

論文 レディーミクストコンクリートの乾燥収縮制御を目的とした骨材のスクリーニングに関する検討

佐藤 晴香*1・寺西 浩司*2

要旨: 本研究では、全国各地のレディーミクストコンクリート工場の標準配合表を基にして、複合理論に基づく乾燥収縮予測式により、骨材の乾燥収縮ひずみのスクリーニング値を計算した。そして、その値を 170×10^{-6} 以下として骨材を選定すれば、レディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみを概ね 800×10^{-6} 以下に制御できるとの知見を得た。また、この値に対応する骨材特性値のスクリーニング値は、細骨材および粗骨材の気乾含水率 1.2%以下および 0.7%以下、粗骨材の比表面積 $6.5\text{m}^2/\text{g}$ 以下であることを示した。

キーワード: レディーミクストコンクリート、標準配合、乾燥収縮予測式、複合理論、気乾含水率、比表面積

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮に関しては、2009年版のJASS 5 から、計画供用期間の級が長期または超長期の場合の乾燥収縮率の上限値が 8×10^{-4} と規定された。また、このことを契機として、コンクリートの乾燥収縮ひずみに対する関心が高まり、多くの研究が行われるようになった。一方で、骨材の乾燥収縮ひずみは、岩種や産地などにより様々に異なり、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、使用する骨材の乾燥収縮ひずみの大きな影響を受ける。

そこで、本研究では、各地のレディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場という）からコンクリートの標準配合表を入手し、複合理論に基づく乾燥収縮予測式により、生コン工場や呼び強度、スランプごとに、レディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみを所定の値以下に制御できるような、骨材の乾燥収縮ひずみの値を計算した。また、それらの結果を踏まえ、レディーミクストコンクリートに使用する骨材のスクリーニング値を提示した。さらに、提示した値に対応するような骨材の各種特性値についても併せて検討した。

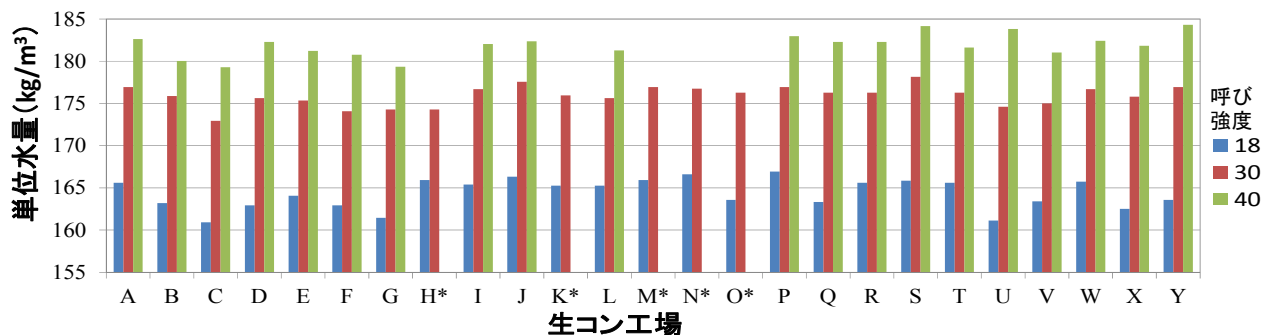
2. 生コン工場の標準配合

本研究では、各都道府県の生コンクリート工業組合を介して、表-1 に示すように、できるだけ広範な地方から生コン工場の標準配合表を入手した。図-1~3 に、各生コン工場における呼び強度 18, 30, 40 の標準配合の単

表-1 標準配合表の入手先の生コン工場

地方	都道府県	生コン工場記号
北海道	北海道×2	A, B
東北	秋田, 岩手, 山形	C, D, E
関東	東京×2, 茨城, 群馬, 山梨	F, G, H, I, J
中部	愛知×2, 三重	K, L, M
近畿	滋賀, 大阪	N, O
中国	岡山, 広島*, 鳥取	P, Q, R
四国	徳島, 香川, 愛媛, 高知	S, T, U, V
九州・沖縄	大分, 鹿児島, 沖縄	W, X, Y

*生コンクリート工業組合の標準配合表



*当該工場には、呼び強度 40 の標準配合は存在しない（高性能 AE 減水剤を使用する配合のみ）

図-1 単位水量

*1 名城大学大学院 理工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 名城大学 理工学部建築学科教授 博士(工学)(正会員)

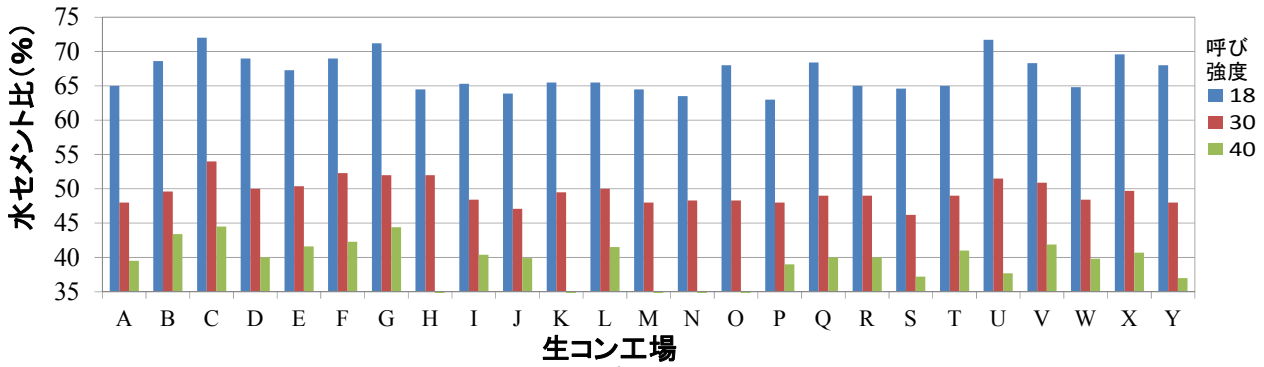
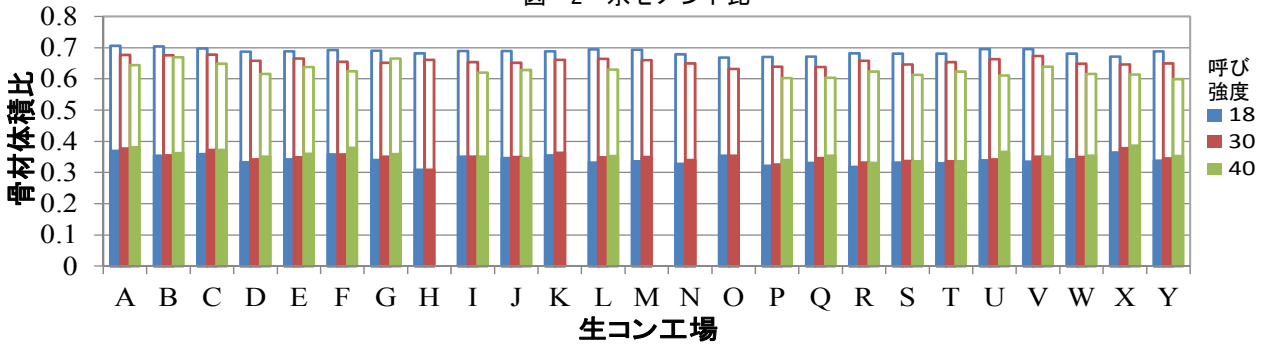


図-2 水セメント比



*白抜き部分は細骨材体積比，塗りつぶし部分は，粗骨材体積比を示す。

図-3 骨材体積比

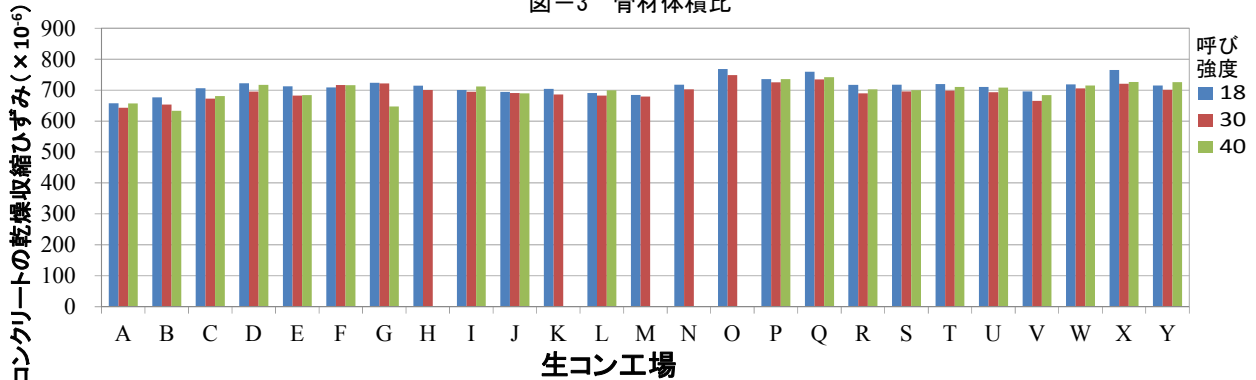


図4 コンクリートの乾燥収縮ひずみ（乾燥期間182日）

位水量，水セメント比および骨材体積比（単位骨材体積/1000）を示す（普通コンクリート，スランプ18cm，粗骨材の最大寸法20mm，普通ポルトランドセメント，AE減水剤のケース）。

どの工場においても，呼び強度が高いほど，単位水量が大きくなり，骨材体積比が小さくなることからわかる。また，これらの値の生コン工場間での相違は，全体として，呼び強度などの配合による相違に比べて比較的小さいといえる。

3. 使用骨材の乾燥収縮ひずみを一定とした場合のコンクリートの乾燥収縮ひずみ

本章では，骨材のスクリーニング値の検討に先立ち，まず，生コン工場や，呼び強度およびスランプの変化に伴う調査の変動がレディミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響について検討した。

検討にあたっては，まず，次の事項を仮定した。すなわち，①細骨材と粗骨材の乾燥収縮ひずみは同一である，②骨材の弾性係数（ E_a ）は60kN/mm²（一般的な骨材の平均的な値）である。そのうえで，さらに，骨材の乾燥収縮ひずみを一定値（ここでは 150×10^{-6} ）と仮定し，入手した各生コン工場の標準配合表を基に，普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの乾燥期間182日における乾燥収縮ひずみを計算した。

また，コンクリートの乾燥収縮ひずみは，筆者らが過去に提案した複合理論に基づく汎用的な乾燥収縮予測式¹⁾を，上記①の仮定を踏まえたうえで，さらにJIS乾燥収縮試験の結果のみを推定する形に特化した次式により計算した。

$$\varepsilon_{sc} = \frac{1}{n_c} \left\{ (1 - V_a) \varepsilon_{sp} - nV_a \varepsilon_{sa} \right\} \quad (1)$$

ここに，

$$n_c = 1 + \frac{2(n-1)V_a}{n+1-(n-1)V_a} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{sp} = \frac{t}{2.31(\alpha \cdot W/C + \beta) + t} (\lambda \cdot W/C + \delta) \quad (3)$$

$$E_p = \frac{100}{W/C} \gamma + \eta \quad (4)$$

ここに、 $n = E_a/E_p$ 、 ε_s : 乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)、 E : 弾性係数(kN/mm²)、 V_a : 骨材体積比、 t : 乾燥期間(日)、 W/C : 水セメント比(%), $\alpha, \beta, \lambda, \delta, \gamma, \eta$: セメントの種類に関わる定数(表-2による)。また、添字 c, p, a は、それぞれコンクリート、セメントペースト、骨材を表す。

表-2 定数

α	β	λ	δ	γ	η
0.322	4.77	86.3	54	5.9	4.2

図-4 に計算結果を示す。同図から、生コン工場や呼び強度の変化に伴うコンクリートの乾燥収縮ひずみの変動は、最大で 135×10^{-6} 程度であり、比較的小さいことがわかる。したがって、次章以降に示すように、生コン工場や呼び強度などにかかわらず、レディーミクストコンクリート全体に対して、乾燥収縮制御の観点から骨材の

乾燥収縮ひずみに関するスクリーニング値を一律に定めることは合理的であるといえる。

4. コンクリートの乾燥収縮ひずみが所定値以下となるような骨材の乾燥収縮ひずみの上限値

4.1 骨材の乾燥収縮ひずみの上限値

前章の考察結果を踏まえ、本章では、式(1)を骨材の乾燥収縮ひずみ ε_{sa} について整理した次式により、コンクリートの乾燥収縮ひずみ(乾燥期間 182 日)が 800×10^{-6} 以下となるような、骨材の乾燥収縮ひずみの上限値(以下、ひずみ上限値という)を計算した。

$$\varepsilon_{sa} = \frac{l}{nV_a} \{n_c \varepsilon_{sc} - (1 - V_a) \varepsilon_{sp}\} \quad (5)$$

図-5 に、スランプ 18cm における骨材のひずみ上限値の計算結果を示す。また、図-6 に、スランプ 18cm における骨材のひずみ上限値と呼び強度の関係を、図-7 に、呼び強度 18 における骨材のひずみ上限値とスランプの関係を示す。ここで、図-6 および 7 は、各地方から生コン工場を 1 工場ずつ抽出し、そのデータを示したものである。

これらの図によると、呼び強度が低く、スランプの大きい配合ほど、骨材のひずみ上限値が小さくなっており、乾燥収縮ひずみの小さい骨材を使用する必要があること

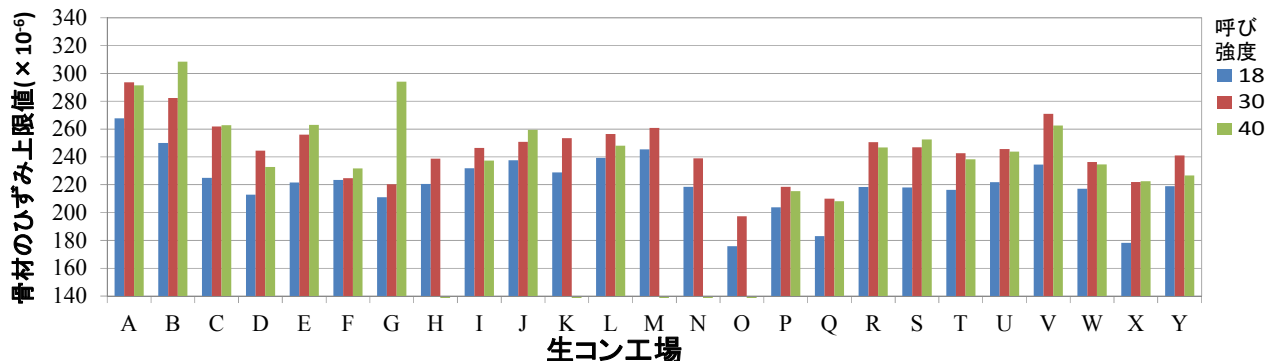


図5 骨材のひずみ上限値

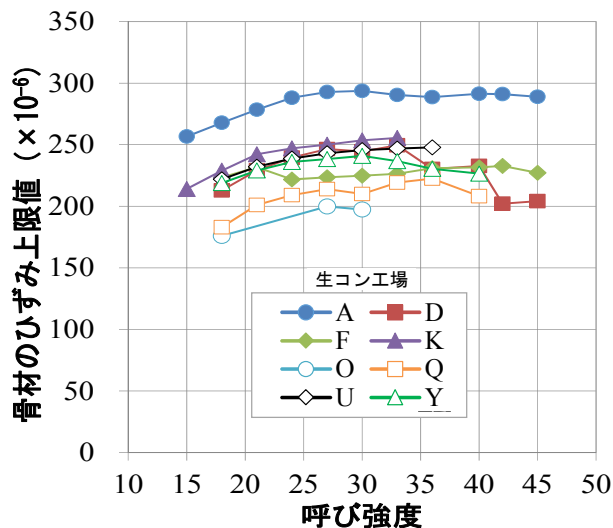


図-6 骨材のひずみ上限値と呼び強度の関係

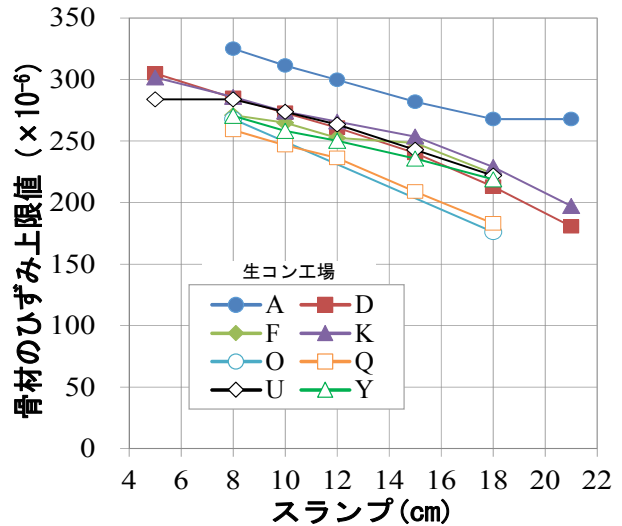


図-7 骨材のひずみ上限値とスランプの関係

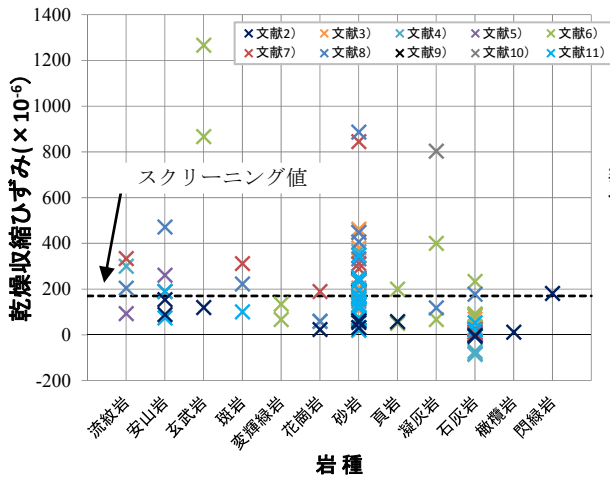


図-8 骨材の乾燥収縮ひずみの実測値(最終値)

がわかる。また、本調査の範囲が一般的な標準配合の標本であるとすれば、図-5 に示した結果から、乾燥収縮ひずみ 170×10^{-6} 以下(生コン工場 O の値)をスクリーニングの閾値として骨材を選定すれば、レディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみを 800×10^{-6} 以下に概ね制御できるものと考えられる。

4.2 骨材の乾燥収縮ひずみの実測値とスクリーニング値の関係

図-8 に、文献 2)~11) に報告されていた骨材の乾燥収縮ひずみの実測値(最終値)を、岩種別に取りまとめて示す。また、図-9 に実測値の分布を示す。これらは、骨材原石から採取したコアか粗骨材そのものにひずみゲージを貼付するなどして測定されたものである。また、これらとは別に、黒井ら¹²⁾は、関東地域における 17 の産地の硬質砂岩の乾燥収縮ひずみを測定し、その結果が $40 \sim 251 \times 10^{-6}$ の範囲にあったと報告している。

これらの図によると、全体の 60% に当たる骨材は、乾燥収縮ひずみが 170×10^{-6} 以下になっており、このことから、現在使用されている骨材の少なくとも半数以上は、前節で提示したひずみ上限値によるスクリーニングを通過するものと推測される。また、本研究で取り上げたデータは、幅広い岩種の骨材の乾燥収縮ひずみを調べることを目的として収集されたものであり、生コン工場での使用実績とは異なっているため、実際には、より高い比率の骨材がスクリーニングを通過することも十分に考えられる。ただし、骨材の中には、スクリーニング値を上回っているものもあるので、そのような骨材を使用する場合には、コンクリートの乾燥収縮に関するより詳細な検討が必要になるものと考えられる。

4.3 コンクリートの乾燥収縮ひずみが所定値以下となるような細骨材と粗骨材のひずみ上限値の関係

前節まででは、単純化のために、細骨材と粗骨材の乾燥収縮ひずみが同一であると仮定して計算を行った。し

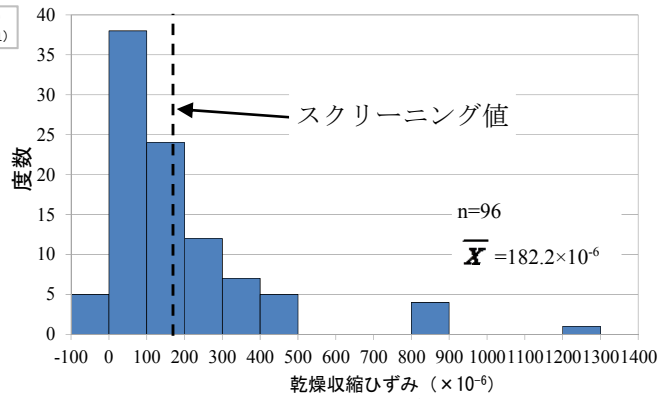


図-9 骨材の乾燥収縮ひずみの分布

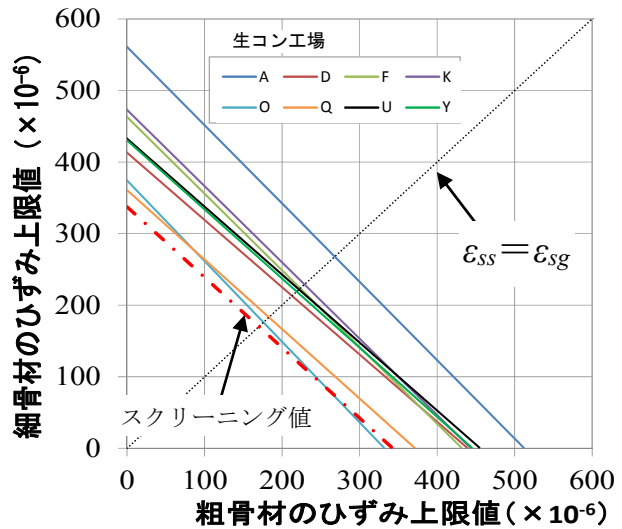


図-10 細骨材と粗骨材のひずみ上限値の関係

かし、実際には、それぞれの乾燥収縮ひずみが異なるケースが多いものと考えられる。そこで、ここでは、式(5)の代わりに、筆者らが過去に提案した乾燥収縮予測式¹⁾を、細骨材と粗骨材の乾燥収縮ひずみが異なる値であるとの前提を基に特化した次式、および式(2)~(4)を用いて、コンクリートの乾燥収縮ひずみが 800×10^{-6} 以下となるような、細骨材と粗骨材のひずみ上限値の関係を求めた。

$$V_s \epsilon_{ss} + V_g \epsilon_{sg} = \frac{1}{n} \left\{ n_c \epsilon_{sc} - (1 - V_a) \epsilon_{sp} \right\} \quad (6)$$

ここで、記号の添字 s, g は、それぞれ細骨材および粗骨材を表す。

図-10 に、呼び強度 18、スランプ 18cm における計算結果を示す(図-6 および 7 と同一工場のデータ)。ここで、同図は、4.1 節における検討と同様に、各生コン工場の標準配合における水セメント比、骨材体積比(ただし、ここでは、細・粗骨材の個々の体積比)や、 E_a (60 kN/mm^2 一定)の値を式(6)に入力したうえで、同式中の ϵ_{sg} の値を変化させてそれに対応する ϵ_{ss} の値を計算し、その結果を図示したものである。細骨材と粗骨材の乾燥収縮ひずみの組合せが、図中における生コン工場ごとの関係線より下側に位置していれば、コンクリートの乾燥収縮

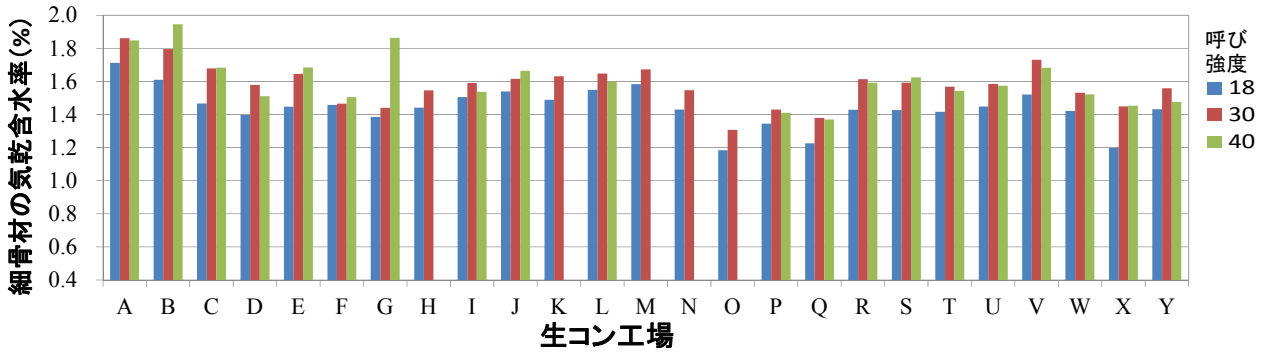


図-11 細骨材の気乾含水率の上限值

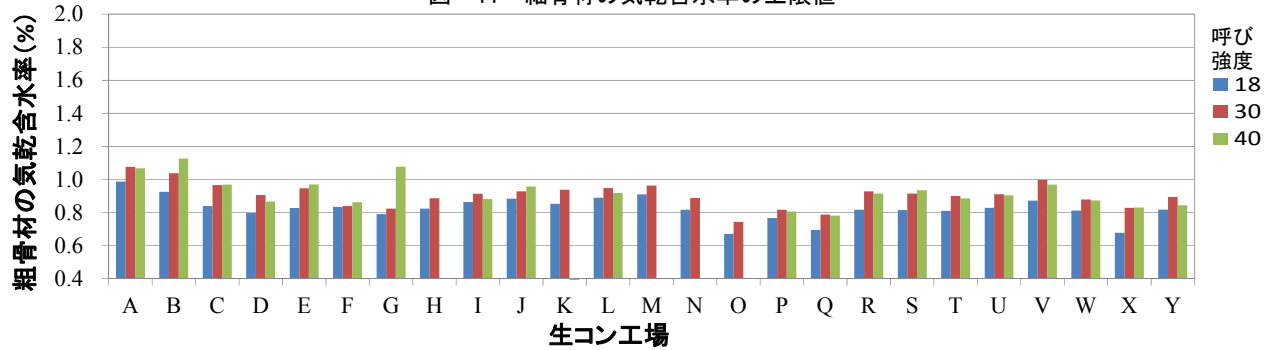


図-12 粗骨材の気乾含水率の上限值

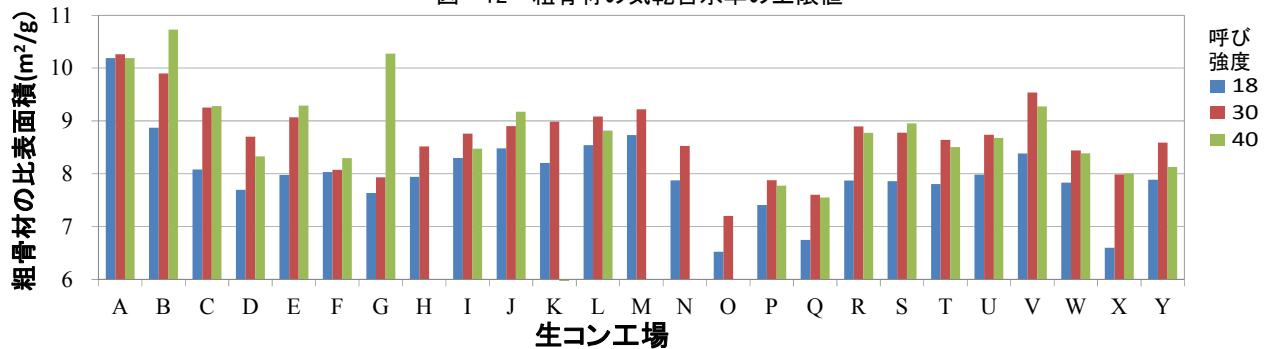


図-13 粗骨材の比表面積の上限值

ひずみは 800×10^{-6} 以下に制御されることになる。

また、図中の関係線の傾きの平均値は -0.98 であり、ほぼ -1 といつてよい。そして、このことは、細骨材と粗骨材の乾燥収縮ひずみの平均値がスクリーニング値 (170×10^{-6}) 以下 (すなわち、図中に示した一点鎖線より下側の領域) であれば、レディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみを 800×10^{-6} 以下に制御できることを意味している。

5. 骨材の特性値の上限值

筆者らは、これまでに、骨材の乾燥収縮ひずみと細・粗骨材の気乾含水率 (温度 20°C 、相対湿度 60% の環境下での含水率) や粗骨材の比表面積などとの間に密接な関係があることを報告した²⁾。ここでは、その結果を利用して、4.1 節で計算した骨材のひずみ上限値 (170×10^{-6}) に対応する各種特性値の上限值を求めた。以下に、骨材の各種特性値と乾燥収縮ひずみの関係式²⁾を示す。

$$y_s = 5.747 \times 10^{-3} \varepsilon_{sa} + 0.1736 \quad (7)$$

$$y_g = 3.450 \times 10^{-3} \varepsilon_{sa} + 0.0629 \quad (8)$$

$$S_m = 3.174 \times 10^{-3} \varepsilon_{sa} + 0.9397 \quad (9)$$

ここに、 y_s 、 y_g : 細・粗骨材の気乾含水率(%), S_m : 粗骨材の比表面積(m^2/g), ε_{sa} : 骨材の乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)。

図-11~13に、スランブ 18cm における各種特性値の上限値の計算結果を示す。これらの図における生コン工場 O の値から、気乾含水率 1.2% 以下および 0.7% 以下の細骨材および粗骨材、あるいは比表面積 $6.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 以下の粗骨材を用いれば、レディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみを 800×10^{-6} 以下に概ね制御できるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、各地のレディーミクストコンクリート工場の標準配合表を入手し、複合理論に基づく乾燥収縮予

測式により、レディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみが 800×10^{-6} 以下となるような、骨材の乾燥収縮ひずみのスクリーニング値を計算した。また、その値に対応する骨材の特性値も併せて求めた。本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 乾燥収縮ひずみ 170×10^{-6} 以下をスクリーニング値として骨材を選定すれば、レディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみを 800×10^{-6} 以下に概ね制御できる。

(2) 一般に使用されている骨材の少なくとも半数以上は、乾燥収縮ひずみが 170×10^{-6} 以下であり、スクリーニング値を満足することができる。

(3) 使用する細骨材と粗骨材の乾燥収縮ひずみの平均値がスクリーニング値 (170×10^{-6}) 以下であれば、コンクリートの乾燥収縮ひずみを 800×10^{-6} 以下に制御できる。

(4) 上記 (1) に対応する骨材特性値のスクリーニング値は、細骨材および粗骨材の気乾含水率 1.2% 以下および 0.7% 以下、粗骨材の比表面積 $6.5 \text{m}^2/\text{g}$ 以下となる。

謝辞

標準配合表の入手にあたり、各都道府県の生コンクリート工業組合およびレディーミクストコンクリート工場のご協力をいただいた。また、本研究の実施に際し、JSPS 科研究費 15K06311 の助成を受けた。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 寺西浩司, 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, No.602, pp.21-28, 2006.4
- 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, 2013.5
- 3) 井坂幸俊, 浜頭彦次, 谷村充: コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす粗骨材物性の影響 その1.粗骨材の

乾燥収縮, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.911-912, 2010.9

- 4) 田中博一, 橋田博: 骨材の種類が乾燥収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.553-558, 2009.7
- 5) 後藤貴弘, 中村俊彦, 高尾昇, 鳴瀬浩康: コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす骨材の物性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.89-94, 2010.7
- 6) 小山田哲也, 小田島悠弥, 越谷信, 藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に対する石灰石骨材の有効性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.359-364, 2010.7
- 7) 山田一徳, 中村士郎, 小田部裕一, 寺西浩司: 複合理論によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.529-534, 2013.7
- 8) 立松和彦, 荒井正直, 岩清水隆, 木村芳幹, 浦野秀男, 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, No.549, pp.1-6, 2001.11
- 9) 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, No.557, pp.89-94, 2002.7
- 10) 竹内毅典, 寺西浩司, 木村伸嘉, 前田大介: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, No.42, pp.73-76, 2004.2
- 11) 寺西浩司: コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす要因 骨材や単位水量などの影響をどのように考えるか, コンクリート工学, Vol.46, No.12, pp.11-19, 2008.12
- 12) 黒井登起雄: 砕石コンクリートの乾燥収縮に及ぼす関東地域の硬質砂岩の影響, セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.49-54, 2015.10