

コンクリート骨材の乾燥収縮特性及び耐硫酸性
の性能評価に関する研究

Study on Evaluation Methods for Drying Shrinkage Properties
and Sulfuric Acid Attack Resistance of Concrete Aggregate

平成 29 年

山 田 宏

目 次

第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景と目的.....	1
1.2 本論文の構成.....	4
第1章の引用資料.....	6
第2章 既往の研究.....	7
2.1 骨材がコンクリートの乾燥収縮現象に与える影響.....	7
2.1.1 コンクリートの乾燥収縮現象の各種機構.....	8
2.1.2 粗骨材の乾燥収縮現象のメカニズム.....	10
2.1.3 粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮現象に与える影響.....	11
2.1.4 乾燥収縮に関する評価方法.....	15
2.2 骨材がコンクリートの耐硫酸性に与える影響.....	19
2.2.1 コンクリートの硫酸による劣化メカニズム.....	20
2.2.2 コンクリートの耐硫酸性の改善技術.....	22
2.3 まとめ.....	25
第2章の引用資料.....	26
第3章 粗骨材の収縮特性のひずみゲージによる評価.....	30
3.1 はじめに.....	30
3.2 粗骨材の収縮特性に与える測定手法の影響.....	31
3.2.1 使用材料.....	32
3.2.2 測定方法.....	33
3.2.3 粗骨材粒子間のばらつき.....	37
3.2.4 ひずみの方向依存性.....	41
3.2.5 体積表面積比.....	42
3.2.6 粗骨材の乾燥収縮率のひずみゲージによる評価法.....	45
3.3 まとめ.....	46
第3章の引用資料.....	47
第4章 粗骨材の収縮特性の各種指標による推定.....	48
4.1 はじめに.....	48
4.2 粗骨材の各種指標と乾燥収縮率の関係.....	49
4.2.1 使用材料.....	50
4.2.2 測定方法.....	51
4.2.3 粗骨材の細孔径分布.....	54
4.2.4 粗骨材の物理的指標と乾燥収縮率の関係.....	57

4.2.5 粗骨材の複合指標と乾燥収縮率の関係.....	63
4.3 まとめ.....	66
第4章の引用資料.....	67
第5章 コンクリートの乾燥収縮率の粗骨材による推定	69
5.1 はじめに	69
5.2 コンクリートの乾燥収縮率	70
5.3 コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材の各種指標の関係	73
5.3.1 コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材の空隙構造特性の関係.....	74
5.3.2 コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材の複合指標の関係	76
5.3.3 コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材の乾燥収縮率の関係	78
5.4 コンクリートの乾燥収縮率の複合則による推定	80
5.4.1 検討に用いた複合則.....	81
5.4.2 複合則による推定結果	82
5.5 コンクリートの乾燥収縮率の土木学会式による推定	85
5.5.1 土木学会式による推定結果.....	86
5.5.2 骨材の品質の影響を表す係数の決定法の提案.....	87
5.6 まとめ.....	93
第5章の引用資料.....	94
第6章 高炉スラグ細骨材がモルタルの耐硫酸性の改善に与える効果	96
6.1 はじめに	96
6.2 実験概要	97
6.3 各種スラグ細骨材がモルタルの耐硫酸性に与える影響	99
6.4 高炉スラグ細骨材の粗粒率がモルタルの耐硫酸性に与える影響.....	103
6.5 細骨材率がモルタルの耐硫酸性に与える影響.....	105
6.7 高炉スラグ細骨材の細粒分がモルタルの耐硫酸性に与える影響.....	108
6.8 まとめ.....	112
第6章の引用資料.....	113
第7章 結論.....	114
7.1 本研究のまとめ	114
7.2 今後の検討課題	120
謝辞.....	121

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

近代的なセメントが製造されて以来、コンクリートが土木工事や建築工事で積極的に使用されている。100年を超える歴史を持つコンクリートについて、多くの研究者や技術者によって種々の課題の解決や技術革新がこれまでに重ねられており、現在のコンクリート構造物の長大化や高層化などが実現している。コンクリートの数ある技術のなかでも、骨材の品質がコンクリートの性能に大きく影響することが既往の研究で明らかにされており、それがコンクリート構造物の高度化を図る上で大きな技術基盤のひとつとなっている。

骨材はコンクリート体積中の約7割を占める構成材料であり、使用される骨材の品質によって、コンクリートの強度や耐久性などの性能に影響を与える。そのため、コンクリートの所定の性能を確保するために、骨材の品質がJISや各学協会の基準などで規定されている。現在、JISで規格化されているコンクリート用骨材としては、表1-1のとおりである。次に、骨材の供給実態をみていく。

図1-1にコンクリート用骨材と道路用骨材の合計の供給構造の推移を示す。年間の総供給量は平成2年をピークに、それ以降は減少傾向にある。天然骨材については、高度経済成長期の需要量の増大、河川環境や海洋環境の保全などを背景に、川砂や海砂などがコンクリート用骨材として採取することが制限され、現在では砕石や砕砂の使用量が増大している。

しかし近年では、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」の品質を満足する砕石を用いたコンクリートで大きな問題が生じた。その問題は硬質砂岩を用いたコンクリートを適用した垂井高架橋の上部工で多数のひび割れや設計値以上のたわみが生じたものであった。

表 1-1 コンクリート用骨材

コンクリート用骨材	規格
天然骨材	JIS A 5308 付随書 1
砕砂・砕石	JIS A 5005
人工軽量骨材	JIS A 5002
スラグ骨材	JIS A 5011
再生骨材	JIS A 5021～5023
溶融スラグ骨材	JIS A 5031

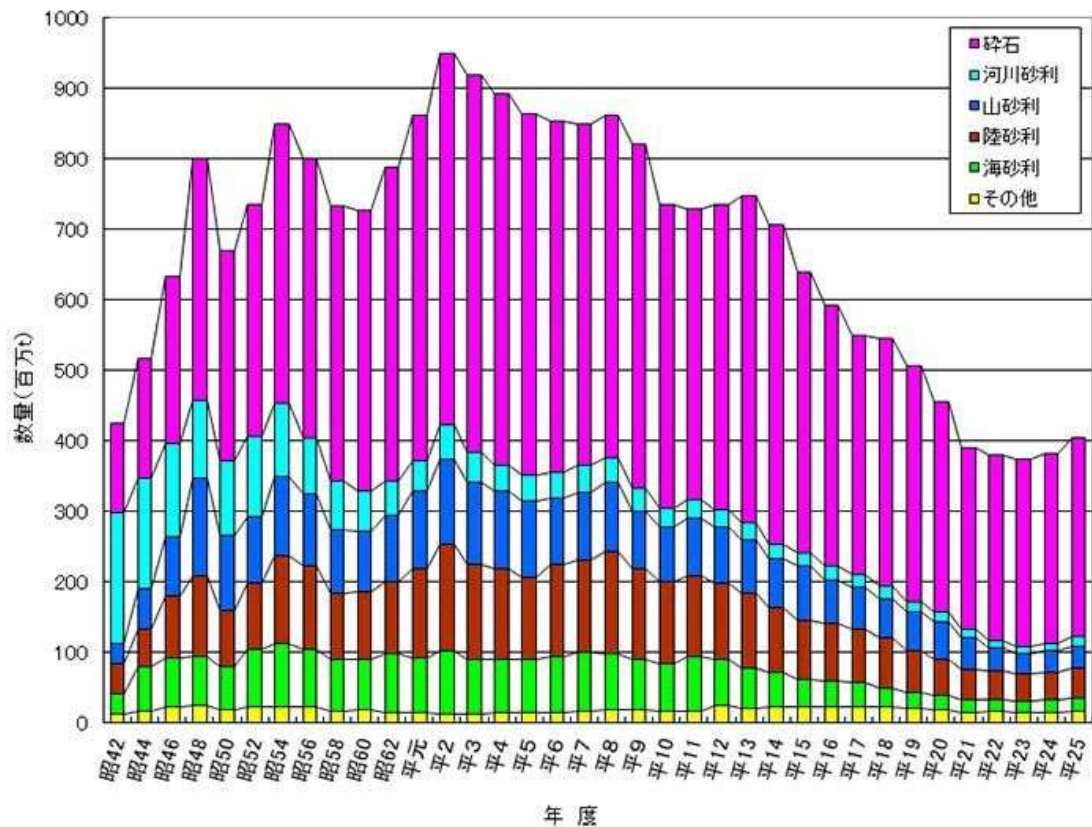


図 1-1 骨材の供給構造の実態¹⁾

垂井高架橋のひび割れ問題について、原因究明などが行われた結果、コンクリートの乾燥収縮ひずみに骨材が大きく影響したことが指摘²⁾された。このことから、骨材の品質において、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」などに規定される品質の範疇を超える新たな課題が認識されることとなった。

このように、砕石の使用量が多い一方で、垂井高架橋のような問題が懸念されている。また、良質な砕石についても、今後、永続的に採取できるわけではない。これらのことから、限りある資源の有効活用を図り、良質なコンクリートを提供するためには、骨材の品質などがコンクリートの性能にどの程度影響するのかを的確に把握することが、今後、さらに重要となる。この課題に対する解決策のひとつには、骨材自体の長さ変化特性に関して、その特性値を評価する技術の確立が挙げられる。骨材自体の長さ変化特性を把握する試験は、コンクリートの長さ変化試験に比べて、早期かつ簡易に結果が得られることが明らかになっている³⁾。しかし、現状ではその実施はあまり積極的でない。これは、骨材自体

の乾燥収縮の測定データの信頼性について、課題が残っており、測定データに与える測定手法の影響やコンクリートの乾燥収縮率との関係性が十分に把握されていないためである。

一方、図1-1のその他に分類される骨材は、人工軽量骨材、輸入骨材およびスラグ骨材の合計であるが、他の骨材に比べて、その使用量は低い水準となっており、改善の余地がある。このうち、スラグ骨材については、製造工場の近郊における資源不足の緩和への期待や天然骨材資源の枯渇の対策として、1970年代から本格的な検討が始まり、高炉スラグ骨材に続き、フェロニッケルスラグ骨材、銅スラグ骨材、電気炉酸化スラグ骨材が、それぞれJIS規格化されている。また、スラグ骨材は、天然骨材を適切に混合して使用することで骨材の品質の改善を図ることができ、良質なコンクリートの製造にも寄与する。

特に高炉スラグ骨材はコンクリートの性能を改善する効果が高いことから、近年では、その利用量が増加している。高炉スラグ骨材は潜在水硬性を有する他に、セメント系材料の耐硫酸性を改善させる⁴⁾ことが知られている。セメント系材料の耐硫酸性の改善は、近年生じている下水道関連施設が起因する道路陥没事故⁵⁾を防ぐ上で重要な技術であり、当該施設への高炉スラグ骨材の更なる適用拡大が期待される。しかし、現状では、セメント系材料の耐硫酸性の改善効果に与える高炉スラグ骨材の材料特性値などの影響が十分に明らかになっていない。このことから、高炉スラグ骨材がセメント系材料の耐硫酸性の改善効果に与える影響に関して評価する技術の開発が必要である。

以上より、環境負荷を低減し、持続可能な社会を構築するためには、骨材資源の確保と副産物の有効な利活用が必要であり、それを実現するための骨材の評価技術の開発が重要であると考えられる。そこで本研究では、碎石の乾燥収縮の評価法に関する課題と高炉スラグ骨材がセメント系材料の耐硫酸性の改善効果に与える影響に関する課題を解決すべく、コンクリートの乾燥収縮特性を推定できる碎石自体の長さ変化特性の工学的な評価技術とモルタルの耐硫酸性の改善効果に与える高炉スラグ骨材の影響に関する評価技術を示すことを目的とした。

1.2 本論文の構成

本論文の構成フローを図1-2に示す。本論文の第2章以降の概略は以下のとおりである。

第2章「既往の研究」では、骨材が乾燥収縮と耐硫酸性に与える影響について既往の知見をレビューする。

第3章「粗骨材の収縮特性のひずみゲージによる評価」では、粗骨材自体の乾燥収縮のひずみゲージによる測定を行い、その実態解明を試みる。具体的には、粗骨材粒子の乾燥収縮率について、粗骨材粒子間のばらつき、ひずみの方向依存性および粗骨材粒子の体積表面積比の影響を把握し、粗骨材自体の収縮特性に与える測定手法の影響を明らかにする。また、粗骨材の乾燥収縮率の測定期間についても言及する。

第4章「粗骨材の収縮特性の各種指標による推定」では、粗骨材の品質を評価する指標で、第3章で示した粗骨材自体の乾燥収縮特性を推定できるかどうかを検討する。具体的には、粗骨材の密度や吸水率などの一般的な品質、粗骨材の体積変化に関係があるとされる空隙構造特性、または、粗骨材の品質指標を組み合わせた複合指標が、粗骨材自体の乾燥収縮特性を説明できる指標になり得るかどうかを明らかにする。

第5章「コンクリートの乾燥収縮率の粗骨材による推定」では、第3章で示した粗骨材自体の乾燥収縮特性の工学的有用性を示すために、粗骨材の各種指標とコンクリートの乾燥収縮率の関係などを検討する。具体的には、粗骨材自体の乾燥収縮率、第4章で得られた粗骨材自体の微細な空隙構造特性の指標、または、粗骨材の品質指標を組み合わせた複合指標でコンクリートの乾燥収縮率を簡易に推定できる指標になり得るかなどを明らかにする。

第6章「高炉スラグ細骨材がモルタルの耐硫酸性の改善に与える効果」では、各種スラグ細骨材を用いたモルタルの耐硫酸性を把握した上で、モルタルの耐硫酸性の改善効果に与える高炉スラグ細骨材の影響について検討し、その評価技術を明らかにする。

第7章「結論」では、第3章から第6章までに得られた成果に基づき、本論文を総括する。

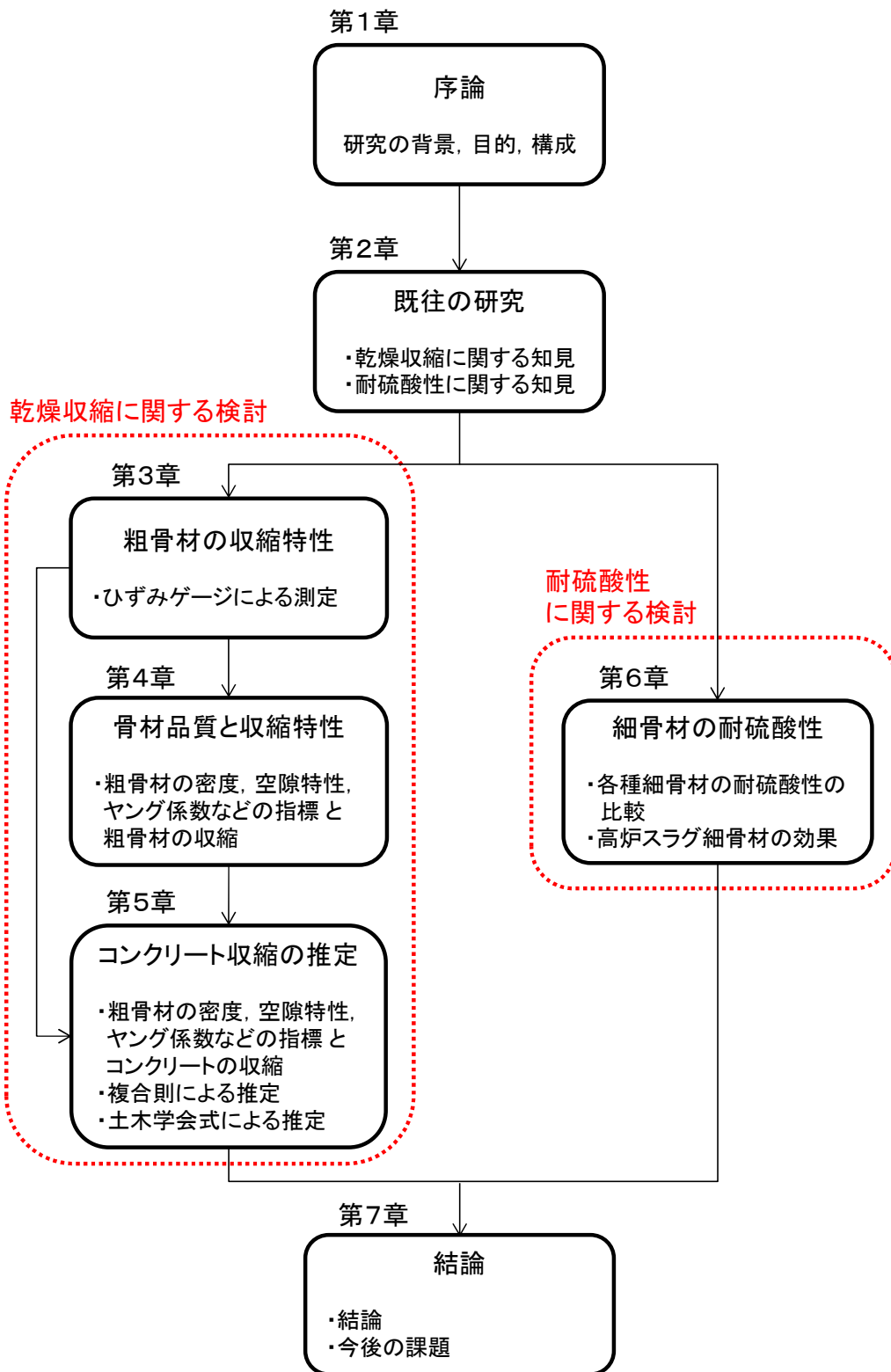


図 1-2 本論文の構成

第1章の引用資料

- 1) 【骨材需給の推移】一般社団法人日本砕石協会：<http://www.saiseki.or.jp/kotsujukyu.html>, 2017.4.27アクセス
- 2) 垂井高架橋損傷対策特別委員会：垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会最終報告書, 土木学会, 2008.
- 3) 後藤幸正, 藤原忠司：乾湿を伴う骨材の体積変化, 土木学会論文報告集, 第247号, pp.97-108, 1976.
- 4) Paweena Jariyathitipong, 細谷多慶, 藤井隆史, 綾野克紀：高炉スラグ細骨材によるコンクリートの耐硫酸性改善に関する研究, 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.4, pp.337-347, 2013.
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部：下水道事業のストックマネジメント実施に関するガイドライン, 2015.

第2章 既往の研究

2.1 骨材がコンクリートの乾燥収縮現象に与える影響

コンクリートの収縮には、乾燥収縮、自己収縮、炭酸化収縮などの発生機構の異なる現象が確認されている。なかでも、コンクリート中の水分が外部へ逸散することで生じる乾燥収縮は、最も一般的な収縮現象で、その存在は古くから知られており、多くの技術者や研究者によって、乾燥収縮機構や乾燥収縮に起因するひび割れの抑制に関する検討が行われている。

コンクリート中の粗骨材は、コンクリートの乾燥収縮を抑制する存在として認識されている。しかし、現在では、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」に規定される品質を満足する粗骨材でも、コンクリートの乾燥収縮を助長させるケース¹⁾も認められている。また、近年実施されたコンクリートの乾燥収縮に影響を与える配合因子などの検討結果によれば、粗骨材種類の影響が大きいことが報告^{2), 3), 4)}されている。

粗骨材自体の乾燥収縮現象は、コンクリート中で生じることが一般的であり、コンクリートと同様に水分の逸散によって生じる⁵⁾とされる。粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響については、6ヶ月の期間を要する乾燥収縮試験によって把握することが一般的である。

コンクリートの従来の乾燥収縮試験によらずに、粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響を、簡易な試験などで推定することができれば、コストの縮減や省力化が図れるため、実務上有益であると言える。このような観点から、その研究開発の試み⁶⁾もなされている。

本研究では、コンクリートの乾燥収縮特性を推定できる粗骨材自体の長さ変化特性の工学的な評価技術の提案を目指すために、ここではまず、乾燥収縮に関連するこれまでの知見を整理する。具体的には、コンクリートや粗骨材の乾燥収縮現象に関する基礎的な知見を整理し、粗骨材がコンクリートに与える影響に関する既往の知見を解説する。次に、乾燥収縮に関する評価方法を解説する。

2.1.1 コンクリートの乾燥収縮現象の各種機構

コンクリートの乾燥収縮は、硬化体に含まれる水分が外部へ逸散することで体積変化する現象である。乾燥収縮による変形で生じる応力によって、コンクリートにひび割れを生じさせるケースが少なくないことから、乾燥収縮はコンクリートの耐久性に大きな影響を与えることになる。

コンクリートにひび割れを生じさせないようにするためには、原因のひとつである乾燥収縮を抑制する必要があるため、乾燥収縮の機構について理解することが極めて重要であると言える。

乾燥収縮の機構は、水の形態や関係する空隙径によって異なることが指摘されており、その機構の分類は、表2-1のように例示される。

表 2-1 乾燥収縮機構の分類⁷⁾

乾燥収縮機構	湿度 範囲 (%RH)	水の存在様式	孔の径	備考
I 化学結合水の 離脱	~20	化学的結合水	—	・高温時に多く生じる ・ゆるく結合した結晶水は常温低湿で離脱
II 層間水の離脱	~20	層間水	4Å	
III 固層の表面張力 の変化	~40	物理的吸着水	4~10Å	吸着水の脱着による固層の表面張力の増大による
IV 物理的吸着水の 分離圧	~40	物理的吸着水	4~10Å	吸着水のゲル粒子間に無理に吸着しようとするときに生じる圧力
V 凝縮水の表面 張力	40~80 80~98	ゲル孔中の凝縮水 毛細管中の凝縮水	10~100Å 100~1000Å	可逆性・等方性 可逆性・等方性
VI 静水圧クリープ	40~98	—	10~1000Å	機構Vによる静水圧クリープ

コンクリートの乾燥収縮の主たる原因となる硬化したセメントペーストの乾燥収縮現象に適用される機構は乾燥条件によって異なるとされており，全湿度範囲を統一的に説明できる乾燥収縮機構の理論は未だ確立されていないとされる⁸⁾。現時点で比較的有力とされる乾燥収縮機構の理論は，表2-2のとおりである。

表 2-2 乾燥収縮機構の理論

理論	概要	説明可能な湿度範囲(%RH)	参考例
毛細管張力説	メニスカスの形成によって毛細管水中で引張応力が生じることで硬化体に体積変化を生じさせる	40～	セメント・コンクリート研究会 ⁹⁾
分離圧説	水の吸着を妨害する区間に作用する分離圧の一部が解放され，粒子間の距離が減少することで硬化体に体積変化を生じさせる	全範囲	Powers ¹⁰⁾ ，丸山・岸 ¹¹⁾
		50～	Wittmann ¹²⁾
表面張力説	ゲル粒子に吸着する水分子の脱離による表面張力の変化によって硬化体に体積変化を生じさせる	～42	Wittmann ¹²⁾
層間水移動説	カルシウムシリケート水和物への水の移動が層間隔に影響することで硬化体に体積変化を生じさせる	～35	Feldman & Sereda ¹³⁾ ，Ishai ¹⁴⁾ ，H. Uchikawa, et al. ¹⁵⁾

2.1.2 粗骨材の乾燥収縮現象のメカニズム

粗骨材の体積変化は、硬化したセメントペーストと同様に、乾湿に伴って生じることが指摘されている⁵⁾。粗骨材に関する体積変化の機構については、これまでにいくつか研究報告がされており、毛管張力説、表面張力説、分離圧説が有力とされている。

後藤ら¹⁶⁾によると、粗骨材の内部比表面積と粗骨材の乾燥収縮率に相関性を確認しており、乾湿に伴う骨材の体積変化の主たる機構は、表面張力説としている。丸山ら¹¹⁾によると、硬化したセメントペーストの乾湿に伴う体積変化は、分離圧説によって説明ができるとしており、粗骨材の体積変化にもこの説を適用することが可能であると予言している。また、小幡¹⁷⁾も、丸山らの分離圧説を支持しており、統一的な説明ができるとしている。一方、石灰石骨材の体積変化においては、吸水収縮または乾燥膨張挙動が確認された例^{11), 18)}もあり、この場合、毛管張力説の適用が妥当であることが報告されている。

これまでに提案されている粗骨材の体積変化の機構は、研究者によって異なっており、統一的な見解が得られていないが、いずれの説でも空隙構造が考慮されてある。したがって、粗骨材の乾燥収縮は、空隙構造が極めて重要な因子であると言える。

2.1.3 粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮現象に与える影響

コンクリートの約7割もの体積を占める骨材は、その品質によってコンクリートの強度や耐久性などの性能に影響を与える。このことから、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」では、コンクリート用骨材として天然骨材と人工骨材が規定され、コンクリートの性能を確保するために細部にわたる品質を規定している。

JIS規格では、骨材の分類によっても細かな規定をしており、例えば、天然骨材のうち、岩石を砕いて製造する砕石や砕砂は、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」によって、物理的・化学的な品質が規定されている。

しかし近年では、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」を満足する骨材を用いたコンクリートで大きな乾燥収縮ひずみが生じた¹⁾ことで話題となった。

粗骨材がコンクリートの収縮に与える影響に関する既往の研究¹⁹⁾では、粗骨材の様々な品質とコンクリートの収縮との関係が検討されている。例えば、粗骨材に含まれる鉱物組成、粗骨材のヤング係数、乾燥収縮特性、空隙特性などとコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を検討しており、コンクリートの乾燥収縮ひずみと良好な対応関係を持つ指標がいくつか見出されている。

ここでは、粗骨材の品質に関して、(1)粘土鉱物の影響、(2)ヤング係数の影響、(3)乾燥収縮の影響、(4)空隙特性の影響、についてのこれまでの検討をそれぞれ解説する。

(1) 粘土鉱物の影響

粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響は粘土鉱物であるモンモリロナイトによるものが古くから知られている。

粘土鉱物はシリカ層やギブサイト層などの結晶が積層することによって形成されており、この積層した結晶の層間に水分子が浸入することによって膨張するとされる²⁰⁾。コンクリートの乾湿に伴い、粗骨材に含まれる粘土鉱物の水分が移動することで、粗骨材に大きな体積変化が生じる。

乾湿に伴う体積変化が繰り返されることで、粗骨材とセメントペーストとの一体性が失われ、コンクリートの強度や耐久性に影響を及ぼすことが指摘されている²¹⁾。また、モンモリロナイトのようなコンクリートに有害とされる粘土鉱物が粗骨材中にある一定量以上含有されていると、粗骨材自体が乾湿繰返しの作用によって崩壊しやすくなり、ポップアウ

トなどの現象を生じることがある。

このように粘土鉱物は、コンクリートの乾燥収縮などに大きな影響を与えるため、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」などでは、砂利及び砂の品質として粘土塊量を規定している。

(2) ヤング係数の影響

一般的な天然骨材では、粗骨材のヤング係数がコンクリートの乾燥収縮ひずみに影響を与えることが指摘され、ヤング係数が大きい骨材を用いたコンクリートは乾燥収縮ひずみが小さいと報告されている²²⁾。これは、硬化したセメントペーストの収縮はコンクリートの収縮値の5～15倍と言われるが、ヤング係数が大きい粗骨材は、この硬化したセメントペーストの収縮を強く拘束するためである。

また、小野ら²³⁾は、コンクリートの収縮に与える骨材の役割はペーストの変形拘束効果と体積希釈効果であるとしており、著しく小さいヤング係数のゴム骨材を用いた場合、ペーストの乾燥収縮よりもコンクリートの乾燥収縮が大きくなることを示している。さらに、尾口ら²⁴⁾は、弾性係数の異なる人工材料を用いた実験から、乾燥収縮では骨材の体積希釈効果が骨材の拘束効果よりも卓越するとしている。

杉江ら²⁵⁾は、コンクリートの乾燥収縮における骨材の役割を解析的に検討しており、一般的なヤング係数の粗骨材では、コンクリートにおける粗骨材の集約程度でモルタルの収縮の拘束程度が異なることを示している。

骨材のヤング係数は、コンクリートの乾燥収縮に大きな影響を与えるため、構成材料のヤング係数などをパラメータとした複合則によって、コンクリートの乾燥収縮率を推定する研究^{26), 27)}も行われている。

(3) 乾燥収縮の影響

粗骨材の乾燥収縮がコンクリートの乾燥収縮やひび割れに与える影響について、名古屋ら²⁸⁾は、収縮量が1400 μ にもなる骨材を用いて、実験と解析から骨材の乾燥収縮がコンクリートの乾燥収縮に与える影響について検討した。その結果、収縮量が大きい骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮量は、骨材単体の収縮量と同じだけコンクリート中の骨材が収縮するとして推定されるよりも小さいとした。これは、コンクリート中での骨材の乾燥程度は骨材単体のときよりも緩慢であるためとしている。

小幡ら²⁹⁾は、コンクリート中にひずみゲージを貼り付けた粗骨材を埋め込むことで、コンクリート中の粗骨材の乾燥収縮挙動を検討した。その結果、一般的な天然粗骨材では、コンクリートの乾燥収縮には粗骨材自身の乾燥収縮が卓越するとした。また、乾燥収縮ひずみが小さい粗骨材では、粗骨材の高い剛性により、セメントペーストの乾燥収縮を拘束する効果が顕著となり、小野ら²³⁾の主張を裏付ける結果を得ている。

また、篠野ら³⁰⁾は、拘束されたコンクリートの乾燥によるひび割れに与える骨材の乾燥収縮の影響を解析的に検討した。その結果、コンクリート中の骨材の品質が同様であることを前提に、乾燥収縮が大きい骨材を用いた場合、コンクリート中にひび割れが生じることを解析的に明らかにしている。

同じ骨材でも粒子間で乾燥収縮が大きく異なれば、コンクリート中に生じるひび割れや乾燥収縮への影響を無視することが難しいと考えられる。しかし、現状では、骨材粒子間のばらつきの程度は十分に明らかになっていない。

(4) 空隙特性の影響

水分のやりとりのポケットとなる粗骨材の空隙は、コンクリートの乾燥収縮に影響を与えるとされる。硬化したセメントペーストの乾燥収縮の機構を参考にするると、水分の形態は、固体中の空隙の径に応じて異なり、その機構は、前節で示した表2-1のように分類され

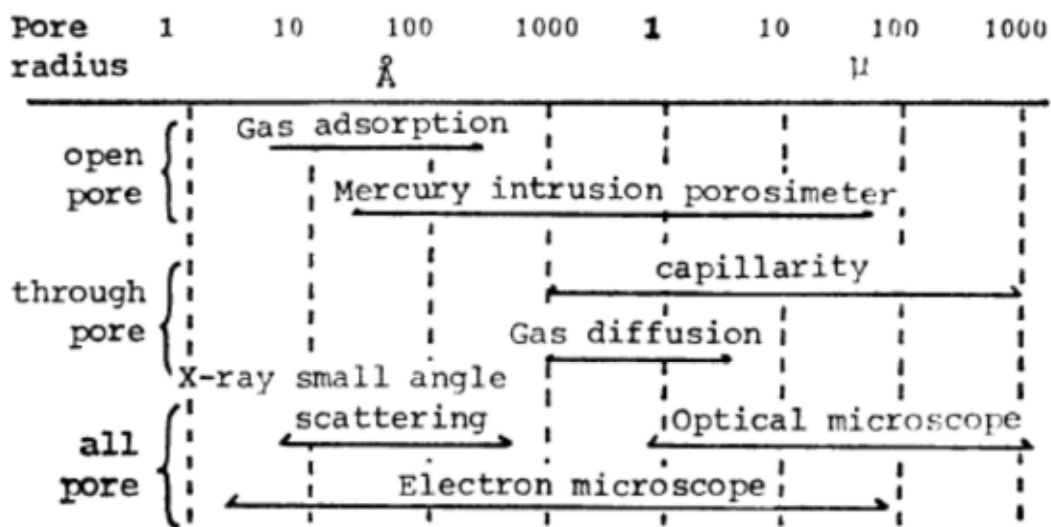


図 2-1 空隙構造の測定法と適用径³²⁾

ると考えられている。

粗骨材の空隙構造は、岩石が生成される過程によって大きく異なっており、天然の岩石は、その成因プロセスの違いから、火成岩、堆積岩および変成岩に区分され、さらには、鉱物の微細な結晶構造の違いによって岩種が分類される³¹⁾。また、同一産地の同じ岩種の岩石でも品質にばらつきがあるため、粗骨材の空隙構造が異なる。

空隙構造を把握する手法は、空隙径に応じて異なることが一般的に知られており、**図2-1**のようにまとめられる。

粗骨材の空隙特性の影響について、比較的大きな空隙を評価する最も簡易な指標と言える吸水率では、粗骨材の岩種を分類することで、コンクリートの乾燥収縮との相関関係が確認されている³³⁾。また、凍結融解抵抗性を簡易に把握できる指標である安定性についても、同様の傾向が得られている³³⁾。粗骨材のさらに細かな空隙の影響は、水銀圧入法やガス吸着法によって得られた特性値とコンクリートの乾燥収縮の関係が検討されている。これまでの検討によると、粗骨材の比表面積^{16), 34)}および細孔直径1000~10000Åの空隙の多少^{35), 36)}が、コンクリートの乾燥収縮と相関関係があることが指摘されている。

2.1.4 乾燥収縮に関する評価方法

コンクリートの収縮には、自己収縮、乾燥収縮、炭酸化収縮などが一般的に知られている。しかし、実際には、これらの収縮ひずみを厳密にそれぞれ独立した成分として測定することは困難とされる。現状では、独立した収縮ひずみの成分を測定する技術は確立しておらず、主たる収縮ひずみの成分を捉える方法として、JISなどでその測定方法を規定している。

図2-2に収縮ひずみの概念図を示す。通常のJISの試験では自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの和である全収縮ひずみを計測している。本論文のこれ以降の記述ではJISの方法で測定された全収縮ひずみを「乾燥収縮ひずみ」または「乾燥収縮率」と称する。

また、粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に影響を与えることから、粗骨材自体の乾燥収縮ひずみの測定もこれまでに試みられている。

ここでは、本研究に関するコンクリートおよび粗骨材の乾燥収縮の測定方法について取り上げることとする。

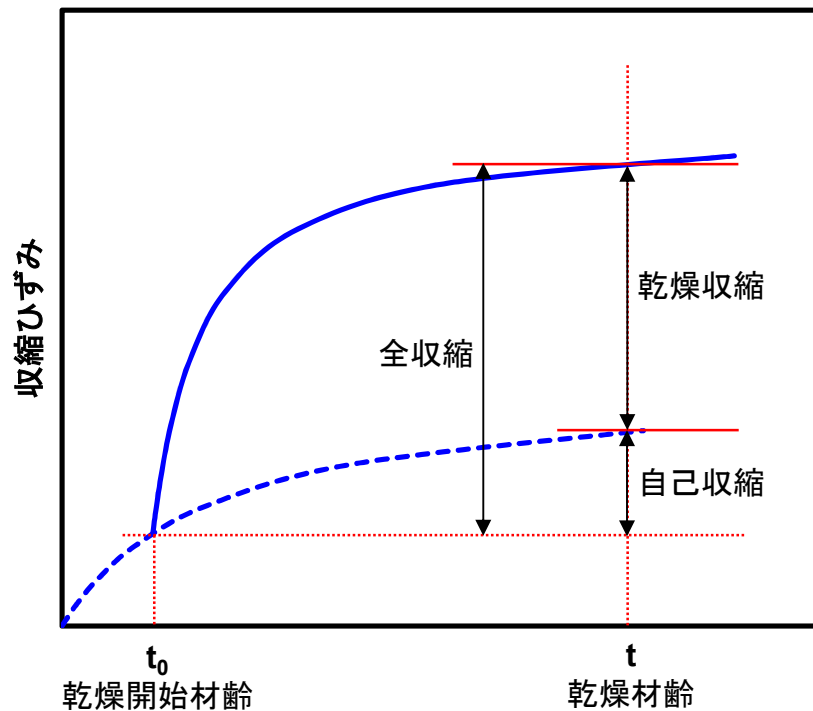


図 2-2 収縮ひずみの概念図

(1) コンクリートの乾燥収縮の評価方法

コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定方法は、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」およびJIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」の2つの規格が定められている。JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」では、ひずみの測定方法のみを規定しているが、JIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」では、ひずみの測定に関する試験条件などを規定している。

コンクリートの乾燥収縮率は、上記規格に準拠して、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $60\pm 5\%RH$ の環境条件のもと、乾燥材齢6ヶ月経過時点の長さ変化率で一般的に評価されている。

(2) 粗骨材の乾燥収縮の評価方法

現状では、粗骨材の乾燥収縮ひずみの測定方法がJISなどによって規定されていない。粗骨材自体の乾燥収縮特性を把握する方法として、a) 粗骨材の原石コアによる方法、b) 粗骨材粒子による方法がこれまでに検討されている。

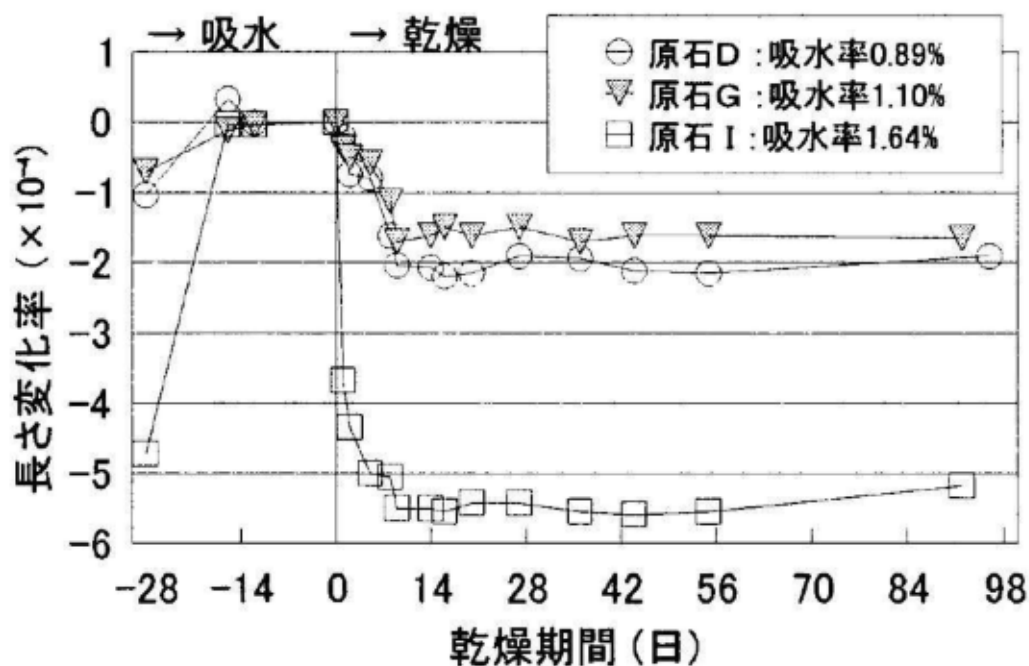


図 2-3 粗骨材の原石コアによる乾燥収縮率の測定例³⁶⁾

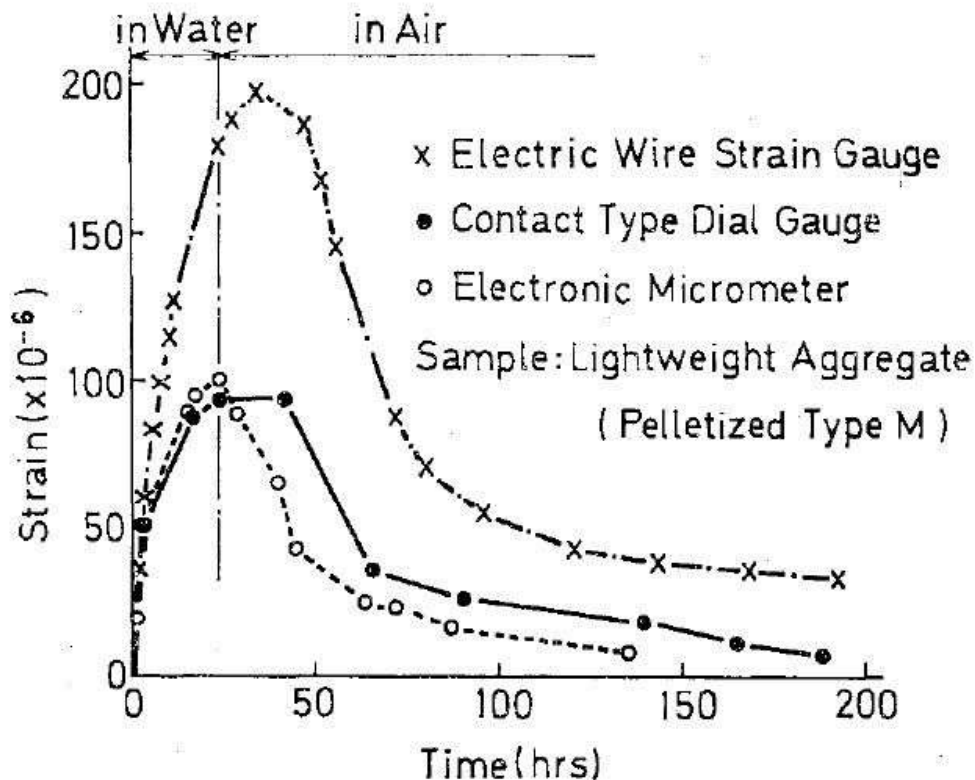


図 2-4 粗骨材粒子に対する乾燥収縮率の測定例⁵⁾

a) 粗骨材の原石コアによる方法

粗骨材の原石コアから粗骨材の乾燥収縮特性を把握する方法は、いくつか検討例^{24), 36)}がある。コンタクトゲージで計測できるサイズのコアを採取し、原石コアの乾燥収縮特性が把握されている。図2-3の計測例のとおり、粗骨材の原石の種類毎に異なる結果が得られている。また、乾燥収縮ひずみの変動が収束する期間は、コンクリートの乾燥収縮ひずみを把握する方法よりも短期間で測定結果が得られることがわかる。

b) 粗骨材粒子による方法

粗骨材粒子から乾燥収縮特性を把握する方法は、後藤ら⁵⁾によって、ひずみゲージ、コンタクトゲージおよびマイクロメーターを用いる方法が検討されている。図2-4のとおり、測定方法によって異なる結果が得られているが、原石コアによる方法よりもさらに短期間で測定結果が得られている。さらに、中本ら¹⁹⁾もひずみゲージによって粗骨材の乾燥収縮特性を把握しており、早期に結果が得られることを報告している。

コンクリート中の粗骨材の乾燥収縮特性を最も正確に把握できる手法は、粗骨材の1粒子に対して測定を行うひずみゲージによる方法であると考えられるが、測定結果の信頼性が十分でないことなどから、その実施例は多くない。測定方法の妥当性を示すことができれば、結果が早期に得られる簡易な方法となり、粗骨材の選別などに資する技術開発となると考えられる。

2.2 骨材がコンクリートの耐硫酸性に与える影響

コンクリートは必ずしも化学的に安定している材料ではなく、様々な化学物質と反応することで、コンクリート構造物の劣化が生じることがある。結合材の主成分であるセメントはアルカリ性であるため、無機酸などの作用によって、セメント水和物の溶解、化合物の生成による膨張、または、腐食などが生じて、物理的な性能が低下することがある。

化学的侵食が生じる環境は幅広く、酸や各種塩類を使用する工業施設をはじめ、温泉地帯、下水道関連施設、海洋、あるいは、硫酸塩を含む土壌などがあげられる。なかでも温泉地帯や下水道関連施設などにおいて存在する硫酸は、セメント水和物と激しく反応するため、その劣化が著しい。硫酸はセメントの主成分である石灰と化合して石膏を生成する以外にも、セメントのケイ酸塩化合物やアルミン酸塩化合物をも浸食するとされる³⁷⁾。

化学的侵食を受ける環境のなかでも、下水道関連施設は、管きょ総路延長が約47万km、処理場数が約2200箇所と膨大なストックが存在しており、平成27年度には下水管路の老朽化などに起因した道路陥没の発生件数が、約3300箇所に及んでいる³⁸⁾。社会活動に重大な影響を及ぼす事故の発生などを未然に防ぐためにも、適切な維持管理が求められる。

下水管路の老朽化が顕在化する中で、コンクリート自体の耐硫酸性を改善させるための研究がこれまでに検討されており、高炉スラグ骨材を用いることで、良好な耐硫酸性が得られることが見出されている。しかし、現状では、高炉スラグ骨材の材料特性値などがコンクリートの耐硫酸性の改善効果に与える影響は十分に明らかになっていない。

本研究では、高炉スラグ細骨材がセメント系材料の耐硫酸性の改善効果に与える影響を評価する技術の開発のため、ここではまず、コンクリートの硫酸に対する劣化メカニズムや現在実施されている対策などを整理する。

2.2.1 コンクリートの硫酸による劣化メカニズム

下水道関連施設に存在する硫酸や塩類によって、コンクリートの中性化や化学的侵食などが生じる。特に硫酸による劣化は著しく、近年では、下水管路の老朽化に起因した道路陥没が発生し、適切な対応が求められるところである。

下水管路の老朽化は、下水に含まれる硫黄分が微生物の活動によって、循環することで生じるとされる。図2-5に下水管路の劣化メカニズムの模式図を示す。まず、嫌気性の硫酸塩還元細菌の働きにより、下水中の硫黄分である硫酸イオンから液相部に硫化水素ガスが生成される。次に液相部から気層部に硫化水素が放散される。そして、好気性の硫黄酸化細菌の働きにより、気層部の硫化水素から硫酸が生成される。微生物活動の最終生成物である硫酸がコンクリートに作用することで著しい劣化が生じる。

コンクリート中には水酸化カルシウムが含まれており、pH12～13のアルカリ性を保って

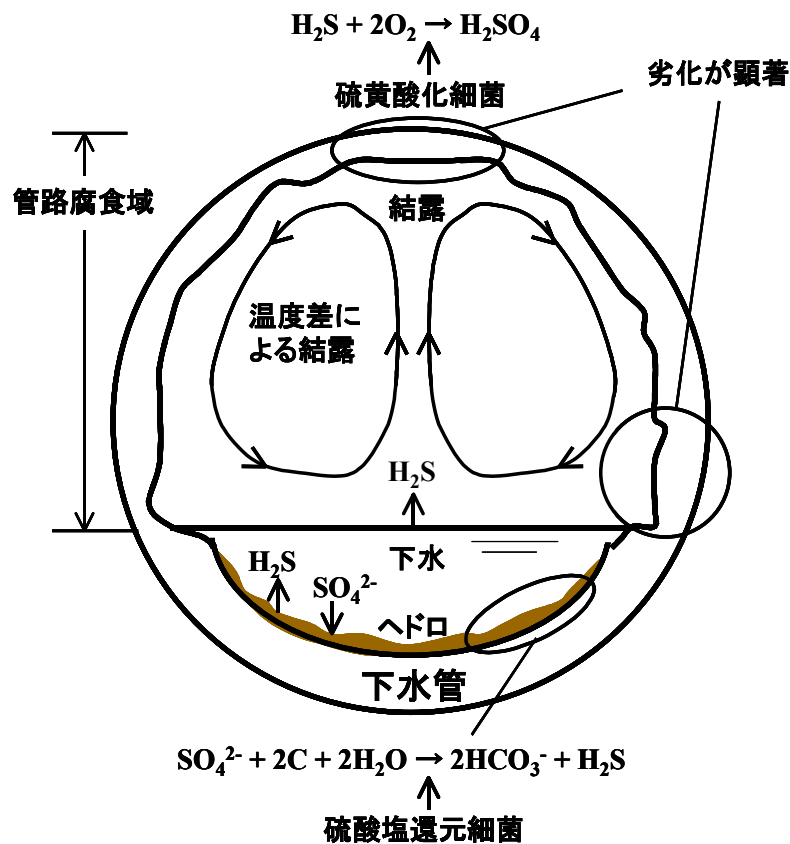
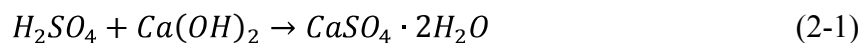
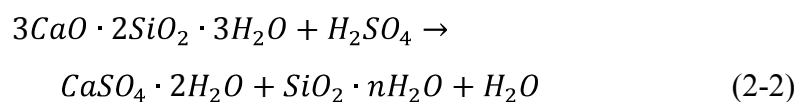


図 2-5 下水管路の劣化メカニズム ³⁹⁾

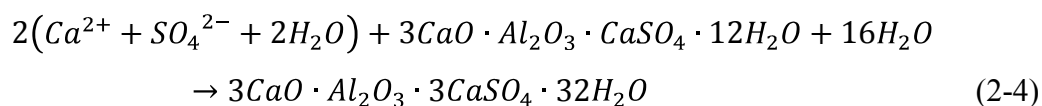
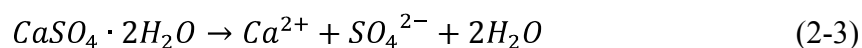
いる。下水関連施設のコンクリートの表面で硫酸の濃度が増加すると、水酸化カルシウムと硫酸が式2-1に示すように反応し、二水石膏を生成する。



また、微生物活動によって生成された硫酸は、セメント水和物であるケイ酸カルシウムとも反応し、二水石膏とシリカゲルを生成させる。化学式で示すと式2-2のようになる。



そして、二水石膏は、硫酸イオンが解離し、この硫酸イオンがセメント水和物であるモノサルフェートやアルミン酸カルシウムと反応し、エトリンガイトを生じさせる。それぞれの反応は、式 2-3 および式 2-4 に示すようになる。



結合水が多く含まれるエトリンガイトが生成されるまで反応が進行すると、断面の欠損が生じていることが一般的である。劣化反応が断面の深部に進行していくことで、最終的には道路陥没などの重大な事故が発生している。

2.2.2 コンクリートの耐硫酸性の改善技術

下水道関連施設におけるセメント系材料の微生物が関与する硫酸による劣化を抑制するためには、硫酸によるセメント系材料の腐食に至るまでの過程において、いずれかの段階でその進行を抑止する必要がある。劣化を抑制するための対策の分類としては表2-3のように例示される。

ここでは、表2-3のうち、コンクリート自体の耐硫酸性の向上技術に関して解説する。

コンクリートの硫酸による劣化は、式2-1に示したように水酸化カルシウムと反応することから始まる。このため、コンクリート中の水酸化カルシウム分に着目して耐硫酸性を向上させる技術や硫酸と反応しても膨張などの有害な挙動を示さない材料をセメント主成分に置き換えることで耐硫酸性を向上させる技術などがこれまでに開発されている。

コンクリートの耐硫酸性の改善に関する技術は、構成材料のそれぞれの観点から検討が重ねられており、高炉セメント⁴¹⁾、アルミナセメント⁴²⁾、ナフタレン系の混和剤⁴³⁾および高炉スラグ細骨材⁴⁴⁾などの使用がそれぞれ耐硫酸性の向上に資することが報告されている。以下では、主要成分であるセメントと細骨材に関する耐硫酸性の改善技術について解説する。

まず、高炉セメントを用いた硬化体の耐硫酸性の改善メカニズムであるが、硫酸と反応する水酸化カルシウムが、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を発揮するためのアルカリ刺激材として消費されるため、硬化体中の遊離水酸化カルシウム分が少なくなり、硫酸浸食が低減するとされる。

次に、アルミナセメントを用いた硬化体であるが、アルミナセメントの水和メカニズムは通常のポルトランドセメントのそれとは異なっている⁴²⁾。アルミナセメントは水和反応によって、硫酸と反応する水酸化カルシウムが生成されないため、耐硫酸性が高いとされる。アルミナセメントの利用については、ヨーロッパで進んでおり、特に下水管路の修繕用被覆モルタルとしての利用が進んでいる³⁹⁾。

また、配合においてセメント分を少なくすることで、硬化体の耐硫酸性が改善することも報告^{45), 46)}されている。言い換えると、これは硬化体中の配合条件において、骨材量を増大させることで、硬化体の耐硫酸性が改善することになる。

細骨材に着目したセメント系材料の耐硫酸性の改善技術については、高炉スラグ細骨材が効果的であるとされる。細骨材に川砂を用いた場合と高炉スラグ細骨材を用いた場合において、硫酸との反応によって、表面に形成される二水石膏の性質が異なることで、その後の硫酸浸食の程度が異なることが指摘されている。高炉スラグ細骨材を用いた場合は、

表 2-3 下水管路の腐食抑制技術⁴⁰⁾

対策技術の分類	技術の分類	対象施設	原理と対策
コンクリート腐食抑制技術（硫酸生成の抑制）	下水中の硫酸イオン濃度低下	主として 管路施設	硫化水素の生成ポテンシャルの低下：工場排水，温水排水等の規制，海水侵入の防止
	下水あるいは汚泥中の硫化物生成抑制	管路施設	嫌気性化防止：圧送管への空気注入，酸素注入，硝酸塩注入等，伏越し管の構造変更，自然流下の管きよでの沈殿物の排掃，コンクリート表面の洗浄，フラッシング
		ポンプ場 処理場	嫌気性化防止：揚水ポンプの適正運転，処理場の適正運転
	硫化水素の気層中への放散防止	管路施設 ポンプ場 処理場	硫化物の酸化・固定化：塩化第二鉄注入 放散を抑制する構造：段差・落差の解消
	硫酸を生成する硫黄酸化細菌の活動抑制	管路施設 ポンプ場 処理場	気層中 H ₂ S ガス濃度の希釈・除去：換気・脱臭 コンクリート表面の乾燥：換気 硫黄酸化細菌の代謝抑制：コンクリートへの防菌剤・抗菌剤混入
コンクリート防食技術（コンクリートへの対策）	コンクリートの耐硫酸性向上	管路施設 ポンプ場 処理場	コンクリート表面の被覆：塗布型ライニング工法，シートライニング工法 コンクリート自身の耐硫酸性向上：耐硫酸性コンクリート

表面に形成される二水石こうの空隙構造が，川砂を用いた場合のそれと比べて，小さくなり，いわゆる硬質な二水石こうの膜が形成するとされる⁴⁴⁾。

しかし，セメント系材料の耐硫酸性の改善効果に与える高炉スラグ骨材の材料特性値な

どの影響は十分に明らかになっていない。骨材資源の確保に繋がるスラグ骨材の利用拡大を図るためにも、高炉スラグ細骨材がセメント系材料の耐硫酸性の改善効果に与える影響について検討する余地があると言える。

2.3 まとめ

本章では、骨材がコンクリートの乾燥収縮現象や耐硫酸性に与える影響について、既往の研究結果に基づき、関連事項を踏まえ概説した。以下に主な内容をまとめる。

- (1) コンクリートの乾燥収縮において、収縮の主たる要因であるセメントペーストの乾燥収縮の発生機構は、毛管張力説、表面張力説、分離圧説および層間水移動説の4つの説が有力とされているが、統一的な見解に至っていない。また、粗骨材の乾燥収縮に関する機構については、毛管張力説、表面張力説、分離圧説が有力とされているが、統一的な見解に至っていない。
- (2) 粗骨材の品質において、モンモリロナイトに代表される粘土鉱物の含有量、粗骨材のヤング係数、乾燥収縮および粗骨材の空隙特性の4つの要因がコンクリートの乾燥収縮に影響を与える。具体的には、粘土鉱物の含有量が多いほど、粗骨材のヤング係数が小さいほど、粗骨材の乾燥収縮が大きいほど、または、粗骨材に微細な空隙が多いほど、コンクリートの乾燥収縮は大きい傾向となる。
- (3) コンクリートの乾燥収縮率は、独立したひずみ成分のみを厳密に測定することは困難であり、JISなどでは、主たるひずみ成分を把握する目的で試験が行われている。また、粗骨材自体の乾燥収縮率は、いくつか測定法が提案されているが、積極的な活用がなされていない。コンクリートの乾燥収縮試験よりも早期に簡易に試験結果の得られる粗骨材自体の乾燥収縮の測定手法の確立が望まれる。
- (4) コンクリートの硫酸による劣化は、硬化体中の水酸化カルシウムやセメントの水和物と反応し、最終的には断面を欠損させる。また、コンクリートの耐硫酸性を改善させる技術は、構成材料の各面から検討されており、一般的なセメントを用いる場合、構成材料に高炉スラグを用いることで耐硫酸性が改善される。特に、近年では高炉スラグ細骨材の有用性が確認されているが、その品質などがセメント系材料の耐硫酸性の改善効果に与える影響は明確ではない。

第2章の引用資料

- 1) 垂井高架橋損傷対策特別委員会：垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会最終報告書，土木学会，2008.
- 2) 閑田徹志，百瀬晴基，今本啓一，三橋博三：レディーミクストコンクリートを対象とした乾燥収縮の調査研究およびその統計分析，日本建築学会構造系論文集，第629号，pp.1019-1026，2008.
- 3) 大田吉昭，梶田佳寛，鹿毛忠継：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす粗骨材と調合の影響，日本建築学会構造系論文集，第668号，pp.1729-1735，2011.
- 4) Wenyan Zhang, Mohamed Zakaria, Yukio Hama : Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete, Construction and Building Materials, Vol.49, pp.500-510, 2013.
- 5) 後藤幸正，藤原忠司：乾湿を伴う骨材の体積変化，土木学会論文報告集，第247号，pp.97-108，1976.
- 6) 寺西浩司：骨材の乾燥収縮ひずみの評価指標に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.78, No.687, pp.905-912, 2013.
- 7) 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，No.346, pp.30-40, 1975.
- 8) 土木学会：コンクリート技術シリーズ コンクリートのクリープおよび乾燥収縮Ⅱ，pp.44-49，2000.
- 9) セメント・コンクリート研究会 水委員会：セメント・コンクリート中の水の挙動，p.239，1993.
- 10) Powers, T.C. : Mechanism of Shrinkage and Reversible Creep of Hardened Cement Paste, Proc. Conf. Structure of Concrete and Its Behavior under Load, London, Cement and Concrete Association, pp.319-344, 1968.
- 11) 丸山一平，岸 直哉：セメント硬化体の収縮理論，日本建築学会構造系論文集，第642号，pp.1395-1403，2009.
- 12) Wittmann, F.H. : Creep and Shrinkage Mechanisms, Creep and Shrinkage in Concrete Structures, JHON WILEY & SONS, p.143, 1982.
- 13) Feldman, R.F., Sereda, P.J. : A New Model for Hydrated Cement and Its Practical Implications,

- Engineering. j., 53, pp.53-59, 1970.
- 14) Ishai, O. : The Time-Dependent Deformational Behavior of Cement Paste, Mortar and Concrete, Proc. Conf. Structure of Concrete and Its Behavior Under Load, London, Cement and Concrete Association, pp.345-364, 1968.
 - 15) H. Uchikawa, S. Hanehara and D. Sawaki : Structural change of hardened mortar by drying, Proceedings of the 3rd NCB international seminar on cement and building materials, Vol.4, pp. VIII 1-12, 1991.
 - 16) 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.
 - 17) 小幡雄一郎 : 粗骨材がコンクリートの収縮に与える影響, 名古屋工業大学博士論文, pp.58-60, 2015.
 - 18) 小幡雄一郎, 上田 仁, 吉田 亮, 梅原秀哲 : 粗骨材における含水率と体積変化との関係に関する一考察, 土木学会第65回年次学術講演会, pp.571-572, 2010.
 - 19) 中本純次, 正木亮, 高木啓太 : コンクリートの乾燥収縮特性におよぼす粗骨材の影響, 材料, Vol.61, No.10, pp.819-824, 2012.
 - 20) 松岡 元 : 土質力学, 森北出版, pp.7-8, 2002.
 - 21) 鈴木哲也 : 収縮性骨材とセメントペーストの境界組織, 開発土木研究所月報, No.428, pp.1-6, 1989.
 - 22) Neville, A.M. : Creep of Concrete, North-Holland Pub. Co., 1970.
 - 23) 小野秀晃, 下村匠 : コンクリートの収縮現象における骨材の役割, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.458-462, 2005.
 - 24) 尾口佳丈, 田中泰司, 下村匠 : 骨材の性質に着目したコンクリートの収縮の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.547-552, 2009.
 - 25) 杉江和, 篠野宏, 丸山一平 : コンクリートの乾燥収縮下における骨材の役割に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.625-630, 2013.
 - 26) H. Hyodo, et al. : Evaluation of Effect of Aggregate Properties on Drying Shrinkage of Concrete, Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, Japan. 2013.
 - 27) 田中希枝, 島弘 : 骨材の乾燥収縮とヤング係数を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する複合モデルの検証, 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造) , Vol.68, No.1,

- pp.72-82, 2012.
- 28) 名古屋翼, 阿部浩示郎, 下村匠: 骨材とセメントペーストの収縮およびその空間分布がコンクリートの変形と応力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011.
 - 29) 小幡雄一郎, 吉田亮, 梅原秀哲: 粗骨材の排水挙動がコンクリートの乾燥収縮に与える影響, 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造), Vol.70, No.2, pp.194-207, 2014.
 - 30) 篠野宏, 丸山一平, 中村光: コンクリート中の粗骨材が拘束試験体のひび割れに及ぼす影響についての解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014.
 - 31) Yves Guéguen, Victor Palciauskas著, 西澤 修, 金川久一訳: 岩石物性入門, シュプリンガー・ジャパン, p.7, 2008.
 - 32) 後藤誠史: 細孔構造の測定, 粘土科学, 第24巻, 第1号, pp.1-12, 1984.
 - 33) 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, No.1, pp.467-472, 2010.
 - 34) 八木翔吾, Carlos Aquino, 井上真澄, 岡本享久: 石灰石骨材の収縮特性とコンクリートの乾燥収縮に関する研究, 土木学会第65回年次学術講演会, pp.573-574, 2010.
 - 35) 岩清水隆, 米澤敏男, 井上和政, 松本竹史: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材品質の影響に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.1079-1080, 1998.
 - 36) 立松和彦, 荒井正直, 石清水隆, 木村芳幹, 浦野英男, 今本啓一, 元木亮: 関西地域における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第549号, pp.1-6, 2001.
 - 37) 笠井芳夫編著: コンクリート総覧, 技術書院, pp.536-545, 1998.
 - 38) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部: 下水道事業のストックマネジメント実施に関するガイドライン, 2015.
 - 39) 三品文雄ほか: 基礎から応用までさらに詳しい下水道腐食対策講座, 月間下水道, pp.4-26, 1990.
 - 40) 日本下水道事業団: 下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術および防食技術の評価に関する報告書, 財団法人下水道業務管理センター, 2001.
 - 41) 浅上修, 岡田昌巳, 五十嵐秀明, 米田俊一: 各種セメントの耐硫酸性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.152-157, 1996.
 - 42) 野中資博ほか: 上下水道施設のコンクリート防食実務, 森北出版, pp.103-104, 2005.

- 43) 寺西修治, 河合研至:二種類の混和材を含む硬化したセメントペーストの化学的耐久性, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.244-249, 1992.
- 44) Paweena Jariyathitipong, 細谷多慶, 藤井隆史, 綾野克紀:高炉スラグ細骨材によるコンクリートの耐硫酸性改善に関する研究, 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.4, pp.337-347, 2013.
- 45) 久田真, 皆川浩, 寺林明日美, 納口恭太郎:硫酸が作用するセメント硬化体の劣化進行に関する研究, 土木学会論文集E, Vol.64, No.3, pp.449-459, 2008.
- 46) 河合研至, 波多野裕侍, 大亀寛:粗骨材量の相違がコンクリートの硫酸劣化に及ぼす影響, Cement Science and Concrete Technology, Vol.67, pp.480-486, 2014.

第3章 粗骨材の収縮特性のひずみゲージによる評価

3.1 はじめに

収縮ひび割れ制御に対する関心の高まりから、コンクリートの乾燥収縮に関する規定の見直しが実施されている。2007年制定の土木学会コンクリート標準示方書¹⁾において、コンクリートの乾燥収縮率の設計値は、試験値や実績から定めることを原則とした。その後、2012年制定の土木学会コンクリート標準示方書²⁾において、新しい推定式が構築され、骨材の吸水率や骨材の品質の影響を表す係数がその式のパラメータに加わった。

一般的に、コンクリートの乾燥収縮率を試験によって定める場合は、JIS A 1129「コンクリートの長さ変化試験」の方法で、乾燥期間6ヶ月経過時点での長さ変化率によって評価する。しかし、試験には長期間を要することから、その実施は容易であるとは言えない。このため、早期かつ簡易にコンクリートの乾燥収縮率を推定できる手法の確立が望まれるところである。

コンクリートの乾燥収縮に影響を与える要因は、コンクリート構造物の置かれる環境条件の他、材料物性や施工条件など多岐にわたる。なかでも、コンクリート体積中の約7割を占める骨材はコンクリートの乾燥収縮に大きな影響を与えることが指摘されている³⁾。近年実施されたレディーミクストコンクリートの乾燥収縮に関する調査結果によれば、乾燥収縮率に対する影響因子として、粗骨材種類が最も支配的であることが報告⁴⁾されている。従って、コンクリートの乾燥収縮率を推定する際、粗骨材の乾燥収縮特性を把握することは重要であると考えられる。

粗骨材自体の乾燥収縮特性は、粗骨材粒子を直接に把握する方法^{5),6)}や原石コアによって把握する方法⁷⁾がこれまでに検討されており、いずれの方法でも、コンクリートの長さ変化試験に比べて、早期かつ簡易に結果が得られることが明らかになっている。しかし、それらの実施はあまり積極的ではない。これは、粗骨材自体の乾燥収縮の測定データの信頼性について明確でない部分があり、測定データの妥当性やコンクリートの乾燥収縮率との関係性が十分に把握されていないためと考えられる。

このような背景から、コンクリートの乾燥収縮率を推定するためのひとつの指標として、粗骨材自体のひずみゲージによる乾燥収縮特性の把握を試みた。碎石を対象として、粗骨材の乾燥収縮特性の実態を解明するとともに、その測定手法が測定値に与える影響や結果が得られる期間を検討し、粗骨材の乾燥収縮率のひずみゲージによる評価法を確立する。

3.2 粗骨材の収縮特性に与える測定手法の影響

粗骨材の乾燥収縮率は、これまでに種々の方法によって測定されている^{5), 6), 7), 8)}が、標準的な測定方法の確立には至っていない。ひずみゲージを用いることで粗骨材粒子の乾燥収縮率は、比較的簡易に測定できるが、その実施例は必ずしも多くない。

これは、粗骨材粒子の乾燥収縮率の測定結果に対する信頼性が認知されていないためと考えられる。測定結果の信頼性を確保し、工学的な利用価値を高めるためには、以下の3点についての検討が必要と考えられる。

- ①同一のロットから採取した粗骨材粒子であっても、乾燥収縮率の測定結果は、相当大きなばらつきを示すことが予想される。測定結果の活用を考えると、そのばらつきの大きさを把握する必要がある。
- ②測定手法の差異が測定結果に与える影響を明らかにする必要がある。ひずみゲージを用いた測定では、粗骨材粒子の表面をゲージで覆うため、乾燥湿潤に伴う水分の移動可能な領域（表面積）の変動が避けられない。また、粗骨材粒子に発生するひずみの方向依存性の有無についても明確にする必要がある。
- ③ひずみゲージを用いて測定した粗骨材粒子の乾燥収縮率の測定結果が、当該粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率を推定する上で有効な指標であることを示す必要がある。

本章では、上記①および②に関する検討を行っており、それぞれ産地および品質の異なる粗骨材を対象に、乾燥収縮率について粒子間のばらつき、粗骨材粒子中でのひずみの方向依存性や体積表面積比の影響を把握し、粗骨材の乾燥収縮率のひずみゲージによる評価法を確立した。上記③については、後述する第5章において、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性を検討する。

3.2.1 使用材料

表3-1に示すそれぞれ産地および品質の異なるG1～G19の19種類の砕石を対象とした。粗骨材品質の影響を広い範囲で捉えるために、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」の規格を満足する粗骨材だけではなく、同規格を大きく外れる粗骨材まで様々な品質の粗骨材を選定した。なお、粗骨材の最大寸法は、G6が15mm、G12、G13、G15、G18およびG19が20mm、その他の粗骨材が25mmである。

表 3-1 粗骨材の種類と品質

分類	岩種	No.	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 [※] (%)
火山岩	安山岩	G1	2.25	6.43	27.5
	安山岩	G2	2.63	1.66	3.80
	安山岩	G3	2.29	5.58	52.7
	安山岩	G4	2.47	2.74	72.9
	安山岩	G5	2.44	3.91	54.2
	安山岩	G6	2.65	2.67	14.8
	安山岩	G7	2.29	6.53	56.5
深成岩	花崗岩	G8	2.53	1.47	22.3
砕屑岩	砂岩～シルト岩	G9	2.37	4.96	89.7
	砂岩	G10	2.45	3.33	56.4
	砂岩	G11	2.65	0.50	3.30
	砂岩	G12	2.64	0.69	11.4
	砂岩	G13	2.57	1.56	34.8
	頁岩	G14	2.59	1.54	27.9
	砂岩	G15	2.64	0.99	17.3
火砕岩	凝灰岩	G16	2.48	4.38	45.3
	凝灰岩	G17	2.28	7.17	70.2
生物岩	石灰岩	G18	2.71	0.26	1.50
	石灰岩	G19	2.70	0.29	0.70

網掛けは、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」を満足しない物性値

※：JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」

3.2.2 測定方法

粗骨材自体の長さ変化の測定方法は、ひずみゲージによる方法、粗骨材粒子を数個連結させてコンタクトゲージで測定する方法および電子マイクロメーターによる方法などが報告⁵⁾されている。本論では、粗骨材自体の長さ変化の測定方法として、ひずみゲージによる方法を採用した。

長さ変化を測定する試験片として、通常測定に用いる試験片Aと、体積表面積比の影響を把握するための試験片Bの2種類を作製した。図3-1に試験片の作製から試験までの代表的な流れを示す。

試験片の作製について、試験片Aは、表3-1に示す全ての粗骨材に1軸計測のひずみゲージ（東京測器研究所製）を用いることを基本としたが、一部の粗骨材（表3-1に示すG2, G8, G9, G11, G12, G13, G15, G16, G18およびG19）については、ひずみの方向依存性を把握するために3軸計測のひずみゲージ（東京測器研究所製）を用いた。試験片Bは、加工に必要な大粒径の粗骨材粒子をそれぞれひとつずつ用意できた一部の粗骨材（表3-1に示すG3, G8, G9, G11およびG16）に1軸計測のひずみゲージを用いた。

試験片Aに用いた粗骨材粒子の粒径は、コンクリートの乾燥収縮に与える影響が細骨材よ

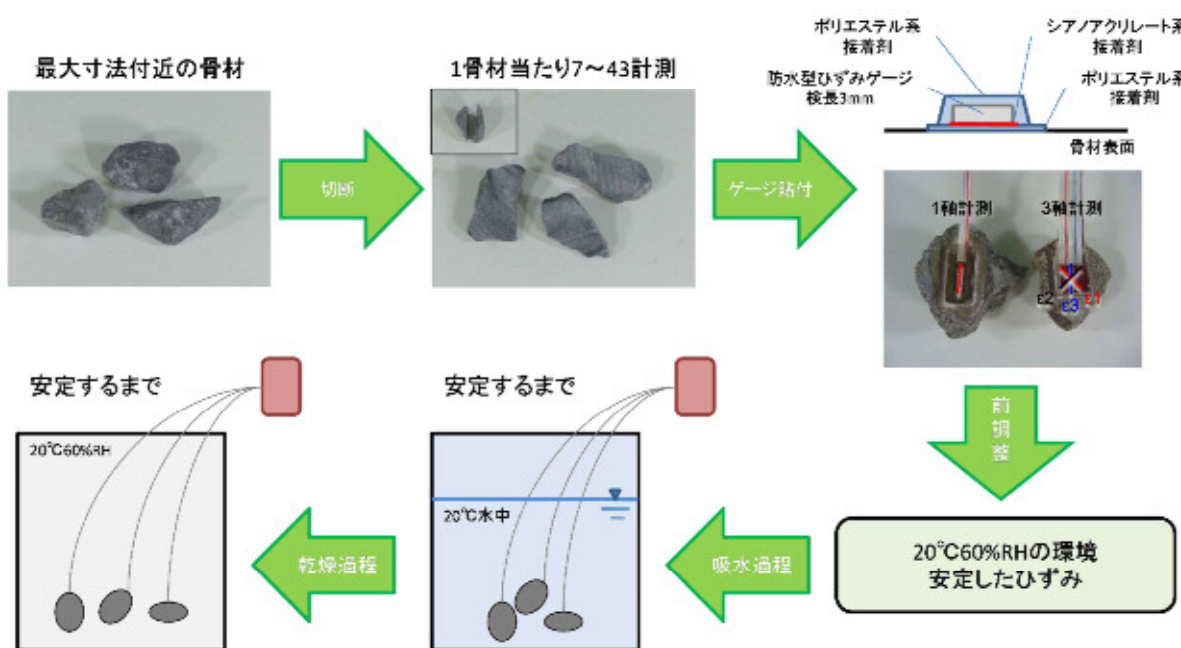


図 3-1 試験片の作製から試験までの流れ



写真 3-1 試験片 A の一例

りも粗骨材の方が大きいとの報告⁷⁾があることと、ひずみゲージの貼り付けには、ある程度の大きさの粗骨材粒子が必要であったことから、大きな粒径の粗骨材粒子を選定することが合理的と考え、それぞれ最大寸法付近の粗骨材粒子を選定した。

写真3-1に試験片Aの一例を示す。試験片Aの加工過程は、まず、粗骨材粒子を切断し、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1軸計測あるいは3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に試験片Bの一例を示す。試験片Bの加工過程は次のとおりである。まず、ひとつの大粒径の粗骨材粒子からコア半径 r (mm)が4.80mm、9.00mmおよび14.8mmのコアを採取した。これを、長さ L (mm)が20.0mmの半円筒形状となるよう切断した。さらに、円周面以外の全ての面を防水処理して、1軸計測の防水型ひずみゲージ（検長3mm）を、円の中心位置に貼付けた。その後、ひずみゲージ全体を防水処理した。

このように、試験片Bは、異なるコア半径の試験片を用いることで、意図的に体積 V (mm^3)や体積表面積比 V/S (mm)などを変化させた。なお、水分が移動可能な円周面の表面積 S (mm^2)は、次の式3-1から算出した。

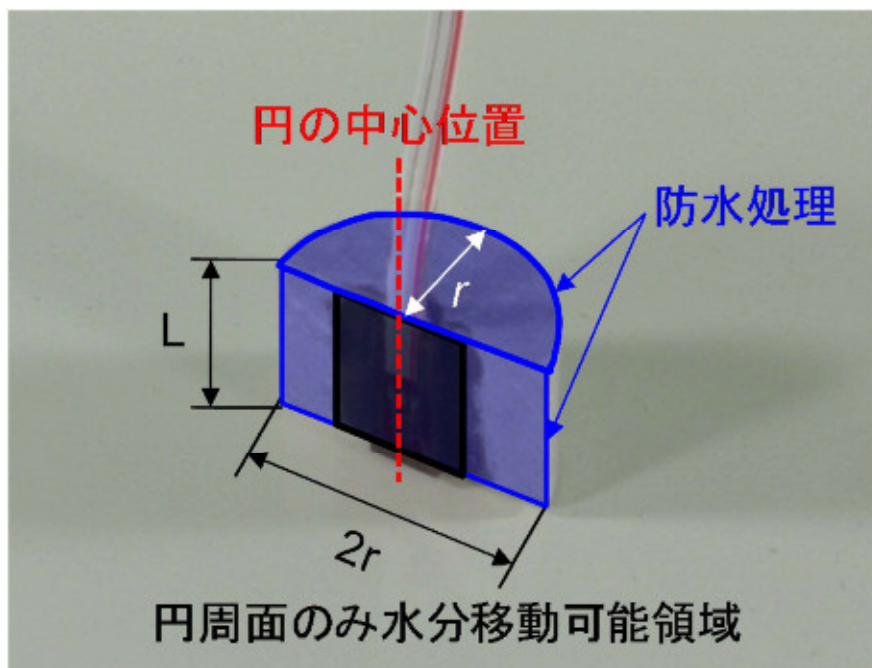


写真 3-2 試験片 B の一例

$$S = 2\pi r \quad (3-1)$$

表3-2にそれぞれのコア半径に対応する体積表面積比などを算出した結果を示す。

粗骨材の長さ変化試験は、それぞれの試験片が温度20℃、湿度60%RHの環境でひずみの変動が無くなり、十分に安定した状態を確認した後に開始した。試験開始後、20℃水中に浸漬する吸水過程と、温度20℃、湿度60%RHの環境に静置する乾燥過程の中で、それぞれひずみの変動が安定した状態になるまでひずみを測定した。

吸水膨張率は、試験開始時点のひずみと吸水開始後、ひずみの変動が認められなくなった状態でのひずみの差とした。乾燥収縮率は、乾燥開始時点のひずみと乾燥開始後、ひずみの変動が認められなくなった状態でのひずみの差とした。また、3軸計測のひずみゲージによる測定結果からは、ロゼット解析によって最小主ひずみおよび最大主ひずみを求めた。

以下に記述した結果・考察において、特に明記しないものは、試験片Aの試験結果である。

表 3-2 体積表面積比などの算出結果

r (mm)	V (mm ³)	S (mm ²)	V/S (mm)
4.80	724	302	2.40
9.00	2540	565	4.50
14.8	6880	930	7.40

長さ L : 20.0mm

3.2.3 粗骨材粒子間のばらつき

図3-2に1軸計測のひずみゲージによる粗骨材粒子の長さ変化試験における測定結果の一例を示す。粗骨材G9およびG14のひずみの挙動は、セメントペーストなどと同様に、吸水すると膨張し、乾燥すると収縮した。また、吸水膨張率と乾燥収縮率は、ほぼ等しい値となった。他の粗骨材についても同様であった。これ以降の検討では、乾燥収縮率に関する結果を中心に示す。

粗骨材粒子の乾燥収縮率の測定には、1粗骨材当たりの計測数 n を少なくとも7個とした。しかし、粗骨材の種類によっては測定値のばらつきが大きくなることが予想される。実施可能であれば、できるだけ多くの粗骨材粒子を計測することが望ましいが、使用機器の制約や試験に要する労力の問題もあるので、一律に計測数を増やすことも困難である。このため、一部の粗骨材について、適宜、粗骨材粒子の計測数を増やし、ばらつきの程度が変化するかどうか、検討を行った。

測定が終了した順で計測数7個毎に累積して、それぞれ乾燥収縮率の平均値および標準偏

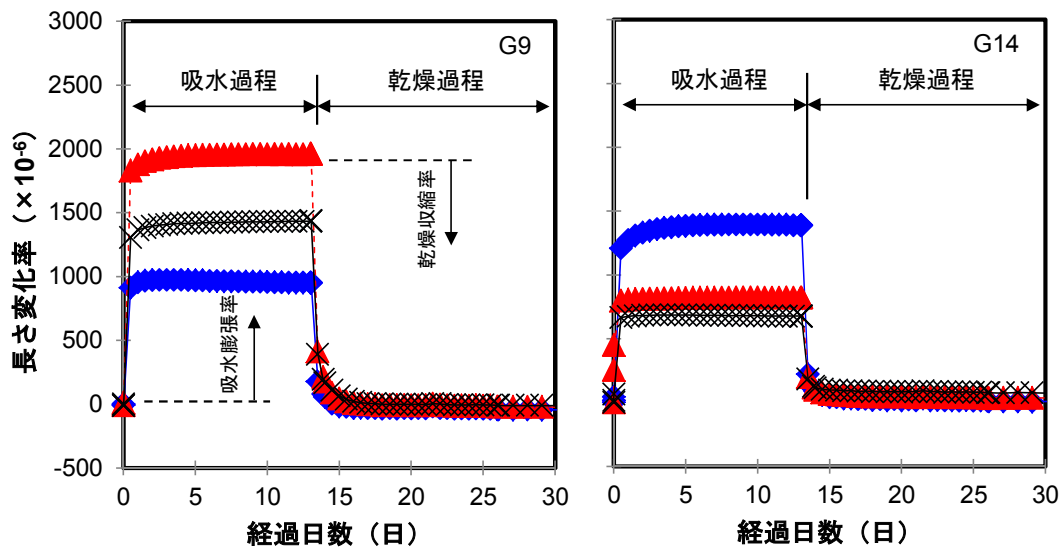


図 3-2 粗骨材粒子の長さ変化試験の結果一例

差を算出した。なお、最終の累積では、端数分のみを計測数、もしくは端数分を加えた計測数とした。図3-3に測定結果に与える計測数の影響の一例を示す。粗骨材G9および粗骨材G14ともに、乾燥収縮率の平均値および標準偏差は、計測数の大小によらず、ほぼ一定値となった。このことから、今回実施した乾燥収縮率の測定では、計測数が7個以上であれば、概ね有効なデータを与えるものと考えられる。

表3-3に粗骨材の乾燥収縮率の測定結果一覧を示す。粗骨材の乾燥収縮率の平均値および標準偏差は、大きい値から小さい値まで幅広く分布する結果となった。また、粗骨材の乾燥収縮率の最小値と最大値は、大きいもので 2000×10^{-6} を超える差が生じたが、これは同一のロットから採取した粗骨材粒子でも、それぞれのヤング係数や空隙構造などが異なるに起因していると考えられる。なお、一般的に、コンクリートの収縮低減に効果的とされる石灰岩骨材（粗骨材G18, G19）は、他の粗骨材と比べて、粗骨材自体の乾燥収縮率が明らかに小さくなっていた。

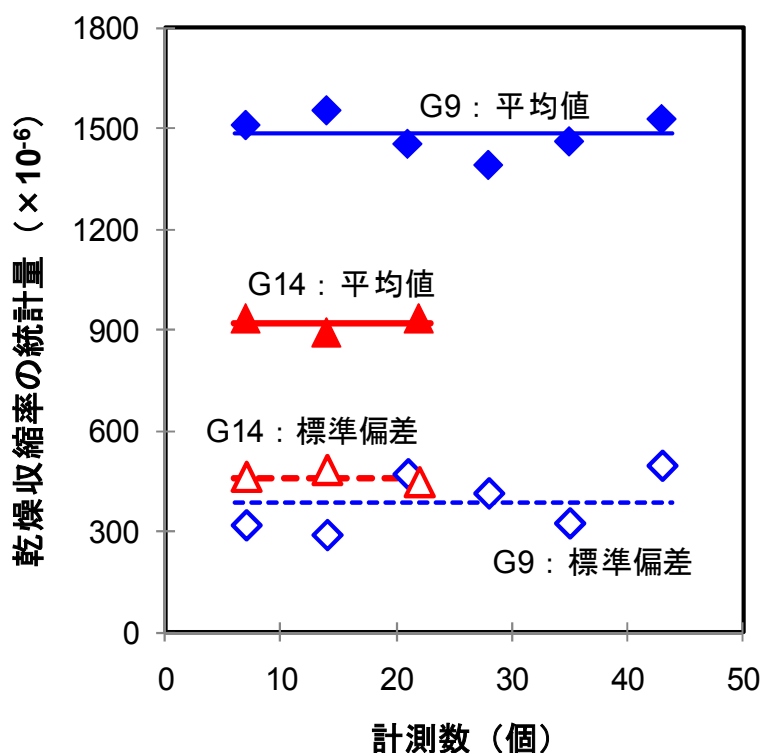


図 3-3 測定結果に与える計測数の影響

表 3-3 粗骨材の乾燥収縮率の測定結果一覧

分類	No.	n	乾燥収縮率 (×10 ⁻⁶)			
			平均	標準偏差	最小	最大
火山岩	G1	7	383	155	198	611
	G2 ^{***}	19	126	46	50	228
	G3	7	334	170	167	613
	G4 ^{**}	7	348	51	288	446
	G5	8	646	328	248	1296
	G6 ^{**}	10	416	129	210	628
	G7	7	550	494	130	1583
深成岩	G8 ^{**}	16	180	89	33	348
砕屑岩	G9	43	1529	496	486	2753
	G10 [*]	10	620	138	408	828
	G11 ^{***}	30	86	30	29	147
	G12 ^{***}	13	139	31	78	198
	G13 ^{**}	15	459	62	357	561
	G14 ^{**}	22	935	413	267	1719
	G15 ^{**}	15	528	117	233	686
火砕岩	G16 [*]	15	255	109	59	532
	G17	11	907	445	245	1766
生物岩	G18 ^{***}	15	21	6	10	31
	G19 ^{***}	15	26	4	18	31

* : 絶乾密度のみ満足する粗骨材

** : 絶乾密度, 吸水率を満足する粗骨材

*** : 絶乾密度, 吸水率, 安定性を満足する粗骨材

対象規格 : JIS A 5005 「コンクリート用砕石及び砕砂」

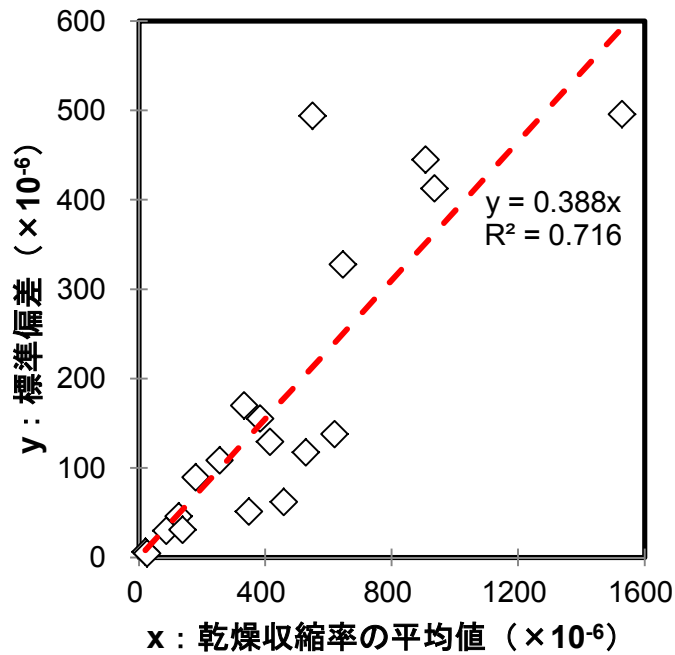


図 3-4 乾燥収縮率の平均値と標準偏差の関係

図3-4に乾燥収縮率の平均値と標準偏差の関係を示す。乾燥収縮率の平均値が大きくなると、標準偏差も大きくなる傾向となった。試験試料によって多少の差はあるが、標準偏差が乾燥収縮率の平均値の約39%となっていた。篠野ら⁹⁾によると、コンクリート中の粗骨材の乾燥収縮率が一樣であることを前提に、大きな乾燥収縮率の粗骨材を用いると、拘束されたコンクリートの内部でひび割れが生じることが解析的に明らかになっている。ある一定以上の乾燥収縮率の平均値を持つ粗骨材は、本検討で得られた粗骨材の乾燥収縮率の粒子間のばらつきの結果から、大きな乾燥収縮率の粗骨材粒子がその集合に含まれることになるため、コンクリートの内部でひび割れが生じることへの影響が示唆される。なお、ひび割れに影響を与える粗骨材の乾燥収縮率の程度については、今回の検討の範囲外であるため、今後の検討課題である。

3.2.4 ひずみの方向依存性

粗骨材の乾燥収縮率は、粒子中でひずみの方向依存性があることが予想される。3軸計測のひずみゲージによる測定を行い、ひずみの方向依存性の程度を把握した。なお、各粗骨材当たりの試験片数は3個とした。

図3-5に乾燥収縮の最小主ひずみと最大主ひずみの関係を示す。乾燥収縮の最小主ひずみと最大主ひずみは、約25%の差となり、偏差ひずみは平均ひずみの約±12%となった。すなわち、粗骨材粒子でひずみの方向依存性を考慮せず1軸計測のゲージによる測定を行った場合、測定結果に対して約25%の範囲で変動することになる。このように、ひずみの測定方向を限定することに伴うばらつきの増加も否定できない。当該粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率の概略値を推定することが目的であれば、1軸計測のひずみゲージによる測定値を用いても問題ないものと考えられる。これは、コンクリート中に存在する粗骨材粒子はアランダムに配向していて、最小ひずみを与える主軸が供試体軸方向に一致して存在しているわけではないためである。

なお、粗骨材粒子周辺のバインダーの乾燥収縮やひび割れに関する検討を行う場合は、ひずみの方向性が収縮挙動の解明やひび割れの進展の解析などに資するものと考えられる。

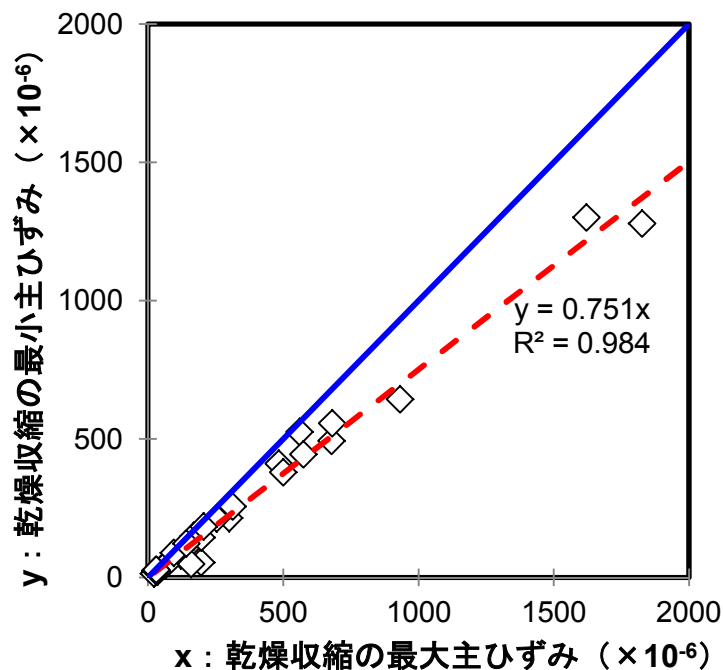


図 3-5 最小主ひずみと最大主ひずみの関係

3.2.5 体積表面積比

コンクリートの乾燥収縮率の場合、体積表面積比（これ以降は、 V/S と称する）が異なると、同じコンクリートでも乾燥収縮率と収束するまでに要する日数が異なることが報告¹⁰⁾されている。また、 V/S の変化により粗骨材粒子の乾燥収縮率の収束値そのものが影響を受ける可能性も否定できない。ここでは、 V/S を制御した試験片Bの測定結果に基づいて V/S の影響について検討する。

(1) 乾燥収縮率

図3-6に粗骨材の乾燥収縮率と V/S の関係を示す。 V/S が大きくなると、粗骨材粒子の乾燥収縮率は粗骨材G3およびG9では小さくなる傾向となり、その他の粗骨材では、あまり変わらなかった。 V/S が2.40mmから7.40mmに増加したときの乾燥収縮率の減少は、最大で乾燥収縮率の平均値の約28%（粗骨材G9）となった。一方、乾燥収縮率が比較的小さな粗骨材の場合、粗骨材の乾燥収縮率に与える V/S の影響は小さいと言える。

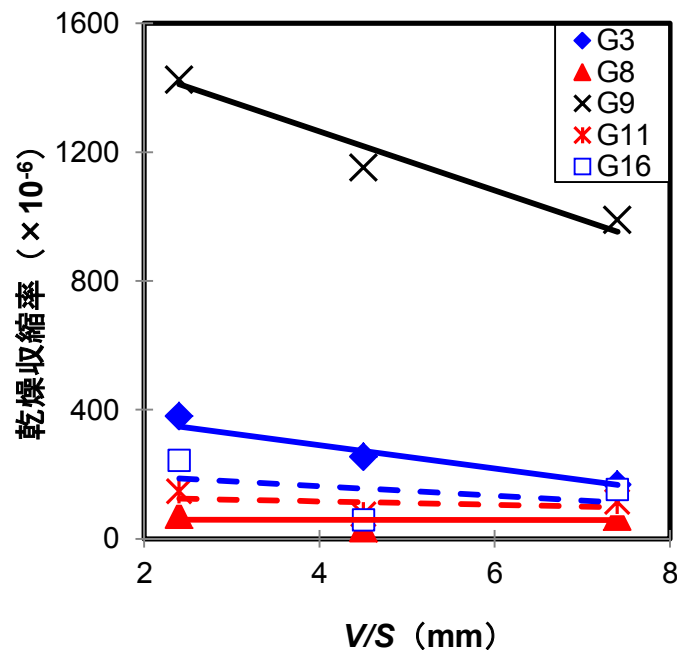


図 3-6 粗骨材の乾燥収縮率と V/S の関係

(2) 収束日数

本論では、ひずみの変動が安定した状態の乾燥収縮率に対して95%の乾燥収縮率に至るまでに要する乾燥日数を収束日数とした。

図3-7に収束日数とV/Sの関係を示す。V/Sが大きくなると、収束日数はいずれの粗骨材でも大きくなる傾向となった。V/Sの違いによる収束日数の違いは、最大で約12日(粗骨材G11)となった。V/Sの影響の受けやすさは、粗骨材によって異なる結果となった。

粗骨材の空隙量および水分の移動しやすさを簡易に評価できる指標として粗骨材の吸水率に着目し、収束日数と吸水率の対応を検討した。図3-8に収束日数と吸水率の関係を示す。図3-8中には、参考としてV/Sの値毎に個別に一次式で回帰した直線を示した。収束日数と吸水率の関係は、いずれのV/Sでも吸水率が大きくなるほど収束日数は小さくなる傾向となった。すなわち、V/Sが大きくなると粗骨材粒子の乾燥に要する期間が長くなるため、収束日

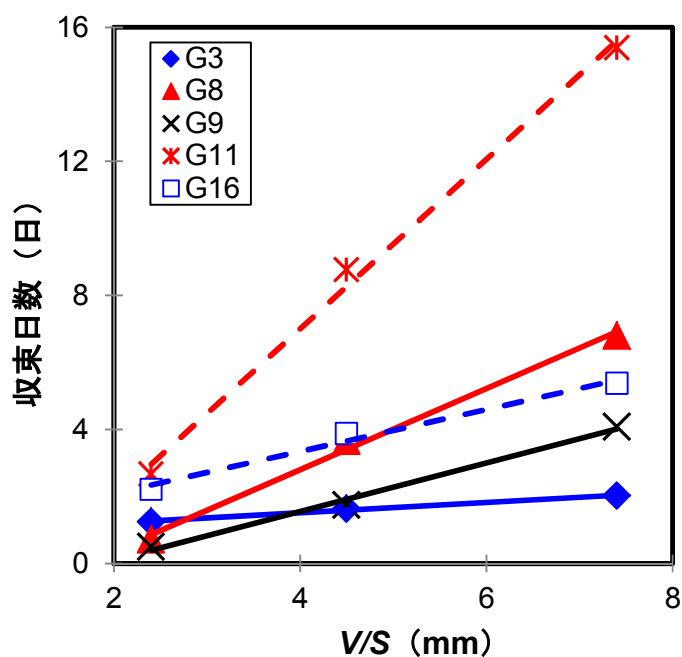


図 3-7 収束日数と V/S の関係

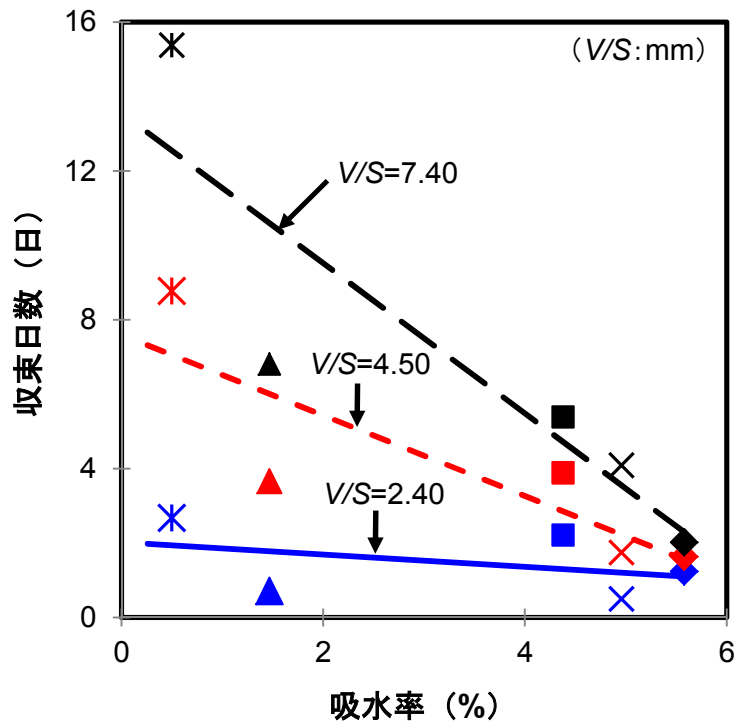
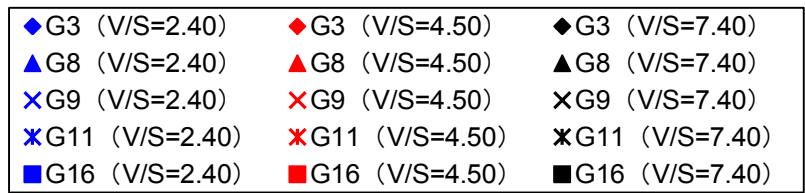


図 3-8 収束日数と吸水率の関係

数が大きくなる傾向は一致して認められる。しかし、粗骨材の吸水特性によってその程度は異なってくる。すなわち、吸水率が大きい粗骨材では、収束日数に与えるV/Sの影響が相対的に小さくなる。逆に、吸水率が小さい粗骨材では、粗骨材粒子のV/Sによって収束日数が大きく変化する。

3.2.6 粗骨材の乾燥収縮率のひずみゲージによる評価法

粗骨材粒子の乾燥収縮率の1軸計測のひずみゲージによる測定には、粒子毎のばらつき、ひずみの方向依存性、あるいは、測定する粒子の体積表面積比の影響が避けられないことが明らかになった。しかし、1軸計測のひずみゲージによって測定された7個以上の粗骨材粒子の乾燥収縮率を平均することで、当該粗骨材の乾燥収縮率の概略値が表現できることが確認された。また、ひずみゲージによって測定される粗骨材粒子の乾燥収縮率は、早いもので数日以内に結果が得られることがわかった。

実際のコンクリート中の粗骨材粒子は、その形状や空間的な配置が一様に定まっておらず、ひずみの方向依存性や体積表面積比の影響を必ずしも考慮しなくても良いと考えられる。特にコンクリートの乾燥収縮率の把握を目的とする場合は、1軸計測のひずみゲージによって粗骨材の乾燥収縮率を計測することが有効であるものと考えられる。本章で得た結果を踏まえて、表3-4のとおり、その粗骨材の乾燥収縮率の概略値を得るための評価法を提案する。

表 3-4 粗骨材の乾燥収縮率のひずみゲージによる評価法（案）

	提案する方法
(1)使用するひずみゲージ	・1軸計測の防水型ひずみゲージ
(2)粗骨材粒子の寸法	・15～25mm
(3)測定数	・粗骨材粒子7個以上
(4)測定の流れ	・粗骨材粒子の平滑面作製 ・ひずみゲージの貼付け ・試料の吸水（ひずみ安定するまで） ・20℃60%RHの環境下で測定（ひずみ安定するまで）
(5)主な装置等	・データロガー（ 1×10^{-6} の分解能があるもの）
(6)評価指標	・乾燥収縮率の平均値（乾燥開始からひずみ安定するまでの長さ変化率をそれぞれの粗骨材粒子で算出して、それらを平均する）

3.3 まとめ

本章では、粗骨材自体の乾燥収縮に着目し、ひずみゲージを用いた測定手法が粗骨材自体の乾燥収縮特性に与える影響を様々な品質の粗骨材を対象に検討した。本研究の実験の範囲で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) それぞれ産地および品質の異なる19種類の粗骨材を対象に、乾燥収縮率の大きさと粒子間のばらつきを検討した。その結果、各粗骨材の乾燥収縮率の大きさは大小様々で、複数個測定した乾燥収縮率を平均した値が大きくなると、その標準偏差も大きくなる傾向となった。試験試料によって多少の差はあるが、標準偏差が乾燥収縮率の平均値の約39%であることを明らかにした。また、7個以上の粗骨材粒子の乾燥収縮率を計測し、それらの値を平均することで、当該粗骨材の乾燥収縮率の概略値を得られることを明らかにした。
- (2) 粗骨材粒子におけるひずみの方向依存性について検討した結果、最大主ひずみと最小主ひずみの差は約25%であったことから、1軸計測のひずみゲージによる測定値はひずみの測定方向に起因するばらつきが含まれることを明らかにした。
- (3) 粗骨材の乾燥収縮率に与える体積表面積比の影響を検討した結果、乾燥収縮率が比較的大きな粗骨材は、体積表面積比が増加すると乾燥収縮率が減少する傾向であった。一方、乾燥収縮率が比較的小さな粗骨材は、粗骨材の乾燥収縮率に与える体積表面積比の影響が小さい傾向であった。また、乾燥収縮率が収束するまでに要する日数は、体積表面積比が大きくなると長くなる傾向となり、吸水率が小さい粗骨材ほど、その傾向が顕著であった。

第3章の引用資料

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編, pp.45-49, 2007.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編, pp.105-108, 2012.
- 3) 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.
- 4) 閑田徹志, 百瀬晴基, 今本啓一, 三橋博三：レディーミクストコンクリートを対象とした乾燥収縮の調査研究およびその統計分析, 日本建築学会構造系論文集, 第629号, pp.1019-1026, 2008.
- 5) 後藤幸正, 藤原忠司：乾湿を伴う骨材の体積変化, 土木学会論文報告集, 第247号, pp.97-108, 1976.
- 6) 谷村充, 兵頭彦次, 中崎豪士, 井坂幸俊：粗骨材の乾燥収縮特性に関する検討, 土木学会第65回年次学術講演会, V-160, pp.319-320, 2010.
- 7) 立松和彦, 荒井正直, 石清水隆, 木村芳幹, 浦野英男, 今本啓一, 元木亮：関西地域における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第549号, pp.1-6, 2001.
- 8) 中本純次, 正木亮, 高木啓太：コンクリートの乾燥収縮特性におよぼす粗骨材の影響, 材料, Vol.61, No.10, pp.819-824, 2012.
- 9) 篠野宏, 丸山一平, 中村光：コンクリート中の粗骨材が拘束試験体のひび割れに及ぼす影響についての解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014.
- 10) 百瀬晴基, 閑田徹志：体積表面積比が乾燥収縮ひずみに与える影響, 日本建築学会学術講演梗概集（中国）, pp.847-848, 2008.

第4章 粗骨材の収縮特性の各種指標による推定

4.1 はじめに

前章で粗骨材自体の乾燥収縮率に与える測定手法の影響を明らかにしており，7個以上の粗骨材粒子の乾燥収縮率をひずみゲージによってそれぞれ計測して，それらの値を平均することで，当該粗骨材の乾燥収縮率の概略値を得られることを示した．一方，実施が容易な粗骨材の試験で得られる試験結果から，その乾燥収縮率が推定できれば，労力の軽減が図れることから，実務上有益である．

粗骨材の密度や吸水率などの比較的簡易に把握できる指標で，コンクリートの乾燥収縮率との関係性を実験的に検討した研究例¹⁾があるが，それらの指標でコンクリートの乾燥収縮率を統一的に表現するには至っていない．また，粗骨材自体の乾燥収縮率についても，これまで積極的にその特性を直接的に測定することが行われてこなかったこともあり，粗骨材の品質を評価する指標との関連性を検討した研究例²⁾は少ない．

また，粗骨材の体積変化のメカニズムは，研究者によって支持する説が異なり，毛細管張力説^{3),4)}，表面張力説⁵⁾，分離圧説^{3),6)}の3つの説が有力とされるが，いずれの説でも空隙構造を考慮しているため，粗骨材の乾燥収縮率を議論する上で，その特性値を軽視できないことを示している．

以上のような背景から，粗骨材の乾燥収縮率を他の物理的指標から推定できるかどうか検討する．

4.2 粗骨材の各種指標と乾燥収縮率の関係

粗骨材の密度や吸水率などの指標からコンクリートの各種性能を関連付ける試みがこれまでに多数行われている。なかでも、粗骨材の品質とコンクリートの乾燥収縮率を関連付ける試み¹⁾が行われており、粗骨材の密度や吸水率などの指標とコンクリートの乾燥収縮率は、粗骨材種類を特定することで、線形関係が認められるとしている。

一方、粗骨材の体積変化に関して有力とされる各種メカニズムでは、いずれも空隙構造が考慮されている。また、コンクリートの乾燥収縮率に影響を与える粗骨材の空隙構造は、比表面積^{5), 7)}および細孔直径1000~10000 Åの空隙の多少^{8), 9)}であることがこれまでに報告されている。さらに、多孔体の体積変化を推定する手法として、ヤング係数などの影響を考慮した理論によるアプローチもこれまで検討されている。後藤ら⁵⁾によると、吸脱着に関するGibbsの式とBangham & Fakhoury¹⁰⁾の式を組み合わせることにより、多孔体の長さ変化率は表面エネルギーの変化と密度、比表面積およびヤング係数からなる複合指標の一次式になることを示している。

本検討では、密度、吸水率などの粗骨材の品質を評価する指標、コンクリートの乾燥収縮率に影響を与えることが指摘されている空隙構造特性、さらに、物理的な指標を組み合わせた指標によって、第3章で得られた粗骨材の乾燥収縮率の概略値を簡易に推定できるかどうか検討した。

4.2.1 使用材料

表4-1に検討に用いた粗骨材の種類と品質を示す。なお、粗骨材の最大寸法は、G6が15mm、G12、G13、G15、G18およびG19が20mm、その他の粗骨材が25mmである。粗骨材の乾燥収縮率は、前章でも示したひずみゲージによる方法で測定した。選定した粗骨材のNo.は、前章の表3-1で示した粗骨材のNo.とリンクしている。

表 4-1 粗骨材の種類と品質

分類	No.	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性※ (%)	乾燥収縮率 (×10 ⁻⁶)	
					平均	標準偏差
火山岩	G1	2.25	6.43	27.5	383	155
	G2	2.63	1.66	3.80	126	46
	G3	2.29	5.58	52.7	334	170
	G4	2.47	2.74	72.9	348	51
	G5	2.44	3.91	54.2	646	328
	G6	2.65	2.67	14.8	416	129
	G7	2.29	6.53	56.5	550	494
深成岩	G8	2.53	1.47	22.3	180	89
砕屑岩	G9	2.37	4.96	89.7	1529	496
	G10	2.45	3.33	56.4	620	138
	G11	2.65	0.50	3.30	86	30
	G12	2.64	0.69	11.4	139	31
	G13	2.57	1.56	34.8	459	62
	G14	2.59	1.54	27.9	935	413
	G15	2.64	0.99	17.3	528	117
火砕岩	G16	2.48	4.38	45.3	255	109
	G17	2.28	7.17	70.2	907	445
生物岩	G18	2.71	0.26	1.50	21	6
	G19	2.70	0.29	0.70	26	4
川砂		2.56	1.58	3.50	—	—

網掛けは、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」を満足しない物性値

※：JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」

4.2.2 測定方法

粗骨材の一般的な品質である絶乾密度，吸水率は，JIS A 1110「粗骨材の密度及び吸水率試験方法」に準拠した．また，安定性については，JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」に準拠した．多孔材料の空隙構造は，**図4-1**に再掲するように，空隙径によって測定手法が異なるが知られるが，本論では，コンクリートの乾燥収縮率に影響を与えるとされる空隙径の範囲をカバーできる水銀圧入法およびガス吸着法である水蒸気吸着法によって，粗骨材の細孔構造を把握した．さらに，複合した指標による検討には，粗骨材のヤング係数が必要であるため，コンクリートおよびモルタルのヤング係数から当該指標を推定した．以下に詳細を示す．

(1) 水銀圧入法による空隙構造の測定

粗骨材の空隙構造を把握する方法として，水銀圧入法を適用した．粗骨材の空隙構造の把握には，Quantachrome社の全自動多機能水銀ポロシメーターであるPOREMASTERを用いた．第3章で示したようにひずみゲージによって測定された粗骨材粒子の乾燥収縮率は粒子間の相当なばらつきがあることから，測定に用いる試料の選定・調整には特段の配慮を払った．複数の粗骨材粒子を偏りが生じないように選定し，それらを2.5～5.0mm角程度に粉碎して，十分に混合したものを試料として用いた．測定回数は試料毎に2回とした．なお，空隙の形態は円筒型と仮定した．水銀の表面張力は $480 \times 10^{-3} \text{N/m}$ とした．接触角は 130° とし

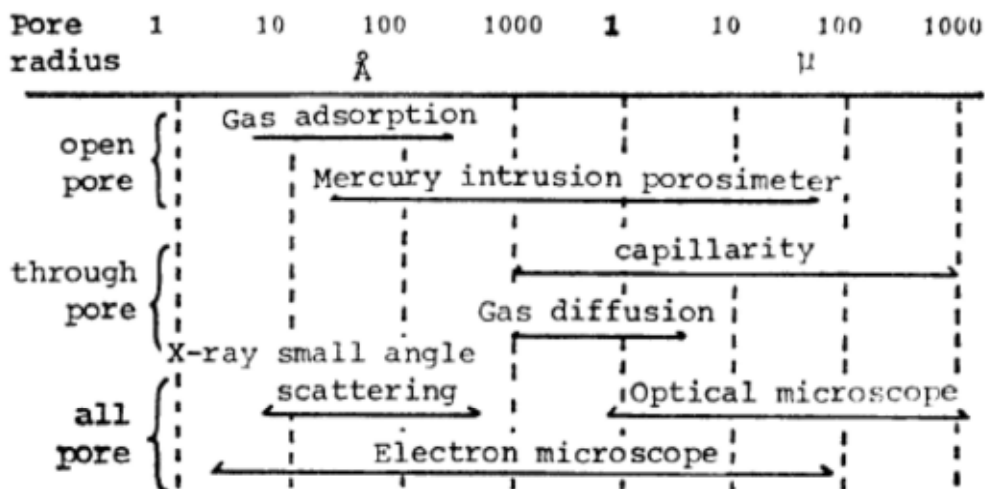


図 4-1 空隙構造の測定法と適用径 ¹¹⁾

た．細孔直径測定範囲は6nm以上とした．

なお，水銀圧入法による空隙構造の把握には，表4-1に示す一部の粗骨材（G2，G3，G6，G8，G9，G11，G13，G14，G16およびG18）を選定した．

（2）水蒸気吸着法による比表面積の測定

粗骨材の比表面積を把握する方法として，今本らの研究¹²⁾を参考にして，比較的簡易に実施が行える水蒸気吸着による方法を用いた．表4-1に示す全ての粗骨材を対象に，試験は，約1kgの絶乾状態の粗骨材を温度20℃，湿度33%RHの環境に静置し，水蒸気を吸着させ，安定した水蒸気吸着量 $v(g)$ になるまで質量を測定した．吸着面に対して単分子膜を形成するのに要する吸着量 $v_m(g)$ を式4-1で求めた後，吸着量 $v_m(g)$ に相当する分子数（アボガドロ数）および吸着水分子の断面積(10.8 \AA^2)を乗じて比表面積(m^2/g)を算出した．

$$v_m = v \left(1 - \frac{x}{100} \right) \quad (4-1)$$

ここに， x ：平衡湿度(%RH)

（3）ヤング係数の測定

ここでは粗骨材のヤング係数の推定を試みている．その推定において，コンクリートとモルタルのヤング係数が必要となるため，コンクリートとモルタルも作製した．

コンクリートは，単位水量 165 kg/m^3 ，水セメント比55%，細骨材率46%および目標空気量4.5%の配合条件で表4-1に示す粗骨材をそれぞれ用いて作製した．

モルタルは，水セメント比55%，砂セメント比2.73の配合条件とした．なお，細骨材は表4-1に示す川砂，セメントは普通ポルトランドセメント，混和剤はAE減水剤（C×0.31%）およびAE助剤を使用した．

コンクリートおよびモルタルのヤング係数の測定に用いる供試体は，供試体を材齢1日で脱型した後，材齢28日まで水中養生を行った．コンクリートおよびモルタルのヤング係数

の測定は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に従った。なお、割線ヤング係数と初期接線ヤング係数では、初期接線ヤング係数の方が、コンクリートの乾燥収縮率との相関性が高い¹⁾ことから、本論でもコンクリートおよびモルタルのヤング係数には、初期接線ヤング係数を採用した。

4.2.3 粗骨材の細孔径分布

Bentur¹³⁾によると、硬化セメントペーストにおいて、乾燥収縮に影響を与える細孔直径は、湿度60%RHにおいて30nm以下とされている。また、内川ら¹⁴⁾によると細孔直径30nm~2 μ mの毛細管空隙が乾燥収縮に影響を与えている。本論の水銀圧入法による結果は、細孔直径2 μ m以下（細孔半径1 μ m以下）の測定データで整理した。

図4-2に水銀圧入法によって測定された粗骨材の細孔量の結果の一例を示す。結果の一例に示した粗骨材は、測定した細孔量が最も多くなったG3と乾燥収縮率の大きいG9である。本論では、細孔構造の測定は、試料毎に2回としている。図のとおり、いずれの粗骨材でも1回目の測定と2回目の測定で大きな差は見受けられない。その他の粗骨材についても同様の結果であった。このため、以下の検討では、1回目と2回目の測定結果を平均して整理した。

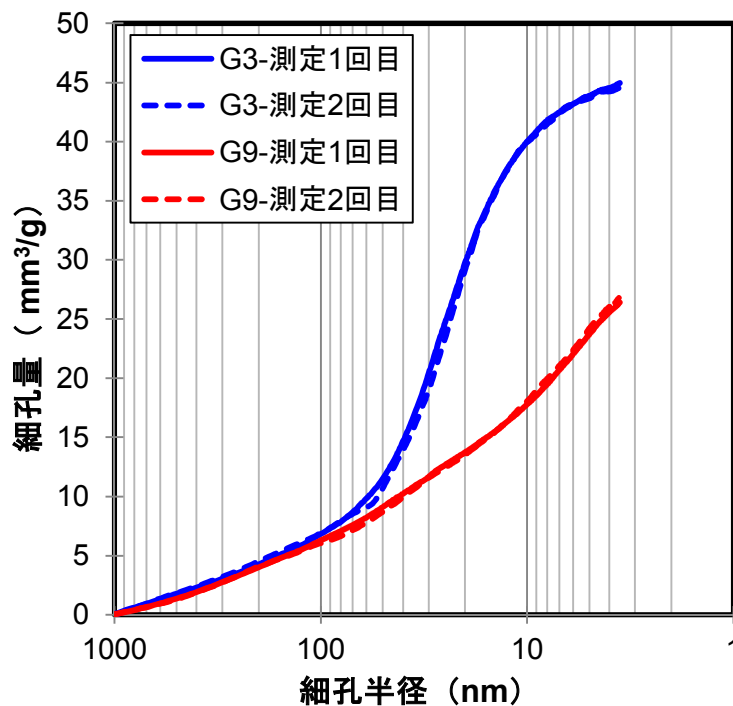


図 4-2 粗骨材の細孔量の測定結果一例

図4-3に粗骨材の細孔径分布を示す。図の下側に、単位対数目盛あたりの細孔量を併せて表示した。全体として、粗骨材種類によって細孔量が異なることがわかる。岩種を分けてみると、火山岩（左図）において、G3, G2, G6の順で細孔量が大きいことがわかるが、粗骨材の乾燥収縮率はG6, G3, G2の順で大きいため、細孔量の大小関係と一致していない。下側の図から、細孔半径10nm以下の細孔量の累計値は、G6, G3, G2でそれぞれ5.68, 4.88, 1.00mm³/gであり、乾燥収縮率の大小関係と一致する。また、G3は細孔半径10~20nmの範囲で細孔量のピークが確認され、G2およびG6では細孔半径100~200nmの範囲で細孔量のピークが確認される。

次に、砕屑岩（中図）において、G9, G13, G14, G11の順で細孔量が大きいことがわかるが、粗骨材の乾燥収縮率はG9, G14, G13, G11の順で大きいため、こちらも細孔量の大小関係と一致していない。下側の図から、細孔半径10nm以下の細孔量の累計値は、G9, G14, G13, G11でそれぞれ8.85, 1.54, 3.19, 0.00mm³/gであり、こちらは乾燥収縮率の大小関係と一致していない。G9においては細孔半径10~20nmの範囲で細孔量のピークが確認されるが、その他では、顕著なピークが確認されない。

そして、その他（右図）において、岩種が異なることでそれぞれ細孔量が異なることがわかる。下側の図からいずれの粗骨材も顕著なピークが確認されない。また、細孔半径10nm以下の細孔量の累計値は、G16, G8, G18でそれぞれ4.77, 0.85, 0.00mm³/gであり、粗骨材の乾燥収縮率はG16, G8, G18の順で大きいため、その他の岩種では大小関係が一致する。

以上のように、岩種によっては、微細な空隙量の大小が乾燥収縮率の大小関係に影響されることが推察された。

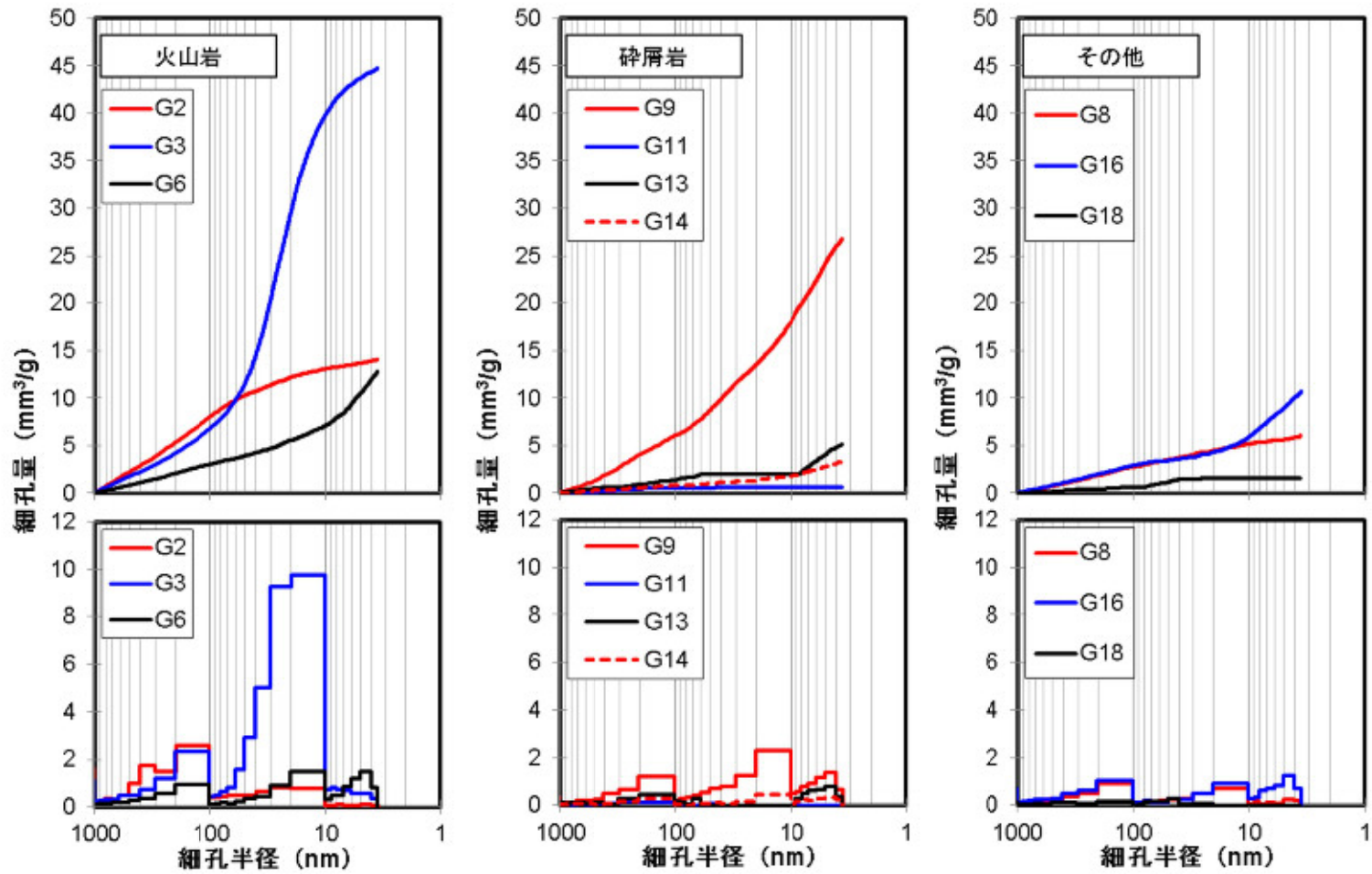


図 4-3 粗骨材の細孔径分布

4.2.4 粗骨材の物理的指標と乾燥収縮率の関係

ここでは、粗骨材の一般的な物理的指標や粗骨材の空隙構造に関する指標と粗骨材の乾燥収縮率の関係を検討した。

(1) 絶乾密度、吸水率および安定性

図4-4に粗骨材の乾燥収縮率の平均値と粗骨材の絶乾密度、吸水率および安定性の関係を示す。理由は明確ではないが、どの物理的指標も、砕屑岩に分類される粗骨材とそれ以外に分類される粗骨材では、線形関係が異なっていた。砕屑岩に分類される粗骨材のみ異なる傾向を示す結果は、コンクリートの乾燥収縮率との相関性の解明を試みた研究¹⁾と同様な結果となった。

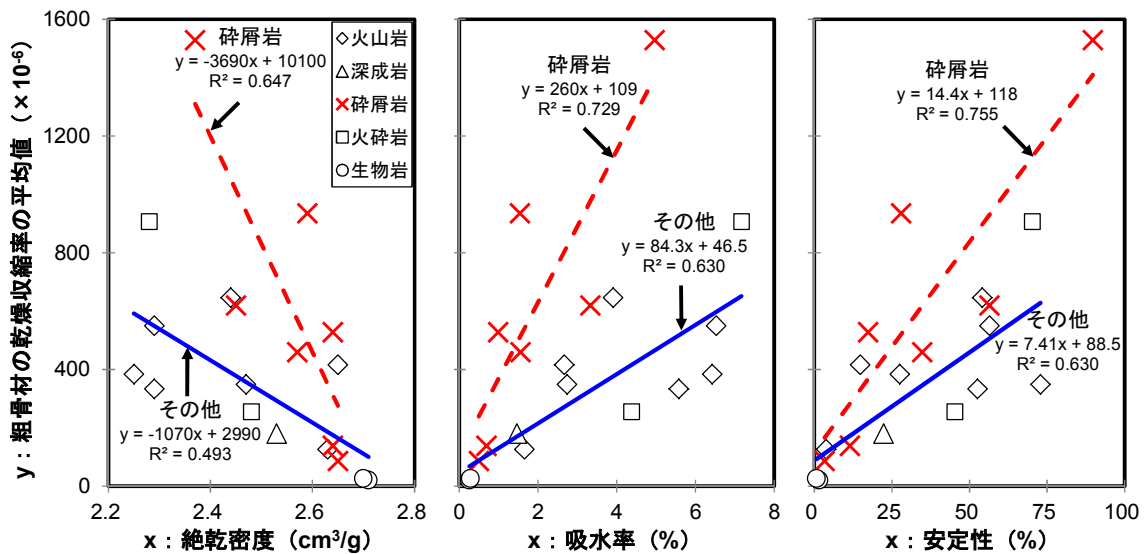


図 4-4 粗骨材の乾燥収縮率と粗骨材の絶乾密度、吸水率および安定性の関係

(2) 細孔量

微細な空隙量の多少^{8),9)}がコンクリートの乾燥収縮率に影響を与えることが報告されている。粗骨材自体の乾燥収縮率についても、微細な空隙量に影響されるものと推察されたため、粗骨材の乾燥収縮率と細孔量の関係について検討した。

図4-5に粗骨材の乾燥収縮率の平均値と細孔量の関係を示す。砕屑岩に分類される粗骨材のみ線形関係が認められる。また、細孔量が大きいと、粗骨材の乾燥収縮率も大きい傾向が認められる。

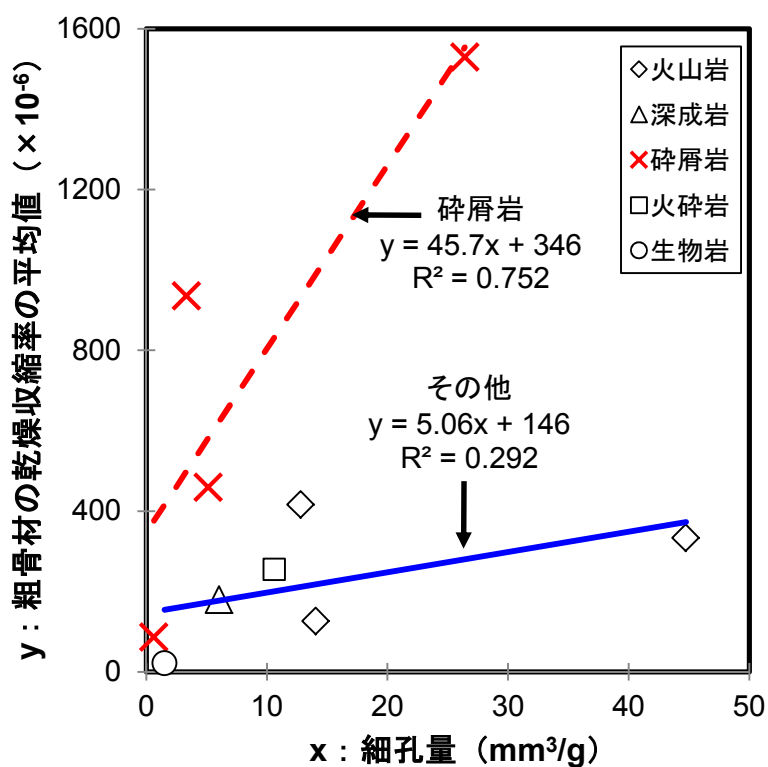


図 4-5 粗骨材の乾燥収縮率と細孔量の関係

(3) 比表面積

後藤ら⁵⁾によると、粗骨材の体積変化は、比表面積の影響が支配的であるとされるため、粗骨材の乾燥収縮率と比表面積の関係性について検討した。

a) 水銀圧入法による結果

図4-6に粗骨材の乾燥収縮率の平均値と水銀圧入法による比表面積の関係を示す。砕屑岩に分類される粗骨材とそれ以外に分類される粗骨材では、線形関係が異なっていた。また、比表面積が大きいと、粗骨材の乾燥収縮率も大きい傾向が認められる。

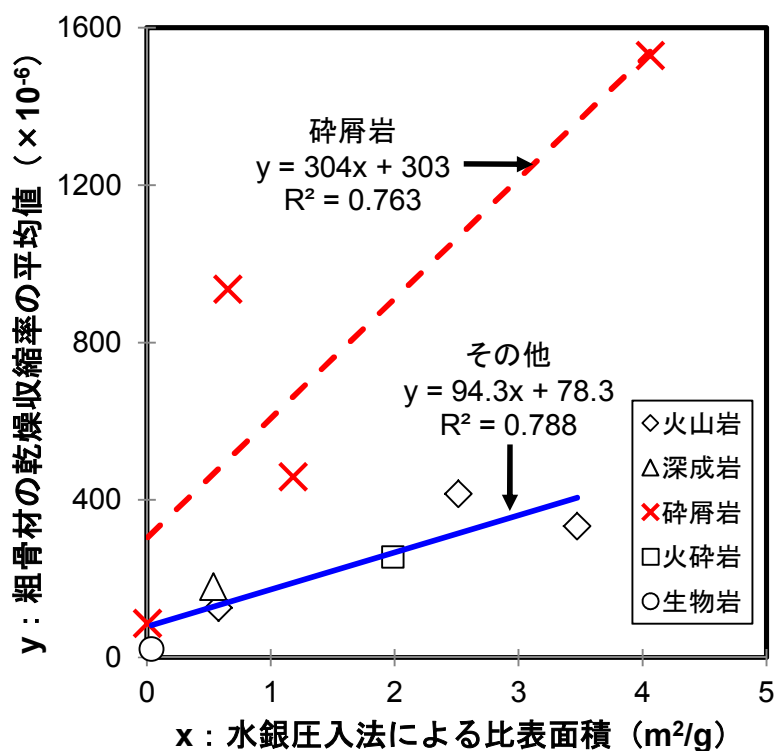


図 4-6 粗骨材の乾燥収縮率と水銀圧入法による比表面積の関係

b) 水蒸気吸着法による結果

図4-7に粗骨材の乾燥収縮率の平均値と水蒸気吸着法による比表面積の関係を示す。水銀圧入法の結果と同様に、砕屑岩に分類される粗骨材とそれ以外に分類される粗骨材では、線形関係が異なっていた。また、比表面積が大きいと、粗骨材の乾燥収縮率も大きい傾向が認められる。

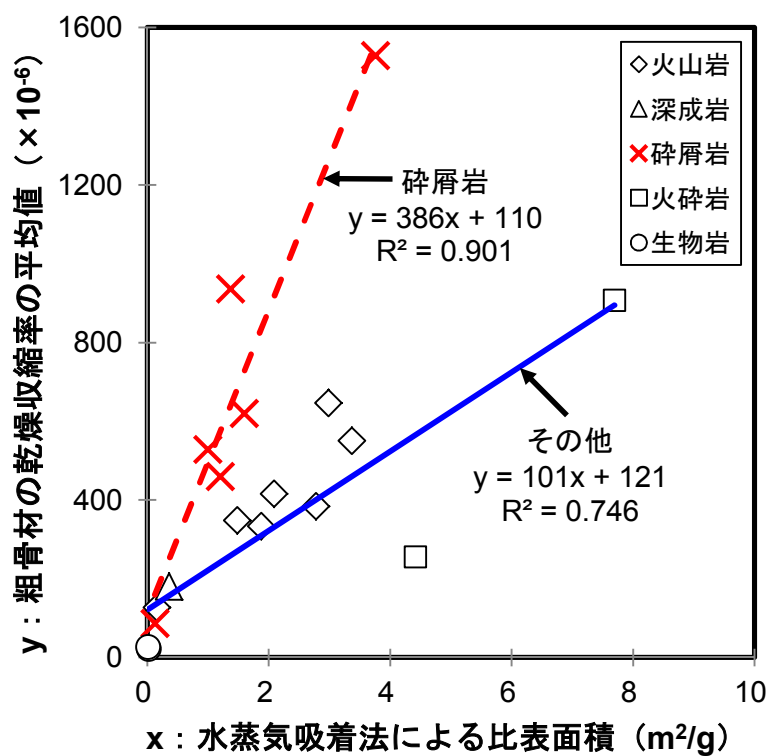


図 4-7 粗骨材の乾燥収縮率と水蒸気吸着法による比表面積の関係

(4) 平均細孔径

粗骨材の一般的な物理的指標や細孔量および比表面積の指標では、粗骨材の乾燥収縮率を同一の線形関係で表現することが困難であった。多孔物質の細孔を円筒型と仮定して代表的な細孔径の概略値を把握する指標として平均細孔径¹⁵⁾がある。この平均細孔径で、粗骨材の乾燥収縮率を粗骨材の種類を特定しなくても表現することができるかどうか検討した。平均細孔径 $r(\text{nm})$ は式4-2から算出される。

$$r = \frac{2V}{S_{mi}} \quad (4-2)$$

ここに、 S_{mi} ：水銀圧入法によって得られた比表面積(m^2/g)

V ：細孔量(mm^3/g)

図4-8に粗骨材の乾燥収縮率の平均値と平均細孔径の関係を示す。決定係数が十分に大きくないが、平均細孔径を用いることで粗骨材の乾燥収縮率を累乗関数によって表現可能であった。また、平均細孔径が50nm以上であれば、粗骨材の乾燥収縮率が小さいことが推定できる。

以上より、粗骨材の乾燥収縮率を把握する方法として、その粗骨材の吸水率や比表面積などを用いて推定することも可能であるが、これらの指標を用いて適切な推定結果を得るためには、粗骨材種類の特定を必要とする場合もある。一方、平均細孔径を用いることで粗骨材種類を特定せずに推定することが可能である。

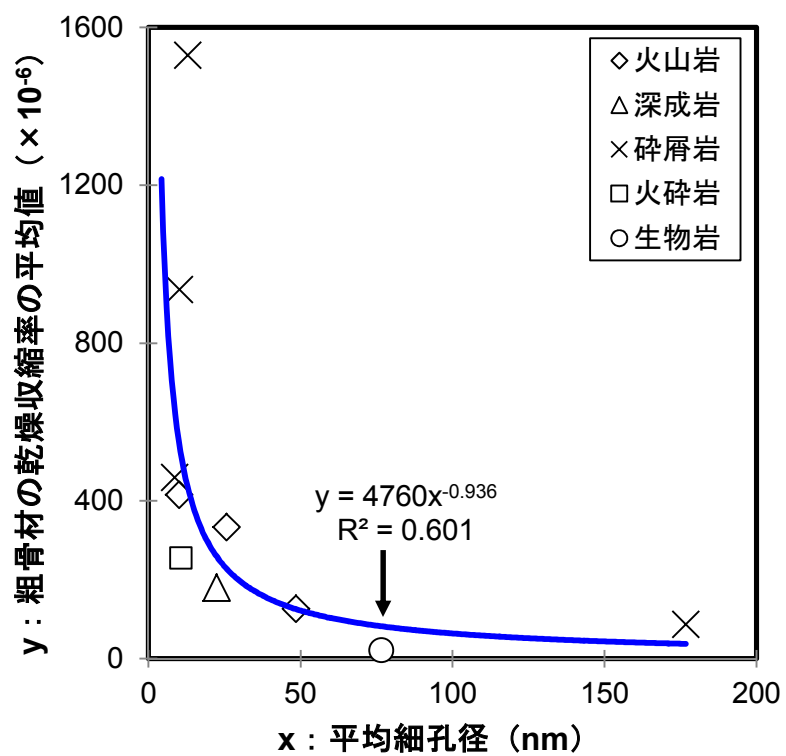


図 4-8 粗骨材の乾燥収縮率と平均細孔径の関係

4.2.5 粗骨材の複合指標と乾燥収縮率の関係

粗骨材の一般的な物理的指標や細孔量および比表面積のみの単一指標では、粗骨材の乾燥収縮率を推定するためには、粗骨材の種類を特定する必要があったが、平均細孔径を用いることで、同一の累乗関数で表現できることを示した。このことから複数の指標を組み合わせることで、高い精度の同一の関数で粗骨材の乾燥収縮率を表現できるものと考えられる。

天然骨材では、粗骨材のヤング係数がコンクリートの乾燥収縮率に影響を与えることが指摘され、ヤング係数が大きい骨材を使用したコンクリートは乾燥収縮率が小さいことが報告されている¹⁶⁾。このことから、粗骨材のヤング係数も考慮した指標と粗骨材の乾燥収縮率との関係を検討する。

後藤ら⁵⁾によると、粗骨材の体積変化は、比表面積の影響が支配的であるとしているが、本研究では、粗骨材の比表面積で粗骨材種類を特定せずに、粗骨材の乾燥収縮率を推定できる指標とならなかった。粗骨材のヤング係数も考慮した関係式として、後藤ら⁵⁾は吸脱着に関するGibbsの式とBangham & Fakhoury¹⁰⁾の式を組み合わせることにより、多孔体の長さ変化率 $\Delta l/l$ を式4-3のようになるとしている。

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\rho S_p}{E} (\gamma' - \gamma_0) \quad (4-3)$$

ここに、 ρ ：真密度(g/cm³)

S_p ：内部表面積(m²/g)

E ：ヤング係数(N/mm²)

γ_0 ：固体の真空中での表面エネルギー(N/m)

γ' ：吸着層をもつ固体の表面エネルギー(N/m)

本論では、式4-3の表面エネルギーの変化を除いた項、すなわち、 $\rho S_p/E$ (m/N)を粗骨材のヤング係数を考慮した複合指標として採用した。

真密度は、便宜的に粗骨材の絶乾密度を代用した。内部表面積は、水蒸気吸着法によって測定した比表面積を用いた。粗骨材のヤング係数は、粗骨材の原石からコアを採取した供試体や粗骨材粒子自体で直接把握することが望ましいが、本論では、コンクリートおよびモルタルのヤング係数を把握し、式4-4に示すHashin-Hansen式¹⁷⁾より推定した。

$$\frac{E_c}{E_m} = \frac{n+1+(n-1)V_a}{n+1-(n-1)V_a} \quad (4-4)$$

ここに、 $n : E_a/E_m$

$E : \text{ヤング係数(N/mm}^2\text{)}$

$V_a : \text{粗骨材体積比}$

なお、添字 c 、 a 、 m は、それぞれコンクリート、粗骨材、モルタルである。

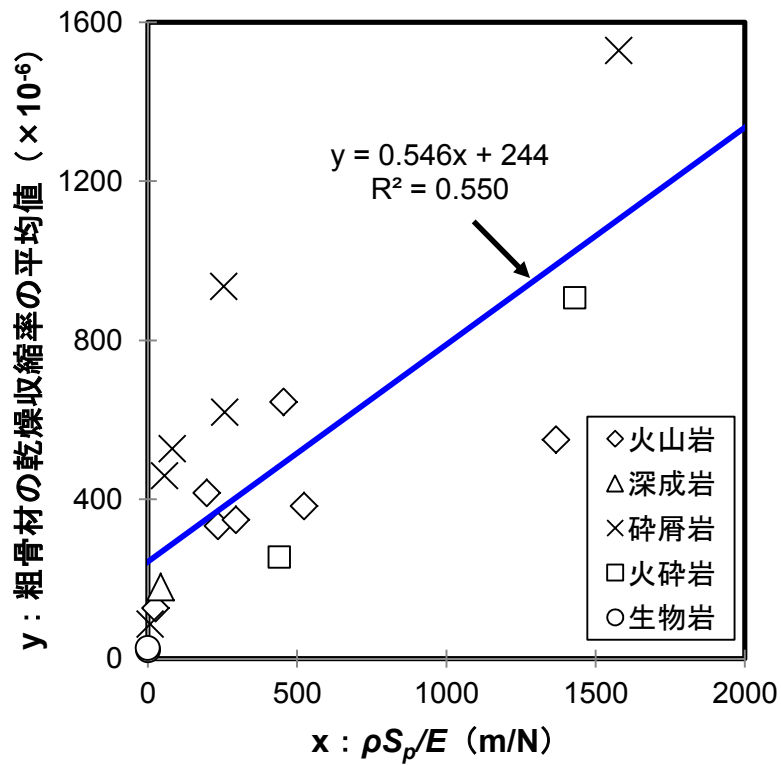


図 4-9 粗骨材の乾燥収縮率と $\rho S_p/E$ の関係

図4-9に粗骨材の乾燥収縮率と $\rho S_p/E$ の関係を示す。絶乾密度や吸水率などの個別の物理的指標よりも、 $\rho S_p/E$ を用いた方が粗骨材の乾燥収縮率の平均値を粗骨材種類の特定をせずとも推定できる可能性があることがわかった。しかし、 $\rho S_p/E$ では粗骨材の乾燥収縮率の平均値の推定にばらつきが生じるため、粗骨材の最も正確な乾燥収縮率を把握するには、ひずみゲージによって、粗骨材粒子の乾燥収縮率を直接測定することが望ましいと言える。

4.3 まとめ

粗骨材の品質を評価する各種指標やそれらを組み合わせた複合指標と粗骨材の乾燥収縮率の関係を検討した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 粗骨材の細孔半径 $1\mu\text{m}$ 以下の細孔径分布は、粗骨材種類によって異なっていた。粗骨材の細孔量と乾燥収縮率において数量的な対応関係を得るには至らなかったが、砕屑岩に分類される粗骨材の細孔量と当該粗骨材の乾燥収縮率は、線形関係が確認された。
- (2) 水銀圧入法によって得られた細孔半径 $1\mu\text{m}$ 以下のデータから求めた粗骨材の比表面積や水蒸気吸着法によって得られた粗骨材の比表面積と粗骨材の乾燥収縮率との関係は、いずれの指標も砕屑岩とそれ以外に分類することで線形関係が成り立つことが確認された。
- (3) 水銀圧入法によって得られた細孔半径 $1\mu\text{m}$ 以下のデータから求めた粗骨材の平均細孔径は、粗骨材の乾燥収縮率を累乗関数によって表現可能であった。
- (4) 粗骨材の乾燥収縮率を把握する方法として、その粗骨材の吸水率や比表面積などを用いて推定することも可能であるが、これらの指標を用いて適切な推定結果を得るためには、粗骨材種類の特定を必要とする場合もある。一方、粗骨材の乾燥収縮率をひずみゲージにより直接測定すれば、このような問題は生じない。

第4章の引用資料

- 1) 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, No.1, pp.467-472, 2010.
- 2) 寺西浩司: 骨材の乾燥収縮ひずみの評価指標に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.687, pp.905-912, 2013.
- 3) 丸山一平, 岸 直哉: セメント硬化体の収縮理論, 日本建築学会構造系論文集, 第642号, pp.1395-1403, 2009.
- 4) 小幡雄一郎, 上田 仁, 吉田 亮, 梅原秀哲: 粗骨材における含水率と体積変化との関係に関する一考察, 土木学会第65回年次学術講演会, pp.571-572, 2010.
- 5) 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) 小幡雄一郎: 粗骨材がコンクリートの収縮に与える影響, 名古屋工業大学博士論文, pp.58-60, 2015.
- 7) 八木翔吾, Carlos Aquino, 井上真澄, 岡本享久: 石灰石骨材の収縮特性とコンクリートの乾燥収縮に関する研究, 土木学会第65回年次学術講演会, pp.573-574, 2010.
- 8) 岩清水隆, 米澤敏男, 井上和政, 松本竹史: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材品質の影響に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.1079-1080, 1998.
- 9) 立松和彦, 荒井正直, 石清水隆, 木村芳幹, 浦野英男, 今本啓一, 元木亮: 関西地域における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第549号, pp.1-6, 2001.
- 10) Bangham, D. H. and Fakhoury, N. : The Swelling of Charcoal, Proceedings of the Royal Society of London, Vol.130, No.812, pp.81-89, 1930.
- 11) 後藤誠史: 細孔構造の測定, 粘土科学, 第24巻, 第1号, pp.1-12, 1984.
- 12) 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.
- 13) A. Bentur : The pore structure of hydrated cementitious compounds of different chemical composition, Journal of the American ceramic society, Vol.63, pp.381-386, 1980.
- 14) H. Uchikawa, S. Hanehara and D. Sawaki: Structural change of hardened mortar by drying, Proc. of the 3rd NCB international seminar on cement and building materials, Vol.4, pp. 1-12, 1991.

- 15) 河添邦太朗, 池田憲治 : 多孔性物質の細孔分布の測定—高圧水銀法について—, 化学工学, 第26巻, 第10号, pp.1101-1108, 1962.
- 16) Neville, A.M. : Creep of Concrete, North-Holland Pub. Co., 1970.
- 17) Hansen, T. C. : Influence of Aggregate and Voids on the Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar and Cement Paste, Journal of the ACI, Vol.62, No.2, pp.193-216, 1965.

第5章 コンクリートの乾燥収縮率の粗骨材による推定

5.1 はじめに

前章までで、粗骨材粒子の乾燥収縮率に与える測定手法の影響を明らかにするとともに、粗骨材自体の乾燥収縮特性を粗骨材のその他の各種指標で推定できるかどうか検討した。その結果、7個以上の粗骨材粒子の乾燥収縮率をひずみゲージによってそれぞれ計測して、それらの値を平均することで、当該粗骨材の乾燥収縮率の概略値を得られることを示した。また、粗骨材の乾燥収縮率は、粗骨材の空隙構造特性を示す平均細孔径などで粗骨材種類を特定しなくても表現できることを示した。

ここでは、簡易に測定できる粗骨材の乾燥収縮率の有用性を示すために、粗骨材のひずみゲージによる乾燥収縮率の他にも、第4章で検討した平均細孔径や複合指標とコンクリートの乾燥収縮率の関係性を検討する。さらに、コンクリートの乾燥収縮率に関する複合則や土木学会式の適用性も検討する。本検討の結果により、コンクリートの乾燥収縮率を簡易に推定する指標などを明らかにする。

5.2 コンクリートの乾燥収縮率

粗骨材の乾燥収縮率をはじめとした各種物性値との関係性を比較検討するために、各種粗骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮率を把握した。

コンクリートは、単位水量 165kg/m³、水セメント比 55%、細骨材率 46%および目標空気量 4.5%の配合条件で表 5-1 に示す粗骨材をそれぞれ用いて作製した。なお、細骨材は表 5-1 に示す川砂、セメントは普通ポルトランドセメント、混和剤は AE 減水剤 (C×0.31%) を使用した。

表 5-1 粗骨材の種類と品質

分類	岩種	No.	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 [※] (%)
火山岩	安山岩	G1	2.25	6.43	27.5
	安山岩	G2	2.63	1.66	3.80
	安山岩	G3	2.29	5.58	52.7
	安山岩	G4	2.47	2.74	72.9
	安山岩	G5	2.44	3.91	54.2
	安山岩	G6	2.65	2.67	14.8
	安山岩	G7	2.29	6.53	56.5
深成岩	花崗岩	G8	2.53	1.47	22.3
砕屑岩	砂岩～シルト岩	G9	2.37	4.96	89.7
	砂岩	G10	2.45	3.33	56.4
	砂岩	G11	2.65	0.50	3.30
	砂岩	G12	2.64	0.69	11.4
	砂岩	G13	2.57	1.56	34.8
	頁岩	G14	2.59	1.54	27.9
	砂岩	G15	2.64	0.99	17.3
火砕岩	凝灰岩	G16	2.48	4.38	45.3
	凝灰岩	G17	2.28	7.17	70.2
生物岩	石灰岩	G18	2.71	0.26	1.50
	石灰岩	G19	2.70	0.29	0.70
川砂			2.56	1.58	3.50

網掛けは、JIS A 5005 「コンクリート用砕石及び砕砂」 を満足しない物性値

※ : JIS A 1122 「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」

コンクリートの長さ変化試験に用いる供試体は、材齢1日で脱型した後、材齢7日まで水中養生を行った。コンクリートの乾燥収縮率は、温度20℃、湿度60%RHの環境でJIS A 1129-3（ダイヤルゲージ法）の方法に従い、材齢6ヶ月まで測定した。表5-2にコンクリートの乾燥収縮率の測定結果を示す。使用する粗骨材が異なることで、コンクリートの乾燥収縮率が大きくことなる結果となった。

表 5-2 コンクリートの乾燥収縮率

分類	No.	コンクリートの乾燥収縮率 ($\times 10^{-6}$)
火山岩	G1	924
	G2 ^{***}	733
	G3	906
	G4 ^{**}	926
	G5	1011
	G6 ^{**}	886
	G7	1069
深成岩	G8 ^{**}	822
砕屑岩	G9	1424
	G10 [*]	1099
	G11 ^{***}	667
	G12 ^{***}	777
	G13 ^{**}	1019
	G14 ^{**}	1160
	G15 ^{**}	1071
火砕岩	G16 [*]	782
	G17	1142
生物岩	G18 ^{***}	514
	G19 ^{***}	536

* : 絶乾密度のみ満足する粗骨材

** : 絶乾密度，吸水率を満足する粗骨材

*** : 絶乾密度，吸水率，安定性を満足する粗骨材

対象規格：JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」

本論では、使用する粗骨材の違いがコンクリートの乾燥収縮に与える影響を把握することに主眼を置いているため、単位水量・水セメント比・細骨材率・AE減水剤の使用量は、全配合を通じて一定とした。このため、コンクリートのフレッシュ性状は、使用粗骨材によって多少の変動が生じるのは避けられず、フレッシュコンクリートの試験結果は、スランプ3.5～18.6cm、空気量4.0～6.2%であった。ここで、空気量がコンクリートの乾燥収縮率に与える影響は、空気量4.0%の変動で乾燥収縮率が約 50×10^{-6} 変動するとの報告¹⁾がある。今回、作製したコンクリートの空気量の変動は、最大2.2%であることから、この空気量の変動がコンクリートの乾燥収縮率に与える影響はほとんどないものとみなした。

5.3 コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材の各種指標の関係

一般的に、コンクリートの乾燥収縮率を把握には6ヶ月もの期間を要する。コンクリートの乾燥収縮率を簡易に推定できれば、従来の試験実施にかかるコストや労力の軽減などにつながるため、実務上有益である。

従来のコンクリートの乾燥収縮率に影響を与える因子は、コンクリートの配合のなかで、単位水量の影響が大きいとされていたが、近年では、粗骨材種類の影響が支配的であることが報告されている。

実施が容易な粗骨材の品質に関する試験で得られる結果とコンクリートの乾燥収縮率を結びつける検討はこれまでに実施されているが、使用される粗骨材の岩種を区別する必要があり、同一の関数で表現できる指標を見出すに至っていない²⁾。

以上のことから、本研究で得られた粗骨材の各種指標によって、コンクリートの乾燥収縮率を簡易に推定できる手法になり得るかどうかを検討し、コンクリートの乾燥収縮率を簡易に推定できる有用な指標を明らかにする。

5.3.1 コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材の空隙構造特性の関係

粗骨材の比表面積^{3), 4)}および細孔直径1000~10000Åの空隙の多少^{5), 6)}がコンクリートの乾燥収縮率に影響を与えることが指摘されている。また, Bentur⁷⁾によると, 硬化セメントペーストにおいて, 乾燥収縮に影響を与える細孔直径は, 湿度60%RHにおいて30nm以下とされている。また, 内川ら⁸⁾によると細孔直径30nm~2μmの毛細管空隙が乾燥収縮に影響を与えるとしている。

水銀圧入法による結果は, 第4章で得られた細孔半径1μm以下の測定データで整理した指標を用いて, コンクリートの乾燥収縮率との関係を検討した。

ここでは, 粗骨材の乾燥収縮率を統一的に表現することができた平均細孔径とコンクリートの乾燥収縮率の関係を検討した。

平均細孔径 $r(\text{nm})$ の算出方法を式5-1に再掲する。

$$r = \frac{2V}{S_{mi}} \quad (5-1)$$

ここに, S_{mi} : 水銀圧入法によって得られた比表面積(m^2/g)

V : 細孔量(mm^3/g)

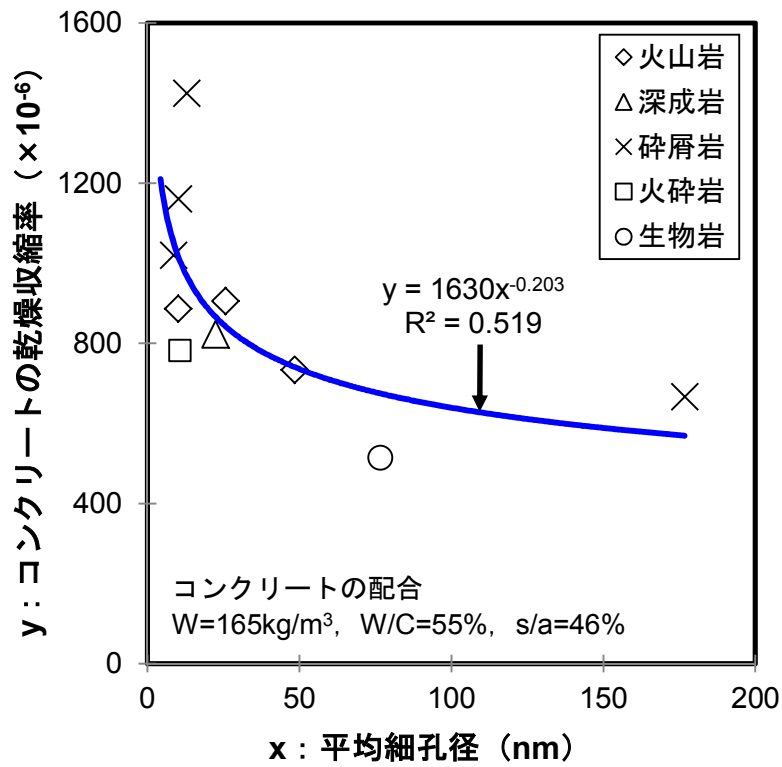


図 5-1 コンクリートの乾燥収縮率と平均細孔径の関係

図5-1にコンクリートの乾燥収縮率と平均細孔径の関係を示す。平均細孔径を用いることでコンクリートの乾燥収縮率を累乗関数によって表現できることがわかった。また、平均細孔径が50nm以上であれば、コンクリートの乾燥収縮率が小さいことがわかる。

5.3.2 コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材の複合指標の関係

ここでは、第4章で得られた粗骨材の乾燥収縮率を粗骨材種類の特定をせずに線形関係で表現することができたヤング係数を考慮した複合指標 $\rho S_p/E$ とコンクリートの乾燥収縮率の関係を検討した。ヤング係数を考慮した複合指標として採用した多孔体の体積変化率 $\Delta l/l$ を求める方程式³⁾を式5-2に再掲する。

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\rho S_p}{E} (\gamma' - \gamma_0) \quad (5-2)$$

ここに、 ρ ：真密度(g/cm³)

S_p ：内部表面積(m²/g)

E ：ヤング係数(N/mm²)

γ_0 ：固体の真空中での表面エネルギー(N/m)

γ' ：吸着層をもつ固体の表面エネルギー(N/m)

ここでは、真密度は、粗骨材の絶乾密度を用いた。内部表面積は、水蒸気吸着量から算出した比表面積を用いた。粗骨材のヤング係数は、Hashin-Hansen式⁹⁾から推定した。なお、粗骨材のヤング係数は、初期接線ヤング係数である。Hashin-Hansen式を式5-3に再掲する。

$$\frac{E_c}{E_m} = \frac{n+1+(n-1)V_a}{n+1-(n-1)V_a} \quad (5-3)$$

ここに、 n ： E_a/E_m

E ：ヤング係数(N/mm²)

V_a ：粗骨材体積比

なお、添字 c 、 a 、 m は、それぞれコンクリート、粗骨材、モルタルである。

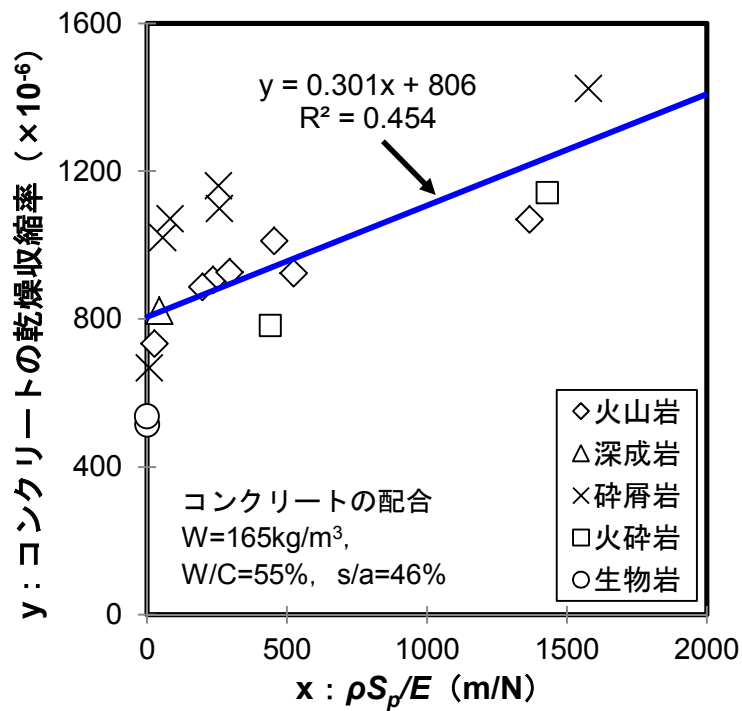


図 5-2 コンクリートの乾燥収縮率と $\rho S_p/E$ の関係

図5-2にコンクリートの乾燥収縮率と $\rho S_p/E$ の関係を示す。図からわかるように、決定係数は小さいが、 $\rho S_p/E$ を用いることでコンクリートの乾燥収縮率を粗骨材種類の特定を必要とせず表現できる可能性があることがわかった。

5.3.3 コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材の乾燥収縮率の関係

ひずみゲージを用いて測定した粗骨材粒子の乾燥収縮率がコンクリートの乾燥収縮率を推定する上で有効な指標であることを示すために、コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材の乾燥収縮率の平均値の関係を検討した。図5-3にその関係を示す。様々な品質の粗骨材でも有用性があることを示すために、図中のプロットでは、規格を満足する粗骨材は、絶乾密度、吸水率および安定性を満足する粗骨材を、規格を満足しない粗骨材は、それ以外の粗骨材をそれぞれまとめた。コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材の乾燥収縮率の平均値の間には、高い相関性が認められた。図5-3中には目安として回帰直線から $\pm 100 \times 10^{-6}$ の範囲を点線で示している。今回の実験データは、概ねこの範囲に入っていたが、乾燥収縮率の非常

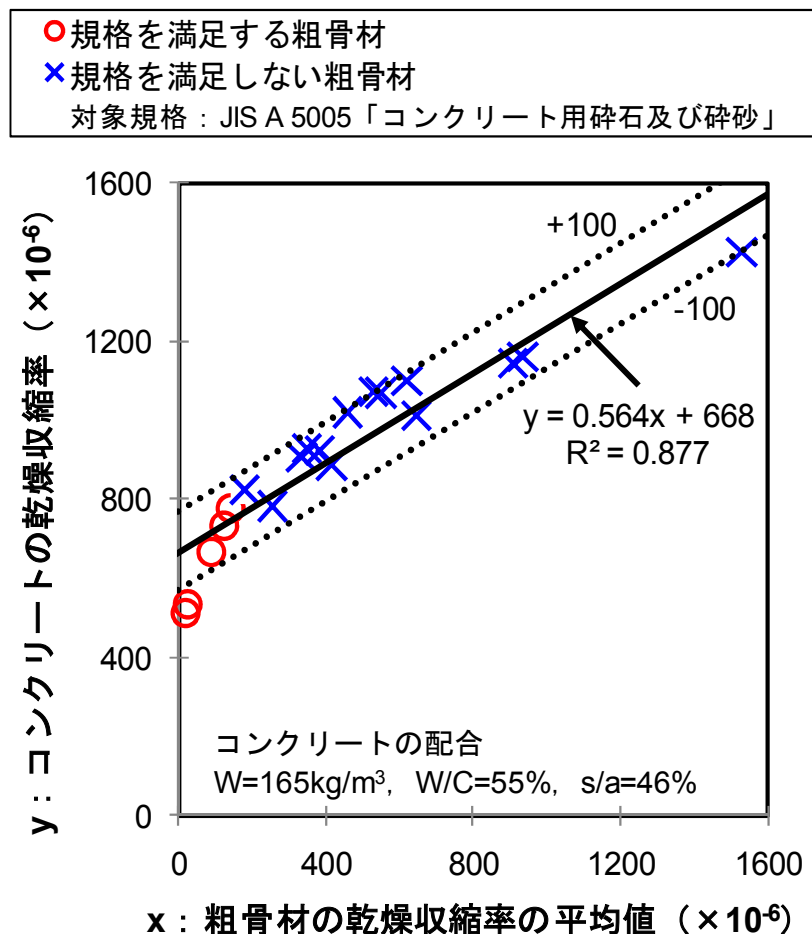


図 5-3 コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材の乾燥収縮率の平均値の関係

に小さい一部の粗骨材では、この範囲から外れていた。これは、粗骨材自体の乾燥収縮率が非常に小さい石灰岩骨材（粗骨材G18, G19）であった。また、本論で実験した配合条件でのコンクリートの乾燥収縮率は、次の推定式で表現できる。

$$\varepsilon_c = 0.564\varepsilon_a + 668 \quad (5-4)$$

ここに、 ε_c : コンクリートの乾燥収縮率($\times 10^{-6}$)

ε_a : 粗骨材の乾燥収縮率の平均値($\times 10^{-6}$)

国土交通省近畿地方整備局の2011年の通達【コンクリート橋梁における「ひび割れ防止対策（案）について】や2009年の建築学会の「建築工事標準仕様書・同解説」¹⁰⁾によると、コンクリートの乾燥収縮率の上限値を 8×10^{-4} としている。式5-4によると、粗骨材の乾燥収縮率の平均値が 3×10^{-4} 程度であれば、これを用いたコンクリートの乾燥収縮率は 8×10^{-4} 程度となる。

なお、コンクリートの配合条件が異なり、乾燥収縮率が 8×10^{-4} 程度以下の粗骨材を用いて検討したケース¹¹⁾においても、コンクリートの乾燥収縮率と粗骨材の乾燥収縮率の関係は、本検討の結果と同様に、一次式で表現され、高い相関性を有していた。

以上より、粗骨材の乾燥収縮率をひずみゲージによって把握することは簡易かつ早期に測定結果が得られる手法であり、また、乾燥収縮率の平均値が 15×10^{-4} 程度と既往の研究¹¹⁾の範囲を超える粗骨材においても、粗骨材の乾燥収縮率の平均値が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有効であることを示すことができた。

なお、第3章と本章の内容の一部は、公益社団法人コンクリート工学会が2012年8月に発刊した「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調査研究委員会報告書」にまとめられているコンクリートおよび構成材料の収縮評価方法試案¹²⁾の作成にあたり、その参考とされている。

5.4 コンクリートの乾燥収縮率の複合則による推定

粗骨材の物性指標を用いることで、一定の配合条件のコンクリートの乾燥収縮率を推定することが可能であった。また、コンクリートの配合によらず、早期にコンクリートの乾燥収縮率が推定することができれば、実務上有益である。

コンクリートの乾燥収縮率の推定は、膨大な実験データを基礎とした経験式を用いるのが一般的である。また、異なるアプローチとして、コンクリートの乾燥収縮率を骨材とマトリックスの乾燥収縮率の複合と考える複合則も提案されている。複合則は、骨材の乾燥収縮ひずみおよびヤング係数などの材料特性を考慮しており、コンクリートの乾燥収縮率が精度よく推定できるとされている。

このような背景からここでは、コンクリートの乾燥収縮率の複合則による推定を試みた。複合則には、粗骨材のヤング係数がパラメータに含まれているが、そのヤング係数は、一般的に割線ヤング係数が用いられる。コンクリートのヤング係数において、割線ヤング係数と初期接線ヤング係数では、初期接線ヤング係数の方が、コンクリートの乾燥収縮率との相関性が高い²⁾ことがわかっている。このため、本論では粗骨材のヤング係数に初期接線ヤング係数および割線ヤング係数の両方を用いて、コンクリートの乾燥収縮率の複合則による推定を試みた。

5.4.1 検討に用いた複合則

コンクリートの乾燥収縮率を求める複合則は、近年では、コンクリートをセメントペースト、細骨材、粗骨材から構成される三相材料として、厚肉球殻理論をベースとする寺西佐藤式¹³⁾が新しい。しかし、寺西佐藤式には、細骨材の乾燥収縮率など、把握に困難なパラメータも必要とされる。ここでは、コンクリートの乾燥収縮率をより簡易に推定できる複合則の適用性を検討するため、寺西佐藤式の基礎となっている岸谷馬場式¹⁴⁾で検討した。岸谷馬場式は、コンクリートをモルタルと粗骨材から構成される二相材料として考えられており、推定精度の高い複合則とされている¹⁵⁾。

岸谷馬場式は、式5-5のように記述される。

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_m} = \frac{(1-(1-mn)V_a)(n+1-(n-1)V_a)}{(n+1+(n-1)V_a)} \quad (5-5)$$

ここに、 ε ：乾燥収縮率($\times 10^{-6}$)

E ：ヤング係数(N/mm²)

V_a ：粗骨材体積比

n ： E_a/E_m

m ： $\varepsilon_a/\varepsilon_m$

なお、添字 c 、 a 、 m は、それぞれコンクリート、粗骨材、モルタルである。

式5-5に必要なパラメータのうち、粗骨材のヤング係数以外は、実験によって得た。また、粗骨材のヤング係数は、コンクリートおよびモルタルのヤング係数を把握し、式5-3に示したHashin-Hansen式⁹⁾によって推定した。

なお、ここでは、粗骨材のヤング係数に、初期接線ヤング係数および割線ヤング係数のどちらも検討に用いた。

5.4.2 複合則による推定結果

複合則のパラメータには、モルタルの乾燥収縮率やヤング係数が含まれるため、それらの物性値を把握した。

モルタルは、水セメント比55%、砂セメント比2.73の配合条件とした。なお、細骨材は表5-1に示す川砂、セメントは普通ポルトランドセメント、混和剤はAE減水剤（C×0.31%）およびAE助剤を使用した。

モルタルの乾燥収縮試験に用いる試験体は、材齢1日で脱型した後、材齢7日まで水中養生を行った。モルタルの乾燥収縮率は、20°C、60%RHの環境でJIS A 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法（ダイヤルゲージ法）」に従い、乾燥材齢28日まで測定した。その結果、乾燥材齢28日時点のモルタルの乾燥収縮率は、 903×10^{-6} であった。

モルタルのヤング係数の測定に用いる供試体は、供試体を材齢1日で脱型した後、材齢28日まで水中養生を行った。コンクリートおよびモルタルのヤング係数の測定は、JIS A 1149

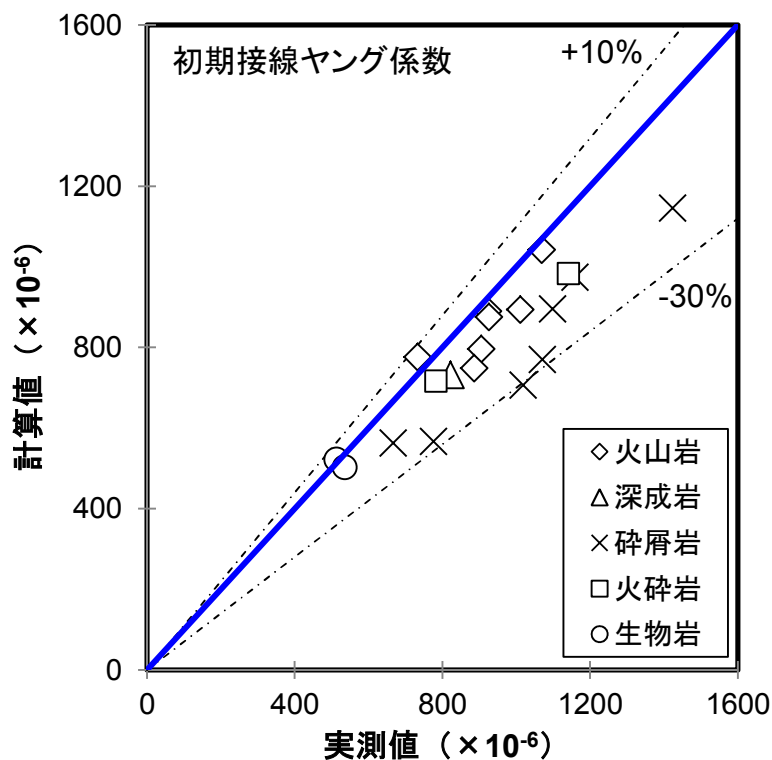


図 5-4 岸谷馬場式に初期接線ヤング係数を用いた計算結果

「コンクリートの静弾性係数試験方法」に従った。その結果、材齢28日時点のモルタルの初期接線ヤング係数および割線ヤング係数は、それぞれ34.8および34.0kN/mm²であった。

岸谷馬場式によって、コンクリートの乾燥収縮率を経時的に予測することも可能であるが、その予測値は、実測値よりも大きい値になることが報告されている¹¹⁾。これは、コンクリートの乾燥収縮率の供試体寸法と推定式のパラメータとなるモルタルの乾燥収縮率の供試体寸法が異なることに起因するとされている。しかし、最終値を予測する場合には、供試体寸法の影響はほとんどなく、高い精度の予測値を算出できるとされている。本論では、コンクリートの乾燥収縮率の最終値の予測のために複合則を用いた。

図5-4に岸谷馬場式に初期接線ヤング係数を用いた計算結果を示す。初期接線ヤング係数を用いた計算値は、実測値の-30～+10%の範囲であり、実測値よりも小さい値となる傾向であった。

図5-5に岸谷馬場式に割線接線ヤング係数を用いた計算結果を示す。割線ヤング係数を用いた計算値は、実測値の±30%の範囲で予測できる結果となった。

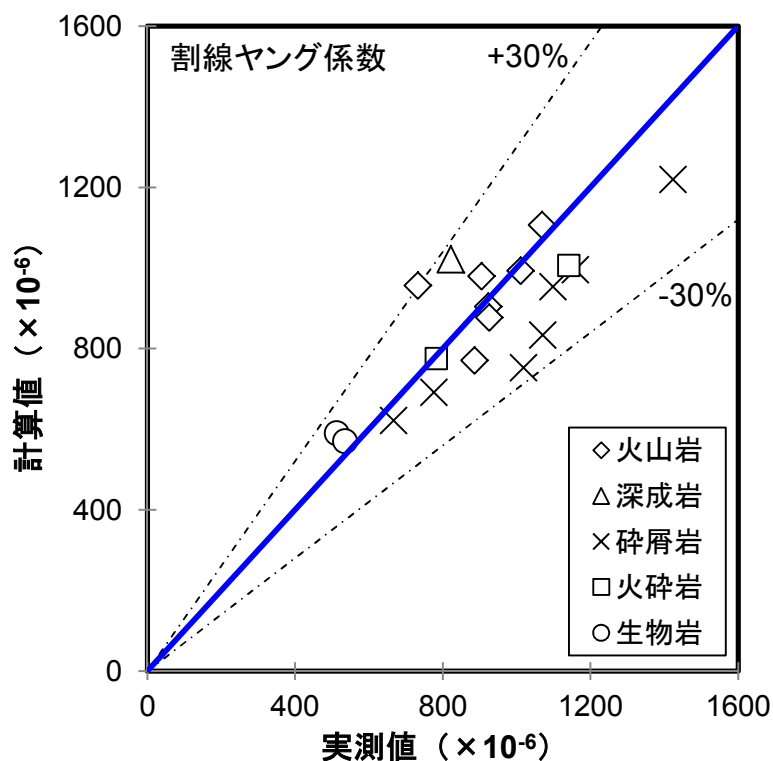


図 5-5 岸谷馬場式に割線ヤング係数を用いた計算結果

割線ヤング係数を用いた計算値よりも初期接線ヤング係数を用いた計算値の方が実測値の推定範囲が小さくなった。また、今回、モルタルの初期接線ヤング係数と割線ヤング係数は大きく異なる値ではなかったため、粗骨材の初期接線ヤング係数と割線ヤング係数の違いが、推定結果の偏りに影響を与える結果になった。

5.5 コンクリートの乾燥収縮率の土木学会式による推定

土木学会が2012年に制定したコンクリート標準示方書¹⁶⁾において、新しい推定式が構築され、骨材の吸水率や骨材の品質の影響を表す係数などがその式のパラメータに加わった。この推定式は、全国で実際に流通している種々の骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率を基に構築されており、推定結果は、個々の試験値に対して、最大±50%程度のばらつきがあるとされている。また、骨材の品質の影響を表す係数が推定式に組み込まれているが、骨材の品質によって具体的な数値を定める記述がコンクリート標準示方書にはない。

コンクリート標準示方書に示されている推定式¹⁶⁾は、次のように記述される。

$$\varepsilon'_{sh} = 2.4 \left(W + \frac{45}{-20+30 \cdot C/W} \right) \cdot \alpha \cdot \Delta\omega \quad (5-6)$$

ここに、 ε'_{sh} ：収縮の試験値の推定値($\times 10^{-6}$)

W ：単位水量(kg/m^3) ($W \leq 175 \text{ kg}/\text{m}^3$)

C/W ：セメント水比

α ：骨材の品質の影響を表す係数 ($\alpha=4\sim 6$ ：標準的な骨材の場合には $\alpha=4$)

$\Delta\omega$ ：骨材中に含まれる水分量

$$\Delta\omega = \frac{\omega_S}{100+\omega_S} S + \frac{\omega_G}{100+\omega_G} G \quad (5-7)$$

ω_S および ω_G ：細骨材および粗骨材の吸水率(%)

S および G ：単位細骨材量および単位粗骨材量(kg/m^3)

本研究では、粗骨材品質の影響を広い範囲で捉えるために、JIS A 5005「コンクリート用 碎石及び砕砂」の規格を満足する粗骨材だけではなく、同規格を大きく外れる粗骨材まで様々な品質の粗骨材を対象としている。これらの粗骨材を用いたコンクリートに関して、土木学会式の適用性を検討した。

5.5.1 土木学会式による推定結果

図5-6に土木学会式による計算結果を示す。骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha=4$ にした場合、計算値は、実測値の $\pm 50\%$ の範囲となったが、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha=6$ にした場合、実測値の $+50\%$ の範囲を超える計算値も得られる結果となった。また、砕屑岩に分類される粗骨材については、骨材の品質の影響を表す係数 α の値を変えることで、推定精度が向上したが、その他の粗骨材については、推定精度の向上が期待できなかった。

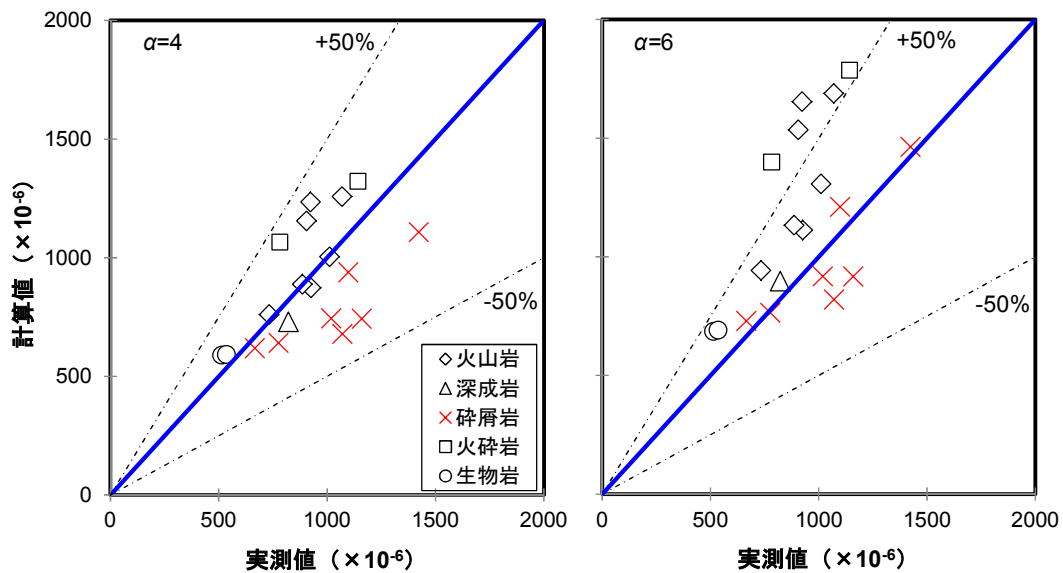


図 5-6 土木学会式による計算結果

5.5.2 骨材の品質の影響を表す係数の決定法の提案

本来、骨材の品質の影響を表す係数は、使用する粗骨材毎に設定する必要があると考えられる。なぜならば、同一のロットの骨材でも、品質がそれぞれ異なるためである。

そこで、骨材の品質の影響を表す係数を粗骨材毎に決定することを目的に、第3章で得られた粗骨材の乾燥収縮率および粗骨材の吸水率に着目して、その算出法を検討した。

図5-7に土木学会式による推定結果と粗骨材の乾燥収縮率および粗骨材の吸水率の関係を示す。なお、縦軸は土木学会式による推定結果として、計算値を実測値で除した値を示している。土木学会式による推定結果と粗骨材の乾燥収縮率および粗骨材の吸水率の関係は、決定係数が小さく、それぞれの単一の指標では、推定結果を明確に表現することが困難であると言える。

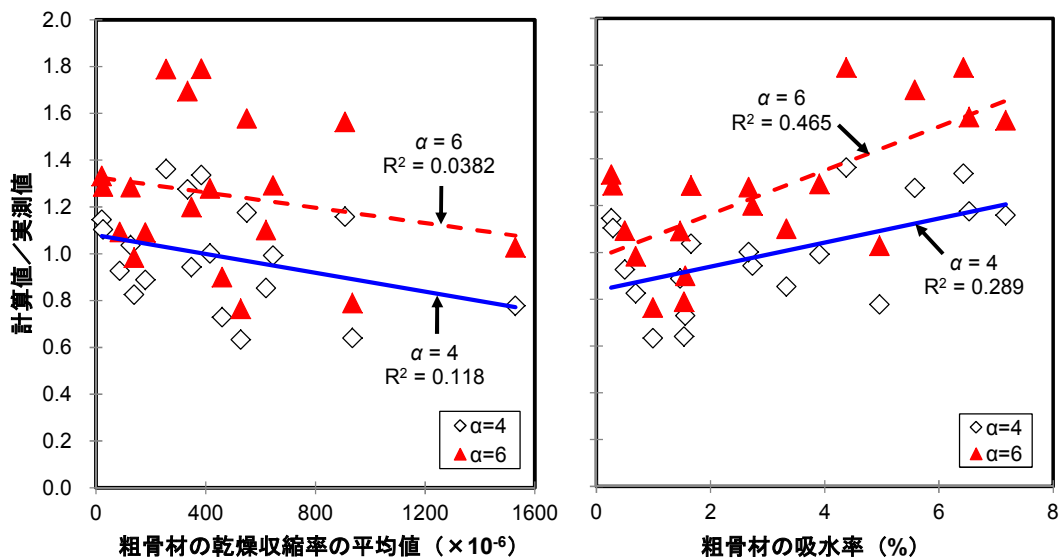


図 5-7 土木学会式による推定結果と粗骨材の乾燥収縮率および吸水率の関係

ここで、丸山ら^{17), 18)}は多孔体の収縮駆動力は次の式で評価できるとしている。

$$\Delta\Pi = -K \cdot \frac{\Delta V}{V} / w_V \quad (5-8)$$

ここに、 $\Delta\Pi$ ：分離圧(MPa)

K ：多孔体の体積弾性率

$\Delta V/V$ ：体積ひずみ

w_V ：体積含水率(cm^3/cm^3)

式5-8によると、収縮駆動力は、体積弾性率と体積ひずみを体積含水率で除した項の積で

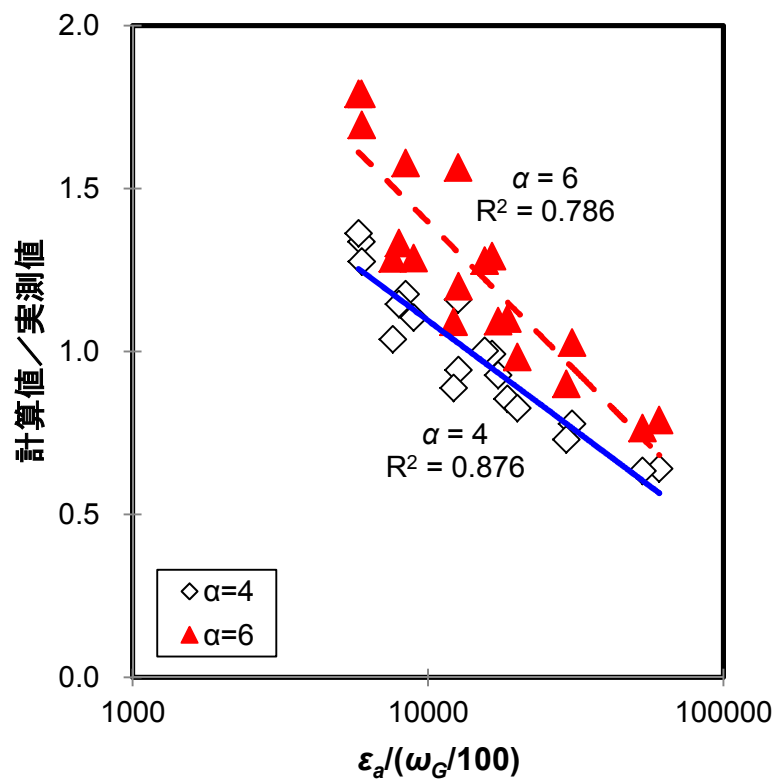


図 5-8 土木学会式による推定結果と $\varepsilon_a/(\omega_G/100)$ の関係

表現される。ここでは、体積ひずみを体積含水率で除した項($\Delta V/V$)/ w_V を参考に、体積ひずみ $\Delta V/V$ および体積含水率 w_V を、それぞれ粗骨材の乾燥収縮率の平均値 $\varepsilon_d(\times 10^{-6})$ および粗骨材の吸水率 $\omega_G(\%)$ とみなした指標 $\varepsilon_d/(\omega_G/100)$ で検討した。

図5-8に土木学会式による推定結果と $\varepsilon_d/(\omega_G/100)$ の関係を示す。土木学会式による推定結果と $\varepsilon_d/(\omega_G/100)$ の関係は、骨材の品質の影響を表す係数 α の値によらず、決定係数が大きく、高い相関関係があることがわかる。

図5-9に土木学会式による計算値と実測値が同値になるように決定した骨材の品質の影響を表す係数 α' と $\varepsilon_d/(\omega_G/100)$ の関係を示す。図のとおり、骨材の品質の影響を表す係数 α' と粗骨材の $\varepsilon_d/(\omega_G/100)$ の関係は、決定係数が0.892と大きく、高い相関関係を有していた。

式5-6の骨材の品質の影響を表す係数 α を α' に置き換えたときのコンクリートの乾燥収縮率の計算値と実測値を比較した。その結果を図5-10に示す。図のとおり、骨材の品質の影響を表す係数を粗骨材の乾燥収縮率の平均値および吸水率の関数とすることで、土木学会式による計算値は、実測値の概ね $\pm 20\%$ の範囲となった。

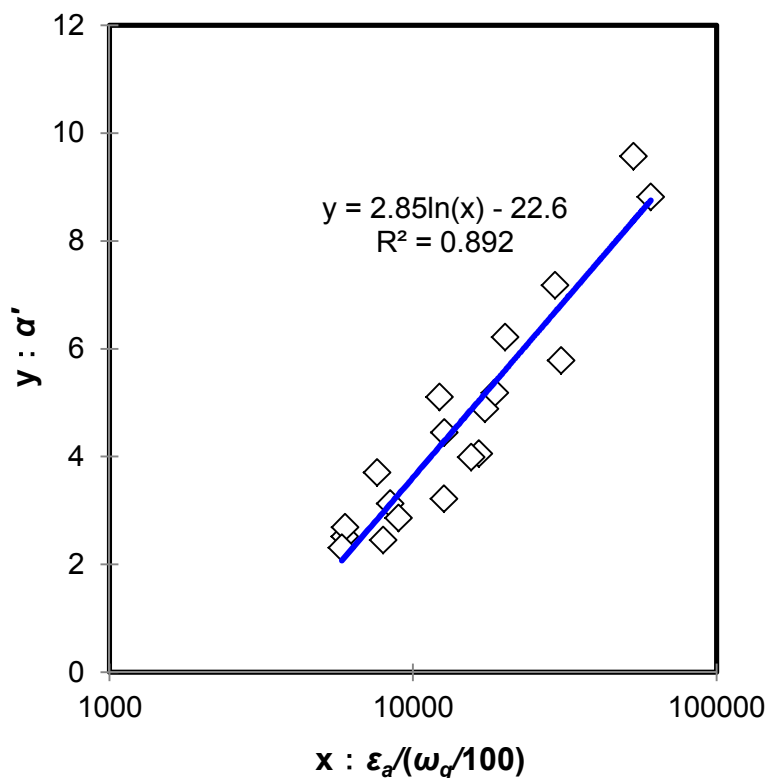


図 5-9 骨材の品質の影響を表す係数 α' と $\varepsilon_d/(\omega_G/100)$ の関係

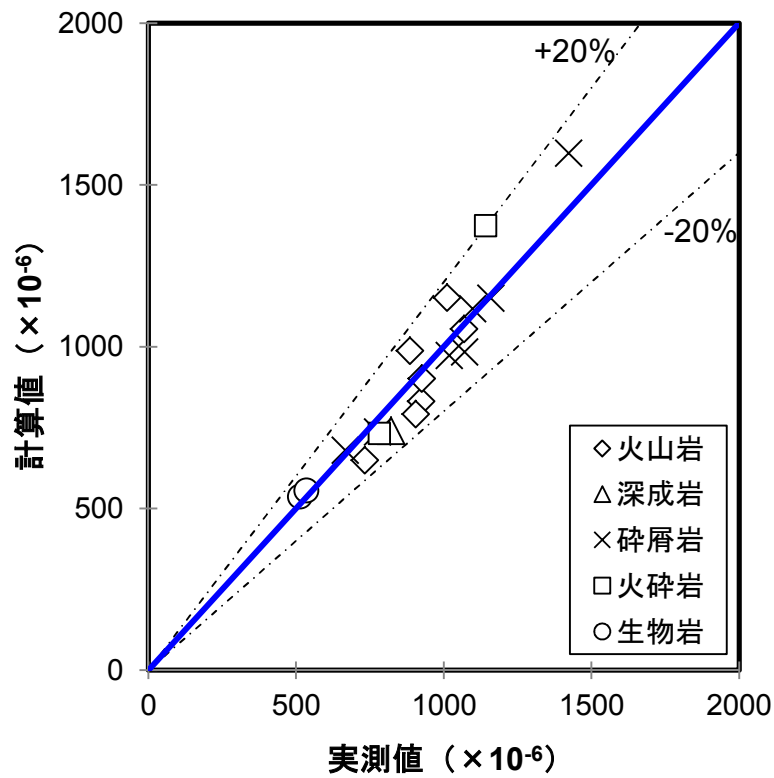


図 5-10 骨材の品質の影響を表す係数 α' を用いた計算結果

以上より、骨材の品質の影響を表す係数は、粗骨材毎によって定めることが望ましいことが確認された。土木学会式の一部を修正し、骨材の品質の影響を表す係数を定める式を次のとおり提案する。

$$\varepsilon'_{sh} = 2.4 \left(W + \frac{45}{-20+30 \cdot c/W} \right) \cdot \alpha' \cdot \Delta\omega \quad (5-9)$$

$$\alpha' = 2.85 \times \ln \left(\frac{\varepsilon_a}{\omega_G/100} \right) - 22.6 \quad (5-10)$$

また、式 5-10 には従来の土木学会式に存在しない変数 ε_a を含んでいる。粗骨材の乾燥収縮率はひずみゲージによって簡易に評価することができるが、その実施が困難な場合、本研究の第 4 章で得られた粗骨材の品質指標との関係式を用いることで粗骨材の乾燥収縮率を推定することもできる。従来の土木学会式に含まれる変数のうち、粗骨材の吸水率から骨材の品質の影響を表す係数を定める場合について、砕屑岩に分類される粗骨材およびそれ以外に分類される粗骨材で、それぞれ式 5-11 および式 5-12 を提案する。

$$\alpha' = 2.85 \times \ln\left(26000 + \frac{10900}{\omega_G}\right) - 22.6 \quad (5-11)$$

$$\alpha' = 2.85 \times \ln\left(8430 + \frac{4650}{\omega_G}\right) - 22.6 \quad (5-12)$$

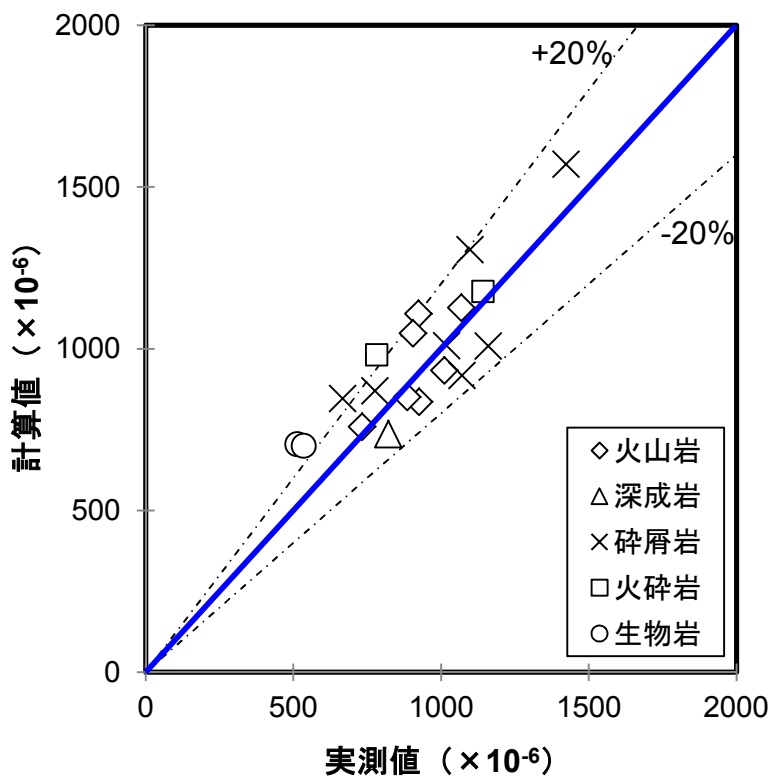


図 5-11 吸水率から求めた骨材の品質の影響を表す係数 α' を用いた計算結果

式 5-11 および式 5-12 から骨材の品質の影響を表す係数を求めて、式 5-9 によってコンクリートの乾燥収縮率を推定した結果を図 5-11 に示す。図のとおり、土木学会式による計算値は、実測値の概ね±20%の範囲となることが確認できた。

5.6 まとめ

粗骨材の各種指標とコンクリートの乾燥収縮率との関係を検討した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 水銀圧入法によって得られた粗骨材の細孔半径 $1\mu\text{m}$ 以下のデータから求めた平均細孔径でコンクリートの乾燥収縮率を同一の累乗関数によって表現できることを明らかにした。また、粗骨材のヤング係数、比表面積、密度から求められる複合した指標とコンクリートの乾燥収縮率は線形関係が確認され、粗骨材の乾燥収縮率の大小を判断する指標になり得ることを明らかにした。
- (2) 粗骨材粒子の乾燥収縮率の測定結果とコンクリートの乾燥収縮率との関係は、一次式で表現され、高い相関性を有していた。複数個の粗骨材粒子の乾燥収縮率を測定し、その平均値を求めることで、当該粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率を推定できると考えられ、本検討の範囲内の結果では、粗骨材の乾燥収縮率の平均値が 3×10^{-4} 程度であれば、これを用いたコンクリートの乾燥収縮率は 8×10^{-4} 程度と推定される。このことから、粗骨材の乾燥収縮率のひずみゲージによる評価法の有用性が確認されたと言える。
- (3) 岸谷・馬場が提案する複合則によるコンクリートの乾燥収縮率の推定は、計算に用いるヤング係数の種類によって精度が異なる結果となった。コンクリートの乾燥収縮率の複合則による推定に割線ヤング係数を用いることで、計算値は実測値の $\pm 30\%$ の幅の範囲で推定できることを明らかにした。また、初期接線ヤング係数を用いると、計算値は実測値の $-30\%\sim +10\%$ の幅の範囲で推定できることを明らかにした。
- (4) コンクリートの乾燥収縮率を推定する土木学会式に含まれる骨材の品質の影響を表す係数を定める式を提案した。提案式を用いた土木学会式による計算値は、実測値の概ね $\pm 20\%$ の範囲となることを明らかにした。

第5章の引用資料

- 1) 米倉亜州夫, 伊藤祐二, 森下全人: コンクリートの乾燥収縮及びクリープに及ぼす空気量の影響, 土木学会第37回年次学術講演会, V-172, pp.343-344, 1982.
- 2) 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, No.1, pp.467-472, 2010.
- 3) 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.
- 4) 八木翔吾, Carlos Aquino, 井上真澄, 岡本享久: 石灰石骨材の収縮特性とコンクリートの乾燥収縮に関する研究, 土木学会第65回年次学術講演会, pp.573-574, 2010.
- 5) 岩清水隆, 米澤敏男, 井上和政, 松本竹史: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材品質の影響に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.1079-1080, 1998.
- 6) 立松和彦, 荒井正直, 石清水隆, 木村芳幹, 浦野英男, 今本啓一, 元木亮: 関西地域における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第549号, pp.1-6, 2001.
- 7) A. Bentur : The pore structure of hydrated cementitious compounds of different chemical composition, Journal of the American ceramic society, Vol.63, pp.381-386, 1980.
- 8) H. Uchikawa, S. Hanehara and D. Sawaki : Structural change of hardened mortar by drying, Proc. of the 3rd NCB international seminar on cement and building materials, Vol.4, pp. 1-12, 1991.
- 9) Hansen, T. C. : Influence of Aggregate and Voids on the Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar and Cement Paste, Journal of the ACI, Vol.62, No.2, pp.193-216, 1965.
- 10) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.185-187, 2009.
- 11) H. Hyodo, et al. : Evaluation of Effect of Aggregate Properties on Drying Shrinkage of Concrete, Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, Japan. 2013.
- 12) 日本コンクリート工学会: 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調査研究委員会報告書, pp.195-201, 2012.
- 13) 寺西浩二, 佐藤嘉昭: 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式-3相モデルへの展開および外的要因の影響の考慮-, 日本建築学会構造系論文集, 第602号,

- pp.21-28, 2006.
- 14) 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, No.346, pp.30-40, 1975.
 - 15) 江口清, 寺西浩司: 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 日本建築学会構造系論文集, 第557号, pp.15-22, 2002.
 - 16) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, pp.105-108, 2012.
 - 17) 丸山一平, 高松伸之, 堀口直也: セメント系サイディングの湿度の依存する面内ひずみ予測, 日本建築学会構造系論文集, 第669号, pp.1891-1896, 2011.
 - 18) 丸山一平, 岸 直哉: セメント硬化体の収縮理論, 日本建築学会構造系論文集, 第642号, pp.1395-1403, 2009.

第6章 高炉スラグ細骨材がモルタルの耐硫酸性の改善に与える効果

6.1 はじめに

下水道関連施設は、衛生上重要な施設であり、生活基盤を支える必要不可欠な社会基盤である。しかし、下水道関連施設は、微生物が関与する硫酸によってセメント系材料の劣化が顕在化する例が認められており、設計耐用年数を待たずに著しい劣化が生じる場合もある。

セメント系材料に対する微生物が関与する硫酸による劣化は、微生物活動の産物である硫酸がアルカリ性のセメントを浸食することで、構造物の断面を著しく減少させることが知られる。下水道関連施設のセメント系材料の浸食抑制技術としては、微生物活動の阻害を目的とした硫酸生成の抑制や最終的な劣化因子となる硫酸に対する抵抗性の向上などが挙げられる。

一方、セメント系材料の耐硫酸性の向上に関する技術は、構成材料のそれぞれの観点から検討が重ねられており、高炉セメント¹⁾、ナフタレン系の混和剤²⁾および高炉スラグ細骨材³⁾などの使用がそれぞれ耐硫酸性の向上に資することが報告されている。一般的にセメント系材料は、高強度になるほど耐硫酸性は低下することが知られているが、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートに関しては、高強度のものでも良好な耐硫酸性を発揮できるとされ³⁾、細骨材による耐硫酸性技術は、材料開発の観点などからの応用が期待できる。また、産業副産物の有効利用の観点からも高炉スラグ細骨材の有用性が確認されることで、当該材料のさらなる利活用が期待される。

ここでは、各種スラグ細骨材がセメント系材料の硫酸浸食に対する耐久性に与える影響に関して基礎的な検討を行った上で、高炉スラグ細骨材の粗粒率や配合条件である砂セメント比がモルタルの耐硫酸性に与える影響などを検討する。本検討の結果により、モルタルの耐硫酸性の改善効果に与える高炉スラグ細骨材の影響を評価する指標を明らかにする。

6.2 実験概要

各種スラグ細骨材がモルタルの耐硫酸性に与える影響を把握するために、スラグ細骨材の種類、特性値や配合条件に着目して検討した。

表 6-1 に検討に用いた細骨材とその物性値を示す。細骨材には、広島県産の天然骨材、銅スラグ細骨材、フェロニッケル細骨材および産地の異なる 3 種類の高炉スラグ細骨材を用いた。セメントは、普通セメント（密度：3.15g/cm³，ブレン値：3290cm²/g）および高炉セメント B 種（密度：3.04g/cm³，ブレン値：3870cm²/g）を用いた。また、粗粒率の影響を把握するために、図 6-1 に示す粒度曲線になるように A 産の高炉スラグ細骨材の粒度を調整した。

モルタルの配合は、水セメント比 50%，砂セメント比 1.0 を基本条件とした。また、砂セメント比の影響を把握するために、砂セメント比 0.5，2.0，3.0 の配合条件のモルタルを製作した。練混ぜは、ホバート型モルタルミキサを使用し、ブリーディングを抑制するためにダブルミキシング法⁴⁾（セメントに対する一次水率は 23%）とした。

供試体は、材齢 1 日で脱型し、材齢 21 日まで水中養生（温度 20℃）を行った。

モルタルの硫酸浸漬試験には、モルタルを切断して、4cm角に成形した立方体の供試体を用いた。また、今回の検討では促進試験としたので、質量パーセント濃度で10%の硫酸を用

表 6-1 使用した細骨材とその特性値

	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	F.M.	化学成分(%)				
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO
天然骨材	2.55	2.00	2.55	70.4	12.2	4.30	7.00	1.20
銅スラグ細骨材	3.41	0.81	3.17	34.0	5.00	38.0	3.00	1.50
フェロニッケル スラグ細骨材	3.10	0.45	1.66	56.0	1.90	8.00	4.70	28.1
高炉スラグ細骨材 (A 産)	2.80	0.46	2.57	33.8	14.4	0.60	42.7	3.30
高炉スラグ細骨材 (B 産)	2.81	0.61	2.57	33.3	14.7	0.20	43.1	5.90
高炉スラグ細骨材 (C 産)	2.78	0.72	2.57	33.4	16.0	0.20	41.6	6.00

いた。硫酸は、7日ごとに全量交換した。また、硫酸浸漬1日、2日、4日、8日、16日および32日経過時点で硫酸から取り出した供試体は、下水道事業団の試験方法⁵⁾によって流水洗浄して質量を測定した。なお、モルタルの硫酸に対する抵抗性は、硫酸の侵食作用が最も進行した時点の硫酸浸漬32日経過時点の質量減少率で評価を行った。

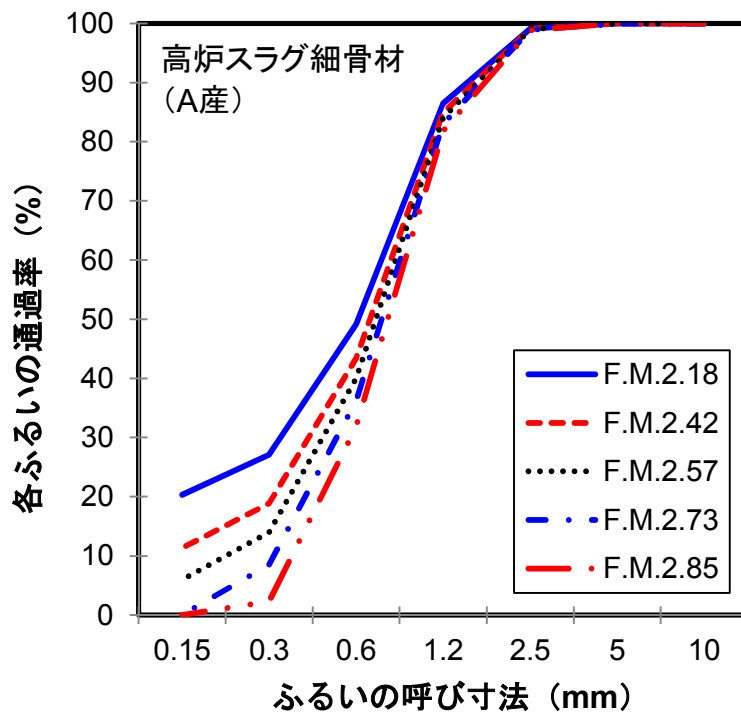


図 6-1 高炉スラグ細骨材の粒度分布

6.3 各種スラグ細骨材がモルタルの耐硫酸性に与える影響

写真6-1に代表的なモルタルの硫酸浸漬32日後の状況を、表6-2に外観観察結果を示す。

外観観察の結果、硫酸浸漬後1日で全てのモルタルの稜角部においてひび割れが発生した。また、天然骨材及び銅スラグ細骨材を用いたモルタルの表面部の軟化が著しく、劣化が最も顕著に現れた。フェロニッケルスラグ細骨材を用いたモルタルについては、表面部の軟



写真 6-1 硫酸浸漬 32 日後のモルタルの外観

表 6-2 外観観察結果

	硫酸浸漬後					
	1日	2日	4日	8日	16日	32日
天然骨材	○△	—————>				
銅スラグ細骨材	○△	—————>				
フェロニッケル スラグ細骨材	○△	—————>				
高炉スラグ細骨材 (A産)	○	—————>		◇	—————>	

(凡例) ○：ひび割れ発生，△：軟化，◇：剥離

化が若干認められるだけであった。高炉スラグ細骨材（A産）を用いたモルタルは、膨張は確認できるものの、ほとんど軟化が認められず、浸漬後8日付近で外側が剥離する程度となった。また、浸漬時間の経過とともにひび割れが拡大した。なお、他の産地の高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、A産のそれとほとんど同じであった。

使用する細骨材を変化させたモルタルの硫酸環境下での外観変化において、高炉スラグ細骨材（A産）を用いたモルタルはその表面が剥離するなど材料の硬質性が維持されるのに対し、その他の材料を用いたモルタルは表面がスラリー状となり材料自体が軟化する傾向となった。

図6-2に各種細骨材を用いたモルタルの硫酸浸漬試験結果を示す。天然骨材、銅スラグ細骨材およびフェロニッケルスラグ細骨材を用いた試料の質量減少率は浸漬後32日で約55～75%となった。高炉スラグ細骨材を用いたモルタルも硫酸浸漬当初から質量減少が確認されるものの、天然骨材を用いたモルタルに比べて、質量の減少程度が小さいものであった。高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの硫酸浸漬32日後の質量減少率は、A産、B産およびC産で、それぞれ38.7%、36.9%および33.1%となった。また、モルタルの細骨材にどの産地の

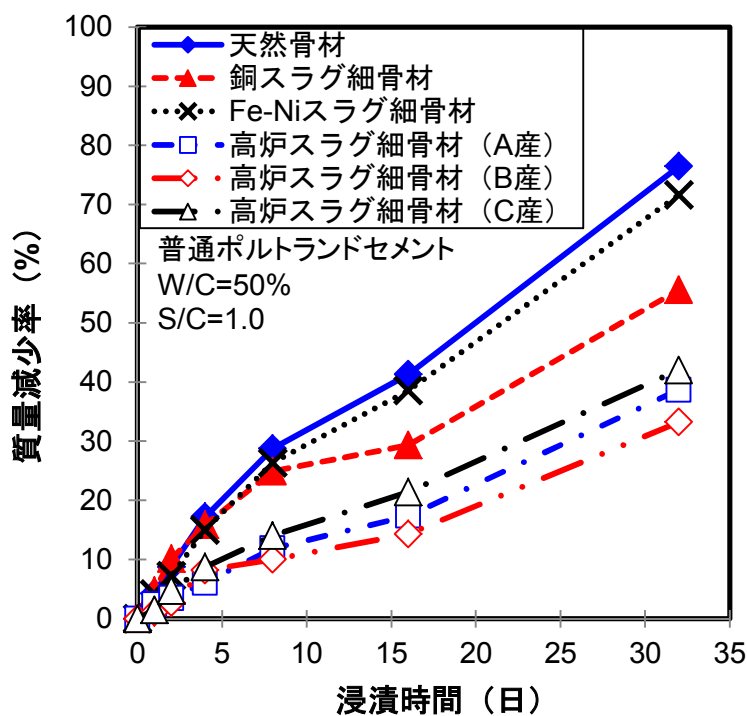


図 6-2 各種細骨材を用いたモルタルの硫酸浸漬試験結果

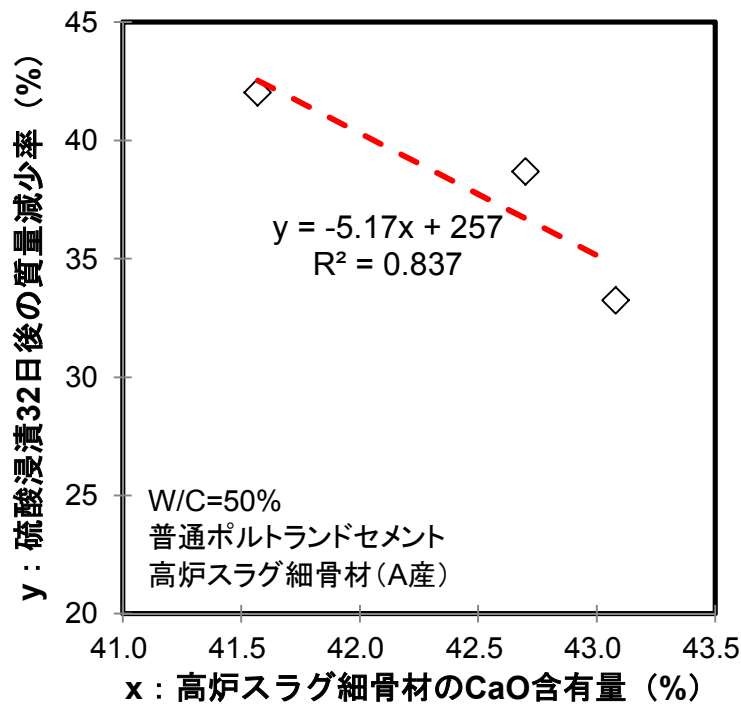
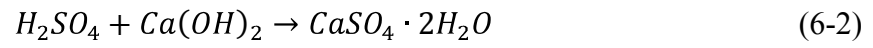


図 6-3 モルタルの硫酸浸漬 32 日後の質量減少率と CaO 含有量の関係

高炉スラグ細骨材を用いても、天然骨材を用いたモルタルの質量減少率の半分程度の値になることがわかった。すなわち、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは、天然骨材を用いたモルタルに対して2倍程度の質量減少率の抑制効果を有すると言える。

高炉スラグ細骨材において、細骨材中の大部分を占める化学成分はCaO含有量であるため、今回の硫酸浸漬試験の結果の32日後の質量減少率と産地の異なる高炉スラグ細骨材のCaO含有量の関係を把握した。図6-3にその関係を示す。32日後の質量減少率と細骨材中のCaO含有量の間には、線形関係が成り立ち、1%のCaO含有量の変動で、質量減少率が約5%変動することがわかった。

高炉スラグ細骨材自体は硫酸との反応性が高く、当該細骨材を用いたモルタルは、硫酸との反応によって、侵食を受ける面に硬質な二水石こうの膜が形成されることで、硫酸に対する抵抗性が高くなるとされている³⁾。硫酸との反応によって二水石こうが生成されるまでの一般的な反応式を以下に示す。



高炉スラグ細骨材のCaO含有量が多いことで、硬質な二水石膏の膜がより均質的に形成されることが考えられ、その結果、モルタルの硫酸浸漬32日後の質量減少率が小さくなったものと推察される。

6.4 高炉スラグ細骨材の粗粒率がモルタルの耐硫酸性に与える影響

A産の高炉スラグ細骨材について粒度特性がモルタルの耐硫酸性に与える影響について検討した。図6-4に粗粒率を調整したA産の高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの硫酸浸漬試験結果を示す。硫酸浸漬期間が長くなるといずれのモルタルの質量減少率は大きくなった。また、粗粒率を調整したA産の高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの硫酸浸漬32日後の質量減少率は、F.M.2.18, 2.42, 2.57, 2.73および2.85で、それぞれ34.3%, 37.5%, 38.7%, 40.3%および43.8%となり、A産の高炉スラグ細骨材の粗粒率が小さくなると、当該粗粒率の高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの質量減少率は小さくなる傾向がうかがえ、高炉スラグの種類に着目した検討結果⁶⁾と類似した結果となった。

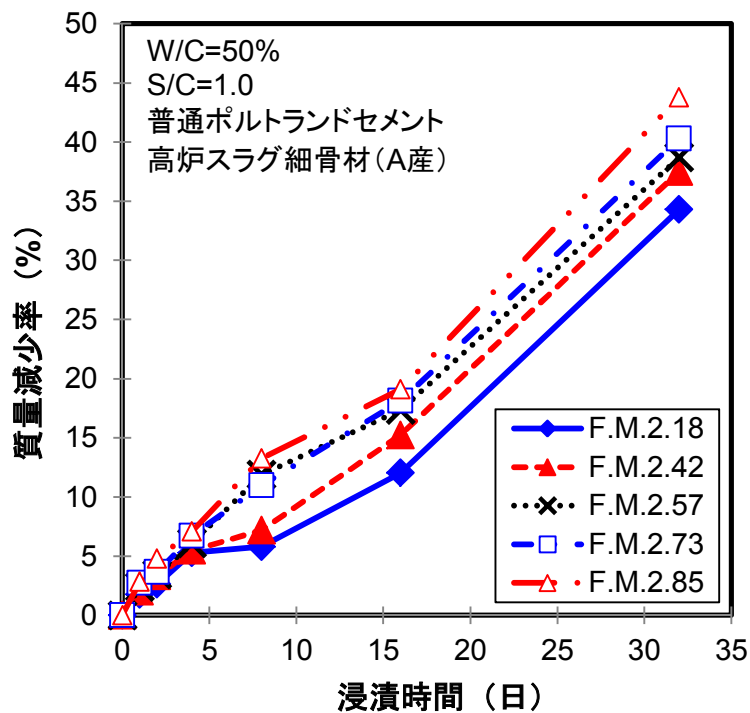


図 6-4 粗粒率を調整した高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの硫酸浸漬試験結果

図6-5にモルタルの硫酸浸漬32日後の質量減少率と粗粒率の関係を示す。32日後の質量減少率とA産の高炉スラグ細骨材の粗粒率の間には、線形関係が成り立ち、1.00の粗粒率の変動で、質量減少率が約13%変動することがわかった。細骨材に含まれる細粒分が多くなるほど、モルタルの質量減少率が小さくなる結果となった。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐硫酸性は、天然骨材を用いたものに比べて、硬質な二水石こうの膜が形成されることで、硫酸の侵入を抑制でき、耐硫酸性が改善するとされる³⁾。一般的に表面積が大きくなることで、化学反応が相対的に早く進行することが考えられ、粗粒率の小さいA産の高炉スラグ細骨材を用いたモルタルでは、硫酸の侵入を抑制する硬質な二水石こうの膜がより早期に形成され、質量減少率が小さくなったものと推察される。

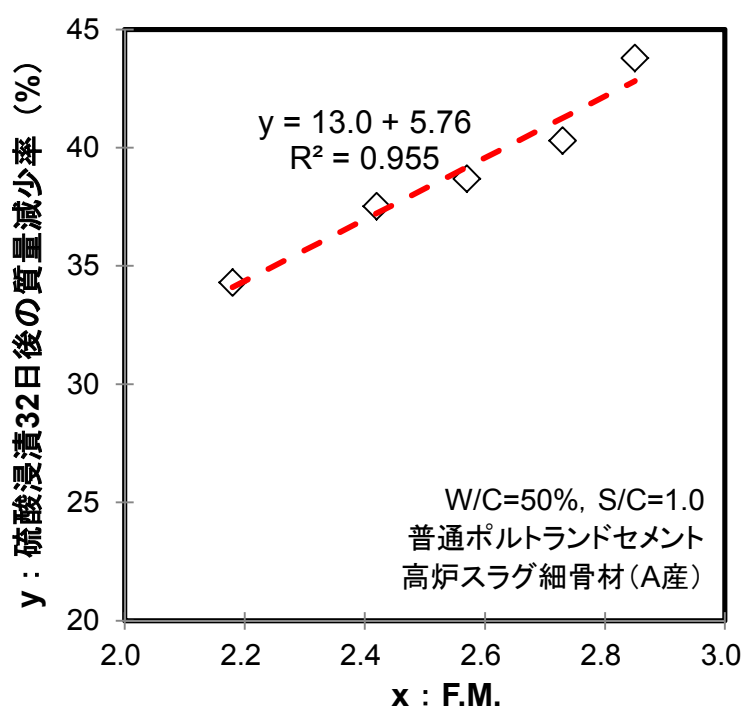


図 6-5 モルタルの硫酸浸漬 32 日後の質量減少率と粗粒率の関係

6.5 細骨材率がモルタルの耐硫酸性に与える影響

細骨材の粗粒率の検討において、細粒分が多い細骨材を用いたモルタルの質量減少率が小さくなることがわかった。このことから、さらに高炉スラグの細粒分を多くしたケースについて検討するため、端的な例として、セメントに高炉セメントB種も用いて、砂セメント比の配合の影響を検討した。なお、ここでは、使用するセメント種類によらず、細骨材にはA産の高炉スラグ細骨材を用いた。

図6-6に砂セメント比が異なるモルタルの硫酸浸漬試験結果を示す。普通セメントを用いたモルタルは、いずれの砂セメント比の配合においても硫酸浸漬期間が長くなると質量減少率が大きくなった。普通セメントを用いたモルタルの硫酸浸漬32日後の質量減少率は、S/C=0.5, 1.0, 2.0および3.0で、それぞれ39.7%, 38.7%, 36.9%および33.1%となった。また、

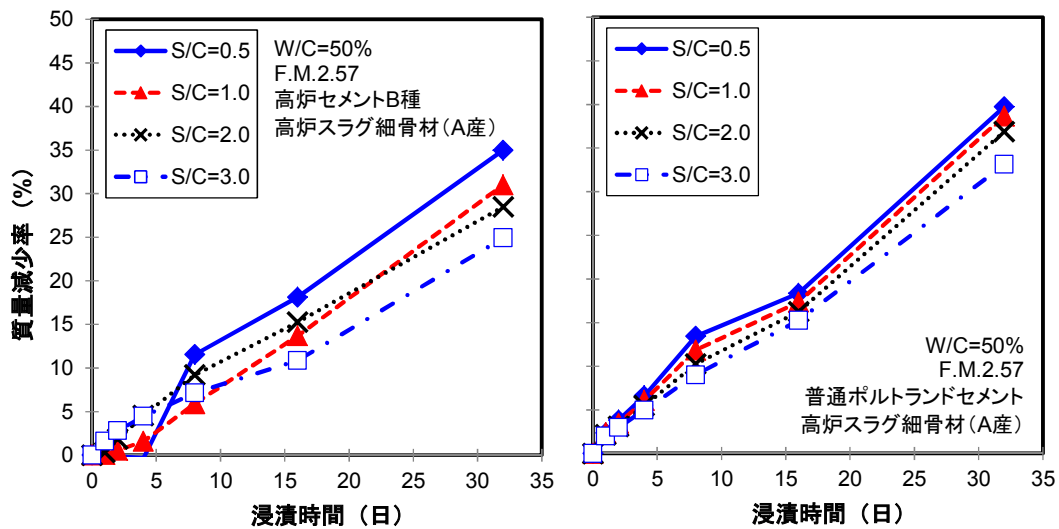


図 6-6 砂セメント比が異なるモルタルの硫酸浸漬試験結果

高炉セメントB種を用いたモルタルにおいても、いずれの砂セメント比の配合においても硫酸浸漬期間が長くなると質量減少率が大きくなった。高炉セメントB種を用いたモルタルの硫酸浸漬32日後の質量減少率は、S/C=0.5, 1.0, 2.0および3.0で、それぞれ35.0%, 31.0%, 28.5%および24.9%となった。これらのことから、使用するセメントの種類にかかわらず、モルタルの砂セメント比が大きくなると、当該砂セメント比のモルタルの質量減少率は小さくなる傾向がうかがえ、天然の細骨材を用いた検討結果⁷⁾と類似した結果となった。さらに、同じ砂セメント比を比較すると、使用するセメントの違いによって、最大8.4%の質量減少率の差が確認され、より微細な高炉スラグを用いることでモルタルの質量減少率が小さくなることがわかった。

図6-7にモルタルの硫酸浸漬32日後の質量減少率と砂セメント比の関係を示す。使用するセメントの種類にかかわらず、32日後の質量減少率と砂セメント比の間には、線形関係が

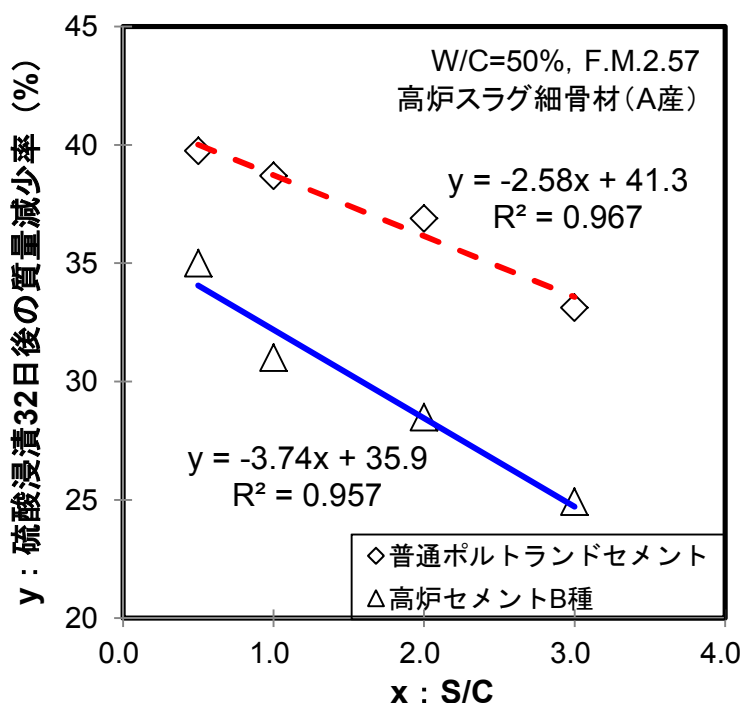


図 6-7 モルタルの硫酸浸漬 32 日後の質量減少率と砂セメント比の関係

成り立つことがわかった。砂セメント比1.0の変動で、普通セメントを用いたケースでは質量減少率が約2.6%変動し、また、高炉セメントB種を用いたケースでは質量減少率が約3.7%変動することがわかった。高炉スラグ細骨材と高炉セメントB種を用いることで、さらに質量減少率が小さい結果となった。

モルタルの質量減少率が小さくなるひとつの理由として、高炉スラグ細骨材の細粒分の影響が考えられる。高炉スラグ細骨材自体は、天然骨材に比べて、硫酸との反応性が高く、細骨材自体の硫酸による質量変化率も大きいことが指摘されている³⁾。砂セメント比が大きくなると、高炉スラグ細骨材自体の体積が増加し、細骨材自体への硫酸による侵食作用が大きくなることが考えられるが、本検討結果では、質量減少率が小さくなっている。これは、砂セメント比の増大に伴い、高炉スラグ細骨材に含まれる細粒量が相対的に多くなることで、硫酸の侵入を抑制する硬質な二水石膏の膜の形成に寄与したことが考えられ、その結果、モルタルの質量減少率が小さくなったものと推察される。

また、モルタルの質量減少率が小さくなる別の理由として、配合におけるセメントペーストの体積の影響も考えられる。砂セメント比が大きくなると、セメントペーストの体積が相対的に小さくなることで、硫酸と反応する水酸化カルシウム分が減少した結果、モルタルの硫酸に対する抵抗性が改善されたものと考えられる。

今回の検討結果では、高炉スラグ細骨材の細粒分の影響およびセメントペーストの体積の影響のどちらが卓越していたかを決定付ける明確な結果を得るに至っていないが、モルタルの硫酸に対する抵抗性に与える影響は、複合的に作用しているものと考えられ、どちらも小さいものではないと思われる。

6.7 高炉スラグ細骨材の細粒分がモルタルの耐硫酸性に与える影響

高炉スラグ細骨材の粗粒率や配合の砂セメント比に着目した結果、高炉スラグ細骨材の細粒分がモルタルの硫酸に対する抵抗性の改善に寄与していると考えられる。

どの程度の粒子径が高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの硫酸に対する抵抗性の改善に寄与するか検討するために、硫酸浸漬 32 日後の質量減少率と高炉スラグ細骨材の細粒分との関係について重回帰分析を行った。ここで取り上げた説明変数は、1.2mm～0.6mm、0.6mm～0.3mm、0.3～0.15mm および 0.15mm 以下の高炉スラグ細骨材の単位体積質量である。なお、高炉スラグ細骨材の細粒分の影響を検討する目的から、普通セメントを用いた結果のみを取り上げている。

表 6-3 に重回帰分析の結果を示す。決定係数は 96.5%と高く、これら 4 つの高炉スラグ細骨材の粒子径の分類で高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの硫酸浸漬 32 日後の質量減少率を説明可能と判断した。

高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの硫酸浸漬 32 日後の質量減少率に及ぼす説明変数の影響力を意味する偏回帰係数⁸⁾の結果より、正の値である 0.6mm～0.3mm の高炉スラグ細骨材の単位体積質量は、硫酸浸漬 32 日後の質量減少率が増大していることから、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの硫酸に対する抵抗性の改善に寄与しているとは言えない。

表 6-3 重回帰分析結果

変数	偏回帰係数	標準誤差	T 値	P 値	標準偏回帰係数
1.2mm～0.6mm の粒子径の高炉スラグ細骨材	-0.0333	0.0310	-1.07	0.332	-1.22
0.6mm～0.3mm の粒子径の高炉スラグ細骨材	0.0648	0.0478	1.35	0.234	1.42
0.3mm～0.15mm の粒子径の高炉スラグ細骨材	-0.0712	0.0186	-3.83	0.0122	-0.750
0.15mm 以下の粒子径の高炉スラグ細骨材	-0.0354	0.00664	-5.33	0.00311	-0.514
定数	43.1	1.04	-	-	-
決定係数					0.965

これに対し、偏回帰係数が負の値となる 1.2mm～0.6mm, 0.3～0.15mm および 0.15mm 以下の高炉スラグ細骨材の単位体積質量は、硫酸浸漬 32 日後の質量減少率を低下させることから、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの硫酸に対する抵抗性の改善に寄与していると言える。

標準偏回帰係数⁸⁾の結果が負の値となり、絶対値が大きいものが高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの硫酸浸漬 32 日後の質量減少率の増大の抑制を意味するが、5%以下の P 値で優位性が確認できる変数は、0.3～0.15mm および 0.15mm 以下の高炉スラグ細骨材の単位体積質量である。

以上のことから、高炉スラグ細骨材の 0.3mm 以下の細粒分がより多く含まれるものが硫酸浸漬 32 日後の質量減少率の増大の抑制に寄与することがわかった。

高炉スラグ微粉末も含め、0.3mm 以下の粒子径の高炉スラグが 10%の硫酸への浸漬 32 日後の質量減少率の増大の抑制に寄与すると考えられる。

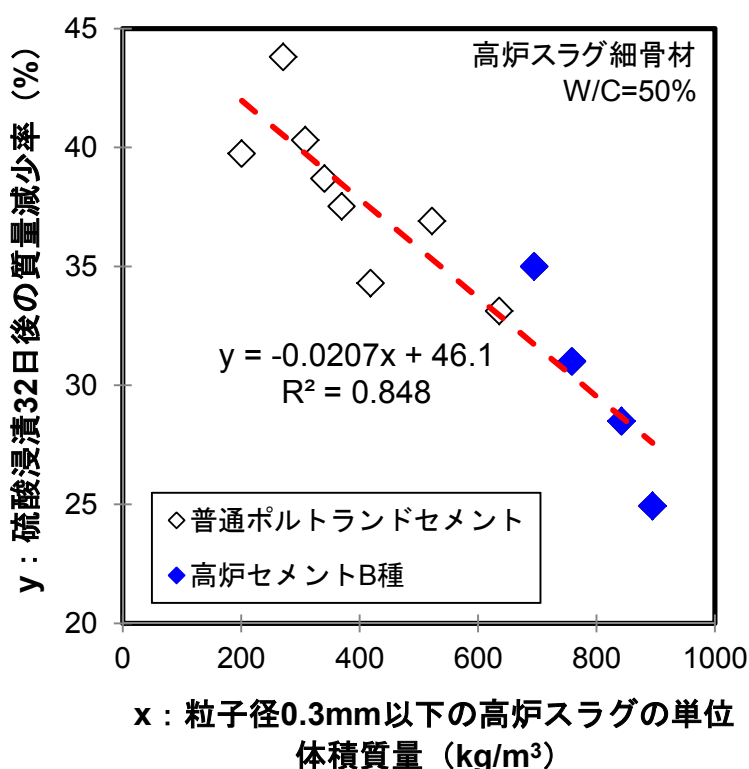


図 6-8 モルタルの硫酸浸漬 32 日後の質量減少率と 0.3mm 以下の粒子径の高炉スラグの単位体積質量の関係

このことから、高炉セメント B 種に高炉スラグ微粉末が質量パーセントで 50%含有されると仮定して、A 産の高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの硫酸浸漬 32 日後の質量減少率と 0.3mm 以下の粒子径の高炉スラグの単位体積質量の関係について検討した。

図 6-8 にその関係を示す。図のとおり、モルタルの硫酸浸漬 32 日後の質量減少率と 0.3mm 以下の粒子径の高炉スラグの単位体積質量は線形関係が成り立つことが確認された。すなわち、高炉スラグ微粉末と 0.3mm 以下の粒子径の高炉スラグ細骨材は、モルタルの硫酸浸漬 32 日後の質量減少率の増大の抑制に与える効果は、ほぼ等価であるものと考えられる。

これまでで高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの耐硫酸性の改善効果に関して、0.3mm 以下の粒子径の高炉スラグの単位体積質量が評価指標になり得ることを示した。この指標について、実用的な活用方法を検討した。

Paweena ら³⁾によると、硫酸によるコンクリートの侵食深さと、浸漬期間と硫酸濃度の積との間には、原点を通る線形関係が成り立つことが報告されており、その線形の傾きを硫酸侵食速度係数と定義している。また、蔵重ら⁹⁾は、硫酸によって硬化体表面から剥落した部分が元の硬化体の質量と等価であると仮定して、質量減少量から侵食深さを換算している。

ここでは、蔵重ら⁹⁾の質量減少量から侵食深さへの換算方法を適用して、Paweena ら³⁾が定義する硫酸侵食速度係数を算出した。図 6-8 の縦軸を硫酸侵食速度係数に置き換えたものを図 6-9 に示す。図のとおり、硫酸侵食速度係数と 0.3mm 以下の粒子径の高炉スラグの単位体積質量は線形関係が成り立つことが確認された。0.3mm 以下の粒子径の高炉スラグの単位体積質量を用いて、図中の回帰直線を利用することで任意の硫酸濃度と浸漬期間での高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの硫酸による侵食深さを推定できると言える。例えば、0.3mm 以下の粒子径の高炉スラグの単位体積質量 800kg/m^3 のとき、硫酸侵食速度係数は約 $4.9\text{mm/年}\cdot\%$ になり、硫酸濃度 1% で浸漬期間 2 年における侵食深さは、約 9.8mm と算出される。

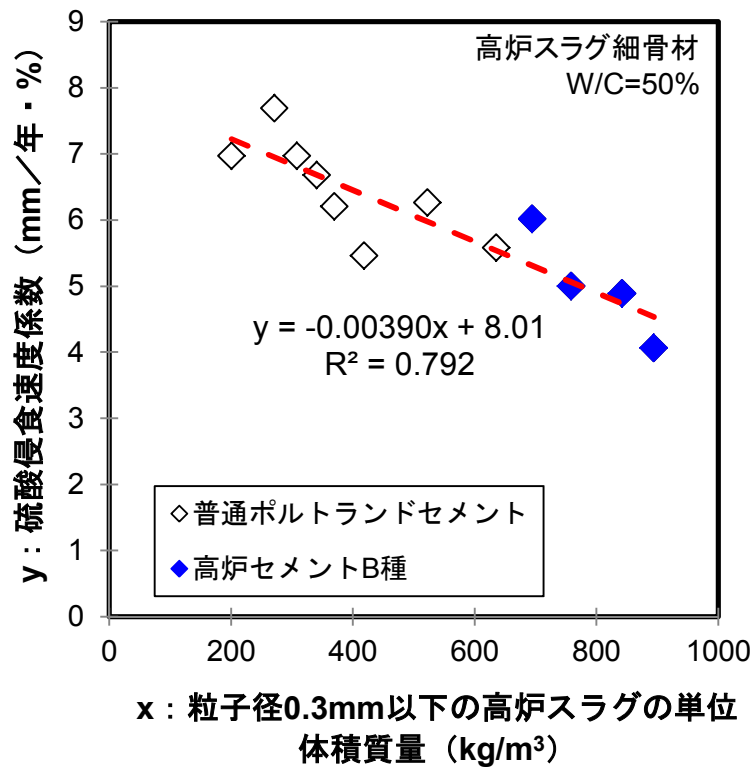


図 6-9 硫酸侵食速度係数と 0.3mm 以下の粒子径の高炉スラグの単位体積質量の関係

6.8 まとめ

スラグ細骨材の種類，高炉スラグ細骨材の品質や配合条件に着目してモルタルの耐硫酸性について検討した．その結果を以下にまとめる．

- (1) 各種スラグ細骨材と天然骨材を用いたモルタルの耐硫酸性は異なっていた．スラグ骨材のなかでも高炉スラグ細骨材を用いることで，モルタルの耐硫酸性が改善される．また，高炉スラグ細骨材の品質は，化学成分のCaO含有量が多いほど，また，粗粒率が小さいほど，高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの耐硫酸性が改善されることを明らかにした．さらに，配合における砂セメント比が大きいほど，高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの耐硫酸性が改善されることを明らかにした．
- (2) 統計学的分析の結果から0.3mm以下の粒子径の高炉スラグ細骨材がモルタルの耐硫酸性の改善に影響を与えることを明らかにした．また，0.3mm以下の粒子径の高炉スラグ細骨材と高炉スラグ微粉末の耐硫酸性の改善効果は，同程度であることを示した．高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの耐硫酸性の改善程度を把握する場合，高炉スラグ微粉末を含めて，0.3mm以下の粒子径の高炉スラグの単位体積質量が評価指標になり得ることを示した．

第6章の引用資料

- 1) 浅上修, 岡田昌巳, 五十嵐秀明, 米田俊一: 各種セメントの耐硫酸性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.152-157, 1996.
- 2) 寺西修治, 河合研至: 二種類の混和材を含む硬化したセメントペーストの化学的耐久性, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.244-249, 1992.
- 3) Paweena Jariyathitipong, 細谷多慶, 藤井隆史, 綾野克紀: 高炉スラグ細骨材によるコンクリートの耐硫酸性改善に関する研究, 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.4, pp.337-347, 2013.
- 4) 田澤榮一編著: エース・コンクリート工学, 朝倉書店, pp.127-128, 2002.
- 5) 日本下水道事業団編著: 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術および防食マニュアル, 財団法人下水道業務管理センター, 2007.
- 6) 沖花智之, 藤井隆史, 高橋克則, 綾野克紀: 種々の高炉スラグを細骨材に用いたコンクリートの物性に関する研究, 土木学会第68回年次学術講演会, V-298, 2013.
- 7) 久田真, 皆川浩, 寺林明日美, 納口恭太郎: 硫酸が作用するセメント硬化体の劣化進行に関する研究, 土木学会論文集E, Vol.64, No.3, pp.449-459, 2008.
- 8) 井上勝雄: エクセルで学ぶ多変量解析の使い方, 丸善, pp.117-133, 2002.
- 9) 蔵重勲, 魚本健人: 硫酸の作用を受けるセメント硬化体の劣化予測手法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.615-620, 2002.

第7章 結論

7.1 本研究のまとめ

本研究は、骨材資源の確保や副産物の有効利用を背景に、環境負荷を低減し、持続可能な社会の構築に資する技術開発として、コンクリートの乾燥収縮特性を推定できる砕石自体の長さ変化特性の工学的な評価技術と高炉スラグ細骨材がモルタルの耐硫酸性の改善効果に与える影響に関する評価技術を示したものである。

(1) 粗骨材の収縮特性のひずみゲージによる評価

粗骨材自体の乾燥収縮特性に与えるひずみゲージを用いた測定手法の影響を検討した。

その結果、1軸計測のひずみゲージで測定した粗骨材粒子毎の乾燥収縮率のばらつきは、測定方向に起因するばらつきや体積表面積比の影響によるばらつきも含まれたものであり、標準偏差が乾燥収縮率の平均値の約39%であることを明らかにした。しかし、1軸計測のひずみゲージによって7個以上の粗骨材粒子の乾燥収縮率を把握し、その測定結果を平均することで、粗骨材の乾燥収縮率の概略値を得られることを示した。粗骨材の乾燥収縮率が収束するまでに要する日数は、早いもので数日以内に結果が得られることを明らかにした。

粗骨材の乾燥収縮率のひずみゲージによる評価法を表7-1のとおり提案した。

表 7-1 粗骨材の乾燥収縮率のひずみゲージによる評価法 (案)

	提案する方法
(1)使用するひずみゲージ	・ 1 軸計測の防水型ひずみゲージ
(2)粗骨材粒子の寸法	・ 15～25mm
(3)測定数	・ 粗骨材粒子 7 個以上
(4)測定の流れ	・ 粗骨材粒子の平滑面作製 ・ ひずみゲージの貼付け ・ 試料の吸水 (ひずみが安定するまで) ・ 20℃60%RH の環境下で測定 (ひずみが安定するまで)
(5)主な装置等	・ データロガー (1×10 ⁻⁶ の分解能があるもの)
(6)評価指標	・ 乾燥収縮率の平均値 (乾燥開始からひずみが安定するまでの長さ変化率をそれぞれの粗骨材粒子で算出して、それらを平均する)

(2) 粗骨材の収縮特性の各種指標による推定

ひずみゲージによって測定された粗骨材の乾燥収縮率の平均値を他の物理的指標から推定できるかどうか検討した。

その結果、粗骨材の乾燥収縮率を把握する方法として、粗骨材の品質を評価する吸水率や比表面積などの単一の指標を用いて推定することも可能であるが、これらの指標を用いて適切な推定結果を得るためには、粗骨材種類の特定を必要とする場合もあることを明らかにした。一方、粗骨材の細孔量と比表面積から計算される平均細孔径、または、密度とヤング係数と比表面積から構成される複合指標を用いることで、粗骨材種類の特定を必要とせずに粗骨材の乾燥収縮率を表現できることを明らかにした。

表7-2に粗骨材の乾燥収縮率の各種指標による推定法をまとめる。

表 7-2 粗骨材の乾燥収縮率の各種指標による推定法 (案)

指標 x	試験 (算出) 方法	適用砕石	推定式	精度
絶乾密度 (g/cm ³)	JIS A 1110	砕屑岩	-3690x + 10100	○
		砕屑岩以外	-1070x + 2990	△
吸水率 (%)	JIS A 1110	砕屑岩	260x + 109	○
		砕屑岩以外	84.3x + 46.5	○
安定性 (%)	JIS A 1122	砕屑岩	14.4x + 118	○
		砕屑岩以外	7.41x + 88.5	○
細孔量 (mm ³ /g)	水銀圧入法 ^{※1}	砕屑岩	45.7x + 346	○
比表面積 (m ² /g)	水銀圧入法 ^{※1}	砕屑岩	304x + 303	○
		砕屑岩以外	94.3x + 78.3	○
	水蒸気吸着法	砕屑岩	386x + 110	◎
		砕屑岩以外	101x + 121	○
平均細孔径 (nm)	水銀圧入法 ^{※1}	全て	4760x ^{-0.936}	○
$\rho S_p/E^{*2}$ (m/N)	ρ : JIS A 1110 S_p : 水蒸気吸着法 E : Hashin-Hansen 式	全て	0.546x + 244	△

※1 : 細孔半径 1 μ m 以下で測定データの整理が必要

※2 : ρ は絶乾密度, S_p は比表面積, E は粗骨材の初期接線ヤング係数

(3) コンクリートの乾燥収縮率の粗骨材による推定

粗骨材に関する指標でコンクリートの乾燥収縮率を推定できるかどうか検討した。

その結果、細孔量や比表面積から計算される平均細孔径、または、密度とヤング係数と比表面積から構成される複合指標で、粗骨材種類の特定を必要とせずにコンクリートの乾燥収縮率を表現でき、コンクリートの乾燥収縮率の大小を判断する指標になり得ることを明らかにした。

また、複合則によってコンクリートの乾燥収縮率を推定した場合、計算に用いる骨材のヤング係数の種類によって推定精度と推定範囲が異なることを明らかにした。

粗骨材粒子の乾燥収縮率の測定結果とコンクリートの乾燥収縮率との関係は、一次式で表現され、高い相関性を有していた。7個以上の粗骨材粒子の乾燥収縮率をそれぞれ把握して、それらの平均値を求めることで、当該粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率を推定することができ、本検討の範囲では、次の式7-1で表現される。

$$\varepsilon_c = 0.564\varepsilon_a + 668 \quad (7-1)$$

ここに、 ε_c ：コンクリートの乾燥収縮率($\times 10^{-6}$)

ε_a ：粗骨材の乾燥収縮率の平均値($\times 10^{-6}$)

なお、粗骨材の各種指標によって推定された粗骨材の乾燥収縮率を次式に代入した場合においても、コンクリートの乾燥収縮率を推定することが可能であると考えられる。

さらに、コンクリートの乾燥収縮率を推定する土木学会式において、骨材の品質の影響を表す係数を定める式を提案した。土木学会式の一部を修正した式と提案した式を式7-2および式7-3に示す。コンクリートの乾燥収縮率は、提案式を用いることで高い精度で推定できることを明らかにした。

$$\varepsilon'_{sh} = 2.4 \left(W + \frac{45}{-20+30 \cdot C/W} \right) \cdot \alpha' \cdot \Delta\omega \quad (7-2)$$

ここに、 ε'_{sh} ：収縮の試験値の推定値($\times 10^{-6}$)

W ：単位水量(kg/m^3) ($W \leq 175 \text{ kg}/\text{m}^3$)

C/W ：セメント水比

α' ：骨材の品質の影響を表す係数

$$\alpha' = 2.85 \times \ln \left(\frac{\varepsilon_a}{\omega_G/100} \right) - 22.6 \quad (7-3)$$

ε_a ：粗骨材の乾燥収縮率の平均値($\times 10^{-6}$)

ω_G ：粗骨材の吸水率(%)

$\Delta\omega$ ：骨材中に含まれる水分量

また、式7-3を粗骨材の吸水率のみで表す場合、砕屑岩に分類される粗骨材およびそれ以外に分類される粗骨材で、それぞれ式7-4および式7-5のように書き換えることができる。

$$\alpha' = 2.85 \times \ln \left(26000 + \frac{10900}{\omega_G} \right) - 22.6 \quad (7-4)$$

$$\alpha' = 2.85 \times \ln \left(8430 + \frac{4650}{\omega_G} \right) - 22.6 \quad (7-5)$$

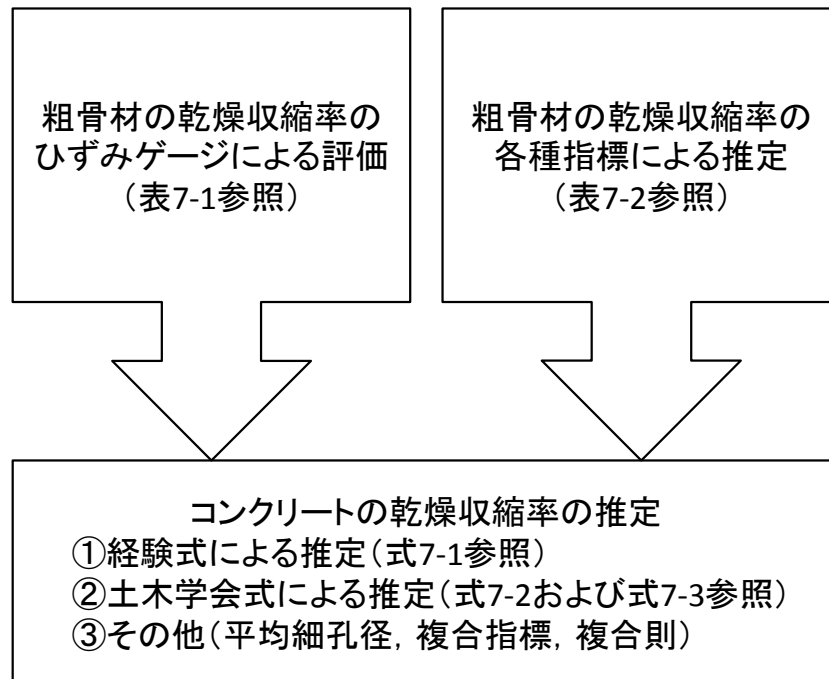


図 7-1 本研究結果の活用イメージ

大きな乾燥収縮率を持つ粗骨材は、コンクリートの乾燥収縮率に影響を与えるが、コンクリートの乾燥収縮率を把握しようとする、6ヶ月もの期間を要することが一般的である。コンクリートの乾燥収縮率に影響を与える大きな乾燥収縮率を持つ粗骨材かどうかを、簡易かつ早期に評価できる本研究の結果は、実務上有益な技術と言える。本研究結果の活用のイメージを図7-1に示す。

(4) 高炉スラグ細骨材によるモルタルの耐硫酸性の改善効果

モルタルの耐硫酸性に与える細骨材の種類，材料特性値および配合条件の影響について検討を行った。

その結果，使用する細骨材の種類によってモルタルの耐硫酸性は異なっており，モルタルの耐硫酸性を改善させる効果が最も高かったのが，高炉スラグ細骨材であることを明らかにした。高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは，天然骨材を用いたモルタルと比べて，2倍程度の耐硫酸性を有することを明らかにした。

高炉スラグ細骨材を用いたモルタルは，細骨材のCaO含有量が多いほど，粗粒率が小さいほど，また，砂セメント比が大きいほど，耐硫酸性が改善されることを明らかにした。

また，統計学的分析の結果から，高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの耐硫酸性の改善程度は，高炉スラグ微粉末を含めて，0.3mm以下の粒子径の高炉スラグの単位体積質量が評価指標になり得ることを明らかにした。

7.2 今後の検討課題

骨材の評価技術としての乾燥収縮特性のひずみゲージによる測定手法や耐硫酸性に関する評価指標について、コンクリートの高度化などへの応用を図る上で、今後、必要と考えられる課題を以下にまとめる。

(1) 粗骨材の乾燥収縮特性の評価技術について

乾燥収縮現象は、水分の移動が大きくかわることが挙げられるが、今回の検討では、粗骨材の乾燥収縮率のひずみゲージによる評価法についてのみを明らかにしている。

今後、粗骨材自体の乾燥収縮率と水分移動の関係を明らかにしていくことで、コンクリートの乾燥収縮に与える粗骨材の影響に関して更なる解明が期待できる。また、今回の検討で得られた粗骨材粒子毎のばらつきも考慮することで、コンクリート内部の乾燥によるひび割れなどの現象の解明に貢献するものと考えられる。

今回の対象は碎石のみとしたため、碎石以外の粗骨材でひずみゲージによる乾燥収縮率の把握が適用可能かどうかは明らかではない。今後、本手法の適用できる粗骨材の範囲を明確にしていくためにも、更なるデータの蓄積が必要である。

さらに、骨材資源の確保と有効活用の観点から、大きな乾燥収縮率の粗骨材を用いたコンクリートの収縮低減技術についても、検討を展開させていく必要がある。

(2) 高炉スラグ細骨材の耐硫酸性の改善効果について

今回の検討では、同一水セメント比の配合条件のもと、高炉スラグ微粉末を含めて、0.3mm以下の粒子径の高炉スラグの単位体積質量がモルタルの耐硫酸性の評価指標になり得ることを示している。水セメント比が異なる場合や環境条件が異なる場合などで、今回の評価指標が適用可能かどうか明らかではない。今後、想定されるあらゆる条件の影響を整理する必要がある、更なるデータの蓄積が課題である。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，ご指導をいただきました，長岡技術科学大学 市坪誠教授，下村匠教授，山口隆司教授，幡本将史准教授，群馬大学 小澤満津雄准教授に深謝の意を表します。

本論文は，筆者がこれまでに研究した内容に関する成果をとりまとめたものです。

骨材の乾燥収縮に関する研究は，筆者が住友大阪セメント株式会社から土木研究所の交流研究員として派遣されていた期間に実施した内容であります。この研究に出会えたきっかけを与えていただきました住友大阪セメント株式会社 関根福一社長に深く感謝の意を表します。また，派遣期間中に常に応援していただいた住友大阪セメント株式会社 藤原康生常務執行役員，今井俊雄執行役員，村瀬欣伸建材事業部長（当時），若杉三紀夫技師長（当時）に厚くお礼を申し上げます。

土木研究所 渡辺博志グループ長，片平博統括主任研究員には，この研究テーマを与えていただくとともに，研究業務の遂行にあたって多くのご指導とご助言をいただきました。厚くお礼を申し上げます。

骨材の耐硫酸性に関する研究は，筆者が呉工業高等専門学校に在籍していたときに実施した内容であります。本論文をまとめる機会を与えてくださった市坪誠先生には，呉高専の学生であった頃からこれまでに多大なるご指導とご助言を賜りました。ここに改めて深甚な感謝の意を表します。山口隆司先生には，当時，この研究を進めるにあたって多くのご指導とご助言をいただきました。ここに改めて厚くお礼を申し上げます。

また，ここに全ての方のお名前をあげることはできませんが，これまでに関係した多くの方に，心より感謝とお礼を申し上げます。

山 田 宏