コンクリートの強度発現に及ぼす湿潤養生条件の影響評価

ハザマ　正会員　○福留和人
ハザマ　正会員　古川幸則
ハザマ　正会員　庄野　昭

１．はじめに

コンクリートが硬化後，所要の強度，耐久性，ひび割れ抵抗性等の性能を発揮させるためには，硬化初期において適切に養生を行うことが重要である．コンクリート構造物の性能をより高めるためには，できる限り長く湿潤養生を行うことが望ましく，さらに，積極的に水を供給し十分な水がコンクリート中に保たれた状態を維持することが重要である．書者らは，型枠を取りはずした後に水中養生と同様の湿潤養生を実現できる浸水養生システムを開発した。本研究では，浸水養生期間の選定を想定し，湿潤養生方法が圧縮強度発現特性に及ぼす影響をセメントの水和反応の観点から評価した．

表-1　セメントの品質，鉱物組成

密度 cm^2/g	比表面積 cm^2/g	鉱物組成mi（%）			
		C3S	C2S	C3A	C4AF
3.16	3，300	54	21	9	9

２．実験概要

普通ポルトランドセメント（**表-1**）を用いたW/C55%（単位セメント量 286kg/m^3）のコンクリートを**表-2** に示す条件で養生し，材齢 7，28，91，182 日および湿潤養生終了時に圧縮強度試験を実施した．また，打込み直後，圧縮強度試験時，湿潤養生終了時に試験体の質量測定を行った．ここで，湿潤養生とは，型枠内に存置してポリエチレンシートで覆って水分逸散を防ぐ養生とし，外部からの水分供給は行っていない．養生温度は，全て 20℃で一定とした．

表-2　養生条件

養生条件	記号
標準水中養生（20℃）	標準水中
示方書養生（湿潤5日間） ＋気中養生（20℃，相対湿度60%）	示方書
短縮養生（湿潤3日） ＋気中養生（20℃，相対湿度60%）	短縮1日 短縮3日
短縮3日＋標準水中１週間＋気中養生	浸水１W
短縮3日＋標準水中２週間＋気中養生	浸水２W
短縮3日＋標準水中３週間＋気中養生	浸水３W

３．水和反応に及ぼす湿潤養生条件の影響評価

(1)水和反応式および水和反応速度

水和生成物の容積および結合水量の算定に当たり，**表-3** に示すセメント鉱物の化学反応式を採用した[1)]．水中養生における各セメント鉱物の水和率は，**図-1** に示す水和速度に基づいた[2)]．ここで，簡単のために，エトリンガイトの生成反応（式(3)，(5)）は，材齢 1 日以内に終了し，モノサルフェートへの転移反応（式（4），(6)）は，材齢 1 日以降，C_3AおよびC_4AFの反応速度でそれぞれ進行するものとした．なお，石こうの添加率は，質量で 3%と仮定し，式（3），(5）で同量の石こうが消費されるものとした．

表-3　水和反応式[1)]

$2C_3S+6H\rightarrow C_3S_2H_2+3CH$ (1)
$2C_2S+4H\rightarrow C_3S_2H_3+CH$ (2)
$C_3A+3C\underline{S}H_2+26H\rightarrow C_3A\cdot 3C\underline{S}\cdot H_{32}$ (3)
$2C_3A+C_3A\cdot 3C\underline{S}\cdot H_{32}+4H\rightarrow 3(C_3A\cdot C\underline{S}\cdot H_{12})$ (4)
$C_4AF+3C\underline{S}H_2+27H\rightarrow C_3AF\cdot 3C\underline{S}\cdot H_{32}+CH$ (5)
$2C_3A+C_3AF\cdot 3C\underline{S}\cdot H_{32}+4H\rightarrow 3(C_3AF\cdot C\underline{S}\cdot H_{12})+2CH$ (6)
$C_3A+CH+12H\rightarrow C_3A\cdot CH\cdot H_{12}$ (7)
$C_4AF+2CH+10H\rightarrow C_3AH_6\text{-}C_3AFH_6$ (8)
ここで，C：CaO，S：SiO_2，A：Al_2O_3，F：Fe_2O_3，CH：Ca（OH）$_2$，H：H_2O，$\underline{S}$：SO_3である．

(2) 水和生成物容積および結合水量の算定

水和生成物の容積Vrは，水和率Riが与えられれば，セメント鉱物と水和生成物の分子量および密度から理論的に算定できる[1)]．なお，式（4），(6）のモノサルフェートへの転移反応，式（7），(8）のCHの消費を伴う反応では，それぞれ転移前，消費前の容積を差引く必要がある．これらを考慮したセメント鉱物に対する水和生成物の容積変化率

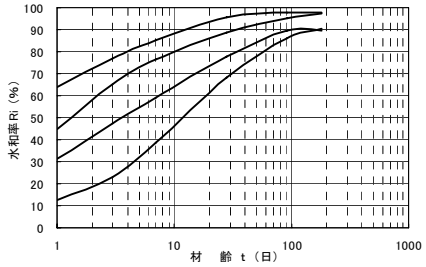

図-1　セメント鉱物の水和速度[2)]

ｷｰﾜｰﾄﾞ：養生，浸水養生，圧縮強度，水和反応
連絡先：ハザマ技術研究所，〒305-0822 茨城県つくば市苅間 515-1　tel：029-858-8813，fax:029-858-8819

は，小田部[3]らが算定した値（**表-4**）を採用した．なお，保水状態を定量化するために，結合水量Wrも算定した．結合水比は，化学反応式から算定した（**表-4**）．

表-4　各鉱物の結合水比，固相容積変化率[3]

鉱物	C_3S	C_2S	C3Am	C4AFm	C_3A
結合水比	0.75	0.68	2.03	1.74	1.22
容積変化率	1.55	1.51	1.20	1.53	1.74

(2)保水状態の定義

基準となる水中養生における非結合水量 Wfw に対する各養生条件 j における非結合水量 Wfj の比率を保水率ωと定義した．非結合水量は，初期水量である単位水量に**図-2** に示す吸水量 Wa および水分逸散量 Wdj の実測値を加・減算し，さらに(2)で求めた結合水量Wrを差引くことで算定した．

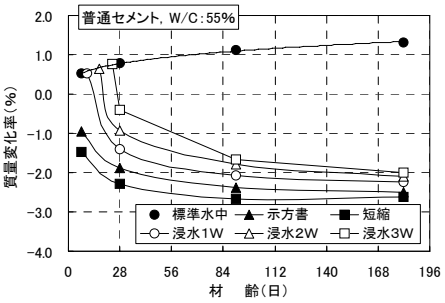

図-2　材齢と質量変化率の関係

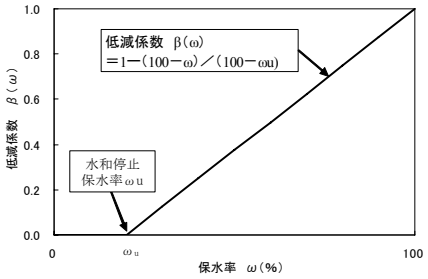

図-3　保水率と低減係数βの関係

(3)水和反応速度に及ぼす保水率の影響の評価方法

反応速度は反応物質の濃度に比例するという基本的な反応速度論に基づき，水和反応速度はコンクリートの保水率の低下とともに直線的に低減すると仮定した．また，非結合水の一部は，ゲル空隙等に吸着し，水和反応に寄与しない水として存在するとし，ある水和率に達すると水和が停止すると仮定（以下，水和停止保水率ωu）した．保水率と低減係数βの関係を**図-3** 示す．

(4)各養生条件 j における水和率 Rji の算定方法

材齢の経過とともにセメントの水和，吸水または水分逸散が進行し，保水率も変化する．ここでは，計算を簡略化するために，時間ステップ Δt（＝1day）で順次算定する方法を採用することとした．すなわち，材齢 t における保水率 ωj(t)に対する低減係数β(ωj(t))から時間ステップ Δt の水和率の増分を算定し，材齢 t＋Δt の水和率を求めた．

以上の算定方法をフローで表すと，**図-4** のようになる．

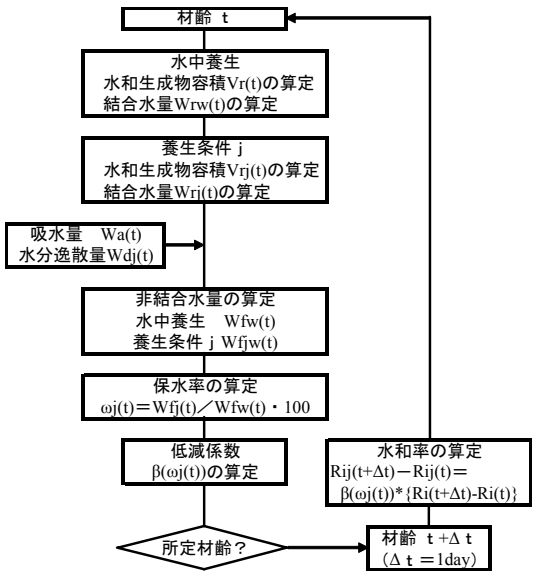

図-4　算定フロー

4．算定結果および考察

水和生成物容積／ペースト容積と圧縮強度の関係を**図-5** に示す．ほぼ直線関係にあるが，回帰式の R^2 が最大となる水和停止保水率は，15%程度となり，ゲル空隙の保水量の割合として既往知見と一致する[3]．回帰式により圧縮強度を算定し，実測値とともに材齢との関係で表すと**図-6** のようになる．単純な仮定で湿潤養生の影響を評価したが，おおよそ妥当であると考えられる．今後，多様なセメント，養生条件への適用性を検討する予定である．

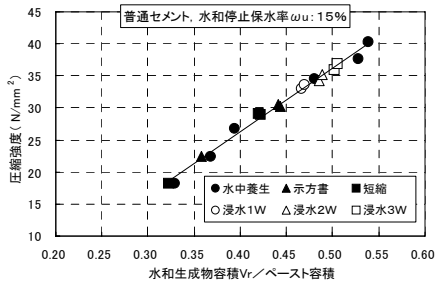

図-5　水和生成物容積と圧縮強度の関係

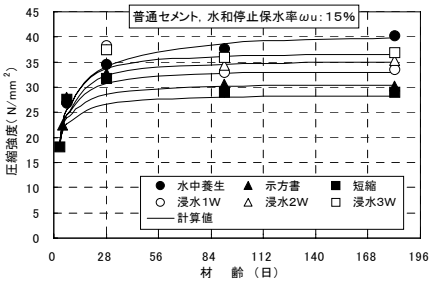

図-6 材齢と圧縮強度の関係

参考文献　1）田代他：コンクリート中の水の挙動，セメント・コンクリート研究会水委員会，pp.51-53，1993，2)F.M.Lea：The Chemistry of Cement and Concrete 3rd Edition, Ed. Arnold, London , pp.243,1970，3）小田部他：初期空隙における水和物形成に基づいた強度発現性の評価，JCI 年次論文報告集，Vol.27-1，pp.571-576，2005.