

論文 環境配慮型コンクリートの基礎的性質に関する一考察

溝渕 麻子*1・小林 利充*2・近松 竜一*3・一瀬 賢一*4

要旨：本研究は、一般のコンクリートに比べて、CO₂ 排出量を大幅に削減した低炭素型のコンクリートを検討するために、CO₂ 排出原単位の少ない混和材を結合材とし、各種結合材の組合せおよび混合比率の違いがコンシステンシーや強度発現特性に及ぼす影響について実験的に検討した。その結果、セメントの混合比率が 30%以下の場合でも、適切な水結合材比を設定することで所要の強度が得られ、二酸化炭素排出量を削減出来ることを確認した。

キーワード：環境負荷低減, CO₂ 排出量, 混和材, 混合比率, 単位水量, 圧縮強度

1. はじめに

我が国は、京都議定書を受け、1998 年 10 月「地球温暖化対策の推進に関する法律(平成 10 年法律第 117 号)」を制定し、その後も改正を重ね、自動車の燃費の改善、住宅・建築物の省エネ性状の向上、工場・事業場の省エネルギー対策の拡充など、様々な取組みを進めている¹⁾。このような社会的要求の中、建設業における CO₂ 排出量の大幅削減に寄与する、環境負荷低減型のコンクリートについて関心が高まっている。

高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ等の混和材を多量に使用したコンクリートに関する既往の研究としては、結合材として高炉スラグ微粉末を 45%置換し、強度およびスラグの比表面積をパラメータとした横室らの研究²⁾、結合材としてフライアッシュを 20%まで、高炉スラグ微粉末を 30%まで置換した松家らの研究³⁾、結合材として高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよびシリカフェームを 80%まで置換した大澤らの研究⁴⁾、結合材として高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを 85%まで置換し、フレッシュ性状を確認した近松らの研究⁵⁾、品質の異なるフライアッシュを 85%置換した骨材を用いない硬化体に関する福留らの研究⁶⁾など幾つかの研究がある。そこで本研究では、パラメトリックスタディとして、各種調査における基本物性の確認を行った。

2. 実験概要

本実験では、STEP1 として、各種結合材の組合せおよび結合材料に対する各種材料の混合割合が単位水量に及ぼす影響について、設定条件を満たす単位水量を検討し、基礎性状を確認した。STEP2 では、STEP1 にて決定した単位水量を基に、STEP1 と同様に各種結合材の組合せおよび結合材料の混合割合ごとに、それぞれ水結合材

比をパラメータとし、フレッシュ性状・強度性状に及ぼす影響について検討した。

本研究で使用したコンクリート材料の種類および品質を表-1 に示す。また、各 STEP ごとの設定条件を表-2 に示す。結合材の組合せは、1 成分ではセメントのみ、2 成分ではセメントおよび高炉スラグ微粉末(図表上は BS と表記)、3 成分ではこれにフライアッシュ(図表上は FA と表記)、4 成分ではさらにジルコニア起源シリカフェーム(図表上は SF と表記)を加えたものとした(表-3 参照)。

STEP1 では、単位結合材量(350kg/m³)、粗骨材かさ容積(0.58m³/m³)および混和剤(高性能 AE 減水剤)の添加率(単位結合材量×0.7%)を一定として、スランプ 21±2cm、空気量 4.5±1.5%が得られる所要単位水量を求めた。

STEP2 では、STEP1 で決定した単位水量を用い、水結合材比 30%、37%および 44%ごとに、所定のコンシステンシーが得られるように、混和剤の添加率を調整した。なお、粗骨材かさ容積は、水結合材比ごとに設定した。

コンクリートの練混ぜは、20℃の試験室で行った。容量 60 リットルの水平強制練りミキサーを用いて、1 バッチの練混ぜ量を 40 リットルとした。練混ぜ順序は、STEP1 では、セメント、混和材、細骨材および粗骨材を 10 秒間空練りした後、水と混和剤を加えて 90 秒間練混ぜた。STEP2 では、同様に空練りをした後に、水結合材比ごとに若干練混ぜ時間を変えて、水結合材比 30%では 120 秒(調合No.1, No.5 およびNo.8 は 150 秒)、37%および 44%では 90 秒とした。

試験項目および試験方法を表-4 に示す。フレッシュコンクリートの試験は練混ぜ 5 分後に行った。なお、ブリーディング量および凝結試験については STEP1 のみ実施し、O 漏斗試験については、STEP2 の水結合材比 30%および 37%について実施した。

*1 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 主任 (正会員)

*2 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 副課長 博士(工学) (正会員)

*3 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 担当課長 博士(工学) (正会員)

*4 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部長 博士(工学) (正会員)

3. 実験結果および考察

3.1 STEP1

(1) 単位水量

図-1に、所要単位水量と各種結合材の置換率の関係を2成分(C-BS)、3成分(C-BS-FA)および4成分(C-BS-FA-SF)ごとに示す。この結果から、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いた場合は、置換率の増加に伴い、概ね線形的に単位水量が低減することがわかる。

ここで、フレッシュコンクリートの品質および単位水量の低減効果を検討するため、各結合材の置換率と単位水量の低減量から、置換率1%に対する単位水量の低減効果を算定した結果を表-5に示す。高炉スラグ微粉末を用いた場合は置換率1%で0.15kg程度、フライアッシュを用いた場合は置換率1%で0.5kg程度、それぞれ水量を低減することができる。フライアッシュは、高炉スラグ微粉末よりも水量低減効果大きい。ただし、フライアッシュ置換率を30%とした場合、単位水量を低減し、目標とするスランプが得られるが、目視および作業性より、粘性が大きく施工性が低下する傾向が認められた。なお、シリカフュームを用いた場合については、本実験範囲での置換率1%で0.8~0.4kgの水量を低減できるが、実験データが少ないこともあるため、今後データを蓄積し、検討する必要がある。

(2) ブリーディング

ブリーディング量は、表-5に示すように、セメントの混合比率の減少に伴って小さくなる傾向にあり、セメントの混合比率を25%以下とした場合は、本実験の範囲では、ブリーディングの発生がほとんど認められない。これは、セメント100%および50%と比較し、単位水量を低減させたことによると考えられる。

(3) 凝結時間

凝結時間と混合比率の関係を図-2に示す。各種結合材の混合比率との関係で整理すると、高炉スラグ微粉末の

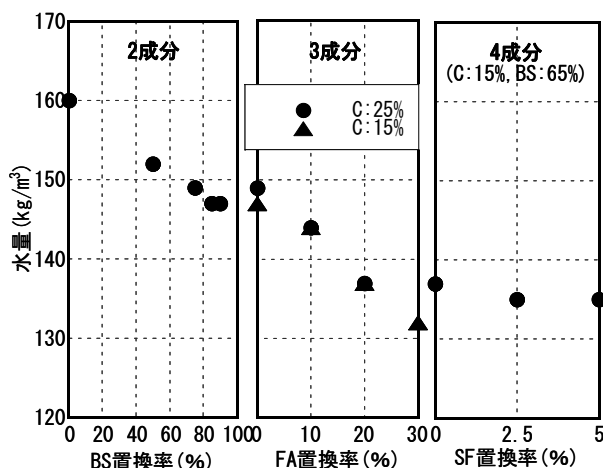


図-1 所要単位水量と各種結合材の混合比率の関係

表-1 使用材料

材料	種類	記号	品質
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16g/cm³ 比表面積 3160cm²/g
高炉スラグ微粉末	高炉スラグ微粉末	BS	密度 2.89g/cm³ [注]石膏内添タイプ 比表面積 4360cm²/g
フライアッシュ	フライアッシュII種	FA	密度 2.17g/cm³ 比表面積 4180cm²/g
シリカフューム	シノコニア起源シリカフューム	SF	密度 2.23g/cm³ 比表面積 87000cm²/g
水	上水道水	W	
細骨材	陸砂	S	表乾密度2.62g/cm³ 吸水率1.34%、粗粒率2.63
粗骨材	硬質砂岩碎石	G	最大寸法20mm、表乾密度2.64g/cm³ 吸水率0.79%、実積率60.0%
混和剤	高性能AE減水剤	-	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
	AE剤	-	ロジンのカリウム塩

表-2 設定条件

項目	設定条件	
	STEP1	STEP2
スランプ (SL) スランプフロー (SF)	21±2.0 cm (SL)	W/B30% : 60±10cm (SF) W/B37% : 50±7.5cm (SF) W/B44% : 21±2cm (SL)
空気量	4.5±1.5% (5%目標)	4.5±1.5% (4~6%目標)
結合材量	350 kg/m³	-
単位水量	-	STEP1で決定した水量
水結合材比	-	30%, 37%および44%
粗骨材 かさ容積	0.58 m³/m³	W/B30% : 0.56 m³/m³ W/B37% : 0.57 m³/m³ W/B44% : 0.58 m³/m³
高性能AE減水剤 添加量	結合材量×0.7%	-

表-3 結合材混合比率

調合No.	成分	混合比率 (%)			
		C	BS	FA	SF
1	1	100	0	0	0
2	2	50	50	0	0
3		25	75	0	0
4	3	25	65	10	0
5		25	55	20	0
6	2	15	85	0	0
7	3	15	75	10	0
8		15	65	20	0
9	4	15	65	17.5	2.5
10		15	65	15	5
11	2	10	90	0	0
12	3	15	55	30	0

表-4 試験項目および試験方法

項目	試験方法	
フレッシュ性状	スランプ (スランプフロー)	JIS A 1101 (1150)
	空気量	JIS A 1128
	室温・コンクリート温度	JIS A 1156
	単位容積質量	JIS A 1116
	0漏斗	JSCF-F512
	ブリーディング量	JIS A 1123
	凝結試験	JIS A 1147
強度	標準養生強度	JIS A 1108

表-5 フレッシュ性状および単位水量の低減効果

調合 No.	成分	結合材混合比率 (%)				単位水量 (kg/m ³)	W/B (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	フラーディング量 (cm ³ /cm ³)	凝結時間 (h-m)		単位水量の低減量 (kg/m ³)	低減効果 (kg/%)
		C	BS	FA	SF							始発	終結		
1	1	100	0	0	0	160	45.7	22.0	5.2	2,295	0.08	6-10	7-45	—	—
2	2	50	50	0	0	152	43.4	22.5	4.8	2,325	0.03	5-05	8-05	8*	8/50=0.16
3		25	75	0	0	149	42.6	22.5	4.6	2,322	0.00	4-45	9-25	11*	11/75=0.15
6		15	85	0	0	147	42.0	21.5	5.2	2,302	0.00	4-00	10-40	13*	13/85=0.15
11		10	90	0	0	147	42.0	20.5	5.1	2,303	0.02	3-45	9-15	13*	13/90=0.14
4	3	25	65	10	0	144	41.1	21.0	4.8	2,309	0.01	4-55	8-15	5**	5/10=0.5
5		25	55	20	0	137	39.1	18.5	4.8	2,284	0.00	4-15	8-45	12**	12/20=0.6
7		15	75	10	0	144	41.1	21.0	5.7	2,279	0.00	4-35	10-35	3***	3/10=0.3
8		15	65	20	0	137	39.1	19.5	4.5	2,311	0.00	3-40	9-40	10***	10/20=0.5
12		15	55	30	0	132	37.7	16.0	3.5	2,329	0.00	3-30	9-50	15***	15/30=0.5
9		4	15	65	17.5	2.5	135	38.6	20.5	4.4	2,316	0.00	3-10	9-55	2****
10	15		65	15	5	135	38.6	19.5	6.0	2,278	0.00	4-05	11-30	2****	2/5=0.4

[注] *: 調合 No. 1 との比較, **: 調合 No. 3 との比較, ***: 調合 No. 6 との比較, ****: 調合 No. 8 との比較

置換率の増加に伴って、始発時間は早まるのに対して、終結時間は遅くなる傾向にある。これに伴って、始発から終結までの時間は、セメント 100%では 1.5 時間程度であるが、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴い長くなる傾向にあり、置換率 85%では 6.5 時間程度と非常に長くなる。また、フライアッシュを用いた場合は、高炉スラグ微粉末の置換と同様、その置換率の増加に伴って始発時間は早まるが、終結時間は一部を除いて若干遅くなる。始発が早まるのは水量低減の影響が、終結の遅延は水和活性の低下の影響が要因であると推察されるが、詳細については今後検討が必要である。なお、シリカフェームを使用した場合は、その置換率の増加に伴い、始発及び終結時間は遅くなる傾向が認められる。

3.2 STEP2

(1) 高性能 AE 減水剤添加率

高性能 AE 減水剤の添加率と各種結合材の置換率の関係を各成分ごとに整理し、図-3 に示す。2 成分系については、水結合材比 44%では、高炉スラグ微粉末の置換率にかかわらず高性能 AE 減水剤の添加率はほぼ一定となる。一方、水結合材比 30%及び 37%については、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴って高性能 AE 減水剤の添加率は減少する傾向にあるが、置換率 50%以上はほぼ一定となる。また、3 成分系については、水結合材比にかかわらず、フライアッシュ置換率の増加に伴って、高性能 AE 減水剤量が増加する傾向にあり、置換率 20%以上ではほぼ一定となる。さらに、4 成分系については、シリカフェーム置換率にかかわらず、ほぼ一定となる。なお、結合材置換率が同じ場合、W/B30%、37%および 44%での高性能 AE 減水剤の添加率の差は、B×0.1%の

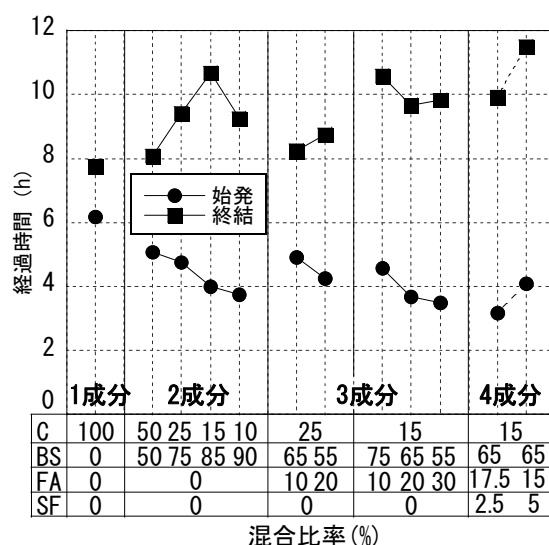


図-2 凝結時間と混合比率の関係

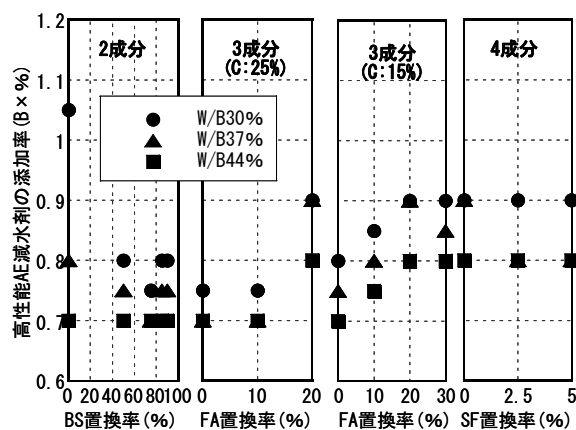


図-3 高性能 AE 減水剤添加率と結合材置換率の関係

範囲にある。ただし、普通ポルトランドセメント 100% の場合を除く。

スランプフローは、W/B30%では 54.5～68.8cm、W/B37%では 42.5～59.3cm の範囲にそれぞれあり、W/B44%におけるスランプは、19.0～22.5cm の範囲にあり、いずれも設定条件を満足している。

(2) AE 剤添加率

AE 剤の添加率と各種結合材の置換率の関係を図-4 に示す。2 成分系の場合、水結合材比 37 及び 44%では、高炉スラグ微粉末の置換率にかかわらず AE 剤の添加率はほぼ一定となる。一方、水結合材比 30%については、高炉スラグ微粉末の置換率の増加とともに増加する傾向にあり、置換率 75%以上では顕著に増大する。3 成分系の場合は、いずれの水結合材比についても、フライアッシュ置換率の増加とともに増加し、前述した高炉スラグ微粉末よりも顕著である。フライアッシュに含まれる未燃カーボンに AE 剤が吸着されたものと推察される。4 成分系の場合は、シリカフェーム置換率の増加に伴って減少する傾向にある。セメント量および高炉スラグ微粉末の割合を一定とし、フライアッシュとシリカフェームの割合を変化させているため、この傾向は、フライアッシュの割合が低下することで、AE 剤の添加率が低下したと考えられる。

空気量は 4.0～5.8%の範囲にあり、設定条件を満足している。

(3) フレッシュコンクリートの粘性

水結合材比 30%および 37%のケースについて、粘性を評価するために O 漏斗流下時間を測定した。O 漏斗流下時間と各種結合材の置換率の関係を図-5 に示す。2 成分系においては、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴って O 漏斗流下時間は増大し、粘性が高くなる傾向にある。特に、高炉スラグ微粉末の置換率が 75%以上では、O 漏斗流下時間が 20 秒以上となる。また、フライアッシュを用いた 3 成分系については、O 漏斗流下時間の大きな変化は認められない。一方、シリカフェームを添加した 4 成分系においては、シリカフェーム置換率の増加に伴って O 漏斗流下時間は小さくなり、粘性が著しく低減されることが確認できる。

(4) 圧縮強度

28 日標準養生強度と各種結合材の置換率の関係を図-6 に示す。高炉スラグ微粉末を用いた場合は、その置換率の増加に伴って標準養生強度が低下する傾向にある。置換率 85%はこれを用いない場合の約 1/2 となる。フライアッシュを用いた場合は、セメントの混合比率、水結合材比にかかわらず、その置換率の増加に伴って標準養生強度は低下する傾向にある。置換率 20%はこれを用いない場合の約 9 割となる。一方、シリカフェームを

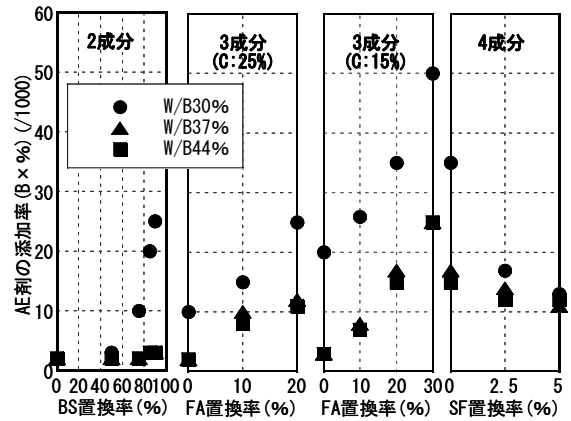


図-4 AE 剤添加率と結合材置換率の関係

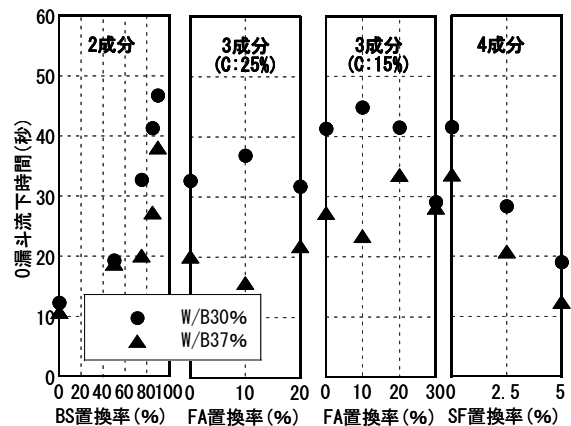


図-5 O 漏斗流下時間と結合材置換率の関係

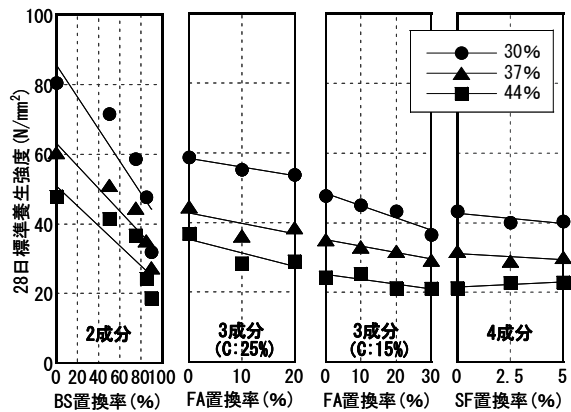


図-6 28 日標準養生強度と結合材置換率の関係

用いた場合は、置換率による標準養生強度に大きな差異は認められない。これは、高強度域と異なり、微粒子を混合しても、一般的なマイクロファイバー効果による顕著な強度増進は得られ難いものと推察される。

28 日標準養生強度と結合材水比の関係を図-7 に示す。いずれも結合材水比の増加に伴い、28 日標準養生強度も増加する傾向が認められる。2 成分では、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴い、この傾きは小さくなる傾向

があり、その傾きは2倍程度異なる。3成分では、セメントの混合比率によらず、フライアッシュの置換率10%および20%では、その傾きはほぼ同等であり、置換率の違いによる傾向は認められないが、30%になると若干傾きが小さい。4成分では、シリカフェームの置換率によらず同等である。

なお、28日標準養生強度と材齢の関係を図-8に示す。材齢の経過に伴って、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの反応が促進され、置換率に伴う強度低下は小さくなると予想したが、材齢56日までにこのような傾向は認められず、特に材齢28日から56日の強度増進はほぼ同等である。

(5) 二酸化炭素排出量と強度の比較

得られた調査をもとに、表-6に示す使用材料のインベントリーデータを用い、二酸化炭素排出量を算出した結果を図-9に示す。ただし、シリカフェームはフライアッシュと同じとし、水は0と仮定する。二酸化炭素排出量は、概ね、セメント量の減少に伴い、大幅に低減する。水結合材比で異なるが、セメント100%での二酸化炭素排出量は、 $280\sim 410\text{kg/m}^3$ であるのに対し、セメントの混合比率15%以下では、いずれの水結合材比においても、 72kg/m^3 以下となり、調合条件によっては最小で 39kg/m^3 となる。また、水結合材比による影響としては、セメント量が多い領域では二酸化炭素排出量は顕著に変化するが、セメント量が少ない領域では緩慢になる傾向にある。

図-10に、STEP2における各材齢のコンクリートの圧縮強度に対する二酸化炭素排出量の比を水結合材比37%について結合材料の成分ごとに示す。これは、各調合における二酸化炭素排出量を圧縮強度で除した値である。セメントの混合比率が小さくなると、その比は小さくなる傾向が見られる。また、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの置換率が增大するに伴い、この値は小さくなる傾向にある。セメントの混合比率が15%の場合には、フライアッシュおよびシリカフェームの混合比率によらず、ほぼ同等である。

高炉セメントC種のセメントの混合比率(30%)以下の場合でも、適切な水結合材比を設定することにより、所要の強度発現を確保しつつ、二酸化炭素排出量も削減できるものと考えられる。

4. まとめ

本実験では、STEP1で、各種結合材の組合せおよび結合材料に対する各種材料の混合割合が単位水量に及ぼす影響について、設定条件(スランブ $21\pm 2\text{cm}$ 、空気量 $4.5\pm 1.5\%$ 、高性能AE減水剤添加率 $B\times 0.7\%$)を満足する所要単位水量を定めた。またSTEP2では、STEP1

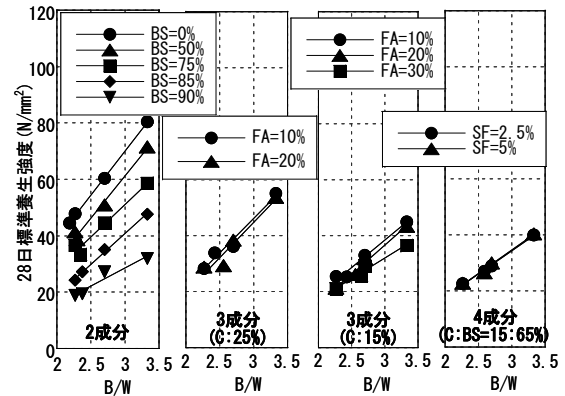


図-7 28日標準養生強度と結合材水比の関係

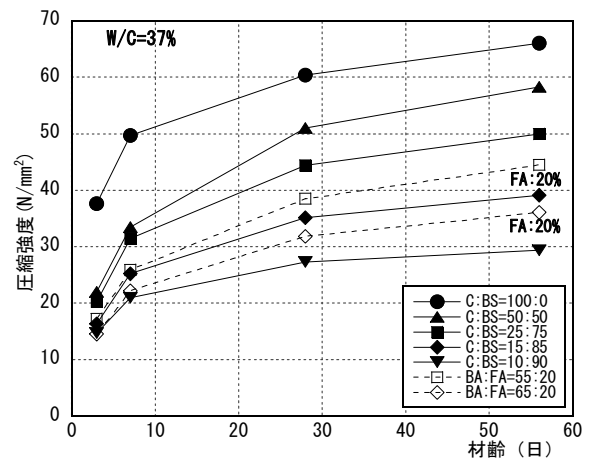


図-8 標準養生強度と材齢の関係

表-6 使用材料のインベントリーデータ

材料	二酸化炭素排出量 (kg/t)
ポルトランドセメント ⁷⁾	757.9
高炉スラグ微粉末 ⁷⁾	24.1
フライアッシュ ⁷⁾	17.9
シリカフェーム	17.9
水	0
細骨材 ⁷⁾	3.5
粗骨材 ⁷⁾	2.8
高性能AE減水剤 ⁸⁾	200

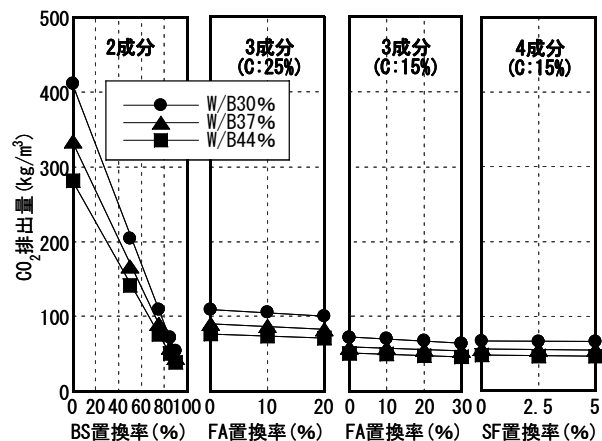


図-9 CO₂排出量と結合材置換率の関係

にて決定した単位水量を基に、各種結合材の組合せおよび結合材料の混合割合ごとに、それぞれ水結合材比(30%、37%および44%)をパラメータとし、フレッシュ性状・強度性状に及ぼす影響について検討を行った。本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 混和材料(高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ)の置換率の増加に伴い、概ね線形的に所要の単位水量を低減できる。
- (2) セメントの混合比率の減少に伴い、ブリーディング量は小さくなり、25%以下では、ブリーディングの発生は認められない。
- (3) 各種混和材(高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよびシリカフェーム)を置換するに伴い、凝結の最終時間は遅延する傾向にある。
- (4) 高炉スラグ微粉末を用いた場合、置換率の増加に伴い粘性が高くなる傾向にある。フライアッシュを用いた場合は、大きな変化は認められない。一方、シリカフェームを添加した場合、置換率の増加に伴い粘性が著しく低減される。
- (5) 高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを多量に用いた場合、材齢の経過に伴い反応が促進され、置換率に伴う強度低下は軽減されると予想したが、材齢56日の時点では強度発現の改善効果に大きな差異は認められない。
- (6) 標準養生28日強度と結合材水比の関係は、比例関係にあり、結合材水比が高くなると、強度も増加する傾向がある。
- (7) セメントの混合比率が30%以下の場合でも、適切な水結合材比を設定することにより、所要の強度発現を確保しつつ、二酸化炭素排出量も削減できる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、日本シーカ(株)、宇部興産(株)に、ご協力を頂いた。ここに深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 企画 環境省 地球環境局, 監修 独立行政法人 国立環境研究所: パンフレット「STOP 温暖化2008」(追加改訂 2009.04.08.), pp.21-22, 2009
- 2) 横室隆, 依田彰彦, 添田悠介, 小椋由之: 高炉スラ

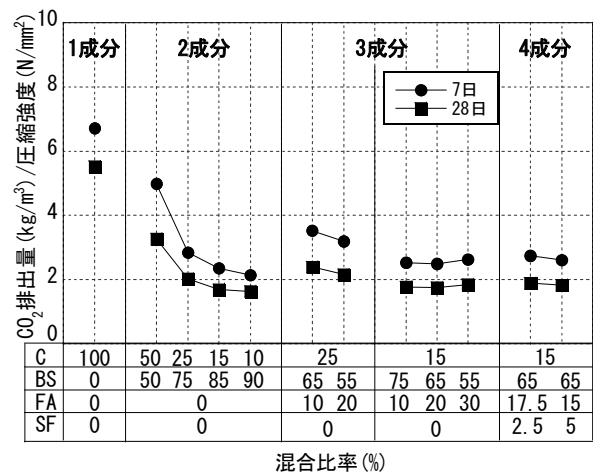


図-10 コンクリートの圧縮強度に対するCO₂排出量の比

グ微粉末を用いたコンクリートの性質について、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.185-190, 113-118, 2003.

- 3) 松家武樹, 堺孝司, 鈴木康範, 福留和人: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.185-190, 2010
- 4) 大澤友宏, 平田隆祥, 二戸信和, 人見尚: 種々の混和材を高置換したセメント系混合材料の基礎物性とCO₂削減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.179-184, 2010
- 5) 近松竜一, 竹田宣典, 十河茂幸: 異種粒度の結合材を用いたフレッシュコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.93-98, 1990.
- 6) 福留和人, 坂本守, 鈴木達雄, 長瀧重義: フライアッシュを多量に用いた硬化体の基本特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.91-96, 1998.
- 7) 土木学会: コンクリート技術シリーズ No.44 コンクリートの環境負荷評価 p. I -26.
- 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.67