

## 論文

# 生コンスラッジの有効利用に関する実験的研究

## —スラッジ結合材の基礎的性状—

佐々貴 敬\*1・村上 聖\*2・三井 宜之\*3  
上杉 英之\*4・橋爪 宏幸\*4

### Experimental Study on Valid Use of Concrete Sludge — Fundamental Properties of Sludge Binder —

Kei SASAKI, Kiyoshi MURAKAMI, Yoshiyuki MITSUI,  
Hideyuki UESUGI and Hiroyuki HASIZUME

#### 1. はじめに

生コン工場におけるミキサーの洗浄やアジテータトラック中の残りコン・戻りコンの洗浄による洗い排水から細・粗骨材を分離回収した残りの懸濁水（これをスラッジ水と呼ぶ）を脱水機により脱水した固形物を生コンスラッジ（スラッジケーキ）と呼ぶ。生コンスラッジは、産業廃棄物の取り扱い上「汚泥」に属し、管理型の埋立処分が義務付けられていたが、平成8年に厚生省より、固化したモルタルと同等の性能、即ち一軸圧縮強度で8N/mm<sup>2</sup>以上の生コンスラッジは、「ガラス・陶磁器くずに該当する」安定型廃棄物に指定変更しうる事が通達された。しかし、通常生コンスラッジで8N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度を確保することは難しく、結局のところ管理型廃棄物として処理されているのが現状であり、処分場確保や処分費用等の多くの問題を抱えている。

生コンスラッジの処理から再生材の生産までの全工程を、発生場所である生コン工場内で行うことができれば、スラッジは原料、再生材は製品であるので、産業廃棄物に該当せず、何の制約も受けない。言い換えると、スラッジが発生した工場内で、スラッジを加工し、有償で売却できる製品を製造することのみが、廃棄物清掃法の適用から除外される道なのである。

スラッジケーキを乾燥、粉碎した乾燥スラッジについては、これまでにコンクリート用材料（細骨材やセメントの一部として）、高流動コンクリート用微粉末、地盤改良材、路盤材等への利用に関する研究報告<sup>1) 4)</sup>があるが、スラッジケーキの乾燥・粉碎等のランニングコストや乾燥スラッジの安定な供給量などの面で零細工場での適用は困難である。一方、セメントや高炉スラグ微粉末を混和材として混入したスラッジケーキの強度発現性状について畑中らによる一連の研究報告<sup>9) 11)</sup>がある。その結果として、乾燥スラッジを加えて固化するよりも、スラッジケーキをそのまま固化の方が強度発現性状は圧倒的に良好であること、同一置換率でセメントよりも高炉スラグ微粉末を混和材として用いた方が強度発現が大きく、特に含水率が高いスラッジケーキほど顕著であること、スラッジケーキの強度増加量は混和材水比によりある程度推定できることなどが示されている。この方法であれば、零細工場でも十分に適用可能であり、スラッジケーキを結合材としてボード類、パネル、ブロック等の建材への利用も考えられる。

本研究では、簡易脱水による含水率の比較的に大きなスラッジケーキと高炉スラグ微粉末を混合した結合材の基礎性状について実験的検討を行った。その内容は、次のとおりである。

- 1) スラッジケーキ混入率が結合材の圧縮強度発現性状に及ぼす影響
- 2) スラッジケーキの脱水後ストック期間が結合材の圧縮強度発現性状に及ぼす影響
- 3) スラッジ結合材に対する繊維補強効果
- 4) スラッジ結合材の強度理論

平成12年10月10日受付

\*1 大学院生，自然科学研究科後期博士課程

\*2 大学院助教授，自然科学研究科

\*3 工学部教授，環境システム工学科

\*4 大学院生，自然科学研究科前期博士課程

## 5) スラッジ結合材の強度発現促進方法

## 2. スラッジケーキ混入率が結合材の圧縮強度発現性状に及ぼす影響

即時脱水スラッジケーキの混入率が結合材の圧縮強度および材齢に伴う強度発現性状に及ぼす影響について実験的検討を行った。ここで、即時脱水ケーキとは、その日の生コンから排出される生コンスラッジを24時間以内に空圧式脱水機により脱水したスラッジケーキをいう。

## 2.1 実験方法

スラッジケーキには、前述のように即時脱水ケーキを用いた。なお、含水率は140%である。高炉スラッジ微粉末には、JIS A 6206「コンクリート用高炉スラッジ微粉末」に適合するものを用い、その密度および比表面積は、それぞれ2.89および $4200\text{cm}^2/\text{g}$ である。結合材（スラッジケーキ+高炉スラッジ微粉末）に対するスラッジケーキの質量比（以下、スラッジケーキ混入率と呼ぶ）を0～100%の範囲内の数水準で変化させ、スラッジケーキ混入率と標準養生材齢28日圧縮強度の関係を実験的に求めた。また、代表的なスラッジケーキ混入率に対して標準養生材齢91日までの圧縮強度発現性状を調べた。

混練方法は、スラッジケーキをエッジによりスライスしたものを容量5lのオムニミキサーに投入し、1分間空練した後、高炉スラッジ微粉末を投入しさらに2分間混練した。フロー値180～200を目標に、スラ

ジケーキと高炉スラッジ微粉末の混合比率に応じて練り具合を観察しながら加水した。高含水率のスラッジケーキは、そのチキソトロピー性状のためにミキサーのせん断攪拌により容易に流動し、高炉スラッジ微粉末の混入量が少ない場合には加水しなくとも目標フロー値を満足した。供試体は、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を用い、各調合および材齢ごとに3個ずつ作製した。

## 2.2 実験結果および考察

表1、2に試験結果を示す。なお、表中の加水率とは、

表1 スラッジケーキ混入率の影響

スラッジケーキ混入率 (%)	加水率 (%)	標準養生材齢28日圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
0	33	0
5	33	0.4
10	31	1.7
12	23	5.9
20	22	13.6
40	14	11.8
50	6	10.1
60	3	8.6
80	0	5.3
100	0	0

\*フロー値180～200を目標に加水

表2 スラッジ結合材の圧縮強度発現性状

スラッジケーキ混入率 (%)	加水率 (%)	圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )		
		標準養生材齢 (日)		
		7	28	91
56	20	2.8	10.6	14.8
62	11	4.1	10.0	13.7

\*フロー値180～200を目標に加水

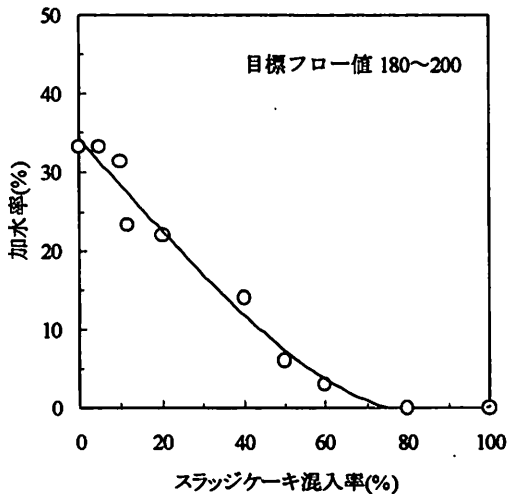
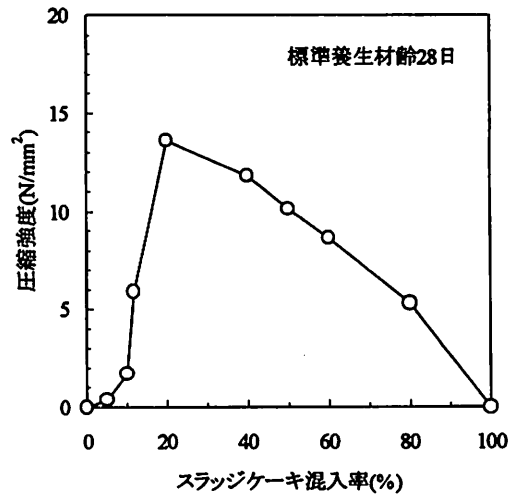


図1 スラッジケーキ混入率と加水率および圧縮強度の関係



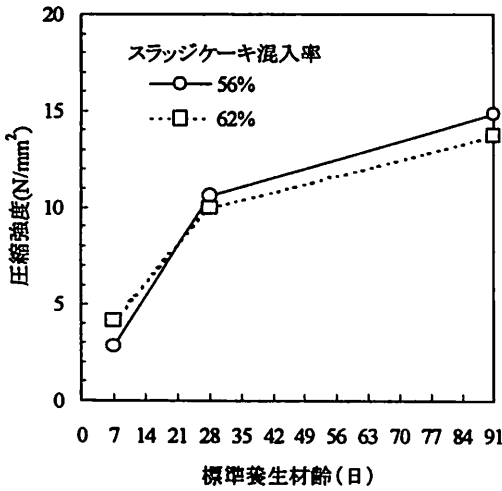


図2 スラッジ結合材の圧縮強度発現性状

結合材に対する加水量の質量比をいう。また、図1に、スラッジケーキ混入率と加水率および標準養生材齢28日圧縮強度の関係を、図2に、スラッジケーキ混入率が56、62%について標準養生材齢91日までの圧縮強度発現性状を示す。図1より、スラッジケーキ混入率が大きくなるほど、フロー値180~200を得るための加水量が少なくなることで、圧縮強度がピークを示す最適なスラッジケーキ混入率が存在し、この場合にはスラッジケーキ混入率が約20%のときに最大の圧縮強度約14N/mm<sup>2</sup>が得られた。また、生コンスラッジの有効利用を目的に、スラッジケーキを可能な限り多量に消費することを考え、圧縮強度が8N/mm<sup>2</sup>以上を目標とすれば、スラッジケーキ混入率は約60%まで許容できる。図2より、高炉スラグ微粉末の硬化特性上、短期材齢の強度発現は小さいが、長期材齢の強度増加が大きく、材齢91日強度は材齢28日強度の約1.4倍となった。前述の目標圧縮強度8N/mm<sup>2</sup>に対するスラッジケーキ混入率の許容範囲は、長期養生が可能であれば、さらに大きな値を採ることができる。

### 3. スラッジケーキの脱水後ストック期間が結合材の圧縮強度発現性状に及ぼす影響

スラッジケーキと高炉スラグ微粉末を混合し、結合材として再利用する場合、即時脱水ケーキの発生量と供給量のバランスをとるために、脱水ケーキをある期間ストックする必要が生じる。そこで、即時脱水ケ

キの脱水後の経過日数が結合材の圧縮強度発現性状に及ぼす影響について実験的検討を行った。

#### 3.1 実験方法

スラッジケーキには即時脱水ケーキを、高炉スラグ微粉末には前述のものを用いた。脱水ケーキは、脱水当日、脱水後2、4、7、14、28日間実験室内に放置したものをそれぞれ用意した。スラッジケーキ混入率は、前述の実験結果より、標準養生材齢28日圧縮強度が8N/mm<sup>2</sup>以上を目標に許容しうる最大値として60%を選定した。

混練方法は、前述のとおりであり、フロー値180~200を目標に加水した。供試体は、φ50×100mmの円柱供試体を用い、所定の脱水後経過日数のスラッジケーキに対して標準養生材齢28、91日のそれぞれについて各3個ずつ作製した。

#### 3.2 実験結果および考察

表3に試験結果を示す。また、図3に、スラッジケーキの脱水後経過日数に対する標準養生材齢28、91日圧

表3 脱水後経過時間の影響

脱水後の経過日数	含水率 (%)	加水率 (%)	フロー値	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	
				標準養生材齢 (日)	
				28	91
0	147	5	180	11.2	21.7
2	149	9	186	10.6	17.4
4	139	12	203	12.3	21.1
7	149	11	207	11.9	10.8
14	126	15	198	8.9	6.4
28	117	25	195	6.3	7.6

\*スラッジケーキ混入率は60%一定  
フロー値180~200を目標に加水

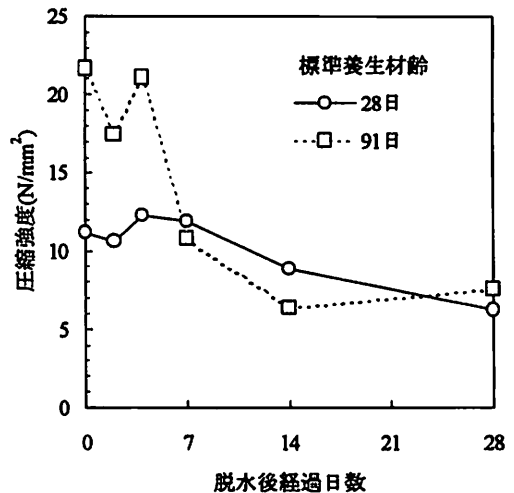


図3 スラッジケーキの脱水後経過日数と圧縮強度の関係

縮強度の変化を示す。表より、脱水後経過日数が7日までスラッジケーキの含水率の変化はほとんどないが、それ以降の含水率の減少に伴って目標フロー値を得るための加水量が増加していることが分かる。また、図より、材齢28日強度については、脱水後経過日数が7日まではほぼ一定の圧縮強度約11～12N/mm<sup>2</sup>が得られているが、それ以上経過したものはスラッジケーキの含水率の減少とともに強度は低下していることが分かる。これは、含水率の減少に伴う加水量の増加に起因するものと考えられる。また、材齢91日強度は、脱水後経過日数が4日までは材齢28日強度の約1.6～2倍と大きく増加しているが、7日以上経過したものは長期養生による強度発現がほとんど認められなかった。これは、脱水後経過日数が長くなると、スラッジケーキの活性度が低くなるためと考えられる。

以上の結果より、脱水後の経過日数は7日が限度であり、長期養生における強度発現を期待するのであれば、脱水後4日以内に使用してしまうのが最適と思われる。また、脱水後のストック期間を延ばすためには、本実験のように室内放置するのではなく、乾燥固化しないように密閉容器等に貯蔵するなどの処置を講ずる必要があり、その際の品質管理特性値として含水率が有効であると考えられる。

#### 4. スラッジ結合材に対する繊維補強効果

スラッジケーキと高炉スラグ微粉末から成る結合材は、ボード類等の建材への利用を目的とした場合、圧縮強度はそこそこではあるが、比重が大きく、曲げ強度は小さい。そこで、これらの欠点を改善するために、人工軽量骨材および繊維を混入した場合のスラッジ結合材の軽量化と強度性状について実験的検討を行った。

##### 4.1 実験方法

本実験の使用材料を表4に示す。スラッジケーキには含水率が140%の即時脱水ケーキを、高炉スラグ微粉末には密度が2.89、比表面積が8110cm<sup>2</sup>/gのJIS適合品を用いた。また、細骨材には、表5に示す品質の人工軽量骨材を用い、細骨材の標準粒度の範囲内で各粒径の混入率を表中に示すように定めた。繊維には、繊維長18mmのビニロン繊維を用い、繊維を混入する場合に流動性を確保するために混和剤として高性能減水剤を使用した。

表6に使用調合を示す。スラッジケーキ混入率は60%一定とし、繊維および高性能減水剤無混入におけるフロー値が約180になるように加水量を定めた。そ

の結果、絶乾状態で用いた軽量骨材の混入率が大きくなるにつれて加水量も多くなっている。軽量骨材および繊維の混入率は、対結合材質量比でそれぞれ0、50、70、90%および0、0.5、0.75、1.0%とした。また、繊維を混入する場合には、高性能減水剤を標準使用量の範囲内で対結合材質量比で2.0%混入した。

混練方法は、容量5lのオムニミキサーを用い、軽量骨材有無のスラッジ結合材を練り上げた後、繊維を混

表4 使用材料

スラッジケーキ	即時脱水ケーキ 含水率 140%
高炉スラグ微粉末	JIS 適合品 密度 2.89 比表面積 8110cm <sup>2</sup> /g
細骨材	人工軽量骨材 絶乾比重 0.735
繊維	ビニロン繊維 密度 1.30 繊維径 41μm 繊維長 18mm 引張強度 1.85kN/mm <sup>2</sup> 引張弾性率 43.9kN/mm <sup>2</sup>
混和剤	高性能減水剤

表5 人工軽量骨材の品質と混入率

グレード	N-1	N-2	N-3	N-4
粒径(mm)	4.8~2.4	2.4~1.2	1.2~0.6	0.6~0.3
絶乾比重	0.65	0.65	0.75	0.90
実積率(%)	60.3	61.9	60.2	61.8
混入率(%)	10	20	60	10

表6 使用調合

軽量骨材 混入率 (%)	繊維 混入率 (%)	加水率 (%)	減水剤 混入率 (%)	フロー値
0	0	8	0	177
	0.5	8	2.0	208
	0.75	8	2.0	173
	1.0	8	2.0	170
50	0	25	0	182
	0.5	25	2.0	198
	0.75	25	2.0	183
	1.0	25	2.0	183
70	0	34	0	174
	0.5	34	2.0	184
	0.75	34	2.0	179
	1.0	34	2.0	179
90	0	49	0	167
	0.5	49	2.0	188
	0.75	49	2.0	180
	1.0	49	2.0	169

\*スラッジケーキ混入率は60%一定  
軽量骨材、繊維、減水剤混入率は対結合材質量比

入る場合には繊維を分散投入し、約3分間混練した。表6に示すように、高性能減水剤を2.0%混入することにより、繊維混入率が1.0%までフロー値の大きな低下はみられなかった。

供試体は、圧縮強度試験用にφ50×100mmの円柱供試体を、曲げ強度試験用に40×40×160mmの三連型枠による角柱供試体を用い、各調合について3個ずつ作製し、標準養生材齢28日後に強度試験に供した。なお、曲げ強度試験はJIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠し、荷重と試験機のクロスヘッド変位の関係を測定した。

4.2 実験結果および考察

表7に試験結果を示す。また、図4に、繊維混入率

に対する圧縮強度および曲げ強度の変化を軽量骨材混入率ごとに示す。表および図より、供試体の表乾比重は、軽量骨材を混入することにより無混入の場合よりも約3割程度低減するが、軽量骨材混入率を50%以上に増やしてもそれ以上の軽量化は期待できない。また、圧縮強度および曲げ強度はともに軽量骨材の混入により大きく低下している。これは、本実験ではフロー値を一定に保つために軽量骨材混入により加水量が増え、水結合材比が大きくなったためと考えられる。繊維混入の影響に関しては、軽量骨材無混入の場合、繊維混入率の増加に伴い圧縮強度および曲げ強度はともに増加し、特に曲げ強度に対する繊維補強効果が著しく大きくなっている。しかし、軽量骨材を混入した場合には、繊維を混入しても圧縮強度および曲げ強度の増加

表7 スラッジ結合材の繊維補強効果

軽量骨材混入率 (%)	繊維混入率 (%)	表乾比重	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )
0	0	1.7	14.8	3.2
	0.5	1.6	16.6	5.3
	0.75	1.6	19.3	7.1
	1.0	1.6	16.8	7.6
50	0	1.2	14.9	2.2
	0.5	1.2	13.8	2.1
	0.75	1.2	13.9	1.9
	1.0	1.2	13.8	1.6
70	0	1.1	11.6	1.9
	0.5	1.1	12.7	2.3
	0.75	1.1	11.0	1.9
	1.0	1.1	11.0	1.9
90	0	1.1	10.5	1.6
	0.5	1.1	10.1	1.8
	0.75	1.1	8.4	1.5
	1.0	1.1	8.9	1.6

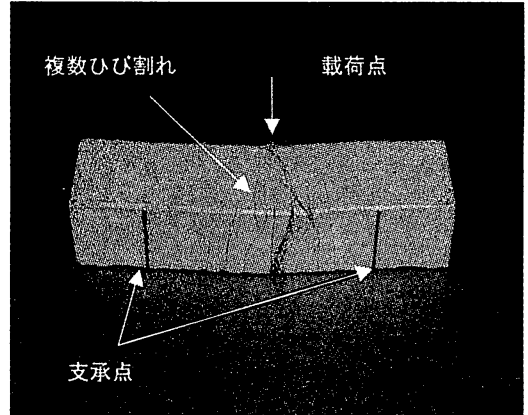


写真1 複数ひび割れの発生状況

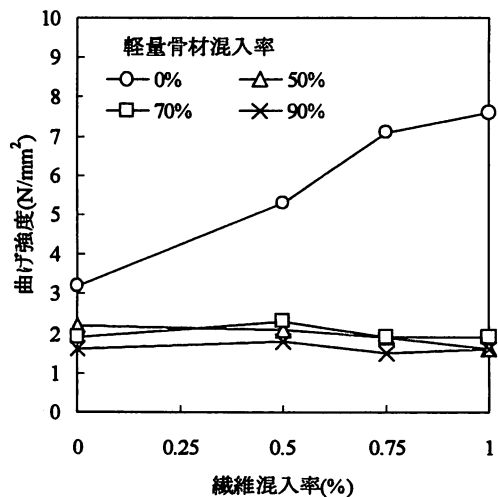
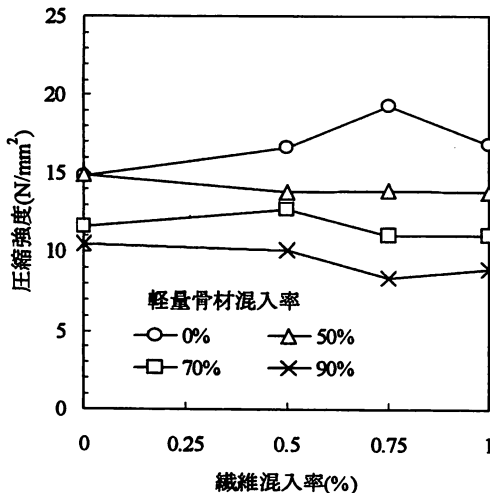


図4 繊維混入率と圧縮強度および曲げ強度の関係

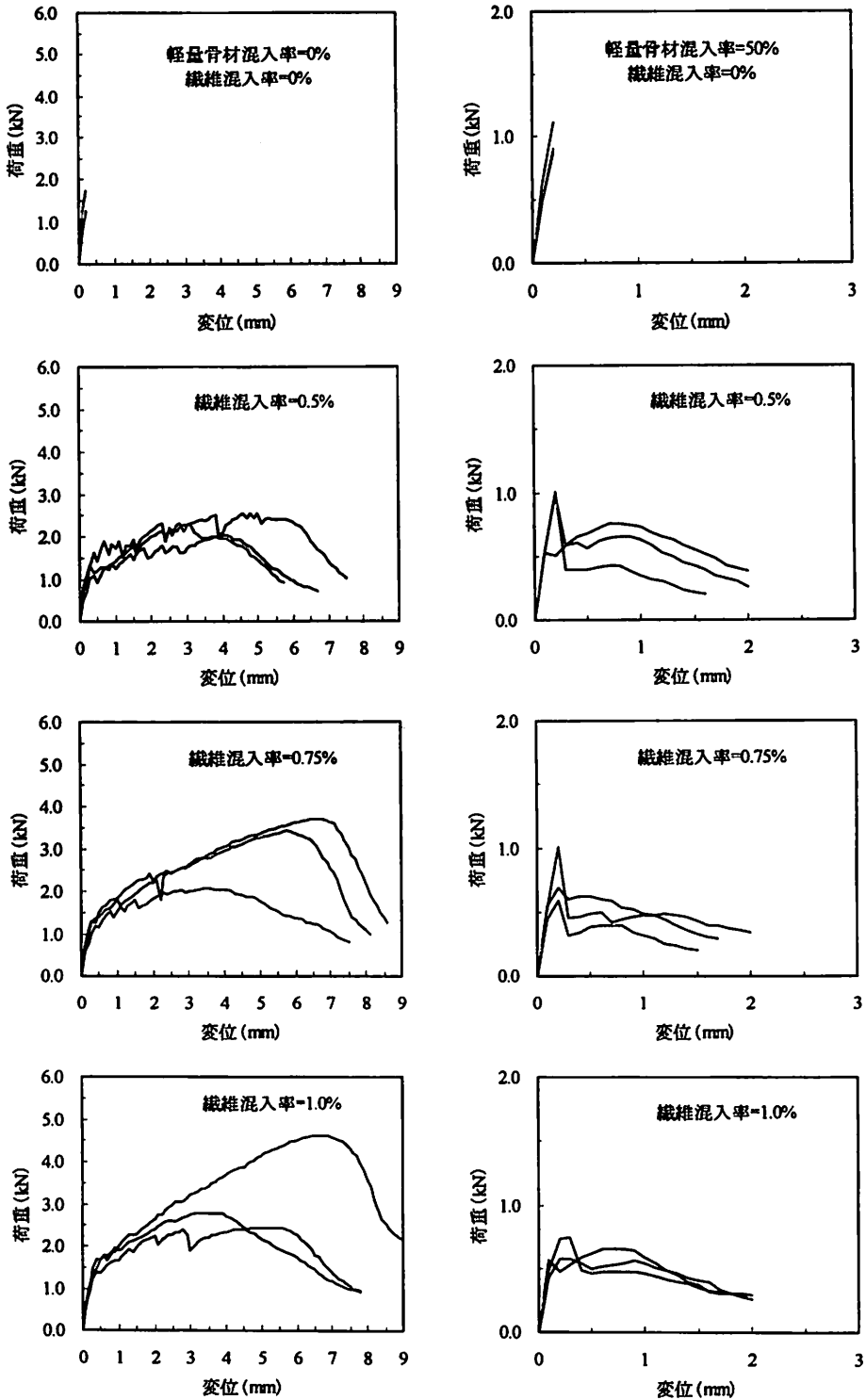


図5 曲げ試験における荷重ークロスヘッド変位曲線の測定値

はほとんどみられない。これは、上述のように軽量骨材混入による水結合材比の増加によりマトリックス強度だけでなく繊維の付着強度も低下し、繊維が引き抜けやすくなるためと考えられる。

図5に、曲げ試験における荷重-クロスヘッド変位曲線の測定値を軽量骨材混入率が0%および50%の場合について示す。軽量骨材無混入の場合には、繊維の混入により初期ひび割れが発生した後も荷重が低下することなく、最大荷重に至るまで複数のひび割れを生じながら非常に大きな変形能力を示した(写真1)。一方、軽量骨材を混入した場合、繊維を混入しても1本のひび割れが進展拡大することにより大きく荷重が低下した後、若干の粘りが認められるものの、複数ひび割れの発生はみられず、靱性の向上は期待できない。

複数ひび割れの発生条件は、繊維が破断しないことを前提に繊維の付着強度がマトリックスの引張強度よりも相対的に大きいことが必要になる。繊維が破断しないためには繊維径、繊維の引張強度および繊維の付着強度から定まる限界繊維長さが繊維長さよりも大きいことが必要であり、繊維径および繊維の引張強度が大きくなれば限界繊維長さは大きくなり、繊維の付着強度が大きくなれば逆に限界繊維長さは小さくなる。繊維の付着が効きすぎると繊維が切れやすくなるために、繊維が破断しないためには径や引張強度が大きな繊維を使用する必要がある。本実験で使用したビニロン繊維は高引張強度であり、マトリックス強度も小さいので繊維破断の可能性は小さく、ほとんど繊維の引き抜けによるものと考えられる。いま、セメントマトリックスに対する繊維の付着メカニズムを考えた場合、繊維とマトリックス界面の化学結合による付着の例はあまりなく、ほとんどは繊維表面の突起や端部フックによる機械的付着と摩擦付着であると思われる。機械的付着の場合には、その付着強度はマトリックス強度に依存することからマトリックスの引張強度が小さくなれば繊維の付着強度も低下するために、上述の条件から複数ひび割れは生じにくいと思われる。また、本実験で使用したビニロン繊維の場合にはその表面形状より主に摩擦付着に依存しているものと想定される。摩擦付着の場合には、繊維とマトリックス界面の接触面積に依存することから、マトリックス強度よりもマトリックスの組織の緻密さが繊維の摩擦付着強度に強く関係する。一般に、組織が緻密になれば強度も大きくなるのが常であるが、その場合マトリックスの引張強度も大きくなる。さらに、界面には遷移帯と呼ばれる粗大な $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の結晶が集積し、マトリックス強度

が大きくなっても繊維界面の付着強度は大きく向上しないことも複数ひび割れが生じにくい原因となる。しかし、スラッジ結合材の場合には、スラッジのアルカリ刺激による高炉スラッジ微粉末の硬化により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費され、緻密な組織が形成されるために、マトリックス強度は小さいが繊維の摩擦付着強度が大きいため、複数ひび割れの発生条件が満足されたものと予想される。

以上の結果から、本実験の範囲内では軽量骨材混入率を50%以上に増やしてもそれに見合う軽量化は期待できず、強度も大きく低下すること、また繊維混入により軽量骨材無混入の場合には大きな強度および靱性の向上がみられたが、軽量骨材を併用すると調合条件にもよるものと思われるが繊維補強効果が大きく低下することが判った。現状では、軽量化を図るよりも繊維補強により強度および靱性の飛躍的向上を活用した用途を模索する方が製品化の早道であると考えられる。

## 5. スラッジ結合材の強度理論

スラッジ結合材の用途を図るためには、所要の強度を得るための調合設計が必要になる。前記の図1に示すように、最大の圧縮強度が得られるスラッジケーキ混入率の最適値が存在することが分かったが、その関係はスラッジケーキの含水率が一定で、フロー値がほぼ一定になるように加水量を調整した条件で得られたものであり、スラッジケーキの含水率が変化した場合やフロー値の設定が異なる場合にもその関係が保持されるとは考えられない。そこで、所要の圧縮強度を得るための強度理論の構築を目的に、次の推論に基づいて実験的検討を行った。

1) 高炉スラッジ微粉末は、スラッジケーキ中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ のアルカリ刺激により硬化する。このアルカリ性物質は、高炉水砕スラッジのガラス構造を形成している $\text{SiO}_2$ のネットワークを切断する作用をもち、ネットワークの切断が一旦始まるとスラッジに含まれているアルカリ成分が溶出してきてアルカリ性雰囲気は保たれるので、ネットワークの切断が継続され、高炉スラッジの水への溶解が進み、ポルトランドセメントの水和と同じような反応が起こってC-S-H系水和物が生成するために水砕スラッジの硬化現象が生じる。また、最初に添加されたアルカリ性物質は単に初期の水和を促す作用を行うのみで化学量論的に必要なものではないとされている。このことは、高炉スラッジの潜在水硬性を発揮させるのに必要なアルカリ刺

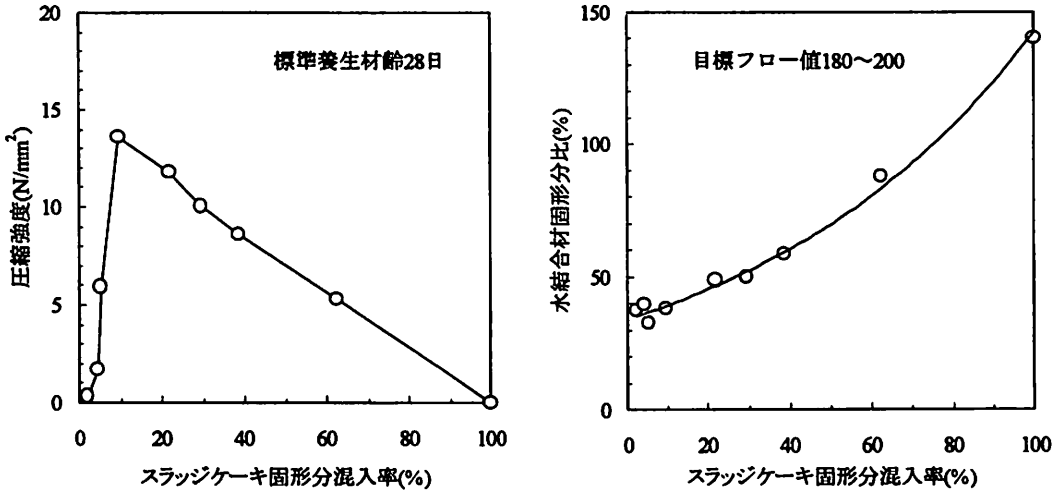


図6 スラッジケキ固形分混入率と圧縮強度および水結合材固形分比の関係

激材としてのスラッジケキ混入率に閾値が存在することを予測させる。

- 水セメント比説に従えば、水和反応にあずからない余剰水は毛細管空隙となって硬化体の強度を低下させる。このことは、前記1)のアルカリ刺激材として必要な量のスラッジケキを混入した場合、スラッジケキの含水量や加水量を含めた水結合材固形分比によりスラッジ結合材の圧縮強度が一意的に決まることを予測させる。

図6は、前記の図1に示す実験結果を基に、スラッジケキ固形分混入率（結合材固形分に対するスラッジケキ固形分の質量比）と標準養生材齢28日圧縮強度および水結合材固形分比（結合材固形分に対するスラッジケキの含水量と加水量を含む水量の質量比）の関係を示す。なお、結合材固形分は、スラッジケキの含水量を除く固形分と高炉スラグ微粉末の和である。図より、スラッジケキ固形分混入率が約10%まで混入率の増加とともに圧縮強度は大きく増加し、水結合材固形分比はその範囲でほぼ一定であることから、上記の推論1)が成り立つ可能性が示唆される。また、スラッジ固形分混入率が約10%以上に増加すると、混入率の増加とともに圧縮強度は低下しているが、その範囲では水結合材固形分比もフロー値を一定に保つために増加しており、上記の推論2)に従えば、水結合材固形分比の増大による空隙量の増加が圧縮強度を低下させる要因となっていると考えられる。

以上の予測を実証するために、ここでは、水結合材固形分比を一定とし、スラッジケキ固形分混入率を変化させた場合と、スラッジケキ固形分混入率を一定とし、水結合材固形分比を変化させた場合の圧縮強度の変化を実験的に調べた。

### 5. 1 実験方法

スラッジケキは、含水率が215%の即時脱水ケキを、また高炉スラグ微粉末には密度が2.89、比表面積が4200cm<sup>2</sup>/gのJIS適合品を用いた。表8に使用調合を示す。シリーズ①では、水結合材固形分比を55%一定とし、スラッジケキ固形分混入率を5~25%の5水

表8 シリーズ①、②の使用調合

シリーズ	スラッジケキ固形分混入率 (%)	水結合材固形分比 (%)	加水率 (%)	減水剤混入率 (%)	フロー値
①	5	55	44	0	—
	10	55	34	0	227
	15	55	23	0	189
	20	55	12	0.3	176
	25	55	1.3	1.3	191
②	15	35	2.7	2.5	216
	15	45	13	0.5	185
	15	55	23	0	189
	15	65	33	0	227
	15	75	43	0	—

\*スラッジケキ固形分混入率は、スラッジケキ固形分の結合材固形分に対する質量比  
 水結合材固形分比は、スラッジケキの含水量と加水量を含む水量の結合材固形分に対する質量比  
 加水率は、加水量の対結合材固形分質量比  
 減水剤混入率は、対結合材固形分質量比



準で変化させた。なお、スラッジ固形分混入率が大きくなるにつれてフロー値が低下し、混入率の大きい範囲で練り混ぜが困難となったため、その際には高性能減水剤を表中に示す量で混入した。シリーズ②では、スラッジケーキ固形分混入率を15%一定とし、水結合材固形分比を35~75%の5水準で変化させた。なお、水結合材固形分比が小さくなるにつれてフロー値が低下し、水結合材固形分比が小さい範囲で練り混ぜが困難となったため、その際には高性能減水剤を表中に示す量で混入した。

混練方法は前述のとおりであり、供試体にはφ50×100mmの円柱供試体を用い、各調合ごとに3個ずつ作製し、標準養生材齢28日後圧縮強度試験に供した。

5.2 実験結果および考察

表9に試験結果を示す。また、図7に、水結合材固形分比を55%一定とした場合のスラッジケーキ固形分

表9 シリーズ①、②の試験結果

シリーズ	スラッジケーキ固形分混入率 (%)	水結合材固形分比 (%)	結合材固形分水比	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
①	5	55	1.82	0
	10	55	1.82	13.5
	15	55	1.82	13.5
	20	55	1.82	11.1
	25	55	1.82	13.7
②	15	35	2.86	20.1
	15	45	2.22	13.9
	15	55	1.82	13.5
	15	65	1.54	13.3
	15	75	1.33	12.1

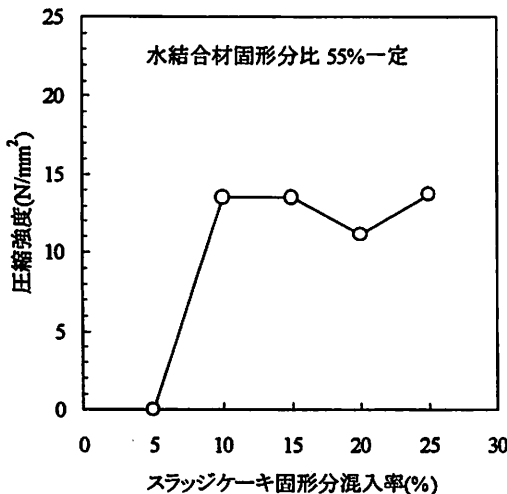


図7 スラッジケーキ固形分混入率と圧縮強度の関係

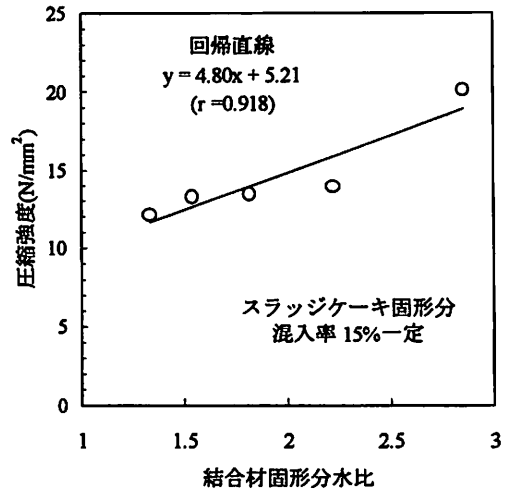


図8 結合材固形分水比と圧縮強度の関係

混入率と圧縮強度の関係を、図8に、スラッジケーキ固形分混入率を15%一定とした場合の結合材固形分水比と圧縮強度の関係を示す。図7より、スラッジケーキ固形分混入率が10%以上ではほぼ一定の圧縮強度約13N/mm<sup>2</sup>が得られ、高炉スラグ微粉末に対するアルカリ刺激材としてのスラッジケーキ固形分混入率の閾値は約10%以上であり、前述の推論1)の妥当性が実験的に確かめられた。また、図8より、スラッジケーキ固形分混入率が15%と上記の閾値以上において、結合材固形分水比と圧縮強度の間にほぼ直線的な関係が得られ、前述の推論2)の妥当性が実験的に確認された。

以上の結果より、スラッジ結合材の調合設計として、スラッジケーキ固形分混入率を安定な圧縮強度が得られる閾値の約10%以上とした上で、所要の圧縮強度を得るために必要な結合材固形分水比を求める方法を提案する。その際に、スラッジケーキをできるだけ多量に消費することを考えるならば、スラッジケーキ固形分混入率は本実験の範囲内で約25%まで許容できるが、スラッジケーキ固形分混入率および結合材固形分水比が大きくなるほどフロー値が低下するので、施工性も考慮した上で、適切なスラッジケーキ固形分混入率と水結合材固形分比を選定することが必要である。

6. スラッジ結合材の強度発現促進方法

これまでの実験結果より、スラッジ結合材の圧縮強度として標準養生材齢28日で約10~20N/mm<sup>2</sup>のものが得られ、二次製品への利用に対して所要の強度を確

保することができることが判った。しかし、高炉スラグ微粉末の硬化特性から長期養生における強度発現は大きいものの、短期強度が小さく、製品化を目的とした場合にはスラッジ結合材の強度発現促進方法の開発が望まれる。そこで、本実験では、強度発現促進方法として養生温度および石膏添加がスラッジ結合材の強度発現性状に及ぼす影響について検討した。

### 6.1 実験方法

スラッジケーキには、含水率が196%の即時脱水ケーキを、高炉スラグ微粉末には、密度が2.89、比表面積が6140cm<sup>2</sup>/gのJIS適合品を用いた。また、石膏には市販の焼石膏(α型半水石膏)を使用した。使用調査は、スラッジケーキ固形分混入率を閾値以上の20%、水結合材固形分比を60%、加水率(対結合材固形分質量比)を20.8%一定とした。石膏混入率は、対結合材固形分質量比で0, 10, 20%の3水準とした。ここで、石膏を混入した場合、その速硬性によりフロー値が低下したが、今回は凝結遅延剤を用いず、目標フロー値が180~200になるように高性能減水剤を混入し、できるだけ速やかに供試体を作製した。

混練方法は前述のとおりであり、供試体はφ50×100mmの円柱供試体を用い、各調合および養生材齢について各3個ずつ作製した。養生温度の影響に関しては、石膏無混入について20℃および40℃水中養生材齢3, 7, 28日で、石膏添加の影響に関しては、石膏混入率=0, 10, 20%について20℃水中養生材齢3, 7, 28日で圧縮強度試験を行った。

### 6.2 実験結果および考察

表10に試験結果を示す。また、図9に、養生温度および石膏添加が圧縮強度発現性状に及ぼす影響を示す。石膏無混入の40℃水中養生の場合、材齢3日で石膏無混入の20℃水中養生の場合の圧縮強度の約2.4倍の圧縮強度が得られ、高温養生による短期材齢強度の発現がかなり大きいことが分かる。しかし、材齢28日では20℃および40℃水中養生における圧縮強度の差異はほとんどみられない。また、石膏の混入により、材齢3日で40℃水中養生の場合とほぼ同じくらいの圧縮強度が得られ、さらに材齢28日までの強度増加もかなり大きいことが分かる。材齢28日の圧縮強度は、石膏混入率が10%および20%についてそれぞれ約30および40N/mm<sup>2</sup>であり、石膏混入率が大きいほど強度増加も大きくなっている。

以上の結果より、40℃水中養生は、潜在強度を短期に発現させるのに有効であるが、長期強度の発現は小さいこと、石膏混入により短期だけでなく長期強度の

表10 スラッジ結合材の強度発現促進に関する試験結果

種類	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		
	材齢(日)		
	3	7	28
石膏無混入 20℃水中養生	6.3	10.6	19.2
石膏無混入 40℃水中養生	14.9	15.1	20.9
石膏混入率10% 20℃水中養生	13.8	24.6	31.7
石膏混入率20% 20℃水中養生	17.5	26.4	40.4

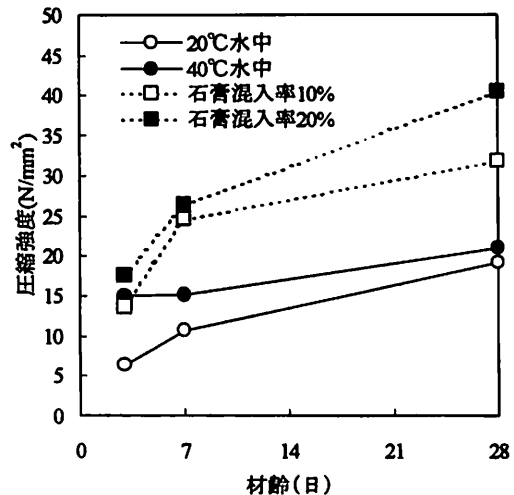


図9 養生温度および石膏混入がスラッジ結合材の圧縮強度発現性状に及ぼす影響

発現も大きくなること、また、石膏単独では耐水性が小さい欠点がスラッジ結合材に混入することにより解消され、水中養生の場合も安定した強度が得られることが判った。

### 7. まとめ

本研究では、簡易脱水による比較的含水率の大きなスラッジケーキと高炉スラグ微粉末を混合した結合材の基礎的性状について実験的に検討を行った。その結果として、次のような知見が得られた。

- 1) フロー値一定の条件下で、最大の圧縮強度が得られるスラッジケーキ混入率が存在するが、生コンスラッジの有効利用を目的に、スラッジケーキを可能な限り多量に消費することを考え、圧縮強度が8N/mm<sup>2</sup>以上を目標とすれば、スラッジケーキ混入率は約

60%まで許容できることが判った。

- 2) 即時脱水ケーキの脱水後のストック期間は、7日が限度であり、長期強度の発現を期待するのであれば、脱水後4日以内に使用してしまうのが最適である。また、その際の品質管理特性値としてスラッジケーキの含水率が有効である。
- 3) 本実験の範囲内では、軽量骨材混入率を50%以上に増やしてもそれに見合う軽量化は期待できず、強度も大きく低下する。また、繊維混入により軽量骨材無混入の場合には大きな強度および靱性の向上がみられたが、軽量骨材を併用すると繊維補強効果が大きく低下するので、強いて軽量化を図るよりも繊維補強による大きな強度および靱性の向上を活用した用途を考える方が製品化の早道であると思われる。
- 4) スラッジ結合材の強度理論に関して、水結合材固形分比を一定とした場合、スラッジケーキ固形分混入率が約10%以上ではほぼ一定の圧縮強度が得られ、アルカリ刺激材としてのスラッジケーキ固形分混入率の閾値は約10%以上であること、スラッジケーキ固形分混入率を上記の閾値以上とした場合、結合材固形分水比と圧縮強度との間にはほぼ直線的な関係が成り立つことが判った。
- 5) スラッジ結合材の強度発現促進方法に関して、40℃水中養生は潜在強度を短期に発現するのに有効であるが、長期強度の増加は小さくなること、石膏混入は短期だけでなく長期強度の発現も大きく、強度発現促進だけでなく、スラッジ結合材の高強度化に有効であることが判った。

#### 謝 辞

本実験にあたっては、熊本大学工学部甲斐定夫技官をはじめ、同大学卒業生の矢田部良、泉高陽、日高愛里諸氏の協力をいただきました。また、クラレ(株)にはビニロン繊維、新島物産(株)には人工軽量骨材を提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 竹田吉紹ほか：乾燥スラッジを混入したコンクリートの特性に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.48，pp.424～428，1994
- 2) 畑中重光ほか：生コンスラッジの基礎的性状に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，No.48，pp.280～285，1994
- 3) 月岡存：乾燥スラッジを混入したコンクリートの特性，セメント・コンクリート論文集，No.49，pp.348～353，1995
- 4) 畑中重光ほか：生コンスラッジに関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.33，No.6，pp.14～24，1995. 6
- 5) 畑中重光ほか：生コンスラッジの現状と利用の可能性，コンクリート工学，Vol.34，No.8，pp.49～58，1996. 8
- 6) 畑中重光ほか：生コンスラッジの再生路盤材への適用，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.268～273，1996
- 7) 畑中重光ほか：乾燥微粉碎した生コンスラッジの活性度と有効利用に関する一考察，セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.470～475，1997
- 8) 月岡存：生コンスラッジの混和材としての有効利用に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.175～180，1998
- 9) 畑中重光ほか：生コンスラッジの強度発現性状に及ぼす混和材の影響，セメント・コンクリート論文集，No.49，pp.312～317，1995
- 10) 畑中重光ほか：生コンスラッジの強度発現性状と組織構造の関係に関する考察，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.950～955，1996
- 11) 湯浅幸久ほか：混和材を添加したスラッジケーキの強度発現性状と組織構造に関する考察，第23回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.116～123，1996. 10