

論文 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

片平 博*¹・渡辺博志*²

要旨: コンクリートの乾燥収縮率は骨材の品質によって大きく異なる。コンクリートの乾燥収縮率の測定には一般に JIS A 1129 の方法が用いられるが、この試験には半年の実施期間が必要となる。そこで、比較的簡易な指標によって乾燥収縮率を推定する方法について検討した。25 種類の粗骨材を用いたコンクリートの長さ変化率について、骨材物性（密度、吸水率、安定性、水蒸気吸着率）やコンクリート供試体の弾性係数との関係を調査した。この結果、骨材が砕屑岩（砂岩、頁岩）とそれ以外とでは傾向が異なる結果となった。相関の高かった指標は動弾性係数であり、また砕屑岩に限っては水蒸気吸着率も高い相関を示した。

キーワード: 乾燥収縮, 絶乾密度, 吸水率, 安定性損失質量百分率, 比表面積, 動弾性係数

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート構造物の置かれる環境条件のほか、材料物性や施工要因等の様々な影響を受けるが、とりわけ、コンクリート容積中の約 7 割を占める骨材の影響を強く受ける。近年では、良質な骨材資源の減少に伴い、比較的大きなコンクリートの乾燥収縮率も報告¹⁾されている。

このため、コンクリート標準示方書[設計編](2007 年版)では、コンクリートの収縮率(乾燥収縮, 自己収縮, 炭酸化収縮を含む)の設計値を、試験値や実績をもとに定めることを原則とし、これらのデータが無い場合には、従来の収縮率推定式の解を 1.5 倍することにより求めることとなった。また、JASS 5 では、計画供用期間の級が長期または超長期のコンクリートについて収縮率を 8×10^{-4} 以下と規制することとなった。

現在、コンクリートの収縮率は「コンクリートの長さ変化試験」(JIS A 1129)の 6 ヶ月経過時点での長さ変化率によって評価するのが一般的である。しかし、この試験は計測が長期に及ぶことから、その検証は容易ではない。そこで長さ変化率の推定が可能な、簡易な評価指標についての検討を行っている。

筆者らは比較的低品質な砕屑粗骨材 13 種類を対象に、これを用いたコンクリートの長さ変化率と、骨材物性(密度, 吸水率, 安定性損失質量百分率(以下, 安定性という), 比表面積)やコンクリート供試体の弾性係数との関係を調査した結果を昨年報告した²⁾。今回は、前報の実験には含まれなかった川砂利骨材や石灰岩砕屑等の 12 種類の骨材に対して新たに実験を行い、昨年報告したデータも含め、全 25 種類の粗骨材の実験結果を再整理した。この結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 骨材の種類とコンクリートの配合

収集した粗骨材は表-1 の G1~G25 に示す 25 種類であり、骨材の物性の影響を広範囲に捉えることを目的に、規格を満足する骨材から規格を大きく外れる骨材まで様々な品質の骨材を収集した。このうち G1~G13 は前報で報告した骨材, G14~G25 が今回新たに実験を行った骨材である。なお、規格を満足しない骨材は、通常はコンクリー

表-1 骨材の種類と品質

記号	岩種	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 (%)
G1	砂岩 (Ss)	2.65	0.50	3.3
G2	花崗岩 (Gr)	2.53	1.47	22.3
G3	安山岩 (As)	2.47	2.74	72.9
G4	砂岩 (Ss)	2.45	3.33	56.4
G5	頁岩 (Sl)	2.59	1.54	27.9
G6	安山岩 (As)	2.65	2.67	14.8
G7	安山岩 (As)	2.29	6.53	56.5
G8	安山岩系凝灰岩 (Tf)	2.48	4.38	45.3
G9	玄武岩系凝灰岩 (Tf)	2.28	7.17	70.2
G10	安山岩 (As)	2.63	1.66	3.8
G11	安山岩 (As)	2.29	5.58	52.7
G12	安山岩 (As)	2.25	6.43	27.5
G13	砂岩~シルト岩 (Ss)	2.37	4.96	89.7
G14	安山岩 (As)	2.44	3.91	54.2
G15	砂岩 (Ss)	2.57	1.56	9.2
G16	砂岩 (Ss)	2.64	0.99	5.3
G17	石灰岩 (Li)	2.70	0.29	0.7
G18	石灰岩 (Li)	2.71	0.26	1.5
G19	川砂利 (Rg)	2.45	3.37	12.9
G20	川砂利 (Rg)	2.53	1.9	10.6
G21	川砂利 (Rg)	2.39	3.72	29.3
G22	川砂利 (Rg)	2.45	4.21	19.2
G23	川砂利、玉砕 (Rg)	2.48	4.39	19.4
G24	川砂利 (Rg)	2.40	3.98	25.0
G25	川砂利 (Rg)	2.53	2.66	14.2
(細骨材) 川砂		2.56	1.58	3.5

※網掛けは規格を満足しない物性値

*1 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 主任研究員 (正会員)

*2 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 上席研究員 (正会員)

ト用骨材として使用されていないものである。実験結果の整理では、これらの骨材を表-2に示す分類に分けてグラフを整理した。

骨材の最大寸法は25mm（ただしG6は15mm，G17およびG18は20mm）とし、これらの粗骨材を用いて $W=165\text{kg/m}^3$ ， $W/C=55\%$ ， $s/a=46\%$ ，目標空気量4.5%の条件でコンクリートを練り混ぜた。細骨材には表-1の最下段に示した川砂を使用し、セメントには普通ポルトランドセメント、混和剤にはAE減水剤（ $C\times 0.31\%$ ）とAE助剤（空気量を得る適量）を使用した。

練り混ぜたコンクリートのフレッシュ性状としては、スランプは粗骨材の性状によって大きく異なり3.5～18.6cmの範囲、空気量は3.7～6.2%の範囲であった。

2.2 長さ変化試験

練り混ぜた各フレッシュコンクリートを用いて $10\times 10\times 40\text{cm}$ 角柱供試体を2本ずつ作製し、打設の翌日に脱枠した後、材齢7日まで水中養生を行い、その後、「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法（ダイヤルゲージ法）」（JIS A 1129-3）の方法に従って、材齢6ヶ月までの長さ変化率を測定した。環境条件としては温度 20°C ，相対湿度 $60\pm 5\%$ とした。

2.3 長さ変化率と比較する物性

表-3に示す各物性値と6ヶ月経過時点の長さ変化率を比較した。各物性の選択理由と測定方法を以下に述べる。

(1) 粗骨材の基本物性

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。これらの物性と長さ変化率との関係を調査した。

(2) 粗骨材の水蒸気吸着率

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報告がある^{3),4)}。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⁴⁾されており、この方法に準拠して実験を行った。

実験の概要としては、室温 20°C の実験室内において、

表-2 粗骨材の分類

大分類	小分類	実験の対象とした骨材
火成岩	火山岩	安山岩
	半深成岩	-
	深成岩	花崗岩
堆積岩	砕屑岩	砂岩、シルト岩、頁岩
	火砕岩	凝灰岩
	生物岩	石灰岩
変成岩		-
上記の混合	川砂利	川砂利

表-3 長さ変化率と比較する各種物性

比較対象とした物性		測定方法
粗骨材の基本物性	絶乾密度	JIS A 1110
	吸水率	JIS A 1110
	安定性損失質量百分率	JIS A 1122
粗骨材の水蒸気吸着率		20°C ，湿度33%での吸着率
コンクリートの弾性係数	たわみ振動	JIS A 1127(角柱供試体)
	縦振動	JIS A 1127(円柱供試体)
	超音波	超音波伝播速度より算出(円柱供試体)
	静弾性係数(割線弾性係数)	JIS A 1149(破壊荷重の1/3応力までの割線)
	静弾性係数(初期弾性係数)	初期応力曲線の初期接線

約 $400\times 250\times 250\text{mm}$ の気密容器内に約1kg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、この値と長さ変化率を比較した。

(3) コンクリートの弾性係数

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長さ変化率との関係について調査した。

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) 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。

2) 縦振動による動弾性係数

長さ変化試験用供試体の作製と同時に $\phi 100\times 200\text{mm}$ 円柱供試体を各配合ごとに3本作製し、材齢28日まで水中養生し、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。

3) 超音波による動弾性係数

2)で作製、養生（28日）した円柱供試体の両端面に探

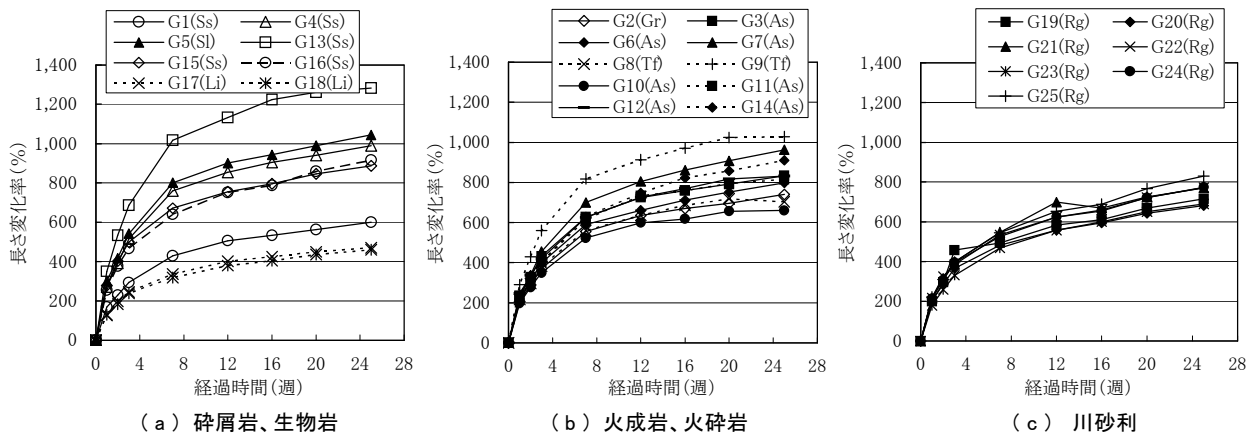


図-1 長さ変化試験の結果

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。

4) 静弾性係数 (割線弾性係数)

2) で作製、養生 (28 日) した円柱供試体に対して 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。

5) 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、4) 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. 実験結果と考察

3.1 長さ変化試験の結果

長さ変化試験の結果を図-1 に示す。これらの図より、

今回の実験の範囲では、以下のような傾向が見られた。

- (1) 碎屑岩では同じ砂岩でも長さ変化率が大きく異なる結果となった。
 - (2) 石灰岩の長さ変化率は小さかった。
 - (3) 川砂利は種類の違いによる長さ変化率の違いが小さかった。
- (3) の理由としては今回収集した川砂利が東北地方産出のものが大半であったことが一因として考えられる。

6 ヶ月経過時点の長さ変化率について、各種物性と比較した結果について以下に述べる。

3.2 粗骨材の基本物性と長さ変化率の関係

骨材の絶乾密度と長さ変化率との関係を図-2 に、骨材の吸水率と長さ変化率との関係を図-3 に、骨材の安定性と長さ変化率との関係を図-4 に示す。ここで、碎屑岩は他の骨材より長さ変化率が大きい傾向を示したので、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、碎屑岩と碎屑岩以外の骨材を分けることで、長さ変化率との対応関係の良否を示す決定係数 (図中の R^2) は、 $0.59 \sim 0.71$ 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、碎

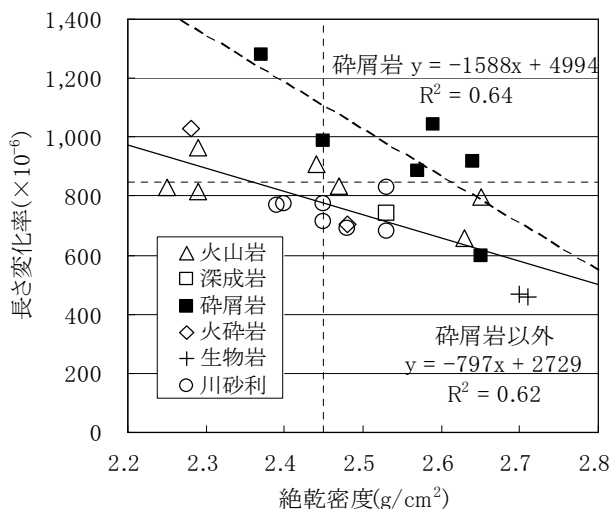


図-2 絶乾密度と長さ変化率の関係

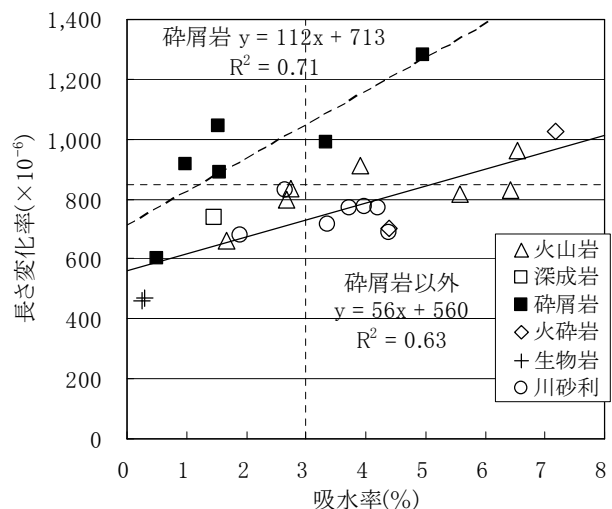


図-3 吸水率と長さ変化率の関係

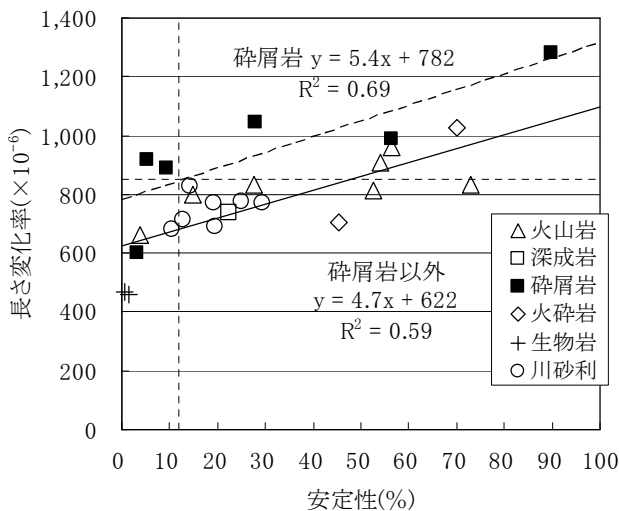


図-4 安定性と長さ変化率の関係

屑岩を除くと、各物性の規格値を満足する範囲での長さ変化率は全て 8×10^{-4} 以下であり、本実験の範囲では、現在の骨材規格の妥当性が伺えた。ただし、細骨材の品質によっては長さ変化率が変化することも考えられる。

3.3 粗骨材の水蒸気吸着率と長さ変化率の関係

時間経過に伴う粗骨材の水蒸気吸着率の変化を図-5に示す。G1~G13の履歴は前報²⁾で報告したので、ここではG14~G25の結果を示す。水蒸気吸着率は時間の経過に伴って徐々に増加し、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-6に示す。砕屑岩と砕屑岩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。

特に砕屑岩に対しては高い相関を示した。

3.4 動弾性係数と長さ変化率の関係

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-7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、データを砕屑岩と砕屑岩以外とに分けることで、比較的高い相関性を示した。

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長さ変化率との関係を図-8に、超音波による動弾性係数と長さ変化率との関係を図-9に示す。図-7と同様に、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。

上記のように今回の実験の範囲では、動弾性係数は長さ変化率と比較的良好な対応を示した。

図-10は同じ円柱供試体に対して測定した縦振動による動弾性係数と、超音波による動弾性係数を比較した図である。良い相関を示しており、測定法の違いによる有意な差は認められなかった。

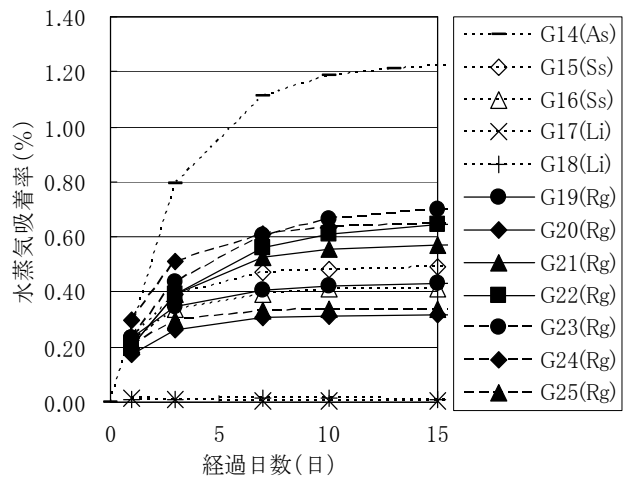


図-5 水蒸気吸着率の経時変化

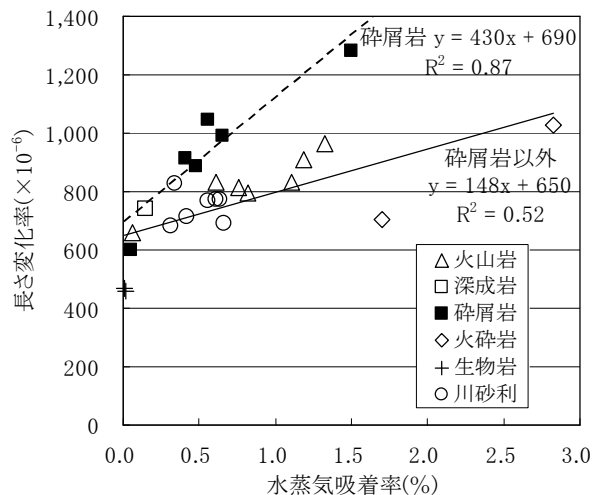


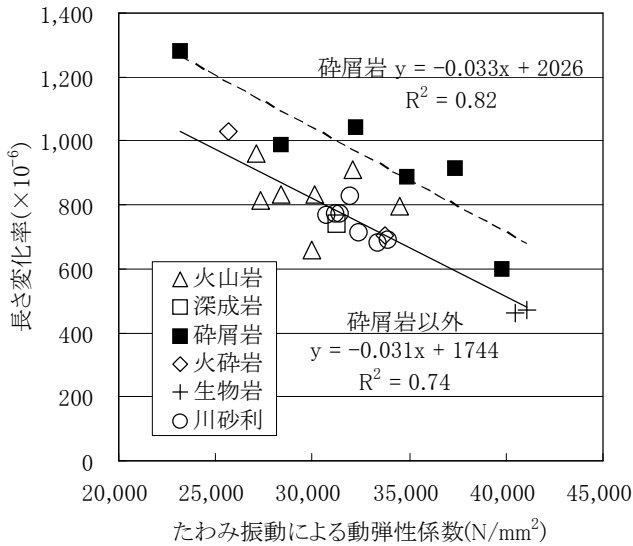
図-6 水蒸気吸着率と長さ変化率の関係

3.5 静弾性係数と長さ変化率の関係

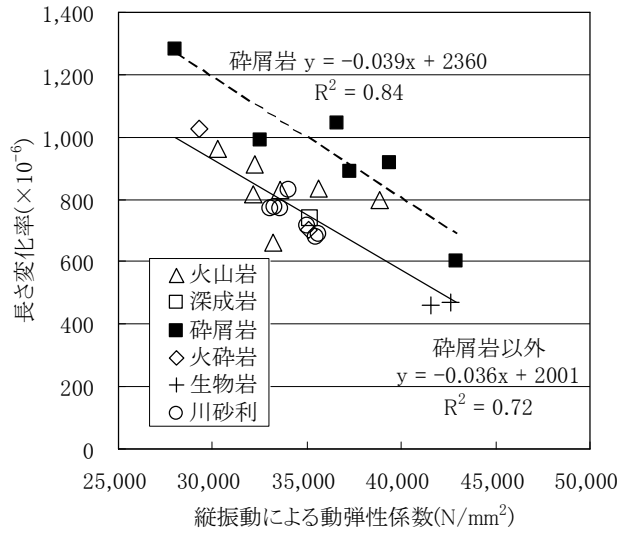
円柱供試体の圧縮強度試験時の割線弾性係数と長さ変化率との関係を図-11に示す。図-7~9に示した動弾性係数の図と比較すると、決定係数はやや低くなった。

乾燥収縮は低応力レベルで発生すると考えられることから、荷重載荷初期の接線弾性係数も求めた。この初期弾性係数と長さ変化率との関係を図-12に示す。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-11よりも砕屑岩以外の決定係数は高くなった。砕屑岩の決定係数がやや低くなったのは、ばらつきの影響と考えられる。

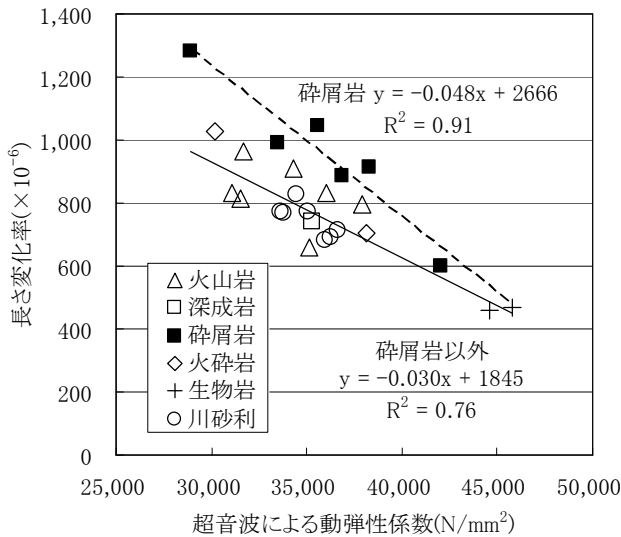
図-10では、同じ円柱供試体で測定された動弾性係数と静弾性係数を比較しているが、割線弾性係数は動弾性係数に比較して低く、初期弾性係数は割線弾性係数に比



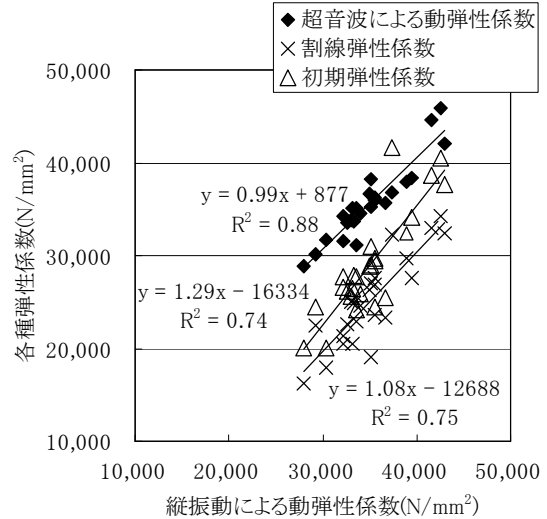
図一七 たわみ振動による動弾性係数と長さ変化率の関係



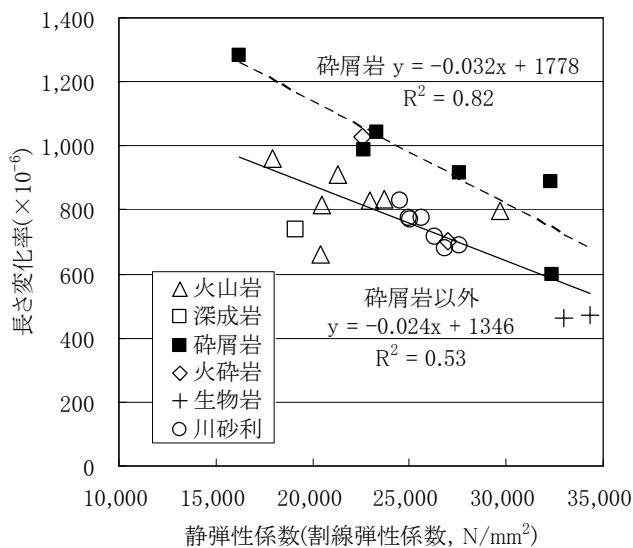
図一八 縦振動による動弾性係数と長さ変化率の関係



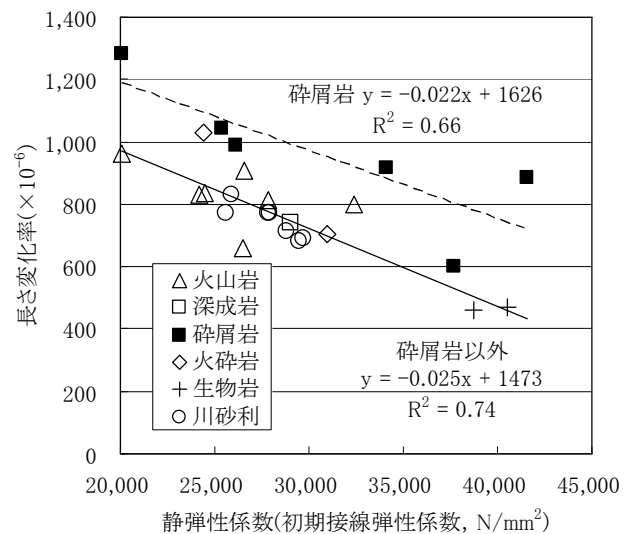
図一九 超音波による動弾性係数と長さ変化率の関係



図一〇 円柱供試体を対象とした弾性係数の比較



図一一 静弾性係数(割線弾性係数)と長さ変化率の関係



図一二 静弾性係数(初期接線弾性係数)と長さ変化率の関係

較して動弾性係数に値が近づいていることが分かる。

このことから、初期弾性係数を精度良く求めることにより、動弾性係数と同様に長さ変化率を推定することが可能と考えられる。ただし、動弾性係数の測定に比較して初期弾性係数の測定は容易ではなく、実務的には困難と考えられる。

4. 乾燥収縮率の管理手法に関する一考察

実工事においては、長さ変化率の極端に大きなコンクリートを排除するための検査手法が必要となる。今回の実験結果の範囲から、その方向性を検討する。

図-2~4には現在の骨材品質基準を点線で示した。この基準を満足している範囲において長さ変化率が 8×10^{-4} を超えたのは砕屑岩のみであり、砕屑岩以外は全て 8×10^{-4} 以下であった。また、砕屑岩であっても吸水率、安定性共に小さな値の G1 (吸水率 0.5%, 安定性 3.3%) を用いたコンクリートの長さ変化率は小さかった。

これらのことから、粗骨材が砕屑岩の場合には、骨材の品質基準を現状よりも厳しく設定するか、または、今回の実験結果で乾燥収縮率と対応の良かった水蒸気吸着率や圧縮強度試験用供試体の動弾性係数を測定することで、それらの値から合否を判定する方法が考えられる。

一方、岩種が砕屑岩以外の場合には、骨材の品質基準を満足していることを確認することで、長さ変化率の照査を省略できる可能性がある。

ただし、限られた実験範囲での考察であり、細骨材の影響等、今後、整理しなければならない課題も多い。

また、合否の判定基準となる数値の設定に関しても、今後の研究課題である。

5. まとめと今後の課題

コンクリートの乾燥収縮による長さ変化率を簡易に推定する方法として様々な物性との対応を検討した。

今回の実験の範囲では、以下の結果が得られた。

- (1) 骨材の基本的な物性である密度、吸水率、安定性、比表面積、また、コンクリートの動弾性係数 (撓み振動法、縦波振動法、超音波伝播速度)、静弾性係数 (割線弾性係数、初期接線弾性係数) を指標として、長さ

変化率との対応を検討した。この結果、骨材を砕屑岩 (砂岩、頁岩) と砕屑岩以外に分類することで、どの指標とも相関性が認められた。

- (2) 今回選定した指標の中で長さ変化率と良い相関を示したのはコンクリートの動弾性係数であった。また、砕屑岩に限っては水蒸気吸着率も高い相関を示した。
- (3) 得られた実験結果をもとに、簡易に長さ変化率を照査するための方法について、その方向性を検討した。

今回の報告は、比較的低品質な 25 種類の粗骨材を対象とした実験結果であるが、今後とも骨材試料数を増やして検討することが重要である。また、砕屑岩と砕屑岩以外で傾向が異なる結果となった。この理由としては、砕屑岩が粒子の圧密結合であるのに対して他の岩は鉱物として結晶構造化しており、微細な空隙構造の違いが影響していることが考えられるが、詳細については今後の検討が必要である。また、細骨材の影響等についても検討を行っていく必要がある。

謝辞：粗骨材の水蒸気吸着率の測定方法については東京理科大学の今本啓一先生からご指導を頂いた。末筆ながら付けて謝意を表す。

参考文献

- 1) 百瀬晴基ほか：全国のレディーミクストコンクリート工場を対象としたコンクリートの乾燥収縮に関する調査研究 (その 1：省力化乾燥収縮試験法の概要と調査結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州)、pp.291-292, 2007.8
- 2) 片平博、渡辺博志：骨材がコンクリートの乾燥収縮率に与える影響の簡易推定法に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.5, pp.843-844, 2009.9
- 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, 1979.6
- 4) 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