

論文 フライアッシュを多量に添加した、ガラスカレットを用いたコンクリート 2 次製品に関する実験研究

石川 嘉崇*1・柳町 孝治*2・中山 一孝*3

要旨：再生資源の有効利用の観点から、フライアッシュおよびガラスカレットを混和材ならびに骨材として大量に用いたコンクリート 2 次製品を試作した。試作は、製造時の CO₂削減を目的にポリマーセメントを用いた無焼成製法にて行い、強度特性を中心に基本的な性状の把握試験を実施した。今回試作したタイルおよびインターロッキングブロックについては、フライアッシュ添加率 70%程度まで、陶磁器質タイルの JIS 規格値および JASS 7 の普通インターロッキングブロック規格値をそれぞれ満足した。試作結果から、ポリマーセメントを用いることによりフライアッシュおよびガラスカレットを多量に混和できることを確認した。

キーワード：フライアッシュ, ガラスカレット, コンクリート 2 次製品, ポリマーセメント

1. はじめに

現在日本では、石炭火力発電所等より排出される石炭灰の発生量は年間 760 万トンと多量であり、このうち約 81%が有効利用されている¹⁾ものの、今後さらに 2010 年までに約 1.5 倍に増加すると予想されている²⁾。フライアッシュ(以下, F A)は石炭灰のうち約 9 割を占め、「再生資源の利用促進に関する法律」における指定副産物として有効利用が義務付けられているが、セメント製造原料および普通ポルトランドセメントへの混和材等の分野への有効利用が大部分であり、今後これらの分野には大幅な需要拡大は望めない状況である。一方、コンクリート 2 次製品の有効利用に占める比率は約 4%とわずかであることから同分野でのより一層の利用促進が求められている¹⁾。

また、ガラス製品生産量は 551 万トン(1995 年)であり、このうちガラスビンが最も多く約 40%を占め、「容器包装リサイクル法」の施行にともない、廃ガラスビンのリサイクルが積極的に実施されている³⁾。廃ガラスカレットの有効利用の場合、無色透明または茶色のガラスビン

を除いた再利用価値の乏しい有色廃ガラスビン起源とするガラスカレット(以下, G C)については有効利用があまり進展していないのが現状である。

そこで本報では、再生資源の有効利用拡大および製造時の CO₂削減の観点から、F Aおよび G C(特に再利用価値の乏しい有色廃ガラス)を混和材ならびに骨材として大量に用いたコンクリート 2 次製品を、ポリマーセメントを用い無焼成で試作し、主に強度特性を中心にその基本的性状の把握を行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料

(1) F A

F Aについては、F A採取条件として、電気集塵機で採取した原粉(以下, E P 灰)とさらに分級により粗粉を除去した分級灰(以下, 分級灰)を用いた。石炭産地は 2 産地とした。試験に用いた F Aを表-1 に示す。分級灰は JIS A 6201 の II 種に該当する。

(2) G C

*1 電源開発(株) 茅ヶ崎研究センター 工修 (正会員)

*2 元旦ビューティ工業(株) 静岡工場 工場長

*3 電源開発(株) 茅ヶ崎研究センター (正会員)

G Cについては、無色透明または茶色のガラスビンを除いた有色廃ガラスビンを破碎後、粒度調整（1mm 以下と 1～2mm）を行った。密度は 2.5g/cm^3 であった。

(3) セメント

セメントについては、ホワイトセメント（密度 3.05g/cm^3 ，比表面積 $3,650\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。インターロッキングブロック（以下，I B）の基層には早強セメント（密度 3.14g/cm^3 ，比表面積 $4,400\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。

(4) ポリマー

コンクリート 2 次製品を無焼成で製作するためポリマーを使用した。ポリマー性能を表 2 に示す。試験にはポリマー水溶液を 1:1（I B 基層では 1:2）で水にて希釈した希釈ポリマー水溶液を用いた。

2.2 試験概要

はじめに，G C を無混入状態とした場合での基本特性を把握する目的でセメントペースト（以下，C P）基本特性試験およびタイル基本特性試験を実施し，その後，G C を混入した I B を製作し I B 基本特性試験を実施した。

(1) C P 基本特性試験

試験要因，試験項目を表 3 に示す。試験に用いる供試体は JIS R 5201 に準じ、寸法 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ とした。

(2) タイル基本特性試験

試験要因，試験項目を表 4 に示す。試験要因については C P 基本特性試験と同一とし，供試体形状は $150 \times 150 \times 15\text{mm}$ とした。

(3) I B 基本特性試験

試験要因，試験項目を表 5 に示す。供試体形状は $98 \times 198 \times 60\text{mm}$ で，このうち表層厚みを 10mm，基層厚みを 50mm とした。試験は表層の調合を一定にし，基層の調合を変化させ行った。

(4) 調合

C P およびタイル基本特性試験の調合は同一とし，表 6 に示す。また，I B 基本特性試験

表 1 F A の品質

記号	石炭産地	採取条件	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	強熱減量 (%)
II A	豪州	分級灰	2.29	4030	1.5
EPB	豪州	EP 灰	2.29	3100	1.4
EPC	中国	EP 灰	2.22	3170	3.5

表 2 ポリマーの性能

組成	メタクリル酸 アクリル共重合樹脂
乾燥固形分 (%)	45
PH	8.0
密度 (g/cm^3)	1.05
粘度 ($\text{mPa} \cdot \text{S}$) (25℃)	50

表 3 C P 基本特性試験の要因と項目

試験要因	水準	試験項目
ポリマー混入	有 (7～47%)， 無	曲げ強度 JIS R 5201
F A 添加率	0,20,40,60,80%	圧縮強度 JIS R 5201
F A 採取条件	EP 灰, 分級灰	吸水率 JIS A 5209
石炭産地	豪州, 中国	かさ密度

表 4 タイル基本特性試験の要因と項目

試験要因	水準	試験項目
C P 基本特性試験 と同一	C P 基本特性試験 と同一	曲げ強さ JIS A 5209 吸水率 JIS A 5209

表 5 I B 基本特性試験の要因と項目

試験要因	水準	試験項目
ポリマー混入	有 (8～18%)	曲げ強度
F A 添加率	50,67,74%	JASS7 M-101
F A 採取条件	EP 灰	圧縮強度
石炭産地	豪州, 中国	JASS7 M-101

の調合を表 7，8 に示す。

(5) 製造方法および養生条件

C P およびタイルについては，セメント，フライアッシュをオムニミキサーにて混練した後，ポリマー水溶液を添加し，さらに混練する。混練後型枠に流し込み，振動テーブルで振動させ成形する。養生は，気中養生（温度 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ，RH50%）とした。また，I B については，C P およびタイルと同様に基層と表層をオムニミキサーで混練後，プレス成形機にて成形する。養生は，気中養生（温度 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ，RH50%）とした。

表－６ ＣＰ及びタイル基本特性試験の調合一覧

記号	水セメント比 (%)	水結合材比 (%)	F A 添加率 (%)	ポリマー セメント比 (%)	ポリマー 結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)					
						水	ポリマー 固形分	ホワイト セメント	F A		
									分級灰	EP 灰	
	W/C	W/B	FA/B	P/C	P/B	W	P	C	II A	EPB	EPC
W-N- 0	36	36	0	0	—	522	—	1458	—	—	—
W-II A-20	45	36	20	0	—	507	—	1127	282	—	—
W-II A-40	63	38	40	0	—	504	—	801	534	—	—
W-II A-60	99	40	60	0	—	502	—	507	760	—	—
W-II A-80	214	43	80	0	—	507	—	238	950	—	—
P-N- 0	25	25	0	7	7	387	112	1562	—	—	—
P-II A-20	44	35	20	13	10	442	128	1013	253	—	—
P-II A-40	47	28	40	14	8	386	112	830	553	—	—
P-II A-60	85	34	60	25	10	415	120	486	728	—	—
P-II A-80	160	32	80	47	9	392	114	244	977	—	—
W-EPB-20	48	39	20	0	—	524	—	1089	—	272	—
W-EPB-40	66	40	40	0	—	517	—	781	—	521	—
W-EPB-60	103	41	60	0	—	512	—	496	—	744	—
W-EPC-60	103	41	60	0	—	507	—	491	—	—	737
W-EPB-80	212	42	80	0	—	505	—	239	—	955	—
P-EPB-20	33	26	20	10	8	387	112	1174	—	293	—
P-EPB-40	45	27	40	13	8	380	110	841	—	561	—
P-EPB-60	74	30	60	21	9	385	112	523	—	785	—
P-EPC-60	74	30	60	21	9	381	111	518	—	—	777
P-EPB-80	151	30	80	44	9	379	110	252	—	1007	—

表－７ ＩＢ基本特性試験の調合一覧（基層）

記号	水セメント 比 (%)	水結合材比 (%)	F A 添加率 (%)	ポリマー 混入率 (%)	ポリマー 結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)							
						水	ポリマー 固形分	早強 セメント	F A		G C		
									EP 灰		合計	1mm 以下	1～2 mm
	W/C	W/B	FA/B	P/C	P/B	W	P	C	EPB	EPC			
P-EPB-50	44	22	50	8	4	175	31	397	397	—	1243	—	1243
P-EPB-67	52	17	67	9	3	168	30	326	661	—	1033	—	1033
P-EPB-74	99	26	74	18	5	222	39	224	632	—	989	742	247
P-EPC-50	47	23	50	8	4	183	32	393	—	393	1245	—	1245
P-EPC-67	56	18	67	10	3	177	31	319	—	656	1033	—	1033

注記 B：結合材量（C+FA）

表－８ ＩＢ基本特性試験の調合（表層）

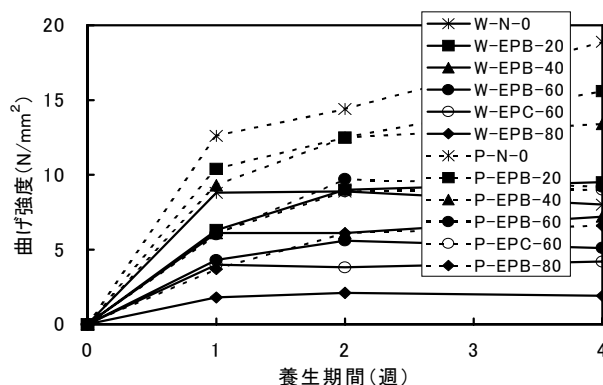
水セメント比	ポリマー 混入率	単位量 (kg/m ³)			
		水	ポリマー 固形分	ホワイト セメント	G C
W/C (%)	P/C (%)	W	P	C	1～2 mm
29	8	132	38	453	1712

3. 試験結果及び考察

3.1 ＣＰ基本特性試験結果

(1) 曲げ強度

曲げ試験結果を図－１，２に示す。ポリマーを混入することにより大幅な強度増進が図れることが分かる。F A添加率の増加にしたがい、強度が直線的に低下している。ただし、ポリマー無混入の場合のF A添加率0%と20%のものとを比較すると、後者の4週強度が水セメント比、水結合材比とも大きいものにも拘わらず大きくくなっている。これは、F Aのポゾラン反応による強度発現効果と推察される。F A採取条件については、ポリマー無混入の場合ほとんど差



図－１ 曲げ強度と養生期間（EP 灰）（CP）

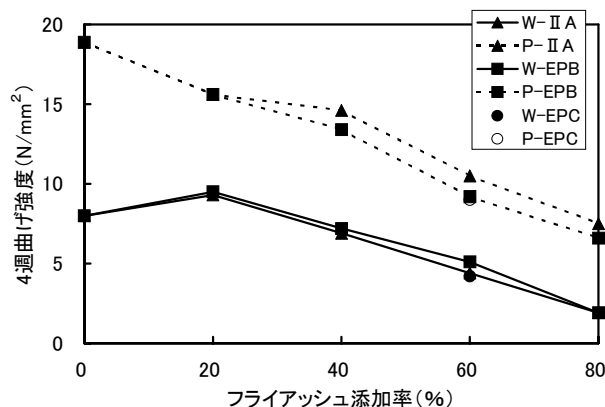


図-2 4週曲げ強度とF A添加率 (CP)

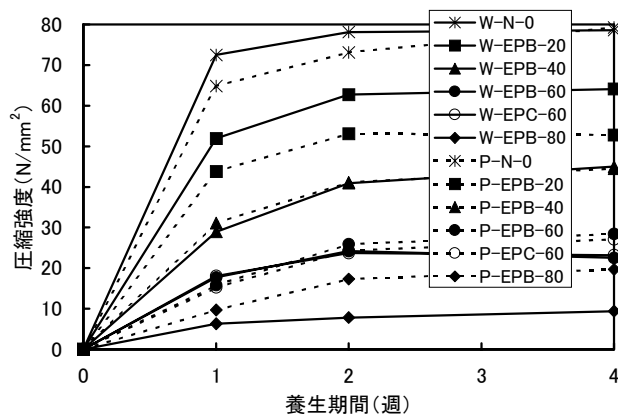


図-3 圧縮強度と養生期間 (EP 灰) (CP)

がないが、ポリマー混入により 40, 60, 80%において分級灰の方が若干大きくなっている。また、4 週曲げ強度における石炭産地による相違はみられない。

(2) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-3, 4に示す。ポリマー無混入の場合、2 週強度以降の強度発現が小さい。ポリマー混入効果については、曲げ強度と同様にポリマー混入により強度増進が図れることが分かるが、曲げ強度ほど顕著ではない。

F Aの添加率の増加にしたがい、ほぼ直線的に圧縮強度が低下している。また、F A採取条件については曲げ強度と同様にポリマー無混入の場合ほとんど差がないが、ポリマー混入の場合、分級灰の方が若干大きくなる。石炭産地については、曲げ強度と同様に相違はみられない。

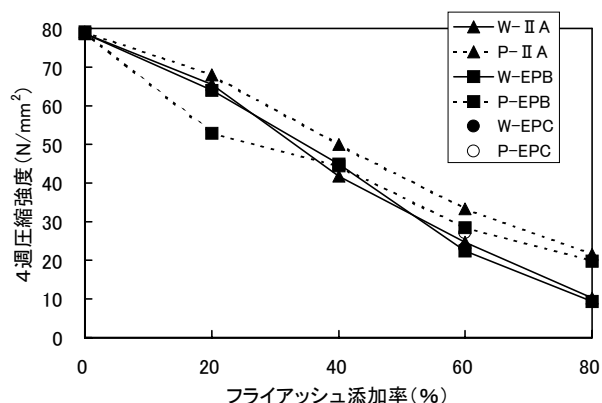


図-4 4週圧縮強度とF A添加率 (CP)

(3) 吸水率

4 週養生後の試験結果を図-5に示す。ポリマー混入により大幅に吸水率の低減が図れることが分かる。F A添加率の増加に応じて吸水率は大きくなるが、特にポリマー無混入の場合のF A添加率 80%で大きい値となっている。F A採取条件及び石炭産地については、大きな違いは認められない。

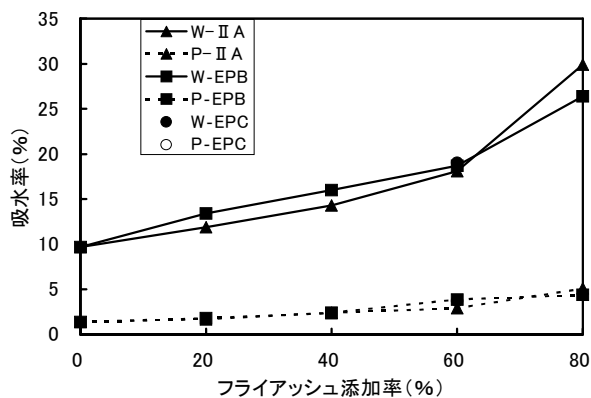


図-5 吸水率とF A添加率 (CP)

(4) かさ密度

4 週養生後の試験結果を図-6に示す。F Aとセメントの密度差により、F A添加率の増加にしたがいかさ密度が低下する。また、ポリマーと水の密度差からポリマーを混入したものの方

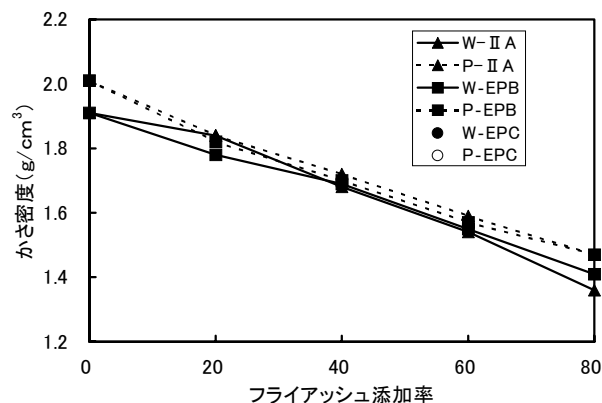


図-6 かさ密度とF A添加率 (CP)

が大きくなっている。その他のF A採取条件及び石炭産地については大きな違いがなかった。

3.2 タイル基本特性試験結果

(1) 曲げ強さ

4週養生後の試験結果を図-7に示す。ポリマー混入により、無混入の場合と比べ著しく曲げ破壊荷重が大きくなる。ポリマーを混入した場合、F Aの添加率が大きくなるにつれ曲げ破壊荷重は大きく低下する。また、F A採取条件および石炭産地による差はわずかである。

(2) 吸水率

4週養生後における試験結果を図-8に示す。ポリマー混入により吸水率は大きく低下する。また、F Aの添加率増加にしたがい、吸水率は増大するが、この傾向はポリマー無混入の場合で顕著である。F Aの影響はポリマー無混入で若干差があるが、ポリマーを混入したものではそれほど差はない。

(3) 陶磁器タイルのJIS規格との比較

今回の試験結果と「陶磁器質タイルのJIS規格」⁴⁾とを比較する。床タイル曲げ破壊荷重規格値(120N/cm)から判断すると、ポリマー無混入の場合は規格値以下であるが、ポリマー混入によりF A条件によらずF A添加率70%程度までは規格値を満足できる。吸水率の規格値(磁器質1.0%以下、せっき質5.0%以下、陶器質22.0%以下)から判断すると、ポリマー無混入の場合ではF A添加率60%程度までは陶器質の規格値を満足し、ポリマー混入の場合ではF A添加率の小さい範囲では磁器質の規格値を、大きい範囲ではせっき質の規格値を満足させることができた。

3.3 I B基本特性試験結果

前述の基本特性試験結果から、F A採取条件による若干の差があるものの、ポリマーの混入により、F A添加率70%程度までのF Aの添加が可能であることが分かった。そこで、E P灰を70%程度まで添加したポリマーC Pに骨材

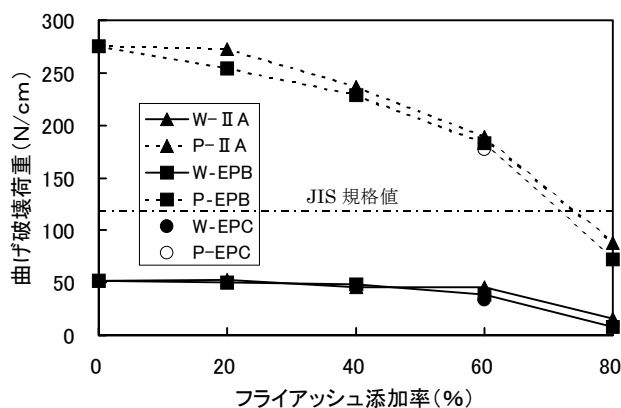


図-7 曲げ破壊荷重とF A添加率(タイル)

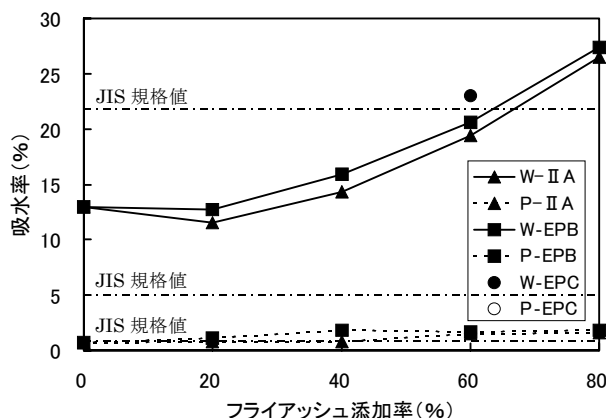


図-8 吸水率とF A添加率(タイル)

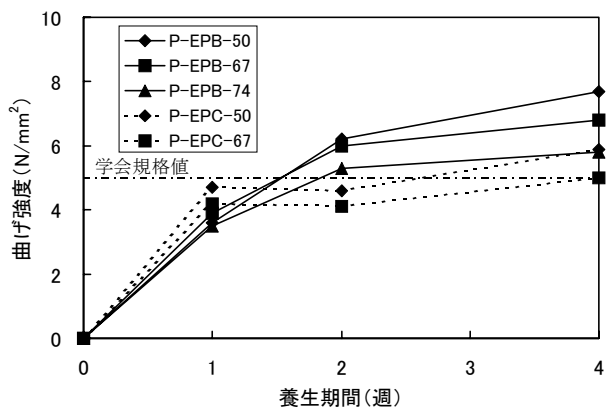


図-9 曲げ強度と養生期間(I B)

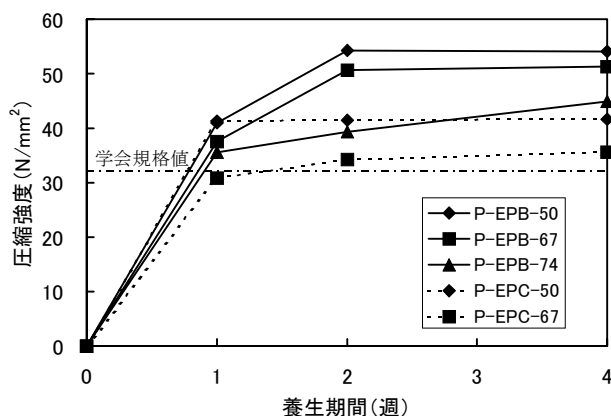


図-10 圧縮強度と養生期間(I B)

としてGCを混入したIBを製作し、試験を行った。

(1) 曲げ強度

試験結果を図-9に示す。EPB灰については、1週から2週まで明瞭な強度増加があるが、EPC灰についてはみられない。FA添加率が大きくなるにつれ、曲げ強度が小さくなっている。

(2) 圧縮強度

試験結果を図-10に示す。曲げ強度と同様な強度発現傾向を示している。

(3) 強度比

強度比（圧縮強度／曲げ強度）を図-11に示す。若材齢ではばらつくが、4週養生時にはほぼ一定の値となる。

(4) 建築学会規格値との比較

今回の試験結果と「日本建築学会標準仕様書・同解説（JASS7）」⁵⁾の普通IBの規格値とを比較する。曲げ強度に関して、EPB灰はFA添加率74%の場合、2週強度で規格値（5.0N/mm²）を満足する。EPC灰はFA添加率67%の場合、4週強度で規格値を満足する。また、圧縮強度に関してはすべてのケースで規格値（32.0N/mm²）を満足する。

4. まとめ

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) FAの添加率が増加するにつれ曲げ強度および圧縮強度は低下する。
- (2) ポリマーの混入によりポリマー無混入の場合と比べ、曲げ強度および圧縮強度が大きくなるが、その度合いは前者の方が著しい。吸水率については小さくなる。また、FA採取条件による差は、ポリマー無混入では生じていないが、ポリマー混入時では認められた。今後ポリマーとFAとの相互作用に関する検討が必要である。
- (3) 今回試作したポリマー混入タイルは、曲げ破壊荷重においてFA添加率70%程度まで陶磁器質タイルのJIS規格値を満足した。また、吸水率において、FA添加率の小さい範囲では磁器質の規格値を、大きい範囲ではせっき質の規

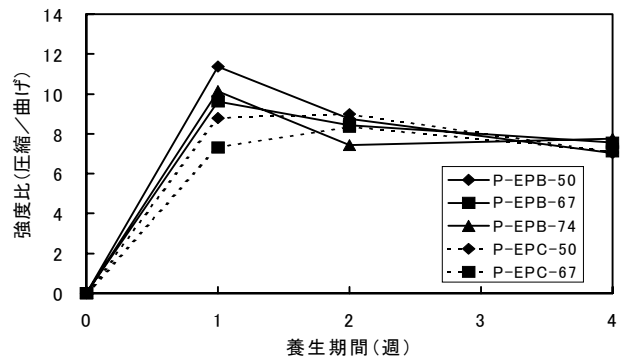


図-11 強度比と養生期間（IB）

格値を満足した。FA採取条件による差はごくわずかであった。

(4) 今回試作したFAを70%程度まで添加するポリマー混入IBは、曲げ強度および圧縮強度においてJASS7の普通IB規格値を満足した。ただし、CP試験とは異なり、石炭産地による差が認められたため、今後FA成分等も考慮した詳細検討が必要であると考えられる。

(5) 今回の試作範囲においては、ポリマー混入タイルでは単位FA量800kg/m³程度、ポリマー混入IBではFAとGCを合わせた単位量1600kg/m³超の添加範囲で性能を満足できた。

以上の結果から、ポリマーセメントを用いることにより無焼成にてFAならびにGCを大量に添加したコンクリート2次製品の製造が可能であることを確認した。今後、凍結融解抵抗性等の耐久性の把握ならびに、再生資源の有効利用の観点および製造時のCO₂削減の観点から、総合的な検討を行う予定である。

参考文献

- 1) (財) 石炭灰総合利用センター：石炭灰全国実態調査報告書（平成11年度分），pp. 6, 2001. 3
- 2) 総合資源エネルギー調査会（総合部会／需給部会）：今後のエネルギー政策について報告書（案），pp. 27, 2001. 6
- 3) (財) クリーン・ジャパンセンター：再資源化技術の開発状況調査報告書，pp. 185, 1973. 3
- 4) JIS A 5209 陶磁器質タイル
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS7 メーソンリー工事，2000