

# [26] セメント硬化体の力学的性質に及ぼす含水率の影響に関する 一 考察

正会員 ○ 岡 島 達 雄 (名古屋工業大学)  
石 川 時 雄 ( 同 )

## § 1 序

乾いている時は、堅くて強いものでも、濡れると柔かく弱くなることは、日常生活の中で木や紙などで体験することである。(図1, 2) コンクリートについても同じような現象が見られる。全く同一材質のコンクリートでも、試験時に乾燥しているほうが湿っているものより強い。このことは、水中養生中のコンクリートの強度が、水和反応が進むことによって、増大することと混同されがちである。実際のコンクリート構造物は各部位で含水状態が異なり、特にマッシブなコンクリートでは、その差異も大きい。コンクリート構造物の強度管理をより厳密に行うため、また、より経済的な構造物の設計をするためにも、上記の2点を別々に把握する必要がある。ところが、現状は小さな供試体を使ったセメントペーストの研究や、養生条件による影響を含んだコンクリートの研究が多く、この現象の機構についても十分明らかにされていない。そこで本稿は従来の研究から、水分がセメント硬化体強度に及ぼす影響の現象とその機構を総括し、今後の研究の指針を得ようとするものである。

## § 2 含水率とセメント硬化体の力学的性質—現象

コンクリートの強度に及ぼす水分の影響は、古くはGilkeyの養生条件と強度発現に関する研究の中に見られる<sup>3)</sup>。(図3)

Pihlajavaaraは、コンクリートは乾燥すると強度が増し、逆に、湿潤すると強度は弱くなるというこの現象をそれぞれ、drying—strength—ening, wetting—weakeningと呼んだ<sup>4)</sup>。

この現象に関連した実験的事実を挙げれば、次のようである。

a) 乾燥状態の強度は湿潤状態の強度に比べ、一般に20~100%増加する<sup>5)</sup>。またペーストで約25%、モルタルで約40%、コンクリートで100%以上増加するという報告もある<sup>6)</sup>。

b) 水分による引張強度(曲げ強度)の低下率は、圧縮のそれにはほぼ等しい<sup>5)7)</sup>。(図9A, B)

c) わずかな吸水によって、強度は、乾燥状態のそれから大きく減少する。特に、ペーストでその傾向が強い<sup>9)</sup>。(図4, 5)

d) セメントペーストでは、水セメント比の小さいもの程、強度に及ぼす水分の影響

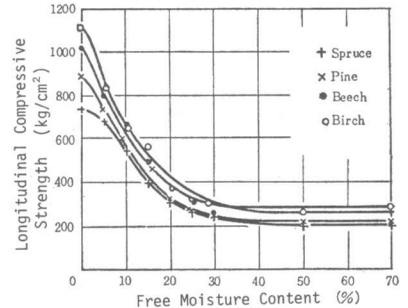


図1 木材の繊維方向圧縮強度と含水率<sup>1)</sup>

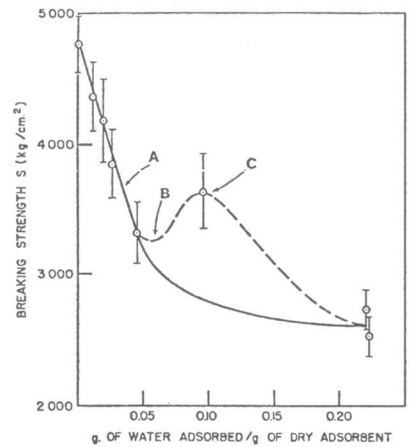


図2 ガラスの圧縮強度と含水比<sup>2)</sup>

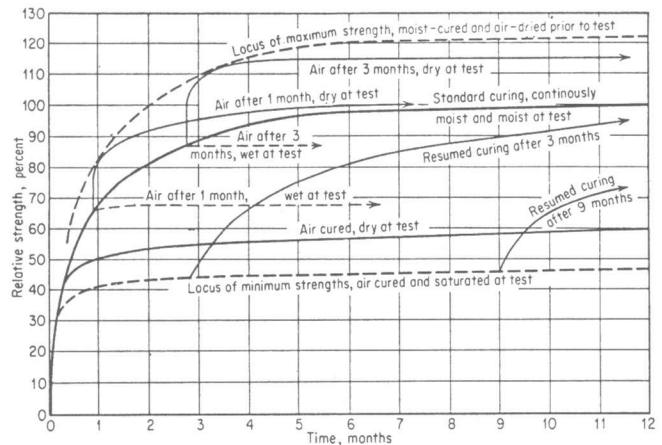


図3 コンクリートの圧縮強度と湿潤養生条件および載荷時の乾湿差<sup>3)</sup>

響は著しい<sup>9)</sup>。(図5)

e) ヤング係数と含水率との関係は、研究者によって異なり、まだ不明確である<sup>7) 9) 10) 11)</sup>。(図6)筆者らのモルタル供試体を用いた実験によれば、ヤング係数は、含水率によってほとんど影響されず、一定であった。(図7)

f) 乾燥収縮のため、マイクロクラックが発生する。そのため、図9 Aに見られるように、引張強度(曲げ強度)が、絶乾で、やや減少する。ヤング係数にもその影響が見られる<sup>7)</sup>。(図11c)

g) 乾燥の途中において曲げ強度が著しく低下する。原因は表面と内部との含水率の相違により、収縮による引張応力が発生し、これが引張縁の曲げ応力にプラスされるからである<sup>12)</sup>。

h) 強度に及ぼす水分の影響は、一軸応力下だけでなく、二軸、三軸応力下にもその影響が見られる<sup>13) 14)</sup>。(図8)

### §3 含水率とセメント硬化体の力学的性質—機構

§2のa)~c)現象に対して、これまでに考えられてきた機構は以下のようなものである。

- i) 乾燥収縮によりセメントペーストが緻密化する<sup>15)</sup>。
- ii) 骨材に拘束されたペーストに収縮に伴う引張応力が発生する<sup>15)</sup>。
- iii) 飽水コンクリートは圧縮されると、空隙内に静水圧が発生し、内部引張応力が大きくなる<sup>15)</sup>。
- iv) 水が潤滑剤の作用をする<sup>12)</sup>。
- v) 乾燥によって摩擦係数が増加するため、端面及び内部摩擦力が増加する<sup>16)</sup>。

i)~v)の妥当性を吟味してみよう。セメントペーストの乾燥収縮は最大0.6%、コンクリートで $10^{-4}$ のオーダーであり、体積減少率では、ペーストでも、1.8%である。従って、i)の密度増加だけにより、a)の事実を説明しうるものとは思えない。ii)は、乾燥によって強度を減少させるものである。iii)~v)は、圧縮強度に対しては説明できるが、引張強度に対してはほとんど影響を及ぼさないと考えられる。従って、b)の事実を説明しえない。

a)~c)の事実を説明しうる機構を挙げると、

- vi) 乾燥により、セメントゲル粒子間の水層が薄くなり、ファンデルワールス結合力が増加する<sup>17) 18)</sup>。
- vii) 破壊は、応力が集中するクラックの先端で始まり、ここでは $-Si-O-Si-$ 結合が引き伸ばされる。水分の存在するところでOH基の形成を容易にし、結合は $-Si-OH$   $HO-Si-$ へと変化する<sup>19)</sup>。
- viii) 水の付着により、表面エネルギーが低下する。

ヤング係数を一定と仮定するならば、viii)が最も妥当である。

GlucklichとKorinは、ひずみエネルギー解放率 $G_c$ が表面エネ

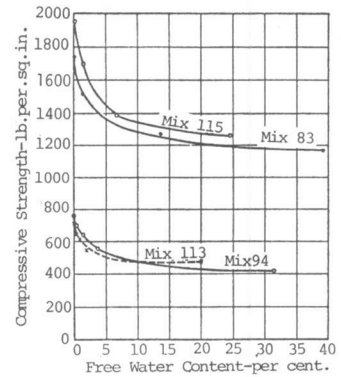


図4 気泡コンクリートの圧縮強度と含水率<sup>8)</sup>

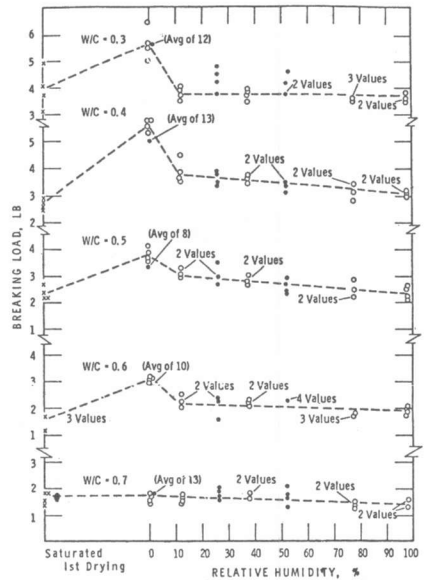


図5 ペーストの曲げ荷重と相対湿度<sup>9)</sup>

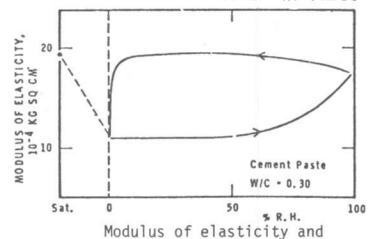


図6 ペーストのヤング係数と相対湿度<sup>19)</sup>

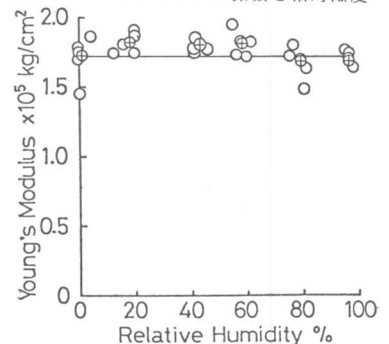


図7 モルタルのヤング係数と相対湿度

ルギーを表わすものとして、実験的に  $G_c$  を求め、圧縮強度  $\sigma_{comp}$ 、曲げ強度  $\sigma_{bend}$  を次式で与えている<sup>7)</sup>。(図9 A, B, C)

$$\sigma_{comp} = [(2GcE) / \{\pi(1-\nu^2)b\}]^{1/2} \dots \dots (1)$$

$$\sigma_{bend} = [(GcE) / \{\pi(1-\nu^2)c\}]^{1/2} \dots \dots (2)$$

E: ヤング係数  $\nu$ : ポアソン比  $b, c$ : クラック長さ

堀は、表面張力の異なる種々の媒液中のモルタルの曲げ強度を求め、曲げ強度と媒液の表面張力が、ほぼ直線関係にあることを見つけた。このことは、モルタルの表面エネルギーが液体の表面張力  $\gamma_L$  だけ減少したためであるとして、彼は次式を提案した<sup>20)</sup>。(図10)

$$\sigma \propto \gamma_s - \gamma_L \dots \dots (3)$$

$\sigma$ : 強度  $\gamma_s$ : 清浄な固体面の表面エネルギー

Bangham は、長さ変化も表面エネルギーの低下によるものだととして、次式を提案している<sup>21)</sup>。

$$\Delta l / l = \lambda \Delta \gamma \dots \dots (4)$$

$\Delta l$ : 長さ変化量  $l$ : 長さ  $\lambda$ : 定数  $\Delta \gamma$ : 単位面積当たりの表面エネルギーの低下量

Griffith の式から、強度と表面エネルギーの関係は、次式で与えられる<sup>22)</sup>。

$$\sigma \propto (\gamma_s - \Delta \gamma)^{1/2} \dots \dots (5)$$

Hiller は、(4), (5)式から、次式を得た<sup>2) 4) 6) 10)</sup>。

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^2 = 1 - \frac{\Delta l}{\lambda \gamma_s l} \dots \dots (6)$$

$\sigma_0$ : 真空時の強度

固体表面に気体分子が吸着した時、固体の表面エネルギーの低下量は、熱力学から Gibbs の式で与えられる<sup>23)</sup>。

$$\Delta \gamma = \frac{RT}{V_m S} \int_0^p \frac{v}{P} dp \dots \dots (7)$$

R: 気体定数 T: 絶対温度  $V_m$ : 気体のモル容積 S: 固体の比表面積  $v$ : 固体 1 g に吸着された気体の容積 p: 気体の圧力

また、Wittmann と Setzer は、単位体積当たりの表面エネルギーの低下量を与える式を提案している<sup>24) 25)</sup>。

筆者らは、(7)式の  $v$  を B E T 式で表わし<sup>26)</sup>、

$$v = \frac{v_{\infty} k P / P_0}{1 - P / P_0} \frac{1 - (n+1)(P/P_0)^n + n(P/P_0)^{n+1}}{1 + (k-1)P/P_0 - k(P/P_0)^{n+1}} \dots \dots (8)$$

k: 吸着の強さを表わす定数  $v_{\infty}$ : 単分子吸着量 n: 飽和蒸気圧における最大吸着層数

(5), (7), (8)式から、次式を得た<sup>27)</sup>。(図11, 12)

$$\sigma \propto \left\{ \gamma_s - \frac{RT v_{\infty}}{V_m S} \ln \left[ 1 + k P / P_0 + \dots + k (P / P_0)^n \right] \right\}^{1/2} \dots (9)$$

ヤング係数を一定とした場合、表面エネルギーの低下をこの現象の主な機構と考えることが、最も妥当であるが、微視的にみてこの

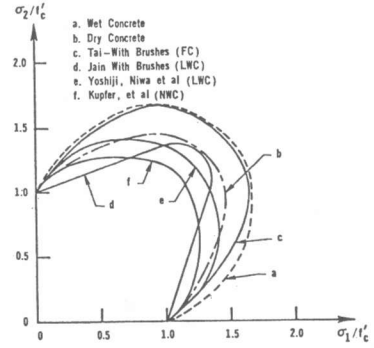


図8 二軸圧縮強度<sup>13)</sup>

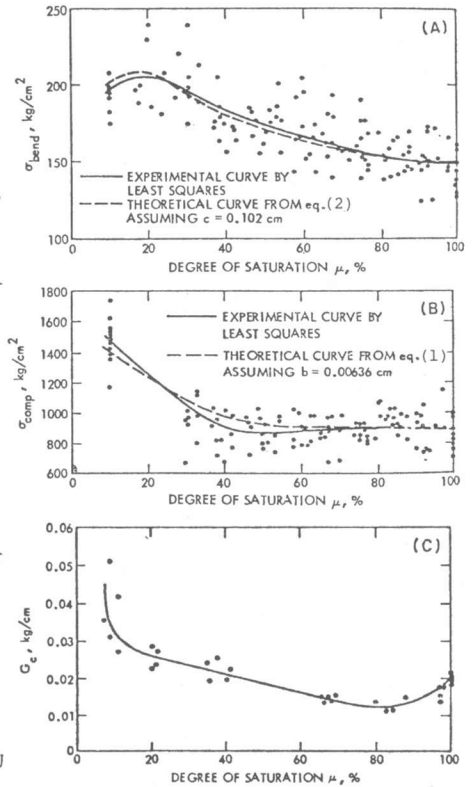


図9 モルタルの曲げ、圧縮強度及びひずみエネルギー解放率と湿潤係数<sup>7)</sup>

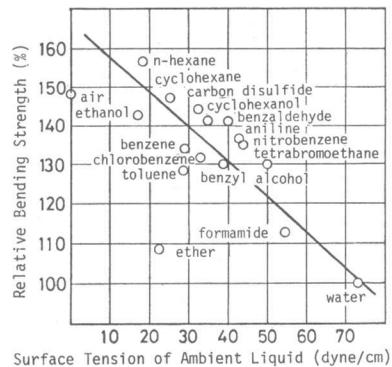


図10 モルタルの曲げ強度比と媒液の表面張力<sup>20)</sup>

表面エネルギーの変化がどのように強度と結びつくのかは、これからの問題であろう。

#### § 4 結

水分がセメント硬化体の力学的性質に及ぼす影響の特徴的現象は次のようである。

I 乾燥状態の強度は飽水状態の強度よりも、20～100%増加する。

II 水分による引張強度(曲げ強度)の低下率は、圧縮のそれにはほぼ等しい。

III わずかな含水率でも、強度が大きく減少する。

IV ヤング係数と含水率との関係は、研究者によって様々であり、未だに不明確である。しかし、筆者らの実験によれば、ヤング係数はほぼ一定であった。

ヤング係数が含水率による影響を受けないと仮定するならば、上記の現象を説明しうる機構を表面エネルギーの低下に求めることが適当である。微視的に、表面エネルギーと強度の関係、および表面エネルギーとひずみエネルギー解放率の関係を明らかにすることが、残された大きな課題である。

#### 参考文献

- 1) Kollmann, F., "Tech. des Holzes und der Holzwerkstoffe", Bd.1, Bd.2 Auf. Springer-Verl. (1951)
- 2) Hiller, K. H., J. Appl. Phys. Vol. 35, pp. 1622-1628 (1964)
- 3) Gilkey, H. J., Eng. News-Record, Vol. 119, pp. 630-633 (Oct., 1937)
- 4) Pihlajavaara, S. E., Valtion Tek. Tutkimuslaitos, Julk., No. 100, pp. 94-97 (1965)
- 5) Pihlajavaara, S. E., Cem. Conc. Res., Vol. 4, pp. 761-771 (1974)
- 6) Wittmann, F. H., Mater. Struct., 1, No. 6, pp. 547-552 (1968)
- 7) Glucklich, J., et.al., J. Am. Ceram. Soc., Vol. 58, No. 11-12, pp. 517-521 (1975)
- 8) Bessey, G. E., et.al., Mag. Conc. Res., No. 3, pp. 119-122 (1949)
- 9) Sereda, P. J., et.al., HRB Special Report, No. 90, pp. 58-73 (1966)
- 10) Wittmann, F. H., J. Am. Ceram. Soc., Vol. 56, No. 8, pp. 409-415 (1973)
- 11) Polivka, M. A., et.al., Proc. Intern. Confer. on Mech. Behav. of Mater., Vol. 4, pp. 203-213 (Aug., 1972)
- 12) 笠井芳夫, "材料科学概説", 彰国社, pp. 183-184 (1977)
- 13) Taylor, M. A., et.al., ACI J., pp. 627-633 (Dec., 1974)
- 14) Isenberg, J., Civ. Engin. and Pub. Work Rev., pp. 1475-1476 (Oct., 1965)
- 15) Troxell, M. A., et.al., "Comp. and Prop. of Conc.", McGraw-Hill, New York, pp. 254-255 (1956)
- 16) W. チェルニン, "セメント, コンクリート化学", 技報堂, pp. 78 (1970)
- 17) 岩崎訓明, "コンクリートの特性", 共立出版, pp. 84 (1970)
- 18) Soroka, I., "Port. Cem. Paste and Conc.", Macmillan Press, London, pp. 97-98 (1979)
- 19) Feldman, R. F., et.al., Engng. J., Vol. 53, No. 9, pp. 53-59 (1970)
- 20) 堀素夫, 窯協誌, Vol. 70 c, pp. 268-273 (1962)
- 21) Banqham, D. H., et.al., Proc. Roy. Soc., Vol. A 130, pp.81-89 (1931)
- 22) Griffith, A., Phil. Trans. Roy. Soc., Vol. A 221, pp.163 (1920)
- 23) Gibbs, J. W. "Collected Works", New Haven, Gale Univ. press (1957)
- 24) Wittmann, F. H., et.al., Appl. Phys., Vol. 3, pp. 403-409 (1973)
- 25) Wittmann, F. H., et.al., RILEM/IUPAC Intern. Symp., Prag (Sept., 1973)
- 26) Brunauer, S., "The Adsorption of Gases and Vapors", Vol. 1, Princeton Univ. Press (1945)
- 27) 岡島達雄, 石川時雄, 昭和54年度日本建築学会秋季大会梗概集, pp. 1-2 (1979)

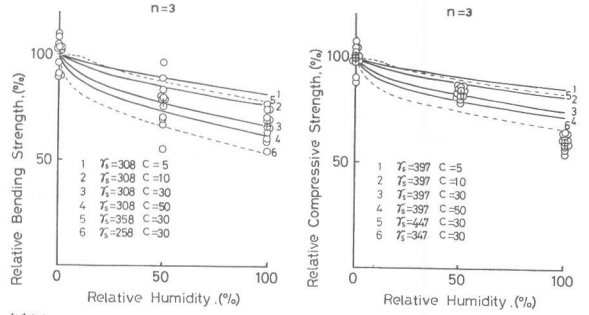


図11 モルタルの曲げ強度比と相対湿度<sup>27)</sup>

図12 モルタルの圧縮強度比と相対湿度<sup>27)</sup>