

論文

[1033] コンクリートの乾燥収縮に及ぼす配合の影響

正会員 藤原 忠司（岩手大学工学部）

正会員 石田 宏（岩手大学工学部）

准会員 國成（岩手大学工学部）

正会員 ○ 小西 俊之（岩手大学大学院）

1. まえがき

コンクリートの乾燥収縮には、多くの要因が関連する。その中でも、コンクリートの配合は基本的要因の一つであり、これに着目した研究が数多く存在している。

筆者らも、セメント系硬化体（セメントペースト、モルタル、コンクリート）の配合と乾燥収縮との関連を実験的に明らかにし、さらに配合の観点からみた収縮の予測方法を検討して、多くの知見を得た⁽¹⁾。しかし、この研究では、主としてモルタルについて検討しており、実用的に最も重要なコンクリートに関しては、供試体寸法など実験条件に不十分な点があるため、的確な検討を行えないままに終わった。

本研究では、先に得られた結果を踏まえ、コンクリートの配合と乾燥収縮との関連をより明確にしようとしている。

2. 実験概要

図-1に示すような水セメント比と骨材容積率との組合せにより、配合を定めた。

合計30種類の配合は、それぞれに単位水量と単位セメント量が異なり、フレッシュコンクリートのコンシステンシーも相違する。これは、コンクリートの乾燥収縮に関連して、これらを比較要因にしようとの意図による。

骨材には、比重 2.96、吸水率 1.07% の碎石・砕砂を用いた。粗骨材および細骨材ともに、同一の原石から製造されたものを使用したのは、複合則による解析の便宜を考慮したためである。最大寸法を 20mm とし、細骨材率は 46% とすべて一定にした。セメントには、普通ポルトランドセメントを使用しており、混和剤の影響を除外するため、減水剤等を一切用いていない。

供試体は、10×10×40cm の角柱であり、28 日水中養生後、温度20℃、相対湿度60% の恒温恒湿室で乾燥させ、長さ変化を転倒式コンパレータで測定した。測定は乾燥 105 日まで行ない、得られた収縮の経時変化を双曲線型とみなし、近似曲線を求めて、終局収縮ひずみを算出した。ここでは、このひずみを検討の対象とする。

3. 配合の要因と乾燥収縮との関連

コンクリートの配合の各要因と乾燥収縮との関連については、単位水量が収縮を支配するとの

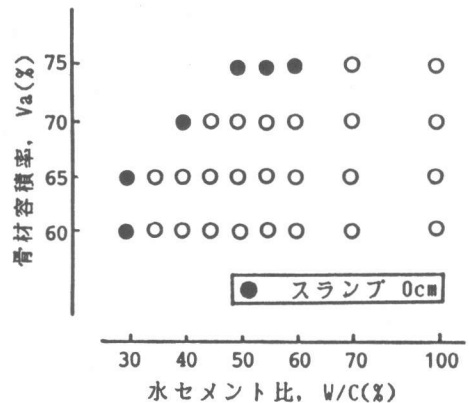


図-1 供試体の配合

説⁽²⁾をはじめ、様々な見解が示されている。単一の要因で収縮を予測できるならば、きわめて好都合であり、はじめにこの点を検討してみる。

図-2は、単位水量と乾燥収縮との関係を示している。

総体的に、単位水量が大きいほど、収縮の大きい傾向は明かであり、収縮に対し、単位水量が支配的要因であるのは疑いない。しかし、ばらつきが比較的著しく、この要因のみで収縮を評価するには無理がある。とくに、骨材容積率 V_a が 75% の配合の場合、いずれもきわめて硬練りであり、硬化後のコンクリートの組織が粗いためか、小さな単位水量の割に比較的大きな収縮を示す。この配合のコンクリートは、乾燥収縮の観点から、特殊な性格を有すると考え、以下の解析では対象外とする。

単位セメント量と収縮の関係を図-3に示す。図には、3種類の水セメント比についてのみ示してあるが、他の水セメント比の場合もほぼ同様の傾向を示した。あくまで水セメント比が同一の場合に限り、単位セメント量が多いほど収縮が大きいと言える。換言すれば、単位セメント量が収縮に関連する要因の一つであるのは疑いないものの、この要因のみで全てを説明できない。

図-4は、ペースト量（容積）と収縮との関係を、同じく3種類の水セメント比について示している。コンクリートの乾燥収縮をもたらすのが、主にペーストの収縮であるとするれば、ペースト量が多いほどコンクリートの収縮が大きくなるのは当然であり、図にもそのような傾向が認められる。しかし、この傾向は単位セメント量の場合と同様に、水セメント比一定の条件で成立し、ペースト量のみによる包括的な解釈は無理である。

単位セメント量当りの収縮を単位収縮と呼ぶことにし、これと水セメント比との関係を

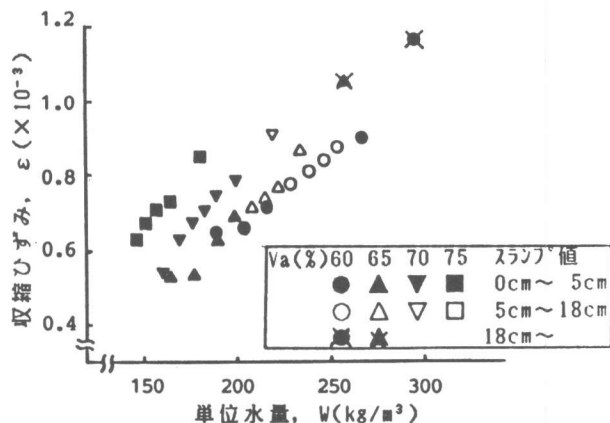


図-2 単位水量と収縮の関係

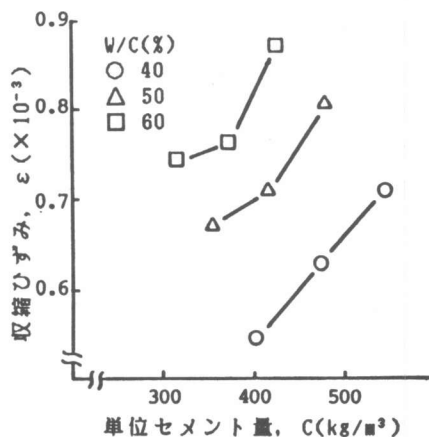


図-3 単位セメント量と収縮の関係

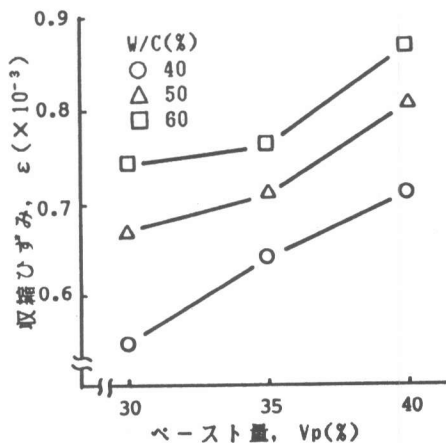


図-4 ペースト量と収縮の関係

求めたのが、図-5である。両者には明確な直線関係がみられ、実験式は次のようになる。

$$\varepsilon_c/C = 4.43(W/C) - 0.442 \quad (1)$$

$$\varepsilon_c = 4.43W - 0.442C \quad (2)$$

ここに、

ε_c : コンクリートの収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

W: 単位水量 (kg/m^3)

C: 単位セメント量 (kg/m^3)

限られた種類の配合で、両者に直線関係が成立することは既に指摘されている⁽³⁾が、本実験結果によれば、比較的広い配合領域にわたっても、この関係が成り立つと言える。式(2)の係数より、単位水量が収縮を大きく支配する要因であることは明かであるものの、単位セメント量の影響の項を加えると、収縮をよりの確に評価できることになる。これまでの種々の見解の中では、図-5に示されるような関係が最も有用性をもっていると指摘できよう。

4. 既往の収縮予測手法の検討

配合要因あるいはそれに関連する諸性質から、コンクリートの収縮値を定量的に予測しようとする試みが幾つかなされている。その中で、Rüsch はコンシステンシーに着目し、軟練りおよび硬練りコンクリートに対しては、基本となる乾燥収縮値からそれぞれ約 25% 増減させるよう提案している⁽⁴⁾。

この妥当性を検討するため、スランプと収縮との関係を求めたのが、図-6である。

全体的に、スランプの大きいほど、収縮が大きくなる傾向が認められ、コンシステンシーに着目することの妥当性をうかがわせている。しかし、ばらつきが大きく、軟・硬練りの定義にもよるが、ある値の増減でもって、収縮を予測出来るほどの根拠が本実験結果には見当たらない。

単位セメント量当りのスランプ値を単位スランプ値と呼ぶことにすれば、これは図-7のように、水セメント比と良好な相関関係にある。ただし、骨材容積率 V_a が 70% の場合はこの傾向から外れるため、この図ではこれを除外している。

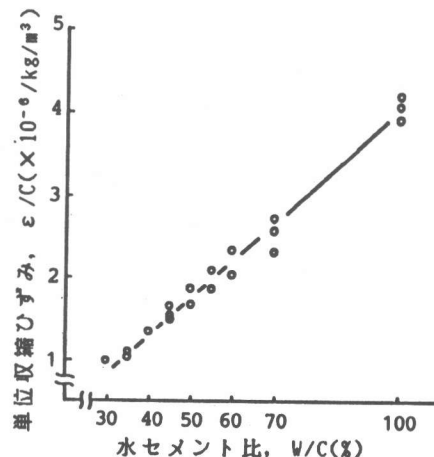


図-5 水セメント比と単位収縮の関係

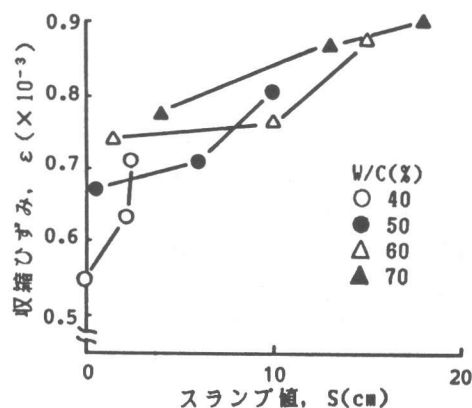


図-6 スランプ値と収縮ひずみの関係

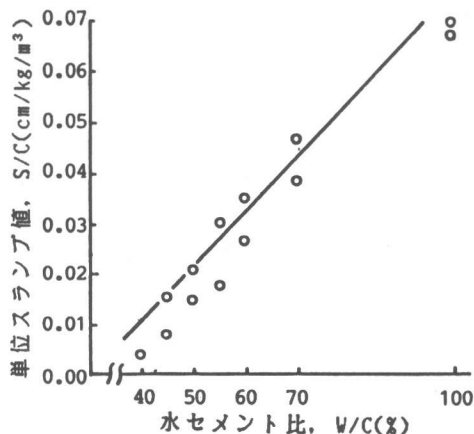


図-7 水セメント比と単位スランプ値

図の関係は、次のように直線表示される。

$$S/C = 0.11(W/C) - 0.03 \quad (3)$$

ここに、S：スランプ値 (cm)

この単位スランプ値と前述した単位収縮値との関係を求めたのが、図-8である。多少のばらつきはあるものの、図-6の関係と比較すれば、良好な相関関係にあり、実験式は次のようになる。

$$\varepsilon_c/C = 39.48(S/C) + 1.00 \quad (4)$$

$$\varepsilon_c = 39.48S + 1.00C \quad (5)$$

上式は、スランプ値によって収縮がほぼ決定されるものの、これに単位セメント量を加味すれば、関連性がさらに増すことを意味している。式(4)に式(3)を代入すると、次式が得られる。

$$\varepsilon_c/C = 4.19(W/C) - 0.38 \quad (6)$$

この式は、前出の式(1)にほぼ等しい。したがって、コンシステンシーに着目するよりは、式(1)のような形で収縮の予測式を確立するのが、有用性に優れていると思われる。

次に、Bažant の提唱する収縮予測式⁽⁵⁾を検討してみよう。この式で、配合にかかわる部分だけを取り出せば、次の形になる。

$$\varepsilon_s = 1210 - 880y \quad (7)$$

$$y = (390z^{-4} + 1)^{-1} \quad (8)$$

$$z = \{1.25(A/C)^{1/2} + 0.5(G/S)^2\} \cdot \{(1+S/C)/(W/C)\}^{1/3} f_c'^{1/2} - 12 \quad (9)$$

ここに、 ε_s ：相対湿度 0% の終局収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、A/C：骨材セメント重量比、G/S：粗骨材と細骨材の重量比、S/C：細骨材セメント重量比、W/C：水セメント重量比、 f_c' ：コンクリートの 28 日材令圧縮強度 (ksi)

このように、収縮に関連すると思われる配合要因のすべてが上式に組み込まれている。図-9に、この式の検討を示す。

上式によれば、収縮値は y に逆比例する。図にも、そのような傾向が若干みられるが、この傾向から大きくかけ離れる場合も存在しており、上式により収縮を的確に予測できると思われる。

5. 複合則による収縮予測

現在用いられている収縮予測式に難点があるとすれば、より有用な予測式を確立する必要があるが、収縮の複合則を適用するのも、その一つの手段であると考えられる。数多く提示されている複合式の中では、次の Hansen らの式⁽⁶⁾の信頼性が高い⁽⁷⁾。

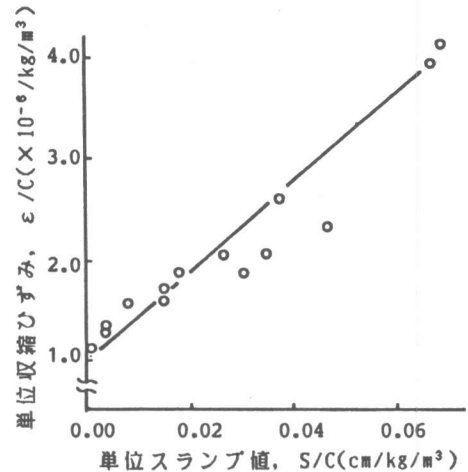


図-8 単位スランプ値と単位収縮

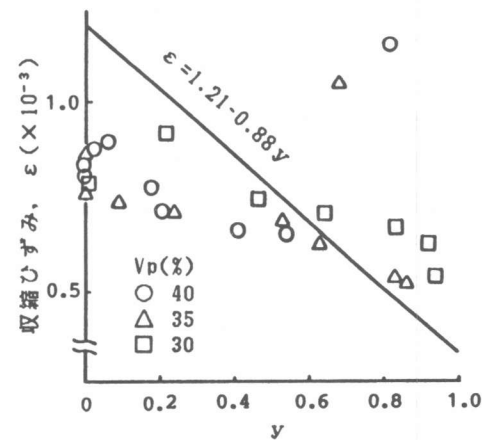


図-9 Bažant 式の検討

$$\varepsilon_c / \varepsilon_p = (1-m) \{n+1+(n-1)V_s^2-2nV_s\} / (n+1) + m \quad (n \geq 1) \quad (10)$$

$$\varepsilon_c / \varepsilon_p = (1-m) \{n+1-(n+1)V_s\} / \{n+1+(n-1)V_s\} + m \quad (n \leq 1) \quad (11)$$

$$n = E_a / E_p, \quad m = \varepsilon_a / \varepsilon_p$$

ここに、 E_a ：骨材のヤング係数 (kgf/cm²)、 E_p ：ペーストのヤング係数 (kgf/cm²)、 ε_a ：骨材の収縮 ($\times 10^{-6}$)

上式に含まれる要因のうち、骨材に関しては、母岩から採取した円柱供試体 ($\phi 30$ mm) を用いて実測したところ、 $E_a = 9.4 \times 10^5$ kgf/cm²、 $\varepsilon_a = 55 \times 10^{-6}$ が得られた。これを細骨材および粗骨材の両者に適用する。細骨材のこれらの値を求めるのは事実上不可能であり、細骨材として、粗骨材と同一の岩石から製造されたものを使用したのは、この値を適用したいとの意図による。

上式中のペーストの性質についても実測した。ここでは、収縮と配合要因との関連を求めるのが主目的であるため、ペーストの性質を配合要因と関係付けてみる。ペーストのヤング率に関しては、セメント水比との間に、次のような直線関係が成り立つ。なお、本実験で用いた材料の場合はすべて $n \geq 1$ に相当する。

$$E_p = 62.82(C/W) + 55.12 \quad (12)$$

また、ペーストの収縮についても、水セメント比により、次のように表示できる。

$$\varepsilon_p = 67(W/C) \quad (13)$$

これらを式 (10) に代入すれば、コンクリートの乾燥収縮が配合要因および骨材の性質の関数として表示される。

図-10 は、コンクリートの乾燥収縮の実測値と上の方法で求めた計算値との関係を示しており、計算値は実測値に比較的よく適合していると言える。

この計算値を配合の諸要因との関連で捉えた例が図-11 であり、単位水量との関係を示している。同図中の実測値と比較するならば、計算値が実測値の傾向をよく捉えているのが認められよう。他の要因についてもほぼ同様の傾向が得られており、この結果は、単一の配合要因のみによって収縮を説明しようとした従来の見解が、収縮の複合則によって、統一的に解釈され得ることを示している。

この複合式には、配合要因の外に、骨材の性質が含まれる。従来、コンクリートの収縮を支配するのはペーストの収縮であるとの考えから、骨材の影響は無視されてきたかの感がある。しかし、骨材の低品質化が懸念されている今日、骨材がコンクリートの収縮に大きくかわる可能性も強まっている⁽⁸⁾。その意味で、骨材の

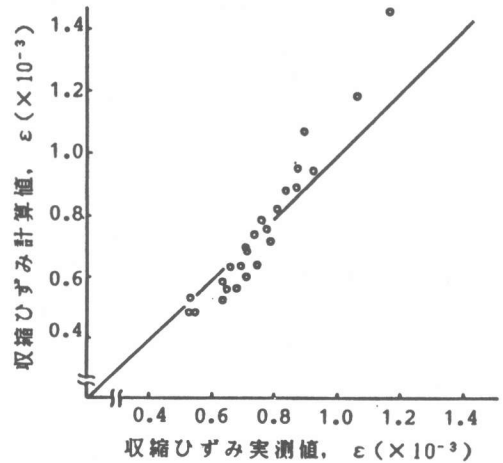


図-10 Hansen 式の検討

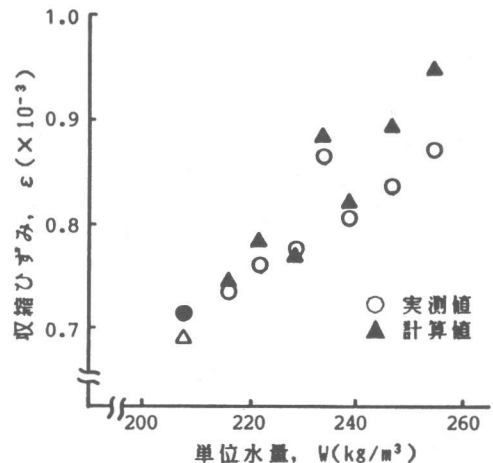


図-11 単位水量と収縮の関係(計算値)

影響をも考慮している複合式を収縮予測に適用することの意義は大きいと考えられる。複合式に含まれる骨材のヤング率や収縮値については、一般に測定が難しい。もし、これらの要因を骨材の比重や吸水率等の測定容易な物性と関連付けることが出来るなら、複合式の実用性は益々高まるであろう⁽¹⁾。

6. あとがき

本研究で得られた結論を要約すれば、以下のようになる。

- (1) 配合の各種要因と収縮の関連については、きわめて硬練りの配合を除き、従来から指摘されている傾向が認められた。その中で、水セメント比と単位セメント量当りの収縮との良好な直線関係を、実用的な収縮予測に適用できる可能性がある。
- (2) 現在実用に供されている配合の影響を考慮した収縮予測式のうち、二つの式について検討したところ、実験値との適合性は必ずしも良好とは言い難い結果が得られた。
- (3) 収縮に関する複合式に配合要因を組み込めば、配合の観点から収縮を予測するための有用な式が得られる可能性がある。この式には、骨材の影響も含まれており、なおさら実用性が高い。ただし、本実験では、用いた骨材が1種類に限られており、骨材の種類を多くした実験を行なって、この結論の妥当性を検討する必要がある。

《参考文献》

- 1) 藤原忠司：セメント系硬化体の配合と乾燥収縮との関連、土木学会論文集 No.390, pp.209～217, 1989.2.
- 2) 米国内務省開拓局編（近藤泰夫訳）：コンクリートマニュアル、国民科学社, pp.13～14, 1966.
- 3) 日本セメント研究所：コンクリートの配合と乾燥収縮の関係について、セメント工業 No. 131, pp19～22, 1974.
- 4) Rüschi, H. and Jungwirth, D. (百島祐信訳)：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮、鹿島出版会, 1976.
- 5) Bažant, Z.P. and Panula, L.: Practical Prediction of Time-Dependent Deformations of Concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol.11, No.75, pp.307～316, 1979.
- 6) Hansen, T.C. and Nielsen, K.E.C.: Influence of Aggregate Properties on Concrete Shrinkage, *Jour. of ACI*, Vol.62, No.7, pp.783～794, 1965.
- 7) 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 No.286, pp.125～137, 1979.
- 8) 藤原忠司：低品質の粗骨材を用いたコンクリートの諸性質、セメント・コンクリート No. 481, pp.8～15, 1987.