

論文 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

片平 博*¹・渡辺博志*²

要旨: 近年, 骨材の品質によってコンクリートの乾燥収縮率が大きく異なることが報告されている。コンクリートの乾燥収縮率は JIS A 1129-1993 によって求めるのが一般的であるが, この試験には半年の実施期間が必要で, その検証は容易ではない。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。今回は, 比較的低品質な 13 種類の砕石を用いたコンクリートの長さ変化試験結果について, 骨材物性 (密度, 吸水率, 安定性損失質量百分率, 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。本実験の範囲では, 長さ変化率と最も良い対応を示したのは動弾性係数であった。

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 800×10^{-6} 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を求める方法は規準類に明確に規定されていないが, コンクリートの長さ変化試験(JIS A 1129-1993)によって求める場合が多い。この試験は試験体を製造してから半年間に及ぶ計測を行うもので, 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low品質な骨材を対象に, 既存のデータを用いて概略の検討を行い, 長さ変化試験に用いた供試体の試験開始時の動弾性係数と長さ変化率との間に比較的良い対応関係があることを報告している²⁾。しかし, 当時の長さ変化試験は湿度を厳密に管理しておらず, また, 供試体本数も各配合 1 本であった。

今回, より的確な長さ変化試験を行い, また, より広範囲な物性との関係について調査を行ったので, その内容を報告する。

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~G13に示す13種類の砕石であり, 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。G1,G4,G5およびG13は堆積岩であり, それ以外は火成岩である。実験結果の分析においては, これらのデータを分けて整理した。規格を満足しない骨材は, 通常はコンクリート用骨材として使用されていないものである。

骨材の最大寸法は 25mm (G6 のみ 15mm) 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の最下段に示した良質な川砂を使用し, 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

表-1 骨材の種類と品質

記号	岩種	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	安定性損失質量 百分率(%)
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 (Tt)	2.48	4.38	45.3
G9	玄武岩系凝灰岩 (Tt)	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
	(細骨材) 川砂	2.56	1.58	3.5

※網掛り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)

水剤と AE 助剤を使用した。

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が 3.5~8.0cm の範囲、空気量が 3.7~5.2% 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 10×10×40cm 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（ダイヤルゲージ方法）」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。環境条件としては室温 20℃の実験室内に設置した試験槽（内寸 120×90×120cm）に、相対湿度を 60%とするために 50kg の臭化ナトリウムを過飽和水溶液の状態に配置したが、供試体が湿っている試験開始当初の状態では臭化ナトリウムによる湿度調整は困難であった。このため、試験開始から約 1 ヶ月間は試験槽の扉の開閉の調整で相対湿度を概ね 60±5%の範囲に調整した。それ以降については臭化ナトリウムの調湿作用によって試験槽内の相対湿度は 60%で安定した。

2.3 長さ変化率と比較する物性

表 2 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損失質量百分率（以下、安定性という）を考えた。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ためである。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、コンクリートの乾燥収縮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試験を行った。

試験の概要としては、室温 20℃の実験室内において、

表 2 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℃、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 400×250×250mm 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に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、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を除して面積を推定することになるが、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 100×100×400mm 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 φ100×200mm 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

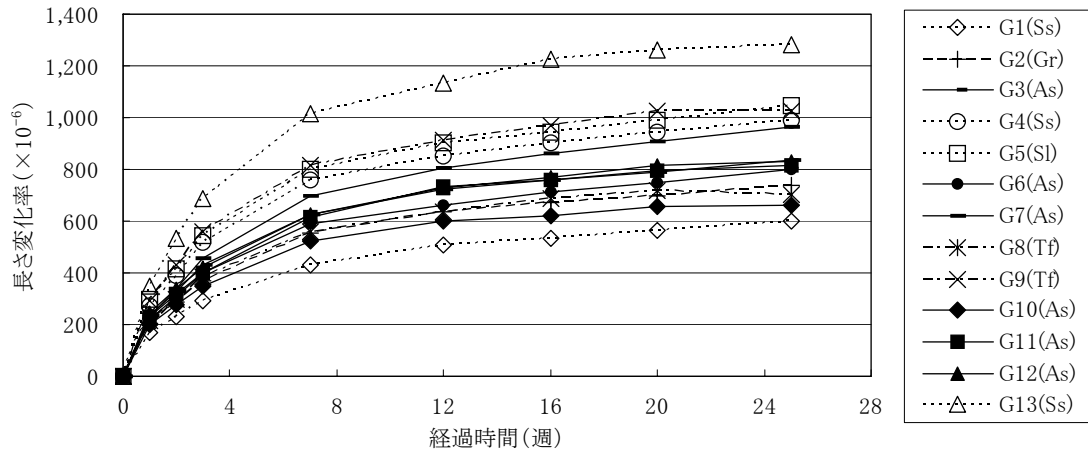


図-1 長さ変化試験の結果

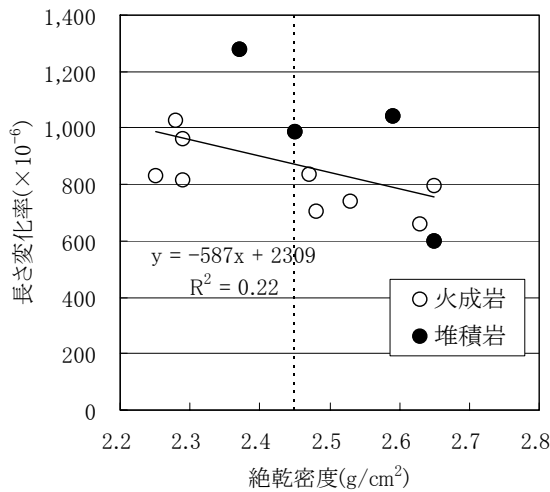


図-2 絶対乾密度と長さ変化率の関係

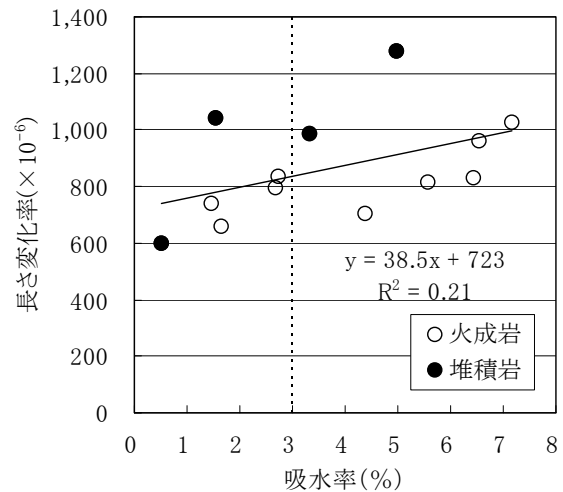


図-3 吸水率と長さ変化率の関係

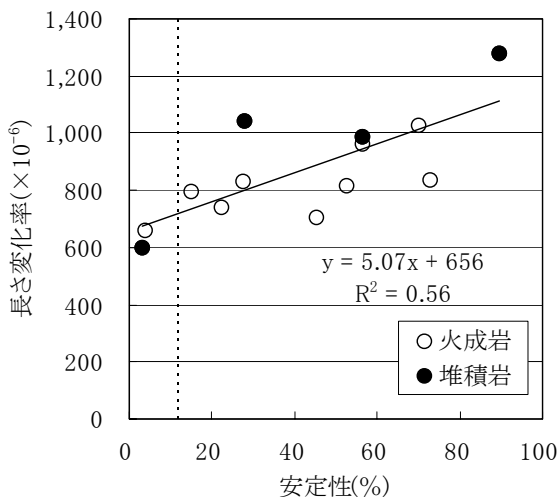


図-4 安定性と長さ変化率の関係

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、荷重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、0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。図では堆積岩 (Ss, Sl) を白抜きで、火成岩 (As, Tf, Gr) をそれ以外で示したが、比較的大きな長さ変化率を示したのは堆積岩で多かった。

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

骨材の絶対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。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た。また、堆積岩と火成岩を比較すると、特に図-2, 3では、堆積岩のほうが長さ変化率がやや大きい傾向を示した。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、火成岩と堆積岩の全てのデータを対象に求めているが、絶乾密度や吸水率と長さ変化率との決定係数は低く、安定性と長さ変化率との決定係数は高くなった。

各図には骨材の品質規格値を点線で示しているが、各物性の規格値を満足する範囲では、堆積岩の1データ(G5)を除いて長さ変化率は概ね 800×10^{-6} 程度以下であり、本実験の範囲では、現在の骨材規格の妥当性が伺えた。この結果は、骨材規格を満足する骨材であっても長さ変化率が 800×10^{-6} を超えるものがやや多く存在する(とする文献1)等の結果とは相反する結果であった。

この理由としては、データ数が十分でないこともあるが、長さ変化試験を実施する際の試験条件も影響しているものと考えられる。すなわち、今回の実験は臭化ナト

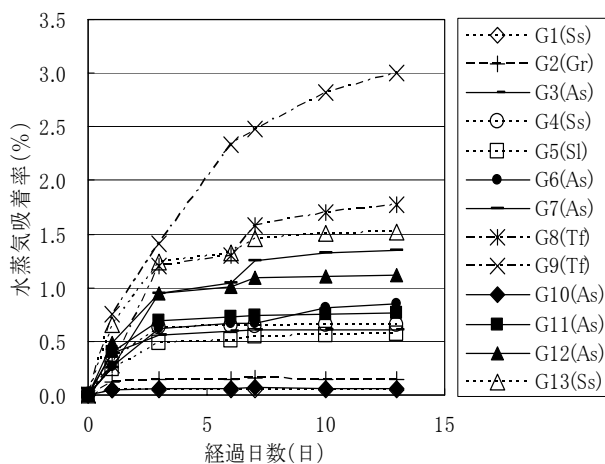


図-5 水蒸気吸着率の経時変化

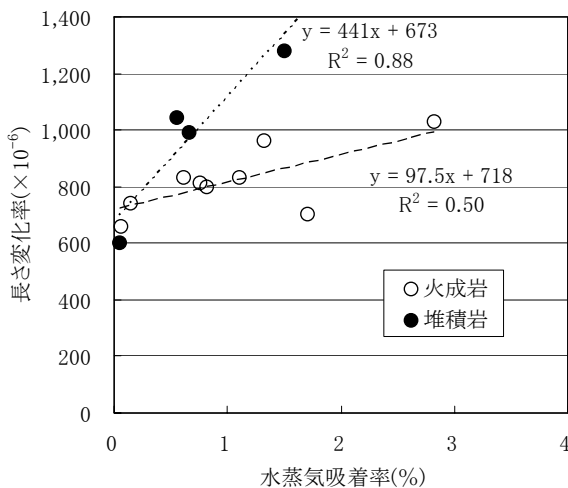


図-6 水蒸気吸着率と長さ変化率の関係

リウムを調湿剤として、試験槽内は無風状態で試験を行っている。これに対して機械式恒温恒湿槽を使用する場合には、槽内の空気循環用送風機によって常に供試体に風が当たる状態であり、同じ湿度60%の環境であっても、乾燥条件は異なると考えられる。このような試験条件の違いの影響についても今後検討していく必要があると考える。

なお、絶乾密度および吸水率が規格値を満足していながら長さ変化率が 800×10^{-6} を超えた堆積岩G5は、骨材として使用するには好ましくないとされる頁岩であり、乾湿の繰り返し作用によってスレーキング(劣化)を起こす岩種でもあった。

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。水蒸気吸着率は時間の経過に伴って徐々に増加するが、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。本試験結果の範囲では、火成岩と堆積岩とで異なる傾向を示し、同じ水蒸気吸着率では堆積岩のほうが長さ変化率が大きい傾向を示した。火成岩と堆積岩とで傾向が異なる原因としては、溶岩が温度低下によって凝結する火成岩と、元々はバラバラの粒子が圧密によって凝結する堆積岩とでは粒子(鉱物)間の微細な空隙構造が異なっている可能性が考えられるが、原因の究明には今後の研究が必要と考える。

図-6では火成岩と堆積岩に分けて決定係数を求めている。本実験の範囲では、各々、比較的高い決定係数が得られた。

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、良い対応を示した。火成岩と堆積岩との差も堆積岩の1データ(G5)を除くと小さかった。

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。長さ変化試験を実施した供試体そのものを測定した図-7の結果と比較すると当然のことながら決定係数はやや落ちるものの、各動弾性係数と長さ変化率とは比較的良好な対応関係を示した。

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良い対応を示し、岩種の違いによる差も小さいことから、長さ変化率を推定するための有力な指標と

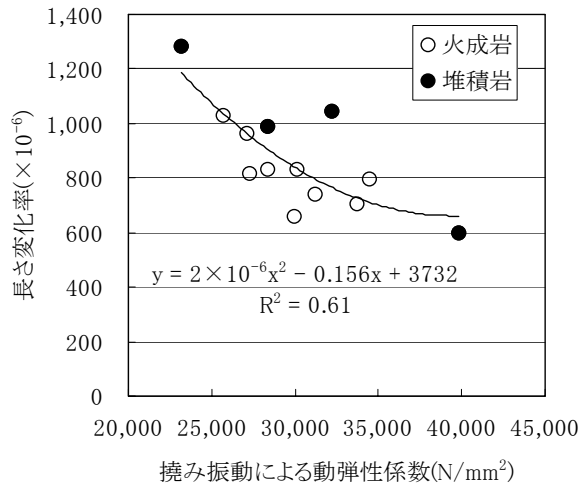


図-7 撓み振動による動弾性係数と長さ変化率の関係

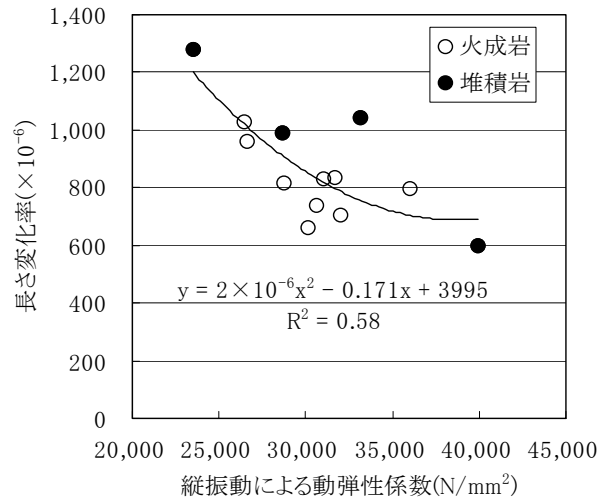


図-8 縦振動による動弾性係数と長さ変化率の関係

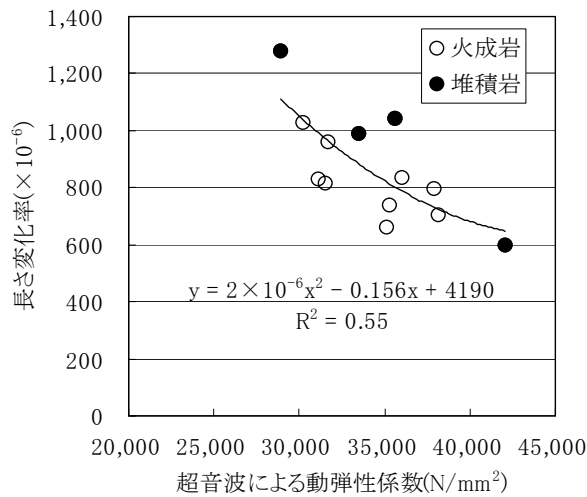


図-9 超音波法による動弾性係数と長さ変化率の関係

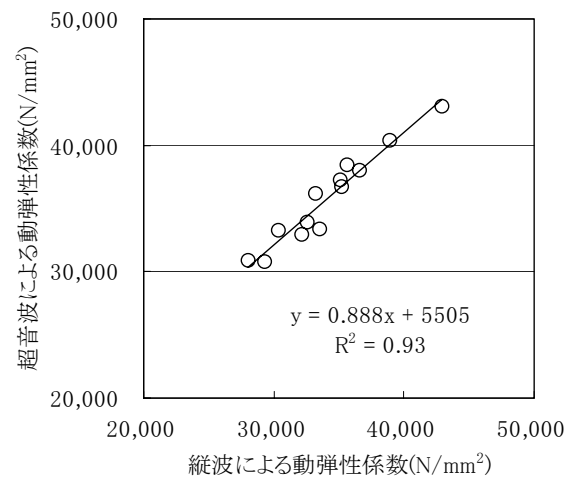


図-10 縦波法と超音波法の動弾性係数の比較

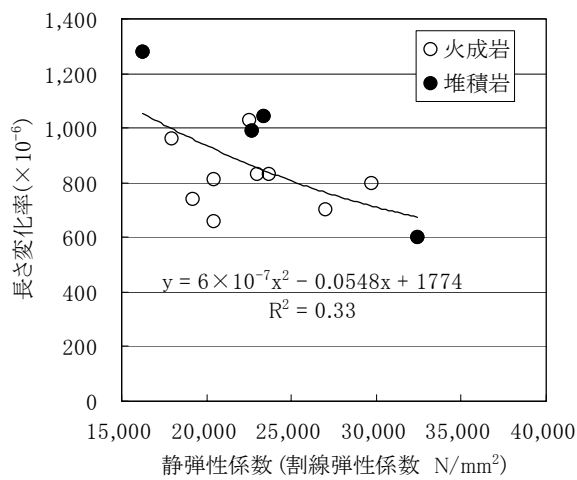


図-11 静弾性係数(割線弾性係数)と長さ変化率の関係

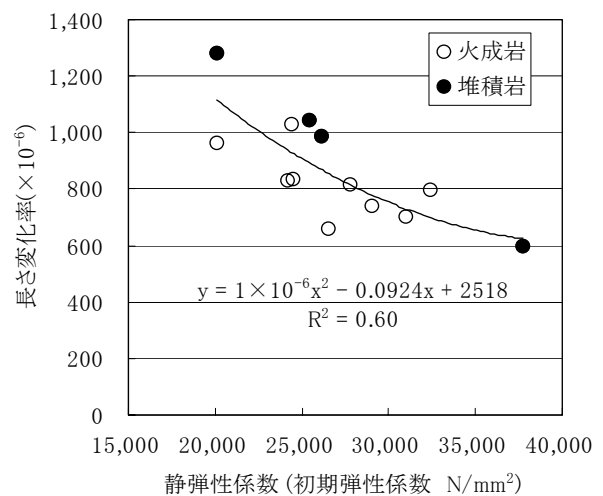


図-12 静弾性係数(初期弾性係数)と長さ変化率の関係

考えられる。

図-10 は同じ円柱供試体に対して、縦振動による動弾

性係数と、超音波法による動弾性係数とを比較した図である。非常に良い相関を示しており、測定法の違いによ

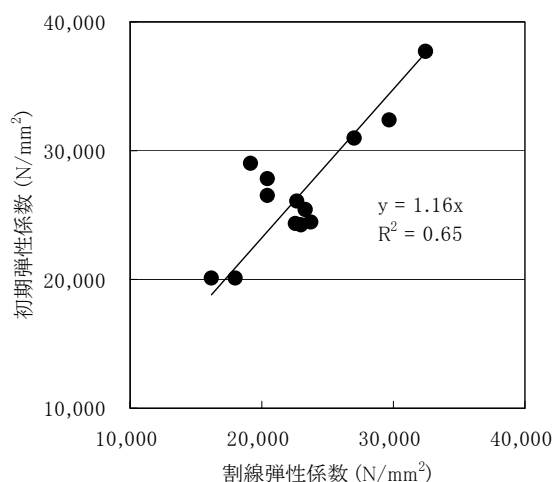


図-13 割線弾性係数と初期弾性係数の比較

る有意な差は認められず、実用性を考えると超音波法による方法が最も簡易で実用的と考える。

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よりも決定係数が高くなった。

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い。

割線弾性係数と初期弾性係数を比較すると図-13のようであり、初期弾性係数は割線弾性係数の概ね1.16倍程度を示すデータが多いが、いくつかのデータについては、異なる関係を示した。

4. まとめ

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、吸水率および安定性について、長さ変化率と最も良い相関を示したのは安定性であった。

- (2) 現在の密度、吸水率、安定性のそれぞれの規格値を満足する骨材を使用したコンクリートの長さ変化率は概ね 800×10^{-6} 以下であった。

- (3) 粗骨材の水蒸気吸着率とコンクリートの長さ変化率との関係は、骨材を火成岩と堆積岩に分類することで、比較的良い対応を得た。

- (4) コンクリートの動弾性係数はコンクリートの長さ変化率と比較的良い対応を得た。

- (5) コンクリートの静弾性係数のうち、割線弾性係数については、コンクリートの長さ変化率との対応はやや悪かった。初期弾性係数についてはコンクリートの長さ変化率と比較的良い対応を得た。

以上の結果と試験の簡便性から、容易に長さ変化率を推定する方法としては、円柱供試体を用いた超音波法による動弾性係数測定が最も合理的と考えられる。

しかしながら今回の報告は、比較的低品質な骨材を対象とした実験結果であり、また、乾燥収縮率が小さいとされる石灰石骨材のデータが無いなど、試験データ数が十分とは言えず、更に、長さ変化試験の試験装置の違いによる影響や、火成岩と堆積岩とで傾向が異なる原因等について不明な点が多く、今後の研究が重要である。

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。末筆ながら付して謝意を表する。

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：簡易な評価指標によるコンクリートの乾燥収縮量推定のための基礎的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.63, No.5, pp.843-844, 2008.9
- 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