

各種センサ等によるコンクリート工事における品質管理の高度化技術の開発（その1）

東京大学大学院工学系研究科 正会員 ○孫 博超 正会員 野口 貴文 正会員 北垣 亮馬 正会員 友寄 篤
児玉 (株) 正会員 西島 茂行 正会員 山本 秀之
日本国土開発 (株) 正会員 山内 匡

1. はじめに

昨今、建設生産システム全体の生産性向上が求められ、筆者らはコンクリート工事における品質管理の高度化を図るための品質管理システム（スマートセンサ（SS）型枠システム）の開発を進めており、これまでに脱型判定に必要な表層強度推定やその可視化、無線ネットワーク化、セントルへの実用化事例について報告をした¹⁾など。本報告では、土木、トンネル、建築各分野での SS 型枠システムの利用対象を広げ、その 1 では温度のみによる若材齢コンクリートの強度推定手法に湿度の要素を新たに加え、セメント等の水和反応率に基づく材齢 4 週まで適用し得るコンクリートの強度推定式を確立することを目的として、センサユニットの開発と基礎的検討を行った。

2. 湿度の要素を加えた強度推定式の提案

国土交通省告示の改正により、測定されたコンクリート温度から計算した有効材齢に基づいて求めた圧縮強度により、建築工事における型わくおよび支柱の取り外しを行うことができる。この強度推定式では湿度が 100%と仮定されているが、実際には様々な温湿度での環境が想定され、夏季では床部材において圧縮強度が低下することが指摘されている²⁾。そこで正確な強度推定のために、有効材齢に湿度の影響を加えた以下の式を設定した。

$$f_{c_{te}} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{(te(T,RH) - 0.5)/t_0} \right)^{1/2} \right] \right\} \cdot f_{c_{28}} \quad (1)$$

$$te(T, RH) = \frac{1}{24} \sum \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + \frac{T_i}{T_0}} \right] \cdot g(RH) \quad (2)$$

$$g'(RH) = \frac{g(RH)}{g(100)} \quad (3)$$

ここで、 $f_{c_{te}}$ はコンクリートの圧縮強度（N/mm²）、 s はセメントの種類による係数、 $t_0=1$ （日）、 $f_{c_{28}}$ は呼び強度の強度値（N/mm²）、 $te(T,RH)$ は有効材齢（日）、 T_i はコンクリート温度（℃）、 Δt_i は測定期間（時間）とする。 $g(RH)$ は湿度影響関数であり、湿度 100%未満でのセメントの反応速度低下を表すため、湿度 100%で $g(RH)$ は 1 となる。

3. 強度に及ぼす湿度の影響に関する実験概要

強度と温湿度との関係を明らかにするために、普通ポルトランドセメント、大井川産陸砂を用いた W/C=50%のモルタルにより実験を行なった。表層強度への影響を想定し、φ5cm×10cmの円柱供試体とした。表-1に示す 12 水準の養生環境における材齢 1, 3, 7, 28 日に圧縮強度試験を行なった。この結果を基に、以下の手順で $g(RH)$ を算出した。

100%RH 下の材齢 28 日で得られる圧縮強度を式(1)の $f_{c_{28}}$ とし、温度 3 水準に対してそれぞれ $f_{c_{28_10^\circ C}}$, $f_{c_{28_18^\circ C}}$, $f_{c_{28_40^\circ C}}$ とする。全ての温湿度および材齢における圧縮強度を式(1)の $f_{c_{te}}$ に代入して $te(T,RH)$ を求め、式(2)から全ての温湿度および材齢における $g(RH)$ を求める。この $g(RH)$ は $f_{c_{28_10^\circ C}}$, $f_{c_{28_18^\circ C}}$, $f_{c_{28_40^\circ C}}$ から導かれているため、各材齢における湿度のみの影響とするために、湿度 100%の条件では 1 となるように、式(3)により各材齢における $g'(RH)$ を算出した。12 水準の養生条件と各材齢における $g'(RH)$ を図-1に示す。

表-1 養生条件

温度 (℃)	相対湿度(%)
10	70
	80
	90
	100
18	70
	80
	90
	100
40	70
	80
	90
	100

キーワード スマートセンサ、コンクリート、強度推定、有効材齢、品質管理

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 1 号館 B04 号室

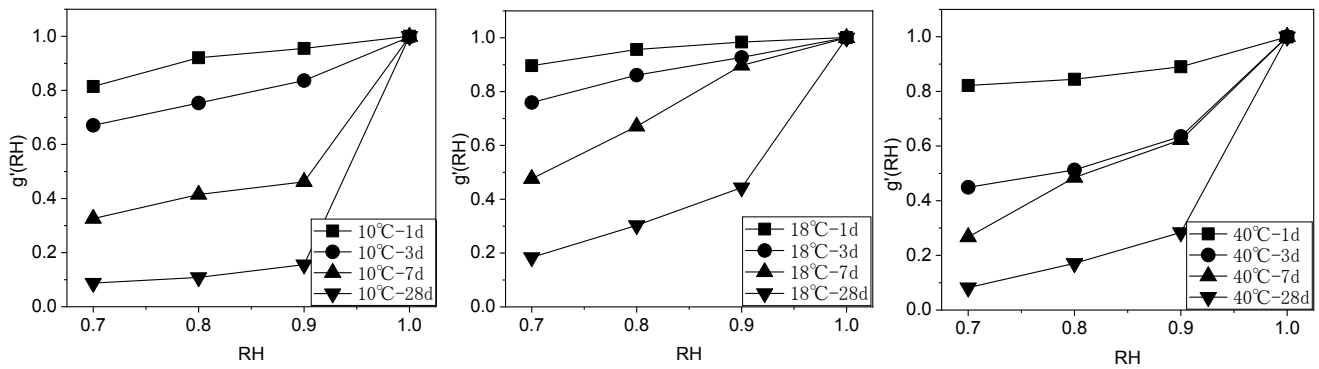
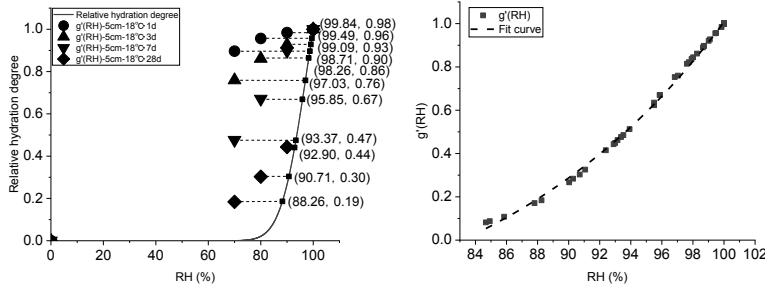
図-1 各養生温度で計算された $g'(RH)$, 左: 10°C, 中: 18°C, 右: 40°C

図-2 内部湿度への変換

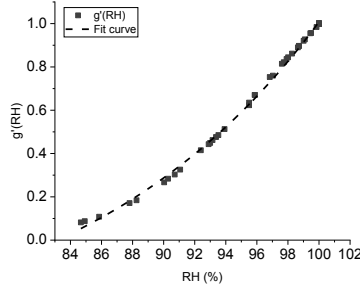
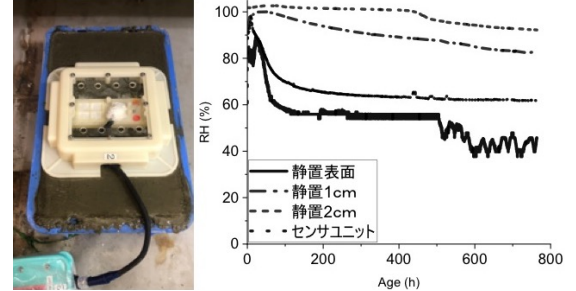
図-3 内部湿度と $g'(RH)$ 

図-4 相対湿度の測定結果とセンサユニット

ここで示される $g'(RH)$ は、養生環境湿度の影響であるため、Jensen による相対湿度とセメント粒子の反応率との関係³⁾に基づき、圧縮強度とセメント反応率とは等価であるとみなし、養生環境湿度を供試体内部の相対湿度に変換した。図-2 に温度 10°Cでの変換を示す。18°C, 40°Cの結果も同様に変換すると、内部湿度と $g'(RH)$ との関係は図-3 のように近似され、内部湿度の影響を加えた有効材齢を表す式として式(4)を得た。

$$te(T, RH) = \frac{1}{24} \sum \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + \frac{T_i}{T_0}} \right] \left[-0.53229 + 1.54038 e^{0.06309(RH_i - 100)} \right] \quad (4)$$

4. 温湿度測定センサユニットの開発

乾燥の影響を受けやすいコンクリート表層部の湿度を測定するために、湿度測定空間の深さを 5mm 程度とし、センサ部が結露しないように通風孔を設けた繰返し使用可能なセンサユニットを試作した(図-4)。厚さ 15cm のモルタル試験体を打設後、20°C, 60%RH の実験室にて、静置、送風機による通風、ハロゲンランプによる熱照射の 3 条件下で 800 時間、①センサユニット部、②表面部、③深さ 1cm、④深さ 2cm の湿度変化を測定した。通風・熱放射の条件下では、静置条件下よりも表層部の乾燥が進む結果が得られた。また、図-4 に示すように、いずれの条件下でもセンサユニットでは、表面部と深さ 1cm の中間領域の湿度が計測されているという結果が得られた。

5. まとめ

湿度による影響を考慮した有効材齢式と強度推定式とを提案し、実験によって湿度影響関数を得た。今後はセンサユニットで得られる湿度との関係やセメント種類による差などの検討が必要である。

参考文献

- 1) 野口ほか：スマートセンサ型枠システムを利用したコンクリートの養生・品質管理システムの開発，土木学会第 67 回年次学術講演会，pp.95-96，2012
- 2) 中田ほか：各種結合材を用いた構造体コンクリートの圧縮強度管理の基準に関する検討 その 16 圧縮強度管理の基準に関する一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.171-172，2015
- 3) O.M. Jensen et al. : Clinker mineral hydration at reduced relative humidity, Cement and Concrete Research 29, pp.1505-1512, 1999