

土木研究所資料

骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮
に与える影響と評価試験法に関する研究

平成23年3月

独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ基礎材料チーム

Copyright © (2011) 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。

骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮 に与える影響と評価試験法に関する研究

基礎材料チーム 上席研究員 渡辺博志

主任研究員 片平 博

研 究 員 伊佐見和大

交流研究員 山田 宏

要旨

骨材資源を有効に利用するためには、その骨材がコンクリートの性能に与える影響を正しく評価し、その結果に基づいて使用の適否を判断する必要がある。硬化コンクリートの性能のうち骨材品質の影響を強く受けるものとして耐凍害性と乾燥収縮があげられる。コンクリートの耐凍害性に与える影響に関しては砂利と碎石とで傾向が異なり、砂利については新たに提案した簡易凍結融解試験結果によって、碎石については吸水率で評価できることを示した。乾燥収縮に関しては、粗骨材の岩種・生成年代別に骨材物性との関連を整理し、また、コンクリートの弾性係数等との関連を整理した。さらに、骨材の乾燥収縮率と高い相関があることを突き止め、ひずみゲージによる粗骨材の乾燥収縮率測定方法を提案した。

キーワード：コンクリート、粗骨材、耐凍害性、吸水率、冷凍庫、乾燥収縮、動弾性係数、白亜紀

はじめに

骨材はコンクリート中の7～8割を占める重要な構成材料であり、その品質は、「JIS A 5308 レディーミクストコンクリート」の「附属書A. レディーミクストコンクリート用骨材」や土木学会「コンクリート標準示方書」等で規定されている。骨材としては、古くは良質な川砂利、川砂、海砂等の天然骨材が使用されていたが、需要量の増大と河川での河床低下の防止や海での環境問題等から、次第にその採取量は制限され、これに替わって砕石、砕砂等の割合が増加してきている。また、近年では、コンクリートの乾燥収縮量が大きくなる骨材の存在も指摘されており、骨材の低品質化が懸念されている。

一方、コンクリートダムの建設においては、ダムサイト近傍の原石山から原石を採取して骨材を製造するが、近年、良好な原石が採取できる原石山が減少しており、骨材品質が低下する傾向にある。また、これに合わせて原石山での掘削量の増大、廃棄岩の処分場の増大、骨材輸送距離の増大等による環境負荷が大きくなっている。これらのことから、現在の品質規格を満足しない骨材であってもコンクリートの性能を損なわない範囲の骨材であれば、有効利用を図ることで骨材の供給量を確保し、環境負荷を低減することが望ましい。

このような状況において、骨材資源を有効に活用するためには、骨材品質がコンクリートの性能に与える影響を的確に評価する技術開発が重要である。骨材品質がコンクリートの性能に与える影響としてはフレッシュ性状、強度、耐久性など様々なものがあるが、特に耐凍害性と乾燥収縮に与える影響が大きい。これらの照査には、現状ではコンクリート試験体を製造しての長期間に及ぶ試験が必要であり、簡易な評価試験法の確立が望まれている。

このため本研究では、骨材品質がコンクリートの耐凍害性と乾燥収縮に与える影響と、評価試験方法について検討を行った。

目 次

はじめに

1. 現状における骨材の品質評価方法と課題	1
1.1 骨材需要量の実態	1
1.2 骨材の物性値とコンクリートの性能との関係	2
1.3 研究目的	5
1.4 検討の対象とする骨材寸法について	5
2. 耐凍害性に関する検討	7
2.1 収集した骨材の物性	7
2.2 実験概要	7
2.3 安定性試験に関する検討	10
2.4 簡易凍結融解試験の試験条件に関する検討	13
2.5 砂利の評価	15
2.6 碎石の評価	20
2.7 碎石と砂利の違いに関する考察	23
2.8 粗骨材最大寸法を 15mm とした砂利コンクリートの性能	26
2.9 まとめ	29
3. 乾燥収縮に関する検討	30
3.1 収集した骨材の物性	30
3.2 実験方法	31
3.3 岩種・地質年代とコンクリートの乾燥収縮率の関係	34
3.4 粗骨材と細骨材の影響比較	35
3.5 粗骨材の乾燥収縮率とコンクリートの乾燥収縮率との関係	37
3.6 粗骨材の物理的性質とコンクリートの乾燥収縮率との関係	38
3.7 骨材の水蒸気吸着率とコンクリートの乾燥収縮率との関係	40
3.8 コンクリートの弾性係数と乾燥収縮率との関係	41
3.9 水セメント比の影響	45
3.10 40×40×160mm 供試体を用いた長さ変化試験結果	46
3.11 まとめ	48

附録

附録 1. 骨材の耐凍害性判定方法（案）	51
附録 2. 骨材の簡易凍結融解試験方法（案）	53
附録 3. コンクリートの乾燥収縮率に与える粗骨材の評価方法（案）	56
附録 4. ひずみゲージによる粗骨材の乾燥収縮率試験方法（案）	60

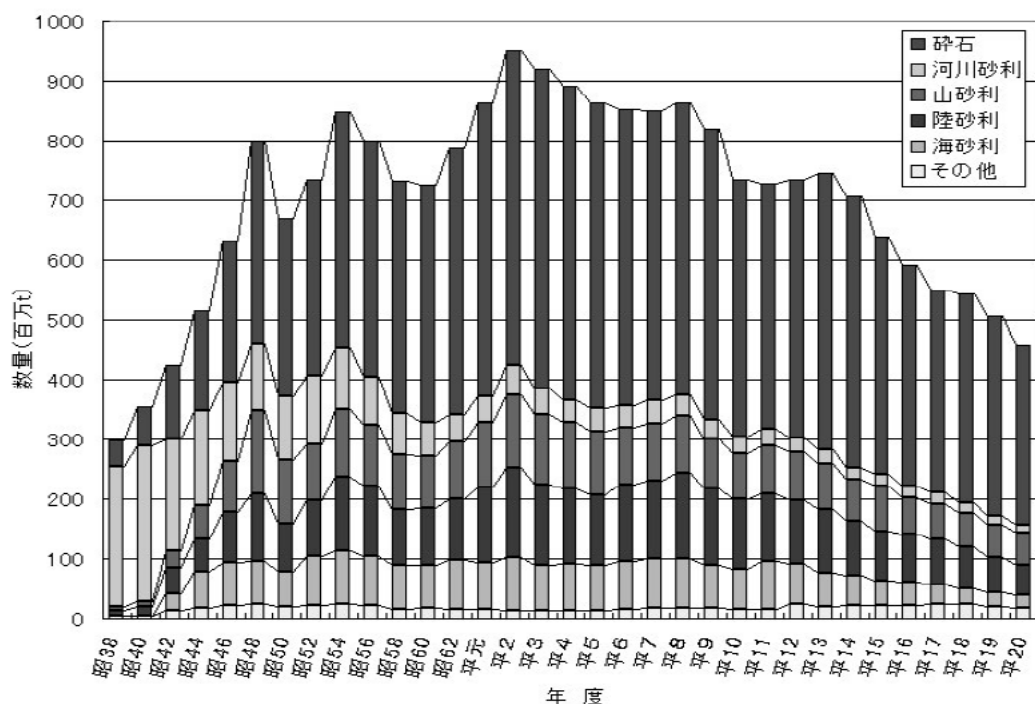
1. 現状における骨材の品質評価方法と課題

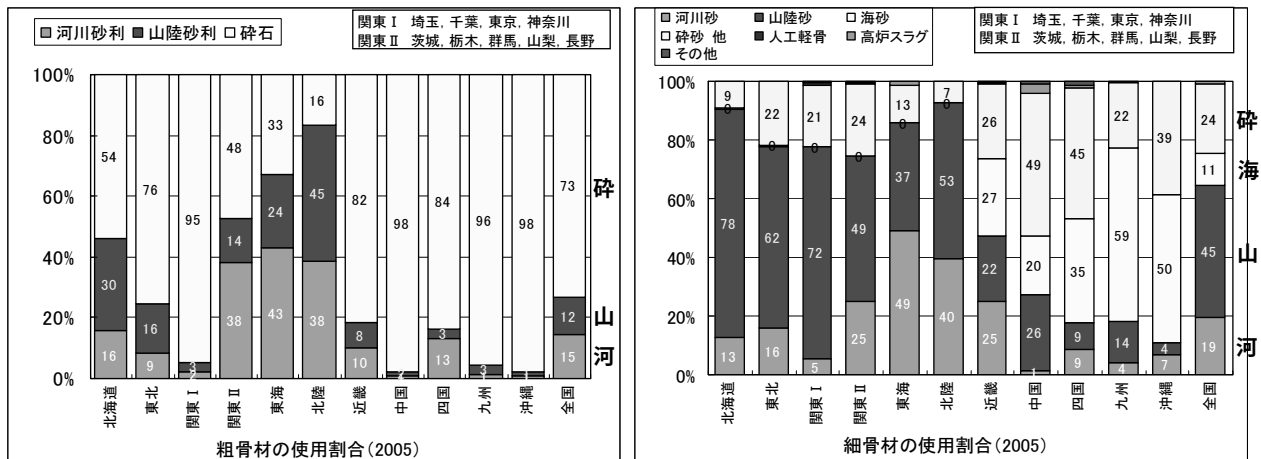
1.1 骨材需要量の実態

図 1.1.1 は骨材（コンクリート用と道路用の合計）の供給構造の推移である。昭和 40 年頃は河川砂利の割合が多かったが、高度成長期の需要の増大と河川の河床低下の防止から河川からの採取量が制限されたことから、次第に陸砂利、山砂利、海砂利（おもに砂）等の割合が増加している。これらは採取場所が異なるものの品質としては河川砂利と同様の天然骨材である。碎石は道路用骨材を中心に供給量を増やしてきたが、近年では天然骨材の不足と、密度や吸水率といった骨材物性が天然骨材よりも安定しているといった理由から、コンクリート用骨材としての割合も高くなってきている。

図 1.1.2 は 2005 年における経済産業省の統計資料から、各地域におけるコンクリート用骨材の内訳を整理したものである。これによると、粗骨材に関しては、関東Ⅰ区と近畿以西では碎石の使用がほとんどであるのに対して、北海道、関東Ⅱ区、東海、北陸では現在でも河川砂利や山陸砂利といった天然骨材の使用割合が比較的高いことが分かる。細骨材に関しては、東日本では河川砂、山陸砂の割合が高く、西日本では海砂と砕砂の割合が高いことが分かる。海砂は採取規制が進んでおり、2005 年時点では中国から大量に輸入されていたが、その後、中国が輸出を禁止しており、西日本では天然細骨材の不足が深刻化している。

上述の河川砂利、河川砂、山陸砂利等の天然骨材が使用されている地域は、大きな河川が存在する地域と符合している。東北地方で天然骨材の使用割合が低いのは、この地方は新第三紀のグリーンタフ地帯で、比較的地質年代の若い山岳が多く、そこから崩れ出る砂利の品質が低いことに起因しており、他県から碎石を輸





図ー1.1.2 地域ごとの骨材使用割合（経済産業省統計資料より）

送している県もある。関東 I 区で砕石の割合が高いのは膨大な需要量に近隣の骨材採取場からの供給が追いつかず、この地域でも遠方から石灰石骨材等の砕石が大量に輸送されている。このように、骨材事情は地域によって大きく異なり、地域事情に見合った対応が必要となる¹⁾。

一方、コンクリートダムの建設に当たっては、ダムサイト近傍に原石山を設定し、その原石山から岩石を採取することが一般に行われる。この場合、地表面に近い部分は一般に品質が悪いので、その部分は廃棄して、山の内部から良質な岩石を採取することになるが、近年では良質な原石山が少なく、製品となる骨材の割合が掘削量の 1/2 に満たない場合も多い²⁾。このことは、コスト面、環境面の双方で掘削量の増大と廃棄量の増大という 2 重の負荷を強いるものとなる。骨材資源の有効利用には、骨材の品質を的確に評価することが重要である。なお、ダムサイト近傍に良質な川砂利が存在する場合には、それを骨材に使用する場合もある。

1.2 骨材の物性値とコンクリートの性能との関係

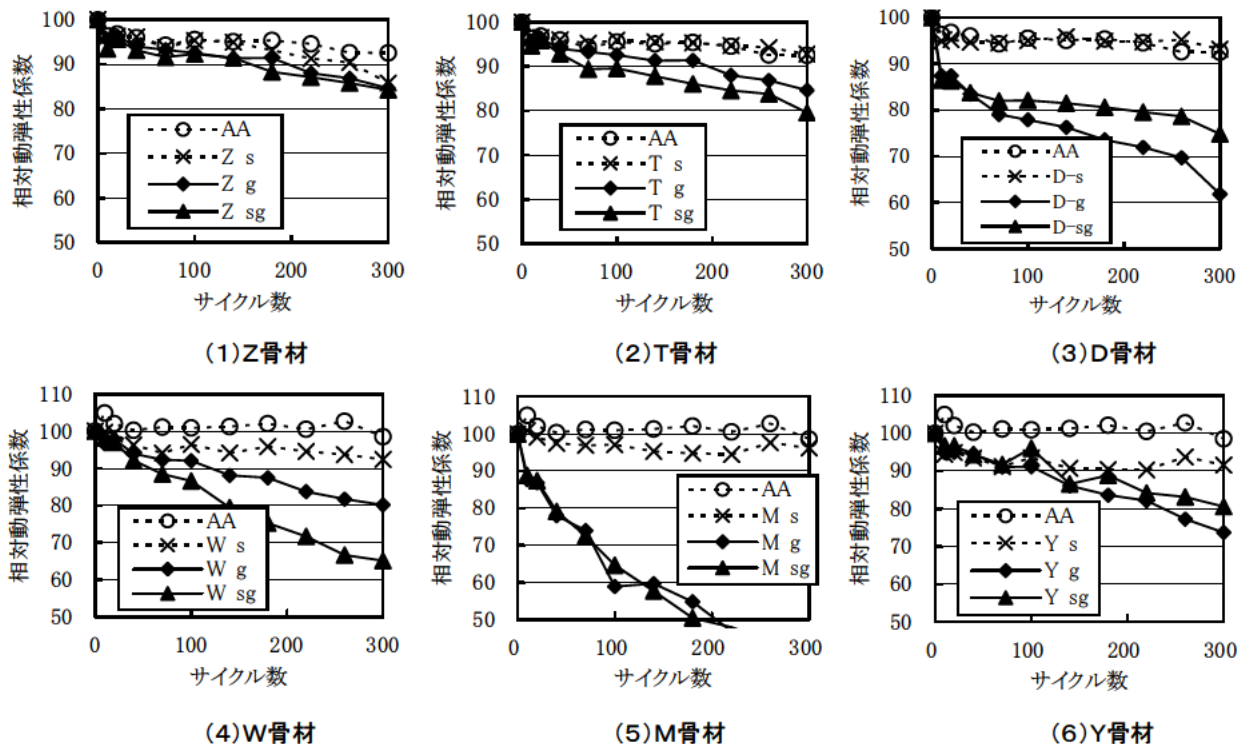
表 1.2.1 は、コンクリートの構成材料をペースト、細骨材および粗骨材に分け、コンクリートの各種性能に大きな影響を与える材料について整理したものである。厳密に言えば、各性能ともにそれぞれの材料の影響を多少なりもと受けているが、この表では、あくまで大きな影響を与えるもののみを整理した。以下にその概要を述べる

- ・フレッシュ性状は各材料の品質の影響を受ける。
- ・強度は主にペーストの水セメント比に依存する。
- ・温度ひび割れはペースト中のセメント量に依存する。
- ・塩害や中性化は主にペースト中の透過性に依存する。初期塩は細骨材中に存在する。
- ・凍害に関しては、ペーストが劣化する現象と粗骨材が劣化する現象がある。細骨材の品質はほとんど影響しないことを、これまでの研究で確認している³⁾。図 1.2.1 はその研究結果の一例であり、コンクリートの凍結融解試験における動弾性係数の変化を示したものである。良質な骨材を使用した結果が AA であり、これに対して、細骨材または粗骨材を低品質骨材に置き換えた結果をそれぞれ示している。これによれば、

表－1.2.1 コンクリートの性能に与える材料の影響

コンクリートの性能		ペースト	細骨材	粗骨材
フレッシュ性状		●	●	●
強度		●		
耐久性	温度ひび割れ	●		
	塩害	●	●	
	中性化	●		
	凍害	●		●
	乾燥収縮	△	△	●
	乾湿繰り返し			●
	ASR	●	●	●

凡例 ●：大きく影響する、△：比較的影響する



図－1.2.1 低品質骨材使用コンクリートの凍結融解試験結果（細骨材と粗骨材の比較）

粗骨材のみを置き換えたケース(-g)、または細骨材と粗骨材を置き換えたケース(-sg)で動弾性係数が低下しており、細骨材のみを置き換えたケース(-s)での動弾性係数の低下は見られなかった。

- 乾燥収縮は、本報告書で詳述するが、概略としては、本来、収縮するのはペーストであり、骨材はそれを拘束する役割を担う。ただし、骨材の種類の違いによる影響が大きく、ペーストや細骨材の種類の違いの影響はそれほど大きくない。
- 骨材の種類によっては、乾湿の繰り返しで劣化するものがある⁴⁾。
- ASR に関してはペースト中のアルカリ量と骨材中のシリカ量との関係が重要となる。

このように整理すると、骨材の品質がコンクリートの性能に大きな影響を与える範囲はある程度限定され、特に凍害や乾燥収縮に与える影響が大きく、今回の研究範囲は表－1.2.1 に示す太枠の範囲とした。

表－1.2.2 骨材の品質規格の標準値

	JIS A 5308 附属書A レディーミクストコンクリート 用骨材		JIS A 5005 コンクリート用砕石 及び砕砂		コンクリート標準示方書 ダムコンクリート編	
骨材の種類	砂利	砂	砕石	砕砂	粗骨材	細骨材
絶乾密度(g/cm ³)	2.5以上	2.5以上	2.5以上	2.5以上	表乾2.5以上	
吸水率(%)	3.0以下	3.5以下	3.0以下	3.0以下	3以下 ^{注1)}	
安定性(%)	12以下	10以下	12以下	10以下	12以下 ^{注1)}	10以下
すりへり減量(%)	35以下		40以下		40以下	
微粒分量(%)	1.0以下	3.0以下	3.0以下	9.0以下	1.0以下	3.0以下
粘土塊量(%)	0.25以下	1.0以下			0.25以下	1.0以下
軟らかい岩片(%)	5.0以下				5.0以下	
密度1.95に浮く物(%)	0.5以下	0.5以下				
塩化物量(NaClとして、%)		0.04以下				0.04以下
有機不純物		標準液と同じ、薄い				

注1) 設計基準強度が18N/mm²以下の場合
吸水率3%以下、安定性40%以下
または、吸水率5%以下、安定性12%以下

現在の骨材の品質規格を表 1.2.2 に示す。表に示したのは標準値であって、種々の条件によって規格値が変更になるため、詳細は各規準書を参照されたい。

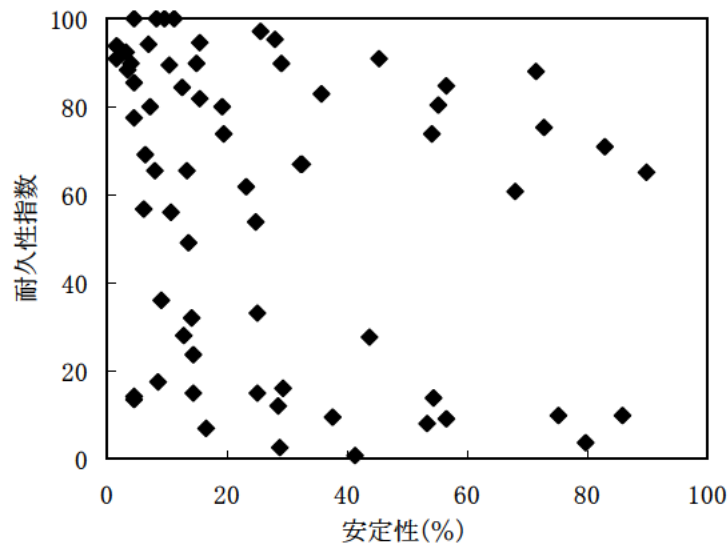
表中の密度と吸水率は最も代表的な骨材物性値であり、密度はコンクリートの配合設計にも必要となる。安定性損失質量百分率（以下、安定性という）は、骨材を硫酸ナトリウム溶液に浸漬し、その後、乾燥炉で105℃まで乾燥させることを5回繰り返し、その間に硫酸ナトリウムの結晶圧で破壊され、損失する骨材割合を求める試験で、結晶圧の作用が、水の凍結圧に類似しているという想定のもと、骨材の耐凍害性を評価する一つの指標として用いられている。すりへり減量と微粒分量はすりへり作用に対する抵抗性を示す指標である。粘土塊量、軟らかい岩片、密度 1.95 に浮く物は、骨材中の弱い粒子または軽い粒子の割合を求めるもので、多種多様な岩種が混入する砂利砂に対して規定が設けられている。塩化物量は主に海砂に対する規定であり、有機不純物は表土が混入する可能性があるものに対して規定されている。

このように、骨材の品質に関しては様々な規格値が定められているが、これらの骨材を用いたコンクリートの性能に直結するような物性値は、すり減り減量と塩化物量のみであろう。その他の物性値がコンクリートの性能に与える影響については十分に解明されているとは言い難い。

安定性は、耐凍害性の評価指標としてしばしば用いられる。しかしながら、コンクリートの耐凍害性との対応性が必ずしも高いとはいえない。当研究チームがこれまでに収集した実験データによると、粗骨材の安定性と、その骨材を使用したコンクリート（W/C50～55%、目標空気量 4.5%）の耐久性指数との関係は図 1.2.2 に示すとおりで、良好な対応関係は得られていない。

ダムコンクリートに関しては、表 1.2.2 の注 1) に示すように、耐凍害性を必要とする場合の粗骨材の品質を吸水率と安定性の双方の値の掛け合わせで評価することとなっている。これは、昭和 54～56 年に当チーム（当時、コンクリート研究室）が実施した研究成果⁵⁾に基づいたものである。今回の検討では、この昭和 54～56 年の実験データも含めたかたちで、実験データを更に増やし、種々の検討を実施した。

乾燥収縮に関しては、現状では骨材の品質規格から、コンクリートの乾燥収縮を推定できる指標は無いと言って良い。



図ー1.2.2 安定性と耐久性指数の関係

1.3 研究目的

上記のように、現状においては、骨材の品質がコンクリートの耐凍害性や乾燥収縮量に与える影響を的確に評価する指標は無いと言ってよい。このため、コンクリート試験体を使用しての凍結融解試験 (JIS A 1148) や長さ変化試験 (JIS A 1124) に頼らざるを得ない状況であるが、これらの試験には多大な労力と3ヶ月間あるいは6ヶ月間といった長期の試験期間を必要とし、簡易な指標による評価方法の確立が望まれている。

このため本研究では、以下を研究目的とした。

- (1) 骨材がコンクリートの耐凍害性に与える影響を調査し、簡易に評価することの可能な評価指標(試験方法)を提案する。
- (2) 砂利骨材を使用したコンクリートの耐凍害性に関しては、粗骨材最大寸法を25mmから15mmに変更することによる耐凍害性の改善効果を検証する。
- (3) コンクリートの乾燥収縮に大きな影響を及ぼす骨材の種類を明らかにする。
- (4) 骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響を簡易に評価することの可能な評価指標(試験方法)を提案する。

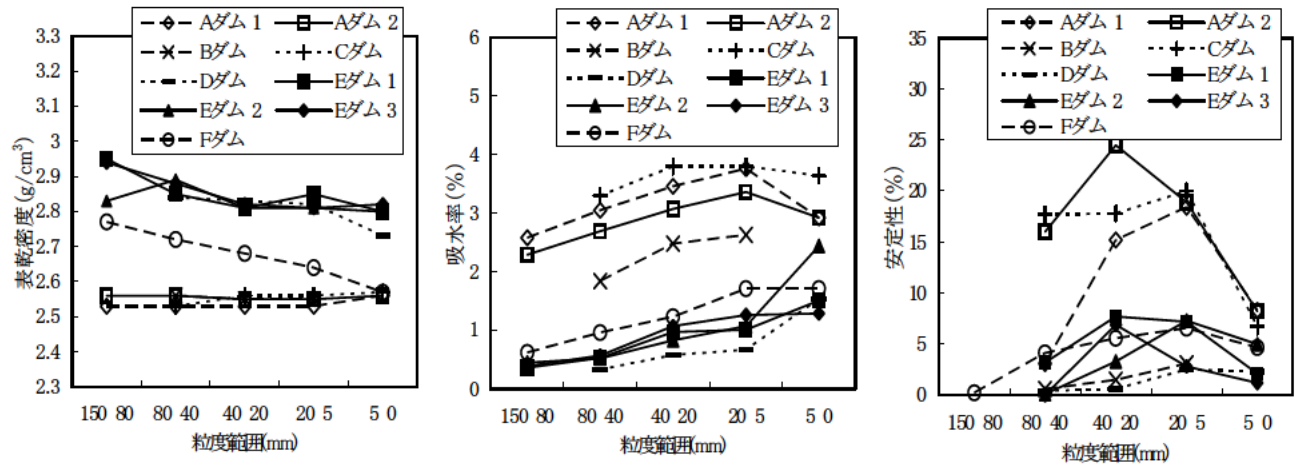
1.4 検討の対象とする骨材寸法について

レディーミクストコンクリートに使用する粗骨材最大寸法は、一般に碎石の場合は20mm、砂利の場合は25mmまたは40mmが一般的である。一方、ダムコンクリートでは、粗骨材最大寸法150mmまたは80mmといった大粒径骨材が使用される。可能であれば大粒径骨材に対しても検討の対象とすべきであるが、以下の理由により、今回の実験の対象とする粗骨材最大寸法は25mmとした。

- (1) 凍結融解や乾燥収縮等の環境条件が厳しいのは、コンクリート構造物の表面から数cm程度までの深さであり、大粒径骨材粒子の全体が厳しい環境に曝される可能性は低い。
- (2) ダムコンクリート用骨材の密度、吸水率、安定性に関して、粒子寸法との関係を調査すると図1.4.1に示すようになり、密度および吸水率は骨材粒子が小さいものほど品質が低くなる傾向を示している。安

定性に関しては粒子径が 20～40mm 程度で最も劣化しやすい傾向を示している。これらのことから、同一産地で同じ岩種であれば、150mm や 80mm といった大粒径骨材の品質が粒子径 20～40mm 程度の骨材の品質を下回る可能性は低いと考えられる。

- (3) 表 1.4.1 は骨材のふるい分けに用いる網ふるいの公称寸法と実寸法（ふるい目の開き寸法）の関係である。公称 20mm の実寸法は 19mm、公称 25mm の実寸法は 26.5mm であり、実寸法としては 7.5mm もの違いがある。すなわち、公称 25mm は、公称 20mm と公称 40mm のほぼ中間的な大きさに当たる。
- (4) 現在、大粒径骨材を使用するのはダムコンクリートだけであり、一般のレディーミクストコンクリートの粗骨材最大寸法は 20mm または 25mm が主流である。本研究成果をダムコンクリートのみならず、一般のレディーミクストコンクリートにも適用可能とするためには粗骨材最大寸法を 25mm とした検討が合理的である。



図一4.1 骨材の粒度範囲と骨材物性値との関係

表一4.1 網ふるいの公称寸法と実寸法の関係

公称 寸法(mm)	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80
実寸法 (mm)	4.75	9.5	16	19	26.5	31.5	37.5	53	63	75

2. 耐凍害性に関する検討

2.1 収集した骨材の物性

今回の検討で対象とした粗骨材の一覧を表 2.1.1 に示す。表中の S54、S55、S56 と記されたデータは、昭和 54～56 年に土木研究所と各地方整備局の技術事務所等で実施された試験データであり、A～J の記号は試験実施機関名を示す。これらの試験結果の詳細は「土木研究所資料第 1838 号」⁵⁾に収録されている（このうち、G機関で実施された試験結果に関しては凍結融解試験から得られる耐久性指数の値が極端に小さく、疑問があるので今回の対象からは除外した）。これに加えて今回、平成 15 年度以降に収集した 28 種類の粗骨材を対象にして各種試験を実施した。表中に粗骨材の絶乾密度、吸水率、安定性等の物理的品質を示しているが、収集した骨材の多くは骨材の品質規格を満足しない低品質骨材であり、通常はコンクリート用骨材として使用しないものである。なお、平成 15 年度の KS は、当チームが標準で使用している良質な粗骨材である。

細骨材には、表 2.1.2 に示すものを使用した。S54、S55、S56 の試験では、各技術事務所等で試験が実施された関係上、各技術事務所で所有する細骨材が使用されている。平成 15 年度以降に収集した粗骨材を使用した配合では、全て J' の細骨材を使用した。これらの細骨材は品質規格を満足する良質なものである。

2.2 実験概要

表 2.1.1 に示す粗骨材を使用したコンクリートの凍結融解試験を実施した。コンクリート配合と試験結果を同表に示す。コンクリート配合としては普通ポルトランドセメントを使用し、W/C50～55%、目標空気量 4.5% の AE コンクリートとした。凍結融解試験は JIS A 1148 (A 法) に示す水中凍結水中融解法とし、300 サイクルまで試験を実施し、耐久性指数と質量減少率を求めた。この耐久性指数をコンクリートの耐凍害性の指標とし、この耐久性指数を簡易に推定することの可能な粗骨材の物性や試験方法について検討を行った。具体的には粗骨材の密度、吸水率、安定性および骨材の簡易凍結融解試験結果などである。

従来より、骨材の耐凍害性は安定性によって評価されてきたが、安定性とコンクリートの耐久性指数との関係は必ずしも良好でないとの報告もあり、本研究では、安定性と耐久性指数との関連を調査するとともに、安定性試験の特性について検討した。

骨材の簡易凍結融解試験とは、当研究チームが再生骨材の耐凍害性を評価するために開発した試験法⁶⁾である。図 2.2.1 にその概要を示すが、まず、安定性試験と同様に、粗骨材を 25-20mm、20-15mm、15-10mm、10-5mm の各粒子群にふるいわけると、この粒子群ごとに、1,000cc 程度のポリプロピレン製の容器（タッパ）に約 1 kg の骨材試料を入れて水で満たし、1 日 1 サイクルで冷凍庫と水槽に交互に入れることで骨材に凍結融解作用を与え、所定のサイクル終了後に、試験前に用いたふるい目から抜け落ちる粒子の割合（損失率）を測定するものである。冷凍庫には一般家庭用に市販されているフォースター冷凍庫（最低温度-18℃以下）を使用した。サイクル数は再生骨材では 10 サイクルで十分であったが、天然骨材の場合には更に多くのサイクル数が必要となり、30 サイクル（一部の試験で 50 サイクル）まで実施した。また、凍結融解による劣化を促進し、サイクル数を減じることを目的に、水に NaCl を質量比で 1～3 % 混入した塩水を用いた試験も実施した。

表－2.1.1 粗骨材の品質と配合および凍結融解試験結果 (1/2)

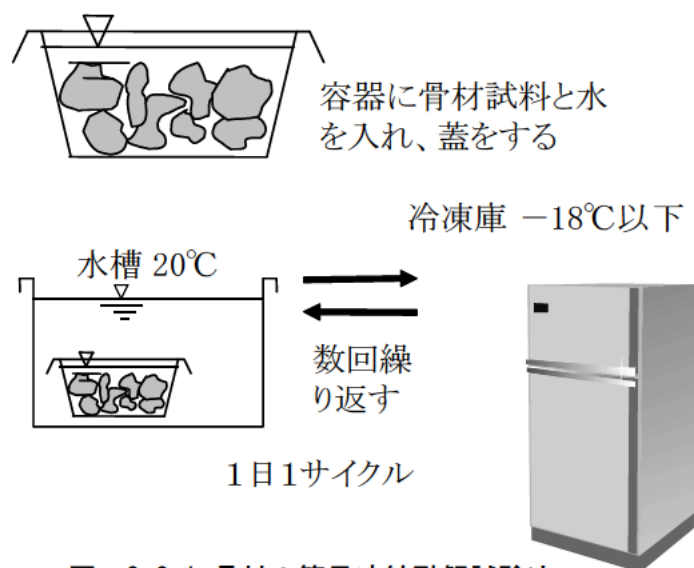
粗骨材の種類			粗骨材物性					配合				フレッシュ性状		凍結融解試験	
収集 年度	記号	岩種	最大 寸法 (mm)	密度 (g/cm ³)	吸水 率 (%)	安定性 (%)	すりへり 減量(%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	細骨 材	SL (cm)	Air (%)	耐久性 指数	質量減 少率 (%)
S54	A 1	砕石(安山岩)	25	2.54	1.6	1.7	15.6	50	48.6	130	A' 1	7.0	5.9	97	3.1
	A 2	砕石(安山岩)	25	2.25	6.6	4.4	34.5	50	38.4	145	A' 1	6.0	5.6	14	6
	A 1	砕石(安山岩)	25	2.54	1.6	1.7	15.6	50	40.3	165	A' 2	7.0	4.6	94	2
	D 1	砕石(粘板岩)	30	2.62	1.4	7.1	23.7	60	38	144	D'	6.0	4.0	80	3
	D 2	砕石(粘板岩)	30	2.62	4.3	14.5	46.6	45	35	148	D'	6.5	4.5	15	
	D 3	砕石(粘板岩)	30	2.47	4.4	13.4	28.8	60	38	157	D'	6.5	4.3	66	2.8
	E 1	玉砕(火成岩)	25	2.63	0.7	3.5	13.1	60	50	180	E'	8.0	4.1	88	5.1
	E 2	川砂利	25	2.60	1.4	32.4	27.7	60	50	180	E'	7.0	4.5	83	5.4
	E 3	砕石(堆積岩)	25	2.64	2.0	35.6	21.0	60	49.0	180	E'	7.0	4.1	67	5.2
	G 1	砕石(結晶片岩)	25	2.71	0.6	3.5	12.3	45	36	166	G'	7.5	2.8	28	
S55	G 2	砕石(花崗岩)	25	2.57	1.2	1.9	51.0	45	36.0	168	G'	6.0	4.0	18	
	J 3	砕石(粘板岩)	25	2.56	3.4	85.9	32.9	45	41.2	167	J'	6.5	4.5	10	
	A 2	砕石(安山岩)	25	2.48	4.9	6.9	25.4	50	48.6	147	A'	6.5	5.7	96	2.5
	B 1	砕石(凝灰岩)	25	2.32	9.1	41.3	14.0	50	41.0	167	B'	7.5	4.5	1	
	C 1	川砂利	25	2.63	1.4	4.6	14.2	50	42	159	C'	8.0	4.4	78	6.3
	C 2	砕石(安山岩)	25	2.57	2.3	15.4	28.7	50	42	160	C'	8.0	4.4	95	6.2
	C 3	砕石(流紋岩)	25	2.46	4.3	25.1	15.2	50	42	160	C'	7.5	4.2	33	7.4
	C 4	砕石(凝灰岩)	25	2.14	9.8	37.7	29.3	50	42	164	C'	7.5	4.2	9	6.5
	E 1	砕石(花崗岩)	25	2.66	0.5	12.5	34.8	50	41	174	E'	8.0	4.3	84	2.4
	E 2	川砂利	25	2.40	3.5	24.7	25.7	50	36.4	157	E'	6.5	4.2	54	3.5
S56	F 1	砕石(凝灰岩)	25	2.39	5.7	54.3	22.9	50	45	150	F'	6.5	4.5	14	
	G 1	砕石(安山岩)	25	2.37	6.2	1.2	50.0	50	40.5	169	G'	7.5	4.6	6	
	G 2	砕石(花崗岩)	25	2.57	1.2	1.0	54.9	50	40.5	170	G'	6.5	4.0	4	
	J 1	砕石(砂岩)	25	2.50	5.3	68.0	50.1	50	38.5	164	J'	8.0	4.2	61	1.7
	J 2	砕石(粘板岩)	25	2.57	4.1	79.6	37.8	50	40.5	170	J'	8.0	4.3	4	
	J 3	砕石(チャート)	25	2.58	1.8	10.5	38.6	50	39.5	167	J'	8.0	4.2	89	1.2
	A 1	砕石(安山岩)	25	2.54	4.1	1.6	18.9	50	47.7	144	A'	4.5	4.3	91	1.9
	A 2	砕石(安山岩)	25	2.48	4.9	6.9	25.4	50	46.6	156	A'	4.5	4.0	94	2.5
	A 3	砕石(安山岩)	25	2.25	6.6	4.4	34.5	50	43.2	152	A'	5.0	3.9	13	1.5
	B 1	砕石(安山岩)	25	2.52	4.3	28.8	14.5	50	42.7	177	B'	7.0	4.5	3	
S56	B 2	砕石(安山岩)	25	2.35	10.8	75.3	30.9	50	39.4	187	B'	7.5	4.2	10	
	C 1	砕石(安山岩)	25	2.67	0.8	25.5	24.7	50	44.5	165	C'	6.5	4.3	97	4.6
	C 2	砕石(チャート)	25	2.43	5.1	6.3	16.1	50	42.5	169	C'	7.5	4.1	69	8
	C 3	砕石(流紋岩)	25	2.50	3.5	8.4	14.8	50	43.5	165	C'	6.5	4.1	17	
	C 4	砕石(安山岩)	25	2.41	5.3	15.5	26.6	50	42	175	C'	6.0	4.2	82	12
	C 5	砕石(玉砕)	25	2.63	1.4	4.6	13.1	50	42.5	165	C'	7.5	4.0	86	5.5
	E 1	砕石(流紋岩)	25	2.34	6.6	43.7	22.9	50	42.2	170	E'	7.0	4.4	28	
	F 1	砕石(硬質砂岩)	20	2.69	1.1	9.6	17.7	50	43	169	F'	8.0	4.0	100	3.7
	F 2	砕石(安山岩)	20	2.62	2.1	11.2	26.2	50	43	169	F'	6.5	4.5	100	4.2
	F 3	砕石(安山岩)	25	2.46	3.9	4.5	16.6	50	43	166	F'	6.0	4.2	100	3.6
S56	F 4	砕石(凝灰岩)	30	2.39	5.5	14.5	23.0	50	45.0	168	F'	8.0	4.3	24	
	F 5	砕石(凝灰岩)	25	2.46	4.1	8.3	15.4	50	43	163	F'	6.0	4.0	100	4.4
	F 6	砕石(凝灰岩)	15	2.36	1.9	6.1	42.1	50	41	170	F'	6.0	4.4	57	
	G 1	砕石(粘板岩)	25	2.57	2.3	33.8	66.6	50	40.5	167	G'	7.0	4.1	48	
	G 2	砕石(安山岩)	25	2.50	4.0	8.3	35.6	50	40.5	167	G'	7.0	4.0	59	
	G 3	砕石(安山岩)	25	2.32	6.4	7.7	56.1	50	40.5	160	G'	6.0	4.4	34	
	G 4	砕石(花崗岩)	25	2.58	0.9	7.8	52.4	50	40.5	170	G'	7.0	4.4	4	
	G 5	砕石(結晶片岩)	25	2.71	0.5	3.4	11.4	60	42.5	166	G'	7.0	4.3	75	
	G 6	砕石(花崗岩)	25	2.58	0.8	5.4	50.7	60	42.5	169	G'	6.0	4.4	37	9.5
	J 1	砕石(砂岩)	25	2.51	4.2	83.0	43.4	50	38.5	164	J'	9.0	4.5	71	
H15	J 2	砕石(粘板岩)	25	2.57	4.1	79.6	37.8	50	40.5	170	J'	4.5	4.1	7	2.5
	J 3	砕石(石灰岩)	25	2.73	0.8	8.1	22.3	50	39.5	155	J'	6.0	4.1	65	2.1
	KS	砕石(砂岩)	20	2.65	0.50	3.3	10.7	55	45	165	J''	17.8	4.7	93	1.6
	TZ	砕石(砂岩)	25	2.45	3.33	56.4	27.7	55	45	165	J''	10.1	5.7	85	2.2
H16	TO	砕石(安山岩)	25	2.47	2.74	72.9	33.3	55	45	165	J''	17.9	6.8	85	1.8
	DD	砕石(花崗岩)	25	2.53	1.47	23.1	10.8	55	45	165	J''	10.0	4.2	62	2.6
	TW	川砂利	25	2.45	4.21	19.2	20.1	55	46	165	J''	18.0	6.0	80	1.8
	MM	川砂利	25	2.45	3.37	12.9	17.2	55	46	165	J''	18.6	5.6	44	1.7
H18	YH	川砂利(玉砕)	25	2.48	4.39	19.4	22.4	55	46	165	J''	10.9	5.1	74	1.6
	OT	砕石(頁岩)	25	2.59	1.54	32.34		55	46	165	J''	7.5	4.3	95	2.6
	KK	川砂利	25	2.53	1.90	10.61		55	46	165	J''	18.5	6.0	56	1.7
	KT	川砂利	25	2.50	2.63	8.99		55	46	165	J''	18.6	6.0	36	1.8
H18	SG	川砂利	20	2.59	1.05	1.90		55	46	145	J''	7.0	5.2	94	1.5

表－2.1.1 粗骨材の品質と配合および凍結融解試験結果 (2/2)

粗骨材の種類			粗骨材物性					配合			フレッシュ性状		凍結融解試験		
収集 年度	記号	岩種	最大 寸法 (mm)	密度 (g/cm ³)	吸水 率 (%)	安定性 (%)	すりへり 減量(%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	細骨 材	SL (cm)	Air (%)	耐久性 指数	質量減 少率 (%)
H19	IT A	川砂利	25	2.40	3.98	24.95		55	46	165	J [〃]	18.1	5.6	15	1.5
	IT B	川砂利	25	2.41	3.78	13.61		55	46	165	J [〃]	13.0	5.6	49	1.3
	MG A	碎石(安山岩)	15	2.65	2.67	14.95		55	46	165	J [〃]	6.0	4.7	90	1.4
	FS A	碎石(安山岩)	25	2.29	6.53	56.46		55	46	165	J [〃]	8.7	5.6	9	1.7
	FS B1	碎石(安山岩)	25	2.48	4.38	45.27		55	46	165	J [〃]	6.9	3.6	91	1.4
	FS B2	碎石(玄武岩系 凝灰岩)	25	2.28	7.17	71.59		55	46	165	J [〃]	9.2	4.5	88	1.8
	FS B3	碎石(凝灰岩)	25	2.65	2.46	28.95		55	46	165	J [〃]	7.8	4.4	90	2.4
	AT A	川砂利	25	2.39	3.72	29.31		55	46	165	J [〃]	15.3	5.2	16	2
	AT B	碎石(安山岩)	25	2.63	1.66	4.13		55	46	165	J [〃]	10.2	6.3	90	1.5
	AT C	碎石(凝灰岩質 安山岩)	25	2.29	5.58	53.39		55	46	165	J [〃]	9.0	5.6	8	2.9
	YG A	川砂利	25	2.53	2.66	14.21		55	46	165	J [〃]	17.1	6.0	32	
	YG B	川砂利	25	2.47	3.22	16.50		55	46	165	J [〃]	17.5	5.4	7	
	AM A	碎石(安山岩)	25	2.25	6.43	28.50		55	46	165	J [〃]	11.0	5.2	12	2.19
SP	碎石(風化砂岩)	25	2.37	4.96	89.85		55	46	165	J [〃]	10.8	5.9	65	0.48	
H20	IS I	碎石 (石英安山岩)	25	2.40	4.30	55.18		55	46	165	J [〃]	5.5	4.6	80	2.2
	IS U	碎石 (石英安山岩)	25	2.40	4.30	32.35		55	46	165	J [〃]	5.2	5.1	67	1.9
	IS G	碎石 (石英安山岩)	25	2.44	3.89	54.15		55	46	165	J [〃]	5.2	4.4	74	1.2

表－2.1.2 細骨材の品質

	種類	密度(g/cm ³)	吸水率(%)	安定性(%)
A'	海砂	2.75	1.2	0.3
B'	川砂	2.56	2.5	2.9
C'	川砂	2.55	2.1	2.4
D'	川砂	2.57	3.0	2.6
E'	混合	2.57	1.2	2.5
F'	川砂	2.52	1.7	1.4
J'	川砂	2.63	2.0	4.7
J''	川砂	2.56	1.6	3.5



図－2.2.1 骨材の簡易凍結融解試験法

2.3 安定性試験に関する検討

2.3.1 安定性と耐久性指数の関係

骨材の耐凍害性の評価は、JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」の結果によって行われるのが一般的である。表 2.1.1 に示す各種粗骨材の安定性と、これらの粗骨材を使用したコンクリートの耐久性指数との関係を図 2.3.1 に示す。コンクリートの配合は 2.2 に示したとおりで、W/C50～55%の AE コンクリートとし、細骨材には良質な川砂を使用した。耐久性指数の大小によらず、安定性の値は広範囲に分布する結果となり、両者の間に良好な対応関係を見ることはできなかった。

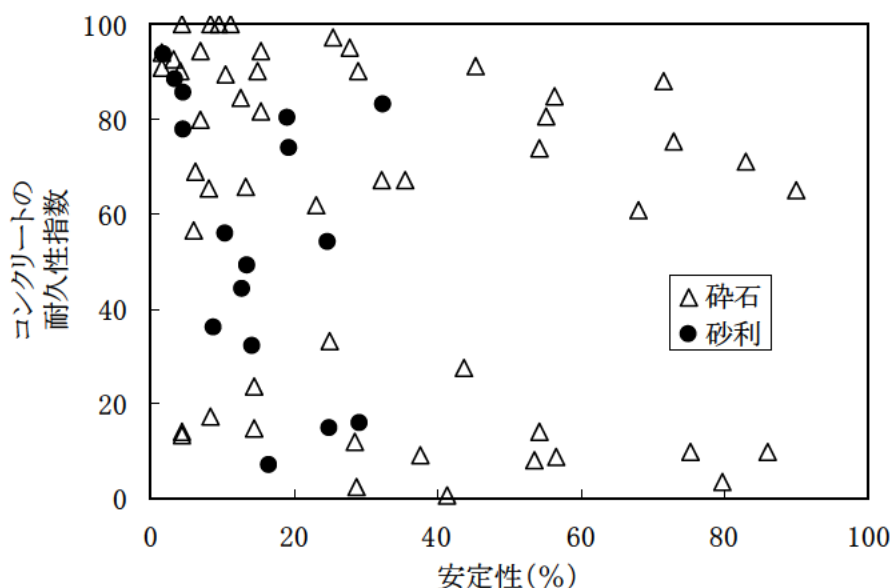


図-2.3.1 安定性と耐久性指数の関係

2.3.2 安定性試験における結晶圧の作用機構の検討

安定性試験は硫酸ナトリウムの結晶圧による破壊作用を応用したものである。この試験では、骨材試料を硫酸ナトリウム溶液と乾燥炉とに交互に入れるが、その間の硫酸ナトリウムの変化をみると、まず溶液中で芒硝と呼ばれる硫酸ナトリウム 10 水和物($\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)が結晶化する。これを乾燥炉に入れると水が分離し、粉状の無水物(NaSO_4)に変化する。硫酸ナトリウムの結晶圧が作用する時期としては 10 水和物が形成される溶液中であるとする説と、無水物に変化する乾燥中であるとする説の双方があり、その機構が解明されているとは言い難い⁷⁾。そこで、どの時点で結晶圧が作用するかについて実験を行った⁸⁾。

表 2.3.1 に示す3種類のレンガと岩片（玄武岩）を用いて、安定性試験を実施し、硫酸ナトリウム溶液浸漬後と乾燥後の長さ変化を測定した。安定性試験の条件としては、岩片の試験は JIS A 1122 に準拠したが、レンガについては寸法が大きいことから浸漬期間2日間、乾燥期間2日間とした。長さ変化の測定はレンガについてはダイヤルゲージ法(JIS A 1129-3)、岩片についてはコンタクトゲージ法(JIS A 1129-2)によって測定した。なお、他の条件は同一に硫酸ナトリウム溶液ではなく水に浸漬する条件でも試験を実施した。

レンガの長さ変化測定結果を図 2.3.2 に示す。硫酸ナトリウムに浸漬(-Na)したレンガAは2サイクル目

の溶液中で崩壊し、レンガCは7サイクル目からひび割れが発生し、そのひび割れは浸漬する毎に拡大し、9サイクル目の溶液中で崩壊した（写真 2.3.1）。レンガBはスケーリング量は大きかったが10サイクルまで分裂はしなかった。図 2.3.2 より硫酸ナトリウムに浸漬した条件では浸漬後の長さ変化が大きく、乾燥後は逆に小さくなる傾向を示した。水に浸漬(-W)したケースでは劣化は認められなかった。

岩片の実験結果を図 2.3.3、写真 2.3.2 に示す。硫酸ナトリウム溶液に浸漬した岩片では9サイクル目から岩片のほぼ中央にひび割れが確認され、溶液に浸漬する毎に膨張し、乾燥後はやや戻る挙動を繰り返した。水に浸漬した岩片ではひび割れは生じず、逆に僅かに収縮する挙動を示した。

以上の結果から硫酸ナトリウムの結晶圧は溶液中で作用している可能性が高いと考えられる。

表-2.3.1 レンガ、岩片の物性と形状

	大きさ(mm)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
レンガA	56×65×200	0.7	85.6
レンガB	40×60×200	1.89	8.2
レンガC	50×50×200	2.06	6.1
岩片D	約20×60×140	2.86	0.3

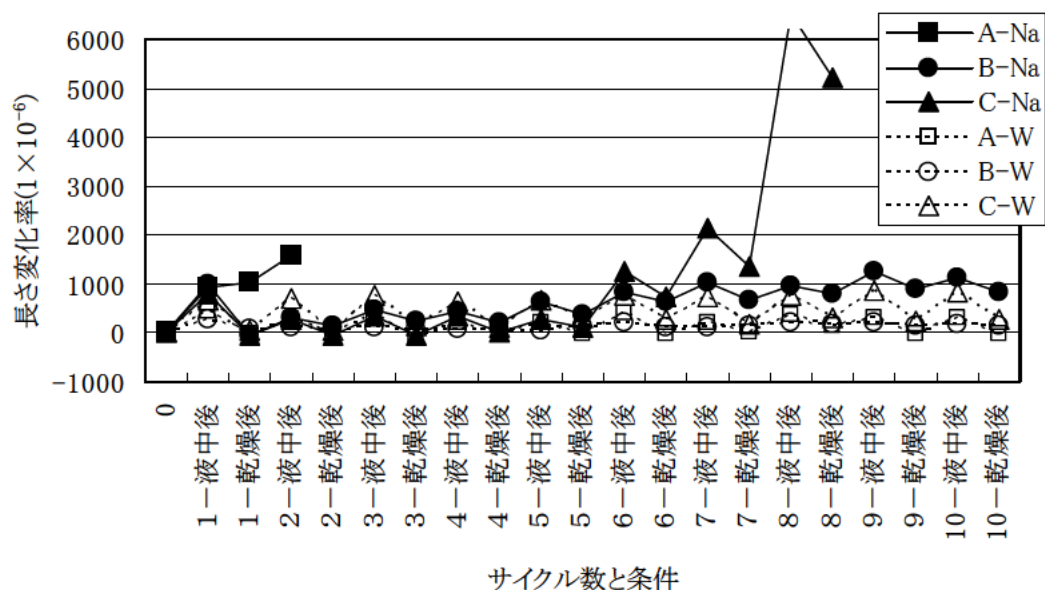


図-2.3.2 レンガを用いた試験結果



写真-2.3.1 レンガ B-Na(上) と C-Na(下)

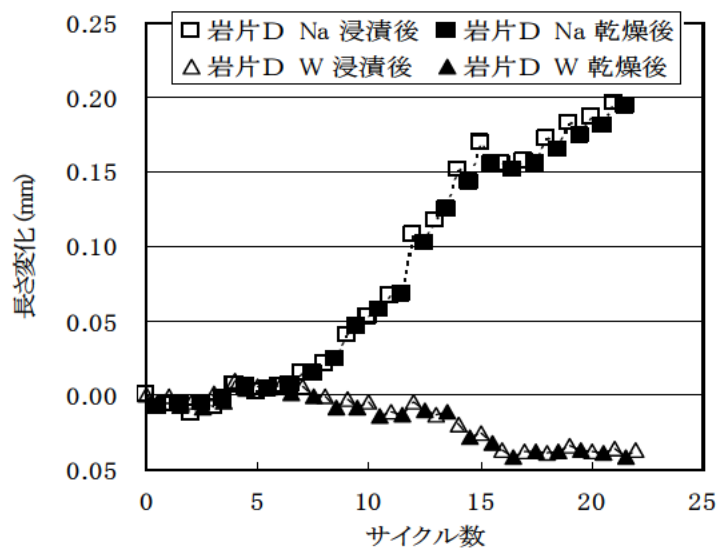


図-2.3.3 岩片を用いた試験結果

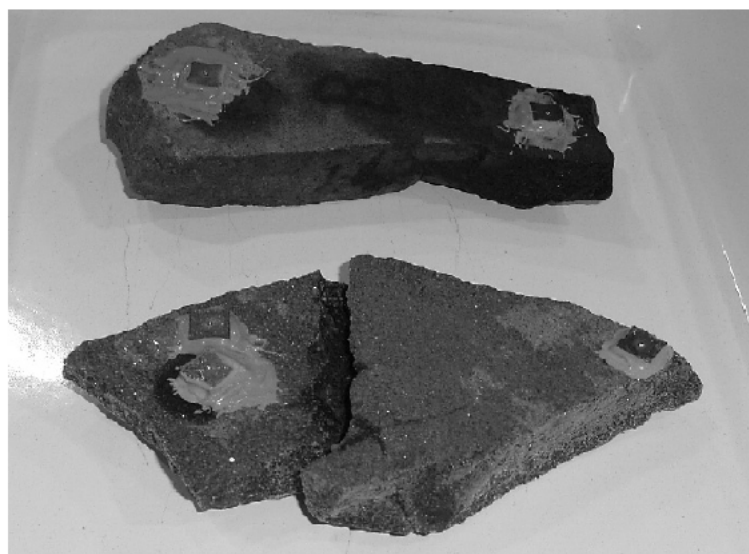


写真-2.3.2 岩片 D-W(上) と D-Na(下、試験終了時)

2.3.2 安定性試験結果の変動要因の検討

2.3.1 の検討結果から、安定性試験における結晶圧の発生時期は溶液中である可能性が高まったことから、溶液中での結晶化に影響を与えるであろう溶液の温度や蒸発条件が安定性試験結果に与える影響についての実験を行った⁸⁾。実験条件は表 2.3.2 に示す 3 条件とし、15 リットルのポリバケツに 4 リットルの硫酸ナトリウム溶液を入れ、実験Ⅰはバケツに蓋をして密閉状態としたケース、実験Ⅱは蓋を外して溶液からの水分の蒸発を許容したケース、実験Ⅲは温度を 25℃として蓋をしたケースとした。その他の実験条件は JIS A 1122 に従うこととし、骨材試料には 2015 の安山岩（密度 2.50g/cm³、吸水率 3.91%）を用いた。

表 2.3.2 に示すように、環境条件を変えたことで、溶液の密度やバケツの底に析出する硫酸ナトリウム 10 水和物の結晶の量が異なっており、溶液の密度はケースⅠとⅡで同程度であるが、水分の蒸発を許容したケースⅡでは結晶の析出量が多くなった。ケースⅢでは溶液の密度が高くなった分だけ、結晶の析出は少なかった。もし仮に、結晶圧が乾燥時に生じるとするならば、溶液濃度が最も高いケースⅢで骨材の損失率が大きくなると考えられ、逆に溶液中で結晶圧が作用するのであれば結晶の析出量が最も多いケースⅡで骨材損失率が大きくなると考えられる。結果は表 2.3.2 に示すようにケースⅡの骨材損失率が最も大きく、溶液中の硫酸ナトリウム 10 水和物の結晶の析出によって骨材に圧力が作用することを裏付ける結果となった。

実験ケースⅠ、Ⅱ、Ⅲの損失質量百分率は、ケースⅡで最も大きく、ケースⅢで最も小さく、その差は 2 倍以上に及んだ。このことから、安定性試験では、浸漬中の僅かな温度の違いや、溶液からの水分蒸発の違い等が、試験結果に比較的大きな影響を与えることが明らかとなった。

表－2.3.2 浸漬条件を変えた安定性試験の条件と結果

	条件	液中の 結晶の量	液の密度 (g/cm ³)	損失質量 百分率(%)
Ⅰ	20℃蓋あり	中	1.133	16.5
Ⅱ	20℃蓋なし	多	1.124	26.3
Ⅲ	25℃蓋あり	少	1.164	11.2

2.4 簡易凍結融解試験の試験条件に関する検討

2.3 の結果から、安定性試験結果はその粗骨材を使用したコンクリートの耐久性指数と必ずしも良い対応を示さず、また、試験条件の僅かな変化で結果が変動しやすい試験法であることが明らかとなった。このため、安定性試験に替わる簡易な試験法としての簡易凍結融解試験の適用について検討を行った。

2.4.1 繰り返し回数の検討

粗骨材の簡易凍結融解試験法では、凍結融解の繰り返し回数を適切に設定しなければならない。そこで、繰り返し回数の影響を把握する目的で、繰り返し回数を、真水を使用した条件では 50 回まで、塩水を使用した条件では 30 回まで実施した。

粗骨材の簡易凍結融解試験における繰り返し回数と損失率の関係を図 2.4.1（真水を使用した場合）と図 2.4.2（1%の塩水を使用した場合）に示す。真水を使用した場合には 50 サイクルまでは、繰り返し回数に

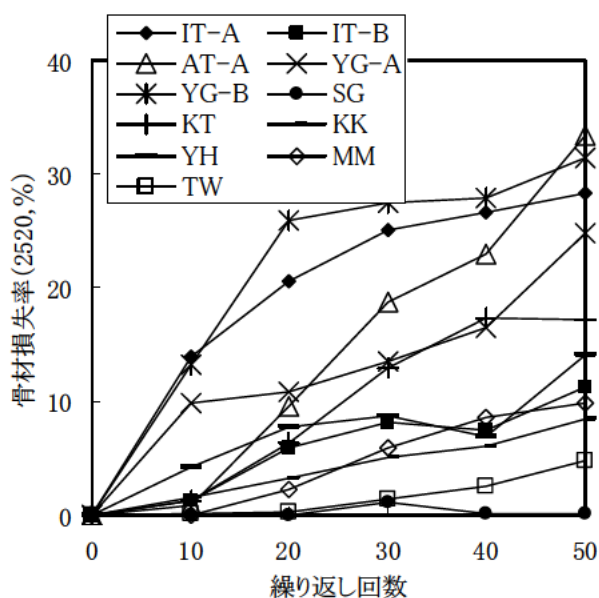


図-2.4.1 繰返し回数と損失率(真水)

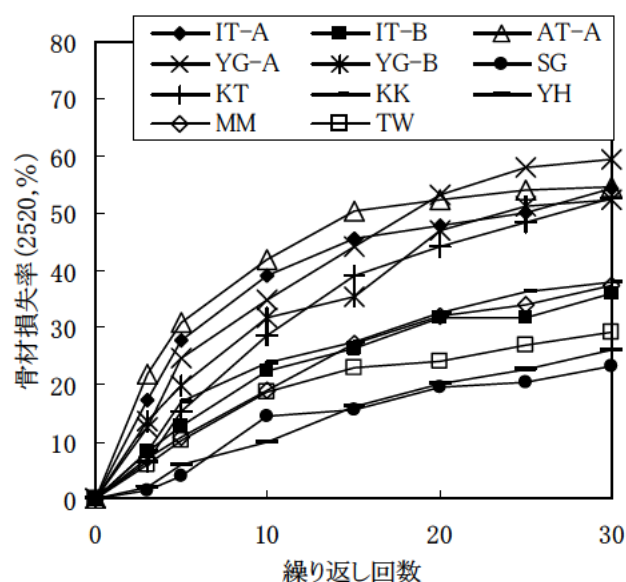


図-2.4.2 繰返し回数と損失率(塩水1%)

概ね比例して損失率が増加する傾向を示しているが、各試料の損失率の大小関係は、30 サイクル以降で安定しているようであり、30 サイクル程度の繰返し回数が必要であると考えられる。一方、1%の塩水を使用した場合の骨材の劣化は、真水に比較して大幅に促進されており、塩水の繰返し回数3回の結果は、真水の30回の結果に概ね対応する結果となった。繰返し回数10回以降では、コンクリートの耐久性指数では94を示したSGも損失率が増加する傾向を示し、また、損失率の増加率は漸減する傾向を示した。各試料の損失率の大小関係は3回以降ではほぼ安定していることから、繰返し回数は3回で良いと考えられる。

2.4.2 塩水濃度の検討

塩水を用いる場合の塩水濃度は、1，2，3%の3水準で試験を行った。図 2.4.3 は、塩水濃度を1，2，3%としたときの簡易凍結融解試験結果を比較したものである（繰返し回数5回）。塩水濃度を変えても、損失率の値に優位な差は見られないことから、塩水濃度は1%で良いと考えられる。

2.4.3 試験を行う粗骨材粒子の大きさ

図 1.2.1 に示すように、コンクリートの耐凍害性に与える影響は細骨材よりも粗骨材のほうが大きい。また、2.7 節で凍結融解試験後のコンクリート供試体の観察を行っているが、凍結融解によって骨材に生じるひび割れは比較的大きな骨材粒子から発生していることが伺える。これらのことから、粗骨材がコンクリートの耐凍害性に与える

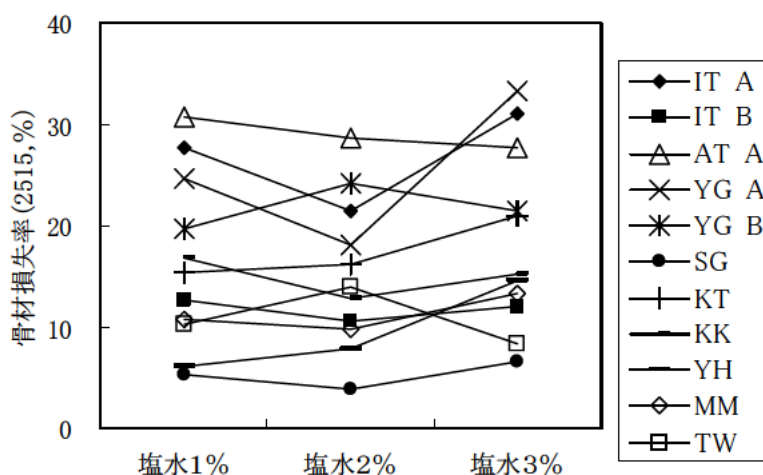
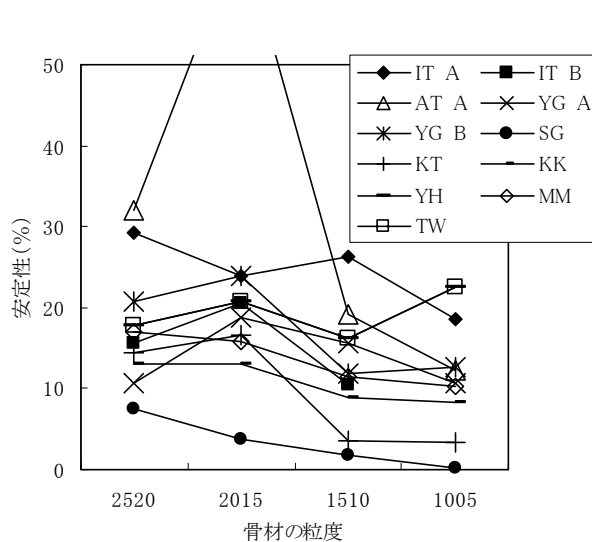
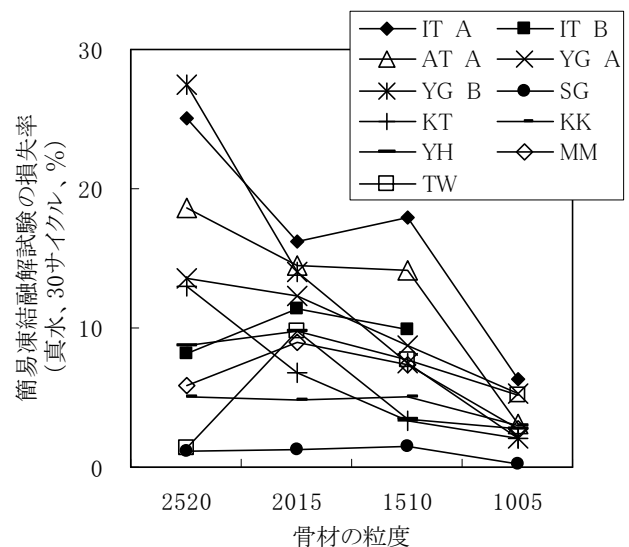


図-2.4.3 塩水濃度と損失率の関係



図－2.4.4 粒度と安定性の関係



図－2.4.5 粒度と簡易凍結融解試験の損失率の関係

影響は、粗骨材中でもより大きな粒子の品質が影響することが予想される。

図 2.4.4 は、各骨材の粒子の大きさ（粒度）と安定性の関係を示したものであり、安定性は粒子が大きいものほど大きくなる傾向を示した。図 2.4.5 は簡易凍結融解試験結果（真水、30 サイクル）について、粒度の大きさとの関係を見たものであり、こちらも、粒子が大きいほど損失率が大きくなる傾向を示した。これらの結果からも大粒径の骨材粒子の影響が大きいことが予想される。このことより、安定性や簡易凍結融解試験の損失率に関しては、全粒子の平均値の他に大粒径の損失率も算出した。大粒径とは上位 2 位までの粒径の平均値とした。すなわち 2505 の骨材であれば、2520、2015、2510、1005 の粒子群に分けて試験を行うが、このうち 2520 と 2015 の粒子群の結果から得られる損失率である。

2.5 砂利の評価

2.5.1 簡易凍結融解試験結果の適用範囲

簡易凍結融解試験結果のうち、真水を使用し、繰り返し回数を 30 回とした場合の大粒径の損失率と、コンクリートの耐久性指数との関係を図 2.5.1 に示す。図では、骨材の種類を砂利と碎石とに分けて示している。この図を図 2.3.1（安定性と耐久性指数との関係）と比較すると、砂利に関しては対応関係が非常に良くなっていることが分かる。その反面、碎石に関しては、良好な関係は得られなかった。

砂利と碎石の違いに関する考察は 2.7 で詳述するが、端的に言えば、碎石はほぼ同一の岩種・品質の集合体であるのに対して、砂利は様々な品質の粒子の集合体である。砂利コンクリートの場合は品質の悪い粒子から劣化が発生することから、骨材試料中にどれだけ悪い粒子が混じっているかを判定する試験法が適していると考えられ、今回提案した簡易凍結融解試験法はその目的に適った試験法と考えられる。また、安定性試験に比較して、試験方法が単純で、また、実際の凍害と同様に水の凍結による氷結圧を利用している点で、安定性試験よりも優れていると考えられる。

従って、次項では、砂利に絞っての検討結果を述べる。一方、碎石の評価に関しては、2.6 節で詳述する。

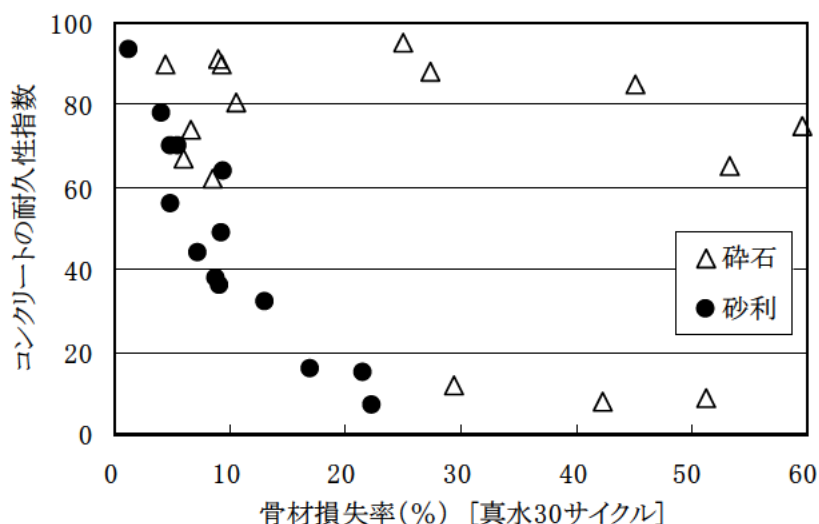


図-2.5.1 簡易凍結融解試験結果（真水 30 サイクル、大粒径）と耐久性指数の関係

2.5.2 簡易凍結融解試験による砂利の評価

砂利粗骨材の絶乾密度、吸水率、安定性とコンクリート耐久性指数との関係を図 2.5.2～2.5.4 に示す。これらの図より、いずれの骨材物性とも、耐久性指数は良好な対応関係を示さなかった。また、各図には一般的な骨材の品質規格値を点線で示しているが、規格を満足している範囲においても、コンクリートの耐久性指数が 60 を下回るデータが見られた。

砂利骨材は様々な物性の粒子の集合体であり、その中に低品質な粒子がどの程度の割合で混入しているかが重要と考えられる。図 2.5.2～2.5.4 に示した物性のうち、密度と吸水率は、試験の対象とする骨材量 (2.5kg) の平均的な値として求められるので、これらの値から低品質骨材の混入割合を推定することは困難である。これに対して安定性試験は、低品質骨材の混入割合の推定には適した試験法のように思える。ただし、2.3 で述べたように、試験条件の僅かな違いで試験結果が変動しやすいことや、コンクリート中の骨材に作用する水の氷結圧と硫酸ナトリウムの結晶圧との対応関係に関しては、未だに不明な点が多い。そこで、今回の検討では、2.2 および 2.4 で述べた簡易凍結融解試験の適用性について検討した⁹⁾。

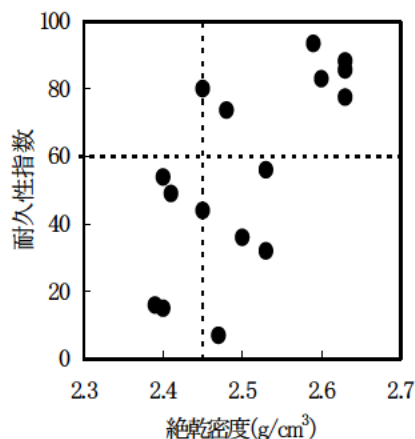


図-2.5.2 絶乾密度と耐久性指数の関係(砂利)

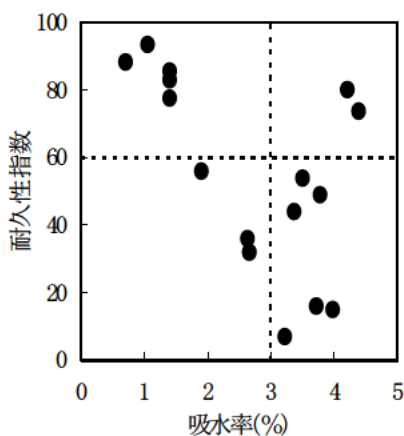


図-2.5.3 吸水率と耐久性指数の関係(砂利)

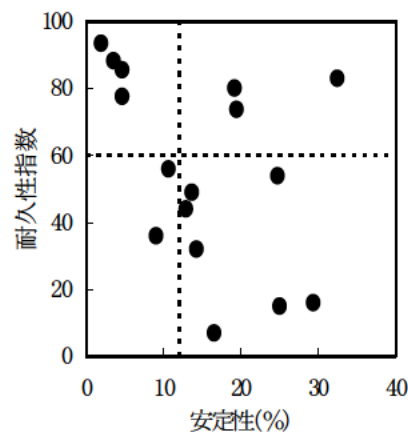


図-2.5.4 安定性と耐久性指数の関係(砂利)

表 2.5.1 安定性と簡易凍結融解試験結果

岩種	安定性(%)		簡易凍結融解試験 損失率(%)		
			真水 (30サイクル)		1%塩水 (3サイクル)
	全粒度	大粒径	全粒径	大粒径	大粒径
IT-A	25.0	27.1	17.0	21.5	17.3
IT-B	13.6	17.4	9.6	9.3	8.3
AT-A	29.3	45.8	12.4	17.0	21.7
YG-A	14.2	14.1	10.1	13.0	12.4
YM-B	16.5	22.0	13.6	22.4	13.6
SG	2.3	5.6	1.1	1.2	1.4
KT	9.0	15.8	5.7	9.1	6.5
KK	10.6	13.0	4.4	4.9	8.3
YH	19.4	19.7	5.1	9.4	2.0
MG	12.9	16.4	6.1	7.3	7.1
TW	19.1	19.0	5.9	4.9	5.9
KK(1505)	8.6	8.6	4.0	4.0	—
MG(1505)	11.0	11.0	5.5	5.5	—
AT-A(1505)	15.8	15.8	8.7	8.7	—

簡易凍結融解試験は表 2.1.1.に示す H15～H20 に収集した 11 種類の砂利骨材を対象とした。また、3 種類の砂利骨材 (KK,MM,AT-A) については粗骨材最大寸を 15mm としたコンクリートの耐久性指数と 15-5mm の損失率との関係についても検討した。試験結果を表 2.5.1 に示す。

全粒径の安定性と耐久性指数の関係を図 2.5.5 に、大粒径の安定性と耐久性指数の関係を図 2.5.6 に示す。また、粗骨材の簡易凍結融解試験結果についても同様に、全粒径の値と耐久性指数の関係を図 2.5.7 に、大粒径の値と耐久性指数の関係を図 2.5.8 に示す。これらの図より、耐久性指数との関係は、安定性の結果よりも簡易凍結融解試験の結果のほうが良い対応を示した。また、全粒径よりも大粒径のほうが耐久性指数との対応関係が良好であった。なお、いずれの図でも、最大粗骨材寸法の違いによる傾向の違いは見られなかった。

図 2.5.9 は、1 %塩水を使用した 3 サイクルの大粒径の損失率とコンクリートの耐久性指数との関係である。図 2.5.8 に比較して決定係数はやや低いものの、良い対応関係を示した。また、図 2.5.10 は真水を使用するの 30 サイクルの結果と、1 %塩水を使用するの 3 サイクルの結果を比較した結果であり、双方の値は概ね良く対応する結果であった。

図 2.5.11 は、2520 粒子に関して、安定性試験、真水 30 サイクルの試験、1 %塩水 3 サイクルの試験、および 1 %塩水 10 サイクルの試験結果について、損失した粒子の粒度分布を示したものである。これによると、真水 30 サイクルの場合の損失粒子は大きい粒径ほど多い傾向を示しており、1 %塩水 3 サイクルの結果もそれに近いものであった。これに対して安定性試験の結果は、2.5mm 以下の粒子の占める割合が高い傾向にあり、水の凍結融解による劣化とは異なる傾向を示した。なお、1 %塩水の場合でもサイクル数を 10 回に増やした結果では、安定性と同様に 2.5mm 以下の粒子の占める割合が増える傾向にあった。

これらの結果から、安定性試験や繰り返し回数を増やした塩水の試験では、劣化の状態が真水の凍結融解と異ると考えられ、1 %塩水を使用するの試験は、繰り返し回数を 3 回程度とするのが妥当と考えられる。

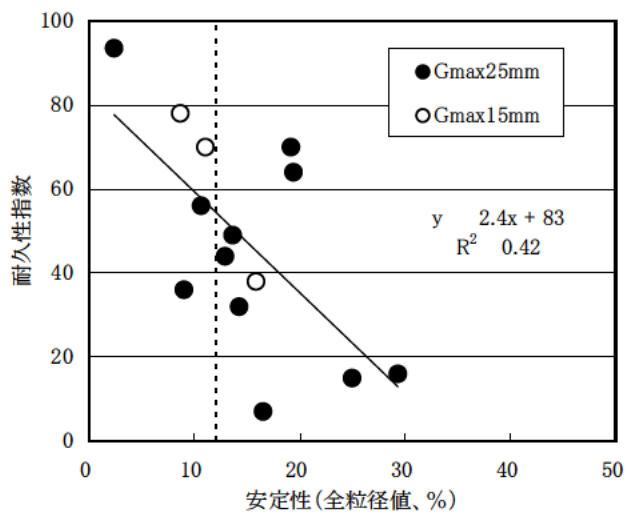


図-2.5.5 安定性(全粒径)と耐久性指数

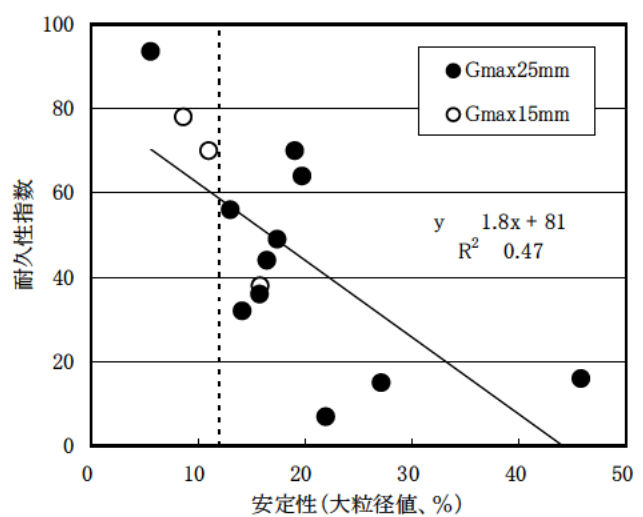


図-2.5.6 安定性(大粒径)と耐久性指数

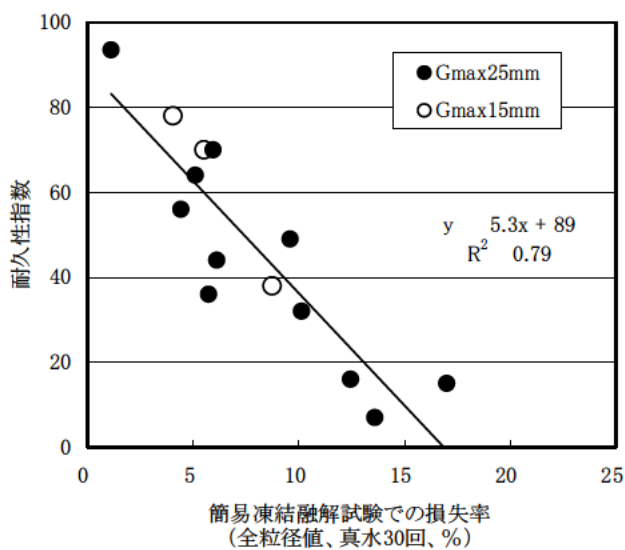


図-2.5.7 簡易凍結融解試験結果(全粒径)と耐久性指数

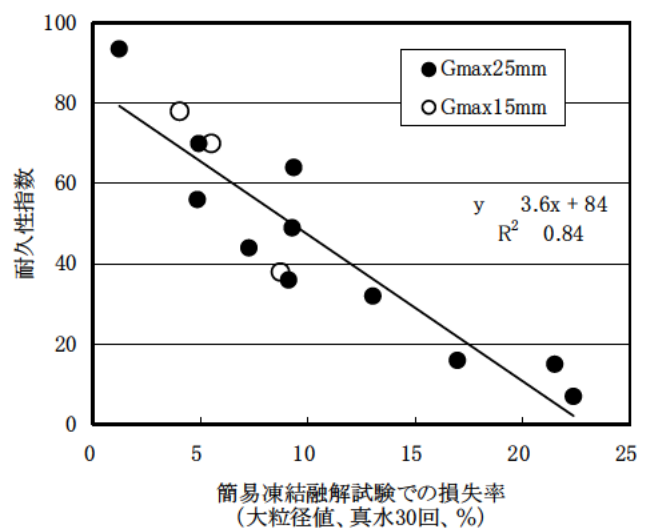


図-2.5.8 簡易凍結融解試験結果(大粒径)と耐久性指数

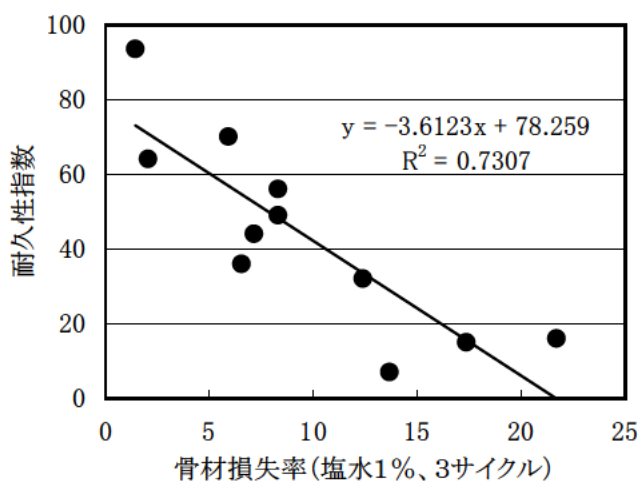


図-2.5.9 簡易凍結融解試験結果
(1%塩水3サイクル、大粒径)と耐久性指数

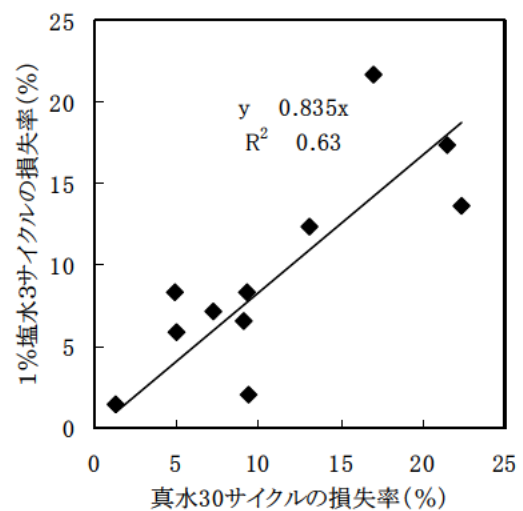


図-2.5.10 真水30サイクルと
1%塩水3サイクルの比較

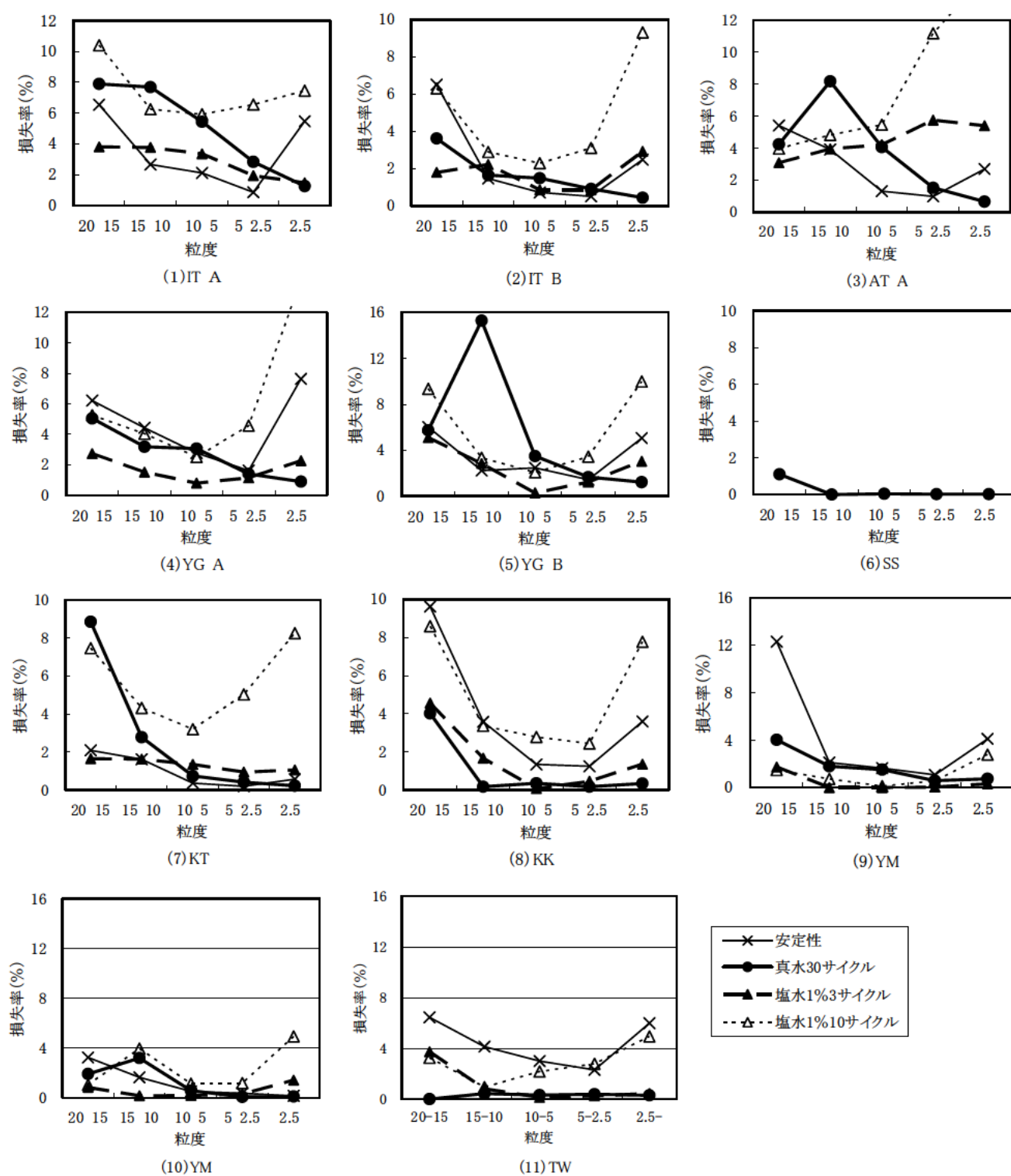


図-2.5.11 2520骨材に対する損失粒子の粒度分布の比較

2.6 碎石の評価

2.6.1 碎石に対する簡易凍結融解試験の適用性

簡易凍結融解試験結果（損失率）とコンクリートの耐久性指数との関係は図 2.5.1 に示すとおりであり、碎石に関しては、損失率と耐久性指数との間に良好な対応関係は認められず、損失率が大い（骨材では劣化する）にも拘わらず耐久性指数が高い（コンクリートとしては劣化しない）ものも認められた。

このメカニズムについて考察する。図 2.6.1 は 25-20mm 粒子に対して簡易凍結融解試験を実施し、損失した 20mm 以下の粒度分布を調査したものである。これによると、砂利では粒子の大きさが小さくなるほど質量分率が低くなる傾向を示している。これに対して碎石の場合は、砂利と同様の傾向を示すものと、小さな粒子の質量分率が比較的高いもの（図 2.6.1(2)の点線のデータ）が認められた。前者の劣化は、骨材が分裂的に破壊する現象、後者は、骨材の表面からのスケーリング的な劣化（細粒劣化）が生じていることが予想される。

砂利と碎石について、これらの劣化メカニズムを整理すると図 2.6.2 のようになると考えられる。すなわち、流水作用によって表面が研磨された砂利の場合は、一部の品質の悪い粒子が粒子内部から分割されるような劣化を示すのに対して、均質な岩石から破碎作用によって製造される碎石の場合は、品質がよほど悪い場合には砂利のように粒子内部から破壊するものの、それ以外の場合には、粒子表面に破碎時の微細な欠陥を有する可能性と、形状が角張っていることと相まって、骨材表面から細粒劣化が進行することが予想される。そして、このような細粒劣化は、個々の劣化の規模が小さいために、周囲をペーストで覆われたコンクリート中では、発生しにくいものと考えられる。

この細粒劣化が卓越する碎石（図 2.6.1(2)の点線）をその他の碎石と分けて示すと、損失率と耐久性指数との関係図は図 2.6.3 のようになり、損失率が大きく耐久性指数の高い領域のデータがほとんどであった。すなわち、細粒劣化が確認されない碎石であれば、砂利とほぼ同じ判定手法で、耐凍害性を評価できる可能性がある。しかしながら、細粒劣化が生じる碎石の耐凍害性の評価を簡易凍結融解試験で行うことは困難と考えられる。

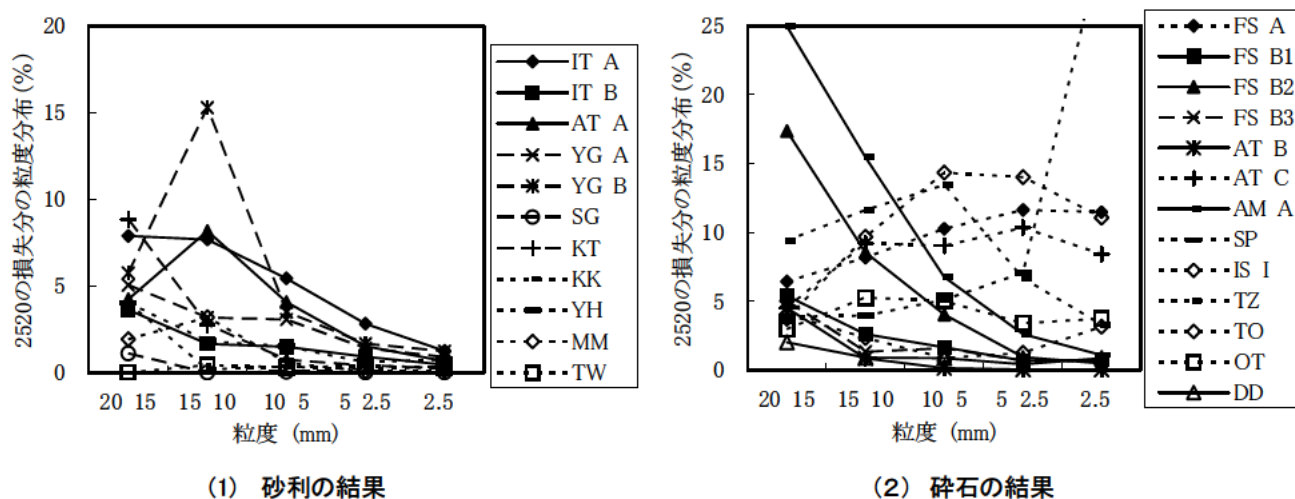


図-2.6.1 簡易凍結融解試験における損失分の粒度分布

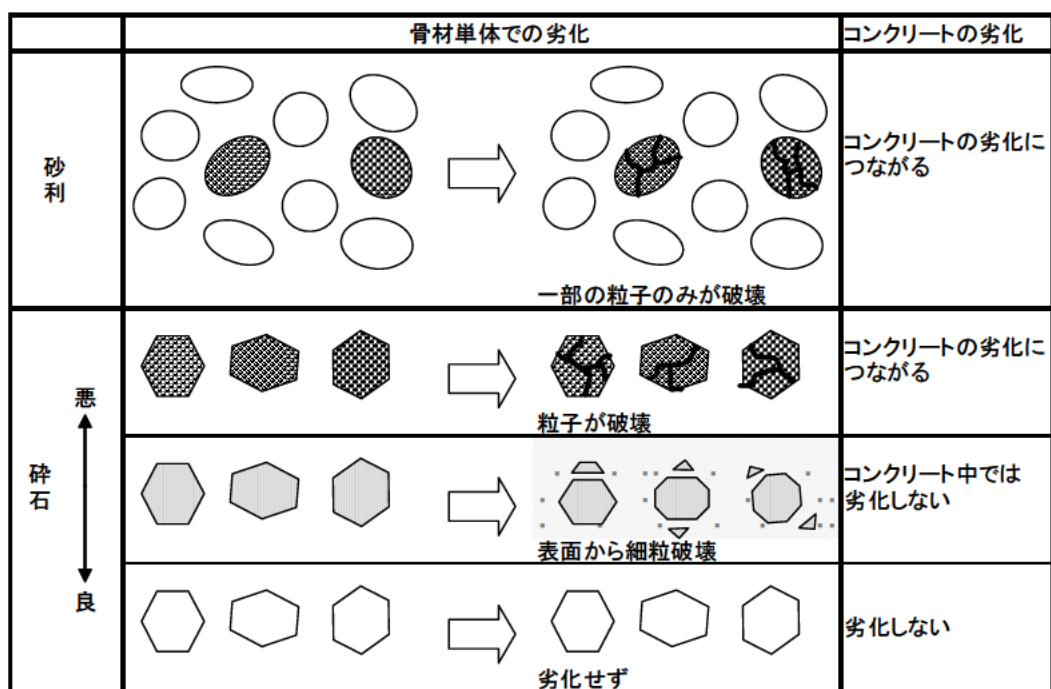


図-2.6.2 骨材単体の劣化とコンクリートの劣化の関係(イメージ図)

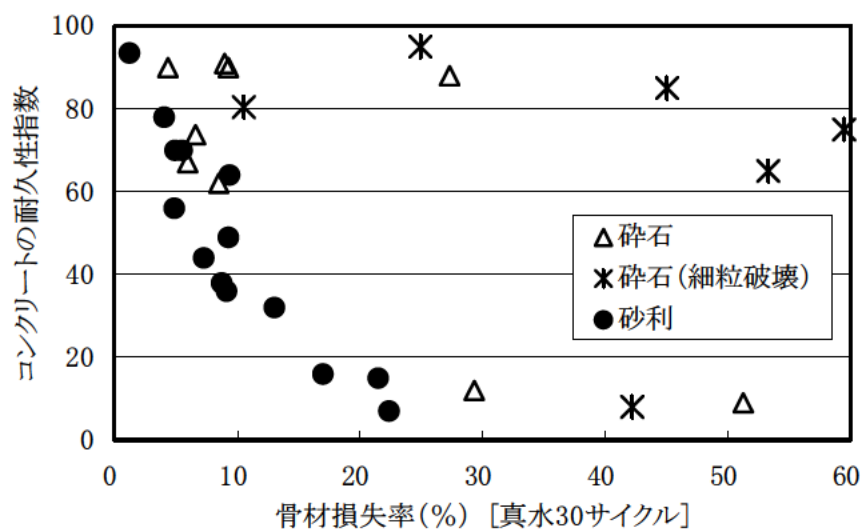


図-2.6.3 簡易凍結融解試験結果(真水30サイクル、大粒径)と耐久性指数の関係

2.6.2 砕石の密度・吸水率による評価

砕石は大きな岩塊を砕いて製造するために、砂利に比較して骨材粒子間の品質の変動は小さい。このため、試験対象試料の平均値で示す密度や吸水率といった指標での耐凍害性の評価法について検討した。特に、凍害劣化は骨材中の水が凍結することにより劣化が生じると考えられることから、吸水率との対応が良いことが予想される。

図 2.6.4 は骨材の絶乾密度とコンクリートの耐久性指数との関係、図 2.6.5 は吸水率と耐久性指数との関係を示したものである。また、耐久性指数を 85 以上、60～85 および 60 以下の 3 ランクに区分し、これと絶乾密度および吸水率との対応を見たものを図 2.6.6 に示す。これらの図より、以下の特徴が認められた。

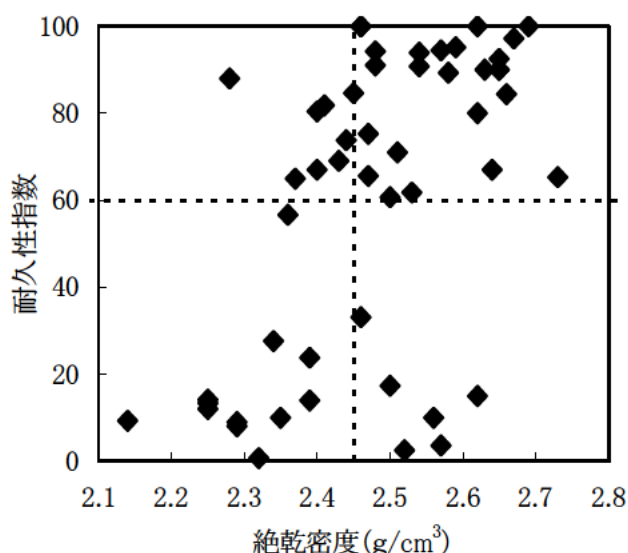


図-2.6.4 絶乾密度と耐久性指数の関係（砕石）

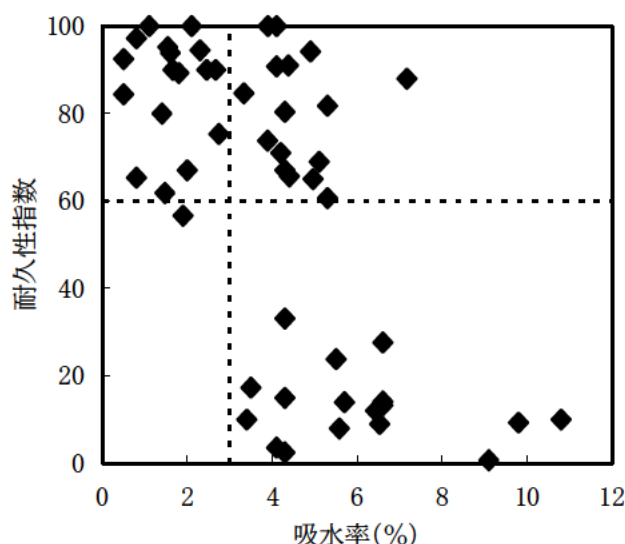


図-2.6.5 吸水率と耐久性指数の関係（砕石）

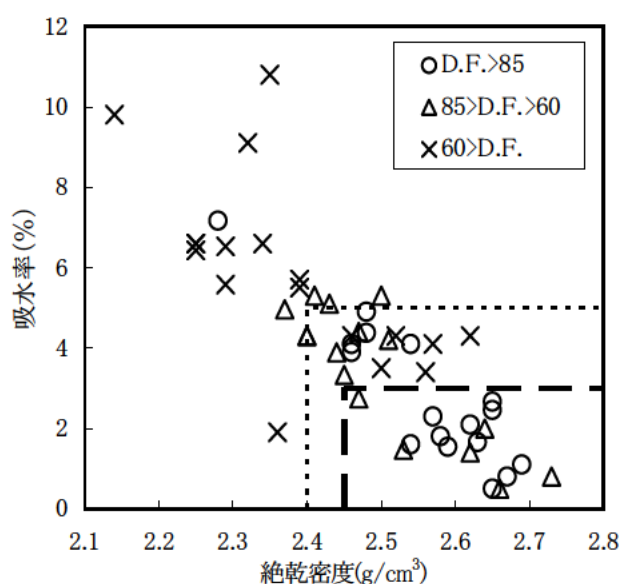


図-2.6.6 絶乾密度・吸水率と耐久性指数の関係(砕石)

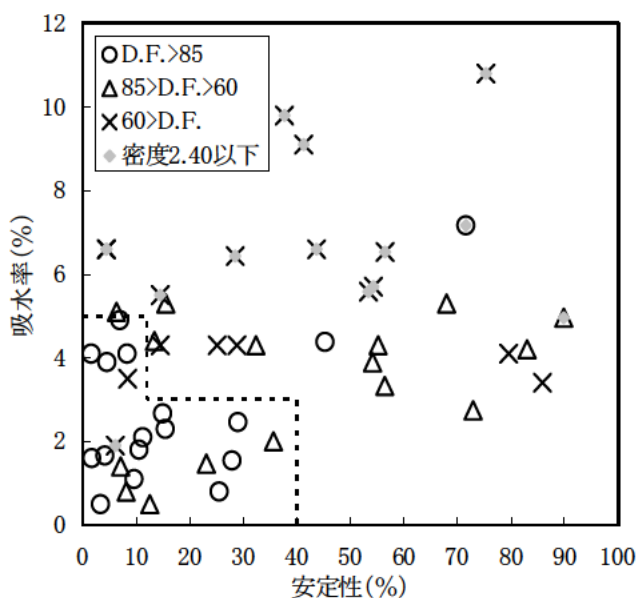


図-2.6.7 絶乾密度・吸水率と耐久性指数の関係(砕石)

- ・ 図 2.6.6 より、一般的な骨材の品質基準である絶乾密度 2.5g/cm^3 以上(有効桁の関係から 2.45g/cm^3 以上)、かつ吸水率 3.0% 以下の範囲での耐久性指数は全て 60 以上であった。この反面、絶乾密度 2.40g/cm^3 以下、かつ吸水率 5.0% 以上の範囲での耐久性指数は 60 以下のものが多かった。
- ・ 図 2.6.4 より、絶乾密度と耐久性指数とは、それほど良い対応関係を示さなかった。
- ・ 図 2.6.5 より、吸水率と耐久性指数とは、比較的良好な対応関係を示しており、吸水率 3.0% 以下の範囲では、ほとんどの耐久性指数が 60 以上であった。

これらのことから、砕石使用コンクリートの耐久性は、粗骨材の吸水率で判定して良いと考えられ、現在の品質規格値である 3.0% 以下は、妥当な規格値であると考えられる。

コンクリート標準示方書ダムコンクリート編では、表 1.2.2 に示すように骨材がコンクリートの耐凍害性

に与える影響を安定性と吸水率の双方の値から判定するようになっている。これは当研究チームの昭和 54～56 年度の研究成果⁵⁾に基づいて定められた規格値である。図 2.6.7 は今回の収集データから、碎石に関して、安定性と吸水率が耐久性指数に与える影響を整理したものである。この図の中にダムコンクリート編の判定基準を点線で示したが、概ね妥当な判定基準であることが確認できた。ただし、同図においても、耐久性指数の高いもの（○）は吸水率の低い範囲に、耐久性指数の低いもの（×）は吸水率の高い範囲に分布しており、コンクリートの耐久性指数は、安定性よりも吸水率とより高い対応関係にあることが分かる。また、ダムコンクリート編では、粗骨材の密度を表乾密度で 2.50g/cm^3 以上と規定している。この値は吸水率を 3 % 程度と仮定すると絶対密度で概ね 2.43g/cm^3 以上となり、この値も、図 2.6.6 から判断して妥当な値と考えられる。

2.7 碎石と砂利の違いに関する考察

2.7.1 碎石と砂利の分類

表 2.1.1. に示した粗骨材を分類すると表 2.7.1 のように様々な岩種に分類できるが、大別すると碎石と砂利とに分類される。図 2.7.1 にイメージ図を示すが、碎石と砂利とでは、以下のような根本的な違いがある。

表 2.7.1 粗骨材の分類

岩種				試料数
碎石	堆積岩	碎屑岩	砂岩	7
			粘板岩	6
			頁岩	1
		火砕岩	凝灰岩	8
		生物岩	チャート	2
			石灰岩	1
	火成岩	深成岩	花崗岩	2
		火山岩	安山岩	24
			流紋岩	3
砂利				16
計				70

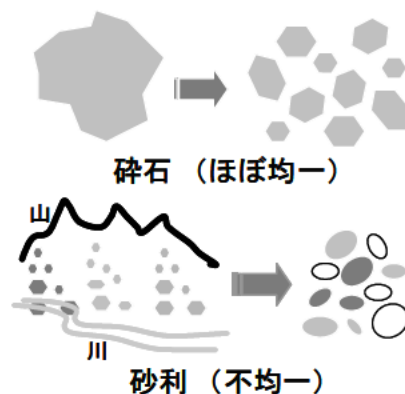


図-2.7.1 碎石と砂利の違い

碎石は、採石場で産出される。比較的均質な岩盤を砕いて製造するために、骨材粒子間の品質のばらつきは比較的小さい。破碎して製造することから、粒子形状は角張っている。これに対して砂利は、河川または旧河川部の河床堆積物であり、これを掘削して得られる。河床堆積物は、その河川沿いに存在する様々な山岳からの崩落岩が、長い年月の間に河川を流下し、堆積したものであるから、様々な岩種、品質の岩石の集合体となる。流水の磨砕作用で、粒子形状は丸みをおびている。

凍結融解による骨材の劣化を、骨材粒子内に存在する水の氷結圧によって骨材が破壊する現象と考えれば、骨材内の空隙が大きい場合ほど氷結圧が大きくなり、骨材は劣化しやすくなるものと考えられる。骨材内部の空隙の大きさを例えば吸水率を指標として考えた場合、吸水率は、粗骨材最大寸法 25mm の骨材の場合、2.5kg 分の骨材試料の平均値として示されるので、同じ吸水率の碎石と砂利とを比較すると、均質な碎石よりも様々な粒子の集合体である砂利のほうが、大きな空隙を有する粒子の存在確率は高くなる。

2.7.2 凍結融解試験結果に見られる碎石と砂利の違い

砂利を使用したコンクリートと碎石を使用したコンクリートの劣化の違いは、凍結融解試験によって動弾性係数が大きく低下した供試体のひび割れ発生状況からでも確認することができる。写真 2.7.1～2.7.3 は砂利コンクリートの凍結融解試験後の劣化状況の写真である。砂利コンクリートの場合には、特定の一部の砂利からひび割れが延伸する傾向が認められる。一方、写真 2.7.4 は碎石コンクリートの例であるが、砂利使用コンクリートに比較してコンクリート表面全体に劣化が認められる。

表 2.7.2 は凍結融解試験が終了した供試体を切断し、切断面を観察したもので、ひび割れが確認される粗骨材の数とペースト中のひび割れの有無を示したものである。この表の、ひび割れた骨材数に関して、コンクリートの耐久性指数との関係を図 2.7.2 に、骨材の吸水率との関係を図 2.7.3 に、骨材の安定性との関係を図 2.7.4 に示す。耐久性指数との関係では碎石と砂利とでそれほど優位な差は認められなかったが、ひび割れた粗骨材の数は砂利で数個のものが多く、碎石では 10 個を超えているものが多かった。吸水率

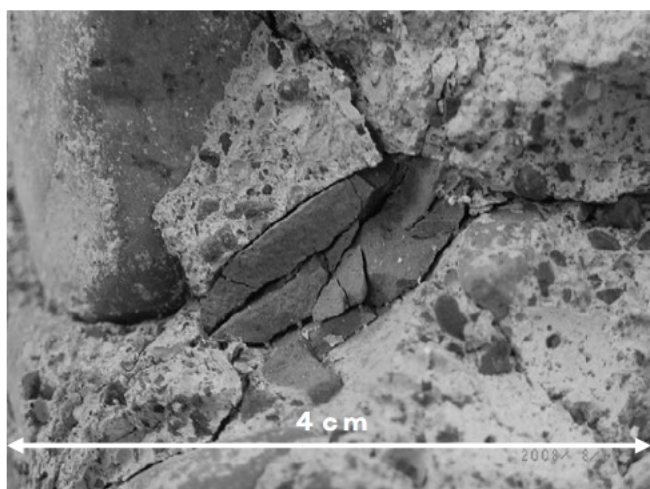


写真-2.7.1 砂利骨材の劣化状況

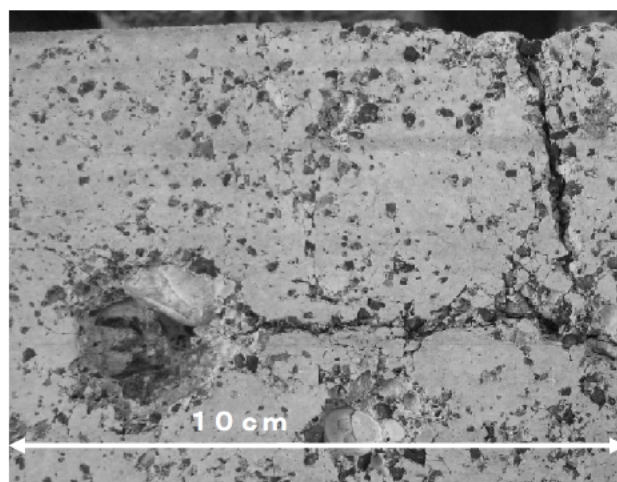


写真-2.7.2 砂利コンクリート表面の劣化状況(1)

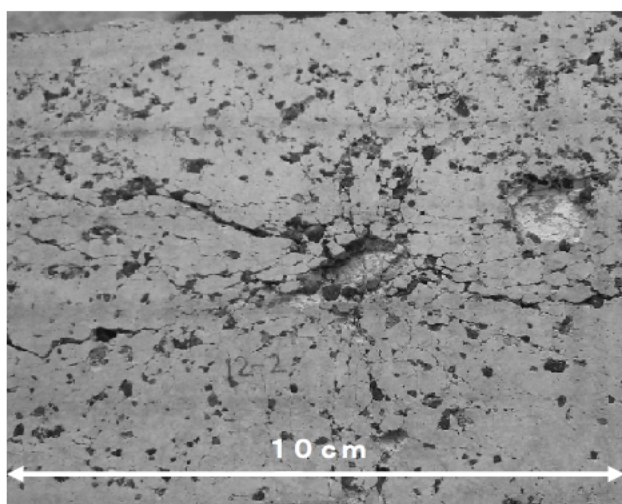


写真-2.7.3 砂利コンクリート表面の劣化状況(2)

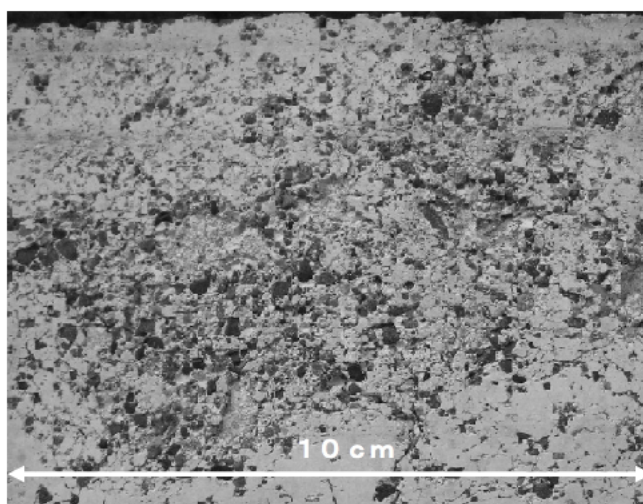
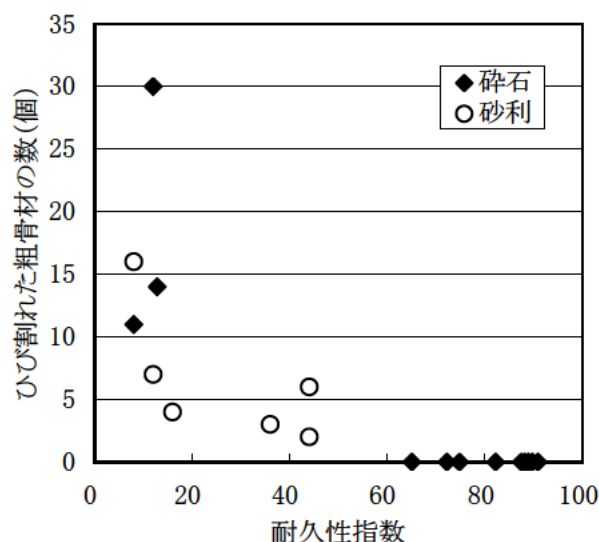


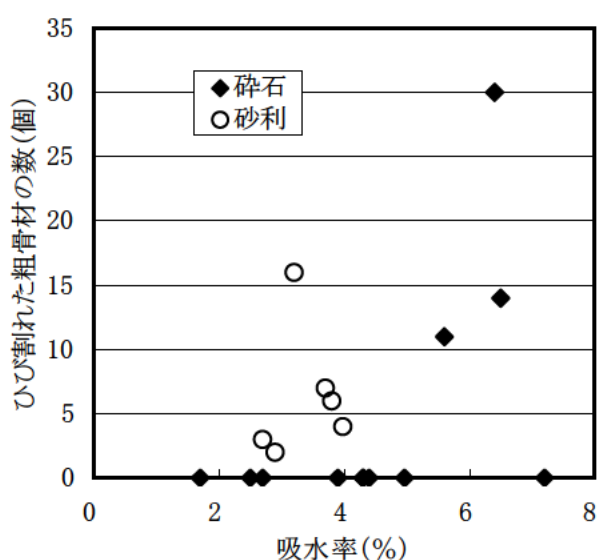
写真-2.7.4 碎石コンクリート表面の劣化状況

表－2.7.2 凍結融解試験終了後の断面観察結果

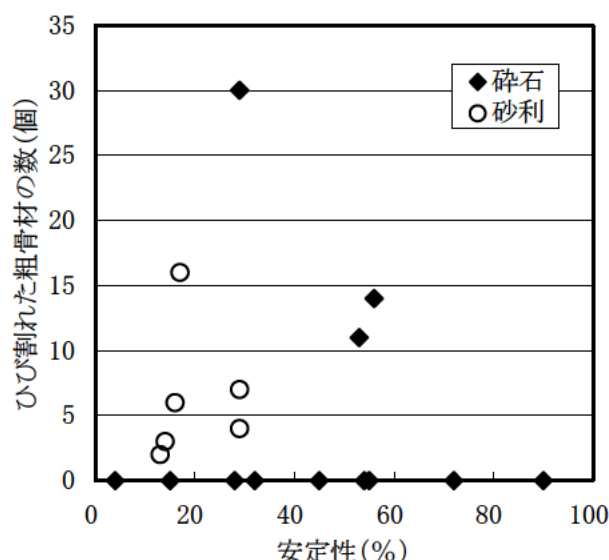
骨材の種類		耐久性 指数	吸水率 (%)	安定性 (%)	ひび割れ た粗骨材 の数	ペースト中の ひび割れ
砕石	AT C	8	5.6	53	11	あり
	AM A	12	6.4	29	30	あり
	FS A	13	6.5	56	14	あり
	SP	65	5.0	90	0	無し
	IS U	72	4.3	32	0	無し
	IS G	75	3.9	54	0	無し
	IS I	82	4.3	55	0	無し
	AT B	88	1.7	4	0	無し
	FS B2	88	7.2	72	0	無し
	FS B3	89	2.5	28	0	無し
	MG A	90	2.7	15	0	無し
	FS B1	91	4.4	45	0	無し
砂利	YM B	8	3.2	17	16	あり
	AT A	12	3.7	29	7	あり
	IT A	16	4.0	29	4	無し
	YM A	36	2.7	14	3	僅かにあり
	MM	44	2.9	13	2	僅かにあり
	IT B	44	3.8	16	6	無し



図－2.7.2 耐久性指数とひび割れ骨材数の関係



図－2.7.3 吸水率とひび割れ骨材数の関係



図－2.7.4 安定性とひび割れ骨材数の関係

との関係では、粗骨材がひび割れたケースの吸水率が砂利では2～4%の範囲であるのに対して砕石では5～8%の範囲であった。安定性との関係についても、粗骨材がひび割れた場合の安定性が砂利では10～30%の範囲であるのに対して砕石では30～60%の範囲であった。

以上のように、砕石と砂利とでは、密度、吸水率、安定性等の骨材物性とコンクリートの耐凍害性との関係が異なる傾向が確認された。これらのことから、2.5～2.6 節では、砕石と砂利とを分けて検討したものである。

2.8 粗骨材最大寸法を 15mm とした砂利コンクリートの性能

2.8.1 概要

2.5 では砂利使用コンクリートの耐凍害性の簡易評価方法について述べてきたが、本節では、砂利使用コンクリートの粗骨材最大寸法(以下、 $G_{\max}$ という)を 25mm から 15mm に変更することによるコンクリートの耐凍害性の改善効果等について述べる¹⁰⁾。

表 2.8.1 はふるい目の公称と実寸法である。コンクリートの分類としては $G_{\max}$ が 25mm と 20mm のコンクリートは一般に同類として扱われるが、表 2.8.1 から分かるように公称 25mm と 20mm の実寸法の差は 7.5mm である。一方、公称 20mm と 15mm の実寸法の差は 3mm しかない。

一般には、砂利コンクリートでは $G_{\max}$ 25mm、碎石コンクリートでは $G_{\max}$ 20mm としている場合が多いが、コンクリートの流動性の面から考えれば砂利は流動性が良いことから $G_{\max}$ は小さくても良い。また、砂利の場合、骨材の耐凍害性の指標とされる安定性や簡易凍結融解試験から得られる損失率は、図 2.8.1 や図 2.8.2 に示すように、小さい粒度ほど値が小さくなる傾向を示しており、 $G_{\max}$ を小さくすることでコンクリートの耐凍害性が改善される可能性がある。これらのことから、 $G_{\max}$ を 25mm から 15mm に変更したときの砂利コンクリートの性能について検討を行った。

表-2.8.1 ふるいの寸法

公称 (mm)	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80
実寸法 (mm)	4.8	9.5	16.0	19.0	26.5	31.5	37.5	53.0	63.0	75.0

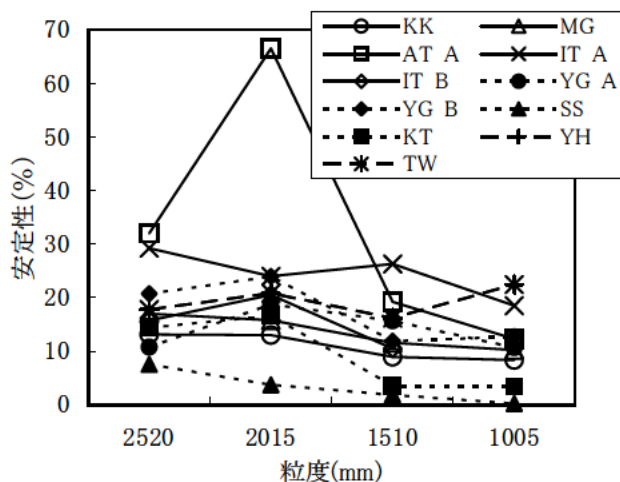


図-2.8.1 粒度と安定性の関係

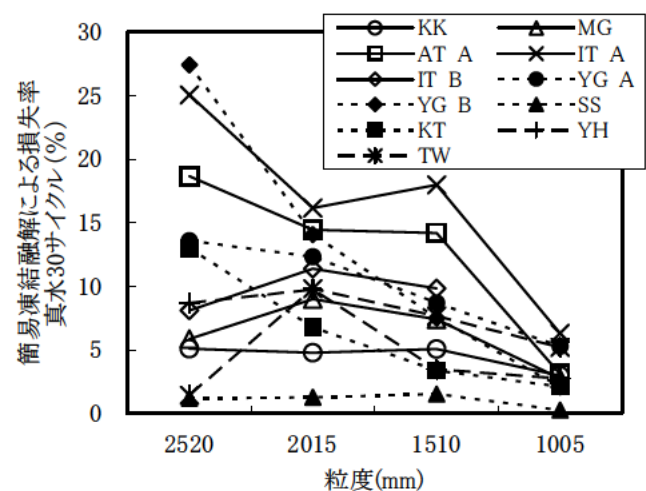


図-2.8.2 粒度と簡易凍結融解試験結果の関係

2.8.2 実験方法

実験に使用した砂利粗骨材は表 2.8.2 に示す 3 種類とし、比較用に碎石 KS も使用した。砂利 KK は現在の骨材品質規格を満足しているが、砂利 MM および砂利 AT-A は骨材の品質規格 (JIS A 5308 附属書 1) を満足しないものである。砂利は 2505($G_{\max}$ 25mm)と 1505($G_{\max}$ 15mm)の 2 種類、碎石は 2005($G_{\max}$ 20mm)とし、表 2.8.3 の配合条件に統一してコンクリートを練り混ぜた。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には規格を満足する川砂 (絶乾密度 2.56g/cm^3 、吸水率 1.58%、安定性 3.5%) を使用した。

表 2.8.2 粗骨材の品質

粗骨材の種類			骨材の品質		
種類	骨材 記号	粒度	絶乾密度 (kg/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 (%)
砂利A	KK	2505	2.53	1.90	10.0
		2515	2.53	1.88	11.8
		1505	2.53	1.92	8.6
砂利B	MM	2505	2.47	2.86	13.7
		2515	2.48	2.80	16.9
		1505	2.47	2.91	11.0
砂利C	AT-A	2505	2.39	3.72	29.1
		2515	2.40	3.49	45.3
		1505	2.38	3.91	15.9
碎石	KS	2005	2.66	0.50	3.3

表-2.8.3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (g/m ³)		実測空気量 (%)
		W	C	S	G	AE減水剤	AE剤	
55	46	165	300	832	930~968	930	3	5.0~6.8

練り混ぜたコンクリートのスランプと空気量を測定した後、100×100×400mm の角柱供試体を 2 本、φ 100×200mm の円柱供試体を 3 本ずつ作製した。翌日に脱枠、材齢 28 日まで水中養生を行った後、角柱供試体については凍結融解試験(JIS A 1148 A 法)を実施した。円柱供試体については圧縮強度試験を実施し、その際に、静弾性係数を測定した。

2.8.3 実験結果

スランプの測定結果を図 2.8.3 に示す。砂利コンクリートでは粗骨材を 2505 から 1505 に変えることによりスランプが約 2cm 小さくなったが、それでも碎石コンクリートより約 6cm 大きく、砂利コンクリートの流動性の良さが確認できた。空気量は 5.0~6.8% の範囲であった。

図 2.8.4、2.8.5 に示すように、砂利コンクリートの粗骨材を 2505 から 1505 に変えることで圧縮強度は僅かに増加し、静弾性係数は同程度となった。

凍結融解試験の結果を図 2.8.6、2.8.7 に示す。砂利コンクリートの粗骨材を 2505 から 1505 に変えることで、耐久性指数は向上する傾向を示した。もともとの耐久性指数が低かった AT-A での効果は小さかったが、耐久性指数が 60 前後であった KK、MM では 10~25 程度値が向上した。質量減少率は粗骨材を 1505 とすることでやや増加する傾向を示した。これは骨材粒子が小さくなったことで供試体表面付近の小さな骨材粒子の剥落が増加したためと考えられる。しかしながら、質量減少率の量としてはいずれも 2.5% 以下の小さな値であった。

骨材の安定性とコンクリートの耐久性指数との関係を図 2.8.8 に示す。簡易凍結融解試験（真水 30 サイクル）から得られる損失率と、コンクリートの耐久性指数との関係を図 2.8.9 に示す。ここでの損失率は最大粒径（G_{max}25mm では 2515、G_{max}15mm では 1505）の値である。2505 から 1505 に変えることで安定性や簡易凍結融解試験の損失率が小さくなり、これに合わせて耐久性指数が向上する関係が確認できた。

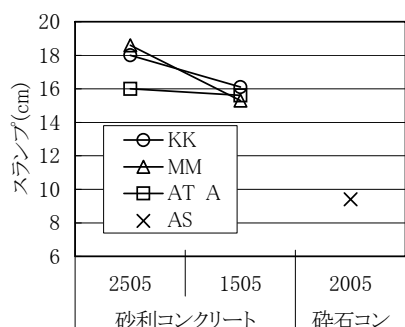


図-2.8.3 スランプ

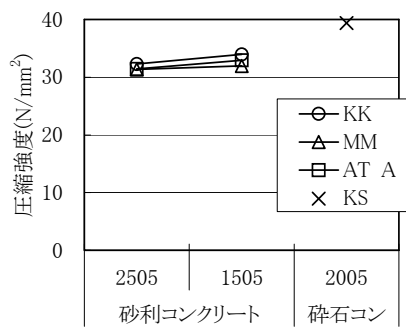


図-2.8.4 圧縮強度

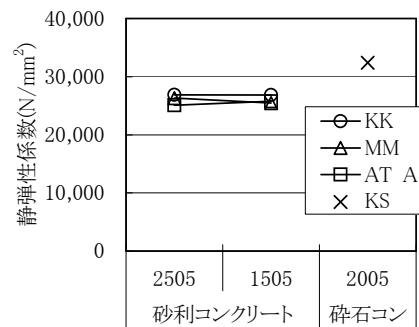


図-2.8.5 静弾性係数

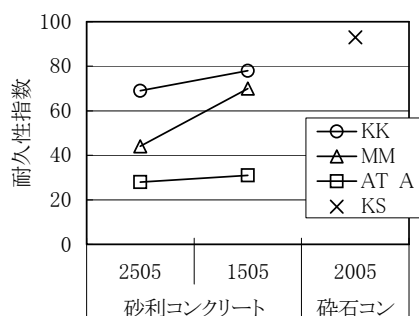


図-2.8.6 耐久性指数

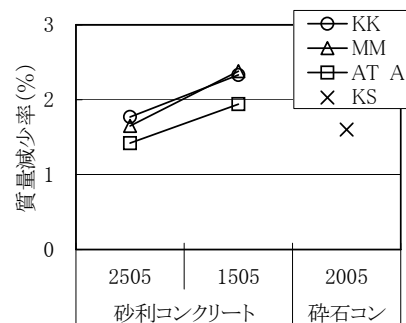


図-2.8.7 質量減少率

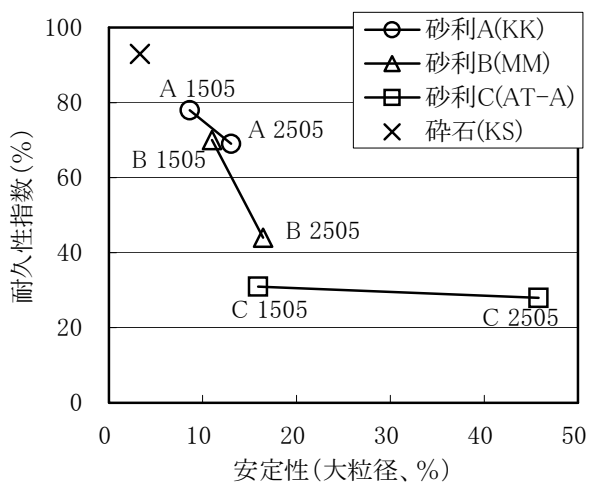


図-2.8.8 安定性と耐久性指数の関係

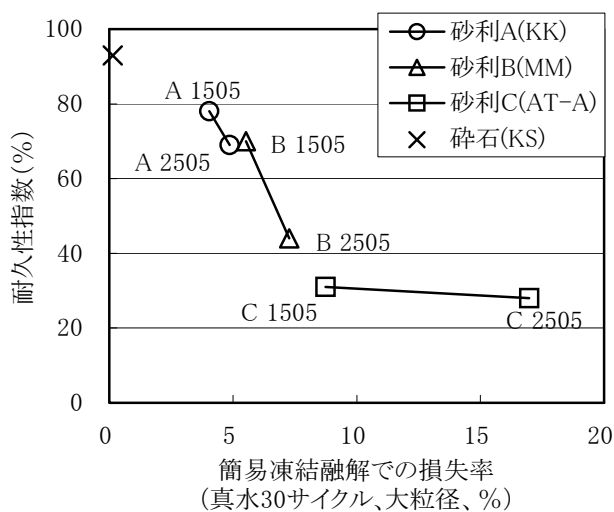


図-2.8.9 簡易凍結融解試験結果と耐久性指数の関係

2.9 まとめ

骨材がコンクリートの耐凍害性に与える影響に関する研究に関して、研究結果を以下に整理する。

- (1) 従来、骨材の耐凍害性の評価試験として用いられてきた安定性試験に関して検討を行い、硫酸ナトリウムの結晶圧の作用時期は、液中浸漬中であることを明らかとした。また、溶液の温度や蒸発の有無等によって安定性試験の結果が変動することを実験により確認した。
- (2) 骨材の簡易凍結融解試験の適用条件の検討の結果、繰り返し回数は、真水を使用する場合は 30 回、塩水を使用する場合は 3 回程度で良いことが分かった。また、塩水濃度は 1, 2, 3 %では有意な差が認められなかった。さらに、試験の対象とする骨材の粒子径としては、粗骨材の全ての粒径を対象とするよりも、大粒径（上位 2 粒度）を対象とした結果のほうが、耐久性指数との対応が良好であった。
- (3) 粗骨材に砂利を使用した場合と碎石を使用した場合とでは、コンクリートの劣化の状態が異なることが明らかとなり、砂利と碎石とは分けて検討することとした。
- (4) 砂利に関しては、簡易凍結融解試験結果（損失率）とコンクリートの耐久性指数との関係が良好であった。
- (5) 碎石に関しては、簡易凍結融解試験において細粒劣化が卓越する骨材では、損失率によるコンクリートの耐久性の評価は困難であった。一方、吸水率と耐久性指数とは比較的良い対応関係を示した。
- (6) 砂利骨材の場合、粗骨材最大寸法を 25mm から 15mm に変更することで、良好なフレッシュ性状を確保しつつ、コンクリートの耐凍害性が向上した。

3. 乾燥収縮に関する検討

3.1 収集した骨材の物性

今回の実験に使用した骨材の一覧を表 3.1.1 に示す。本研究では、骨材の物性がコンクリートに与える影響を広範囲に捉えることを目的に、骨材の品質規格を満足するものから、規格を大きく外れるものまで、種々の粗骨材を収集した。細骨材に関しては、良質な川砂である S1(S-K)を主として使用し、細骨材の影響を確認する実験において S2～S6 を使用した。なお、S3～S6 は表中の記号の対応した粗骨材を砕いて製造した細骨材である。

表－3.1.1 骨材の品質

分類	No.	記号	岩種	最大寸法 (mm)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 (%)	水蒸気吸着 率(%) ^{注1)}
粗 骨 材	G1	KS	砂岩 (Ss-j)	20	2.65	0.50	3.3	0.05
	G2	DD	花崗岩 (Gr)	25	2.53	1.47	23.1	0.15
	G3	TO	安山岩 (As)	25	2.47	2.74	72.9	0.61
	G4	TZ	砂岩 (Ss-k)	25	2.45	3.33	56.4	0.66
	G5	OT	頁岩 (Sl-k)	25	2.59	1.54	32.3	0.56
	G6	MG-A	安山岩 (As)	15	2.65	2.67	14.9	0.82
	G7	FS-A	安山岩 (As)	25	2.29	6.53	56.5	1.32
	G8	FS-B1	安山岩系凝灰岩 (Tf)	25	2.48	4.38	45.3	1.70
	G9	FS-B2	玄武岩系凝灰岩 (Tf)	25	2.28	7.17	71.6	2.82
	G10	AT-B	安山岩 (As)	25	2.63	1.66	4.1	0.06
	G11	AT-C	安山岩 (As)	25	2.29	5.58	53.4	0.76
	G12	AM-A	安山岩 (As)	25	2.25	6.43	28.5	1.11
	G13	SP	砂岩～シルト岩 (Ss-k)	25	2.37	4.96	89.9	1.50
	G14	IS-G	安山岩 (As)	25	2.44	3.91	55.2	1.19
	G15	ZT	砂岩 (Ss-k)	20	2.57	1.56	34.8	0.48
	G16	SK	砂岩 (Ss-k)	20	2.64	0.99	17.3	0.41
	G17	LI-H	石灰岩 (Li)	20	2.70	0.29	0.7	0.01
	G18	LI-L	石灰岩 (Li)	20	2.71	0.26	1.5	0.02
	G19	MM	川砂利 (Rg)	25	2.45	3.37	12.9	0.42
	G20	KK	川砂利 (Rg)	25	2.53	1.9	10.6	0.32
	G21	AT-A	川砂利 (Rg)	25	2.39	3.72	29.3	0.56
	G22	TW	川砂利 (Rg)	25	2.45	4.21	19.2	0.61
	G23	YH	川砂利、玉砕 (Rg)	25	2.48	4.39	19.4	0.67
	G24	IT-A	川砂利 (Rg)	25	2.40	3.98	25.0	0.64
	G25	YG-A	川砂利 (Rg)	25	2.53	2.66	14.2	0.34
	G26	D1	砂岩 (Sl-j)	20	2.65	0.71	2.8	0.10
	G27	OM	砂岩 (Ss-j)	20	2.64	0.69	11.4	0.18
細 骨 材	S1	S-K	川砂 (Rs)	5	2.56	1.58	3.5	0.24
	S2	S-K2	川砂 (Rs)	5	2.56	0.59	5.2	0.35
	S3	S-TW	川砂 (Rs)	5	2.50	1.67	9.8	0.23
	S4	S-DD	花崗岩 (Gr)	5	2.56	0.59	10.6	0.15
	S5	S-ZT	砂岩 (Ss)	5	2.54	1.54	16	0.38
	S6	S-LI	石灰岩 (Li)	5	2.67	0.16	5.16	0.02

※網掛けは規格を満足しない物性値

注1)水蒸気吸着率の測定方法は3.2 (5)を参照

3.2 実験方法

本実験は表 3.2.1 に示す3シリーズに分けて、コンクリート試験体を製造し、コンクリートの長さ変化試験を実施した。コンクリート配合は表 3.2.2 に示すとおりであり、セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、配合 A と B には AE 減水剤と AE 助剤を使用し、配合 C には空気非連行型の高性能 AE 減水剤を使用した。

表-3.2.1 実験ケース

実験シリーズ	検討内容	使用粗骨材	使用細骨材	配合(W/C)
シリーズ1	粗骨材の影響	G1~G27	S1	A(55)
シリーズ2*	細骨材の影響	G1	S1~S6	A(55)
シリーズ3	W/Cの影響	G1,G15,G27	S2	A(55), B(40), C(30)

*シリーズ2は、粗骨材を除いたモルタル配合についても実施

表-3.2.2 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (g/m ³)			目標空気量 (%)
			W	C	S	G	高性能AE	AE減水剤	AE剤	
A	55	46	165	300	813~854	928~1016	-	930	3	4.5
B	40	44	165	413	745	961~978	-	1790	4	4.5
C	30	42	165	550	694	971~988	7700	-	-	1.5

乾燥収縮率の測定は JIS A 1129-3 に準拠することとし、100×100×400mm の角柱供試体を配合ごとに2本ずつ作製し、7日間の水中養生後に、室温20℃、湿度60%の環境にて、6ヶ月間にわたって、ダイヤルゲージ法によって長さ変化を測定した。なお、シリーズ2のモルタル配合に関しては40×40×160mm の角柱供試体を配合ごとに3本ずつ作製し、同様の実験を実施した。

材齢6ヶ月経過時点の長さ変化率をコンクリートの乾燥収縮率として、この乾燥収縮率に影響を与える因子や、この乾燥収縮率を簡易に推定する方法について、以下のような検討を行った。

(1) 骨材の岩種や地質年代との関係

コンクリートの乾燥収縮は、骨材の影響を強く受ける¹¹⁾。このため、粗骨材の岩種を表 3.2.3 のように分類し、シリーズ1のコンクリートの乾燥収縮率との関連について検討した。また、砕屑岩に関しては地質年代との関連についても検討した。

表-3.2.3 粗骨材種類の分類

大分類	小分類	収集した骨材の岩種	試料数
火成岩	火山岩	安山岩(As)	8
	半深成岩		
	深成岩	花崗岩(Gr)	1
	火砕岩	凝灰岩(Tp) [※]	2
堆積岩	砕屑岩	砂岩(Ss)、頁岩(Sl)	7
	生物岩	石灰岩(Li)	2
変成岩			
上記の混合	川砂利	川砂利(Rg)	7
計			27

※火砕岩は地質分類上は堆積岩にあたるが、G8が安山岩系、G9が玄武岩系であることから火成岩の分類とした。

(2) 粗骨材と細骨材の影響比較

シリーズ1とシリーズ2の比較から、粗骨材と細骨材について、コンクリートの乾燥収縮率に与える影響度合いの違いについて検討した。

(3) 粗骨材の乾燥収縮率との関係

表 3.1.1 に示す 27 種類の粗骨材のうち、19 種類の碎石粗骨材に対して、粗骨材の乾燥収縮率を測定し、シリーズ 1 のコンクリートの乾燥収縮率との比較を行った¹²⁾。粗骨材のひずみの測定にはひずみゲージを使用した。粗骨材の最大寸法に近い粒子を切断し、平滑面を作製した。次に、切断面に対して、ひずみゲージを貼付ける部分よりも若干大きめの面をポリエステル系接着剤で防水処理した。さらに、防水処理面にシアノアクリレート系接着剤で 3 軸計測あるいは 1 軸計測の防水型ひずみゲージ（それぞれ検長 3mm）を貼付けた。その後、ポリエステル系接着剤でひずみゲージ全体を防水処理した（写真 3.2.1 参照）。

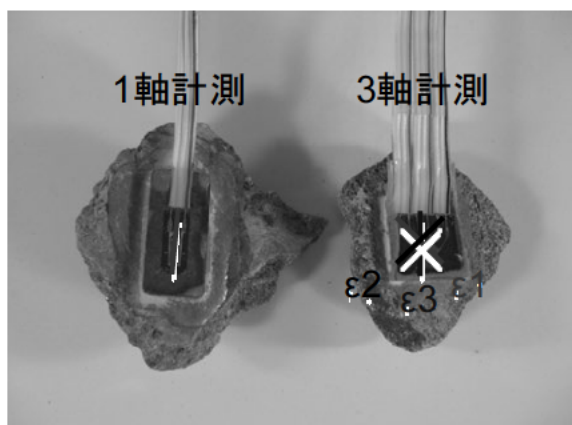


写真-3.2.1 ひずみゲージの貼り付け

骨材を 20℃水中に浸漬し、ひずみが安定した状態から試験を開始し、骨材を水中から取りだし、20℃、60%RH の環境でひずみが安定するまで測定を実施した。3 軸計測の結果からは最小主ひずみおよび最大主ひずみを求めた。

(4) 粗骨材の物理的性質との関係

コンクリートの長さ変化は主にペーストの収縮に起因するものであり、骨材はその収縮量を低減する働きを示すと考えられるので、収縮量の大きなコンクリートの骨材は変形に対する抵抗性の小さな骨材であると考えられる。そこで、そのような骨材の物性を評価する指標として、密度、吸水率および安定性を選定した。密度および吸水率は骨材の緻密さ、空隙量を反映した物性であること、安定性は一般には骨材の耐凍害性を評価する指標であるが、硫酸ナトリウムの結晶圧に対する抵抗性を試験するものであることから、骨材中の空隙構造と強度に関連する指標と考えた。これらの物性とシリーズ 1 のコンクリートの乾燥収縮率との関係を調査した¹³⁾。

(5) 骨材の水蒸気吸着率との関係

骨材の内部空隙も含めた比表面積が、コンクリートの長さ変化率と良い相関があるという研究報告がある^{14)、15)}。比表面積の測定方法としては気体吸着 BET 法による測定方法が JIS R 1626 に定められているが、これより簡易な方法として水蒸気による方法が提案¹⁵⁾されており、この方法に準拠して実験を行った¹³⁾。試験の概要としては、室温 20℃の実験室内において、約 400×250×250mm の気密容器内に約 1 kg の塩化マグネシウム（6 水和物）を過飽和水溶液の状態で配置することで容器内の相対湿度を 33%に保持し、この容器内

に絶乾状態とした粗骨材試料を入れるもので、骨材に吸着される水蒸気量を時間経過毎に測定した。粗骨材試料は骨材種類ごとに約 1kg を金網容器に入れ、密閉容器 1 つあたり 2 ～ 3 試料を入れることとした。比表面積を求めるには吸着した水分量を水の分子の大きさで除して面積に換算する必要があるが、今回は簡単に、水蒸気の吸着量を骨材の絶乾質量で除すことによって水蒸気吸着率を求め、この値とコンクリートの乾燥収縮率を比較した。

(6) コンクリートの弾性係数との関係

ペーストの収縮変形に対する抵抗性の小さな骨材が含まれるコンクリートは、弾性係数が低いことが予想されることから、コンクリートの弾性係数とコンクリートの乾燥収縮率との関係について調査した¹³⁾。弾性係数の測定方法としては、以下の 5 とおりの方法によることとした。

- 1) 静弾性係数（割線弾性係数）： 長さ変化試験用供試体の作製と同時に $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体を配合ごとに 3 本作製し、28 日間養生後に、JIS A 1149 の方法に従って静弾性係数を測定した。すなわち、圧縮試験機で載荷する際の供試体のひずみをコンプレッソメータ（変位計）で測定し、供試体の縦ひずみが 50×10^{-6} のときの応力と最大荷重の 1/3 の応力を結ぶ線分の勾配として得られる割線弾性係数を求めた。
- 2) 静弾性係数（初期弾性係数）： 乾燥収縮は応力的には低いレベルで進行すると考えられるので、1)の方法とは別に、載荷開始時点の接線弾性係数を求めた。本試験では応力が 1.27N/mm^2 （荷重として 10kN ）毎にひずみ量を測定しており、原点と応力 1.27N/mm^2 を結ぶ応力ひずみ直線の勾配から初期弾性係数を求めた。
- 3) 縦振動による動弾性係数： 1) で作製、養生（28 日）した円柱供試体に対し、JIS A 1127 に示す縦振動による方法で動弾性係数を測定した。
- 4) 超音波による動弾性係数： 1) で作製、養生（28 日）した円柱供試体の両端面に探触子を当て、透過法により供試体の長さ方向の超音波伝播速度を測定することで動弾性係数を求めた。
- 5) たわみ振動による動弾性係数： 長さ変化試験を実施する $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 角柱供試体を用いて、材齢 7 日時点の動弾性係数を JIS A 1127 に示すたわみ振動による方法で測定した。

(7) 水セメント比の影響

シリーズ 3 の実験結果より、水セメント比が乾燥収縮率に与える影響について検討した。なお、セメント比が低くなると自己収縮が発生することから、本試験では W/C40% と 30% のケースにおいて自己収縮率の測定を実施した。自己収縮の測定は、コンクリート供試体の内部に埋込み型ひずみ計を配置し、打設直後からのひずみ量を測定することとし、他の長さ変化測定用の供試体と同様に、打設の翌日には脱型し、材齢 7 日まで水中養生を実施した。試験本数は配合ごとに 2 本とした。

(8) $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ 供試体による長さ変化試験

コンクリートの長さ変化試験では、一般には $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試験体が用いられ、乾燥収縮の測定には約 6 ヶ月の期間が必要となる。供試体寸法を小さくすることによる試験期間の短縮を試みた。 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角注型枠を使用し、粗骨材最大寸法 25mm のコンクリート供試体を 1 配合あたり 3 本作製した。配合は、基本的には表 3.2.1 のシリーズ 1 の配合に準拠したが、空気量を調整すると煩雑となるので、空気量

は連行しない NonAE 配合とした。供試体の作製方法としては、①供試体 3 本分の容積に対して僅かに余裕を持った量のモルタルをモルタルミキサーで先練りする。この際、モルタルのフロー値が 200mm 程度となるように、非空気連行型の高性能 AE 減水剤を添加する。②供試体 3 本分の容積に相当する粗骨材をモルタルに入れ、手練りで十分に混合する。③ 3 本の型枠にコンクリートを打設する。その際に粗骨材は全量投入し、モルタル分は型枠上面よりも僅かに盛り上げ、ブリーディングの終了を待って表面を仕上げる。打設の翌日に脱枠し、7 日の水中養生後に、室温 20℃、湿度 60% の環境にて、7 日に 1 度の割合でダイヤルゲージ法によって長さ変化を測定した。この試験は、G10、G12、G13、G15、G17、G27 の粗骨材（いずれも碎石）を使用した配合で実施した。なお、JIS A 1129 では、「供試体断面の一边の寸法は粗骨材寸法の最大寸法の 3 倍以上とすることが望ましい」と規定しており、本試験においても粗骨材最大寸法の影響を確認することを目的に、G10 の粗骨材を用いた配合では粗骨材最大寸法を 25mm、15mm、10mm の 3 水準で試験を実施した。

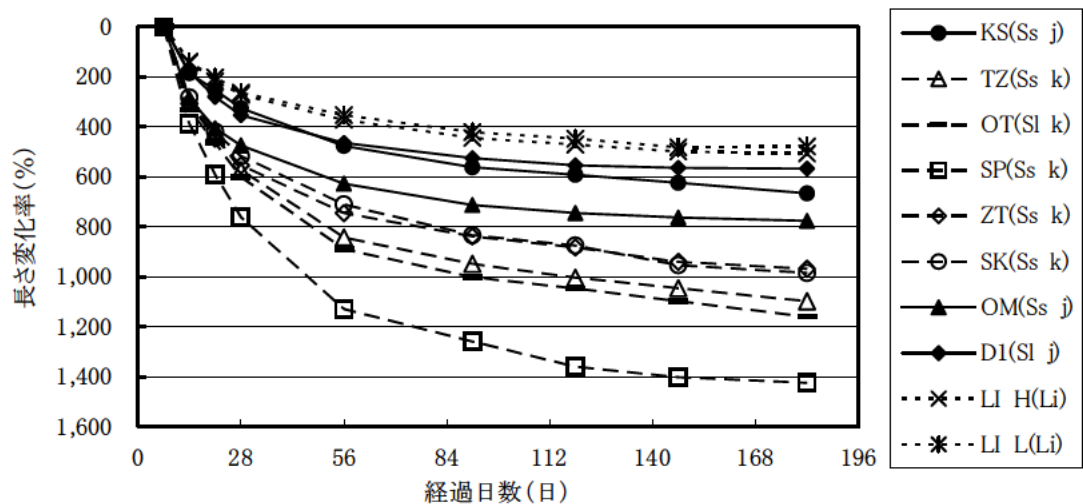
3.3 岩種・地質年代とコンクリートの乾燥収縮率の関係

コンクリートの長さ変化試験結果（シリーズ 1）を表 3.2.3 に示す粗骨材の岩種別に分けて図 3.3.1 に示す。この図より、骨材の違いによるコンクリートの乾燥収縮率の大きさの違いは、(b)の火成岩や(c)の川砂利では比較的小さく、(a)の堆積岩で大きかった。特に砕屑岩を使用の場合の乾燥収縮率の大きさは骨材の種類によって大きく異なる結果となった。

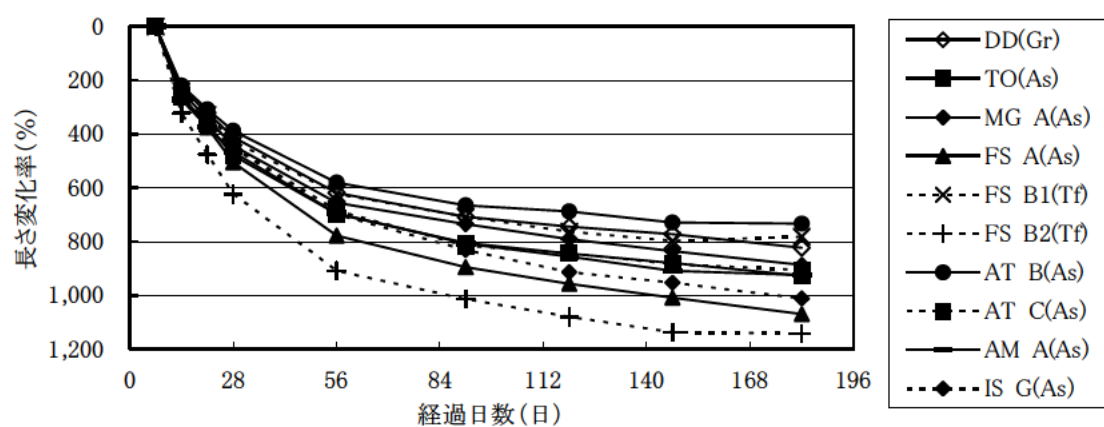
砕屑岩に関しては、生成された地質年代ごとに分けて整理することとした。地質年代とは図 3.3.1 のようであり、日本において骨材としての砕屑岩が産出される箇所の地質年代はジュラ紀または白亜紀のものが多。そこで、図 3.3.1(a)ではジュラ紀(-j)のものを実線で、白亜紀(-k)のものを破線で示した。これより、地質年代の古いジュラ紀のもので乾燥収縮は小さく、地質年代の若い白亜紀のものでは乾燥収縮が大きくなった。ここでのいう砕屑岩とは、主に硬質砂岩であり、同じ名称の硬質砂岩であっても、コンクリートの乾燥収縮量は様々であり、地質年代に大きく依存することが明らかとなった。

表－3.3.1 地質年代(単位:億年前)

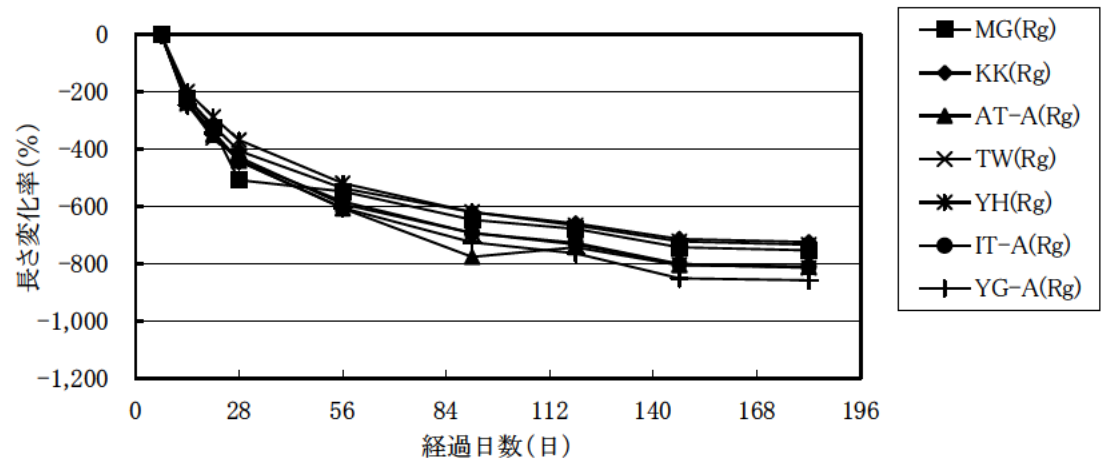
46～	5.4～	5.1～	4.4～	4.1～	3.6～	2.9～	2.45～	2.08～	1.45～	0.65～	0.026～
先カンブリア紀	カンブリア紀	オルドビス紀	シルル紀	デボン紀	石炭紀	ペルム紀	三畳紀	ジュラ紀	白亜紀	第三紀	第四紀
古生代							中生代		新生代		



(a) 砕屑岩、生物岩



(b) 火成岩、火砕岩



(c) 川砂利

図-3.3.1 コンクリートの長さ変化試験結果(シリーズ1)

3.4 粗骨材と細骨材の影響比較

シリーズ2の実験結果として、細骨材の種類を変えた配合のコンクリートの長さ変化試験の結果を図3.4.1(a)に示す。図(b)は同様に粗骨材の種類を変えた場合のコンクリートの長さ変化試験結果である。図(a)

の配合では粗骨材に全て G1 を使用し、図(b)のものでは細骨材に全て S1 を使用した。すなわち図(a)、(b)の◆のグラフは G1 と S1 を使用した配合であり、これを基準にして、図(a)では細骨材のみを変更した配合、図(b)では粗骨材のみを変更した配合を比較したものである。また、モルタル配合での長さ変化試験結果を図 3.4.2 に示す。

モルタルの試験結果を図 3.4.2 に示すが、細骨材の違いによって長さ変化率が大きく異なる結果となった。これに対して、コンクリートとした場合の長さ変化率は、図 3.4.1 に示すように、粗骨材の違いによる影響は大きいものの、細骨材の違いによる影響は小さい結果となった。細骨材の種類を変えることによる長さ変化率の変化量は、粗骨材を同じ品質のもので置き換えた場合の 20～50%程度であった。このように、コンクリート(またはモルタル)の長さ変化は、試料中に存在するより大きな骨材の影響を強く受ける結果となった。

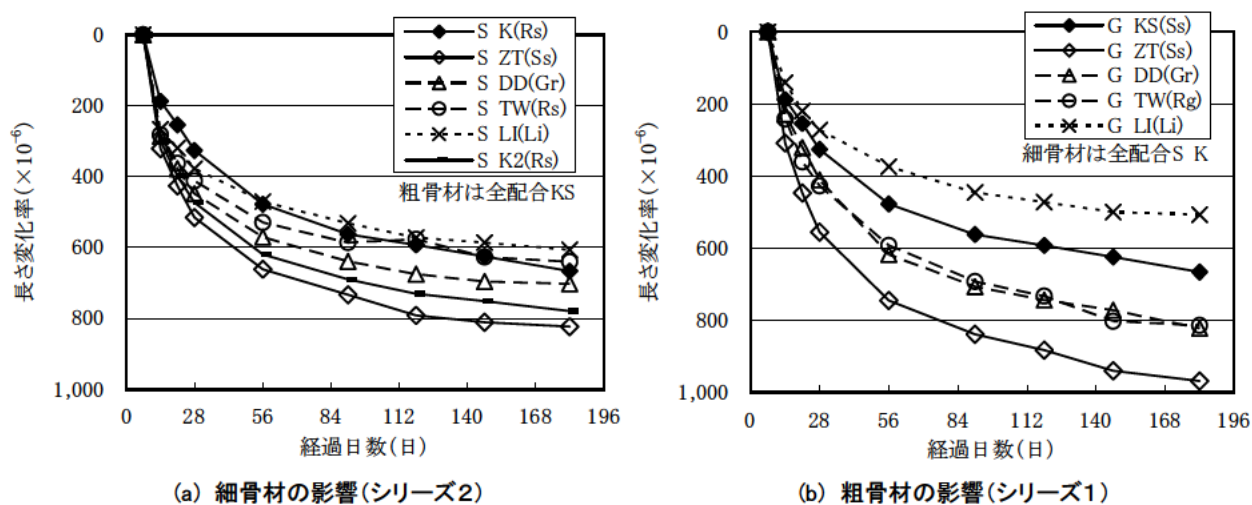


図-3.4.1 乾燥収縮率に与える粗骨材と細骨材の影響比較(コンクリートの試験)

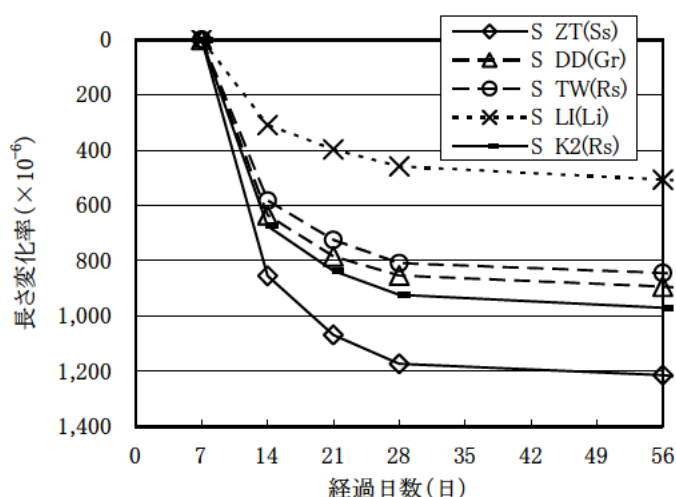


図-3.4.2 乾燥収縮率に与える細骨材の影響比較(モルタルの試験)

なお、図(a)中の◇は 100%砂岩(白亜紀)の砕砂、×は 100%石灰石の細砂である。現実的にこのような細骨材が使用されることは稀であり、これらを除いて考えると、限られた実験結果からの推定ではあるが、細骨材が替わることによる乾燥収縮率の変化は 100×10^{-6} 程度と考えられる。

3.5 粗骨材の乾燥収縮率とコンクリートの乾燥収縮率との関係

粗骨材の乾燥収縮率の測定では、概ね4日間でひずみが安定した。

骨材の乾燥収縮率は、方向依存性があることが予想されるため、3軸計測のひずみゲージを用いて、骨材の長さ変化試験を実施し、方向依存性の程度を把握した。1骨材当たりの試験片数 n は3とした。乾燥収縮の最小主ひずみと最大主ひずみの関係を図 3.5.1 に示す。乾燥収縮の最小主ひずみと最大主ひずみの差は、概ね 25%程度であり、異方性は比較的小さい結果となった。このため、1軸計測のひずみゲージを用いた試験結果で、骨材の乾燥収縮率を十分表現し得ると考えられる。

1軸計測のひずみゲージによって測定した骨材の乾燥収縮率の結果一覧を表 3.5.1 に示す。各骨材の乾燥収縮率の平均値と標準偏差の関係を図 3.5.2 に示す。標準偏差は、乾燥収縮率の平均値が大きくなると、大きくなる傾向となり、変動係数は 40%程度と比較的大きな結果となった。このため、信頼できる試験データを得るためには 10 個程度の測定データが必要と考えられる。

骨材の乾燥収縮率（1軸ひずみゲージの平均値）とコンクリートの乾燥収縮率の関係を図 3.5.3に示す。双方の間には高い相関性が認められ、骨材の乾燥収縮率がコンクリートの乾燥収縮率に対し多大な影響を与えていることが明らかとなった。また、骨材の乾燥収縮率の測定は、コンクリートの乾燥収縮率を推定するひとつの指標として極めて有効であると考えられる。

表-3.5.1 骨材の乾燥収縮率測定結果

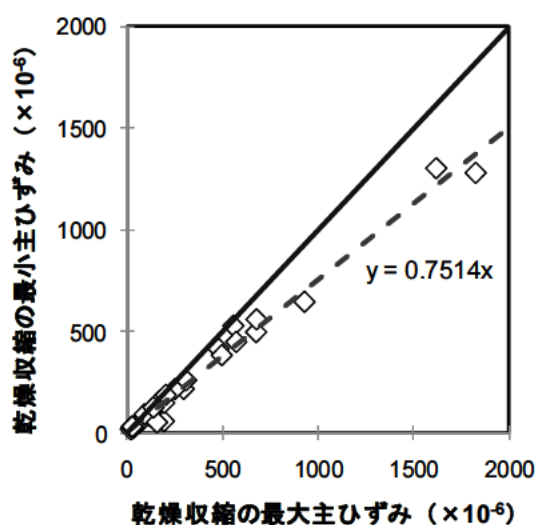


図-3.5.1 最小主ひずみと最大主ひずみの関係

分類	No.	n	乾燥収縮率 ($\times 10^{-6}$)				
			平均	標準誤差	標準偏差	最小	最大
火山岩	AM A	7	383	59	155	198	611
	AT B	19	126	10	46	50	228
	AT C	7	334	64	170	167	613
	TO	7	348	19	51	288	446
	IS G	8	646	116	328	248	1296
	MG A	10	416	41	129	210	628
	FS A	7	550	187	494	130	1583
深成岩	DD	16	180	22	89	33	348
砕屑岩	SP	43	1529	76	496	486	2753
	TZ	10	620	44	138	408	828
	KS	30	86	5	30	29	147
	OM	13	139	8	31	78	198
	ZT	15	459	16	62	357	561
	OT	22	935	88	413	267	1719
	SK	15	528	30	117	233	686
火砕岩	FS B1	15	255	28	109	59	532
	FS B2	11	907	134	445	245	1766
生物岩	LI L	15	21	2	6	10	31
	LI H	15	26	1	4	18	31

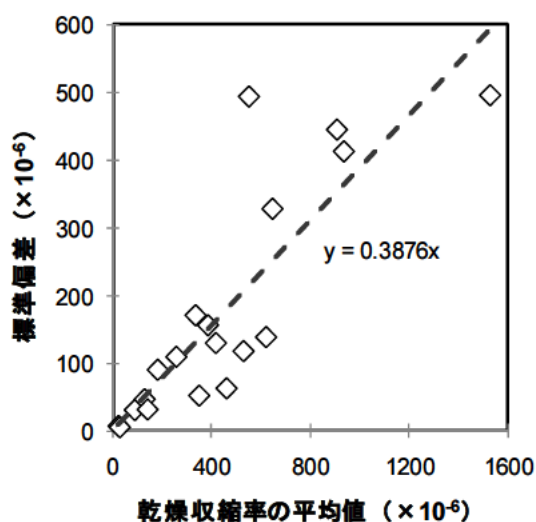


図-3.5.2 乾燥収縮率の平均値と標準偏差の関係

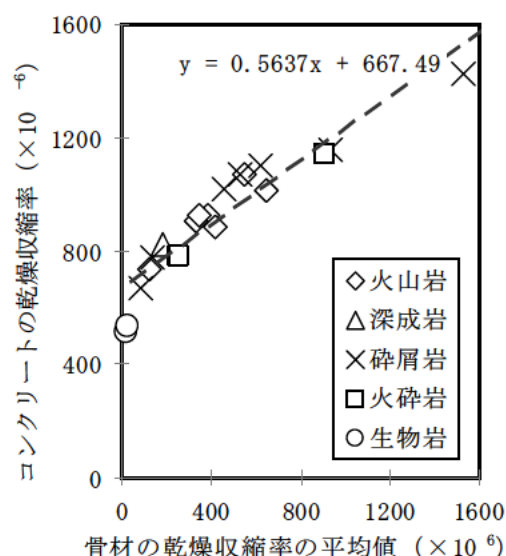


図-3.5.3 骨材の乾燥収縮率とコンクリートの乾燥収縮率との関係

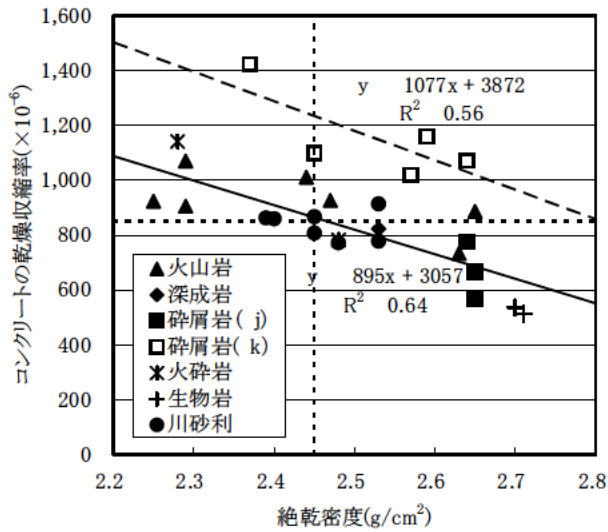
3.6 粗骨材の物理的性質とコンクリートの乾燥収縮率との関係

粗骨材の絶乾密度と乾燥収縮率との関係を図 3.6.1 に、粗骨材の吸水率と乾燥収縮率との関係を図 3.6.2 に、粗骨材の安定性と長さ変化率との関係を図 3.6.3 に示す。これらの図では白亜紀の砕屑岩(k)のみが他の骨材と傾向が異なったので、分けて整理した。

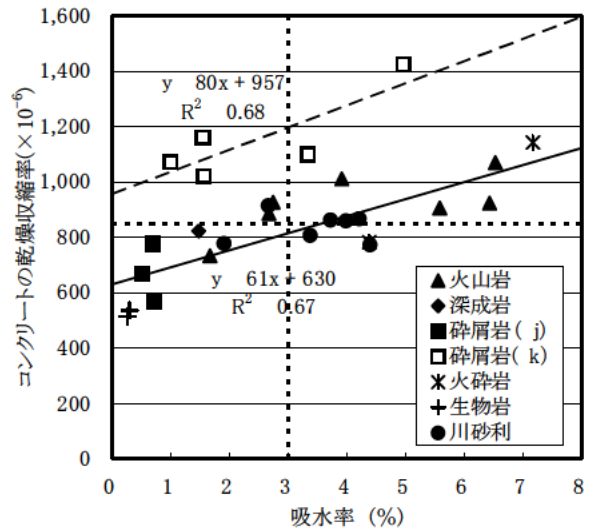
傾向としては各物性値が悪くなるほど長さ変化率は大きくなる傾向を示し、白亜紀の砕屑岩を他と分けることで、各種の骨材物性とコンクリートの乾燥収縮率との相関係数は表 3.6.1 に示すように、0.75～0.82 となった。各図には骨材の品質規格値を点線で示しているが、白亜紀の砕屑岩を除くと、各物性の規格値付近の乾燥収縮率は、概ね 8×10^{-4} 程度となり、本実験の範囲では、現在の骨材規格の妥当性が伺えた。

図 3.6.4～3.6.6 は砕石粗骨材に関して、粗骨材の各物性値と 3.5 で測定した粗骨材の乾燥収縮率との関係を示したものである。こちらでも、白亜紀の砕屑岩を他と分けることで、各種の骨材物性と骨材の乾燥収縮率とは比較的良い対応を示した（表 3.6.2）。各図には骨材の品質規格値を点線で示した。図 3.5.3 より、コンクリートの乾燥収縮率 8×10^{-4} に対応した粗骨材の乾燥収縮率は 320×10^{-6} 程度であり、白亜紀の砕屑岩を除くと、各物性の規格値付近の乾燥収縮率は、概ね 320×10^{-6} 程度となった。

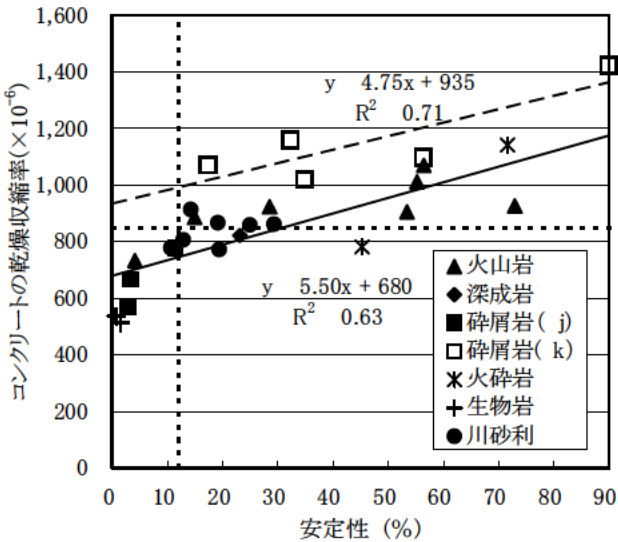
砕屑岩に関しては、ジュラ紀の砕屑岩を■、白亜紀の砕屑岩を□で示した。いずれの砕屑岩であっても、密度および吸水率の規格値は満足しているが、物性値の違いは明確である。長期や超長期の建築物に用いる場合など、乾燥収縮を厳しく管理する必要がある場合には、砕屑岩に限って、絶乾密度、吸水率、安定性等の規格値を厳しく設定することで、乾燥収縮率の大きな骨材を選別することも可能と考えられる。なお、安定性については、結果にばらつきが生じやすいことから、余裕を持った規格値を設定することが望ましく考えられる。



図一3.6.1 粗骨材密度とコンクリート乾燥収縮率との関係



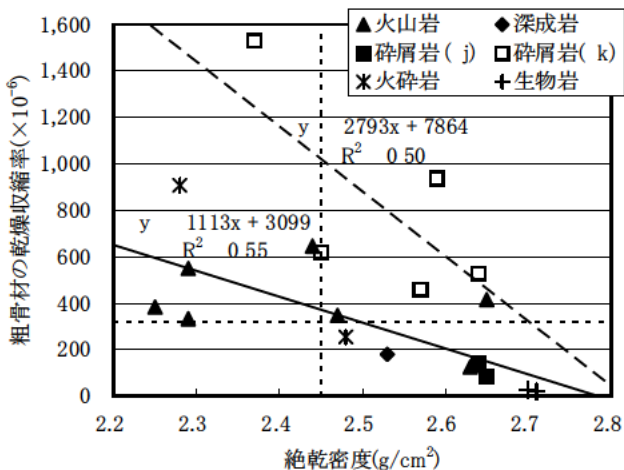
図一3.6.2 粗骨材吸水率とコンクリート乾燥収縮率との関係



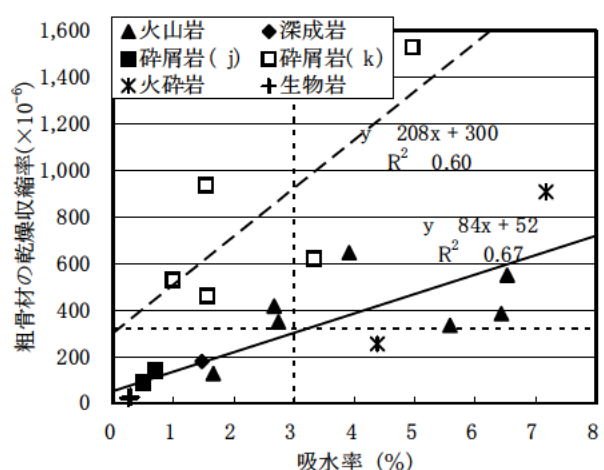
図一3.6.3 粗骨材安定性とコンクリート乾燥収縮率との関係

表一3.6.1 各物性とコンクリート乾燥収縮率との相関関係

比較対象とした物性		測定方法	乾燥収縮率との相関係数	
			白亜紀の砕屑岩	それ以外の粗骨材
粗骨材の基本物性	絶対乾密度	JIS A 1110	0.75	0.80
	吸水率	JIS A 1110	0.82	0.82
	安定性	JIS A 1122	0.84	0.79
水蒸気吸着率		20℃, 湿度33%での吸着率	0.96	0.74
コンクリートの弾性係数	動弾性(1) 撓み振動	JIS A 1127 (角柱供試体)	0.85	0.85
	動弾性(2) 縦振動	JIS A 1127 (円柱供試体)	0.84	0.84
	動弾性(3) 超音波伝搬速度	超音波伝搬速度 (円柱供試体)	0.89	0.88
	静弾性(1)	JIS A 1149 (1/3割線)	0.91	0.77
	静弾性(2)	初期接線	0.82	0.84



図一3.6.4 密度と粗骨材乾燥収縮率との関係



図一3.6.5 吸水率と粗骨材乾燥収縮率との関係

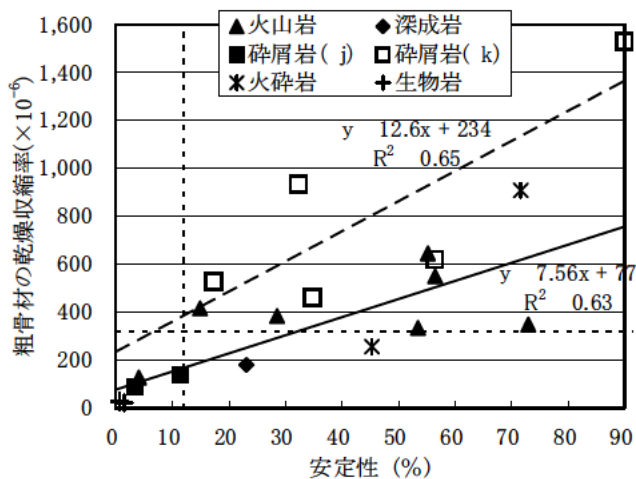


図-3.6.6 安定性と粗骨材乾燥収縮率との関係

表-3.6.2 粗骨材物性と粗骨材乾燥収縮率との相関関係

比較対象とした物性		測定方法	乾燥収縮率との相関係数	
			白亜紀の 砕屑岩	それ以外の 粗骨材
粗骨材 の基本 物性	絶乾密度	JIS A 1110	0.71	0.74
	吸水率	JIS A 1110	0.77	0.82
	安定性	JIS A 1122	0.81	0.79
水蒸気吸着率		20℃, 湿度33% での吸着率	0.93	0.88

3.7 骨材の水蒸気吸着率とコンクリートの乾燥収縮率との関係

時間経過に伴う粗骨材の水蒸気吸着率の変化を図 3.7.1 に示す。水蒸気吸着率は時間の経過に伴って除々

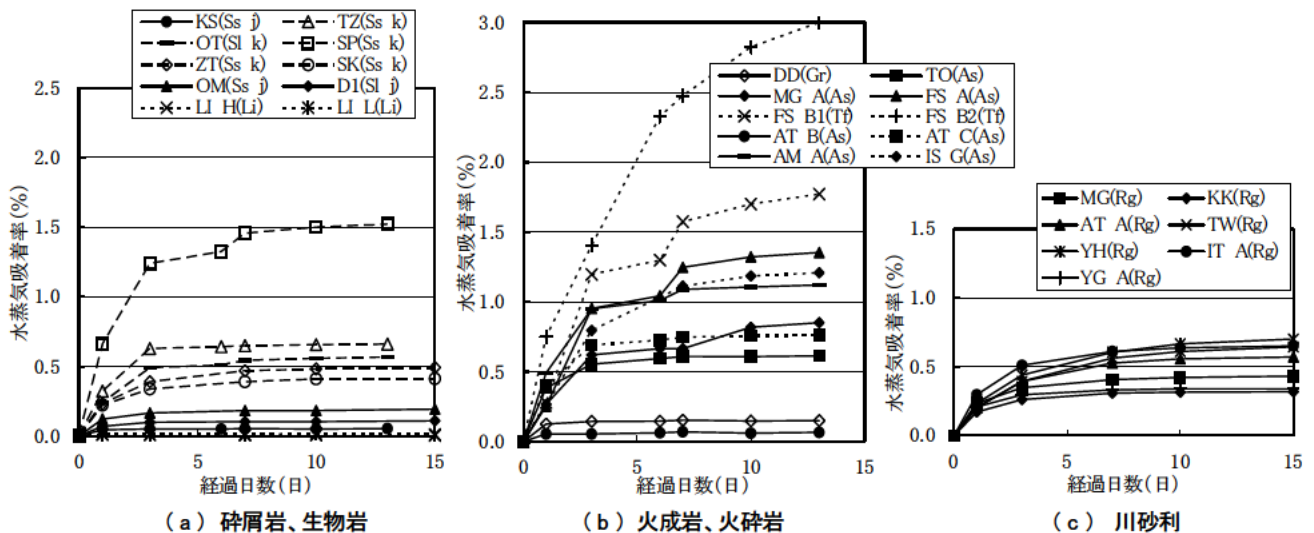


図-3.7.1 水蒸気吸着率の経時変化

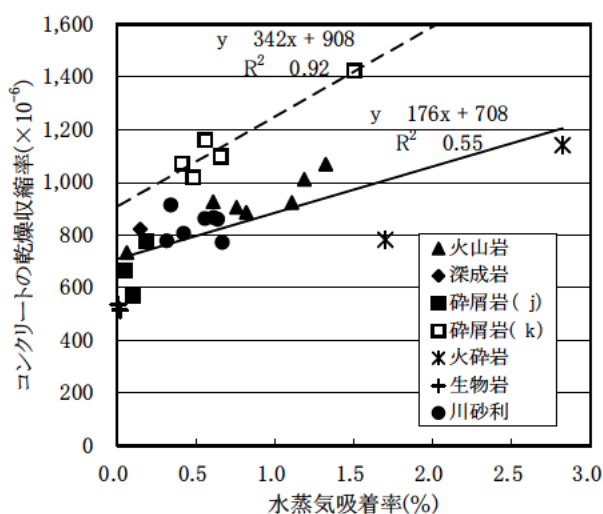


図 3.7.2 粗骨材の水蒸気吸着率とコンクリート乾燥収縮率との関係

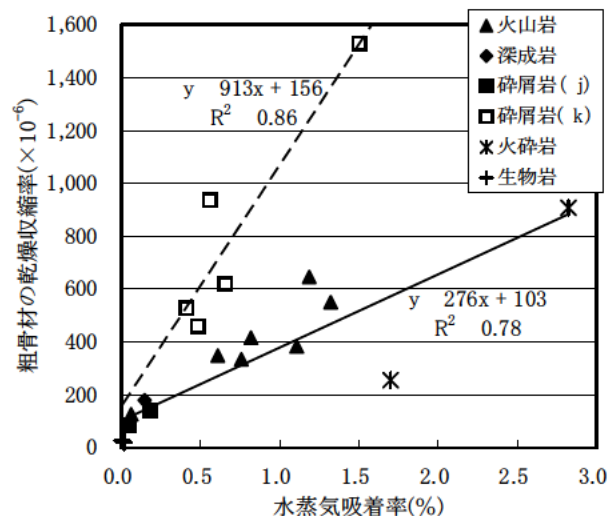


図 3.7.3 粗骨材の水蒸気吸着率と粗骨材乾燥収縮率との関係

に増加し、水蒸気吸着率の小さなものほど早く定常状態に達する傾向を示した。

経過日数 10 日時点の水蒸気吸着率とコンクリートの長さ変化率との関係を図 3.7.2 に、粗骨材の乾燥収縮率との関係を図 3.7.3 に示す。白亜紀の砕屑岩とそれ以外とは異なる傾向を示し、これを分けることで、水蒸気吸着率と長さ変化率との間に相関関係が認められた（表 3.6.1 および表 3.6.2）。

細骨材の水蒸気吸着率と細骨材の種類を変えたケースのコンクリートの乾燥収縮率（図 3.4.1(a)）との関係は、図 3.7.4 のようであった。

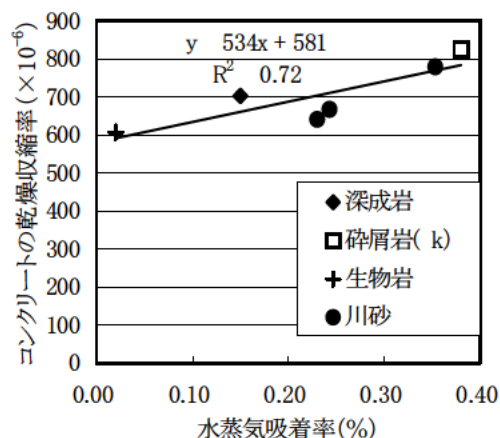


図-3.7.4 細骨材の水蒸気吸着率とコンクリートの乾燥収縮率との関係

3.8 コンクリートの弾性係数と乾燥収縮率との関係

コンクリートの乾燥収縮率、圧縮強度および弾性係数測定結果を表 3.8.1 に示す。

コンクリートの静弾性係数（割線弾性係数）とシリーズ1のコンクリートの乾燥収縮率との関係を図 3.8.1 に、初期弾性係数と長さ変化率との関係を図 3.8.2 に示す。動弾性係数が低いものほど長さ変化率が大きくなる傾向を示し、白亜紀の砕屑岩とそれ以外を分けることで、比較的高い相関性を示した。初期弾性係数を算出した応力レベルは $0 \sim 1.27 \text{ N/mm}^2$ であり、測定ひずみ量は 50×10^{-6} 程度と非常に小さな値であることから、測定値のばらつきの影響が大きいことが予想されたが、結果としては図 3.8.1 よりも白亜紀の砕屑岩以外の決定係数はやや高くなった。

円柱供試体の 28 日材齢における縦振動による動弾性係数と乾燥収縮率との関係を図 3.8.3 に、超音波による動弾性係数と乾燥収縮率との関係を図 3.8.4 に示す。また、長さ変化試験を実施した角柱供試体の 7 日材齢におけるたわみ振動による動弾性係数と長さ変化率との関係を図 3.8.5 に示す。いずれの図においても、白亜紀の砕屑岩とそれ以外を分けることで、各動弾性係数と長さ変化率とは比較的高い相関性を示した。

図 3.8.6 は同じ円柱供試体に対して測定した静弾性係数（割線弾性係数）と、動弾性係数との関係を示したものである（シリーズ1, 2, 3）。静弾性係数の値に対して、動弾性係数は約 10 kN/mm^2 大きい値を示した。

シリーズ1, 2, 3の結果を用い、圧縮強度と各種弾性係数との関係を整理した。この結果を図 3.8.7～3.8.9 に示す。これらの図では、コンクリートの乾燥収縮率の大きさを4ランクに分けて示した。いずれの図においても、乾燥収縮率が大きいものに関しては、圧縮強度に対する弾性係数の値が相対的に小さくなる傾向を示した。なお、この関係図においては岩種の違いによる差は見られなかった。

図 3.8.7 にはコンクリート標準示方書に示される圧縮強度と静弾性係数の関係を実線で示した。また、この関係よりも弾性係数が 4 kN/mm^2 小さい関係を点線で示した。この図より、示方書に示す関係よりも弾性係数が 4 kN/mm^2 以上小さいものでは、コンクリートの乾燥収縮率の大きいものの割合が高くなった。

図 3.8.8 および 3.8.9 にも同様に実線と点線を描いた。これらの図では縦軸に動弾性係数をとっているが、図 3.8.6 より、静弾性係数の値に対して動弾性係数は約 10 kN/mm^2 大きい値を示すことから、示方書の静弾

表-3.8.1 コンクリートの乾燥収縮率、圧縮強度、弾性係数測定結果

	コンクリート配合			乾燥収縮率 182日 ($\times 10^{-6}$)	圧縮強度 σ_{28} (N/mm^2)	動弾性係数 (N/mm^2)			静弾性係数(N/mm^2)	
	細骨材	粗骨材	W/C (%)			たわみ振動	縦振動	超音波	1/3割線	初期接線
						材齢7日	材齢28日			
シリーズ1	S-K	KS	55	667	39.4	39,825	42,916	42,019	32,402	37,700
		DD		822	35.8	31,233	35,165	35,306	19,142	29,000
		TO		926	32.5	30,085	35,589	36,039	23,680	24,500
		TZ		1099	31.7	28,350	32,548	33,492	22,637	26,100
		OT		1160	38.1	32,214	36,610	35,604	23,327	25,400
		MG-A		886	41.8	34,479	38,884	37,929	29,714	32,400
		FS-A		1069	29.0	27,108	30,302	31,666	17,970	20,100
		FS-B1		782	33.8	33,754	35,093	38,166	26,989	31,000
		FS-B2		1142	30.6	25,684	29,269	30,177	22,543	24,400
		AT-B		733	43.4	29,967	33,189	35,139	20,427	26,500
		AT-C		906	33.9	27,306	32,189	31,528	20,451	27,800
		AM-A		924	37.2	28,364	33,560	31,092	22,971	24,200
		SP		1424	25.9	23,138	28,001	28,923	16,207	20,100
		IS-G		1011	24.0	32,076	32,240	34,309	21,300	26,564
		ZT		986	38.9	34,881	37,306	36,871	32,271	41,600
		SK		1018	41.4	37,345	39,416	38,306	27,603	34,100
		D1		568	41.4	42,665	43,330	43,278	33,000	37,500
		OM		777	40.3	40,282	41,517	41,242	29,540	39,400
		LI-H		522	37.4	41,040	42,607	45,827	34,297	40,500
		LI-L		511	35.2	40,433	41,553	44,619	32,992	38,700
		MM		794	31.3	32,420	35,042	36,657	26,303	28,800
		KK		757	32.3	33,358	35,487	35,975	26,863	29,500
		AT-A		856	31.4	30,699	33,051	33,771	25,067	25,600
		TW		858	33.0	31,210	33,578	35,092	25,655	27,800
		YH		767	40.7	33,932	35,601	36,294	27,552	29,700
		IT-A		860	31.8	31,418	33,306	33,626	24,956	27,900
		YG		921	32.6	31,922	34,026	34,472	24,548	25,900
シリーズ2	S-K2	KS	55	779	33.3	42,381	44,102	43,301	33,335	39,800
	S-TW	KS		640	36.1	39,649	40,789	40,236	36,117	35,400
	S-DD	KS		703	32.4	43,208	45,103	44,197	32,426	38,200
	S-ZT	KS		823	29.4	42,478	43,842	43,997	29,427	37,400
	S-LI	KS		607	35.2	45,501	45,713	45,035	35,166	46,000
シリーズ3	S-K2	KS	55	821(738)	45.0	42,381	44,102	43,301	33,335	39,000
	S-K2	OM		776(752)	40.3	40,282	41,517	41,243	29,540	39,400
	S-K2	ZT		1176(1134)	42.1	36,105	39,044	38,752	25,519	32,500
	S-K2	KS	40	686(612)	56.8	46,278	47,110	45,158	35,931	39,900
	S-K2	OM		808(784)	50.2	41,537	42,894	42,434	31,662	35,600
	S-K2	ZT		1078(1036)	55.3	38,103	40,328	39,899	26,228	33,800
	S-K2	KS	30	654(732)	84.8	51,704	51,324	48,304	40,383	42,700
	S-K2	OM		686(882)	93.2	50,728	51,265	48,959	37,362	42,800
	S-K2	ZT		960(1124)	97.6	43,383	45,168	42,871	29,639	34,500

()は終結を基点とした収縮率

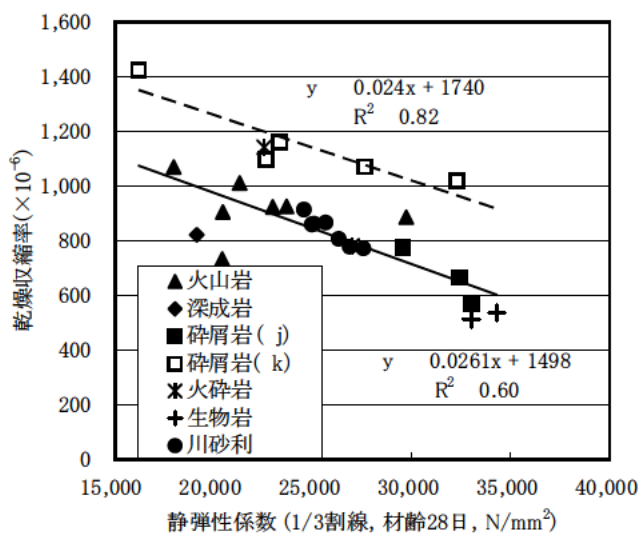


図-3.8.1 静弾性係数(1/3割線)と乾燥収縮率との関係

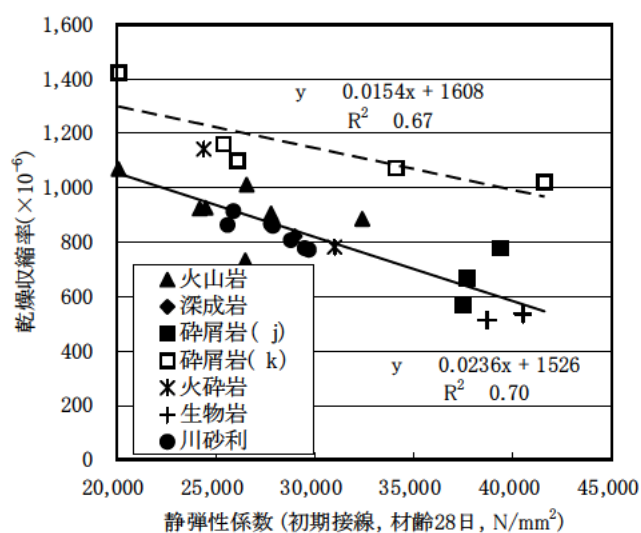


図-3.8.2 静弾性係数(初期接線)と乾燥収縮率との関係

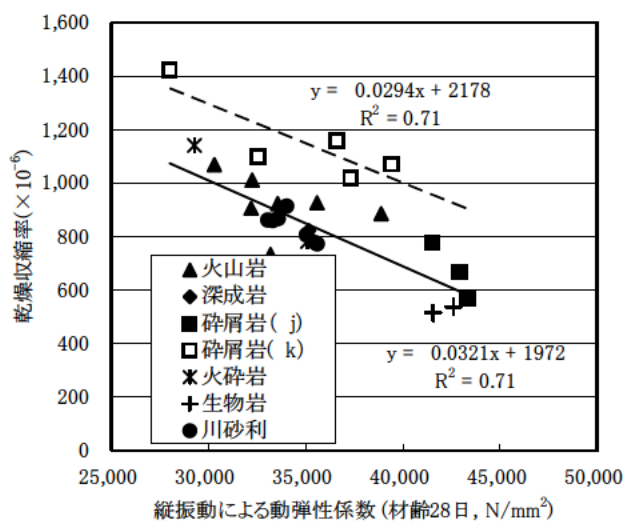


図-3.8.3 縦振動による動弾性係数と乾燥収縮率との関係

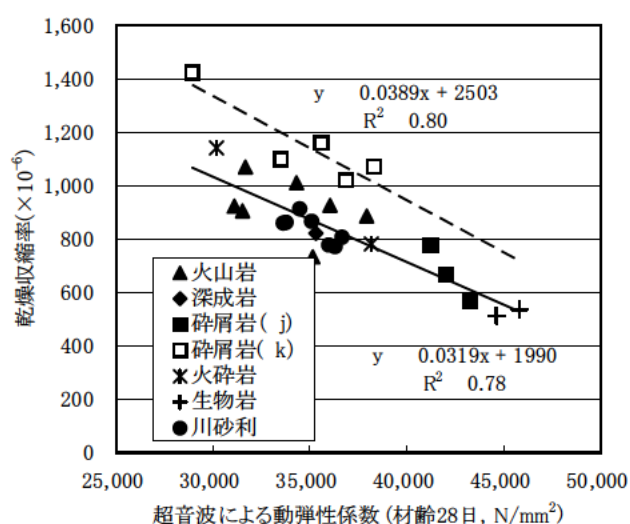


図-3.8.4 超音波による動弾性係数と乾燥収縮率との関係

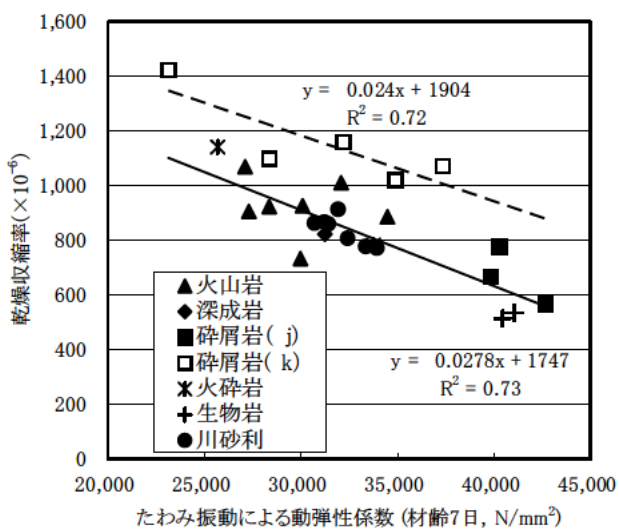


図-3.8.5 たわみ振動による動弾性係数と乾燥収縮率との関係

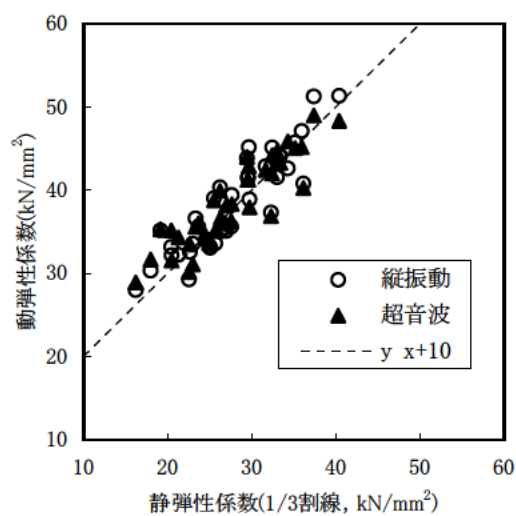
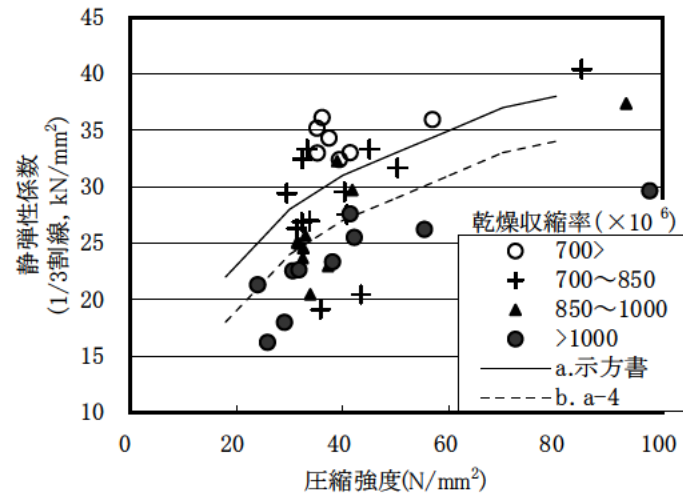
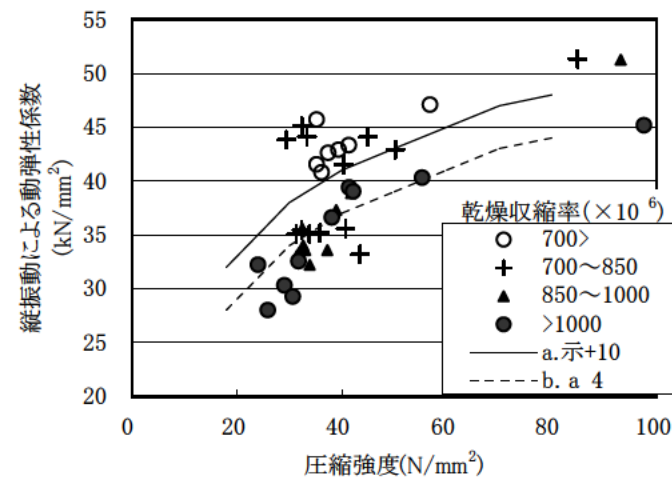


図-3.8.6 静弾性係数と動弾性係数の比較

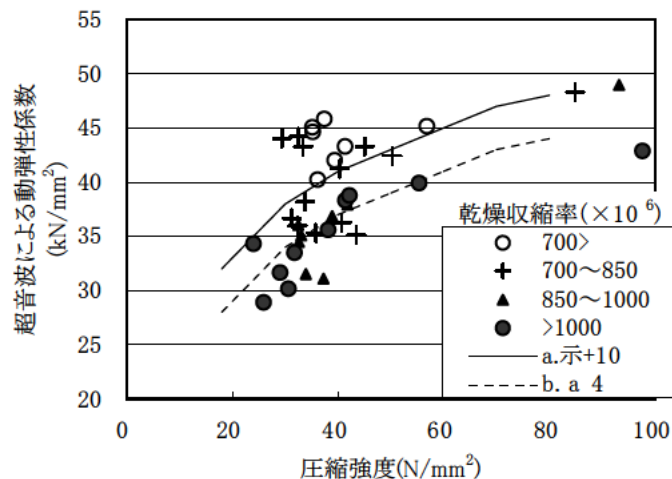
性係数の値に 10 を加えて実線を示し、点線は実線から弾性係数が 4 kN/mm^2 小さい線とした。これらの図においても、点線よりも下側の範囲で、コンクリートの乾燥収縮率の大きいものの割合が高くなった。このように、圧縮強度と弾性係数の関係から、粗々の推定ではあるが、乾燥収縮率の大きなコンクリートを推定することが可能と考えられる。



図－3.8.7 圧縮強度と静弾性係数の関係



図－3.8.8 圧縮強度と縦振動による動弾性係数の関係



図－3.8.9 圧縮強度と超音波による動弾性係数の関係

3.9 水セメント比の影響

シリーズ3の長さ変化試験結果を図 3.9.1 に示す。一般的に、長さ変化試験は7日の水中養生終了後を起点として測定するので、図 3.9.1 はそれに従ってグラフを作成している。一方、水セメント比が低い配合の場合は、打設して数日間の間に自己収縮が発生することが知られている。図 3.9.2 は供試体内に埋め込んだひずみゲージによって測定した材齢7日までの長さ変化率である。このうち W/C30%のケースでは、打設直後はやや膨張し、概ね終結時間に対応する約 0.3 日以降に急速な自己収縮を示している。その後、1 日を経過した時点で脱型し、水中養生に移行しており、吸水による膨潤により自己収縮量は減少する傾向を示した。W/C40%のケースでは、顕著な自己収縮は認められなかった。このように、特に W/C30%の条件では、自己収縮が顕著であり、乾燥収縮率の測定にはこれを考慮する必要があると考えられる。そこで、終結時を初期値として、材齢7日までの長さ変化率を図 3.9.1 に加えた結果を図 3.9.3 に示す。ここで、W/C55%のケースでは材齢7日までのひずみ量を測定していないので W/C40%の測定結果を用いた。

図 3.9.1 および図 3.9.3 から、材齢6ヶ月時点の乾燥収縮率を比較した結果を図 3.9.4 に示す。これによると、材齢7日を起点とした乾燥収縮率は、水セメント比が低いものほど小さくなる傾向を示したが、終結を起点とした乾燥収縮率は、水セメント比によらず、概ね一定と見ることができる。

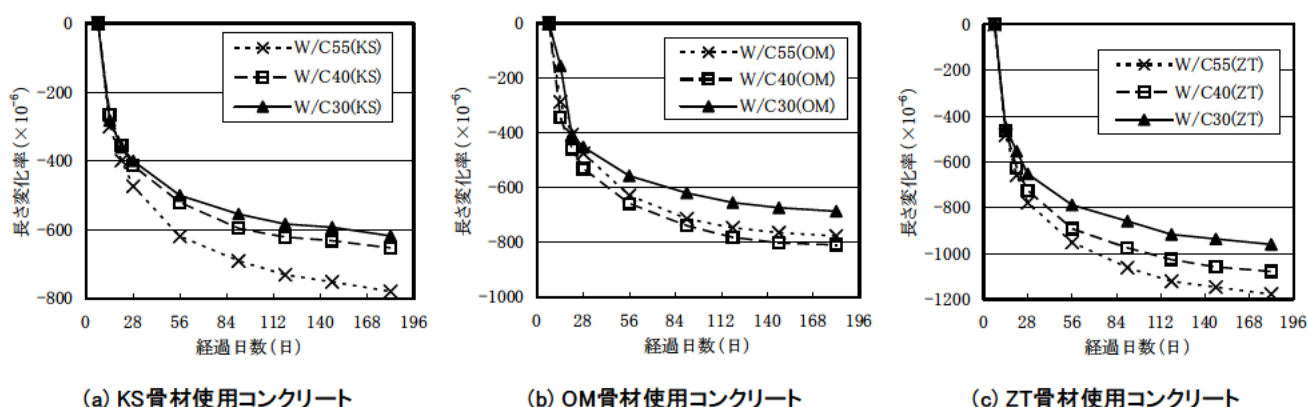


図 3.9.1 水セメント比の比較(7日を基点とした長さ変化試験結果)

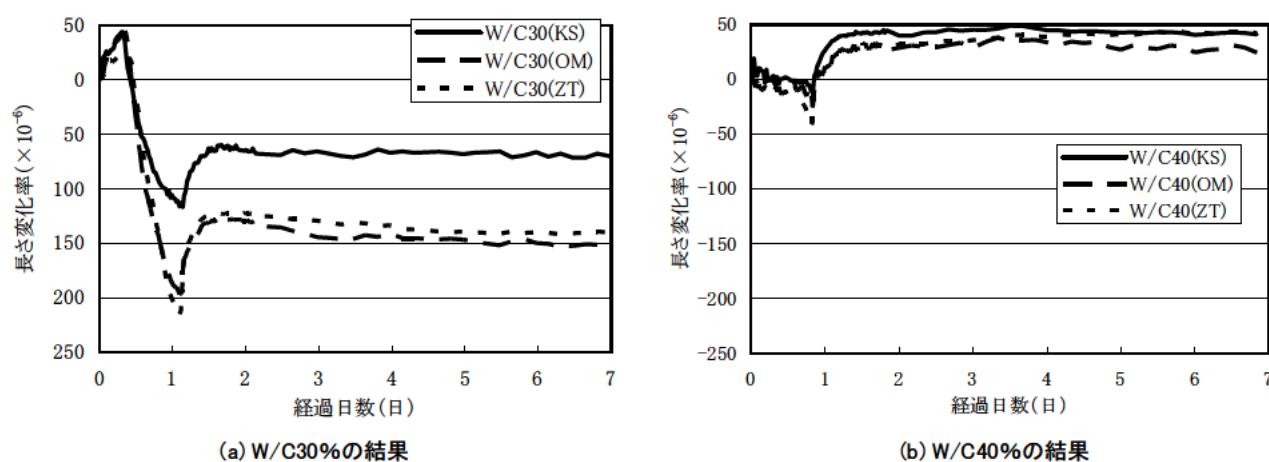


図 3.9.2 材齢7日までの長さ変化測定結果

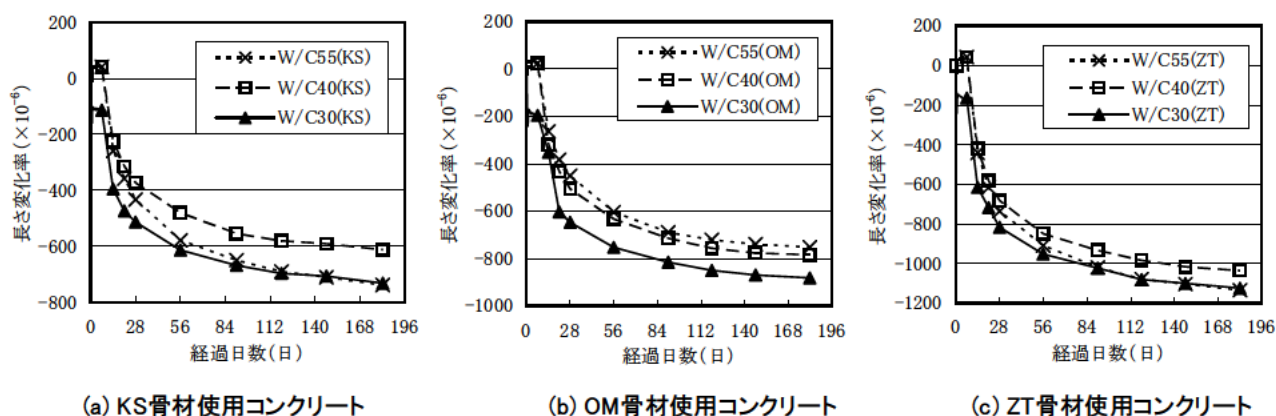


図-3.9.3 水セメント比の比較(終結を基点とした長さ変化試験結果)

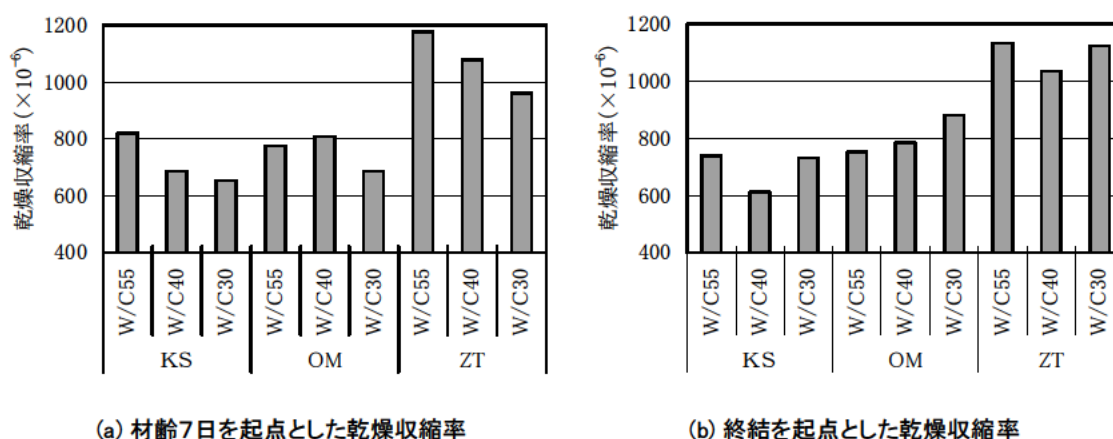


図-3.9.4 水セメント比の違いによる乾燥収縮率の違い

3.10 40×40×160mm 供試体を用いた長さ変化試験結果

40×40×160mm 供試体を用いた長さ変化試験結果のうち、 $G_{\max}25\text{mm}$ の結果を図 3.10.1(a)に示す。(b)には同じ配合の100×100×400mm 供試体の試験結果を示す。40×40×160mm 供試体の試験結果では、28 日程度までの長さ変化率が大きく、それ以降の変化率は僅かであった。また、100×100×400mm 供試体の試験結果と同様に粗骨材の違いによる収縮量の違いが確認できた。

図 3.10.2 は、粗骨材最大寸法の違いについて試験を行った結果である。これによると、粗骨材最大寸法が小さいものほど、収縮量が僅かに大きくなる傾向が認められた。

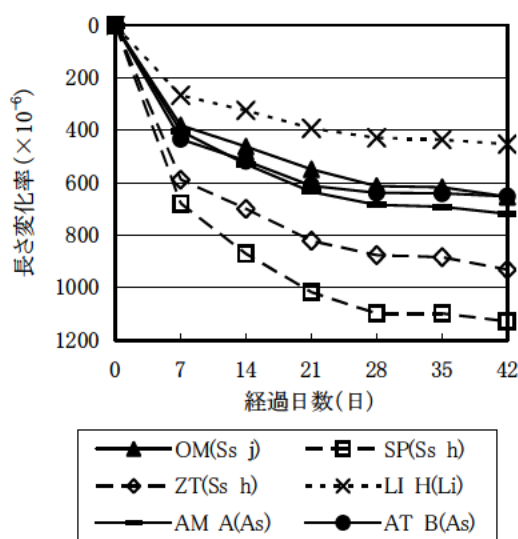
図 3.10.3 は40×40×160mm 供試体の結果と100×100×400mm 供試体の結果を比較したものであり、40×40×160mm 供試体の収縮量は100×100×400mm 供試体の収縮量よりもやや小さい結果となった。この原因としては、本実験では1辺40mmの型枠に $G_{\max}25\text{mm}$ のコンクリートを打ち込んだために、大きな骨材が供試体の中心線付近に偏在することとなり、これによって粗骨材の収縮量低減作用がより大きく作用したことが考えられる。この弊害を低減するためには $G_{\max}$ を小さくすることが有効と考えられ、 $G_{\max}$ を10mmとした試験結果は100×100×400mm 供試体の結果と良く一致した(図 3.10.3の▲)。

ちなみに、コンクリートの長さ変化率試験方法を規定したJIS A 1129では、供試体の1辺の長さは $G_{\max}$ の3倍以上とすることが推奨されており、1辺が40mmであれば $G_{\max}$ は13mm以下となる。また、今回の100

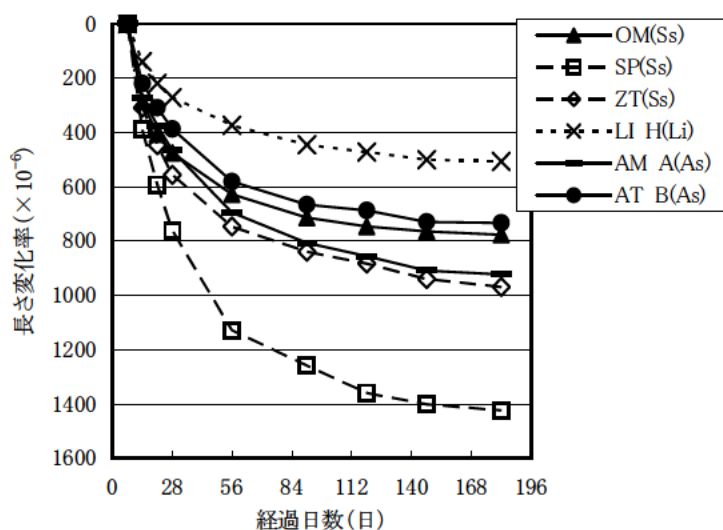
×100×400mm 供試体の試験では $G_{\max}$ を 25mm としており、辺長の 1/4 である。40×40×160mm 供試体でも同じ比率で試験を行おうとすると $G_{\max}$ は 10mm となる。

なお、今回の実験では、臭化ナトリウムの過飽和水溶液による湿度調整を試みたが、乾燥開始から 1 週間の間は調湿が不十分で湿度が 70～75% となった。調湿が適切に行われれば、長さ変化率の収束は今回の実験結果よりも早まることが予想される。

以上のことから $G_{\max}$ に配慮することで、40×40×160mm 供試体を用いた乾燥材齢 28 日程度の試験で、コンクリートの乾燥収縮率の推定が可能と考えられる。ただし、限られた実験結果であり、今後とも検証を進める必要がある。



(a) 40×40×160mm 供試体の試験結果



(b) 100×100×400mm 供試体の試験結果

図-3.10.1 長さ変化試験結果

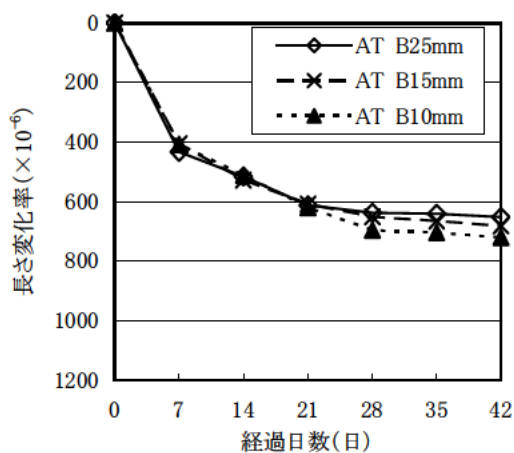


図-3.10.2 粗骨材最大寸法の違いの影響

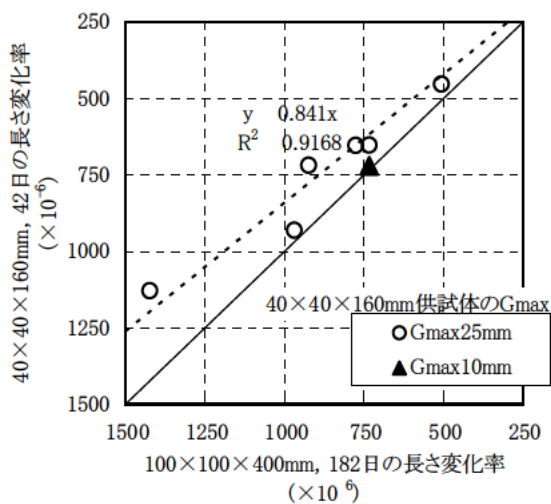


図-3.10.3 長さ変化試験結果の比較

3.11 まとめ

骨材がコンクリートの乾燥収縮率に与える影響に関する研究に関して、研究結果を以下に整理する。

- (1) コンクリートの乾燥収縮率は、粗骨材の種類の影響を大きく受ける。今回の検討の範囲では、白亜紀の砕屑岩を用いた配合で乾燥収縮率が大きくなった。
- (2) 細骨材の違いがコンクリートの乾燥収縮率に与える影響は、粗骨材に比較して小さかった。
- (3) 粗骨材の乾燥収縮率をひずみゲージを用いて測定した結果、その粗骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮率と高い相関関係を示した。
- (4) 粗骨材の種類を白亜紀の砕屑岩とそれ以外とに分類することで、コンクリートの乾燥収縮率は、粗骨材の密度、吸水率、安定性および水蒸気吸着率と比較的良好な対応関係を示した。
- (5) 粗骨材の種類を白亜紀の砕屑岩とそれ以外とに分類することで、コンクリートの乾燥収縮率は、コンクリートの弾性係数と比較的良好な対応関係を示した。また、圧縮強度と弾性係数との関係をみたところ、乾燥収縮率の大きなコンクリートでは、圧縮強度に対する弾性係数の値が低い傾向が認められ、この傾向には岩種の違いの影響は認められなかった。
- (6) 水セメント比がコンクリートの乾燥収縮率に与える影響については、測定開始材齢を7日とした場合は、低水セメント比ほど乾燥収縮率が小さくなる傾向を示したが、コンクリートの終結を起点として自己収縮も考慮すると、水セメント比の違いによる有意な差は認められなかった。
- (7) 40×40×160mm 供試体を使用することで、乾燥材齢28日程度でコンクリートの乾燥収縮率を測定できる可能性を示した。

附 錄

附録 1．骨材の耐凍害性判定方法（案）

1．適用範囲

本判定方法（案）は、凍結融解抵抗性を必要とするコンクリートに使用する骨材の耐凍害性の判定方法の案を示すものである。

骨材は天然の砂利および碎石の粗骨材を対象とするものであり、人工軽量骨材、各種スラグ骨材、および再生骨材は対象としない。また、細骨材は対象としない^{注1)}。

凍害の環境条件としては、一般的な土木構造物が凍結融解作用を受ける場合を想定しており、積雪寒冷地などにおいて、判定基準を引き上げることを妨げるものではない。また、海水や凍結防止剤等による塩害・凍害の複合劣化は対象としない。

注 1) 本編 1.2 でも述べたように、これまでの研究成果³⁾として、コンクリートの耐凍害性に与える影響が小さいことを確認しているので対象としないこととした。

2．骨材の最大寸法

判定試験を行う粗骨材の最大寸法は 25mm 以下を標準とする。なお、それ以上の寸法の骨材の評価については、同一産地、同一岩種であれば、25mm の判定結果をそのまま用いて判定して良い^{注2)}。

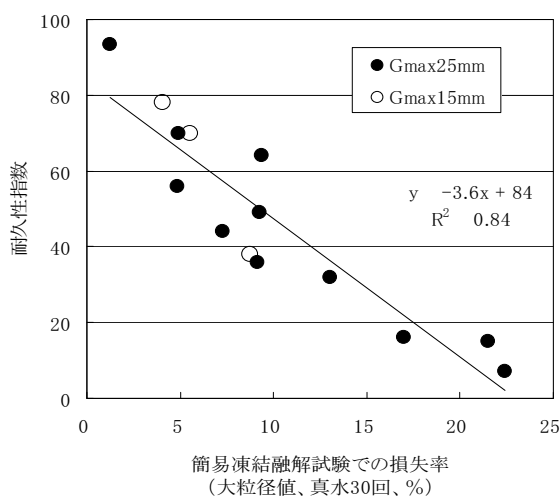
注 2) 本編 1.4 の図-1.4.1 に示したとおり、密度および吸水率は骨材粒子が小さいものほど品質が低くなる傾向を示している。また、安定性に関しては粒子径が 20～40mm 程度で最も劣化しやすい傾向を示している。これらのことから、同一産地、同一岩種であれば、25mm の判定結果をそのまま流用して良いと考えた。

3．骨材の分類

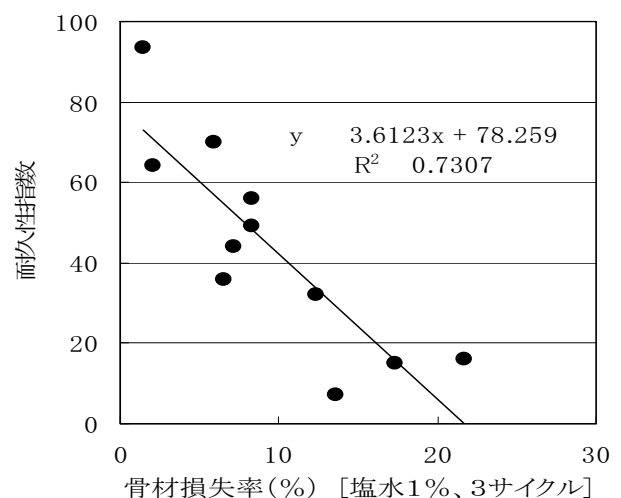
砂利と碎石とでは、骨材物性とコンクリートの耐凍害性との関係が異なるので、砂利と碎石は分けて扱う。

4．砂利の評価方法

粗骨材の簡易凍結融解試験方法（案）によって試験を行い、損失率を求める。試験には水道水（真水）を使用する方法と塩水を使用する方法とがあり、どちらで評価しても良い。試験結果の例を図 1 および図



図－1 損失率と耐久性指数の関係（真水 30 回）



図－2 損失率と耐久性指数の関係（塩水 3 回）

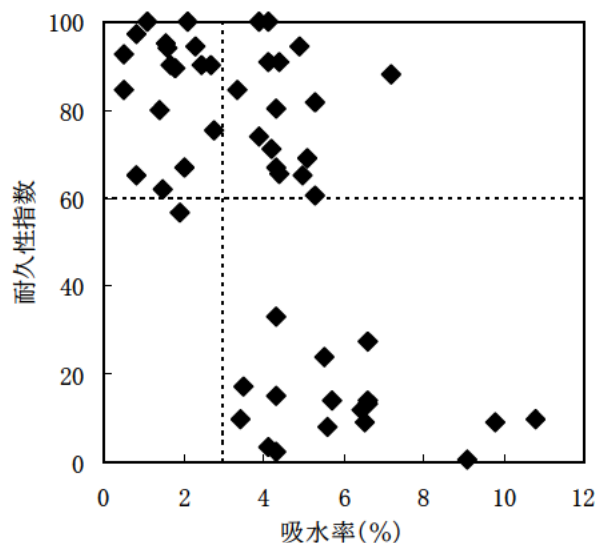
2に示すが、損失率とコンクリート（水セメント比 55%、AE コンクリート）の耐久性指数とは良い対応を示しており、特に真水を使用した試験での対応関係が良好である。

試験から得られる損失率が 5 %以下であれば、耐凍害性を有する骨材と判定して良い。

5. 碎石の評価方法

粗骨材の吸水率で評価して良い。図 3は、吸水率とコンクリート（水セメント比 55%、AE コンクリート）の耐久性指数との関係であり、吸水率が 3 %以下の範囲と、耐久性指数 60 以上の範囲が対応している。

吸水率が 3 %以下であれば、耐凍害性を有する骨材と判定して良い。



図－3 碎石の吸水率と耐久性指数の関係

6. 4および5で耐久性を有すると判定されない骨材の扱い

表 1に示す配合でコンクリート供試体を製造し、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法（A法）」によって試験を実施し、耐久性指数が 60 以上であれば、耐凍害性を有する骨材と判定して良い^{注3)}。

注3) この判定方法は、コンクリート標準示方書「ダムコンクリート編」と同一とした。

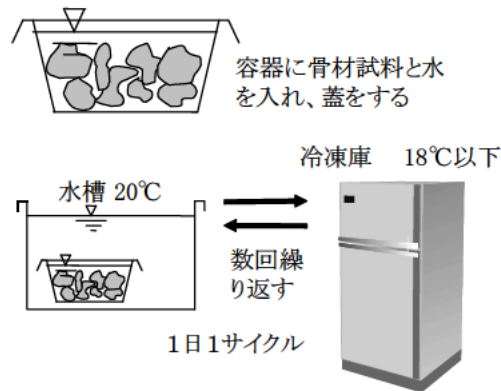
表－1 凍結融解試験を行う場合のコンクリート配合と試験条件

配合	試験条件
セメントの種類	普通ポルトランドセメント
水セメント比	55%
スランプの範囲	8.0±1.0cm
空気量の範囲	4.5±0.5%
養生	水中養生
試験開始材齢	28日

附録 2. 骨材の簡易凍結融解試験方法（案）

1. 試験の概要

この方法は図－1に示すように、容器に骨材試料と水（または塩水）を入れ、その容器ごと冷凍庫と水槽に交互に入れることで凍結融解作用を与え、再生骨材の粒度の変化から再生骨材の凍結融解抵抗性を評価する試験法である。



図－1 簡易凍結融解試験の概要

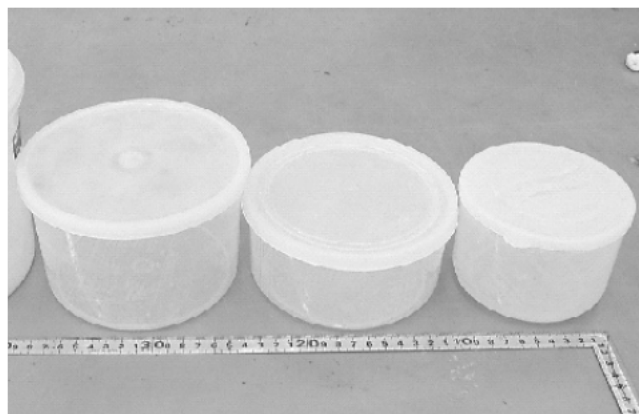
2. 適用範囲

本試験法は、砂利粗骨材の耐凍害性を評価することを目的に実施する試験法である。試験は砂利粗骨材の25mm以下の骨材を対象に実施する。

3. 試験に用いる機器

3.1 容器

ポリプロピレン製で蓋を有するもの（写真 1 参照）。容積は1,000cc程度のものが望ましい。



写真—1 容器の例（左から容量 1,500cc ,900cc ,600cc ）

3.2 冷凍庫

試料を 18℃以下に冷凍することが可能な冷凍庫^{注1)}。なお、18℃以下に到達するのに要する時間は各冷凍庫の性能と試料量によって異なるために、使用する冷凍庫で一度に試験可能な試料量を事前に確認しなければならない。

注1) スリースターもしくはフォースター冷凍庫を使用する。スリースターとは「最低温度が 18℃以下となる能力」を有する冷凍庫、フォースターとは「容量 100 リットルあたり 4.5kg の食料を 24 時間以内に 18℃以下に冷凍する能力」を有するもの。現在市販されている冷凍庫（冷凍冷蔵庫を含む）のほとんどはフォースターである。

3.3 水槽

水温が 20℃程度の水槽

3.4 ふるい

JIS Z 8801 に規定する呼び寸法が 4.75mm、9.5mm、16mm、19mm、26.5mm の網ふるい

3.5 はかり

秤量 2kg 以上、感量 0.1g 以下のはかり

3.6 温度計

容器内の水温を測定できる温度計、測定レンジは 30℃～25℃

4. 試験手順

- (1) 粗骨材の粒度群を 4.75-9.5mm、9.5-16mm、16-19mm、19-26.5mm とし、対象とする骨材の最大寸法から、上位 2 つの粒子群（表 1 参照）を試験の対象とする^{注2)}。対象とする骨材試料を気燥状態でふるい分け、上位 2 つの粒子群について 1kg 以上の試料を準備する。

注2) 本編 2.5.2 の検討結果より、コンクリートの耐凍害性には、骨材中の大きな粒子の影響が顕著であることが判明したため、試験の対象を上位 2 つの粒子群とした。

表－1 試験の対象とする粒子群

粗骨材最大寸法		試験の対象とする粒子群			
公称	ふるい目の寸法	4.75-9mm	9-16mm	16-19mm	19-26.5mm
20mm	19mm		○	○	
25mm	26.5mm			○	○

- (2) 各粒子群ごとに 1 つの容器を用意し、試験を行う。容器の容量に対して骨材試料の量ができるだけ多くなるように試料の量を設定し^{注3)}、容器に入れた粒子群の試料質量を 0.1g 単位で測定する。

注3) 骨材よりも水の比熱が大きいため、容器中の水量が多くなると凍結融解にかかる時間が長くなる。

- (3) 容器に水（または塩水）を満たし、蓋をする。水は水道水で良い。塩水は、質量比で 1 % の塩化ナトリウムを水道水に混入したものを用いる。
- (4) 容器の一つに温度計を設置する。温度計は容器の中心部分の温度が測定できるように配置する。
- (5) 容器を冷凍庫に入れ、中の水が 18℃以下となるまで冷凍する。凍結時間は 16 時間程度となるように冷凍庫の冷凍能力と容器数量を設定する。
- (6) 容器を冷凍庫から取り出し、水槽に入れ、中の氷が完全に融解するまで水中におく。融解時間は 8 時間程度を標準とする。

(7) 1日1サイクルで (5)と(6)を交互に繰り返す^{注4)}。

注4) 休日等で試験ができない日は凍結したままの条件として良い。

(8) 試験の終了は、水道水を使用した場合は30サイクル、塩水を使用した場合は3サイクルとする。所定のサイクル数が終了した後に、容器から試料を取り出し、気乾状態として、試験を行う前に使用したふるいでふるい、ふるいにとどまった試料の質量と、ふるいを通過した試料の質量を目量1 gまで計る。

5. 計算

5.1 各粒子群の損失質量分率

各粒子群の損失質量分率 (P_1) は、次式によって算出し、四捨五入によって小数点以下1けたに丸める。

$$P_a = \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) \times 100$$

ここに、 P_a : 各粒子群の損失質量分率 (%)

m_1 : 試験後にふるい上のとどまった試料の質量 (g)

m_2 : 試験後にふるいから抜け落ちた試料の質量 (g)

5.2 骨材の損失質量分率

骨材の損失質量分率は、次式によって算出する。

$$P_b = \frac{P_{a1} \times b_1 + P_{a2} \times b_2}{b_1 + b_2} \times 100$$

ここに、 P_b : 骨材の損失率 (%)

P_{a1} : 最上位の粒子群の損失質量分率 (%)

P_{a2} : 最上から2番目の粒子群の損失質量分率 (%)

b_1 : 最上位の粒子群の質量分率 (%)

b_2 : 最上から2番目の粒子群の質量分率 (%)

附録 3. コンクリートの乾燥収縮に与える粗骨材の評価方法（案）

1. 位置づけ

本評価方法は、一般的な土木用コンクリート^{注1)}の乾燥収縮率が過大とならない粗骨材を比較的簡易に判定するための目安となる指標を示すものである。

2. の評価方法は、乾燥ひび割れ抑制に対して比較的高い要求性能が求められる条件（プレストレストコンクリートや環境条件の厳しい場合など）に使用する骨材や、骨材の岩種等から大きな乾燥収縮率が予想される骨材^{注2)}、または、過去に使用実績のない骨材を評価する場合等を想定している。

3. の評価方法は、環境条件の厳しくない一般的なRC構造物に使用する骨材、これまでの使用実績や過去の試験結果等から乾燥収縮率が大きくないことがあらかじめ予想される骨材を評価することを想定している。

4. は、製造されたコンクリートの乾燥収縮率を、圧縮強度試験用のテストピースを用いて、大まかに推定することを想定している。

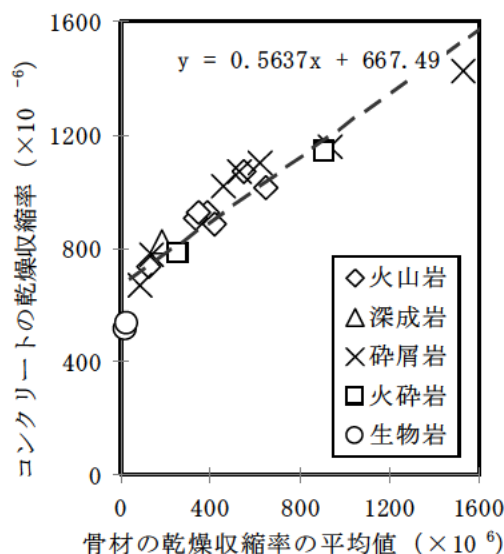
注 1) 細骨材に良質な川砂、セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比 40～55%、単位水量 160～170kg/m³ 程度の一般的な土木用コンクリートの配合を想定している。

注 2) 本編 3.3 の結果によれば、乾燥収縮率が大きい可能性のある粗骨材は、白亜紀以降に堆積した砕屑岩（砂岩、頁岩、粘板岩）である。

2. ひずみゲージによる骨材の乾燥収縮率測定法による評価

骨材が碎石である場合には、ひずみゲージによる粗骨材の乾燥収縮率試験方法（案）に従って試験を行う。

骨材の乾燥収縮率とコンクリートの乾燥収縮率の関係は図 1 のようである。この図をもとに、骨材の乾



図ー 1 骨材の乾燥収縮率とコンクリートの乾燥収縮率との関係

表－１ ひずみゲージによる骨材の乾燥収縮率測定法による評価の目安

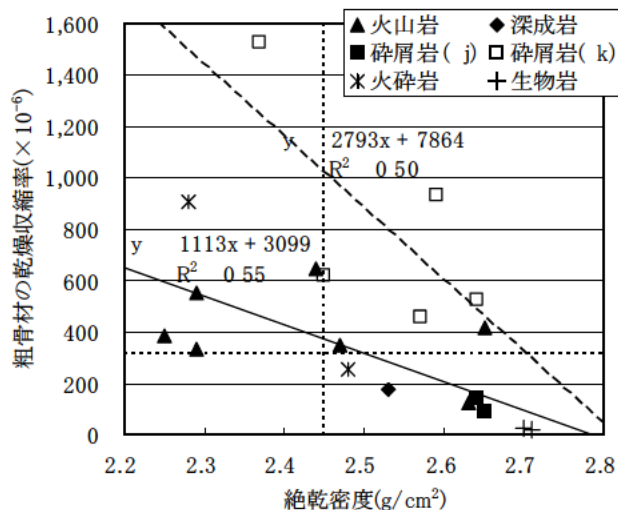
コンクリートの乾燥収縮率の目標値	$1,000 \times 10^{-6}$ 以下	850×10^{-6} 以下
骨材の乾燥収縮率の目安	600×10^{-6} 以下	320×10^{-6} 以下

乾燥収縮率によって評価を行うための目安を表 1 に示す。

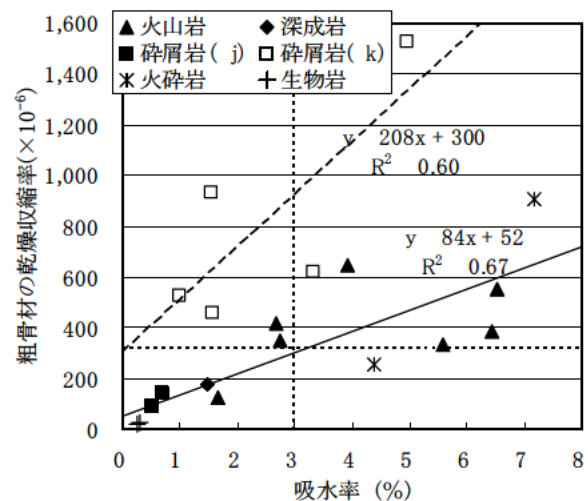
表 1 の目安を満足しない粗骨材であっても、コンクリートの長さ変化率試験を行って、要求性能を満足できる結果が得られれば、これを使用して良い。このときの配合条件としては、コンクリート工学協会より、「普通 30 18 20 N」の配合が提案されている¹¹⁾。

3. 骨材の岩種による評価

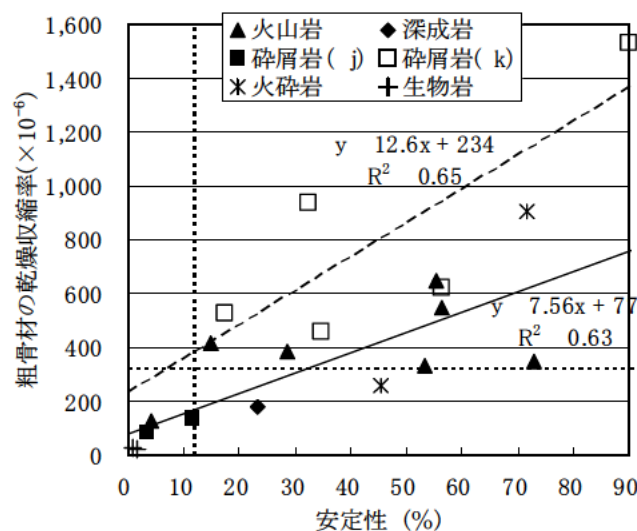
骨材の絶乾密度、吸水率、安定性と骨材の乾燥収縮率との関係を図 2, 3, 4 に示す。これらの図をもとに、ばらつきも考慮して粗骨材の乾燥収縮率が目標値を満足するための骨材物性の目安を表 4 に示す。



図－２ 絶乾密度と骨材の乾燥収縮率の関係



図－３ 吸水率と骨材の乾燥収縮率の関係



図－４ 安定性と骨材の乾燥収縮率の関係

表－２ 骨材の基本物性による評価の目安

粗骨材の乾燥収縮率の目安	600×10 ⁻⁶ 以下			320×10 ⁻⁶ 以下		
物性値	密度(g/cm ³)	吸水率(%)	安定性(%)	密度(g/cm ³)	吸水率(%)	安定性(%)
砂岩、粘板岩、頁岩※	2.60 以上	1.0 以下	12 以下	2.60 以上	1.0 以下	8 以下
上記以外の碎石または砂利	2.45 以上	3.0 以下	12 以下	2.50 以上	2.0 以下	12 以下

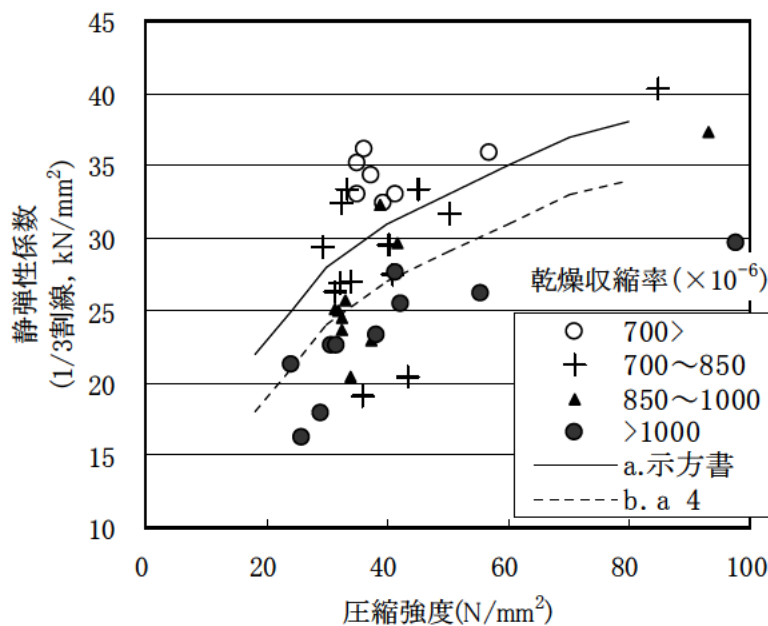
※特に白亜紀以降の砂岩、粘板岩、頁岩では、表－２の物性値が満足できず、乾燥収縮が大きくなる傾向がある

４．コンクリートの動弾性係数による評価

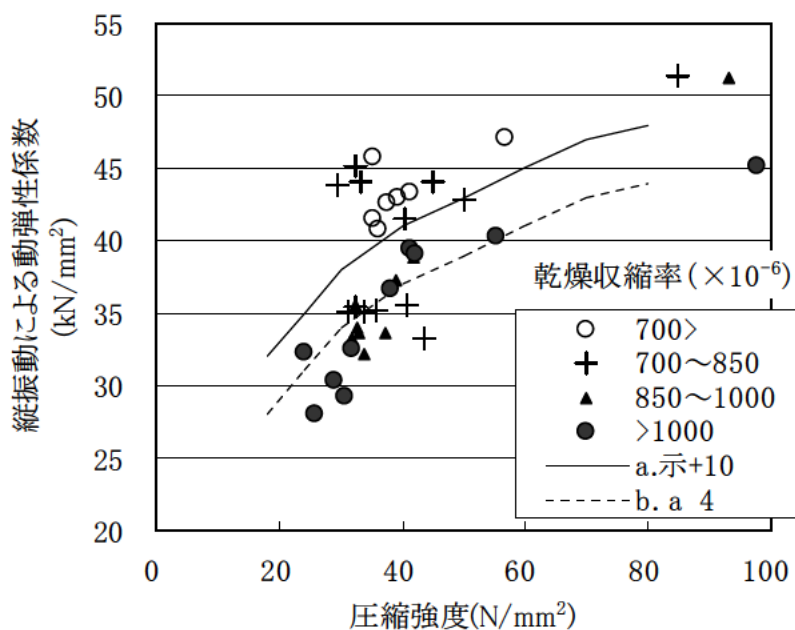
弾性係数は、圧縮強度試験用供試体を用い、以下のいずれかの方法によって測定する。

- (１) JIS A 1149 の方法に従って静弾性係数を測定する
- (２) JIS A 1127 に示す縦振動による方法で動弾性係数を測定する
- (３) 超音波伝播速度の測定から動弾性係数を測定する

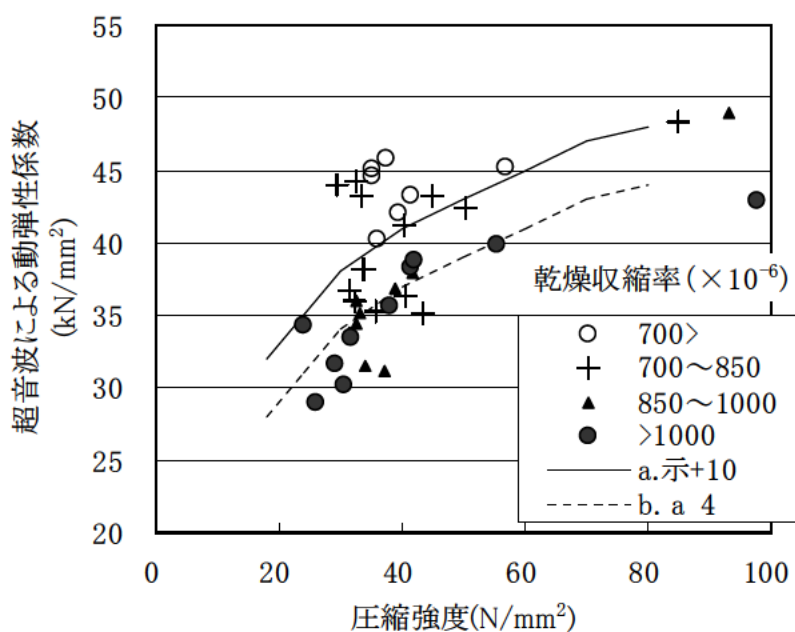
圧縮強度と、各弾性係数との関係は図 ５～７に示すようである。図にはコンクリート標準示方書に示される圧縮強度と弾性係数の関係を実線で示す（動弾性係数に関しては示方書の値+10kN/mm² として示す）。また、この実線よりも弾性係数が 4 kN/mm² 低い線を点線で示す。測定される圧縮強度と弾性係数の関係が、この点線よりも低い領域にある場合には、コンクリートの乾燥収縮率が 1,000×10⁻⁶ を超える可能性が高いと評価する。



図－５ 圧縮強度と静弾性係数の関係



図－6 圧縮強度と縦振動による動弾性係数の関係



図－7 圧縮強度と超音波による動弾性係数の関係

附録 4. ひずみゲージによる粗骨材の乾燥収縮率試験方法（案）

1. 適用範囲

碎石粗骨材の乾燥収縮率をひずみゲージを用いて測定する方法を定めたものである。

2. 試験に用いる機器

2.1 ひずみゲージ

測長 3 mm の合金箔ゲージを標準とする。

2.2 接着剤およびコーティング剤

接着剤はひずみゲージを粗骨材の平滑面に完全に接着することが可能なもの。

コーティング剤は、それを塗ることで完全な防水処理が可能なもの。また、これを施工することで、ひずみの測定値に悪影響を及ぼさないもの。

2.3 測定器

ひずみゲージの測定が可能な測定器

3. 粗骨材

粗骨材最大寸法が 20mm の場合は 15-20mm の範囲、粗骨材最大寸法が 25mm の場合は 20-25mm の範囲骨材粒子を選定する。選定に際しては、対象とする粗骨材全体を代表する骨材粒子を選定することとし、個数は 10 個を標準とする。

粗骨材をコンクリート用カッターで切断するか、グラインダー等で研磨することによって、ひずみゲージが貼り付け可能な面積の平滑面を作製する。

4. ひずみゲージの貼り付け

平滑面に対して、ひずみゲージを貼付ける部分よりも若干大きめの面にコーティング剤を塗り、その上に接着剤でひずみゲージを貼付ける。その後、コーティング剤でひずみゲージとリード線の素線部分の全体を覆うことで防水処理を施す。

5. 測定

ひずみゲージを貼り付けた粗骨材を 20℃ の水中に入れる。ひずみが十分に安定した状態で、粗骨材を水中から取り出し、気温 20℃、湿度 60% の条件でひずみが安定するまで乾燥させる。測定期間の目安としては、粗骨材寸法が 20mm 程度の場合、水中、乾燥ともに 4 日間程度である。

6. 測定結果の整理

粗骨材の乾燥収縮率を求めるための手順を以下に示す。

- (1) 乾燥状態で安定したひずみ量から、水中で安定したひずみ量を差し引くことで、各粗骨材粒子の乾燥収縮率を求める。
- (2) 試験を実施した粗骨材総数の平均値を求める。

【参考文献】

- 1) 片平博、渡辺博志：天然骨材資源の低品質化の現状と課題、コンクリート工学、（社）コンクリート工学協会、pp.20-23、2008.5
- 2) 上阪恒雄、永山功、渡辺和夫、西澤賢太郎：コンクリートダム原石山における廃棄岩の実態調査、土木研究所資料、第3655号、1999.7
- 3) 片平博、渡辺博志：低品質細骨材の有効利用に関する研究、ダム工学、No.238、pp.25-33、2006.7
- 4) 渡辺博志、森濱和正、片平博：低品質骨材を使用したコンクリートの乾湿繰返し抵抗性に関する検討、土木研究所資料、第4042号、2007.1
- 5) 小林茂敏、河田博之、高橋正志、高橋弘人、石井良美：コンクリート用骨材に関する調査報告書（1） 物理的品質不良骨材に関する試験調査、土木研究所資料第1838号、昭和57年6月
- 6) 片平博、渡辺博志：再生骨材の耐凍害性評価手法の研究、コンクリート工学論文集、Vol.21、No.1、201.1
- 7) Carlos Rodriguez-Navarro, Eric Doehne, Eduardo Sebastianb: How does sodium sulfate crystallize Implications for the decay and testing of building materials, Cement and Concrete Research 30, pp.1527-1534 (2000)
- 8) 片平博、渡辺博志：安定性試験における結晶圧作用機構に関する基礎的研究、セメント技術大会講演要旨、Vol.63、pp.110-111、2009.5
- 9) 片平博、伊佐見和大、渡辺博志：砂利粗骨材の耐凍害性評価法に関する研究、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.65、No.5、pp.861-862、2010.9
- 10) 片平博、渡辺博志：粗骨材最大寸法15mmの砂利コンクリートの性能、セメント技術大会講演要旨、2011.5
- 11) コンクリートの収縮問題検討委員会報告書、（社）コンクリート工学協会、2010.3
- 12) 山田宏、片平博、渡辺博志：コンクリートの乾燥収縮率と骨材の乾燥収縮率の関係、「コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響」に関するシンポジウム論文集、（社）日本コンクリート工学協会、2010.12
- 13) 片平博、渡辺博志：コンクリートの乾燥収縮率を推定するための簡易評価指標に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、pp.467-472、2010.7
- 14) 後藤幸正、藤原忠司：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、第286号、pp.125-137、1979.6
- 15) 今本啓一、石井寿美江、荒井正直：各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響、日本建築学会構造系論文集、第606号、pp.9-14、2006.8

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4199 March 2011

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課

〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754