

コンクリートの乾燥収縮率推定法に関する実験的検討

片平 博* 渡辺博志**

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮によって生じるひび割れ問題は、これまで単位水量を低く抑えることで有害な乾燥ひび割れを抑制できるという考えに基づいて対応がなされてきたが、近年、骨材の種類によっても乾燥収縮率が大きく異なることが報告されている。

このため、コンクリート標準示方書[設計編](土木学会2007年版)では、コンクリートの収縮率の設計値を、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、建築工事標準示方書 JASS 5 鉄筋コンクリート工事(建築学会2009年版)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(850×10^{-6} 未満)と規制することとなった。

現在、コンクリートの乾燥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)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。そこで土木研究所基礎材料チームでは、長さ変化率と対応の良い簡易な評価指標について、検討を行っている²⁾。

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種類の比較的品質な砕石である。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。規格を満足しない骨材は、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。

骨材の最大寸法を25mm(G6のみ15mm)とし、これらの粗骨材を用いて単位水量 165 kg/m^3 、水セメント比55%、細骨材率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。

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
	(細骨材)川砂	2.56	1.58	3.5

※黄色の網掛けは規格を満足しない物性値

2.2 コンクリートの長さ変化試験

練り混ぜた各フレッシュコンクリートを用いて $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ 角柱供試体を作製し、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。試験本数は各配合2本とし、環境条件としては室温 20°C 、相対湿度60%とした。

2.3 長さ変化率と比較する物性

以下に述べる各物性値(表-2参照)について6ヶ月経過時点の長さ変化率との対応を検討した。

(1) 粗骨材の基本物性

骨材はコンクリートの収縮を低減する働きをするので、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が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

表-2 比較の対象とした物性値と実験結果

比較対象とした物性		測定方法	長さ変化率との関係	
			関係式	決定係数
粗骨材の基本物性	絶乾密度	JIS A 1110	1次式	0.22
	吸水率	JIS A 1110	1次式	0.21
	安定性	JIS A 1122	1次式	0.56
粗骨材の水蒸気吸着率		20℃, 湿度33%での吸着率	1次式	堆積岩0.88 火成岩0.50
コンクリートの弾性係数	撓み振動	JIS A 1127 (角柱供試体)	2次式	0.61
	縦振動	JIS A 1127 (円柱供試体)	2次式	0.58
	超音波	超音波伝搬速度より算出 (円柱供試体)	2次式	0.55
	静弾性(1)	JIS A 1149 (1/3応力割線)	2次式	0.33
	静弾性(2)	初期接線	2次式	0.60

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）を挙げた。

(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対応するという報告がある³⁾。比表面積の測定方法には気体吸着BET法（JIS R 1626）があるが、これより簡易な方法として、絶乾状態の骨材を20℃、相対湿度33%の容器に入れ、骨材に吸着される水蒸気量を測定することで、それが比表面積と対応するという報告³⁾があり、この方法に準拠して10日間経過時点の水蒸気吸着率を測定した。

(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はそれ自体の弾性係数が低いことが予想され、また、それをを用いたコンクリートの弾性係数も低くなることが予想される。このことから、コンクリートの種々の弾性係数を測定し、これらの値と長さ変化率を比較した。

- 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の撓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3本ずつ作製し、材齢28日後に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)で作製した円柱供試体（材齢28日）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)で作製した円柱供試体（材齢28日）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、ひずみ測定はコンプレッソメータ（変位計）により行い、破壊の1/3応力までの応力-ひずみ曲線から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。

3. 実験結果

3.1 長さ変化試験結果

6ヶ月経過時点の長さ変化率を図-1に示す。これより、堆積岩の長さ変化率のデータの分布幅は火成岩に比較して大きい傾向にあった。この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。

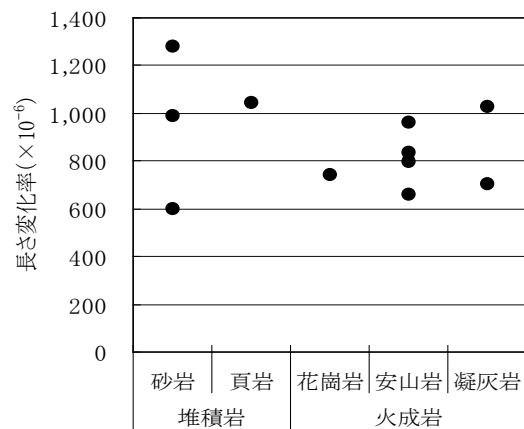


図-1 長さ変化試験結果

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、吸水率および安定性とコンクリートの長さ変化率との関係を図-2～4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が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。各骨材物性と長さ変化率との対応関係の良否を示す決定係数（図中のR²）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やや高くなった。

*土木用語解説：コンクリートの弾性係数

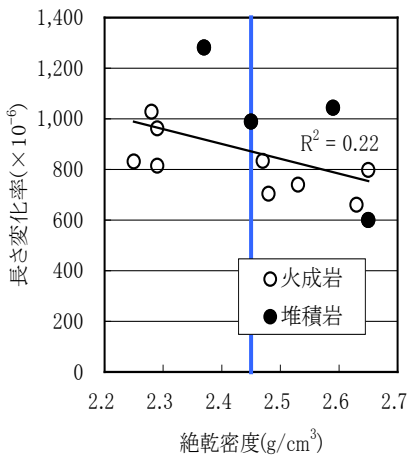


図-2 骨材の絶対乾密度と長さ変化率との関係

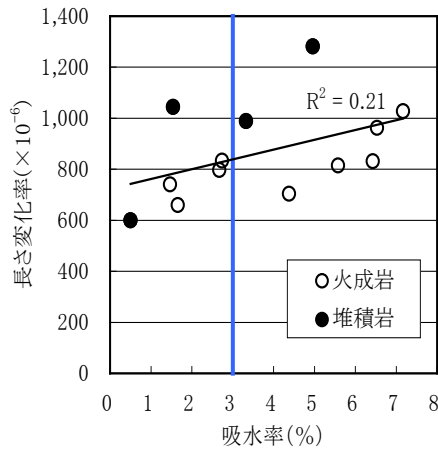


図-3 骨材の吸水率と長さ変化率との関係

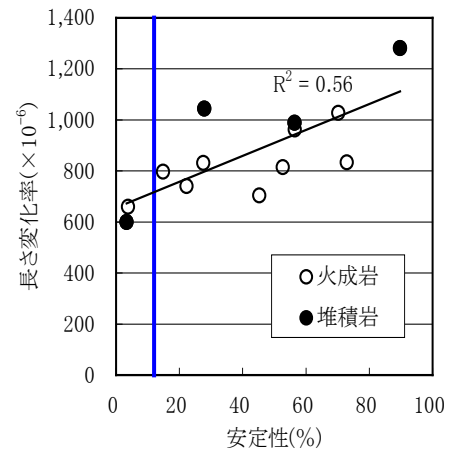


図-4 骨材の安定性と長さ変化率との関係

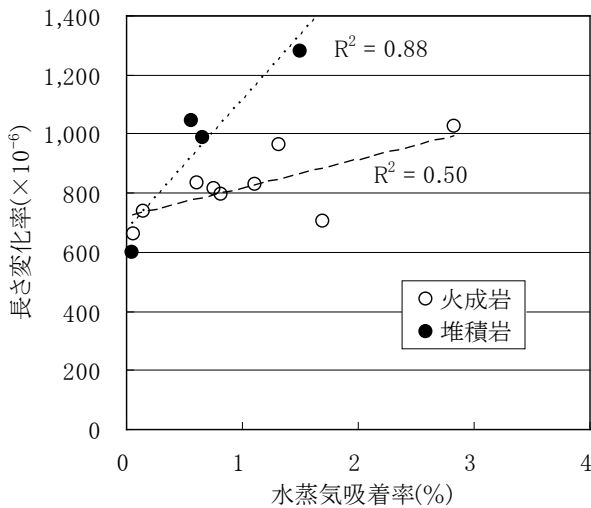


図-5 水蒸気吸着率と長さ変化率の関係

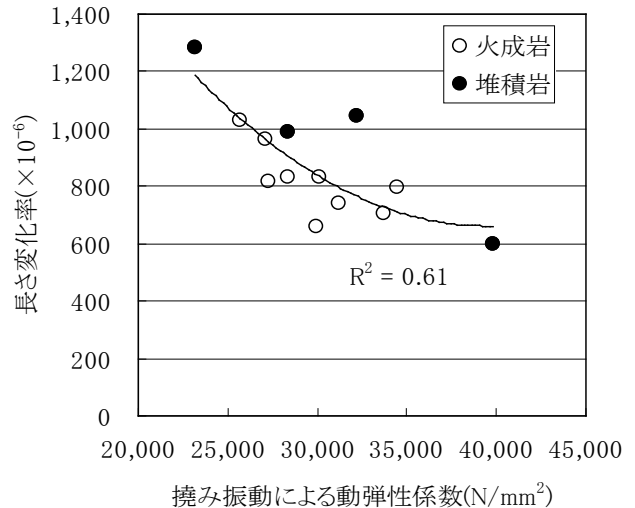


図-6 動弾性係数と長さ変化率の関係

3.3 粗骨材の水蒸気吸着率と長さ変化率の関係

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-5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、火成岩と堆積岩に分類すれば比較的良い対応関係を示した。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を要す。

3.4 動弾性係数と長さ変化率の関係

撓み振動による動弾性係数と長さ変化率との関係を図-6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や超音波による動弾性係数も概ね同様の結果を示した。決定係数を表-2に示す。

3.5 静弾性係数と長さ変化率の関係

割線弾性係数と長さ変化率との関係を図-7に示すが、図-6に示した動弾性係数の図と比較すると、対応関係は悪くなった。

これに対して、荷重載荷初期の接線弾性係数は表-2に示すように決定係数は動弾性係数と同程度の値を示した。ただし、初期接線による静弾性係数の測定は容易ではない。

4. 乾燥収縮率推定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手法が必要となる。今回の実験は対象とした骨材の種類も限られて

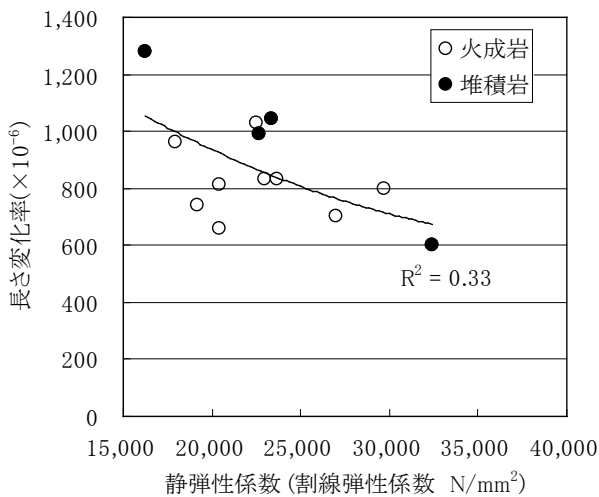


図-7 静弾性係数と長さ変化率の関係

おり、必ずしも十分な結果ではないが、本実験結果の範囲内で考えられる一つの試案を述べる。

今回の実験結果と試験の簡便性から、長さ変化率と比較的対応の良い物性としてコンクリートの動弾性係数が挙げられる。圧縮強度用の管理供試体は必ず作製するので、超音波法等で動弾性係数を測定するのは比較的容易である。

一方、図-2～4には現在の骨材基準を青線で示した。この骨材基準を満足している範囲において、長さ変化率が 8×10^{-4} を超えるデータは堆積岩の一部のみであり、火成岩は全て 8×10^{-4} 以下となった。また、堆積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、粗骨材が堆積岩の場合には、骨材の品質基準を満足している場合であっても、吸水率や安定性の値が十分に小さくない場合は、圧縮強度試験用の供試体等を用いて動弾性係数を測定し、その値から適否を判定する方法が考えられる。具体的な数値の設定は今後の研究に委ねる。

なお、岩種が火成岩の場合には、骨材の品質基準を満足していることを確認することで、長さ変化の照査を省略できる可能性がある。

5. まとめと今後の課題

- (1) 今回の実験の範囲では、コンクリートの長さ変化率と最も良い対応を示したのはコンクリートの動弾性係数であった。
- (2) 実験結果から、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試案を述べた。
今回の実験の結果、骨材の種類によってコンクリートの長さ変化率が異なること、また、長さ変化率と対応が良いと思われるいくつかの物性値についてその特徴を整理することができた。この結果から長さ変化率推定法の一試案を述べたが、簡易な一つの物性値のみから精度の高い推定を行うことは困難で、要求される推定精度のレベルに応じて複数の指標を組み合わせるなど、合理的な照査方法を構築していくことが課題である。今後ともデータを増やして検討を継続する予定である。

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）、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.31-1、pp.97-102、2009.7
- 3) 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

片平 博*



独立行政法人土木研究所
つくば中央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
Hiroshi KATAHIRA

渡辺博志**



独立行政法人土木研究所
つくば中央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、博士（工学）
Dr.Hiroshi WATANABE