

論文 最近の試験データを用いた土木学会の収縮ひずみ予測式の適用性に関する検討

藤井 隆史*1・下村 匠*2

要旨：2012年に改訂された土木学会コンクリート標準示方書の収縮ひずみの予測式は、JIS A 1129 試験による実験値を概ね±50%の精度で推定できるとされている。本論文では、この予測式について、骨材の品質を表わす係数 α の選択方法を骨材の岩種に着目して検証した。石灰岩骨材を含む一般的な骨材であれば、骨材の品質の影響を表わす係数 α には4を用いればよい。一方で、砂岩骨材は、骨材の品質が乾燥収縮ひずみに与える影響は大きい。したがって、予測式中の骨材の品質の影響を表わす係数 α には、砂岩骨材を一部にでも用いた場合は6を用いるのがよい。

キーワード：収縮ひずみ、土木学会コンクリート標準示方書、JIS A 1129 試験、予測式、骨材、結合材

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮は、部材のたわみ、ひび割れ、プレストレスの減少等に影響する構造物の設計における重要な値である。コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定には長期の時間を要するため、設計段階においては、予測式を用いて値を求めることも多い。土木学会コンクリート標準示方書（以下、示方書）の乾燥収縮ひずみの予測式¹⁾は、2012年に改訂された²⁾。この予測式は、全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会が、平成22年度に全国の生コンクリート工業組合から収集したデータ³⁾とセメント協会が昭和54年および昭和56年に収集したデータ^{4),5)}をもとに作成され、JIS A 1129 試験による実験値を概ね±50%の精度で推定できるとされている^{2),6)}。この予測式では、骨材の影響を考慮するために、骨材中に含まれる水分量 $\Delta\omega$ を用いているが、骨材の種類によって、その影響の大きさが異なるため、骨材の品質を表わす係数 α を乗じている。骨材の品質を表わす係数は、 $\alpha=4\sim6$ の値を用いることとされており、標準的な骨材では、 $\alpha=4$ としてよいとされている。予測式の作成過程を示した資料^{2),6)}では、砂岩骨材を用いた場合には、 $\alpha=6$ とするのがよいと報告されているが、砂岩骨材がどの程度用いられた場合に $\alpha=6$ を選択するかは示されていない。

全国生コンクリート工業組合連合会は、予測式の作成に用いられたデータ以外にも、乾燥収縮ひずみのデータを全国の生コンクリート工業組合から収集し取りまとめている^{7),8),9)}。本論文では、全国生コンクリート工業組合連合会が収集した最近のデータを用いて、示方書の収縮ひずみの予測式について、骨材の品質を表わす係数 α の選択方法を骨材の岩種に着目して検証を行った。また、結合材の種類の影響および乾燥期間が短い場合の精度についても検証を行った。

2. 土木学会コンクリート標準示方書の予測式

2017年制定の示方書〔設計編〕では、収縮の特性値は、JIS A 1129 試験（100×100×400mm 供試体、水中養生7日後、温度20℃、相対湿度60%の環境下で6か月乾燥後の収縮ひずみ）によるものとされている。試験によらない場合は、式(1)に示す予測式により特性値を設定する。

$$\varepsilon'_{sh} = 2.4 \left(W + \frac{45}{-20+30 \cdot C/W} \cdot \alpha \cdot \Delta\omega \right) \quad (1)$$

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

W ：コンクリートの単位水量（ kg/m^3 ）

$(W \leq 175 \text{ kg/m}^3)$

C/W ：セメント水比

α ：骨材の品質の影響を表わす係数（ $\alpha=4\sim6$ ）

標準的な骨材の場合は $\alpha=4$ としてよい。

$\Delta\omega$ ：骨材中に含まれる水分量

$$\Delta\omega = \frac{\omega_S}{100+\omega_S} S + \frac{\omega_G}{100+\omega_G} G$$

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 ）

収縮ひずみの経時変化曲線 $\varepsilon'_{sh}(t, 7)$ は、以下の式を用いて算出する。

$$\varepsilon'_{sh}(t, 7) = \frac{\varepsilon'_{sh,inf}(t-7)}{\beta+(t-7)} \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon'_{sh}(t, 7)$ ：材齢7日に乾燥を開始したコンクリートの材齢 t 日における収縮ひずみ

$\varepsilon'_{sh,inf}$ ：乾燥収縮ひずみの最終値

β ：乾燥収縮ひずみの経時変化を表わす項

$\varepsilon'_{sh,inf}$ および β は、以下の式を用いて算出する。

$$\varepsilon'_{sh,inf} = \left(1 + \frac{\beta}{182} \right) \cdot \varepsilon'_{sh} \quad (3)$$

*1 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻准教授 博士（工学）（正会員）

*2 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻教授 博士（工学）（正会員）

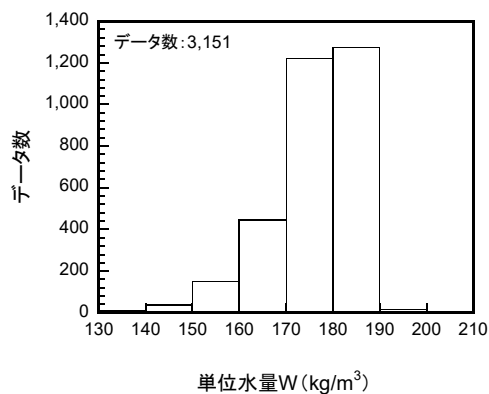


図-1 単位水量の範囲

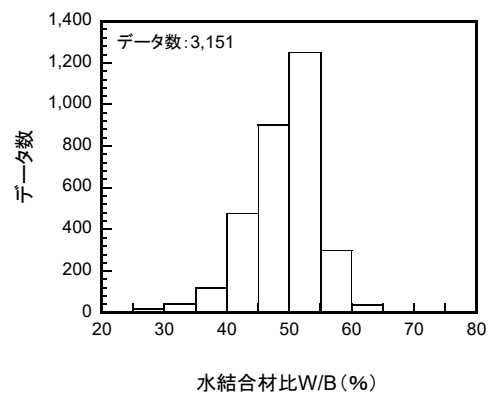


図-2 水結合材比の範囲

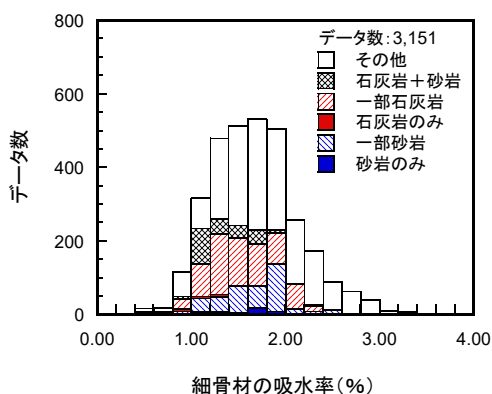


図-3 細骨材の吸水率の範囲

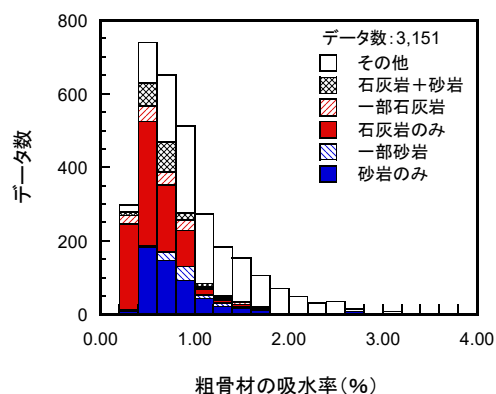


図-4 粗骨材の吸水率の範囲

$$\beta = \frac{30}{\rho} \left(\frac{120}{-14+21C/W} - 0.70 \right) \quad (4)$$

ここに、 ρ : コンクリートの単位容積質量 (g/cm^3)

本予測式による推定値は、個々の試験値に対して最大で±50%程度のばらつきがあることから、これらの不確実性の影響を考慮しなければならないとされている。2017 年制定示方書の予測式は、2012 年に改定されたものが踏襲されている。

3. 検証に使用したデータの概要

本研究では、全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会が、平成 20 年から平成 24 年にかけて調査した 3,486 件のデータのうち、収縮低減剤、収縮低減型（高性能）AE 減水剤、尿素、膨張材などの収縮低減効果のある混和材料および人工軽量骨材を用いたものを除き、さらに 2. に示す推定値の計算に必要な情報が含まれる 3,151 件のデータを検証対象とした。乾燥収縮ひずみの実験値は、乾燥期間 182 日のものが 3,108 件、乾燥期間 28 日のものが 955 件で、このうち、乾燥期間 28 日と 182 日の両方の実験値があるものが 912 件ある。

検証対象としたデータの単位水量、水結合材比、細骨材の吸水率および粗骨材の吸水率の範囲を、それぞれ、図-1、図-2、図-3 および図-4 に示す。式(1)では、単位水量の範囲は $175\text{kg}/\text{m}^3$ 以下とされているが、本検証

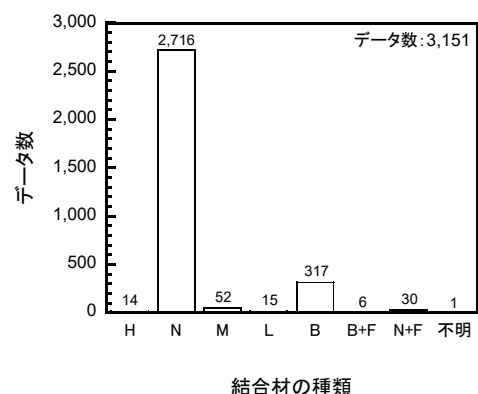


図-5 結合材の種類ごとのデータ数

では、単位水量が $175\text{kg}/\text{m}^3$ 超えるものも検証対象とした。水結合材比の範囲は、23.0～71.1%で中央値は 50.0%である。細骨材および粗骨材の吸水率について、乾燥収縮が小さくなると言われる石灰岩が用いられているものに注目すると、他の骨材に比べて総じて吸水率が小さいことが分かる。一方、乾燥収縮が大きいと言われる砂岩が用いられているものは、他の骨材と同程度の吸水率である。なお、図中の「その他」には、前述の石灰岩および砂岩以外の岩種の砕砂、碎石および砂、砂利、高炉スラグ骨材、銅スラグ細骨材を用いたものが含まれている。

検証対象としたデータに用いられている結合材の種類を図-5 に示す。図中の H、N、M および L は、それぞれ、早強ポルトランドセメント、普通ポルトランドセ

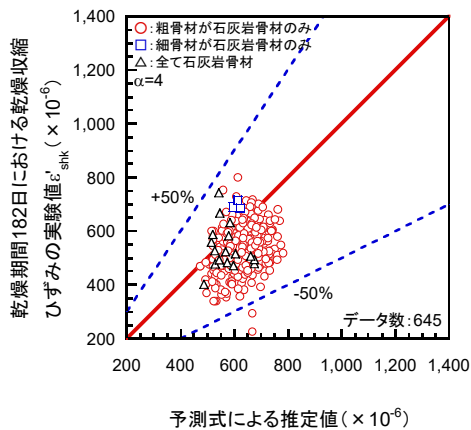


図-6 石灰岩骨材を用いたコンクリートで $\alpha=4$ とした場合の精度

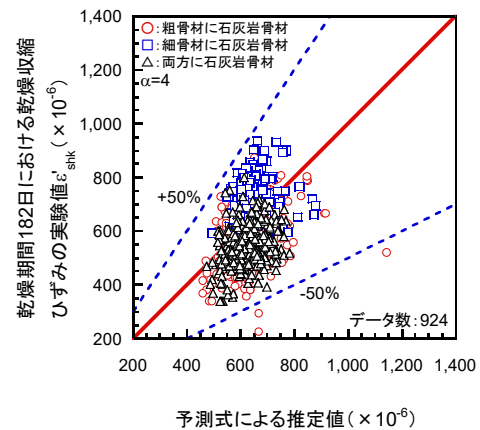


図-7 骨材の一部に石灰岩骨材を用いたコンクリートで $\alpha=4$ とした場合の精度

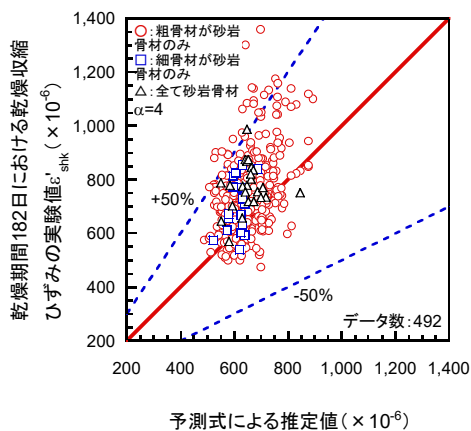


図-8 砂岩骨材を用いたコンクリートで $\alpha=4$ とした場合の精度

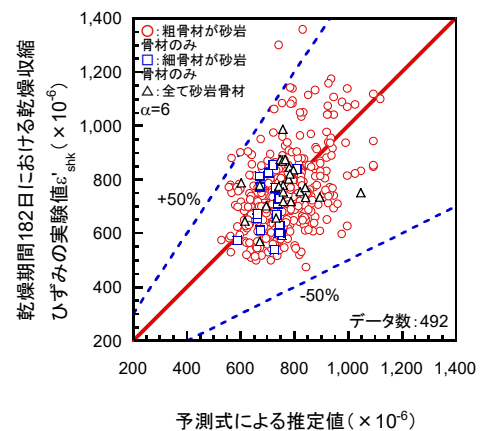


図-9 砂岩骨材を用いたコンクリートで $\alpha=6$ とした場合の精度

メント、中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントが用いられているものである。図中のBBは、高炉セメントB種を用いたものを、BB+Fは、高炉セメントB種とフライアッシュを併用したもの、N+FはフライアッシュセメントB種または普通ポルトランドセメントとフライアッシュを併用したものである。主に普通ポルトランドセメントを用いたものが収集されている。

4. 予測精度の検証

4.1 骨材の影響

図-6は、結合材には普通ポルトランドセメントのみを用い、細骨材、粗骨材、または、その両方に、石灰岩骨材のみが用いられているコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と予測式による推定値とを比較したものである。骨材の品質の影響を表わす係数 α には、4を用いて計算している。石灰岩骨材を用いると乾燥収縮ひずみは小さくなると言われているが、図-3および図-4に示すように、石灰岩骨材の吸水率は、概ね小さく、その影響でコンクリートの乾燥収縮ひずみも小さい値となっている。骨材の品質の影響を表わす係数 α が小さいほど、予測

式による推定値は小さくなる。骨材の品質の影響を表わす係数 α に、最も小さい4としても実験値に比べるとやや大きい値を示す傾向であるが、概ね $\pm 50\%$ の範囲内にあることが分かる。図-7は、図-6のデータも含めて、結合材には普通ポルトランドセメントのみを用い、骨材の一部に石灰岩骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と予測式による推定値を比較したものである。ただし、砂岩骨材を併用したものは除き、骨材の品質の影響を表わす係数 α は4を用いている。図中の○は、粗骨材の一部または全部が石灰岩骨材の結果を、□は、細骨材の一部または全部が石灰岩骨材の結果を、△は、細骨材および粗骨材の両方の一部または全部が石灰岩骨材の結果を示している。骨材の一部に石灰岩を用いたものでも、多くのデータが $\pm 50\%$ の範囲内にある。砂岩骨材を併用した場合を除き、乾燥収縮が小さいと言われる石灰岩骨材を用いた場合も、骨材の品質の影響を表わす係数 α には、4を用いればよいと考えられる。

図-8は、結合材には普通ポルトランドセメントのみを用い、細骨材、粗骨材、または、その両方に、砂岩骨材のみが用いられているコンクリートの乾燥収縮ひずみ

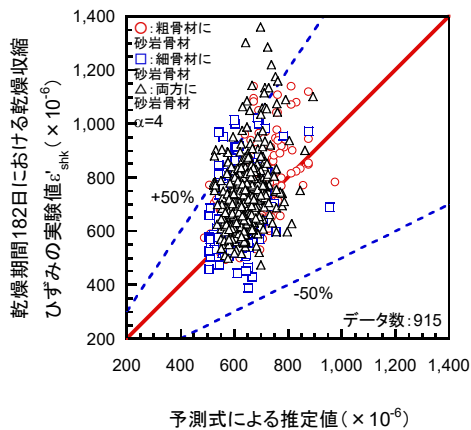


図-10 骨材の一部に砂岩骨材を用いたコンクリートで $\alpha=4$ とした場合の精度

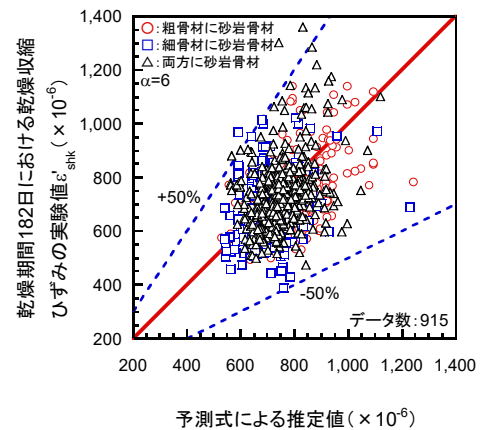


図-11 骨材の一部に砂岩骨材を用いたコンクリートで $\alpha=6$ とした場合の精度

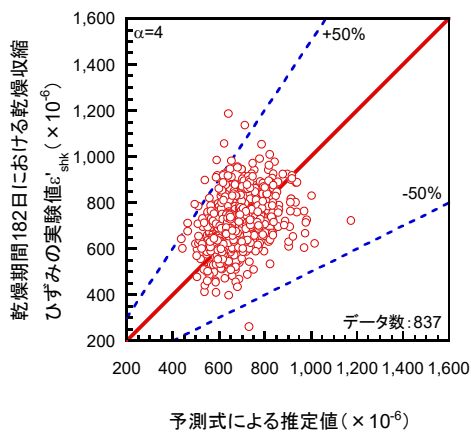


図-12 砂岩および石灰岩以外の骨材を用いたコンクリートで $\alpha=4$ とした場合の精度

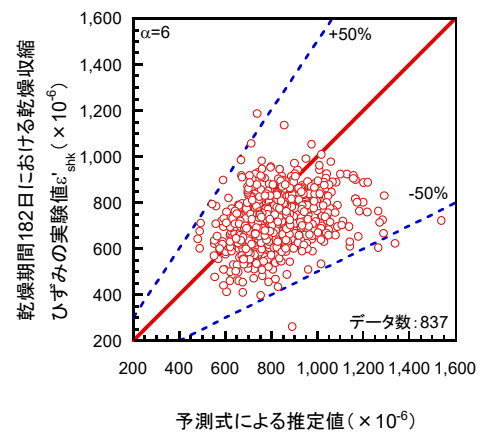


図-13 砂岩および石灰岩以外の骨材を用いたコンクリートで $\alpha=6$ とした場合の精度

の実験値と、骨材の品質の影響を表わす係数 α に最小の4を用いて計算した予測式による推定値とを比較したものである。細骨材、粗骨材のいずれか、または両方に、砂岩骨材が用いられているコンクリートでは、骨材の品質の影響を表わす係数 α には、4を用いて計算すると、実験値に比べて小さめの推定値が計算されていることが分かる。細骨材に用いた場合にも、粗骨材に用いた場合にも、同程度の差が生じている。一方、図-9は、骨材の品質の影響を表わす係数 α に最大の6を用いて計算した結果である。砂岩骨材を用いた場合には、骨材の品質の影響を表わす係数 α を6にした方が、 $\pm 50\%$ の範囲内に多くのデータがあることが分かる。

図-10は、図-8のデータも含めて、結合材には普通ポルトランドセメントのみを用い、骨材の一部に砂岩骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と、骨材の品質の影響を表わす係数 α には、4を用いて計算した予測式による推定値とを比較したものである。図中の○は、粗骨材の一部または全部が砂岩骨材の結果を、□は、細骨材の一部または全部が砂岩骨材の結果を、△は、細骨材および粗骨材の両方の一部または全部が砂岩骨材

の結果を示している。骨材の一部に砂岩骨材を用いられたコンクリートでも、骨材の品質の影響を表わす係数 α には、4を用いて計算すると、実験値に比べて小さめの推定値が計算されていることが分かる。これに対して、図-11は、骨材の一部に砂岩骨材を用いたコンクリートに対して、骨材の品質の影響を表わす係数 α に、6を用いて計算した結果である。骨材の一部が砂岩骨材の場合には、骨材の品質の影響を表わす係数 α に6を用いた方が、 $\pm 50\%$ の範囲内に多くのデータがあり、予測式による推定値と実験値がよく一致するようになることが分かる。

図-12は、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用い、細骨材および粗骨材の両方に、砂岩または石灰岩のいずれの骨材も用いられていないコンクリートの乾燥期間182日における乾燥収縮ひずみの実験値と示方書の予測式による推定値とを比較したものである。ただし、骨材の品質の影響を表わす係数 α は、4として計算している。一方、図-13は、骨材の品質の影響を表わす係数 α を6として計算した予測式による推定値と実験値とを比較したものである。骨材の品質の影響を表わす係数 α を4として計算した場合、全体としては、やや小さい値を推

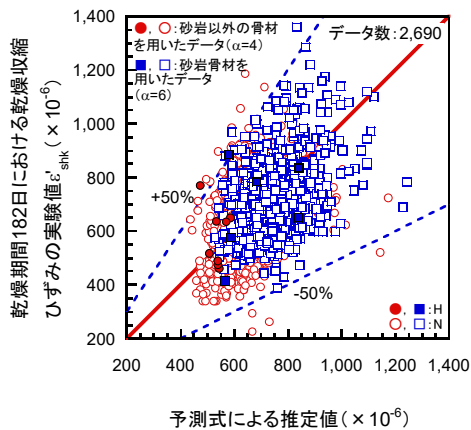


図-14 普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントを用いた場合の精度

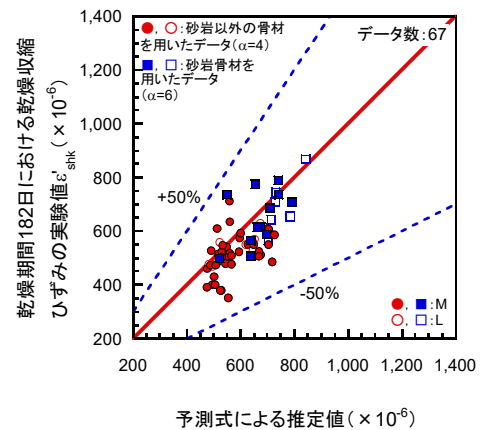


図-15 中庸熱ポルトランドセメントまたは低熱ポルトランドセメントを用いた場合の精度

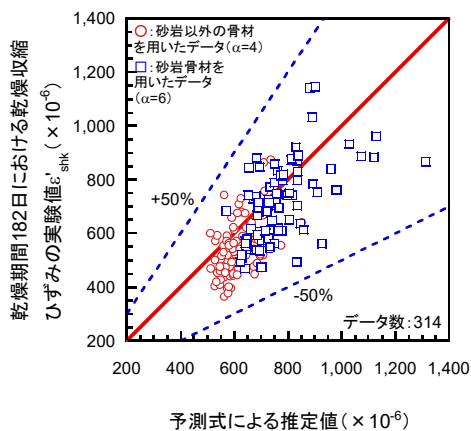


図-16 高炉セメント B 種を用いた場合の精度

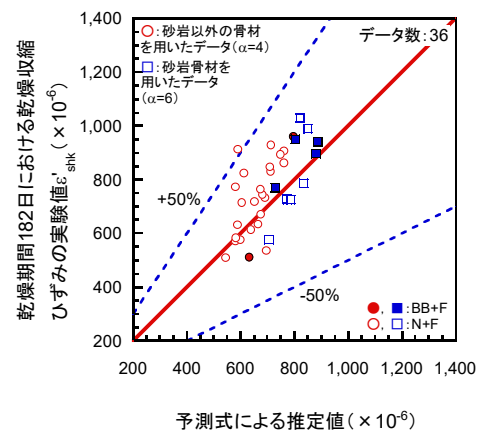


図-17 フライアッシュを用いた場合の精度

定する結果となっているのに対し、 α を 6 として計算した場合、全体としては、やや大きい値を推定する結果となっている。これらのデータには、砂や砂利を用いたデータが含まれており、砂岩を含んでいるものもあることが推測される。示方書では、「標準的な骨材の場合は $\alpha=4$ としてよい。」とされており、砂岩の骨材も用いられていないコンクリートでは、骨材の品質の影響を表わす係数 α には 4 を用いればよいと考える。しかし、砂および砂利は、品質のばらつきもあるため、砂岩が多く産出されるような産地の砂や砂利によっては、骨材の品質の影響を表わす係数 α を大きくした方がよい。

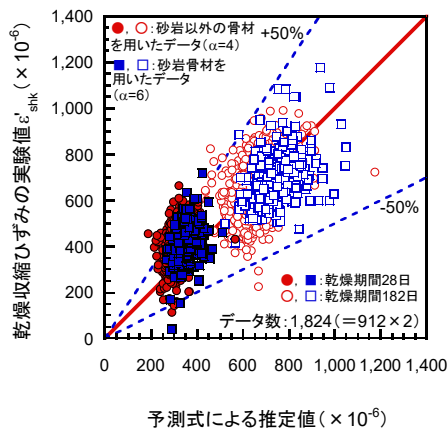
4.2 結合材の影響

図-14 は、結合材に普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と予測式による推定値とを比較したものである。中塗りおよび白抜きのデータは、それぞれ、早強ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメントを用いたものである。骨材の品質の影響を表わす係数 α には、骨材の一部にでも砂岩骨材を用いているものは 6 を用い、砂岩が用いられていないものでは 4 を用いて計算を行っている。いずれのセメントを用いたものも、

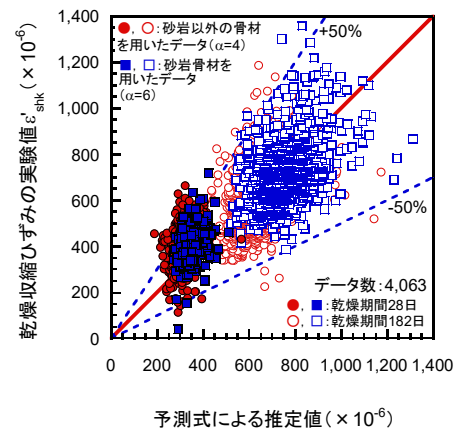
概ね $\pm 50\%$ の範囲で推定されている。

図-15 は、結合材に中庸熱ポルトランドセメントまたは低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と予測式による推定値とを比較したものである。中塗りおよび白抜きのデータは、それぞれ、中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントを用いたものである。データ数は少ないが、中庸熱ポルトランドセメントまたは低熱ポルトランドセメントを用いた場合も推定値に対する実験値の差は、概ね $\pm 50\%$ の範囲である。

図-16 は、結合材に高炉セメント B 種のみを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と予測式による推定値とを比較したものである。高炉セメント B 種を用いた場合にも、推定値に対する実験値の差は、概ね $\pm 50\%$ の範囲である。図-17 は、結合材にフライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と予測式による推定値とを比較したものである。中塗りおよび白抜きのデータは、それぞれ、高炉セメント B 種および普通ポルトランドセメントとフライアッシュを併用して用いたものである。データ数は少ないが、フライアッシュを用いた場合も推定値に対する実験値の差は、概ね $\pm 50\%$



図一18 乾燥期間 28 日の精度



図一19 全データの精度

の範囲である。予測式の作成では、主に普通ポルトランドセメントのみを用いたものを対象に行われたが、JIS A 1129 試験の試験値の予測精度に与える結合材の種類の影響は、小さいといえる。

4.3 乾燥期間 28 日の予測精度

図一18は、乾燥期間が28日と182日の両方の実験値が収録されている912件について、乾燥期間182日に加えて、乾燥期間28日の収縮ひずみを式(1)、式(2)、式(3)および式(4)を用いて計算した予測式による推定値と実験値を比較したものである。中塗りおよび白抜きのデータは、それぞれ、乾燥期間が28日および182日のものである。乾燥期間28日における推定値は、実験値に比べてやや小さめの値となっている。図一19は、本研究に用いたすべての実験データの予測式による推定値と実験値を比較したものである。乾燥期間182日の推定値は、実験値と比較して概ね±50%の範囲にあるが、乾燥期間28日における推定値は、実験値に比べてやや小さめの値となっている。乾燥期間が短い場合には、小さめの値になることを留意しておくことが必要と思われる。

5. まとめ

本論文で得られた知見を以下に示す。

- (1) 砂岩骨材を一部でも用いる場合や砂岩が多く産出される産地の砂や砂利には、骨材の品質の影響を表わす係数 α は、6を用いて計算するのがよい。これに対して、石灰岩骨材を含む他の一般的な骨材を用いる場合、骨材の品質の影響を表わす係数 α は、4を用いればよい。
- (2) 予測精度に与える結合材の種類の影響は小さい。
- (3) 乾燥期間182日の予測式による推定値は、実験値と比較し概ね±50%の範囲にあるが、乾燥期間28日における推定値は、実験値に比べて小さめの値となる。

謝辞：本論文に用いたデータは、全国生コンクリート工

業組合連合会より提供頂いた。ここに、謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.107-109，2018.3
- 2) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書改定資料ー基本原則編・設計編・施工編ー，コンクリートライブラリー138，pp.65-70，2012.3
- 3) 全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会：乾燥収縮に関する実態調査結果報告書(平成22年度)，新技術開発報告 No.38，全国生コンクリート工業組合連合会，2010.12
- 4) セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-31「粗骨材の品質がコンクリートの諸性質に及ぼす影響」，1979.6
- 5) セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-32「細骨材の品質がコンクリートの諸性質に及ぼす影響」，1981.3
- 6) 綾野克紀，藤井隆史，平喜彦：コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に関する研究，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.69，No.4，pp.421-437，2013.12
- 7) 全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会：乾燥収縮に関する実態調査結果報告書(平成20年度)，新技術開発報告 No.33，全国生コンクリート工業組合連合会，2009.3
- 8) 全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会：乾燥収縮に関する実態調査結果報告書(平成21年度)，新技術開発報告 No.35，全国生コンクリート工業組合連合会，2009.11
- 9) 全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会：乾燥収縮に関する実態調査結果報告書(平成24年度)，新技術開発報告 No.42，全国生コンクリート工業組合連合会，2014.3