

報告 副産物および再生骨材を用いた環境配慮型コンクリートの基礎検討

高橋 祐一*1・松田 信広*2・竹内 博幸*3

要旨：CO₂ 排出量抑制を目的として高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いたコンクリートの研究が盛んに行われている。本検討では、これにリサイクル材である再生骨材を使用した環境配慮型コンクリートの基本的な性能について、室内実験にて確認した。その結果、いずれの調合においても良好なフレッシュコンクリート性状が得られるものの、圧縮強度、中性化および乾燥収縮に対する抵抗性は骨材の組合せや結合材種類によって、それぞれの性能が異なることを確認した。そのため、実用化にあたっては、CO₂ 排出量のみならず、強度発現性および適用部位を考慮して骨材や副産物の組合せおよび使用量を決定する必要がある。

キーワード：リサイクル, 低炭素, 再生骨材, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ

1. はじめに

近年、コンクリートの開発のキーワードとして「環境配慮型」が挙げられており、CO₂ 排出量の抑制を目的に、結合材または細骨材の代替として、副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた低炭素型コンクリートの研究が盛んに行われている^{例え1), 2)}。また、(一社)日本建設業連合会では、CO₂ 排出量原単位で2020年までに1990年度比20%、2030年まで25%の削減目標を掲げており、その中で、建設業における主要材料であるコンクリートの製造に伴うCO₂ 排出量を大幅に削減できる低炭素型コンクリートの普及推進に取り組んでいる³⁾。

一方、再生骨材は、構造物の解体により発生するコンクリート塊をリサイクルした材料で、再生骨材コンクリートの研究は1970年代から行われている。しかし、再生骨材に関するJIS規格や建築学会の指針等の整備は進められているものの、コンクリート用の骨材として利用されたのは、リサイクルされたコンクリート塊の0.2%程度に留まっている⁴⁾。

再生骨材の利用にあたっては、アルカリシリカ反応に対する品質管理が重要な管理項目の一つである。筆者らは出所を特定しない再生骨材を対象にしていることから、アルカリシリカ反応抑制対策として、a) コンクリートのアルカリ総量規制(3.0kg/m³以下)、b) アルカリシリカ反応抑制効果のあるセメント・混和材の使用、c) 安全と認められる骨材の使用、の3点について実施している。このうち、アルカリシリカ反応抑制効果のある混和材としては、高炉スラグ微粉末もしくはフライアッシュが挙げられている。すなわち、これらを再生骨材コンクリートに使用することで、アルカリシリカ反応を抑制するとともに低炭素化が可能な環境配慮型コンクリートを製造できると考えられる。

そこで、本検討では、高炉スラグ微粉末4000およびフライアッシュⅡ種を結合材の一部として使用した再生骨材コンクリートの基本的な性能を確認することを目的とした実験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料を表-1に示す。セメントおよび混和材は当該工場の実出荷を想定し、安定して入手できる材料とした。再生骨材は、当該工場において通常製造されている品質(再生骨材M相当)のものである。

2.2 調合

本実験におけるコンクリートの調合を表-2に示す。FAおよびBFSは、セメントの内割で使用した。結合材はBBのみの調合(以下、BB調合とする)、BB:FA=9:

表-1 使用材料

名称	記号	銘柄/産地	物性
セメント	BB	高炉セメントB種	密度: 3.04g/cm ³
	N	普通ポルトランドセメント	密度: 3.15g/cm ³
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末4000	密度: 2.88g/cm ³ 粉末度: 4,450cm ² /g
	FA	フライアッシュⅡ種	密度: 2.27g/cm ³ 粉末度: 3,750cm ² /g
普通細骨材	S1	砕砂/東京都八王子産	絶乾密度: 2.60g/cm ³ 吸水率: 1.14%
	S2	山砂/千葉県富津産	絶乾密度: 2.52g/cm ³ 吸水率: 1.82%
再生細骨材	RS	再生骨材M相当	絶乾密度: 2.49g/cm ³ 吸水率: 3.17%
普通粗骨材	G	碎石/東京都八王子産	絶乾密度: 2.61g/cm ³ 吸水率: 0.91%
再生粗骨材	RG	再生骨材M相当	絶乾密度: 2.48g/cm ³ 吸水率: 3.03%
化学混和剤	Ad	AE減水剤(高機能タイプ)	密度: 1.055g/cm ³
	SP	高性能AE減水剤	密度: 1.062g/cm ³

*1 五洋建設(株)技術研究所 建築技術開発部 課長 博士(工学) (正会員)

*2 (株)東京テクノ 工場長 (正会員)

*3 五洋建設(株)技術研究所 建築技術開発部長 (正会員)

表-2 調合

調合名*1	W/B (%)	単位量(kg/m ³)										Ad/SP*2 (B×%)	AE*3
		W	BB	N	FA	BFS	SI/S2	RS	G	RG			
55BBJJ	55	176	320	-	-	613/257	-	910	-	1.20	4.0A		
55BBJR		174	316			593/248	-	912					
55BBRR	55	173	283	-	-	615/258	-	910	-	1.50	3.5A		
55BBFJJ		171	280			595/249	-	912					
55BBFJR	55	173	94	31	189	611/256	-	910	-	1.00	10A		
55BBFRR		171				93	591/247	-	912				
55NFBJJ	55	171	-	93	187	-	822	-	912	0.60	8.0A		
55NFBJR		176				391	570/239	-	910	-	1.50		
55NFBRR	55	174	387	-	-	550/230	-	912	-	1.30	5.0A		
45BBJJ		173	346			-	765	-	912	-	1.10		
45BBFJJ	45	171	342	-	-	571/239	-	910	-	1.10	13A		
45BBFJR		173	342			552/231	-	912					
45BBFRR	45	173	115	38	231	566/237	-	910	-	1.00	12A		
45NFBJJ		171				114	546/229	-	912				
45NFBJR	45	171	-	114	228	-	760	-	912	0.40	12A		
45NFBRR		173				494	535/224	-	878	-	1.00		
35BBJJ	35	171	489	-	-	517/216	-	880	-	0.80	7.0A		
35BBJR		170	437			-	718	-	880	-	0.85		
35BBRR	35	170	437	-	49	536/224	-	878	-	0.80	16A		
35BBFJJ		168	432			517/217	-	880					
35BBFJR	35	170	146	49	291	529/221	-	878	-	0.90	15A		
35BBFRR		168				144	511/214	-	880				
35NFBJJ	35	168	-	144	48	511/214	-	880	-	0.80	14A		
35NFBJR		168				144	511/214	-	880				
35NFBRR	35	168	-	144	48	511/214	-	880	-	0.60	12A		
35NFBRR		168				144	511/214	-	880				

*1 調合名：水結合材比・結合材種類・骨材の組合せ

*2 W/B=55%・45%：Ad (AE減水剤(高性能タイプ))

W/B=35%：SP (高性能 AE 減水剤)

*3 空気量調整剤 1.0A=B×0.002%

1とした調合(以下、BBF調合とする)およびN:FA:BSF=3:1:6とした調合(以下、NFB調合)の3種類とした。なお、各材料の混合比率は全て質量比とし、BSFおよびFAの置換率は、実用化を想定して決定した。水結合材比は55%、45%および35%の3水準、骨材の組合せは、細骨材と粗骨材ともに普通骨材(以下、JJ調合)、粗骨材のみ再生骨材(以下、JR調合)および細骨材と粗骨材ともに再生骨材(以下、RR調合)の3水準とした。目標スランブおよび許容差は、W/B=55%および45%で18±2.5cm、W/B=35%で23±2cm(ただし、23cmを超えた場合は材料分離のないこと)とし、目標空気量はすべての調合で4.5±1.5%として、AE減水剤または高性能AE減水剤および空気量調整剤を用いて調整した。また、単位水量は当該工場の実績に基づき、再生骨材を用いた調合は普通骨材を用いた調合から2kg/m³、BBF調合およびNFB調合はBB調合から3kg/m³それぞれ減じた。

2.3 練混ぜ

練混ぜは60L強制二軸練りミキサを使用し、空練りを15秒行い、注水後、90秒練り混ぜて排出した。ただし、W/B=35%の調合については、練混ぜ後5分間静置して30秒攪拌した後に排出した。

2.4 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-3に示す。硬化コンクリートに対しては、圧縮強度および静弾性係数の他、一

表-3 試験項目および試験方法

対象	試験項目	試験方法	備考
フレッシュコンクリート	スランブ	JIS A 1101	18±2.5cm ^{*1} 23±2.0cm ^{*2}
	空気量	JIS A 1128	4.5±1.5%
	コンクリート温度	JIS A 1156	-
	塩化物量	JASS5T-502	0.30kg/m ³ 以下
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108	標準養生
	静弾性係数	JIS A 1149	標準養生
	アルカリシリカ反応性	ZKT-206	相対動弾性係数≥80%
	促進中性化	JIS A 1153	-
	長さ変化	JIS A 1129	-

*1 W/B=55%・45%

*2 W/B=35%、23cmを超えた場合は材料分離のないこと

表-4 フレッシュコンクリート試験結果

調合名	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	塩化物量 (kg/m ³)	
55BBJJ	15.5	4.3	14	-	
55BBJR	17.0	4.5	14		
55BBRR	18.5	4.2	14		
55BBFJJ	20.0	4.7	13		
55BBFJR	19.0	4.5	13		
55BBFRR	18.5	4.9	14		
55NFBJJ	19.5	4.6	12		
55NFBJR	17.5	4.0	11		
55NFBRR	20.0	5.0	11		
45BBJJ	20.5	4.0	13		
45BBJR	19.5	3.8	13		
45BBRR	17.5	3.8	13		
45BBFJJ	19.5	4.7	14		
45BBFJR	19.0	4.7	13		
45BBFRR	19.0	5.0	14		
45NFBJJ	20.0	4.4	12		
45NFBJR	20.5	5.1	11		
45NFBRR	17.0	5.4	12		
35BBJJ	25.0 ^{*1}	4.1	14		0.028
35BBJR	23.0	4.5	13		0.029
35BBRR	22.0	5.0	14	0.027	
35BBFJJ	23.0	5.2	14	0.024	
35BBFJR	22.5	4.8	14	0.022	
35BBFRR	22.5	5.4	15	0.028	
35NFBJJ	23.0	4.4	12	0.007	
35NFBJR	22.5	4.3	12	0.006	
35NFBRR	23.0	5.5	12	0.006	

*1 材料分離なし

部の調合について、アルカリシリカ反応性、促進中性化試験および長さ変化試験を実施した。促進中性化試験は、各水結合材比において各結合材を用いたRR調合と、W/B=45%のBBF調合については、骨材の組合せの影響を確認するため、JJ調合およびJR調合も加えて実施した。また、長さ変化率試験は、W/B=55%および35%において各結合材を用いたRR調合と、W/B=55%のBBF調合については、骨材の組合せの影響を確認するため、JJ調合およびJR調合も加えて実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4に、各調

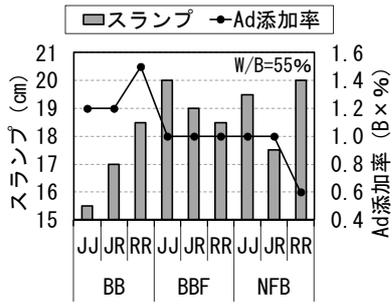


図-1 スランプと AE 減水剤添加率 (W/B=55%)

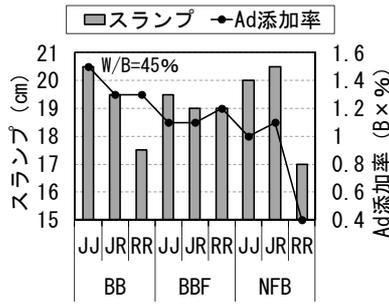


図-2 スランプと AE 減水剤添加率 (W/B=45%)

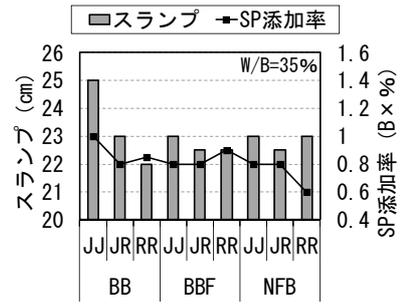


図-3 スランプと高性能 AE 減水剤添加率 (W/B=35%)

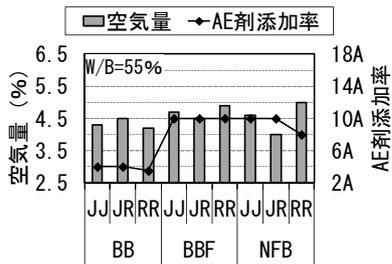


図-4 空気量と空気量調整剤添加率 (W/B=55%)

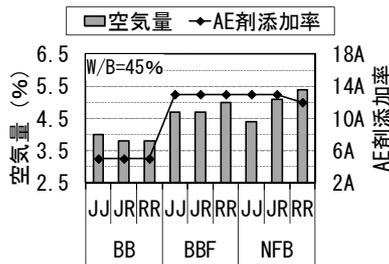


図-5 空気量と空気量調整剤添加率 (W/B=45%)

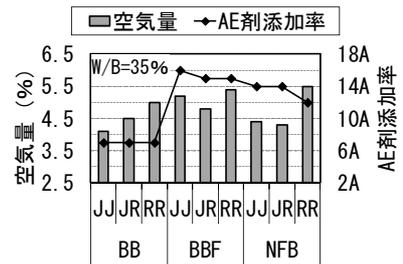


図-6 空気量と空気量調整剤添加率 (W/B=35%)

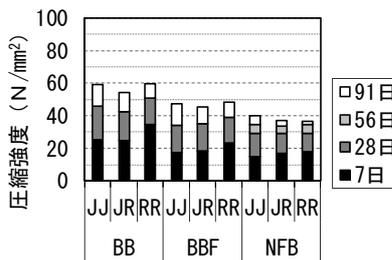


図-7 圧縮強度試験結果 (W/B=55%)

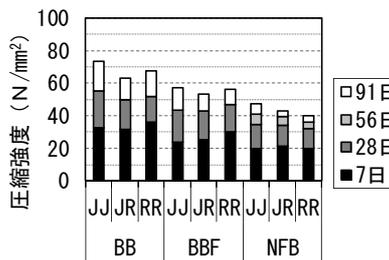


図-8 圧縮強度試験結果 (W/B=45%)

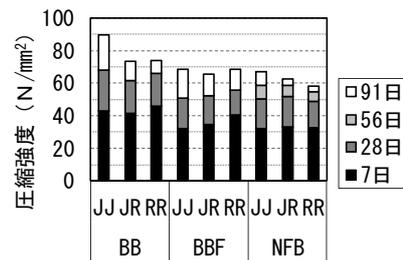


図-9 圧縮強度試験結果 (W/B=35%)

合におけるスランプ試験結果と AE 減水剤または高性能 AE 減水剤の添加率を図-1～図-3 に、空気量試験結果と空気量調整剤の添加率を図-4～図-6 に示す。スランプおよび空気量は全ての調査で管理値内に納まった。スランプにおける骨材の組合せの影響をみると、BB 調査および NFB 調査では、RR 調査が他の骨材を用いた調査と同程度のスランプを得るための AE 減水剤または高性能 AE 減水剤の添加率が大きくなる傾向にあった。一方、結合材種類の影響をみると、W/B=55%および 45%では、BB 調査と比較して BBF 調査および NFB 調査は AE 減水剤の添加量が小さくなる傾向にあった。空気量は骨材の組合せによる影響はあまりみられないものの、FA を使用した BBF 調査および NFB 調査では、空気量調整剤の使用量が BB 調査の 2 倍～2.5 倍程度必要であった。W/B=35%の調査を対象に実施した塩化物量試験の結果をみると、最大で 0.029kg/m^3 (35BBJR) であり、いずれも規準値である 0.30kg/m^3 を大きく下回った。また、実

際の出荷の際には、再生骨材から溶出する塩化物量を再生骨材の全塩化物量の $1/5^5$ とし、溶出しない塩化物量をあらかじめ差し引いた値として設定した管理限界値を用いた管理を行っている。本実験の W/B=35%の管理限界値は、JR 調査で $0.226\text{kg/m}^3 \sim 0.228\text{kg/m}^3$ 、RR 調査で $0.169\text{kg/m}^3 \sim 0.171\text{kg/m}^3$ となるが、いずれの調査においても十分に下回った。

3.2 圧縮強度および静弾性係数試験結果

圧縮強度試験結果を図-7～図-9 に示す。圧縮強度に及ぼす骨材の組合せの影響をみると、材齢 28 日においては、BB 調査で $RR \geq JJ > JR$ 、BBF 調査で $RR > JJ = JR$ と異なる傾向にあったものの、NFB 調査ではほとんど影響がみられなかった。一方、材齢 28 日以降の強度の伸びをみると、結合材種類や水結合材比により値に差はあるものの、JJ 調査と比較して再生骨材を使用した JR 調査と RR 調査では小さくなる傾向にあり、とくに BB 調査の W/B=35%では顕著であった。これは、過去の研究⁶⁾と同

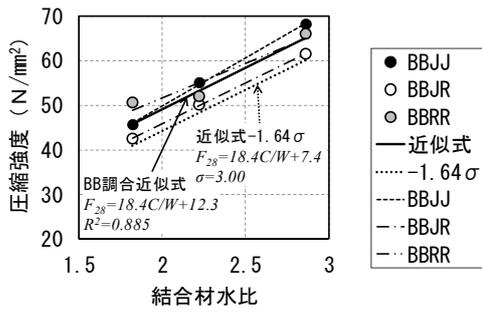


図-10 結合材水比と圧縮強度の関係 (BB 調合)

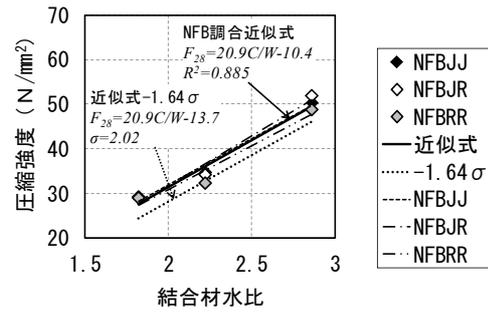


図-12 結合材水比と圧縮強度の関係 (NFB 調合)

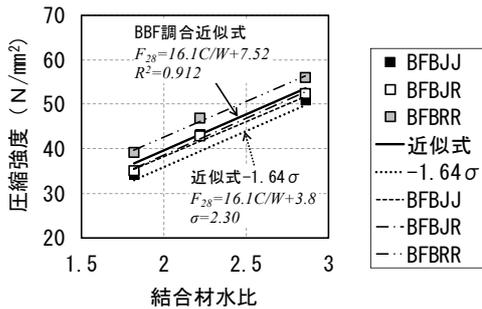


図-11 結合材水比と圧縮強度の関係 (BBF 調合)

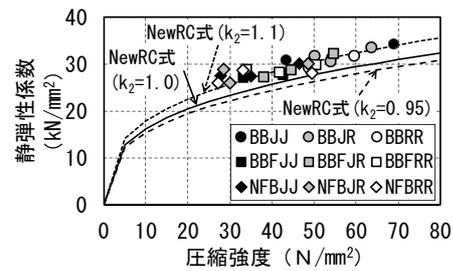


図-13 圧縮強度と静弾性係数の関係 (材齢 28 日)

様であった。結合材種類の影響をみると、いずれの水結合材比においても BB 調合が最も大きくなっており、W/B=55%および45%ではNFB 調合と比較してBBF 調合の方が大きく、結合材中のセメントの割合が大きいほど圧縮強度が大きくなる傾向にあった。しかし、W/B=35%のBBF 調合とNFB 調合の差はあまりみられなかった。

結合材種類ごとの結合材水比と材齢 28 日圧縮強度の関係を図-10～図-12 に示す。結合材水比と圧縮強度の関係から求めた近似式の傾きは、結合材種類に拘らず概ね同等であった。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-13 に示す。なお、図中には、NewRC 式に混和材種類ごとの修正係数 (FA : 1.1, BSF : 0.95) をそれぞれ乗じた式を示している。本実験では、骨材の組合せや結合材種類の影響はほとんどなく、NewRC 式にて求められる値と同等の値を示した。

3.3 アルカリシリカ反応迅速試験結果

35BBFRR および 35NFBRR を対象に行ったアルカリシリカ反応迅速試験結果を表-5 に示す。いずれも反応性無し(A)と判定される相対動弾性係数 80%以上となった。

3.4 中性化深さ

促進中性化試験結果を図-14 に示す。W/B=45%のBBF 調合における骨材の組合せによる影響をみると、JJ 調合で 18.3mm, JR 調合で 16.7mm, RR 調合で 12.6mm と再生骨材を使用した調合の方がやや小さい結果であった。一方、結合材種類による影響をみると、いずれの水結合材比においてもNFB 調合が最も大きく、一方でBB 調合が最も小さくなり、結合材中のセメントの割合が影

表-5 アルカリシリカ反応迅速試験結果

調合名	一次共鳴振動数(Hz)		相対動弾性係数(%)	
	煮沸前	煮沸後	平均	差
35BBF-RR	9331	9304	99.4	0.6
	9331	9244	98.1	-0.7
	9285	9227	98.8	0.0
35NFB-RR	8753	8710	99.0	-0.3
	8668	8669	100	0.7
	8840	8796	99.0	-0.3

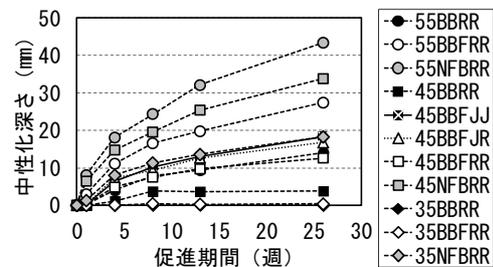


図-14 促進中性化試験結果

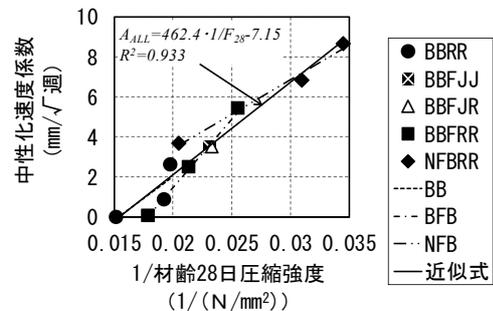


図-15 圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係

響する結果となった。材齢 28 日圧縮強度と中性化速度係数の関係を図-15 に示す。結合材種類によるばらつきは

多少あるものの、両者の間には正の相関がみられており、圧縮強度の逆数が小さい、すなわち圧縮強度が大きいほど中性化速度係数が小さくなるという一般的な傾向と同様であった。また、建築学会が発行している「建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事」(以下、JASS5 とする)において、計画供用期間の級が標準の場合の所要の中性化速度の指標値として $1.69\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ が示されている。これを促進中性化試験条件において換算すると $2.34\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$ となる。この値を満足する圧縮強度を図-15中に示す近似式から求めると $48.7\text{N}/\text{mm}^2$ となる。さらに結合材種類ごとにこの圧縮強度を満足するための水結合材比を図-4~図-6に示すばらつきを考慮した下限式 (-1.64σ) より求めると、BB 調合で 44.6%、BBF 調合で 35.9%、NFB 調合で 33.5% となり、JASS5 に示される普通ポルトランドセメントのケースと比較して小さく、特に BBF 調合および NFB 調合はかなり小さい値となった。

3.5 長さ変化率

長さ変化率の試験結果を図-16に示す。目標値となる 8×10^{-4} 以下を満足したのは、BB 調合および NFB 調合であった。骨材の組合せの影響をみると、JJ 調合と比較して、JR 調合および RR 調合はそれぞれ 172×10^{-6} 、 87×10^{-6} と 10%~20%程度大きい値となり、再生骨材を使用した影響がみられた。一方、結合材種類による影響をみると、BB 調合と NFB 調合は概ね同程度であったものの、これらと比較して BBF 調合がやや大きくなる傾向にあった。一般に、FA を使用することで長さ変化率は小さくなるが、本実験では逆の結果となった。

乾燥期間 4 週、8 週、13 週と 26 週の長さ変化率の関係

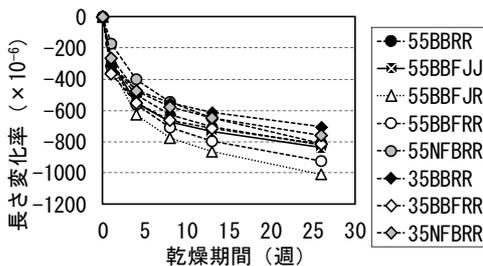


図-16 長さ変化率試験結果

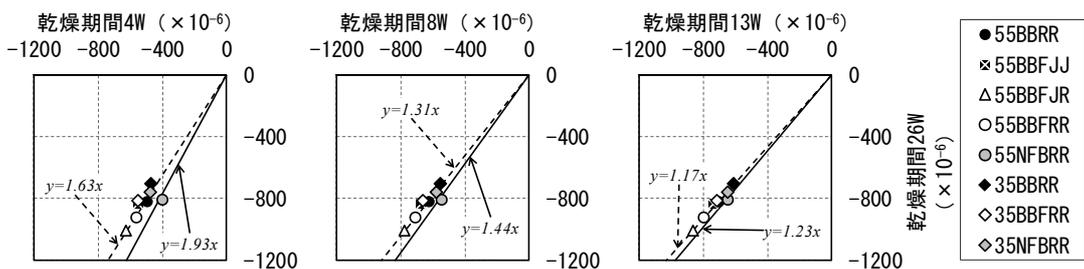


図-17 乾燥期間 4 週・8 週・13 週と 26 週の長さ変化率の関係

を図-17に示す。図中の破線は近似式を、直線は 4%不良率を考慮した式を示している。55NFBRR を除いてどちらも良好な相関が認められ、骨材の組合せおよび結合材種類の影響はほとんどみられなかった。JASS5 に示されている係数 α_i ($\alpha_f=2.11$, $\alpha_s=1.49$, $\alpha_{13}=1.21$) と本実験の結果を比較すると、4 週および 8 週では本実験の α_i の方が小さい結果であった。

4. CO₂ 排出量の算定

4.1 呼び強度に対応する水結合材比の算定

CO₂ 排出量を比較するにあたって、結合材ごとに呼び強度 30~42 に対応する水結合材比を算出した。水結合材比の算出には図-10~図-12に示しているばらつきを考慮した下限式 (-1.64σ) を強度算定式として使用した。また、標準偏差は呼び強度の 10%とし、調査強度は式(1)および式(2)を満足するように定めた。

$$F = SL + 2\sigma \quad \dots \text{式(1)}$$

$$F = 0.85SL + 3\sigma \quad \dots \text{式(2)}$$

ここに、 F : 調査強度 (N/mm²)

SL : 呼び強度 (N/mm²)

σ : 標準偏差 (N/mm²)

結合材ごとの呼び強度に対応する水結合材比の一覧を表-6に示す。なお、一部は本実験の水結合材比の範囲外に、また、BB 調合においては一般より大きな水結合材比となっているが、関係式が成り立つものと仮定して算定した。

4.2 CO₂ 排出量の算定および比較

CO₂ 排出量の比較は、各呼び強度において目標スランブ 18cm の調査を対象とした。なお、CO₂ 排出量の算定に用いた各材料の CO₂ 排出量原単位は表-7に示すとおりである。

各調査における CO₂ 排出量の算定結果を図-18に示す。CO₂ 排出量は、結合材種類に拘らず呼び強度の増加に伴って大きくなっている。BB 調合に対する同一呼び強度の BBF 調合および NFB 調合の CO₂ 排出量の割合をみると、呼び強度が大きいほど、その割合は小さくなっている。しかし、同一呼び強度の CO₂ 排出量は、NFB 調合が最も小さく、BBF 調合が最も大きい結果となり、低

表-6 結合材ごとの呼び強度に対応する水結合材比

結合材種類	呼び強度に対応する水結合材比(%)				
	30	33	36	39	42
BB	64.3	57.1	51.3	46.6	42.7
BBF	49.8	44.8	40.7	37.3	34.4
NFB	42.0	39.2	36.7	34.5	32.6

※ 強度算定式 BB 調合： $F_{28}=18.4B/W+7.4$
 BBF 調合： $F_{28}=16.1B/W+3.8$
 NFB 調合： $F_{28}=20.9B/W-13.7$

表-7 各材料のCO₂排出量原単位

材料	CO ₂ 排出量原単位 (kg/t)
高炉セメント B 種	459.2 ⁷⁾
フライアッシュ II 種	29 ⁸⁾
高炉スラグ微粉末 4000	40.4 ⁸⁾
再生細骨材	3.3 ⁸⁾
再生粗骨材	4.56 ⁸⁾
AE 減水剤*1	350 ⁸⁾
高性能 AE 減水剤*1	350 ⁸⁾

*1 AE 減水剤・高性能 AE 減水剤は、文献 8) の高性能減水剤の値を採用した。

炭素化を図る目的で高炉セメント B 種の 10%をフライアッシュ II 種で置換した BBF 調合が BB 調合よりも大きくなる結果であった。これは、呼び強度に対応する水結合材比が小さくなったことが影響している。また、先に述べたように耐久性についても結合材種類や骨材の組合せで異なっている。したがって、再生骨材を用いた低炭素型コンクリートの実用化にあたっては、CO₂ 排出量のみならず、強度発現性や適用部位を考慮した上で骨材や副産物の組合せおよび使用量を決定する必要がある。

5. まとめ

本検討では、高炉スラグ微粉末 4000 およびフライアッシュ II 種を結合材の一部として使用した再生骨材コンクリートの基本的な性能を確認することを目的とした実験を行った。その結果、以下の内容について確認した。

- 1) 同程度のワーカビリティを得るための AE 減水剤または高性能 AE 減水剤の使用量は再生骨材を使用するとやや大きくなり、フライアッシュを使用するとやや小さくなる。
- 2) 材齢 28 日以降の強度の伸びは、結合材種類や水結合材比により値に差はあるものの、普通骨材を用いた調合と比較して再生骨材を使用した調合は小さくなる傾向にある。また、同一水結合材比の圧縮強度は、結合材に対するセメントの割合が大きいほど大きくなる。
- 3) 中性化速度係数は、骨材の組合せおよび結合材種類の影響は小さく、一般のコンクリートと同様に圧縮強度の影響が大きい。一方、長さ変化率は、骨材の組合せおよび結合材種類の影響を受ける。

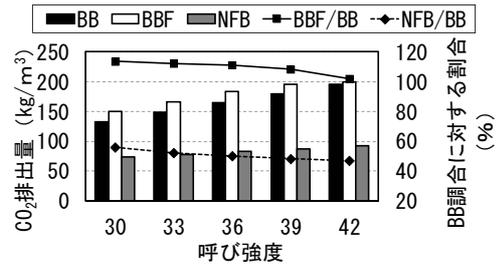


図-18 CO₂排出量算定結果

- 4) 再生骨材を用いた低炭素型コンクリートの実用化にあたっては、CO₂ 排出量のみならず、強度発現性や適用部位を考慮した上で骨材や副産物の組合せおよび使用量を決定する必要がある。

謝辞

本実験の実施にあたり、三協 Mirai(株)、日本シーカ(株)、武蔵野土木工業(株)の各位に多大なるご協力をいただきました。各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 黒田泰弘, 依田侑也, 片山行雄: 高炉セメントとフライアッシュを混合使用した低炭素コンクリートに関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, vol.35, No.1, pp.103~108, 2013.7
- 2) 白根勇二, 梶田秀幸, 宮原茂禎, 中村英佑: 実環境に暴露した低炭素型のコンクリートの強度特性および耐久性の評価, コンクリート工学年次論文集, vol.38, No.1, pp.153~158, 2016.7
- 3) 日本建設業連合会: 低炭素型コンクリートの普及促進に向けて, 2016.4
- 4) 国土交通省: 平成 24 年度建設副産物実態調査結果参考資料, 2014.3
- 5) 上西隆, 竹内博幸, 河野政典, 山田雅弘, 西浦範昭, 西山直洋: 再生骨材コンクリートの実用化に関する研究 その 2. フレッシュコンクリートの性状とコンクリート柱の塩化物量, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.635~636, 2006.9
- 6) 高橋祐一, 樹田佳寛, 竹内博幸: 再生骨材コンクリートの性質に影響を及ぼす要因の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 659 号, pp.9~14, 2011.1
- 7) セメント協会: セメントの LCI データの概要, p.7, 2015.9
- 8) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 改訂資料, コンクリートライブラリー138 号, 2013.3