論文 圧密理論を適用したモルタルの脱水メカニズムに関する基礎的研究

服部 宏己*1・畑中 重光*2・三島 直生*3・和藤 浩*4

要旨:真空脱水処理を行ったコンクリートに関する一連の実験から、処理表面である上層ほど圧縮強度が高く、圧縮強度分布と密度分布の間に強い相関が見られることが筆者らにより報告されている。本研究は、この真空脱水処理に起因した内部圧縮強度分布の発生メカニズムを明らかにすることを目的としている。本報では、その基礎段階として、一次元圧密理論を適用した脱水挙動のモデル化を行うとともに、モルタルの加圧脱水実験を行うことによって、この種の脱水メカニズムの説明に一次元圧密理論の適用が可能であることを示した。 キーワード:真空脱水コンクリート、圧密理論、密度分布、圧縮強度分布、モルタル

1. はじめに

筆者らは、軟練りコンクリートにも適用可能 な真空脱水工法の提案および同工法の改善を目 的として、諸要因を変化させたときの脱水率、 表層硬度および内部圧縮強度分布等の検証・考 察を行ってきた¹⁾。真空脱水工法をより効果的 なものとするには、その脱水過程および圧縮強 度分布の発生メカニズムを解明することが不可 欠であると思われる。フレッシュコンクリート の脱水過程に関する研究はこれまでにも見られ る²⁾が、真空脱水工法を対象とした研究はほと んど見当たらない。

これまでの研究によれば,真空脱水処理を行 ったコンクリートは,上層ほど圧縮強度が高く, 圧縮強度分布と単位容積質量(以下,密度)の 間に強い相関が見られた³⁾。また,水セメント 比の分析を行った結果,この圧縮強度分布と水 セメント比分布はおおむね良い対応を示したが, 真空脱水処理開始時期が圧縮強度に及ぼす影響 については,水セメント比の分布だけでは説明 できなかった⁴⁾。これらのことから,真空脱水 処理を行ったコンクリートの圧縮強度の変化は, 密度および水セメント比の両方の変化によって 説明付けられると推測した。 一方,真空脱水コンクリートでは,コンクリ ート内部の間隙を減圧することで大気圧により 加圧されるという事実に着目し,コンクリート の脱水過程は,大気圧による圧密現象で説明で きると推測した。

以上のように、本研究は、圧縮強度分布の発 生メカニズムを土質工学の分野で扱われている 圧密理論⁵⁾を応用して定量的に明らかにするこ とを目的としている。本報では、加圧脱水によ る密度分布の推定手法を示し、また、加圧脱水 実験を行うことによって、圧密理論の適用性を 検討する。なお、コンクリートの場合、圧密現 象を論じる上で粗骨材の影響が大きいことが予 想されるため、ここではコンクリートの前段階 として、モルタルについて検証することとした。



*1 東急建設(株)名古屋支店 工修 (正会員)
*2 三重大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)
*3 三重大学助手 工学部建築学科 博士(工学) (正会員)
*4 三重大学技術専門職員 工学部建築学科 (正会員)

2. 圧密現象

図-1に圧密現象の概念図を示す。対象とす る試料は、固相および液相の2相に分け、それ ぞれを非圧縮性と仮定している。圧密現象は、 圧密圧力がかかった時に時間の経過とともに液 相が排出され、体積を減らして密度を上げる現 象とされている。真空脱水工法では、前述した ようにコンクリート内部の間隙を減圧すること によって、スラブ上面に大気圧相当の圧力がか かることになる。したがって、真空脱水工法の 脱水挙動は、フレッシュコンクリートが大気圧 により圧密され、余剰水が排出される現象と考 えることができる。

3. 加圧脱水と真空脱水

図-2に加圧脱水と真空脱水の応力状態を示 す⁶⁾。同図より,加圧による圧密圧力が大気圧 に等しい場合,脱水終了時の有効応力は両者と も同じ値となる。また,後述する脱水の過程も, 両者とも同じになる。土を試料とした真空脱水 と加圧脱水の比較実験⁷⁾では,両者の間隙水圧 の経時変化はほぼ等しく,また,鉛直方向の体 積ひずみの経時変化も両者ともほぼ等しくなる ことが報告されている。

したがって,真空脱水による脱水過程は,加 圧脱水によって推定することが可能であると考 えられる。

4. 解析モデル

4.1 圧密方程式

真空脱水工法では、透水面が上面のみである ことおよびスラブ厚さがろ過マットの面積に比 べて充分に小さいことから一次元圧密理論を適 用することとした。また、本研究では、密度分 布を定量的に明らかにすることを目的としてお り、圧縮量と時間の関係を表す最も基本的な圧 密方程式として式(1)を用いることとした⁵⁾。な お、式(1)は均質な試料に対応しており、自重お よび過大な層厚の変化の影響は考慮していない。 図-3に式(1)の解から求めた圧縮ひずみの 無次元量 $\epsilon / \epsilon_f (\epsilon_f : 最終圧縮ひずみ) と層の$ 深さの無次元量 <math>z/H (H : 両面透水の層厚) との $関係を示す。図中の <math>T_v$ は、時間を無次元化した ものであり、片面透水の層厚 h (= H/2) では式 (2)で定義される。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \tag{1}$$

ここに, ϵ : 圧縮ひずみ, t:時間 (s), c_v : 圧密係数 (cm²/s), z:層の深さ (cm)

$$T_{v} = \frac{c_{v} \cdot t}{h^{2}}$$
ここに, T_{v} : 無次元の時間係数,
(2)

t :時間 (s),

h : 片面透水の層厚 (cm)



また、図-3において各等時線の左側の面積は、 圧縮量の無次元量 S/S_f (以下,圧密度)となり、 図-4に示すように、圧密度 U_s と時間係数 T_v の関係は一本の曲線で示される。ここで、横軸 は対数表示としている。

4.2 圧密係数

式(1)中の圧密係数 *c*_v は,圧密の速さを支配 する係数であり,本研究では圧密終了時までを 対象としていることから,曲線定規法⁸⁾により 求めることとした。

圧密係数 *c*_v は,曲線定規法では,片面透水の 場合に式(3)で表される。

$$c_{v} = \frac{0.197 \cdot \overline{h}^{2}}{t_{50}}$$
(3)

ここに, <u>h</u>:試験体の平均高さ (cm), t₅₀:理論圧密度 50%になる時間 (s)

4.3 最終圧縮量

載荷後の体積比 f_f (=全体積/固体の体積) と 圧密圧力 pの対数値の関係は、直線的に表され ることが一般的に知られている。すなわち、両 者の関係は、式(4)で示される。

$$f_f = a - b \times \log p$$
 (4)
ここに, f_f : 載荷後の体積比,
 p : 圧密圧力 (MPa),
 a, b : 係数

また,最終圧縮量 S_f は,式(5)によって求め られる。したがって,式(4)中のaおよびbが既 知であれば,任意の層厚に対する最終圧縮量を 導くことができる。

$$S_f = \frac{f_i - f_f}{f_i} h_i \tag{5}$$

- ここに, *S_f*:最終圧縮量 (cm),
 - *h_i*:載荷前の層厚 (cm),
 - $f_i: 載荷前の体積比,$
 - f_f:載荷後の体積比

4.4 圧縮量と時間の関係

任意の厚さに対する圧縮量 S と時間 t の関係 は、微小な厚さの試料の圧密係数 c_v および式(4) 中の係数 a および b が既知であれば、 $\mathbf{図} - 4$ に 示す理論曲線から求められる。すなわち、ある 時間 t に対する時間係数 T_v を式(2)より求め、 $\mathbf{図} - 4$ の関係より、求めた時間係数 T_v に対する 圧密度 U_s を算出する。圧縮量 S は、圧密度 U_s に式(5)から求まる最終圧縮量 S_f を乗じて導く

ことができる。

4.5 密度分布

以上のことから, 圧密による体積減少量が水 の脱水量と等しいと仮定すると, 任意の厚さの 均質な試料に対して, 密度の経時変化を時間の 関数として式(6)で表すことができる。

$$\gamma(t) = \frac{W_i - S(t) \cdot A}{V_i - S(t) \cdot A}$$
(6)
ここに, $\gamma(t) : t$ (s)時の密度 (g/cm³),
 $S(t) : t$ (s)時の圧縮量 (cm),
 $W_i : 載荷前の質量$ (g),
 $V_i : 載荷前の体積$ (cm³),
 $A : 試験体の断面積$ (cm²)



なお, 脱水終了直後の密度分布の推定値は, 図-3から深さ方向に一様となる⁹⁾が, 真空脱 水処理を行ったコンクリートの既往の実験³⁾で は, 処理終了後の密度分布は上層ほど大きくな ることを報告している。この差の原因としては, 深さ方向の真空度の変化および水和反応の進行 と載荷開始時期の関係により深さ方向に不均質 な試料となっていること等が考えられる。

5. 実験概要

5.1 実験要因

本実験は、圧密理論の適用性について考察す ることを目的としていることから、粗骨材の影 響を排除するため、試料は表-1に示すような 調合のモルタルとした。また、脱水量に大きく 関係する圧密圧力 *p* を 0.013, 0.078, 0.132 (MPa) の3水準に変化させた。

5.2 実験方法

1.0

2.0

4.0

5.0

6.0

7.0

0.1

0

П

圧縮量S

図-5に本実験で使用した圧密実験装置を示す。試験体は、φ100×60mmの円柱体とし、下面のみの片面透水とした。ろ過マットには真空



表-1 モルタルの調合表

脱水処理に使用しているシート¹⁾を用い,重り を載せた時点からの時間と圧縮量の関係および 最終の脱水量を測定した。載荷時間は1000sと し,モルタルの練混ぜ直後に載荷を開始した。

6. 実験結果

(1) 圧縮量と時間の関係

図-6に圧縮量 S と時間 t の関係の実験値と 解析値の比較を示す。ここで,解析値の圧密係 数 c_v および最終圧縮量 S_f は,それぞれ式(3)か ら求めた値およびほぼ収束した値として一律 1000s 時の圧縮量を用いている。なお,実験値 の初期値は,実験上の誤差を排除するため,曲 線定規法を用いて理論値と一致するように補正 しており,補正値は 0.6mm~2.7mm 程度と比較 的大きい値となっている。





図-6 圧縮量 Sと時間 t の関係

同図によれば、どの曲線も実験値と解析値は 比較的よく一致している。

圧密係数と圧密圧力の関係 (2)

図-7に圧密係数*c*_vと圧密圧力*p*の関係を示 す。同図によれば、W/Cおよび圧密圧力pが大 きいほど圧密係数 c, が大きくなる傾向にある。 また、これらの値は、土の圧密係数 c, が、大き くても 0.05 cm^2 /s 程度 $^{8)}$ であることを考えると 極めて大きいといえる。

(3) 体積比と圧密圧力の関係

図-8に載荷後の体積比 f_fと圧密圧力 p の関 係を示す。ここで、載荷後の体積比は、固体の 体積を載荷前と同値とし,全体積を載荷前の体 積から脱水量を引いた値として求めた。同図に よれば、W/C=40%および 60%ともにほぼ直線的 な関係となっている。また、同図中には、対数 近似式を示した。

(4) 最終圧縮量と収束時間

図-9に最終圧縮量*S*_fと圧密圧力*p*の関係を 示す。ここで,最終圧縮量 S_fは,1000s 時の圧



縮量としている。同図によれば、p =0.132MPa の最終圧縮量 S_fは, W/C=60%では 5.1mm, W/C=40%では 3.4mm となっており、このとき の圧縮ひずみは、それぞれ 0.088 および 0.060 である。また, 圧密圧力 p が大きくなるにした がい、最終圧縮量 Sf の変化は緩やかになる傾向 が見られる。

真空脱水工法の脱水時間の位置づけを把握す るために収束時間について考察する。図-10に



圧密圧力p(MPa)

収束時間 tf と圧密圧力 p の関係

図-10

収束時間 t_f と圧密圧力pの関係を示す。ここで、 収束時間 t_f は、おおむね収束した時間として、 最終圧縮量 S_f の99%に圧縮量が達するまでの時 間とした。同図によれば、圧密圧力pが 0.078MPa および 0.132MPa のときでは、収束時 間 t_f は同程度の値で、W/C=60%では約 110s(約 2min)、W/C=40%では約 190s(約 3min)となっ ている。

(5) 脱水量

図-11 は、実測脱水量を示す。同図中には、 脱水率(使用水量に対する脱水量)および脱水 後の換算 W/C(セメント量に対する脱水後の水 量)も併せて示す。同図によれば、圧密圧力に かかわらず、W/C=60%の脱水率は W/C=40%の 値よりも大きくなっており、W/Cが大きいほど 圧密の効果が大きいといえる。この傾向は、真 空脱水実験で得られた傾向と一致する¹⁾。なお、 W/C=60%および W/C=40%の脱水後の換算 W/C は、それぞれ45%程度および35%程度となった。

7. まとめ

- 加圧脱水を行ったモルタルについて、圧密
 理論を用いた密度の推定手法を示した。
- 2) モルタルを用いた加圧脱水実験により,以 下の結果が得られた。
 - a) モルタルの補正後の圧縮量と時間の関 係は,理論値と比較的よく一致してお り,圧密理論の適用が可能であると思 われる。
 - b) 圧密係数は, 圧密圧力の増加に伴い上 昇する傾向を示した。
 - c) 載荷後の体積比と圧密圧力の対数値の 関係は、ほぼ直線的となった。
 - d) 補正後の最終圧縮量は、圧密圧力が大気圧相当の 0.1 MPa 程度では、 W/C=60%で約 5mm, W/C=40%で約 3.5mm であった。
 - e) 収束時間は、圧密圧力が大気圧相当の
 0.1MPa 程度では、W/C=60%で約 2min 、
 W/C=40%で約 3min であった。

- f) W/C が大きいほど圧密の効果は大きい といえる。
- 3) 今後は、密度分布の推定手法の妥当性について考察し、真空脱水と加圧脱水による効果の比較を行うとともに、コンクリートにおいても圧密理論の適用が可能かを調べる必要がある。コンクリート内部の密度分布と水セメント比分布の両者を考慮した圧縮強度分布の推定方法についても考察を進めていく予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり,貴重なご助言を頂いた 佐藤健先生(岐阜大学助教授)並びに原田哲夫先 生(長崎大学教授)に深謝致します。

本研究費の一部は,2002 年度セメント協会研究 奨励金(研究代表者:三島直生)によった。付記 して謝意を表します。

参考文献

- 1) 畑中重光,和藤浩,三島直生,村松昭夫:真 空脱水工法によるコンクリート床スラブの表 層および内部強度性状改善に関する実験的研 究,日本建築学会構造系論文集,第 558 号, pp.7-14,2002
- 2) 伊藤康司,丸山久一,清水敬二,橋本親典: フレッシュコンクリートの脱水機構に関する 解析的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol. 12, No. 1, pp. 263-268, 1990
- 3) 和藤浩,畑中重光,山本景司,村松昭夫:床 スラブコンクリートの真空脱水締固め工法に おける諸要因の影響,コンクリート工学年次 論文集, Vol. 23, No. 2, pp. 391-396, 2001
- 4) 山本景司,畑中重光,和藤浩,山口武志:真空脱水処理を行ったコンクリートの内部強度 分布とその要因分析,コンクリート工学年次 論文集,Vol.23,No.2,pp.385-390,2001
- 5) 三笠正人: 軟弱粘土の圧密, 鹿島出版会, 1963
- 6) 軟弱地盤対策工法, 土質工学会, 1993
- 7) 谷村剛嗣,梅崎健夫,塩野敏昭:等方応力状 態から真空圧密を受けた粘土の非排水せん断 特性,土木学会年次学術講演会,第 54 回, pp. 112-113, 1999
- 8) 土質試験の方法と解説,地盤工学会,2001
- 9) 服部宏己,三島直生,和藤浩,畑中重光:圧 密理論を適用したモルタルの密度分布の推定, 建築学会東海支部研究報告集,pp.25-28, 2003