

# 静置状態におけるフレッシュコンクリートの ブリーディングモデルに関する理論的研究

## BLEEDING MODEL OF FRESH CONCRETE IN STILL STATE

李 柱 国\*  
Zhuguo LI

In this study, the author considered the bleeding of fresh concrete as a self-weight consolidation process, which is resulted from that the particle fabric has no enough tightness to support the fresh concrete's weight or and a vertical pressure acting on its upper surface. By analyzing the ability of particle fabric and hydrate of cement to support the normal stress acting on the maximum shear plane, a time-dependent pore water pressure formula was obtained. Then based on the Kozeny-Carman's permeability model, a permeability formula was proposed for fresh concrete, in which effective void ratio caused by free mixing water is used. Moreover, using Darcy's law, formulas of bleeding capacity and bleeding rate were induced for fresh concrete, and a time-dependent bleeding model was further proposed. Also, the author verified the bleeding model by comparing the test results and the calculating values of 8 series of fresh concrete having different specimen's heights, mix proportions, and vertical pressures.

**Keywords :** Fresh concrete, Bleeding model, Pore water pressure, Particle fabric, Hydration; Free mixing water

フレッシュコンクリート, ブリーディングモデル, 間隙水圧, 粒子配列, 水和反応, 自由水

### 1. はじめに

ブリーディングは、コンクリートの材料分離現象の一つである。ブリーディングが発生すると、水みちと骨材下面における欠陥が形成されるため、水密性が低下し、引張異方性が生じ、コンクリートと水平鉄筋との付着力および鉄筋の腐食抵抗性が低下する<sup>1), 2), 3)</sup>。また、ブリーディングによって、水セメント比が不均一になり、コンクリート部材の上部の強度が低下する<sup>1), 4), 5), 6)</sup>。なお、ブリーディングは、コンクリート構造物の打継ぎ部における接合不良、仕上げ材の接着不良などの問題と密接な関係にある<sup>7)</sup>。

打込み後、まだコンクリートが十分に硬化していないプラスチックな状態で、その表面が乾燥すると、プラスチック収縮によるひび割れは発生する。この表面乾燥は、気温、相対湿度および風速によるコンクリート表面の水分蒸発率に左右され、ブリーディング速度の影響を受ける<sup>7)</sup>。ブリーディング速度が小さければ、塑性収縮ひび割れが生じやすくなる<sup>8), 9)</sup>。しかし、過剰なブリーディングは、乾燥収縮によるひび割れの原因になり、ブリーディングに伴う沈下が鉄筋などによって拘束されると、その上面にひび割れが生じる。そのため、日本建築学会鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針では、設計基準強度 36N/mm<sup>2</sup>以下のコンクリートのブリーディング量を 0.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>以下に規定している。コンクリートの高性能化・高品質化を実現するために、ブリーディングを考慮した調査設計、施工管理および硬化後の性能予測に関する一連の

技術の確立が重要な課題である。

ブリーディングは硬化コンクリートの品質に大きく影響するため、その挙動を把握することは重要である。ブリーディングの影響要因についての研究は多く報告されている。コンクリートの単位水量、スランプおよび垂直圧力が大きいほど、ブリーディングが大きい<sup>10), 11)</sup>。単位セメント量およびセメントの比表面積が大きいほど、ブリーディングが少ない<sup>9)</sup>。セメント種類もブリーディングに影響を及ぼす<sup>7)</sup>。フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、もみ殻灰およびシリカフェームなどの混和材の使用によって、ブリーディングは低減する<sup>9), 12), 13)</sup>。細骨材が細かいほど、ブリーディングは少ない<sup>8)</sup>。減水剤、増粘剤および AE 剤の添加は、ブリーディングを減少させる効果がある<sup>9), 14), 15)</sup>。再生骨材やスラグ骨材の使用は、ブリーディングを増大させる<sup>16), 17)</sup>。コンクリートの打込み高さおよび表面面積が大きいほど、ブリーディング量は多い<sup>9), 10), 11), 18)</sup>。温度が高いほど、水の粘度が低下するため、ブリーディング速度は増大するが、水和反応率は高くなるため、ブリーディングは減少する<sup>9), 18), 19)</sup>。また、Lamond ら<sup>9)</sup>は、2~3 秒の振動締めはブリーディングを若干増大させるが、振動締めが 20 秒~10 分間持続すると、逆にブリーディング量は減少し、施工現場における通常の打込み締め締めはブリーディングにあまり影響を与えないと指摘している。しかし、Zhang ら<sup>11)</sup>は、5 分間振動すると、ブリーディングが大幅に増大するとの実験結果を報告している。なお、繊維の使用はブリーディングを抑制する効果

\* 山口大学大学院理工学研究科情報・デザイン工学系専攻  
准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Information and Design Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, Dr. Eng.

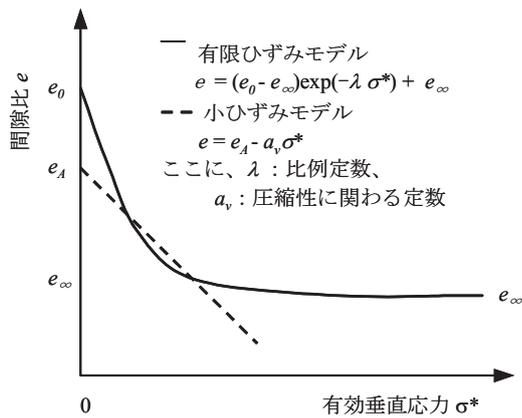


図1 間隙比と有効垂直応力に関するモデル

があると考えられる<sup>20)</sup>。

フレッシュコンクリートのブリーディング挙動は複雑であり<sup>21)</sup>、上述のように影響要因が多いため、ブリーディング挙動を表すモデルはまだ確立されていない。Powers<sup>22)</sup>は、Poiseuille 毛管流動則に基づいて、コンクリートの沈降量・速度がブリーディング量・速度とそれぞれ等しいと仮定して、初期ブリーディングの速度式を提案した。しかし、コンクリート中の空気脱出によって、コンクリートの沈降量はブリーディング量と等しくならない。また、ブリーディング速度が時間と共に減少する実現現象はこの予測式では表現できない。Radocea<sup>23)</sup>は、ブリーディングが固体と水の密度差によるセメント粒子の等速沈降に起因すると指摘し、Darcy 法則およびKozeny-Carman の透水係数式を用いてセメントペーストのブリーディング率の予測式を提案した。しかし、この予測式は、セメントの水和反応の影響を無視しているため、温度の影響を表現できない。

この早期の粒子沈降理論(sedimentation theory)と異なり、自重圧密理論(self-weight consolidation theory)では、固体粒子の間隙が水に完全に充填され、ブリーディングが粒子の自重による圧密に起因するものであり、有効垂直応力による固体粒子の間隙の経時的減少がブリーディング量の経時的増加と等しいとされている。Tan ら<sup>24)</sup>は、自重圧密理論および小ひずみモデル(small-strain model)に基づいてブリーディングの予測式を提案した。図1に示すように、小ひずみモデルは、間隙比が有効垂直応力に伴って減少し続けると仮定しているが、有限ひずみモデルは、有効垂直応力による間隙比の減少に限度を設けている<sup>25)</sup>。セメントの水和反応による硬化は、間隙比の減少に限度が存在する原因の一つと考えられる。

そのため、小ひずみモデル(small-strain model)に基づいたブリーディングの予測式は、ブリーディングに与える水和反応の影響を反映できない。その後、Tan ら<sup>26)</sup>と Josserand ら<sup>27)</sup>は、有限ひずみモデル(finite-strain model)を用いて、水和反応の影響を反映できるブリーディングの予測式を提案した。また、Morris ら<sup>28)</sup>は、コンクリートの凝結始発の時点で self-weight consolidation が停止すると考え、小ひずみモデルと有限ひずみモデルによって凝結時間の影響を反映するブリーディングの予測式をそれぞれ求め、小ひずみモデルに

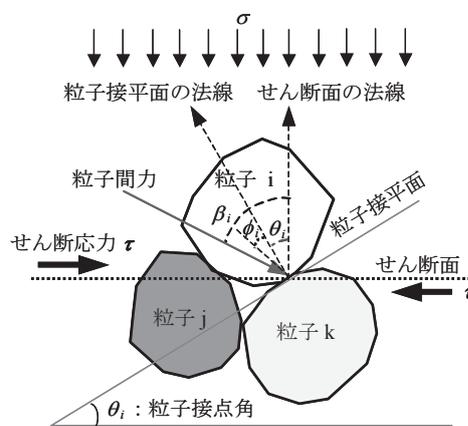


図2 粒子接点角および粒子間力方向角

基づいた予測式は、高さが低い試料および小さい初期間隙比をもつ試料に適用しようと結論した。Tan ら、Josserand らおよび Morris らの提案した予測式は、水和反応の影響を表現できるが、コンクリートの硬化速度を時間のみの関数としているため、ブリーディングに与える環境温度の影響を表現できない。また、間隙比を予測式のパラメータとしているが、粒子間隙の充填水のすべてはブリーディング水になりうると考え、自由水概念を導入していないため、単位水量が同じであっても、空気量の増加、混和材料の使用および比表面積が大きいセメントと細骨材の使用によってブリーディングが減少する現象をこれらの式では解釈できない。

一方、Clear ら<sup>29)</sup>は、フレッシュコンクリートの沈降圧密が有効垂直応力に起因し、フレッシュコンクリートの受ける応力の一部が間隙水圧に支持され、粒子の圧密程度が小さいほど、間隙水圧が大きく、間隙水圧がブリーディングに伴って経時的に消散することを指摘している。したがって、ブリーディングは、間隙水圧による水の上昇挙動と考えられる。

この背景を踏まえ、フレッシュコンクリートのブリーディングの影響要因を定量化し、予測技術を開発することを目指して、本研究では、フレッシュコンクリートを含水粒子集合体とみなし、その粒子配列が支持できる応力の粒子沈降圧密による変化により、水和反応の影響を考慮した間隙水圧の経時変化式を求める。また、Kozeny-Carman の透水係数式に基づいて、自由水概念を導入したフレッシュコンクリートの透水係数を考察する。さらに、Darcy 法則に基づいて、ブリーディング量・速度の経時変化式を誘導し、ブリーディングの経時変化モデルを提案する。最後に、試料の調合、高さおよび上表面に加える垂直圧力を変化させて測定したブリーディング量と理論式による計算結果を比べて、ブリーディングの経時変化モデルの妥当性を検証する。

## 2. フレッシュコンクリートの間隙水圧の経時変化

フレッシュコンクリートを含水粒子集合体とみなせば、その固体粒子(結合材粒子と骨材粒子)は、粒子接点を通じて自重と上表面に作用する垂直圧力によって生じる粒子間力を受ける。1 個の粒子が一つのせん断面上に有する粒子接点数は、粒子のサイズ、形状および固体粒子の体積濃度に依存する。図2に示すように、粒子 *i* の粒子間力方向角  $\beta_i$  が、その粒子滑動抵抗角  $\delta$  (粒子内部摩擦角  $\phi$  と粒子接点角  $\theta_i$  の和) より大きくなると、粒子は隣接粒子の表面に滑動す

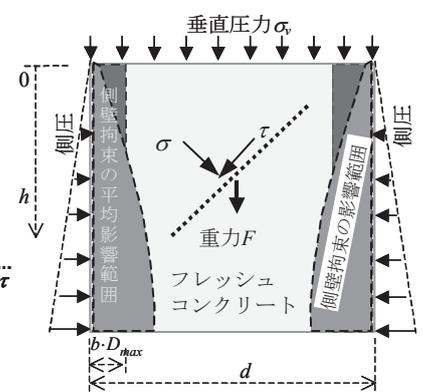


図3 静置状態のフレッシュコンクリートの载荷と応力状態

る可能性がある<sup>30)</sup>。粒子間力が自重と垂直圧力によるものであるため、粒子は下へ沈降し、それが受けている粒子間力を支持できるところに移動する<sup>31)</sup>。このような移動が発生すると、粒子の噛み合いは緊密になるため、粒子接点角と粒子内部摩擦角が共に増大し、試料全体が支持できる応力は大きくなる。粒子集合体の粒子配列構造の強弱は平均粒子滑動抵抗角によって評価される<sup>31)</sup>。

粒子は、安定な位置に達する前に、粒子間力を完全に負担することができないため、間隙水は、一部の粒子間力を間隙水圧で負担すると考えられる。このため、間隙水は、粒子の沈降移動と同時に上昇する。したがって、フレッシュコンクリートのブリーディングは、粒子の噛み合いが弱いことに起因するものであり、粒子の沈降圧密に伴って発生する。

個々の粒子接点角は測定できないため、沈降する粒子とその場所を把握することは殆ど不可能である。しかし、粒子接点角の分布は正規分布に近い<sup>31)</sup>、全体の粒子配列構造の強さを把握できる。したがって、本研究では、全体粒子配列の強さを平準化して、間隙水圧と水の上昇挙動を考察する。

フレッシュコンクリートは容器や型枠の側壁からの側圧を受ける。側圧による鉛直方向の摩擦力は、側壁近隣の粒子沈降を拘束する。フレッシュコンクリートの流動性が低いほど、この拘束の影響範囲が大きい。また、下部へ行くほど、側圧が大きいため、拘束の影響範囲は大きいと思われる(図3参照)。しかし、側壁から遠い位置にある固体粒子は、側壁の影響を受けずに自由に沈降移動できる。したがって、容器や型枠のフレッシュコンクリートの応力状態を三軸圧縮とすると、粒子沈降運動に及ぼす側圧の影響を過大に評価してしまう恐れがある。

側圧による側壁の摩擦力はフレッシュコンクリートの重力の一部を支えると考えれば、粒子配列と間隙水圧によって支持しなければならない自重は減少する。ここに、固体粒子とその間隙水に実際に支持する重力を有効重力と呼ぶことにする。拘束の平均影響範囲を側壁から何個かの粗骨材までの範囲とし、便宜上、この平均影響範囲が経過時間によらないとすれば、深さが $h$ の位置における有効重力 $F$ は、式(2-1)によって求められる。円形水平断面の場合には、 $s_e$ は、式(2-2)によって表わされる。

$$F = \int_0^h \rho(s - s_h^*) h = \rho s_e h \quad (2-1)$$

$$s_e(\text{円形}) = \frac{\pi}{4} (d - 2 \cdot b \cdot D_{\max}) \quad (2-2)$$

ここに、 $F$ : 有効重力(kgf)、 $\rho$ : コンクリートの単位容積質量(kg/m<sup>3</sup>)、 $h$ : コンクリートの高さ(m)、 $s$ : コンクリートの水平断面積(m<sup>2</sup>)、 $s_h^*$ : 深さが $h$ の位置における側壁影響範囲の水平断面積(m<sup>2</sup>)、 $s_e$ : 有効重力の平均作用面積(m<sup>2</sup>)、 $d$ : 円形試料の場合における試料の直径(m)、 $D_{\max}$ : 骨材の最大寸法(m)、 $b$ : 側壁影響範囲と骨材の最大寸法との比

側圧の影響を、固体粒子に作用するコンクリートの自重の減少として取り扱い、静置状態におけるフレッシュコンクリートの応力状態を一軸圧縮とすれば、平均最大せん断応力 $\tau$ および平均垂直応力 $\sigma$ は、式(2-3)のように表される。

$$\tau = \sigma = \frac{1}{2} (\sigma_v + \frac{1}{2} \rho \frac{s_e}{s} h) \quad (2-3)$$

ここに、 $\tau$ : 平均最大せん断応力(kg/m<sup>2</sup>)、 $\sigma$ : 平均垂直応力(kg/m<sup>2</sup>)、 $\sigma_v$ : 上表面に作用する垂直圧力(kg/m<sup>2</sup>)

固体粒子の間隙水の表面張力とサクシオン効果による粒子間の内部摩擦力<sup>32)</sup>の増加は小さいので、それを無視すると、静置状態におけるフレッシュコンクリートが粒子配列によって支持できるせん断応力 $\tau^*$ は、打込んだ直後から $t$ 時刻において、式(2-4)によって表される<sup>33)</sup>。式中の $\delta$ 、 $\phi$ 、 $\theta$ は、最大せん断面上の粒子接点あたりのものである。

$$\tau^* = \sigma \tan \delta = \sigma \tan(\phi + \theta) \quad (2-4)$$

ここに、 $\tau^*$ :  $t$ 時刻の粒子配列によって支持できるせん断応力、 $\delta$ :  $t$ 時刻の平均粒子滑動抵抗角、 $\phi$ : 平均内部摩擦角、 $\theta$ :  $t$ 時刻の平均粒子接点角

もし、フレッシュコンクリートの粒子配列構造は弱ければ、つまり、平均粒子滑動抵抗角 $\delta$ が小さければ、コンクリートが支持できるせん断応力 $\tau^*$ は、それが受けるせん断応力 $\tau$ より小さい。支持できない応力分は、粒子間の間隙に作用する。間隙に存在する水は、この過剰間隙水圧力によって上昇する。このブリーディングの発生に伴って、固体粒子が沈降移動する。粒子沈降に伴って、前述のように粒子の噛み合いが緊密になるため、平均粒子滑動抵抗角が増大し、試料が支持できる応力が大きくなる。結果として、過剰間隙水圧は減少(消散)していき、ブリーディング速度が減少し、やがてゼロになる。

フレッシュコンクリートの粒子配列構造によって支持できないせん断応力 $\tau^a$ は、式(2-3)と式(2-4)によって、次式のように得られる。

$$\tau^a = \tau - \tau^* = \frac{\sigma_v + \rho s_e h / 2s}{2} (1 - \tan \delta), \quad \tan \delta \leq 1.0 \quad (2-5)$$

ここに、 $\tau^a$ : 粒子配列構造によって支持できないせん断応力

一軸圧縮の場合、最大せん断応力は垂直応力と等しいため、粒子配列構造によって支持できない垂直応力 $\sigma^a$ は、式(2-6)のようになる。

$$\sigma^a = \tau^a = \frac{\sigma_v + \rho s_e h / 2s}{2} (1 - \tan \delta) \quad (2-6)$$

ここに、 $\sigma^a$ : 粒子配列構造によって支持できない垂直応力

一方、セメントは水と接触すると、水和反応が発生するため、コンクリートは徐々に硬くなる。水和生成物によって、セメント粒子と骨材粒子は沈降しにくくなり、コンクリートが支持できる応力は増大する。ここに、任意時刻 $t$ においては水和生成物によるコンクリートの圧縮強度分を $\sigma_h$ と記すことにする。

前述のように、側壁の拘束影響範囲以外の粒子は自由に沈降できる。有効重力の概念を導入すると、フレッシュコンクリートは、有効重力と外部垂直圧力が作用する1軸圧縮状態であると近似的に見なすことができる。したがって、Mohr-Coulomb 則によって、水和生成物が支持できる垂直応力は $\sigma_h/2$ である。

コンクリートの粒子配列と水和生成物が支持できない垂直応力は、間隙水に加える。したがって、間隙水圧 $u$ は、式(2-7)によって表わされる。

$$u = \sigma^a - \frac{\sigma_h}{2} = \frac{\sigma_v + \rho s_e h / 2s}{2} (1 - \tan \delta) - \frac{\sigma_h}{2} \quad (2-7)$$

ここに、 $u$ : 間隙水圧(kg/m<sup>2</sup>)、 $\sigma_h$ : 水和生成物によるコンクリートの圧縮強度(kg/m<sup>2</sup>)

固体粒子は、自重と外力による粒子間力を受けて沈降移動するが、粒子間力を支持できる位置に停留すると考えられる。したがって、

フレッシュコンクリートの平均粒子滑動抵抗角は、経過時間と共に増大し、やがて安定値に近づく。ここでは、粒子沈降圧密による平均粒子滑動抵抗角の正接値の経時変化が指数関数で表されることができると仮定して、式(2-8)のようである。

$$\tan \delta = \tan \delta_{\infty} - (\tan \delta_{\infty} - \tan \delta_0) \exp(-k_a t) \quad (2-8)$$

ここに、 $\delta_0$ : 初期平均粒子滑動抵抗角、 $\delta_{\infty}$ : 安定状態の平均粒子滑動抵抗角、 $k_a$ : 比例定数

ブリーディングが停止する時点では、コンクリートの平均粒子滑動抵抗角は、安定値 $\delta_{\infty}$ に達すると考えられる。この時点で、セメントの水和生成物によるコンクリートの圧縮強度を $\sigma_{hb}$ と記せば、水和生成物によって支持できるせん断力は $\sigma_{hb}/2$ である。したがって、式(2-4)によって、平均粒子滑動抵抗角の安定値 $\delta_{\infty}$ は、式(2-9)のようになる。

$$\tan \delta_{\infty} = \frac{\tau - \sigma_{hb}/2}{\sigma} = \frac{\sigma_v + \rho_s e h / 2s - \sigma_{hb}}{\sigma_v + \rho_s e h / 2s} = 1 - \frac{\sigma_{hb}}{\sigma_v + \rho_s e h / 2s} \quad (2-9)$$

ここに、 $\sigma_{hb}$ : ブリーディングが停止する時点のコンクリートの水和生成物による圧縮強度(kg/m<sup>2</sup>)

セメントの水和率は、図4に示すように材齢と共に増大し、一般に式(2-10)によって表わされる<sup>34)</sup>。

$$\alpha(t_e) = \alpha_{\infty} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\omega}{t_e}\right)^{\chi}\right], \quad \alpha(t_e) \leq 100\%, \quad (2-10)$$

ここに、 $t_e$ : 環境温度が基準温度と異なる場合における等価材齢(min.)、 $\alpha(t_e)$ : 等価材齢 $t_e$ 時点の水和率、 $\alpha_{\infty}$ : 基準温度の場合の最大水和率、 $\chi$ : 水和率の経時変化曲線の形状を表すパラメータ、 $\omega$ : 水和反応速度に関わる定数

20℃に対する等価材齢は、式(2-11)によって計算される<sup>34)</sup>。

$$t_e = t \cdot \exp\left(\frac{E}{R} \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{273+T} \right]\right) \quad (2-11)$$

ここに、 $T$ : 環境温度(℃)、 $E$ : 結合材の活性化エネルギー(J/mol)、 $R$ : 気体定数(8.3144J/mol/K)

凝結始発までの結合材の活性化エネルギー $E$ は、結合材の比表面積、セメントの化合物の割合および混和材料の種類と添加率に依存し、式(2-12)によって表わされる<sup>34)</sup>。

$$E = 22100 \cdot f_e \cdot P_{C3A}^{0.30} \cdot P_{C4AF}^{0.25} \cdot B^{0.35} \quad (2-12)$$

ここに、 $P_{C3A}$ ,  $P_{C4AF}$ : それぞれセメントのC<sub>3</sub>AおよびC<sub>4</sub>AFの含有量(質量比)、 $B$ : 結合材のプレーン比表面積(m<sup>2</sup>/kg)、 $f_e$ : 混和材料を使用した場合の補正係数であり、式(2-13)で求められる<sup>34)</sup>。

$$f_e = 1 - 1.05 \cdot P_{FA} \cdot \left(1 - \frac{P_{FACao}}{0.40}\right) + 0.40 \cdot P_{slag} \quad (2-13)$$

ここに、 $P_{FA}$ ,  $P_{slag}$ : それぞれフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の置換率(質量比)、 $P_{FACao}$ : フライアッシュ中のCaoの含有量(質量比)

凝結始発までの誘導期(図4中のDormant Period)において、水和率の経時変化式は、式(2-14)のように線形関係と近似することができる<sup>26)</sup>。

$$\alpha(t_e) = \varpi \cdot t_e \quad (2-14)$$

文献34)によって、コンクリートの凝結が始発する時の水和率は、水結合材比に依存する。環境温度が21.1℃の場合、凝結始発(貫入抵抗: 3.4MPa)時の水和率は、式(2-15)によって表わされる。

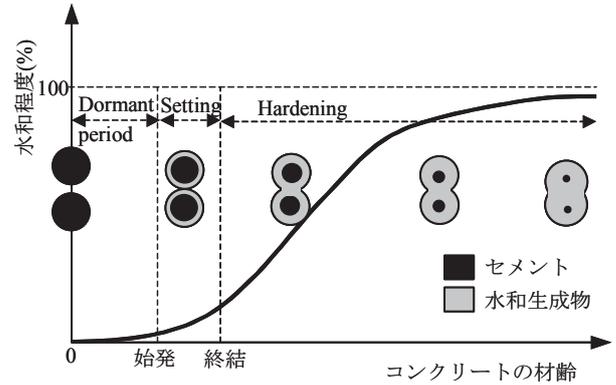


図4 水和程度の経時変化

$$\alpha_i = 0.15 \frac{W}{CM} \quad (2-15)$$

ここに、 $\alpha_i$ : コンクリートの凝結始発時の水和率、 $W$ : 単位水量(kg/m<sup>3</sup>)、 $CM$ : 単位結合材量(kg/m<sup>3</sup>)

式(2-15)を式(2-14)に代入すると、環境温度が約20℃の場合における $\omega$ は、式(2-16)に示すように得られる。

$$\varpi = \frac{0.15}{t_i} \cdot \frac{W}{CM} \quad (2-16)$$

ここに、 $t_i$ : 20℃時のコンクリートの凝結始発時間(min.)

文献35)によって、セメントペーストの強度と水和率の関係は、ほぼ線形である。同一のコンクリートに対して、凝結始発までの小さい範囲において、水和生成物によるコンクリートの圧縮強度が水和率に比例すると仮定すれば、式(2-17)が得られる。

$$\sigma_h = c_1 \cdot \alpha(t_e) \quad (2-17)$$

ここに、 $c_1$ : 比例定数

しかし、同一の水和反応率であっても、セメントペーストの強度が同じわけではない。水セメント比が大きいほど、セメント粒子は離れて、水和生成物によるセメントペーストの強度が小さい。したがって、式(2-17)中の比例定数 $c_1$ と水セメント比は反比例すると考えれば、式(2-18)が成立する。

$$\sigma_h = \frac{c_2}{W/CM} \cdot \alpha(t_e) \quad (2-18)$$

ここに、 $c_2$ : 定数

式(2-14)と式(2-16)を式(2-18)に代入すると、水和生成物によるコンクリートの圧縮強度は、式(2-19)によって表わされる。

$$\sigma_h = \frac{c}{t_i} \cdot t_e \quad (2-19)$$

ここに、 $c$ : 定数(=0.15 $\cdot c_2$ , kg/m<sup>2</sup>)

したがって、式(2-7)に示す間隙水圧式は、式(2-20)のようになる。

$$u = \frac{\sigma_v + \rho_s e h / 2s}{2} (1 - \tan \delta) - \frac{a \cdot c}{2} \cdot t \quad (2-20)$$

ここに、 $a = \exp\left(-\frac{E}{R} \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{273+T} \right]\right)$

式(2-20)は、垂直圧力、試料の厚さ、流動性(初期平均粒子接点角を決定する)、経過時間、環境温度、水セメント比、セメントの水和反応速度(凝結始発時間を決定する)、セメントの成分と粉末度および混和材料の種類と置換率などが間隙水圧に与える影響を反映する

ことができる。

ブリーディングが停止するまでの経過時間を  $t_s$  と記すと、式(2-19)によって、 $t_s$  時点のコンクリートの水和生成物による圧縮強度  $\sigma_{hb}$  は、式(2-21)によって表される。

$$\sigma_{hb} = \frac{a \cdot c}{t_i} \cdot t_s \quad (2-21)$$

ここに、 $t_s$  : ブリーディングが停止するまでの経過時間(min.)

### 3. フレッシュコンクリートの透水係数

Kozeny-Carman 透水係数式を式(3-1)に示す<sup>23)</sup>。

$$K = \frac{\rho_w g}{5\eta_w B_s^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (3-1)$$

ここに、 $K$  : 透水係数、 $\rho_w$  : 水の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $g$  : 重力加速度(m/s<sup>2</sup>)、 $\eta_w$  : 水の粘度(kg/m·s)、 $B_s$  : 固体粒子の単位体積あたりの表面積(m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)、 $\varepsilon$  : 間隙比

練混ぜ水には気泡と化学物質があるため、水の密度  $\rho_w$  は純水と同じではない。また、水中の微細な気泡は、表面張力によって球形を保ったまま変形しないようになる。このため、微細な気泡の存在は、水の変形を阻害して、水の粘性  $\eta_w$  を増加させる。

フレッシュコンクリートの間隙比は、空気・水とコンクリートとの体積比と考えられる。しかし、太田ら<sup>30)</sup>は、練混ぜ水は、図5に示すように、充填拘束水、水膜水、自由水およびセメント凝集体の内部に拘束される凝集内部拘束水に分けられ、充填拘束水、水膜水および凝集内部拘束水は、通常の静置状態の間隙水圧によって自由に移動できず、ブリーディングは自由水から発生すると指摘している。前述したように、水中の微細な気泡は、表面張力によって球形を保ったままであるため、静置状態の間隙水圧で外部に逸脱しにくい。また、水膜水のみが凝結前の水和反応に寄与すると考えれば、自由水のみがブリーディングする。ここに、自由水による固体粒子の間隙を実効間隙と呼ぶことにする。

Powers は、拘束水および水和反応に参加する結合水の影響を考慮した透水係数式を、式(3-2)に示すように提案した<sup>23)</sup>。しかし、この実験式中のパラメータ  $x$  を測定や設定することは現時点ではできない。

$$K = \frac{\rho_w g}{5\eta_w B_s^2 (1-x)} \cdot \frac{(\varepsilon-x)^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (3-2)$$

ここに、 $x$  : 拘束水と結合水の影響を補正するための定数

したがって、本研究では、実効間隙比を用いて、式(3-1)によってフレッシュコンクリートの透水係数を算定することにする。フレッ

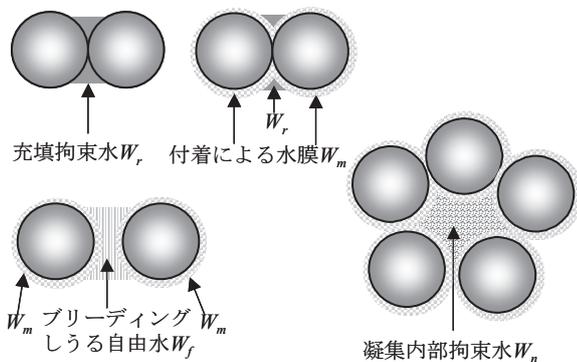


図5 フレッシュコンクリート中の水の存在状態

シュコンクリートの初期透水係数は、式(3-3)によって表される。

$$K_0 = \frac{\rho_w g}{5\eta_w B_s^2} \cdot \frac{\varepsilon_{e0}^3}{(1-\varepsilon_{e0})^2} \quad (3-3)$$

ここに、 $K_0$  : 初期透水係数、 $\varepsilon_{e0}$  : 初期実効間隙比

初期実効間隙比は、式(3-4)によって求められる。

$$\varepsilon_{e0} = W_f \quad (3-4)$$

ここに、 $W_f$  : 単位水量中の自由水の体積(m<sup>3</sup>)

粒子の沈降圧密と水のブリーディングに伴って、実効間隙比は減少して、透水係数は小さくなっていく。しかし、フレッシュコンクリートのブリーディング量は、第1章に述べた制限値以下であれば、全体水量の5%以下にすぎない。したがって、本研究では透水係数のブリーディングに伴う減少を無視することにする。

フレッシュコンクリートを粗骨材とマトリックスモルタルの2材料とみなし、粗骨材粒子がモルタルに包まれ、粗骨材粒子の表面に強く付着する水がないと考えれば、練混ぜ水は、セメント粒子と細骨材の表面に付着し、それらの間隙に存在する。太田らが提案したセメントペースト中の自由水  $W_f$  の計測方法<sup>30)</sup>を拡張すると、フレッシュコンクリート中の自由水量は以下の手順で求められる。

まず、セメント粒子をよく分散させるために、高性能減水剤を多量(1.5%以上)に添加し、水-固体粒子(セメントと細骨材)の質量比を6つ以上の水準に変化させてモルタル(タイプI)を練り混ぜる。その直後に、JIS R 5201:1997 に準じてモルタルのフロー値を測定する。モルタルに使用するセメント、細骨材および混和材は、ブリーディングの予測対象であるコンクリートに用いられるものと一致し、セメントと細骨材の質量比も同じにする。

また、ブリーディングの予測対象であるコンクリートに用いるセメントと細骨材の質量比、減水剤の種類と添加率を同じにして、水-固体粒子の質量比を変えてモルタル(タイプII)を練り混ぜてフロー値を測定する。

次に、測定したフロー値と水-固体粒子の質量比をプロットして、図6に示すようなグラフを得る。タイプIのモルタルのフロー値がゼロである時およびグラフの屈折点における水-固体粒子の質量比によって、それぞれ充填拘束水量  $W_r$  と水膜水量  $W_m$  を求める。また、タイプIIのモルタルのグラフの屈折点における水量  $W^*$  より、凝集内部拘束水量  $W_n$  を計算する( $W_n = W^* - W_r - W_m$ )。

最後に、フレッシュコンクリートの単位水量  $W$  より自由水量  $W_f$  を算出する( $W_f = W - W_n - W_r - W_m$ )。

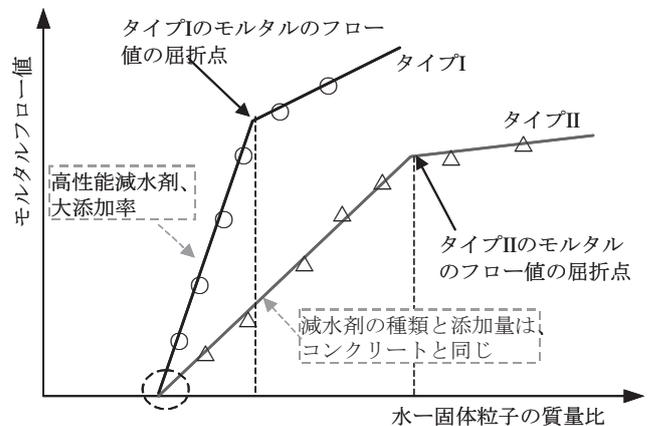


図6 モルタルのフローと水-固体粒子の質量比との関係

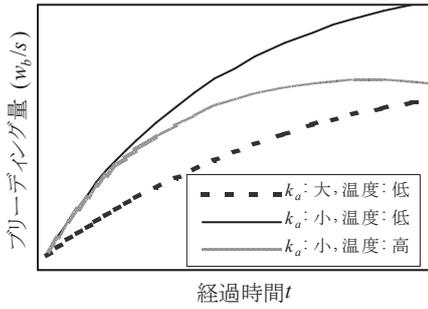


図7 ブリーディング量の経時変化模式図

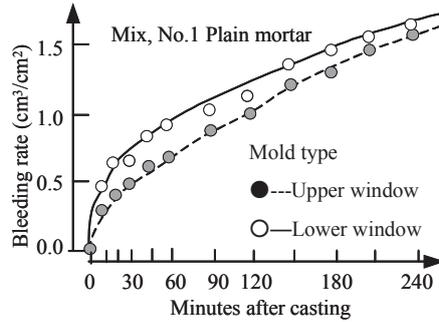


図8 ブリーディング量の経時変化の実験結果<sup>37)</sup>

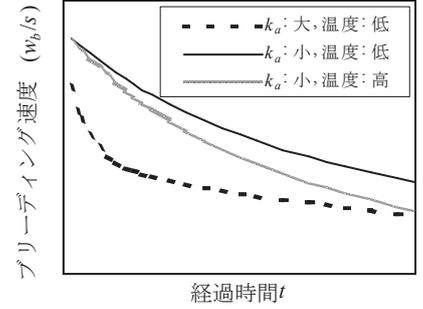


図9 ブリーディング速度の経時変化模式図

#### 4. ブリーディングの経時変化モデル

フレッシュコンクリート中の水の移動に Darcy 則を適用すると、水の上昇速度  $v_b$  は、式(4-1)のように表される。

$$v_b = K \cdot u \quad (4-1)$$

ここに、 $v_b$  : 水の上昇速度(m/s)

コンクリートの下部の方が、上部試料の重力が大きいため、間隙水圧は大きい。式(2-20)に示す間隙水圧は、高さが  $h$  であるフレッシュコンクリートの間隙水圧の平均値である。したがって、上表面まで上昇する水量、つまり、ブリーディング水量  $w_b$  の経時変動は、式(4-2)のようである。

$$\frac{dw_b}{dt} = v_b \cdot s = s \cdot K_0 \cdot u \quad (4-2)$$

ここに、 $w_b$  : ブリーディング量(m³)

式(2-8)、式(2-9)および式(3-3)を式(2-20)に代入して、さらに式(2-20)を式(4-2)に代入して積分すると、任意の時刻のブリーディング量  $w_b/s$  (m³/m²) は、式(4-3)のように得られる。

$$\frac{w_b}{s} = \frac{\rho_w g}{10\eta_w B_s^2} \cdot \frac{W_f^3}{(1-W_f)^2} \cdot \left\{ \frac{1}{k_a} \left[ \left( \sigma_v + \frac{s_e}{2s} \rho h \right) (1 - \tan \delta_0) - a \cdot c \cdot \frac{t_s}{t_i} \right] \cdot (1 - \exp(-k_a t)) \right\} + a \cdot c \cdot \left( \frac{t_s}{t_i} - \frac{1}{2} \frac{t}{t_i} \right) \cdot t \quad (4-3)$$

式(4-3)は、フレッシュコンクリートのブリーディングの経時変化モデル式である。

式(4-4)が成立するため、ブリーディング量は、時間  $t$  の増加関数である。式(4-3)によれば、ブリーディング量の経時変化の特徴は、図7に示すようになる。経時変化曲線の形状は、図8に示す既往の実験結果<sup>37)</sup>と一致している。

$$\frac{dw_b/s}{dt} = K_0 \cdot u \geq 0 \quad (4-4)$$

式(4-3)の両辺を時間  $t$  で除すと、ブリーディング速度式は、次式のように得られる。

$$\frac{w_b/s}{t} = \frac{\rho_w g}{10\eta_w B_s^2} \cdot \frac{W_f^3}{(1-W_f)^2} \cdot \left\{ \frac{1}{k_a} \left[ \left( \sigma_v + \frac{s_e}{2s} \rho h \right) (1 - \tan \delta_0) - a \cdot c \cdot \frac{t_s}{t_i} \right] \cdot (1 - \exp(-k_a t)) / t \right\} + a \cdot c \cdot \left( \frac{t_s}{t_i} - \frac{1}{2} \frac{t}{t_i} \right) \quad (4-5)$$

式(4-5)の右辺において、大括弧内の第2項の値は時間に伴って減少する。また、第1項の時間  $t$  についての導関数は負値であるため、

第1項の値も時間とともに小さくなる。したがって、ブリーディング速度は、時間と共に減少することが認められる。式(4-5)によって得られるブリーディング速度の経時変化の特徴を図9示す。経時変化曲線の形状は、既往の実験結果<sup>27)</sup>と一致している。

経過時間を始発時間  $t_i$  と取ると、最終ブリーディング量は、式(4-6)に示すように求められる。

$$\left( \frac{w_b}{s} \right)_{\max} = \frac{\rho_w g}{10\eta_w B_s^2} \cdot \frac{W_f^3}{(1-W_f)^2} \cdot \left\{ \frac{1}{k_a} \left[ \left( \sigma_v + \frac{s_e}{2s} \rho h \right) (1 - \tan \delta_0) - a \cdot c \cdot \frac{t_s}{t_i} \right] \cdot (1 - \exp(-k_a t_i)) \right\} + \frac{a \cdot c}{2} \cdot \frac{t_s^2}{t_i} \quad (4-6)$$

式(4-6)によれば、コンクリートの単位容積質量  $\rho$ 、高さ  $h$ 、表面垂直圧力  $\sigma$  および自由水量  $W_f$  (単位水量、水セメント比、結合材・細骨材の比表面積および混和材料などに依存する) の増加に伴って、最終ブリーディング量が増大する。しかし、固体粒子の比表面積  $B_s$  の増大に伴って、最終ブリーディング量は減少する。これらは、一般的な知見と一致している。

また、式(2-20)の下に示すパラメータ  $a$  値の変化を分析することによって、環境温度、セメントの細度・組成および混和材料の種類・置換率などが最終ブリーディング量に与える影響を明らかにすることができる。

なお、水に気泡があると、水の密度  $\rho_w$  は減少し、前述したように微細な気泡が水の粘度  $\eta_w$  を増大させるため、コンクリート中の空気量が多いほど、式(4-6)からブリーディング量は少なくなる。

式(4-6)中のパラメータ  $\delta_0$  は、初期平均粒子滑動抵抗角であり、フレッシュコンクリートの流動性に依存するものである。流動性は高いほど、固体粒子の噛み合い程度は低く、フレッシュコンクリートのせん断変形抵抗は小さいため、式(2-4)によって初期平均粒子滑動抵抗角  $\delta_0$  は小さくなる。式(4-6)によると、 $\delta_0$  の減少に伴って、ブリーディング量は増大する。

#### 5. 実験検証

ブリーディング実験に用いたコンクリートの調合を表1に示す。用いた普通ポルトランドセメントの C<sub>3</sub>A と C<sub>4</sub>FA の含量はともに9%である。また、その比表面積は 335m<sup>2</sup>/kg である。混和材料を使わないため、式(2-12)と式(2-13)から、結合材の活性化エネルギーは 44977J/mol である。 (3.3.2-4)

細骨材と粗骨材(最大寸法  $D_{\max}$ : 20mm)は、それぞれ海砂と砕石であった。粗粒率は2.57と6.67であり、吸水率は1.60%と0.40%であった。

表1 実験に用いたコンクリートの調合

No.	W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )					フレッシュ時の性質				
			W	C	S	G	Sp (C×%)	Sl (cm)	Sf (mm)	T <sub>50</sub> (s)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	
C <sub>1</sub>	50	38	165	330	691	1128	0.4*	8.0	-	-	2400	
C <sub>2</sub>	50	38	175	350	674	1100	0.8*	18.0	-	-	2330	
C <sub>3</sub>	50	38	165	330	691	1128	0.8**	-	456	-	2438	
C <sub>4</sub>	50	38	175	346	678	1106	0.9**	-	502	4.39	2420	
C <sub>5</sub>	50	38	183	366	661	1079	0.8**	-	623	2.62	2414	
C <sub>6</sub>	40	38	183	458	633	1032	0.8**	-	580	3.75	2430	
C <sub>7</sub>	45	38	183	407	648	1058	0.8**	-	594	2.39	2421	
C <sub>8</sub>	55	38	183	333	672	1096	0.8**	-	562	3.00	2430	

注: W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, W, C, S, G: それぞれ水、セメント、砂および砕石の単位質量(kg), Sp\*: AE減水剤, Sp\*\*: 高性能AE減水剤, Sl: スランプ(cm), T<sub>50</sub>: 50cmフロー時間(s), Sf: スランプフロー(mm)

表2 経時変化モデル式(4-3)中の各パラメータの設定値

No.	K <sub>0</sub> (×10 <sup>-8</sup> m/s)	k <sub>a</sub>	σ <sub>v</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	b	h (m)	tanδ <sub>0</sub>	c (kg/m <sup>2</sup> )	t <sub>i</sub> (min.)	t <sub>s</sub> (min.)
C <sub>1</sub>	10.0	0.031	0	4.50	0.17	0.5	15	360	120
C <sub>1</sub>					0.25				
C <sub>2</sub>	14.0	0.030	61	3.10	0.25	0.2	15	420	180
C <sub>2</sub>		0.031	122	3.25					
C <sub>2</sub>		0.035	183	3.80					
C <sub>3</sub>	11.0	0.025	0	3.25	0.25	0.30	15	420	180
C <sub>4</sub>	11.5	0.030		3.20		0.29			
C <sub>5</sub>	12.5	0.032		3.05		0.23			
C <sub>6</sub>	4.0	0.030		3.10		0.26			
C <sub>7</sub>	8.0	0.031	0	3.09	0.25	0.25	18	420	250
C <sub>8</sub>	13.0	0.029		3.13		0.27			

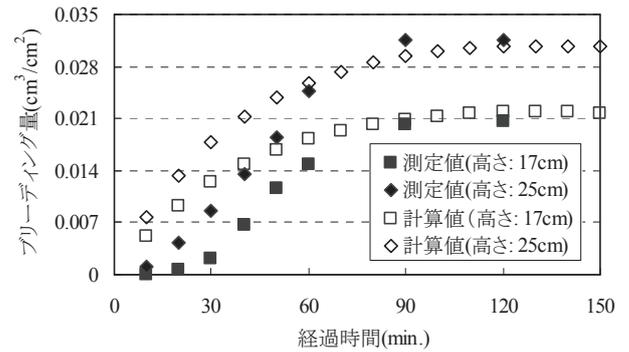
注: K<sub>0</sub>: 透水係数, k<sub>a</sub>: 比例定数(式(2-8)参照), σ<sub>v</sub>: 外部垂直圧力, b: 側壁影響範囲と骨材の最大寸法との比, h: 試料の高さ, δ<sub>0</sub>: 初期粒子抵抗角, c: 定数(式(2-9)参照), t<sub>i</sub>: コンクリートの凝結始発時間, t<sub>s</sub>: ブリーディングが停止するまでの経過時間

強制型ミキサーを用いて3分間でコンクリートを練り混ぜた直後に、スランプまたはスランプフロー、50cmフロー時間、単位容積質量をそれぞれ測定した。また、JISA1123に準じてブリーディング水量の測定を行った。実験時の温度Tは25℃であったため、パラメータaの値は0.734である。

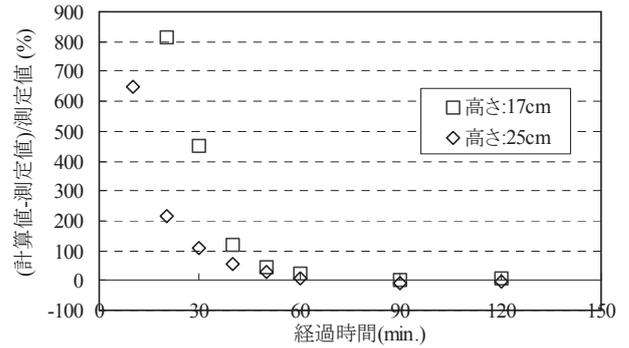
本来、ブリーディング量の経時変化モデル式(4-3)中の各パラメータを測定して、表1に示す各コンクリートのブリーディング量を計算して、実測値と比べることによって、式(4-3)の信頼性を検証するのが原則である。しかし、式(4-3)中のパラメータs<sub>e</sub>, k<sub>a</sub>, δ<sub>0</sub>およびcなどの測定は、現時点では殆ど不可能である。したがって、本研究では、最終ブリーディング量の計算値を測定値と一致させるようにモデル式(4-3)中の各パラメータの値を設定した上で、各時刻のブリーディング量を計算し、測定値と比較した。計算値と測定値との一致性およびパラメータの設定値の合理性より、提案した経時変化モデルの妥当性を検証した。

### 5.1 ブリーディング量の実測値と計算値の比較

#### (1) 高さの影響

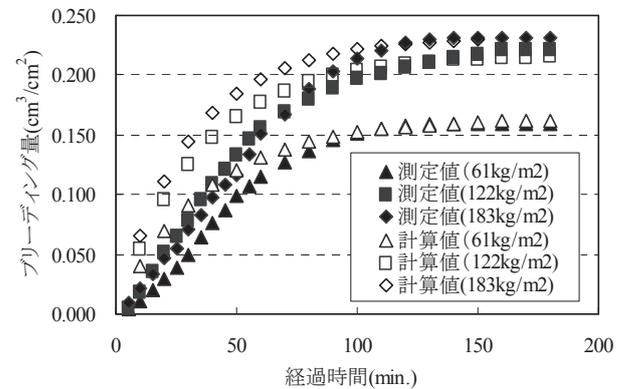


(a) 計算値と測定値

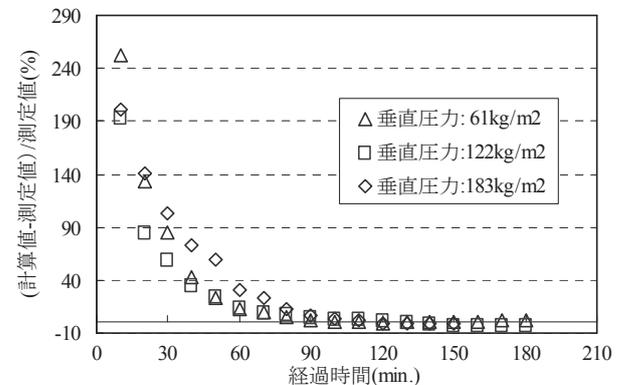


(b) 計算値と測定値の差異程度

図10 ブリーディング量の経時変化に与える試料の高さの影響



(a) 計算値と測定値



(b) 計算値と測定値の差異程度

図11 ブリーディング量の経時変化に与える垂直圧力の影響

フレッシュコンクリート C<sub>1</sub> を JIS 試験方法の標準容器(内径  $d=25\text{cm}$ , 水平断面積  $s=0.049\text{m}^2$ )に 17cm および 25cm の高さまで充填した後、ブリーディング量を測定した。異なる試料の高さでの実験結果を図 10(a)に示す。試料の高さの増加に伴って、ブリーディング量は増加する傾向が見られた。

120 分の最終ブリーディング量の計算値を測定値と一致させるように設定した各パラメータの値を表 2 に示す。h 以外のパラメータの設定値は同じである。図 10(b)に示すように、およそ 60 分から 120 分までのブリーディング量の計算値と測定値はよく一致している。ピペットでブリーディング水を完全に吸い取れなかったことが、60 分までのブリーディング量の計算値が測定値より大きかった理由であると思われる。初期のブリーディング量は少なく、測定誤差が相対的に大きいため、60 分までの(計算値-測定値)/測定値の値は大きかった。また、試料の高さが高いほど、両者の差異程度が小さい傾向が見られた。これは、高い試料の体積が大きく、ブリーディング量が大きく、ブリーディング量の測定誤差は相対的に小さいためと考えられる。

(2) 垂直圧力の影響

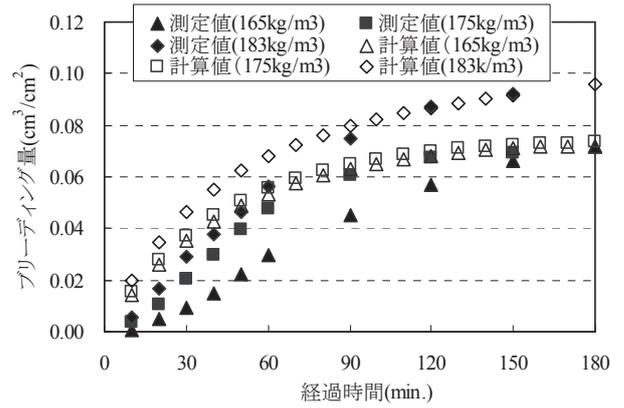
フレッシュコンクリート C<sub>2</sub> のブリーディング量を測定する時に、アルミ平板(直径 240mm×厚さ 5mm)と重りを試料の上に載せた。重りを調節して、アルミ板と重りの総重量をそれぞれ 3kg, 6kg および 9kg の 3 水準にした。ブリーディング量の経時変化の実験結果を図 11(a)に示す。垂直圧力が大きいほど、ブリーディング量が増大することが認められた。180 分の最終ブリーディング量の計算値を測定値と一致させるように各パラメータの値(表 2 参照)を設定した上、各時刻のブリーディング量を計算した。計算結果を図 11(a)に示す。図 11(b)は、計算値と測定値の差異程度を示すものである。およそ 60 分から 180 分までの計算結果は測定値とよく一致している。前述のように、60 分までの計算値が測定値より大きいのは、ブリーディング水の吸い取りに誤差があるためである。また、図 10(b)と図 11(b)を比べると、垂直圧力を加えた場合の計算値と測定値の差異は小さいことがわかった。垂直圧力を加えた場合には、ブリーディング量が多かったため、測定誤差が相対的に小さくなり、計算値との差異が小さくなったと思われる。

(3) 単位水量の影響

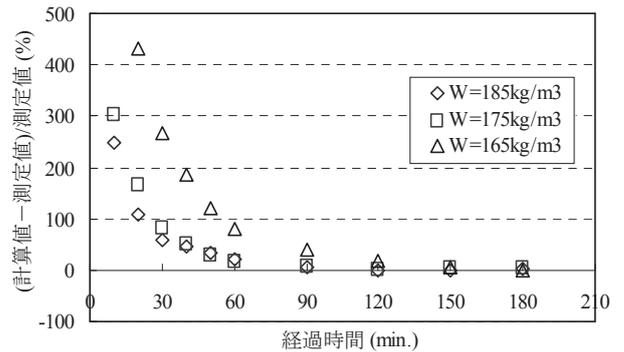
コンクリート C<sub>3</sub>~C<sub>5</sub> のブリーディング量の実験結果を図 12(a)に示す。同図によって、単位水量が大きいほど、ブリーディング量が大きいことが認められる。180 分の最終ブリーディング量の計算値を測定値と一致させるように設定した各パラメータの値を表 2 に示す。各時刻の計算結果を図 12(a)に併示する。計算値と測定値の差異程度を図 12(b)に示す。60~180 分間のブリーディング量の計算値は測定値とよく一致している。単位水量が 165kg/m<sup>3</sup> である試料の 60 分までのブリーディング量の計算値と測定値の差異が他の試料より大きかったのは、単位水量が 165kg の場合にはブリーディング量が少なく、ピペットでの吸い取りによるブリーディング量の測定誤差がより大きかったためと考えている。

(4) 水セメント比の影響

コンクリート C<sub>6</sub>~C<sub>8</sub> のブリーディング量の実験結果を図 13(a)に示す。同図より、水セメント比が大きいほど、ブリーディング量が多い。210 分の最終ブリーディング量の計算値を測定値と一致させ

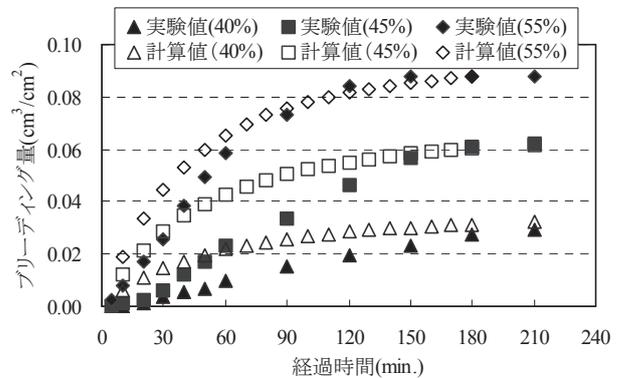


(a) 計算値と測定値

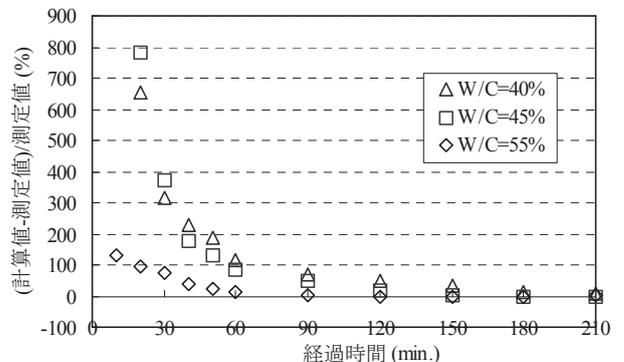


(b) 計算値と測定値の差異程度

図 12 ブリーディング量の経時変化に与える単位水量の影響



(a) 計算値と測定値



(b) 計算値と測定値の差異程度

図 13 ブリーディング量の経時変化に与える水セメント比の影響

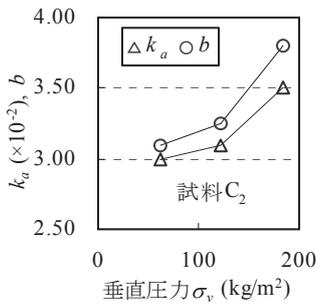


図 14  $k_a, b$  と垂直圧力の関係

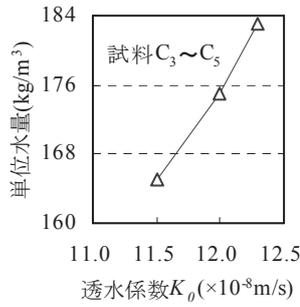


図 15 透水係数と  $W$  の関係

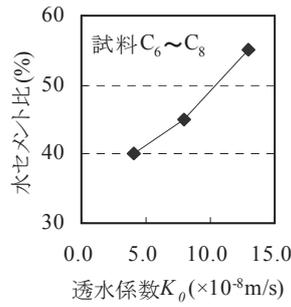


図 16 透水係数と  $W/C$  の関係

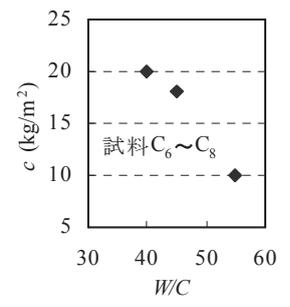


図 17  $c$  と  $W/C$  の関係

るように設定した各パラメータの値を表 2 に示す。各時刻のブリーディング量の計算値を図 13(a) に示す。図 13(b) に示すように、60～210 分間のブリーディング量の計算値と測定値はよく一致している。水セメント比が 55% の試料の 60 分までの計算値と測定値の差異程度が他の試料より小さかったのは、そのブリーディング量が相対的に多く、測定誤差は相対的に小さかったためと考えられる。

## 5.2 計算に用いたパラメータの設定値の合理性

最終ブリーディング量の計算値を測定値と一致させるように設定した各パラメータによって得られた各時点のブリーディング量の計算値は実測値と一致しても、パラメータの設定値は、コンクリートの調合に対応せず、不合理であれば、モデル式(4-3)は妥当であるとはいえない。従って、次に、表 2 に示す各パラメータの設定値の合理性を検討する。

図 14 に  $k_a$  と  $b$  の設定値と垂直圧力の関係を示す。同図に示すように、垂直圧力が大きいほど、 $k_a$  と  $b$  の設定値は大きい。垂直圧力の増大に伴って、粒子の沈降圧密が速くなるため、 $k_a$  は大きくなる。また、側圧が垂直圧力とともに大きくなるため、側圧による側壁の拘束の影響範囲が増大し、 $b$  値は増加するはずである。したがって、垂直圧力の影響を計算するための  $k_a$  と  $b$  の設定は合理的である。

図 15、図 16 に、透水係数と単位水量  $W$ 、水セメント比  $W/C$  の関係を示す。単位水量または水セメント比の増大に伴って、透水係数の設定値は大きくなる。単位水量が多いほど、自由水  $W_f$  が多いため、式(3-3)と式(3-4)によって透水係数は増大する。また、水セメント比が大きいほど、単位セメント量が小さくなり、自由水  $W_f$  が増加し、固体粒子の比表面積  $B_s$  が減少するため、透水係数は増大する。

図 17 に、試料 C6～C8 のパラメータ  $c$  の設定値と水セメント比の関係を示す。パラメータ  $c$  は、セメントの水和生成物によるコンクリートの圧縮強度の比例係数である。第 2 章に述べたように、水和生成物が同じであっても、水セメント比が大きいほど、空隙が多いため、強度は小さい。したがって、水セメント比の増加に伴って、 $c$  値は減少するはずである。

図 18 に、試料 C3～C8 の  $k_a, b, \tan \delta_0$  とスランプフロー  $S_f$  の関係を示す。スランプフローの増加に伴って、 $k_a$  は増大するが、 $b$  と  $\tan \delta_0$  は減少する。流動性が増大すると、固体粒子は沈降しやすいため、固体粒子の沈降圧密速度と関連するパラメータ  $k_a$  は大きくなるはずである。また、流動性が高いほど、粒子の噛み合いは弱く、初期平均粒子接点角  $\delta_0$  は小さく、また側壁拘束の影響範囲が小さいため、 $b$  値は小さくなる。

また、文献 38)によれば、単位水量が 185kg で水セメント比が 65% 以下の場合には、フレッシュコンクリートの透水係数は  $15 \times 10^{-8} \text{m/s}$  以下である。表 2 に示すように、すべての  $K_0$  設定値は、この範囲に入っている。

したがって、最終ブリーディング量の計算値を測定値と一致させるように設定した式(4-3)中の各パラメータの値は、コンクリートの調合によく対応しており、合理的に設定された。ブリーディング量の計算値と測定値の前述した比較によって、提案したモデル式(4-3)は、あくまでも静置時間が約 60 分以降のブリーディング量の予測に適用しうると考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、フレッシュコンクリートを含む水粒子集合体とみなして、まず、粒子配列およびセメントの水和生成物が支持できる重力と垂直圧力の経時変化について理論的考察を行い、間隙水圧の経時変化式(式(2-20)参照)を得た。

次に、Kozeny-Carman 透水係数式に基づき、フレッシュコンクリートに適用でき、自由水量を考慮した透水係数式を提案した(式(3-3)参照)。また、自由水量の求め方を提示した。

さらに、Darcy 則によって、フレッシュコンクリートのブリーディング量の経時変化モデル式、最終ブリーディング量式、ブリーディング速度式をそれぞれ誘導して求めた(式(4-3, 5, 6)参照)。

8 シリーズのコンクリートを用いて、試料の高さ、垂直圧力、単位水量および水セメント比がブリーディング量に与える影響について実験的考察を行った。また、ブリーディング量の経時変化モデル式中の各パラメータを合理的に設定して、各時点のブリーディング量を計算した。各時点の計算値と測定値を比較することによって、提案したブリーディング量の経時変化モデルの妥当性を検討し、静置時間がおよそ 1 時間以降のブリーディング量をこのモデルで予測しうることを明らかにした。

フレッシュコンクリートのブリーディングを、その粒子配列が自重と垂直圧力を十分に支持できないことによって発生する間隙水圧

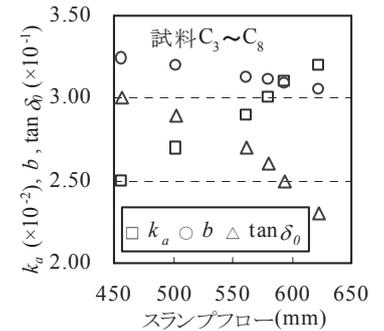


図 18  $k_a, b, \tan \delta_0$  の設定値に与える  $S_f$  の影響

に起因するものと考え、粒子配列が自重を支持する能力に及ぼすセメント水和の影響を考慮し、自由水による実効間隙比の概念を導入することによってブリーディングモデルを提案した。これにより、ブリーディングに与える使用材料（セメントの種類、成分、細度など）、調合（水セメント比、単位水量、混和材料の種類と置換率など）、試料の寸法（高さ、水平断面面積）、単位容積質量、流動性、垂直圧力および温度などの影響を表現できた。

現時点では、モデル式のすべてのパラメータを測定できないため、パラメータの測定結果に基づいたフレッシュコンクリートのブリーディング量の計算を行うのは困難である。しかし、標準ブリーディング試験における最終ブリーディング量の測定結果と計算結果を一致させることによって、各パラメータの値を決定すれば、決定したパラメータ値を利用して、非標準試験や現場施工の条件下のブリーディング量を推定することが可能である。この点から鑑みれば、提案したモデルは現時点でも実用性があると考えられる。

### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究(B)、課題番号：22360228、課題名：材料分離を考慮したコンクリートの生産・施工システムの構築、研究代表者：李柱国）の助成を受けたものです。また、九州産業大学工学部都市基盤デザイン工学科 松尾栄治 准教授に貴重なアドバイスをいただきました。ここに、記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 十代田知三：引張強度にみられるコンクリートの異方性，日本建築学会論文報告集，No.230，pp.1-9，1975.4
- 2) T. A. Söylev, and R. François：Corrosion of reinforcement in relation to presence of defects at the interface between steel and concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.17, No.4, pp.447-455, 2005.8
- 3) 青木秀行ほか：水セメント比の違いによる鉄筋近傍の透水性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.519-524，2002.7
- 4) 神田衛・吉田八郎：コンクリート打込み後の柱断面における水セメント比の分布性状，セメント・コンクリート，No.342，pp.27-32，1975.8
- 5) Y. Kasai, and I. Matsui：Studies on concrete strength of structure in Japan, *Quality Control of Concrete Structures*, RILEM, p.89, 1979.6
- 6) G. Giaccio, and A. Giovambattista：Bleeding: evaluation of its effects on concrete behavior, *Materials and Structures*, Vol.19, No.4, pp. 265-271, 1986.5
- 7) 因幡芳樹ほか：コンクリートの打重ね部の付着強度に及ぼす打重ね時間間隔とセメント種類の影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.73，No.631，pp.1443-1448，2008.9
- 8) ACI technical committee: Estimating evaporation rates to prevent plastic shrinkage cracking, *Concrete International*, pp.80-82, 2007.3
- 9) J. F. Lamond, and J. H. Pielert：Significance of tests and properties of concrete & concrete-making materials, *ASTM International*, pp.99-122, 2006.4
- 10) 田代忠一・田澤栄一・笠井芳夫：セメント・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.111-125，1993.10
- 11) W. Zhang, Z. Li, and J. Li: An Experimental Study on The Bleeding of Fresh Concrete in Static and Vibrated States, コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1441-1446，2009.7
- 12) 三岩敬孝ほか：フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートに関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.97-102，1998.7
- 13) 大平好亮ほか：混和材を用いたセメントペーストのブリーディングに関する研究，土木学会第63回年次学術講演会，pp.483-484，2008.9
- 14) 木下健二：ブリーディング挙動に対する高性能減水剤の影響，セメント技術大会講演集，No.48，pp.380-385，1994.5
- 15) 山本隆信・杉山隆文・辻幸和：フライアッシュコンクリートの空気連行

- 性およびブリーディングに影響及ぼす各種要因，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.97-102，1998.7
- 16) C. S. Poon, S. C. Kou and L. Lam：Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete, *Materials and Structures*, Vol.40, No.9, pp.981-988, 2007.10
  - 17) 齊藤丈士ほか：ごみ溶融スラグ細骨材を用いた高性能 AE 減水剤コンクリートのブリーディングに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.121-126，2005.7
  - 18) L. Jossierand, and F. Larrard: Experimental study of scale effect in fresh mortar bleeding, *Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction*, Thomas Telford Publishing, pp.819-826, 2002.8
  - 19) 月岡存：フレッシュコンクリートの性状変化に及ぼす温度の影響，三重大学生物資源学部紀要，No.15，pp.19-25，1995.12
  - 20) 高梨大介ほか：合成短繊維によるブリーディングの抑制効果，コンクリート工学年次論文集 Vol.27，No.1，pp.253-258，2005.7
  - 21) 犬飼利嗣ほか：視覚的評価方法によるコンクリート中のブリーディング挙動に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.609-614，2004.7
  - 22) T. C. Powers：The bleeding of Portland cement paste, mortar and concrete, *Research Laboratory of the Portland Cement Association, Bulletin*, No.2, pp.132-155, 1939.7.
  - 23) A. Radocea: A new method for studying bleeding of cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, No.5, pp.855-868, 1992.6
  - 24) T. S. Tan, T.H. Wee, S. A. Tan, C.T. Tam, and S. L. Lee：A consolidation model for bleeding of cement paste, *Advanced Cement Research*, Vol.1, No.1, pp.18-26, 1987.10
  - 25) P. H. Morris：Analytical solution of linear finite- and small-strain one-dimensional consolidation, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.29, pp.127-140, 2005.2
  - 26) T.S. Tan, C. K. Loh, K.Y. Yong, and T.H. Wee：Modeling of bleeding of cement paste and mortar, *Advances in Cement Research*, Vol.9, No.34, pp.75-91, 1997.4
  - 27) L. Jossierand, O. Coussy, and F. D. Larrard：Bleeding of concrete as an ageing consolidation process, *Cement and Concrete Research*, Vol.36, pp.1603-1608, 2006.9
  - 28) P.H. Morris, and P.F. Dux：Analytical solutions for bleeding of concrete due to consolidation, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp.1531-1540, 2010.10
  - 29) C. A. Clear, and D.G. Bonner：Settlement of fresh concrete-an effective stress model, *Magazine of Concrete Research*, Vol.40, No.142, pp.3-12, 1988.3
  - 30) 李柱国・谷川恭雄・森博嗣・大久保孝昭：フレッシュモルタルのせん断破壊限界応力に関する物性論的アプローチ，日本建築学会構造系論文集，No.542，pp.47-53，2001.4.
  - 31) 村山朔郎：土の力学挙動の理論，技報堂出版，pp.158-165 と 102-107, 1990.10
  - 32) 李柱国・大久保孝昭・谷川恭雄・森博嗣：高流動コンクリートのせん断流動挙動に関する理論的考察，日本建築学会構造系論文集，No.563，pp.1-8，2003.1
  - 33) Z.Li, T. Ohkubo, and Y. Tanigawa：Yield model of high fluidity concrete in fresh state, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.16, No.3, pp.195-201, 2004.6
  - 34) A. K. Schindler：Prediction of concrete setting, *Proceedings of the RILEM International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering*, RILEM Publications SARL, pp.1-14, 2004.3
  - 35) D. Chandra, P. J. Sereda, and E. G. Swenson：Hydration and strength of neat portland cement, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 20, No. 64, pp.131-136, 1968.9
  - 36) 太田顕・名和豊春・大沼博志：セメント粒子の凝集構造とセメントペーストの流動性の関係，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.271-276，2001.6
  - 37) 小野博宣・伊藤和幸：フレッシュモルタルのブリーディング特性，セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.424-429，1997.8
  - 38) 犬飼利嗣・三島直生・畑中重光：フレッシュコンクリートの透水係数に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.579-580，2009.8

(2011年12月7日原稿受理，2012年5月25日採用決定)