

石灰石骨材とコンクリート

増補・改訂版 2005

の印刷にあたって

HPより印刷出来ますが、印刷にあたり次の点にご留意願います。

1. 印刷原稿は、全部で次ページ以下、66ページの両面印刷です。

印刷にあたり、片面印刷か両面印刷の設定を行って下さい。

2. 写真及び図表等の一部がカラー刷りとなっていますが、必ずしも「カラー印刷」の設定を行う必要はないと思われます。

石灰石骨材とコンクリート

増補・改訂版

2005

石灰石鉱業協会

ま え が き

1989 年（昭和 64 年）、石灰石鉱業協会ではコンクリート用石灰石骨材の急増、社会問題化していたアルカリ骨材反応への説明責任などを果たすため、石灰石資源およびコンクリートの専門家にて委員会を設置し、石灰石骨材および石灰石骨材を用いたコンクリートの諸物性に関する文献や関連資料を収集、整理して、主にユーザーの皆様を対象に石灰石骨材の品質や安全性PRに資する小冊子「石灰石骨材とコンクリート 1989」を発刊いたしました。

小冊子発刊から 15 年、この間、国土交通省によるアルカリ骨材反応抑制対策の改正なども行われ石灰石骨材の安全性に対する認知が高まるとともに、高強度コンクリートや高流動コンクリートへの適用など用途拡大も進み石灰石骨材の使用量は着実に増えてきています。

また、地球環境への負荷軽減をめざして、石灰石骨材のみ用いた完全リサイクルコンクリートや石灰石微粉末活用など新技術の開発や提案が行われています。

こうした背景を受けて、2004 年（平成 16 年）4 月、石灰石鉱業協会では石灰石資源およびコンクリートの専門家によるワーキンググループを編成し「石灰石骨材とコンクリート 1989」の増補改訂に着手、技術データ類の更新、新知見などの追補を行って内容の充実を図るとともに会員名簿、統計などの資料を更新し、このたび「石灰石骨材とコンクリート 2005」として取り纏めることができました。

本冊子が、ユーザーの皆様をはじめコンクリートに関係する産・官・学関係機関の皆様にご活用頂いて「石灰石骨材」に対するご理解がさらに深まることを願っております。

2005 年（平成 17 年）3 月 1 日

編集者一覧

(順不同)

資源対策委員会

委員長	土 澤 清	吉澤石灰工業(株)取締役執行役員常務
副委員長	吉 富 功	住友大阪セメント(株)鉱産品事業部資源グループリーダー
委員	三 輪 加寿則	武甲鉱業(株)取締役埼玉事業本部武甲鉱業所長
	中 原 宏	三菱マテリアル(株)セメント事業カンパニー鉱産品部長
	長 久	日鉄鉱業(株)取締役
	鈴 木 清 春	奥多摩工業(株)鉱業部長
	羽 田 直 弘	太平洋セメント(株)資源カンパニー鉱業部副部長
	武 原 真一郎	宇部興産(株)建設資材カンパニー生産・技術本部生産管理部 資源開発グループリーダー

ワーキンググループ

リーダー	大 内 辰 夫	三菱マテリアル(株)セメント事業カンパニー鉱産品部副部長
------	---------	------------------------------

資源担当

主 査	大 内 辰 夫	三菱マテリアル(株)セメント事業カンパニー鉱産品部副部長
委 員	高 杉 龍 幸	武甲鉱業(株)鉱務課長代理
	古 野 正 憲	日鉄鉱業(株)資源開発部開発課長
	谷 口 秀 平	日鉄鉱業(株)資源開発部開発課
	小 嶋 利 司	奥多摩工業(株)鉱業部業務課マネージャー
	松 本 卓 也	住友大阪セメント(株)鉱産品事業部資源グループ鉱業チーム
	伊與田 紀 夫	太平洋セメント(株)資源カンパニー鉱業部資源グループサブリーダー
	原 田 晋 作	宇部興産(株)建設資材カンパニー生産・技術本部生産管理部 資源開発グループ主席部員
	椿 徳 弘	吉澤石灰工業(株)採鉱部採鉱・技術グループマネージャー

コンクリート担当

主 査	中 村 秀 三	太平洋セメント(株)中央研究所研究開発部資源開発チームリーダー
委 員	草 野 昌 夫	住友大阪セメント(株)セメントコンクリート研究所 コンクリート製品技術グループ製品技術チームリーダー
	中 永 秀 彦	(株)宇部三菱セメント研究所埼玉センターコンクリートグループ 主任研究員
	佐々木 彰	(株)宇部三菱セメント研究所宇部センターコンクリートグループ

事務局

平 澤 良 和	石灰石鉱業協会調査部部長
喜 多 敬 二	石灰石鉱業協会技術部次長

目 次

まえがき

1. 石灰石骨材とは	1
1.1 石灰石とは	1
1.2 日本の石灰石資源の特徴	1
1.2.1 起源	1
1.2.2 鉱床分布	2
1.2.3 化学組成	2
1.2.4 結晶粒度	3
1.3 石灰石骨材の製造	4
1.3.1 石灰石鉱山	4
1.3.2 採掘	4
1.3.3 破碎・分級	4
1.3.4 貯蔵・出荷	4
1.3.5 品質管理	4
1.4 日本のコンクリート用石灰石骨材の需給の変遷	7
1.5 米国・英国の石灰石骨材の生産状況	8
1.5.1 米国の状況	8
1.5.2 英国の状況	8
2. コンクリート骨材としての石灰石の特性	10
2.1 石灰石の一般的性質	10
2.1.1 比重・吸水率	10
2.1.2 圧縮強度・引張強度	10
2.1.3 ヤング係数・ポアソン比	10
2.1.4 乾燥収縮	10
2.1.5 凍結融解抵抗性	11
2.1.6 熱的性質	12
2.1.7 すりへり(耐磨耗性)	12
2.1.8 耐水性・耐薬品性	12
2.2 コンクリート骨材としての品質	12
2.2.1 粗骨材の品質	12
2.2.2 細骨材の品質	13
2.3 石灰石のアルカリ骨材反応	14
2.3.1 諸外国で報告されているアルカリ骨材反応	14
(1) アルカリ炭酸塩反応	15
(2) アルカリシリカ反応	15
2.3.2 試験方法	15
2.3.3 各種試験結果	16

(1) ロックシリンダー法	16
(2) コンクリートプリズム法	18
(3) モルタルバー法	21
(4) 化学法	22
(5) 迅速法	23
(6) 岩石学的評価法	23
3. 石灰石骨材コンクリートの性質	25
3.1 まだ固まらないコンクリート(フレッシュコンクリート)	25
3.1.1 スランプ・スランプフロー (流動性)	25
3.1.2 空気量	26
3.1.3 ブリーディング	27
3.1.4 凝結時間	27
3.2 硬化コンクリートの特性	28
3.2.1 強度特性	28
(1) 一般的なコンクリートの圧縮強度	28
(2) 引張強度・曲げ強度	29
(3) 石灰石の品質とコンクリートの圧縮強度	30
(4) 高強度コンクリートの適用例	32
(5) 100N/mm ² を超える超高強度コンクリートへの石灰石骨材の適用性	33
(6) 蒸気養生した場合のコンクリート強度	34
3.2.2 乾燥収縮	35
3.2.3 自己収縮	37
3.2.4 弾性係数ならびにクリープ	38
(1) 静弾性係数・動弾性係数	38
(2) クリープ	39
3.2.5 熱的性質	39
3.3 硬化コンクリートの耐久性	40
3.3.1 すりへり抵抗値(耐磨耗性)	40
3.3.2 凍結融解抵抗性	41
(1) 普通コンクリート(水セメント比 50%)	41
(2) 高強度コンクリート(水セメント比 35%)	42
(3) 蒸気養生したコンクリート(コンクリート製品)	42
3.3.3 中性化抵抗性	43
3.3.4 耐火性・耐熱性	44
(1) 加熱によるコンクリートの変化	44
(2) 熱サイクルを受けたコンクリートの性状	45
3.3.5 耐硫酸塩性(ソーマサイト生成に伴う劣化)	46
3.3.6 耐薬品性・耐水性	47

4. 石灰石微粉末とコンクリート	49
4.1 石灰石微粉末	49
4.1.1 石灰石微粉末とは	49
4.1.2 石灰石微粉末の品質がコンクリートの品質に与える影響	49
(1) CaCO ₃ 純度	49
(2) 比表面積	50
(3) メチレンブルー吸着量	50
4.1.3 石灰石骨材の石粉	50
4.1.4 他の微粉末との比較	51
4.2 石灰石微粉末添加によるコンクリート性能の改善効果	51
4.2.1 流動性	51
4.2.2 強度特性	52
4.2.3 発熱特性	52
4.2.4 ポンパビリティー改善	53
4.2.5 ブリーディング抑止	53
4.2.6 中性化抑止・遮塩性改善	54
4.3 石灰石微粉末添加による高流動コンクリート	54
4.3.1 高流動コンクリートの作り方	54
4.3.2 石灰石微粉末添加高流動コンクリートの特性	55
5. 石灰石砕石・砕砂による完全リサイクルコンクリート	57
5.1 セメントと石灰石砕石・砕砂コンクリートの化学組成	57
5.2 完全リサイクルコンクリートから作られた再生セメントを用いた コンクリートの品質	58
6. 資料	59
6.1 石灰石生産量ならびに用途別出荷量	60
6.2 ドロマイト生産量ならびに用途別出荷量	61
6.3 骨材の品質基準	62
6.3.1 骨材関係 日本工業規格 (JIS)	62
6.3.2 JIS 以外の規格	63
6.4 会員鉱山用途別出荷図	64
6.5 石灰石鉱業協会会員名簿	66

1. 石灰石骨材とは

1.1 石灰石とは

石灰岩は CaCO_3 を主成分とする堆積岩で、ほとんどが珊瑚礁などとして生物遺骸が集積、固化して生成されたものである。

石灰岩の構成鉱物は主として方解石である。方解石 (CaCO_3)・アラレ石 (CaCO_3)・ドロマイト ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)などを炭酸塩鉱物と呼び、炭酸塩鉱物を 50 重量%以上含む岩石を炭酸塩岩と言う。

石灰石とは、石灰岩を地下資源として利用する場合の呼称である。また、石灰岩と成因・産状等で密接な関係があり、かつ物理的性状も同じである石灰岩—ドロマイト系の炭酸塩岩が一般に石灰石骨材として使用されているため、本書ではこれらを総称して石灰石とよぶ。

1.2 日本の石灰石資源の特徴

1.2.1 起源

日本の石灰岩は、諸外国の石灰岩に比べ CaCO_3 の純度が高いものが多いことが特徴である。これは日本の多くの鉱床が、もともと陸地からの泥分供給のない大洋中の海山で生成された高純度の石灰岩がその起源であることによる。海洋プレートに乗って日本周辺の海溝まで運ばれ、ここで沈み込む際に剥ぎ取られて周囲の堆積物中に異地性岩塊として取り込まれたとされている。

これ以外の起源のものとしては、一部の地域に分布する大陸縁辺部で形成されたタイプの石灰岩や地質的に新しい時代である第四紀に形成された琉球諸島に分布する琉球石灰岩などがある。琉球石灰岩は空隙に富むため強度が弱く、一般にはコンクリート骨材としての用途には適さない。

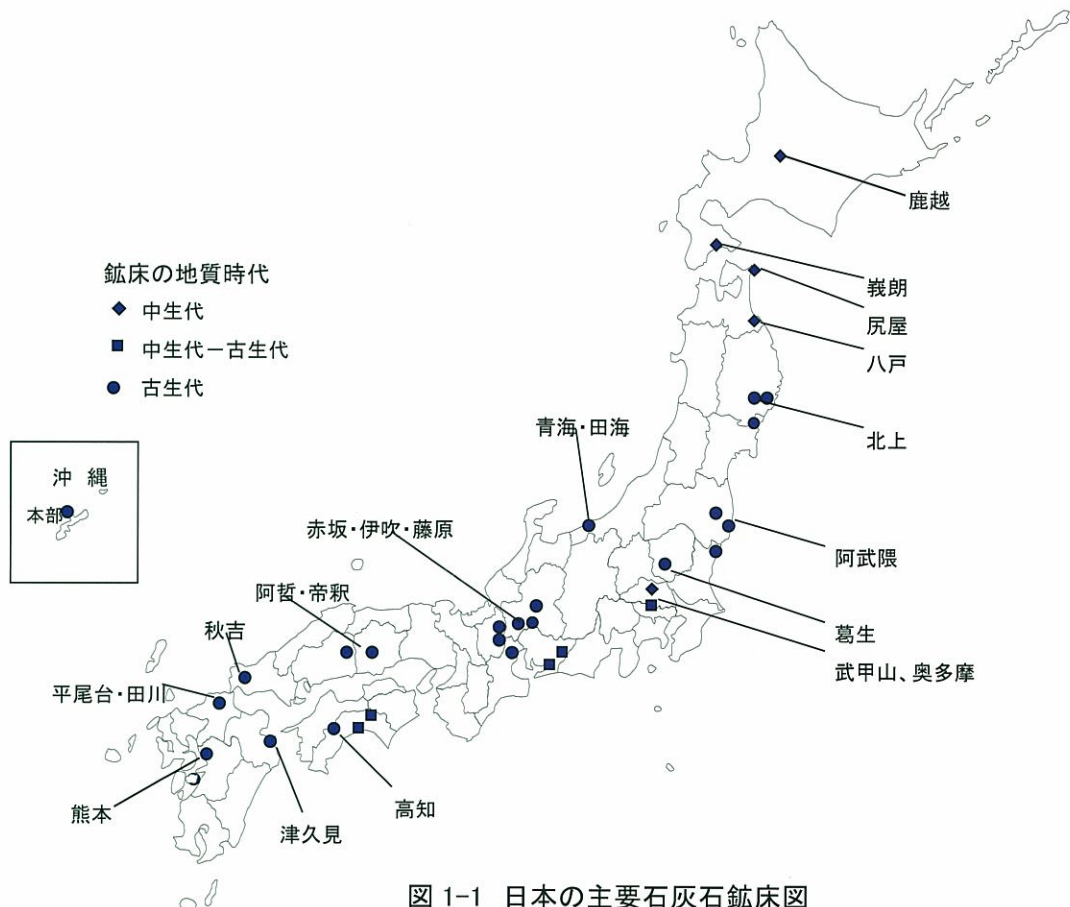


図 1-1 日本の主要石灰石鉱床図

1.2.2 鉱床分布

セメント、鉄鋼、化学等の工業原料として、あるいは土木建築材料として経済的に採掘に値する石灰石岩体を石灰石鉱床と呼んでいる。

日本の石灰石鉱床は、古生代石炭紀（3.6～3.0 億年前）、二畳紀（3.0～2.5 億年前）、中生代三畳紀（2.5～2.0 億年前）、ジュラ紀（2.0～1.5 億年前）に生成された塊状、緻密な石灰石からなるものが大半である。

1.2.3 化学組成

(1) 石灰岩

石灰岩は方解石の集合体からなり、その化学成分は大部分が CaCO_3 である。このほかに少量のドロマイト、石英、粘土鉱物等に由来した MgO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等を含有している。

表 1-1 代表的な石灰石の成分 (単位：%)

ig. loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
43.48	0.84	0.10	0.30	54.82	0.34

(2) ドロマイト（白雲岩または苦灰岩ともいう）

ドロマイトは岩石名であるとともに鉱物名でもある。鉱物ドロマイトは白雲石または苦灰石とも呼ばれ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ の化学成分を有する。 MgO の理論値は 21.9% である。岩石名として白雲石、苦灰石、ドロストーンなどと呼ばれることもある。

(3) 石灰岩—ドロマイト系炭酸塩岩

方解石とドロマイトは鉱物的に共存しやすいため、両者の含有比率により表 1-2 のように分類される石灰岩—ドロマイト系炭酸塩岩が存在する。

表 1-2 石灰岩—ドロマイト系炭酸塩岩の分類 (単位：%)

方解石の含有率	ドロマイトの含有率	岩石名	CaO	MgO	CO_2
100	0		56.0		44.0
95	5	石灰岩	54.8	1.0	44.2
90	10	マグネシア石灰岩	53.6	2.0	44.4
		ドロマイト質石灰岩			
50	50		43.7	10.5	45.8
		石灰質ドロマイト			
20	80	ドロマイト	35.9	17.2	47.0
10	90		33.1	19.5	47.4
0	100	高品位ドロマイト	30.4	21.9	47.7

1.2.4 結晶粒度

通常の石灰石は、構成する方解石の結晶粒子が肉眼的に認め難いほど粒径が細かく、隠微晶質石灰石（結晶粒径： 4μ 以下）あるいは微晶質石灰石（ $4\sim 16\mu$ ）と呼ばれる。一方、熱や圧力による変成作用を受けて方解石結晶が二次的に成長し肉眼的に認めることができるようになったものは結晶質石灰石と呼ばれる。結晶質石灰石は一般に白色度が増すため、製紙用フィラー等としての用途がある。



写真 1-1 隠微晶質石灰石

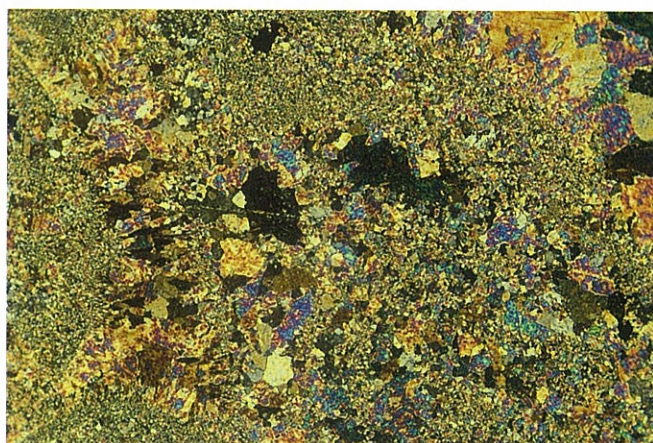


写真 1-2 隠微晶質石灰石の偏光顕微鏡写真



写真 1-3 結晶質の石灰石

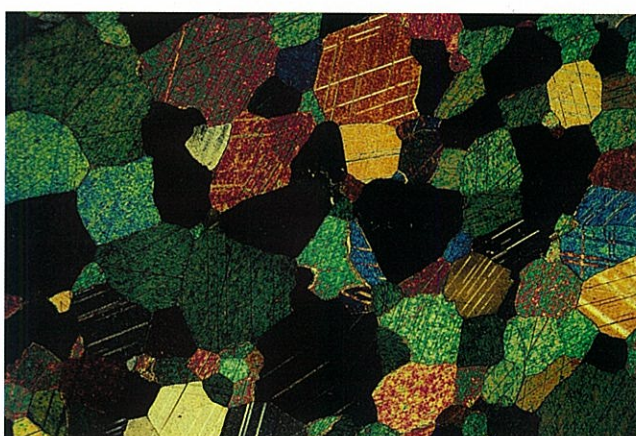


写真 1-4 結晶質石灰石の偏光顕微鏡写真



写真 1-5 ドロマイト

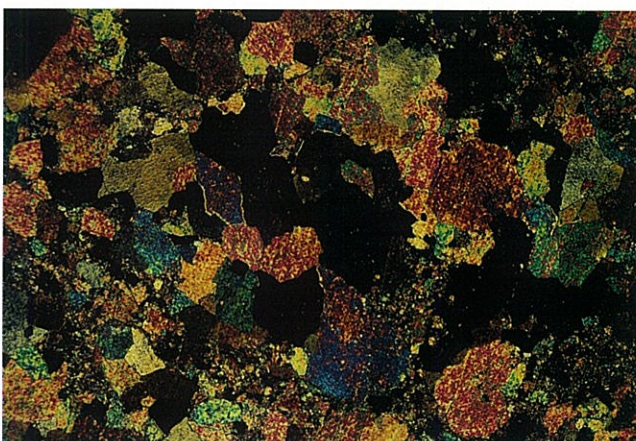


写真 1-6 ドロマイトの偏光顕微鏡写真

(引用：石灰石鉱業協会，1986¹⁻¹⁾)

1.3 石灰石骨材の製造

1.3.1 石灰石鉱山

コンクリート用石灰石骨材は、鉱業法により認可された石灰石鉱山において採掘・破碎・分級の工程を経て製造されている。石灰石鉱山では、通常、骨材向け以外にもセメントや鉄鋼向けなどにも安定した品質の製品を供給している(写真1-7)。国内の石灰石鉱山数は約300で、1年間に約1.7億tの石灰石が採掘され

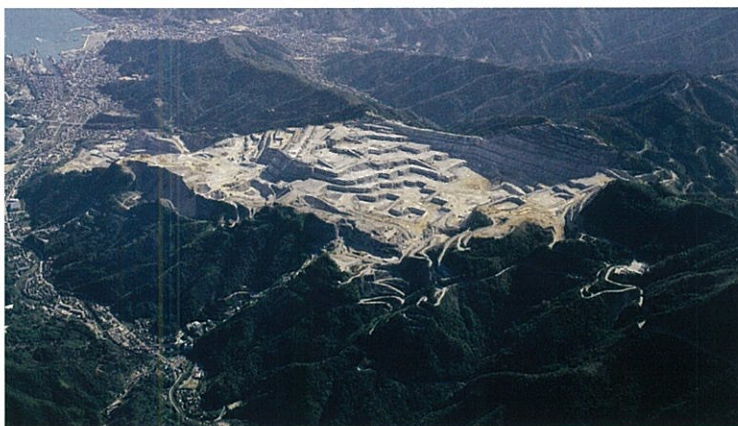


写真 1-7 大規模石灰石鉱山

ている。ほとんどの地下資源が海外から輸入されている中で、石灰石の国内自給率はほぼ100%であり、加えて台湾・韓国・オーストラリア等の国々へ鉄鋼原料などとして輸出されている。

1.3.2 採掘

我が国では、ほとんどの石灰石鉱山で露天採掘法により採掘されている。まず採掘に先行し、表土や鉱床周辺の異種岩石の混入を避けるために十分な剥土、剥岩が行われる。この後、穿孔・爆砕・積込みを経て、立坑またはプラントへ運搬される。

1.3.3 破碎・分級

石灰石骨材プラントのフローシート例を図1-2に示す。

採掘された原石は立坑からプラントへ搬入される。プラントでは一次クラッシャで原石は概ね150mm程度に破碎され、2次、3次の破碎・分級工程を経て、製品別の所定の粒径に調整された製品が製造される。

図1-2の例では水洗工程が設けられているが、この工程が設置されていないプラントもあり、それぞれ湿式プラント、乾式プラントと呼ばれている。

またこの例ではコンクリート用粗骨材として20-05が製造されているが、近年では20-15と15-05を別々に製造し、出荷時あるいはユーザー側で混合して20-05として使用されるケースも増えつつある。

1.3.4 貯蔵・出荷

所定の粒径に調整された碎石・砕砂製品は、ストックヤードやサイロなどに貯蔵され、ダンプ、船等により出荷される。

1.3.5 品質管理

石灰石骨材は塊状緻密な石灰石を原石としており、品質は非常に安定している。また、石灰石鉱床は、砂岩などの他の岩石とは異なり風化帯が存在しない。このため、表土除去後にすぐ製品化可能な原石を確保できるという特長があり、製品に風化岩が混入することもない。また鉱床内部にも粘土脈や夾雑層のような非石灰石が出現することがあるが、切羽において分別採掘が行われ、破碎・篩い分け各工程においても厳格な品質管理が行われており、ユーザーが要求する品質に十分応えられる製品を製造している。

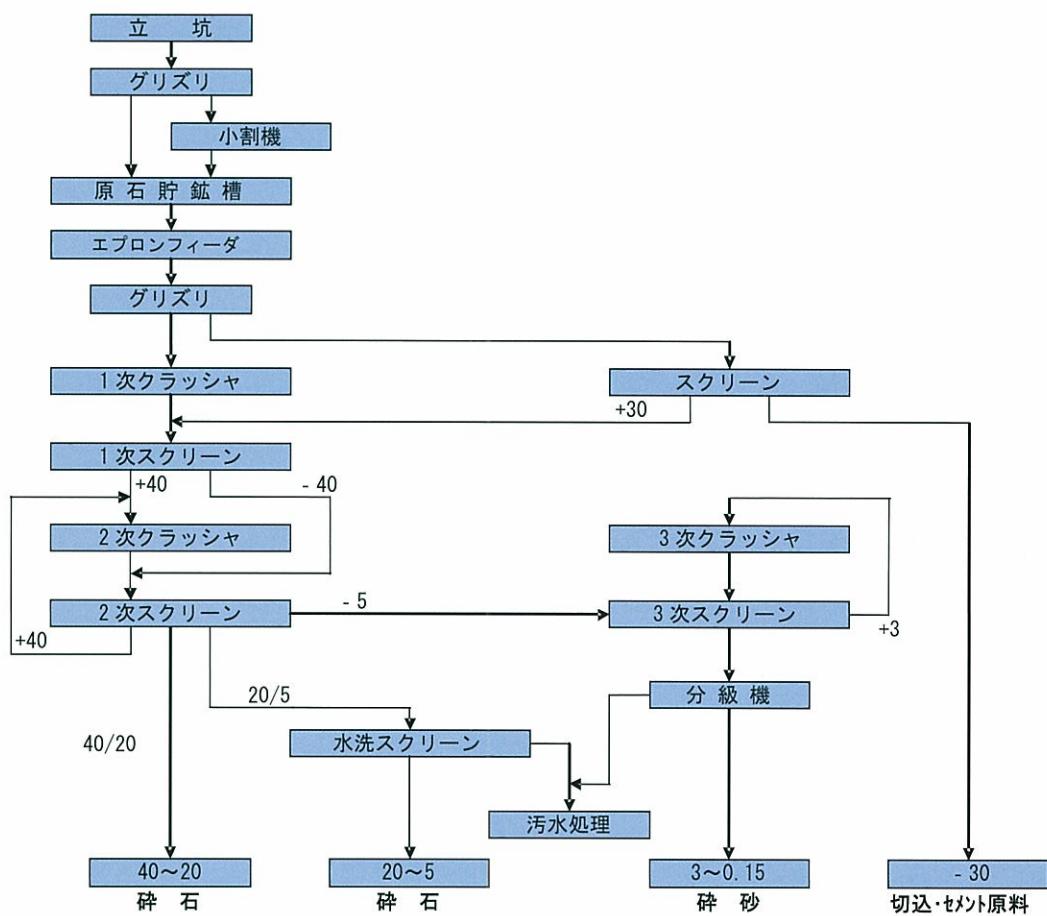


図 1-2 石灰石骨材プラントフロー例

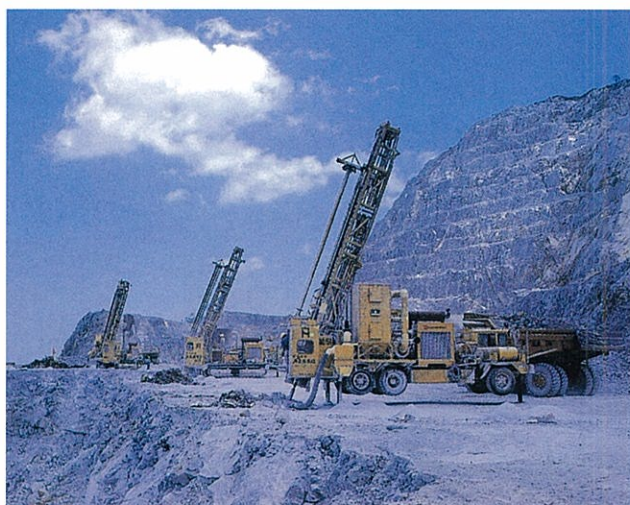


写真 1-8 せん孔作業



写真 1-9 積込作業



写真 1-10 石灰石骨材プラント



写真 1-11 船による出荷



写真 1-12 トラックによる出荷

1.4 日本のコンクリート用石灰石骨材の需給の変遷

コンクリート用石灰石骨材の国内出荷量は、河川砂利の採取規制に伴う砕石へのシフトに呼応し1970年代から増加し始めた。1980年代には国内で問題化したアルカリ骨材反応への対策として、この反応を起こす心配がなくかつ品質の安定している石灰石骨材への需要が増加した。バブル崩壊後の1990年代は、表1-3に示すとおりコンクリート用骨材の総需要量が減少する中でも漸増傾向にあったが、2000年度の38,883千tをピークに出荷量は漸減傾向にある。しかし石灰石骨材の総需要量に対する割合は2000年度以降も増加傾向にあり、2002年度では8.5%を占めている。

表1-3 コンクリート用骨材の総需要量と石灰石骨材（単位：千t）

年度		総需要量 A ¹⁻²⁾	石灰石（ドロマイトを含む）		
			出荷量 B ¹⁻³⁾	B/A	伸び率
1975	S50	446,000	6,694	1.5%	100
1985	S60	472,000	18,527	3.9%	277
1990	H2	604,000	33,161	5.5%	495
1995	H7	563,000	34,447	6.1%	515
1996	H8	577,000	36,243	6.3%	541
1997	H9	536,000	36,374	6.8%	543
1998	H10	495,000	35,494	7.2%	530
1999	H11	500,000	36,581	7.3%	547
2000	H12	500,000	38,883	7.8%	581
2001	H13	475,000	38,491	8.1%	575
2002	H14	445,000	37,732	8.5%	564

（注）（1）伸び率は1975年度を100とした比である。

（2）石灰石はドロマイト出荷量を含む。

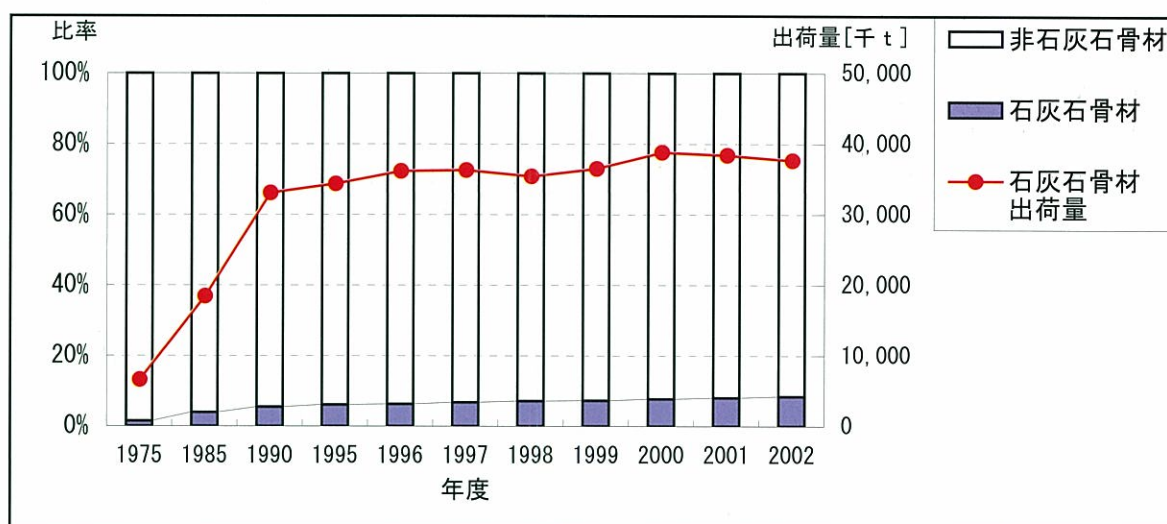


図1-3 コンクリート用骨材の構成比

1.5 米国、英国の石灰石骨材生産状況

骨材資源の世界的需要は年々高まっており、米国のある調査機関の報告¹⁻⁴⁾によると、年間総需要は2007年までに毎年5%ずつ上昇し、210億t以上に達するとも見込まれている。この主要因は中国の需要増加によるもので、世界需要の約4分の1を占めると言われる巨大市場となった中国の今後の動向が注目される。

需給統計が比較的容易に入手できる米国、英国では骨材中に占める石灰石及びドロマイト骨材の割合は後述の通り非常に高い。この理由は地質条件によるものとも想定されるが、今後我が国においてもアルカリ骨材反応問題や海砂の採取規制に伴い、石灰石骨材の比率が更に増えていくものと予想される。

1.5.1 米国の状況

2002年の総骨材生産量は26億3,300万tで、石灰石・ドロマイトが総骨材生産量に占める割合は41%、碎石生産量中に占める割合は71%と非常に高く、8年前の1994年と同程度の高水準で推移している¹⁻⁵⁾。

表 1-4 米国の骨材生産量¹⁻⁵⁾

(千t)

鉱 種		1994	2002
砕 石	石灰石・ドロマイト	880,700	1,075,400
	火成岩・砂岩等	349,300	444,600
砂 利		891,000	1,113,000
計		2,121,000	2,633,000

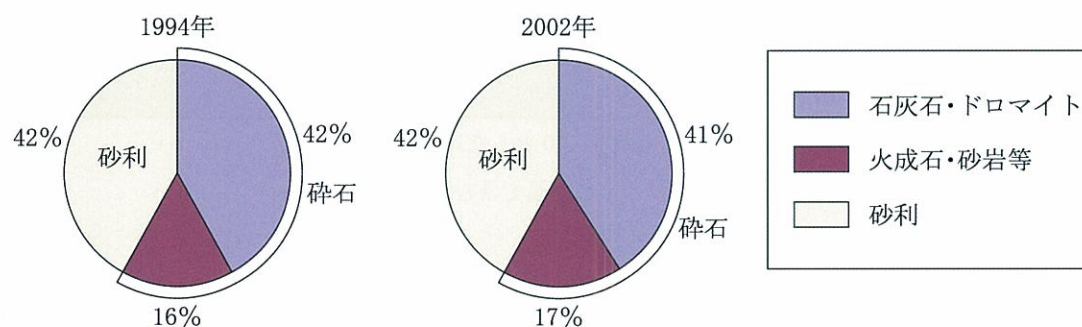


図 1-4 米国の骨材の構成比

1.5.2 英国の状況

2002年の総骨材生産量は約2億2,100万tである。1999年に3億tでピークを迎え、それ以降は減少傾向にある¹⁻⁶⁾。石灰石・ドロマイトが総骨材生産量に占める割合は32%、碎石生産量中に占める割合は56%と高い比率を示す。英国の統計は用途別の正確な生産量が示されており、それによると、2002年の英国におけるコンクリート用石灰石及びドロマイト骨材の出荷量は2,011万tであり、全コンクリート骨材に占める割合は24%であった。これは我が国の8.5%（2002年度、表1-3）の約3倍である。

表 1-5 英国の骨材生産量¹⁻⁶⁾

(千 t)

鉱 種		1994	2002
砕 石	石灰石・ドロマイト	99,190	70,855
	火成岩・砂岩等	62,567	55,716
砂 利		97,672	94,424
計		259,429	220,995

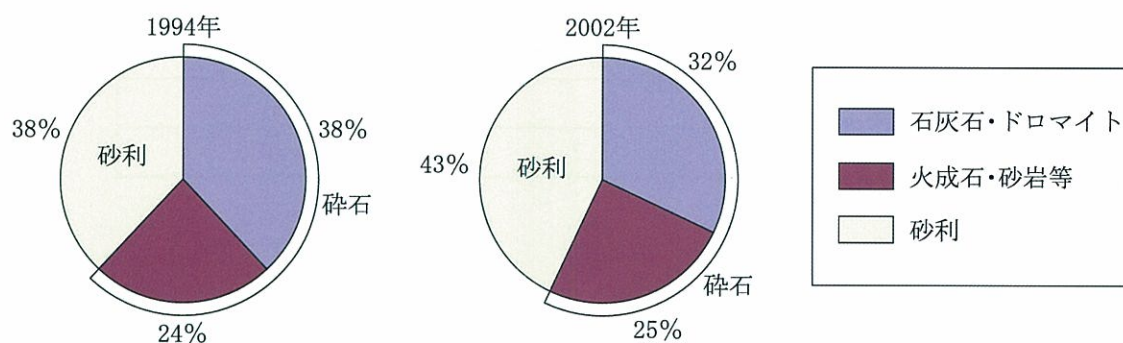


図 1-5 英国の骨材の構成比

表 1-6 英国のコンクリート骨材の供給量¹⁻⁶⁾

(千 t)

鉱 種		1994	2002
砕 石	石灰石・ドロマイト	13,166	20,112
	火成岩・砂岩等	3,178	6,230
砂 利		60,577	58,923
計		76,921	85,265

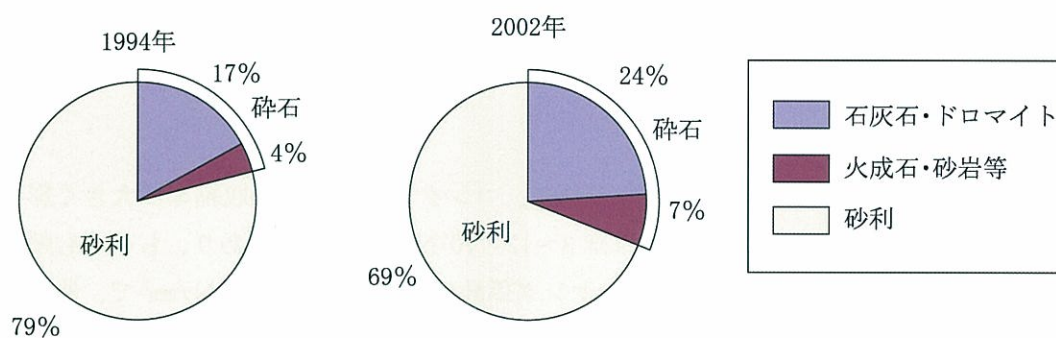


図 1-6 英国のコンクリート骨材の構成比

[参考文献]

- 1-1) 石灰石鉱業協会：石灰石の用途と特性，1986，口絵 p5
- 1-2) 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課推計
- 1-3) 経済産業省経済産業政策局調査統計部編：資源統計年報
- 1-4) World Construction Aggregates, Freedonia Group Inc., 2003. 5
- 1-5) US Geological Survey : Minerals Yearbook Vol. I Metals and Minerals 1995, 2003
- 1-6) British Geological Survey : United Kingdom Minerals Yearbook 1995, 2003

2. コンクリート骨材としての石灰石の特性

2.1 石灰石の一般的性質

2.1.1 比重・吸水率

石灰石の主構成鉱物である方解石の真比重は 2.71 であるが、石灰石の比重は空隙や不純物などの影響により若干低下し、一般に 2.6～2.7 程度である。

また石灰石の吸水率は 0.2～0.8 程度であり、他の骨材用岩石と比べて変動幅が小さい²⁻¹⁾。

表 2-1 石灰石骨材の比重・吸水率

項 目	比重	吸水率 (%)
石灰石	2.6～2.7	0.2～0.8

2.1.2 圧縮強度・引張強度

石灰石の圧縮強度・引張強度は、その結晶粒径、亀裂密度、亀裂の二次晶質物による膠着度、片状構造の有無などによって異なるが、塊状緻密なものであれば結晶粒径の小さなものほど強度があり、結晶化の進んだものほど強度は低下する。

骨材として使用される石灰石は、ほとんどが微晶質～隠微晶質のもので、その圧縮強度は 104～205 N/mm²、引張強度は 8～12 N/mm² 程度の値を示す。いずれも通常のコンクリート用骨材として十分な圧縮強度を有しており、表 2-2 に示す通り他の骨材用岩石と比較しても大差ない²⁻²⁾。

表 2-2 各種岩石の圧縮強度

(単位: kgf/cm²)

石灰石	そ の 他 の 岩 種		
	安山岩	硬砂岩	玉 石
1,041～2,046 (1,433)	704～2,220 (1,422)	1,450～2,740 (1,621)	1,625～1,875 (1,745)

(注) () 内は平均値

(引用: 石灰石骨材専門委員会, H2²⁻³⁾)

2.1.3 ヤング係数・ポアソン比

骨材のヤング係数は、コンクリートのヤング係数、コンクリートの乾燥収縮率に大きく影響する。我が国のコンクリート用骨材のヤング係数はほぼ $3 \sim 12 \times 10^4$ N/mm² の範囲であり、もっとも頻度の高いのは $6 \sim 7 \times 10^4$ N/mm² である^{2-2), 2-4)}。石灰石のヤング係数は、概ね $6 \sim 8 \times 10^4$ N/mm² で、他の岩石に比較してバラツキが小さい。

一方、石灰石のポアソン比は、概ね 0.29～0.34 の範囲内にあり、砂岩・安山岩等のポアソン比は 0.20～0.45 と同等であり、かつバラツキが少ない^{2-2), 2-5)}。

稼行鉱山の産地別ヤング係数、ポアソン比の測定値を表 2-3 に示す。

2.1.4 乾燥収縮

乾燥収縮は多くの機構が絡み合って生じるが、現実の問題となる乾燥収縮は毛細管張力によって起こる。したがって、岩石の乾燥収縮性は体積含水率とヤング係数とで評価できる。各種岩石の乾燥収縮率の測定結果を図 2-1 に示す²⁻⁶⁾。

石灰石は含水率が低いため、乾燥収縮も少ない。

表 2-3 石灰石のヤング係数・ポアソン比

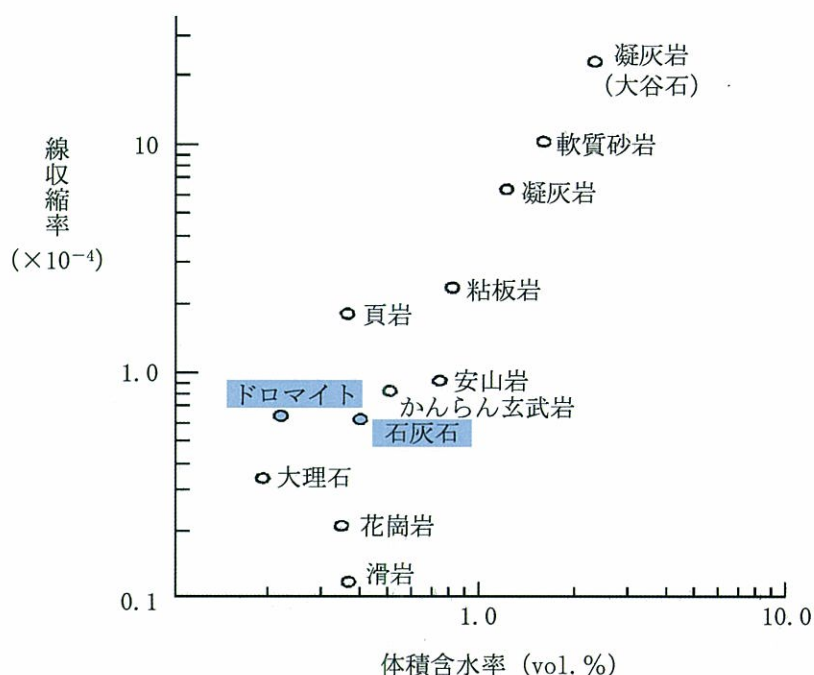
産 地	ヤング係数 (10^5kgf/cm^2)	ポアソン比
北 海 道	6.5	0.29
岩 手	7.0	0.31
栃 木	7.8	0.34
埼 玉	7.8	0.32
新 潟	7.1	0.29
山 口	7.7	0.32
高 知	7.6	0.34
大 分	8.2	0.29

(引用：石灰石骨材専門委員会，H2²⁻³)

2.1.5 凍結融解抵抗性

岩石は孔隙や細孔の中に含まれる水の凍結時において、未凍結水圧が過大な場合には破壊を起こす。水圧の大きさは骨材内部の気孔構造、透水性、含水状態、骨材粒の大きさ等によって支配される。したがって、他の要因が同じであれば、吸水率が大きいほど劣化しやすいといわれている²⁻⁷⁾。

石灰石の凍結融解試験では、凍結融解くり返し 300 サイクル後においても外観上、亀裂の発達、剥げ落ち等は全く見られない。相対動弾性係数は当初の約 93%に低下するが、この値は、優秀な A E コンクリートの耐久性に相当するもので、コンクリート用骨材として使用してさしつかえないものである²⁻⁸⁾。



(注) 条件温度20℃、相対湿度50%

図 2-1 各種岩石の乾燥収縮と体積含水率

(引用：石灰石骨材専門委員会，H2²⁻³)

2.1.6 熱的性質

石灰石の熱重量分析では 700℃付近から CO₂ の放出による重量の加速的減少が認められる。したがって、石灰石は 700℃までは顕著な熱分解を起こさないもので耐火性は十分あることがわかる。

また、石灰石の爆裂試験でも表 2-4 に示すように何ら損傷を受けることがなく、火災などの一時的な加熱に対しては問題ないとされている^{2-9), 2-10)}。

一般に固体の熱的性質には、熱膨張係数、熱伝導率、熱拡散率および比熱などがある。

石灰石の熱膨張係数は 0～100℃の温度の範囲において $4\sim 8\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。一般に骨材として使用される玄武岩、安山岩、花崗岩等の同温度範囲における熱膨張係数は $6\sim 12\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、石灰石の熱膨張係数は他の岩石より小さい^{2-11), 2-12), 2-13)}。

また石灰石の熱伝導率は 9,585～11,636J/m・h・℃、熱拡散率は 0.00457～0.00509 m²/h、比熱は 749～846J/kg・℃である。

表 2-4 岩石の爆裂試験結果

岩 石	項 目	絶 乾		飽 水		気 乾	
		重量減	個数減	重量減	個数減	重量減	個数減
安山岩	損傷率(%)	0	0	0	0	0	0
	含水率(%)	0		1.9		0.1	
花崗岩	損傷率(%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	含水率(%)	0		1.3		0	
石灰岩	損傷率(%)	0	0	0	0	0	0
	含水率(%)	0		0.9		0.1	

(森実, S53²⁻¹⁰⁾)

2.1.7 すりへり(耐摩耗性)

石灰石は硬度のやや低い方解石が主要な構成鉱物であるため、すりへりは他の骨材に比べてやや劣性である。

石灰石のすりへり減量は概ね 18～27%の範囲にあり、JIS・コンクリート用砕石規格(40%以下)、土木・コンクリート舗装示方書(35%以下)の規格値を満足している。

2.1.8 耐水性・耐薬品性

石灰石を構成する方解石(炭酸カルシウム)は純水に対する溶解度が 1.43 mg/100 cc (25℃)であり、通常の環境下では事実上殆ど溶解しない²⁻¹⁴⁾。しかしながら酸には弱いため、酸性薬品を使用する環境下や温泉水、酸性水、硫酸塩含有地下水の影響のある地域では、石灰石が溶解することがある。

とはいえ一般の中性ないし弱アルカリ性の淡水―海水中では石灰石は十分安定であり、骨材としての耐久性の点では問題がない。

2.2 コンクリート骨材としての品質

2.2.1 粗骨材の品質

粗骨材用石灰石としては、塊状で緻密な微晶質ないし隠微晶質のものが要求される。

石灰石粗骨材の品質は、他の骨材に比べて密度、吸水率、安定性などに優れている。すりへり減量については他の骨材に比べて若干劣っているが、そのほかコンクリートに有害な軟石、粘土塊および塩分

については含有の恐れはない。

図 2-2 は各種粗骨材と比較したもので、石灰石のデータは稼行 24 鉱山の製品の測定値である。

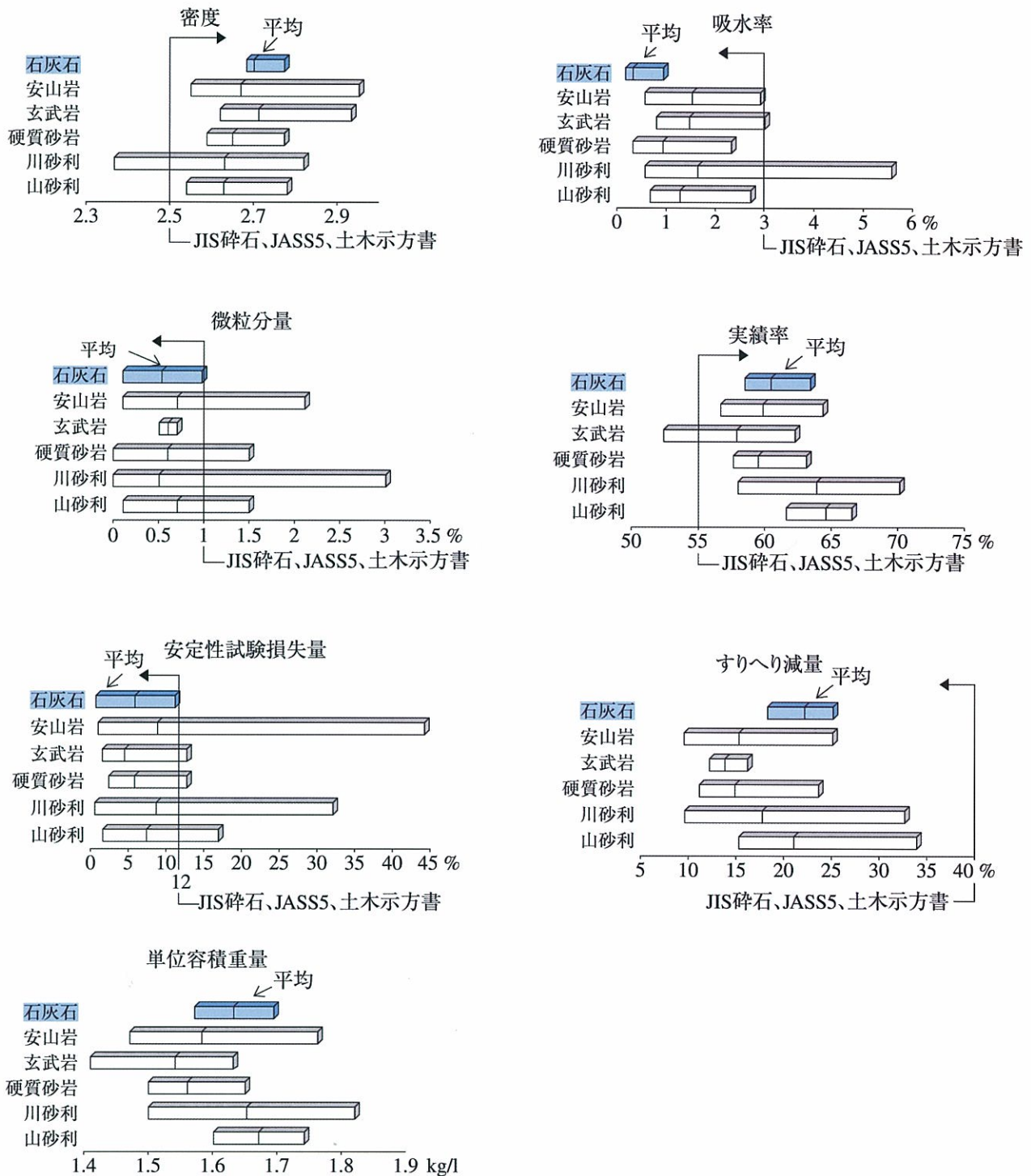


図 2-2 各種粗骨材の品質²⁻¹⁵⁾

2.2.2 細骨材の品質

細骨材用石灰石としては、粗骨材同様、塊状で緻密な微晶質ないし隠微晶質のものほかに、結晶質のものも利用される。

石灰石細骨材の品質は、密度、吸水率、安定性試験損失量などが他の骨材に比べて変動幅が小さく優

れている。有機物、軽量物質および塩分の含有については粗骨材と同様、何ら問題はない。

図 2-3 は各種細骨材と比較したもので、石灰石のデータは稼行 18 鉱山の製品の測定値である。

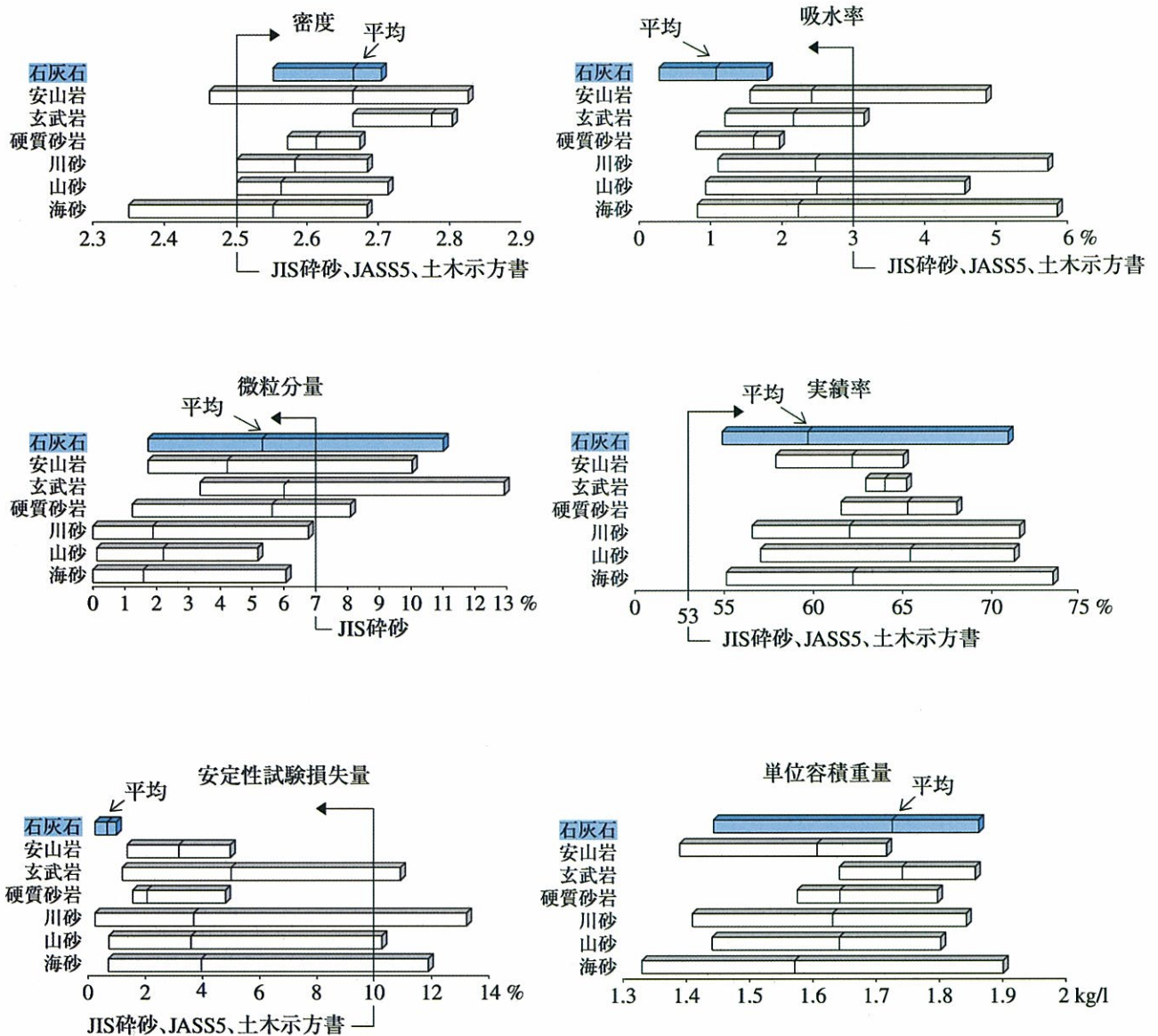


図 2-3 各種細骨材の品質²⁻¹⁶⁾

2.3 石灰石のアルカリ骨材反応

我が国において、石灰石はアルカリ骨材反応の心配が最も少ない骨材として、広く使用されている。また、これまでにこれらの反応が原因で石灰石骨材を用いたコンクリート構造物が異常劣化した事例は未だ報告されていない。国土交通省による平成 14 年 8 月 1 日付の通達『アルカリ骨材反応抑制対策』の中でも、石灰石骨材は天然骨材の中で唯一、試験成績表による確認を行なえば良いとされている。

2.3.1 諸外国で報告されているアルカリ骨材反応

米国・カナダでは、ある特定のタイプの石灰石でアルカリ骨材反応、つまり『アルカリ炭酸塩反応』と『アルカリシリカ反応』が認められている。これらの反応を起こす石灰石は、粘土鉱物を多量に含む

ドロマイト質石灰石や珪質石灰石であることが明らかになっている。

こうしたタイプの石灰石は、日本の多くの石灰石のように大洋中の海山で形成された高純度石灰石にはほとんど存在しない。したがって、日本の石灰石骨材はアルカリ骨材反応に対しては心配ない。

(1) アルカリ炭酸塩反応

アルカリ炭酸塩反応は、粘土鉱物を含有するドロマイト質石灰石に含まれるドロマイトとセメントから供給されるアルカリとの反応によって生ずるコンクリートの劣化現象といわれている。この反応はドロマイトと方解石量の量比、結晶型、粘土鉱物の種類と含有量、ドロマイト—方解石—粘土鉱物の共生関係、骨材の空隙率等の要素が複雑に絡み合っておこるもので、なかでも粘土鉱物（特にイライト）の存在が大きく関与するといわれている。

(2) アルカリシリカ反応

アルカリシリカ反応は、粘土鉱物を含有する珪質石灰岩に認められている。コンクリート間隙水中の水酸化アルカリと骨材中の反応性シリカ及び水の反応によってアルカリシリケートゲルを生成し周囲の水分を吸収し膨張するもので、一般骨材と同様の反応メカニズムである。

2.3.2 試験方法

骨材のアルカリ骨材反応性の有無を調べる試験方法としては、表 2-5 に示す方法が用いられている。

表 2-5 アルカリ骨材反応性試験方法

試験名	規格番号	試験方法
ロックシリンダー法	ASTM C-586	円柱状に切出した岩石試験片を 1 規定の水酸化ナトリウム溶液に長期間浸漬し、アルカリ溶液にさらされた時に岩石が膨張するかどうか確認する。
コンクリートプリズム法	CSA A 23.2-14A	粗骨材のサイズの骨材を用いて、全アルカリ量 0.9% のセメントにアルカリを添加し Na_2O 当量 1.25% のコンクリート供試体を作成し、1 年後の長さの変化率を測定し判定する。
化学法	JIS A 1145	150-300 μm に粉砕した試料を 80°C1N の水酸化ナトリウム溶液中で 24 時間浸漬させ溶解シリカ量 Sc とアルカリ濃度減少量 Rc を測定し、 $\text{Sc}-\text{Rc}$ の関係から判定する。
モルタルバー法	JIS A 1146	所定の細骨材サイズに粉砕混合し、全アルカリ 0.65% のセメントを使用し、セメントの全アルカリ量が 1.2% となるように水酸化ナトリウムを添加しモルタル供試体を作成し、湿空中で長期間（6 ヶ月）養生し膨張量の大きさで反応性を判定する。
迅速法	JIS A 1804	所定の粒度に調整した試料と標準砂を 1 : 1 で混合し、全アルカリ 0.65% のセメントに水酸化ナトリウムを添加し全アルカリ量が 2.5% となるようにモルタル供試体を作成し、127°C 水中（ゲージ圧 150kPa）で 4 時間煮沸し、その長さ変化・相対動弾性係数または超音波伝播速度を測定し判定する。
岩石学的評価方法	ASTM C 295	骨材に含まれる反応性鉱物の有無を偏光顕微鏡観察や粉末 X 線回折などを用いて判定する。

2.3.3 各種試験結果

アルカリ骨材反応を呈するカナダ産石灰石と日本産石灰石の比較試験が多くの研究機関などで実施されている。いずれの結果も日本の石灰石骨材についてはアルカリ骨材反応が認められていない。一方、アルカリ骨材反応が明らかに現れるカナダ産石灰石についても、試験方法によっては評価が分かれる結果となるケースもあり、試験方法を適切に選択することも重要である。

なお、石灰石鉱業協会としては、試験の信頼性もあり、各試験機関において良く普及している方法として JIS A 1146 モルタルバー法を推奨している。

表 2-6 日本産石灰石骨材のアルカリ骨材反応性試験結果総括表

試験名	ロックシリンダー法	コンクリートプリズム法	化学法	モルタルバー法	迅速法
規格番号	ASTM C-586	CSA A 23.2-14A	JIS A 1145	JIS A 1146	JIS A 1804
試験結果	無害	無害	無害	無害	無害

(1) ロックシリンダー法

表 2-7 に試験試料の岩石名と化学分析値を、図 2-4 に試験結果のグラフを示す²⁻¹⁷⁾。試料 A はカナダ産の反応性骨材、試料 B～L は日本産の石灰石骨材である。

ロックシリンダー法による判定基準値は、材令にかかわらず膨張率 0.1%以上が有害とされている (ASTMC586)。カナダ産石灰石骨材は材令初期の段階で基準値をオーバーし、半年を過ぎると 0.9%および 1.6%の膨張率に達し、その後横ばいとなるのに対して、日本産石灰石骨材はドロマイトの含有量に関係なくほとんど膨張しない。材令 5 年を経過しても同様であり、反応性は極めて低い。

表 2-7 試験試料の化学分析値

(単位：%)

産地	試料番号	岩石名	Ig. loss	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
カナダ	A	ドロマイト質石灰岩	39.0	46.8	4.2	1.19	0.52	7.82
日本	B	石灰質ドロマイト	44.8	34.6	17.6	0.06	0.15	0.04
	C	ドロマイト質石灰岩	40.3	55.8	2.4	0.26	0.28	0.46
	D	ドロマイト質石灰岩	42.9	46.0	9.5	0.29	0.19	0.65
	E	ドロマイト質石灰岩	43.0	46.4	8.0	0.06	0.11	0.02
	F	石灰岩	40.7	54.5	0.8	0.36	0.31	2.83
	G	石灰質ドロマイト	44.8	37.1	16.2	0.05	0.21	0.31
	H	石灰岩	40.2	52.9	0.7	0.19	0.38	5.12
	I	石灰岩	38.9	51.2	1.2	0.96	1.10	6.24
	J	石灰質ドロマイト	45.1	34.7	16.3	0.09	0.06	0.09
	K	石灰質ドロマイト	44.5	35.6	16.8	0.07	0.27	0.09
	L	石灰岩	41.1	58.0	0.3	0.04	0.02	0.06

(引用：斉藤ら，1993²⁻¹⁷⁾)

図 2-4 では、カナダ産骨材について、堆積層に垂直方向と水平方向とに別々に採取した試料を各々評価しているが、これは層状に堆積した石灰岩であるため、堆積層に垂直方向の方が水平方向に比べ鉱物組成が大きく変動するためである。カナダでは堆積層に垂直方向に 30cm おきに試験試料を採取することが推奨されている。

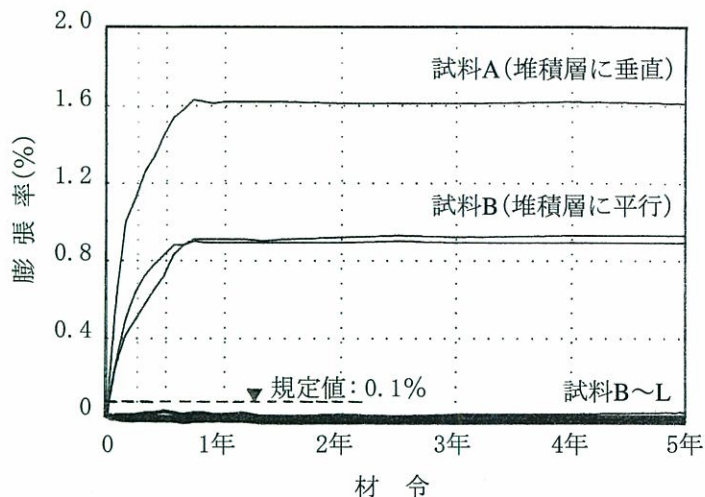


図 2-4 ロックシリンダー法・膨張率と材令の関係

(引用：斉藤ら，1993²⁻¹⁷⁾)

図 2-5、表 2-8 にアルカリ炭酸塩反応の研究の端緒となったカナダ（キングストン）産ドロマイト質石灰石と日本産ドロマイト質石灰石とのロックシリンダー法による比較試験結果と試験に用いた試料の化学分析値を示す。

いずれの結果も日本産が全く問題ないのに対し、カナダ産ドロマイト質石灰石では著しい長さ変化を呈している。化学分析値からは、カナダ産が不溶解残分、 SiO_2 、 Al_2O_3 の含有量が多いことが読み取れる。

表 2-8 ドロマイト質石灰石の化学分析値

(単位：%)

	不溶解残分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
本邦産 (A)	0.8	0.8	0.06	0.1	44.7	9.3
本邦産 (B)	6.6	4.8	1.0	0.4	43.5	7.0
カナダ産	15.2	8.9	2.4	0.8	44.1	4.8

(引用：西他，昭和 55 年²⁻¹⁸⁾)

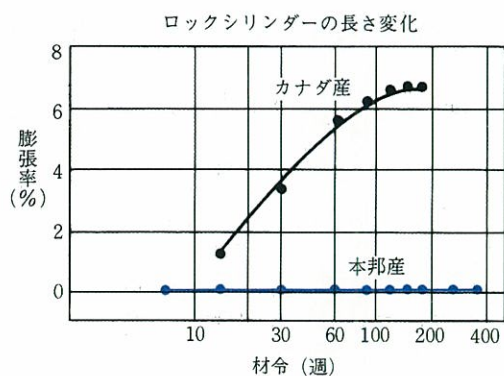


図 2-5 ドロマイト質石灰石のアルカリ炭酸塩反応試験結果

(引用：西他，昭和 55 年²⁻¹⁸⁾)

(2) コンクリートプリズム法

表 2-9 に試験試料の化学分析値を、表 2-10 と図 2-6 に試験結果を示す。

表 2-8 試験試料の化学分析値

鉱山名		化学成分 (%)						
		ig. loss	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅
カナダ	Pittsburg	42.0	6.07	0.94	1.44	37.9	11.18	0.014
日本	峯朗	43.9	0.19	0.04	0.08	55.0	0.69	0.019
	尻屋	43.8	0.30	0.03	0.06	55.3	0.48	0.013
	八戸	43.8	0.12	0.02	0.13	55.3	0.38	0.026
	長岩	41.5	3.75	0.49	1.50	49.8	2.58	0.027
	大叶	43.9	2.06	0.14	0.26	43.4	9.80	0.201
	武甲	43.7	0.30	0.10	0.12	55.1	0.53	0.011
	氷川	43.8	0.36	0.03	0.11	54.7	0.84	0.020
	藤原	43.6	0.53	0.16	0.15	54.9	0.50	0.016
	阿哲	43.8	0.21	0.04	0.06	55.2	0.35	0.022
	伊佐	43.8	0.07	0.02	0.07	55.5	0.31	0.018
	関の山	43.9	0.09	0.08	0.09	55.3	0.55	0.023
	津久見	43.9	0.14	0.03	0.06	55.3	0.54	0.030
	鳥形山	43.8	0.12	0.04	0.15	55.6	0.25	0.020
	安和	43.9	0.14	0.04	0.09	54.5	1.17	0.020

(引用：コンクリート専門委員会²⁻¹⁹⁾)

コンクリートプリズム法での判定基準は膨張率が 0.04%/1 年以上で有害とされている。カナダのオンタリオ州キングストンの Pittsburg 骨材は 168 日目で 0.200%及び 0.333%の膨張を示し有害を示すが、日本産の石灰石骨材は 168 日目ですべて 0.01%未満であり、かつ 28 日目以降ほとんど膨張を示さないで無害と判断される。

表 2-10 コンクリートプリズム法による試験結果

鉱山名		総アルカリ量	膨張率 (%)						
		(kg/m ³)	7 日	14 日	28 日	56 日	84 日	112 日	168 日
カナダ	Pittsburg	3.1	0.022	0.033	0.044	0.069	0.111	0.157	0.200
		5.5	0.035	0.058	0.090	0.147	0.215	0.297	0.333
日本	峩朗	3.1	0.002	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
		5.5	0.001	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
	尻屋	3.1	0.000	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
		5.5	0.003	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
	八戸	3.1	0.003	0.005	0.003	0.005	0.004	0.004	0.004
		5.5	0.004	0.002	0.003	0.004	0.000	0.004	0.004
	長岩	3.1	0.006	0.006	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
		5.5	0.007	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.009
	大叶	3.1	0.004	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
		5.5	0.005	0.008	0.008	0.008	0.009	0.009	0.009
	武甲	3.1	0.002	0.005	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
		5.5	0.000	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
	氷川	3.1	0.001	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005
		5.5	0.000	0.008	0.008	0.007	0.007	0.006	0.006
	藤原	3.1	0.003	0.004	0.002	0.001	0.004	0.004	0.005
		5.5	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
	阿哲	3.1	0.007	0.007	0.007	0.008	0.007	0.007	0.007
		5.5	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
	伊佐	3.1	0.003	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.060
		5.5	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
	関の山	3.1	0.002	0.003	0.001	0.003	0.004	0.004	0.004
		5.5	0.002	0.004	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004
	津久見	3.1	0.001	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
		5.5	0.001	0.003	0.008	0.008	0.007	0.007	0.007
	鳥形山	3.1	0.002	0.002	0.003	0.003	0.005	0.005	0.005
		5.5	0.002	0.002	0.001	0.002	0.006	0.006	0.006
	安和	3.1	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004
		5.5	0.004	0.004	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005

(引用：コンクリート専門委員会²⁻¹⁹⁾)

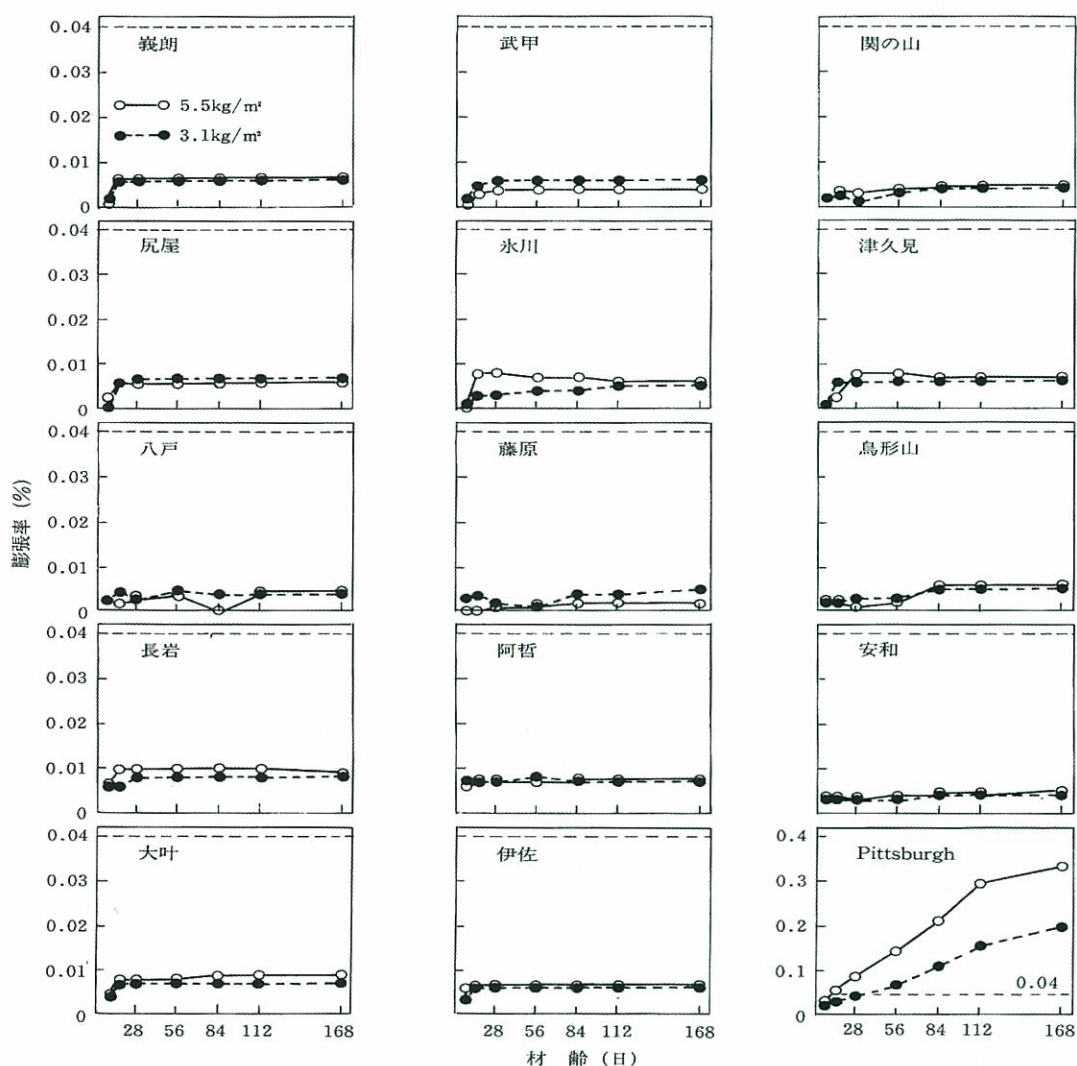


図 2-6 コンクリートプリズム法による膨張率の経時変化

(引用：コンクリート専門委員会，1994²⁻¹⁹⁾)

なお、試験に用いた各試料の化学組成から推定した鉱物組成値を表 2-11 に示す。

表 2-11 鉱物組成の推定値

	寝郎	長岩	大叶	氷川	藤原	関の山	津久見	安和	Pittsburg
カルサイト	96.4	82.4	52.7	95.5	96.2	97.3	97.3	94.3	39.9
ドロマイト	3.2	11.8	44.8	3.8	2.3	2.5	2.5	5.4	51.2
リン灰石	0.04	0.06	0.44	0.04	0.04	0.07	0.07	0.04	0.03
その他	0.31	5.74	2.46	0.84	0.84	0.23	0.23	0.27	8.45

鉱物推定：MgO は、Ca/Mg (CO_3)₂ とみなして鉱物ドロマイトとした。

P₂O₅ は 3CaO・P₂O₅ とみなしてリン灰石とした。残りの CaO は、CaCO₃ とみなしてカルサイトとした。

SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ は、非炭酸塩とみなしてその他とした。

(引用：コンクリート専門委員会，1994²⁻¹⁹⁾)

(3) モルタルバー法

表 2-12 に試験試料の化学分析値を、表 2-13 に試験結果を示す。

表 2-12 試験に用いた日本産石灰石骨材の化学分析値

試 料		化学成分 (%)					
No.	岩 石 名	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Ig. loss
1	石 灰 岩	0.1	0.0	0.1	55.2	0.2	43.7
2	マグネシア石灰岩	3.0	0.3	0.4	50.8	1.6	43.4
3	マグネシア石灰岩	2.4	0.3	0.4	53.0	1.0	42.7
4	ドロマイト(25%), 石灰岩(75%)混合	4.76	—	—	46.1	5.9	—
5	ドロマイト	0.6	0.1	0.4	33.2	18.8	46.7
6	ドロマイト	0.3	0.1	0.1	34.3	18.5	46.8
7	石 灰 岩	0.3	0.2	0.1	55.2	0.6	43.4

(引用：石灰石鉱業協会，昭和 61 年²⁻²⁰⁾)

モルタルバー法での判定基準は、膨張率が 0.05%/3 ヶ月、0.1%/6 ヶ月以上で有害とされている。日本産石灰石骨材では 6 ヶ月の膨張率が 0.014~0.018% (アルカリ量 1.22%時) と、基準値を大幅に下回っている。

表 2-13 日本産石灰石のモルタルバー法による試験結果

試 料		材令時の長さ変化率 (%) (マイナス値：収縮)								セメント中の全アルカリ量(%)
No	岩 石 名	7 日	14 日	28 日	2 か月	3 か月	4 か月	5 か月	6 か月	
1	石 灰 岩	—	0.008	0.006	0.006	0.006	0.008	0.010	0.015	1.22
2	マグネシア石灰岩	—	0.007	0.011	0.012	0.008	0.013	0.016	0.018	1.22
3	マグネシア石灰岩	—	-0.003	-0.001	*1 -0.001	*2 -0.001	*3 0.002	—	*4 0.002	0.75
4	ドロマイト(25%) 石灰岩(75%)混合	—	0.007	0.007	0.006	0.006	0.009	0.011	0.015	1.22
5	ドロマイト	—	0.005	0.009	0.011	0.008	0.010	0.012	0.014	1.22
6	ドロマイト	—	0.004	0.004	*1 0.005	*2 0.005	*3 0.006	—	*4 0.006	0.75
7	石 灰 岩	—	0.002	0.005	*1 0.004	*2 0.006	*3 0.006	—	*4 0.006	0.75

注) 1. *1: 8 週、*2: 14 週、*3: 18 週、*4: 26 週時の測定値。

2. 2 社の提供資料による。

(引用：石灰石鉱業協会，昭和 61 年²⁻²⁰⁾)

また、図 2-7 に表 2-7 の試料を用いた 5 年間の長期材令試験結果を示す。試料 A のカナダ産骨材で約 4 年後に膨張率は 0.1% を超えているが、これ以外の日本産骨材では 5 年後でも 0.1% を大幅に下回っている。

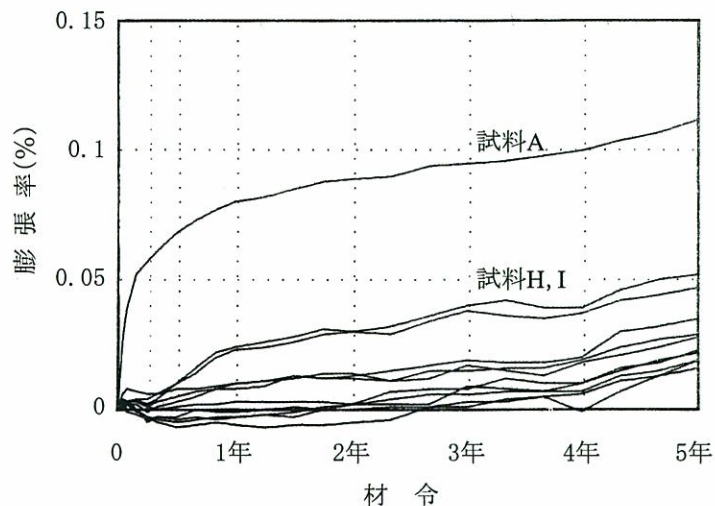


図 2-7 モルタルバー法・膨張率と材令の関係

(引用：斉藤ら，1993²⁻¹⁷⁾)

(4) 化学法

化学法の判定基準は、 $Sc-Rc$ の関係を示す判定図で評価される。

図 2-8 に化学法による試験結果を示すが、いずれも無害領域に入る。日本産石灰石は一般に Sc が 10mmol/l 以下と低い。

なお、P1～P4、S1～S3 はカナダ産骨材である。

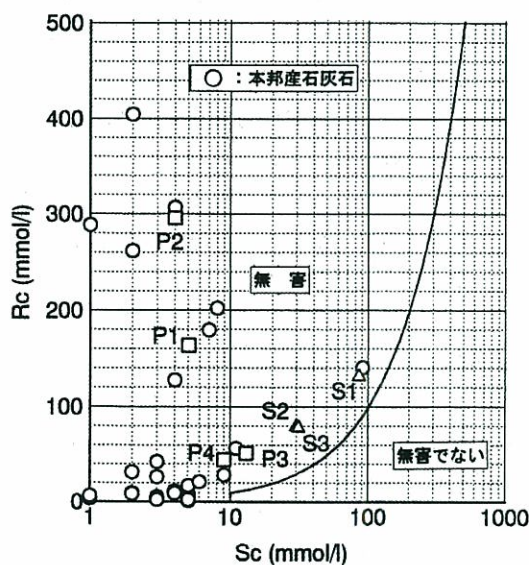


図 2-8 JIS 化学法試験結果

(引用：松浪ら，1994²⁻²¹⁾)

(5) 迅速法

図 2-9 に超音波伝播速度率、相対動弾性係数、長さ変化率の三通りの試験結果を示す。日本産石灰石骨材はいずれも「無害」である。

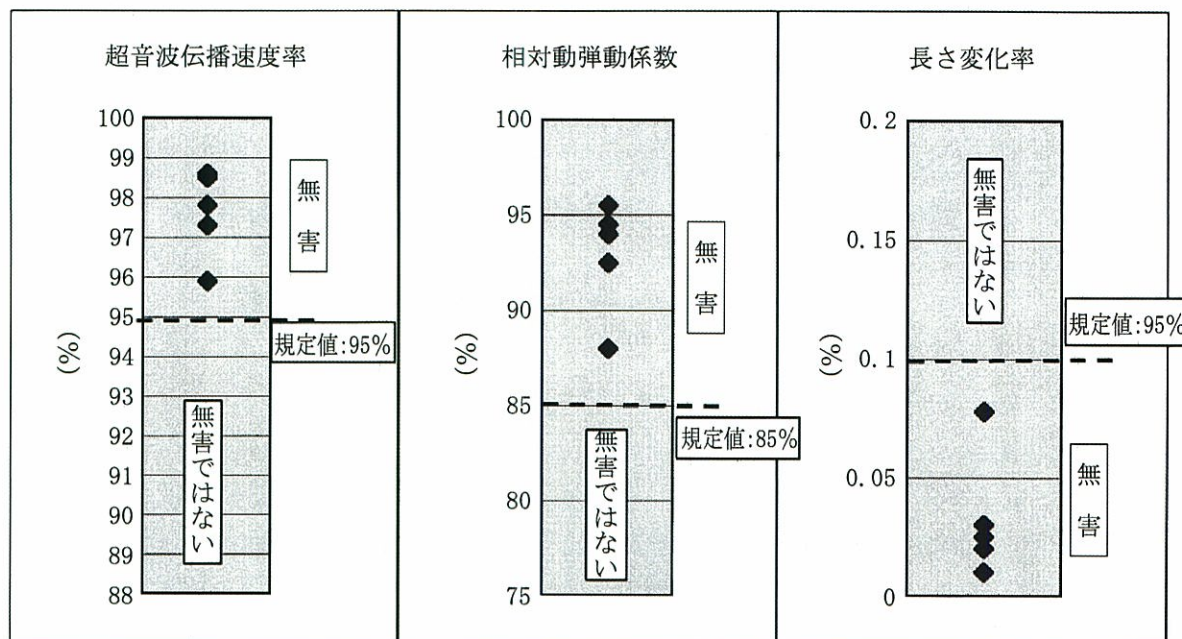


図 2-9 迅速法試験結果²⁻²¹⁾

(6) 岩石学的評価法

米国やカナダでは岩石の偏光顕微鏡観察などによる岩石学的試験が骨材のスクリーニングに用いられている (ASTM C295、CSA A23.2-15A)。表 2-14 に米国、カナダにおいて反応性があると判定されている石灰石骨材の岩石学的な特徴を示す。

表 2-14 アルカリ骨材反応性のある骨材の特徴

反応	岩石学的組織の特徴
アルカリ炭酸塩反応	・ドロマイト質（ドロマイト含有量：40～60％）で多量のカルサイトを含む。 ・粘土鉱物の含有量が 10～20％（多くはイライトである）。 ・粘土鉱物と微細なカルサイトのマトリックス中に分散する孤立したドロマイトの 1～200 μm の小さな菱面体からなる特徴的な組織をもつ。
アルカリシリカ反応	・反応性鉱物として、珪質～泥質のマトリックスや珪質の化石に含まれるオパール、カルセドニー、隠微晶質石英などが含有される。

[参考文献]

- 2-1) 小川敬三他：石灰石の骨材としての性質、石灰石の用途と特性、石灰石鉱業協会，S61，p486-497
- 2-2) 山口梅太郎ほか：石灰石の物理的性質、石灰石の用途と特性、石灰石鉱業協会，S61，p55-60
- 2-3) 石灰石骨材専門委員会：石灰石骨材とコンクリート、石灰石鉱業協会，H2，p11-13
- 2-4) 永松静也：骨材の性質・性能、コンクリート工学協会，S55

- 2-5) 日本鉱業会編：岩石試験データシート作成・利用研究の現状、日本鉱業会誌, S57
- 2-6) 岸谷孝一、馬場明生：建築材料の乾燥収縮機構、セメント・コンクリート Vol. 346
- 2-7) 小林正凡：骨材の性質・性能、コンクリート工学協会, S53
- 2-8) 天君ダムコンクリート用粗骨材についての試験
- 2-9) Kishitani and Mori, Study on Influence of Popping of Aggregates on Fire Resistance of Concrete Joun, of the Facility of Eng, Tokyo Uni, 1975
- 2-10) 森実：骨材の性質・性能、熱的性質・耐火性、コンクリート工学 Vol. 16 No. 9, S53
- 2-11) 武本正・三鍋徳治・城所卓明：石灰石骨材を用いたコンクリートの諸性質に関する研究、セメント技術年報, S63
- 2-12) 原田有：高温度におけるセメントモルタルおよびコンクリートの熱膨張について、セメント・コンクリート Vol. 280
- 2-13) 山口梅太郎：石灰石の物理的性質、日本の石灰石, S58
- 2-14) 日本化学会編：化学便覧, 丸善, S33
- 2-15) (社)セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-28、細骨材の品質調査報告, 1976. 12, pp. 112
- 2-16) (社)セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-29、粗骨材の品質調査報告, 1977. 10, pp. 56, 82
- 2-17) 西、沖村、江藤：ドロマイト質石灰岩のアルカリ炭酸塩反応、セメント技術年報, Vol. 34, 昭和 55 年, pp113-116
- 2-18) 斉藤、田村、松浪：石灰石骨材のアルカリ反応性早期判定試験方法の開発に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15. No. 1. 1993, pp905-910
- 2-19) (社)セメント協会：コンクリート専門委員会 F-47、石灰石骨材のアルカリ炭酸塩反応に関する調査・研究, 1994 年 3 月)
- 2-20) 石灰石鉱業協会会員会社提供資料による, 昭和 61 年
- 2-21) 松浪、田村、斉藤、島田：石灰石骨材のアルカリ反応性早期判定試験方法の開発に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, 1994, pp1095-1098

3. 石灰石骨材コンクリートの性質

石灰石骨材を用いたコンクリートの特性を3.1まだ固まらないコンクリート、3.2硬化コンクリート、3.3 耐久性の順に他の骨材を使用した場合と比較しながら、その利点と欠点について述べる。

3.1 まだ固まらないコンクリート（フレッシュコンクリート）

3.1.1 スランプ・スランプフロー（流動性）

砕石・砕砂を用いる場合は、砂利・砂を用いる場合に比較し所定の流動性を得るために必要な単位水量が増加する³⁻¹⁾。しかし、砕石・砕砂の中で比較すると石灰石は、他の岩種のものに比較し、同一の流動性を得るために必要な単位水量が少なくなる事例が多い。

表 3-1 は石灰石砕石（種類：A～C）と硬質砂岩砕石（種類：D）を用いて所定のスランプを得るのに必要な単位水量を試験したものである。これによると同一スランプを得るために必要な単位水量は、石灰石砕石を用いた場合の方が硬質砂岩砕石を用いた場合より少なくなっている。これは、石灰石砕石の方が硬質砂岩砕石に比べ、実積率が大きく、粒形が良いためと思われる。また、実積率が硬質砂岩砕石に比較し劣っているBにおいても所要単位水量が4kg/m³少なくなっているのは、実積率で判別できないわずかな角張りや骨材表面の平滑度の差によるものと思われる。

表 3-1 単位水量とスランプの関係³⁻²⁾

粗骨材種類		スランプ 8cm W/C=50%		スランプ 18cm W/C=55%		試験に用いた骨材の物理的性質						
		S/a (%)	W (kg/m ³)	s/a (%)	W (kg/m ³)	粗粒率	比重	実積率 (%)	吸水率 (%)	洗い (%)	安定性 (%)	すりへり減量 (%)
石灰石	A	44.0	158	46.0	179	6.53	2.70	62.1	0.22	0.54	0.3	20.4
	B	46.0	166	48.0	189	6.44	2.69	57.1	0.44	0.60	0.1	22.5
	C	46.0	166	48.0	189	6.57	2.78	58.3	0.67	0.53	0.5	23.4
砂岩	D	46.0	170	48.0	193	6.46	2.69	57.7	0.83	0.50	4.2	11.8

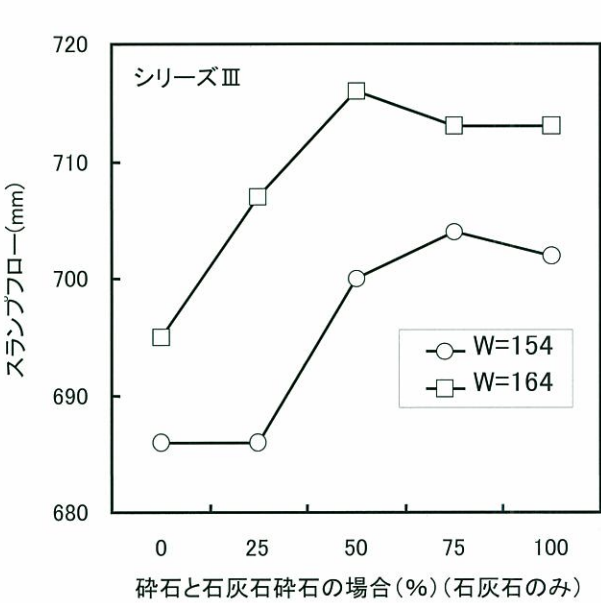


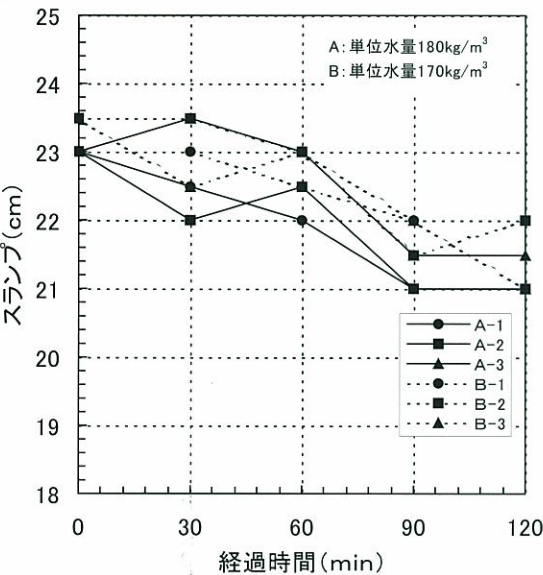
図 3-1 スランプフロー値と石灰石砕石の混合割合の関係
(引用：高山, 2000³⁻³⁾)

試験に用いた骨材の物理的性質

材料の種類	物理的性質
普通セメント	密度 3.14 g/cm ³ 比表面積 4,460 cm ² /g
石灰石微粉末	密度 2.74 g/cm ³ 比表面積 8,600 cm ² /g
海砂	密度 2.58 g/cm ³ 吸水率 2.25% 粗粒率 2.58 実積率 66.1%
石灰石砕砂	密度 2.65 g/cm ³ 吸水率 3.35% 粗粒率 2.72 実積率 71.0%
砕石 2005	密度 2.73 g/cm ³ 吸水率 1.01% 最大寸法20mm 粗粒率 6.73 実積率 59.1%
砕石 1305	密度 2.58 g/cm ³ 吸水率 0.97% 最大寸法15mm 粗粒率 6.22 実積率 61.0%
石灰石砕石	密度 2.65 g/cm ³ 吸水率 1.41% 最大寸法20mm 粗粒率 6.53 実積率 61.7%

また、図 3-1 に示されるように高流動コンクリートにおいても、石灰石砕石を使用した場合の方が硬質砂岩砕石の場合に比べてスランプフローが大きくなっている。これは、スランプの場合と同様、石灰石砕石が硬質砂岩砕石に比べ実積率が大きいことによると思われる。さらに、海砂に石灰石砕砂を混合した場合、混合割合を大きくするに従いスランプフロー値が増加することが確認されている³⁻³⁾。

図 3-2 は石灰石砕石を用いたコンクリートのスランプロスを示したものである。スランプ 23cm のコンクリートにおいて、注水後 90 分においてもスランプの低下が 2cm 程度と良好な結果を示している。



試験に用いた骨材の物理的性質

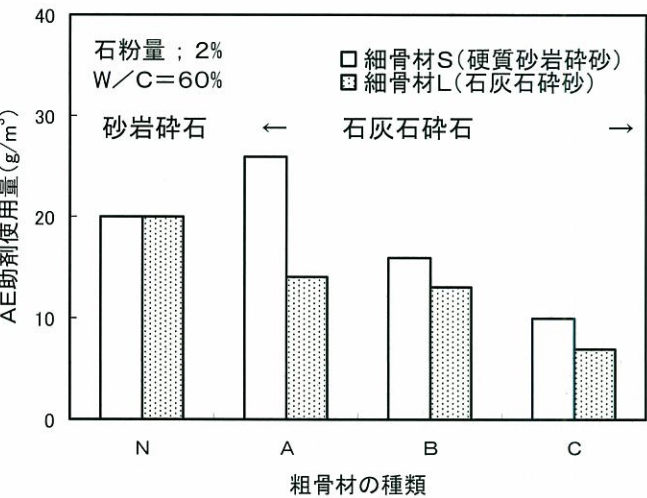
	種類	記号	品質または種類
セメント	普通ポルトランドセメント	C	比重 3.16
細骨材	玄界灘産海砂 (粗砂 7:細砂 3)	S	表乾比重 2.57
粗骨材	山口県美祢産 石灰石砕石	G	表乾比重 2.70 実積率 63.2%
水	工業用水	W	—
混和剤	高性能 AE 減水剤 (標準タイプ)	SP-A	ポリカルボン酸系

図 3-2 スランプの経時変化 (引用：松藤，1999³⁻⁴⁾)

3.1.2 空気量

AE 剤により適量のエントレインドエアを連行させると、コンクリートの凍結融解抵抗性が増すと同時に、気泡がボールベアリングの働きをして流動性も向上する。このため、コンクリートには 4～6% 程度の空気量を持たせることが重要とされている。

図 3-3 は、所要の空気量を得るために必要な AE 助剤用量を示したものである。



試験に用いた骨材の性質

種別	記号	表乾比重	吸水率 (%)	微粒分 (%)
粗骨材	A	2.71	0.70	2.3
	B	2.71	0.63	2.3
	C	2.75	0.92	2.2
	N	2.65	0.71	1.9
細骨材	L	2.68	0.81	0.2
	S	2.65	1.18	2.7

図 3-3 AE 助剤使用量

(引用：セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-46，1992³⁻⁵⁾)

図 3-3 で A、B、C は石灰石骨材を用いた場合の AE 助剤量を示している。石灰石骨材を用いた場合の方が、砂岩骨材を用いた場合より、おおむね所要 AE 助剤量が少なくてすんでいる。また、細骨材 S（硬質砂岩砕砂）と L（石灰石砕砂）を比較した場合、石灰石砕砂 Lの方が硬質砂岩砕砂 Sより所要 AE 助剤使用量は少ない。一般に微粒分量が多くなると所要 AE 助剤量は増加すると言われているが、石灰石の微粒分は他の岩の微粒分に比較し薬剤の吸着³⁻⁶⁾が少ないことにより影響が少ないと思われる。

3.1.3 ブリーディング

コンクリートの打込み後、密度の大きい骨材が沈下し、水が上昇する現象をブリーディングという。ブリーディングは、水みち、骨材および鉄筋下の水溜り、そのほか表面に砂のすじ（砂ボロ）を作るなど多過ぎると好ましくない。逆に少な過ぎると、表面仕上げ作業に支障がでることもあるので注意が必要である。特に高流動コンクリートにおいては、高粉体量、低水セメント比との関係で、ブリーディング水が生じない場合がある。

図 3-4 は、硬質砂岩砕砂 N と石灰石砕砂 A～C を用いたコンクリートのブリーディング率を示したものである。これからわかるように、ブリーディング率は、主に微粒分量（石粉量）の影響を受け骨材岩種の影響は少ない。

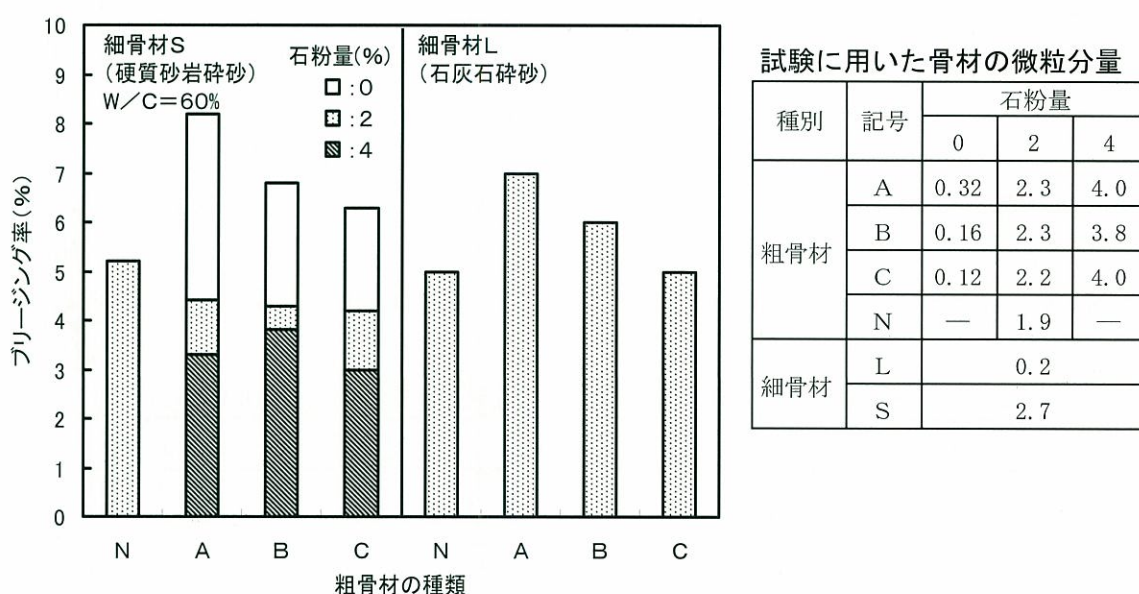


図 3-4 ブリーディング率

(引用：セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-46, 1992³⁻⁵⁾)

3.1.4 凝結時間

コンクリートの凝結時間は、生コンの運搬限界時間、打継ぎ許容時間、こて仕上げ開始時間、などを決定する場合の参考とされる。凝結の遅いコンクリートは、打継ぎ許容時間、運搬限界時間を長く取れる一方、こて仕上げ開始時間を遅くせねばならず工程が長引く場合がある。逆に凝結の早すぎるコンクリートは、長距離の運搬ができない、打継ぎ不良を招き易いなどの問題がある。

図 3-5 に硬質砂岩砕砂、石灰石砕砂を使用したコンクリートの凝結時間を示す。凝結の始発時間・終結時間とも、粗骨材の種類（N：硬質砂岩砕砂、A～C：石灰石砕砂）、細骨材の種類（S：硬質砂岩砕砂、L：石灰石砕砂）による違いによる差は認められない。

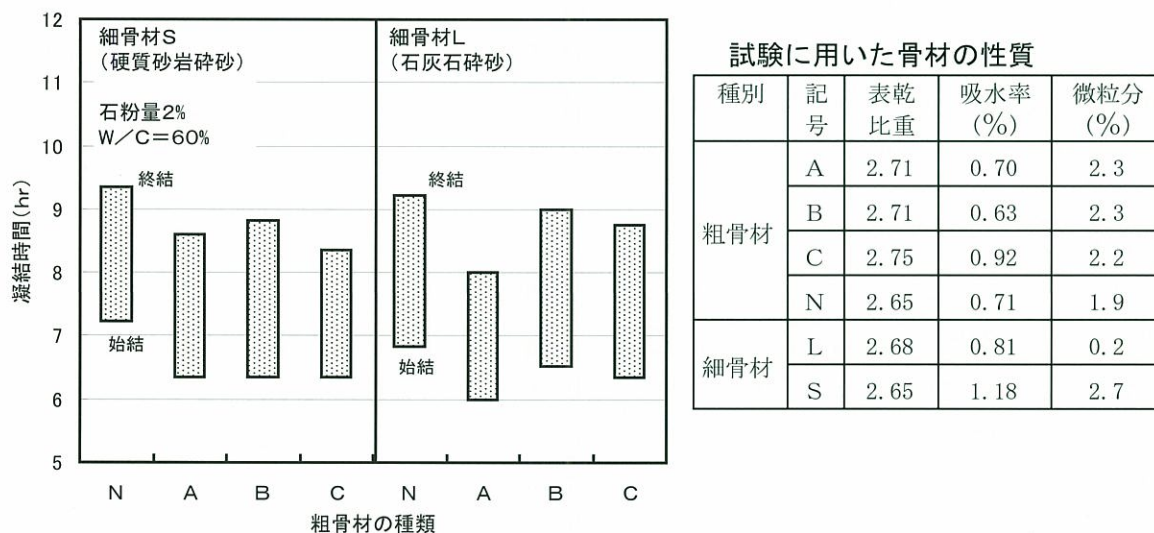


図 3-5 凝結時間

(引用：セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-46, 1992³⁻⁵⁾)

3.2 硬化コンクリートの特性

3.2.1 強度特性

コンクリートの強度等力学特性は、ペースト強度や骨材強度のみならず、骨材セメントペースト間の付着強度に大きな影響を受けることが知られている³⁻⁷⁾。石灰石骨材を用いたコンクリートでは、骨材表面においてセメントペーストと化学反応が起これカルシウム・カーボアルミネートという水和物が生成し、骨材—ペースト界面の組織が緻密化され付着強度が増加する。このことにより、他の骨材を使用したものに比べ石灰石骨材を使用したコンクリートは、一般に強度の発現性が良好である³⁻⁵⁾。

表 3-2 岩石の種類がセメントペーストとの付着張強度に及ぼす影響 (単位：kgf/cm²)

材齢	石灰石	セメントペースト	硬砂岩	花崗岩
28 日	34.47 (55)	62.67 (100)	27.07 (43)	29.34 (45)
91 日	41.24 (60)	69.15 (100)	29.76 (43)	33.18 (48)

(注) W/C=45%、() 内の数字はセメントペーストの引張強度に対する比

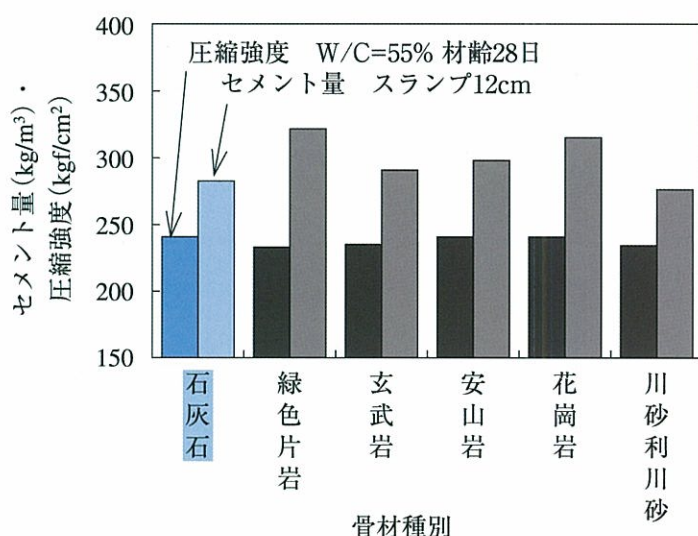
(引用：小林, 1974³⁻⁷⁾)

(1) 一般的なコンクリートの圧縮強度

石灰石骨材を用いたコンクリートの強度発現性は結晶粒度や微粒分量によって若干の違いはあるものの、40N/mm² 程度までの強度範囲において、他の骨材（砂岩系碎石や砂利）を用いたものと同等かそれ以上であるといわれている。

図 3-6 は、骨材に各種岩石の碎石・砕砂ならびに川砂利・川砂を用いたコンクリート圧縮強度の比較を示したものである。石灰石を用いたものは、セメント量が少ないにも係わらず他の種類の岩石を用いた場合と比較し、同等以上の圧縮強度を示している。図 3-7 は、粗骨材に石灰石碎石、川砂利、山碎石を用いた各種コンクリートの圧縮強度と水セメント比の関係を材齢ごとに示したものの一例である。水

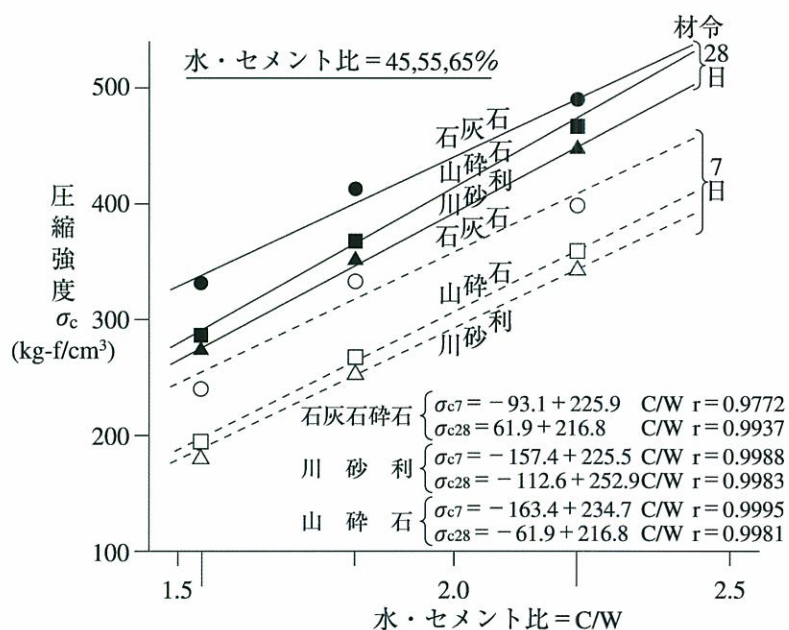
セメント比が一定の場合、石灰石砕石は川砂利や山砕石と比較して、強度は10～15%程度大きくなっている。



試験に用いた骨材の物理的性質

粗骨材	密度	吸水率(%)
石灰石	2.67	0.60
緑色片岩	2.71	1.49
玄武岩	2.81	1.99
安山岩	2.76	1.77
花崗岩	2.57	2.04
川砂	2.59	2.45
細骨材	密度	吸水率(%)
石灰石	2.71	0.23
緑色片岩	2.79	0.86
玄武岩	2.85	1.51
安山岩	2.79	1.34
花崗岩	2.64	0.88
川砂利	2.64	1.16

図 3-6 各種岩石の砕石・砕砂を用いたコンクリートの圧縮強度³⁻⁸⁾



試験に用いた粗骨材の物理的性質

骨材種類	石灰石	山砕石	川砂利
最大寸法(mm)	20	20	25
粗粒率	6.47	6.49	6.69
表乾比重	2.7	2.65	2.64
吸水率(%)	0.41	0.76	1.01
実績率(%)	61	59.3	64
すりへり減量(%)	19.6	12.8	10.2
安定性損失量(%)	1.2	3.8	7.5
洗い損失量(%)	1.4	1.0	0.5
40t 破砕値(%)	19.8	11.7	6.2

(注) W/C=45, 55, 65%, スランブ 18cm セメント N 細骨材山砂使用

図 3-7 各種粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度試験結果

(引用: 大塩, 1987³⁻⁹⁾)

(2) 引張強度・曲げ強度

石灰石骨材を使用したコンクリートは骨材とペーストとの付着が良いため、圧縮強度の場合と同様、引張強度・曲げ強度も川砂利や他の砕石・砕砂を用いたコンクリートと同等かそれ以上であるといわれている^{3-5), 3-8), 3-9)}。

例を表 3-3 に示す。特に曲げ強度で、強度の増進が顕著である。また、引張強度の増進効果は、細骨

材よりも粗骨材のほうが高い。引張強度が大きくなるため、脆度係数(引張強度／圧縮強度)も、石灰石骨材を用いたコンクリートは他の骨材を用いたものより大きくなる傾向にある。

表 3-3 各種骨材を用いたコンクリートの引張強度および曲げ強度

骨材の種類		水セメント比 (%)	強度 (材齢 28 日) (kgf/cm ²)			脆度係数 (引/圧)
粗骨材	細骨材		圧縮強度	引張強度	曲げ強度	
石灰石	石灰岩	50	273	33.2	59.1	0.122
		55	241	27.5	56.2	0.114
		60	204	23.7	53.4	0.116
緑色片岩	緑色片岩	50	277	27.0	52.9	0.097
		55	234	23.2	49.5	0.099
		60	210	21.5	44.3	0.102
玄武岩	玄武岩	50	298	30.6	51.1	0.102
		55	236	24.0	47.3	0.102
		60	192	18.7	41.7	0.097
安山岩	安山岩	50	286	27.6	54.0	0.097
		55	242	25.2	51.7	0.104
		60	195	22.6	46.1	0.116
花崗岩	花崗岩	50	290	25.2	49.6	0.087
		55	243	22.9	47.2	0.094
		60	223	21.3	42.6	0.096
川砂利	川 砂	50	288	26.0	51.9	0.090
		55	235	23.7	47.5	0.101
		60	202	21.9	40.7	0.108

(引用：大和田，1984³⁻⁸⁾)

(3) 石灰石の品質とコンクリートの圧縮強度

石灰石の品質がコンクリートの強度に与える影響は、純度の影響は小さく、結晶粒度の影響が大きいといわれている。図 3-8 は、石灰石の純度と石灰石自身の強度の関係を示したものであり、図 3-9 は、結晶粒径の異なる石灰石を粗骨材に用いたコンクリートの各種強度を示したものである。

隠微晶質(結晶粒径 4μm 以下)石灰石を用いたものは、碎石、砂利を用いたものと同等以上の強度を示す。しかし、結晶質石灰石を粗骨材として用いたコンクリートは、圧縮強度、曲げ強度および引張強度とも小さい。また、骨材自身の品質もすりへり減量が大きく、JIS A 5005(コンクリート用碎石及び砕砂)の規格を満足しないこともある。

一方、結晶質石灰石を細骨材として用いる場合は、図 3-10 に示されるように隠微晶質のもと同等の強度を示す。

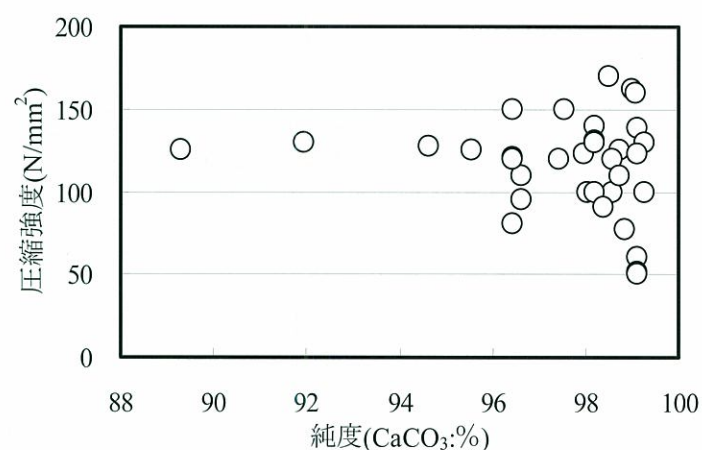
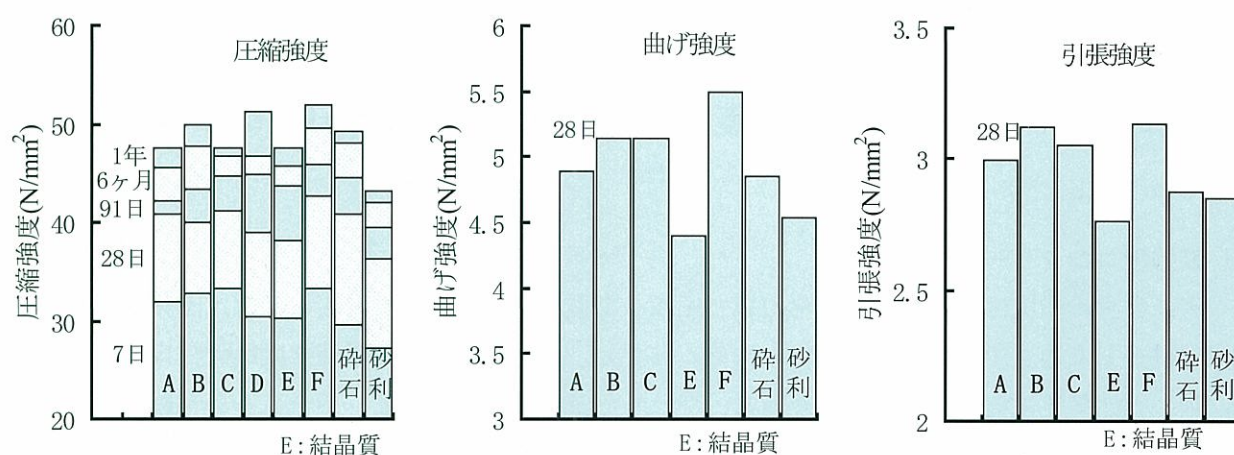


図 3-8 石灰石骨材の純度と圧縮強度の関係 (引用：中村, 2004³⁻¹⁰)



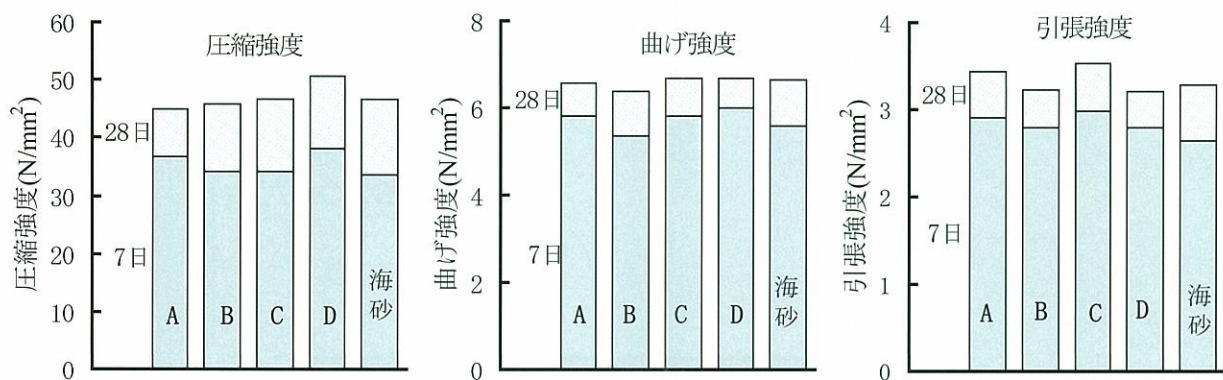
試験に用いた骨材の物理的性質

粗骨材の種類	結晶状況	最大寸法(mm)	粗粒率	表乾比重	吸水率(%)	単位容積質量(kg/ℓ)	実積率(%)	すりへり減量(%)	40 t 破碎値(%)
石灰石粗骨材	A	隱微晶質	25	6.76	2.70	0.31	1.70	63.2	21.4
	B	隱微晶質	25	6.97	2.70	0.52	1.63	60.7	21.6
	C	隱微晶質	20	6.48	2.70	0.55	1.65	61.4	21.4
	D	隱微晶質	25	6.87	2.70	0.44	1.67	62.1	16.8
	E	結晶質	25	6.54	2.70	0.40	1.70	65.1*	35.6
	F	隱微晶質	20	6.60	2.74	0.69	1.68	61.7	18.6
碎石	(山碎石)	20	6.68	2.66	0.62	1.63	61.7	16.5	10.9
砂利	(川砂利)	25	6.71	2.64	0.86	1.78	67.9	13.5	8.4

(注) *は JIS 規格に対し不合格

図 3-9 結晶粒度の異なる石灰石粗骨材を用いたコンクリートの各種強度

(引用：宮川, 1985³⁻¹¹)



試験に用いた細骨材の物理的性質

石灰石の種類	A	B	C	D	海砂
結晶粒径	結晶質	隠微晶質			—
粗粒率	2.53	2.74	2.71	2.64	2.32
表乾密度 (g/cm³)	2.67	2.61	2.65	2.64	2.58
吸水率 (%)	0.46	1.72	1.04	1.17	1.05
微粒分量 (%)	4.0	6.7	4.8	5.8	—

図 3-10 結晶粒径の異なる石灰石細骨材を用いたコンクリートの各種強度

(引用：株式会社宇部三菱セメント研究所内部資料³⁻¹²⁾)

(4) 高強度コンクリートへの適用性

石灰石自身の強度は、硬質砂岩や安山岩と比較して低い。このため、石灰石骨材は高強度コンクリート用骨材として適切でないとする報告もある。しかし、コンクリートの圧縮強度は骨材自体の強度よりも、むしろ、セメントペースト自体の強度、ペーストと骨材の付着強度、ペーストと骨材の弾性係数の違い等のほうが支配的であり、必ずしも骨材原石の圧縮強度とコンクリートの圧縮強度は対応しないともいわれている。

表 3-4 は、各種粗骨材を用いた高強度コンクリートの圧縮強度を表したものである。これによると、石灰石骨材は他の骨材に比べて破砕値は劣るが、コンクリート強度は同等以上の値を示している。また、W/C=33.2%の配合において、石灰石骨材使用のコンクリートは、材齢 91 日で 800kgf/cm²(80.0N/mm²)以上の強度を発現している。このことから、JIS A 5308-2003 で規定されている高強度コンクリート（呼び強度 50、55、60）であれば、石灰石骨材は他の砕石と同等に使用できることがわかる。

表 3-4 粗骨材の種類とコンクリートの圧縮強度

粗骨材 種 類	W/C (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)					
		1 日	7 日	28 日	91 日	182 日	365 日
川砂利	30.0	389	601	660	696	798	746
玉石砕石	32.4	396	636	710	779	806	819
硬質砂岩砕石	32.4	364	637	733	829	886	875
石 灰 石	33.2	361	630	729	816	868	888
川砂利	40.0	240	439	491	556	647	627
玉石砕石	41.3	262	462	559	631	673	709
硬質砂岩砕石	41.3	246	492	579	632	706	728
石 灰 石	41.3	264	474	548	674	712	718
川砂利	50.0	152	349	397	454	463	438
玉石砕石	52.5	140	337	375	487	496	474
硬質砂岩砕石	51.8	124	304	391	443	450	418
石 灰 石	51.3	174	368	453	537	547	523

試験に使用した粗骨材の物理的性質

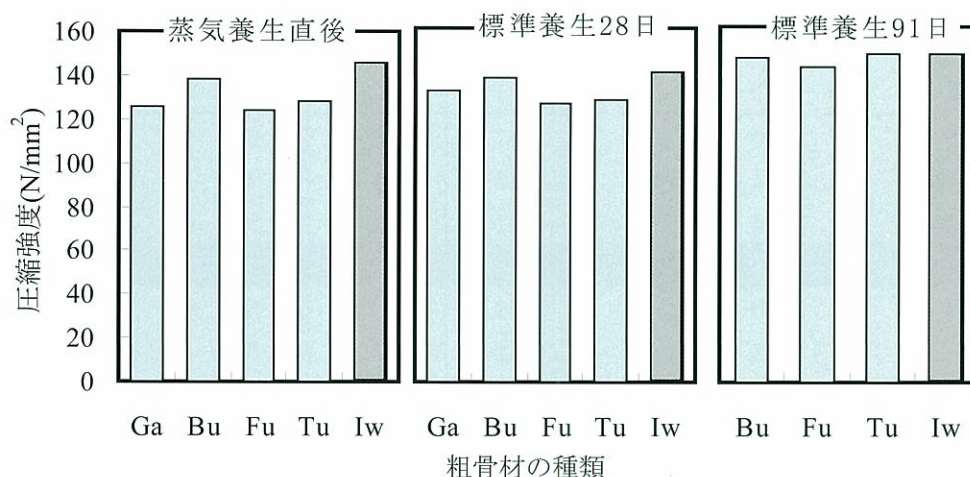
骨 材 種 類	産 地	骨材の 大きさ (mm)	比 重	吸水率 (%)	実積率 (%)	破 砕		
						40 t 破砕値 (%)	40 t 沈下量 (mm)	10%破砕値 (t)
川 砂 利	富 士 川	20	2.68	1.3	62.0	13.7	16.2	31.7
玉 石 砕 石	多 摩 川	20	2.63	1.1	58.3	13.7	22.4	31.0
硬質砂岩砕石	東 京 都	20	2.65	1.0	59.7	12.1	22.2	36.5
石 灰 石 骨 材	東 京 都	20	2.74	0.3	59.4	25.6	27.6	17.3

(引用：依田，1968³⁻¹³⁾)(5) 100N/mm²を超える超高強度コンクリートへの石灰石骨材の適用性

粗骨材に石灰石砕石を使用した水セメント比 16%の超高強度コンクリートの圧縮強度発現を図 3-11 に示す。硬質砂岩砕石を用いたものよりも若干低いものの、いずれの石灰石砕石を使用したコンクリートとも標準養生 28 日で 120N/mm² 以上、標準養生 91 日では 140N/mm² 以上の強度を発現している。

日本でコンクリート用砕石を生産している鉱山の石灰石強度の最小値は 90N/mm²、平均値は 120N/mm² である³⁻¹⁰⁾。試験で使用した石灰石砕石の圧縮強度は 100~125N/mm² であり、図 3-11 の結果は、一般的な強度の石灰石砕石を用いたデータであるといえる。このように、一般的な石灰石砕石が石灰石自身の圧縮強度を越える、120N/mm² クラス以上の超高強度コンクリートにも十分適用できることが示されている。

図 3-12 は、各種細骨材を用いた超高強度コンクリートの圧縮強度を示したものである。このように、細骨材に石灰石砕砂を使用しても、100N/mm² を超える超高強度コンクリートの製造が可能であることが示されている。



試験に用いた骨材の物理的性質

砕石記号	岩石岩種	母岩		CaO含有量 (%)	表乾密度 (g/cm³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粒形判定実積率 (%)	400kN 破砕値 (%)	引張強度 (N/mm²)
		圧縮強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)							
Ga	緻密質石灰石	124.5	9.9	54.9	2.70	0.60	59.0	59.5	23.1	14.8
Bu		120.6	8.3	54.5	2.71	0.34	61.0	60.3	23.0	9.3
Fu		103.0	—	52.6	2.69	0.71	61.6	62.7	21.1	10.1
Tu		122.6	7.8	55.2	2.70	0.48	60.9	59.7	22.3	9.2
Iw	硬質砂岩	216.4	—	—	2.64	0.82	60.5	60.6	10.2	20.5

図 3-1 石灰石粗骨材を使用した高強度コンクリートの圧縮強度

(引用：小島，2004³⁻¹⁴)

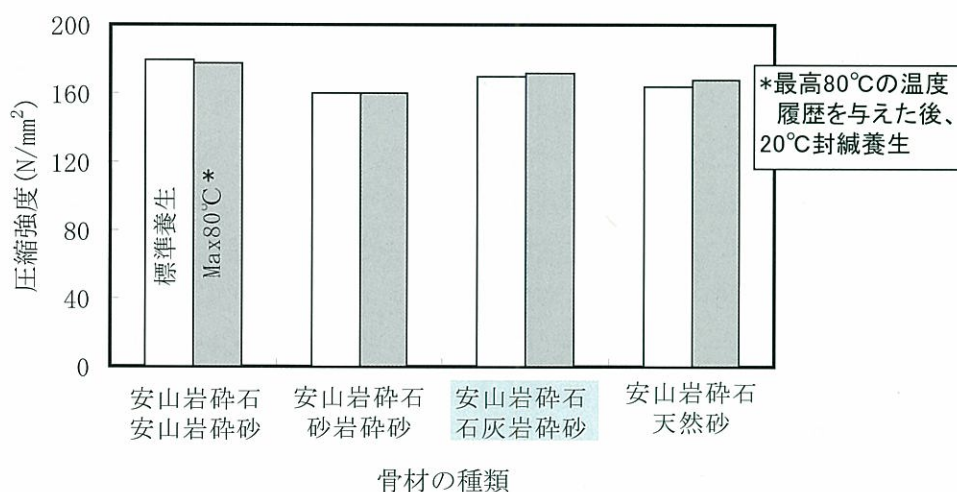
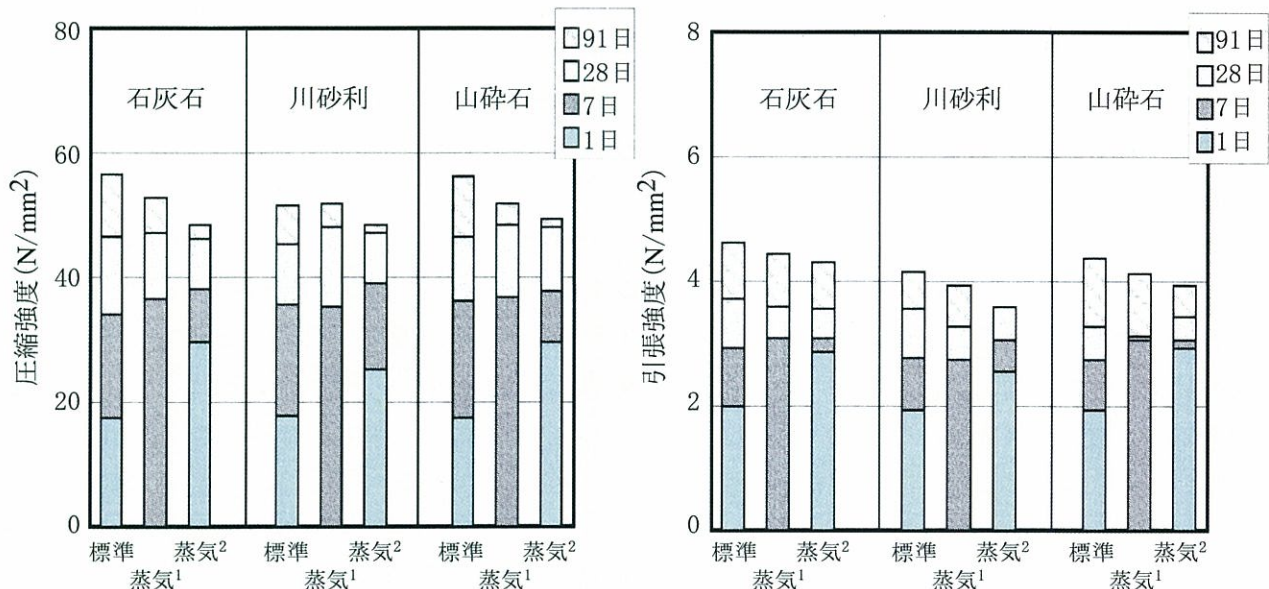


図 3-12 各種細骨材を使用した高強度コンクリートの圧縮強度

(引用：陣内，2003³⁻¹⁵)

(6) 蒸気養生した場合のコンクリート強度

図 3-13 は、蒸気養生したコンクリートの圧縮強度と引張強度の発現状況をそれぞれ示したものである。蒸気養生した場合でも、石灰石骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、川砂利や山砕石を使用したコンクリートと同等である。引張強度は、石灰石骨材を用いたコンクリートの方が他の骨材を用いたよりも若干高い傾向にある。また、図 3-11 に示したように、蒸気養生においても 100N/mm² 以上の高強度コンクリートを得ることができる。



蒸気養生方法：前養生 3h, 15°C/h で昇温 60°C 3h, 放冷 3h

蒸気 1：蒸気養生終了後、20°C 水中養生

蒸気 2：蒸気養生終了後、20°C 気中養生

図 3-13 各種骨材を用いたコンクリートの圧縮および引張強度³⁻¹⁶⁾

なお、オートクレーブ養生の場合、石灰石骨材は SiO_2 を多量に含む骨材(川砂、けい石)に比べて強度の発現に劣るという報告がある(表 3-5)。これは、 SiO_2 を多量に含む骨材では、セメント中の Ca 分と骨材中の SiO_2 が水熱反応して、トバモライトという水和物を生成するのに対し、石灰石骨材は、 SiO_2 を含まないため、この反応が期待できないためと考えられている³⁻¹⁷⁾。石灰石骨材を使用したコンクリートをオートクレーブ養生する場合、注意が必要である。

表 3-5 骨材の種類を変えたモルタルのオートクレーブ養生後のモルタル強さ

種類	化学成分(%)			モルタル フロー ー値 (mm)	水中 20℃養生 (kgf/cm ²)				オートクレーブ 養生 (kgf/cm ²)	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	CaO		7 日		28 日		曲げ	圧縮
					曲げ	圧縮	曲げ	圧縮		
川砂	70.7	18.1	2.1	173	86.2	546	93.4	766	141	869
けい石	95.5	2.8	0.1	130	82.3	534	97.7	714	137	836
石灰石	3.4	1.3	53.6	147	93.5	569	109	735	96.7	655

* W/C=40%

(引用：西, 1971³⁻¹⁷⁾)

3.2.2 乾燥収縮

一般に、石灰石骨材を用いたコンクリートは、他の骨材を用いたコンクリートに比べて乾燥収縮が小さいといわれている³⁻⁵⁾。

表 3-6 に示す比較試験の一例によると、安山岩碎石、硬質砂岩碎石、川砂利等を用いたコンクリートの乾燥収縮量は材齢 8 週で $6 \sim 11 \times 10^{-4}$ の範囲にあるのに対し、石灰石骨材を用いたコンクリートの場合は $3 \sim 7 \times 10^{-4}$ 程度と、約 4 割乾燥収縮が小さいことが示されている。

この理由として、

①セメントと石灰石との反応によって生成するカルシウム・カルボアルミネート ($C_3A \cdot mCaCO_3 \cdot nH_2O$) が、結晶水あるいは間隙水として水分を取り込むこと³⁻¹⁹⁾

②骨材界面に水和物が生成することで細孔量が少なくなり、水分の逸散が少なくなること³⁻⁵⁾

③通常の骨材が乾燥すると収縮するのに対し、石灰石骨材は乾燥膨張すること³⁻²⁰⁾

などが考えられている。

図 3-14 は、12 の種類・産地が異なる粗骨材を用いた同一配合のコンクリートの乾燥収縮率を示したものである。粗骨材に石灰石を用いたコンクリートの乾燥収縮は、他の岩種の粗骨材を用いたものよりも小さい。また、石灰石の産地が異なっても、コンクリートの乾燥収縮率にほとんど差がない。一方、硬質砂岩と安山岩は産地が異なるとコンクリートの乾燥収縮率が大きく異なる事が示されている。図 3-15 は、細骨材に石灰石砕砂を用いた場合のコンクリートの乾燥収縮を示している。このように、石灰石骨材を細骨材に用いても、乾燥収縮は低減されることが示されている。

表 3-6 コンクリートの乾燥収縮率および質量変化

粗骨材の種類	長さ変化率($\times 10^{-4}$)				質量変化率(%)				長さ変化率($\times 10^{-4}$)				質量変化率(%)			
	2 週	4 週	5 週	8 週	2 週	4 週	5 週	8 週	2 週	4 週	5 週	8 週	2 週	4 週	5 週	8 週
—	目標 : W/C=50%、スランプ 10cm								目標 : W/C=50%、スランプ 18cm							
安山岩	-2.8	-5.4	-6.5	-9.1	-2.9	-3.7	-4.1	-4.8	-2.4	-6.6	-8.2	-11.6	-3.3	-4.4	-4.6	-5.4
硬質砂岩	-1.6	-4.3	-5.5	-7.4	-2.1	-2.8	-3.1	-3.7	-2.1	-4.1	-4.6	-6.7	-2.6	-3.4	-3.6	-4.3
石灰石①	-1.1	-2.5	-3.2	-3.9	-1.3	-1.9	-2.2	-2.6	-2.1	-4.1	-4.6	-6.7	-2.2	-2.9	-3.1	-3.8
石灰石②	-1.3	-2.8	-3.6	-4.8	-1.6	-2.3	-2.5	-3.0	-1.9	-3.3	-4.0	-6.3	-2.0	-2.6	-2.8	-3.5
石灰石+けい石	-1.6	-4.4	-5.4	-6.6	-2.4	-3.0	-3.5	-4.0	-2.5	-4.7	-5.5	-8.3	-2.4	-3.4	-3.4	-4.1
玉石	-1.9	-3.9	-5.0	-7.4	-1.7	-2.5	-2.9	-3.3	-2.5	-5.1	-5.8	-8.5	-2.8	-3.4	-3.6	-4.1
川砂利	-1.9	-4.4	-5.4	-7.8	-2.0	-2.7	-3.1	-3.5	-3.0	-5.7	-6.6	-9.7	-2.3	-3.2	-3.4	-4.1
—	目標 : W/C=65%、スランプ 10cm								目標 : W/C=65%、スランプ 18cm							
安山岩	-2.7	-6.4	—	-8.4	-4.1	-5.1	—	-6.0	-3.2	-7.6	-8.5	-9.3	-4.6	-5.9	-6.0	-6.6
硬質砂岩	-1.7	-4.8	—	-7.0	-3.0	-4.0	—	-4.9	-2.3	-6.4	-6.9	-8.2	-3.5	-4.5	-4.7	-5.2
石灰石①	-0.8	-2.7	—	-4.4	-2.7	-3.5	—	-4.4	-2.0	-4.7	-5.1	-6.1	-2.8	-3.7	-3.9	-4.5
石灰石②	—	—	—	—	—	—	—	—	-1.8	-4.0	-4.5	-5.1	-2.7	-3.6	-3.7	-4.3
石灰石+けい石	-1.2	-3.5	—	-5.5	-2.8	-3.7	—	-4.5	-2.2	-5.4	-5.9	-6.4	-3.4	-4.4	-4.6	-5.0
玉石	-2.0	-4.9	—	-6.6	-3.2	-4.0	—	-4.8	-2.7	-6.7	-7.1	-8.2	-3.7	-4.8	-5.0	-5.5
川砂利	-2.1	-4.7	—	-7.0	-2.8	-3.6	—	-4.4	-2.8	-6.4	-6.9	-8.4	-3.3	-4.4	-4.5	-5.0

(注)材齢 1 週(水中より取り出した日)を基準とした。

(引用 : 岩井, 1967³⁻¹⁸⁾)

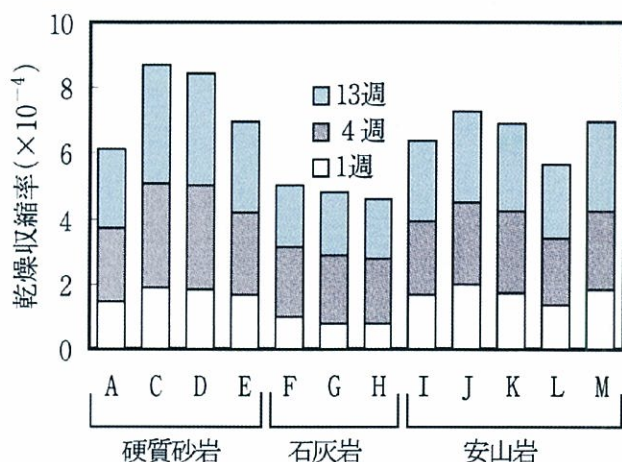


図 3-14 粗骨材の種類とコンクリートの乾燥収縮率

(引用：セメント協会耐久性専門委員会，
ひびわれ分科会報告 H-23, 1992³⁻¹⁹⁾)

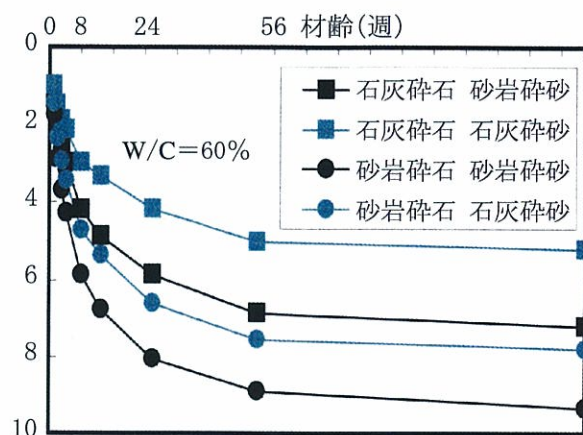


図 3-15 細骨材の種類とコンクリートの乾燥収縮率

(引用：セメント協会
コンクリート専門委員会報告 F-46, 1992³⁻⁵⁾)

3.2.3 自己収縮

自己収縮とは、「セメントの水和反応の進行によってコンクリート、モルタル及びセメントペーストの体積が減少し、収縮する現象」と定義され、特に水セメント比の小さい高強度コンクリートや高流動コンクリートにおいて問題となる現象である。

図 3-16 ならびに図 3-17 は、水セメント比 30%ならびに 16%のコンクリートの自己収縮ひずみをそれぞれ示したものである。

水セメント比 30%低熱ポルトランドセメントコンクリート(記号：L)の打込み 24 時間後の自己収縮は、骨材に石灰石碎石・砕砂(記号：◇)を用いたものは、砂岩碎石・山砂(記号：▲)を用いたものよりも、 100×10^{-6} 程度小さいことが示されている。また、水セメント比 16%の超高強度コンクリート配合においては、石灰石骨材を用いた場合は、硬質砂岩碎石を用いた場合の約 60%に自己収縮ひずみが低減されることが示されている。

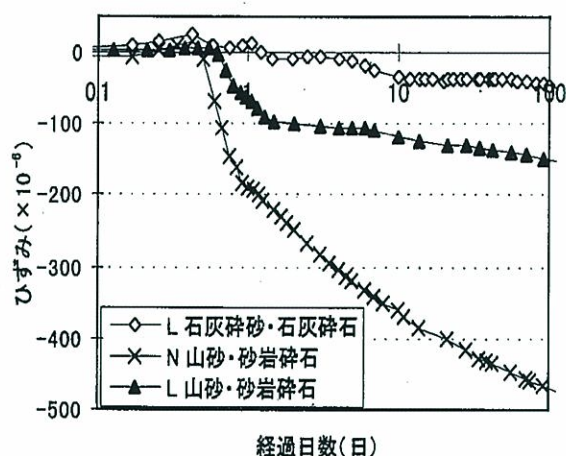


図 3-16 W/C=30%の自己収縮試験結果

(引用：城国, 1999³⁻²¹⁾)

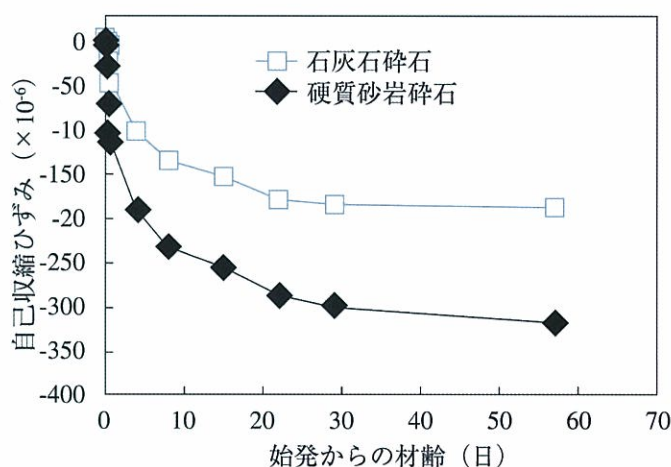


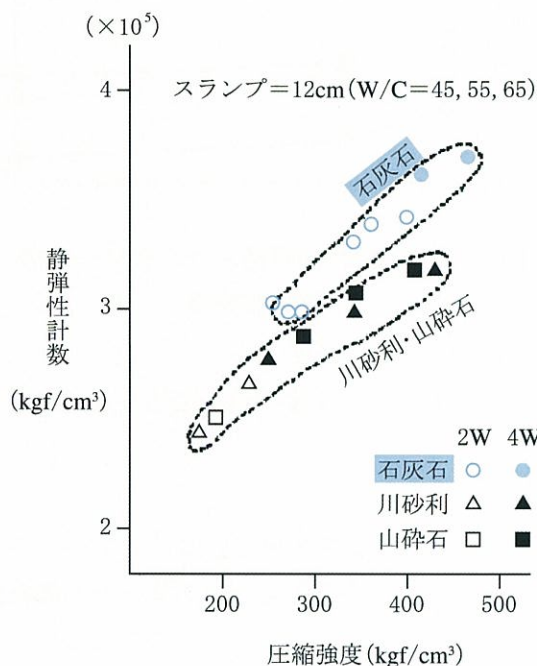
図 3-17 W/C=16%の自己収縮試験結果

(引用：小島, 2004³⁻¹⁴⁾)

3.2.4 弾性係数ならびにクリープ

(1) 静弾性係数・動弾性係数

図 3-18 ならびに図 3-19 に示すように、同一強度で比較した場合、石灰石骨材を用いたコンクリートの静弾性係数は他の骨材を用いたものよりも大きい。動弾性係数も静弾性係数の場合と同じく石灰石骨材を用いたものの方が大きい。



W/C=45, 55, 65%, スランプ 12cm

図 3-18 静弾性係数と圧縮強度の関係
(引用：大塩, 1987³⁻⁹)

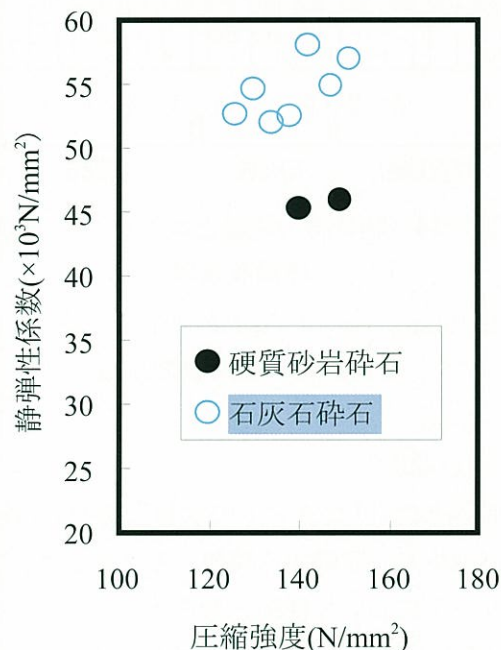


図 3-19 超高強度域における静弾性係数と
圧縮強度の関係(引用：小島, 2004³⁻¹⁴)

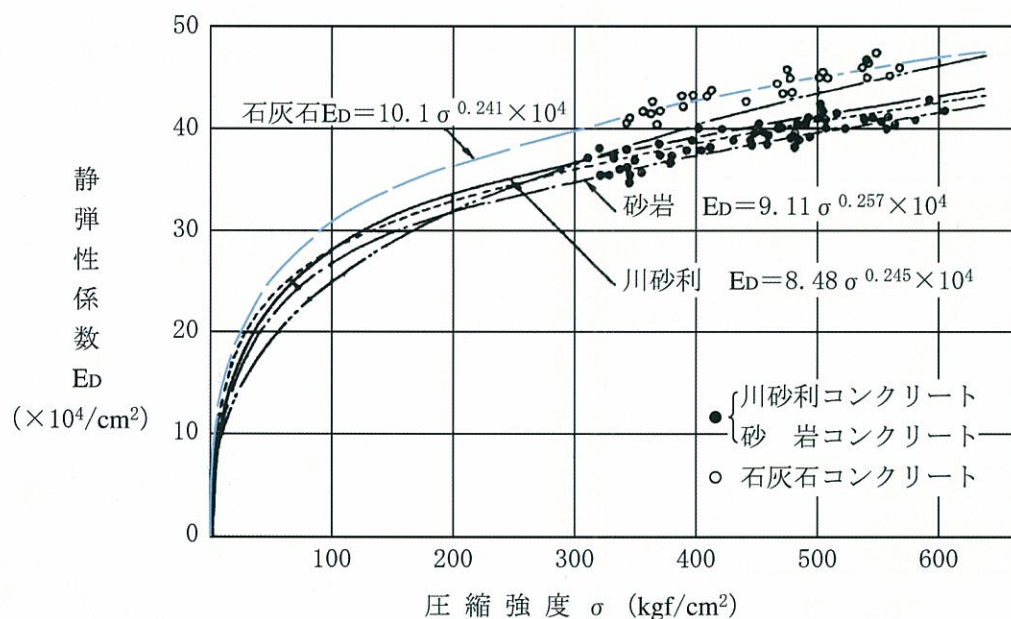


図 3-20 圧縮強度と動弾性係数の関係
(引用：荒木, 1969³⁻²²)

(2) クリープ

各種骨材を用いたコンクリートの、載荷 140 日におけるクリープ係数を表 3-7 に示す。他の骨材に比べ、石灰石骨材を使用したコンクリートは、クリープ係数が小さいことがわかる。図 3-21 は、圧縮クリープの経時変化を示したものである。石灰石骨材を使用したコンクリートは、硬砂岩系砕石を用いたコンクリートに比べて、圧縮クリープひずみならびにクリープ係数が 3/4 程度になることが示されている。

表 3-7 各種骨材を用いたコンクリートの材齢 140 日のクリープ係数

骨材の種類		水セメント比 (%)	材齢 28 日 圧縮強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 (×10 ³ kgf/cm ²)	材齢 200 日の乾燥収縮ひずみ (×10 ⁻⁶)	材齢 140 日のクリープ係数
粗骨材	細骨材					
石灰石	石灰岩	55	241	3.42	263	0.37
玄武岩	玄武岩	55	236	2.81	822	0.59
安山岩	安山岩	55	242	2.91	827	0.54
花崗岩	花崗岩	55	243	2.10	878	0.49
川砂利	川 砂	55	235	2.56	849	0.63

(引用：大和，1984³⁻⁸)

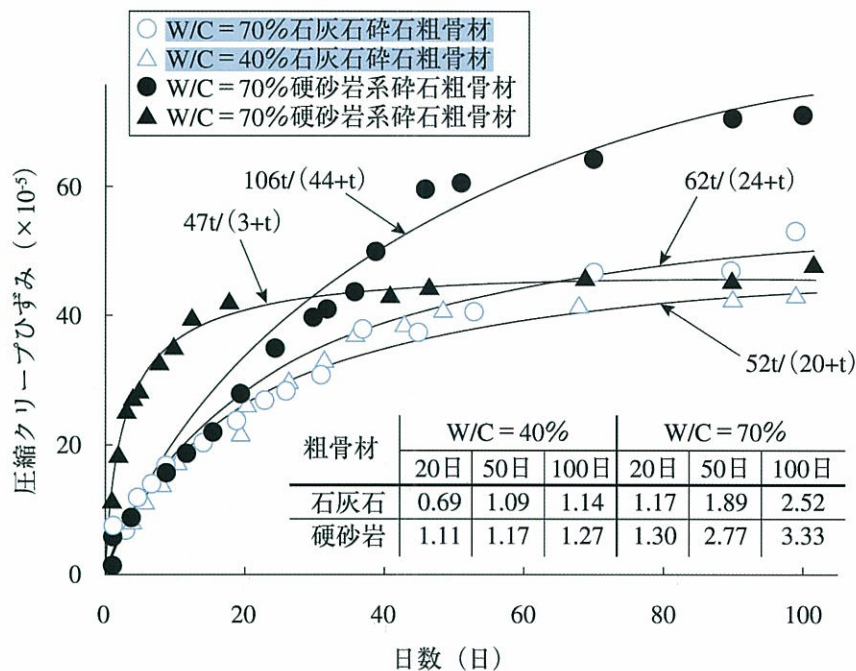


図 3-21 各種粗骨材を用いたコンクリートの圧縮クリープの経時変化

(引用：庄谷，1990³⁻²³)

3.2.5 熱的性質

材料の熱的性質を表すものとして、熱膨張係数、熱伝導率、熱拡散率および比熱などがある。これらはセメントの水和発熱による温度応力解析やコンクリートの耐火性を検討する際に重要となる。

2002 年版土木学会コンクリート標準示方書（施工編） 4.3.2 熱物性の設計値の解説では、一般的なコンクリート熱伝導率は 2.6～2.8 W/m℃、熱拡散率は 0.83～1.1×10⁻⁶m²/s、比熱を 1.05～1.26kJ/kg℃程度と記載しており、骨材の種別により特に区別していない。しかし、詳細に見ると骨材により、それ

らの値は若干異なる。表 3-8 に各種骨材を用いたコンクリートの常温(100℃以下)における熱的性質を示す。石灰石骨材を用いたコンクリートは他の骨材のものに比較し熱線膨張係数が小さく³⁻²⁴⁾、熱伝導率が高い³⁻⁸⁾。

表 3-8 各種骨材を用いたコンクリートの熱的定数の測定例

骨材の種類		W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		材齢 91 日における熱特性			
粗骨材	細骨材		水	セメント	熱膨張係数 (x10 ⁻⁶ /°C)	熱伝導率 (W/m°C)*1	熱拡散率 (x10 ⁻⁶ m ² /s)*2	比熱 (kJ/kg°C)*3
石灰石	石灰石	55	156	284	5.87	3.12 (2.68)	0.861 (310)	1.5 (0.35)
石灰石	海砂		153	278	8.17	3.23 (2.78)	0.886 (319)	1.6 (0.38)
緑色片岩	緑色片岩		177	322	8.54	2.52 (2.15)	0.731 (263)	1.5 (0.36)
玄武岩	玄武岩		161	293	6.54	2.17 (1.85)	0.519 (185)	1.8 (0.42)
安山岩	安山岩		165	300	6.95	2.31 (1.99)	0.589 (212)	1.7 (0.40)
花崗岩	花崗岩		174	316	8.77	3.08 (2.65)	0.750 (270)	1.8 (0.44)
川砂利	川 砂		153	278	10.04	2.88 (2.48)	0.942 (339)	1.3 (0.32)

*1 括弧内の数字は、単位を(kcal/mh°C)とした場合の値

(引用：大和，1984³⁻⁸⁾)

*2 括弧内の数字は、単位を(x10⁻⁵m²/h)とした場合の値

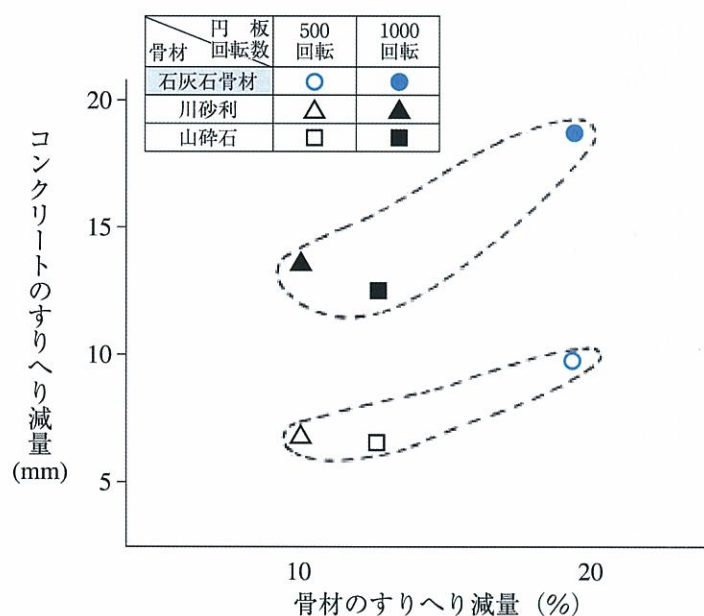
*3 括弧内の数字は、単位を(kcal/kg°C)とした場合の値

3.3 硬化コンクリートの耐久性

3.3.1 すりへり抵抗性(耐摩耗性)

石灰石は、主として硬度のやや低い「方解石」の集合体であるため、骨材自身のすりへり抵抗性が比較的低い。そのため、石灰石骨材を用いたコンクリートのすりへり抵抗性も他の骨材を用いたものに比べてやや劣る。したがって、自動車交通量の多い道路など摩耗性の激しい場所での石灰石骨材の使用はできるだけ避けた方がよいといわれている。

一方、石灰石骨材を用いたコンクリートと他の骨材を用いたものですりへり抵抗性に差がないとの報告³⁻²⁴⁾もある。



試験に用いた粗骨材の物理的性質

骨材の種類	石灰石骨材	山砕石	川砂利
産地	岩手県	茨城県	富士川
最大寸法(mm)	20	20	20
粗粒率	6.47	6.49	6.69
表乾比重	2.7	2.65	2.64
吸水率(%)	0.41	0.76	1.01
単位容積重量(kg/l)	1.64	1.56	1.67
実積率(%)	61	59.3	64
すりへり減量(%)	19.6	12.8	10.2
安定性損失量(%)	1.2	3.8	7.5
40 t 破砕率(%)	19.8	11.7	6.2
洗い損失(%)	1.4	1	0.5

図 3-22 骨材のすりへり減量とコンクリートのすりへり減量の関係

(引用：大塩，1987³⁻⁹⁾)

3.3.2 凍結融解抵抗性

石灰石骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性は高いとする報告が多い。その理由は、石灰石骨材を使用したコンクリートでは、骨材—ペースト間界面の組織が緻密になり付着力が向上するためと考えられている。

(1) 普通コンクリート（水セメント比 50%）

図 3-23、図 3-24 は、石灰石骨材を用いた普通コンクリート（水セメント比 50%）の凍結融解抵抗性試験の結果を示したものである。凍結融解 300 サイクル試験後の相対動弾性係数が 80～90%以上、あるいは耐久性指数が 80 以上あり、石灰石骨材を用いたものは、他岩種の骨材を用いたものに比べて凍結融解抵抗性に遜色がない。

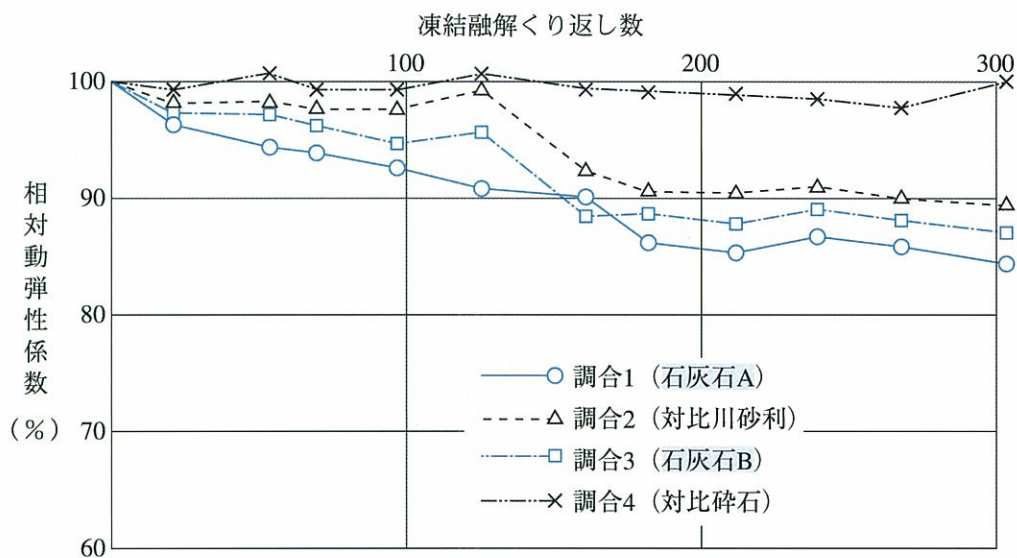
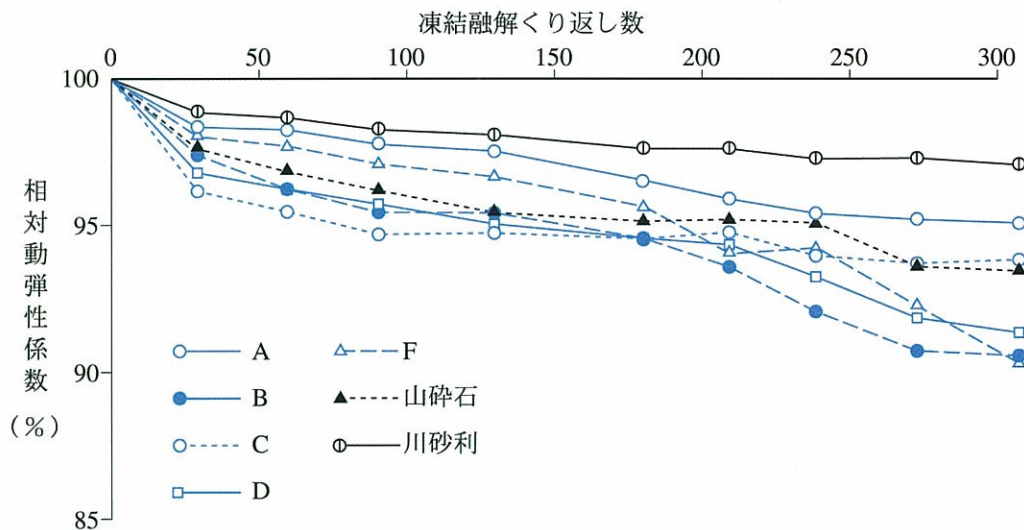


図 3-23 凍結融解試験における相対動弾性係数の変化

(引用：武本，1987³⁻²⁴⁾)



(注) 1. 粗骨材-A.B.C.D+隠微晶質石灰石 F:隠微晶質ドロマイト質石灰石 山碎石+硬質砂岩。
2. 細骨材-山砂。
3. スランプ8cm. W/C50%. 空気量4.5%

図 3-24 凍結融解試験結果

(引用：宮川，1985³⁻¹¹⁾)

(2) 高強度コンクリート（水セメント比 35%）

図 3-25 は、石灰石骨材を用いた高強度・高流動コンクリート（水セメント比 35%）の凍結融解抵抗性試験結果を示したものである。普通強度の場合、石灰石骨材と他の骨材の凍結融解抵抗性が同程度であるのに対し、高強度の場合、石灰石骨材を用いたものの凍結融解抵抗性が、砂岩碎石を用いたものに対し明らかに優れていることが示されている。

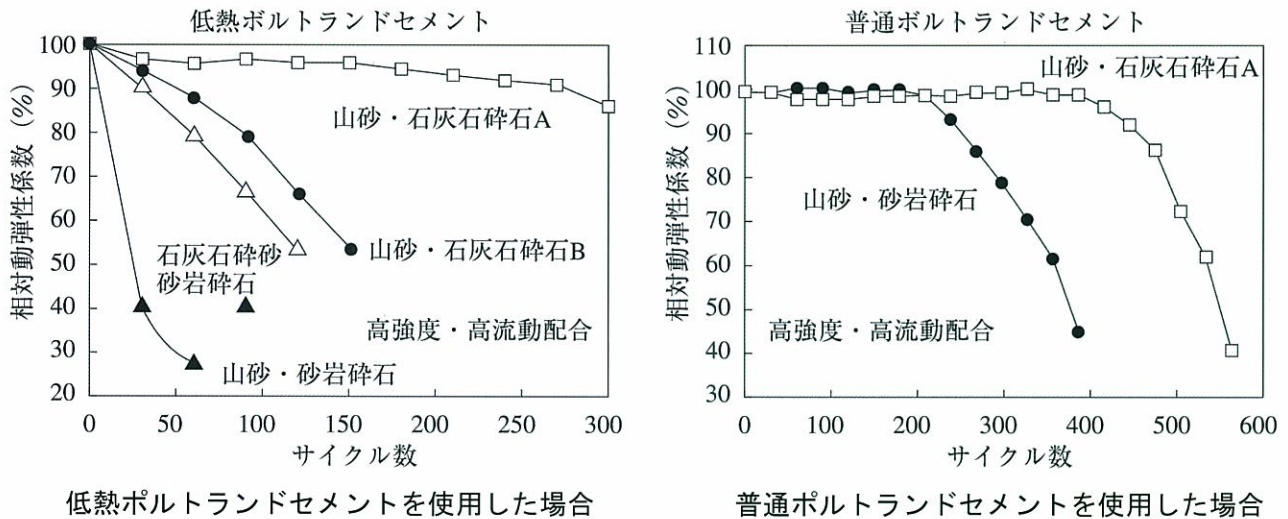


図 3-25 凍結融解試験結果

(引用：城国，1999³⁻²¹⁾)

(3) 蒸気養生したコンクリート（コンクリート製品）

図 3-26 は、蒸気養生を行ったコンクリートのスケーリング試験結果を示したものである。粗骨材に硬質砂岩・輝緑岩を使用した場合よりも、石灰石骨材を使用した場合のスケーリング量のほうが小さく、石灰石骨材を使用したコンクリートのスケーリングに対する抵抗性は高いことが示されている。

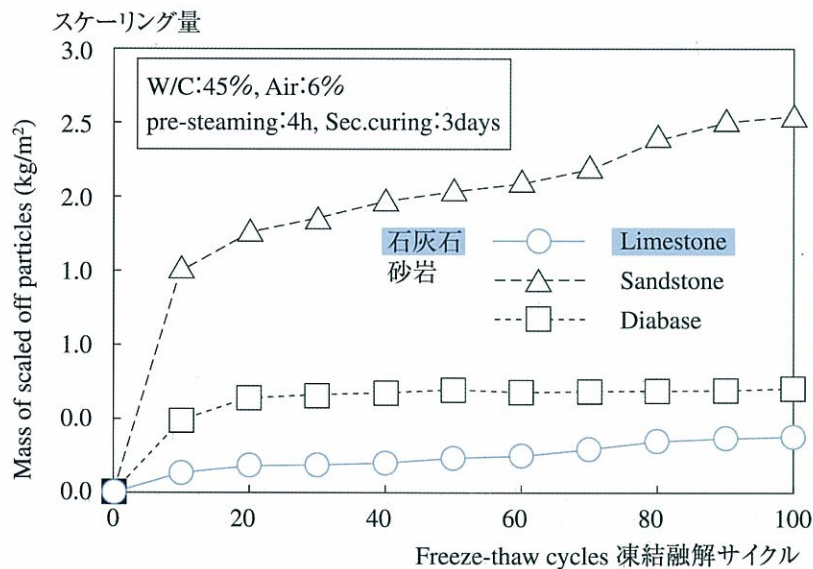


図 3-26 蒸気養生を行ったコンクリートのスケーリング試験結果

(引用：庄谷，1998³⁻²⁶⁾)

3.3.3 中性化抵抗性

図 3-27、図 3-28 は、石灰石 3 種類と砂岩を用いたコンクリートの中性化抵抗性を比較した試験結果を示したものである。これによれば、石灰石碎石を粗骨材に使用したコンクリートの中性化深さは、砂岩碎石を使用したコンクリートの中性化深さに対し、その差は±1mm の範囲内であり、ほぼ同等である。また、石灰石砕砂を細骨材に用いた場合と砂岩砕砂を細骨材に使用した場合の間に差は認められていない。なお、このセメント協会における研究では、石灰石骨材に付着している石粉(微粒分)量がコンクリートの中性化抵抗性に与える影響の検討も行われ、石粉量が 0~4% の範囲において中性化抵抗性への影響はないと結論づけている。

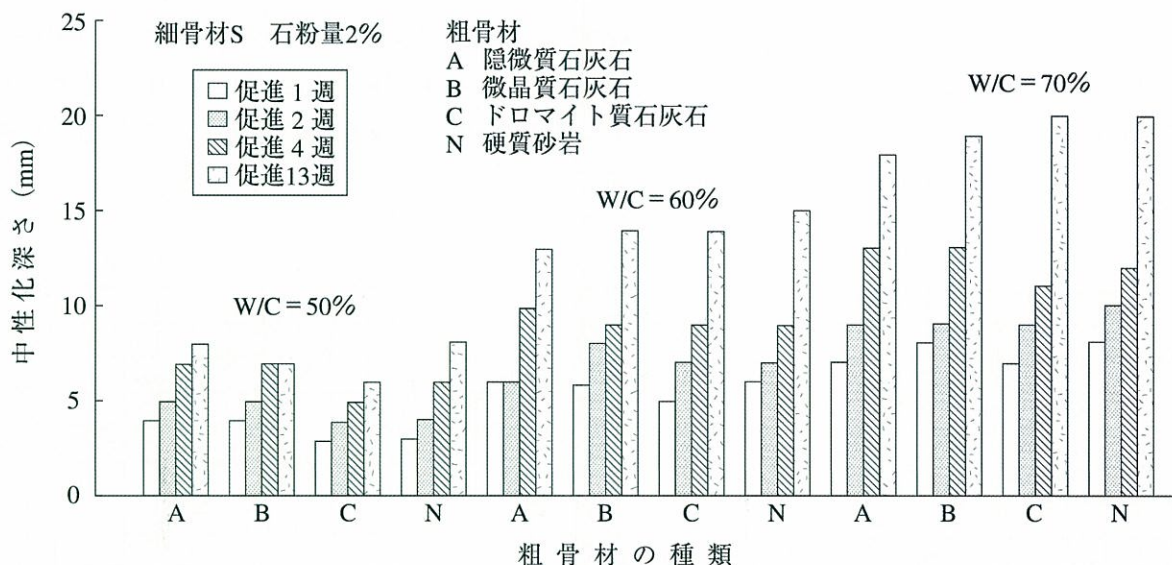


図 3-27 粗骨材の種類とコンクリートの中性化深さとの関係（促進試験：CO₂ 濃度 10%）

（引用：セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-46, 1992³⁻⁵）

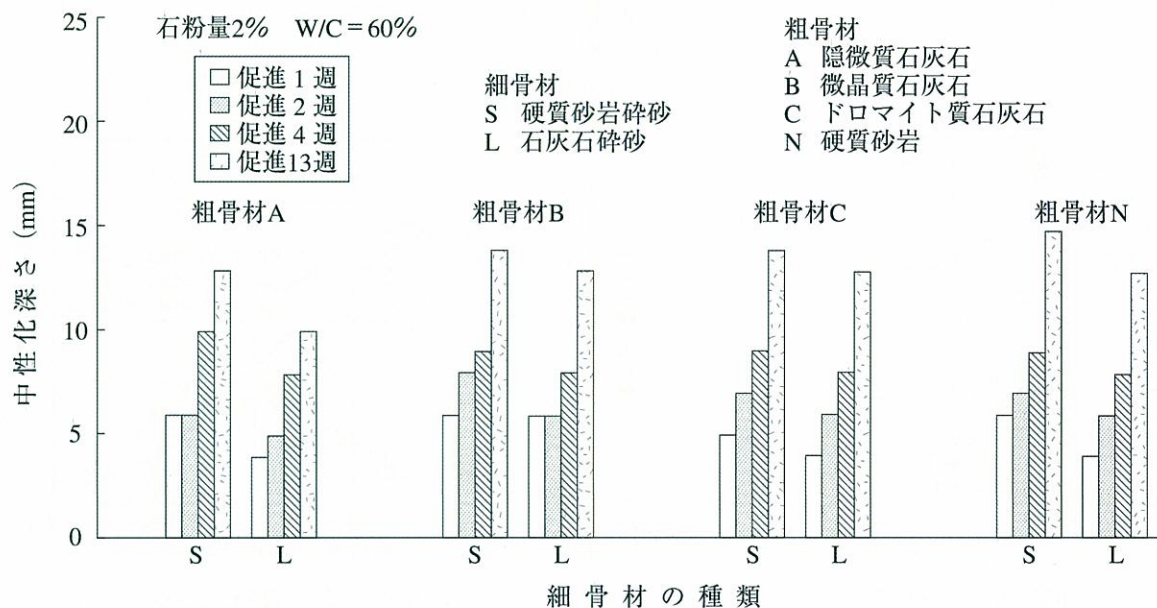


図 3-28 細骨材の種類とコンクリートの中性化深さとの関係（促進試験：CO₂ 濃度 10%）

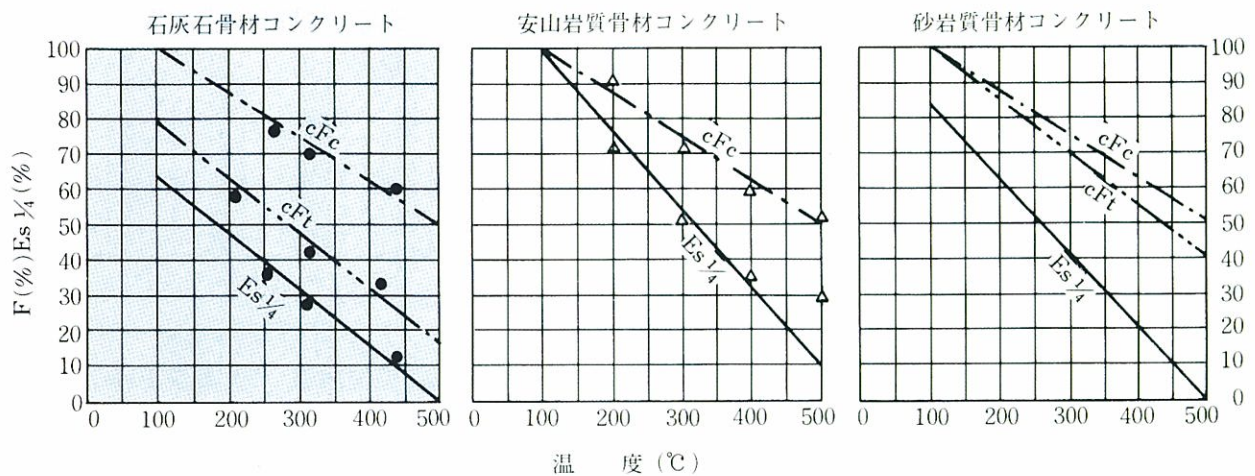
（引用：セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-46, 1992³⁻⁵）

3.3.4 耐火性・耐熱性

一般に、耐火性とはコンクリートの火熱に対する抵抗性のことで、火災に代表される 1,000℃程度の温度環境に比較的短時間さらされた場合の強度変化等の特性を示し、耐熱性はそれよりは低い温度環境（製鉄所の溶鉱炉マット部、煙突、原子力発電所の原子炉格納容器など）に長時間さらされた場合、あるいは繰り返しの熱作用を受けた場合の強度変化等の特性を示す。

(1) 加熱によるコンクリートの変化

一般に、500℃程度までのコンクリートの残存強度および弾性係数の低下は、ペースト部分の熱による変状が主な原因であり、骨材岩種による差は小さいものといわれている。500℃以上では、骨材の熱による変状が生じる。砂岩質骨材や花崗岩に含まれている石英は、573℃において α 石英から β 石英に変態して急激に膨張する。また、750～800℃で石灰石は主成分である炭酸カルシウム (CaCO_3) が加熱分解する。コンクリートが加熱されることによる強度低下は、細・粗骨材の組み合わせその他の影響があり一様ではないが、石灰石骨材を用いたコンクリートの耐火性(加熱による強度低下)は、珪岩質骨材を用いたコンクリートよりも良好であるとの報告もある。



(注) cFc: 圧縮強度, cFt: 引張強度, $Es \frac{1}{4}$: 弾性係数。

図 3-29 加熱されたコンクリートの残存強度 (F) と弾性係数 (E)

(引用: 原田, 1960³⁻²⁷)

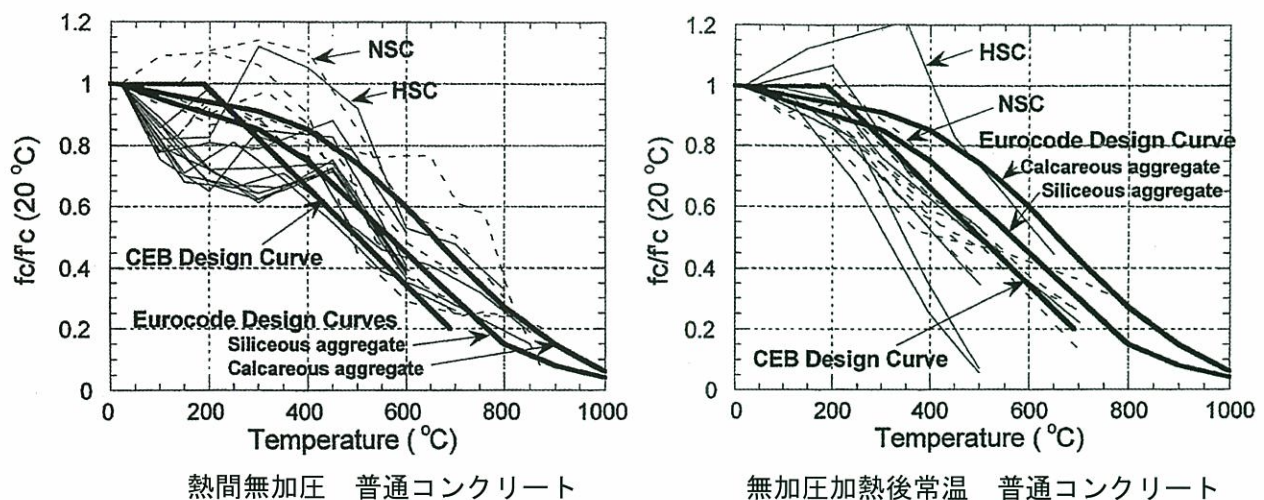
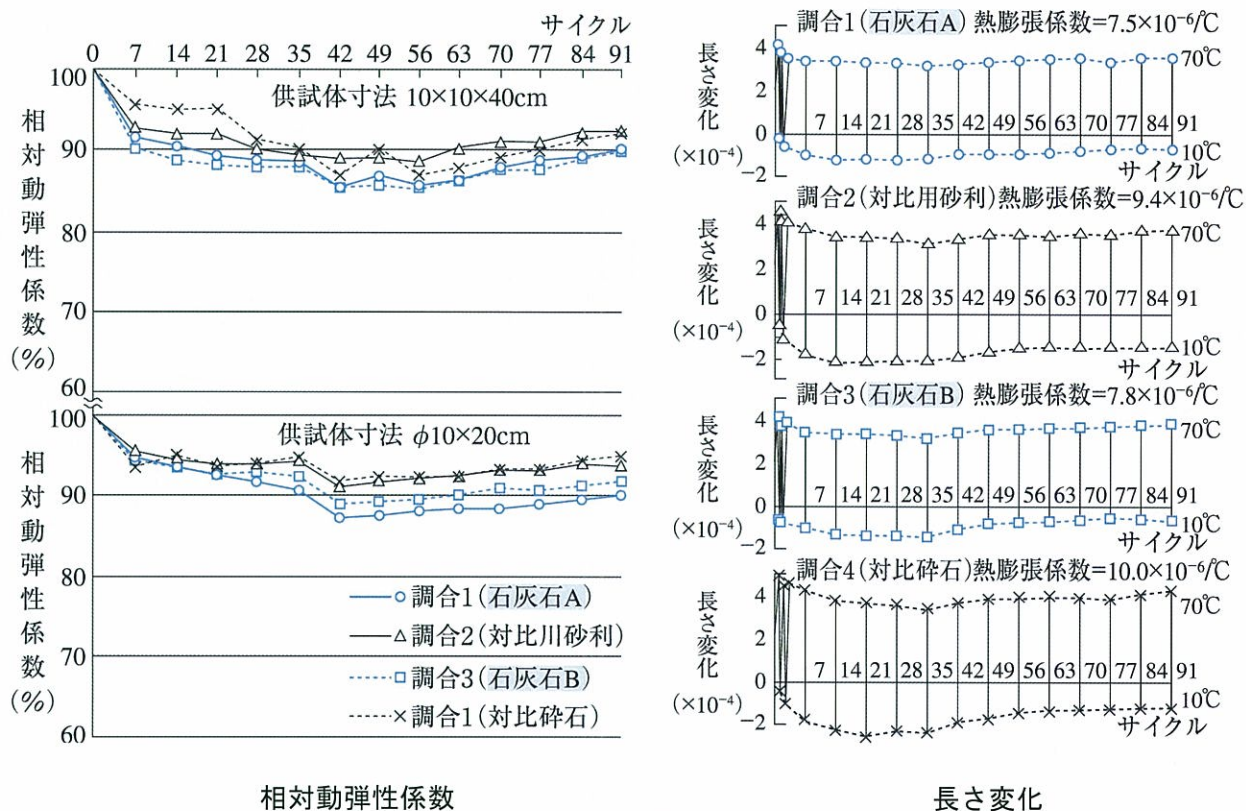


図 3-30 圧縮強度残存率と温度の関係

(引用: L.T. Phan, 1996³⁻²⁸)

(2) 熱サイクルを受けたコンクリートの性状

10～70℃の繰り返し熱サイクル（1サイクル/日）を91サイクル受けた場合、図3-31に示すように石灰石骨材を用いたコンクリートと川砂利や山砕石を用いたコンクリートの間に、強度、長さ変化および相対動弾性係数の変化に差は認められていない。



相対動弾性係数

長さ変化

圧縮強度

調合		標準養生 (kgf/cm ²)			熱サイクル試験 (kgf/cm ²)		
No	粗骨材の種類	7 日	28 日	終了時	開始時 ¹⁾	終了時 ²⁾	比較 ³⁾
1	石灰石 A	323	449	479	488	468	523
2	対比川砂利	286	439	486	461	477	544
3	石灰石 B	279	415	468	401	408	475
4	対比砕石	252	414	490	435	459	523

- (注) 1) 熱サイクル試験は28日標準養生相当後開始した。
 2) 熱サイクル試験は91サイクル（材令3ヶ月）で終了した。
 3) 熱サイクルなしの終了時。

コンクリートの配合

調合 No.	粗骨材の種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位 (kg/m ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
1	石灰石 A	12±2	4.5±1	50	47	175	350	808	957	0.875
2	対比川砂利				42	167	334	736	1,033	0.835
3	石灰石 B				44	180	360	768	1,033	0.900
4	対比砕石				44	180	360	768	981	0.900

図3-31 熱サイクル（10～70℃）を受けたコンクリートの性状

（引用：武本，1988³⁻²⁴）

表 3-9 に示されるように、石灰石骨材を用いたコンクリートは川砂利や山砕石を用いたコンクリートに比べて、温冷繰り返し 55℃（温水）1.5 時間、20℃（冷水）1.5 時間の短時間加熱冷却の繰り返しおよび 55℃（温水）7.0 時間、20℃（冷水）17.0 時間の長時間加熱冷却の繰り返しに対し良好な耐久性を有している。これは、石灰石骨材を用いたコンクリートの場合、熱膨張係数が小さく、強度が比較的大きいために熱衝撃に対する抵抗度（熱応力抵抗係 $R = St(1 - \mu)/E\alpha$ 、 St ：引張強度、 μ ：ポアソン比、 E ：弾性係数、 α 熱膨張係数）が大きいためである。

表 3-9 加熱冷却（55～20℃）繰り返しに対する各種コンクリートの耐久性

サイクル種類	コンクリート種別	粗骨材とモルタル部分の熱膨張係数の差 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	コンクリートの熱膨張係数 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	試験開始時の諸データ				試験終了時の諸データ					
				動弾性係数 $\times 10^6$ kgf/cm^2	曲げ強さ kgf/cm^2	熱応力抵抗係数 $^{\circ}\text{C}$	石灰石を 100 とした場合 %	サイクル数	動弾性係数 $\times 10^6$ kgf/cm^2	動弾性係数低下率 $\pm\%$	曲げ強さ kgf/cm^2	曲げ強さ低下率 $\pm\%$	残留伸び率 $\times 10^{-2}\%$
短時間加熱冷却の場合	普通[20-250]	2.2	(8.9)	0.39	53.3	11.1	59.1	34	0.39	0	38.7	-27.4	2.04
	普通[20-300]	2.5	9.0	0.43	50.4	10.4	55.4	60	0.41	-4.4	33.9	-32.6	4.09
	普通[20-350]	2.6	(9.0)	0.44	61.5	12.4	66.0	34	0.42	-4.5	39.6	-35.6	1.62
	石灰石[25-300]	4.3	5.9	0.45	62.4	18.8	100.0	30	0.45	0	56.7	-9.0	0.56
	白雲石灰石[20-300]	3.0	9.1	0.45	66.6	13.0	69.2	30	0.45	0	60.9	-8.7	0.74
	石灰石-川砂利[25-250]	6.4	7.3	0.43	53.0	13.5	71.8	30	0.41	-4.6	44.4	-11.2	0.35
	石灰石-川砂利[25-300]	6.6	7.5	0.44	(55)	(13.8)	73.5	30	0.43	-2.2	48.3	-15.2	0.24
	石灰石-川砂利[25-350]	6.8	7.0	0.48	63.0	15.0	79.8	30	0.47	-2.0	65.1	+3.3	0.68
	重晶石[20-300]	1.6	15.0	0.39	(32)	(4.4)	23.5	30	0.16	-59.5	0	-100.0	18.9
	石灰石-重晶石[25-300]	12.3	12.8	0.45	43.4	6.0	31.9	30	0.20	-55.5	11.7	-74.8	15.3
	重晶石-石灰石[20-300]	8.5	13.1	0.41	44.4	6.6	35.1	30	0.23	-43.9	14.1	-68.2	6.82

注) コンクリート種別の[]内は[骨材の最大寸法-単位セメント量]、()内は推定値

(引用：本間，1959³⁻²⁹⁾)

3.3.5 耐硫酸塩性（ソーマサイト生成に伴う劣化）

コンクリートの硫酸塩による劣化は、二水セッコウ、エトリンガイトの生成が主原因であると考えられていた。しかしながら 1960 年代以降ヨーロッパ各国を中心に、ソーマサイトの生成に伴う劣化（以下、TSA：Thaumasite form of Sulfate Attack）について多数報告され、TSA も広く認識されることとなった。

TSA とは、硫酸塩を含む環境における SO_4^{2-} 侵入により、セメントペーストの一部もしくは大部分がソーマサイトに変化し組織が軟化する現象である。ソーマサイト生成には、ケイ酸カルシウム水和物（硬化セメントペーストの大部分を占める水和物）、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 H_2O の化学成分の存在と低温環境（5℃付近で、ソーマサイト生成が最も活性化する）が必要である。そのうち CO_3^{2-} は、主に骨材もしくはフィラーから供給されると考えられている。

石灰石骨材を使用したコンクリートの TSA 発生事例としては、1998 年、イギリス南西部の高速道路の橋脚（粗骨材にドロマイト、細骨材に石灰石を使用）において、地中部分に大規模な劣化が見つかった

ものが有名である。

TSA の対策として、コンクリートの水密性の向上、フライアッシュや高炉スラグなどの混和材の使用が挙げられるが、硫酸塩を含む環境においては基本的に炭酸塩骨材および石灰石微粉末の使用は制限する方が良いとする報告³⁻³⁰⁾もある。なお、現時点で日本における TSA の事例は報告されていない。

3.3.6 耐薬品性・耐水性

石灰石を構成する炭酸カルシウムは、純水に対する溶解度が 1.43mg/100cc (25℃) であり、通常的环境下では事実上ほとんど溶解しない³⁻³¹⁾。しかしながら、炭酸カルシウムは酸に弱いため、温泉水や酸性雨、硫酸塩含有地下水の影響のある地域では、骨材が化学的に腐食されることがある。このような状況下での石灰石骨材の使用に対しては、規制する規定（コンクリートマニュアル、日本道路公団温泉腐食対策指針³⁻³²⁾）と、これとは逆に、下水管路のように微生物の働きにより、硫化水素などの腐食性ガスや硫酸の発生する環境では、石灰石骨材を使用しコンクリートの全アルカリ度を高めることで、耐用年数を延長しようとするよう奨励する規定（下水道施設の臭気と腐食対策、財団法人下水道業務管理センター³⁻³³⁾）がある。

一般の中性ないしは、弱アルカリ性の淡水中では、石灰石は十分安定であり、耐水性に問題は無く、骨材としての耐久性が期待できる。使用実績をあげれば、石灰石骨材を使用したダム为例として、新川ダム、安波ダム（沖縄県）、青江ダム（長崎県）、高瀬川ダム（岡山県）、鏡ダム（高知県）、網取ダム（岩手県）などがある³⁻³⁴⁾。

【参考文献】

- 3-1) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕平成 11 年
- 3-2) 我妻佳幸ほか：石灰石碎石を用いたコンクリートの長期強度、土木学会第 46 回年次学術講演会概要集 V(H3.9), V-275, 1991, pp. 566-567
- 3-3) 高山俊一：高流動コンクリートの流動性と骨材の実積率、土木学会第 55 回年次学術講演会概要集 V(H12.9), V-96, 2000, pp. 192-193
- 3-4) 松藤泰典ほか：中流動コンクリートの製造に関する基礎的研究(その 4)、石灰石骨材を用いた中流動コンクリート製造に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999. 9, pp. 391~392
- 3-5) (社)セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-46、石灰石骨材コンクリートの研究, 1992. 10
- 3-6) 大橋正治ほか：碎石粉の品質評価試験方法ならびに品質基準に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, 1995, pp. 393-398
- 3-7) 小林正几ほか：芳香族系減水剤を用いたコンクリートの強度特性について、セメント技術年報 No. 28, 1974, pp. 260-263
- 3-8) 大和竹史ほか：各種の砕砂および碎石を用いたコンクリートの諸特性、セメント技術年報 No. 38, 1984, pp. 277-280
- 3-9) 大塩明ほか：石灰石骨材を用いたコンクリートの基礎的諸物性、セメント技術年報 No. 41, 1987, pp. 106-109
- 3-10) 中村秀三：コンクリート用骨材としての石灰石、石灰石(330), 2004. 7, pp. 51-56
- 3-11) 宮川秀和ほか：結晶粒径の異なる石灰石を用いたコンクリートの物性、セメント技術年報 No. 39, 1985, pp. 73-76
- 3-12) 株式会社宇部三菱セメント研究所内部資料

- 3-13) 依田彰彦ほか：高強度コンクリートに関する一実験、セメント技術年報 No. 22, 1968, pp. 292-296
- 3-14) 小島明ほか：石灰石砕石を用いたコンクリートの強度特性、コンクリート工学年次論文集 Vol. 26, No. 1, 2004, pp. 93-98
- 3-15) 陣内浩ほか：実用化を迎えた〔設計基準強度〕150N/mm²級超高強度コンクリートの性能、セメント・コンクリート, No. 678, 2003. 8, pp. 10-16
- 3-16) 高島三郎ほか：蒸気養生した石灰石コンクリートの強度、セメント技術年報 No. 22, 1968, pp. 315-319
- 3-17) 西晴也ほか：オートクレーブ養生したコンクリートの諸試験、セメント技術年報 No. 25, 1971, pp. 237-241
- 3-18) 岩井達ほか：砕石コンクリートの強度・収縮について(主として石灰岩質骨材について)、セメント技術年報 No. 21, 1967, pp. 307-310
- 3-19) (社)セメント協会：耐久性専門委員会ひびわれ分科会報告 H-23、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討, 1992. 10
- 3-20) 後藤幸正ほか：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響、土木学会論文報告集 No. 286, 1979. 6, pp. 125-137
- 3-21) 城国省二ほか：低熱ポルトランドセメントに石灰石骨材を用いたコンクリートの性状、土木学会第 54 回年次学術講演会概要集 V(H11. 9), V-53, 1999, pp. 106-107
- 3-22) 荒木謙一ほか：かた練り砕石コンクリートの配合とコンシステンシー、強度について、セメント技術年報 No. 23, 1969, pp. 357-361
- 3-23) 庄谷征美ほか：石灰石コンクリートの品質特性に関する 2、3 の検討、セメント・コンクリート論文集 No. 44, 1990, pp. 122-127
- 3-24) 武本正ほか：石灰石骨材を用いたコンクリートの諸性質に関する研究、セメント技術年報 No. 41, 1987, pp. 110-113
- 3-25) 原田有：高温度におけるセメントモルタルおよびコンクリートの熱膨張について、セメント・コンクリート No. 280, 1970, pp. 33-42
- 3-26) 庄谷征美ほか：凍結防止剤の影響を受けるコンクリートのスケーリング抵抗性に関する研究、セメント・コンクリート論文集 No. 52, 1998, pp. 212-217
- 3-27) 原田有：骨材の岩質を異にするコンクリートの耐火性能、セメント・コンクリート No. 165, 1960, pp. 2-9
- 3-28) L.T.Phan : Fire Performance of High-Strength Concrete : A Report of the State-of-the Art, National Institute of Standards and Technology, December, 1996
- 3-29) 本間英五郎：加熱冷却ならびに乾燥湿潤繰り返しに対する各種コンクリートの耐久性に関する研究、セメント技術年報 No. 8, 1959, pp. 282-290
- 3-30) 吉田夏樹：コンクリート構造物における硫酸塩劣化の現象—ソーマサイト生成による新たな劣化問題—, GBRC, Vol. 28, 2003, pp. 32-38
- 3-31) 日本化学会編：化学便覧 昭和 33 年 丸善
- 3-32) 西林新蔵、宮川豊章：化学作用に対する耐久性、コンクリートの耐久性, 昭和 61 年, 朝倉書店
- 3-33) (財)下水道業務管理センター：材料の選定、下水道の臭気と腐食対策, 1988 年, pp. 193
- 3-34) 小林茂敏、丸章夫：コンクリート用骨材、日本の石灰石, 石灰石鉱業協会, 昭和 58 年

4. 石灰石微粉末とコンクリート

4.1 石灰石微粉末

4.1.1 石灰石微粉末とは

石灰石微粉末は石灰石を粉砕し、ブレン比表面積 $2,500\text{cm}^2/\text{g}$ 以上に微粉末化したものであり、主にフレッシュコンクリートの流動性、材料分離抵抗性、耐久性の改善ならびに水和熱低減を目的にコンクリート用混和材ならびにセメント用混和材として使用されている。

一般に使用されている石灰石微粉末は、ブレン比表面積 $3,000\text{cm}^2/\text{g} \sim 6,000\text{cm}^2/\text{g}$ のものが多い。コンクリート用石灰石微粉末の品質規格(表 4-1)については、石灰石微粉末研究委員会(日本コンクリート工学協会、1998)にて検討された経緯はあるが JIS 規格化は未了である。

表 4-1 石灰石微粉末の品質規格(案) ⁴⁻¹⁾

(コンクリート混和用)

項目	規定値
比表面積(cm^2/g)	2,500 以上
圧縮強度比(%)	7d 28d
	100 以上
化学組成(%)	CaCO_3
	90 以上
	MgO
	5 以下
	SO_3
	0.5 以下
	Al_2O_3
	1.0 以下
	湿分
	1.0 以下
メチレンブルー吸着量(mg/g)	1.0 以下

表 4-2 石灰石微粉末の品質規格 ⁴⁻¹⁾

(ENV197-1992 : セメント混和用)

項目	規定値
石灰石含有量 (CaCO_3)	75%以上
粘土含有量 (メチレンブルー吸着量)	1.2g/100g 以下
有機物含有量 (TOC)	0.2%以下

4.1.2 石灰石微粉末の品質がコンクリートの品質に与える影響

(1) CaCO_3 純度

CaCO_3 純度がコンクリートの強度に影響を与えるような印象があるが、純度が 46.6%から 99%(ブレン比表面積 $5,000\text{cm}^2/\text{g} \sim 6,000\text{cm}^2/\text{g}$) と異なる石灰石微粉末を用い、その強度への影響をモルタルを用いて検討した結果(図 4-1a)では、強度に対する石灰石微粉末の CaCO_3 純度の影響は認められていない。

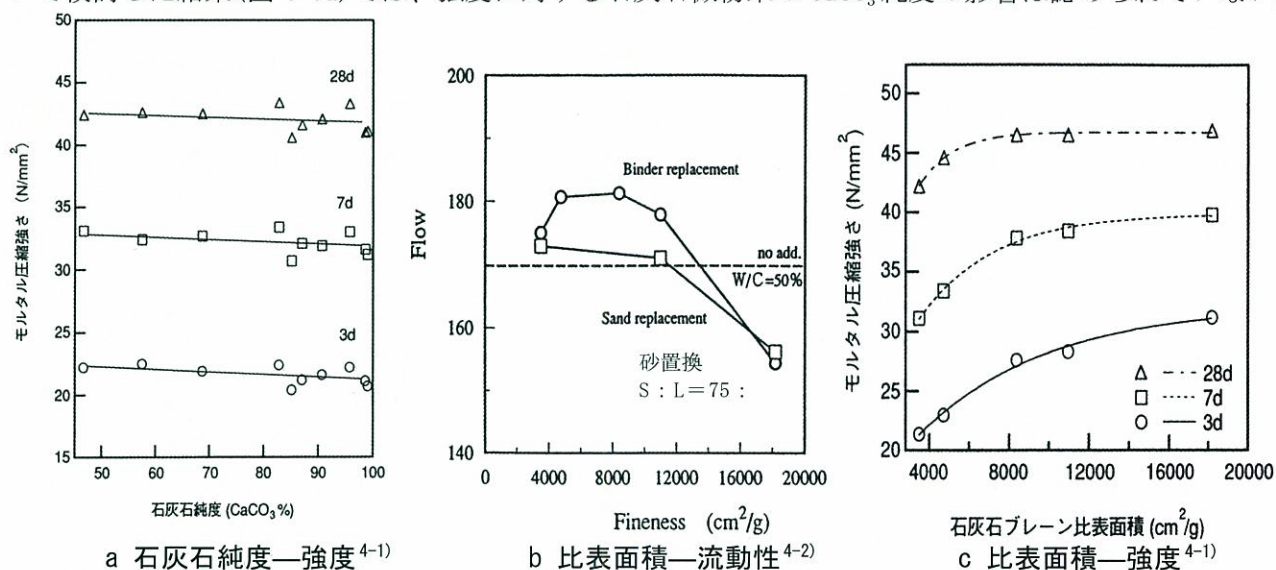


図 4-1 石灰石微粉末の品質がコンクリートの品質に与える影響
(引用：松野，1998 ⁴⁻¹⁾，大賀 1998 ⁴⁻²⁾)

(2) 比表面積

石灰石微粉末の比表面積がコンクリートの流動性ならびに強度に与える影響を検討した結果(図 4-1b、c)では、比表面積が $10,000\text{cm}^2/\text{g}$ 以下であれば流動性への影響はほぼなく、また、比表面積が増加すると強度の増加が見られ、その効果は初期材令ほど大きいことが示されている。

(3) メチレンブルー吸着量

最近のコンクリートには、分散剤(減水剤)が流動性を向上させるために使用される。メチレンブルー吸着量の多いものは、分散剤を吸着してしまいセメントの分散を阻害する。そのために吸着量の大きなものを用いるとコンクリートの流動性が低下することが示されている(図 4-2)。

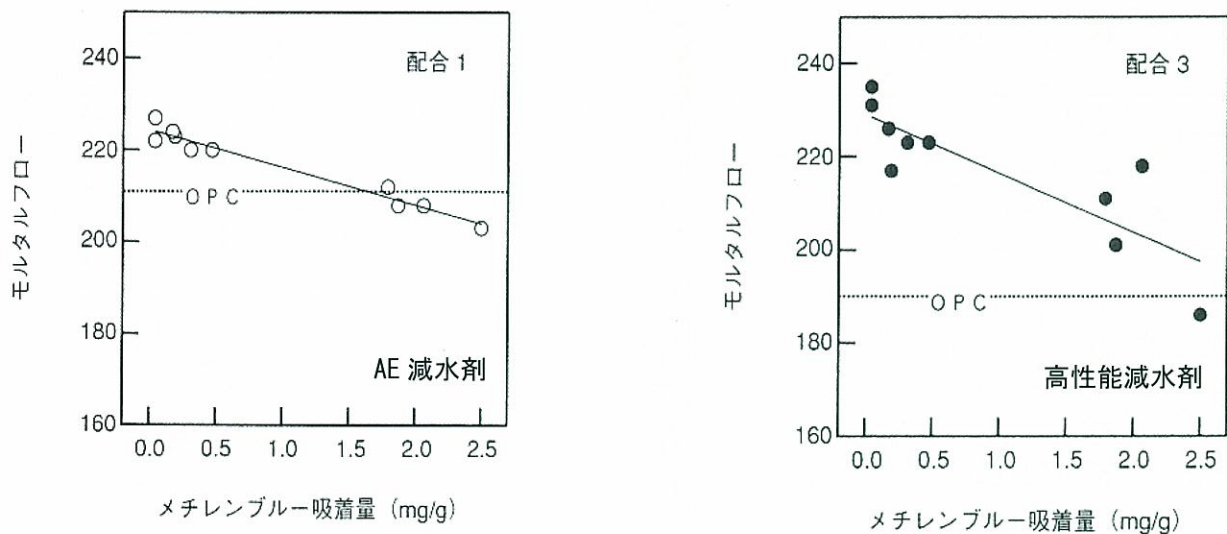


図 4-2 石灰石微粉末の品質がコンクリートの品質に与える影響

(引用：松野，1998⁴⁻¹⁾)

4.1.3 石灰石骨材の石粉

石灰石骨材は岩石を破碎して作られる。このため骨材中の破碎によって生じた石粉(微粉末)が含まれる。この石粉は基本的に石灰石を粉砕して作られた微粉末と同一のものである。生コンのヤードから採取した骨材中に存在する石粉(JIS A 1103 骨材の微粉分量試験方法に則って採取した $75\mu\text{m}$ 以下の粒子)の粒度分布と化学組成を図 4-3 と表 4-3 に示す。これから、石灰石の石粉と微粉末は同等の品質を有していることがわかる。

表 4-3 岩石と石粉の化学組成

含有率(%)	岩石	石粉(微粉末)
CaCO_3	90.8	92.4
MgO	8.2	6.1
SiO_2	0.23	0.89
Al_2O_3	0.12	0.32
Fe_2O_3	0.08	0.22
Na_2O	0.00	0.00
K_2O	0.02	0.04

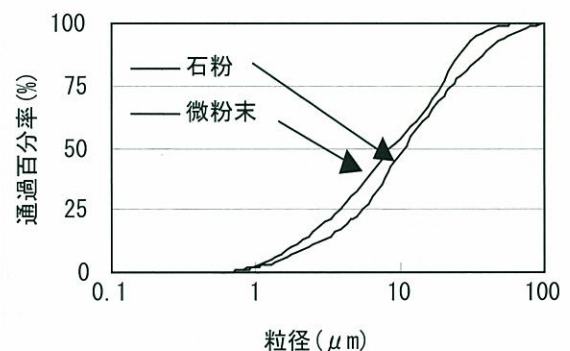


図 4-3 石粉の粒度分布

4.1.4 他の微粉末との比較

コンクリートあるいはセメントの混和材として用いられる微粉末には、石灰石微粉末の他に、代表的なものとして高炉スラグおよびフライアッシュがある。高炉スラグやフライアッシュがセメントと化学反応するのに対し石灰石微粉末は基本的には不活性である。石灰石微粉末は、高炉スラグを添加した場合のような水和発熱量の増加や、フライアッシュの未燃カーボンが示す空気連行剤の効き目を阻害する作用がほとんどなく、流動性を改善するための微粉末添加材として適しており、また、他の微粉末にない凝結促進効果がある。

表 4-4 コンクリート添加用微粉末の性質

微粉末名	比表面積 (cm^2/g)	化学組成(%)						
		CaO(CaCO_3)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O
石灰石微粉末	3,000 ~ 6,000	54.9(98.0)	0.16	0.15	0.1	0.62	0.00	0.11
高炉スラグ	4,000 ~ 8,000	40.8	34.4	16.2	0.8	6.6	0.22	0.56
フライアッシュ	3,000 ~ 4,000	4.0	58.0	25.9	4.3	1.6	1.5	2.2

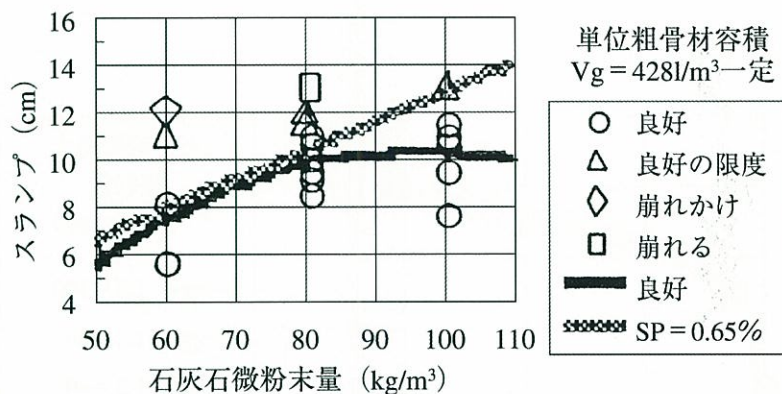
*CaO からの CaCO_3 換算値

4.2 石灰石微粉末添加によるコンクリート性能の改善効果

4.2.1 流動性

コンクリートは、平均粒径 $20\mu\text{m}$ のセメントから最大粒径が $20(40)\text{mm}$ の骨材まで非常に広い粒度分布を持つ粒子の混合体であり、コンクリートとして材料分離を起こさず流動するためには一定量の微粉末が必要である。石灰石微粉末を適度に添加することにより材料分離を抑え流動性の良いコンクリートとすることが可能である。実例を図 4-4 に示す。発熱量を制限するため単位セメント量を $250\text{kg}/\text{m}^3$ とし、不足した微粉末量を、石灰石微粉末を添加することで補い流動性を改善している。

また、図 4-5 中の表に示されるように砂の一部として使用することで同一スランプを得るための高性能減水剤量(SP)をも減少させることができる。



$G_{\text{max}} = 40\text{mm}$, $s/a = 39.4\%$, $W = 148\text{kg}/\text{m}^3$, 高性能減水剤使用

図 4-4 石灰石微粉末添加によるコンクリートの流動性改善³⁾

(引用：大友，2001⁴⁻³⁾)

4.2.2 強度特性

石灰石微粉末自身に水硬性はないが、微粉末であるため、セメント水和時の核生成の働きをしたり、水和初期にはアルミネートと若干の反応をする。このため砂の一部に石灰石微粉末を使用するとコンクリート強度が大きくなる。実例を図 4-5 に示す。100kg/m³の石灰石微粉末の添加により材令 28 日強度が約 10%増加している。

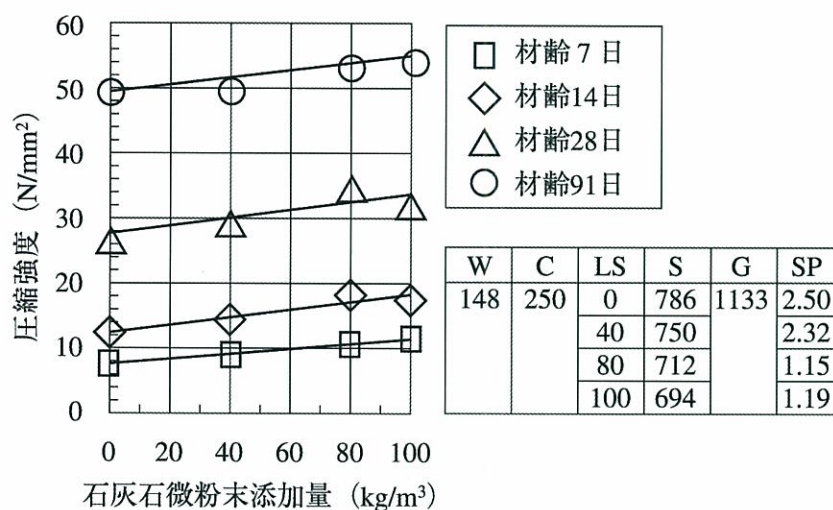


図 4-5 石灰石微粉末添加によるコンクリートの強度増進

(引用：羽生，2001⁴⁻⁴⁾)

4.2.3 発熱特性

石灰石微粉末は基本的に不活性で、強度増進作用は核生成によるものといわれている。このため、流動性改善のために添加量を増加させてもコンクリートの発熱量を増加させる作用が少ない。実例を図 4-6 に示す。石灰石微粉末を 100kg/m³まで増加させても、コンクリートの断熱温度上昇量に増加は認められない。

このように石灰石微粉末は発熱量を増加させずコンクリート流動性を改善する微粉末として優れた性質を持つ。

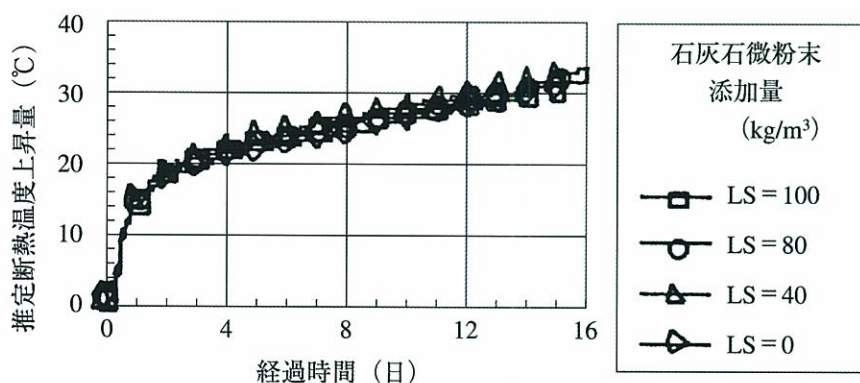


図 4-6 石灰石微粉末添加によるコンクリートの発熱特性の変化⁴⁻⁴⁾

(引用：羽生，2001⁴⁻⁴⁾)

4.2.4 ポンプバリエーション改善

コンクリートの打設にはポンプが用いられる。ポンプで圧送されるコンクリートには圧力が加わり水分が固体粒子間より絞り出される作用を受ける。脱水したコンクリートは流動性を失いポンプを閉塞させ打設が不可能となる。石灰石微粉末を添加するとコンクリート中の水分が脱水するための経路が長くなること、経路が狭隘になること等により抵抗が増し脱水しづらくなることで、ポンプ閉塞の危険性を低減できる。石灰石微粉末の添加量とポンプ圧送性を 60 秒加圧ブリーディング率(少ないほど良)で評価した結果を図 4-7 に示す。

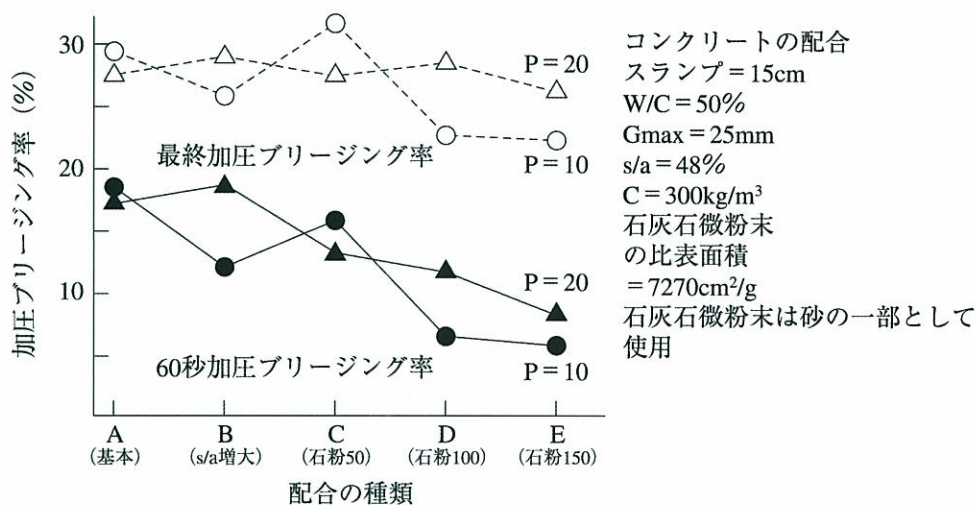


図 4-7 ポンプバリエーション改善効果

(引用：十河，1991⁴⁻⁵⁾)

4.2.5 ブリーディング抑止

ブリーディングの多いコンクリートは、上部のコンクリートの緻密さが損なわれたり、また、水平鉄筋の下場に水がたまり空隙を作ったりするので、好ましくない。石灰石微粉末を添加することにより、このブリーディングを低減でき、鉄筋とコンクリートの付着を向上させることができる。実例を図 4-8 に示す。

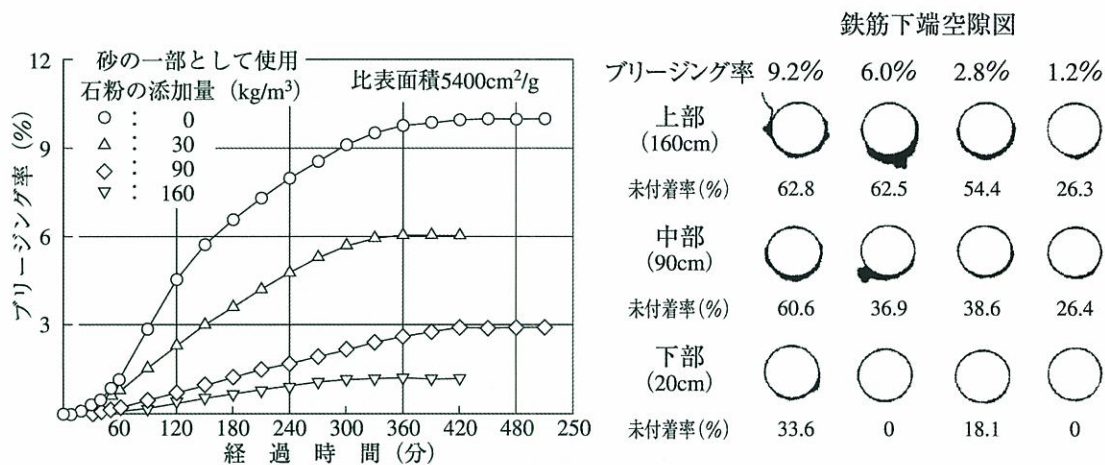


図 4-8 石灰石微粉末のブリーディング抑止効果

(引用：平田，1992⁴⁻⁶⁾)

4.2.6 中性化抑止・遮塩性改善

コンクリートの中性化速度は細孔分布に制御され、細孔量が少なく細かい程中性化速度は遅くなる。石灰石微粉末の添加により、細孔分布が細かい方へシフトすることにより中性化速度が低減される。実例を図4-9に示す。コンクリートの遮塩性も細孔分布と密接な関係にあり、石灰石微粉末の添加により改善される。実例を図4-9に示す。

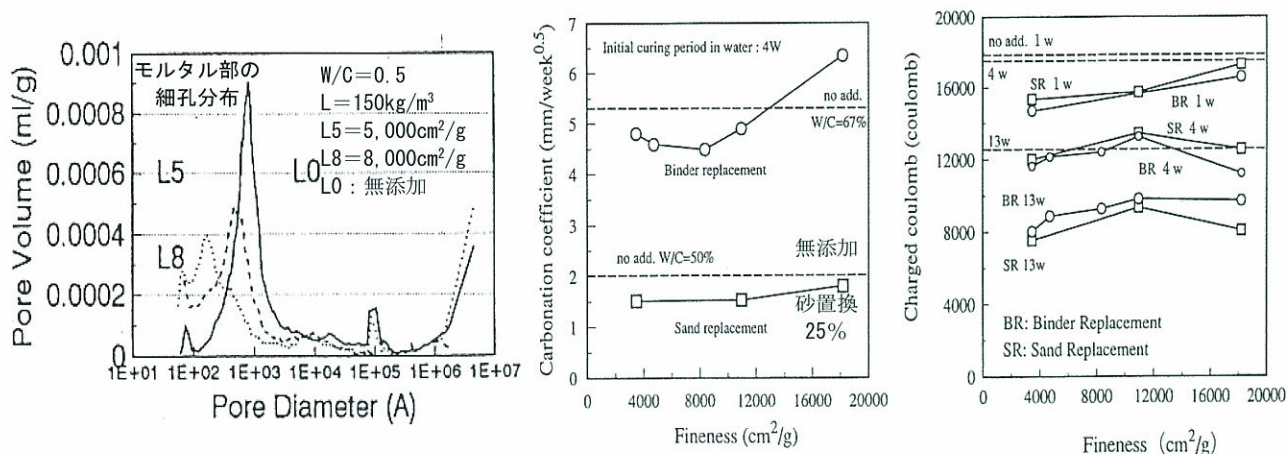


図4-9 石灰石微粉末の中性化抑止効果ならびに遮塩性改善効果

(引用：大賀，1998⁴⁻²⁾，国府，1995⁴⁻⁷⁾)

4.3 石灰石微粉末添加による高流動コンクリート

4.3.1 高流動コンクリートの作り方

高流動コンクリートは、ペースト部分の量と粘性を増加させ骨材間の摩擦と分離を低減することで、通常のスランプコンクリートに比較し流動性、材料分離抵抗性、充填性を向上させたものである。石灰石微粉末を用いてペーストの量ならびに粘性を増加させる手法は、基本となるコンクリートに比較し不必要に高強度化したり、発熱量や収縮量の増加をもたらすことがないため好ましい。

調・配合においてセメント量を固定し、骨材部を石灰石微粉末で置換することで流動性が向上する。特に砂置換で添加した場合は添加量に応じてスランプフローが増大している。実例を図4-10に示す。

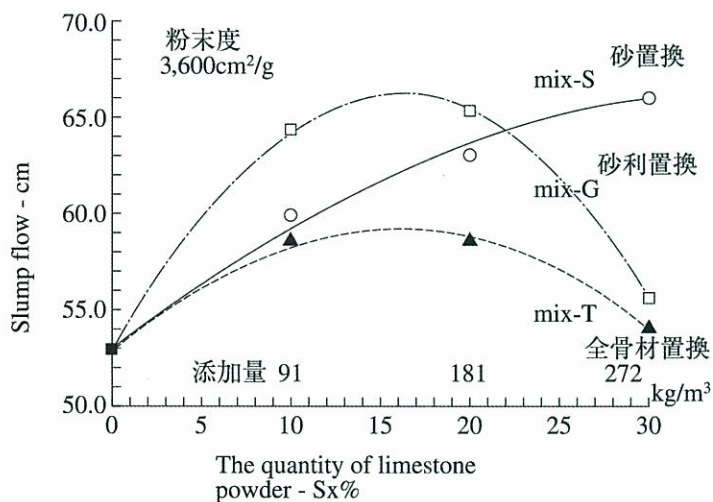


図4-10 石灰石微粉末添加量とスランプフロー

(引用：綾野，1993⁴⁻⁸⁾)

普通コンクリートを石灰石微粉末の添加と高性能減水剤使用量の調整のみで高流動コンクリートとした例を表 4-5 に示す。粗骨材を石灰石微粉末に置換することでコンクリートの総粉体量を 586kg/m^3 とし、粉体が増加した分、高性能減水剤の使用量を増加させたことでスランプ 18cm のコンクリートがワーカブルなスランプフロー65cm の高流動コンクリートとなった。

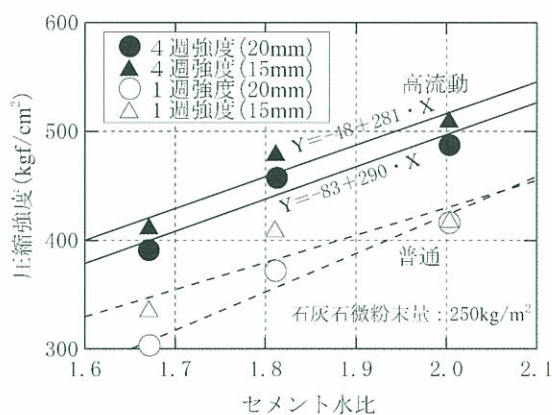
表 4-5 高流動コンクリートの配合例⁴⁻⁹⁾

	Gmax	SL, SF	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	L (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	SP (Px%)
普通	20mm	18cm	4.5	55	45.3	185	336	0	770	984	0.88
高流動		65cm			51.5			250	764	751	1.49

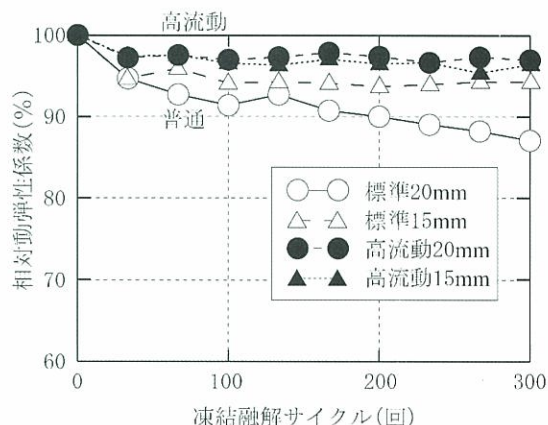
P=C+L, L 石灰石微粉末 比表面積 6, 200cm²/g, SP 高性能減水剤

4.3.2 石灰石微粉末添加高流動コンクリートの特性

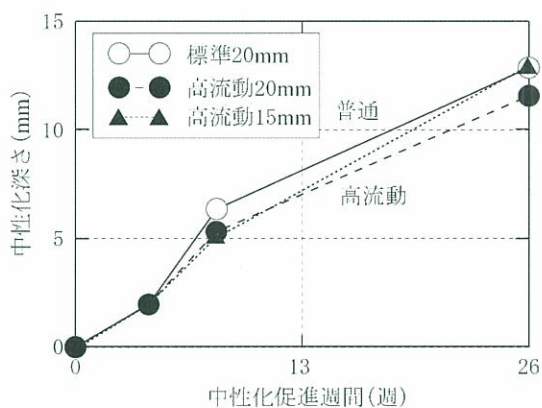
表 4-5 に示した高流動コンクリートの特性を普通コンクリートの特性と比較したものを図 4-11 に示す。石灰石微粉末を添加することで高流動化したコンクリートの力学的性質、乾燥収縮、耐久性などの品質は、元となった普通コンクリート同等以上である。



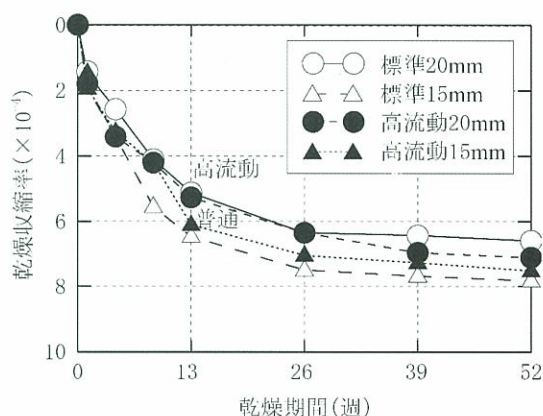
a 強度の比較



b 凍結融解抵抗性の比較



c 中性化速度の比較



d 乾燥収縮の比較

図 4-11 石灰石微粉末添加高流動コンクリートと普通コンクリートの特性比較

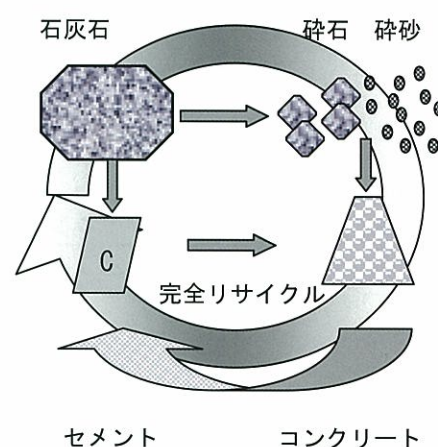
(引用：浜田, 1995⁴⁻⁹⁾)

[参考文献]

- 4-1) 松野路雄ほか：石灰石微粉末のキャラクターとモルタルの性質、「石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム」石灰石微粉末委員会報告書、日本コンクリート工学協会、1998. 5, pp. 151-158
- 4-2) 大賀宏行ほか：石灰石微粉末を用いたモルタルの諸特性に及ぼす配合条件および養生条件の影響、セメント・コンクリート論文集, No. 52, 1998, pp. 356-361
- 4-3) 大友健ほか：高性能 AE 減水剤と石灰石微粉末を使用した低熱ポルトランドセメントコンクリートの配合検討、土木学会第 56 回年次学術講演改講演概要集 (H13. 10), V-119, 2001, pp. 238-239
- 4-4) 羽生剛ほか：高性能 AE 減水剤と石灰石微粉末を使用した低熱ポルトランドセメントコンクリートの強度・発熱特性、土木学会第 56 回年次学術講演改講演概要集 (H13. 10), V-274, 2001, pp. 548-549
- 4-5) 十河茂幸ほか：石灰石粉によるコンクリートの加圧ブリージング性状の改善効果、土木学会第 46 回年次学術講演改講演概要集 (H3. 9), V-62, 1991, pp. 140-141
- 4-6) 平田隆祥ほか：石灰石粉によるブリージングの低減がコンクリートの強度・耐久性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, 1992, pp. 309-313
- 4-7) 国府ほか：鉱物微粉末を用いたコンクリートの乾燥収縮とひび割れ性状、セメント・コンクリート論文集, No. 49, 1995, pp. 620-625
- 4-8) 綾野克紀ほか：石灰石微粉末を用いた超流動コンクリートの配合に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, 1993, pp. 167-172
- 4-9) 浜田二郎ほか：石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートの品質に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, 1995, pp. 135-138

5. 石灰石碎石・砕砂による完全リサイクルコンクリート

「セメントおよびセメントの原料となる物質のみがコンクリートの結合材、混合材または骨材として用いられ、硬化後、再度全量がセメント原料および再生骨材として使用可能であるようなコンクリートおよびモルタル」⁵⁻¹⁾が完全リサイクルコンクリートとして 1994 年東京大学建築学科友澤教授によって提唱された。そして同時に、コンクリートを普通ポルトランドセメント、石灰石碎石・砕砂を用いて作ることで、容易にコンクリートの性能を損なうことなくコンクリートを完全リサイクル化することが可能であることも示された。



5.1 セメントと石灰石碎石・砕砂コンクリートの化学組成

セメントは石灰石、粘土、珪石、鉄原料、石膏を原料に作られ、その化学組成は表 5-1 に示す通りである。石灰石碎石・砕砂コンクリート（セメント量 320kg/m³、骨材量 1,780kg/m³）の化学組成を同じく表 5-1 に示す。

化学成分を見ると、石灰石碎石・砕砂コンクリートの CaO 含有率は 87.3%と普通セメントの CaO 含有率 65.3%より十分大きく、石灰石碎石・砕砂コンクリートが十分にセメントの石灰石原料の代替となりえることがわかる。

石灰石碎石・砕砂コンクリートに粘土、珪石、鉄、石膏の原料を加え再製造した再生セメントの化学組成を表 5-1 に示す。再生セメントの化学組成は、元の普通セメントと全く同じものであり、さらに、品質も表 5-2 に示す通り両者の間に差は認められない。

また、再生セメント製造時に必要な粘土、珪石、鉄、石膏の原料を高炉、ニッケル、銅等のスラグならびにフライアッシュ等の副産物代替としてコンクリートに利用することで再生セメント製造時の成分調整を不要としたものも提案されている⁵⁻²⁾。

図 5-1 完全リサイクル
コンクリートの概念

表 5-1 セメントと石灰石碎石・砕砂コンクリートならびに再生セメントの化学組成(%)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Total
普通セメント	65.33	21.44	5.24	2.85	2.06	0.29	0.43	97.64
コンクリート ⁵⁻¹⁾	87.30	8.08	1.37	0.84	0.40	0.12	0.14	98.25
再生セメント ⁵⁻¹⁾	66.82	21.37	5.02	2.77	1.91	0.19	0.24	98.32

注) ig. loss を除いた部分の百分率

表 5-2 普通セメントと再生セメントの品質

	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性	フロー 値(mm)	圧縮強さ(kgf/cm ²)		
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)			3 日	7 日	28 日
普通セメント	3.15	3,360	27.6	2-33	3-24	良	256	162	262	424
再生セメント ⁵⁻¹⁾	3.13	3,340	26.6	2-00	2-50	良	233	152	248	432

5.2 完全リサイクルコンクリートから作られた再生セメントを用いたコンクリートの品質

再生セメントの品質が元の普通セメントと同等なので、それを用いたコンクリートの品質が元のコンクリートと同等であることは言を待たない。実験で示された結果を表 5-3⁵⁻³⁾に示す。

このように、石灰石碎石・砕砂を用いてコンクリートをつくることで、コンクリートの品質を損なうことなく完全リサイクル化が可能な事が示されている。

表 5-3 完全リサイクルコンクリートから再生したセメントを用いたコンクリートの品質

強度レベル	セメント種類	W/C	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (KN/mm ²)
通常	普通	0.58	31.6	39.1
	再生		35.2	39.0
高強度	普通	0.30	67.6	48.0
	再生		66.8	46.5

[参考文献]

- 5-1) 友澤史紀ほか：完全リサイクルコンクリート（エココンクリート）の研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1994. 9，pp. 341-342
- 5-2) 友澤史紀ほか：完全リサイクルコンクリートの実用化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1996. 9，pp. 393-394
- 5-3) 友澤史紀ほか：完全リサイクルコンクリート，コンクリート工学，Vol. 35, No. 7, 1997. 7, pp57-60