

論文 産地の異なる石灰石粗骨材を使用したコンクリートのフレッシュおよび強度性状

長塩 靖祐^{*1}・藤田 仁^{*2}・吉本 稔^{*3}・伊與田 紀夫^{*4}

要旨：産地の異なる石灰石粗骨材を使用し，石灰石粗骨材の微粒分量を変化させた場合のコンクリートのフレッシュおよび強度性状について検討を行った。その結果，フレッシュおよび強度性状に及ぼす石灰石粗骨材の産地の影響は少ないことが確認できた。一方，微粒分量の影響は微粒分量が増加すると，スランプは小さくなり空気量は少なくなるが，所要の空気量が得られるように調整すればスランプは所要の性状が得られるものと考えられた。また微粒分量の増加により，ブリーディング量は少なくなること，凝結時間は早くなることおよび圧縮強度は高くなることが，空隙量から 50nm 以上の空隙量が少なくなることが確認された。
キーワード：石灰石粗骨材，微粒分量，ブリーディング，凝結，圧縮強度，静弾性係数

1. はじめに

コンクリート用石灰石骨材の出荷量は約 3700 万 t/年（2002 年度）に達し，コンクリート用骨材の総需要量の約 1 割を占めており，コンクリート用骨材の総需要量が落ち込む中で，その割合に対する比率は増加傾向にある¹⁾。また粗骨材に着目しコンクリート用砕石に限れば，そのうちの約 2 割が石灰石である²⁾。これは，石灰石粗骨材がアルカリ骨材反応に対する心配がないことや，石灰石粗骨材を使用したコンクリートは乾燥収縮が小さくなること¹⁾など，近年のコンクリート構造物の高耐久化が求められる背景もその一つの要因と推測することができる。

一方，石灰石の起源は産地により古生代～中生代とかなり幅広い地質時代に亘っており，生成した時代や産地が異なれば，石灰石粗骨材としての品質性状が異なっている可能性もあり，それを使用したコンクリート性状については，把握する必要があると考えられる。しかし，産地が異なる石灰石粗骨材を使用した場合のコンクリート性状に及ぼす影響についての検討は，

まだ少ないのが現状である。また石灰石粗骨材は，方解石の塊であることからやや角張っており，摩擦による粉化がしやすいこともあって，微粒分量が増加しやすい傾向にある。しかし，微粒分量の増加は，コンクリート中の粉体量が増加することから，ブリーディング防止や材料分離抵抗性の向上など，コンクリートの品質向上が期待できると考えられ³⁾，微粒分量が増加した場合のコンクリート性状に及ぼす影響については明確にする必要があると考えられる。

本研究は，産地が異なる 3 種類の石灰石粗骨材を使用して，微粒分量を 1%以下、3%および 5%と 3 水準変化させた場合のコンクリートのフレッシュおよび強度性状について，基礎的検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表 - 1 に使用材料を示す。使用した石灰石粗骨材の 3 種類は，コンクリート用骨材として出荷量の多い北海道，関東および九州地区²⁾から選

*1 太平洋セメント株式会社中央研究所研究開発部建設資源・材料チーム(正会員)

*2 太平洋セメント株式会社中央研究所研究開発部建設資源・材料チーム 工修 (正会員)

*3 太平洋セメント株式会社中央研究所研究開発部建設資源・材料チームリーダー 工修 (正会員)

*4 太平洋セメント株式会社資源カンパニー鉱業部資源グループリーダー 理修

定した。比較用として硬質砂岩碎石を使用した。なお、石灰石の微粒分量の影響を明確に把握するために、普通ポルトランドセメントにはセメント製造時に JIS R 5210 に規定される鉱物質粉末を混合していないものを使用した。表 - 2 に粗骨材の化学成分を、表 - 3 にその物理的性質を示す。石灰石粗骨材 A は MgO が他の石灰石粗骨材よりもやや多く、ドロマイト質石灰岩に分類されるもの¹⁾であるが、いずれの石灰石粗骨材も CaO 含有率が 52.0 ~ 55.7% (CaCO₃ 純度 92 ~ 99%) と高純度のものである。石灰石粗骨材の物理的性質は、硬質砂岩碎石と比較した場合、表乾密度 2.68 ~ 2.69g/cm³ と高く、吸水率が 0.30 ~ 0.45% と低い特徴がある。また微粒分量は、いずれの骨材も 1% 以下である。石灰石粗骨材の比較では、A および C の実績率が B よりもやや大きい。

2.2 微粒分の作製

石灰石粗骨材の微粒分は、既往の報告⁴⁾を参考に、ロサンゼルス試験機により、石灰石粗骨材種類ごとに磨砕して作製した。作製した微粒分を、微粒分量 1% 以下の水準の石灰石粗骨材に、それぞれの種類ごとに微粒分量で 3% および 5% となるように追加添加し、所定の微粒分量を持った石灰石粗骨材を作製した。なお、作製した微粒分のプレーン比表面積は約 8000cm²/g 程度であった。

表 - 1 使用材料

セメント(C)	普通ポルトランドセメント
細骨材(S)	陸砂 (密度:2.61g/cm ³ , F.M.:2.76)
粗骨材(G)	A: 石灰石粗骨材 (北海道地区) B: 石灰石粗骨材 (関東地区) C: 石灰石粗骨材 (九州地区) I: 硬質砂岩碎石
AE 減水剤(Ad)	リゲニンスルホン酸系
空気量調整剤(AE)	界面活性剤

表 - 2 粗骨材の化学成分

骨材種類	化学成分(%)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
A	1.84	0.13	0.12	52.0	2.42
B	0.26	0.20	0.14	55.2	0.58
C	0.06	0.06	0.03	55.7	0.49
I	75.3	11.4	2.31	1.82	1.13

2.3 コンクリート配合

表 - 4 にコンクリート配合を示す。コンクリート配合は W/C = 50%, 単位粗骨材かさ容積および AE 減水剤添加量 (C × 0.25%) 一定とし、目標スランプ 12 ± 2.5cm, 目標空気量 4.5 ± 1.5% となるように、微粒分量 1% 以下の水準を基準に、単位水量の調整により決定した。微粒分量を増加した場合も、上述で決定した配合で固定した。なお、本実験における空気量調整剤については、硬質砂岩碎石 I にて所要の空気量が得られる添加量を決定し、石灰石粗骨材を使用する場合についても、微粒分量によらず、その添加量で一定とした。石灰石粗骨材 A および C は、石灰石粗骨材 B および硬質砂岩碎石 I よりも、骨材の実績率がやや大きいことから、少ない単位水量で所要のスランプが得られる結果にあった。

2.4 試験項目とその方法

(1) スランプおよび空気量

スランプ試験は JIS A 1101 に、空気量試験は JIS A 1128 に準拠して行った。

(2) プリーディングおよび凝結

プリーディング試験は JIS A 1123 に、凝結試験は JIS A 1147 に準拠して行った。

(3) 圧縮強度および静弾性試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に、静弾性係数試

表 - 3 粗骨材の物理的性質

骨材種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	実績率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)
A	2.68	0.45	1.68	63.7	6.55	0.60
B	2.69	0.30	1.62	60.4	6.74	0.90
C	2.69	0.30	1.68	62.3	6.43	0.30
I	2.64	0.66	1.72	59.8	6.74	0.57

表 - 4 コンクリート配合

骨材種類	W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
A	50	42	0.63	160	320	769	1067	0.80
B	50	45	0.63	163	326	808	1024	0.82
C	50	43	0.63	160	320	789	1056	0.80
I	50	45	0.63	163	326	821	995	0.82

験は JIS A 1149 に準拠して行った。供試体寸法はφ10×20cmとし、養生は標準養生、材齢は3、7および28日とした。

(4) 空隙量および骨材界面観察

材齢28日時のコンクリート硬化体の空隙量について、水銀圧入式ポロシメーターにより測定を行った。また、骨材界面の周辺について顕微鏡観察を行った。

2.5 試験水準

試験水準を表-5に示す。スランプ、空気量、圧縮強度および静弾性係数は全水準で実施した。石灰石粗骨材種類AおよびCのブリーディング、凝結および空隙量については、微粒分量3%の水準で実施した。骨材界面の観察は、微粒分量1%以下の水準で石灰石粗骨材Bと硬質砂岩碎石Iについて実施した。

3. 試験結果および考察

3.1 スランプおよび空気量

図-1にスランプおよび空気量の試験結果を示す。石灰石粗骨材の種類および微粒分量によらず、スランプおよび空気量は所要の規格値を満足する結果にあった。石灰石粗骨材の種類の影響は見受けられず同様の結果であり、微粒分量1%以下のものは砂岩碎石と同様であった。一方、微粒分量が増加すると、スランプは小さくなり、空気量は少なくなる結果にあった。スランプに影響を及ぼす因子の一つとして空気量が

挙げられており、一般的には空気量が1%増加するとスランプは約2.5cm増加する⁵⁾。本実験では微粒分量によらず、空気量調整剤の添加量を固定しており、微粒分の増加により実質粉体量が増加しているため、所要の空気量が得られておらず、その結果としてスランプが低下していると考えられる。スランプの低下を所要の空気量が得られていないと考え、前述に基づき、微粒分量3%および5%の実測空気量を、微粒分量1%以下の実測空気量に補正した時の補正スランプの結果を表-6に示す。補正スランプはいずれも12.0~14.5cmの範囲となり、微粒分量1%以下の場合と同程度となった。本実験の範囲内であるが、微粒分量5%程度までであれば、所要の空気量が得られるように、空気量調整剤等を用いて空気量を調整すれば、所要のスランプは得られるものと考えられる。

3.2 ブリーディングおよび凝結

図-2にブリーディング量の測定結果を示す。図中の時間はブリーディング終了時間である。ブリーディング量は、石灰石粗骨材の種類によらず同程度であり、産地の影響は少ないものと考えられる。石灰石粗骨材と砂岩碎石を比較した場合には、ブリーディング量は同程度であり、単位水量が同じこともあるが粗骨材岩種の影響

表-5 試験水準

骨材種類	微粒分量 (%)	試験項目				
		スランプ 空気量	ブリーディング 凝結	圧縮強度 静弾性	空隙量	顕微鏡観察
A	1%以下	○	-	○	-	-
	3%		○		○	-
	5%		-		-	-
B	1%以下		○		○	○
	3%		○		○	-
	5%		-		-	-
C	1%以下		-		-	-
	3%		○		○	-
	5%		-		-	-
I	1%以下		○		○	○

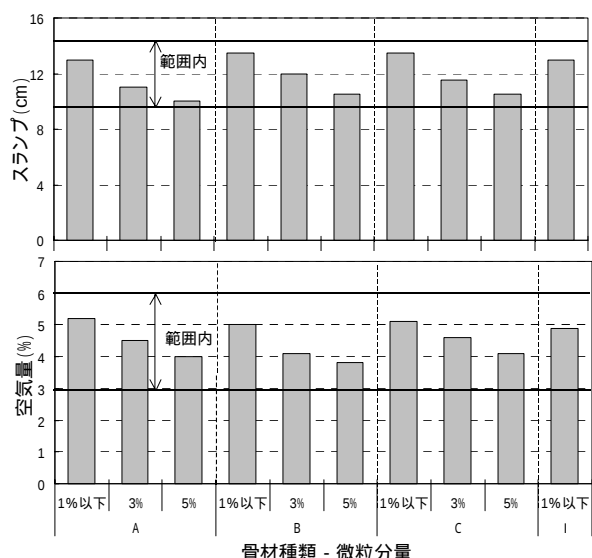


図-1 スランプおよび空気量

表 - 6 空気量補正による補正スランプの検討

骨材種類	微粒分量 (%)	実測スランプ (cm)	実測空気量 (%)	補正空気量 (%)	補正スランプ (cm)
A	1%以下	13.0	5.2	5.2	13.0
B	3%	11.0	4.5		12.0
C	5%	10.0	4.0		12.5
A	1%以下	13.5	5.0	5.0	13.5
B	3%	12.0	4.1		14.5
C	5%	10.0	3.8		13.5
A	1%以下	13.5	5.1	5.1	13.5
B	3%	11.5	4.6		13.0
C	5%	10.5	4.1		13.0

*)微粒分量 1%以下の補正スランプは実測スランプ値

は少ないものと考えられる。一方、微粒分量の影響は、微粒分量が増加するとブリーディング量は少なくなる傾向にあり、ブリーディングの終了時間も早くなる結果にあった。微粒分量の増加によるブリーディング量の減少は、実質粉体量が増加しているためであると考えられる¹⁾。

図 - 3 に凝結試験結果を示す。凝結は、石灰石粗骨材の種類によらず始発、終結とも同程度であり、また、石灰石粗骨材と砂岩碎石を比較した場合にも始発、終結は同程度であり、ブリーディングの結果と同様に、産地の影響および粗骨材岩種の影響は少ないものと考えられる。一方、微粒分量の影響は、微粒分量が増加すると始発、終結とも早くなる結果にあった。微粒分量の増加により凝結時間が早くなることについては、セメントと石灰石微粉末の相互作用により、エーライトの初期水和が促進したためではないかと考えられる⁶⁾。

3.3 圧縮強度および静弾性係数

図 - 4 に粗骨材種類および微粒分量を変化させた場合の圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度は石灰石粗骨材の種類によらず、ほぼ同等の結果にあり、また、石灰石粗骨材と砂岩碎石を比較した場合にも圧縮強度はほぼ同等であり、石灰石粗骨材の産地および粗骨材岩種の影響は少ないものと考えられる。一方、微粒分量を増加させた3%および5%では、微粒分量1%以下のものより、圧縮強度が高くなる結果にあった。

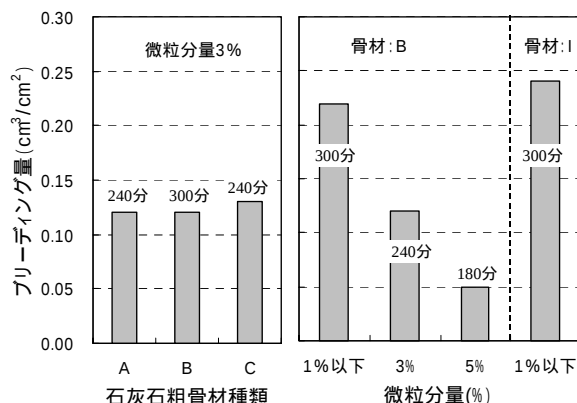


図 - 2 ブリーディング量

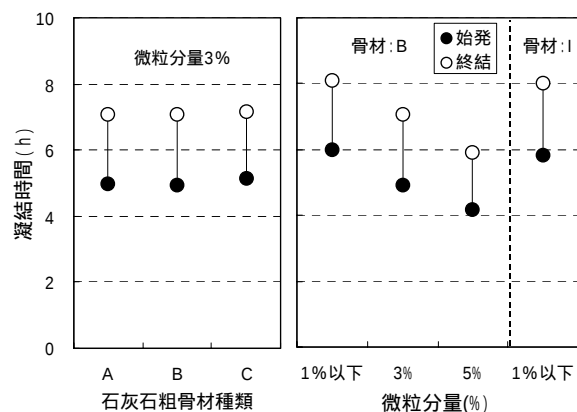


図 - 3 凝結時間

特に、微粒分量を増加させると、初期材齢となる3日および7日強度が高い結果にあった。強度の伸びは、3日から7日では石灰石粗骨材種類および微粒分量によらず同程度であったが、7日から28日では微粒分量が増加すると、同程度かやや小さくなる傾向にあった。骨材の一部に石灰石微粉末を混合した場合に強度増進効果があるとされている⁷⁾。その理由としてセメントと石灰石微粉末の相互作用により、エーライトの初期水和を促進すること⁶⁾、間隙質相との反応から初期強度が向上すること⁷⁾および微粉末効果の物理的な充填によること⁷⁾などが報告されている。今回の微粒分の増加により圧縮強度が高くなった理由としては、凝結時間が早くなっていることからエーライトの水和が促進していると考えられ、また、微粒分の増加で実質粉体量の

増加により間隙質相との反応が活発になったのではないかと推察することもでき、その結果として強度が高くなったと考えられる。更に、後述するように、微粒分の増加により、強度発現に関係する空隙量も少なく、前述の水和促進の他に、微粉末効果の物理的な充填も影響していると考えられる。今回の実験結果は、エーライトの水和促進効果、間隙質相の活発な反応および微粒子による物理的な充填作用などが相互に影響したものではないかと考えられる。

図 - 5 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は、石灰石粗骨材種類および微粒分量によらず、同様な関係にあり、産地および微粒分量の影響は少ないものと考えられる。一方、粗骨材岩種による違いが見受けられており、同一圧縮強度で比較した場合、石灰石粗骨材を使用した場合は、砂岩碎石を使用した場合よりも静弾性係数が高い。これは、既往の報告¹⁾とも同様であった。コンクリートの静弾性係数に及ぼす要因としては、骨材の剛性およびペーストと骨材の相互作用の2つが挙げられており⁸⁾、前者の骨材剛性とは骨材自体の弾性係数が影響していること、後者のペーストと骨材の相互作用とは骨材とペーストマトリックスの付着性状が影響していることと報告されている⁸⁾。石灰石粗骨材自体の弾性係数については、砂岩碎石と比較すると、高い場合⁸⁾、同程度の場合¹⁾または低い場合⁹⁾との報告があり、一概に断定することは難しい。また骨材とその周りの付着性状については、石灰石粗骨材を用いた場合、他の骨材を使用した場合と比較して、遷移帯と呼ばれる骨材周辺の組織が緻密化¹⁰⁾しており、骨材とペーストの付着性状が高い¹⁾とされている。後述するように、顕微鏡観察から骨材界面との付着性状が良いことが示唆されている。そのため静弾性係数に及ぼす影響については、今回使用した石灰石粗骨材自体の弾性係数について測定し、骨材とその周りの付着の影響も踏まえて検討することが必要であると考えている。

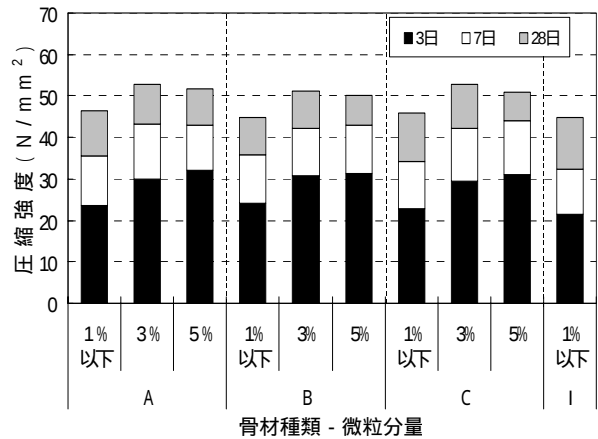


図 - 4 圧縮強度の比較

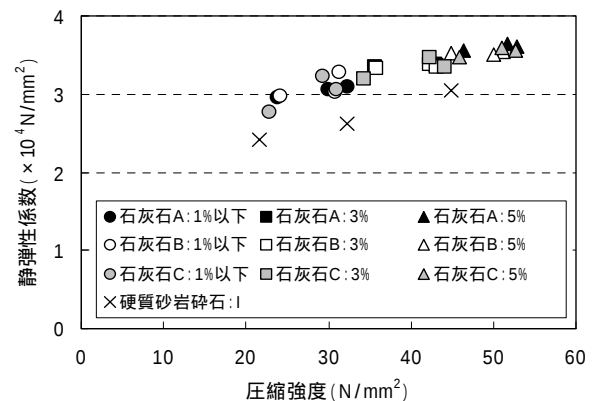


図 - 5 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.4 空隙量および顕微鏡観察

図 - 6 に材齢 28 日時の 50nm 以上の空隙量を示す。ここでは、強度発現に関係すると言われている 50nm 以上の空隙量¹¹⁾について整理を行った。50nm 以上の空隙量は、石灰石粗骨材の種類によらず同程度であり、また、石灰石粗骨材と砂岩碎石を比較した場合にも同程度であった。一方、微粒分量の影響は、微粒分量の増加により、50nm 以上の空隙量が少なくなる結果にあった。微粒分量の増加により、50nm 以上の空隙量が少なくなっており、この結果は、圧縮強度の結果と対応していた。写真 - 1 に骨材界面の観察結果を示す。界面の観察から、石灰石粗骨材を使用した場合の方が、砂岩碎石よりも骨材とペーストマトリックス部分が密接に付着していることが伺えており、今後、定量的評価を行い付着性状について、明確にしていく予定である。

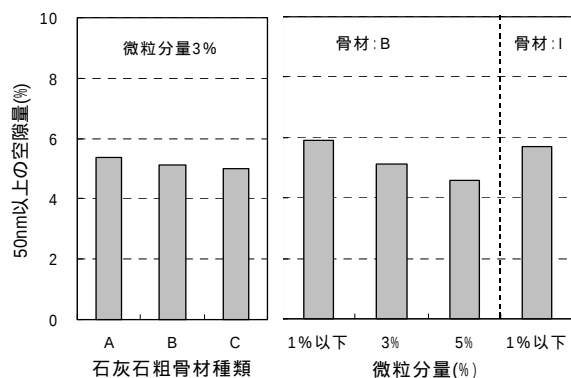


図 - 6 50nm 以上の空隙量

4. まとめ

本実験結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 石灰石粗骨材の産地がフレッシュおよび強度性状に及ぼす影響は少なかった。
- (2) 微粒分量の影響は微粒分量の増加により、スランプが小さく、空気量が少なくなるが、所要の空気量が得られるように調整すれば、スランプは所要の性状が得られるものと考えられた。
- (3) 微粒分量の増加により、ブリーディング量が少なくなること、凝結時間が早くなることおよび圧縮強度が高くなることが確認された。
- (4) 空隙量は、石灰石粗骨材の産地の影響はなく、微粒分量の増加により 50nm 以上の空隙量が少なくなった。

参考文献

- 1) 石灰石骨材とコンクリート, 石灰石鉱業協会, 2005
- 2) 中村秀三ほか: コンクリート用石灰石骨材, コンクリート工学, Vol.41, No.10, pp.3-7, 2003.10
- 3) 坂井悦郎ほか: コンクリート用材料, コンクリート工学, Vol.40, No.5, pp.39-46, 2002.5
- 4) 小畠明ほか: 石灰石碎石の磨砕により増加した微粒分がコンクリートの諸性状に及ぼす影響, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.497-498, 2004.9
- 5) コンクリート技術の要点 05, コンクリート

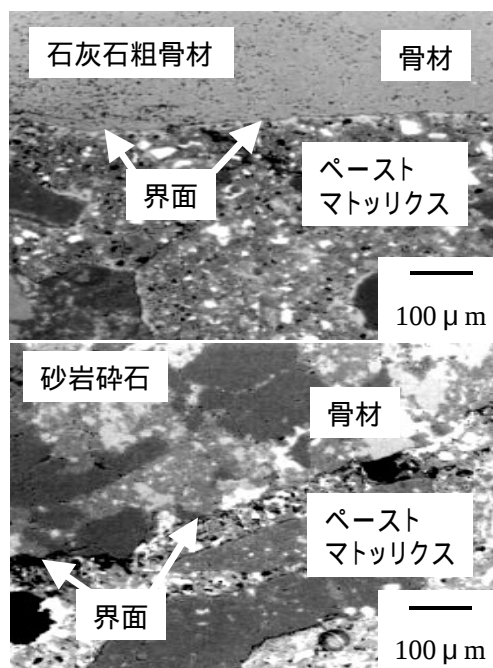


写真 - 1 骨材界面の状況

工学協会, pp.52-53, 2005

- 6) 浅賀喜与志ほか: 粒度の異なる炭酸カルシウム添加がセメントの水和に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No.51, pp.20-25, 1997
- 7) 坂井悦郎ほか: フィラーセメント、わかりやすいセメント科学、セメント協会、pp.54-62, 1993
- 8) 鶴田浩章: 高強度コンクリートの圧縮強度・静弾性係数に及ぼす粗骨材物性の影響に関する最近の研究、コンクリート工学, Vol.43, No.2, pp.76-83, 2005.2
- 9) 小坂義夫ほか: コンクリートのヤング係数におよぼす骨材の影響について、第 22 回セメント技術年報, pp.260-265, 1968
- 10) 内川浩ほか: 骨材のキャラクターが硬化モルタルの遷移帯及び強度に及ぼす影響、第 47 回セメント技術大会講演集, pp.386-391, 1993
- 11) 内川浩ほか: 混合セメントモルタル及びコンクリートの硬化体構造が強度発現に及ぼす影響、セメントコンクリート論文集, No.44, pp.330-335, 1990