

論文 細骨材中の表面水移動に関する研究

伊藤 始^{*1}・田邊 忠顕^{*2}

要旨：コンクリート製造においては、細骨材中の水分量の管理が最重要と言われている。しかし、その水分が細骨材中でどのように移動して、表面水が変化するか、内部メカニズムを研究した例は、皆無である。ここでは、砂の不飽和浸透試験を行い、時間に対する毛管水頭の変化の解析的評価を行うことにする。透水試験、水分特性試験を行うことにより砂の特性パラメータの決定を行うと同時に、不飽和浸透流の毛管運動理論に基づき、有限要素および中心差分を用いてモデル化した。

キーワード：細骨材、毛管水頭、不飽和浸透流、透水係数

1. はじめに

コンクリートの配合において、決定した単位水量を正確に用いることは、同じレベルのコンクリートを製造するために重要である[1]。その際の単位水量には、細骨材中の表面水も含まれ正確な計量が必要となる。しかし、実際の現場での表面水の測定方法は、時間や資金の面で困難が多く、保管の段階からの水分管理が必要となるわけである。水分移動についての研究は、農学や土質工学の分野で発達しているが、砂、特に細骨材のように、粒度分布の範囲が限られているものに関してデータが不足しており、砂中の水分移動の研究が必要とされるわけである。本研究では、細骨材中の水分移動を不飽和流動による表面水の移動としてとらえ、それに焦点を当て、排水の面から、実験や解析を試みた。

2. 飽和・不飽和浸透流の理論

2.1 Richards の毛管運動理論

対象とする透水性媒体（土や砂）中に閉曲面をとり、その中の質量保存の関係を考える。水の圧縮性や砂の骨格構造の変化を無視し、かつ見かけの流速ベクトル \vec{q} を用いると、砂中の水分の連続方程式として次式が得られる[2, 3, 4]。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\text{div}(\vec{q}) \quad (1)$$

ここで、 θ は体積含水率、 t は時間、 \vec{q} は流速である。

一方、水分運動を記述する方程式は、飽和地下水に関する Darcy の法則を、透水係数が体積含水率 θ の関数であると仮定して、不飽和浸透流にまで一般化した Buckingham の方程式である。

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

$$\vec{q} = -\vec{K}(\theta) \text{grad}\phi \quad (2)$$

ここで、 $\vec{K}(\theta)$ は透水係数、 ϕ は水理水頭で $\phi = \psi + z$ (ψ は毛管水頭 (圧力水頭)、 z は位置水頭) である。式 (1) に式 (2) を代入すれば、Richards の不飽和浸透流方程式になる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (3)$$

透水係数は一般的にはテンソルであり、異方性を持つと考えるべきであるが、これを測定することは極めて困難であるので、等方性を仮定し、 K を θ の関数から ψ の関数に置き換えて、 $\partial \theta / \partial t = \partial \theta / \partial \psi \cdot \partial \psi / \partial t = C(\psi) \partial \psi / \partial t$ とすると、毛管水頭に関する次式が得られる。ここに、 $C(\psi)$ は比水分容量である。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\psi)}{\partial z} \quad (4)$$

2.2 不飽和特性を表す式

式 (4) を解くには、物理条件として体積含水率 θ 、毛管水頭 ψ 、不飽和透水係数 $K(\theta)$ 、 $K(\psi)$ の相互関係が必要である。理論的な計算や数値解析から、これらの関係を表する数式が提案されてきたが、ここでは、土壌特性式として比較的良好に用いられる、van Genuchten および Kozeny の提案した次式を用いることにしたが、これらの式中の α 、 β 、 m 、 n 、 K_s 、 θ_s 、 θ_r は、実験から求めることにした。

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(\frac{1}{1 + (\alpha|\psi|)^n} \right)^m + \theta_r \quad (5)$$

$$K(\theta) = K_s \cdot S_e^\beta \quad (6)$$

ここに、 θ_s : 飽和含水率、 θ_r : 比残留率 (重力排水後の含水率)、 K_s : 飽和透水係数
 S_e : 有効飽和度 ($= (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$)、 α 、 β 、 m 、 n : 砂の特性パラメータ
 また、比水分容量は式 (5) を微分することにより、次式として表される。

$$C(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \frac{(\theta_s - \theta_r) \cdot m \cdot n \cdot \alpha \cdot (\alpha|\psi|)^{n-1}}{\left\{ 1 + (\alpha|\psi|)^n \right\}^{m+1}} \quad (7)$$

Richards の式に以上の式を物理条件として考慮し、適切な初期条件、境界条件に基づき解析するものとし、一次元不飽和浸透流としてのモデル化を後述する。

3. 不飽和浸透実験

3.1 実験装置

本研究で、使用した実験装置は図-1に示したように、鉛直カラム、ポンプ、散水器、圧力を測定するテンシオメータおよび圧力変換器よりなる。

カラムは、全長 150 cm で直径 10 cm の塩化ビニル製である。このカラムに砂を詰める際、透水試験と条件を同じにするために、砂と水を少しずつカラムに入れ、気泡を取り除く作業をした（水締め）。その時、カラムが長かったり、砂を一度に入れると、砂が均質に分布しなくなり、粒径ごとにかたよる危険がある。そして、水締めの際に最も注意すべきである細かい砂粒子による目詰まりへの対処もした。

カラムの側面には、毛管水頭を測定するための、圧力変換器、小室と連結したテンシオメータを取り付ける。テンシオメータとは、先端に素焼きのポーラスカップを付けた管であり、カップの水を砂中水と連続させてその水圧を測定する装置である。

カラムの底面には、無数の穴をあけた板を用い、布を敷いて砂が漏れないようにした。自由重力排水にした場合、排水がなされないおそれがあるため、水面を CD 面に設け、AB 面での水の堰止めを防いだ。

3.2 実験手順

次の手順で実験を行った。

- ①水締めを終了したカラムを、気乾状態になるまで排水させる。
- ②ポンプから一定の流量の水を流し、その間の水圧の変化をひずみの値としてデータロガーで記録する。測定点 3 カ所のテンションの時間変化が 0 になった時を定常状態とし、流量を切り替える。
- ③測定は、降水中は 2 分間隔、降水後の排水中は 5 分間隔にする。

3.3 実験に用いた試料

1) 砂

実験に用いた砂は、コンクリートを作る際に用いるものと同じである。そして、粒径分布は、土木学会基準に適合するものである。特性は、採取地-豊田、種類-山砂、F.M 3.10 である。

2) 収縮低減剤

これは、水道水との比較のために用いたものであり、水の表面張力を減らすため用いられる薬品である[5]。性質は、成分-低級アルコールのアルキレンオキシド付加物、比重 0.99、pH 6~7 であり、使用量は収縮低減剤 1 に対して水 24 とする。以下より、収縮低減剤が用いられた実験を収縮低減剤と省略することがある。

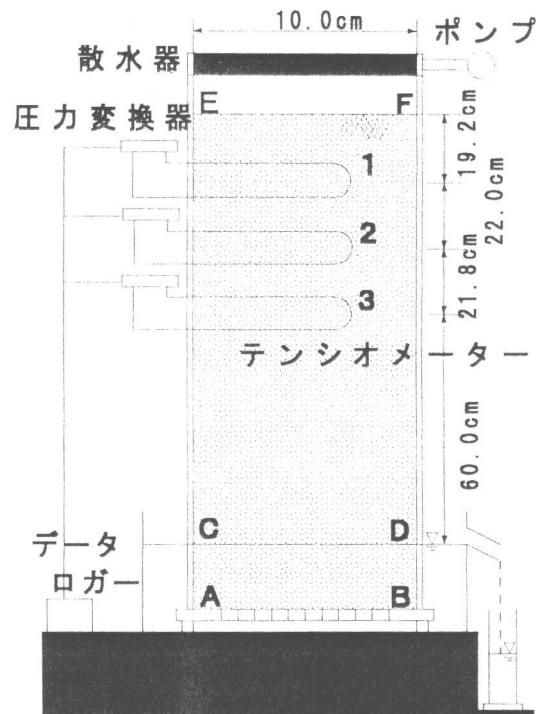


図-1 実験装置の概略図

4. 解析のための予備実験

4.1 透水試験

図-2は、細骨材の飽和透水試験と不飽和透水試験の結果を示したものである。 K_s 、 β を決定するための近似式には、式(6)に示したKozenyの式を用いた。決定したパラメータは表-1に示す。

4.2 水分特性試験

図-3は、細骨材の体積含水率と毛管水頭の関係を実験からプロットしたものである。 θ_s 、 θ_r 、 α 、 m 、 n を決定するための近似式は、式(5)に示したvan Genuchtenの式を用いた。

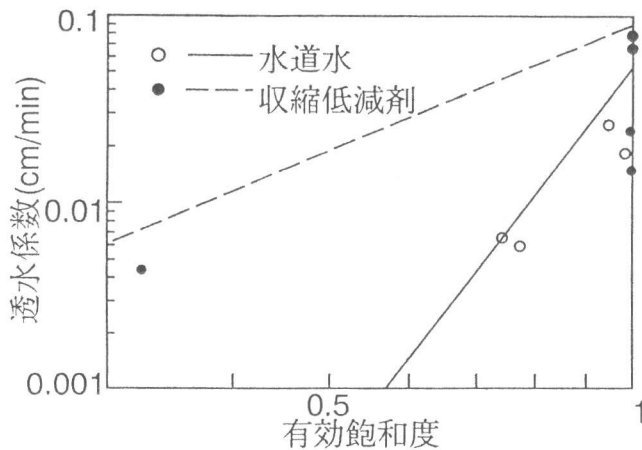


図-2 透水試験

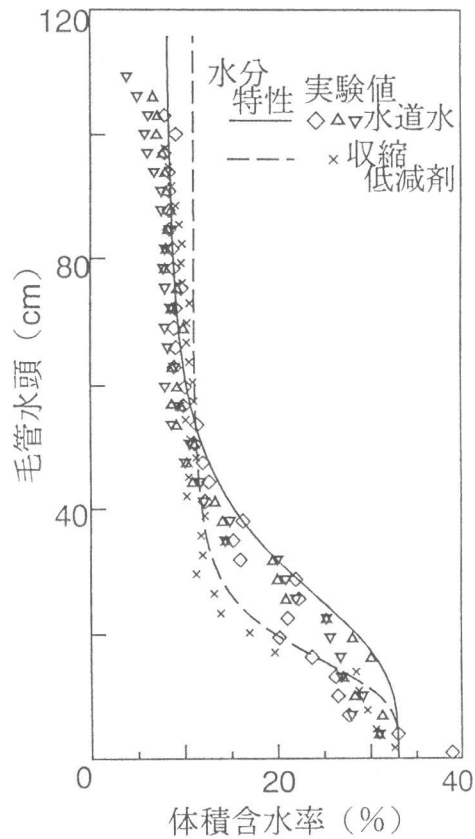


図-3 水分特性曲線

表-1 解析に用いたパラメータ

実験	K_s	β	θ_s	θ_r	α	m	n
水道水	0.0527	7.011	0.33	0.08	0.032	1	3.5
収縮低減剤	0.0902	2.239	0.33	0.11	0.055	1	4.0

5. 一次元不飽和浸透流モデル

5.1 数値解析手法

理論と実験結果を比較・検討するために、不飽和浸透理論に基づいて数値解析を行った。

今回の実験は、鉛直一次元であるので、式(4)において、 $\partial\psi/\partial x = \partial\psi/\partial y = 0$ として得られる次式を基礎式とした。

$$C(\psi) \frac{\partial\psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \frac{\partial\psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\psi)}{\partial z} \quad (8)$$

この式に含まれる各偏導関数を、空間的には有限要素、時間的には中心差分を用いて離散化すると下式に示すような微分方程式が得られる。

$$\left(\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C]\right)\{\psi(t + \Delta t)\} = \left(-\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C]\right)\{\psi(t)\} + \{F\} \quad (9)$$

ここに、 $[K]$ 、 $[C]$ 、 $\{F\}$ それぞれのマトリックスを下式に示す。

$$[K] = \left[\int_V K(\psi) \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} dV + \int_V \frac{\partial K(\psi)}{\partial \psi} [N]^T \frac{\partial [N]}{\partial z} dV \right] \quad (10)$$

$$[C] = \left[\int_V C(\psi) [N]^T [N] dV \right] \quad (11)$$

$$\{F\} = \left\{ - \int_S q [N]^T dS - \int_S K(\psi) [N]^T dS \right\} \quad (12)$$

ここに、 $[N]$ 内挿関数マトリックスである。

また、数値解析にあたっては、以下の境界条件を与える。図において、EF面は降水を考慮することより、EF: $q = -K(\theta) \partial \phi / \partial n$ とする。

一方、CD面は飽和水面を形成しているので、CD: $\psi = 0$ となる。

初期条件としては、実験で測定した3点の初期毛管ポテンシャルを与え、その間については線形に変化させるものとした。計算条件は、 $\Delta z = 1\text{cm}$ 、節点数 126 点、時間間隔 $\Delta t = 0.1\text{min}$ として、予備実験で得られたパラメータを使用して解析を行った。

6. 結果と考察

6.1 予備実験

透水試験について、Kozeny の式が最良であると思われるが、両試験とも試験数が少ないため、解析に用いるパラメータの決定には、疑問が残る。水分特性曲線について、毛管水頭の上部は蒸発、下部は計量時の重力排水や流出を考慮して、含水率を高め、式を内挿した。重力と毛管力がつり合うことにより、毛管水縁が現れているが、収縮低減剤を使用した実験では、含水率に関係なく毛管力が弱まることにより、毛管水頭の高い位置に毛管水縁が現れている。

6.2 不飽和浸透実験

図-4 は、水道水と収縮低減剤のそれぞれの実験結果と解析結果を示したものである。

1) 実験結果

毛管水頭は、降水強度の変化に対応して変化し、一定の値に収束する。これは、砂中の水分量が定常状態に達したことを示している。降水強度を増加させた場合は、砂中の水分量が増え、負圧の毛管力が減少することになる。そして、毛管水頭の変動は、散水点に近い測点ほど、早い時期に現れ、水分の移動が行われていることがわかる。収縮低減剤を使用した場合には、含水率が低下し、透水係数が減少することにより、変動時刻が遅れている。また、変動終了後も少しの変化がみられることや止水後の負圧への増加が少ないことが特徴として挙げられる。

2) 実験と解析の比較・検討

両実験とも、全体的には、大筋において一致した曲線になっている。詳細において、収束した段階での毛管水頭は、収縮低減剤での収束後の少しの上昇を除けば、良く一致している。毛管水頭の変動時期は、収縮低減剤では、良い一致がみられるが、水道水では、降水に対する反応が遅くなっている。これは透水係数と有効飽和度-透水係数関係の傾きが影響していると考えられる。

この影響は、止水後の毛管水頭の降下が鈍いことにも現れる。そして、上昇時の一時的な沈みこみの原因を考える必要がある。

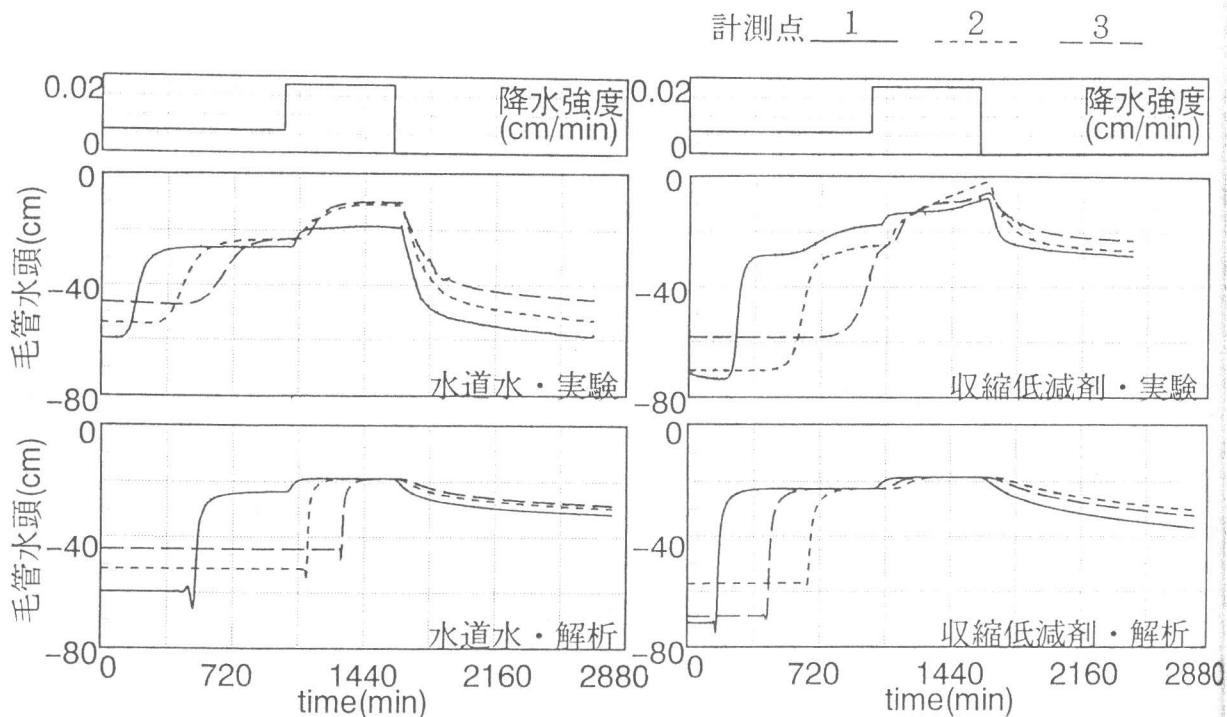


図-4 不飽和浸透実験

6.3 問題点

- ・実験における締め固めと実際の細骨材の管理条件の違いを考慮して、それに適応できる普遍的な方法が必要となる。
- ・水分特性曲線の上において、蒸発による水分損失の影響が、無視できないほど大きいので、蒸発した水分量を調べるか、または、蒸発の影響を小さくする実験方法が必要である。

7. 結論

土の分野で一般的に用いられている Richards の式を多少修正すると、細骨材中の不飽和流動による表面水移動の解析にも適応可能であるようであるが、実際の細骨材中の表面水移動による水分移動に適用するためには、さらに実験を重ね、砂の山積みの状態、サイロ中の状態を検討する必要がある。このような上で、細骨材の水分管理を、解析と点実測と組み合わせて、精度の高いレベルで行えると考えている。

参考文献

- 1) 村田二郎：コンクリート100講、山海堂、1993
- 2) 日野幹雄、太田猛彦、砂田憲吾、渡辺邦夫：洪水の数値予測（その第一歩）、森北出版、1989
- 3) 榎根勇：水文学、大明堂
- 4) 田中恒介：雨水による地表流発生に関する実験的研究、名古屋大学工学部卒業論文
- 5) 日本セメント株式会社：テトラガードAS 20 技術資料、日本セメント株式会社