

報告

[1022] 石炭灰を用いたレジンコンクリートの性状について

正会員 杉田英明 (九州電力 総合研究所)
 正会員 藤本 浩 (西日本技術開発 調査部)
 正会員 ○熊谷秀春 (西日本技術開発 調査部)
 水 賢治 (ヤマウ 技術課)

1. まえがき

近年、石油に替わる代替エネルギー源の一つとして、石炭の占める割合が増大しつつある。火力発電用に使用される石炭は、700万kwに対して約200万t/年が必要とされ、石炭の燃焼によって15~20%の石炭灰が排出される。その量を全国的規模で見ると現在約380万t/年から1995年には800万t/年にも達すると予想されている。

一方、石炭灰は約40%程度が有効利用されているにすぎず、残りは海面または陸上の灰捨場に埋立処分されているが、将来増加する石炭灰の灰捨場確保は、適地の減少ならびに環境の面からの制約が多く、また、現在使用中の灰捨場の寿命にも問題があり、石炭灰の有効利用の技術開発が強く望まれている。

したがって本報告は、このような背景に基づき、石炭灰の資源活用を目標として従来レジンコンクリート(以下RECと称す)の増量材の一部に使用されている炭酸カルシウムを石炭灰に置き換えた場合の基本的性状を把握し、その適用性を検討したものである。

2. 試験概要

2.1 使用材料

試験に使用した材料を表-1に示す。

石炭灰は、粒子形態の異なる3灰種(細粉, 粗粉, 原粉)とし、原粉については、細粉と粗粉を4:6の割合で混合した。骨材は、土木学会コンクリート標準示方書の規格に適合するものとした。なお、骨材の使用にあたっては、含水率が0.1%以下になるように105℃で24時間乾燥した¹⁾。以下、材料の名称は表-1の呼称で表記する。

2.2 試験項目及び方法

試験は、予備試験と本試験に分かれ、予備試験では表-2に示す27配合について、練り混ぜ後の性状を観察するとともにフローを測定した。また本試験では、予備試験結果に基づいて選定した8配合について、練り上がり、強度、耐久性等の基本的性状を検討した。

表-1 使用材料

区 分	呼称	種 別	
結合材	石炭灰 FA	オーストラリア産 細粉, 粗粉, 原粉(細粉40%, 粗粉60%)	
	樹脂 R	不飽和ポリエステル(低収縮型)	
硬化剤	触媒 C	メチルエチルケトンパーオキシサイド	
	促進剤	H _N	ナフテン酸コバルト
		H _G	ジメチルアリニン
骨 材	粗骨材 G	川砂利(比重: 2.57, 最大骨材寸法: 10mm)	
	細骨材 S	川砂(比重: 2.54, 粗粒率: 2.78)	

表-2 予備試験の配合条件

FA	混合重量比(%)		硬化剤添加率(%)		
	FA	R	C	H _N	H _G
細粉	16	12, 13, 14	1.0	1.0	0.5
	18				
	20				
粗粉	17	16, 17, 18	1.0	1.0	0.5
	18				
	19				
原粉	17	14, 15, 16	1.0	1.0	0.5
	18				
	19				

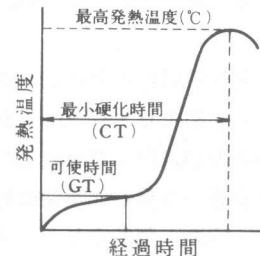


図-1 不飽和ポリエステル樹脂の硬化時間

練り混ぜは、JIS A 1181に基づいて行うものとし、練り上がり性状はフロー、スランプ及び硬化時間（可使時間、最小硬化時間）の測定を行った。①フローは、セメントの凝結試験に規定されているセメントペースト容器にRECを詰めた後、容器を取り去ってから1分後における広がり程度の度とした。②スランプについては、JIS A 1173に基づくものとした。③可使時間（ゲルタイム；GT）は、目視と発熱による2種の判定方法とした。なお、目視によるゲルタイムは、すべての材料を混合した時点からそれを型枠に詰め樹脂がゼリー状ならびにこぼりが生じ始める時点までの時間（目視によるGT）とした。また、発熱によるゲルタイムは、RECを型枠に詰めてからの経過時間と発熱温度の関係曲線より求めた²⁾（図-1参照）。④最小硬化時間（キュアタイム；CT）は、図-1に示すようにRECを混合して最高発熱温度に達した時点までの時間とした。

表-3 硬化後のRECの性状試験項目及び方法

項目	試験方法	
強度性状	圧縮強度	JIS A 1182
	動弾性係数	JIS A 1127
	曲げ強度	JIS A 1184
	引張強度	JIS A 1185
耐久性	凍結融解	ASTM-C 666
	長さ変化	供試体中心部にひずみ計を埋設

硬化後のRECの性状試験は、表-3に示す6項目についてそれぞれの方法に基づいて行った。以下、供試体の製作方法等の主要項目を記述する。

強度性状及び凍結融解試験用供試体は、JIS A 1181に基づいて製作した。なお、供試体の形状は、圧縮強度、引張強度及び凍結融解試験用供試体がφ7.5×H15cm、曲げ強度試験用供試体が6×6×26cmとした。また、供試体の養生方法は、恒温室内で所定の材令に達するまで気中養生（20±3℃）とした。

長さ変化用供試体は、15×15×53cmの鋼製型枠の中心部に厚さ3cmの仕切鋼板を挿入し、その両端部の中心にひずみ計を設置した後、RECの打設、棒状バイブレータによる締固めを行った。なお、ひずみの測定は、供試体に埋設したひずみ計よりスイッチボックスを介して、自動デジタルひずみ計を用いて行った。また、供試体の養生方法は、恒温恒湿室内で供試体製作直後から試験終了（材令91日）まで室内気中養生（20℃，RH60%）とした。

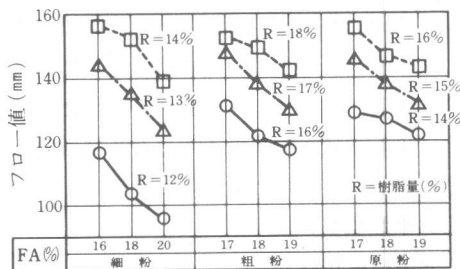


図-2 各配合におけるフローの測定結果

3. 予備試験結果

予備試験は、本試験で用いる灰種（2種）及び石炭灰の混入量、樹脂の使用量（各2種）を選定するために実施したものであり、表-2に示した27配合のフロー値について検討した。

図-2は各配合におけるフローの測定結果を示したものである。この図よりフローは、灰種の違いに関係なく石炭灰の混入量の増加に伴って小さくなる傾向を示した。なお、練り上がり状態から最も作業性に適したフローは、約130～150mm程度の範囲と判断された。また、樹脂の使用量は、細粉、原粉、粗粉の順に増えており、経済性等を考慮すると樹脂量の少ない細粉あるいは原粉を使用するのが望ましいと考えられる。以上の結果より、各配合について練り上がり性状の評

表-4 予備試験の評価

FA(%)	R(%)	12	13	14	15	16	17	18
細粉	16	×	○	△	-	-	-	-
	18	×	○	△	-	-	-	-
	20	×	×	×	-	-	-	-
粗粉	17	-	-	-	-	△	○	△
	18	-	-	-	-	×	○	○
	19	-	-	-	-	×	×	○
原粉	17	-	×	○	△	-	-	-
	18	-	×	○	○	-	-	-
	19	-	×	×	○	-	-	-

○：優
△：良
×：不可
■：本試験に適切

価を行うと表-4に示すようになる。

4. 本試験結果

本試験は、表-4に示す予備試験の結果より細粉，原粉を用いたものの中から8配合を設定し，それについての練り上がり性状，強度性状及び耐久性の各試験を行った。これらの結果を以下各項目毎に記述する。

4.1 配合及び練り上がり性状試験結果

練り上がり性状試験は，練り上がり温度，ゲルタイム，キュアタイム，フロー及びスランプについて行った。それらの結果を表-5と図-3~7にそれぞれ示す。

表-5 配合及び練り上がり性状試験結果

FA	配合番号	混合重量比(%)				硬化剤添加率(%)			練り上がり温度(°C)	GT(目視)		GT(発熱)		CT		フロー(mm)	スランプ(cm)
		FA	R	G	S	C	HN	Hg		時間(min)	温度(°C)	時間(min)	温度(°C)	時間(min)	温度(°C)		
細粉	BS-1316	16.0	13.0	45.4	25.6	1.0	1.0	0.5	21.8	30	25.6	21.5	23.8	64	31.6	144	12.4
	BS-1416	16.0	14.0	44.8	25.2				19.4	38	24.7	22.5	21.3	79	32.4	153	12.8
	BS-1318	18.0	13.0	44.2	24.8	1.0	1.0	0.5	21.9	45	24.5	32.0	22.6	95	30.3	137	12.2
	BS-1418	18.0	14.0	43.5	24.5				20.7	40	24.5	25.0	21.8	76	30.2	141	12.6
原粉	BM-1517	17.0	15.0	43.5	24.5	1.0	1.0	0.5	22.6	32	27.8	18.5	22.2	58	37.2	141	12.3
	BM-1617	17.0	16.0	42.9	24.1				21.7	30	26.3	17.0	22.5	60	37.0	153	13.1
	BM-1518	18.0	15.0	42.9	24.1	1.0	1.0	0.5	20.8	35	25.3	24.0	22.4	71	33.7	136	12.5
	BM-1618	18.0	16.0	42.2	23.8				21.9	34	26.1	20.5	22.3	73	38.9	151	13.0

RECにおける硬化の指標となるゲルタイム(GT)は，前述の目視と発熱による2種の方法で判定した。なお，RECの硬化は，添加する硬化剤の量を一定にしたとき，雰囲気温度の影響を受けて大幅に変動するとされている³⁾。そこで本試験は，練り上がり温度を $20 \pm 3^\circ\text{C}$ に設定した。その結果，ゲルタイムは，目視の方が発熱による判定に比べて約10~15分程度遅くなる傾向にあった。また，図-3に示す石炭灰・樹脂比(FA/R)とゲルタイム(GT)の関係をみると，ゲルタイムは，目視及び発熱のいずれも石炭灰・樹脂比が大きくなると遅くなる傾向にあり，両者の関係は図中に示す一次回帰式で表わされ，比較的高い

相関性が認められた。図-4は，RECの練り上がり時からの経過時間と発熱温度の関係を示すものである。この図よりキュアタイムは，細粉の方が原粉に比べて遅く，また，発熱

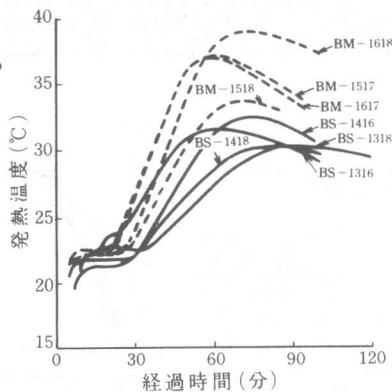


図-4 経過時間と発熱温度の関係

温度の上昇量は原粉の方が細粉に比べて大きい傾向にある。なお，図-5に示す石炭灰・樹脂比(FA/R)と最高発熱

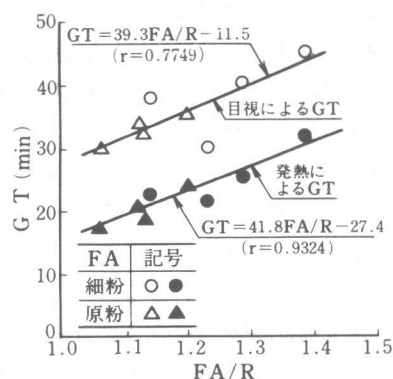


図-3 石炭灰・樹脂比とゲルタイムの関係

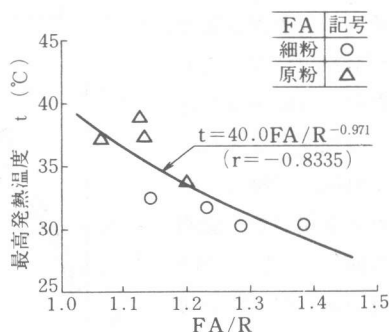


図-5 石炭灰・樹脂比と最高発熱温度の関係

温度 (t) の関係を見ると、最高発熱温度は、石炭灰・樹脂比が大きくなると低くなる傾向にあり、両者の関係は図中に示す回帰式で表され比較的高い相関性が認められる。

RECにおけるフローは 136~153mm, スランプは12.2~13cmの範囲であり細粉と原粉による明確な差異は認められない。しかしながら、図-6に示す石炭灰・樹脂比 (FA/R) とフローの関係

をみると、フローは、石炭灰・樹脂比が大きくなると小さくなる傾向にあり、また、細粉は原粉に比べて大きい。これは、石炭灰の粒子形状が影響したものと考えられる。なお、フローはスランプとの間に比較的高い相関性があり、

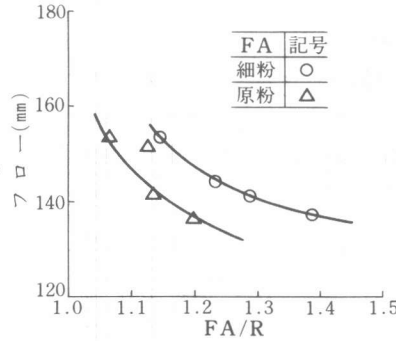


図-6 石炭灰・樹脂比とフローの関係

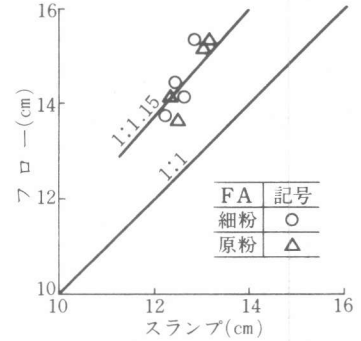


図-7 スランプとフローの関係

フローは、スランプの1.15倍程度である。すなわち、今回測定した簡易な方法によるフローは、十分信頼性があるものと考えられ、流動性評価の一方法として提案できるものと判断される。

4.2 強度性状試験結果

RECの強度性状試験は、圧縮強度、動弾性係数、曲げ強度及び引張強度について実施した。それらの結果を表-6と図-8~11に示す。

(1) 圧縮強度

圧縮強度試験は、細粉と原粉の各1配合 (細粉; 1318配合, 原粉; 1518配合) が材令1, 3, 7, 14, 28日の5材令, その他の配合が材令1, 7, 14日の3材令で行った。その結果, RECの圧縮強度は灰種ならびに配合種別による明確な差異は認められず、材令14日においておおむね 860~930kgf/cm²程度となった。これは、炭酸カルシウムを用いた一般的な値⁴⁾ (800~1600kgf/cm²) の下限値を示すものである。

図-8は、材令と圧縮強度の関係を示

表-6 強度性状試験結果

F A	配合番号	圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)					動弾性係数 E_b ($\times 10^5$ kgf/cm ²)					曲げ強度 σ_b (kgf/cm ²)	引張強度 σ_t (kgf/cm ²)
		材令 (日)					材令 (日)					材令 (日)	材令 (日)
		1	3	7	14	28	1	3	7	14	28	材令 (日)	材令 (日)
細粉	BS-1316	574	-	846	894	-	2.24	-	2.48	2.53	-	239	101.2
	BS-1416	605	-	906	930	-	2.20	-	2.47	2.47	-	231	88.6
	BS-1318	531	673	799	858	958	2.05	2.26	2.40	2.40	2.44	217	93.8
	BS-1418	605	-	911	884	-	2.16	-	2.42	2.42	-	245	96.0
原粉	BM-1517	577	-	925	913	-	1.97	-	2.24	2.26	-	224	102.0
	BM-1617	551	-	902	906	-	1.90	-	2.19	2.17	-	232	94.1
	BM-1518	559	769	885	932	951	1.94	2.14	2.22	2.25	2.28	238	100.8
	BM-1618	523	-	890	901	-	1.80	-	2.12	2.13	-	222	91.7

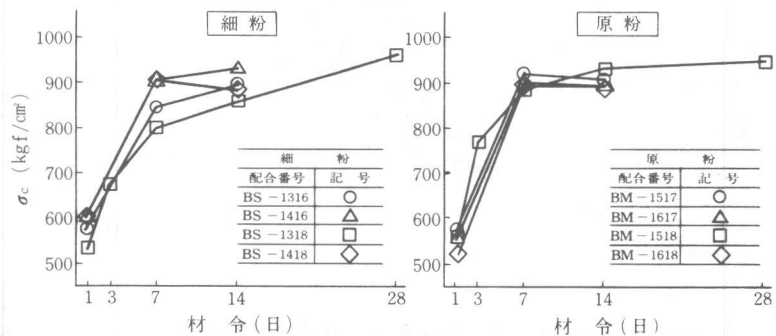


図-8 材令と圧縮強度の関係

すものである。この図より圧縮強度の伸びは、細粉、原粉のいずれも材令 7日までに顕著に認められ、材令 7日以降については緩慢となっている。また、細粉と原粉の圧縮強度の伸びを比較すると、材令14日程度までは原粉の方が細粉に比べて大きい。材令28日においては両者とも 950 kgf/cm²程度でほぼ同等な値となっている。このような初期材令での強度差は、図-4より硬化時の発熱温度が影響しているものと考えられる。

(2) 動弾性係数

動弾性係数の測定は、圧縮強度と同様にすべての供試体について行った。

図-9は、圧縮強度と動弾性係数の関係を示したものである。この図より同一強度上における動弾性係数は、細粉の方が原粉に比べて約 0.2×10^5 kgf/cm²程度大きい値を示している。また、圧縮強度と動弾性係数の間には、細粉と原粉のそれぞれにおいて高い相関性があり、両者の関係は図中の回帰式で示される。

(3) 曲げ強度及び引張強度

RECの曲げ強度及び引張強度試験は、すべての配合について材令14日の1材令で行った。その結果、曲げ強度及び引張強度は、灰種ならびに配合種別による明確な差異は認められないものの、曲げ強度はおおむね約 220 ~ 240kgf/cm²程度、引張強度はおおむね約90 ~ 100kgf/cm²程度である。なお、これらの値は、炭酸カルシウムを用いた一般的な値⁴⁾(曲げ強度; 140 ~ 350kgf/cm², 引張強度; 90 ~ 140kgf/cm²)とほぼ同程度である。

図-10と11は、圧縮強度と曲げ強度及び引張強度の関係をそれぞれに示したものである。これらの図よりいずれもバラツキはあるものの、圧縮強度に対して曲げ強度は約 1/4程度、引張強度は約 1/9.5程度であり、圧縮強度に対する曲げ及び引張強度比は通常のコンクリートに比べて優れているものと考えられる。

4.3 耐久性試験結果

RECの耐久性試験は、細粉と原粉の各1配合を対象に凍結融解及び長さ変化について実施した。

(1) 凍結融解

RECの凍結融解試験は、材令28日以降に実施した。

なお、凍結融解作用に対する

抵抗性は、重量変化率、相対動弾性係数及び耐久性指数を求めて評価し、さらに、100, 200, 300サイクルの完了時

におけるそれぞれの圧縮強度についても検討した。それらの結果を表-7と図-12に示す。

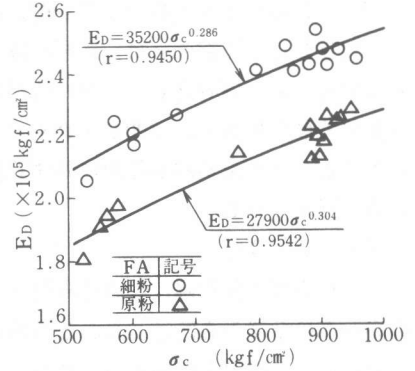


図-9 圧縮強度と動弾性係数の関係

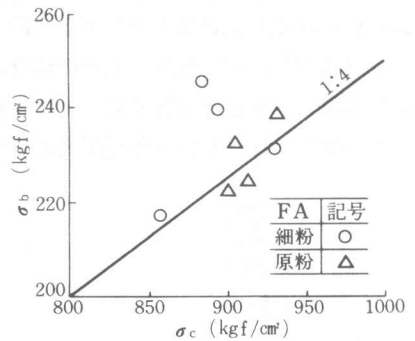


図-10 圧縮強度と曲げ強度の関係

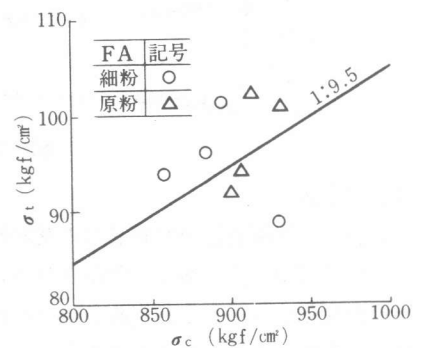


図-11 圧縮強度と引張強度の関係

表-7 凍結融解試験結果

F A	配合番号	試験終了 サイクル数 N	重量変化率 PW (%)	相対動弾性 係数 PC (%)	耐久性指数 DF (%)	圧縮強度 σc (kgf/cm ²)			
						サイクル数			
						0	100	200	300
細粉	BS-1318	300	0.0	96.2	96.2	1030	962	930	902
原粉	BM-1518		0.0	96.9	96.9	1014	956	947	914

供試体重量は、凍結融解作用を 300サイクル与えた場合において、細粉及び原粉ともに変化が無く、また、相対動弾性係数は細粉が96.2%、原粉が96.9%であり、両者ともほぼ変わらない性状を示した。さらに、耐久性指数についても相対動弾性係数と同様である。すなわち、RECの凍結融解作用に対する抵抗性は、比較的優れているものと判断される。

図-12はサイクル数と圧縮強度比の関係を示したものである。この図より、凍結融解作用を与えたRECの圧縮強度は、灰種の違いによる明確な差異は認められないものの、両者ともサイクル数が増加するに伴って圧縮強度が減少する傾向にあり、300サイクルで約10%程度の低下がみられる。このことから凍結融解作用に対する抵抗性は、比較的優れているものと考えられる。

(2) 長さ変化

RECの長さ変化は、埋め込み型ひずみ計を型枠にセットし、打設後からのひずみを測定した。その結果を図-13に示す。

RECは、細粉と原粉のいずれも、発熱により約 $1700 \sim 1800 \times 10^{-6}$ 程度の膨張を生じ(細粉; 1.5時間程度, 原粉; 1時間程度)、ほぼ最小硬化時間に達した時点より硬化による収縮に移向し、細粉の場合約 2600×10^{-6} 程度、原粉の場合約 3700×10^{-6} 程度の収縮を示す。また、材令91日におけるひずみ量は、細粉と原粉でそれぞれ収縮側に約 400×10^{-6} 程度と約 1400×10^{-6} 程度であり、原粉の方が細粉に比べて約4倍程度大きいものであった。

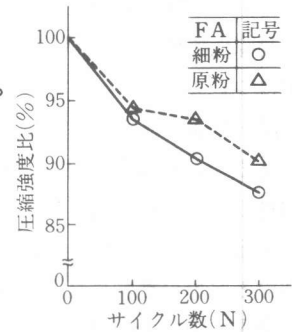


図-12 サイクル数と圧縮強度比の関係

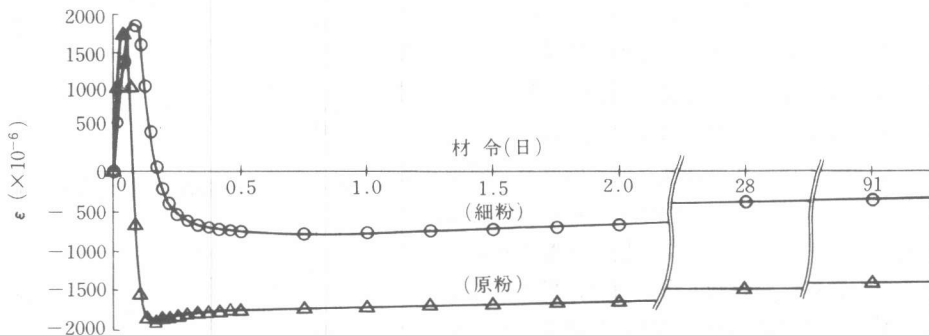


図-13 材令とひずみの関係

5. まとめ

以上、石炭灰を用いたRECの基本的性状について検討した結果、石炭灰はRECの増量材として十分使用可能であると判断される。しかしながら、石炭灰は炭種や粉碎、燃焼状態によって灰質が変化することや石炭灰を用いたRECの長期的な安定性などの問題を含め、さらに今後の検討が必要であると考えられる。

<参考文献>

- 1) 山崎竹博：不飽和ポリエステルレジコンクリートの土木材料への適用に関する基礎的研究, PP.13
- 2) 滝山栄一郎：ポリエステル樹脂, 日刊工業新聞社, PP.17
- 3) 清水茂夫：実用レジコンクリート, 山海堂, PP.21
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧, 技報堂, PP.997