

# 論文 併用系自己充填コンクリートにおける石灰石微粉末の粉末度が及ぼす影響

瀬戸謙一郎<sup>\*1</sup>・古澤靖彦<sup>\*2</sup>・信田佳延<sup>\*3</sup>

**要旨:** 併用系自己充填コンクリートに用いられる石灰石微粉末 (Lime Powder ;LP) の粉末度が、フレッシュコンクリート品質および圧縮強度に及ぼす影響を系統的に検討した。

その結果、自己充填性の実現には、使用する LP の粉末度には最適な領域が存在することが明らかとなり、本検討で用いた配合の範囲においては、その領域が 4500cm<sup>2</sup>/g 程度であった。また、LP の使用が普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの圧縮強度を全体的に進ませることが明らかとなり、結合材分散作用と充填作用の機構で説明可能である。

**キーワード:** 石灰石微粉末, 自己充填コンクリート, 併用系

## 1. はじめに

粉体系および併用系自己充填コンクリートを製造するためには、コンクリート中で流体として挙動するペースト部の量がある程度以上確保する必要がある。ペースト量の確保には、通常は耐久性の観点より水量に下限値を設けて粉体の増量分を多くするが、化学反応性の高い結合材をむやみに増量すると過剰強度、温度ひび割れ発生のリスク増加、自己収縮の増加などの不都合が生じる。これより、化学的な活性が小さい石灰石微粉末 (Lime Powder ; 以降 LP) を増量材とすれば、上述の無用な不都合を避けることができ、一般強度スペックの自己充填コンクリートを実現するための、不可欠な材料として広く用いられるようになった<sup>1)</sup>。

LP も他の微粉材料と同様に、その性質の相違によってコンクリートの様々な性状に影響を及ぼすと思われる、将来的には適用する LP の性質を選択することでコンクリートの性能をより高める材料設計技術も重要となる。

本研究ではこのような意図のもとに、LP の最も一般的な性質指標である粉末度の変化

が、自己充填コンクリートの性質に及ぼす影響を系統的に検討したものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

ベースセメントには普通ポルトランドセメント (Ordinary Portland Cement; 以降 OPC) を使用し、高性能 A E 減水剤はポリカルボン酸系のものを使用した。さらに、増粘剤として、水溶性ポリサッカライドであるウエランガムを使用した。本実験に使用した材料特性を表-1 に示す。また今回、実験に使用したブレーンの異なる各 5 タイプの LP (3500 cm<sup>2</sup>/g、4730 cm<sup>2</sup>/g、8380 cm<sup>2</sup>/g、10970 cm<sup>2</sup>/g、18180 cm<sup>2</sup>/g; 以降 3500LP、4730LP、8380LP、10970LP、18180LP) の粒度分布を図-1 に示す。また、化学成分を表-2 に示す。

表-1 使用材料

使用材料	記号	摘要
セメント	C	普通ポルトランドセメント [日本セメント社製] 比重3.16
石灰石微粉末	LP	秩父産石灰石微粉末 比重2.69
細骨材	S	上野原産川砂 比重2.57, 吸水率3.00%, F.M.2.82, 実積率71.3%, 微粒分(0.15mm未満)9.5%
粗骨材	G	八王子産硬質砂岩砕石 比重2.66, 吸水率0.53%, F.M.6.58実積率61.3%, Gmax=20mm
高性能 A E 減水剤	SP	ポリカルボン酸系
特殊増粘剤	VIS	水溶性ポリサッカライド (ウエランガム)

\*1 鹿島技術研究所 第二研究部第2研究室 工修 (正会員)

\*2 鹿島技術研究所 企画室企画課課長代理 工博 (正会員)

\*3 鹿島技術研究所 第二研究部第2研究室室長 工修 (正会員)

表-2 コンクリート配合

W/C (%)	V <sub>M</sub> /V <sub>P</sub> (%)	V <sub>S</sub> /V <sub>M</sub> (%)	G <sub>vol</sub> (l)	空気量 (%)	LP混合率 (%)	単位置 (kg/m <sup>3</sup> )					SP (P×%)	VIS (W×%)	
						W	C	LP	S	G			
27	85	42	300	4.5 ± 1.5	0	175	648	—	707	798	1.7	0.1	
		44				169	626		740				
		46				163	604		774				
54		42			50	175	324	277	707				
						44	169	313	267				740
						46	163	302	258				774
39		44			30	169	438	160	740				
90						70	188	374	740				

2.2 コンクリート配合

本実験では、要因として LP のブレンに加えて、LP の混合比率を取り上げた。実験を行ったコンクリートの配合を表-2 に示す。水粉体容積比、粗骨材容積は、それぞれ 85%、300 l と一定にした。なお、高性能 A E 減水剤の添加量については、ウエランガムを適正量使用した場合、高性能 A E 減水剤の添加量が練上り時のコンクリートの品質に与える影響は小さくなる<sup>2)</sup>ことから、すべての配合において 1.7 (P×%) 一定とした。

2.3 実験方法

本実験において実施した試験は、土木学会「自己充填型の高流動コンクリートの試験方法(案)」に準じて実施した。なお今回、自己充填性の評価にはボックス型充填性試験器(鉄筋障害 5 本：鉄筋径 D10・鉄筋間隔 35mm)を使用した。コンクリートの練混ぜには、水平二軸強制練りミキサ(60 l, 60rpm)を使用し、練混ぜ量は 40 l とした。練混ぜ時間は、モルタル先練り 90 秒、骨材投入後 90 秒とし、5 分静置後 30 秒攪拌して排出した。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュコンクリート品質に及ぼす影響 (1) ブレンの影響

図-2 に LP のブレンと各フレッシュコンクリート試験結果との関係を示す。これにより、スランプフローは細骨材容積比が小さくなるにつれて、いずれの LP を使用したケースにおいても、大きくなる結果となった。また、LP のブレンの影響については、細骨材容積比にかかわらず 4730LP で最大となり、それ以上のブレンのものを使用した場合には、ブレン値

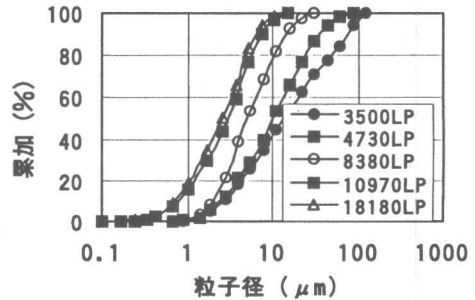


図-1 LP の累加粒径曲線

表-1 LP の化学組成 (%)

項目	Ig. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	T-S	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
含有量	42.6	2.8	0.3	0.2	52.9	1.0	0.01	0.09

が高いほどスランプフローは低下する結果となった。これは、100 μm 以上の粗粉を 5%程度含んでいる 3500LP を使用した場合、この粗粉と細骨材の微粉の粒度が一致して、その範囲だけ粒度が卓越して粒度の連続性が低下して、流動性が低下したものであろう<sup>3)</sup>。一方、高ブレン LP を使用した場合には、ペースト中に占める微粒分の割合が多くなり過ぎても細骨材との粒度の連続性が悪くなり、ペーストが骨材間を通過して一体に挙動せず、全体の流動性が低下するものと考えられる。

50cm フロー時間は、細骨材容積比が小さくなるにつれて、いずれの LP を使用したケースにおいても小さくなる結果となった。また、LP のブレンの影響については、細骨材容積比がいずれのケースにおいても、3500LP~8380LP の間ではブレンの増大とともに小さくなり、8380LP~18180LP の間では横這い、もしくはブレンの増大とともに若干大きくなる結果となった。この原因については、今後検討する必要があるが、今回

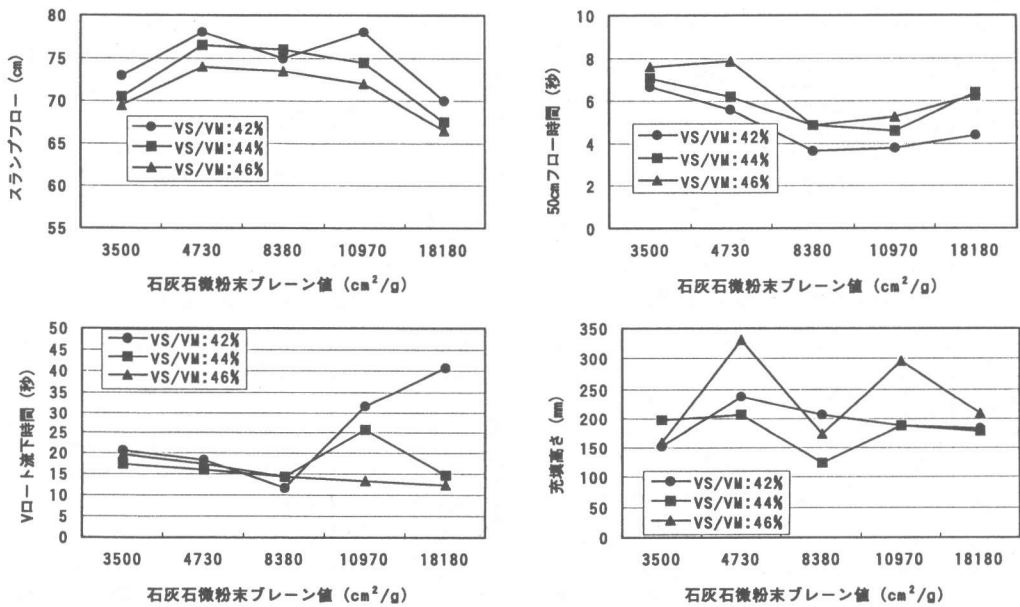


図-2 LPブレンドとフレッシュコンクリート性状の関係

試験を行った配合では、3500LP、4730LP に比べて粗粉が少ない 8380LP の使用が、50cm フロー時間で評価される粘性を低下させるのに効果的であり、それ以上のブレンドでは、微粒分の影響により粘性が若干上がるものと考えられる。

Vロート流下時間は、8380LP までは細骨材容積比による差はなかった。しかし、10970LP 以上の LP ブレンドでは細骨材容積が最も小さい 42% のケースで粗骨材同士のロッキングが明らかに認められ、流下時間も 30 秒以上となった。また、細骨材容積比 44% でも、10970LP 以上で流下時間が増加し時々ロッキングが生じる不安定な状態となった。高ブレンドの LP を使用した場合、前述したように微粒分の多いペーストでは粗骨材同士の接触を抑制することが困難となると考えられる。特に、細骨材容積比が小さい場合には、モルタル中に占める微粒分の割合が増加することになるため、この傾向が顕著になり、以上の結果に繋がったと推察される。

今回自己充填性の評価として実施したボックス型充填性試験では、4730LP を使用し、細骨材容積比が 46% のケースが最も充填高さが大きくなった。しかしながら、LP のブレンドと充填高さ

には、明確な傾向は見出せなかった。

## (2) LP の混合比率の影響

図-3 に LP 混合比率と各フレッシュコンクリート試験の関係を示す。

スランプフローは、4730、10970LP ともに混合比率 50% で最大となった。また、50cm フロー時間は、4730LP を使用した場合には、混合比率の増加とともに低下する結果となった。一方、10970LP を使用した場合には、混合比率 30% において、急激な低下が認められるものの、それ以上の混合比率の増加に対しては、変化が認められなかった。これらは、本比較が同一配合条件で行われており、OPC 及び各 LP の拘束水比、変形係数<sup>4)</sup> がそれぞれ異なるため、混合比率が変化することによって全粉体の特性が変化することによると推察される。

Vロート流下時間は、4730LP を使用した場合には、混合比率 30~50% が最も小さく、70% では、粗骨材同士のロッキングが認められ、58.2 秒と大きく増加した。混合比率 30% の 50cm フロー時間が 50% よりも大きいにもかかわらず、Vロート流下時間がほぼ同じ結果であるということは、混合比率 50% においても、わずかながら粗

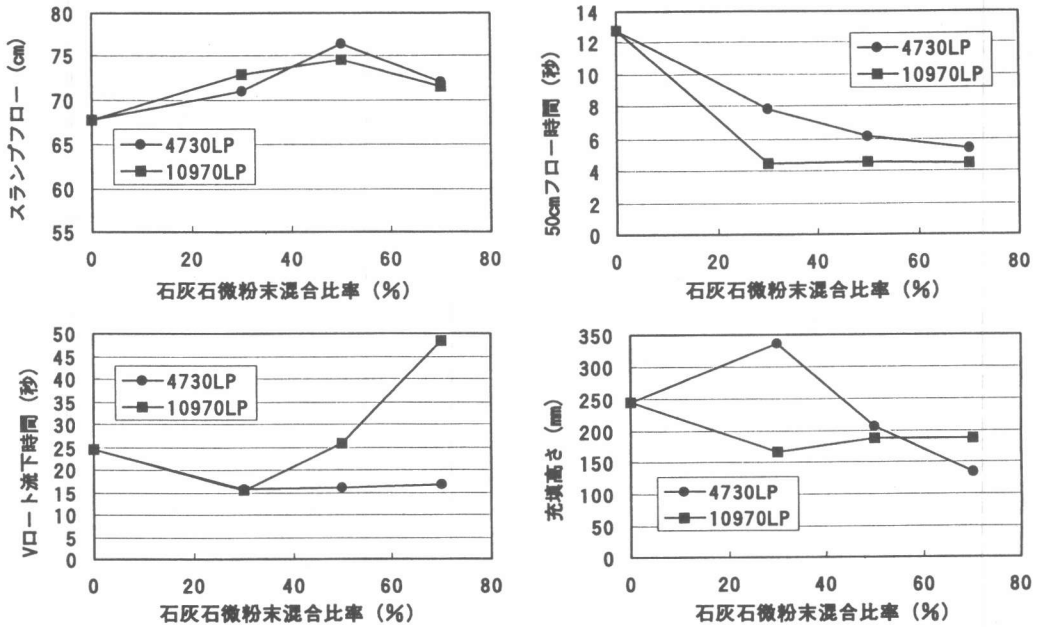


図-3 LP混合比率とフレッシュコンクリート性状の関係

骨材同士の接触機会が増加していると推察できる。一方、10970LPを使用した場合には、同様の傾向が顕著に確認でき、混合比率30%で最小となり、混合比率の増加に伴い流下時間は増大する結果となった。

充填高さは、4730LPでは、混合比率30%において337mmと最も高く、それ以上では混合比率の増加とともに、低下する結果となった。一方、10970LPでは、いずれの混合比率においても170~190mmであり、大きな変化は認められなかった。したがって、本比較を行った配合条件では、4730LPを使用し、混合比率を30%にした状態が自己充填性を得るのに最も適していると言える。また、LPの混合率0%、すなわち、全粉体をOPC単身にした場合には、良好な充填性が得られていないことを考慮すると、4730LPを使用した方が自己充填コンクリートの配合設計が容易に行うことができると考えられる。

## 3.2 圧縮強度に及ぼす影響

### 3.2.1 プレーンの影響

図-4にLPのプレーンと圧縮強度の関係を示す。これより、セメント量の多少に関わらずLPのプレーンと圧縮強度強度の間に明確な関連は観察されないが、すべてのLPプレーンの場合について、セメント量が多くなるほど全体的に圧縮強度が大きくなる傾向となった。また、本条件ではW/Cが54%に固定されているが、圧縮強度が最も低い値で45N/mm<sup>2</sup>であり、平均的には50N/mm<sup>2</sup>に達していた。LPを用いない一般的なコンクリートの水セメント比54%程度での圧縮強度は材令28日で40N/mm<sup>2</sup>以下が通常であり(例えば5)、これに比較してLPを用いたコンクリートの強度は全体的に高い値となった。この傾向は材令91日でも継続されており、最も低い値で50N/mm<sup>2</sup>、平均的には58N/mm<sup>2</sup>に達していた。

### 3.2.2 LPの混合比率の影響

図-5に、LP混合比率と圧縮強度の関係を示す。本比較条件では水量と骨材量が固定されるので、LPの混合比率の増加につれてセメント量が低下(W/Cが増加)して、当然のことながら圧縮強度も低下する。本試験条件では、LPを使用しない場合でW/Cは27%となり、LP混合比率30%

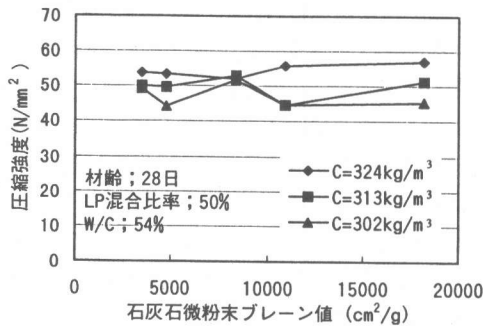


図-4 LPブレーンが圧縮強度に及ぼす影響

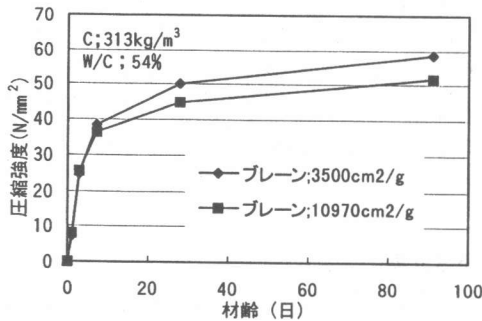


図-6 圧縮強度発現性状

でW/Cが39%、LP50%でW/Cが54%、LP70%でW/Cが90%となる。LP混合でW/Cが39%の場合に圧縮強度は材令28日で60N/mm<sup>2</sup>、W/C54%での圧縮強度は45N/mm<sup>2</sup>に達し、W/Cが90%と極めて大きくなって31N/mm<sup>2</sup>もの圧縮強度を発揮している。ブレーンコンクリートのW/C～σ28関係の一般例で、例えば文献5)からの推定値ではW/C39%で54N/mm<sup>2</sup>、W/C54%で35N/mm<sup>2</sup>となり、これよりかなり高い強度レベルにあることがわかる。

### 3.2.3 圧縮強度発現性状

図-6に、圧縮強度発現性状を示す。ごく初期の圧縮強度の発現が若干大きくW/C54%、材令1日でいずれのLPを用いた場合でも圧縮強度が7N/mm<sup>2</sup>以上となっており、材令3日で材令28日圧縮強度の半分以上が発現されている。

### 3.2.4 考察

石灰石微粉末を用いたコンクリートの一般的性状として、結合材に対する外割で添加した場合、すなわち同一セメント量およびW/Cでは、LPの使用が圧縮強度の上昇に寄与することが報告されて

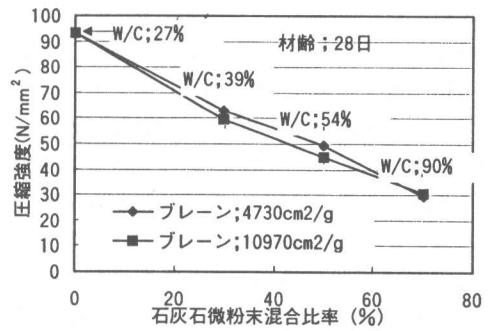


図-5 LP混合比率が圧縮強度に及ぼす影響

いる。この効果は、LPの使用量が少ない場合は材令初期に卓越して材令の経過に伴い小さくなるが<sup>6)</sup>、LPの使用量が多い場合には長期材令でも効果が持続する<sup>7)</sup>としている。今回の試験ではLPの使用量が多いケースで、中長期材令での圧縮強度増進効果の持続が上記の報告に一致する。特にLPの混合比率を70%まで高めて結果的にW/Cが90%になるような極端なケースでも、大きな圧縮強度が発揮されることを確認したことが新たな知見である。

LPの使用が圧縮強度を増進させる効果の機構としては、①LPとセメントの反応、②結合材の分散性の向上による水和促進作用、③物理的な充填作用などが挙げられている。①の反応はアルミネート系鉱物とのモノカーボネートの生成反応で、水和のごく初期段階に生じ、中長期の圧縮強度を支配するエーライト及びピーライトの水和が進行していない若材令で、圧縮強度増進に寄与する。今回の試験では、LPの多量使用によって全般的に長期強度が高まり、若材令の強度増進効果は相対的に小さく観察された。また、一般的に固液系の反応速度は固体の比表面積が大きいほど促進されるが、本試験結果では図-6に示したようにLPのブレーンの影響は観察されていない。これは、LPの使用量が多いため、ブレーンが小さくてもLPの総表面積が反応促進のためには十分大きかったためと推測される。②の分散作用は、結合材と水の間にはLPが介在して両者の物理的な接触性を高める機構と解釈され、その効果は比較的長期に持続する。③の物理的な充填作用は、比較的大きな空隙を充填してマトリクス欠陥サイズを低減して強度を増加させる機構と解釈され、強度の発揮時期を促進するのみではなく最終的な強度を

底上げする効果がある。本研究でも、W/C が 90% と極端に大きくなっても 31N/mm<sup>2</sup> もの圧縮強度を発揮するケースが観察されている。通常のコンクリートでは終局でも到達しない強度と思われる、充填作用による恒久的な強度増進効果が発揮されたと推測される。なお、本研究ではプレーンの相違による長期強度増進効果への影響は観察されなかったが、これは LP の混合比率を最小でも 30% として使用量で 160kg/m<sup>3</sup> 以上の試験条件で得られた結果であり、使用量の少ない範囲では強度増進効果がプレーンに依存する可能性もある。

#### 4. 結論

LP の粉末度が自己充填コンクリートの様々な性質に及ぼす影響を系統的に把握することを目的として試験的な検討を実施した。明らかとなった事項を以下に示す。

- ① 100 $\mu$ m 以上の粗粉を多く含む低プレーンの LP を使用したケースでは、細骨材の微粉との相互作用により、流動性の低下が確認された。
- ② 高プレーンの LP の使用は、粗骨材の移動に寄与するペーストの能力を低下させる。
- ③ 以上より、自己充填コンクリートにおいて、LP の粉末度には最適な領域が存在し、本検討用いた配合においては、約 4500cm<sup>2</sup>/g であった。
- ④ LP の混合比率が全粉体に対して 50%以上で 250kg/m<sup>3</sup> 以上の使用量とすると、長期的な圧縮強度の増進が観察された。
- ⑤ LP の混合比率が 70%、使用量 374kg/m<sup>3</sup> と多量に使用したケースで、W/C が 90%と極めて大きくなっても材令 28 日で 31N/mm<sup>2</sup> もの圧縮強度が発揮されることを確認した。
- ⑥ 本試験の範囲内では、上記の圧縮強度増進効果は LP のプレーンに依存しない。

本研究で対象とした自己充填コンクリートは、併用型でウエランガムを増粘剤として使用したタイプに限定される。しかし、ここで得られたフレッシュコンクリートの性状に関する知見は、要は、「細骨材の微粒分を含む粉体の全体的な微粒分構成バランスとフレッシュ性状に密接な関連がある」ことに集約され、これは、併用系、粉体系の自己充填コンクリートについて共通の指標になる事項と思われる。

また、圧縮強度性状については、混和剤種類の影響が小さくなる比較的長期で得られた知見であるため、本研究の知見は粉体増量型自己充填コンクリートの一般的な指標になり得るであろう。

今後の課題として、フレッシュ性状については異なる種類の粉体間の今後作用を定量的に評価して今回の結果をさらに一般化することであり、強度性状については長期安定性の評価のほか、一般的な耐久性物性を評価することである。

#### 【謝辞】

本研究は、日本コンクリート工学協会「石灰石微粉末研究委員会」(委員長：東京工業大学工学部無機材料工学科・大門教授)より材料の提供を受けるなどの協力を得て実施した。付記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 万木正弘・山本博之・古澤靖彦・坂田昇：締固めが不要なコンクリート配合についての実験的研究、鹿島技術研究所年報、Vol.38、pp17-24、1990.10
- 2) 坂田昇・田沢雄二郎、大友忠典、瀬戸謙一郎：高性能地下連続壁のコンクリート配合に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp213-218、1994.6
- 3) 枝松良展・下川浩児・岡村甫：モルタルフロー値に及ぼす粉体特性の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp77-82、1994.6
- 4) 岡村甫・前川宏一・小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、1993
- 5) 村田次郎：人工軽量骨材コンクリート、セメント協会、1967
- 6) 山崎順次、立松和彦：石灰石粉および碎石粉を用いた高流動コンクリートの基礎的性質、日本建築学会年次学術講演概要集、材料施工、No.1039、pp.79-80、1996
- 7) 田村博、高橋利一、五十嵐千津雄：碎石粉のコンクリートへ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.13、No.1、pp.57-62、1991