30
ISSN 0386－5687
土木研究所資料第3855号

土 木 研 究 所 資 料

ダム建設工事で発生するスラッジのコンクリートへの有効利用に関する調査報告書

(1) 各種コンクリートのワーカビリティー，強度

2002 年 3 月

独 立 行 政 法 人 土 木 研 究 所
技術推進本部構造物マネジメント技術チーム

Copyright © (2002) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所資料
第3855号 2002年3月

ダム建設工事で発生するスラッジのコンクリートへの有効利用に関する調査報告書

(1) 各種ｺﾝｸﾘｰﾄのﾜｰｶﾋﾞﾘﾃｨｰ，強度

構造物マネジメント技術チーム　主席研究員　河野　広隆
主任研究員　森濱　和正
交流研究員　土田　克美※

要　旨

ダム建設工事の濁水処理設備から排出される大量のスラッジは，多くの場合において産業廃棄物として処分されている。この大量に発生するスラッジをダムのＲＣＤ用，ＥＬＣＭ用，外部用，高流動コンクリートに混入したときの品質試験を行い，有効利用の可能性について検討を行った。

まず，スラッジ，骨材の諸特性を把握した。つぎに，スラッジを細骨材の一部として置換し，モルタル，コンクリートに混入したときのワーカビリティー，強度試験を行った。本報告書はこれらの試験結果について，とりまとめたものである。

キーワード：スラッジ，リサイクル，比表面積，ＲＣＤ用コンクリート，ＥＬＣＭ用コンクリート，外部用コンクリート，高流動コンクリート，ワーカビリティー，強度，耐久性，配合設計

※ 戸田建設㈱

まえがき

ダム建設技術の確立にともない，これまでに「設計の合理化」から「施工の合理化」へと経済性の追求が進められてきた。さらに今日では新たに「材料の合理化」が進められ，なかでも骨材の有効利用は一層の経済性の向上はもちろん，環境保全の観点からも重要な課題になっている。

材料の合理化で最も重要な課題は，使用量が多く，製造に多額の費用を要する骨材の有効利用であり，原石山ならびにダムサイト近傍で採取される材料を極力有効に利用することである。近年，原石山から採取される骨材は，低品質化に伴い歩留まりが低下している。低品質骨材の利用を図ることは資源面，環境面，さらには経済面からも重要な課題であり，すでに 1994 ～ 1996 年に検討し，骨材の強度試験方法の提案と，骨材強度とコンクリート強度の関係などについて報告した[1~6]。

低品質骨材の有効利用を妨げている主な理由に，コンクリート品質の低下と，骨材製造時に大量のスラッジが発生するという問題がある。前者の問題については上記のとおりすでに研究を行い，技術的な目途をつけた。後者については，石粉を使った基礎的な研究を 1997 ～ 1999 年に行ない，コンクリートの品質を評価するに当って必要な石粉の品質評価試験，石粉を混入する場合の配合設計法の提案および石粉を混入することよりコンクリート品質の改善が明らかになった[7]。

今回は，これまでの研究を発展させ，ダム建設現場で実際に発生しているスラッジを用いて，その有効利用について検討したものである。

ダム建設工事の現場によっては，骨材製造プラント用濁水処理設備において，全骨材の供給量に対しておよそ 15 %の砕石スラッジが発生しているものもある。さらにダムサイト用濁水処理設備においても，打設面の打ち継ぎ処理(グリーンカット)にともなうコンクリートスラッジや，基礎掘削などに伴うスラッジがコンクリート打設量に対して２%程度発生している。スラッジ発生量の比率は，コンクリートスラッジに対して砕石スラッジは約 16 倍である。これらのスラッジは，産業廃棄物として取り扱われ，多額の費用と手間をかけて処分されているのが実状である。

このように大量に発生するスラッジを，ダムコンクリート用材料として有効利用し，そしてできることであれば石粉の場合のようにコンクリート品質の改善が図れるか否か検討した。

検討対象としたコンクリートは，大量のスラッジをできる限り有効利用できるように，打設量が多く比較的要求性能の低い内部用コンクリートを中心に，高い耐久性も要求される外部用コンクリートなども含めた。具体的には，内部用にはＲＣＤおよびＥＬＣＭ用コンクリート，鉄筋が入っている部位などに最近使用されるようになってきた高流動コンクリート，そして外部用コンクリートを検討対象とした。

最終目標は，スラッジの品質評価試験の提案，スラッジを混入した各種コンクリートの配合設計方法の確立であり，そのためにスラッジのさまざまな品質試験，スラッジを混入したモルタル，コンクリートのワーカビリティー，強度特性，耐久性試験などを実施した。

本報告書は，第一弾としてこれらの実験結果を報告した。

目　　次

まえがき

1．　実験の目的と概要 …… 1

1．1　実験目的 …… 1

1．2　実験概要 …… 2

1．2．1　使用材料 …… 2

1．2．2　対象コンクリート …… 2

1．2．3　試験方法 …… 2

1．2．4　試料採取ダムの概要 …… 3

2．　材料試験 …… 4

2．1　粉体試験 …… 4

2．1．1　試験項目と試験方法 …… 4

2．1．2　試験結果 …… 5

2．2　骨材試験 …… 16

2．2．1　試験項目と試験方法 …… 16

2．2．2　細骨材，粗骨材の一般物理試験結果 …… 17

2．2．3　細粗混合骨材の空隙特性試験結果 …… 19

2．2．4　粗骨材の強度試験結果 …… 27

3．　配合試験 …… 48

3．1　コンクリートの種類 …… 48

3．2　配合試験による基本配合の決定 …… 48

3．3　微粒分率の定義 …… 50

4．　モルタル試験 …… 51

4．1　練混ぜ時間の設定 …… 51

4．2　モルタル試験 …… 56

4．2．1　モルタル配合 …… 56

4．2．2　試験項目と試験方法 …… 56

4．2．3　モルタル試験結果 …… 58

5．　コンクリート試験 …… 80

5．1　コンクリート配合 …… 80

5．2　試験項目と試験方法 …… 80

5．3　コンシステンシー，空気量測定試験結果 …… 83

5．4　配合とコンシステンシー …… 90

5．5　強度試験結果 …… 92

5．6　外部コンクリートの耐久性試験結果 …… 101

６．　まとめ …… 107
６．１　スラッジ，スラッジ混入モルタルおよびコンクリートの品質 …… 107
６．１．１　使用したスラッジの品質評価 …… 107
６．１．２　スラッジ混入モルタルの品質 …… 107
６．１．３　スラッジ混入コンクリートの品質 …… 108
６．２　品質評価 …… 108
６．３　今後の検討課題 …… 109
参考文献 …… 110

1章　実験の目的と概要

1．1　実験目的

本課題の目的は，

(1) スラッジの品質評価方法の確立

(2) スラッジを混入したコンクリートの配合設計方法の確立

である。

そのために，本報告書では以下のことを明らかにすることを目的に実験を行なった。

1)　スラッジの品質評価試験

スラッジの各種品質試験を行ない，それらの品質とコンクリートの品質(主にフレッシュ時の施工性と硬化後の圧縮強度)の関係を求め，スラッジの品質評価に必要な試験を明らかにする。

2)　モルタルによる練混ぜ条件の検討と，品質試験

スラッジを脱水ケーキの塊状のままでコンクリートに投入することを考えているため，均質なコンクリートを得るためには塊状のスラッジが壊れるまで練混ぜる必要がある。そのため，練混ぜ時間を変化させたときの粒度変化を調べ，練混ぜ時間を決めることとした。

また，スラッジを混入したときの品質をモルタルで評価できれば，コンクリートで実施するよりも省力化を図ることができることから，モルタルのフロー試験，空気量試験，凝結試験，圧縮強度試験を行なうこととした。

3)　単位水量，単位結合材量一定で，スラッジの混入率を変化させたコンクリートの品質試験

石粉などの微粒分をコンクリートに混入することでフレッシュ時には最適な微粒分率が存在した[7]ように，スラッジをコンクリートに混入したときも最適な微粒分率が存在するかどうかを確認するため，単位水量，単位結合材量は一定にしておき，スラッジの混入率を変化させたときのコンシステンシー試験を行なう。また経時変化も測定することにより，スラッジ混入率がコンシステンシーに及ぼす影響を調査する。

硬化後は，結合材水比一定のもとで，スラッジ混入率と圧縮強度の関係，外部コンクリートについては凍結融解抵抗性，長さ変化，中性化深さに及ぼす影響も調査する。

また，これらの結果とモルタル試験の関連する結果について関係を求め，モルタルによる品質評価が可能かどうかを検討する。

4)　配合設計方法の検討　骨材空隙充填に必要なモルタル量，ペースト量とコンシステンシーの関係

コンクリートの配合を考える上で重要なことは，フレッシュ時の施工性を確保することと，硬化後の圧縮強度，耐久性を確保することである。強度と耐久性は，単位結合材量と結合材水比によって決まる。

スラッジを混入したコンクリートの施工性を確保するための配合理論として，粗骨材量とモルタル量，または骨材(細粗混合骨材)とペースト量の二相系を考え、必要なモルタル量またはペースト量は，骨材の空隙を充填する量と，骨材の表面を付着する厚さで決まるものと考え，配合設計方法について検討する。

5)　骨材強度とコンクリート強度の関係

以上のスラッジに関する実験に加え，以前実施した骨材強度の評価方法による評価結果とコンクリート強度の関係についても調査する。

１．２　実験概要

１．２．１　使用材料

材料のスラッジ２種類と細骨材（以下略記「Ｓ」），粗骨材２種（粒度 40 ～ 20mm，20 ～ 5mm，「Ｇ」）はコンクリートダム建設現場から採取したものを使用，中庸熱ポルトランドセメント(「Ｃ」)，フライアッシュ(「Ｆ」)，混和剤はダム建設現場で使用しているものと同一品を使用した。

ここでいう２種類のスラッジとは，ダム建設現場の骨材製造プラント用濁水処理設備において含水率 30 %程度まで脱水処理された脱水ケーキ(以下「スラッジａ，Sa」)と，ダムサイト用濁水処理設備から採取した脱水ケーキ(以下「スラッジｂ，Sb」)をいう。

１．２．２　対象コンクリート

検討対象としたコンクリートは，以下の４種類である。

①　ＲＣＤ工法※1用コンクリート

②　拡張レヤー工法（ＥＬＣＭ※2）用コンクリート

③　外部用コンクリート

④　高流動コンクリート

①～④はスラッジ有効利用の目的から，ダム建設現場で大量に発生するスラッジを現場内でできるだけ多く利用できるようにすることを考え，使用部位にあわせたコンクリート配合それぞれについてスラッジ混入の適用性を検討するためである。

コンクリートはセメント，水，細骨材，粗骨材および必要に応じて加える混和材料を構成材料としている。今回はコンクリート配合の参考とした現場配合に用いられているフライアッシュと，本報告書で対象としているスラッジが加わることになる。

※1：Roller Compacted Dam-concrete Method

※2：Extended Layer Construction Method

１．２．３　試験方法

材料のスラッジや骨材の品質試験，ならびにスラッジを混入したモルタル，コンクリートに関する試験項目と試験方法は次の各章に記述した。

２章　材料試験

４章　モルタル試験

５章　コンクリート試験

１．２．４　試料採取ダムの概要

スラッジ，細骨材を採取したUダムの諸元，濁水処理の方法と脱水ケーキの処分方法の概要について補足する。

(1)　Uダムの諸元

形　式：　重力式コンクリートダム　　堤　高　：　120.0 m

堤頂長：　350.0 m　　堤頂幅　：　7.5 m

堤体積：　720,000m^3

(2)　Uダムにおける濁水処理の方法と処分方法

Uダムにおいては，堤体上流側に設置された骨材製造プラント用濁水処理設備と堤体下流側に設置されたダムサイト用濁水処理設備の２系統で個別に濁水を処理している。本報告書で対象としているスラッジは，２つの濁水処理設備において脱水機（フィールタープレス）により含水率 30 %程度まで脱水，排出された脱水ケーキを各々採取したものである。

骨材製造プラント用濁水処理設備では，骨材に付着する微粒分や泥分を取り除くために用いた洗い水の処理を行い，ダムサイト用濁水処理設備では，次のような発生源の濁水を処理している。

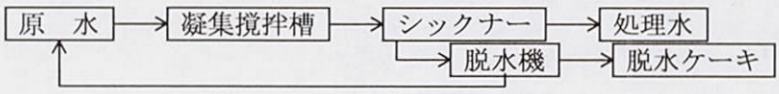
A．バッチャープラントからの排水

B．グラウト工事及びコンクリート工事における清掃，グリーンカット，レイタンス処理等による排水

C．湧水や堤敷内の降雨水　など

濁水処理設備から排出されるスラッジの量は，骨材製造プラント用 334,620 m^3，ダムサイト用 20,736 m^3（いずれも当初計画値）であり，骨材製造プラントから発生するケーキが圧倒的に多い。骨材製造プラントにおいては，「骨材 1,000kg を製造するのに脱水ケーキがおよそ 200kg（投入原石量の 16.7 %に相当）発生している。」（ダム工事関係者談）。ダム建設において骨材製造に伴うスラッジの発生量は，各現場の条件にもよるが一般的には投入原石量の 15 %程度[8)]が見込まれており，ダムの堤体規模により数万～数十万m^3におよぶ場合がある。

濁水処理方式には機械処理脱水方式（**図－1.2.1**）が採用されており，処理水のｐｈ調整用中和材として液化二酸化炭素（液化炭酸ガス，CO_2），水処理用凝集剤としてポリ塩化アルミニウム（ＰＡＣ，無機高分子凝集剤で一般式としては，$[Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$(ただし，$1 \leqq n \leqq 5$, $m \leqq 10$)で表される），高分子凝集剤としてアニオン性凝集剤を添加している。濁水中に含まれる微細粒子は沈降分離槽の底に凝集沈澱し，高濃度の懸濁液となる。この高濃度の懸濁液はスラッジと呼ばれ，泥水ポンプなどで沈降分離槽の底から引き抜かれ，加圧脱水機で脱水され脱水ケーキとして排出されている。脱水ケーキの含水率はおよそ 30 %程度であり，「廃棄物の処理および清掃に関する法律」の適用を受け，産業廃棄物に該当することから産業廃棄物の処理許可を得て，ダム湛水地内において良質材料と互層にして締固め，埋立処分されている。



図－1.2.1　機械処理脱水方式

2章　材料試験

この章は大別して２つの試験内容で構成している。一つはスラッジ，セメント，フライアッシュの粉体を対象とした試験，もう一つは細骨材，粗骨材を対象とした試験である。

２．１　粉体試験

スラッジａ，スラッジｂ，セメント，フライアッシュを粉体試験の対象として，組成分析，密度，粒度分布，かさ密度，比表面積，粒子形状，メチレンブルー吸着量，ゼータ電位，砂当量試験をそれぞれ実施した。

２．１．１　試験項目と試験方法

(1)　組成分析

スラッジａ，スラッジｂを対象とし，JIS M 8853「セラミックス用アルミノけい酸塩質原料の化学分析方法」に準拠し組成成分を求めた。

また，濁水処理時には微粒分の凝集・沈降を促進するために凝集剤を使用しているので，凝集剤の残留分を把握するために粗骨材の組成分析を行いスラッジとの比較を試みた。

セメント，フライアッシュについては製造メーカー実施による組成分析結果を入手した。

(2)　密　　度

密度試験はJIS R 5201「セメントの物理試験方法」中に規定されている密度試験に準拠した。

(3)　粒度分布

粒度分析はレーザー回折「堀場製作所製　レーザー回折散乱式粒度分布 LA-920（測定レンジ 0.02 ～ 2,000 μm)」を用いて測定した。

(4)　かさ密度

かさ密度の測定には「ホソカワミクロン製　パウダーテスター」を用いた。

試験は 45 メッシュ（710 μm）のふるいを通過した粉体を 100ml の容器に充填した後，その見かけの単位容積質量を測定することによってかさ密度を求めた。この時，タッピング（約 15mm の落下運動）を実施しない「ゆるめのかさ密度」と，タッピングを 180 回実施した「かためのかさ密度」を測定した。さらに，ゆるめのかさ密度とかためのかさ密度から次式により圧縮度，実積率，間隙比を求めた。

(圧縮度)＝｛(かためのかさ密度)－(ゆるめのかさ密度)｝／(かためのかさ密度)

(実積率)＝(かさ密度)／(密度)× 100(%)

(間隙比)＝(100 －実積率)／(実積率)

(5)　比表面積

比表面積は空気透過法およびＢＥＴ法によって測定した。

空気透過法はJIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠した。

ＢＥＴ法は１点式直読表面積測定法であり，「micromeritics 社製 FlowSorb II 2300」を用いた。

(6) 粒子形状

粒子形状は顕微鏡写真によって確認した。顕微鏡写真撮影には「日立製作所製 電界放射形操作形電子顕微鏡 S-4100」を用いた。

(7) ゼータ電位

ゼータ電位の測定はレーザー回転プリズム方式コロイド粒子ゼータ電位測定装置（PEN KEM 社製の LASER ZEE™ Model501）を用いた。

試料の調整法は試料 0.5 g に対し，飽和水酸化カルシウム 50ml を加えて 10 分間撹拌させた液を試験試料とする。測定条件は試験試料を装置のセルに投入し，その 20 分後（飽和水酸化カルシウム溶液と撹拌させてから 30 分後）にゼータ電位測定を行った。

(8) メチレンブルー吸着量

メチレンブルー吸着量の測定は，セメント協会標準方法（JCAS）I-61-1995「フライアッシュのメチレンブルー吸着量試験方法」に準拠した。

(9) 砂 当 量

砂当量は JIS A 1801「コンクリート用細骨材の砂当量試験方法」に準拠した。

2．1．2 試験結果

スラッジａ，ｂならびに粗骨材，さらにセメントとフライアッシュの組成成分の分析結果を**表－2.1.1**に示す。粉体の密度などの試験結果は**表－2.1.2**のとおりであった。

(1) 組成分析

スラッジａは，元々が骨材原石を破砕したとき発生する微粒分ということもあり，組成成分の構成割合は骨材と非常に似通っていて，砂岩の造岩鉱物の中で最も安定な鉱物の石英が多い。酸性酸化物である二酸化けい素（SiO_2）と中性酸化物である酸化アルミニウム（Al_2O_3）の 2 つの成分が多く，それぞれ全体の約 70 %，78 %を占めている。

スラッジｂについては，スラッジａや骨材成分と比べアルカリ土類金属酸化物である酸化カルシウム（CaO）の割合が多く，SiO_2とAl_2O_3の 3 成分で全体約 72 %を占めている。CaOの割合が多いのは，バッチャープラントからの排水，グラウト工事及びコンクリート工事における清掃，グリーンカット，レイタンス処理等による排水を処理した後のスラッジであるため，セメントの主成分であるCaO成分が混入しているからだと考えられる。強熱減量率（ig.loss）が多いのは，堤体周りの湧水や堤敷内の雨水などとともに木片や腐葉土のような不純物が混入したものと考えられる。

またスラッジａ，ｂともに骨材成分と比べてAl_2O_3がやや多いのは，凝集剤として用いられたポリ塩化アルミニウム（ＰＡＣ）の成分であるAl_2O_3が付着して残留していることが要因として考えられる。さらに，

濁水処理設備において含水率およそ 30 %程度まで脱水されて排出されたスラッジは比較的粘土に近い状態であることから，均質なコンクリートを得るためには粘着性が懸念される。なお乾燥させたスラッジの色については，スラッジａはやや黒色系で骨材の色に近く，スラッジｂはセメントやフライアッシュに近い灰色系である。

セメントの成分はJIS R 5210「ポルトランドセメント」（中庸熱ポルトランドセメント），フライアッシュの成分はJIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」の品質規格を満たしている。

表－2.1.1　粉体の組成分析結果

種別	組成分析 (wt%)													
	湿分 (%)	強熱減量 ig.loss (%)	二酸化けい素 SiO_2 (%)	酸化アルミニウム Al_2O_3 (%)	酸化第二鉄 Fe_2O_3 (%)	酸化カルシウム CaO (%)	酸化マグネシウム MgO (%)	三酸化硫黄 SO_3 (%)	酸化ナトリウム Na_2O (%)	酸化カリウム K_2O (%)	二酸化チタン TiO_2 (%)	五酸化りん P_2O_5 (%)	一酸化マンガン MnO (%)	※1 (%)
Sa	(0.75)	8.3	51.5	18.9	6.9	2.5	2.4	1.5	1.6	5.0	0.96	0.22	0.14	4.88
Sb	(1.47)	15.1	40.8	15.5	5.2	15.9	2.0	0.60	0.98	2.3	0.65	0.21	0.17	2.52
G	—	4.7	64.0	13.9	3.9	2.6	1.5	0.36	3.4	2.1	0.50	0.13	0.06	4.73

※1:アルカリ評価指数　$Na_2Oeq = Na_2O + 0.658 * K_2O$

種別	組成分析								主要化合物組成		
	湿分 (%)	強熱減量 ig.loss (%)	二酸化けい素 SiO_2 (%)	酸化アルミニウム Al_2O_3 (%)	酸化第二鉄 Fe_2O_3 (%)	酸化カルシウム CaO (%)	酸化マグネシウム MgO (%)	三酸化硫黄 SO_3 (%)	エーライト C_3S (%)	ビーライト C_2S (%)	アルミネート C_3A (%)
C	—	—	23.3	4.2	4.1	63.9	—	2.2	43	35	4
F	(0.12)	0.02	55.1	26.5	3.9	6.8	1.7	0.26	—	—	—

表-2.1.2 **粉体の品質**

	コンクリートの種類	粉体の種類	記号	密度 g/cm³	かさ密度（かため） g/cm³	実積率（かため） %	平均粒径 μm	比表面積（ブレーン法） cm²/g	メチレンブルー吸着量 mg/g	ゼータ電位 mV
今回	RCD ELCM 外部高流動	スラッジ	Sa	2.70	1.275	47.2	9.1	9050	9.68	11
			Sb	2.53	0.912	36.1	5.9	13750	8.94	3
		セメント	C	3.21	1.757	54.7	10.7	3210	—	14
		フライアッシュ	FA	2.10	1.838	65.9	12.5	2950	0.07	9
石粉実験（文献7）	RCD	石粉	YCM	2.70	1.589	58.8	11.9	4300	2.89	64
		セメント	C(M1)	3.21	1.699	52.9	10.2	3580	—	74
		セメント	C(N)	3.16	1.673	53.0	11.7	3490	—	72
		フライアッシュ	FA(F1)	2.36	1.461	61.9	9.7	3680	0.38	63
	RCD	石粉	KsB1	2.66	1.427	53.4	27.1	3460	2.23	53
			KsC1	2.67	1.493	55.9	29.1	3540	2.35	52
	外部高流動		KsB2	2.65	1.665	62.8	44.0	2270	0.99	60
			KsC2	2.65	1.604	60.5	56.0	1450	1.01	56
		セメント	C(M2)	3.20	1.481	46.3	13.4	3490	—	67
		フライアッシュ	FA(F2)	2.05	1.113	50.1	23.1	2920	0.22	57

(2)　密　　度

スラッジａの密度は細骨材密度や粗骨材密度（細骨材 2.65 g/cm³，粗骨材 2.68 g/cm³「**２．２　骨材試験**」にて実施。）に近い数値を示すが，スラッジｂの密度はそれよりもやや小さい。

(3)　粒度分布

粉体の粒度分布測定結果を**表－2.1.3**，**図－2.1.1**に，**表－2.1.4**には通過積算径およびレーザー回折による粒度分布から求めた比表面積をあわせて示す。

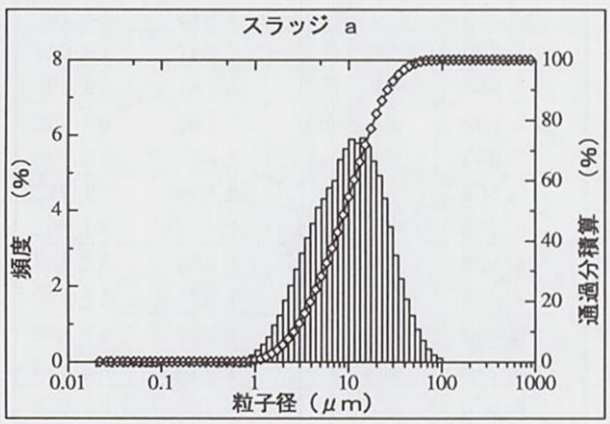
粉体の粒径は概ね 0.6 μmから 100 μmの間にある。50 %平均粒度は，スラッジａはセメント，フライアッシュとほぼ同じ 10 μmであるが，スラッジｂは 5.9 μmとやや小さい。

表－2.1.3　粉体の粒度分布測定結果

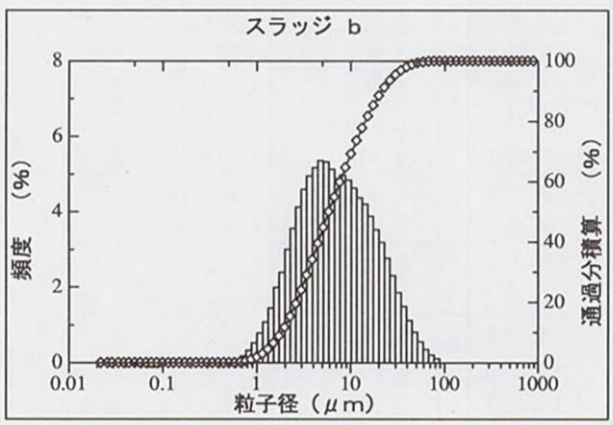
粒子径 (μm)	Sa		Sb		C		F	
	頻度 (%)	積算 (%)	頻度 (%)	積算 (%)	頻度 (%)	積算 (%)	頻度 (%)	積算 (%)
0.584	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.669	0.000	0.000	0.176	0.176	0.160	0.160	0.000	0.000
0.766	0.000	0.000	0.317	0.493	0.285	0.445	0.000	0.000
0.877	0.177	0.177	0.512	1.005	0.444	0.889	0.158	0.158
1.005	0.298	0.475	0.782	1.787	0.646	1.535	0.270	0.428
1.151	0.452	0.927	1.077	2.864	0.834	2.369	0.407	0.835
1.318	0.656	1.583	1.445	4.309	1.040	3.409	0.585	1.420
1.510	0.980	2.563	1.997	6.306	1.335	4.744	0.865	2.285
1.729	1.230	3.793	2.391	8.697	1.481	6.225	1.056	3.341
1.981	1.630	5.423	3.008	11.705	1.735	7.960	1.370	4.711
2.269	2.017	7.440	3.561	15.266	1.949	9.909	1.658	6.369
2.599	2.448	9.888	4.122	19.388	2.168	12.077	1.975	8.344
2.976	2.877	12.765	4.598	23.986	2.372	14.449	2.283	10.627
3.409	3.284	16.049	4.950	28.936	2.564	17.013	2.573	13.200
3.905	3.667	19.716	5.172	34.108	2.760	19.773	2.847	16.047
4.472	4.081	23.797	5.361	39.469	3.004	22.777	3.151	19.198
5.122	4.312	28.109	5.329	44.798	2.892	25.669	3.294	22.492
5.867	4.609	32.718	5.134	49.932	3.392	29.061	3.532	26.024
6.720	4.806	37.524	4.877	54.809	3.557	32.618	3.689	29.713
7.697	5.361	42.885	4.975	59.784	4.235	36.853	4.119	33.832
8.816	5.644	48.529	4.843	64.627	4.923	41.776	4.355	38.187
10.097	5.901	54.430	4.628	69.255	5.605	47.381	4.571	42.758
11.565	5.798	60.228	4.370	73.625	6.042	53.423	4.607	47.365
13.246	5.937	66.165	4.202	77.827	6.770	60.193	4.789	52.154
15.172	5.703	71.868	3.882	81.709	6.970	67.163	4.765	56.919
17.377	5.316	77.184	3.526	85.235	6.773	73.936	4.676	61.595
19.904	4.936	82.120	3.194	88.429	6.638	80.574	4.553	66.148
22.797	4.330	86.450	2.774	91.203	6.018	86.592	4.249	70.397
26.111	3.582	90.032	2.309	93.512	4.931	91.523	3.829	74.226
29.907	2.830	92.862	1.862	95.374	3.602	95.125	3.413	77.639
34.255	2.205	95.067	1.483	96.857	2.361	97.486	3.124	80.763
39.234	1.664	96.731	1.123	97.980	1.345	98.831	2.876	83.639
44.938	1.231	97.962	0.809	98.789	0.694	99.525	2.738	86.377
51.471	0.864	98.826	0.550	99.339	0.330	99.855	2.661	89.038
58.953	0.558	99.384	0.348	99.687	0.145	100.000	2.560	91.598
67.523	0.330	99.714	0.203	99.890	0.000	100.000	2.330	93.928
77.339	0.185	99.899	0.110	100.000	0.000	100.000	1.964	95.892
88.583	0.101	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	1.508	97.400
101.460	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	1.067	98.467
116.210	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.708	99.175
133.103	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.435	99.610
152.453	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.249	99.859
174.616	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.141	100.000
200.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000

表－2.1.4　粉体の粒度分布積算径および比表面積

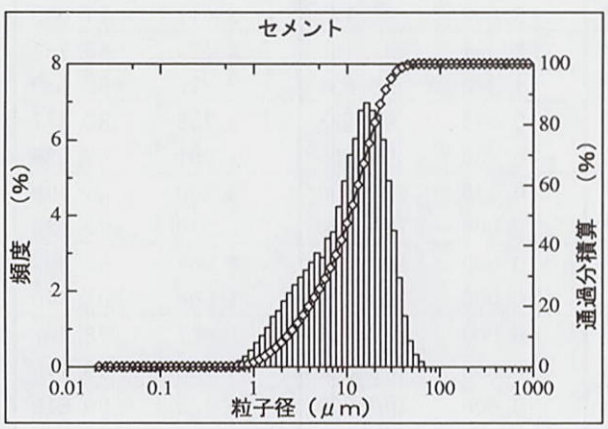
通過積算径	Sa （μm）	Sb （μm）	C （μm）	F （μm）
5%	1.91	1.38	1.55	2.03
10%	2.61	1.83	2.28	2.87
20%	3.94	2.65	3.95	4.62
30%	5.42	3.51	6.08	6.78
40%	7.16	4.53	8.39	9.30
50%	9.12	5.88	10.71	12.46
60%	11.50	7.74	13.20	16.59
70%	14.51	10.34	16.06	22.51
80%	18.78	14.29	19.67	33.14
90%	26.08	21.49	25.04	54.16
95%	34.11	29.10	29.77	72.72
レーザー回折による粒度分布から求めた比表面積　（cm^2/g）	3,786	5,828	3,354	4,062



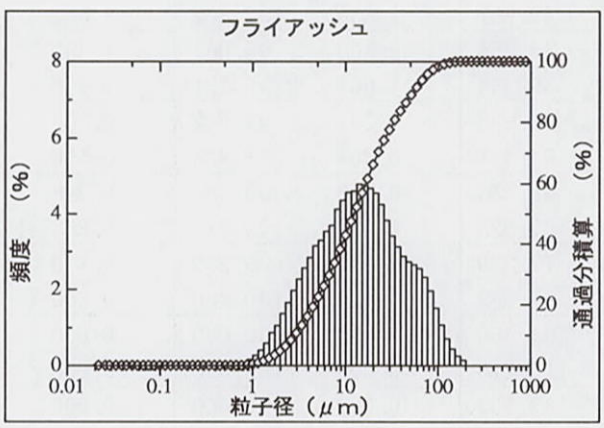
(a) スラッジa



(b) スラッジb



(c) セメント



(d) フライアッシュ

図－2.1.1　粉体の粒度分布

(4) かさ密度，実積率

かさ密度の測定結果と実積率，間隙比の算定結果を**表－2.1.5**，密度とかさ密度から算定した実積率の比較を**図－2.1.2**に示す。

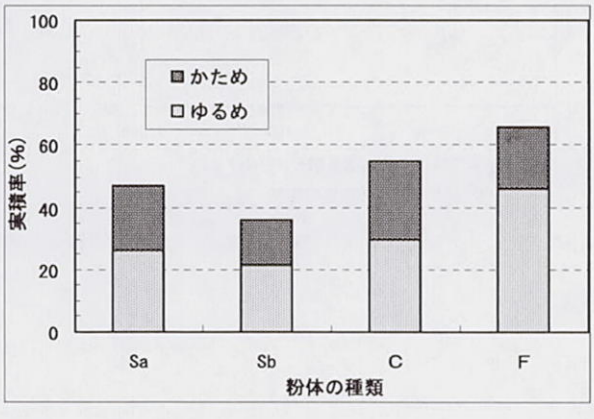
フライアッシュはゆるめの実積率，かための実積率ともに粉体の中では最も大きく，ゆるめとかためのかさ密度より算定した圧縮度が小さいことからも充填性能が優っているといえる。これは粒子形状が丸みを帯びており（**(6) 粒子形状**），充填性における粒子形状の良さと関連している。

一方スラッジａ，スラッジｂ，セメントはいずれも粒子形状が角張っており，平均粒径が小さく、実積率も小さい（**図－2.1.3**）。圧縮度が大きいことから，締固めの程度による密度の変化が大きく，フライアッシュに比べ充填性が劣ると考えられる。

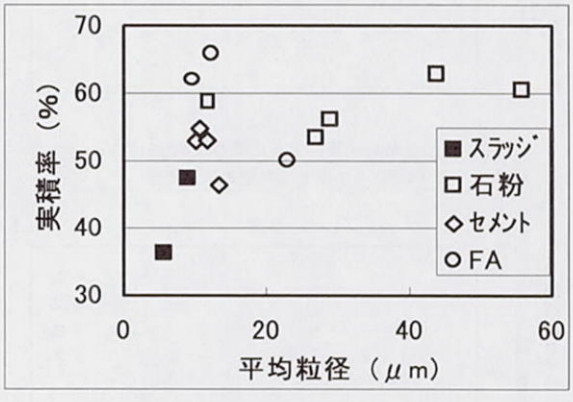
表－2.1.5　粉体のかさ密度，実積率測定結果

		Sa	Sb	C	F
ゆるめのかさ密度 (g/cm^3)	1	0.714	0.538	0.964	0.968
	2	0.714	0.538	0.964	0.972
	3	0.713	0.537	0.962	0.971
	平均	0.714	0.538	0.963	0.970
かためのかさ密度 (g/cm^3)	1	1.275	0.912	1.761	1.384
	2	1.275	0.913	1.760	1.383
	3	1.276	0.912	1.750	1.382
	平均	1.275	0.912	1.757	1.383
圧縮度(%)*		44.0	41.1	45.2	29.8
実積率(%)	ゆるめ	26.4	21.3	30.0	46.2
	かため	47.2	36.1	54.7	65.9
間隙比	ゆるめ	2.783	3.706	2.332	1.164
	かため	1.117	1.773	0.827	0.518

＊ 圧縮度＝（(かため)－(ゆるめ)）／(かため)



図－2.1.2　粉体の実積率



図－2.1.3　平均粒径と実積率の関係

(5) 比表面積

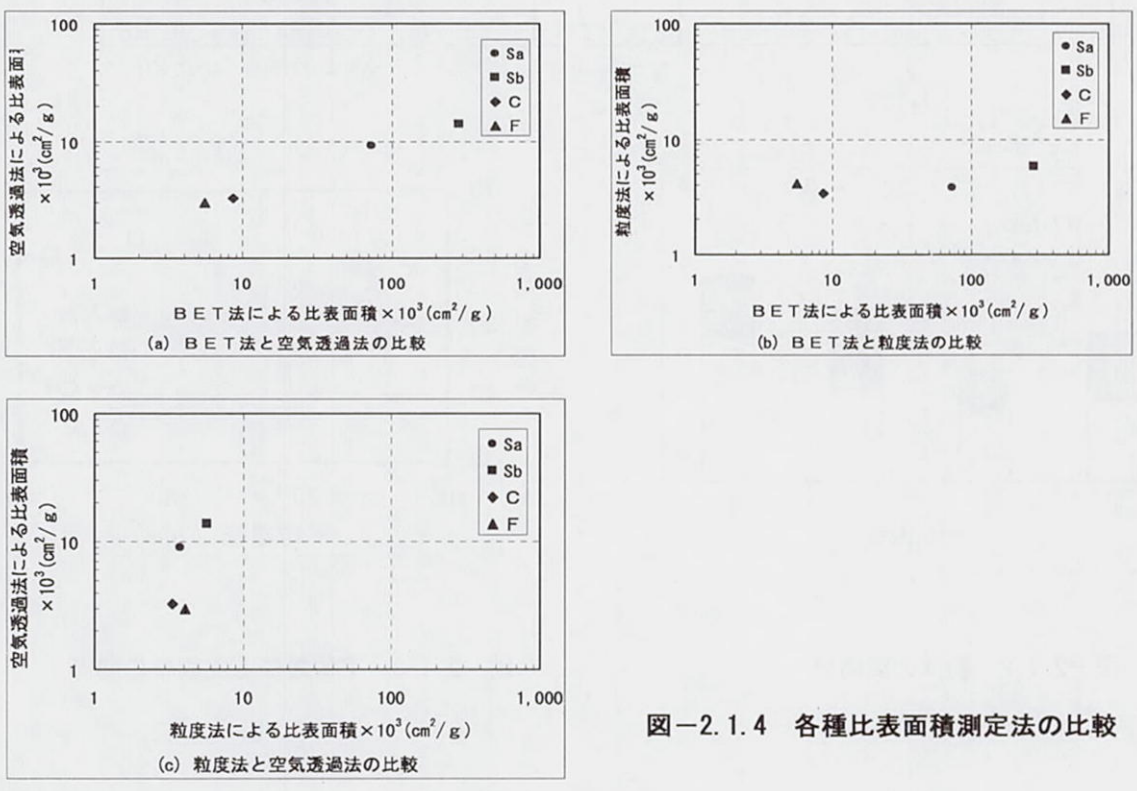
空気透過法，ＢＥＴ法，さらに粒度分布より求めた（以下「粒度法」）比表面積の測定結果を**表－2.1.6**に示す。空気透過法によるスラッジの比表面積は，スラッジａ＝ 9,050cm²/ｇ，スラッジｂ＝ 13,750cm²/ｇであり，セメントやフライアッシュのそれと比べてかなり大きい。

表－2.1.6　粉体の比表面積測定結果

		Sa	Sb	C	F
空気透過法×10³(cm²/ｇ)		9.05	13.75	3.21	2.95
ＢＥＴ法 ×10³(cm²/ｇ)	1	71.5	296.0	8.50	5.20
	2	76.8	290.4	8.40	5.50
	3	72.5	283.8	8.70	5.70
	平均	73.6	290.1	8.53	5.47
粒度法×10³(cm²/ｇ)		3.79	5.83	3.35	4.06

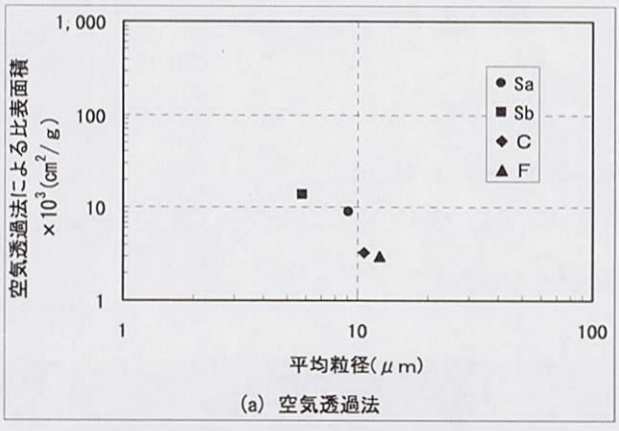
３つの測定法による比表面積の比較を**図－2.1.4**に示す。

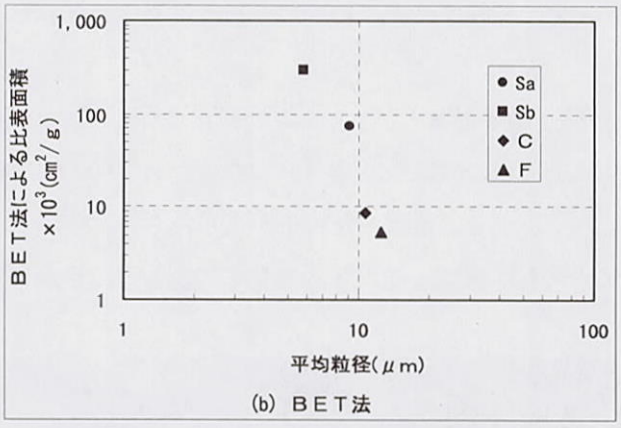
(a)図はＢＥＴ法と空気透過法の比較である。空気透過法はＢＥＴ法より 1 桁小さい値になっているものの，両者はよい相関関係（相関係数ｒ = 0.943）にあることがわかる。(b)図のＢＥＴ法と粒度法の関係も同様の関係（ｒ = 0.942）がある。(c)図には粒度法と空気透過法の関係を示す。両方法ともＢＥＴ法と相関関係があったので，両方法の間にも相関関係があってもよさそうであるがその関係はやや低い（ｒ = 0.821）。

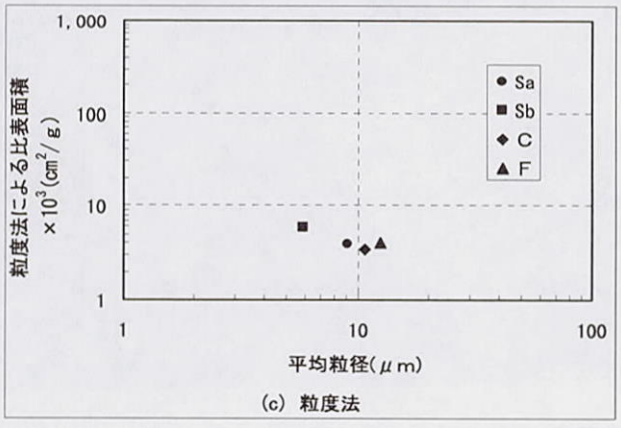


図－2.1.4　各種比表面積測定法の比較

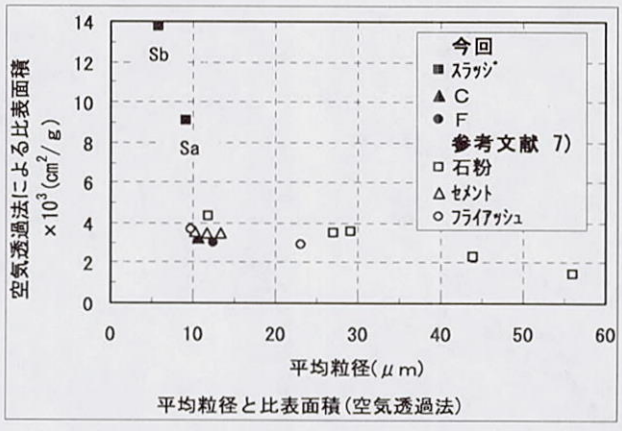
図－2.1.5には各粉体の平均粒径と比表面積の関係を示す。いずれの測定方法においても平均粒径が小さくなるほど比表面積は大きくなっている（右下がりの関係）。







図－2.1.5　粉体の平均粒径と比表面積測定法の関係



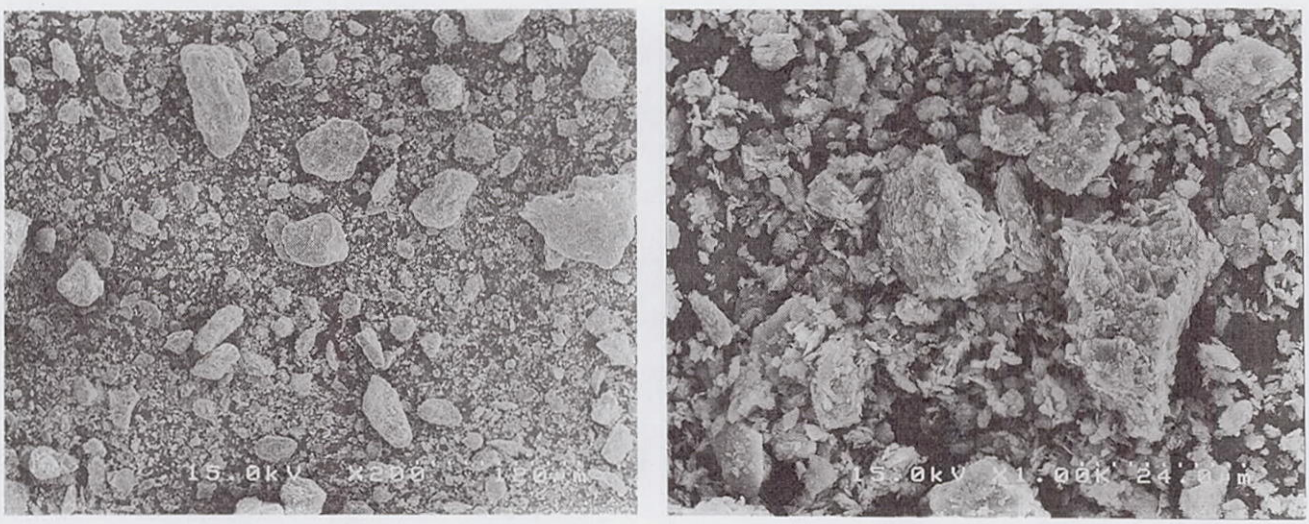
図－2.1.6　各種粉体の平均粒径と比表面積の関係

図－2.1.6には今回のスラッジに関して行った平均粒径，比表面積の測定結果と，石粉の品質評価試験（**参考文献 7)**）のときに行った粉体（石粉，セメント，フライアッシュ）の平均粒径，比表面積の測定結果の比較を示す。スラッジは石粉よりも平均粒径が小さく，比表面積では約3倍近い値を示しており，コンシステンシーや強度発現において石粉とは異なる性状を示すことが考えられる。

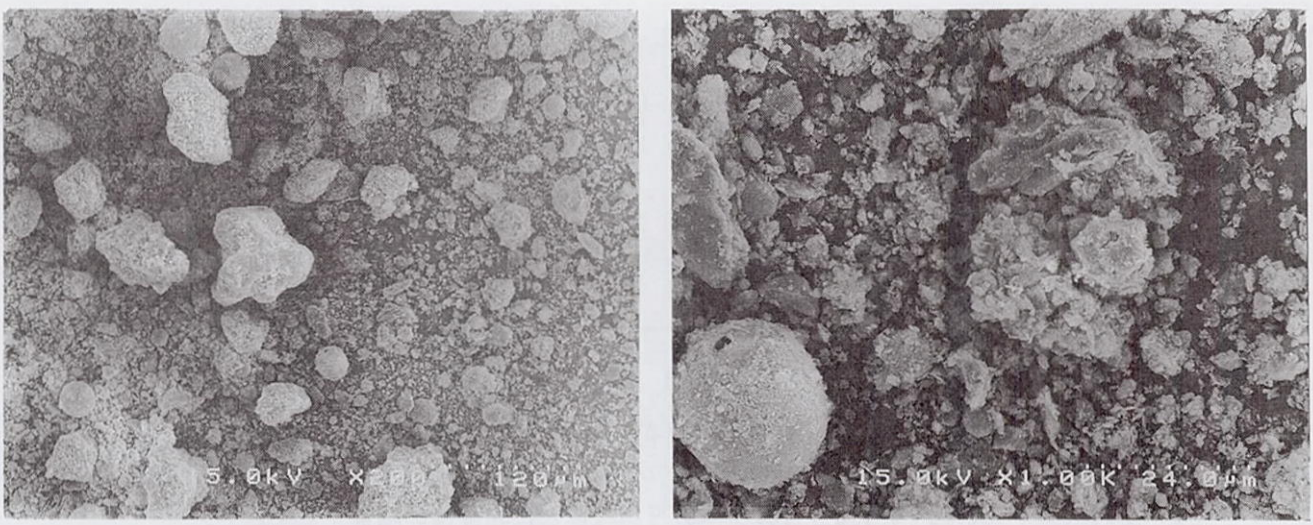
(6) 粒子形状

粒子形状の顕微鏡写真（× 200倍，× 1,000倍）を**写真－2.1.1～2.1.4**に示す。

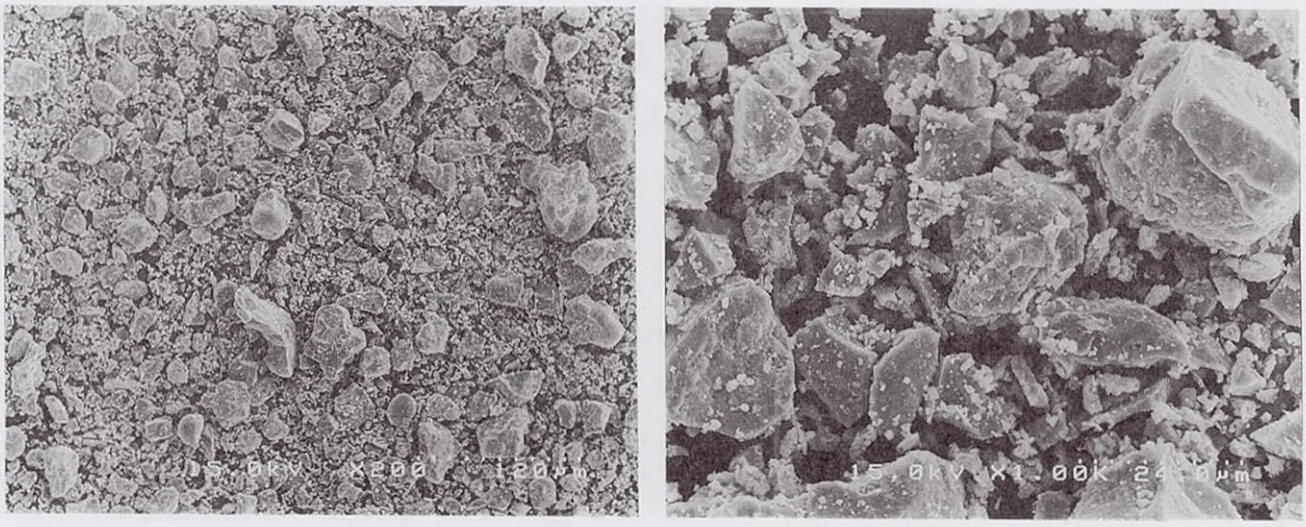
スラッジａは角ばった粒子が大小みられ，スラッジｂは角ばった粒子同士がくっついているようにみえる。セメントは角ばっており，フライアッシュはきれいな球状をしている。



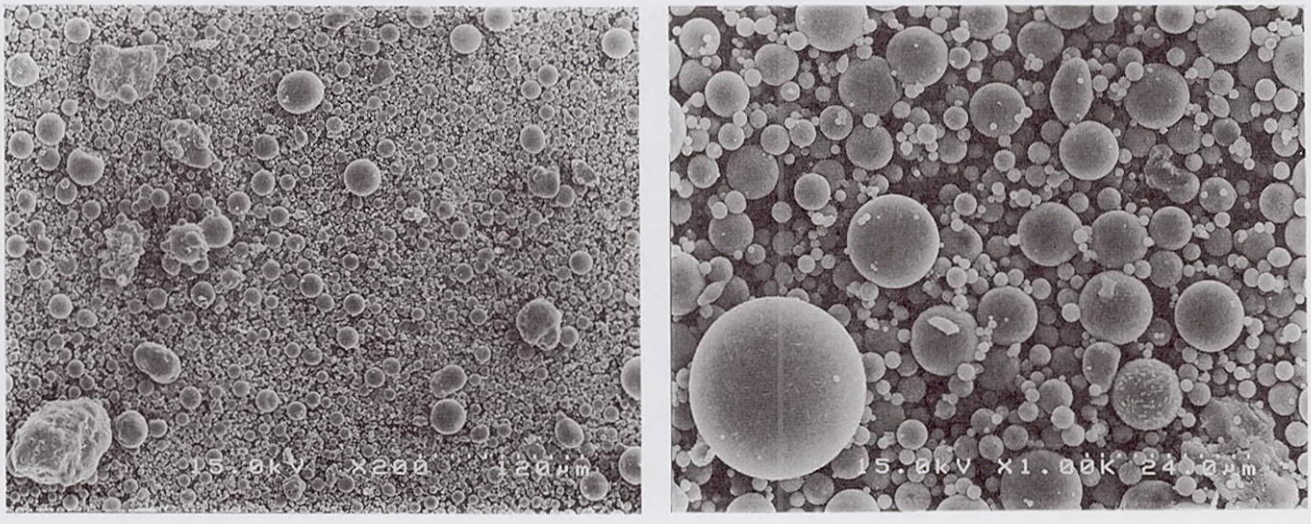
写真－2.1.1　スラッジａの顕微鏡写真（左200倍，右1,000倍）



写真－2.1.2　スラッジｂの顕微鏡写真（左200倍，右1,000倍）



写真－2.1.3　セメントの顕微鏡写真（左200倍，右1,000倍）



写真－2.1.4　フライアッシュの顕微鏡写真（左200倍，右1,000倍）

(7)　ゼータ電位

ゼータ電位の測定結果を**表－2.1.7**に示す。飽和水酸化カルシウム溶液中におけるスラッジａの静電的反発力による分散性は，セメントとフライアッシュの中間であるといえる。また，スラッジｂは 3mV とやや小さな値であることから，分散性はスラッジａに比べ小さいと考えられれる。

表－2.1.7　ゼータ電位測定結果

		Sa	Sb	C	F
ゼータ電位(mV)	1	10.9	3.9	13.3	8.3
	2	12.0	3.0	13.9	9.4
	平均	11	3	14	9

注）平均値の小数点以下は誤差を考慮して切り捨てとした。

(8) メチレンブルー吸着量

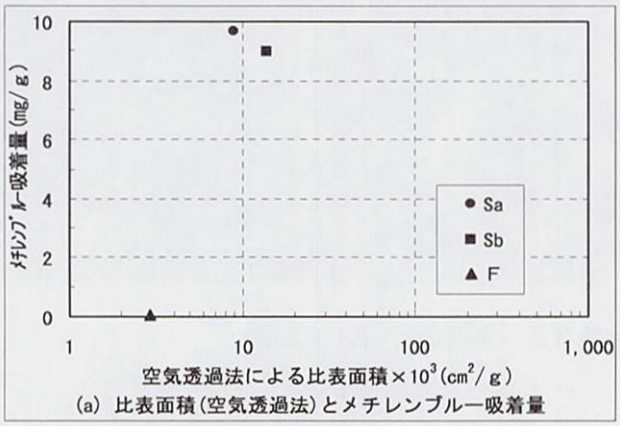
メチレンブルー吸着量の測定結果を**表－2.1.8**に示す。

スラッジａ，ｂのメチレンブルー吸着量はそれぞれ 9.68，8.94mg/ｇであり，フライアッシュのそれと比較して 100 倍以上大きい。石粉（**表－2.1.2**,約 1 ～ 3mg/ｇ）よりかなり大きい。メチレンブルー吸着量が大きいということから，AE 剤や減水剤の吸着量も大きくなり空気連行作用を低減させ，スラッジ使用量の増大はワーカビリティーを損なうことが懸念される。逆にフライアッシュは，メチレンブルー吸着量が非常に小さいことから空気連行性や，ワーカビリティーの低下は小さいことが期待できる。

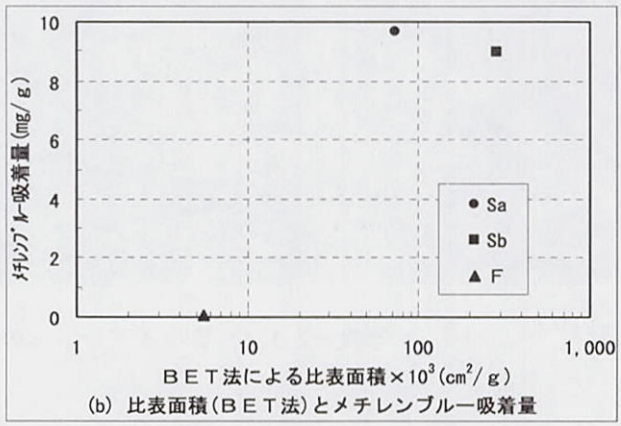
メチレンブルー吸着量と比表面積は相関関係があるといわれていることから，空気透過法をはじめとする 3 つの手法によって求めた比表面積とメチレンブルー吸着量の関係を**図－2.1.7**に示した。スラッジａ，ｂのみについて見れば反比例の関係がありそうであるが，対象が 2 試料しかないため今回の結果からは 3 つの手法による比表面積と吸着量の関係は明確ではなかった。

表－2.1.8　粉体のメチレンブルー吸着量測定結果

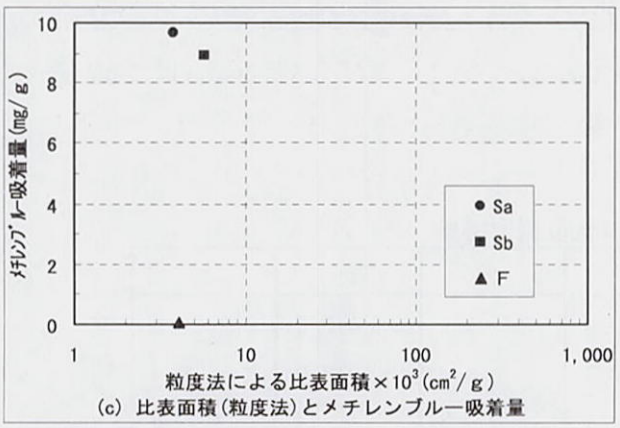
	Sa	Sb	C	F
メチレンブルー吸着量(mg/ｇ)	9.68	8.94	－	0.07



(a) 比表面積(空気透過法)とメチレンブルー吸着量



(b) 比表面積(ＢＥＴ法)とメチレンブルー吸着量



(c) 比表面積(粒度法)とメチレンブルー吸着量

図－2.1.7　比表面積とメチレンブルー吸着量

(9) 砂 当 量

スラッジの砂当量試験に際し比較として細骨材も試験を実施した。

測定は試験試料となる溶液を 20 分間静置させて，微細物質の上端の高さと，砂の上端の高さを読みとるものであるが，スラッジは60分間静置させても分離せず測定できなかった。砂当量の結果を**表－2.1.9**に示す。

表－2.1.9　スラッジの砂当量試験結果

		Sa	Sb	細骨材
砂当量	1	測定不能	測定不能	75.2
	2			75.6
	3			75.4
	平均	－	－	75.4
最大値－最小値（≦3.0）				0.4
測定溶液の温度（℃）				21.4

※）スラッジと細骨材を対象とした。

砂当量試験方法は，JIS A 1801(-1989)「コンクリート生産工程管理用試験方法（コンクリート用細骨材の砂当量試験方法)」において，骨材の微粒分量試験で判別できない細骨材中の粘土質物質の含有量を概略把握する指標となる旨が示されている。反面，規格値については「わが国における現在の研究がコンクリートの性質と砂当量との関係を明確にするまでには到っているとは言い難く，適切な規格値を与えることが困難な段階である。(同解説)」として示されていない。

また，同解説には洗い試験で失われる 5 μm以下の微細物質の量（x，wt %）と砂当量（Y）との関係については，

（スラグ細骨材だけ）　・・・　$Y = 97.06 - 26.59\,x$ ，$r = -0.888$

（スラグ細骨材を除くその他の砂）・・・　$Y = 90.33 - 19.54\,x$ ，$r = -0.844$

なる近似式が示されており，今回の細骨材を「スラグ細骨材を除くその他の砂」として式に当てはめると，5 μm以下の微細物質の量は 0.764(wt %) と推定される。

砂当量試験方法における砂当量（ＳＥ値）は，欧米の規格（ASTM D 2419，NF P 18-598）において 70 以上と定められている。また，鈴木らの研究[9]によれば，①モルタルの曲げ，圧縮強さを考慮した品質を保証できるＳＥ値の限界は，安全側をみて 80 程度であればよい，②モルタルの耐久性を考慮した品質を保証できるＳＥ値の限界は，85 程度であればよい。さらに，③ＳＥ値を求めるための静置時間は，粘土質の量によって相違するため，静置時間の適正値についてさらに検討が必要である，と示されていることを付記しておく。

２．２　骨材試験

２．２．１　試験項目と試験方法

(1)　細骨材，粗骨材の一般物理試験

細骨材および粗骨材の一般的な物理的性質を把握するために，ふるい分け試験，密度および吸水率試験，安定性試験を行った。

(2)　細粗混合骨材の空隙特性試験

コンクリートの配合を考える上で，必要なモルタル量を知るには骨材の空隙量を適切に把握することが重要である。ＲＣＤコンクリートにおいては，施工性を満足する範囲でコンクリートの単位容積質量が最大となる，つまり，空隙量が最小となるように骨材量が選択される。細骨材の空隙量に対するペーストの容積比や，粗骨材の空隙量に対するモルタルの容積比などを知ることが有効である。高流動コンクリートにおいても，コンクリート中の骨材の実積率もしくは空隙率が重要な意味を持つと考えられる。その際，細骨材と粗骨材の相互干渉が及ぼす影響は極めて重要である。

そこでコンクリートの合理的な配合を考える上で，細骨材と粗骨材（粒度範囲 20 ～ 5mm（「粒度 2005」），40 ～ 5mm（「粒度 4005」））の混合（細粗混合骨材）比率を変化させたときの実積率，間隙比の変化を求め，さらに相互干渉の影響を把握するために間隙比モデルの適用を試みた。

(3)　粗骨材の強度試験

粗骨材については，すりへり試験と強度に関する試験（点載荷試験，破砕試験）も行った。

骨材の施工時の割れや硬化コンクリートでの強度への影響は，骨材の破砕性を評価できれば，総合的に取り扱うことができる可能性があることから，この一環として骨材の強度試験を行った。

骨材の強度試験のうち点載荷試験は，労力は大きいが粗骨材の一つ一つの圧裂強度をみることができる試験であり，「岩の調査と試験」（土質工学会，現地盤工学会）[10]に準じて行った。骨材は粒径 40 ～ 5mm を 6 つの粒度範囲に分類し，粒度の相違による圧裂強度の違いをみる。なお，点載荷試験で得られる結果は，ワイブル分布を用いて骨材全体の品質（圧裂強度）を統計的に扱った。

一方破砕試験は，コンクリートの練混ぜに用いる骨材をまとめて試験し，評価しようとするものであり，試験は骨材の破砕試験方法（案）（「提案法」）[3]に準じて行った。対象とする骨材は粒度 2005，4005 の 2 種類とし，試験容器は提案法で規定する大容器と小容器に中容器を追加，最大荷重を 4 段階に設定し，これら粒度，容器の大きさ，荷重の大きさの組み合わせによるによる破砕性の比較を行った。

(1) ～ (3) の試験項目と試験方法を**表－2.2.1**に示す。

表－2.2.1　骨材の試験項目と試験方法

試験項目		試験方法
細骨材・粗骨材	ふるい分け試験	JIS　A 1102
	密度および吸水率試験	細骨材：JIS　A 1109
		粗骨材：JIS　A 1110
	安定性試験	JIS　A 1122
細粗混合骨材	単位容積，質量および実積率試験	JIS　A 1104
粗骨材の強度，硬さ	すりへり試験	JIS　A 1121
	強度試験	点載荷試験[10]
		破砕試験[3]

２．２．２　細骨材，粗骨材の一般物理試験結果

表－2.2.2に骨材の物理試験結果を示す。

表-2.2.2　骨材の物理試験結果

骨材の種類	粒度の範囲	表乾密度 g/cm³	絶乾密度 g/cm³	吸水率 %	安定性損失質量 %	すりへり減量 % A 10-40	B 15-25	C 5-15	FM	単位容積質量 kg/l	実積率 %
粗骨材	4020	2.69	2.68	0.51	—	—	—	—	7.69	—	—
	2005	2.67	2.65	0.62	—	—	—	—	6.55	1.654	61.9
	4005	2.68	2.66	0.57	6.7	14.8	15.4	15.6	7.19	1.667	62.3
細骨材	5mm以下	2.66	2.64	1.33	1.9	—	—	—	2.51	1.696	64.0

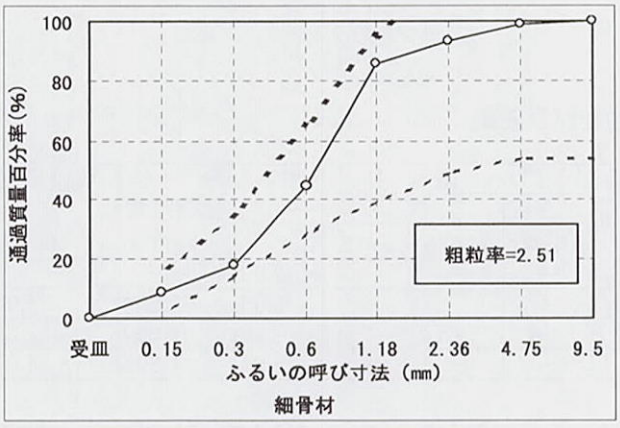
細骨材および粗骨材のふるい分け試験結果を**表－2.2.3**，および**図－2.2.1**，**2.2.2**，密度および吸水率試験，安定性試験の結果を**表－2.2.4**，**2.2.5**に示す。

なお、細骨材の 0.15 ｍｍ以下の微粒分が 8.4%と通常より多めになっているのは、RCD 用コンクリートのフルミックス配合の試験で VC が最小になる量を検討した結果である。

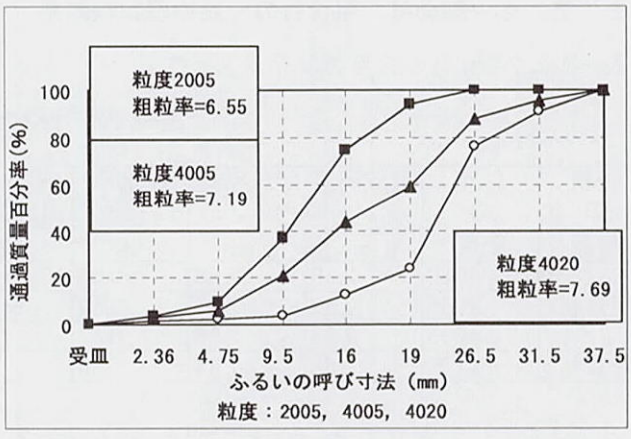
ダム建設現場から採取した骨材でもあり，物理試験結果についてはコンクリート標準示方書等の規格値を満足している。

表－2.2.3　骨材のふるい分け試験結果

ふるいの呼び寸法 (mm)	通過質量百分率(%) 細骨材	粗骨材 粒度 2005	粗骨材 粒度 4020	粗骨材 粒度 4005
37.5	100.0	100.0	100.0	100.0
31.5	100.0	100.0	91.3	95.7
26.5	100.0	100.0	76.6	88.3
19	100.0	94.0	24.0	59.0
16	100.0	74.5	12.3	43.4
9.5	100.0	37.3	3.7	20.5
4.75	99.0	9.9	1.9	5.9
2.36	93.0	3.7	1.8	2.8
1.18	85.7	—	—	—
0.6	45.1	—	—	—
0.3	17.7	—	—	—
0.15	8.4	—	—	—



図－2.2.1　細骨材のふるい分け試験結果



図－2.2.2　粗骨材のふるい分け試験結果

※破線はコンクリート標準示方書［ダム編］[11]において規定している，細骨材の粒度の標準範囲。

表－2.2.4 骨材の密度，吸水率試験結果

細骨材の密度および吸水率試験結果		
	密度(g/cm^3)	吸水率(%)
1	2.65	1.34
2	2.67	1.38
3	2.65	1.28
平均	2.66	1.33
粗骨材の密度および吸水率試験結果		
粒度範囲(mm)	密度(g/cm^3)	吸水率(%)
150～80	2.68	0.32
80～40	2.67	0.40
40～20	2.69	0.51
20～05	2.67	0.62
平均	2.68	—

表－2.2.5　骨材の安定性試験結果

ふるい目(mm)	骨材の損失質量百分率(%)
細骨材の安定性試験	
— ～ 0.15	—
0.15 ～ 0.3	—
0.3 ～ 0.6	0.50
0.6 ～ 1.18	0.80
1.18 ～ 2.36	0.40
2.36 ～ 4.75	0.20
4.75 ～ 9.5	0.01
合　計	1.91
粗骨材の安定性試験	
4.75 ～ 9.5	0.20
9.5 ～ 16	1.00
16 ～ 19	0.50
19 ～ 26.5	0.80
26.5 ～ 37.5	1.00
37.5 ～ 63	1.50
63 ～ 80	0.40
80 ～ 150	1.30
合　計	6.70

20mm以上の粒の異常を認めた個数・・・なし
破壊状況　　・・・表面が粗くな

２．２．３　細粗混合骨材の空隙特性試験結果

(1)　単位容積質量，実積率，間隙比試験結果

細骨材と粗骨材の混合比率（「粗骨材混合率」）を変化させたときの単位容積質量および実積率，間隙比の結果を**表－2.2.6**および**図－2.2.3，2.2.4**に示す。A(x)，B(x)，干渉係数については(2)にて説明する。なお表中の粗骨材混合率は**式(2.2.1)**で定義する。

$$x = \frac{g}{s + g} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.1)$$

ここで，x：粗骨材混合率
s：細骨材の体積
g：粗骨材の体積

表－2.2.6　細粗混合骨材の単位容積質量，実積率および間隙比

(a) 粗骨材粒度 2005の場合

粗骨材混合率 x (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	間隙比 e (x)	※ A (x)	B (x)	干渉係数 k (x)
0.0	1.696	64.0	0.563	0.563	0.563	
10.0	1.777	67.0	0.493	0.568	0.507	
20.0	1.831	69.0	0.450	0.574	0.450	
30.0	1.884	70.9	0.410	0.579	0.394	0.088
40.0	1.942	73.0	0.370	0.584	0.338	0.129
50.0	1.987	74.7	0.339	0.590	0.281	0.188
55.0	1.989	74.7	0.339	0.592	0.253	0.252
60.0	2.007	75.3	0.327	0.595	0.225	0.276
70.0	1.978	74.2	0.348	0.600	0.169	0.416
80.0	1.889	70.8	0.412	0.606	0.113	0.608
90.0	1.772	66.3	0.507	0.611	0.056	0.813
100.0	1.654	61.9	0.616	0.616	0.000	1.000

(b) 粗骨材粒度 4005の場合

粗骨材混合率 x (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	間隙比 e (x)	※ A (x)	B (x)	干渉係数 k (x)
0.0	1.696	64.0	0.563	0.563	0.563	
10.0	1.795	67.7	0.477	0.567	0.507	
20.0	1.884	71.0	0.409	0.571	0.450	
30.0	1.950	73.4	0.362	0.575	0.394	
40.0	2.016	75.8	0.319	0.579	0.338	
50.0	2.062	77.5	0.291	0.584	0.281	0.031
55.0	2.066	77.6	0.289	0.586	0.253	0.107
57.5	2.082	78.2	0.280	0.587	0.239	0.116
60.0	2.065	77.5	0.290	0.588	0.225	0.179
70.0	2.005	75.2	0.330	0.592	0.169	0.381
80.0	1.875	70.2	0.424	0.596	0.113	0.643
90.0	1.777	66.5	0.504	0.600	0.056	0.822
100.0	1.667	62.3	0.604	0.604	0.000	1.000

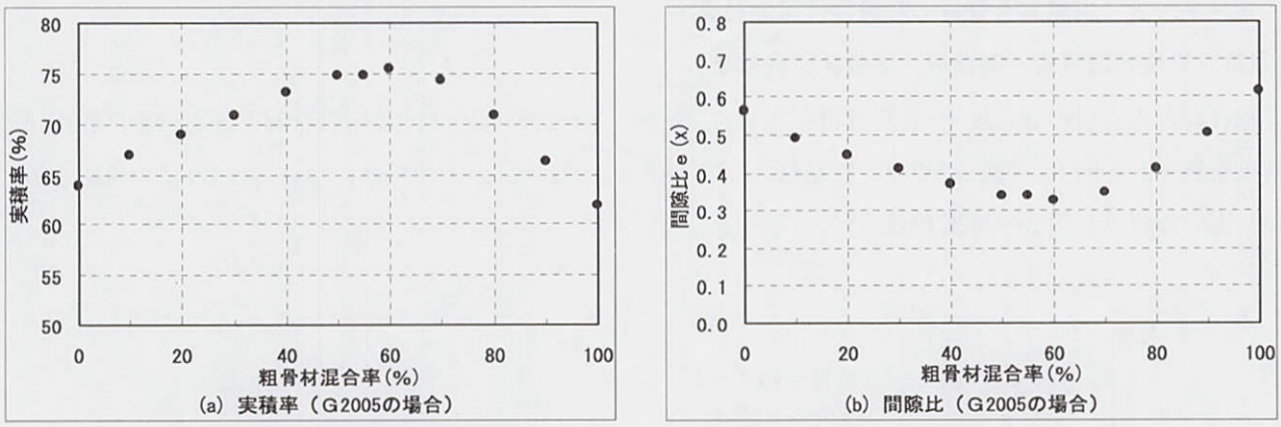
※：$k(x) = (e(x) - B(x)) \,/\, (A(x) - B(x))$

$A(x) = e_0(1-x) + e_1 \cdot x$

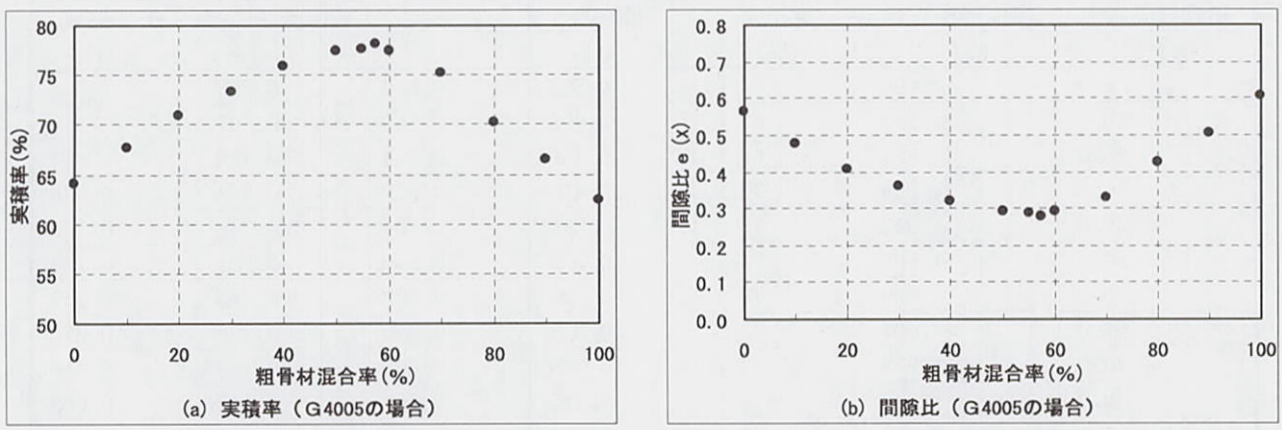
$B(x) = e_0(1-x)$

e_0：細骨材のみの間隙比

e_1：粗骨材のみの間隙比



図－2.2.3　粗骨材混合率と実積率，間隙比の関係(粒度2005の場合)



図－2.2.4　粗骨材混合率と実積率，間隙比の関係(粒度4005の場合)

粗骨材混合率と実積率の関係は上に凸，間隙比との関係は下に凸になっている。実積率の最大値，間隙比の最小値となる混合率はおよそ 50 ～ 70 %の間にあり，粒度 2005 よりも粒度 4005 の方がいくらか大きいようである。

ここでは，間隙比におよぼす相互干渉の影響を把握するため，高田ら[1,2]の提案している間隙比算定モデルの適用を試みた。間隙比算定モデルでは，ほぼ均一な粒径（単一粒度）の球形のガラスビーズを用いてモデルを構築し，実際の間隙比 e(x)に対し，粒子相互の干渉の程度を表す係数（以下，「干渉係数」） k(x)を**式(2.2.2)**で定義している。

$$k(x)=\frac{e(x)-B(x)}{A(x)-B(x)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.2)$$

ここで，$A(x)=e_0(1-x)+e_1 \cdot x$

$B(x)=e_0(1-x)$

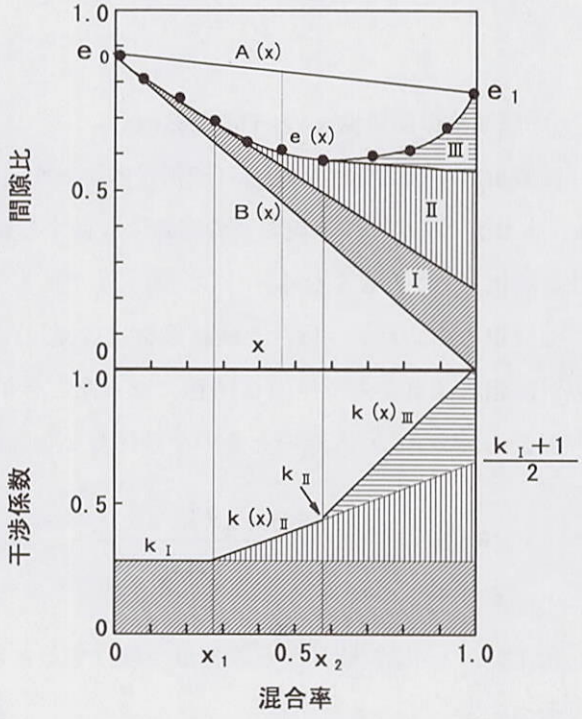
e_0　：細骨材のみの間隙比

e_1　：粗骨材のみの間隙比

(2) 間隙比算定モデル

1) 2粒度間隙比モデルの基本概念

2種類の粒子を混合したときの間隙比モデルにおいて，相互干渉がない仮想状態を仮定すると2つの状態が考えられる。一つは2種類の粒子が全く混ざり合うことなく置換される状態であり，それぞれの粒子の固有間隙比の重ね合わせで求められるため，間隙比は**図－2.2.5**の直線A(x)となり，2粒子混合の最大の間隙比を示す。もう一つは2種の粒子の大きさの比が無限に大きい場合，つまり細粒子を空隙を持たない無限大の粗粒子で置換される状態であり，このときの間隙比は直線B(x)で表され，2粒子混合の最小の間隙比を示す。



図－2.2.5　3領域の干渉係数

2) 2粒度間隙比モデル

実際の2粒子を混合したときの間隙比は，A(x)とB(x)の間に存在することになり，粒子相互の干渉の形態は，混合率によって**図－2.2.5**に示すような状態が考えられる。

a) 領域Ⅰと干渉係数$k_Ⅰ$

混合率が小さく，細粒子の中に少量の粗粒子が存在している領域Ⅰ（混合率0～x_1）では，粗粒子の表面に細粒子が接している部分では局部的に空隙が大きくなるためと考えられており，間隙比がB(x)より混合率にほぼ比例して増加するため，干渉係数は一定値となり，これをk_1と定義する。

b) 領域Ⅱの開始点x_1と干渉係数$k(x)_Ⅱ$

領域Ⅱは，混合率と間隙比の直線関係が崩れるx_1より大きい混合率の範囲である。混合率が増加すると粗粒子間隔は狭くなっていく。それに伴い細粒子と粗粒子の干渉によって空隙量がますます増大する領域であり，干渉係数$k(x)_Ⅱ$による増分に対応している。

領域Ⅱの干渉係数$k(x)_Ⅱ$とその開始点は次のように与えられている。

開始点x_1は，粗粒子の粒径をD，粗粒子の間隔をt_1とすると次のようになる。

$$x_1=\frac{1+e_0}{(t_1/D)^3(1+e_1)+e_0-k(x)\cdot e_1} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.3)$$

実験によりx_1を求め，**式(2.2.3)**に当てはめると$t_1=1.2\,d$（d：細粒子の粒径）のとき干渉係数の増加が始まる。つまり，粗粒子の間隔が細粒子の間隔の1.2倍になったとき領域Ⅰから領域Ⅱへ移行する。

次に，$k(x)_Ⅱ$は実験結果から図－2.2.5のように$x=1$の切片が$(k_1+1)/2$の直線に近似できることから，次式で与えられている。

$$k(x)_{II} = k_I + \frac{(1-k_I)(x-x_1)}{2(1-x_1)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.4)$$

c) 領域Ⅲの開始点 x_2 と干渉係数 $k(x)_{III}$

領域Ⅲは，間隙比が最小値（細密状態）となる混合率 x_2 から混合率 100 %までの範囲である。混合率が x_2 より大きくなると，粗粒子の間隙に存在する細粒子が取り除かれていくことになるので間隙比は増大し，最終的に e_1 に等しくなる。

領域Ⅲの開始点 x_2 は，実験結果を**式(2.2.3)**に当てはめると，$t_2 = 0.12\ D$ のとき，つまり粗粒子の間隔が，粗粒子自身の粒径の 0.12 倍になったとき干渉状態が領域Ⅱから領域Ⅲへ移行する。

混合率が x_2 より大きいときの干渉係数 $k(x)_{III}$ は，次式で与えられる。

$$k(x)_{III} = k_{II} + \frac{(1+k_{II})(x-x_2)}{(1-x_2)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.5)$$

ただし，k_{III} は領域Ⅱから領域Ⅲへ移行するときの干渉係数であり，x_2 を**式(2.2.4)**に代入して求めた値である。

d) $x_1 > x_2$ とのときの干渉係数

x_1 と x_2 の定義から，粒径比 ν が 0.1 より小さいときには $x_1 > x_2$ となる。この場合細粒子の最密状態は崩れ，状態Ⅱが起こる前に状態Ⅲが起こり，状態Ⅰから状態Ⅲへ移行し，干渉係数は 2 直線でモデル化される。

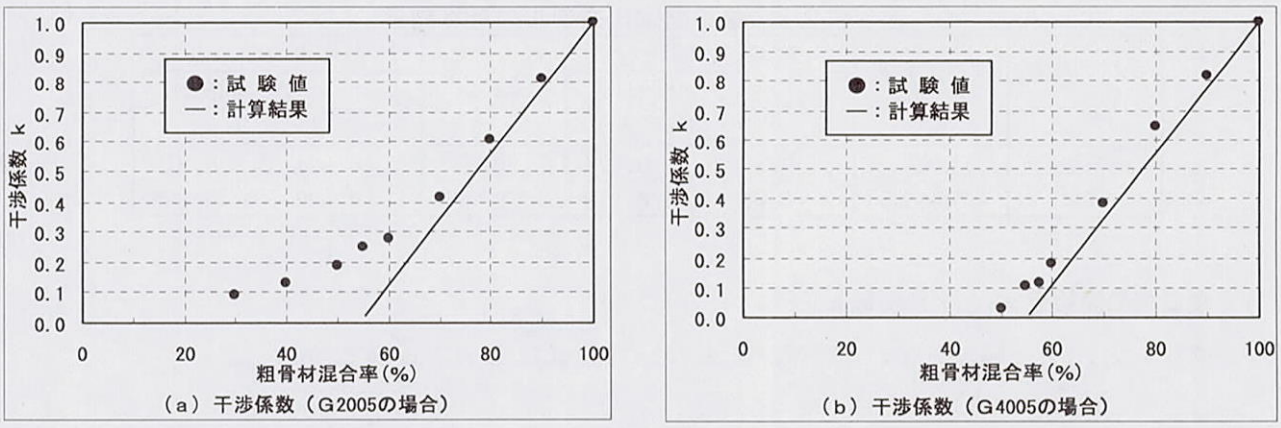
3) 間隙比モデルの適用

間隙比モデルを適用した場合の，粗骨材混合率変化による干渉係数 $k(x)$ 計算結果を**表－2.2.6**の右半分に示すとともに，同モデルの計算結果を**表－2.2.7**に示す。その計算結果を今回の試験結果に適用したのが**図－2.2.6**であり，計算結果と実測値との適合性はよくない。

領域Ⅰの干渉係数は試験値，計算値ともほぼゼロである。領域ⅠとⅡの境界となる混合率 x_1，領域ⅡとⅢの境界となる混合率 x_2 の計算結果は，$x_1 > x_2$ となっており，間隙比モデルでは領域Ⅱは存在せず，干渉係数は 2 直線で表されることになる。この原因として，間隙比モデルは球形の単一粒度によって構築されているのに対し，実際には今回実施したように粒度分布を有している細骨材と粗骨材を混合（混合 2 粒度粒子）したためと考えられる。

表－2.2.7　間隙比モデルの計算結果

骨材の種類	骨材の粒度	平均粒径(mm) 細骨材 d	平均粒径(mm) 粗骨材 D	粒径比 ν d/D	細粗骨材の間隙比 e_0	細粗骨材の間隙比 e_1	間隙比モデルによる計算結果 k_I	x_1	x_2
細粗混合骨材	2005	0.652	11.4	0.0575	0.563	0.616	0.01993	0.619	0.554
	4005	0.652	17.2	0.0379	0.563	0.604	0.00873	0.654	0.556



図－2.2.6　間隙比モデルによる干渉係数の試験値と解析値の比較

(3)　間隙比モデルの修正

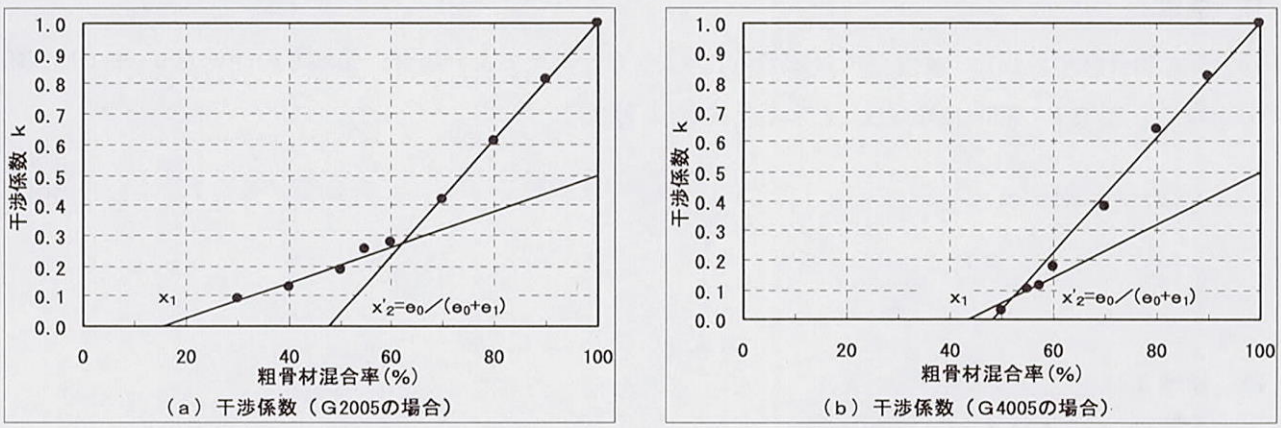
混合２粒度粒子の干渉係数を，森濱ら[7]が材料試験として実施した４ケースと今回実施した２ケースの試験結果から推測すると以下のようになる（**図－2.2.7**）。領域などの呼び方は踏襲することとする。

1)　干渉係数 k_{I}

まず，領域Ⅰの干渉係数 k_{I} は，今回のように粒径比 ν が小さい場合 $k_{I} \fallingdotseq 0$ と考えてよいであろう。ただし，粒度分布の範囲が広い場合には細骨材の大きい粒径と粗骨材の小さい粒径の相互干渉を生じやすくなり，さらに検討が必要になる場合もある。

2)　領域Ⅱの開始点 x_{1} と干渉係数 $k(x)_{II}$

干渉係数 $k(x)_{II}$ は**図－2.2.7**のように，間隙比モデルの場合と同様，粗骨材混合率 $x = 1$ の切片が 1/2 になる直線で近似できている。この結果から x 軸に交わる点 x_{1} を求め，計算したのが**表－2.2.8**である。これにより干渉係数 $k(x)_{II}$ は**式(2.2.6)**となる。



図－2.2.7　干渉係数の試験値と修正値の比較

$$k(x)_{II} = \frac{1}{2}\frac{x - x_{1}}{1 - x_{1}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.6)$$

表－2.2.8　修正間隙比モデルの計算結果

骨材の種類	骨材の粒度	領域Ⅱの開始点		x'_2	領域Ⅲの開始点	
		x_1	間隙比 $e(x_1)$		x_2	間隙比 $e(x_2)$
細粗混合骨材	2005	0.158	0.474	0.477	0.621	0.319
	4005	0.436	0.318	0.482	0.522	0.293

3)　領域Ⅲの開始点 x_2 と干渉係数 $k(x)_{Ⅲ}$

干渉係数 $k(x)_{Ⅲ}$ と x 軸の交点 x'_2 は，図－2.2.7のように**式(2.2.7)**で近似できている。

$$x'_2=\frac{e_0}{e_0+e_1} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.7)$$

$x=1$ のとき $k(x)=1$ を結ぶ直線にほぼ一致している。その時の干渉係数は**式(2.2.8)**で与えられる。

$$k(x)_{Ⅲ}=(1+\frac{e_0}{e_1})x-\frac{e_0}{e_1} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.8)$$

間隙比の最小値となる領域Ⅲの開始点 x_2 は，**式(2.2.6)**と**式(2.2.8)**から次式で得られる。

$$x_2=\frac{2e_0(1-x_1)-e_1x_1}{2(e_0+e_1)(1-x_1)-e_1} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.9)$$

(4)　修正間隙比モデルから求めた間隙比と試験値の比較

前項の修正した間隙比モデルを「修正間隙比モデル」と呼ぶことにする。修正間隙比モデルによって求まる干渉係数を使った間隙比の解析は以下のようになる（**図－2.2.8**）。

1)　領域Ⅰ

細骨材と粗骨材の粒径比 ν が小さく，実質的に $k_1=0$ と考えてよい場合，領域Ⅱの開始点 x_1 までは直線 B(x)となる。領域Ⅰの間隙比を $e(x)_1$ とすると**式(2.2.2)**より

$$e(x)_1=e_0(1-x) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.10)$$

ただし，$0 \leqq x \leqq x_1$

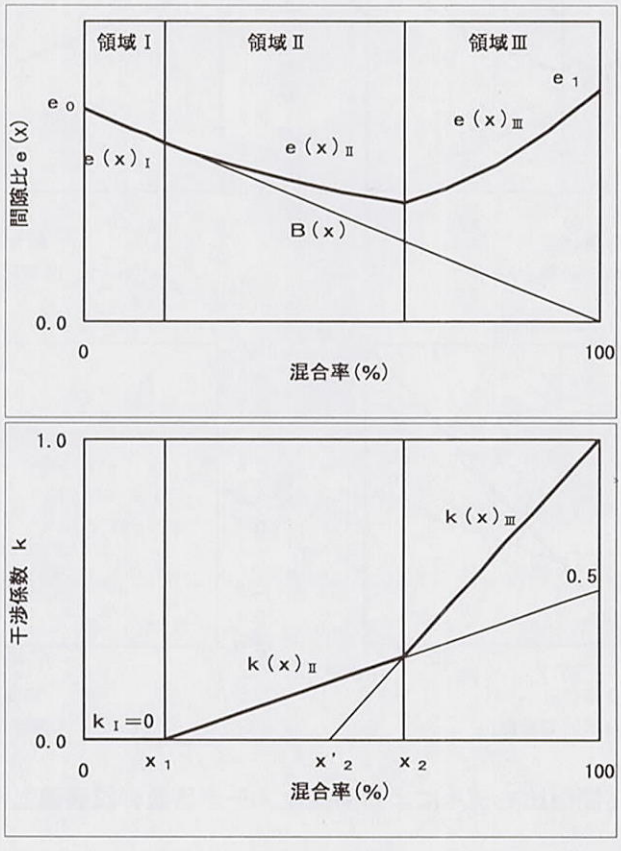
2)　領域Ⅱ

$x>x_1$ の場合，**式(2.2.2)**より間隙比は，

$$e(x)=k(x)\{A(x)-B(x)\}+B(x)$$

$$=\{k(x)\cdot e-e_0\}x+e_0 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.11)$$

領域Ⅱの干渉係数 $k(x)=k(x)_{Ⅱ}$ であり，**式(2.2.6)**を**式(2.2.11)**に代入することによって間隙比が求められる。ただし，$x_1 < x \leqq x_2$ である。



図－2.2.8　干渉係数と間隙比

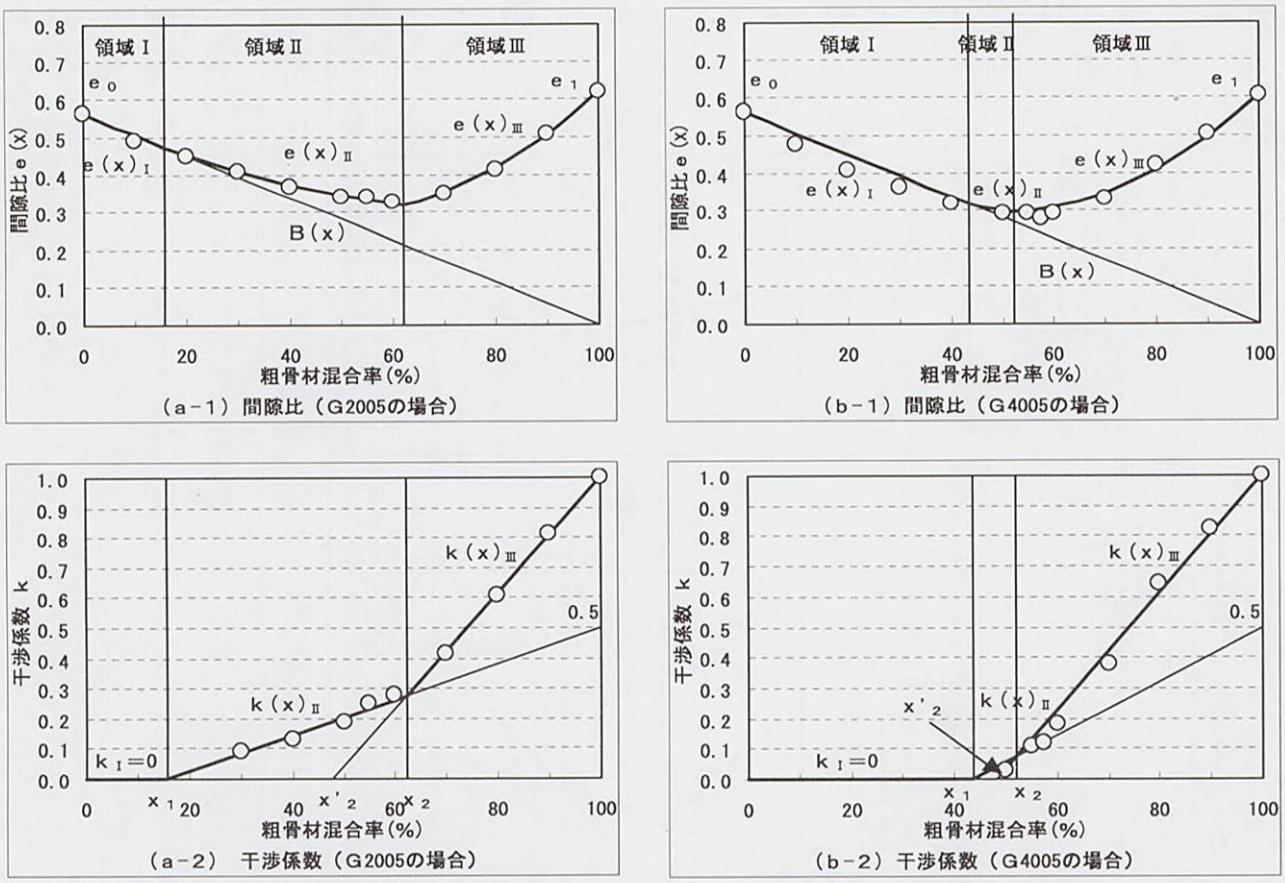
3)　領域Ⅲ

領域Ⅲも領域Ⅱと同様に，**式(2.2.8)**を**式(2.2.11)**に代入することによって間隙比が求められる。ただし，$x_2 < x \leqq 1$ である。

4)　解析値との比較

修正間隙比モデルによる間隙比の解析値と試験値を比較すると，**図－2.2.9**のようになり，よく一致している。

修正間隙比モデルは物理的説明が不明確という根本的な問題があり，今後の検討を要する。しかしながら，細粗混合骨材について試験結果を的確に示すことができることから，以降のコンクリートのワーカビリティーを検討する上で有効な手段であると考える。



図－2.2.9　修正間隙比モデルによる間隙比・干渉係数の試験値と解析値の比較

２．２．４　粗骨材の強度試験結果

(1) すりへり試験結果

粗骨材のすりへり試験結果を**表－2.2.9**に示す。

いずれの粒度区分もすりへり減量は15％前後であり，コンクリート標準示方書［ダム編］[13]に定めるすりへり減量の限度（40 ％を標準とする）の半分以下であり，外部からのすりへり作用に対して十分な抵抗性を有している。

表－2.2.9　粗骨材のすりへり試験結果

粒度区分	粒度範囲(mm)	すりへり減量(%)
A	10～40	14.8
B	15～25	15.4
C	5～15	15.6

(2) 点載荷試験結果

骨材の強度試験のうち点載荷試験は，労力は大きいが粗骨材の一つ一つの圧裂強度をみることができる試験である。「岩の調査と試験」（土質工学会，現地盤工学会）に準じて行い，点載荷圧裂強度を**式(2.2.12)**により求めた。

$$f_{pa}=0.9\cdot\frac{P}{D^2} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.12)$$

ここで，f_{pa}：点載荷圧裂強度
P：最大荷重(N)
D：載荷点距離(mm)

点載荷試験の試料は粒径 40 ～ 5mm を**表－2.2.10**に示す 6 つの粒度範囲に分類し，粒度の相違による圧裂強度の違いをみた。なお，骨材には層状節理がほとんどみられなかったので，荷重の載荷方向は無差別とした。点載荷試験で得られる結果は各試料ごと，つまり一つ一つの骨材の強度しかわからないので，ワイブル分布を用いて骨材全体の品質（圧裂強度）を統計的に扱った。ワイブル分布を用いた点載荷試験結果の整理方法については，**文献5)**の「-資料編-Ⅱ点載荷試験結果の整理について」に委ねる。

試験実施状況を**写真－2.2.1**，点載荷距離と破壊荷重，圧裂強度の結果と分布を**表－2.2.11**および**図－2.2.10**に示す。

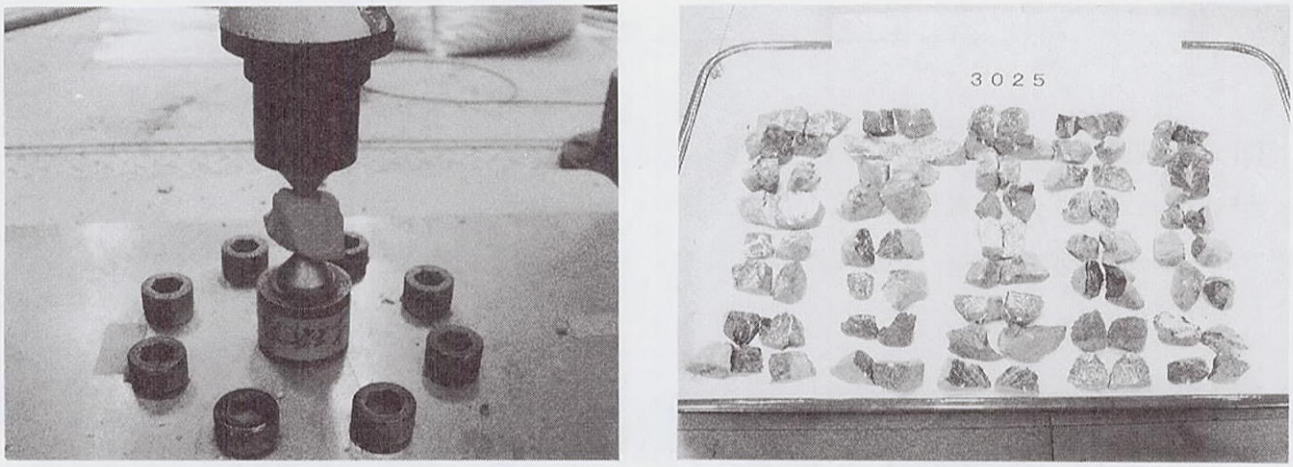
ワイブル分布の計算を行うために，各粒度区分において圧裂強度を $5N/mm^2$ の範囲で区切った場合の頻度，相対度数を**表－2.2.12**に，ワイブル分布を用いて求めた各粒度ごとの平均値，変動係数などを**表－2.2.13**にまとめた。圧裂強度の相対度数のヒストグラムとワイブル分布による確率密度を**図－2.2.11**（連続粒度），**2.2.12**（単粒度）に示す。図中の曲線はワイブル分布を示しており，両者はほぼ一致している。さらに**図－2.2.13**（単粒度），**2.2.14**（連続粒度）に圧裂強度の確率分布を示したように，ワイブル分布が成り立っていることがわかる。骨材の粒径によってその性状（クラックの入り方）が異なることが予想されるので，確率密度関数は各粒度毎に算出した。今回，連続粒度の場合の確率密度については，各粒径ごとの確率密度分布

を骨材全体の粒度分布を考慮して足しあわせることによって算出した。

さらに，載荷点距離の算術平均と圧裂強度の関係を**図－2. 2. 14**，同じく変動係数との関係を**図－2. 2. 15**に示した。圧裂強度は，載荷点距離（粒径）が大きくなると寸法効果のために小さくなる傾向がみられる。なお，試料に用いた骨材全体の圧裂強度平均値は 18.66N/mm^2 であった。

表－2. 2. 10　点載荷試験試料数

粒度範囲	粒　度					
	4030	3025	2520	2015	1510	1005
試 料 数	70	70	70	70	70	70



写真－2. 2. 1　点載荷試験状況　（左：試験状況，右：試験後の骨材）

表－2.2.11　点載荷試験結果（その１ 1/2）

粒度	4030			3025			2520		
試験 No.	載荷点間距離 D (mm)	破壊荷重 P (kN)	圧裂強度 f pa (N/mm^2)	載荷点間距離 D (mm)	破壊荷重 P (kN)	圧裂強度 f pa (N/mm^2)	載荷点間距離 D (mm)	破壊荷重 P (kN)	圧裂強度 f pa (N/mm^2)
1	31.43	10.962	9.99	26.79	8.187	10.27	18.07	6.062	16.71
2	26.90	11.975	14.89	26.88	5.481	6.83	21.88	5.600	10.53
3	24.08	13.020	20.21	28.79	6.675	7.25	21.28	6.243	12.41
4	29.80	13.460	13.64	31.44	5.918	5.39	19.77	5.712	13.15
5	30.88	13.420	12.67	22.21	14.560	26.56	18.49	3.452	9.09
6	26.51	4.562	5.84	24.84	5.493	8.01	17.90	5.912	16.61
7	23.42	8.325	13.66	24.40	3.347	5.06	21.43	6.768	13.26
8	23.87	10.675	16.86	21.33	7.281	14.40	23.05	6.875	11.65
9	24.55	5.925	8.85	19.47	12.670	30.08	19.15	2.707	6.64
10	21.07	6.931	14.05	24.34	6.618	10.05	21.59	4.165	8.04
11	23.11	10.450	17.61	27.06	10.131	12.45	21.52	7.906	15.36
12	24.27	6.250	9.55	28.63	9.306	10.22	22.44	1.320	2.36
13	24.63	10.787	16.00	22.90	11.062	18.98	15.82	4.567	16.42
14	21.65	11.581	22.24	23.59	3.167	5.12	18.12	3.842	10.53
15	26.43	7.956	10.25	21.78	4.455	8.45	16.15	6.662	22.99
16	22.68	13.260	23.20	19.84	11.868	27.14	14.81	3.447	14.14
17	21.21	5.212	10.43	22.32	8.112	14.65	20.55	6.312	13.45
18	24.07	10.237	15.90	17.02	7.500	23.30	21.64	3.605	6.93
19	27.36	9.343	11.23	16.51	7.506	24.78	13.95	3.847	17.79
20	25.71	12.680	17.26	19.46	7.212	17.14	19.66	7.475	17.41
21	22.80	11.550	20.00	17.06	6.900	21.34	18.22	4.175	11.32
22	20.88	2.685	5.54	17.64	5.962	17.24	17.44	2.462	7.29
23	22.27	6.300	11.43	22.13	10.512	19.32	15.90	4.487	15.97
24	20.94	6.556	13.46	18.67	5.300	13.68	13.32	5.812	29.48
25	23.13	6.178	10.39	19.43	4.167	9.93	14.36	5.125	22.37
26	30.91	6.506	6.13	19.37	7.412	17.78	14.18	4.900	21.93
27	23.56	10.312	16.72	18.37	7.925	21.14	15.35	5.387	20.58
28	22.88	12.630	21.71	22.97	6.793	11.59	14.78	5.093	20.98
29	27.72	9.725	11.39	23.46	4.818	7.88	14.25	3.290	14.58
30	21.95	10.893	20.35	22.59	4.755	8.39	19.62	5.412	12.65
31	29.29	5.450	5.72	29.60	3.875	3.98	18.29	1.740	4.68
32	23.37	4.707	7.76	25.74	10.318	14.02	17.92	2.522	7.07
33	23.62	10.993	17.73	18.00	7.925	22.01	19.09	8.243	20.36
34	21.15	6.493	13.06	18.06	4.240	11.70	15.20	6.112	23.81
35	23.08	5.337	9.02	17.02	2.115	6.57	17.18	4.752	14.49
36	23.69	12.100	19.40	19.79	3.212	7.38	16.39	6.206	20.79
37	24.44	4.397	6.63	17.87	3.167	8.93	14.67	4.667	19.52
38	21.03	4.100	8.34	19.00	10.218	25.47	15.39	4.632	17.60
39	18.81	3.802	9.67	19.04	6.781	16.83	15.57	5.368	19.93
40	18.88	8.156	20.59	16.79	6.475	20.67	12.15	5.906	36.01
41	17.81	9.243	26.23	17.07	6.500	20.08	19.96	9.700	21.91
42	22.18	3.377	6.18	15.58	7.900	29.29	20.38	1.948	4.22
43	24.66	5.887	8.71	17.95	2.397	6.70	17.63	2.376	6.88
44	24.18	6.787	10.45	17.65	4.370	12.63	15.13	7.606	29.90
45	21.38	9.537	18.78	14.56	2.296	9.75	13.10	5.325	27.93

表－2.2.11　点載荷試験結果（その１　2/2）

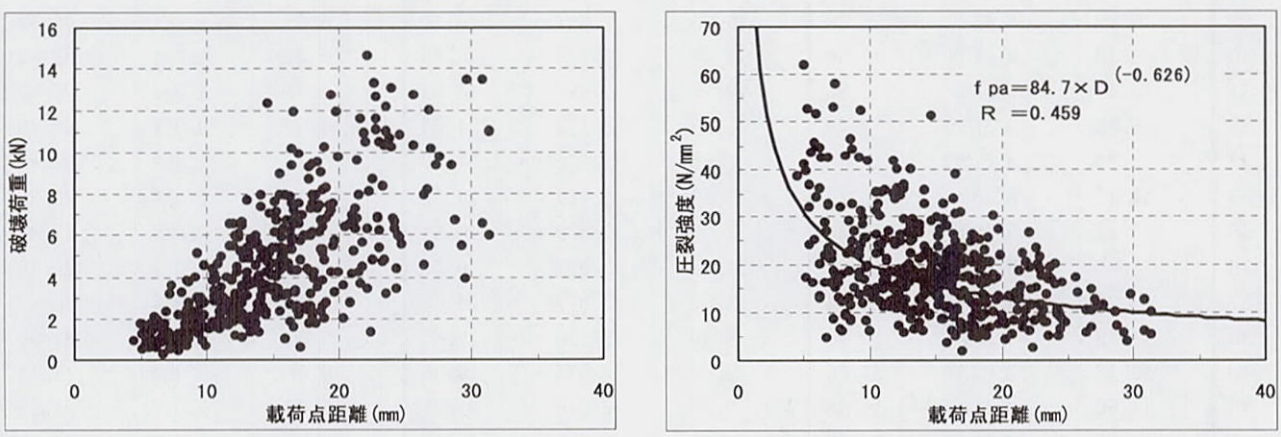
粒度	4030			3025			2520		
試験 No.	載荷点間距離 D (mm)	破壊荷重 P (kN)	圧裂強度 f pa (N/mm^2)	載荷点間距離 D (mm)	破壊荷重 P (kN)	圧裂強度 f pa (N/mm^2)	載荷点間距離 D (mm)	破壊荷重 P (kN)	圧裂強度 f pa (N/mm^2)
46	20.34	3.512	7.64	18.80	5.275	13.43	12.69	6.562	36.67
47	22.63	8.643	15.19	14.14	7.900	35.56	14.07	1.307	5.94
48	16.46	10.118	33.61	15.83	4.975	17.87	16.58	1.580	5.17
49	16.55	9.300	30.56	17.77	8.693	24.78	15.74	5.875	21.34
50	15.96	7.906	27.93	16.48	5.831	19.32	15.95	1.030	3.64
51	18.73	6.668	17.11	17.29	6.956	20.94	14.19	5.281	23.60
52	18.52	7.418	19.46	15.78	3.055	11.04	14.47	5.231	22.48
53	19.36	7.031	16.88	18.87	6.331	16.00	14.18	7.337	32.84
54	18.73	8.968	23.01	14.97	4.602	18.48	12.68	6.393	35.79
55	16.07	3.162	11.02	15.40	3.420	12.98	14.94	4.065	16.39
56	18.78	2.577	6.58	16.60	11.875	38.78	14.94	4.147	16.72
57	18.43	7.231	19.16	13.25	3.685	18.89	13.21	5.087	26.24
58	16.50	5.693	18.82	14.73	4.195	17.40	12.75	3.407	18.86
59	17.18	5.693	17.36	18.01	7.531	20.90	13.26	4.893	25.05
60	17.00	9.881	30.77	16.66	7.156	23.20	15.87	4.620	16.51
61	18.02	9.368	25.96	17.67	2.572	7.41	11.21	4.968	35.58
62	16.55	5.250	17.25	20.36	3.562	7.73	15.03	5.362	21.36
63	16.48	4.305	14.27	18.91	1.945	4.90	11.35	2.291	16.01
64	16.88	2.540	8.02	15.32	7.081	27.15	14.31	3.340	14.68
65	18.40	9.475	25.19	13.15	7.650	39.82	12.42	6.006	35.04
66	18.78	5.075	12.95	13.75	5.931	28.23	13.21	3.570	18.41
67	14.74	12.300	50.95	15.10	4.035	15.93	11.85	1.938	12.42
68	16.42	7.831	26.14	12.41	5.881	34.37	10.88	4.607	35.03
69	16.41	2.677	8.95	14.76	7.018	28.99	11.86	6.506	41.63
70	15.63	8.893	32.76	11.86	5.443	34.83	18.92	4.752	11.95

表－2.2.11　点載荷試験結果（その２　1/2）

粒度	2015			1510			1005		
試験 No.	載荷点間距離 D (mm)	破壊荷重 P (kN)	圧裂強度 f pa (N/mm^2)	載荷点間距離 D (mm)	破壊荷重 P (kN)	圧裂強度 f pa (N/mm^2)	載荷点間距離 D (mm)	破壊荷重 P (kN)	圧裂強度 f pa (N/mm^2)
1	12.02	5.437	33.87	8.70	2.078	24.71	6.19	1.901	44.65
2	15.37	3.955	15.07	8.51	2.351	29.22	8.25	0.705	9.32
3	16.74	3.327	10.69	13.41	2.066	10.34	8.50	1.487	18.52
4	17.10	0.593	1.83	12.26	3.170	18.98	9.23	2.173	22.96
5	15.08	3.330	13.18	14.58	4.212	17.83	7.46	0.997	16.12
6	18.56	6.081	15.89	9.38	5.075	51.91	6.24	0.555	12.83
7	14.21	3.052	13.60	11.63	1.683	11.20	7.15	1.260	22.18
8	17.92	5.981	16.76	12.50	2.116	12.19	7.43	0.932	15.19
9	17.82	1.743	4.94	12.78	1.978	10.90	6.71	1.431	28.60
10	16.62	4.275	13.93	11.20	3.502	25.13	8.21	0.723	9.65
11	15.84	6.243	22.39	12.67	1.035	5.80	8.22	3.220	42.89
12	18.76	2.350	6.01	12.27	1.182	7.07	8.81	1.312	15.21
13	20.04	4.220	9.46	10.87	2.975	22.66	6.37	1.908	42.32
14	14.13	2.927	13.19	14.04	4.005	18.29	6.88	1.722	32.74
15	18.09	2.035	5.60	10.60	2.787	22.32	9.20	1.616	17.18
16	16.70	3.217	10.38	8.58	3.777	46.18	8.51	1.043	12.96
17	15.54	2.316	8.63	12.14	1.775	10.84	7.74	0.853	12.81
18	17.40	5.906	17.56	8.70	3.717	44.20	8.57	0.670	8.21
19	16.84	6.825	21.66	9.32	2.332	24.16	6.68	0.807	16.28
20	13.81	2.118	9.99	12.22	3.085	18.59	9.31	1.320	13.71
21	16.49	6.700	22.18	10.70	3.037	23.87	8.71	2.755	32.68
22	16.26	4.610	15.69	8.89	2.375	27.05	7.98	1.265	17.88
23	17.89	7.275	20.46	9.53	1.206	11.95	7.39	0.955	15.74
24	16.18	3.102	10.66	12.72	2.248	12.50	7.94	0.855	12.21
25	15.68	4.981	18.23	9.86	4.500	41.66	6.80	1.380	26.86
26	15.74	5.400	19.62	10.84	1.581	12.11	9.19	1.612	17.18
27	14.53	3.572	15.23	8.55	1.875	23.08	6.99	1.155	21.28
28	13.15	4.242	22.08	11.09	2.281	16.69	7.00	1.202	22.08
29	15.28	6.687	25.78	15.58	2.347	8.70	6.05	1.827	44.92
30	14.20	3.512	15.68	13.58	3.747	18.29	6.91	1.741	32.82
31	13.64	5.556	26.88	12.72	2.692	14.97	6.25	1.558	35.90
32	16.93	2.371	7.44	11.00	3.232	24.04	4.57	0.891	38.40
33	12.76	3.517	19.44	7.86	2.182	31.79	5.35	1.668	52.45
34	15.11	5.400	21.29	12.36	4.470	26.33	6.91	1.237	23.32
35	15.21	3.480	13.54	12.40	2.820	16.51	5.21	0.523	17.34
36	15.26	2.990	11.56	14.13	3.677	16.57	6.23	0.871	20.20
37	16.92	4.275	13.44	11.89	3.877	24.68	5.59	1.508	43.43
38	11.52	3.967	26.90	9.90	2.135	19.61	5.51	1.078	31.96
39	10.53	3.827	31.06	9.80	2.065	19.35	8.66	0.953	11.44
40	14.56	3.410	14.48	9.23	2.070	21.87	6.04	2.077	51.24
41	14.26	2.552	11.29	11.11	2.492	18.17	5.82	1.717	45.62
42	11.33	2.992	20.98	9.33	3.005	31.07	7.20	1.213	21.06
43	17.88	4.212	11.86	9.27	1.748	18.31	6.79	0.230	4.49
44	13.81	4.510	21.28	10.53	1.855	15.06	7.88	0.452	6.55
45	13.34	1.992	10.07	11.04	1.508	11.14	5.41	0.780	23.99

表－2.2.11　点載荷試験結果（その２　2/2）

粒度	2015			1510			1005		
試験 No.	載荷点間距離 D (mm)	破壊荷重 P (kN)	圧裂強度 f pa (N/mm^2)	載荷点間距離 D (mm)	破壊荷重 P (kN)	圧裂強度 f pa (N/mm^2)	載荷点間距離 D (mm)	破壊荷重 P (kN)	圧裂強度 f pa (N/mm^2)
46	13.09	3.092	16.24	11.87	2.322	14.83	5.84	0.950	25.07
47	9.81	2.725	25.48	11.58	2.797	18.77	6.00	1.371	34.28
48	13.86	2.675	12.53	9.54	2.877	28.45	5.04	1.742	61.72
49	14.25	3.450	15.29	11.54	1.813	12.25	5.72	0.581	15.98
50	17.53	2.502	7.33	9.56	3.010	29.64	5.26	1.215	39.52
51	9.21	3.990	42.33	13.83	1.712	8.06	9.62	2.630	25.58
52	12.59	5.168	29.34	10.61	3.297	26.36	10.06	0.701	6.23
53	10.78	3.885	30.09	14.60	2.171	9.17	6.94	1.725	32.23
54	11.97	3.835	24.09	13.44	1.322	6.59	6.96	2.282	42.40
55	13.84	5.637	26.49	12.53	2.157	12.36	7.40	3.520	57.85
56	11.95	2.452	15.45	11.40	2.502	17.33	8.45	1.038	13.08
57	12.37	4.237	24.92	12.58	3.095	17.60	8.59	0.721	8.79
58	16.35	1.848	6.22	12.76	1.857	10.26	7.90	0.422	6.09
59	13.82	5.900	27.80	13.91	2.320	10.79	7.74	1.065	16.00
60	9.89	1.526	14.04	15.56	4.272	15.88	6.25	0.572	13.18
61	17.19	6.962	21.20	12.31	2.334	13.86	7.25	0.495	8.48
62	16.15	5.318	18.35	10.66	4.105	32.51	9.77	0.870	8.20
63	13.93	3.830	17.76	9.61	1.726	16.82	7.19	1.281	22.30
64	12.12	6.506	39.86	12.11	2.560	15.71	7.32	1.117	18.76
65	13.54	3.610	17.72	13.15	1.626	8.46	6.63	1.072	21.95
66	11.31	3.002	21.12	11.06	1.980	14.57	5.14	1.202	40.95
67	12.85	4.887	26.64	9.86	1.573	14.56	5.45	1.213	36.75
68	10.52	4.337	35.27	8.38	1.736	22.25	7.47	1.106	17.84
69	13.22	4.837	24.91	10.26	1.520	13.00	7.08	0.900	16.16
70	13.08	3.855	20.28	7.28	3.100	52.64	10.39	1.637	13.65



図－2.2.10　点載荷試験結果

表－2.2.12　点載荷圧裂強度の分布

圧裂強度の範囲 (N/mm^2)	粒度 4030		粒度 3025		粒度 2520		粒度 2015		粒度 1510		粒度 1005		粒度 4005	
	頻度	相対度数	頻度	相対度数	頻度	相対度数	頻度	相対度数	頻度	相対度数	頻度	相対度数	頻度	相対度数
0- 5	0	0.00	2	0.03	4	0.06	2	0.03	0	0.00	1	0.01	9	0.02
5-10	18	0.26	17	0.24	9	0.13	8	0.11	7	0.10	9	0.13	68	0.16
10-15	17	0.24	14	0.20	15	0.21	16	0.23	19	0.27	9	0.13	90	0.21
15-20	18	0.26	13	0.19	16	0.23	16	0.23	19	0.27	15	0.21	97	0.23
20-25	7	0.10	11	0.16	13	0.19	14	0.20	10	0.14	10	0.14	65	0.15
25-30	5	0.07	7	0.10	5	0.07	8	0.11	7	0.10	4	0.06	36	0.09
30-35	4	0.06	3	0.04	1	0.01	3	0.04	3	0.04	6	0.09	20	0.05
35-40	0	0.00	3	0.04	6	0.09	2	0.03	0	0.00	4	0.06	15	0.04
40-45	0	0.00	0	0.00	1	0.01	1	0.01	2	0.03	7	0.10	11	0.03
45-50	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	0.01	1	0.01	2	0.00
50-55	1	0.01	0	0.00	0	0.00	0	0.00	2	0.03	2	0.03	5	0.01
55-60	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	0.01	1	0.00
60-65	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	0.01	1	0.00

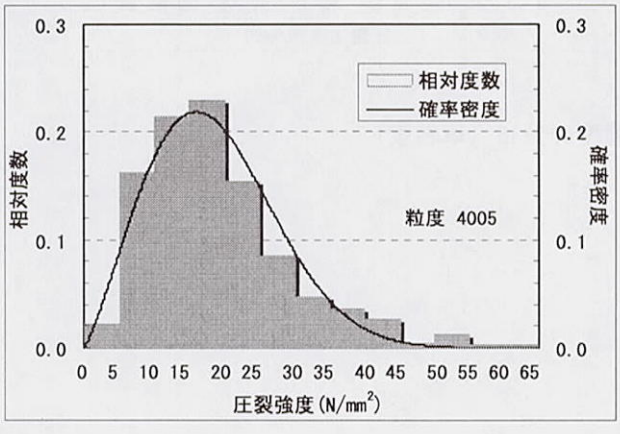
表－2.2.13　圧裂強度とワイブル分布関数

（単粒度）

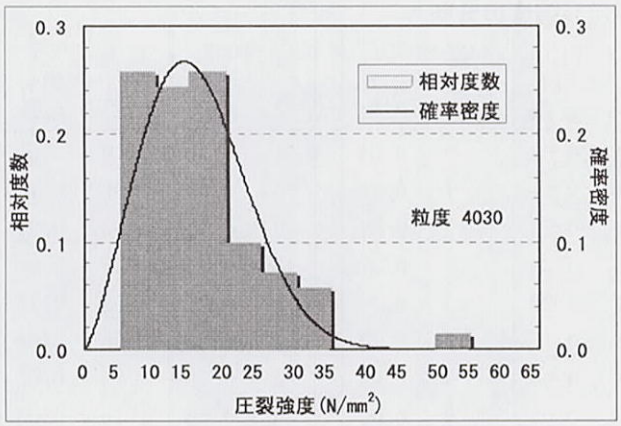
粒度	試料数	圧裂強度 (N/mm^2)						ワイブル分布関数		
	（個）	平均値	ピーク値	最大値	最小値	標準偏差	変動係数	形状母数	尺度母数	相関係数
4030	70	16.04	14.33	50.95	5.54	7.23	45.07	2.359	926.931	0.973
3025	70	16.98	13.92	39.82	3.98	8.62	50.75	2.067	447.308	0.985
2520	70	18.10	14.32	41.63	2.36	9.54	52.72	1.981	393.907	0.996
2015	70	18.38	15.71	42.33	1.83	8.85	48.15	2.191	768.971	0.989
1510	70	19.61	17.67	52.64	5.80	8.70	44.37	2.401	1,691.691	0.972
1005	70	24.04	18.71	61.72	4.49	12.88	53.58	1.946	614.487	0.985

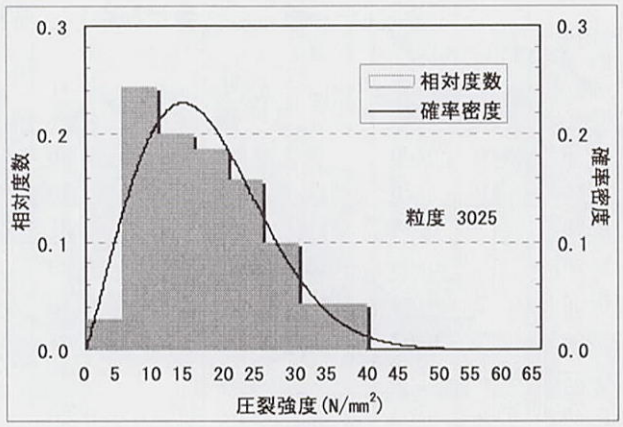
（連続粒度）

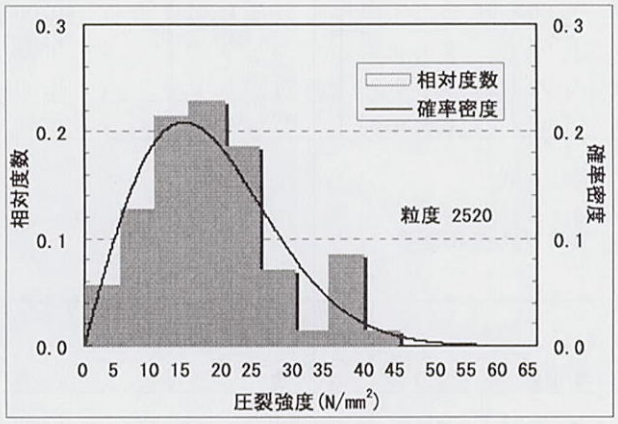
4005	420	18.66	16.09	61.72	1.83	8.88	47.61	2.219	866.064	0.988

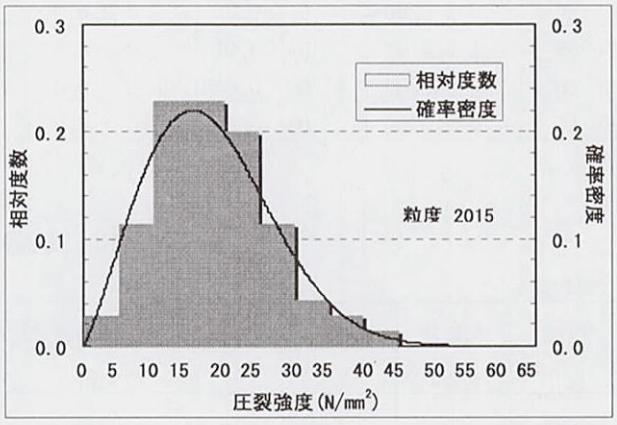


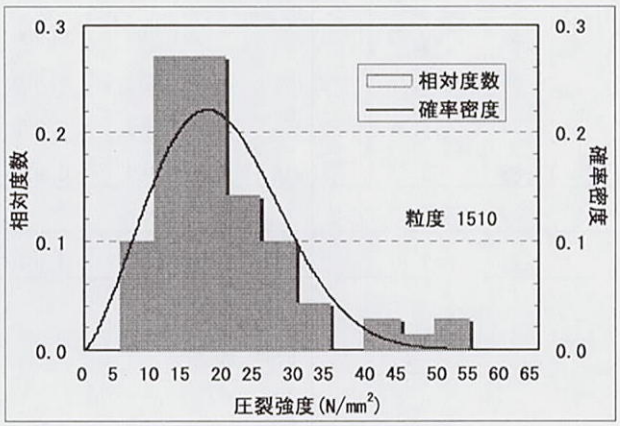
図－2.2.11　点載荷圧裂強度の分布（連続粒度）

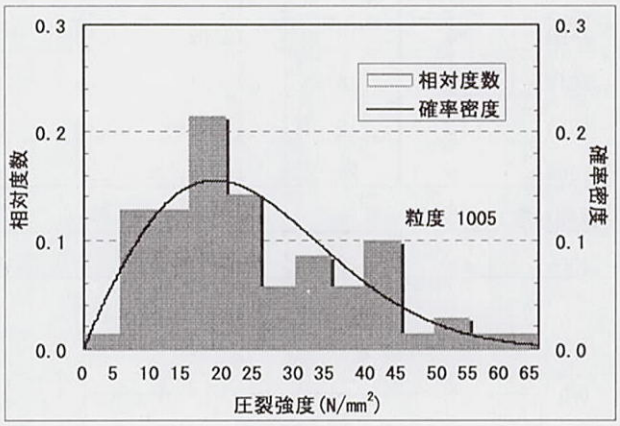




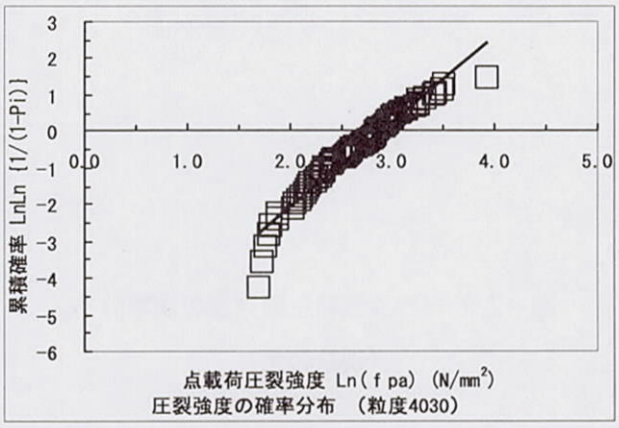


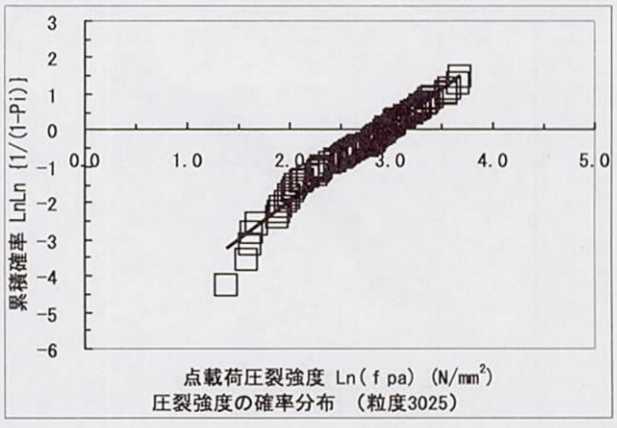


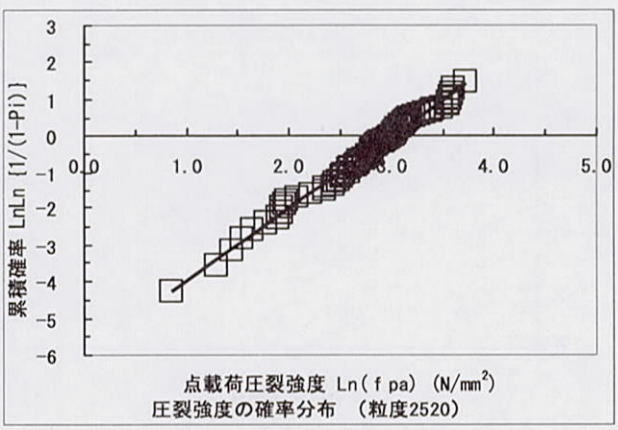


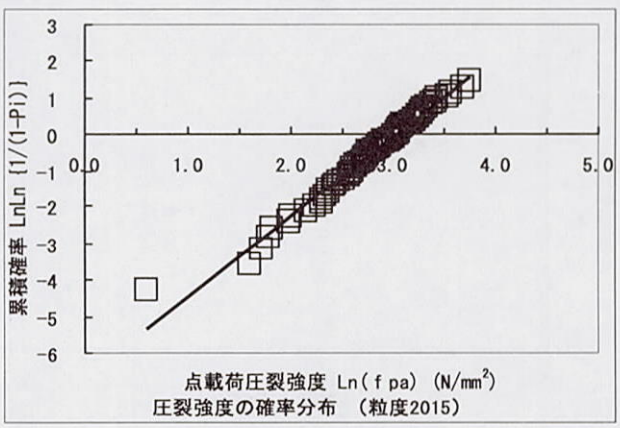


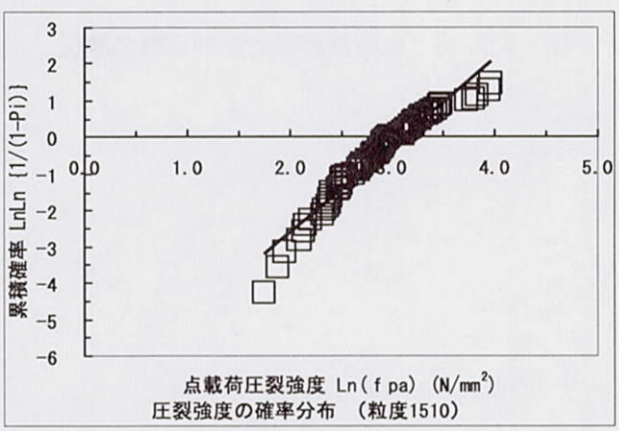
図－2.2.12　点載荷圧裂強度の分布（単粒度）

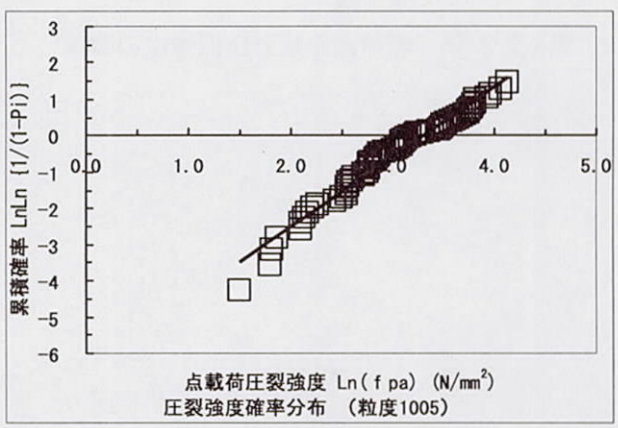




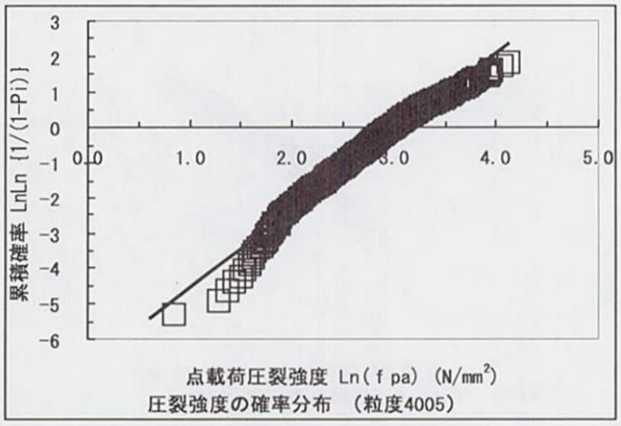




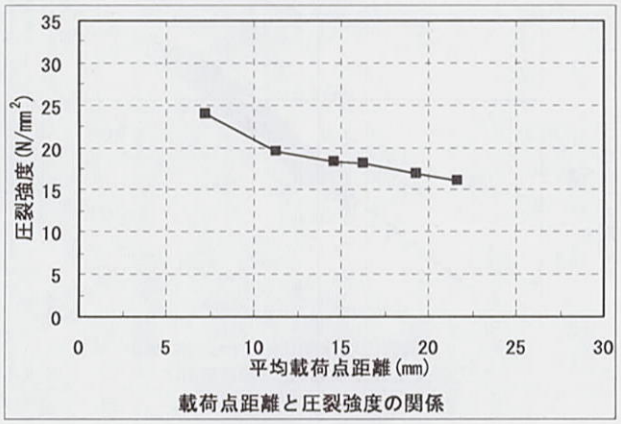




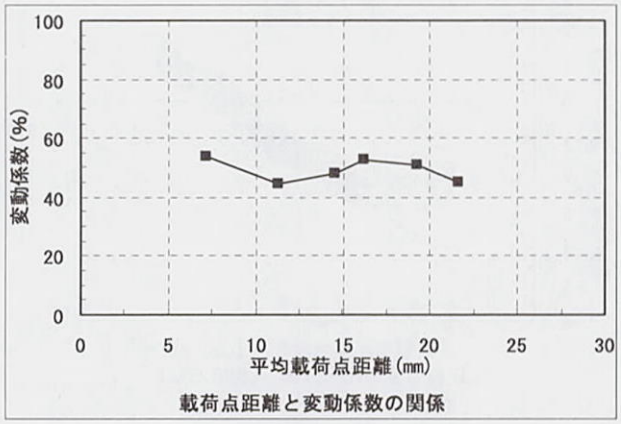
図－2.2.13　点載荷圧裂強度の確率分布（単粒度）



図－2.2.14　点載荷圧裂強度の確率分布
（連続粒度）



図－2.2.15　載荷点距離と圧裂強度の関係



図－2.2.16　載荷点距離と変動係数の関係

(3) 破砕試験結果

1) 破砕試験方法と試験結果

骨材の強度試験のうち破砕試験は，骨材の破砕試験方法（案）（「提案法」）に準じて行った。提案法はイギリスの規格 BS 812（骨材破砕値試験方法）を参考にしており，試験結果の表し方は，BS 規格が全質量に対する細粒となった分の質量の百分率（破砕値）で表記するのに対して，提案法は修正破砕率で表記することとなっている。

破砕値は，破砕後の試料を特定のふるい目でふるい，これを通過する質量を百分率で表したものであり，用いるふるい目は破砕前の試料の粒径にあわせて用意する。BS 規格では，1/2 インチ（あるいは 15mm）ふるいを通過し 10mm ふるいに留まる試料を用い，破砕後 2.5mm のふるいを通過するものをもって破砕値とすることを標準としている。ここではコンクリート練混ぜに用いる連続的な粒度分布を有する骨材（粒度 2005，4005）を試料に用いたので，破砕値の計算方法を次のように設定した。破砕試験後，用いるふるい目は試料の最大粗骨材寸法（Gmax）にあわせて，Gmax20mm に対し 2.5mm のふるい目を用いることを標準とし，Gmax40mm では 5mm のふるい目を用いる。それぞれ 2.5mm，5mm ふるいを通過したものの質量と試料全体の質量に対する百分率をもって破砕値とする（**式(2. 2. 13)**）。

（なお，粒度 8005(Gmax80mm)の試料を用いるときには，10mm のふるい目でふるった結果から，載荷前から存在していた粒度 1005 の質量分を差し引くものとする。）

$$\text{破 砕 値} = \frac{B}{A} \times 100 \ (\%) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.13)$$

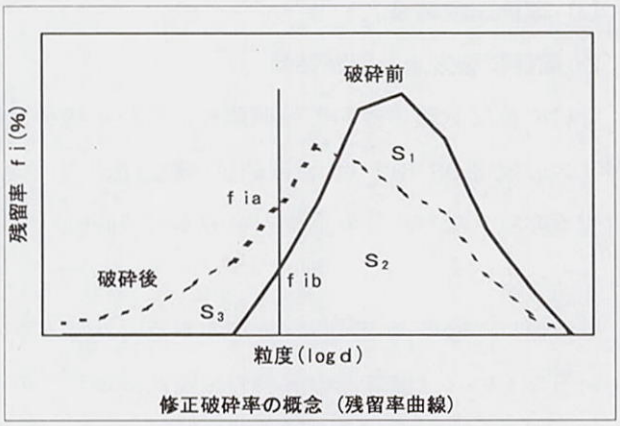
ここで，A：破砕前の骨材質量
B：骨材粒度に応じたふるいを通過した質量

修正破砕率B_M^*は次のように求める。まず，対数で等間隔になる各ふるい目（通常は，粗粒率を求めるのに用いるふるい目を使用）を用いて，破砕前後の試料の残留率をそれぞれ求める。次に，この残留率の破砕前後での差の絶対値をとる。これをすべてのふるい目について合計したものが修正破砕率B_M^*となる（**式(2. 2. 14)**）。

$$B_M^* = \frac{\Sigma \mid f_{ib} - f_{ia} \mid}{2} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.14)$$

ここで，B_M^*：修正破砕率
f_{ib} ：破砕前の $i$mmのふるい目に留まる試料の残留率
f_{ia} ：破砕後の $i$mmのふるい目に留まる試料の残留率

修正破砕率の概念図を図示すると，**図－2.2.17**のようになる。すなわち，破砕前の骨材の粒度分布はS1とS2を加えたものであるが，破砕試験により粒径の大きな骨材が割れると，粒度分布は領域S2とS3を加えたものとなる。修正破砕率はS1，S3の領域の大きさを表現したものであり，粒度分布の見かけの変化を表したものである。



図－2.2.17　修正破砕率の概念

また試験用器具については大容器（粗骨材の最大寸法 80mm 以下を対象とする。），小容器（同 20mm 以下。）のほかに中容器（同 40mm 以下。）を加えて比較対象とした。大きさの異なる 3 つの容器の大きさは次に示す比率で設計・製作されている。

小：中：大　$=1:\sqrt{2}:2$　（容器の一辺の長さ）

$=1:(\sqrt{2})^2:2^2$　（容器の断面積）

$=1:(\sqrt{2})^3:2^3$　（容器の容積）

コンクリートの強度，破壊形態は，骨材の平均強度とばらつきが影響する。提案法は平均強度を評価できる。骨材のばらつき具合を確認するために，粒度，容器の大きさ，載荷荷重の組み合わせにより破砕性を比較する。

2 種類の骨材粒度（粒度 2005 と 4005）と，3 種類の大きさの試料容器，4 段階の載荷荷重（一部の荷重については試験回数を 5 回として，データのばらつきを調べる）の組み合わせを**表－2.2.14**に示す。**写真－2.2.2**には破砕試験載荷状況を示す。

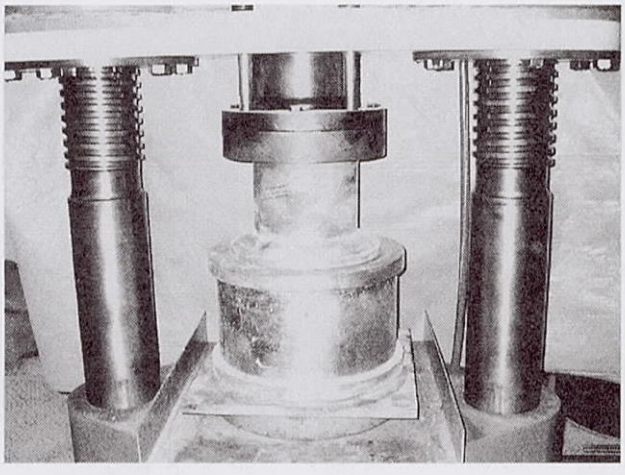
試験容器に詰める骨材粒度 4005 の粒度分布換算は，骨材のふるい分け試験結果（**表－2.2.2**）より，粒度 4020 と粒度 2005 の各ふるいに留まる量を 1：1 の比率で配分した。さらに破砕試験用に粒度 5mm のふるい目（ふるいの呼び寸法 4.75）を通過する質量分を，5mm 以上のふるい目に留まる質量に比例配分した（**表－2.2.15**）。

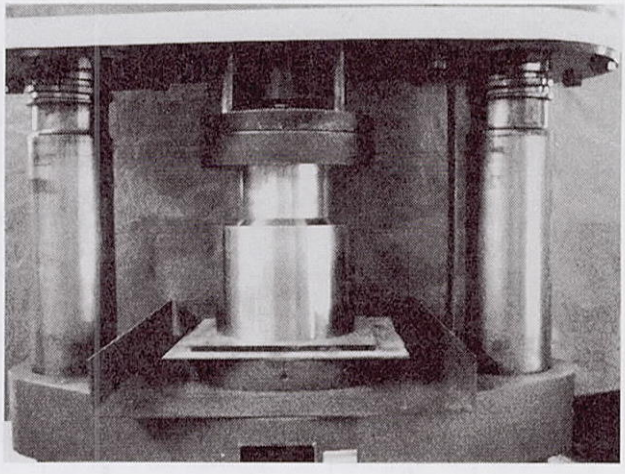
また試験容器に詰める骨材質量は，**表－2.2.15**の配分と粗骨材密度，実積率より換算した値とした。骨材質量を**表－2.2.16**に示す。

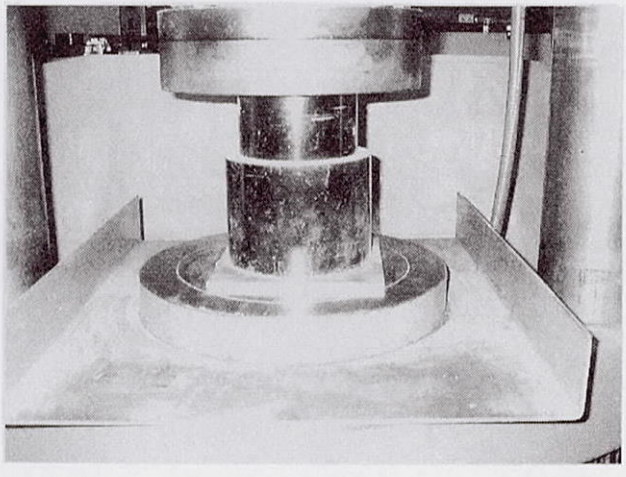
破砕試験前後のふるい分け試験結果を**表－2.2.17**，破砕値，修正破砕率および粗粒率の計算結果を，**表－2.2.18**にまとめた。

表－2.2.14　骨材粒度と載荷荷重の組み合わせ

骨材粒度	容器		載荷荷重(kN)と試験回数(回)								
	大きさ	容積	荷重設定1		荷重設定2		荷重設定3		荷重設定4		
			載荷荷重	回数	載荷荷重	回数	載荷荷重	回数	載荷荷重	回数	合計回数
2005	小	2.0 リットル	100	1	200	1	300	1	400	1	4
4005	小	2.0 リットル	100	1	200	1	300	1	400	5	8
	中	5.7 リットル	200	1	400	1	600	1	800	5	8
	大	16.0 リットル	—	—	800	1	—	—	1,600	5	6
											26







写真－2.2.2　破砕試験載荷状況

（左上：大容器，右上：中容器，左：小容器）

表－2.2.15　ふるい分け試験結果より破砕試験用試料の配分

ふるいの呼び寸法 (mm)	各ふるいに留まる量 (%)		
	4020	2005	4005換算
37.5	0.0	0.0	0.0
31.5	8.7	0.0	4.3
26.5	14.7	0.0	7.3
19	52.7	6.0	29.3
16	11.7	19.6	15.6
9.5	8.5	37.2	22.9
4.75	1.9	27.4	14.6
2.36	0.1	6.2	3.2
受皿	1.7	3.7	2.7

※

ふるいの呼び寸法 (mm)	各ふるいに留まる量 (%)		
	4020	2005	4005換算
37.5	0.0	0.0	0.0
31.5	8.8	0.0	4.4
26.5	15.0	0.0	7.5
19	53.7	6.6	30.2
16	11.9	21.7	16.8
9.5	8.7	41.3	25.0
4.75	1.9	30.4	16.1
2.36	0.0	0.0	0.0
受皿	0.0	0.0	0.0

※4.75mm未満再配分

4005換算：コンクリート配合と同じく4020と2005を1:1混合とする。

表－2.2.16　破砕試験に用いた試料の質量

ふるいの呼び寸法 (mm)	2005		4005			
	小容器 (kg)	百分率 (%)	小容器 (kg)	中容器 (kg)	大容器 (kg)	百分率 (%)
37.5	0.000	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
31.5	0.000	0.0	0.148	0.420	1.180	4.4
26.5	0.000	0.0	0.250	0.712	2.000	7.5
19	0.220	6.6	1.007	2.870	8.056	30.2
16	0.720	21.7	0.562	1.601	4.493	16.8
9.5	1.370	41.3	0.834	2.377	6.673	25.0
4.75	1.008	30.4	0.539	1.536	4.310	16.1
計	3.318	100.0	3.339	9.516	26.713	100.0

骨材密度：　2.68

実積率　：　粒度2005　61.9 %

粒度4005　62.3 %

表－2.2.17　破砕試験前後のふるい分け試験結果

粒度2005，小容器

荷重	ふるい目(mm)		37.5	31.5	26.5	19	16	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	受け皿	計
100kN	破砕前	質量(g)	0.0	0.0	0.0	220.4	720.3	1,370.4	1,007.9							3,319.0
		(%)	0.0	0.0	0.0	6.6	21.7	41.3	30.4							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	0.0	0.0	181.3	549.5	1,287.7	1,039.3	159.4	45.1	21.7	13.0	9.4	12.6	3,319.0
		(%)	0.0	0.0	0.0	5.5	16.6	38.8	31.3	4.8	1.4	0.7	0.4	0.3	0.4	100.0
200kN	破砕前	質量(g)	0.0	0.0	0.0	220.8	719.5	1,370.1	1,008.1							3,318.5
		(%)	0.0	0.0	0.0	6.7	21.7	41.3	30.4							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	0.0	0.0	194.5	409.2	1,065.3	1,061.2	321.6	119.7	60.7	34.8	23.2	28.3	3,318.5
		(%)	0.0	0.0	0.0	5.9	12.3	32.1	32.0	9.7	3.6	1.8	1.0	0.7	0.9	100.0
300kN	破砕前	質量(g)	0.0	0.0	0.0	220.0	720.1	1,370.1	1,008.1							3,318.3
		(%)	0.0	0.0	0.0	6.6	21.7	41.3	30.4							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	0.0	0.0	172.8	321.6	949.0	1,067.8	392.7	178.4	97.6	55.4	35.9	47.1	3,318.3
		(%)	0.0	0.0	0.0	5.2	9.7	28.6	32.2	11.8	5.4	2.9	1.7	1.1	1.4	100.0
400kN	破砕前	質量(g)	0.0	0.0	0.0	220.7	720.0	1,370.0	1,008.0							3,318.7
		(%)	0.0	0.0	0.0	6.7	21.7	41.3	30.4							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	0.0	0.0	176.5	295.1	863.4	994.2	454.1	223.1	127.5	76.4	50.5	57.9	3,318.7
		(%)	0.0	0.0	0.0	5.3	8.9	26.0	30.0	13.7	6.7	3.8	2.3	1.5	1.7	100.0

粒度4005，小容器

荷重	ふるい目(mm)		37.5	31.5	26.5	19	16	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	受け皿	計
100kN	破砕前	質量(g)	0.0	145.7	251.1	1,010.1	562.1	834.0	539.0							3,342.0
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	98.7	290.7	880.2	453.4	828.5	600.1	101.7	36.9	18.7	12.9	8.5	11.7	3,342.0
		(%)	0.0	3.0	8.7	26.3	13.6	24.8	18.0	3.0	1.1	0.6	0.4	0.3	0.4	100.0
200kN	破砕前	質量(g)	0.0	147.0	251.2	1,008.9	562.1	833.6	539.0							3,341.8
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	24.9	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	0.0	236.0	765.6	200.0	971.0	729.2	212.8	100.0	52.1	29.6	20.1	25.4	3,341.8
		(%)	0.0	0.0	7.1	22.9	6.0	29.1	21.8	6.4	3.0	1.6	0.9	0.6	0.8	100.0
300kN	破砕前	質量(g)	0.0	147.3	249.0	1,006.6	561.7	833.7	538.9							3,337.2
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	49.4	158.2	545.0	356.9	795.9	760.2	321.2	149.3	82.8	47.4	31.4	39.5	3,337.2
		(%)	0.0	1.5	4.7	16.3	10.7	23.8	22.8	9.6	4.5	2.5	1.4	0.9	1.2	100.0
400kN ①回目	破砕前	質量(g)	0.0	146.7	249.7	1,008.9	561.7	834.0	539.0							3,340.0
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	0.0	208.4	513.1	370.3	646.3	784.1	355.6	193.1	105.3	65.7	49.0	49.1	3,340.0
		(%)	0.0	0.0	6.2	15.4	11.1	19.4	23.5	10.6	5.8	3.2	2.0	1.5	1.5	100.0
400kN ②回目	破砕前	質量(g)	0.0	150.8	250.4	1,005.9	562.3	834.0	539.0							3,342.4
		(%)	0.0	4.5	7.5	30.1	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	0.0	361.6	397.9	313.6	676.7	764.3	381.5	184.9	102.6	63.8	42.4	53.1	3,342.4
		(%)	0.0	0.0	10.8	11.9	9.4	20.2	22.9	11.4	5.5	3.1	1.9	1.3	1.6	100.0
400kN ③回目	破砕前	質量(g)	0.0	149.1	250.2	1,007.6	561.7	833.8	539.0							3,341.4
		(%)	0.0	4.5	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	107.5	71.7	552.9	347.6	639.2	801.9	368.0	183.0	106.1	65.1	43.9	54.5	3,341.4
		(%)	0.0	3.2	2.1	16.5	10.4	19.1	24.0	11.0	5.5	3.2	1.9	1.3	1.6	100.0
400kN ④回目	破砕前	質量(g)	0.0	146.6	252.1	1,009.0	561.5	834.2	539.0							3,342.4
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							75.0
	破砕後	質量(g)	0.0	56.5	122.7	531.8	358.2	721.6	766.0	354.7	173.8	102.4	62.4	41.4	50.9	3,342.4
		(%)	0.0	1.7	3.7	15.9	10.7	21.6	22.9	10.6	5.2	3.1	1.9	1.2	1.5	100.0
400kN ⑤回目	破砕前	質量(g)	0.0	147.8	249.4	1,008.1	562.4	834.3	538.9							3,340.9
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	91.0	79.1	665.1	327.9	623.0	770.8	341.3	180.7	104.1	62.9	43.3	51.7	3,340.9
		(%)	0.0	2.7	2.4	19.9	9.8	18.6	23.1	10.2	5.4	3.1	1.9	1.3	1.5	100.0

（表－3.2.17　続き）

粒度4005，中容器

荷重	ふるい目(mm)		37.5	31.5	26.5	19	16	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	受け皿	計
200kN	破砕前	質量(g)	0.0	419.5	711.4	2,874.3	1,601.1	2,377.1	1,536.0							9,519.4
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	217.9	830.2	2,289.1	1,440.7	2,330.9	1,857.5	311.6	100.5	46.5	34.3	25.3	34.9	9,519.4
		(%)	0.0	2.3	8.7	24.0	15.1	24.5	19.5	3.3	1.1	0.5	0.4	0.3	0.4	100.0
400kN	破砕前	質量(g)	0.0	419.3	712.6	2,873.8	1,600.9	2,377.0	1,536.0							9,519.6
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	126.7	800.3	1,842.8	1,280.1	2,131.7	2,050.0	665.0	258.9	142.3	96.8	54.9	70.1	9,519.6
		(%)	0.0	1.3	8.4	19.4	13.4	22.4	21.5	7.0	2.7	1.5	1.0	0.6	0.7	100.0
600kN	破砕前	質量(g)	0.0	420.3	714.2	2,870.5	1,600.6	2,377.3	1,536.0							9,518.9
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	351.5	527.0	1,728.2	912.5	2,074.0	2,064.8	901.7	400.5	225.7	132.2	92.4	108.4	9,518.9
		(%)	0.0	3.7	5.5	18.2	9.6	21.8	21.7	9.5	4.2	2.4	1.4	1.0	1.1	100.0
800kN ①回目	破砕前	質量(g)	0.0	420.9	712.3	2,870.2	1,600.7	2,377.0	1,536.1							9,517.2
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	201.7	376.3	1,667.8	775.6	2,097.3	2,063.1	1,071.3	515.9	292.1	184.5	125.9	145.7	9,517.2
		(%)	0.0	2.1	4.0	17.5	8.1	22.0	21.7	11.3	5.4	3.1	1.9	1.3	1.5	100.0
800kN ②回目	破砕前	質量(g)	0.0	421.2	711.5	2,871.9	1,600.7	2,377.0	1,536.1							9,518.4
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	56.5	517.3	1,619.5	980.4	2,046.0	2,070.9	1,017.3	486.1	274.2	169.3	132.5	148.4	9,518.4
		(%)	0.0	0.6	5.4	17.0	10.3	21.5	21.8	10.7	5.1	2.9	1.8	1.4	1.6	100.0
800kN ③回目	破砕前	質量(g)	0.0	422.2	712.3	2,870.2	1,600.9	2,377.2	1,536.1							9,518.9
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	193.3	525.8	1,447.9	1,034.7	1,982.8	2,072.6	1,033.8	497.0	277.1	175.4	135.3	143.2	9,518.9
		(%)	0.0	2.0	5.5	15.2	10.9	20.8	21.8	10.9	5.2	2.9	1.8	1.4	1.5	100.0
800kN ④回目	破砕前	質量(g)	0.0	420.5	711.3	2,872.4	1,601.4	2,377.0	1,536.1							9,518.7
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	256.9	492.5	1,543.8	187.3	2,787.5	1,978.3	1,062.6	509.0	270.5	172.9	112.0	145.4	9,518.7
		(%)	0.0	2.7	5.2	16.2	2.0	29.3	20.8	11.2	5.3	2.8	1.8	1.2	1.5	100.0
800kN ⑤回目	破砕前	質量(g)	0.0	422.5	711.3	2,871.5	1,601.1	2,377.1	1,536.1							9,519.6
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1							100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	135.4	586.6	1,603.6	782.1	2,101.4	2,032.7	1,064.5	478.5	300.2	173.4	122.6	138.6	9,519.6
		(%)	0.0	1.4	6.2	16.8	8.2	22.1	21.4	11.2	5.0	3.2	1.8	1.3	1.5	100.0

粒度4005，大容器

荷重	ふるい目		37.5	31.5	26.5	19	16	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	受け皿	計
800kN	破砕前	質量(g)	0.0	1,178.4	1,999.0	8,055.7	4,493.7	6,672.5	4,310.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26,709
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	850.6	1,572.0	5,792.3	3,294.8	6,186.6	5,490.4	1,796.3	720.9	386.5	245.8	160.9	212.3	26,709
		(%)	0.0	3.2	5.9	21.7	12.3	23.2	20.6	6.7	2.7	1.4	0.9	0.6	0.8	100.0
1600kN ①回目	破砕前	質量(g)	0.0	1,181.5	2,000.9	8,055.2	4,492.8	6,672.9	4,310.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26,714
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	614.0	1,177.7	4,137.4	3,044.1	5,542.3	5,815.7	2,821.5	1,488.1	807.2	508.2	376.3	381.0	26,714
		(%)	0.0	2.3	4.4	15.5	11.4	20.7	21.8	10.6	5.6	3.0	1.9	1.4	1.4	100.0
1600kN ②回目	破砕前	質量(g)	0.0	1,178.4	2,001.0	8,056.1	4,492.8	6,672.7	4,310.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26,711
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	373.8	838.6	4,687.0	3,292.4	5,688.1	5,617.6	2,807.6	1,348.9	797.9	489.7	338.7	430.8	26,711
		(%)	0.0	1.4	3.1	17.5	12.3	21.3	21.0	10.5	5.0	3.0	1.8	1.3	1.6	100.0
1600kN ③回目	破砕前	質量(g)	0.0	1,180.4	1,998.9	8,055.1	4,493.0	6,672.9	4,310.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26,710
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	474.4	1,450.3	4,632.8	2,781.5	5,831.9	5,497.6	2,756.6	1,343.3	751.2	472.6	331.7	386.5	26,710
		(%)	0.0	1.8	5.4	17.3	10.4	21.8	20.6	10.3	5.0	2.8	1.8	1.2	1.4	100.0
1600kN ④回目	破砕前	質量(g)	0.0	1,182.2	1,999.5	8,055.9	4,492.9	6,672.9	4,310.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26,714
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	678.3	1,283.6	4,152.3	2,968.4	5,892.5	5,502.2	2,898.1	1,320.2	761.1	480.4	324.3	452.1	26,714
		(%)	0.0	2.5	4.8	15.5	11.1	22.1	20.6	10.8	4.9	2.8	1.8	1.2	1.7	100.0
1600kN ⑤回目	破砕前	質量(g)	0.0	1,181.3	2,000.7	8,055.4	4,493.0	6,672.8	4,310.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26,713
		(%)	0.0	4.4	7.5	30.2	16.8	25.0	16.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
	破砕後	質量(g)	0.0	551.6	1,309.2	4,350.1	2,998.1	5,677.0	5,690.7	2,794.3	1,337.5	742.7	508.6	322.2	431.2	26,713
		(%)	0.0	2.1	4.9	16.3	11.2	21.3	21.3	10.5	5.0	2.8	1.9	1.2	1.6	100.0

表－2.2.18　破砕試験結果の一覧

粒度	容器	荷重 (kN)	破砕値 ※1) (%)	修正破砕率 (%)	粗粒率			
					破砕前	破砕後		
						全量	5.0mm以下	2.5mm以下
2005	小容器	100	3.1	8.6	6.76	6.52	4.93	3.96
		200	8.0	18.9		6.21	4.82	3.91
		300	12.5	25.4		5.97	4.72	3.85
		400	16.1	28.9		5.80	4.64	3.80
4005	小容器	100	5.7	8.5	7.26	7.02	4.94	3.97
		200	13.2	22.6		6.67	4.85	3.92
		300	20.1	26.2		6.36	4.77	3.87
		400	24.5	31.1		6.18	4.69	3.83
			24.8	34.1		6.20	4.70	3.83
			24.6	31.6		6.18	4.69	3.82
			23.5	29.5		6.22	4.71	3.83
			23.5	29.6		6.25	4.70	3.83
		400平均	24.2	31.2		6.20	4.70	3.83
	中容器	200	5.8	10.3	7.26	6.98	4.94	3.97
		400	13.5	19.5		6.66	4.85	3.92
		600	19.5	24.5		6.44	4.77	3.87
		800	24.5	29.3		6.23	4.70	3.83
			23.4	28.2		6.25	4.70	3.83
			23.8	28.6		6.24	4.70	3.83
			23.9	32.1		6.27	4.71	3.84
			23.9	28.4		6.26	4.71	3.84
		800平均	23.9	29.3		6.25	4.70	3.83
	大容器	800	13.2	17.2	7.26	6.69	4.85	3.92
		1,600	23.9	28.8		6.23	4.70	3.83
			23.3	27.4		6.25	4.70	3.83
			22.6	26.3		6.31	4.72	3.84
			23.3	27.0		6.26	4.71	3.83
			23.0	27.3		6.27	4.71	3.83
		1,600平均	23.2	27.4		6.26	4.71	3.83

※1)：粒度2005では2.5mmふるいを通過する質量を対象とする。
　　：粒度4005では5.0mmふるいを通過する質量を対象とする。

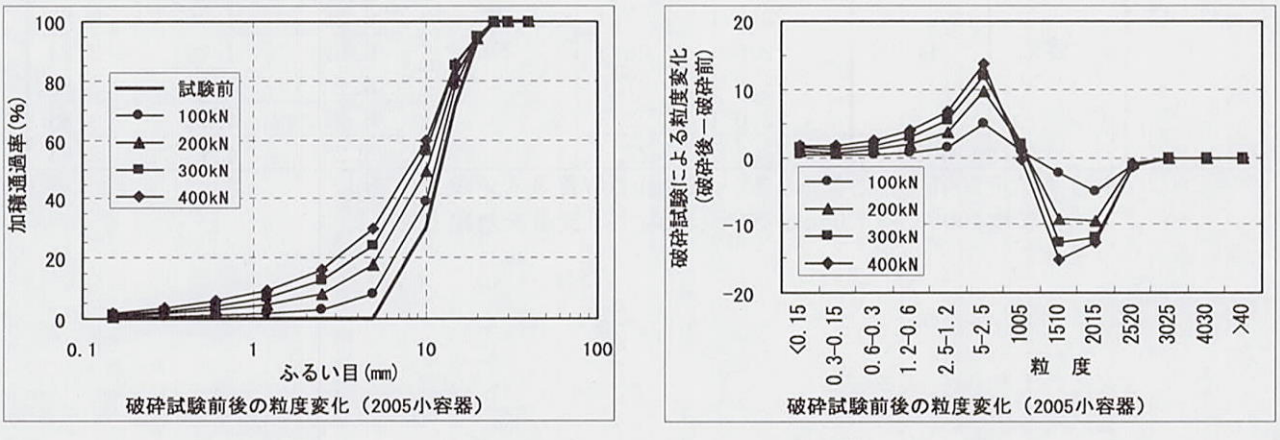
2) 破砕性に関する指標の検討

① 粒度変化

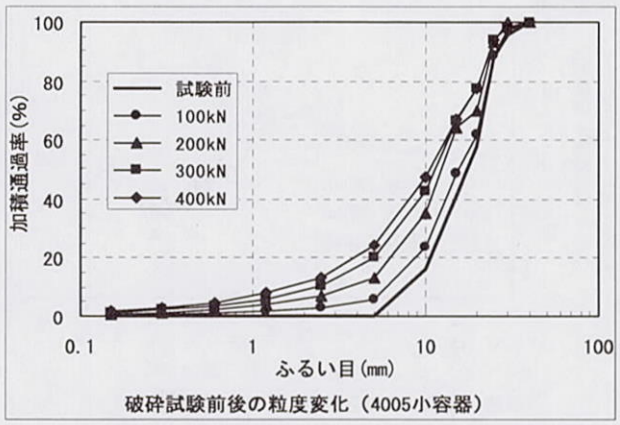
粒度 2005，4005 の 2 種類について試料容器の大きさ，載荷荷重の違いによる破砕試験前後の粒度変化を**図－2.2.18，図－2.2.19**に示す。同じ粒度の骨材を用いて荷重を変化させると，破砕前と後ではある大きさの粒径を境に大きく減少する粒度範囲と増加する粒度範囲がみられ，荷重が大きいほどその変化の割合が大きい。粒度 2005（小容器）においては粒度 1005 がその境界となっており，粒度 1510 が減少し，粒度 5-2.5 が増加している。また粒度 4005 の場合には容器の大きさに関係なく粒度 1510 がその境界に相当し，粒度 2520 が減少し，粒度 5-2.5 が増加している。粒度 2005 と 4005 で大きく減少する粒度範囲が異なるのは，骨材の最大寸法が影響しているものと考えられる。

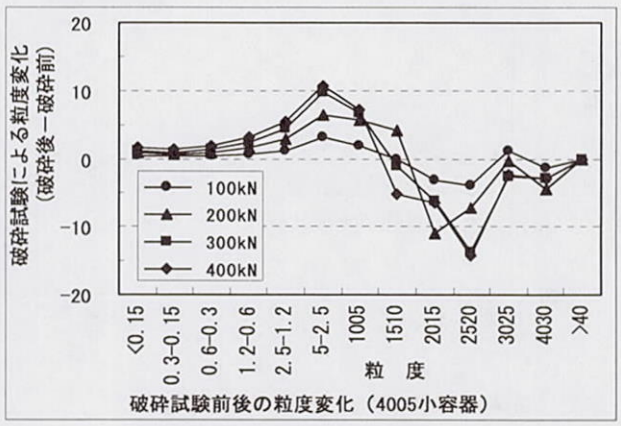
粒度 4005 の場合の容器の大きさの違いによる載荷試験前後の粒度変化を**図－2.2.20**に示す。粒度 4005 においては，載荷荷重の設定（載荷面に対する圧力）が同じであれば容器の大きさによる粒度変化に大きな相違は認められない。骨材の最大寸法 40mm までであれば，大容器を用いなくても中容器，もしくは小容器で同様な結果が得られた。ただし，骨材の最大寸法が 40mm よりも大い場合には容器への試料の詰め方が難しくなるので，適用する容器の大きさを確認する必要がある。

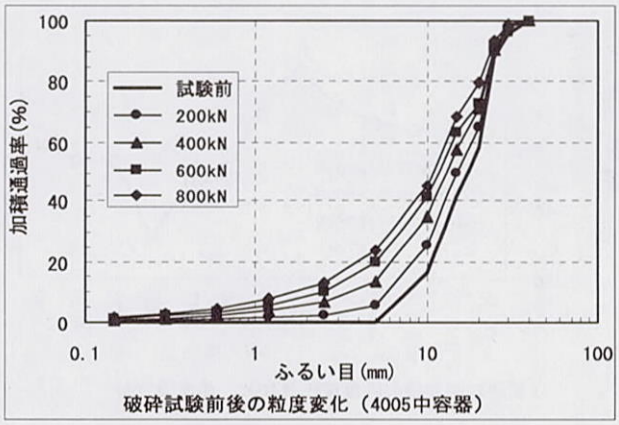
載荷試験前後の粗粒率の変化を**図－2.2.21**に示した。荷重と粗粒率の関係では両者の関係は線形に近く，粗粒率の変化から荷重が推定できる可能性がある。

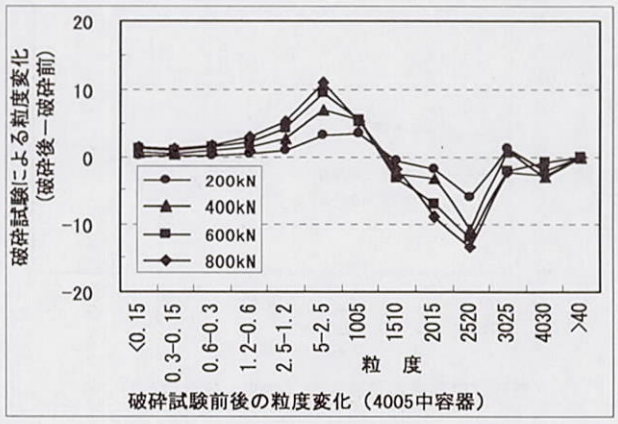


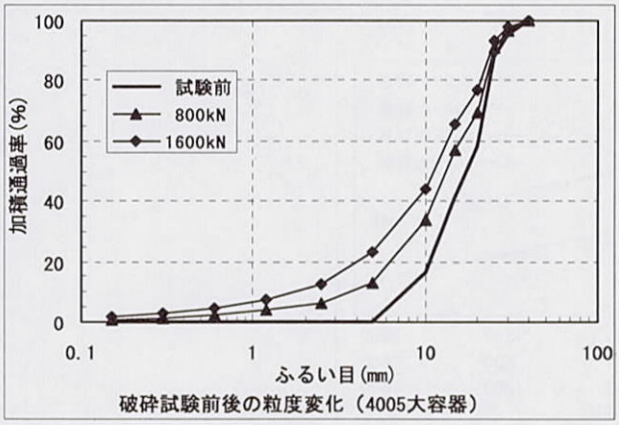
図－2.2.18　荷重の違いによる粒度変化比較（粒度 2005）

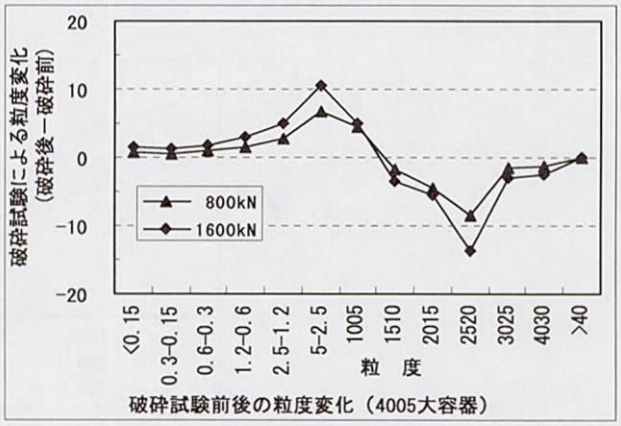




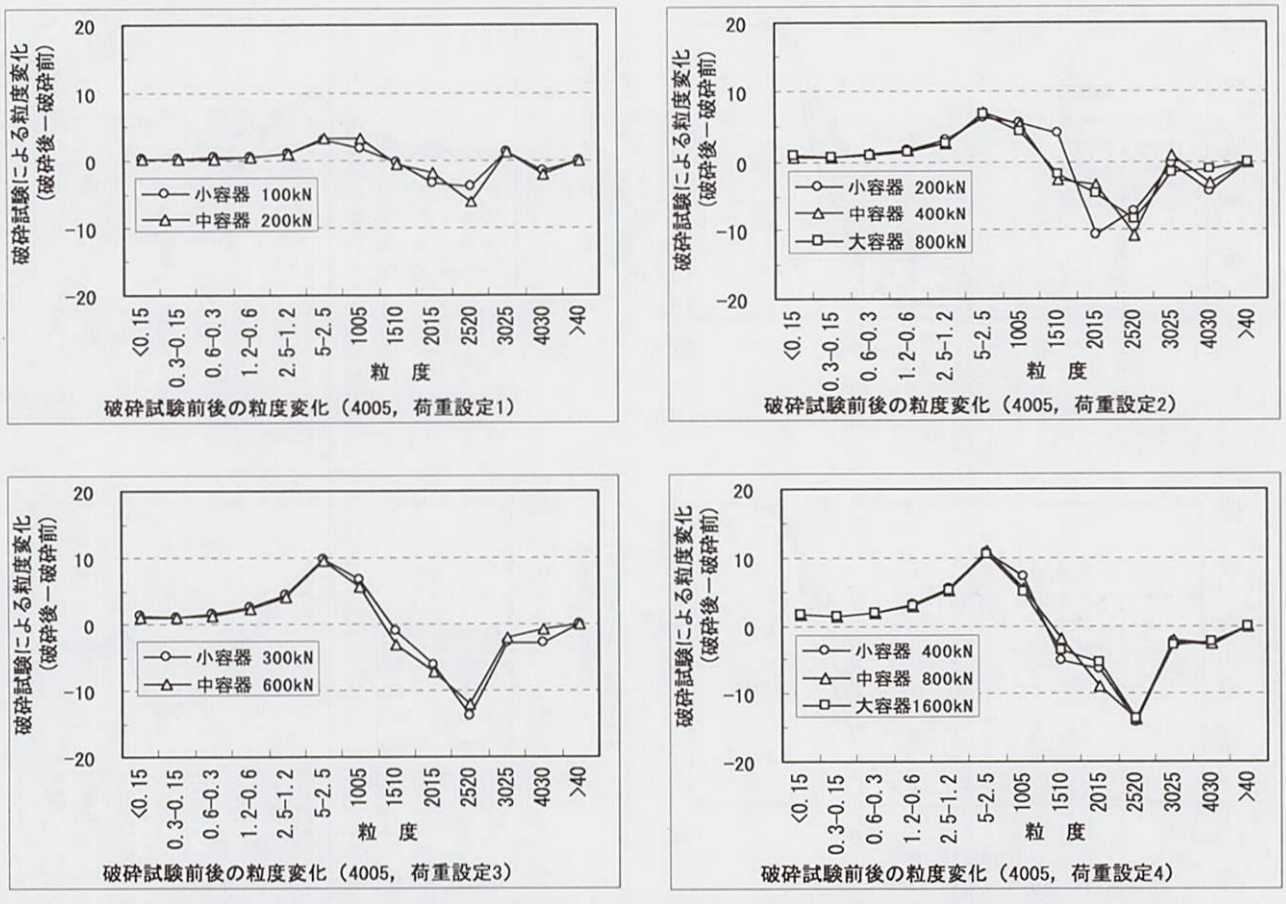




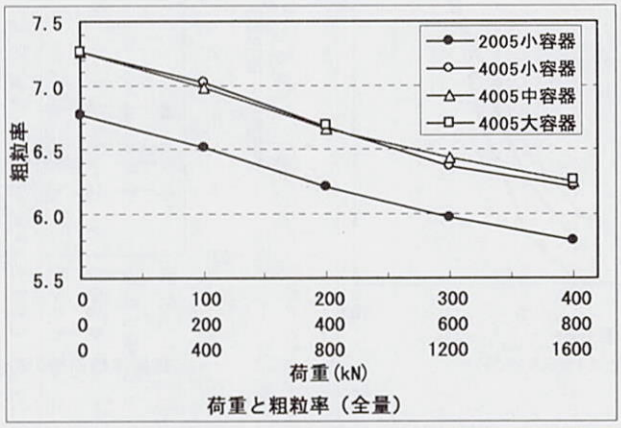




図－2.2.19　荷重の違いによる粒度変化比較（粒度 4005）



図－2.2.20　容器の違いによる粒度変化比較（粒度 4005）

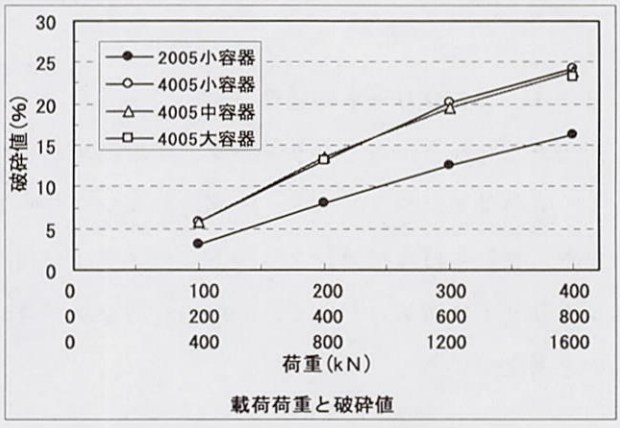


図－2.2.21　粗粒率の変化

② 破砕値

最大載荷荷重と破砕値の関係を**図－2.2.22**に示す。

同じ粒度の骨材を用いて荷重を変化させると，荷重が大きくなるほど破砕値が大きくなる線形の関係がある。荷重と破砕値との相関係数は，粒度 2005 では 0.995，粒度 4005 では載荷荷重が大きいときには容器が大きいほど線形の勾配がやや緩くなる傾向がみられるが全容器の測定値を対象とすると 0.980 である。粒度 2005 と粒度 4005 で破砕値が違っているのは，破砕値算定用のふるい目が 2.5mm，5.0mm となっているからである。

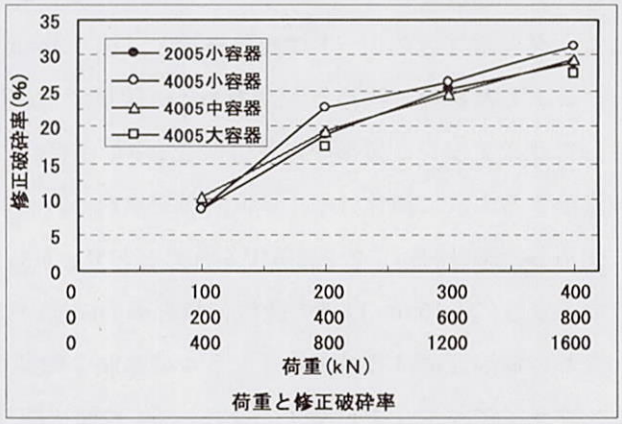


図－2.2.22　荷重と破砕値の関係

③ 修正破砕率

最大載荷荷重と修正破砕率の関係を**図－2.2.23**に示す。荷重が大きくなるほど修正破砕率も大きくなるが，荷重が大きくなるほど修正破砕率の増加分が小さく，線形は上に凸の関係がある。

粒度 4005 について中容器と大容器では，大容器の方が修正破砕率が小さい。これは容器内面の拘束の影響があるのかもしれない。また小容器の測定値が中，大容器の測定値よりも上側にばらついているのは，対象とする骨材に対して容器の大きさが小さいからだと考えられる。

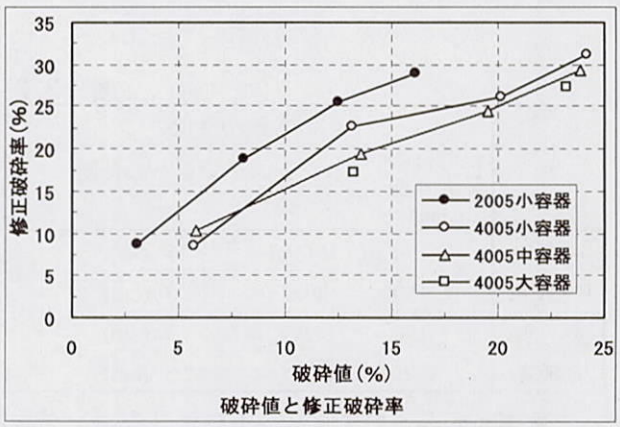


図－2.2.23　荷重と修正破砕率の関係

④ 破砕値と修正破砕率

破砕値と修正破砕率の関係を**図－2.2.24**に示す。両者の間には高い相関性のあることがわかる。

骨材の破砕性をみるのに，破砕値，修正破砕率 2 つの方法がありどちらも一長一短がある。破砕値は特定のふるい目のみを用いてふるい分け試験を行えばよいが，骨材の粒度範囲が異なる場合には比較が難しい。修正破砕率は骨材の粒度範囲が異なっていても破砕性を比較することができるが，反面ふるい分け試験に労力を費やすこととなる。対象とする骨材の粒度，試験に要する時間を鑑みて適宜選択することが必要である。



図－2.2.24　破砕値と修正破砕率の関係

3章　配合試験

3．1　コンクリートの種類

対象とした配合はコンクリートダム建設に用いられる，①ＲＣＤ用コンクリート，②ＥＬＣＭ用コンクリート，③外部用コンクリート，④高流動コンクリートの４種類である。

また，これらは今後コンクリートへのスラッジ利用の有意性が確認されることによって適用範囲がダム用コンクリートに限ることなく，一般の有スランプコンクリート，高流動コンクリートへと拡がることになるものと考えている。

3．2　配合試験による基本配合の決定

スラッジを細骨材に置換したモルタル試験，コンクリート試験を実施するに先立ち，試料を採取したダム建設現場で採用されている配合（示方配合，**表－3.2.1**）を参考にして，次のようにコンクリート配合を決めた。ダム用コンクリートは粗骨材最大寸法 150mm のフルミックス配合を 40mm ふるいでウエットスクリーニングした試料で決めた配合である。実験では 40mm 以上の粗骨材を事前に取り除いておき、水結合材比，フライアッシュ置換率は示方配合と同一割合とし，試験練りを実施し，**表－3.2.2**のコンシステンシーを満足するように細骨材率，単位水量を検討し，コンクリートの基本配合（**表－3.2.3**）を決定した。

使用した細骨材は、2.2.2項でふれたとおり、RCD用コンクリートのフルミックス配合のとき、VC値が最小になるように0.15mm 以下の微粒分量を事前に検討し、9%程度に調整されている。

なお，練混ぜには容量 100 リットルの強制２軸型ミキサを使用して，粗骨材，細骨材，スラッジ，セメント，フライアッシュをミキサに投入し 60 秒間空練りをした後，混和剤を溶解させた水を加え 120 秒（高流動のみ 180 秒）間練混ぜた。また基本配合で使用した混和剤は，示方配合で使用されている混和剤と同じＡＥ減水剤（Ｎ社製，主成分：リグニンスルホン酸化合物），高性能ＡＥ減水剤（Ｎ社製，主成分：ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体），ＡＥ剤（Ｎ社製，主成分：変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤）とした。

表－3.2.2 配合条件

	示方配合			基本配合		
	粗骨材の最大寸法 (mm)	コンシステンシーの目標	空気量の目標 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	コンシステンシーの目標	空気量の目標 (%)
ＲＣＤ	150*	ＶＣ値＝　15 (秒)	1.5±1	40	ＶＣ値＝　20 (秒)	－
ＥＬＣＭ	150*	ｽﾗﾝﾌﾟ＝　3 (cm)	3±1	40	ｽﾗﾝﾌﾟ＝　5 (cm)	4.5
外　部	150*	ｽﾗﾝﾌﾟ＝　3 (cm)	3±1	40	ｽﾗﾝﾌﾟ＝　5 (cm)	4.5
高流動	20	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ＝　62.5 (cm)	1.5±1	20	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ＝　62.5 (cm)	1.5

＊ 40mm ふるいでウェットスクリーニングした試料で試験

表－3.2.1　コンクリートの示方配合（現場配合）

配　合	水結合材比 W/(C+F) (%)	フライアッシュ置換率 F/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m³) 水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G 150mm～80mm	80mm～40mm	40mm～20mm	20mm～5mm	混和剤 AD1 (g)	AE剤 AD2 (g)
RCD	94.0	30.0	31.0	94.0	70.0	30.0	703.0	395.0	395.0	395.0	395.0	275*1	
ELCM	73.6	30.0	25.0	103.0	98.0	42.0	541.0	411.0	411.0	411.0	411.0	385*2	70*3
外　部	50.0	30.0	23.0	100.0	140.0	60.0	487.0	412.0	412.0	412.0	412.0	550*4	100*5
高流動	33.1	60.0	49.1	155.0	187.2	280.8	834.0	0.0	0.0	0.0	875.0	5,148*6	

*1:AE減水剤遅延形，使用量＝(C+F)×0.275％
*2:AE減水剤遅延形，使用量＝(C+F)×0.275％　　*3:AE剤，使用量＝(C+F)×0.0025％×20
*4:AE減水剤遅延形，使用量＝(C+F)×0.275％　　*5:AE剤，使用量＝(C+F)×0.0025％×20
*6:高性能AE減水剤標準形，使用量＝(C+F)×1.10％

表－3.2.3　コンクリートの基本配合

配　合	水結合材比 W/(C+F) (%)	フライアッシュ置換率 F/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m³) 水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G 150mm～80mm	80mm～40mm	40mm～20mm	20mm～5mm	混和剤 AD1 (g)	AE剤 AD2 (g)
RCD	94.0	30.0	47.4	133.0	99.0	42.4	1005.4	—	—	564.9	564.9	354*1	
ELCM	73.6	30.0	40.0	154.0	146.5	62.8	769.0	—	—	584.2	584.2	523*2	31.4*3
外　部	50.0	30.0	37.4	146.0	204.4	87.6	698.5	—	—	590.9	590.9	730*4	29.2*5
高流動	33.1	60.0	49.1	155.0	187.2	280.8	834.0	—	—	0.0	875.0	8,658*6	

*1:AE減水剤遅延形，使用量＝(C+F)×0.25％
*2:AE減水剤遅延形，使用量＝(C+F)×0.25％　　*3:AE剤，使用量＝(C+F)×0.0025％×6
*4:AE減水剤遅延形，使用量＝(C+F)×0.25％　　*5:AE剤，使用量＝(C+F)×0.0025％×4
*6:高性能AE減水剤標準形，使用量＝(C+F)×1.85％

３．３　微粒分率の定義

モルタル試験やコンクリート試験において，スラッジの混入量を表す指標として「微粒分率」を次のように定義した。

細骨材には，0.15mm 以下の微粒分が質量でおよそ 9.0 %含まれていることから，これと細骨材質量に置換するスラッジ質量の和を，細骨材とスラッジ質量の和で除した百分率を微粒分率と呼ぶ。

$$\text{微粒分率}=\frac{\text{細骨材中の0.15mm以下微粒分質量}+\text{スラッジ質量}}{\text{細骨材質量}+\text{スラッジ質量}}\times 100\ (\%)$$

たとえば，

「微粒分率 0.0 %」　・・・細骨材中の微粒分を取り除いたもの。（スラッジなし）

「微粒分率 9.0 %」　・・・細骨材のみをそのまま配合したもの。（スラッジなし）

「微粒分率 13.5%」　・・・スラッジを細骨材に置換して配合に加えたもの。
（微粒分率 13.5 から 9.0 差し引いた値 4.5 がスラッジの置換割合）

「微粒分率 18.0%」　・・・スラッジを細骨材に置換して配合に加えたもの。
（微粒分率 18.0 から 9.0 差し引いた値 9.0 がスラッジの置換割合）

という意味である。

4章　モルタル試験

スラッジをコンクリートに混入したときの影響を確認する前段階として，スラッジをモルタルに混入したときの品質を確認した。

コンクリートの練混ぜ性能（練混ぜ時間）については，「3章　配合試験」の試験練りにおいて確認している。しかしモルタルの場合には練混ぜ量が少なく，使用ミキサも異なることから，練混ぜ性能を確認した後にワーカビリティーと強度への影響を確認するモルタル試験を実施した。

4．1　練混ぜ時間の設定

塊状のスラッジをモルタルに混入するにあたり，スラッジ塊をできるだけ細かく粉砕し，均一に撹拌する必要がある。ここでは容量6リットルのホバート型万能ミキサを使用したときのモルタルの練混ぜ時間を決めるために，つぎの項目について試験を実施した。

○　水を除いた材料を投入したときの空練り時間の長さと，粒度分布の関係。

○　練混ぜ水を加えた後の練混ぜ時間の長さとフロー値，圧縮強度，締固め密度，動弾性係数との関係。

(1)　空練り時間の選定

スラッジを細かくする方法として，水を加える前にスラッジと細骨材を混合して撹拌（空練り）することとした。ここでは空練り時間長さと粒度分布の変化より，空練り時間長さを選定した。

1)　試験方法

屋内に放置して自然乾燥させたスラッジaと細骨材（表面水率 1.5 ～ 2.0 %）を，それぞれ 800 g づつホバート型万能ミキサに投入し（**写真－4.1.1**），空練り時間の長さの違いによる粒度分布の変化を調べた。空練り時間は 30，60，90，120，180 秒とした。

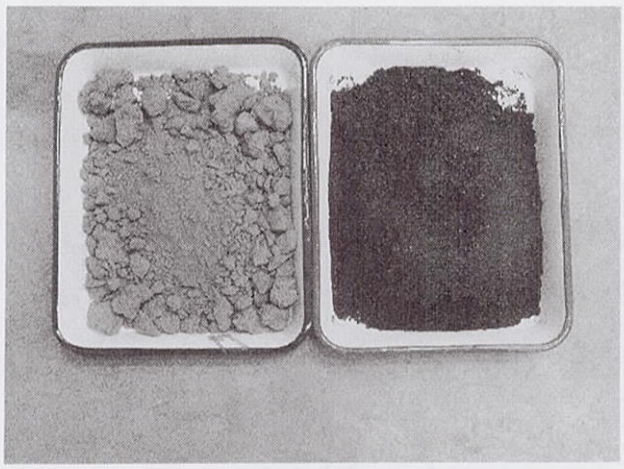
2)　試験結果

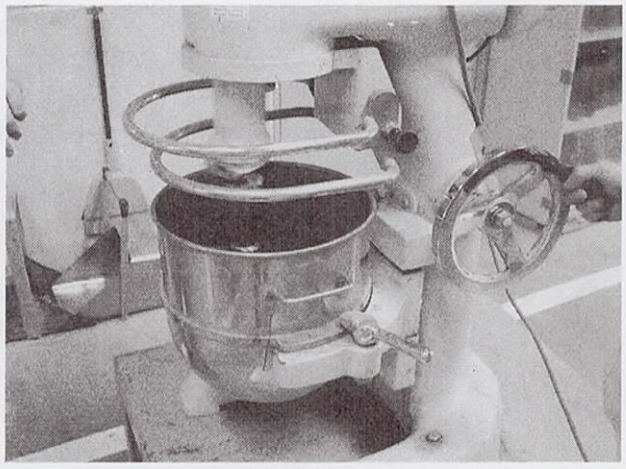
空練り時間の長さと粒度分布の関係を**表－4.1.1**，**図－4.1.1**に示す。

自然乾燥させたスラッジは塊状態であり，空練り時間を長くするほど砕かれて，粒径の小さいものが多い粒度分布となる。

3)　空練り時間

水を加えた後の練混ぜにおいても残ったスラッジ塊はさらに砕かれると考え，標準的な 60 秒を選定した。





写真－4.1.1　試料と練混ぜ状況（左：スラッジａ(左)と細骨材，右：空練り状況）

表－4.1.1　空練り時間と粒度分布

(a)　スラッジａ＋細骨材　　空練り 30秒

ふるいの呼び寸法	各ふるいに留まる質量の累計		各ふるいに留まる質量		ふるいを通る量
(mm)	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
9.5	131.8	8.3	131.8	8.3	91.7
4.75	325.8	20.5	194.0	12.2	79.5
2.36	501.6	31.6	175.8	11.1	68.4
1.18	602.0	37.9	100.4	6.3	62.1
0.6	1,019.6	64.2	417.6	26.3	35.8
受皿	1,588.2	100.0	568.6	35.8	0.0
計			1,588.2	100.0	
(0.6-9.5mm)粗粒率		1.62			

(b)　スラッジａ＋細骨材　　空練り 60秒

ふるいの呼び寸法	各ふるいに留まる質量の累計		各ふるいに留まる質量		ふるいを通る量
(mm)	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
9.5	60.9	3.8	60.9	3.8	96.2
4.75	272.7	17.1	211.8	13.3	82.9
2.36	475.5	29.9	202.8	12.7	70.1
1.18	584.9	36.8	109.3	6.9	63.2
0.6	991.1	62.3	406.2	25.5	37.7
受皿	1,591.0	100.0	599.9	37.7	0.0
計			1,591.0	100.0	
(0.6-9.5mm)粗粒率		1.50			

(c)　スラッジａ＋細骨材　　空練り 90秒

ふるいの呼び寸法	各ふるいに留まる質量の累計		各ふるいに留まる質量		ふるいを通る量
(mm)	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
9.5	58.5	3.7	58.5	3.7	96.3
4.75	259.4	16.3	200.9	12.6	83.7
2.36	463.7	29.1	204.3	12.8	70.9
1.18	559.2	35.1	95.5	6.0	64.9
0.6	958.9	60.3	399.7	25.1	39.7
受皿	1,591.1	100.0	632.2	39.7	0.0
計			1,591.1	100.0	
(0.6-9.5mm)粗粒率		1.45			

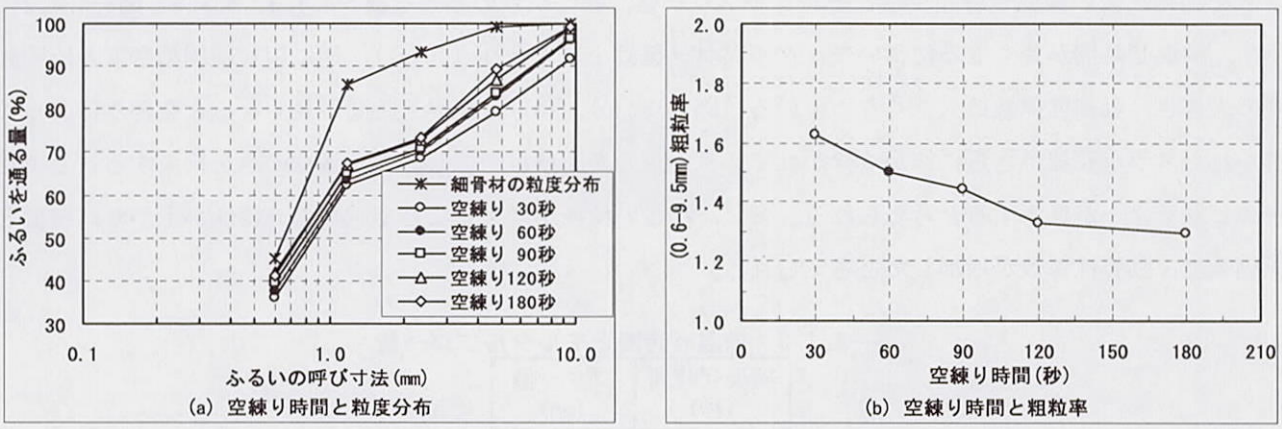
(d)　スラッジａ＋細骨材　　空練り120秒

ふるいの呼び寸法	各ふるいに留まる質量の累計		各ふるいに留まる質量		ふるいを通る量
(mm)	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
9.5	22.0	1.4	22.0	1.4	98.6
4.75	209.7	13.2	187.7	11.8	86.8
2.36	431.9	27.2	222.2	14.0	72.8
1.18	524.2	33.0	92.3	5.8	67.0
0.6	921.0	57.9	396.8	25.0	42.1
受皿	1,590.3	100.0	669.3	42.1	0.0
計			1,590.3	100.0	
(0.6-9.5mm)粗粒率		1.33			

(e)　スラッジａ＋細骨材　　空練り180秒

ふるいの呼び寸法	各ふるいに留まる質量の累計		各ふるいに留まる質量		ふるいを通る量
(mm)	(g)	(%)	(g)	(%)	(%)
9.5	12.5	0.8	12.5	0.8	99.2
4.75	169.4	10.7	156.8	9.9	89.3
2.36	423.9	26.7	254.5	16.0	73.3
1.18	520.6	32.7	96.7	6.1	67.3
0.6	933.8	58.7	413.2	26.0	41.3
受皿	1,590.4	100.0	656.6	41.3	0.0
計			1,590.4	100.0	
(0.6-9.5mm)粗粒率		1.30			

※　質量の合計が1,600ｇにならないのは，表面水が蒸発したためと考えられる。



図－4.1.1　空練り時間と粒度分布の関係

(2) 練混ぜ時間の選定

練混ぜ水を加えた後の練混ぜ時間の長さを選定するために，コンシステンシー試験（モルタルフロー値）と圧縮強度試験ほかを実施した。

1) 試験方法

スラッジａと細骨材の混合比は 1:1 として，**表－4.1.2**に示すモルタル配合とした。スラッジａと細骨材を 60 秒間空練りした後，セメント，水 を投入した。水を加えた後，練混ぜ時間 30 秒毎に通算 180 秒となるまでモルタルフロー値（JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠。）を測定するとともに，物性試験用の供試体φ5×10cm を 3 本ずつ作製（JSCE-F 506「モルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験用円柱供試体の作り方」に準拠。）した。

物性試験は材齢 4 日時点で，単位容積質量，超音波法と共振法による動弾性係数（超音波伝搬速度測定，動弾性係数試験（JIS A 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数試験方法」に準拠。)），圧縮強度試験（JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠。）をそれぞれ実施した。

表－4.1.2 モルタルの配合

W/C (%)	S/C (%)	W (kg/m^3)	C (kg/m^3)	S (kg/m^3)	Sa (kg/m^3)
50.0	54.2	409.7	819.4	443.9	443.9

2) 試験結果

水を加えた後の練混ぜ時間長さとモルタルフロー値，物性試験の結果を**表－4.1.3，4.1.4，図－4.1.2**に示す。練混ぜ時間が長くなるに従いモルタルフロー値は小さくなり（図(a)），逆に相対締固め密度と圧縮強度の大きさ，動弾性係数は大きくなっている（図(b)，(c)，(d)）。練混ぜ時間が長くなると空練りによって砕かれたスラッジ塊がさらに細かく砕かれてスラッジの表面積が増加し，より多くの水を拘束することでワーカビリティーが低下すると考えられる。また，小さい粒径が増えることで試料の充填性が上がり，密度と圧縮強度，動弾性係数が増加したと考えられる。

表－4.1.3 練混ぜ時間とモルタルフロー値

練混ぜ時間 (秒)	フロー値 (mm)
30	147
60	138
90	138
120	133
180	134

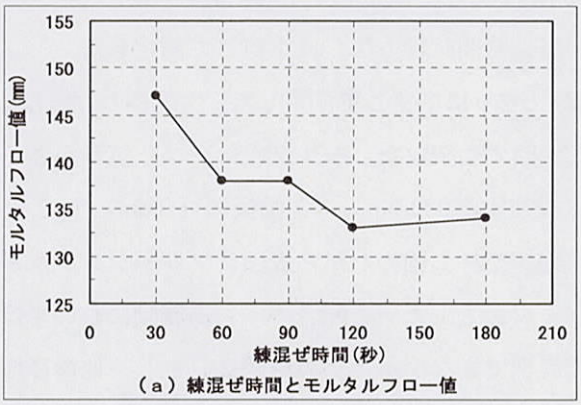
3) 練混ぜ時間

練混ぜ時間の長さに対するモルタルのワーカビリティーと，圧縮強度の大きさは相反する傾向を示す。しかし練混ぜ時間 60 秒付近から以降はフロー値，圧縮強度の大きさがほぼ収束し始めていることから，練混ぜ時間 60 秒とした。練混ぜ時間を 60 秒としたときのフロー値は，練混ぜ時間 30 秒のフロー値の 94 %，相対締固め密度と圧縮強度は，練混ぜ時間 180 秒と比べ 99 %・88 %であった。

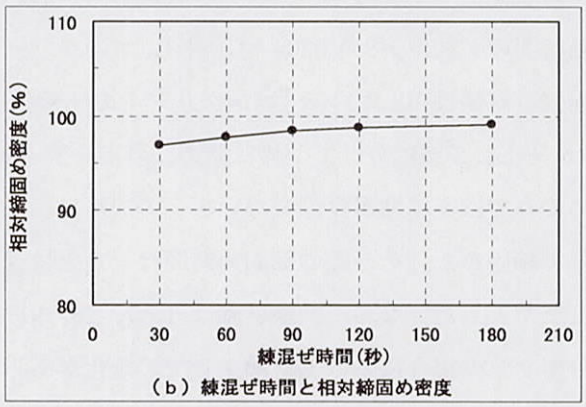
表－4.1.4　練混ぜ時間と物性試験結果

練り混ぜ時間（秒）	単位容積質量			圧縮試験		超音波法			共振法	
	長さ（mm）	質量（g）	単位容積質量（kg/m^3）	最大荷重（kN）	圧縮強度（N/mm^2）	伝搬時間（μs）	伝搬速度（km/s）	動弾性係数（kN/mm^2）	共鳴振動数（Hz）	動弾性係数（kN/mm^2）
30	97.5	393.0	2,052	34.3	17.5	33.3	2.929	15.5	13,201	13.6
	98.3	396.3	2,054	33.3	17.0	35.0	2.808	14.3	12,901	13.2
	98.6	395.3	2,041	33.4	17.0	35.0	2.818	14.3	12,889	13.2
（平均）			2,049		17.1		2.852	14.7		13.3
60	99.3	404.7	2,075	41.8	21.3	33.8	2.938	15.8	13,441	14.8
	97.2	394.9	2,070	42.4	21.6	34.0	2.858	14.9	13,711	14.7
	99.4	403.2	2,065	44.2	22.5	35.1	2.833	14.6	13,551	15.0
（平均）			2,070		21.8		2.876	15.1		14.8
90	98.6	403.9	2,086	45.5	23.2	34.0	2.901	15.5	13,769	15.4
	99.5	408.5	2,090	43.2	22.0	34.3	2.902	15.5	13,477	15.0
	98.8	403.3	2,079	44.4	22.6	34.0	2.906	15.5	13,688	15.2
（平均）			2,085		22.6		2.903	15.5		15.2
120	98.2	401.6	2,084	44.6	22.7	33.3	2.947	16.0	13,649	15.0
	97.3	400.4	2,096	46.3	23.6	32.5	2.994	16.6	14,083	15.7
	99.8	410.6	2,095	45.5	23.2	33.6	2.971	16.3	13,541	15.3
（平均）			2,091		23.2		2.971	16.3		15.3
180	97.2	399.5	2,093	47.9	24.4	32.7	2.973	16.3	14,019	15.6
	98.7	407.2	2,101	49.2	25.1	33.3	2.965	16.3	13,841	15.7
	98.6	406.5	2,099	49.4	25.2	33.4	2.953	16.2	13,866	15.7
（平均）			2,097		24.9		2.964	16.3		15.6

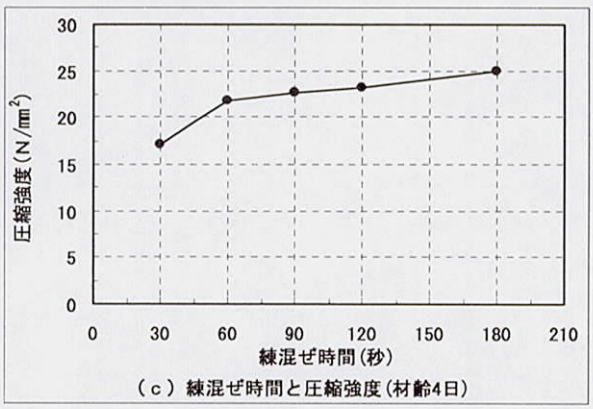
供試体寸法：φ50×100mm



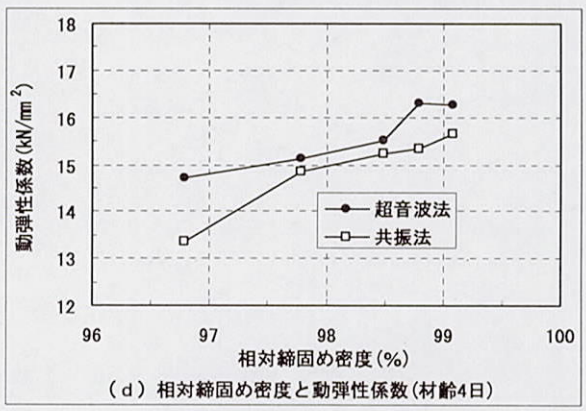
（a）練混ぜ時間とモルタルフロー値



（b）練混ぜ時間と相対締固め密度



（c）練混ぜ時間と圧縮強度(材齢4日)



（d）相対締固め密度と動弾性係数(材齢4日)

図－4.1.2　モルタルの物性試験結果

４．２　モルタル試験

４．２．１　モルタル配合

モルタル試験の配合は，コンクリート基本配合での単位容積（V_1）と，基本配合において粗骨材を取り除いたときの単位容積（V_2）の比率（V_1/V_2）を，水，セメント，フライアッシュ，細骨材それぞれの容積に再配分，質量換算した配合とした。スラッジは採取した状態（含水率およそ 30 %）のスラッジａ，スラッジｂそれぞれ単独の場合と，スラッジａとスラッジｂを 1:1 混合したもの（「Sab」）の 3 種類を用いて，細骨材に置換して用いた。

モルタル試験に用いた配合を**表－4. 2. 1**に示す。

４．２．２　試験項目と試験方法

試験は**表－4. 2. 1**に示した 46 通りの配合についてフロー試験と空気量試験，凝結試験，圧縮強度試験を実施した。モルタルの練混ぜには容量 6 リットルのホバート型万能ミキサを使用し，細骨材とスラッジを投入して 60 秒間の空練りを行い，セメント，フライアッシュ，水を入れてさらに 60 秒間の練混ぜを行った。

モルタルのフロー値は JIS R 5201「セメントの物理試験方法　11.フロー試験」，空気量は JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に準拠して測定した。また，練混ぜ直後（0 時間）と 1 時間ごとに 5 時間までフロー値と空気量の経時変化を測定するとともに，打撃回数 0 回（0 打）と 5 回ごとにフロー値を測定した。なお高流動配合については，打撃なしでフロー値とフロー停止時間を測定した。なおフロー値が 100mm の場合には 1 時間後の経時変化を測定した後，測定を中止した。

凝結時間の試験は JIS A 6204 付属書 1「コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠して測定した。

圧縮強度試験は JIS R 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して測定した。供試体の寸法はφ 5 × 10cm とし，3 層に分けて型枠に詰め，各層を突き棒で 25 回ずつ突いた。モルタルのフロー値が小さく突き固めのみでは充填性が良好でない場合の成形は振動台（振動数 3,000rpm，上下動振幅 1.0mm）上で 3 層に分けて締固めた。その際の締固め時間は一定とはせず，鋼棒で押し固めながら表面にブリージング水が滲む程度までとした。なお，試験材齢は 1，7，28，91 日の 4 材齢とした（4 配合のうち高流動については，微粒分率 9 %の場合において材齢 1 日での硬化が不十分で脱型できなかったため材齢 2 日とし，他の微粒分率の場合にも材齢 2 日とした）。

表－4.2.1　モルタルの配合

配　合	スラッジの種類	微粒分率(%)	単位量(kg/m³)						混和剤 AD1 (g)	混和剤 AD2 (g)
			水 W	セメント C	ﾌﾗｲｱｯｼｭ F	細骨材 S	スラッジa Sa	スラッジb Sb		
RCD	なし	0.0	232.6	173.2	74.2	1758.3			619*1	
		9.0				1758.3				
	Sa	18.0				1600.1	158.2			
		27.0				1441.8	316.5			
		36.0				1283.6	474.7			
	Sab	13.5				1679.2	39.6	39.6		
		18.0				1600.1	79.1	79.1		
		22.5				1520.9	118.7	118.7		
	Sb	11.0				1723.2		35.2		
		13.5				1679.2		79.1		
		18.0				1600.1		158.2		
ELCM	なし	0.0	283.4	269.6	115.5	1414.9			963*2	57.8*3
		9.0				1414.9				
	Sa	13.5				1351.2	63.7			
		18.0				1287.5	127.3			
		27.0				1160.2	254.7			
		36.0				1032.9	382.0			
	Sab	13.5				1351.2	31.8	31.8		
		18.0				1287.5	63.7	63.7		
		22.5				1223.9	95.5	95.5		
	Sb	11.0				1386.6		28.3		
		13.5				1351.2		63.7		
		18.0				1287.5		127.3		
		27.0				1160.2		254.7		
外　部	なし	0.0	271.3	379.8	162.8	1297.8			1,356*4	54.3*5
		9.0				1297.8				
	Sa	13.5				1239.4	58.4			
		18.0				1181.0	116.8			
		27.0				1064.2	233.6			
		36.0				947.4	350.4			
	Sab	13.5				1239.4	29.2	29.2		
		18.0				1181.0	58.4	58.4		
		22.5				1122.6	87.6	87.6		
	Sb	11.0				1271.8		26.0		
		13.5				1239.4		58.4		
		18.0				1181.0		116.8		
高流動	なし	9.0	231.8	280.0	420.0	1247.4			12,950*6	
	Sa	11.0				1222.5	24.9			
		13.5				1191.3	56.1			
		15.5				1166.3	81.1			
		18.0				1135.2	112.3			
	Sab	11.0				1222.5	12.5	12.5		
		13.5				1191.3	28.1	28.1		
		15.5				1166.3	40.5	40.5		
	Sb	11.0				1222.5		24.9		
		13.5				1191.3		56.1		

計 46ケース

*1:AE減水剤遅延形，使用量=(C+F)×0.25%

*2:AE減水剤遅延形，使用量=(C+F)×0.25%　　*3:AE剤，使用量=(C+F)×0.0025%×6

*4:AE減水剤遅延形，使用量=(C+F)×0.25%　　*5:AE剤，使用量=(C+F)×0.0025%×4

*6:高性能AE減水剤標準形，使用量=(C+F)×1.85%

４．２．３　モルタル試験結果

(1)　フロー試験結果

配合別フロー値および空気量の経時変化測定結果を**表－4.2.2～4.2.5**と（表において空気量が 20 %より大きい場合は「>20.0」と表示している。），**図－4.2.1～4.2.4**，（図においてグラフ下方の表示は「配合－スラッジの種類－微粒分率」を表わしている。）に示し，配合別の微粒分率と練混ぜ直後のフロー値（打撃回数 15 回）の関係を**図－4.2.5**に示した。

スラッジの種類による区分では，スラッジａ混入によるフロー値の低減割合よりも，スラッジｂ混入による低減割合が大きい。また，スラッジａとスラッジｂを 1:1 混合した場合（Sab）のフロー値は，スラッジ混入率が高くなるに従い，Sb の値に近づく傾向がみられる。スラッジａ，ｂを同一割合で混入しても，比表面積の大きいスラッジｂの方が表面に水を拘束しやすく，ゼータ電位も小さいので分散しにくく，フロー値への影響が大きいものと考えられる。

つぎに配合別フロー値の変化では，ＲＣＤ配合においてスラッジを加えていない微粒分 9.0 %の練混ぜ直後で，フローの広がりがわずかであった（フロー値 103mm)。スラッジを混入したときの経時変化のフロー値測定では，モルタルはペースト状態よりも砂状のパサパサ状態であり，打撃によりモルタルが崩れたりしたケースもあることから，フロー値での評価が難しい。またＥＬＣＭ配合と外部配合では，微粒分率増加によるフロー値低下の傾向がよく似ている。スラッジを混入した場合の影響を比較してみると，外部配合の方がわずかではあるがフロー値低下の割合が小さい。これは細骨材率が小さい分，同一微粒分率でも細骨材に置換されるスラッジ量が少ないことから，その比表面積増大量も少ないことが要因と考えられる。高流動配合は細骨材率が 49.1 %と最も大きいだけに，スラッジ混入率の増大に対してフロー値の低減割合が大きくなっている。

これら，微粒分率とスラッジの種類を変動因子とした４配合のモルタルフロー試験より，微粒分率が増加することによって，モルタルフロー値が低下すること。フロー値低下の割合は細骨材率が小さい配合の方が少ないこと。さらに平均粒径が大きく，かつ比表面積の小さなスラッジａを置換した方がフロー値低下の影響度合いが小さいことを確認した。

表－4.2.2　フロー値と空気量の経時変化（ＲＣＤ配合）

ｽﾗｯｼﾞの種類	微粒分率(%)	経過時間(時間)	フロー値(mm) 0打	5打	10打	15打	空気量(%)
なし	0.0	0	100	102	108	117	6.8
		1	100	102	102	111	9.1
		2	100	101	101	104	8.2
		3	100	100	101	109	11.9
		4	100	100	103	122	14.2
		5	100	102	108	114	14.5
なし	9.0	0	99	101	102	103	6.4
		1	99	99	104	108	8.0
		2	98	104	114	121	8.9
		3	99	99	102	109	10.9
		4	100	104	142	153	>20.0
		5	99	104	113	121	18.0
Sa	18.0	0	99	100	100	100	3.2
		1	99	100	102	103	5.7
		2	99	100	100	100	13.0
		3	100	100	102	103	17.3
		4	100	136	150	154	>20.0
		5	100	101	141	161	>20.0
	27.0	0	100	100	100	101	6.5
		1	99	100	100	100	15.0
		2	99	100	101	102	>20.0
		3	99	101	116	132	>20.0
		4	99	114	123	135	>20.0
		5	99	136	121	135	>20.0
	36.0	0	99	100	100	101	12.5
		1	99	101	113	119	>20.0
		2	100	108	120	132	>20.0
		3	100	130	147	155	>20.0
		4	99	111	143	153	>20.0
		5	99	131	169	176	>20.0
Sab	13.5	0	99	100	100	100	6.2
		1	100	100	100	100	8.2
		2	99	100	100	100	11.6
		3	89	99	100	100	17.0
		4	99	100	100	100	17.7
		5	99	100	100	100	>20.0
	18.0	0	100	100	100	100	10.6
		1	99	100	100	100	11.7
		2	99	100	100	100	>20.0
		3	—	—	—	—	—
		4	—	—	—	—	—
		5	—	—	—	—	—
	22.5	0	100	100	100	100	16.9
		1	100	100	100	100	>20.0
		2	100	—	—	—	>20.0
		3	—	—	—	—	—
		4	—	—	—	—	—
		5	—	—	—	—	—
Sb	11.0	0	99	99	100	101	5.2
		1	99	99	100	100	7.9
		2	99	100	100	100	12.6
		3	100	100	100	100	13.4
		4	100	100	100	100	16.8
		5	99	100	100	100	17.6
	13.5	0	99	100	100	100	10.4
		1	99	99	100	100	12.1
		2	99	100	100	100	19.5
		3	99	100	100	100	>20.0
		4	—	—	—	—	—
		5	—	—	—	—	—
	18.0	0	100	99	100	100	17.0
		1	100	101	99	99	>20.0
		2	99	—	—	—	>20.0
		3	—	—	—	—	—
		4	—	—	—	—	—
		5	—	—	—	—	—

表－4.2.3　フロー値と空気量の経時変化（ＥＬＣＭ配合）

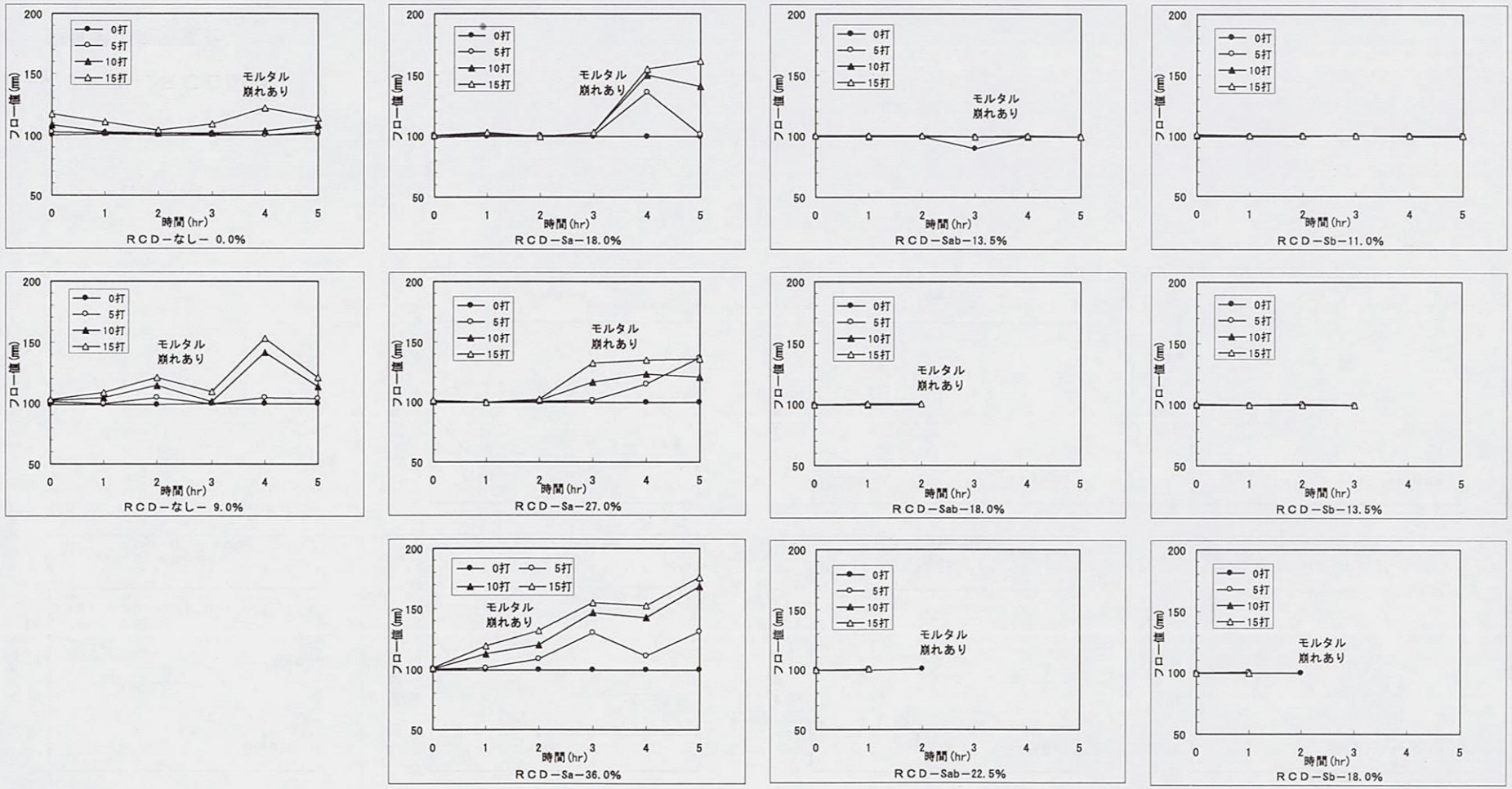
ｽﾗｯｼﾞの種類	微粒分率(%)	経過時間(時間)	フロー値(mm) 0打	5打	10打	15打	空気量(%)
なし	0.0	0	128	192	226	251	6.6
		1	115	167	198	222	5.9
		2	116	168	199	223	7.3
		3	111	150	175	193	7.2
		4	108	142	163	178	7.4
		5	105	127	145	159	8.0
なし	9.0	0	129	182	213	234	1.8
		1	103	127	148	165	2.8
		2	102	123	138	156	3.4
		3	100	116	130	143	3.9
		4	98	110	120	128	4.4
		5	98	104	111	117	5.7
Sa	13.5	0	126	173	193	220	2.3
		1	105	132	143	166	2.4
		2	102	120	136	148	2.7
		3	101	114	120	130	3.6
		4	100	112	112	121	4.2
		5	100	102	109	112	4.6
	18.0	0	111	145	165	181	2.3
		1	104	126	141	152	2.3
		2	101	114	124	133	2.1
		3	100	106	111	114	2.5
		4	100	105	106	109	3.0
		5	101	103	105	106	4.5
	27.0	0	101	113	123	130	2.7
		1	100	106	111	117	3.4
		2	102	105	108	111	3.1
		3	100	103	104	106	2.5
		4	99	100	101	101	4.6
		5	99	99	99	100	6.4
	36.0	0	101	108	111	114	5.8
		1	100	103	105	106	4.4
		2	100	100	101	101	4.3
		3	98	99	99	99	5.2
		4	99	99	99	99	6.6
		5	99	100	100	100	8.0
Sab	13.5	0	109	146	168	182	12.5
		1	105	132	151	163	10.9
		2	102	118	128	138	8.6
		3	101	107	112	116	7.6
		4	100	104	106	107	5.9
		5	100	103	104	105	5.8
	18.0	0	102	112	120	125	4.7
		1	100	105	108	109	3.9
		2	100	103	104	106	3.6
		3	100	100	101	102	4.2
		4	99	100	100	101	5.3
		5	99	100	100	101	4.3
	22.5	0	102	105	107	108	4.2
		1	99	100	100	100	12.7
		2	100	100	100	100	14.1
		3	100	100	100	100	>20.0
		4	—	—	—	—	—
		5	—	—	—	—	—
Sb	11.0	0	116	164	188	204	11.9
		1	108	143	164	179	10.5
		2	103	125	139	152	9.4
		3	102	111	120	127	8.3
		4	100	106	110	113	7.6
		5	100	104	107	108	7.5
	13.5	0	103	122	135	145	8.4
		1	101	111	117	123	7.4
		2	100	102	107	110	5.0
		3	100	102	104	105	5.4
		4	99	101	102	103	6.0
		5	99	100	101	102	7.0
	18.0	0	101	103	105	105	4.3
		1	99	99	89	89	12.2
		2	99	99	99	99	13.1
		3	99	99	99	99	19.5
		4	99	100	100	100	>20.0
		5	99	100	100	100	>20.0
	27.0	0	99	99	99	100	14.0
		1	100	—	—	—	>20.0
		2	99	—	—	—	>20.0
		3	—	—	—	—	—
		4	—	—	—	—	—
		5	—	—	—	—	—

表－4.2.4　フロー値と空気量の経時変化(外部配合)

ｽﾗｯｼﾞの種類	微粒分率(%)	経過時間	フロー値(mm) 0打	5打	10打	15打	空気量(%)
なし	0.0	0	172	217	244	262	5.5
		1	127	174	200	221	5.9
		2	122	174	198	221	5.7
		3	118	164	192	211	6.5
		4	117	160	185	201	6.7
		5	113	150	175	194	6.9
なし	9.0	0	137	176	199	216	1.3
		1	109	147	170	188	2.4
		2	106	137	158	173	2.6
		3	102	127	144	160	3.0
		4	102	122	138	151	3.3
		5	100	112	123	133	3.7
Sa	13.5	0	118	160	170	185	12.9
		1	104	130	144	160	8.6
		2	103	124	133	150	6.8
		3	102	116	128	138	4.9
		4	100	111	123	128	3.9
		5	100	109	115	112	5.9
	18.0	0	107	141	161	175	7.3
		1	102	118	132	144	5.6
		2	101	115	125	134	5.3
		3	101	110	119	128	4.7
		4	99	107	112	116	4.1
		5	100	106	109	112	4.4
	27.0	0	102	112	119	125	3.4
		1	101	105	108	112	2.9
		2	101	107	110	114	4.1
		3	99	102	103	105	3.9
		4	99	100	100	102	3.9
		5	99	99	99	100	3.0
	36.0	0	101	105	108	110	4.5
		1	99	100	101	101	4.1
		2	99	100	100	100	3.1
		3	99	99	99	99	7.4
		4	99	99	100	100	11.5
		5	100	99	100	99	12.0
Sab	13.5	0	104	133	153	169	8.4
		1	102	118	129	141	6.8
		2	102	109	115	120	6.2
		3	100	103	106	109	5.2
		4	100	103	106	108	5.3
		5	99	102	103	104	4.9
	18.0	0	102	106	109	111	4.1
		1	101	103	104	106	3.3
		2	99	100	102	102	4.2
		3	99	100	101	101	4.6
		4	99	99	100	100	8.6
		5	99	100	100	100	7.8
	22.5	0	100	103	104	105	5.5
		1	99	100	100	100	16.2
		2	100	100	100	100	>20.0
		3	100	100	100	99	>20.0
		4	—	—	—	—	—
		5	—	—	—	—	—
Sb	11.0	0	110	155	179	198	12.2
		1	106	141	162	178	9.8
		2	103	126	143	156	8.4
		3	102	116	128	139	7.0
		4	102	109	117	123	6.4
		5	100	106	110	114	5.3
	13.5	0	102	115	124	132	5.6
		1	101	105	109	112	5.3
		2	100	105	107	109	3.4
		3	100	101	103	103	4.6
		4	99	100	100	101	6.4
		5	99	99	100	99	7.0
	18.0	0	99	101	102	102	4.7
		1	99	99	99	99	14.0
		2	99	99	99	99	20.0
		3	99	100	99	99	19.5
		4	99	100	100	100	>20.0
		5	99	99	99	100	>20.0

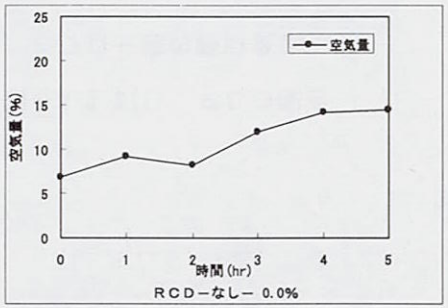
表－4.2.5　フロー値と空気量の経時変化(高流動配合)

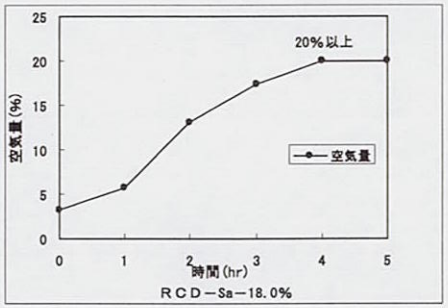
ｽﾗｯｼﾞの種類	微粒分率(%)	経過時間	フロー フロー値(mm)	停止時間(秒)	空気量(%)
なし	9.0	0	351	50	1.1
		1	313	48	1.1
		2	302	56	1.7
		3	305	66	1.6
		4	306	64	1.9
		5	291	73	2.6
Sa	11.0	0	325	63	1.7
		1	321	71	1.4
		2	321	78	2.2
		3	313	82	2.8
		4	303	81	3.3
		5	270	67	3.4
	13.5	0	255	35	4.0
		1	257	52	2.0
		2	206	42	2.2
		3	159	26	2.4
		4	124	7	2.9
		5	112	1	3.4
	15.5	0	237	26	3.9
		1	208	31	3.0
		2	155	27	3.4
		3	124	14	2.7
		4	109	7	3.3
		5	106	3	2.9
	18.0	0	108	1	3.8
		1	104	1	3.4
		2	—	—	—
		3	—	—	—
		4	—	—	—
		5	—	—	—
Sab	11.0	0	262	30	3.4
		1	229	36	2.8
		2	179	37	2.6
		3	135	18	3.5
		4	113	7	2.7
		5	106	2	3.2
	13.5	0	104	1	5.5
		1	101	1	4.7
		2	101	1	4.5
		3	—	—	—
		4	—	—	—
		5	—	—	—
	15.5	0	101	1	5.2
		1	100	1	5.8
		2	—	—	—
		3	—	—	—
		4	—	—	—
		5	—	—	—
Sb	11.0	0	163	17	4.1
		1	109	7	4.0
		2	104	3	3.6
		3	103	2	3.6
		4	102	1	4.4
		5	101	1	4.3
	13.5	0	100	1	6.4
		1	100	1	6.7
		2	—	—	—
		3	—	—	—
		4	—	—	—
		5	—	—	—

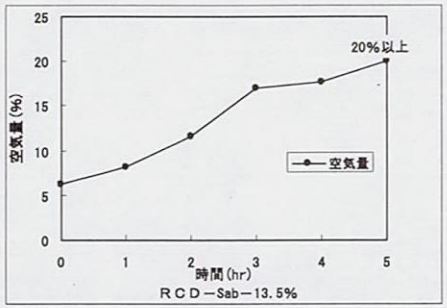


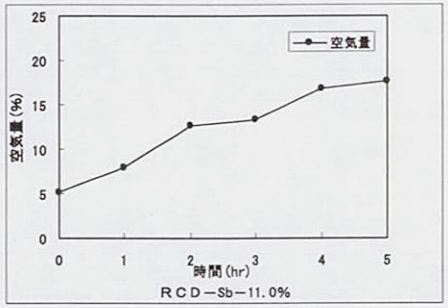
図－4.2.1(1)　ＲＣＤ配合

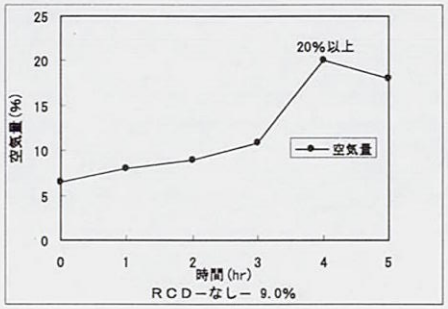
フロー値の経時変化

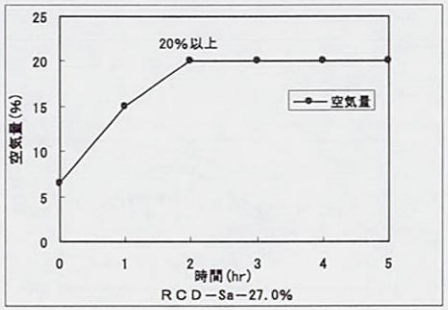


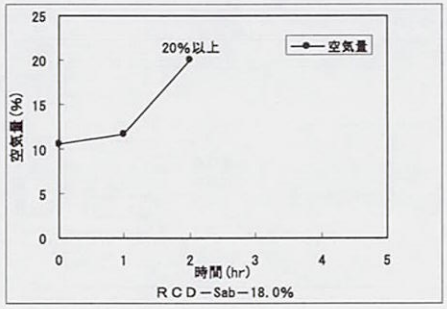


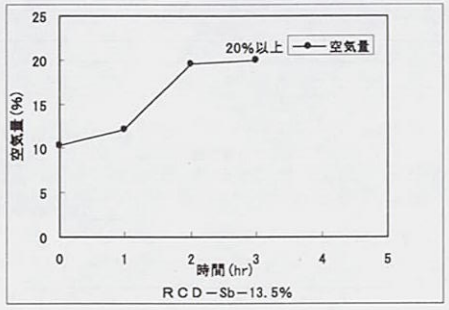


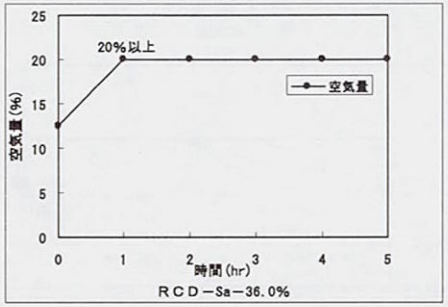


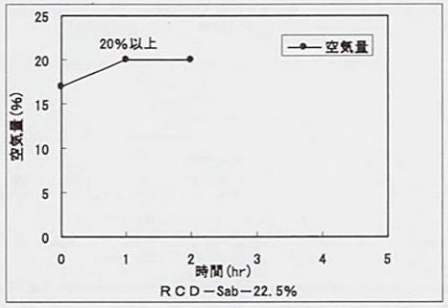


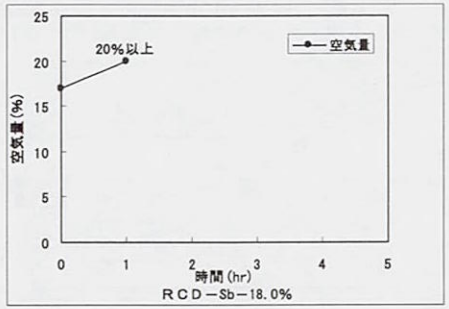




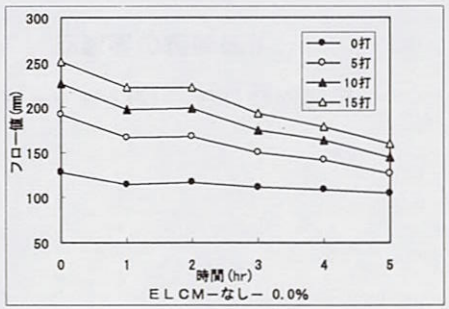


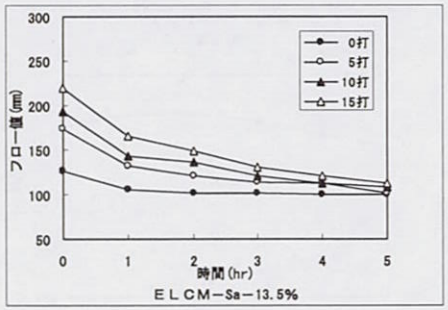


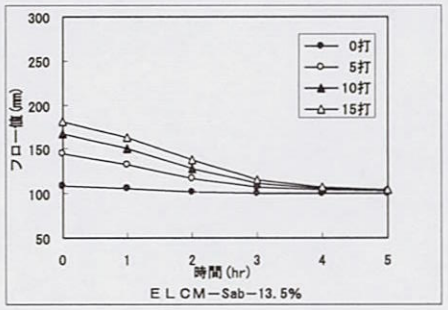


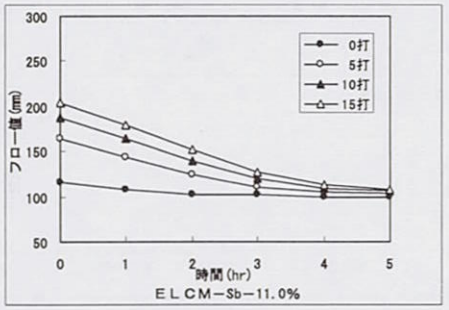


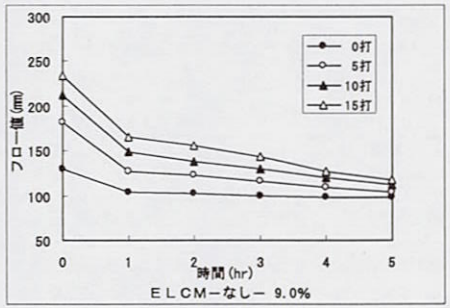
図－4.2.1(2)　ＲＣＤ配合
空気量の経時変化

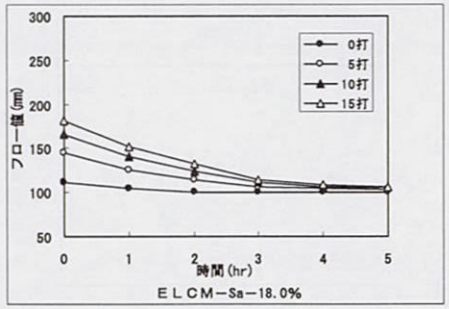


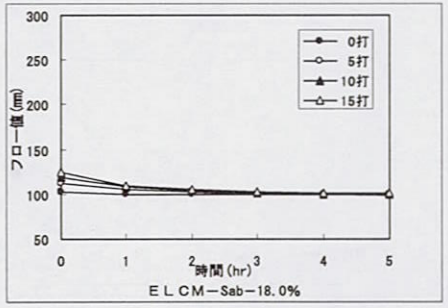


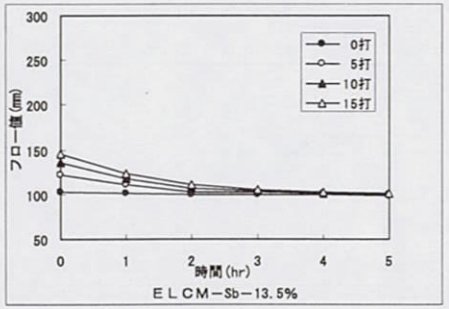


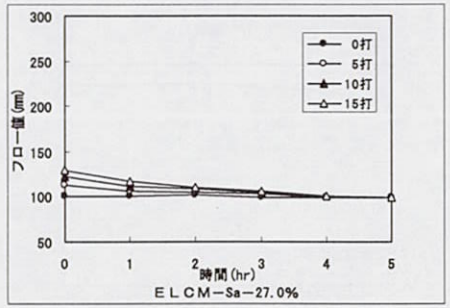


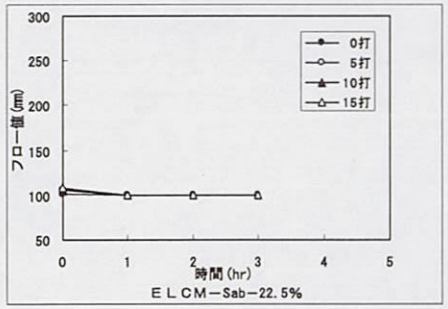


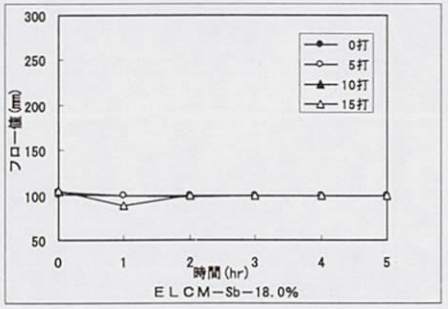


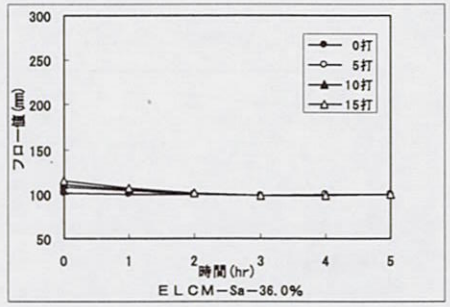


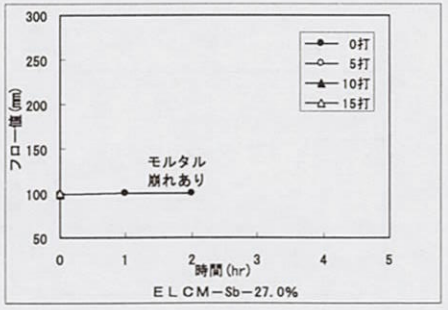




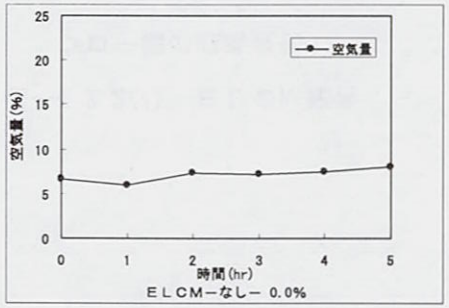


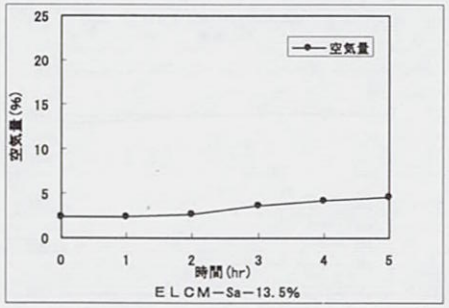


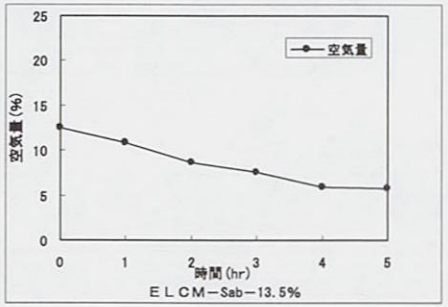


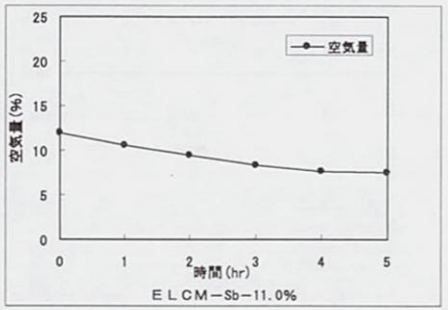


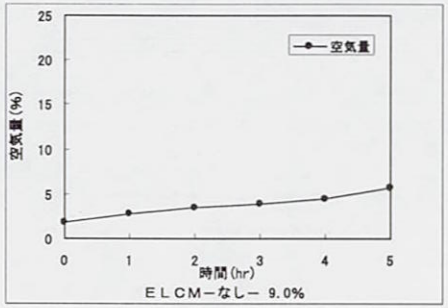
図－4.2.2(1)　ＥＬＣＭ配合
フロー値の経時変化

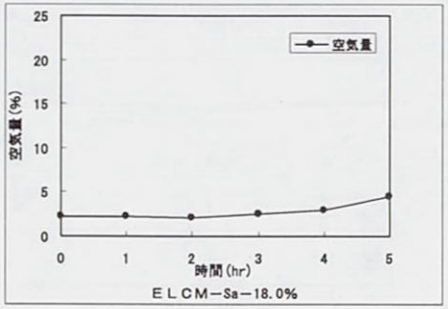


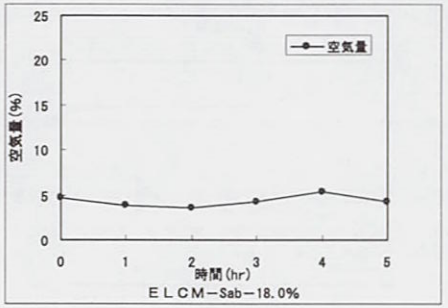


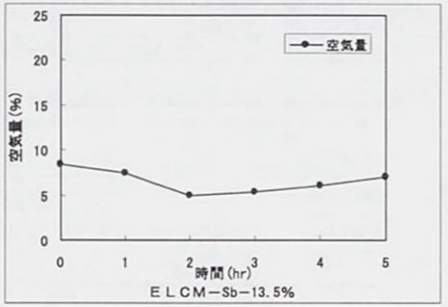


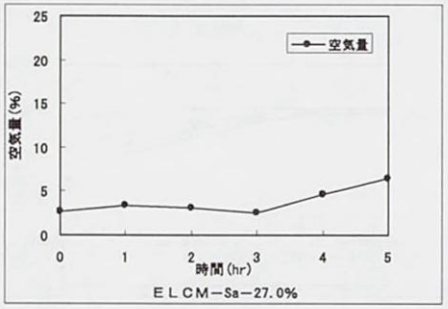


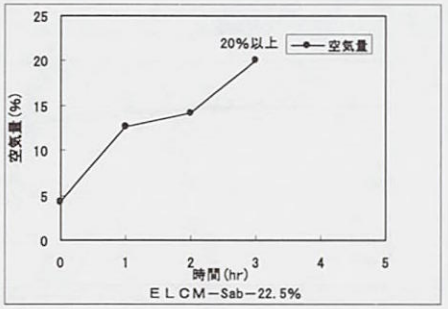


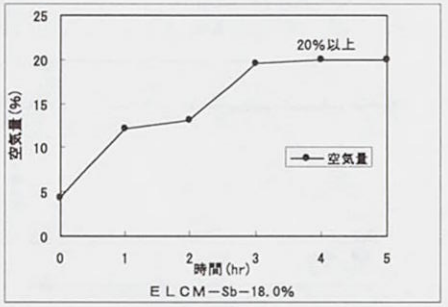


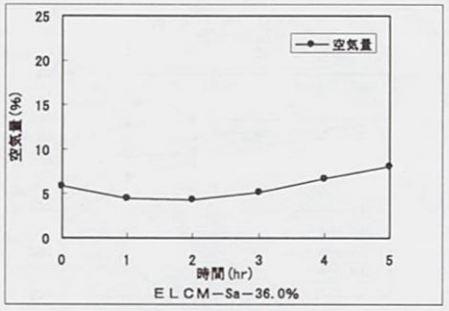


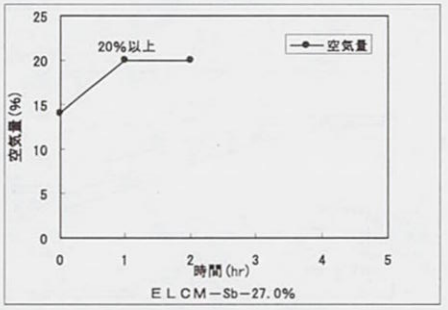




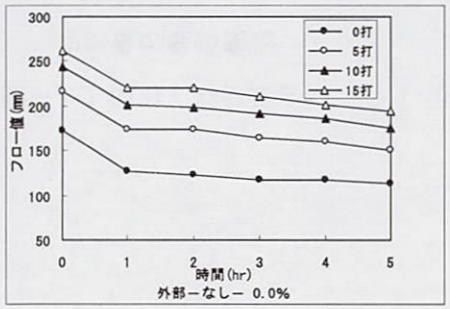


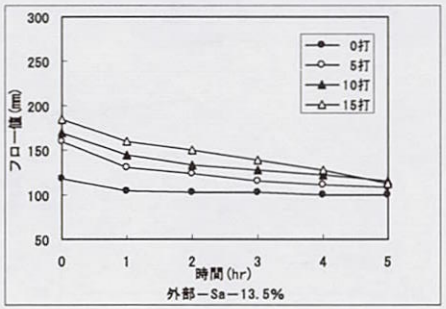


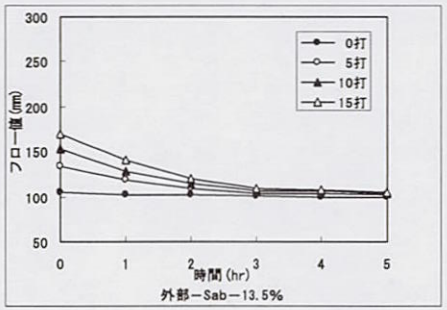


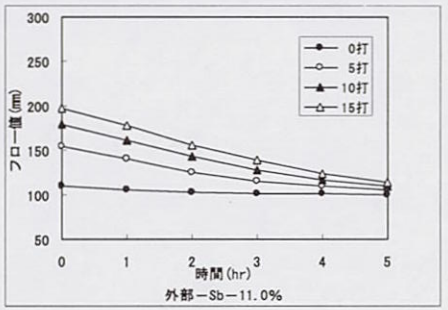


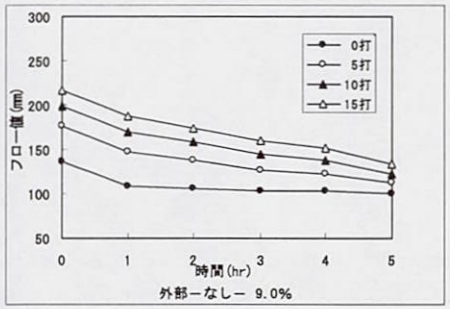
図－4.2.2(2)　ＥＬＣＭ配合
空気量の経時変化

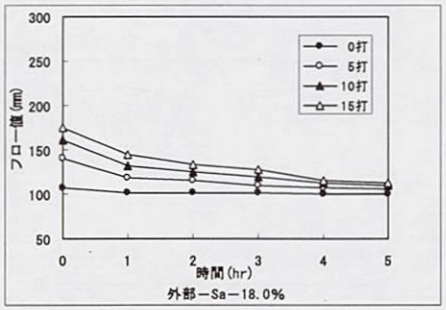


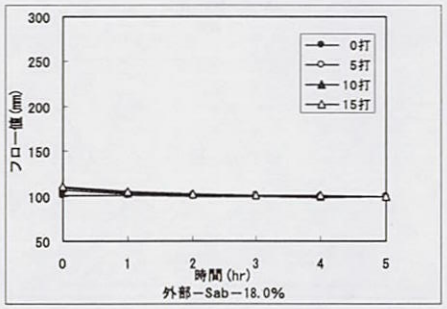


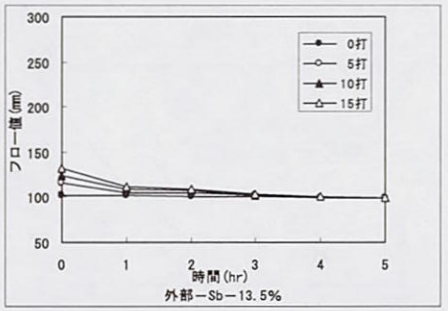


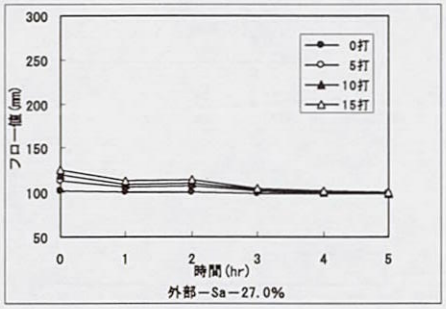


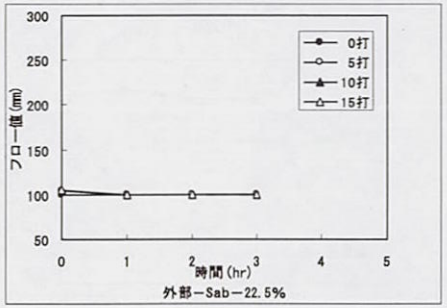


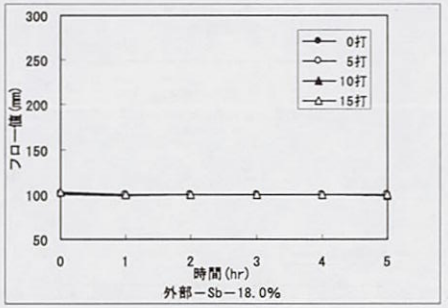


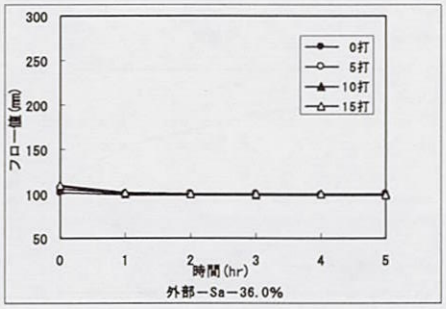




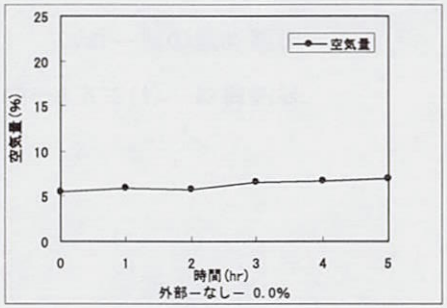


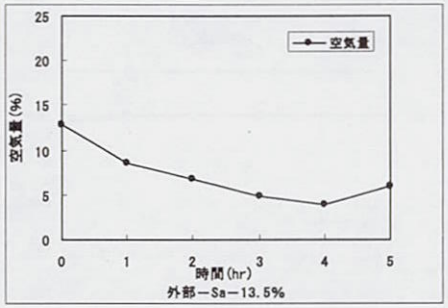


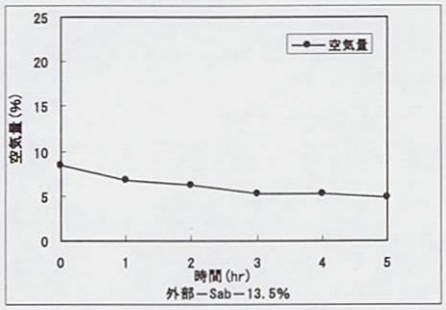


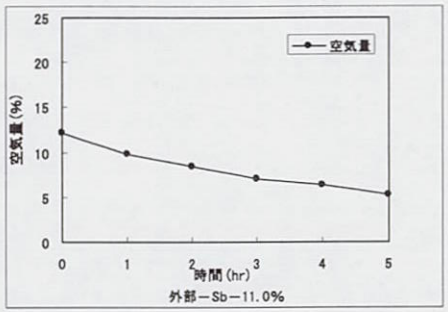


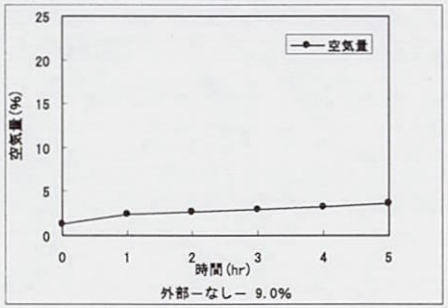
図－4.2.3(1)　外部配合
フロー値の経時変化

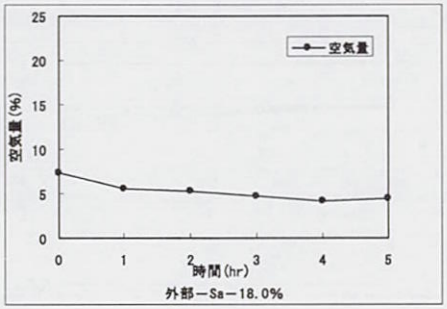


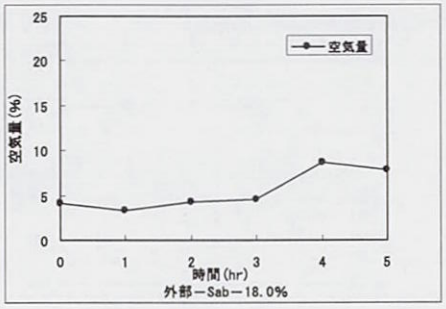


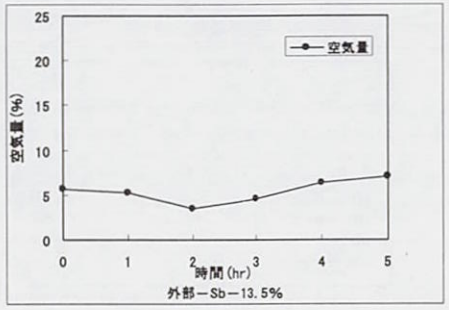


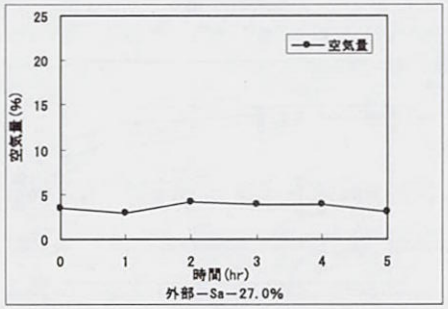


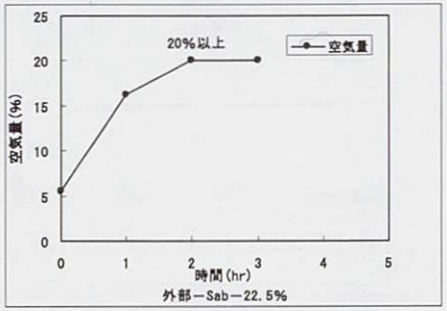


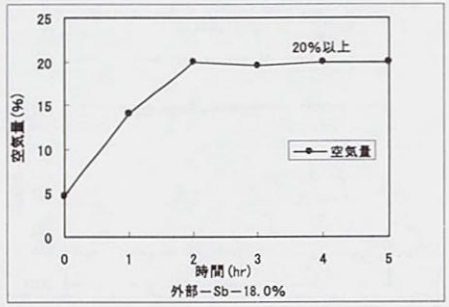


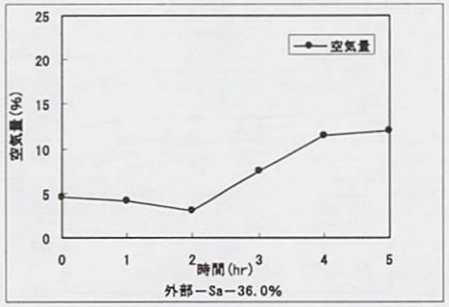




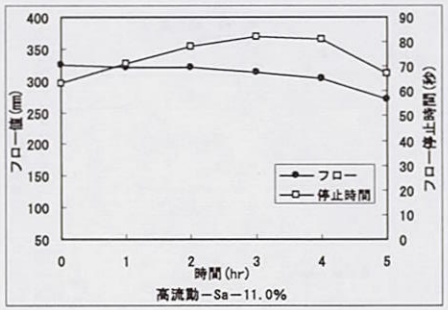


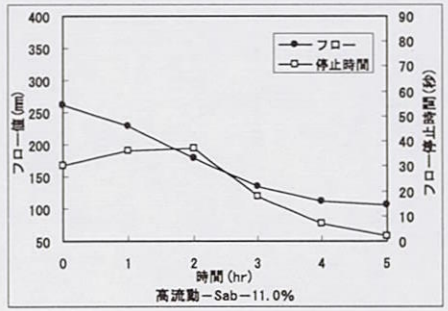


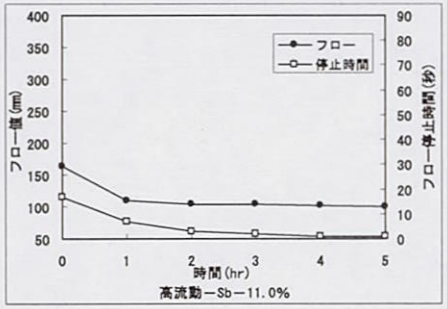


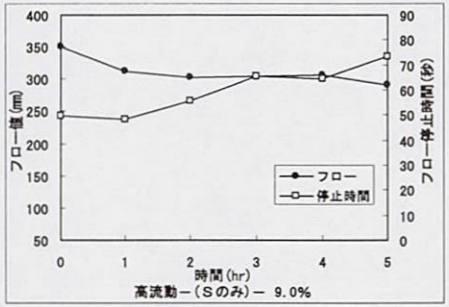


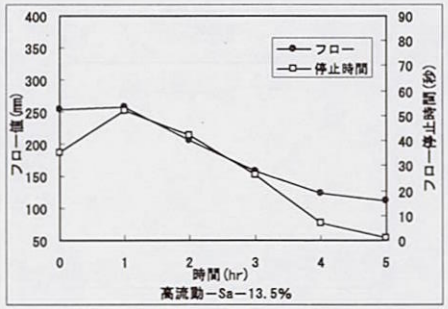
図－4.2.3(2)　外部配合
空気量の経時変化

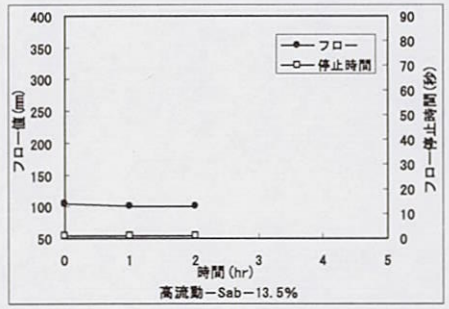


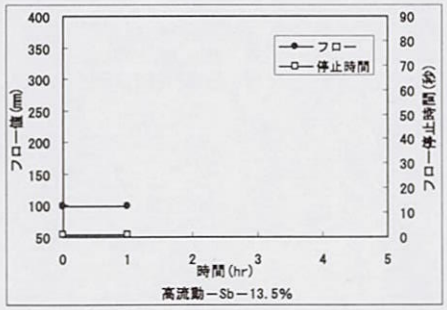


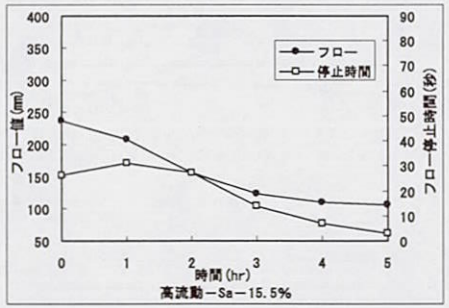


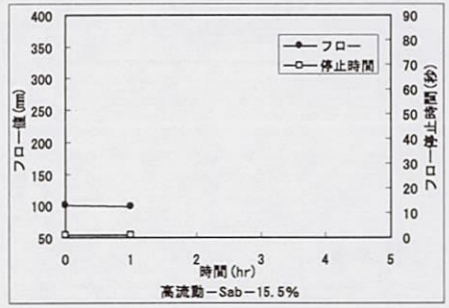


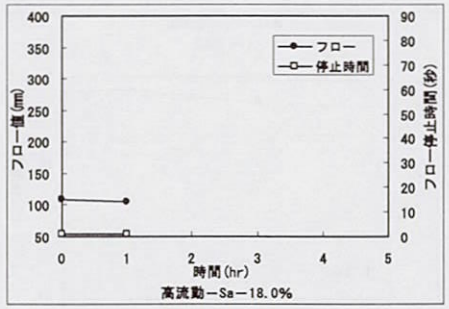




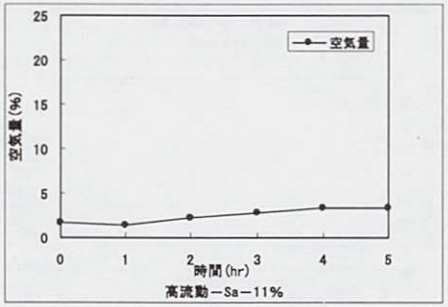


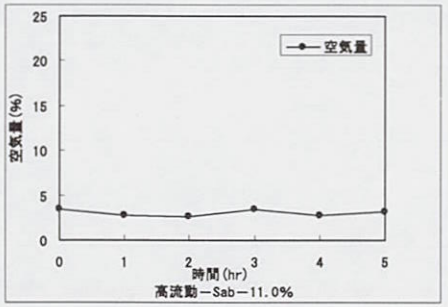


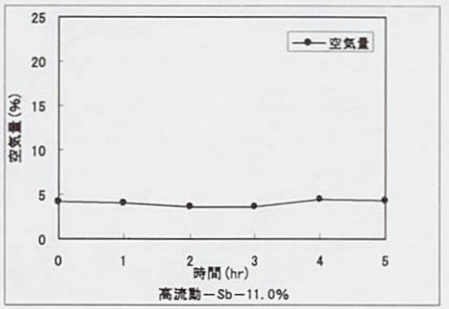


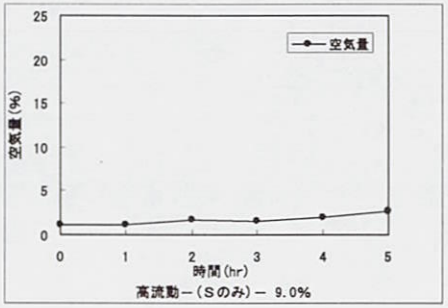


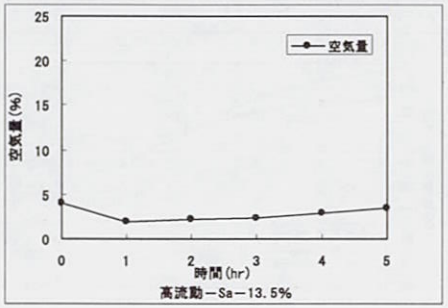
図－4.2.4(1)　高流動配合
フロー値の経時変化

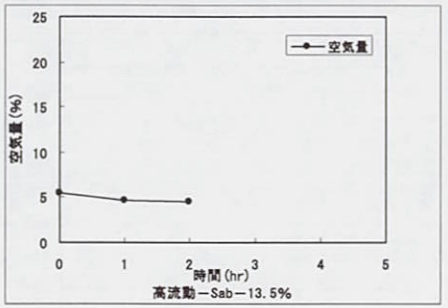


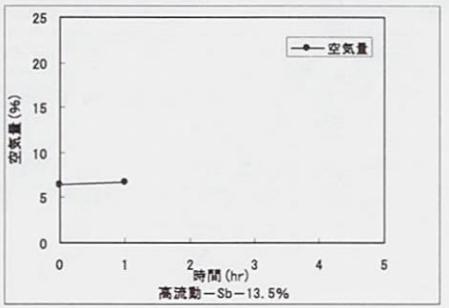


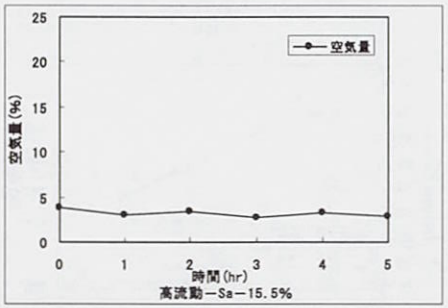


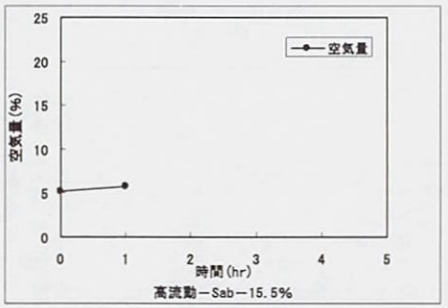


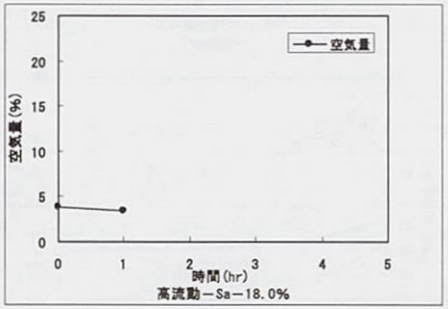




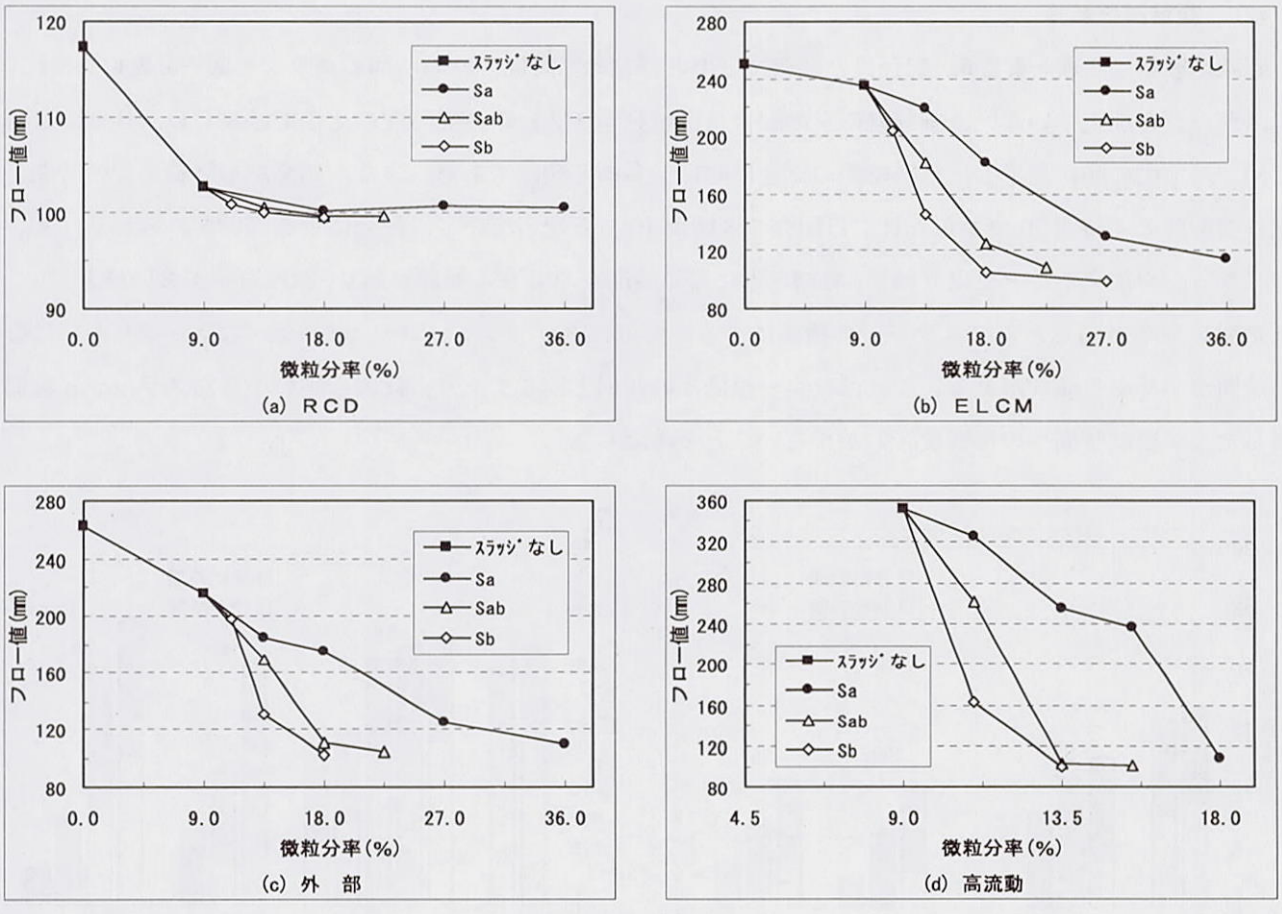








図－4.2.4(2)　高流動配合
空気量の経時変化



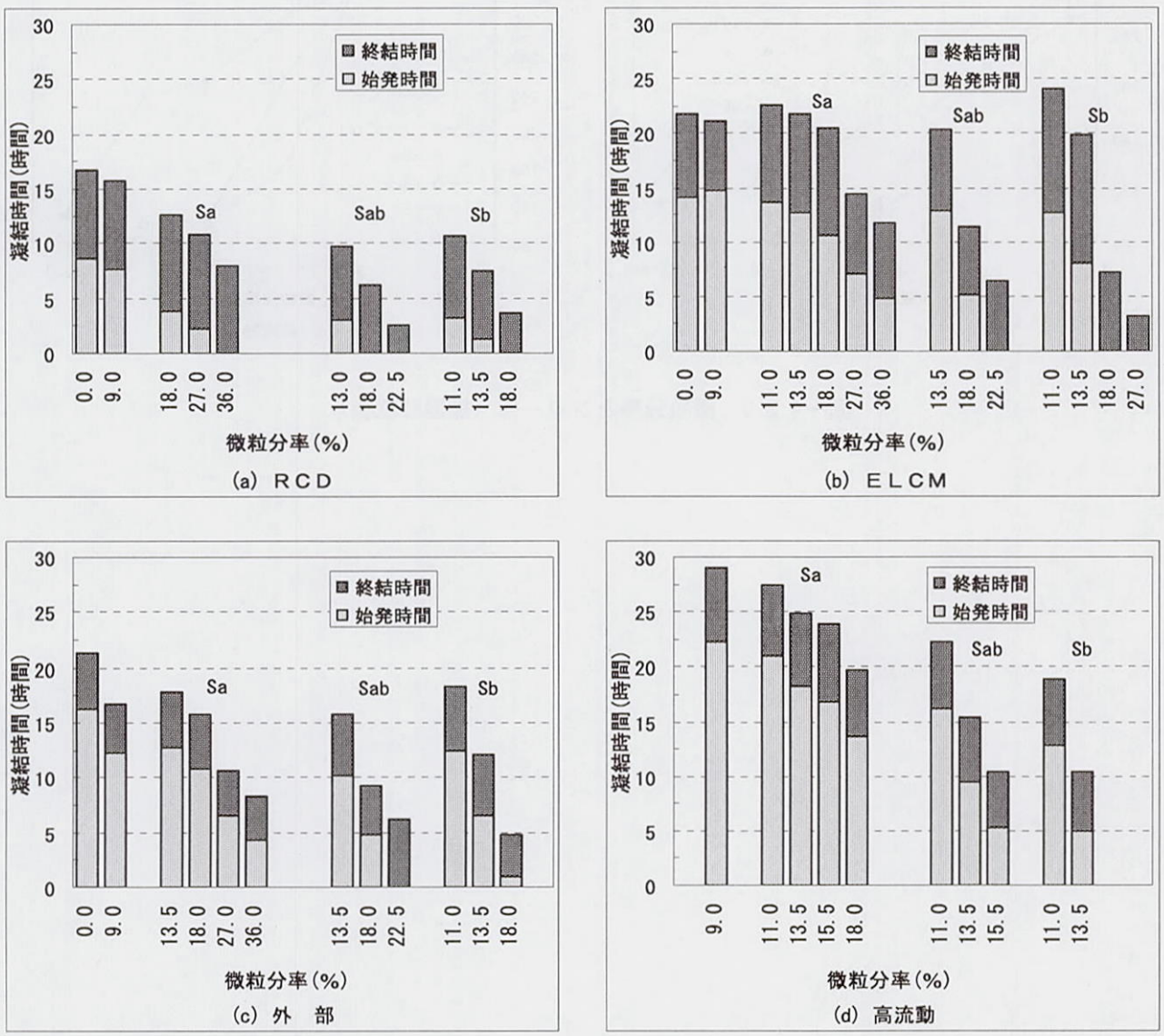
図－4.2.5 微粒分率とフロー値（練混ぜ直後）

(2) 凝結試験結果

凝結試験結果を**表－4.2.6**，配合ごとに微粒分率と凝結始発時間，終結時間のグラフを**図－4.2.6**に示す。

スラッジを加えていない，細骨材のみの配合（微粒分率９％）の始発時間の比較ではＲＣＤ，外部，ＥＬＣＭ，高流動の順に遅延し，終結時間の比較においても同じ順序である。また，始発から終結までの時間差は外部配合の４時間30分から，ＲＣＤ配合の８時間10分となっていて，配合による違いがみられる。

スラッジを加えることにより始発，終結ともに凝結時間が早くなる傾向があり，微粒分率が多いほど早い。また微粒分率が同じときのスラッジの種類による影響は，スラッジａ，スラッジ ab，スラッジｂの順に凝結時間が早くなる傾向がある。これはフロー値低下の傾向と同じであり，比表面積の小さなスラッジａを置換した方が凝結時間への影響度合いが小さいことを確認した。



図－4.2.6　凝結試験結果

表－4.2.6　モルタルの凝結試験結果

配合	スラッジ	微粒分率(%)	①始発時間 (h－m)	②終結時間 (h－m)	(②－①) (h－m)
RCD	なし	0.0	8－35	16－50	8－15
		9.0	7－35	15－45	8－10
	Sa	18.0	3－50	12－40	8－50
		27.0	2－10	10－50	8－40
		36.0	－	8－ 0	－
	Sab	13.5	3－ 0	9－45	6－45
		18.0	－	6－10	－
		22.5	－	2－30	－
	Sb	11.0	3－15	10－45	7－30
		13.5	1－15	7－30	6－15
		18.0	－	3－45	－
ELCM	なし	0.0	14－10	21－50	7－40
		9.0	14－45	21－10	6－25
	Sa	11.0	13－35	22－40	9－ 5
		13.5	12－45	21－45	9－ 0
		18.0	10－35	20－30	9－55
		27.0	7－ 5	14－25	7－20
		36.0	4－50	11－40	6－50
	Sab	13.5	12－50	20－20	7－30
		18.0	5－10	11－20	6－10
		22.5	－	6－25	－
	Sb	27.0	12－40	24－ 0	11－20
		13.5	8－ 5	19－50	11－45
		18.0	－	7－10	－
		22.5	－	3－15	－
外　部	なし	0.0	16－20	21－25	5－ 5
		9.0	12－20	16－50	4－30
	Sa	13.5	12－45	17－50	5－ 5
		18.0	10－50	15－45	4－55
		27.0	6－30	10－45	4－15
		36.0	4－20	8－15	3－55
	Sab	13.5	10－15	15－45	5－30
		18.0	4－45	9－15	4－30
		22.5	－	6－10	－
	Sb	11.0	12－25	18－20	5－55
		13.5	6－30	12－10	5－40
		18.0	1－ 0	4－50	3－50
高流動	なし	9.0	22－15	29－ 0	6－45
	Sa	11.0	21－ 5	27－30	6－25
		13.5	18－15	24－55	6－40
		15.5	16－55	23－50	6－55
		18.0	13－35	19－40	6－ 5
	Sab	11.0	16－10	22－20	6－10
		13.5	9－30	15－25	5－55
		15.5	5－15	10－25	5－10
	Sb	11.0	12－50	19－ 0	6－10
		13.5	5－ 0	10－25	5－25

(3) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を表－4.2.7～4.2.10に示す。

なお，圧縮強度試験材齢の１日目（高流動は２日目）では，石こうキャッピングを採用した都合上，供試体質量は測定していない。

表－4.2.7 モルタルの圧縮試験結果（ＲＣＤ配合）

ｽﾗｯｼﾞの種類	微粒分率 (%)	材齢 (日)	密度 (kg/m^3)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm^2)
なし	0.0	1	—	2.13	1.09
		7	2,279	5.19	2.64
		28	2,260	12.69	6.46
		91	2,271	27.36	13.93
なし	9.0	1	—	1.65	0.84
		7	2,237	5.04	2.57
		28	2,288	9.58	4.88
		91	2,285	23.46	11.95
Sa	18.0	1	—	2.60	1.32
		7	2,245	8.00	4.07
		28	2,304	14.17	7.22
		91	2,284	25.01	12.74
	27.0	1	—	4.60	2.34
		7	2,233	8.43	4.30
		28	2,294	15.73	8.01
		91	2,287	22.18	11.30
	36.0	1	—	3.43	1.75
		7	2,236	6.13	3.12
		28	2,191	7.84	3.99
		91	2,176	13.42	6.83
Sab	13.5	1	—	3.09	1.57
		7	2,285	9.24	4.71
		28	2,287	19.01	9.68
		91	2,303	35.32	17.99
	18.0	1	—	3.47	1.77
		7	2,231	8.72	4.44
		28	2,238	19.33	9.84
		91	2,273	29.70	15.13
	22.5	1	—	3.67	1.87
		7	2,165	6.54	3.33
		28	2,163	10.20	5.20
		91	2,174	14.37	7.32
Sb	11.0	1	—	2.37	1.21
		7	2,260	7.31	3.72
		28	2,265	14.60	7.44
		91	2,276	30.70	15.64
	13.5	1	—	2.70	1.38
		7	2,234	8.53	4.34
		28	2,269	21.31	10.85
		91	2,291	40.00	20.37
	18.0	1	—	3.37	1.71
		7	2,122	6.58	3.35
		28	2,241	19.33	9.84
		91	2,156	20.25	10.31

表－4.2.8 モルタルの圧縮試験結果（ＥＬＣＭ配合）

ｽﾗｯｼﾞの種類	微粒分率 (%)	材齢 (日)	密度 (kg/m^3)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm^2)
なし	0.0	1	—	2.40	1.22
		7	2,168	9.61	4.89
		28	2,164	21.68	11.04
		91	2,170	44.10	22.46
なし	9.0	1	—	2.53	1.29
		7	2,228	10.61	5.40
		28	2,238	21.49	10.94
		91	2,238	47.87	24.38
Sa	13.5	1	—	1.82	0.93
		7	2,140	8.52	4.34
		28	2,142	17.41	8.87
		91	2,152	36.47	18.57
	18.0	1	—	3.54	1.80
		7	2,207	10.60	5.40
		28	2,220	24.17	12.31
		91	2,224	49.43	25.18
	27.0	1	—	4.68	2.38
		7	2,208	12.30	6.26
		28	2,211	30.65	15.61
		91	2,211	52.57	26.77
	36.0	1	—	6.00	3.06
		7	2,225	15.20	7.74
		28	2,210	36.60	18.64
		91	2,213	57.83	29.45
Sab	13.5	1	—	1.73	0.88
		7	2,052	9.09	4.63
		28	2,065	17.28	8.80
		91	2,096	41.40	21.08
	18.0	1	—	2.93	1.49
		7	2,165	12.38	6.31
		28	2,189	27.40	13.96
		91	2,201	51.93	26.45
	22.5	1	—	4.94	2.52
		7	2,198	14.91	7.60
		28	2,191	24.92	12.69
		91	2,198	54.72	27.87
Sb	11.0	1	—	2.23	1.14
		7	2,037	8.79	4.48
		28	2,058	15.64	7.97
		91	2,073	40.05	20.40
	13.5	1	—	1.98	1.01
		7	2,128	10.53	5.36
		28	2,145	21.03	10.71
		91	2,154	47.92	24.40
	18.0	1	—	5.00	2.55
		7	2,184	17.24	8.78
		28	2,192	43.57	22.19
		91	2,202	67.03	34.14
	27.0	1	—	3.37	1.71
		7	1,973	5.77	2.94
		28	2,028	12.53	6.38
		91	2,063	22.43	11.43

表-4.2.9 モルタルの圧縮試験結果（外部配合）

スラッジの種類	微粒分率 (%)	材齢 (日)	密度 (kg/m³)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm²)
なし	0.0	1	—	5.67	2.89
		7	2,213	27.57	14.04
		28	2,201	57.23	29.15
		91	2,214	101.07	51.47
なし	9.0	1	—	6.15	3.13
		7	2,257	25.76	13.12
		28	2,258	59.79	30.45
		91	2,269	103.80	52.86
Sa	13.5	1	—	4.02	2.05
		7	2,081	16.52	8.41
		28	2,077	36.42	18.55
		91	2,090	62.27	31.71
	18.0	1	—	8.61	4.38
		7	2,172	21.87	11.14
		28	2,176	44.55	22.69
		91	2,179	66.77	34.00
	27.0	1	—	12.63	6.30
		7	2,245	24.29	13.88
		28	2,233	62.42	31.79
		91	2,245	95.97	45.51
	36.0	1	—	12.63	6.43
		7	2,245	24.29	12.37
		28	2,233	62.42	31.79
		91	2,245	95.97	48.88
Sab	13.5	1	—	6.23	3.17
		7	2,155	22.71	11.56
		28	2,177	40.78	20.77
		91	2,172	77.20	39.32
	18.0	1	—	6.69	3.41
		7	2,209	31.28	15.93
		28	2,236	48.50	24.70
		91	2,232	94.12	47.93
	22.5	1	—	8.95	4.56
		7	2,171	24.42	12.44
		28	2,216	47.10	23.99
		91	2,207	78.77	40.12
Sb	11.0	1	—	4.40	2.24
		7	2,069	16.03	8.16
		28	2,091	28.31	14.42
		91	2,223	90.33	46.01
	13.5	1	—	6.46	3.29
		7	2,206	27.78	14.15
		28	2,226	46.96	23.92
		91	2,103	65.90	33.56
	18.0	1	—	9.31	4.74
		7	2,208	36.87	18.78
		28	2,211	64.52	32.86
		91	2,221	98.67	50.25

表-4.2.10 モルタルの圧縮試験結果（高流動配合）

スラッジの種類	微粒分率 (%)	材齢 (日)	密度 (kg/m³)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm²)
なし	9.0	1	—	12.73	6.49
		7	2,219	25.40	12.94
		28	2,238	45.08	22.96
		91	2,255	84.65	43.11
Sa	11.0	1	—	13.07	6.65
		7	2,228	32.78	16.69
		28	2,239	39.10	19.91
		91	2,254	83.28	42.42
	13.5	1	—	12.66	6.45
		7	2,220	34.60	17.62
		28	2,237	41.87	21.32
		91	2,246	85.85	43.72
	15.5	1	—	14.16	7.21
		7	2,217	35.01	17.83
		28	2,238	42.90	21.85
		91	2,238	76.83	39.13
	18.0	1	—	14.86	7.57
		7	2,201	35.25	17.95
		28	2,223	42.23	21.51
		91	2,227	83.78	42.67
Sab	11.0	1	—	13.95	7.11
		7	2,235	25.97	13.23
		28	2,241	34.97	17.81
		91	2,243	90.97	46.33
	13.5	1	—	16.85	8.58
		7	2,218	28.65	14.59
		28	2,225	43.99	22.41
		91	2,213	78.10	39.78
	15.5	1	—	16.69	8.50
		7	2,195	30.80	15.69
		28	2,212	39.25	19.99
		91	2,198	78.77	40.12
Sb	11.0	1	—	15.69	7.99
		7	2,217	28.54	14.54
		28	2,238	38.88	19.80
		91	2,228	80.83	41.17
	13.5	1	—	17.37	8.84
		7	2,190	20.61	10.49
		28	2,194	43.77	22.29
		91	2,188	77.77	39.61

1) 締固め率による補正

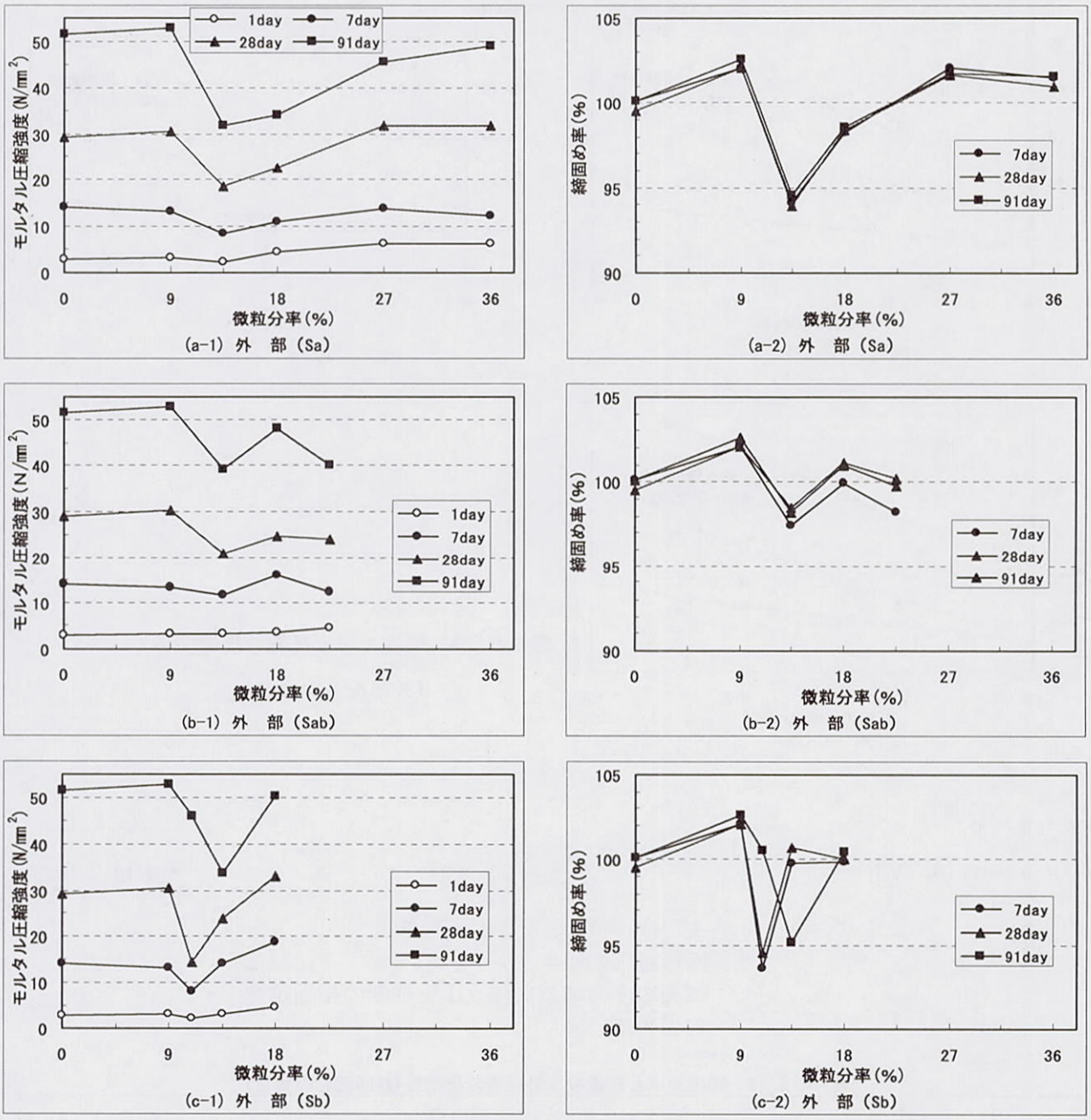
微粒分率と圧縮強度の関係について各材齢毎に比較したところ，ある微粒分率において，圧縮強度の大きさが部分的に小さいなどの不連続性が確認された。圧縮強度の変動は，微粒分率の多少による影響というよりは，むしろ供試体密度のばらつきによる影響が大きいと推測し，次式により各供試体の「締固め率」を計算したところ，**表－4.2.11**に示す結果となった。各配合におけるスラッジの種類別締固め率の最大変動幅はSa，Sab，Scの順に，ＲＣＤ配合が5.4，5.2，2.5，ＥＬＣＭ配合が4.5，8.5，12.2，外部配合が8.6，5.2，9.0，高流動配合が 2.4，2.7，3.0 とかなり大きなばらつきが確認された。一例として，外部配合の圧縮強度と締固め率の結果を**図－4.2.7**に示す。**表－4.2.7～4.2.10**との対比で，同一材齢の圧縮強度が小さい微粒分率と，締固め率が小さいときの微粒分率は一致しており，締固め率のばらつきが圧縮強度に影響していることは明らかである。そこで，締固め率が一定（100％）のときの圧縮強度になるように補正を行った。

$$締固め率＝\frac{供試体の密度}{理論密度}\times 100\quad(\%)$$

ここで，供試体の密度：圧縮強度試験前の，供試体質量と寸法から算出。
理論密度　　：スラッジなし（微粒分率9.0％）の配合における密度。

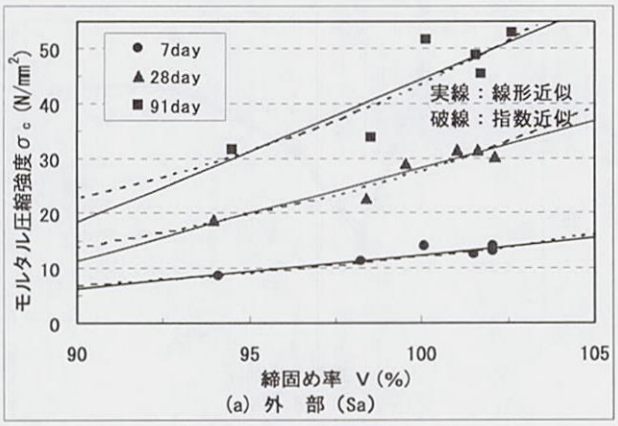
表－4.2.11　モルタル供試体の締固め率

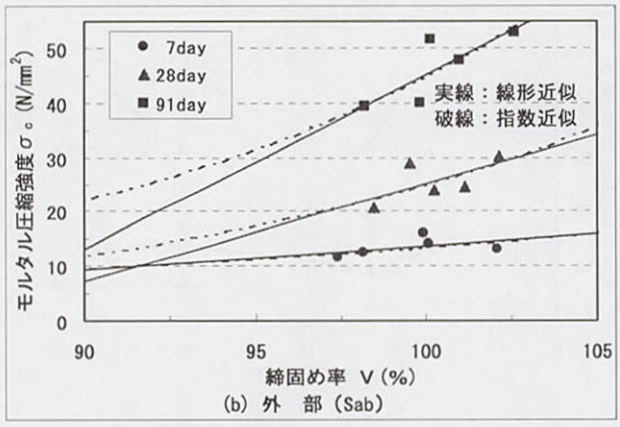
スラッジの種類	微粒分率(%)	締固め率(%)											
		ＲＣＤ配合			ＥＬＣＭ配合			外部配合			高流動配合		
		材齢(日)			材齢(日)			材齢(日)			材齢(日)		
		7	28	91	7	28	91	7	28	91	7	28	91
Sa	0.0	100.3	99.4	99.9	99.4	99.2	99.5	100.1	99.5	100.1	－	－	－
	9.0	98.4	100.6	100.5	102.1	102.6	102.6	102.1	102.1	102.6	100.3	101.1	101.9
	11.0	－	－	－	－	－	－	－	－	－	100.7	101.2	101.9
	13.5	－	－	－	98.1	98.2	98.7	94.1	94.0	94.5	100.3	101.1	101.5
	15.5	－	－	－	－	－	－	－	－	－	100.2	101.2	101.2
	18.0	98.7	101.3	100.5	101.1	101.8	101.9	98.2	98.4	98.5	99.5	100.5	100.7
	27.0	98.2	100.9	100.6	101.2	101.4	101.3	102.1	101.6	101.7	－	－	－
	36.0	98.4	96.4	95.7	102.0	101.3	101.5	101.5	101.0	101.5	－	－	－
	標準偏差	1.66			1.50			2.85			0.66		
Sab	0.0	100.3	99.4	99.9	99.4	99.2	99.5	100.1	99.5	100.1	－	－	－
	9.0	98.4	100.6	100.5	102.1	102.6	102.6	102.1	102.1	102.6	100.3	101.1	101.9
	11.0	－	－	－	－	－	－	－	－	－	101.1	101.3	101.4
	13.5	100.5	100.6	101.3	94.1	94.7	96.1	97.4	98.5	98.2	100.3	100.6	100.0
	15.5	－	－	－	－	－	－	－	－	－	99.2	100.0	99.4
	18.0	98.1	98.4	100.0	99.3	100.3	100.9	99.9	101.1	101.0	－	－	－
	22.5	95.2	95.1	95.6	100.7	100.5	100.7	98.2	100.2	99.8	－	－	－
	標準偏差	2.08			2.64			1.54			0.84		
Sb	0.0	100.3	99.4	99.9	99.4	99.2	99.5	100.1	99.5	100.1	－	－	－
	9.0	98.4	100.6	100.5	102.1	102.6	102.6	102.1	102.1	102.6	100.3	101.1	101.9
	11.0	99.4	99.6	100.1	93.4	94.3	95.0	93.6	94.6	100.6	100.2	101.2	100.7
	13.5	98.3	99.8	100.8	97.5	98.3	98.7	99.8	100.7	95.1	99.0	99.2	98.9
	18.0	93.4	98.6	94.8	100.1	100.5	101.0	99.9	100.0	100.4	－	－	－
	27.0	－	－	－	90.4	93.0	94.6	－	－	－	－	－	－
	標準偏差	2.13			3.62			2.76			1.08		
理論密度(kg/m³)		2,273			2,182			2,211			2,212		

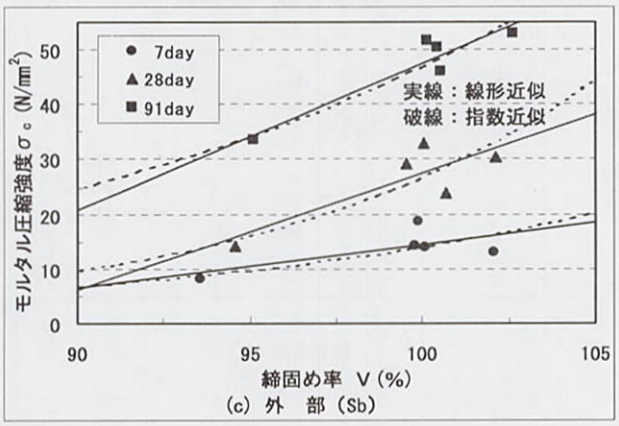


4.2.7 圧縮強度と締固め率の一例（外部配合の場合）

締固め率と圧縮強度の関係について，一例として外部配合の場合を**図－4.2.8**に示す。締固め率と圧縮強度の関係は**式（4.2.1）**で線形近似することが多く，締固め率の増加に伴う圧縮強度の増加率ｋが一定であると仮定すると，締固め率と圧縮強度の関係は**式(4.2.2)**で指数近似することもできる。2 つの式より回帰した結果を**表－4.2.12**に示す。両式による相関係数（ｒ）と締固め率 100 %のときの圧縮強度（$\sigma_{c(V=100)}$）の大きさの違いは僅かながら一長一短があり，微粒分率に対する補正した圧縮強度変動の程度は，線形近似による方が自然である。そのため，ここでは線形近似式を用いて，直線の傾きにより締固め率 100 %に相当する圧縮強度を算出することとした。線形近似式により，材齢１日（高流動は２日）を除いて圧縮強度を補正した結果を**表－4.2.13，図－4.2.9**に示す。







図－4.2.8 締固め率と圧縮強度の関係
（外部配合の場合）

$$\sigma_c = a - b \cdot V \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4.2.1)$$

$$\sigma_c = \sigma_0 \cdot \exp(k \cdot V) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4.2.2)$$

ここで，a，σ_0：締固め率0%のときの圧縮強度
b：回帰直線の傾き
k：締固め率の増減に伴う圧縮強度の指数定数
V：締固め率(%)

表－4.2.12 締固め率と圧縮強度の回帰分析結果（外部配合の場合）

	材齢 (日)	回帰式 $\sigma_c = a + b \cdot V$				回帰式 $\sigma_c = \sigma_0 \cdot \exp(+k \cdot V)$			
		a	b	r	$\sigma_{c(V=100)}$	σ_0	k	r	$\sigma_{c(V=100)}$
Sa	7	−50.0	0.62	0.91	12.4	0.038	0.058	0.92	12.2
	28	−143.2	1.72	0.94	28.4	0.026	0.070	0.95	27.9
	91	−219.2	2.64	0.86	44.5	0.064	0.065	0.88	43.7
Sab	7	−30.4	0.44	0.48	13.6	0.440	0.034	0.51	13.5
	28	−155.6	1.81	0.64	25.3	0.018	0.072	0.66	25.0
	91	−274.6	3.20	0.81	45.2	0.040	0.070	0.81	44.9
Sb	7	−66.3	0.81	0.69	14.4	0.010	0.073	0.78	14.1
	28	−185.8	2.13	0.83	27.5	0.001	0.101	0.87	26.8
	91	−218.8	2.66	0.94	47.4	0.082	0.064	0.95	46.9

注）：相関係数

表－4.2.13　材齢と締固め率による圧縮強度の補正結果

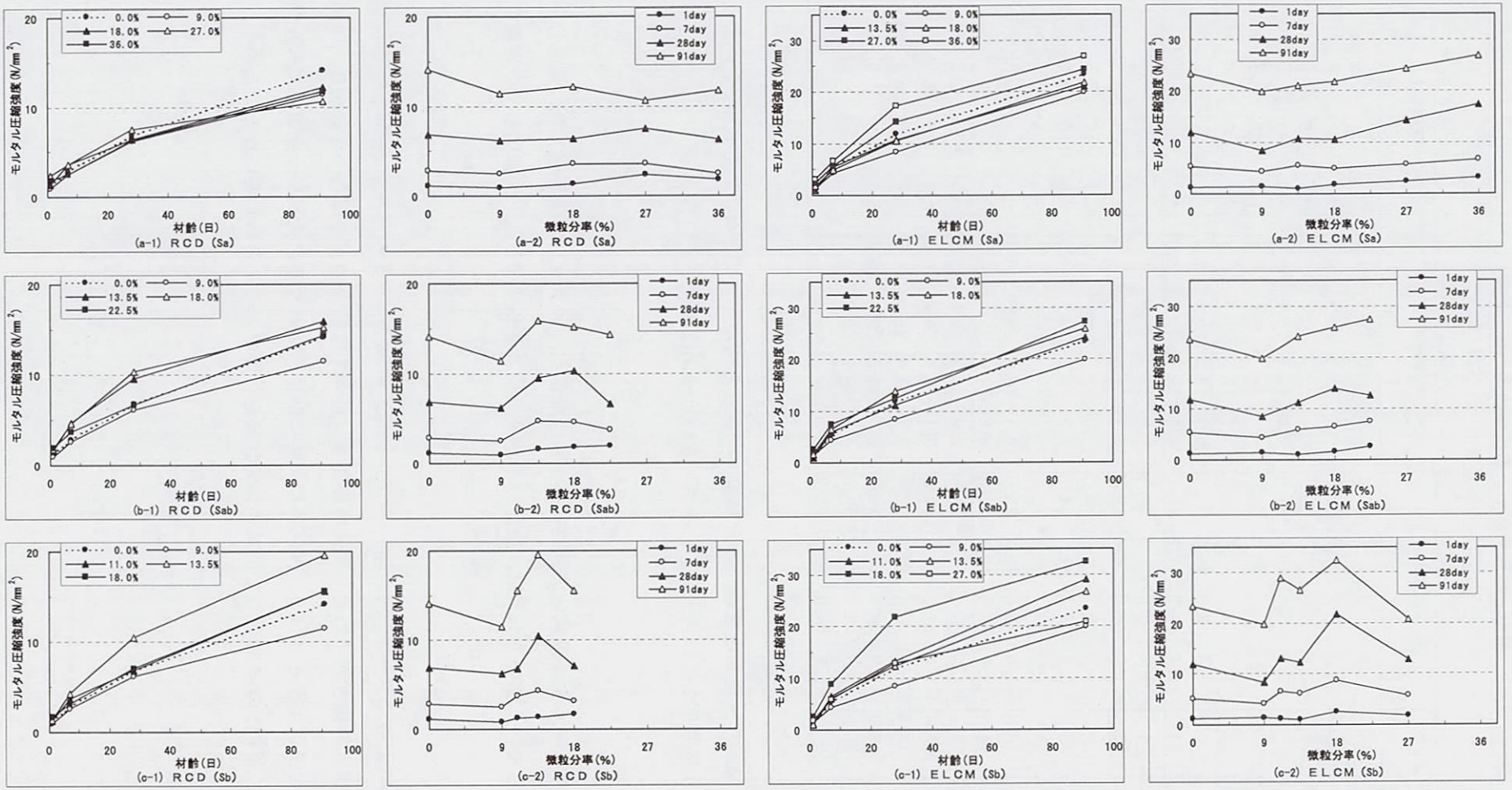
スラッジの種類	微粒分率(%)	線形近似式による補正後の圧縮強度(N/mm^2)															
		RCD配合				ELCM配合				外部配合				高流動配合			
		材齢(日)				材齢(日)				材齢(日)				材齢(日)			
		1	7	28	91	1	7	28	91	1	7	28	91	1	7	28	91
Sa	0.0	1.1	2.8	6.8	14.1	1.2	5.2	11.8	23.4	2.9	14.0	29.9	51.1	—	—	—	—
	9.0	0.8	2.5	6.1	11.4	1.3	4.2	8.4	19.8	3.1	11.8	26.8	46.0	6.5	13.4	23.2	41.1
	11.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.7	17.8	20.1	40.5
	13.5	—	—	—	—	0.9	5.4	10.6	21.0	2.0	12.1	28.9	46.1	6.4	18.1	21.5	42.1
	15.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.2	18.2	22.1	37.9
	18.0	1.3	3.5	6.4	12.2	1.8	4.8	10.6	21.7	4.4	12.2	25.4	37.9	7.6	17.2	21.6	42.0
	27.0	2.3	3.5	7.5	10.6	2.4	5.6	14.3	24.4	6.3	12.6	29.0	41.0	—	—	—	—
	36.0	1.7	2.4	6.2	11.7	3.1	6.7	17.3	26.8	6.4	11.4	30.1	44.8	—	—	—	—
Sab	0.0	1.1	2.8	6.8	14.1	1.2	5.2	11.8	23.4	2.9	14.0	29.9	51.1	—	—	—	—
	9.0	0.8	2.5	6.1	11.4	1.3	4.2	8.4	19.8	3.1	11.8	26.8	46.0	6.5	13.4	23.2	41.1
	11.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.1	14.7	18.5	43.6
	13.5	1.6	4.7	9.5	15.9	0.9	5.8	11.1	24.1	3.2	12.7	23.5	44.9	8.6	15.0	22.7	39.7
	15.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8.5	14.6	20.0	41.4
	18.0	1.8	4.6	10.3	15.2	1.5	6.5	13.8	25.8	3.4	16.0	22.6	44.8	—	—	—	—
	22.5	1.9	3.7	6.6	14.3	2.5	7.4	12.5	27.3	4.6	13.2	23.6	40.7	—	—	—	—
Sb	0.0	1.1	2.8	6.8	14.1	1.2	5.2	11.8	23.4	2.9	14.0	29.9	51.1	—	—	—	—
	9.0	0.8	2.5	6.1	11.4	1.3	4.2	8.4	19.8	3.1	11.8	26.8	46.0	6.5	13.4	23.2	41.1
	11.0	1.2	3.7	6.7	15.5	1.1	6.4	13.1	28.9	2.2	13.4	26.0	44.5	8.0	14.0	20.4	40.4
	13.5	1.4	4.3	10.5	19.6	1.0	6.1	12.3	26.6	3.3	14.3	22.4	46.6	8.8	12.9	21.9	40.9
	18.0	1.7	3.1	7.1	15.5	2.5	8.7	21.7	32.5	4.7	18.9	32.8	49.1	—	—	—	—
	27.0	—	—	—	—	1.7	5.8	12.8	20.7	—	—	—	—	—	—	—	—

締固め率のばらつきをを是正し圧縮強度を補正した結果，一例として示した図－4.2.7（外部配合）ように特定の微粒分率において圧縮強度が極端に大きい，小さいという傾向は漸減している。

2）微粒分率と圧縮強度

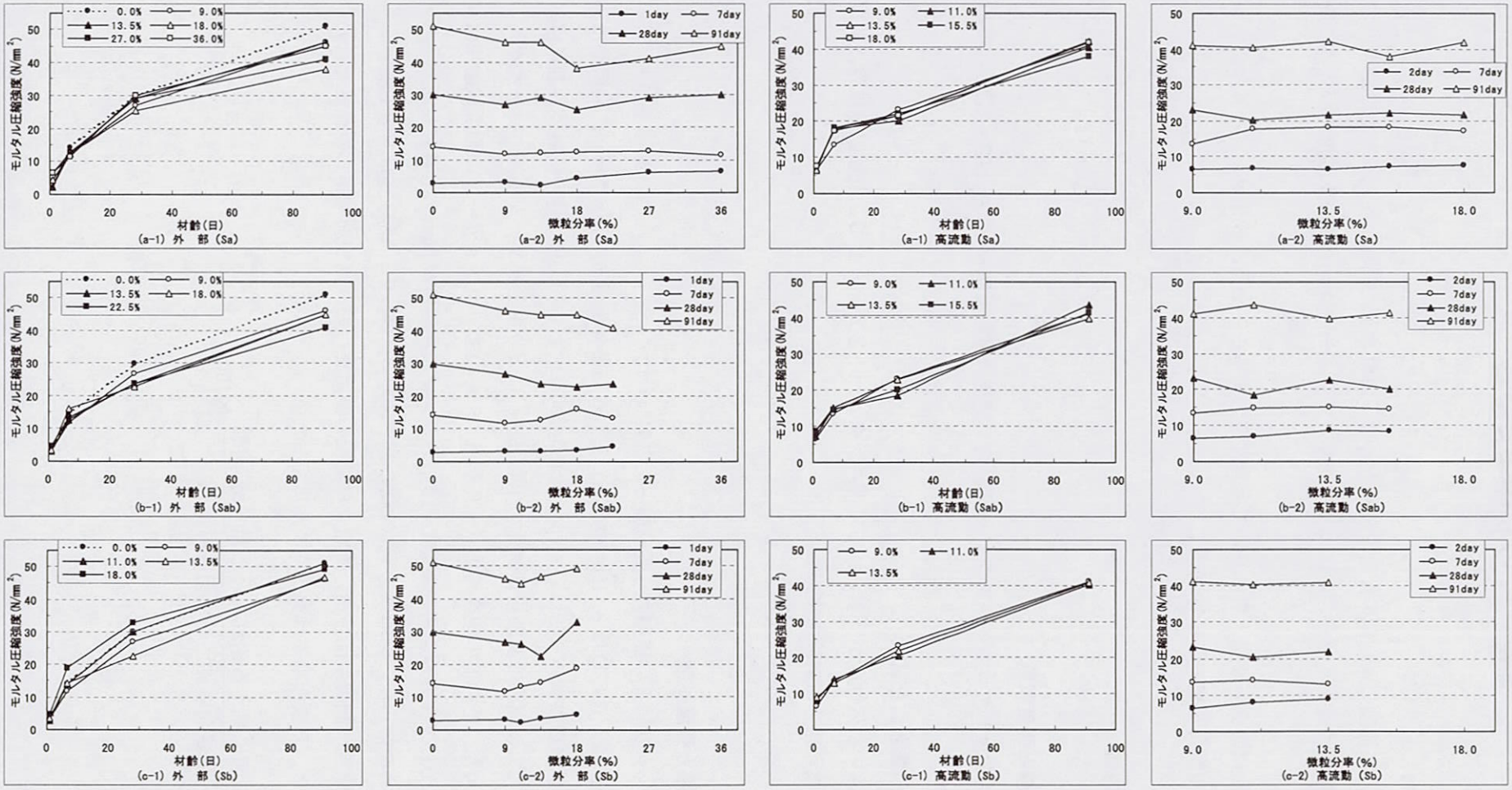
圧縮強度補正の影響もあり，モルタル供試体の試験結果からは配合別，スラッジの種類別でも，微粒分率と圧縮強度の関係は明確ではない。強いて云えば，微粒分率が 9.0 %より多くなると圧縮強度もやや増加するようである。

スラッジを置換することによってワーカビリティー（フロー値）の低下したモルタルをφ 50 × 100mm の供試体に充填したとき，締固め程度の差により単位容積質量，延いては締固め率のばらつきとなり，圧縮強度の大きさに多大な影響を及ぼすこととなる。供試体作製時には目標締固め率を設定し，充填したモルタル質量を測定するなどして，締固め率を確認して供試体作製作業を行うなどのことも必要になるであろう。



RCD配合　　ELCM配合

図－4.2.9　圧縮強度試験結果（補正後）
（その１）



外部配合　　高流動配合

図－4.2.9　圧縮強度試験結果（補正後）（その２）

5章　コンクリート試験

5．1　コンクリート配合

ＲＣＤ，ＥＬＣＭ，外部，高流動の４種類の配合を対象として，単位水量，混和剤使用量とも一定条件の下で，微粒分率のみを３水準ずつ変化させることによりワーカビリティー，コンクリート強度や耐久性に及ぼす影響を確認した。

対象としたスラッジの種類は，ダム建設工事において大量に発生することから，スラッジａとした。

コンクリート試験に用いた配合を**表－5.1.1**に示す。

5．2　試験項目と試験方法

(1)　試験項目

1)　コンシステンシー試験と強度試験

４種類のコンクリートを対象としてコンシステンシー試験および空気量の経時変化，さらに圧縮強度試験，割裂引張強度試験を実施した。

2)　外部コンクリートを対象とした試験

内部コンクリートに比べ高い耐久性能が要求される外部コンクリートを対象として，乾燥収縮試験，曲げ強度試験，中性深さ測定，細孔径分布試験を実施した。

(2)　試験方法

1)　コンシステンシー試験と強度試験

試験方法，対象とするコンクリートの種類の一覧を**表－5.2.1**に示す。

圧縮強度試験用供試体寸法は，ＲＣＤはφ 150×300mm，ＥＬＣＭと外部はφ 125×250mm，高流動はφ100×200mm，割裂引張強度試験用供試体寸法はいずれもφ 150×200mm とした。ＲＣＤの供試体作製にはＲＣＤ工法技術指針(案)付録-2「圧縮強度試験用供試体の作製方法」により振動ランマを使用し，モルタルが表面に浮き上がるまで締固めた。その他の配合の供試体作製はJIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠，３層に分けて突き棒を用いて詰めたが，スランプの測定値が0cmのときには振動台（大型ＶＣ試験機）で振動締固めを行った。材齢は１（高流動のみ２日），7，28，91，182，365日とした。

さらに，割裂引張強度試験後の割裂断面を用いて粗骨材面積の測定を行い「割裂面積率」の算定を行い引張強度との相関性を検証した。割裂面積率は次式により算定した。

$$\text{割裂面積率}=\frac{\text{割裂面に見える割れている粗骨材面積}}{\text{割裂面に見える全粗骨材面積}}\times 100\ (\%)$$

表－5.1.1　微粒分率別コンクリート配合

配　合	スラッジの種類	微粒分率 (%)	水結合材比 W/(C+F) (%)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ置換率 F/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m^3) 水 W	セメント C	ﾌﾗｲｱｯｼｭ F	細骨材 S	スラッジa Sa	粗骨材 G 40mm～20mm	粗骨材 G 20mm～5mm	混和剤 AD1 (g)	混和剤 AD2 (g)
RCD	Sa	9.0	94.0	30.0	47.4	133.0	99.0	42.4	1005.4	0.0	564.930	564.930	354*1	
		18.0							914.9	90.5				
		27.0							824.5	181.0				
ELCM	Sa	9.0	73.6	30.0	40.0	154.0	146.5	62.8	769.0	0.0	584.195	584.195	523*2	31.4*3
		13.5							734.4	34.6				
		18.0							699.8	69.2				
外　部	Sa	9.0	50.0	30.0	37.4	146.0	204.4	87.6	698.5	0.0	590.931	590.931	730*4	29.2*5
		13.5							667.1	31.4				
		18.0							635.6	62.9				
高流動	Sa	9.0	33.1	60.0	49.1	155.0	187.2	280.8	834.0	0.0	0.000	875.000	8,658*6	
		13.5							796.5	37.5				
		18.0							758.9	75.1				

＊1:減水剤遅延形（C+F）×0.25%
＊2:減水剤遅延形（C+F）×0.25%　＊3：AE剤、使用量＝（C+F）×0.0025%×6
＊4:減水剤遅延形（C+F）×0.25%　＊5：AE剤、使用量＝（C+F）×0.0025%×4
＊6:高性能AE減水剤標準形,使用量＝（C+F）×1.85%

表－5.2.1　試験項目と試験方法

試験項目	試験方法	測定値	試験時間等	対象コンクリート
コンシステンシー	JSCE-F507	ＶＣ値，締固め率	0～5時間まで1時間間隔の経時変化	ＲＣＤ
	JSCE-F501	振動（VB）時間		ＥＬＣＭ，外部
	JIS A 1101	スランプ		ＥＬＣＭ，外部，高流動
	JSCE-F503	スランプフロー		高流動
空気量	JIS A 1128	空気室圧力方法		ＥＬＣＭ，外部，高流動
圧縮強度	JIS A 1108	圧縮強度	材齢：1,7,28,91,182,365日 縦・横ひずみの測定	ＲＣＤ，ＥＬＣＭ，外部，高流動
割裂引張強度	JIS A 1113	引張強度	材齢：1,7,28,91,182,365日 割裂面の測定	ＲＣＤ，ＥＬＣＭ，外部，高流動

2)　外部コンクリートを対象とした試験

外部コンクリートを対象として，同一微粒分率の供試体について初期養生を 7 日と 28 日の 2 水準で水中養生した後，気中養生（養生条件：温度 20 ℃，湿度 60 %）し，所定の材齢において乾燥収縮試験，曲げ強度試験，中性化深さ測定，細孔径分布試験を実施した（**表－5.2.2**）。

乾燥収縮試験は JIS A 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法」に準拠した。測定項目は長さ変化，質量変化，相対動弾性係数であり，気中養生 12 ヶ月後まで測定した。曲げ強度試験は JIS A 1106「コンクリートの曲げ試験方法」に準拠し，水中養生後と気中養生 6，12 ヶ月後に供試体 1 体ずつで 3 等分点載荷法により曲げ強度を測定した。中性化深さ試験は，曲げ強度試験で 2 分割された試験片を，それぞれ曲げ試験の中央載荷法により 2 分割し，4 分割された横断面の 3 面についてフェノールフタレイン溶液を噴霧して，打設面，両側面，底面方向から各 5 点ずつ，計 60 点について中性化深さを測定した。細孔径分布試験は中性化深さ測定後のモルタル片を試料として，ポロシメーターを使った水銀圧入法により試験を行った。

表－5.2.2　外部コンクリートの試験項目と試験方法

試験項目	試験方法	備考
乾燥収縮試験	JIS A 1129	長さ変化率ほか　　7,28日養生後に試験を開始する。
曲げ強度試験	JIS A 1106	曲げ強度　　7,28日養生後に試験を開始する。
中性化深さ測定	曲げ試験終了後，中性化深さを測定する。測定は4分割した3断面を20点ずつ測定する。	
細孔径分布試験	中性化試験終了後，ﾓﾙﾀﾙをはつりとり，水銀圧入式ポロシメータにより空隙を測定する。	

５．３　コンシステンシー，空気量測定試験結果

4 種類の配合別コンシステンシーおよび空気量についての経時変化測定結果を**表－5.3.1～5.3.4**と**図－5.3.1～5.3.4**に示す。図においてグラフ下方の表示は「配合－スラッジの種類－微粒分率」を表している。コンクリートの種類別に微粒分率とコンシステンシー経時変化測定結果の関係を**図－5.3.5**に示す。

1) ＲＣＤコンクリート

練混ぜ直後の目標ＶＣ値を満足しているのは微粒分率 9.0 %のみであり，練混ぜ後 2 時間以降はＶＣ値が著しく大きくなっている。微粒分率 18.0 %，27.0 %では，練混ぜ直後から既に目標ＶＣ値を大幅に上まわる結果となっている。

密度から算定した締固め率についても，微粒分率 9.0 %は時間経過に伴いわずかに低下したが,微粒分率 18.0 %，27.0 %は 2 時間で急に低下し,90 %以下になった。。

2) ＥＬＣＭコンクリート

微粒分率が多いほどスランプの低下，ＶＢ時間が長くなる。また時間経過とともにスランプが低下し，微粒分率が多くなるに従い，スランプが 0cm となる時間が早くなっている。

空気量については，微粒分率が多いほど小さい値を示す傾向となっている。

3) 外部コンクリート

微粒分率の増加，時間の経過とともにスランプが低下し，ＶＢ時間が長くなる傾向はＥＬＣＭと同様である。またＥＬＣＭと比較して配合における水結合材比が小さいため，同じ微粒分率でのスランプはＥＬＣＭに比べてやや小さめである。

微粒分率が 13.5 %，18 %において，練混ぜからそれぞれ 2 時間，1 時間経過したとき空気量が 10 %を超えているのは，スランプが 0cm と小さいため空気量測定器への試料の充填性が十分でなかったためと考えられる。

4) 高流動コンクリート

微粒分率 9 %では，時間の経過とともにスランプフローが低下する傾向を示す。微粒分率 13.5 %においては練混ぜ直後でもスランプ 8cm で流動性が低く，さらに微粒分率 18 %では練混ぜ直後でスランプが 0cm であった。

5) 有スランプコンクリートのスランプとモルタルフローの関係

4 配合のうち，有スランプコンクリートであるＥＬＣＭと外部のスランプ，モルタル試験でのフロー値について，同一微粒分率同士の関係を示したのが**図－5.3.6**である（直線回帰したときの近似式，相関係数をｒで表示)。スラッジを置換した配合においても，通常のコンクリート同様にスランプとフロー値の相関性が大きく，コンクリートのワーカビリティーをモルタルのフロー試験により代替できる可能性がある。

表－5.3.1　コンシステンシー，空気量の経時変化（ＲＣＤ配合）

配　合	微粒分率 (%)	経過時間 (時間)	ＶＣ値 (秒)	締固め率 (%)	空気量 (%)
ＲＣＤ	9.0	0	15	97.4	1.2
		1	18	94.4	2.5
		2	43	95.7	0.5
		3	120	91.2	0.2
		4	160	94.3	1.2
		5	—	—	—
	18.0	0	28	95.4	0.7
		1	39	95.0	0.9
		2	138	89.5	1.6
		3	—	—	—
		4	—	—	—
		5	—	—	—
	27.0	0	82	91.6	1.2
		1	140	88.7	2.5
		2	140	82.5	5.8
		3	—	—	—
		4	—	—	—
		5	—	—	—

表－5.3.2　コンシステンシー，空気量の経時変化（ＥＬＣＭ配合）

配　合	微粒分率 (%)	経過時間 (時間)	スランプ (cm)	ＶＢ時間 (秒)	空気量 (%)
ＥＬＣＭ	9.0	0	5.5	9	5.0
		1	3.6	10	4.0
		2	3.3	28	3.2
		3	2.9	38	2.9
		4	0.0	60	4.3
		5	—	—	—
	13.5	0	2.6	13	3.5
		1	1.3	16	2.7
		2	0.8	33	2.5
		3	0.0	71	3.2
		4	—	—	—
		5	—	—	—
	18.0	0	0.6	24	1.9
		1	0.3	51	1.8
		2	0.0	110	2.1
		3	—	—	—
		4	—	—	—
		5	—	—	—

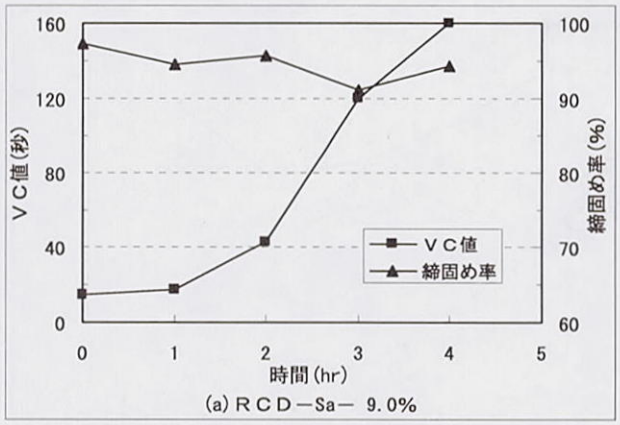
表－5.3.3　コンシステンシー，空気量の経時変化（外部配合）

配　合	微粒分率 (%)	経過時間 (時間)	スランプ (cm)	ＶＢ時間 (秒)	空気量 (%)
外　部	9.0	0	4.5	19	4.5
		1	1.0	—	3.3
		2	0.5	40	5.8
		3	0.0	67.0	3.6
		4	—	—	—
		5	—	—	—
	13.5	0	0.8	51	3.1
		1	0.0	84	2.3
		2	0.0	117	10.0
		3	—	—	—
		4	—	—	—
		5	—	—	—
	18.0	0	0.0	50	3.6
		1	0.0	—	10.2
		2	—	—	—
		3	—	—	—
		4	—	—	—
		5	—	—	—

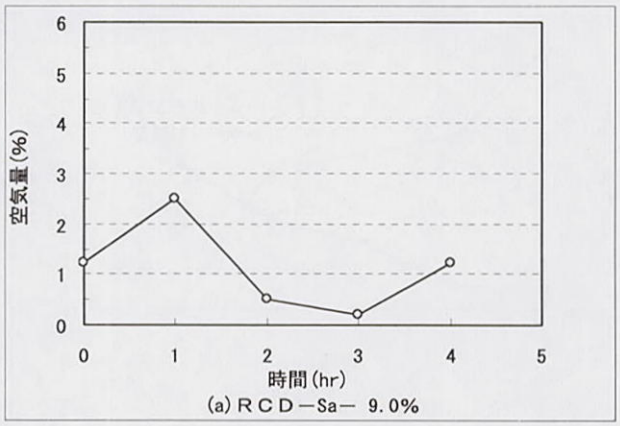
表－5.3.4　コンシステンシー，空気量の経時変化（高流動配合）

配　合	微粒分率 (%)	経過時間 (時間)	50cm SF (秒)	SF (cm)	SF停止時間 (秒)	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)
高流動	9.0	0	8.0	62.4	49.9	26.0	1.8
		1	—	47.1	46.5	23.0	1.5
		2	—	38.8	33.1	20.0	1.8
		3	—	28.0	30.0	16.5	2.0
		4	—	—	—	11.2	1.8
		5	—	—	—	7.1	1.7
	13.5	0	—	—	—	8.3	2.3
		1	—	—	—	2.0	1.9
		2	—	—	—	0.0	2.1
		3	—	—	—	—	—
		4	—	—	—	—	—
		5	—	—	—	—	—
	18.0	0	—	—	—	0.0	2.7
		1	—	—	—	—	—
		2	—	—	—	—	—
		3	—	—	—	—	—
		4	—	—	—	—	—
		5	—	—	—	—	—

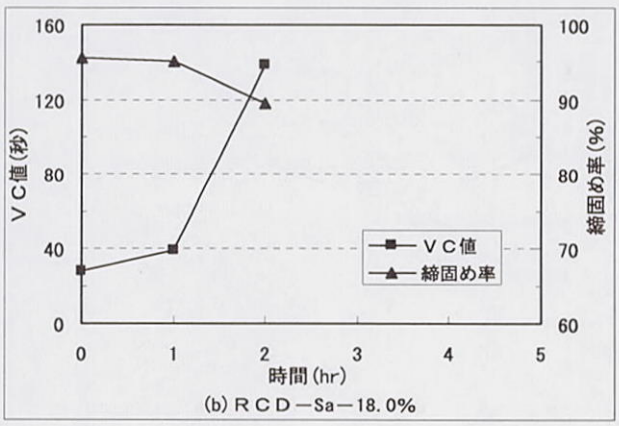
SF：スランプフロー



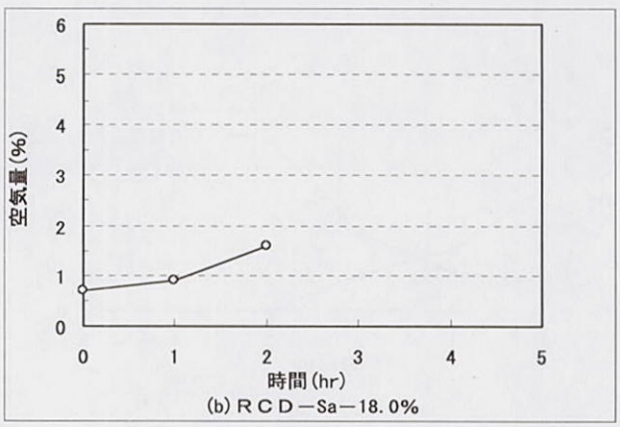
(a) ＲＣＤ－Sa－ 9.0%



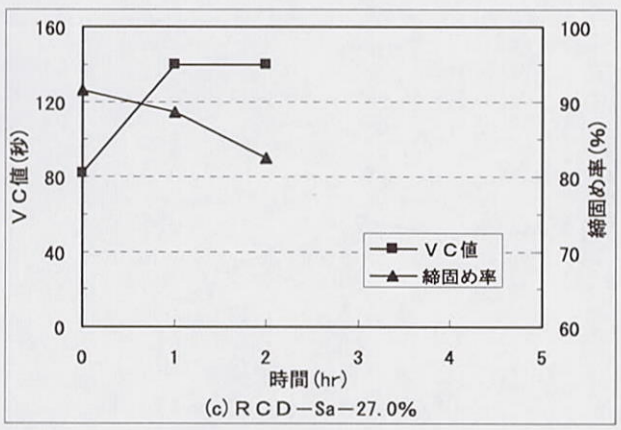
(a) ＲＣＤ－Sa－ 9.0%



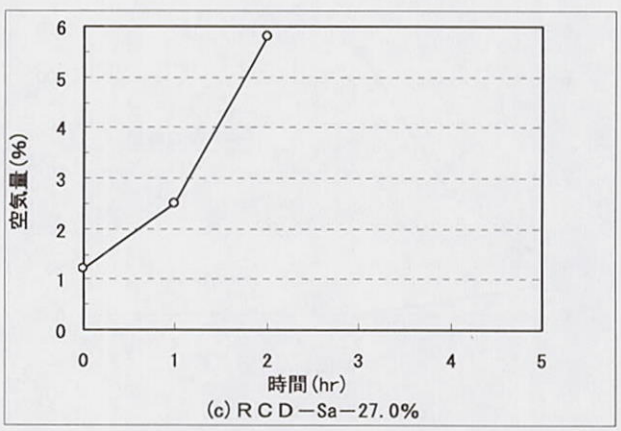
(b) ＲＣＤ－Sa－18.0%



(b) ＲＣＤ－Sa－18.0%

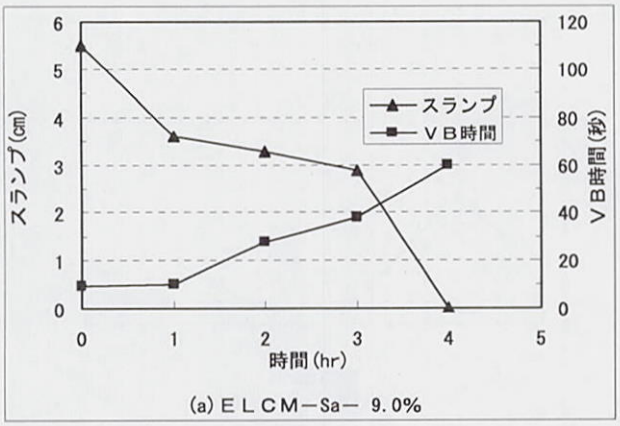


(c) ＲＣＤ－Sa－27.0%

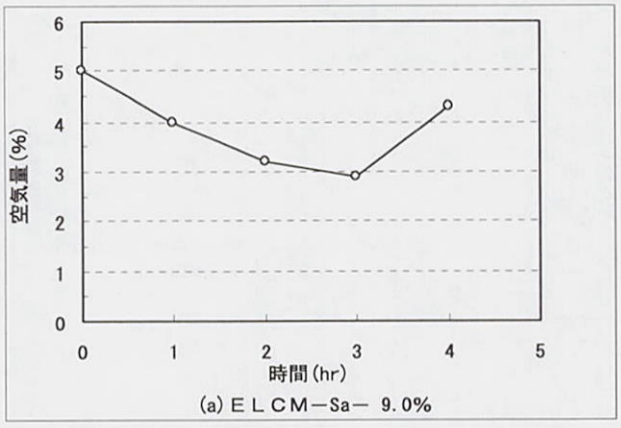


(c) ＲＣＤ－Sa－27.0%

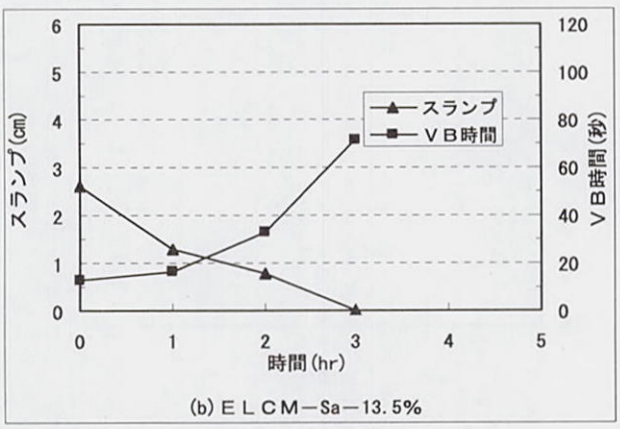
図－5.3.1　コンシステンシーと空気量の経時変化（ＲＣＤ配合）



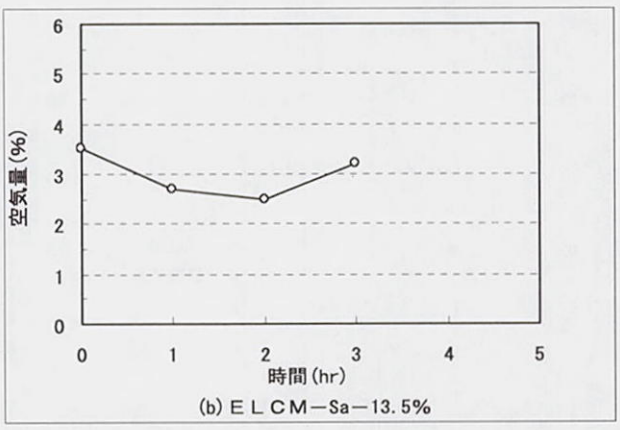
(a) ＥＬＣＭ－Sa－ 9.0%



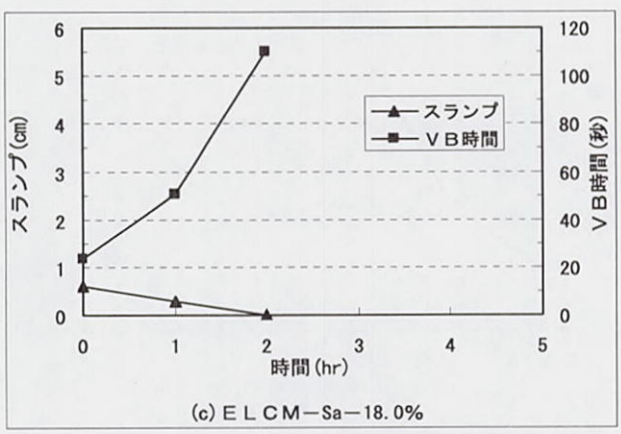
(a) ＥＬＣＭ－Sa－ 9.0%



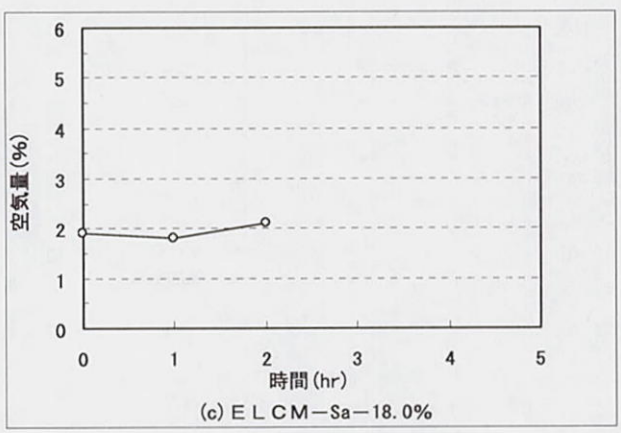
(b) ＥＬＣＭ－Sa－13.5%



(b) ＥＬＣＭ－Sa－13.5%

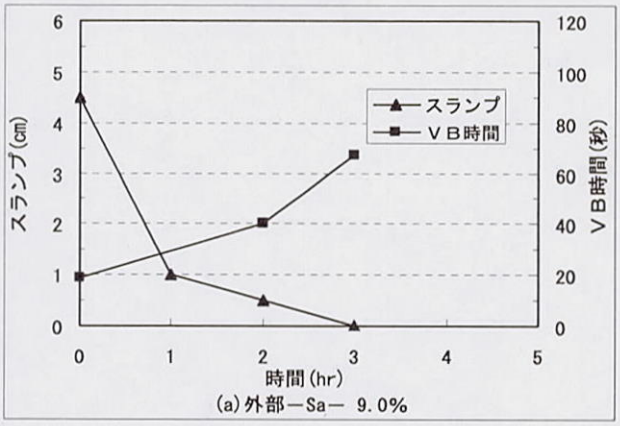


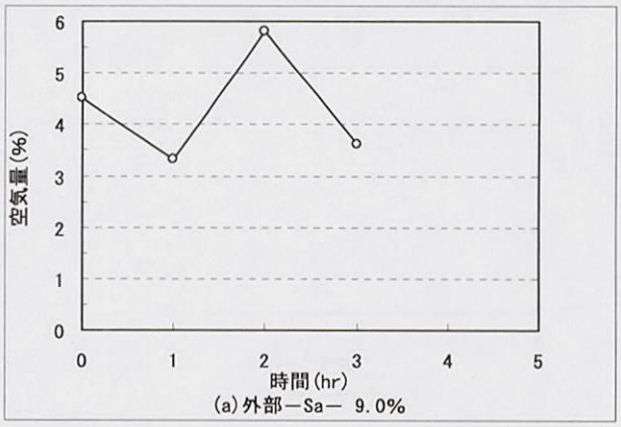
(c) ＥＬＣＭ－Sa－18.0%

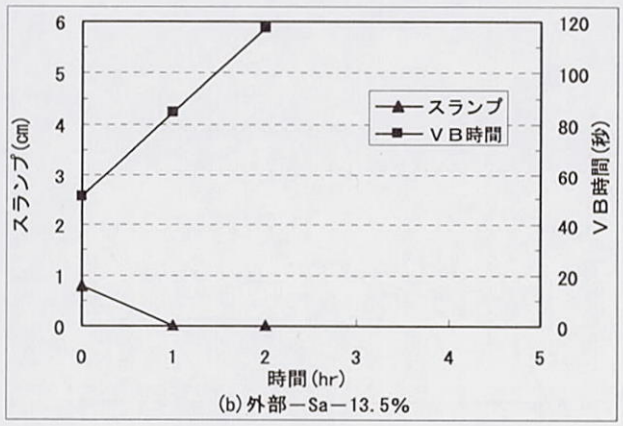


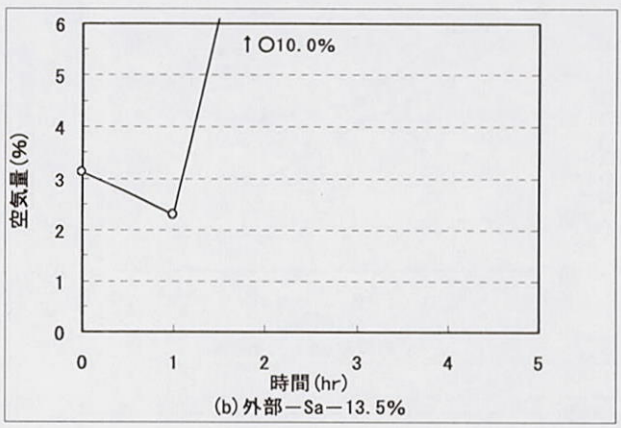
(c) ＥＬＣＭ－Sa－18.0%

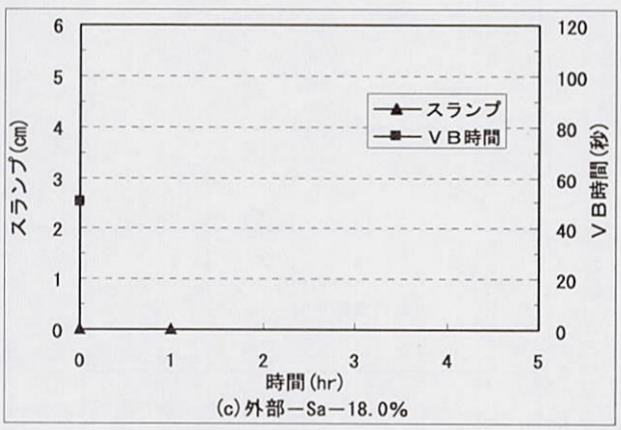
図－5.3.2　コンシステンシーと空気量の経時変化（ＥＬＣＭ配合）

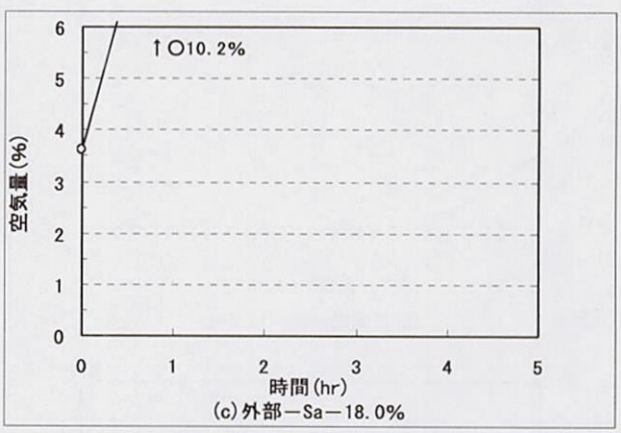




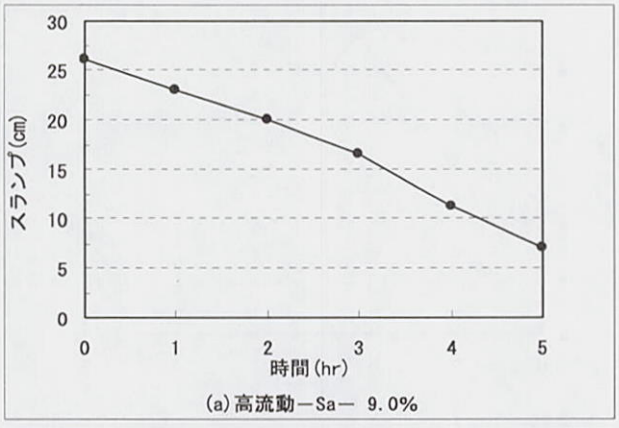




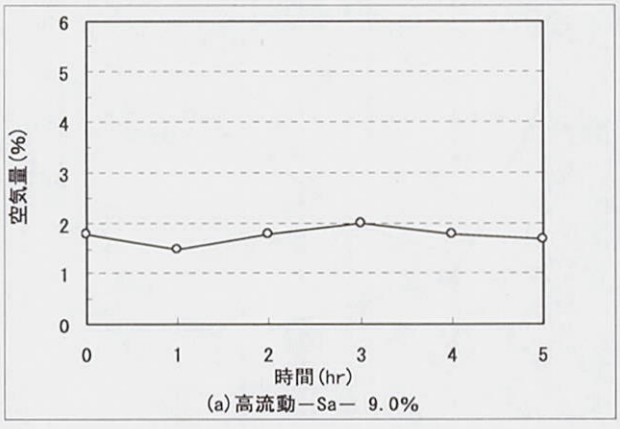




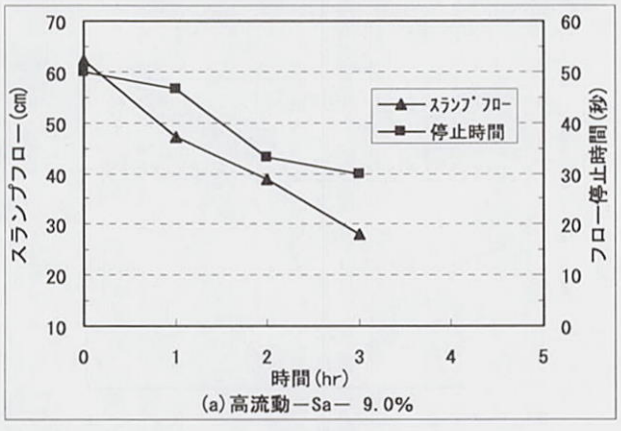
図－5.3.3　コンシステンシーと空気量の経時変化（外部配合）



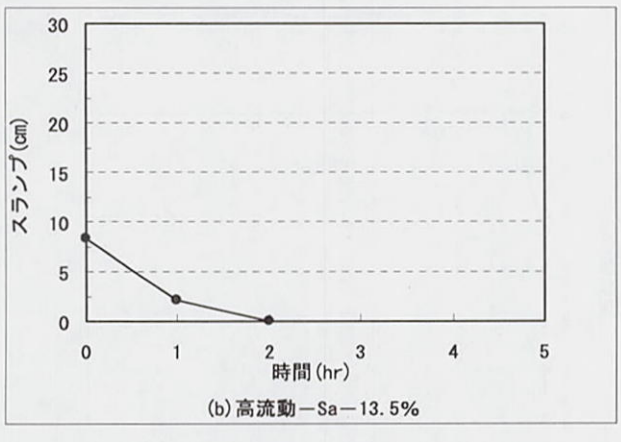
(a)高流動－Sa－ 9.0%



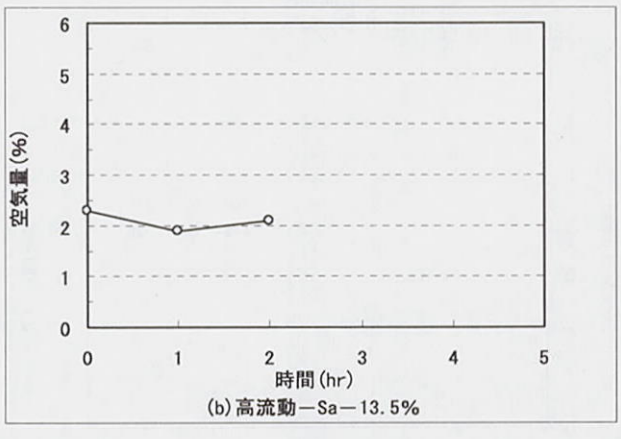
(a)高流動－Sa－ 9.0%



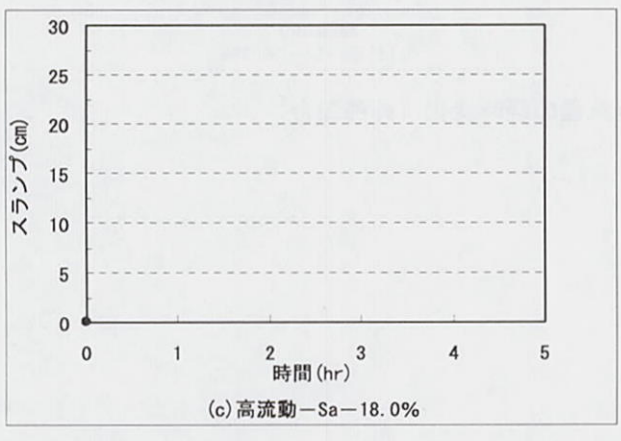
(a)高流動－Sa－ 9.0%



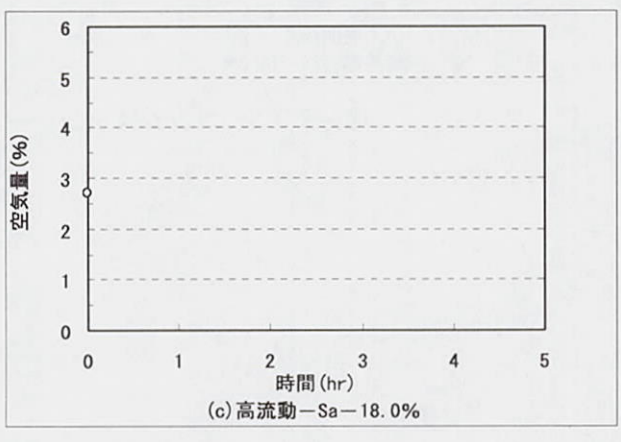
(b)高流動－Sa－13.5%



(b)高流動－Sa－13.5%

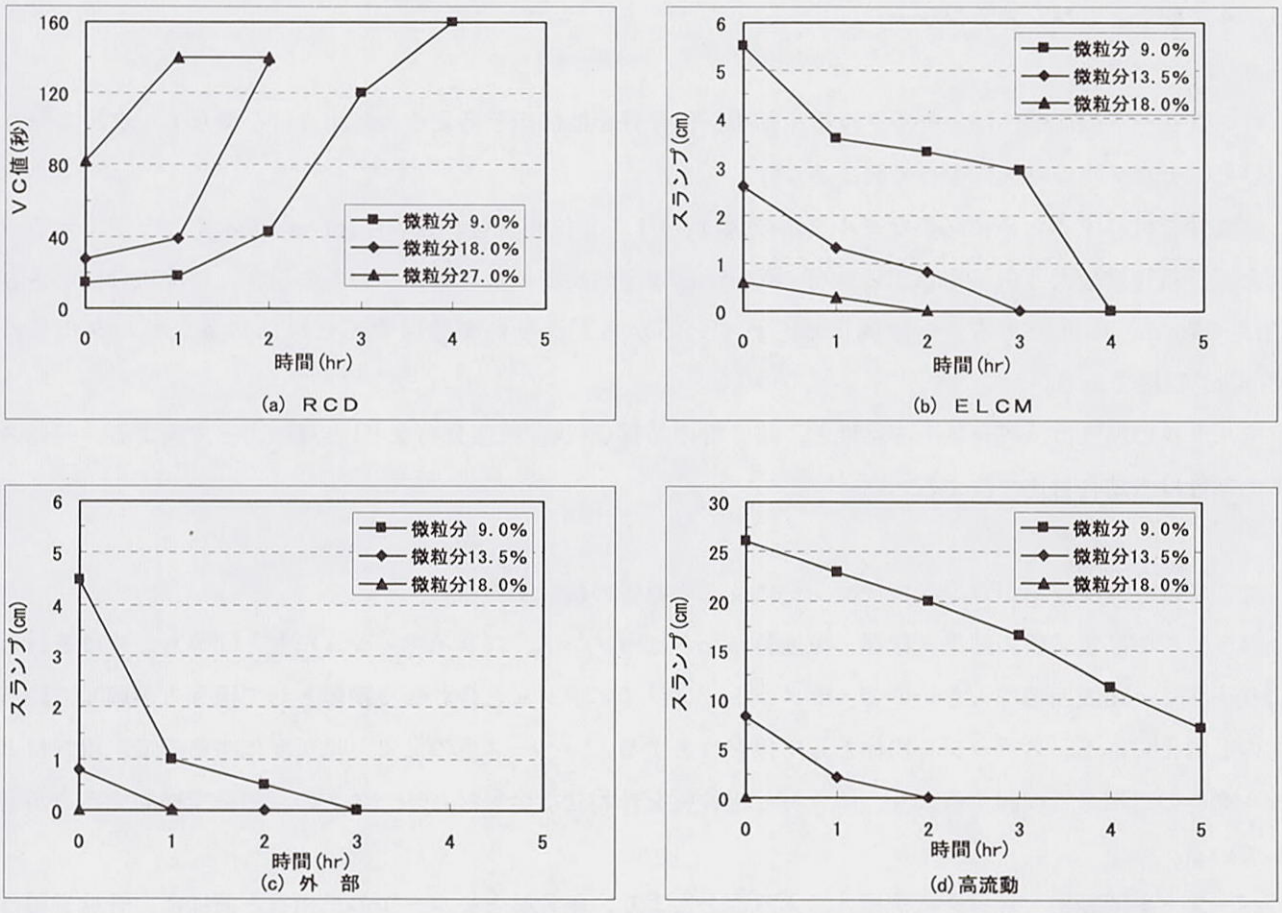


(c)高流動－Sa－18.0%

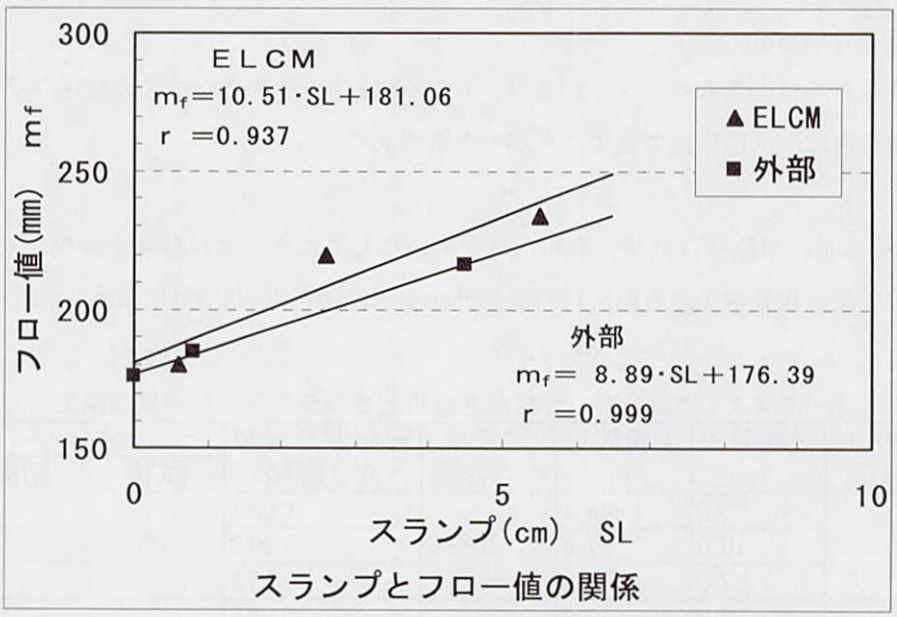


(c)高流動－Sa－18.0%

図－5.3.4　コンシステンシーと空気量の経時変化（高流動配合）



図－5.3.5　微粒分率とコンシステンシー



図－5.3.6　コンクリートとモルタルのワーカビリティー

5．4　配合とコンシステンシー

コンクリートの流動性は、モルタルを流動相、粗骨材を抵抗相と考えると、粗骨材を覆うモルタルの厚さ(量)と、モルタルの粘性によって決まる。

流動性を付与するために必要なモルタルの量は、(1－単位粗骨材かさ容積)m^3/m^3 で示すことができる。例えば，粗骨材最大寸法 40mm で、スランプ 5cm 程度の硬練りのコンクリートの場合、単位粗骨材かさ容積は $0.7m^3/m^3$ 程度であることは既に知られているから，流動性を確保するために必要なモルタル量は $0.3m^3/m^3$ 程度である。

モルタルの粘性は、ペーストの粘性と，細骨材の品質(形状・粒度分布など)と量によって決まる。ペーストの粘性は水結合材比で決まる。

ここでは、スラッジがコンシステンシーに及ぼす影響の検討である。

スラッジの品質試験の結果、粒径、粒度分布などはセメント、フライアッシュなどと同等もしくはそれらより小さく、比表面積は大きいので、セメント、フライアッシュと合わせて粉体として扱う方が適しているものと考えられる。スラッジを粉体として扱おうとすると、ペーストの品質と量が変化するので、粗骨材とモルタルの二相系で検討するより、細骨材と粗骨材を合わせた全骨材とペーストの二相系で検討する方が適している。

ペーストを流動相、骨材を抵抗相と考えることにより、粗骨材とモルタルの二相系と同様に、骨材を覆うペーストの厚さ(量)と、ペーストの粘性によって検討することができる。

骨材とペーストの二相系で検討するにあたって、骨材は、細骨材と粗骨材を混合したとき(細粗混合骨材)のかさ容積を知る必要がある。

流動性を付与するために必要なペーストの量は、(1－単位細粗混合骨材かさ容積)m^3/m^3 で示すことができる。ペーストの粘性は、水粉体比で表すことができるであろう。

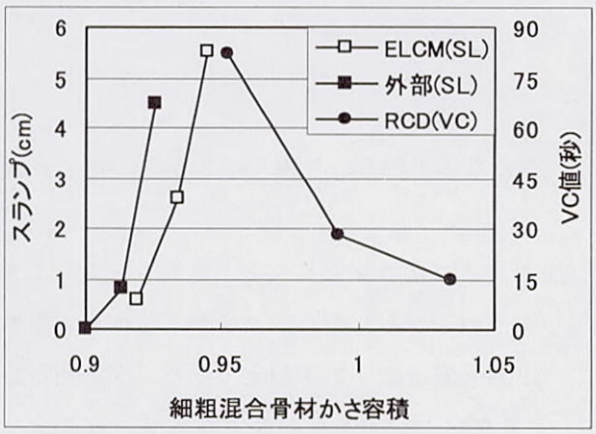
表－5.1.1の単位水量、単位結合材料、混和剤量を一定にしておき、微粒分率を変化させた配合の、コンシステンシー試験結果と粗骨材かさ容積，細粗混合骨材かさ容積を表－5.4.1に示す。

表－5.4.1　微粒分率，骨材かさ容積とコンシステンシー試験結果

コンクリートの種類	微粒分率 %	水粉体比 %	粗骨材かさ容積	細粗混合骨材かさ容積	コンシステンシー 試験	コンシステンシー 結果
RCD	9.0	94.1	0.676	1.034	VC	15
	18.0	57.4		0.993		28
	27.0	41.3		0.952		82
ELCM	9.0	73.6	0.699	0.945	スランプ	5.5
	13.5	63.1		0.934		2.6
	18.0	55.3		0.919		0.6
外部	9.0	50.0	0.707	0.926	スランプ	4.5
	13.5	44.9		0.913		0.8
	18.0	41.1		0.900		0

単位粗骨材量は一定なので、粗骨材かさ容積も一定であり、スラッジの影響を表わすことはできない。細粗混合骨材かさ容積とコンシステンシー試験結果は図－5.4.1のとおりであった。いずれも予想に反し、かさ容積が小さくなると流動性は低下している。これは、図－5.4.2に水粉体比とコンシステンシー試験結果の関係を示すとおり、スラッジを加えることによりペーストの粘性が増加したためである。

今回は、水結合材比が一定で、しかも混和剤量も一定にしているので、スラッジの混入量が増えることによりペーストの粘性が変化し、スラッジがコンクリートのコンシステンシーに及ぼす影響を検討するまでには至らなかった。今後は、スラッジを混入したときのペーストの粘性を考慮し、混和剤の種類や使用量を変化させたときの検討が必要である。



図－5.4.1　細粗混合骨材かさ容積とコンシステンシー試験結果

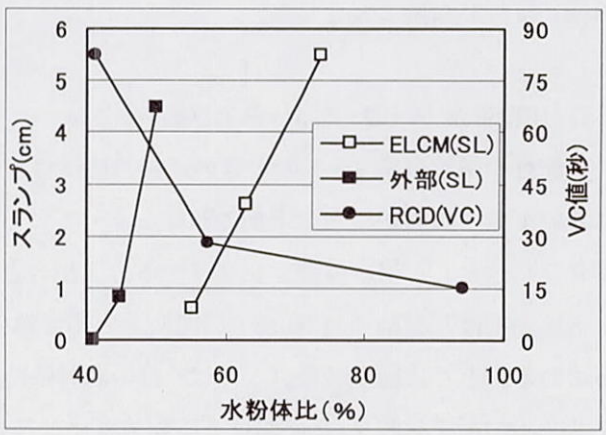


図-5.4.2　水粉体比とコンシステンシー試験結果

５．５　強度試験結果

4 種類の配合別圧縮強度試験と割裂引張強度試験結果を**表－5.5.1～5.5.4**，粗骨材割裂面積の測定結果を**表－5.5.5**，また**図－5.5.1**に材齢,微粒分率と圧縮強度の関係，**図－5.5.2**に圧縮強度と割裂引張強度ならびに微粒分率と割裂引張強度の関係，**図－5.5.3～5.5.5**には圧縮強度,割裂引張強度,曲げ強度の強度発現と，微粒分率9.0%のときの強度に対する微粒分率18.0%のときの強度比を示した。**図－5.5.6**に圧縮強度と静弾性係数の関係，**図－5.5.7**に割裂引張強度と粗骨材割裂面積率の関係を示す。

なお，圧縮強度，割裂引張強度試験供試体の締固め率の標準偏差は，ＲＣＤがそれぞれ 0.43，0.93（圧縮，引張供試体の順。以下同じ。），ＥＬＣＭが 0.57，0.60，外部が 0.99，0.77，高流動が 0.64，0.88 とほぼ一定であり，「４章モルタル試験」で実施した供試体の締固め率のように変動幅が大きくないことから，測定値の補正は行わないこととした。

1）圧縮強度　（図－5.5.1および図－5.5.3）

各配合の微粒分率 9.0 %のときの圧縮強度は材齢とともに大きくなっており，材齢 182 日から 365 日の間においても，なおかつ強度増加の傾向を示している。

ＲＣＤ，ＥＬＣＭ，外部コンクリートの３配合ともにスラッジを入れたコンクリート（スラッジコンクリート）強度は，材齢 365 日までの間において微粒分率9.0%（スラッジなし）のコンクリート強度を上まわっている。とくに練混ぜ後 1，7，28 日の若材齢時において，圧縮強度比は 1.2 を超えている。ダム用コンクリートの標準材齢 91 日における圧縮強度比はＲＣＤ 1.20，ＥＬＣＭ 1.22，外部 1.08 となっている。

高流動の場合も若材齢時にはスラッジコンクリート強度はスラッジなしのコンクリート強度を上まわっているが，28 日材齢以降 365 日材齢までの圧縮強度比は 0.9 前後で推移している。圧縮強度そのものは，材齢 91 日で約 45N/mm^2，365 日材齢で約 65N/mm^2 と高い強度が得られている。

2）割裂引張強度　（図－5.5.2および図－5.5.4）

圧縮強度の大きさに対する割裂引張強度の大きさには正の相関がみられることから，図中には直線回帰した直線と近似式を示した。圧縮強度と割裂引張強度の比率はＲＣＤ 0.125，ＥＬＣＭ 0.102，外部 0.088，高流動 0.074 である。表現を換えれば，配合毎の割裂引張強度は，圧縮強度の 1/8 ～ 1/14 であるといえる。

したがって割裂引張強度の大きさは，微粒分率の多少に依らず，各配合毎に圧縮強度の大きさによって求めることができ，微粒分率が多いことによる割裂引張強度低下の影響はみられない。

外部，高流動コンクリートでは各々の圧縮強度が 45N/mm^2，60N/mm^2 を超える強度域では割裂引張強度の増加は頭打ちになっている。

さらに図中には，「平成８年制定 コンクリート標準示方書［設計編］　3.2.1　強度」に示されている一般の普通コンクリートに対する，圧縮強度の特性値 f'_{ck}（設計基準強度）に基づく引張強度 f_{tk} の特性値の算定式（$f_{tk} = 0.23\ f'^{2/3}_{ck}$）による値を比較用に示した。今回の配合による割裂引張強度の大きさは圧縮強度の大きさに比例することから，圧縮強度が大きくなるに従い，算定式による引張強度の特性値との差はより大きくなっている。

強度比は圧縮の場合と同様の傾向を示しており、高流動コンクリート以外はスラッジなしの強度を上回っており、初期の強度比は大きく、長期になると一定値に収束する傾向がある。

3) 曲げ強度 （図－5.5.5）

図－5.5.5は5.6節の結果であり、外部コンクリートのみの結果である。水中養生を7日または28日までとし、水中養生直後とその後6ヶ月,12ヶ月に曲げ強度試験を行なった結果である。

水中養生期間が長いほうが強度が高いこと,強度比は、試験結果が少ないので明確ではないが,圧縮強度,割裂引張強度とほぼ同様にスラッジなしよりも強度が高くなっている。

4) 静弾性係数 （図－5.5.6）

図中には圧縮強度と静弾性係数の関係について，微粒分率毎に対数近似したときの曲線と近似式（図中の上から下へ，微粒分率の少ない順に式を表示），および「平成8年制定 コンクリート標準示方書［設計編］3.4.2 ヤング係数」に示されている一般の値を比較用に示した。

圧縮強度と静弾性係数は互いに高い相関関係にあり，近似曲線もほぼ類似していることから，圧縮強度と静弾性係数の関係には微粒分率の多少による違い，すなわちスラッジ混入の有無とその量にかかわらず，各配合毎にほぼ同程度であると判断される。高流動の圧縮強度 30N/mm^2 以上の強度域において標準示方書の値より小さい個所があるものの，その他は標準示方書の値より大きい。

さらに外部，高流動コンクリートでは割裂引張強度と同じく，圧縮強度が 45N/mm^2，60N/mm^2 を超える強度域では弾性係数の増加は頭打ちになる傾向がある。

5) 粗骨材割裂面積率 （図－5.5.7）

コンクリート供試体に作用する引張力の増加に伴い，粗骨材の分担する引張力も大きくなることから粗骨材の割裂率が上がり，両者の間には正の相関がみられる。図中には直線回帰したときの直線と近似式を示した。

表－5.5.1　コンクリートの圧縮強度，割裂引張強度試験結果（ＲＣＤ配合）

配合	スラッジの種類	微粒分率 (%)	材　齢 (日)	圧縮強度試験 単位容積質量 (kg/m³)	圧縮強度 (N/mm²)	静弾性係数 ×10⁴(N/mm²)	ﾎﾟｱｿﾝ比	割裂引張強度試験 単位容積質量 (kg/m³)	引張強度 (N/mm²)
ＲＣＤ	なし	9.0	1	2,401	1.68	0.20	0.05	2,344	0.20
			7	2,404	4.28	0.96	0.08	2,377	0.45
			28	2,390	6.90	1.91	0.15	2,397	0.89
			91	2,410	13.15	2.70	0.08	2,415	1.56
			182	2,402	17.19	3.03	0.12	2,379	2.40
			365	2,417	23.54	3.29	0.11	2,407	3.05
	Sa	18.0	1	2,403	2.16	0.28	0.07	2,403	0.25
			7	2,412	5.22	1.22	0.12	2,423	0.64
			28	2,420	9.77	2.09	0.12	2,393	1.23
			91	2,418	15.75	2.75	0.13	2,424	2.18
			182	2,418	22.04	3.06	0.15	2,427	2.85
			365	2,429	27.78	3.37	0.16	2,406	3.36
		27.0	1	2,387	2.30	0.21	0.05	2,407	0.28
			7	2,403	5.40	1.21	0.13	2,401	0.65
			28	2,407	9.52	1.90	0.11	2,419	1.19
			91	2,411	15.37	2.69	0.15	2,429	1.75
			182	2,404	19.27	2.78	0.13	2,425	2.49
			365	2,413	25.60	3.05	0.16	2,436	2.95

表－5.5.2　コンクリートの圧縮強度，割裂引張強度試験結果（ＥＬＣＭ配合）

配合	スラッジの種類	微粒分率 (%)	材　齢 (日)	圧縮強度試験 単位容積質量 (kg/m³)	圧縮強度 (N/mm²)	静弾性係数 ×10⁴(N/mm²)	ﾎﾟｱｿﾝ比	割裂引張強度試験 単位容積質量 (kg/m³)	引張強度 (N/mm²)
ＥＬＣＭ	なし	9.0	1	2,344	1.63	0.30	0.00	—	0.19
			7	2,365	4.85	1.95	0.01	—	0.48
			28	2,371	10.57	2.34	0.07	—	1.32
			91	2,367	21.43	2.79	0.14	2,371	2.42
			182	2,367	27.93	3.00	0.11	2,397	2.88
			365	2,370	32.87	3.18	0.17	2,379	3.20
	Sa	13.5	1	2,350	1.60	0.46	0.03	—	0.22
			7	2,383	5.83	1.95	0.02	—	0.66
			28	2,386	13.29	2.44	0.05	—	1.55
			91	2,377	24.23	2.93	0.17	2,398	2.89
			182	2,380	29.54	2.98	0.11	2,406	3.33
			365	2,377	34.14	3.37	0.17	2,397	3.33
		18.0	1	2,377	1.91	0.78	0.04	—	0.20
			7	2,384	6.59	2.09	0.04	—	0.79
			28	2,386	14.49	2.46	0.06	—	1.70
			91	2,392	26.05	2.96	0.17	2,397	2.88
			182	2,394	29.78	3.21	0.08	2,418	3.31
			365	2,393	34.25	3.52	0.16	2,408	3.38

表－5.5.3　コンクリートの圧縮強度，割裂引張強度試験結果（外部配合）

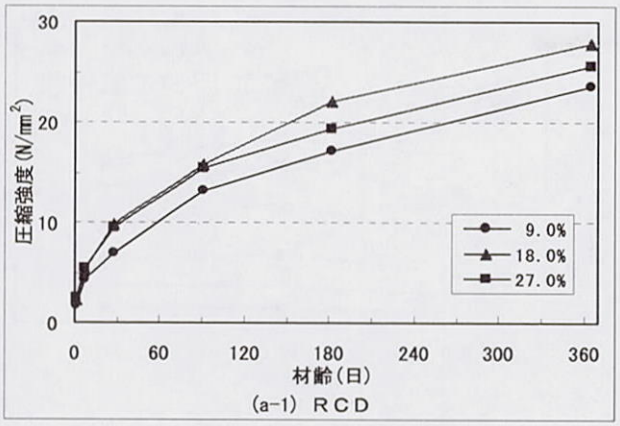
配合	スラッジの種類	微粒分率 (%)	材　齢 (日)	圧縮強度試験				割裂引張強度試験	
				単位容積質量 (kg/m^3)	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 $\times 10^4 (N/mm^2)$	ﾎﾟｱｿﾝ比	単位容積質量 (kg/m^3)	引張強度 (N/mm^2)
外　部	なし	9.0	1	2,348	2.82	0.86	0.00	—	0.43
			7	2,355	11.11	2.69	0.05	—	1.32
			28	2,355	21.97	2.53	0.09	—	2.03
			91	2,357	38.48	2.95	0.16	2,400	3.95
			182	2,367	43.81	3.49	0.18	2,393	3.69
			365	2,372	47.62	3.59	0.13	2,412	4.44
	Sa	13.5	1	2,365	4.46	1.35	0.00	—	0.51
			7	2,395	14.18	2.47	0.07	—	1.46
			28	2,395	27.77	2.79	0.10	—	2.30
			91	2,398	40.72	3.21	0.16	2,438	4.15
			182	2,400	46.67	3.44	0.17	2,410	4.21
			365	2,399	48.87	3.76	0.16	2,419	4.58
		18.0	1	2,382	4.20	1.35	0.00	—	0.48
			7	2,406	15.59	2.45	0.06	—	1.65
			28	2,411	29.17	2.71	0.11	—	2.40
			91	2,409	41.50	3.16	0.15	2,454	3.78
			182	2,419	44.33	3.65	0.20	2,426	4.03
			365	2,422	49.98	3.61	0.15	2,422	4.42

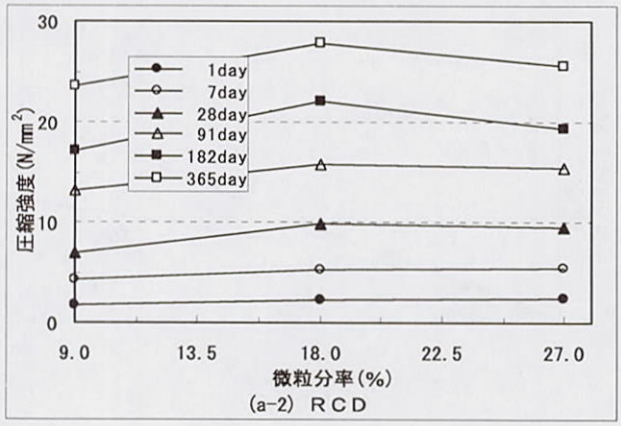
表－5.5.4　コンクリートの圧縮強度，割裂引張強度試験結果（高流動配合）

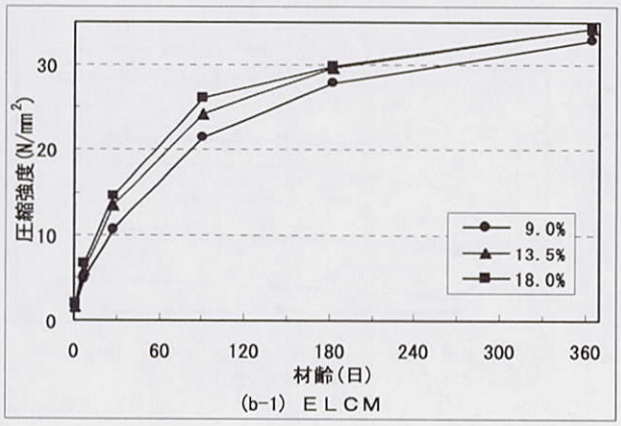
配合	スラッジの種類	微粒分率 (%)	材　齢 (日)	圧縮強度試験				割裂引張強度試験	
				単位容積質量 (kg/m^3)	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 $\times 10^4 (N/mm^2)$	ﾎﾟｱｿﾝ比	単位容積質量 (kg/m^3)	引張強度 (N/mm^2)
高流動	なし	9.0	2	2,329	6.53	1.51	0.08	2,323	0.86
			7	2,353	15.77	2.21	0.16	2,313	1.45
			28	2,362	28.27	2.41	0.16	2,355	2.51
			91	2,372	48.99	3.10	0.17	2,368	4.48
			182	2,366	56.85	3.46	0.18	2,372	5.11
			365	2,375	69.94	3.37	0.18	2,370	5.07
	Sa	13.5	2	2,329	7.25	1.19	0.08	2,301	0.83
			7	2,336	15.19	2.16	0.12	2,357	1.51
			28	2,331	26.05	2.27	0.17	2,327	1.97
			91	2,348	44.84	3.12	0.18	2,334	3.68
			182	2,346	50.38	3.24	0.20	2,339	4.20
			365	2,351	64.89	3.35	0.20	2,348	4.31
		18.0	2	2,326	8.24	1.52	0.08	2,320	0.95
			7	2,348	16.64	2.09	0.16	2,330	1.50
			28	2,347	26.87	2.24	0.16	2,348	2.64
			91	2,356	44.69	3.05	0.19	2,357	4.13
			182	2,356	54.03	3.34	0.18	2,348	4.96
			365	2,366	62.90	3.25	0.19	2,365	4.94

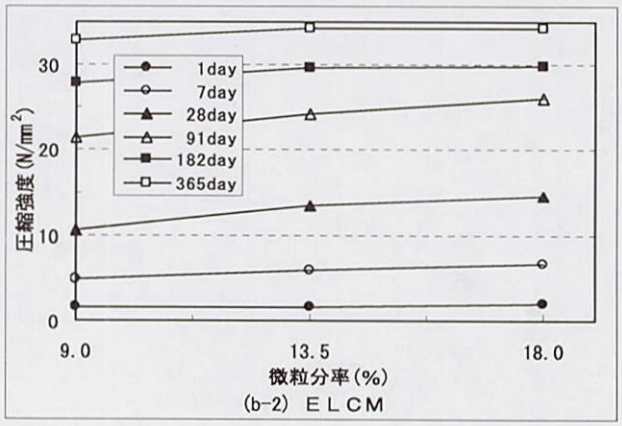
表－5.5.5　粗骨材の割裂面積率

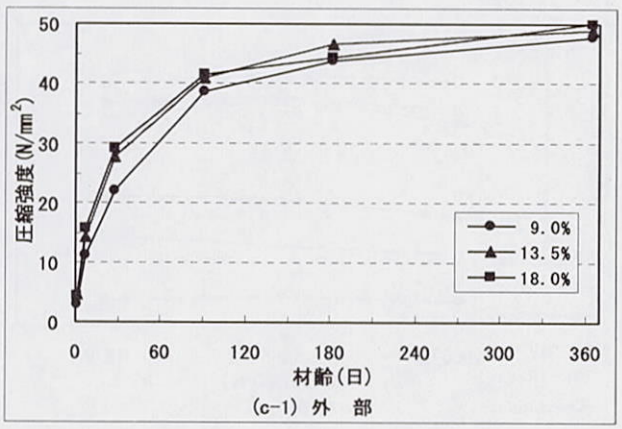
配合	スラッジの種類	微粒分率 (%)	材齢 (日)	割裂面に対する比率			粗骨材割裂面積率 (%)
				割れている粗骨材 (%)	割れていない粗骨材 (%)	粗骨材面積 (%)	
RCD	なし	9.0%	1	3.4	43.4	46.8	7.3
			7	6.8	41.1	47.9	14.1
			28	3.0	23.6	26.6	11.3
			91	27.1	28.8	55.9	48.4
	Sa	18.0%	1	1.0	31.6	32.6	3.2
			7	9.7	49.8	59.5	16.2
			28	10.5	27.4	37.9	27.8
			91	16.6	22.6	39.2	42.3
		27.0%	1	2.4	44.7	47.1	5.0
			7	7.2	33.3	40.5	17.7
			28	10.1	44.3	54.3	18.6
			91	19.4	32.9	52.3	37.2
ELCM	なし	9.0%	1	7.6	44.1	51.7	14.7
			7	2.0	47.0	49.0	4.2
			28	3.7	33.0	36.7	10.2
			91	22.4	17.8	40.2	55.7
	Sa	13.5%	1	0.0	25.2	25.2	0.0
			7	2.1	57.6	59.7	3.6
			28	15.7	26.4	42.1	37.4
			91	24.7	32.4	57.0	43.3
		18.0%	1	3.7	20.1	23.8	15.4
			7	2.7	60.6	63.3	4.2
			28	14.8	48.1	62.9	23.6
			91	24.7	28.6	53.4	46.3
外　部	なし	9.0%	1	7.8	72.8	80.6	9.7
			7	13.5	39.8	53.4	25.4
			28	20.2	39.5	59.7	33.9
			91	35.9	30.9	66.8	53.8
	Sa	13.5%	1	9.6	49.9	59.5	16.1
			7	20.5	42.3	62.8	32.7
			28	19.9	29.3	49.2	40.4
			91	39.0	13.7	52.7	74.0
		18.0%	1	4.2	40.1	44.4	9.5
			7	19.7	25.9	45.5	43.2
			28	28.9	26.7	55.6	52.0
			91	36.7	11.1	47.8	76.8
高流動	なし	9.0%	2	10.6	21.6	32.1	32.9
			7	17.3	17.4	34.7	49.9
			28	37.5	9.0	46.5	80.7
			91	45.1	1.4	46.5	97.1
	Sa	13.5%	2	1.9	23.6	25.5	7.5
			7	7.4	28.0	35.3	20.9
			28	28.4	14.1	42.5	66.9
			91	43.2	5.6	48.8	88.5
		18.0%	2	5.8	20.0	25.8	22.5
			7	10.1	11.6	21.6	46.5
			28	21.2	15.7	36.9	57.5
			91	39.4	3.9	43.3	90.9

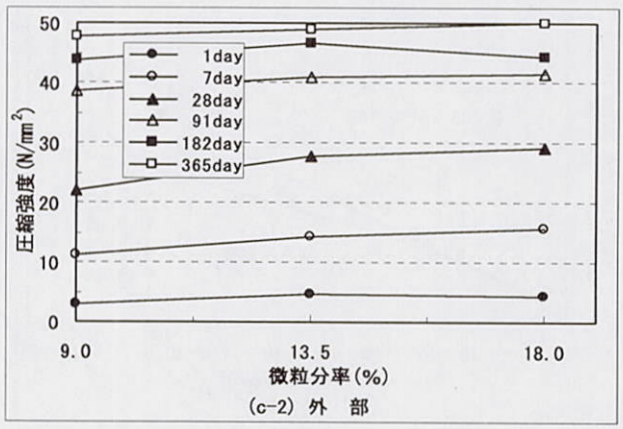

圧縮強度(N/mm²)
材齢(日)
9.0%
18.0%
27.0%
(a-1) RCD

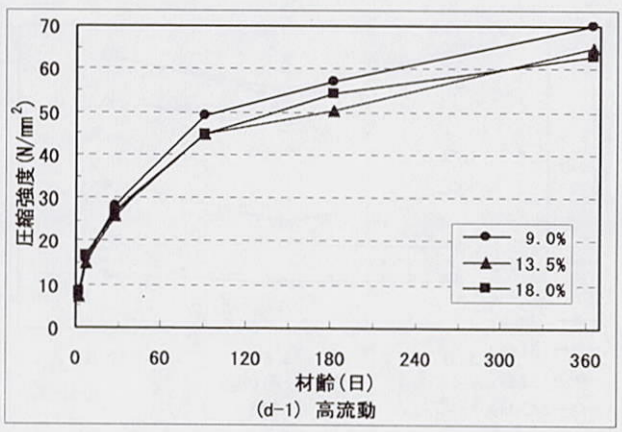

圧縮強度(N/mm²)
微粒分率(%)
1day
7day
28day
91day
182day
365day
(a-2) RCD

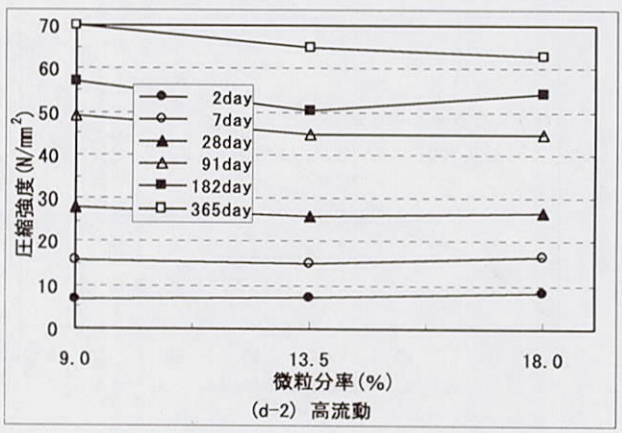

圧縮強度(N/mm²)
材齢(日)
9.0%
13.5%
18.0%
(b-1) ELCM


圧縮強度(N/mm²)
微粒分率(%)
1day
7day
28day
91day
182day
365day
(b-2) ELCM

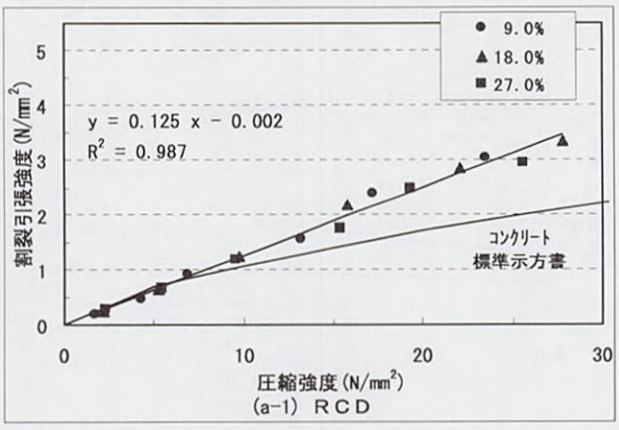

圧縮強度(N/mm²)
材齢(日)
9.0%
13.5%
18.0%
(c-1) 外 部

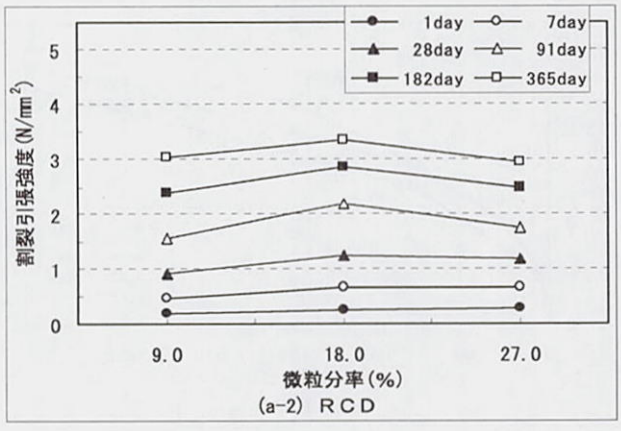

圧縮強度(N/mm²)
微粒分率(%)
1day
7day
28day
91day
182day
365day
(c-2) 外 部

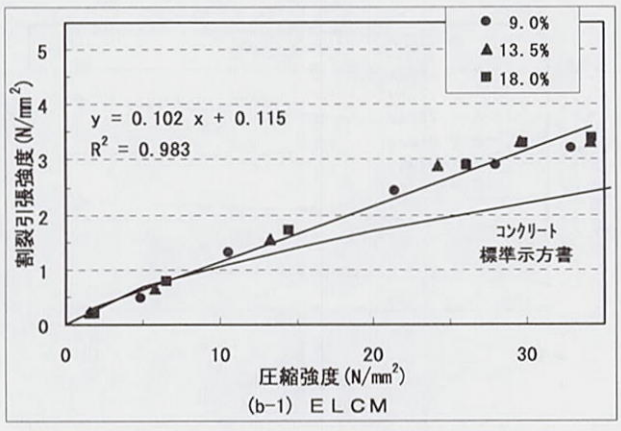

圧縮強度(N/mm²)
材齢(日)
9.0%
13.5%
18.0%
(d-1) 高流動

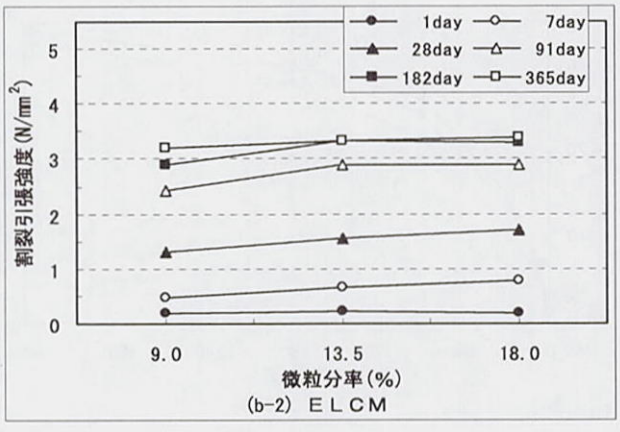

圧縮強度(N/mm²)
微粒分率(%)
2day
7day
28day
91day
182day
365day
(d-2) 高流動

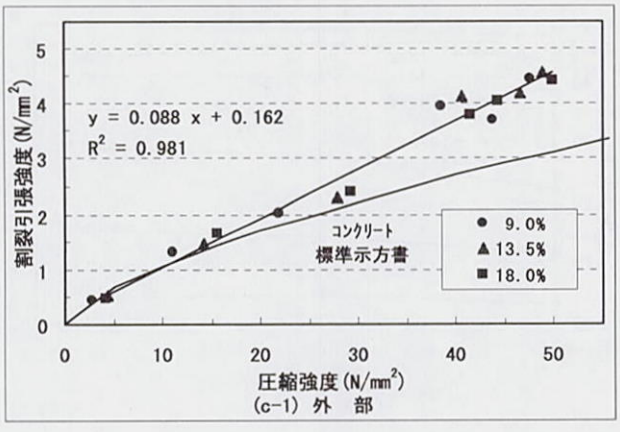
図－5.5.1 圧縮強度

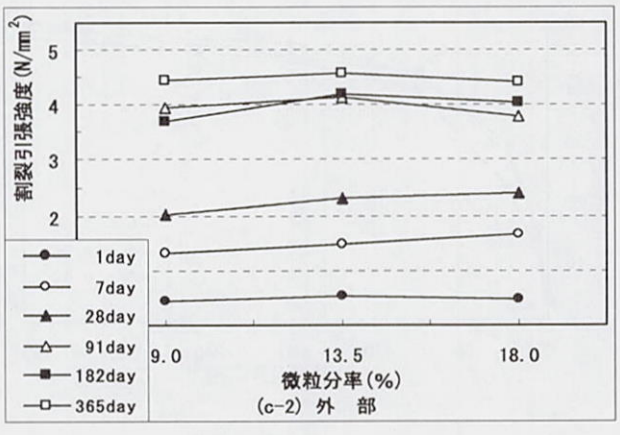

9.0%
18.0%
27.0%
y = 0.125 x - 0.002
R² = 0.987
コンクリート
標準示方書
割裂引張強度(N/mm²)
圧縮強度(N/mm²)
(a-1) RCD

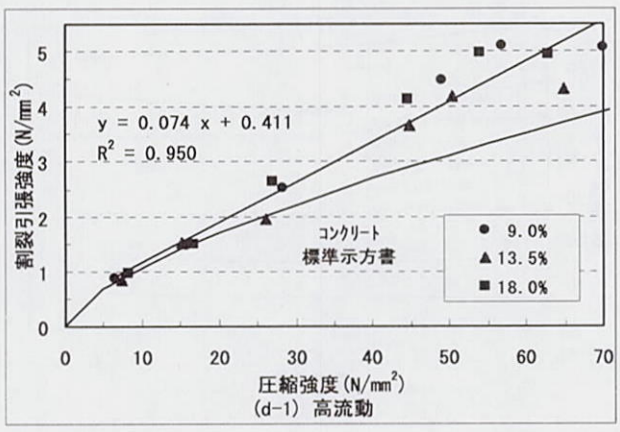

1day
7day
28day
91day
182day
365day
割裂引張強度(N/mm²)
9.0
18.0
27.0
微粒分率(%)
(a-2) RCD

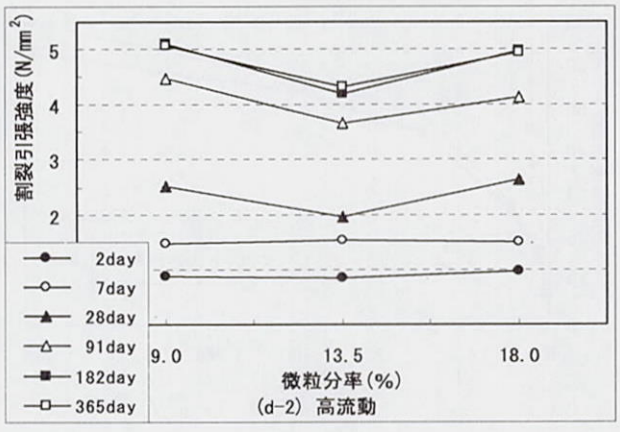

9.0%
13.5%
18.0%
y = 0.102 x + 0.115
R² = 0.983
コンクリート
標準示方書
割裂引張強度(N/mm²)
圧縮強度(N/mm²)
(b-1) ELCM


1day
7day
28day
91day
182day
365day
割裂引張強度(N/mm²)
9.0
13.5
18.0
微粒分率(%)
(b-2) ELCM


y = 0.088 x + 0.162
R² = 0.981
コンクリート
標準示方書
9.0%
13.5%
18.0%
割裂引張強度(N/mm²)
圧縮強度(N/mm²)
(c-1) 外 部


1day
7day
28day
91day
182day
365day
割裂引張強度(N/mm²)
9.0
13.5
18.0
微粒分率(%)
(c-2) 外 部


y = 0.074 x + 0.411
R² = 0.950
コンクリート
標準示方書
9.0%
13.5%
18.0%
割裂引張強度(N/mm²)
圧縮強度(N/mm²)
(d-1) 高流動


2day
7day
28day
91day
182day
365day
割裂引張強度(N/mm²)
9.0
13.5
18.0
微粒分率(%)
(d-2) 高流動

図－5.5.2 割裂引張強度

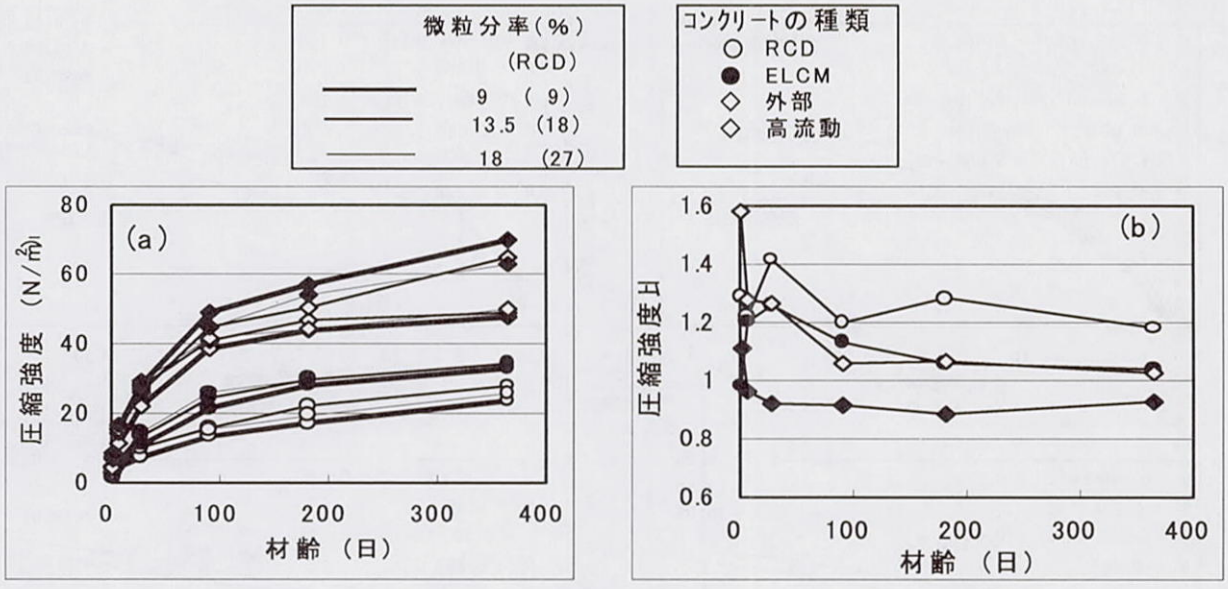


図-5.5.3 圧縮強度

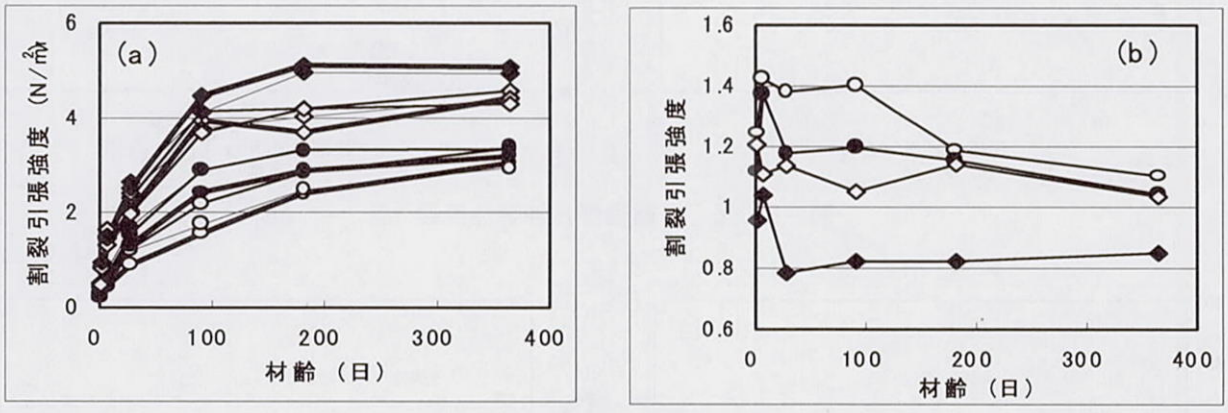


図-5.5.4 割裂引張強度

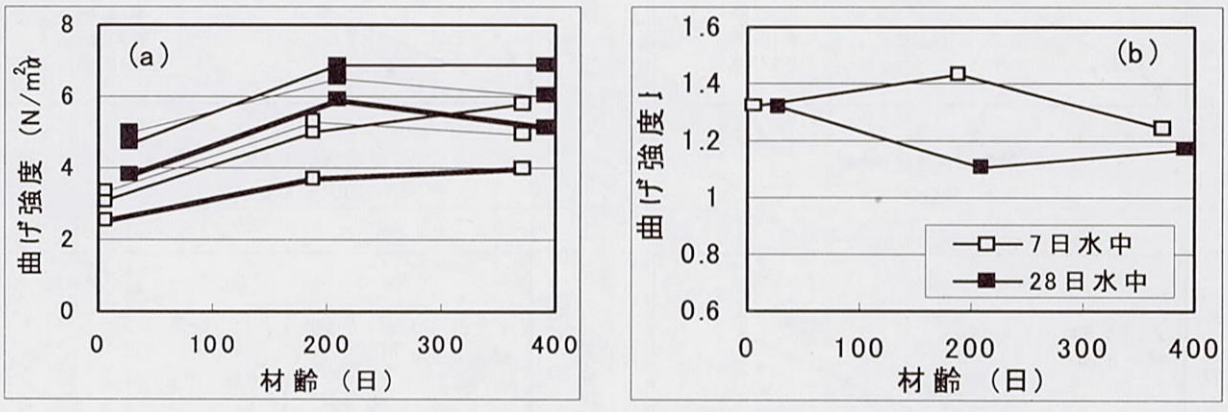
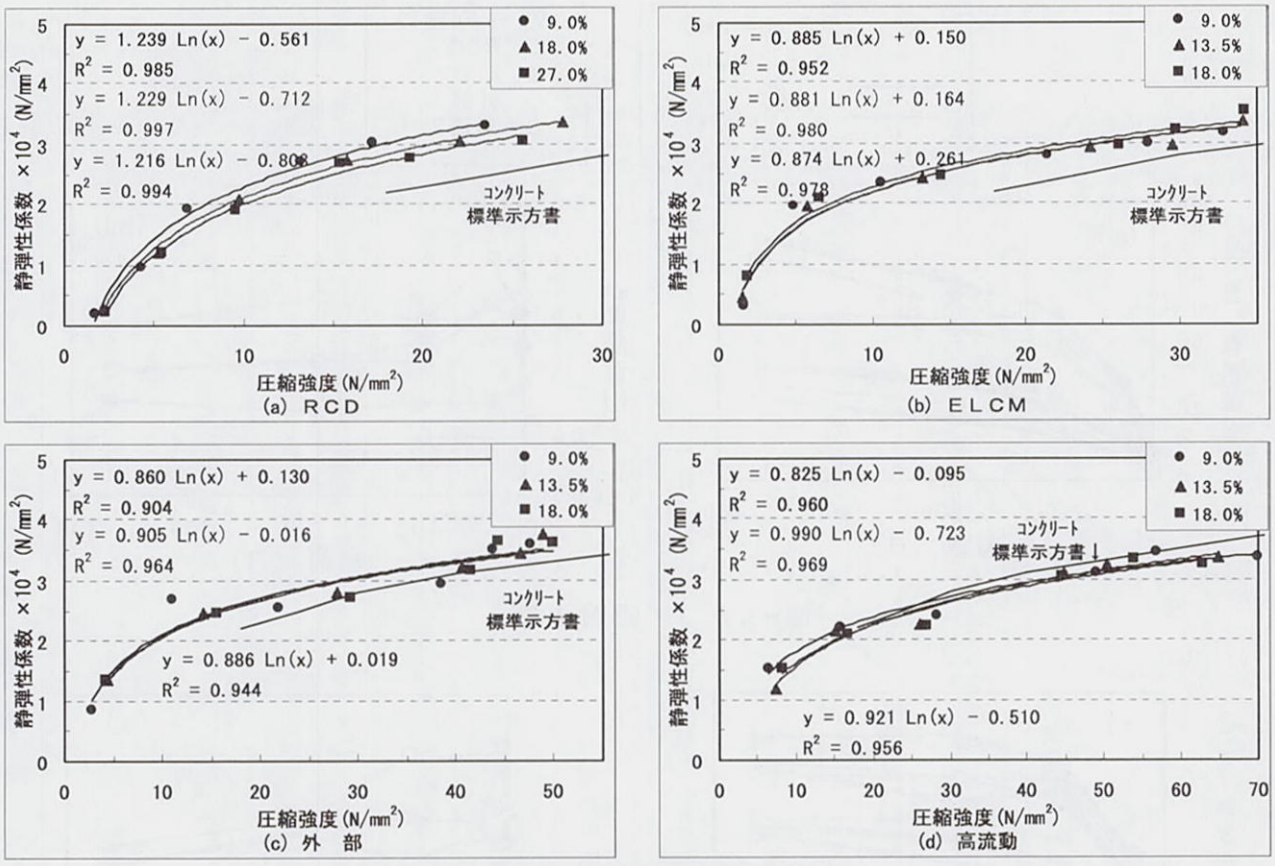
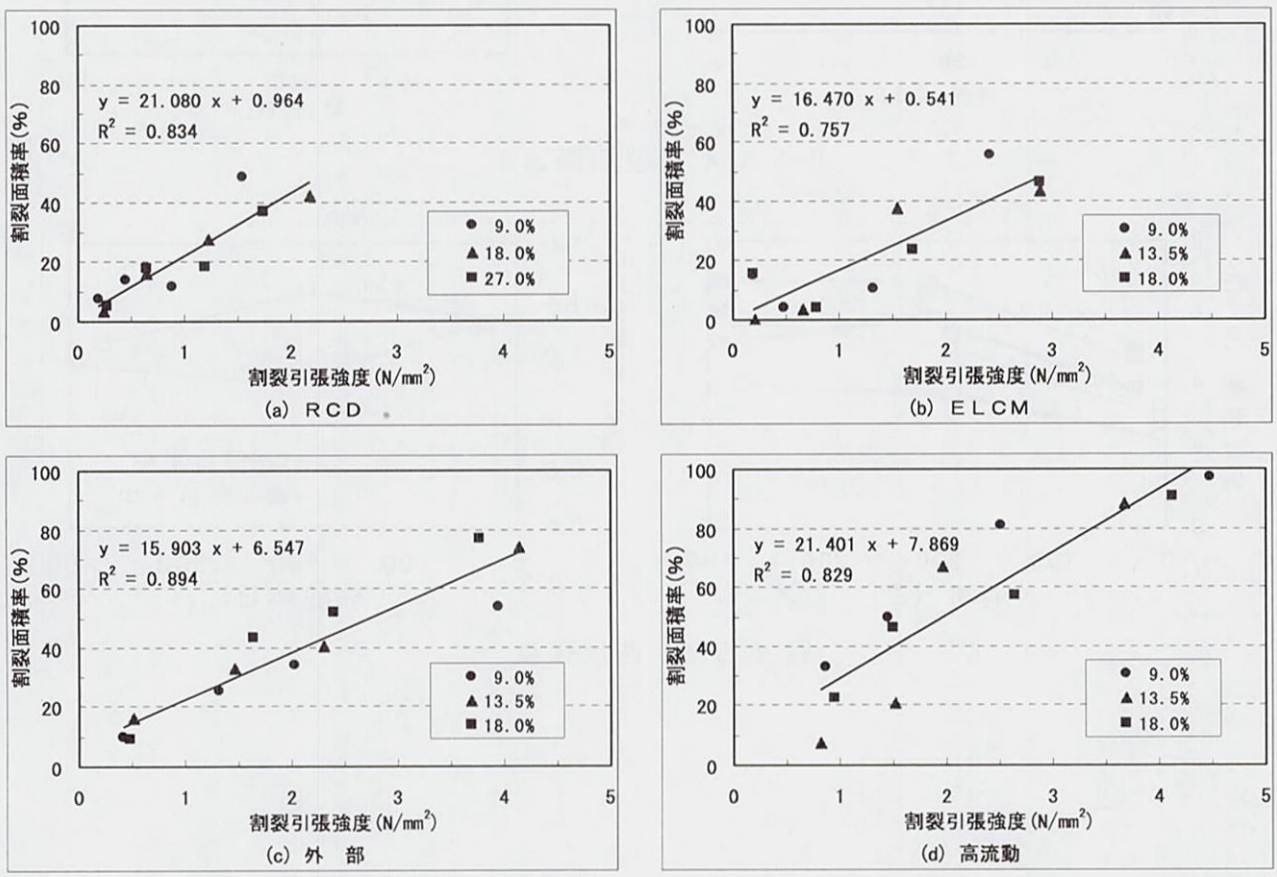


図-5.5.5 曲げ強度



図－5.5.6　圧縮強度と静弾性係数



図－5.5.7　割裂引張強度と粗骨材割裂面積率

５．６　外部コンクリートの耐久性試験結果

外部コンクリートを対象に養生条件と微粒分率を変化させたときの乾燥収縮試験，曲げ強度試験，中性化深さの測定，細孔径分布試験の結果を**表－5.6.1～5.6.4**と**図－5.6.1～5.6.4**に示す。

1）乾燥収縮　（図－5.6.1）

長さ変化は，気中養生期間 56 日（8 週）までは，水中養生期間の長い方が水中養生期間の短いものに比べて変化率が小さい，また気中養生期間 182 日（26 週）以降は微粒分率が多いほど変化率も大きくなる傾向がみられる。

質量変化率と相対動弾性係数については，水中養生期間の長い方が変化率は小さく，水中養生期間 28 日では微粒分率の多いほど変化率が小さい傾向を示している。

2）曲げ強度　（図－5.6.2）

供試体 1 体ずつの結果であるが水中養生期間の長い方が強度が大きく，スラッジなしのコンクリート強度に比べスラッジコンクリートの強度が 10 %以上（最大は 45 %）大きい結果となっている。

3）中性化深さ　（図－5.6.3）

図中には供試体の割裂断面を測定方向別に中性化深さ 5 点ずつ測定した平均値（点）と，1 供試体につき 60 点を測定した平均値（破線）を表示している。

中性化深さはコンクリート打設面が大きく，次に側面，底面が最小になるという一般的傾向を示し，水中養生期間の長い方が中性化深さは小さい。さらに微粒分率が多いほど中性化深さは小さく，微粒分率 9.0 %の中性化深さに対して概ね 20 ～ 30 %（最大は 45 %）の低減効果がみられる。

4）細孔径分布　（図－5.6.4）

水中養生終了時点での細孔径分布を示しており，水中養生期間が長いほど，さらに微粒分率が多いほど細孔量がピークとなるときの細孔径が小さい傾向を示す。

これはスラッジによりコンクリート組織が緻密化されたことによるものと考えられ，これまでの圧縮強度や割裂引張強度，曲げ強度の増加，さらに長さ変化や中性化深さが小さい理由の一つとして考えられる。

表－5.6.1　乾燥収縮試験結果（外部コンクリート）

水中養生期間 7日の場合

	微粒分率	気中養生経過日数(日)　(養生方法　温度：20℃，湿度：60%)							
	(%)	1	3※	7	28	56	91	182	365
長さ変化率 ×10^{-4}	9.0%	−0.21	−0.66	−1.25	−3.84	−5.02	−5.16	−5.63	−5.84
	13.5%	−0.74	−1.42	−1.64	−4.33	−5.34	−5.63	−6.12	−6.39
	18.0%	−0.60	−1.39	−1.69	−4.57	−5.88	−6.24	−6.81	−7.18
質量変化率 (%)	9.0%	−1.06	−2.25	−2.86	−3.47	−3.63	−3.65	−3.66	−3.66
	13.5%	−1.02	−2.50	−2.72	−3.28	−3.44	−3.48	−3.49	−3.55
	18.0%	−0.96	−2.43	−2.69	−3.38	−3.58	−3.63	−3.64	−3.76
相対動弾性係数 (%)	9.0%	98	96	95	93	92	92	92	94
	13.5%	99	98	97	92	90	90	90	91
	18.0%	98	95	91	89	88	88	88	88

水中養生期間28日の場合

	微粒分率	気中養生経過日数(日)　(養生方法　温度：20℃，湿度：60%)							
	(%)	1	3※	7	28	56	91	182	365
長さ変化率 ×10^{-4}	9.0%	−0.25	−0.78	−1.30	−3.92	−5.37	−5.02	−6.05	−6.39
	13.5%	−0.05	−0.88	−1.28	−3.77	−5.04	−5.07	−6.25	−6.51
	18.0%	−0.03	−0.75	−1.20	−3.86	−5.39	−5.73	−6.48	−7.03
質量変化率 (%)	9.0%	−0.83	−1.65	−2.19	−2.93	−3.20	−3.22	−3.28	−3.43
	13.5%	−0.64	−1.53	−1.78	−2.66	−2.95	−2.95	−3.07	−3.30
	18.0%	−0.51	−1.26	−1.49	−2.40	−2.81	−2.82	−2.98	−3.21
相対動弾性係数 (%)	9.0%	99	98	97	96	89	89	90	88
	13.5%	100	99	98	97	91	95	95	95
	18.0%	100	99	98	96	95	95	95	94

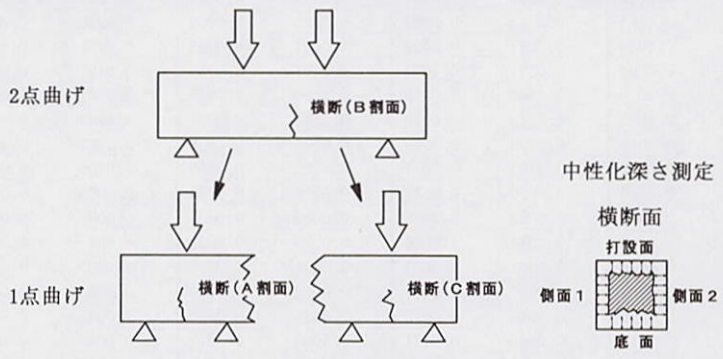
※：13.5%，18.0%は材齢5日

表－5.6.2　コンクリートの曲げ強度試験結果（外部コンクリート）

スラッジの種類	微粒分率 (%)	水中養生期間 (日)	気中養生期間 (日)	材　齢 (日)	曲げ強度 (N/mm^2)
なし	9.0	7	0	7	2.53
			182	189	3.69
			365	372	3.97
Sa	13.5		0	7	3.09
			182	189	4.99
			365	372	5.78
	18.0		0	7	3.34
			182	189	5.28
			365	372	4.93
なし	9.0	28	0	28	3.78
			182	210	5.87
			365	393	5.13
Sa	13.5		0	28	4.67
			182	210	6.86
			365	393	6.87
	18.0		0	28	4.98
			182	210	6.48
			365	393	6.00

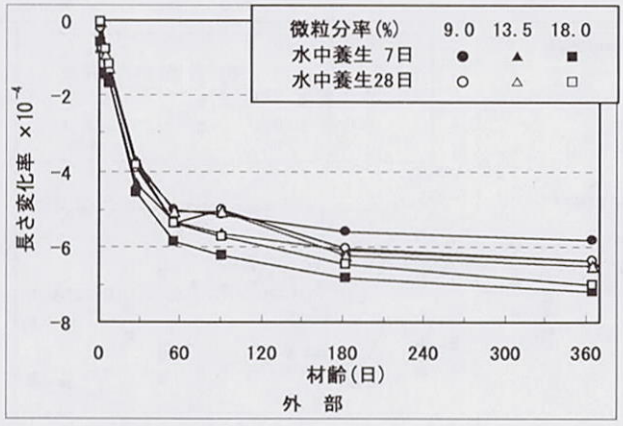
表－5.6.3　中性化深さの測定（外部コンクリート）

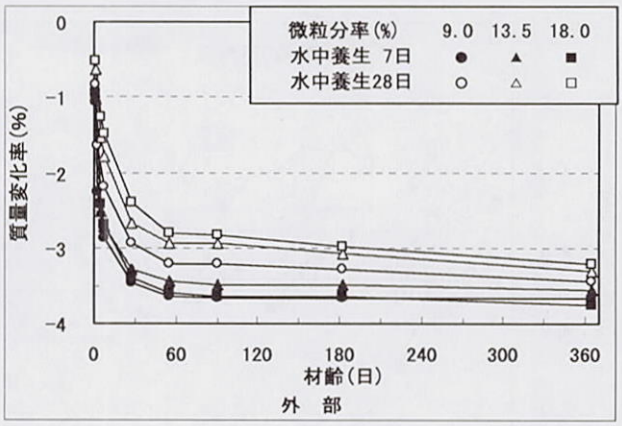
測定時期			気中養生6ヶ月後測定				気中養生12ヶ月後測定			
初期養生条件			水中養生 7日		水中養生28日		水中養生 7日		水中養生28日	
			5点の平均	60点の平均	5点の平均	60点の平均	5点の平均	60点の平均	5点の平均	60点の平均
微粒分率 9.0%	割面A	打設面	7.4	6.7	7.2	5.3	10.7	9.2	8.8	7.2
		側面1	6.8		4.7		11.1		7.5	
		側面2	7.0		5.3		8.5		6.8	
		底　面	5.7		2.9		7.5		4.9	
	割面B	打設面	8.4		7.2		10.8		8.3	
		側面1	7.1		5.6		10.3		8.9	
		側面2	7.1		5.6		8.8		6.7	
		底　面	6.8		4.5		8.0		6.8	
	割面C	打設面	7.6		5.6		10.2		7.8	
		側面1	6.4		5.8		9.6		7.1	
		側面2	6.4		4.2		7.7		6.9	
		底　面	3.8		4.4		7.2		5.6	
微粒分率 13.5%	割面A	打設面	4.7	5.0	4.5	3.8	8.7	7.5	6.4	5.8
		側面1	6.1		3.3		8.1		6.4	
		側面2	5.7		3.8		7.6		5.5	
		底　面	3.5		2.5		5.6		5.6	
	割面B	打設面	5.3		4.5		7.3		6.5	
		側面1	5.6		3.7		8.3		6.3	
		側面2	5.7		4.1		7.3		5.3	
		底　面	4.4		3.8		6.4		4.8	
	割面C	打設面	5.2		4.4		7.6		6.2	
		側面1	5.0		4.0		8.3		5.7	
		側面2	6.2		3.5		7.9		6.1	
		底　面	2.8		3.5		6.4		5.3	
微粒分率 18.0%	割面A	打設面	5.2	4.8	4.1	2.9	6.9	7.1	5.6	5.1
		側面1	5.2		2.5		8.1		4.7	
		側面2	5.1		3.3		6.1		4.4	
		底　面	4.3		3.3		6.6		5.2	
	割面B	打設面	5.2		3.4		7.8		5.5	
		側面1	5.0		2.9		7.3		5.7	
		側面2	5.1		1.9		6.8		4.7	
		底　面	3.3		2.6		7.2		5.4	
	割面C	打設面	4.5		3.8		8.0		5.6	
		側面1	5.0		2.2		7.1		4.3	
		側面2	5.0		2.5		6.8		5.1	
		底　面	4.1		2.6		6.1		4.4	

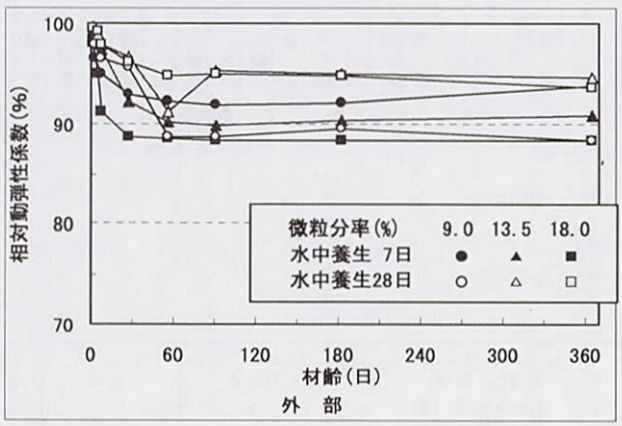


表－5.6.4　細孔径分布試験結果（外部コンクリート）

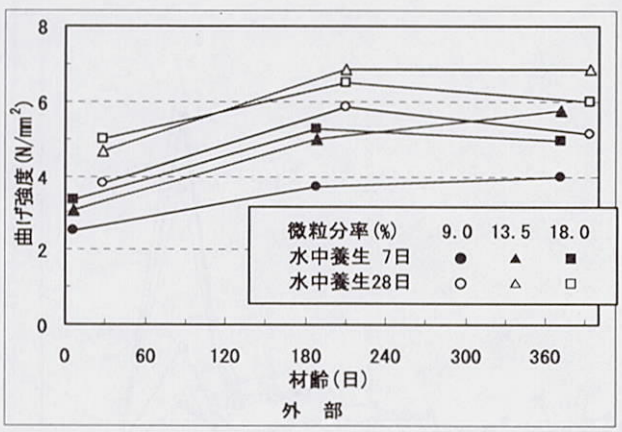
微粒分率(%)		微粒分率(%)		微粒分率(%)		微粒分率(%)		微粒分率(%)		微粒分率(%)	
9.0		13.5		18		9.0		13.5		18	
養生期間		養生期間		養生期間		養生期間		養生期間		養生期間	
水中(日)	7	水中(日)	7	水中(日)	7	水中(日)	28	水中(日)	28	水中(日)	28
気中(日)	0	気中(日)	0	気中(日)	0	気中(日)	0	気中(日)	0	気中(日)	0
細孔径 μm	細孔量 mL/g	細孔径 μm	細孔量 mL/g	細孔径 μm	細孔量 mL/g	細孔径 μm	細孔量 mL/g	細孔径 μm	細孔量 mL/g	細孔径 μm	細孔量 mL/g
390.8914	0.0000	390.8914	0.0000	390.8914	0.0000	390.8914	0.0000	395.0060	0.0000	395.0060	0.0000
183.3497	0.0058	183.3497	0.0057	183.3497	0.0008	183.3497	0.0018	183.6488	0.0046	183.6488	0.0067
121.4420	0.0022	121.4420	0.0017	121.4420	0.0004	121.4420	0.0007	121.9683	0.0016	121.9683	0.0015
91.3031	0.0012	91.3031	0.0010	91.3031	0.0002	91.3031	0.0003	91.0815	0.0009	91.0815	0.0008
60.5577	0.0013	60.5577	0.0010	60.5577	0.0002	60.5577	0.0004	60.5903	0.0009	60.5903	0.0009
36.2683	0.0014	36.2683	0.0010	36.2683	0.0002	36.2683	0.0005	36.3268	0.0011	36.3268	0.0010
25.9334	0.0008	25.9334	0.0005	25.9334	0.0001	25.9334	0.0002	25.9274	0.0006	25.9274	0.0005
18.1341	0.0008	18.1341	0.0005	18.1341	0.0002	18.1341	0.0002	18.1517	0.0004	18.1517	0.0005
12.0881	0.0006	12.0881	0.0007	12.0881	0.0002	12.0881	0.0000	12.0868	0.0005	12.0868	0.0006
9.0620	0.0007	9.0620	0.0003	9.0620	0.0000	9.0620	0.0002	9.0627	0.0004	9.0627	0.0005
7.2490	0.0000	7.2490	0.0000	7.2490	0.0000	7.2490	0.0000	7.2480	0.0000	7.2480	0.0000
5.9504	0.0004	5.8932	0.0002	5.9675	0.0000	5.9322	0.0000	6.0134	0.0002	6.0226	0.0000
4.3886	0.0004	4.3571	0.0003	4.5354	0.0001	4.5151	0.0001	4.5127	0.0003	4.5180	0.0002
3.6264	0.0005	3.6045	0.0003	3.6201	0.0002	3.6073	0.0003	3.5953	0.0002	3.5984	0.0002
2.9633	0.0002	2.9486	0.0002	3.0283	0.0002	3.0195	0.0003	3.0005	0.0002	3.0028	0.0003
2.3893	0.0009	2.3794	0.0004	2.4023	0.0002	2.3969	0.0003	2.4228	0.0003	2.4244	0.0003
2.0179	0.0004	2.0106	0.0001	2.0150	0.0002	2.0111	0.0001	1.9925	0.0002	1.9935	0.0002
1.5777	0.0004	1.5733	0.0003	1.5693	0.0002	1.5671	0.0004	1.5745	0.0002	1.5752	0.0002
1.2975	0.0005	1.2944	0.0004	1.2929	0.0002	1.2914	0.0004	1.2926	0.0001	1.2930	0.0001
1.0378	0.0006	1.0358	0.0001	1.0366	0.0003	1.0357	0.0004	1.0280	0.0003	1.0283	0.0002
0.8156	0.0004	0.8143	0.0000	0.8260	0.0000	0.8254	0.0002	0.8260	0.0000	0.8262	0.0000
0.6672	0.0010	0.6663	0.0003	0.6726	0.0003	0.6723	0.0004	0.6676	0.0000	0.6677	0.0000
0.5459	0.0011	0.5453	0.0003	0.5472	0.0002	0.5470	0.0005	0.5481	0.0002	0.5482	0.0002
0.4277	0.0019	0.4272	0.0006	0.4318	0.0006	0.4316	0.0007	0.4303	0.0003	0.4303	0.0004
0.3466	0.0024	0.3463	0.0006	0.3471	0.0007	0.3470	0.0008	0.3433	0.0003	0.3433	0.0002
0.2806	0.0037	0.2804	0.0012	0.2816	0.0010	0.2815	0.0008	0.2838	0.0002	0.2838	0.0002
0.2268	0.0060	0.2266	0.0020	0.2262	0.0016	0.2262	0.0010	0.2240	0.0004	0.2240	0.0003
0.1818	0.0086	0.1817	0.0043	0.1833	0.0027	0.1832	0.0012	0.1811	0.0005	0.1811	0.0005
0.1498	0.0075	0.1497	0.0060	0.1510	0.0040	0.1510	0.0012	0.1484	0.0005	0.1484	0.0004
0.1279	0.0051	0.1279	0.0062	0.1298	0.0046	0.1297	0.0014	0.1279	0.0004	0.1279	0.0003
0.1125	0.0039	0.1124	0.0050	0.1131	0.0050	0.1130	0.0016	0.1120	0.0006	0.1120	0.0003
0.0948	0.0049	0.0948	0.0059	0.0956	0.0066	0.0956	0.0032	0.0947	0.0009	0.0947	0.0005
0.0784	0.0052	0.0784	0.0060	0.0788	0.0067	0.0788	0.0045	0.0783	0.0016	0.0783	0.0009
0.0683	0.0035	0.0683	0.0040	0.0687	0.0045	0.0687	0.0047	0.0681	0.0020	0.0681	0.0009
0.0597	0.0031	0.0596	0.0036	0.0599	0.0042	0.0599	0.0056	0.0595	0.0029	0.0595	0.0012
0.0518	0.0029	0.0517	0.0034	0.0519	0.0038	0.0519	0.0058	0.0517	0.0044	0.0517	0.0019
0.0450	0.0028	0.0450	0.0031	0.0451	0.0034	0.0451	0.0054	0.0450	0.0059	0.0450	0.0028
0.0390	0.0027	0.0390	0.0031	0.0390	0.0032	0.0390	0.0053	0.0390	0.0071	0.0390	0.0038
0.0336	0.0027	0.0336	0.0030	0.0336	0.0029	0.0336	0.0041	0.0336	0.0079	0.0336	0.0057
0.0293	0.0023	0.0293	0.0025	0.0292	0.0027	0.0292	0.0039	0.0292	0.0064	0.0292	0.0078
0.0256	0.0022	0.0256	0.0024	0.0255	0.0022	0.0255	0.0033	0.0256	0.0043	0.0256	0.0048
0.0221	0.0024	0.0221	0.0025	0.0221	0.0022	0.0221	0.0032	0.0221	0.0045	0.0221	0.0048
0.0191	0.0023	0.0191	0.0024	0.0191	0.0024	0.0191	0.0035	0.0191	0.0044	0.0191	0.0040
0.0166	0.0019	0.0166	0.0020	0.0166	0.0019	0.0166	0.0027	0.0167	0.0036	0.0166	0.0034
0.0144	0.0022	0.0144	0.0023	0.0144	0.0019	0.0144	0.0027	0.0144	0.0034	0.0144	0.0031
0.0125	0.0018	0.0125	0.0018	0.0125	0.0019	0.0125	0.0028	0.0125	0.0032	0.0125	0.0029
0.0109	0.0018	0.0109	0.0018	0.0109	0.0017	0.0109	0.0025	0.0109	0.0032	0.0109	0.0030
0.0094	0.0019	0.0094	0.0020	0.0095	0.0017	0.0095	0.0026	0.0095	0.0032	0.0095	0.0029
0.0082	0.0019	0.0082	0.0020	0.0082	0.0018	0.0082	0.0031	0.0082	0.0038	0.0082	0.0033
0.0073	0.0018	0.0073	0.0018	0.0073	0.0014	0.0073	0.0023	0.0073	0.0023	0.0073	0.0021
0.0060	0.0025	0.0060	0.0025	0.0061	0.0022	0.0061	0.0038	0.0061	0.0051	0.0061	0.0042
0.0052	0.0016	0.0052	0.0018	0.0052	0.0017	0.0052	0.0029	0.0052	0.0031	0.0052	0.0027
0.0045	0.0019	0.0045	0.0020	0.0045	0.0015	0.0045	0.0026	0.0045	0.0032	0.0045	0.0027
0.0040	0.0012	0.0040	0.0012	0.0040	0.0011	0.0040	0.0017	0.0040	0.0019	0.0040	0.0018
0.0036	0.0009	0.0036	0.0010	0.0036	0.0012	0.0036	0.0016	0.0036	0.0016	0.0036	0.0014
0.0033	0.0011	0.0033	0.0011	0.0033	0.0008	0.0033	0.0011	0.0033	0.0015	0.0033	0.0013
0.0030	0.0007	0.0030	0.0008	0.0030	0.0009	0.0030	0.0013	0.0030	0.0011	0.0030	0.0010



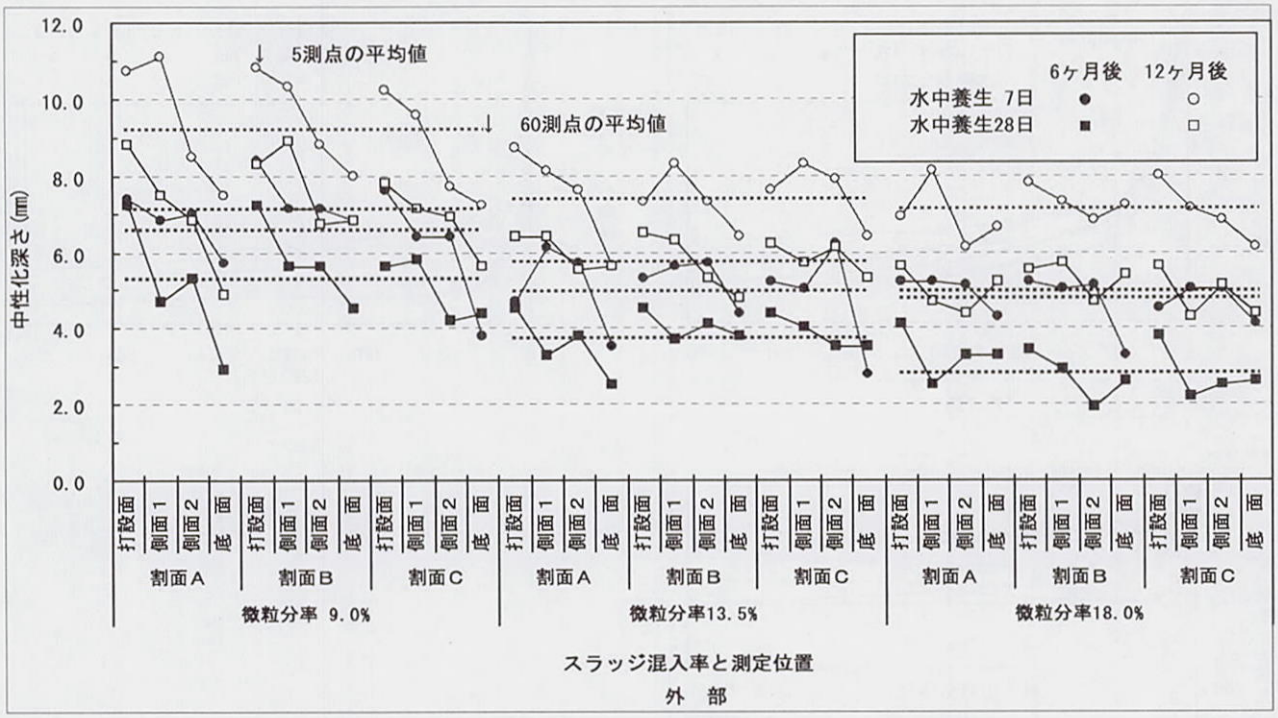




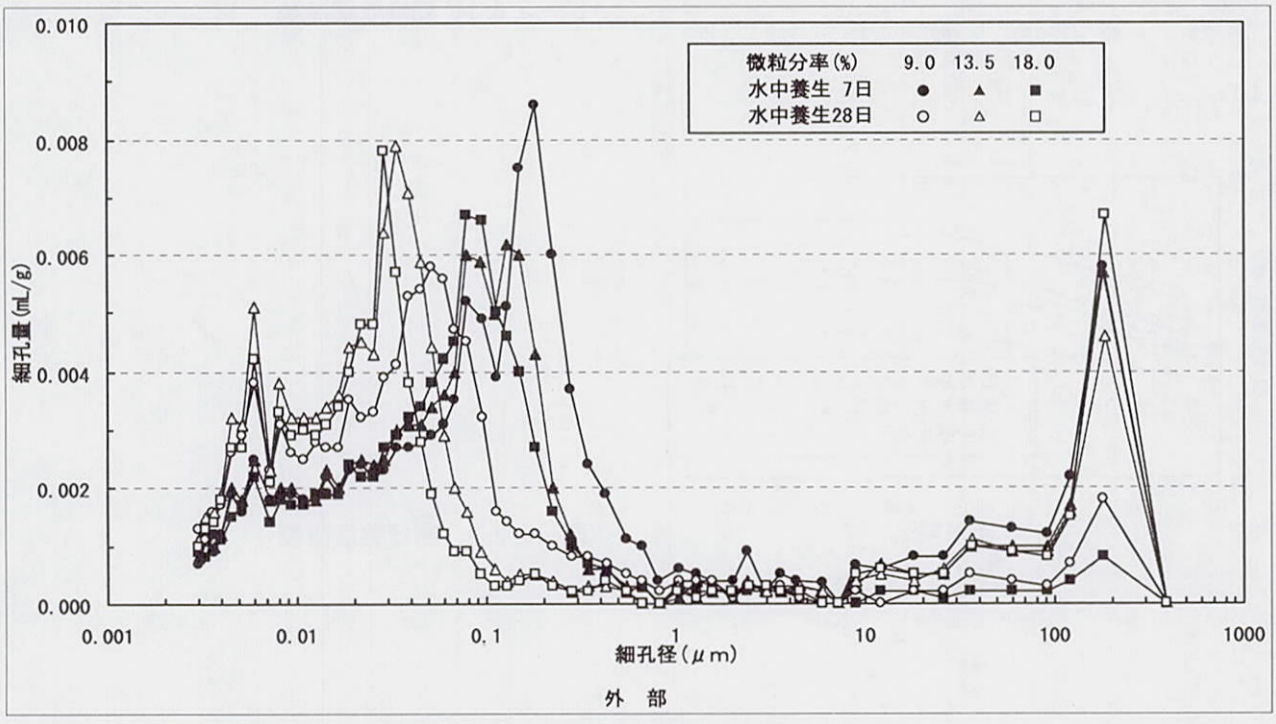
図－5.6.1　乾燥収縮試験



図－5.6.2　曲げ強度試験



図－5.6.3　中性化深さ測定



図－5.6.4　細孔径分布

6章　まとめ

スラッジをコンクリートに混入して有効利用を図ることを目的に，スラッジの品質評価試験，単位水量一定条件のもとで，ＲＣＤ用，ＥＬＣＭ用，外部用，高流動の４種類のコンクリートにスラッジを混入したときのワーカビリティー，強度試験などを実施するとともに，４種類のコンクリートのモルタルの品質からコンクリートの品質を評価できないか検討した。得られた知見は次のとおりである。

６．１　スラッジ，スラッジ混入モルタルおよびコンクリートの品質

６．１．１　使用したスラッジの品質評価

骨材製造プラント用濁水処理設備から採取したスラッジSaとダムサイト用濁水処理設備から採取したスラッジSbの２種類について試験を行った。

スラッジの50％平均粒径については，スラッジSaはセメントやフライアッシュとほぼ同じ10 μmであるが，スラッジSbは5.9 μmとやや小さい。スラッジの比表面積については，セメントやフライアッシュのそれと比べてかなり大きく（ブレーン法で３～４倍），かつメチレンブルー吸着量も大きい。故に，スラッジをモルタルやコンクリートに混入したときには混和剤や練混ぜ水を多く吸着すると考えられ，この影響によってワーカビリティーが低下する。

従って，スラッジの品質として，比表面積，メチレンブルー吸着量を事前に把握しておくことが必要である。

なお，スラッジの組成成分の構成割合は，骨材の組成成分の構成割合と似通っている。スラッジSa，Sbともに凝集剤の成分である酸化アルミニウム（Al_2O_3）が付着残留していることから，骨材成分に比べてその割合が多く，スラッジSbではセメントの主成分であるCaOの割合がやや多くなっている。

６．１．２　スラッジ混入モルタルの品質

脱水したスラッジの塊を破砕し，均一に分散するための練混ぜ時間の検討を行ない，60秒程度必要であることがわかった。

微粒分率(スラッジ混入量)を増加させたとき，またスラッジSa，スラッジSb，スラッジSaとSbを１：１で混合したスラッジSabを混入したときのモルタルのコンシステンシー(フロー値)，圧縮強度は**表－6.1.1**のようになった。

コンシステンシーは，ＲＣＤ用のモルタルのフロー試験では変形せず評価できなかったが，そのほかのコンクリート用のモルタルはスラッジの混入量が増加すると低下した。スラッジの種類の影響は，比表面積の大きいスラッジほど急激に低下した。

圧縮強度は，スラッジの混入量が増加するほど大きくなる傾向があった。スラッジの種類との関係は明確ではなかった。

表－6.1.1　スラッジ混入モルタルの品質

コンクリートの種類	コンシステンシー(フロー値)		圧縮強度
	微粒分率の増加に対して	スラッジの種類に対して	微粒分率の増加に対して
ＲＣＤ	100mm(流動性なし)		わずかに増加
ＥＬＣＭ	徐々に低下	Sa＞Sab＞Sb の順に低下	
外　部			
高流動	急激に低下		

６．１．３　スラッジ混入コンクリートの品質

スラッジSaの混入量を増やしていったときの４種類のコンクリートのワーカビリティー，圧縮強度，外部用コンクリートの乾燥収縮，中性化深さ，細孔径分布の結果は**表－6.1.2**のとおりであった。

ＲＣＤ，ＥＬＣＭ，外部用コンクリートのワーカビリティーは，徐々に低下した。圧縮強度はモルタルの場合と同様にわずかに増加傾向があった。

ＥＬＣＭ，外部用コンクリートの空気量は，低下した。

高流動コンクリートのスランプフローは，スラッジ無混入以外は流動性がなく，測定できなかった。スランプを測定したが，スラッジ混入量の増加により急激に低下した。圧縮強度はわずかに低下した。

外部用コンクリートの乾燥収縮，中性化深さは，小さくなった。細孔径分布を測定すると，細孔量のピークは小さい方に移行していた。また，総細孔量も減少傾向があり，スラッジの混入により緻密になったものと考えられる。

表－6.1.2　スラッジ混入コンクリートの品質
（混入量の増加に対して）

コンクリートの種類	ワーカビリティー	空気量	圧縮強度	乾燥収縮，中性化深さ，細孔径分布
ＲＣＤ	徐々に低下	－	わずかに増加	－
ＥＬＣＭ		低下		－
外　部				・乾燥収縮，中性化は低下 ・細孔径は小さい方へ移行
高流動	・スラッジ無混入以外 スランプフローなし ・ｽﾗﾝﾌﾟも急激に低下	－	わずかに低下	－

６．２　品質評価

スラッジを混入したコンクリートの品質を，モルタルやスラッジの品質から評価するために，コンクリートとモルタル，スラッジの品質の関係を調べた結果，次の３点が明らかになった。

① 有スランプコンクリートであるＥＬＣＭ，外部用コンクリートのワーカビリティーは，モルタルのフロー値と高い相関関係があり，スラッジの混入量を変化させたときのワーカビリティーをモルタルのフロー値で評価できる可能性がある。

② スラッジの比表面積,ゼータ電位がコンクリートのワーカビリティーに及ぼす影響も大きく，スラッジの比表面積の測定は重要と考えられる。

③　メチレンブルー吸着量が混和剤の効果に及ぼす影響も大きく，特に高性能 AE 減水剤に及ぼす影響は非常に大きい。

6．3　今後の検討課題

単位水量一定の条件の下でスラッジ混入量を増加すると，ワーカビリティーは低下するものの，強度や外部用コンクリートの組織の緻密性などの改善が図られることが明らかになった。

今後は，コンクリートの品質を低下させずにワーカビリティーの改善を図るために，混和剤の種類と使用量の検討を行なう予定である。

スラッジを混入すると，有スランプコンクリートの空気量は低下し，高流動コンクリートの流動性は急激に低下した。これらの原因と対策も検討する必要がある。

＜参考文献＞

1) 河野広隆，森濱和正，加藤俊二：「未利用骨材の利用技術に関する調査（1)骨材の各種強度試験」，土木研究所資料第 3420 号，1996.2

2) 河野広隆，森濱和正，加藤俊二：「未利用骨材の利用技術に関する調査（2)骨材強度と有スランプコンクリートの品質」，土木研究所資料第 3469 号，1996.12

3) 河野広隆，森濱和正，加藤俊二，土屋浩樹：「未利用骨材の利用技術に関する調査（3)骨材強度とＲＣＤ用コンクリートの品質，（4)骨材の強度・破砕性に関する評価試験方法の提案」，土木研究所資料第 3491 号，1997.3

4) 河野広隆，森濱和正，古賀裕久：「未利用骨材の利用技術に関する調査（5)横川ダム原石山骨材」，土木研究所資料第 3631 号，1999.2

5) 河野広隆，森濱和正，古賀裕久：「未利用骨材の利用技術に関する調査（6)嘉瀬川ダム骨材」，土木研究所資料第 3639 号，1999.2

6) 河野広隆，森濱和正，片平博，古賀裕久，石原雅規：「未利用骨材の利用技術に関する調査（7)殿ダム・横川ダム骨材」，土木研究所資料第 3774 号，20001.3

7) 河野広隆，森濱和正，古賀裕久，加藤俊二：「微粒分混入コンクリートの品質および配合設計方法に関する検討」，土木研究所資料第 3710 号，2000.2

8) (財)日本ダム協会：「ＲＣＤ工法施工の手引き」，pp.56，1990.6

9) 鈴木一雄，伊藤康司，中根政範：「砂当量試験におけるＳＥ値について」，第 10 回生コン技術大会研究発表論文集，pp.195-198，1999.4

10) (社)土質工学会：「岩の調査と試験」（第 32 章 点載荷試験），pp293-298，1989.9

11) (社)土木学会：「平成 8 年制定コンクリート標準示方書［ダム編］」（4 章 材料），pp.13-14

12) 高田和法，小澤一雅：「粒子の相互干渉を考慮した 2 粒度粒子の間隙比算定モデル」，ダム工学，No.18，pp.34-42，1995.6

13) (社)土木学会：「平成 8 年制定コンクリート標準示方書［ダム編］」（4 章 材料），pp.17-18