

環境配慮型のコンクリートの適用拡大

小林 利 充 並 木 憲 司
(東京本店品質管理部)

一 瀬 賢 一

Application of the Environment Consideration Concrete

Toshimitsu Kobayashi Kenji Namiki

Kenichi Ichise

Abstract

In this study, we investigate the basic property of the environment consideration concrete and it was applied to the field. We report the research result of the basic property of the concrete the mix percentage of the ground granulated blast-furnace slag (GGBS) was made equal to the Portland blast-furnace slag cement (Type A) kind in which. The report also states a research result that environment consideration concrete with GGBS or Portland blast-furnace slag cement (Type B) was applied to the field. Consequently, we confirmed that the basic property of the concrete using Portland blast-furnace slag cement (Type A) exhibits the same quality as normal concrete. This enables the concrete quality to be maintained, and the amount of emission of carbon dioxide to be reduced by adjusting the mix percentage of the ground granulated blast-furnace slag.

概 要

近年、地球温暖化対策として二酸化炭素を低減する取組みが各種行われている。コンクリート分野では、副産物系混和材を利用した環境配慮型のコンクリートが注目されている。本論では、高炉スラグ微粉末の混合割合を高炉セメントA種の範囲で使用したコンクリートの基礎的性状を検討した。また、高炉スラグ微粉末または高炉セメントを使用した環境配慮型のコンクリートを、建築構造物の地下および地上躯体に全面的に使用した内容を報告した。実験の結果、高炉セメントA種相当品の基礎的性状は、高炉スラグ微粉末無混入コンクリートと同等の性能があることが確認できた。実物件での適用では、部位ごとに最適な高炉スラグ微粉末の混合割合を設定することで、品質を考慮しつつ、コンクリートの二酸化炭素排出量を45%削減することができた。

1. はじめに

近年、地球温暖化に影響を及ぼす二酸化炭素(CO₂)排出量の削減検討が活発化している。気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)がフランスで開催され、温暖化対策の枠組みについて政府間で議論されている。このような中、コンクリート分野では、CO₂排出量の低減と副産物の有効利用の観点から、「副産物系混和材(以下、混和材という)」の利用が再注目されている。公益社団法人日本コンクリート工学会から「混和材を大量使用したコンクリートのアジア地域における有効利用に関する研究委員会報告書」¹⁾が、一般社団法人日本建築学会から「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」²⁾がそれぞれ刊行されている。筆者らは、前述した混和材に着目し、コンクリートの材料起源によるCO₂排出量を大幅に低減した「クリーンコンクリート[□](以下、CCという)」を開発し、約50物件に適用している³⁾⁷⁾。一般に、混和材を高含有したコンクリートは、混和材を使用しないコンクリートに比べて、セメント量の削減によるCO₂排出量の低減効果が高いこと、断熱温度上昇量を低減できることが

利点として挙げられる。また、首都圏における高炉スラグ微粉末(以下、スラグという)の供給状況としては、CCの普及に伴い、スラグを常備するレディーミクストコンクリート工場(以下、プラントという)が増えつつある。そのため、スラグが利用しやすい状況にある。

本論では、スラグの混合割合を高炉セメントA種の範囲で使用したコンクリートの基礎的性状を示す。次に、スラグまたは高炉セメントを使用した環境配慮型のコンクリートを、建築構造物全体に適用箇所を拡大した事例について報告する。

2. コンクリートのCO₂排出量

コンクリートのCO₂は、主として「コンクリートを構成する材料の製造」、「コンクリートの製造」および「施工」に起因して排出され、それぞれに輸送が加わる。ここで、前述した「コンクリートを構成する材料の製造」に着目し、各材料のCO₂排出量原単位をTable 1に示す⁸⁾。この結果を見ると、CO₂排出量は、ポルトランドセメントが772kg/tonに対して、スラグは35.6kg/tonであり、スラグはセメントの約1/20である。また、Table 1に示したCO₂

排出量原単位およびプラントの配合計画書(呼び強度30)をもとに、コンクリート1m³当たりの材料別CO₂排出量の内訳をFig. 1に示す。コンクリートを構成する材料のうち、ポルトランドセメントに起因するCO₂排出量が97.5%と非常に多いことがわかる。

一般に、セメント製造時に排出されるCO₂は、原材料やクリンカを粉砕する際の電力エネルギー起源および原材料を高温で焼成する際の熱エネルギー起源として発生する。さらに、セメントの主原料である石灰石を高温で焼成する際に熱分解(CaCO₃→CaO+CO₂↑)され、多量のCO₂が排出される。また、世界規模でのセメント産業からのCO₂排出量は、年々増加し、2010年には世界全体の約6%を占めている⁹⁾。一方、世界のセメントの生産高は2015年には約41億tonであったが¹⁰⁾、2050年には50億tonを大幅に上回ると予想されている¹¹⁾。したがって、セメントの代替としてスラグを使用した環境配慮型のコンクリートは、CO₂排出量の低減になり、地球温暖化対策として有効な手法であると考えられる。

3. 環境配慮型のコンクリートの概要

本論では、混和材を使用し、CO₂排出量を低減したコンクリートを「環境配慮型のコンクリート」と位置付けて記載する。したがって、従来から使用されている高炉セメントを使用したコンクリートも混和材を使用しているため、環境配慮型のコンクリートの範疇とする。前述したように、筆者らは、結合材に占めるポルトランドセメントの混合割合を30%未満とし、CO₂排出量原単位の小さい混和材を結合材の大部分に置換したCCを開発している。しかしながら、CCは、コンクリートの低炭素化や水和熱による温度上昇量を抑制できる反面、中性化の進行が速いという課題がある。そのため、主にマスコンクリートのひび割れ対策として地下構造物に適用されてきた。

今回の試みは、環境配慮型のコンクリートの適用拡大を目的に、地上躯体に適用できるコンクリートを検討した。具体的には、スラグの混合割合を、JIS R 5211(高炉セメント)に規定する高炉セメントA種と同等にした高炉セメントA種相当コンクリート(BA)(ノンプレミック)を検討した。この試みは、CCと比較して、CO₂排出量の低減効果は小さいものの、中性化抵抗性の向上が期待でき、環境配慮型のコンクリートの適用拡大になると考える。

4. 性能確認実験

既往の文献¹²⁾によると高炉セメントA種の使用実績は非常に少ない。BAを地上躯体に適用するに当たり、市中のプラントにおいてBAの室内試験練りを実施し、基礎的性状について検討を行った。

4.1 実験概要

コンクリートの使用材料をTable 2に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、混和材としては比表面積4,000cm²/gクラスのスラグ(せっこう内添型)を使用した。スラグの性質をTable 3に示す。また、細骨材は山砂および石灰砕砂、粗骨材は石灰石を使用した。化学混和剤は市販のAE減水剤を使用した。なお、使用材料はすべてJISに規定されるものとした。

コンクリートの調合をTable 4に示す。水結合材比(W/B)は45.0%、52.5%および60.0%の3水準とした。スラグの混合割合は、高炉セメントA種の範疇として20および25%の2水準とした。単位水量は、プラントの普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を使用したコンクリートの標準配合を参考に、180~185kg/m³の範囲に設定した。比較用として、プラントの標準配合である24-18-20N(W/C59.8%)の普通コンクリートも併せて検討を行った。コンクリートのスランプおよび空気量の目標値は18±2.5cmおよび4.5±1.5%とした。ただし、練上り時のスランプは、運搬による低下(3cm)を考慮して21±2.5cmを目標値とした。また、化学混和剤の添加率は、結合材に対して一律1.0%とした。

コンクリートの製造方法は、40リットルの二軸強制練りミキサーを用いて、材料を一括投入後、90秒間練混ぜを行った。その後、所定のフレッシュ性状であることを確認して供試体を作製した。試験はTable 5に示す、フレッシュ性状、強度性状および耐久性の各項目を実施した。

Table 1 使用材料のCO₂排出量原単位⁸⁾
Carbon-Dioxide Emission of Materials

材料	CO ₂ 排出量(kg/ton)
ポルトランドセメント	772
高炉スラグ微粉末	35.6
細骨材(砂)	4.9
粗骨材(砕石)	3.9
混和剤(ポリカルボン酸系)	350

[注] 水は0kg/ton、細骨材はすべて砂と仮定

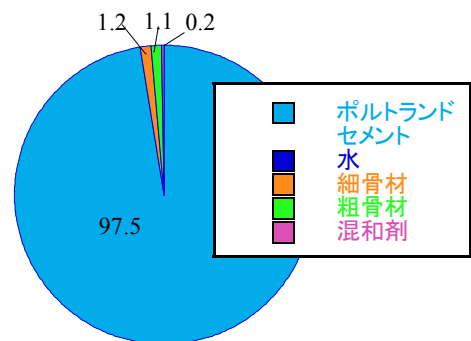


Fig. 1 コンクリートの材料別CO₂排出量の内訳
Detail of Carbon-Dioxide Emission by concrete

4.2 実験結果

4.2.1 フレッシュ性状 フレッシュ性状の一例を Photo 1に、セメントの混合割合とフレッシュ性状の関係を Fig. 2~Fig. 4に示す。スランプおよび空気量は、いずれも目標値を満足した。セメントの混合割合とスランプまたは空気量の関係を見ると、いずれも明確な影響は確認されなかった。一方、スランプフローは、いずれの水結合材比においてもセメントの混合割合が少なくなると小さくなる傾向が見られ、スラグ無混入コンクリート(以下、プレーンコンクリートという)と水結合材比60.0%のスラグ混入コンクリートを比較しても、前述した傾向が見られる。したがって、コンクリートの流動性に及ぼすセメントの混合割合の影響は、スランプでは明確ではないが、スランプフローではその差が確認できる。なお、スランプフローとスランプの比は1.7程度なので、建築工事施工監理指針¹³⁾による判定では、施工時に問題にならないと考える。

4.2.2 強度性状 セメントの混合割合と 28 日標準養生強度の関係を Fig. 5、セメントの混合割合と材齢 28 日に対する材齢 7 日の強度発現率の関係を Fig. 6に示す。28 日標準養生強度は、水結合材比が 60.0%の条件では、多少の差が見られる。しかしながら、水結合材比が 52.5% および 45.0%の条件では同程度である。また、材齢 28 日に対する材齢 7 日の強度発現率を見ると、プレーンコンクリートは 0.76 であるのに対して、スラグ混入コンクリートは 0.58~0.7 と低い。したがって、初期の強度発現という観点からは、プレーンコンクリートに比べて若干遅くなる傾向にある。

セメントの混合割合と構造体強度補正值($28S_{91}$)の関係を Fig. 7に示す。なお、 $28S_{91}$ の算出は、28日標準養生強度と91日簡易断熱養生強度の差から求めた。この結果からもわかるように、スラグ混入コンクリートの $28S_{91}$ は最大でも1N/mm²であることが確認された。

4.2.3 耐久性関連 セメントの混合割合と促進材齢 182 日における中性化速度係数の関係を Fig. 8 に示す。

セメントの混合割合が中性化速度係数に及ぼす明確な傾向は見られず、プレーンコンクリートと水結合材比 60.0%のスラグ混入コンクリートの中性化速度係数を比較するとほぼ同程度であった。中性化に関して、CC のようにスラグを高含有したコンクリートは、プレーンコンクリートに比べて中性化の進行が速くなる。これに対して、BA は、プレーンコンクリートと同等の中性化抵抗性を有していることが確認できた。

セメントの混合割合と耐久性指数の関係を Fig. 9 に示す。300 サイクル後の耐久性指数は、いずれの場合も 90% 以上が得られており、凍結融解抵抗性の観点からも問題ないと考えられる。

セメントの混合割合と乾燥収縮率の関係を Fig. 10 に示す。スラグ混入コンクリートの182日後の乾燥収縮率は、プレーンコンクリートに比べると、同等か若干小さい結果である。

Table 2 使用材料

Materials		
種類	概要	
結合材(B)	セメント(C)	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³)
	混和材(BS)	高炉スラグ微粉末(Table 3参照)
水(W)		工業用水
細骨材(S)		①山砂(表乾密度2.58g/cm ³) ②石灰砕砂(表乾密度2.69g/cm ³)
粗骨材(G)		石灰砕石(表乾密度2.69g/cm ³)
化学混和剤		AE減水剤

Table 3 高炉スラグ微粉末の性質

Properties of Ground Granulated Blast Furnace Slag

項目	試験値	
密度(g/cm ³)	2.86	
比表面積(cm ² /g)	4320	
活性度指数(%)	材齢7日	69
	材齢28日	93
	材齢56日	106
フロー値比(%)	95	
酸化マグネシウム(%)	6.74	
三酸化硫黄(%)	1.98	
強熱減量(%)	1.15	
塩化物イオン(%)	0.006	
塩基度	1.81	

Table 4 調合

Mix Proportions of Concretes

N	混合割合(%)		W/B (%)	単位量(kg/m ³)				
	C	BS		W	C	BS	S	G
0								
1	100	0	59.8	180	301	0	854	952
2	80	20	45.0	185	330	82	718	976
3	75	25	45.0	185	309	103	715	976
4	80	20	52.5	182	278	69	791	966
5	75	25	52.5	182	260	87	791	966
6	80	20	60.0	180	240	60	849	952
7	75	25	60.0	180	225	75	849	952

Table 5 試験項目

Test Item

項目	試験方法	
フレッシュ性状	スランプ	JIS A 1101
	スランプフロー	JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
強度性状	標準養生強度	JIS A 1108
	封かん養生強度	JIS A 1108
耐久性関連	促進中性化試験	JIS A 1153
	凍結融解試験	JIS A 1148
	長さ変化試験	JIS A 1129

また、いずれも JASS 5 の一般仕様コンクリートに示される 8×10^4 を大幅に下回っている。

4.2.4 CO₂ 排出量 28 日標準養生強度に対する CO₂ 排出量の比を Fig.11 に示す。比の算出方法は、各調合から求めた CO₂ 排出量を、28 日標準養生強度で除して求めた。プレーンコンクリートでは 7.84 であるのに対して、セメントの混合割合が少なくなると、その比は 5.66~6.26 と小さくなる傾向が見られる。つまり、同じ圧縮強度のコンクリートを得るときの CO₂ 排出量が小さくなることを意味している。したがって、スラグ混入コンクリートは、低炭素化が図れていることになる。

5. 実構造物への適用

5.1 建物概要

環境配慮型のコンクリートを適用した建物は、事務所を主用途とする鉄骨造(地下鉄筋コンクリート造)の建築物である。建物規模は、地上9階、地下1階、建築面積が 898m²、延べ床面積が8,168m²である。建物の外観をPhoto 2に、建物概要をTable 6に示す。

5.2 プラントの選定

プラントの選定は、現場への運搬時間が短いなどの搬入条件を優先させ、かつCCの製造・出荷実績の豊富な4工場を選定した。BAの調合設計に当たっては、各プラントにおいて試し練りを行った。Table 7には、プラントにおける各材料の製造者を示す。各材料の製造者の組合せは各プラントで異なるが、フレッシュ性状および強度性状はいずれも目標の性能を満足できることを確認した。なお、化学混和剤は、各プラントで常用しているものに対応可能であった。



Photo 1 コンクリートのフレッシュ性状(一例)
Fresh Properties of Concretes

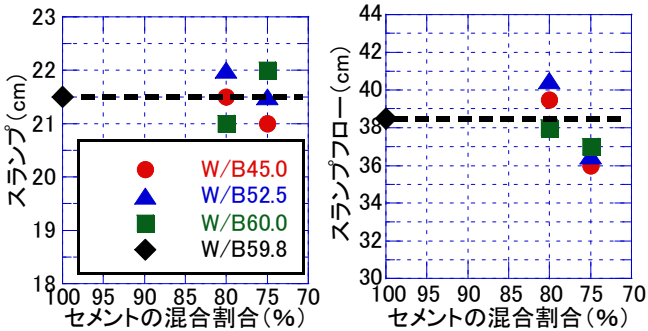


Fig. 2 スランプ
Slump

Fig. 3 スランプフロー
Slump Flow

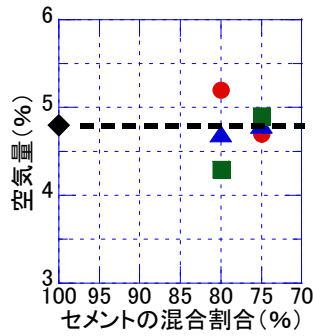


Fig. 4 空気量
Air Content

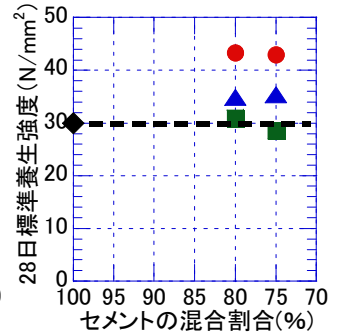


Fig. 5 28日標準養生強度
Compressive Strength(28d)

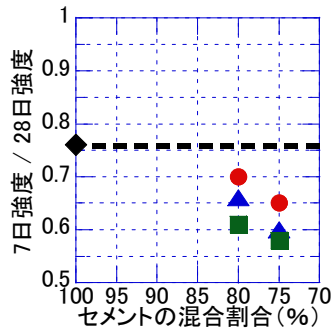


Fig. 6 強度発現
Strength Development

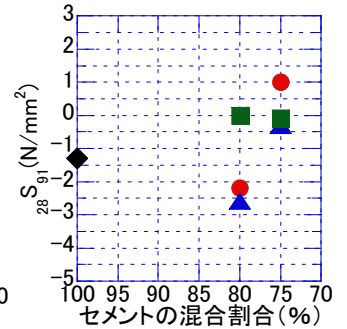


Fig. 7 強度補正值
Strength Correction Value

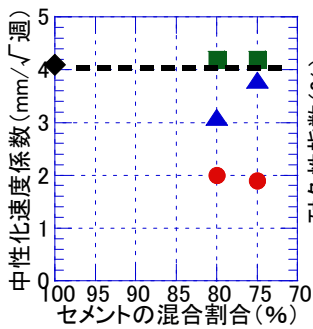


Fig. 8 中性化
Neutralization

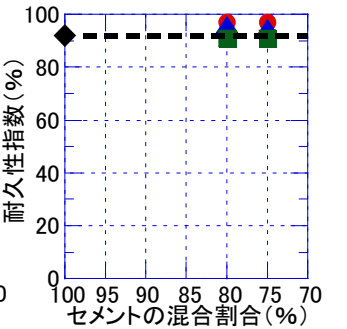


Fig. 9 凍結融解
Freezing and Thawing

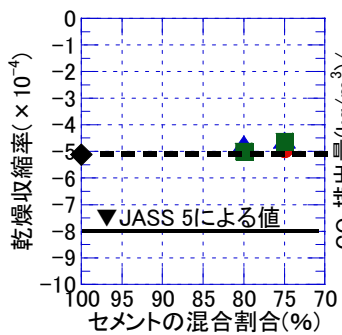


Fig.10 乾燥収縮
Drying Shrinkage

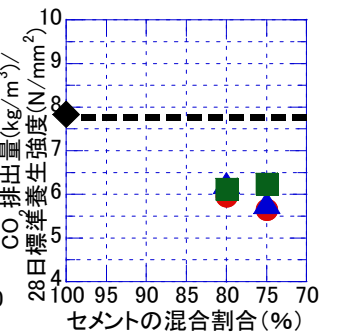


Fig.11 圧縮強度とCO₂ 排出量の比
Rato of Compressive Strength and CO₂ Emission

5.3 適用概要

当プロジェクトでは、強度発現性という観点からスラグを混和材に選定し、その混合割合を適用部材ごとに最適化することで、建物全体として品質確保およびCO₂排出量低減の両立を目指した。具体的に、基礎については、断面寸法が大きく温度ひび割れの可能性がある部材を含んでおり、水和熱の低減が期待できるCCを適用した。また、場所打ちコンクリート杭については、施工性を考慮し、適用実績の豊富な高炉セメントB種を使用したコンクリート(BB)を選定した。さらに、中性化が課題となる地上スラブについてはBAを適用した。部位別のコンクリートの構成をTable 8およびFig. 12に示す。

構造体に適用したコンクリートの数量をTable 9に示す。打込み時期は、場所打ちコンクリート杭が2016年4月～7月、基礎が2016年8月～11月、地上スラブが2016年10月～2017年3月であった。基礎から1階のスラブまでが設計基準強度(Fc)30N/mm²であったため、BAは1階と2階以上で設計基準強度が異なる。そのため、目標スランブは、地上スラブについては18cmとし、基礎と場所打ちコンクリート杭については21cmとした。BAのmSnについては、公共建築工事標準仕様書¹³⁾における「混合セメントのA種」の値を参考に、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと同一とした。CCおよびBAの使用材料および設定条件をTable 10およびTable 11に示す。



Photo 2 建物外観
View of Building

Table 6 建物概要
Outline of Building

項目	内容
主要用途	事務所(地下：機械式駐車場)
面積	建築面積：897.69m ² ， 延べ床面積：8,168.04m ²
構造	地下鉄筋コンクリート造，地上鉄骨造
階数	地下1階，地上9階，塔屋2階
最高高さ	最高高さ38.512m，最高軒高 34.662m
杭・基礎	杭基礎(アースドリル拡底工法)
工期	2016年3月～2017年8月

Table 7 各材料の製造者

Manufacturer of Each Materials			
プラント	セメント	高炉スラグ微粉末	化学混和剤
A工場	E社	H社	K社
B工場	F社	I社	L社
C工場	F社	I社	K社
D工場	G社	J社	M社

Table 8 コンクリートの構成

Construction of the Concretes			
部位	種類	高炉スラグ微粉末の割合*	
地上部	スラブ	BA	30%未満
	基礎	CC	70%以上
地下部	杭	BB	40～45%

[注] *：結合材に対する混合割合(%)

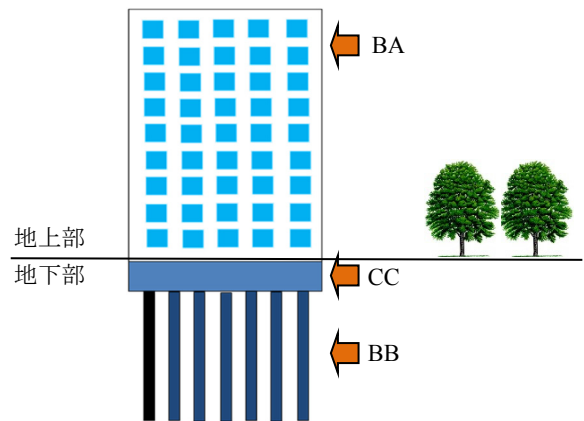


Fig. 12 コンクリートの適用のイメージ
Image of Application of Concrete

Table 9 コンクリートの打込み数量

Applied Quantity of Concretes			
適用部位	種類	設計基準強度 (N/mm ²)	打込み数量(m ³)
地上スラブ	BA	21(2階以上)	1,250
		30(1階)	243
基礎	CC	30	1,826
場所打ち杭	BB	30	1,107

Table 10 使用材料

Materials		
分類	種類	
結合材	セメント	普通ポルトランドセメント
	混和材	高炉スラグ微粉末4000
細骨材	山砂，石灰砕砂	
粗骨材	石灰砕石	
化学混和剤	高性能AE減水剤もしくはAE減水剤	

5.4 適用状況

場所打ちコンクリート杭については、トラックアジテータのシュートによる打込みである。その他の部位については、いずれもポンプ車(理論最大吐出量：78m³/h, 理論最大吐出圧：3.2MPa程度)にて圧送する計画とした。構台を設置した1階よりも下部の打込みはブームを使用し、それよりも上階の打込みは主に鉛直の輸送管を使用した。いずれの部位の打込みも、圧送時の閉塞等の不具合は見られず、締め作業も良好であった。打込みの状況をPhoto 3に示す。CCは、コンクリートの特性上ブリーディングが少なく、初期のプラスチック収縮ひび割れの発生が危惧された。防止策として、表面養生剤を使用してコンクリート上面の仕上げを行った。一方、BAのコンクリート上面は、過大なブリーディングや表面のこぼり等も発生せず、通常のコンクリートと同様に表面仕上げを行うことができた。打込み後は、通常の散水、被覆養生を行うことで、良好なコンクリート表面を得ることができた。

5.5 品質管理状況

コンクリートのフレッシュ性状の品質管理結果をFig. 13に、スランブ試験の一例をPhoto 4に示す。4工場のフレッシュ性状は目標値を満足した。標準偏差として、CCのスランブは0.6cm, 空気量は0.6%であった。また、BA(設計基準強度21N/mm²)のスランブは0.5cm, 空気量は0.4%と、いずれも安定した品質であった。

CCおよびBAの28日標準養生強度をFig. 14に示す。4工場の28日標準養生強度は、すべて呼び強度を満足した。標準偏差として、CCの呼び強度33では4.5N/mm², BAの呼び強度24では2.5N/mm²であった。CCについては、一部のプラントの強度データが高いため、全体としての標準偏差がやや大きい結果となっている。しかしながら、最小値は40.6N/mm²であり、各工場で適切な調合強度が設定されていると考える。また、BAについては、今回の施工において品質のばらつきは通常のコンクリートと同程度であることがわかった。今後、出荷実績を重ね、多くの製品データを得ることにより、調合強度をより合理的に設定できる可能性があると考えられる。

Table 11 設定条件
Setting Conditions

Fc (N/mm ²)	単位水量 (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)
21(2F以上スラブ)	180~185	18±2.5	4.5±1.5
30(1Fスラブ)	170	18±2.5	4.5±1.5
30(基礎)	170~175	21±2	4.5±1.5
30(杭)	197~199	21±2	4.5±1.5



(a)基礎：CC



(b)スラブ：BA

Photo 3 コンクリートの打込み状況
Application Situation of Concrete

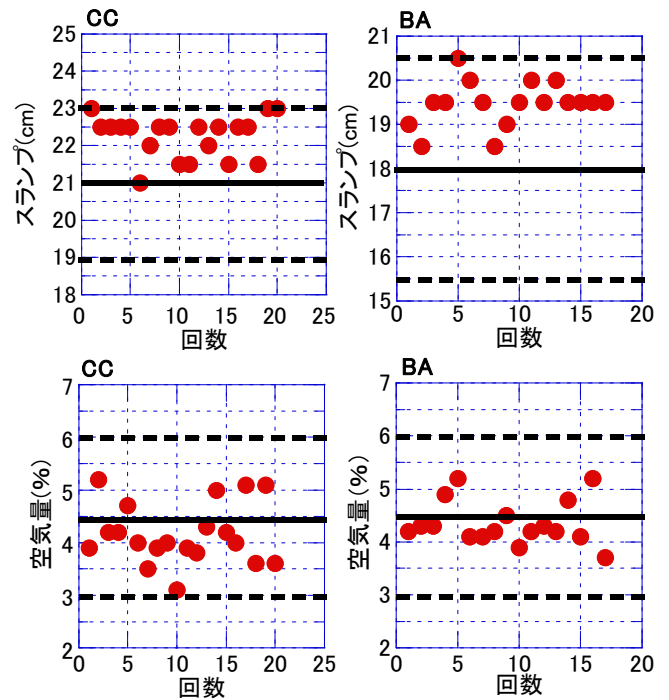


Fig. 13 コンクリートのフレッシュ性状
Fresh Property of Concrete

5.6 CO₂ 排出量削減効果に対する評価

本建物では、地下および地上躯体に環境配慮型のコンクリートを全面的に適用した。ここで、建物全体のCO₂削減効果について、普通ポルトランドセメントを結合材として100%使用した場合と比較した結果をTable 12に示す。日本建築学会の指針(案)¹⁴⁾に従うと、環境配慮型のコンクリートを建築物全体に適用することで、CO₂削減量にして596.5ton、削減率にして44.9%の環境負荷低減効果となる。同指針における環境配慮性に応じた等級としては、最高ランクの等級3に分類される。このうち、本建物において地上部分に初めて適用したBAにおけるCO₂排出量の削減量の割合は建物全体の10.5%となっており、割合的には少ないが、確実に削減効果を高めることができたと考える。



(a)CC



(b)BA

Photo 4 スランプ試験の一例
Slump Test of Concrete

6. まとめ

本論では、環境配慮型のコンクリートとして、スラグの混合割合を高炉セメントA種相当で使用したコンクリートの基礎的性状を検討した。また、スラグまたは高炉セメントを使用した環境配慮型のコンクリートを、建築構造物全体に適用箇所を拡大した事例を述べた。以下に得られた知見を示す。

[高炉セメントA種相当コンクリートの基礎的性質]

- 1)フレッシュ性状は、プレーンコンクリートと同等の性能を有するが、スランプフローに関しては、スラグの混合割合の増加に伴って小さくなる。ただし、建築工事施工監理指針の評価をもとに判断すると、実用上問題とならないと考える。
- 2)強度性状は、プレーンコンクリートと同等の性能を有するが、材齢28日に対する材齢7日の強度発現率は、若干遅れる傾向にある。
- 3)耐久性関連については、プレーンコンクリートと同等の性能を有することが確認できた。
- 4)二酸化炭素排出量は、プレーンコンクリートに比べて15~20%低減できる。

[環境配慮型のコンクリートの実適用]

- 1)環境配慮型のコンクリートとして適用したBA、BBおよびCCの品質管理結果は、いずれも所定の性能を満足した。
- 2)本建物で適用した環境配慮型のコンクリートは、従来のコンクリートに比べて、建物全体で約600ton、CO₂削減率で約45%を低減することができた。
- 3)結合材に対するスラグの混合割合を適切に設定することで、品質を確保しつつ、合理的に環境負荷低減を図ることが可能になると考える。

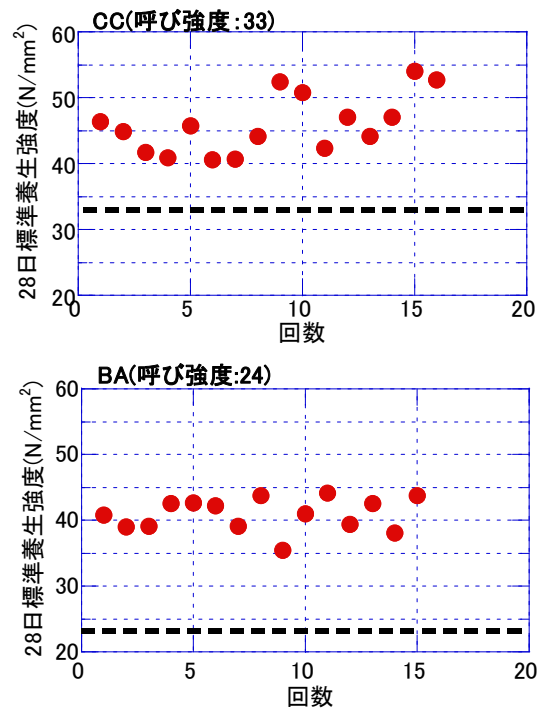


Fig.14 コンクリートの圧縮強度
Compressive Strength of Concrete

Table 12 コンクリートのCO₂排出量低減効果の概算
Reduction Effect of the Carbon Dioxide
Emission of Concrete

適用部位	種類	CO ₂ 削減量 (ton)	CO ₂ 削減率 (%)
地上スラブ	BA	54.4(Fc21)	18.0
		8.2(Fc30)	12.4
基礎	CC	384.2	64.5
場所打ち杭	BB	149.7	41.0
合計(建物全体)		596.5	44.9

謝辞

環境配慮型のコンクリートを実施工に適用するに当たり、ご協力頂いた関係各位に紙面を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1)日本コンクリート工学会：混和材を大量使用したコンクリートのアジア地域における有効利用に関する研究委員会報告書，202p，2015
- 2)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，244p，2017
- 3)小林立充，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)森田康夫，浅岡泰彦，小林立充，一瀬賢一：環境配慮型のコンクリートの建築構造物への適用，コンクリート工学，Vol. 51，No. 7，pp. 584-589，2013
- 5)神代泰道，小林立充，都築正則，松永成雄：大林組技術研究所新実験棟に適用したコンクリート技術，コンクリート工学，Vol. 52，No. 8，pp. 666-671，2014
- 6)小林立充：環境に配慮した低炭素型のコンクリート，コンクリート工学，Vol. 54，No. 5，pp. 578-581，2016
- 7)小林立充，並木憲司，一瀬賢一：低炭素型のコンクリート「クリーンクリート®」，大林組技術研究所報，No. 80，pp. 1-4，2016
- 8)日本コンクリート工学会：コンクリートの環境テキスト(案)[改定版]，127p，2015
- 9)Oak Ridge National Laboratory Carbon Dioxide Information Analysis Center：Global CO₂ Emissions from Fossil-fuel Burning，http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2013.ems，2016閲覧
- 10)U.S.Geological Survey：Cement Statistics and Information，<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement>，2016閲覧
- 11)Cement Sustainability Initiative，Progress Report 2007，27p，2007
- 12)依田彰彦，横室隆，久保田賢，神崎隆男：高炉セメントA種を用い33年経過したRC構造物の耐久性調査，セメント・コンクリート論文集，Vol. 56，pp. 443-448，2002
- 13)建設大臣官房官庁営繕部監修：建築工事施工監理指針(上巻)，社団法人営繕協会，360p，1989
- 14)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，pp. 155-168，2017