜在水硬性の影響が見られた。このような圧縮強度の発現性は、いずれの水セメント比や材齢でもBF混入率に伴い連続的であり、セメント単体であるNPとBBの中庸であった。

また、セメントメーカーの違いでは、Fig.5のようにメーカーCの圧縮強度が僅かに大きい、概ね同様な強度発現性と考えられる。

(2) BF混合シリーズ

NPに各種BFおよびCSを混合したBF混合シリーズにおける圧縮強度はC混合シリーズと同様な傾向を示し、Fig.6に示すように同一の材齢、BF混入率およびW/C (W/B) における圧縮強度の差は $\pm 10\%$ 以内程度と、およそ1:1の関係であり、また、全データの回帰による傾きは標準養生で0.98、封かん養生で0.96と僅かにC混合シリーズの方が小さいものの、大きな差は見られなかった。

Fig.7 Compressive strength due to BF types.

Fig.8 Compressive strength due to SO_3 content.

すなわち、一般に流通しているセメントであるNPとBBを混合し高炉セメントA種相当とした場合には、NPにBFを添加した場合と同等の強度発現性を示している。

また、圧縮強度におよぼすBF種類および結合材中の SO_3 量の影

響を Fig.7 および Fig.8 にそれぞれ示す。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。したがって、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、圧縮強度におよぼす影響は小さいものと考えられる。

3.7 静弾性係数

C 混合シリーズにおける標準養生の圧縮強度と静弾性係数の関係を Fig.9 に示し、図中には静弾性係数の推定式を併記した。圧縮強度と静弾性係数の関係は、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、本実験結果では、いずれの BF 混入率でも NP と同程度であり、この傾向は圧縮強度と同様に BF 混合シリーズでも同様であった。なお、推定式におけるコンクリートの単位容積質量 (γ) は、全供試体の密度の平均値より $\gamma = 2.33 \text{ t/m}^3$ を用いた。

3.8 中性化

(1) 促進中性化試験結果

C 混合シリーズにおける促進期間 26 週の BF 混入率と中性化深さの関係を Fig.10 に示す。中性化深さは、BF 混入率の増加に伴い大きくなる傾向を示したが、BF 混入率 10% および 20% では 2% (NP) と同程度であり、42% (BB) では 30% 以下よりも顕著に大きくなった。このような傾向は BF 混合シリーズにおいても同様であり、Fig.11 に示すように、C 混合シリーズと BF 混合シリーズの中性化

深さの関係はおおよそ 1 : 1 であり、圧縮強度と同様に大きな差は見られなかった。

また、C 混合シリーズにおける水セメント比と中性化速度係数の関係は Fig.12 となり、それぞれの BF 混入率において、直線的な相関が見られ、その関係は Table4 のような回帰式となる。

(2) 中性化抵抗性の寄与率

住宅の品質確保の促進等に関する法律（以下、品確法とする）では、劣化対策等級が定められているが、ここ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）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では

Fig.9 Young's modulus and compressive strength by C mixing series.

Fig.10 Carbonation depth and mixing rate of BF by C mixing series.

Fig.11 Relationship of carbonation depth Between C and BF mixing series.

Fig.12 Carbonation rate coefficient and water cement ratio.

Table4 Regression equation of carbonation rate coefficient.

Types	Regression equation $A = a \cdot W/C + b$		
	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

Fig.13 Example of carbonation rate coefficient when α is changed.

Table5 List of contribution ratio α of carbonation rate coefficient.

Types	Water per binder or cement ratio			
	0.40	0.50	0.60	Mean
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%) ¹⁴⁾	1.04	1.06	1.07	1.06
BB	0.78	0.76	0.75	0.76
N+BF(50%) ¹⁴⁾	0.84	0.84	0.83	0.84

BB であっても合理的・経済的な調合設計が難しくなり、「1. はじめに」で述べたように。上部構造物への利用の支障のひとつとなる。

前項の水セメント比と中性化速度係数の関係より、辻ら¹⁴⁾は混和材を添加したコンクリートについて、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「中性化抵抗性の寄与率 α 」として、“結合材量=NP 量+ α ×混合物（混和材）量”のように定めている。ここで、中性化抵抗性の寄与率 α は、Fig.13 に例として BA20 の場合を示すように、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 を逆算することで求められる。

本実験結果より求められた中性化抵抗性の寄与率 α は、Table5 に示すように、辻らの報告¹⁴⁾よりは小さいものの、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。

品確法の考え方における混合セメント中の混合物の 10 分の 3 の除外とは、中性化抵抗性の寄与率 $\alpha=0.7$ と同義となる。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を緩和できる可能性も示唆される。

3.9 室内実験のまとめ

室内実験では、NP に BB を混合した BA コンクリートの諸性状について検討を行った。その結果、このようなセメント混合においても NP に BF を混合した場合と同様な性状を示した。また、BA コンクリートは NP を用いたコンクリートに比べて、材齢 7 日の圧縮強度は、BF 混入量に伴い小さくなるものの、BF 混入率が約 20%以下では、凝結時間や材齢 28 日の圧縮強度、静弾性係数および中性化抵抗性といったコンクリートの性状は同等であった。

4. 実機実験

4.1 実験の概要

実機実験では、実際のレディーミクストコンクリート工場における実機プラントでのコンクリートの製造、フレッシュコンクリートの経時変化、柱および床の模擬試験体への施工性能や、各種の条件における強度発現性について実験を行った。

実験は、Table6 に示す要因と水準で行った。コンクリートの呼び強度は 27、36 および 45 の 3 水準とし、セメントの混合率は、前章

の室内実験の結果から凝結時間や強度発現性が NP と類似する範囲である BF 混入率が約 20%（BA20）となるよう NP：BB=55：45 で混合した。また、実験は夏期（記号 H）、標準期（S）および冬期（C）の 3 シーズンについて同一のレディーミクストコンクリート工場で行った。

4.2 コンクリートの使用材料および調合

実験に用いたコンクリートの使用材料および調合を Table7 に示す。セメントは同一メーカー製の NP および BB を使用し、細骨材は 4 種の混合砂、粗骨材は硬質砂岩砕石 2005 を使用した。また、化学混和剤は高性能 AE 減水剤とし、標準期および冬期では標準形を、夏期では遅延形を目標のスランブを満足する添加量で使用した。

コンクリートの調合はコンクリートの練上りからトラックアジテータ内による経時 60 分で、目標スランブ 18±2.5cm、目標空気量 4.5±1.5%とし、標準期における呼び強度 27 のみ目標スランブ 21±2.0cm を実施した。各呼び強度に応じた水セメント比は、レディーミクストコンクリート工場が定める JIS の標準調合における NP および BB の強度算定式より求まる値の中間で設定した。なお、Table7 に示すコンクリートの計画調合は通期で同一とした。

4.3 コンクリートの製造および試験方法

コンクリートの製造は、実機プラントで 1 バッチ 1.5m³を材料一括投入として、呼び強度 27 および 36 では 30 秒、呼び強度 45 では 40 秒間練り混ぜた。これを各調合で 2 バッチ行った計 3m³のコンクリートについて、所定の時間までトラックアジテータ内で攪拌し、

Table 6 Factors and levels of actual experiment.

Factors	Levels
Nominal strength (W/C)	27 (0.571), 36 (0.477), 45 (0.409)
Mixing rate of cement	NP : BB = 55 : 45 (Mixing rate of BF is approximately 20%)
Seasons	Summer (Sep.), Standard (Oct.), Winter (Des.)
Test period of fresh concrete	0, 30, 60, 90, 120min from mixing.
Compressive strength test	Standard, semi-adiabatic, in water on site curing. (7, 28, 56, 91 days) Sealed curing on site. (1, 2, 28, 56, 91 days) Core from column and slab model members. (28, 91days)

Table 7 Mixture proportions of concrete.

Nominal strength	Target slump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	Unit bulk volume of coarse aggregate (m ³ /m ³)	Unit amount (kg/m ³)					Addition amount of SP* (C・wt%)
					W	NP	BB	S	G	
27	18	0.571	50.8	0.555	174	168	137	917	894	1.10
27	21	0.571	52.9	0.525	179	173	141	943	846	1.15
36	18	0.477	49.7	0.557	170	196	161	879	896	1.10
45	18	0.409	47.6	0.564	170	229	187	817	907	0.80

Materials quality

Cement (C): Ordinary portland cement (NP), density 3.16g/cm³, specific surface area 3230cm²/g

Type B portland blast-furnace slag cement (BB), density 3.04g/cm³, specific surface area 3760cm²/g

Fine aggregate (S): Tight sands of Oume 30% + Tight sands of Hachiouji 30% + limestone of Chichibu 22% + pit sand of Futtsu 18%, oven-dry density 2.60g/cm³, absorption 1.51%, fineness modulus 2.71.

Coarse aggregate (G): Tight sands 2005 of Hadhiouji, oven-dry density 2.64g/cm³, absorption 0.81%, percentage of solid volume for evaluation of particle shape59.7%

Mixing water (W): Industrial water

Chemical admixture (SP): Air-entraining high-range water-reducing admixture, polycarboxylic acid.

*: Addition amount of SP shows values in standard season experiment.

実験に供した。

フレッシュコンクリートは、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) を練上りから 0、30、60、90 および 120 分で試験し、経時変化試験とした。

また、経時 60 分において、Fig.14 に示す 1000×1000×1000mm の柱模擬試験体および Fig.15 に示す 900×900×210mm の床模擬試験体および圧縮強度試験用の供試体を作製した。コンクリートの打込み後、床模擬試験体では上面を湿潤養生とし、柱模擬試験体とともに 1 週間程度で型枠を取り外し、所定の材齢で圧縮強度試験用のコアを採取した。なお、各模擬試験体においては、図中に示す熱電対位置でコンクリートの温度を測定した。

圧縮強度試験 (JIS A 1108) は、標準、現場水中、現場封かん、簡易断熱養生の供試体および柱、床の模擬試験体コアについて、いずれも寸法 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ として Table6 に示した材齢で実施した。

4.4 フレッシュコンクリート

Fig.16 にフレッシュコンクリートの経時変化を示す。フレッシュコンクリート試験の結果では、経過時間 60 分ではいずれのコンクリートもスランプ、空気量は目標範囲内であった。また、夏期の呼び強度 27 (27H: 記号は、数字は呼び強度を、H/S/C は季節区分を示す) でスランプのロスが見られたものの、その他ではスランプ、空気量ともにおおむね安定しており 120 分においても大きな変化は見られなかった。

Fig.17 に模擬試験体の最高温度を示す。いずれの季節区分でも、模擬試験体の最高温度は、柱の中心部で高く、床では柱よりも低かった。また、呼び強度が大きいほど最高温度は高く、もっとも高い夏期の呼び強度 45 では約 70℃であった。なお、模擬試験体の温度については、実験や環境の条件が異なるため直接的な比較は難しいが、NP および BB に相当する結合材を用いて同様に模擬試験体を

作製した実験結果¹⁵⁾と比較しても著しい違いはない程度であった。

4.5 圧縮強度

Fig.18 に呼び強度 36 のコンクリートにおける各種養生の材齢と圧縮強度の関係を示す。いずれの季節区分においても材齢 28 日の標準養生では呼び強度の強度値以上の圧縮強度を示した。また、現場封かんや簡易断熱養生、模擬部材のように、養生中に水分の供給が少ない条件においても材齢 28 日以降の強度増進が見られ、91 日

Fig.14 Schema of column model member.

Fig.15 Schema of slab model member.

Fig.16 Time dependent change of fresh concrete.

Fig.17 Maximum temperature of model members.

Fig.18 Compressive strength and age of nominal strength 36.

ではいずれの養生条件でも呼び強度の強度値以上の圧縮強度となり、これらの傾向は呼び強度 27 および 45 でも同様であった。

Fig.19 に柱模擬試験体コアと床模擬試験体コア、簡易断熱養生、現場封かん養生供試体の圧縮強度の関係を示す。柱模擬試験体と床模擬試験体のコア強度は同程度であり、床版のような薄く乾燥の影響を受けやすい部材においても十分な強度発現性が見られた。また、簡易断熱養生や現場封かん養生の供試体でも柱模擬部材のコアと圧縮強度は同程度あり、これらの養生では構造体コンクリートに類する強度発現性を有するものと考えられる。

4.6 調合設計に関する検討

(1) 標準偏差および水セメント比

Fig.20 に呼び強度と標準養生における圧縮強度の標準偏差の関係を示す。材齢 28 日における標準偏差は、図中に併記する実験を実施したレディーミクストコンクリート工場における JIS の標準値

よりも小さかった。

また、標準養生 28 日におけるセメント水比と圧縮強度の関係は Fig.21 に示すように直線的であり、標準養生 28 日の圧縮強度は、工場が保有する NP の強度算定式よりも大きく、安全側であった。

これらから、BA コンクリートにおいても、一般のコンクリートと同様な標準偏差を用いて調合強度を求め、また、NP と同様な強度算定式により、管理材齢を 28 日として必要な強度を発現させるための水セメント比（セメント水比）を求めるといった調合設計が適用できると考えられる。

(2) 構造体強度補正値 $_{28}S_{91}$

構造体強度補正値 mS_n は、 m を 28 日、 n を 91 日とした $_{28}S_{91}$ が建設省告示第 1102 号および JASS 5 で、それぞれセメントの種類により示されているが、高炉セメント A 種についてはいずれもない。

Fig.22 に 91 日コア強度と $_{28}S_{91}$ (標準 28 日強度 - 91 日コア強度)

Fig.19 Relationship of compressive strength between slab model member, semi-adiabatic curing, sealed curing in site and column mode member.

Fig.20 Standard deviation of compressive strength and nominal strength.

Fig.21 Compressive strength and Cement-water ratio.

Fig.23 Difference of compressive strength between standard 28 days and sealed 91 days

Fig.22 Strength concrete factor $_{28}S_{91}$ and 91days compressive strength of core from model members.

の関係を示す。この関係は、図中に併記した本研究と同じく柱や床の模擬部材について行った実機実験の結果¹⁵⁾と同程度であり、コア強度が大きくなるに伴い $_{28}S_{91}$ が大きくなる傾向が見られた。

また、本実験ではコア 91 日の圧縮強度が管理基準となる呼び強度の強度値から 3 または 6N/mm^2 を引いた設計基準強度 (F_c) よりも大きいものの、本実験結果における $_{28}S_{91}$ は、普通コンクリートとなる $F_c 18\sim 36\text{N/mm}^2$ にばらつきを考慮した範囲では、告示第 1102 号や JASS 5 示される標準値の 3 または 6N/mm^2 以下であった。

また、Fig.19 で示したように、封かん養生が構造体コンクリートに類する強度発現性を示すことから、室内実験における標準養生 28 日と封かん養生 91 日の圧縮強度の差と BF 混入率の関係を Fig.23 に示す。圧縮強度の差は、いずれの BA コンクリートにおいても NP や BB と同様に負の値となり、セメントメーカによる違いも見られなかった。以上のことから、BA コンクリートにおいても NP と同様の構造体強度補正値 $_{28}S_{91}$ を用いることができると考えられる。

4.7 構造体コンクリートの養生期間に関する検討

BA コンクリートの強度発現性については、室内実験の結果から Fig.4 で示したように圧縮強度は材齢 28 日では NP と同程度であるが、初期の材齢 7 日においては BF 混入量が大きくなるに伴い低下する。このような初期の強度発現性の低下から、打込まれた構造体コンクリートへの初期養生の配慮や注意を要することが考えられる。

そのため、ここでは有効材齢および積算温度の観点から、BA コンクリートの初期強度の発現性を考察し、構造体コンクリートにおける型枠の存置期間および湿潤養生期間について検討を行う。

(1) 有効材齢における強度発現性とセメント係数

コンクリートの強度発現の推定方法に有効材齢を用いたものがある。この方法は、建設省告示第 110 号において、せき板の取り外し時期の確認のためのコンクリート強度の推定手法のひとつとして用いられており、式 (1) で有効材齢が、式 (2) でコンクリート強度との関係が表される。

$$t_e = \frac{1}{24} \sum \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0} \right] \quad \text{式 (1)}$$

ここに、 Δt_i : ($i-1$) 回目のコンクリートの温度の測定から i 回目までの期間 (h)、 T_i : i 回目の測定により得られたコンクリートの温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 T_0 : 1 ($^{\circ}\text{C}$)

$$f_{c_{te}} = \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{(t_e - 0.5) / t_0} \right)^{1/2} \right] \right\} \cdot f_{c_{28}} \quad \text{式 (2)}$$

ここに、 $f_{c_{te}}$: コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 s : セメントの種類に応じた係数 (NP: 0.31、BB: 0.54)、 $f_{c_{28}}$: 呼び強度

Fig.24 に式 (1) で求められる有効材齢と呼び強度に対する現場封かん養生におけるコンクリートの圧縮強度比の関係を示し、式 (2) による圧縮強度の推移を併記した。なお、有効材齢によりせき板の取り外しを行う場合にはコンクリートの温度 (T_i) を用いるが、本検討では外気温を用いている。

実験値では、有効材齢 7 日未満までは NP のセメント係数 $s=0.31$ とした推定値と同程度あり、その後は推定値よりも安全側を推移した。また、BB の推定値 ($s=0.54$) では実験値と乖離することから、BA では NP と同様の $s=0.31$ を用いることができると考えられる

(2) 積算温度による強度発現性

有効材齢と同様に温度と強度発現の関係には、寒中コンクリートなどで用いられる積算温度があり、これは式 (3) で表される。

$$M = \sum_{z=1}^n (\theta_z + 10) \quad \text{式 (3)}$$

ここに、 M : 積算温度 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{D}$)、 z : 材齢 (日)、 θ_z : 材齢 z 日における平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)

Fig.25 に積算温度と呼び強度に対する現場封かん養生におけるコンクリートの圧縮強度比の関係を示す。およそ $360^{\circ}\text{C} \cdot \text{D}$ で回帰式が変わるものの、外気温との関係では Fig.24 の有効材齢よりも、積算温度では長期を含み精度よく強度発現を近似できている。

(3) 型枠の存置期間

告示第 110 号および JASS 5 では、対応する部位について、せき板および支柱 (支保工) における必要な所定の日数および圧縮強度を示している。型枠は、このうちのどちらかを確認した後に取外しを行うこととしているが、後者の方が存置期間は短くなることから、現場での管理に採用されることが多い。ここでは、外気温からコンクリートの強度発現性を精度よく推定できた積算温度との関係より、型枠や部位に応じた所定の強度が発現する日数の検討を行った。

Fig.25 中の関係式および式 (3) から、各種の型枠の存置期間となる所定の強度が発現する材齢について、期間中の平均気温との関係を設計基準強度ごとに Fig.26 および Table8 のように整理した。

Fig.24 Compressive strength ratio based on nominal strength and equivalent age.

Fig.25 Compressive strength ratio based on nominal strength and maturity factor.

Fig.26 Example of time for formwork to remain in place by average temperature.

Table 9 Reference for moist curing period.

Planned service life class	Requires strength (N/mm ²)	Fd (N/mm ²)	Average temperature during the period (°C)			
			5	10	20	30
Short	10	18	4.0	3.5	2.5	1.5
Standard		24	3.0	2.5	2.0	1.5
Long	15	30	4.0	3.5	2.5	1.5
Extra long		36	3.5	3.0	2.0	1.5

*: Reference periods were to move forwards every 0.5 days..

Table 8 Reference for Time for formwork to remain in place.

Fc (N/mm ²)	Sheathing												Shorting							
	Foundation, beam side, column and wall.								Under the slab and beam.				Under the lab.				Under the beam.			
	5N/mm ²				10N/mm ²				50% of Fc				85% of Fc				100% of Fc			
	5°C	10°C	20°C	30°C	5°C	10°C	20°C	30°C	5°C	10°C	20°C	30°C	5°C	10°C	20°C	30°C	5°C	10°C	20°C	30°C
18	2.5	2.0	1.5	1.0	—	—	—	—	3.5	3.0	2.0	1.5	7.5	7.5	5.0	3.0	11.0	11.0	7.5	4.0
24	2.0	1.5	1.0	1.0	—	—	—	—	4.0	3.5	2.5	1.5	9.0	8.5	5.5	3.5	12.5	12.5	8.5	5.0
30	2.0	1.5	1.0	1.0	2.5	2.5	1.5	1.0	4.0	3.5	2.5	1.5	9.5	8.5	6.0	3.5	14.0	13.0	9.0	5.5
36	2.0	1.5	1.0	1.0	2.5	2.0	1.5	1.0	4.0	3.5	2.5	1.5	10.0	9.0	6.0	4.0	15.0	13.5	9.0	5.5

*: Reference periods were to move forwards every 0.5 days.

これより、BA コンクリートの施工においては、圧縮強度の確認により型枠を取り外す場合には、Table 8 の日数を目安に現場封かん養生または現場水中養生の供試体で強度確認を行えばよいこととなる。また、これらの日数はいずれも告示第 110 号および JASS 5 で NP と同じと規定される高炉セメント A 種の存置日数よりも短いことから、BA においても NP と同様の管理方法が可能と考えられる。

(4) 湿潤養生期間

湿潤養生の期間については、JASS 5 では供用期間の級に応じて、型枠の存置期間と同様に日数および所定の強度が示されているが、高炉セメント A 種についてはない。しかし、室内実験より BA においても NP と同様な中性化抵抗性を示したことから、NP と同様な所定の強度で湿潤養生を打ち切ることができると考えられる。

そこで、前項と同じく、Fig.25 の関係から所定の強度が得られる材齢について Table9 のように整理し、強度確認を行う材齢の目安を示した。また、これらの日数は、JASS 5 で示される NP の湿潤養生の打ち切りの日数よりも短く、BA においても NP と同様に湿潤養生期間の管理が可能であると考えられる。

4.8 実機実験のまとめ

実機実験では、BF 混入率を約 20%となるように NP と BB を混合使用した BA コンクリートについて、フレッシュコンクリートの経時変化や各種の強度発現性について検討を行った。その結果 BA コンクリートにおける調合設計や強度管理手法および施工性能は NP を用いたコンクリートと同様に扱うことができることを示した。

5. 二酸化炭素の削減効果

NP および BB を混合使用した BA コンクリートによる二酸化炭素の削減効果を試算すると Table10 のようになる。単位あたりの二酸化炭素の削減率は、セメント中の高炉スラグの分量が約 10%で 8.4%、約 20%で 18.9%、約 30%で 29.5%となる。これは、高炉セメ

Table 10 Trial calculate for reduction effect of CO₂

Types	Mixing rate of BF (wt%)	Reduction rate of CO ₂ (%)	Amount to use of BA concrete.		
			10%	30%	50%
NP	0 ~ 5	0	—	—	—
BA10	nearly 10	8.4	192,734	578,202	963,670
BA20	nearly 20	18.9	433,652	1,300,955	2,168,258
BA30	nearly 30	29.5	674,569	2,023,707	3,372,845

Trial calculation conditions.

Inventory date of CO₂ were NP: 765.5kg-CO₂/t, BB: 443.4kg-CO₂/t¹⁶⁾

Unit cement content was 350kg/m³

Amount used of concrete was 85,481,000m³ that is experience of fiscal 2018 in Japan.¹⁷⁾

ント C 種相当の 60%超と比べると小さいが、室内および実機実験で検討したように NP と同様に上部構造物を含む多様な構造体に汎用的に適用できると考えると、削減される二酸化炭素の絶対量は小さくない。また、BA コンクリート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¹⁸⁾における CO₂削減等級の等級 1 または等級 2 に値する。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、BA コンクリートの環境負荷低減への有効性が伺える。

6. まとめ

普通ポルトランドセメント (NP) と高炉セメント B 種 (BB) を混合使用し、高炉セメント A 種相当 (BA) としたコンクリートの諸性状についてまとめると以下のとおりとなる。

- 1) BA コンクリートは NP に BF を混和材としたコンクリートと同程度の BF 混入率であれば同等な性状を示す。
- 2) BF 混入率 20%以下の BA コンクリートでは、凝結時間や材齢 28 日圧縮強度、静弾性係数及び中性化抵抗性は NP を用いたコンクリートと同等である。

- 3) BA コンクリートの調合設計や施工性能は、NP を用いたコンクリートと同様に扱うことができる。
- 4) BA コンクリートは、二酸化炭素の排出量を削減し、かつ上部構造物を含む多様な構造体に適用できるものと考えられる。

参考文献

- 1) Ministry of the Environment: Chikyuu ondannka keikaku (Plan for Global Warming Counter-measures), 2016.5.13
環境省：地球温暖化対策計画、2016.5.13
- 2) Ministry of Economy, Trade and Industry: sementosangyou ni okeru syouene seizou purosusu no hukuukakudaihousaku ni kansuru tyousa -kongousemennto no hukuukakudainousaku ni kannsuru kenntou- houkokusyo. (Survey report on measures to spread diffusion of process for energy-saving manufacturing in cement industry, study for measures to spread diffusion of blended cement.), 2016.3
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
- 3) Kobayashi, T., Chikamatsu, R., Mizobuchi, A. and Ichise, K.: Development of low Carbon Concrete “Clean-crete”, Report of Obayashi corporation technical research institute, No.75, pp.1-8, 2011 (In Japanese)
小林利允、近松竜一、溝渕麻子、一瀬賢一：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
- 4) Wachi, M., Kanai, R., Tsuji, D., Inoue, K., Mitsui, K. and Yonezawa, T.: Study on the Basic Properties of Concrete using High Amount of Ground-Granulated Blast-Furnace Slag, Takenaka technical research report, No.67, pp.1-6, 2011 (In Japanese)
和田正浩、金井亮、辻大二郎、井上和政、三井健郎、米澤敏夫：高炉スラグ微粉末高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性に関する研究、竹中技術研究報告 No.67、pp.1～6、2011
- 5) Kaneko, T., Yamashita, K., Nitta, M., Kawamata, A., Hayashi, H., Karasawa, T., Murai, K. and Takahashi, Y., et.al: Effects of replacement ratio of granulated blast-furnace slag as the mineral admixtures to concrete properties. Part.1-8, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Building Materials and Construction, pp.535-550, 2019.7 (In Japanese)
金子樹、山下紘太郎、新田稔、川又篤、林晴佳、唐沢智之、村井克綺、高橋祐一ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状 その1～8、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.535～550、2019.7
- 6) Takahashi, Y., Shimizu, K., Nonaka, A., Kishimoto, G., Sonoi, M., Tsurumi, J., Suzuki, Y., Kaneko, T., Furukawa, Y., Kono, M., et.al: Effects of replacement ratio of granulated blast-furnace slag as the mineral admixtures to concrete properties. Part.9-18, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Building Materials and Construction, pp.467-489, 2020.7 (In Japanese)
高橋祐一、清水啓介、野中英、岸本豪太、菌井孫文、鶴見淳也、鈴木好幸、金子樹、古川雄太、河野政典ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状 その9～18、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.467～489、2020.7
- 7) Kaneko, T., Seki, S., Okura, M. and Masuda, Y.: On the properties of concrete using portland blast-furnace slag cement type A by cement blended, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.40, No.1, pp.201-206, 2018 (In Japanese)
金子樹、関新之助、大倉真人、榊田佳寛：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に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.40、No.1、pp.201-206、2018
- 8) Kaneko, T., Okura, M. and Masuda, Y.: On the mix proportion design and curing of concrete in structure for the concrete using type A portland blast-furnace slag cement by cement blended, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.41, No.1, pp.95-100, 2019 (In Japanese)
金子樹、大倉真人、榊田佳寛：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における調合設計および構造物コンクリートの養生に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.41、No.1、pp.95-100、2019
- 9) Japan Cement Association: Data base of statics, output. (accessed 2020.10.1), http://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh2_1200.pdf
セメント協会：統計データベース、生産高（参照 2020.10.1）
- 10) Tamura, T., Yanagida, J., Kono, M., Takeuchi, H., Wakabayashi, S., Kato, J. and Matsuda, T.: Questionnaire survey of ready mixed concrete. Part.1 Outline of questionnaire survey, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Building Materials and Construction, pp.603-604, 2013.7 (In Japanese)
田村友法、柳田淳一、河野政典、竹内博幸、若林信太郎、加藤淳司、松田拓：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、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.603-604、2013.7
- 11) Nippon Slag Association: Tekkou suragu no kourosemento heno riyou. (2019 nen ban) (Utilization of iron and steel slag for portland blast-furnace slag cement. 2019), 2019
鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用（2019年版）、2019
- 12) Cement Journal Co., Ltd.: Konkuri-to you kouro suragu katsuyou handobukku. (Handbook for utilization of ground granulated blast-furnace slag for concrete.), p.69, 2011.2
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
- 13) Kobayashi, K., Uomoto, K., Shima, F.: Konkuri-to konwazai tositeno kouro suisai suraguhunmatsu no hinshitsu ga konkuri-to no assyuku kyoudo narabini kansou syuusyuku ni oyobosu eikyou. (Effect of quality of granulated blast-furnace slag powder for compressive strength and during shrinkage as the concrete mineral admixture.), Concrete Journal Vol.17 No.5, pp.87-95, 1975.5
小林一輔、魚本健人、嶋文雄：コンクリート混和材としての高炉火砕スラグ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
- 14) Tsuji, D., Masuda, Y., Shimizu, A., Imamoto, K., Tanano, H., Miyauchi, H., Kage, T. and Tsuchiya, N.: Durability Performance of Blended Cement Concrete. Part7 Contribution ratio for Carbonation Resistance, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Building Materials and Construction, pp.49-50, 2016.7 (In Japanese)
辻大二郎、榊田佳寛、清水昭之、今本啓一、棚野博之、宮内博之、鹿毛忠継、土屋直子：混合セメントを用いたコンクリートの耐久性能（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、2016.7
- 15) Tanano, H. et.al: Examination of the management standards concerning removal of concrete forms, Building Research Data, No.168, 2016.3
棚野博之ほか：型枠の取り外しに関する管理基準の検討、建築研究資料、No.168、2016.3
- 16) Japanese Cement Association: Summery on LCI data of cement, 2020.3.12
セメント協会：セメントの LCI データの概要、2020.3.12
- 17) ZENNAMA: Summery of ready-mixed concrete industry, Transition of national production amount. ((accessed 2020.10.1)
<https://www.zennama.or.jp/3-toukei/gaiyou/index.html>
全国生コンクリート工業組合連合会、全国生コンクリート共同組合連合会：生コンクリート製造業の概要、全国出荷数量の推移（参照 2020.10.1）
- 18) Architectural Institute of Japan: Recommendation for Design and Practice of Reinforced Concrete Building with Portland Blast-Furnace Slag Cement or Ground Granulated Blast-Furnace Slag, 2017.9
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

ON THE TYPE A PORTLAND BLAST-FURNACE SLAG CEMENT CONCRETE DUE TO BLENDED ORDINARY PORTLAND CEMENT AND TYPE B PORTLAND BLAST-FURNACE SLAG CEMENT

Tatsuki KANEKO^{*1}, *Mahito OKURA*^{*2} and *Yoshihiro MASUDA*^{*3}

^{*1} HASEKO Corporation Technical Research Institute, Ph.D.

^{*2} HASEKO Corporation Technical Research Institute, Deputy Director

^{*3} Prof., Emeritus, Utsunomiya Univ., Ph.D.

The climatic change such as the global warming is one of the important international problem. On the field of construction materials, environmental-conscious concrete which are CO₂ reduction from the concrete materials advance development and practical application. Mostly of these techniques use equivalent for the type C blended cement that are used a large amount of mineral admixtures as the substitution of cement. However, these concrete are used only underground structures of buildings due to properties of strength development, durability and construction performance. Moreover, the load for ready-mixed concrete plant is large on the manufacturing.

This research studied on the environmental-conscious concrete to use general purpose including above-ground structures. Type A portland blast-furnace slag cement is the blended cement which has the equality properties with ordinary portland cement. Nevertheless, Type A portland blast-furnace slag cement does not have production and distribution. Therefore, equivalent for the type A portland blast-furnace slag cement is made to blend the ordinary portland cement and the type B portland blast-furnace slag cement, and experimented on the indoor and the actual site.

On the indoor experiment, fresh concrete properties, strength development and durability were tested on 47 types concrete which were due to influenced mixing rate of blast-furnace slag, water-cement ratio and variability in qualities of the type B portland blast-furnace slag cement. As the result, concrete properties of blended the ordinary portland cement and the type B portland blast-furnace slag cement were similar to concrete adding granulated blast-furnace slag into ordinary portland cement. On 20% or less rate of blast-furnace slag, furthermore, compressive strength of since 28 days, setting times and carbonation resistance were equality with ordinary portland cement concrete.

On the actual experiment, time dependent change of fresh concrete, strength development of various curing conditions and model members, and construction performances were tested concrete which was made in ready-mixed concrete plant. As the results, method of mixture proportion design, quality control and curing showed can treat same with ordinary portland cement concrete.

In this matter, the type A portland blast-furnace slag cement equivalent which blend the ordinary portland cement and the type B portland blast-furnace slag cement has similar concrete characters with ordinary portland cement. Accordingly, this concrete is considered can use above-ground structures as the environmental-conscious concrete, and CO₂ is reduced approximately 18.9% from the trial calculate.

(2020 年 10 月 20 日原稿受理, 2021 年 1 月 27 日採用決定)