

論文 圧密理論を適用した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}・坂本 英輔^{*3}・三島 直生^{*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。真空脱水コンクリートでは大気圧により加圧されるという事実に着目し、これまでにモルタルの加圧脱水実験によって、脱水メカニズムの説明には一次元圧密理論の適用が可能であることを示した。本報では、真空および加圧脱水されたモルタルおよびコンクリートの密度推定に対する圧密理論の適用性を検証した。

キーワード：真空脱水、加圧脱水、圧密理論、密度分布

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内部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。本研究では、真空脱水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仮定し、土質工学の分野で扱われている圧密理論²⁾を応用して前記のメカニズムを定量的に明らかにすることを目的としている。

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、モルタルの加圧脱水実験を行うことによって、一次元圧密理論を適用した密度分布の推定手法を示すとともに、圧縮量の経時変化は、圧密理論によって推定可能であることを示した⁴⁾。本報では、真空および加圧脱水されたモルタルおよびコンクリートの密度推定に対する圧密理論の適用性を

検証することを目的とした実験結果について報告する。

2. 圧密理論式

圧密の過程を表す理論式として、式(1)で表される圧密方程式を用いる²⁾。図-1に式(1)の解から求めた圧縮ひずみの無次元量 $\varepsilon/\varepsilon_f$ (ε_f : 最終圧縮ひずみ) と層の深さの無次元量 z/H (H : 両面透水の層厚) との関係を示す。図中の 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。同図より、圧密終了時には、深さ方向の圧縮ひずみは一定となる。すなわち、圧縮された量の水（液相）が排水されることから密度分布は高さ方向に一定となる。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここに、 ε : 圧縮ひずみ,

t : 時間 (s),

c_v : 圧密係数 (cm^2/s),

z : 層の深さ (cm)

*1 東急建設(株)名古屋支店 工修 (正会員)

*2 三重大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*4 三重大学 工学部建築学科助手 博士(工学) (正会員)

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{h^2} \quad (2)$$

ここに、 T_v ：無次元の時間係数、

t ：時間 (s)、

h ：片面透水の層厚 (cm)

また、図－１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－２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。したがって、最終圧縮量 S_f および c_v が既知であれば式(2) および図－２より圧縮量 S と時間 t の関係を導くことができ、図－１を用いて密度を求めることができる⁴⁾。

3. モルタルの脱水実験

3.1 実験要因

表－１に実験要因および測定項目を示し、表－２に調合表を示す。脱水方法は加圧脱水および真空脱水とし、加圧脱水時の圧密圧力 p は 0.05MPa および 0.1MPa (大気圧相当) の２水準とした。

3.2 実験方法

図－３に本実験で使用した加圧脱水実験装置を示す。透水面は真空脱水と同条件とするため上面透水とし、ろ過マットには真空脱水処理に使用しているマット¹⁾を使用した。図－４に真空脱水実験装置を示す。真空度を確保するため

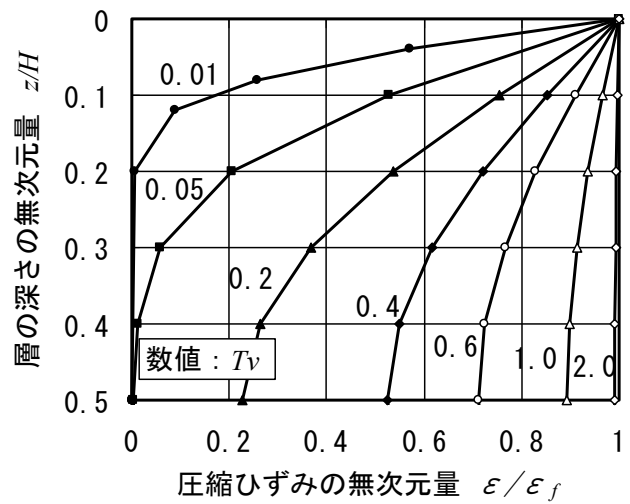
表－１ 実験要因および測定項目

W/C (%)	脱水方法	圧密圧力 p (MPa)	測定項目
60	加圧脱水	0.05	・ブリーディング水の排水量
		0.10	・処理による脱水量
	真空脱水	—	・圧縮量と時間の関係
	無処理	—	・密度分布 (φ25mmコア)

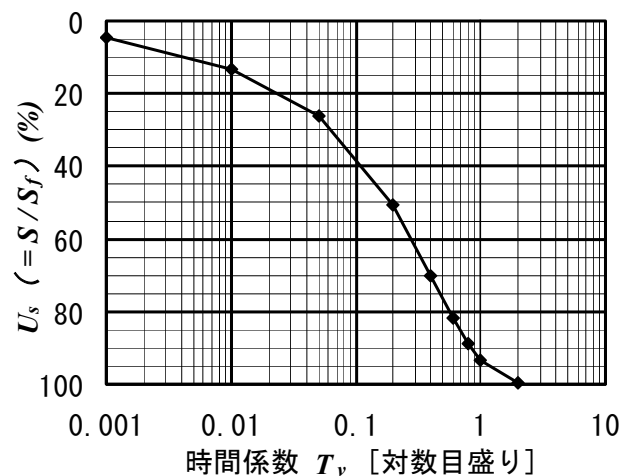
表－２ 調合表 (モルタル)

W/C (%)	s/m (%)	単位量 (kg/cm³)			FL (mm)	空気量 (%)
		W	C	S		
60	50	327	546	1300	266	1.4

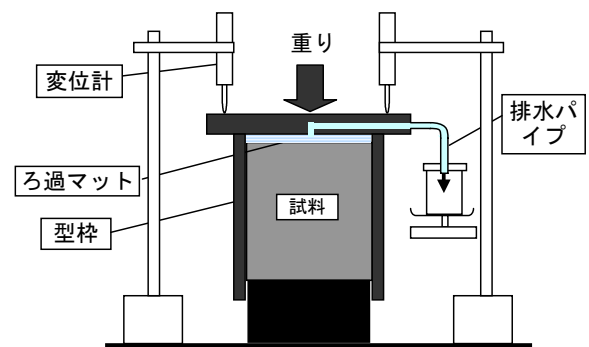
[注] W/C: 水セメント比, s/m: 砂の容積/モルタルの容積, W: 水, C: セメント, S: 細骨材 (粗粒率=2.98), FL: モルタルフロー値



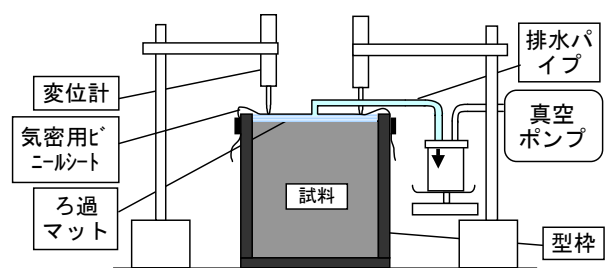
図－１ $\varepsilon/\varepsilon_f$ と z/H の関係



図－２ 圧密度 U_s と時間係数 T_v の関係



図－３ 加圧脱水実験装置 (モルタル)



図－４ 真空脱水実験装置

に試験体上面をビニールシートで覆い、真空度は約 95%であった。加圧脱水および真空脱水ともに、試験体は $\phi 100 \times 120\text{mm}$ とし、処理開始時期はブリーディング終了時(練混ぜ後 120 分)とし、処理直前にスポイトによりブリーディング水を採取し計測した。処理継続時間は 300s とした。

また、図-5にコア試験体の概略図を示す。コア試験体の寸法は $\phi 25 \times 25\text{mm}$ とし、1 試験体から 3 体採取した。密度分布の計測は、材齢 3 週間後に行った。

3.3 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 の関係を示す。同図によれば、加圧脱水では圧密圧力が大きいほど圧縮量が大きく、早く収束する傾向を示している。真空脱水では加圧試験体よりも圧縮量が小さくなっている。図-6中の○印は、加圧脱水時の理論値を示す。0.05MPa および 0.1MPa とともに実験値と理論値は比較的良好に一致している。図-7に、解析値から得られた圧密係数 c_v および最終圧縮量 S_f と圧密圧力 p の関係を示す。同図より、圧密圧力 p が大きいほど圧密係数 c_v および最終圧縮量 S_f は大きくなる傾向にある。また、圧密係数 c_v においては、土の値が大きくても $0.05 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度⁵⁾であることを考えると極めて大きいといえる。

(2) 脱水率

図-8に脱水率を示す。同図によれば、加圧脱水では圧密圧力が大きいほど脱水率が大きくなっているが、圧密圧力が 2 倍となっているのに対して加圧脱水処理による脱水率は 1.1 倍程度となっている。したがって、圧密圧力の増大率ほどの脱水効果は期待できないと思われる。また、真空脱水は圧縮量が 0.1MPa の 75%程度であったにもかかわらず加圧試験体の脱水率と同程度となっている。

(3) 密度分布

図-9に密度分布の実測値を示す。同図によれば、加圧脱水試験体の密度分布は 0.05MPa

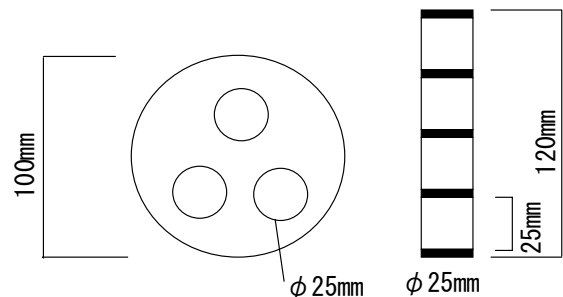


図-5 コア試験体の概略図 (モルタル)

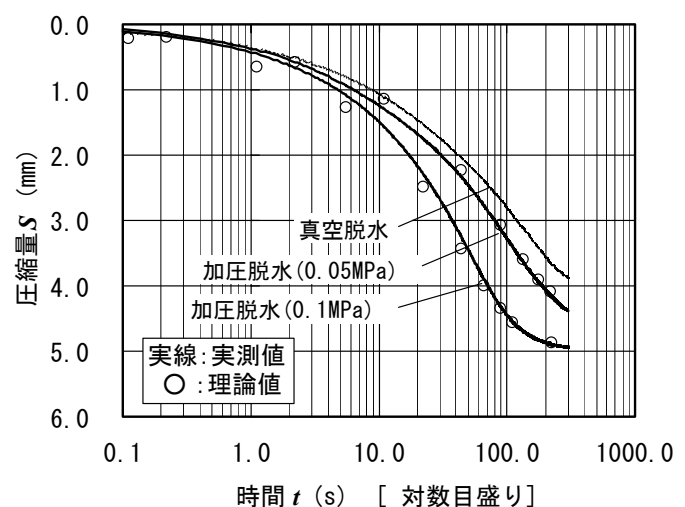


図-6 圧縮量 S と時間 t の関係

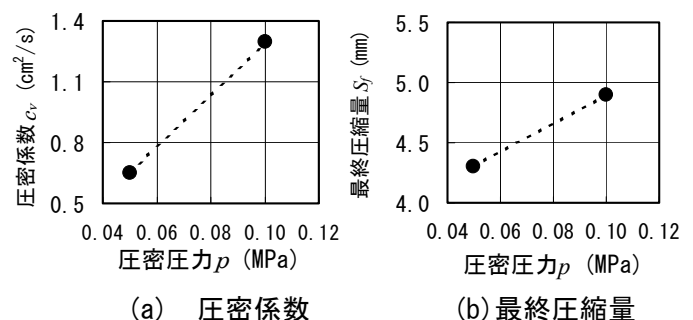


図-7 圧密係数 c_v および最終圧縮量 S_f と圧密圧力 p の関係

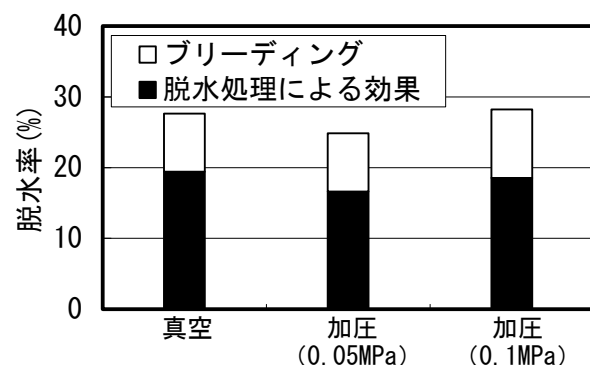


図-8 脱水率 (モルタル)

および 0.1MPa 試験体ともに無処理試験体よりも大きくなり、その深さ方向の勾配は無処理試験体と同程度となっている。また、0.1MPa 試験体の密度は 0.05MPa 試験体よりも深さ方向に一樣に大きくなっている。したがって、加圧脱水試験体では、無処理試験体と比較した各層ごとの脱水量は深さ方向にほぼ一定であると推測され、圧密理論の適用が可能であると考えられる。

真空脱水試験体の密度分布は、最下層では無処理試験体と同程度となっており、最上層では 0.1MPa の加圧試験体と同程度となっていることから、真空脱水では、深さ方向に真空度（間隙水圧）の分布が発生していると考えられる。また、図－9 では真空脱水試験体の密度の平均値が 0.1MPa の加圧試験体に比べて小さくなっているのに対して、図－8 の脱水率では両者は同程度となっている。この原因として、真空脱水では空隙が増大している可能性が考えられる。

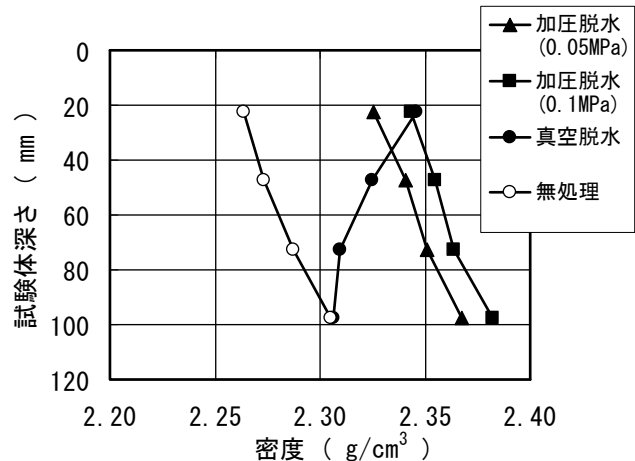
3.4 密度分布の推定

図－10 に加圧脱水処理を行ったコンクリートの無処理から 0.1MPa に推移する密度分布の経時変化の解析値を示す。解析値は無処理の実測値に解析値の差（＝加圧試験体の密度－無処理試験体の密度）を加えた値として求めた。同図によれば、加圧脱水終了時の密度分布の解析値は実測値とほぼ一致しており、上層から圧密されていく様子が分かる。

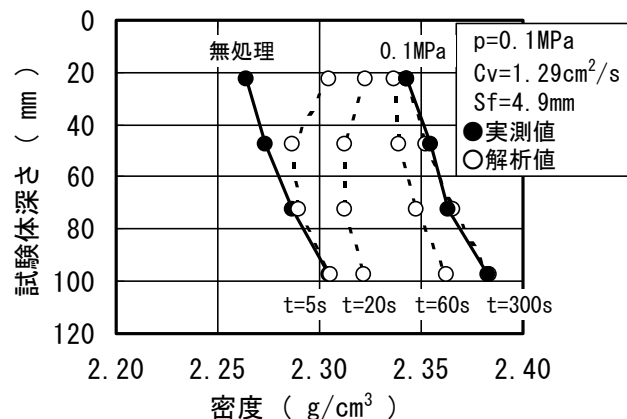
また、真空脱水処理を行ったコンクリートの密度分布は、間隙水圧の分布が深さ方向に生じていると仮定すると、図－7 に示す圧密係数 c_v および最終圧縮量 S_f と圧密圧力 p の関係から、真空度に対応した圧密圧力に対するそれぞれの値を求め、層ごとに分割して密度分布の経時変化を求めることができる。

4. コンクリートの脱水実験

4.1 実験概要



図－9 密度分布の実測値（モルタル）



図－10 加圧脱水による密度分布の推定値（モルタル）

表－3 実験要因および測定項目（コンクリート）

W/C (%)	試験体形状 および寸法 (mm)	工法	処理継続 時間 (s)	圧密圧力 p (MPa)	測定項目
65	円柱型 $\phi 150 \times 180$	加圧脱水	300	0.10	・ブリーディング水の 排水量 ・処理による脱水量 ・密度分布 ($\phi 50\text{mm}$ コア)
			1000	0.50	
		真空脱水	300	—	
		無処理	—	—	
	ボックス型 $300 \times 460 \times 180$	加圧脱水	1000	0.50	
		無処理	—	—	

表－4 調合表（コンクリート）

W^*/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/cm³)				SP ($C \times \%$)	SL (cm)
		W^*	C	S	G		
65	56	185	285	993	801	0.9	15.0

[注] W^*/C : 水セメント比 [W^* : 水+高性能 AE 減水剤 (SP)], s/a : 細骨材率, C : セメント, S : 細骨材 (粗粒率=2.98), G : 粗骨材, SL : スランブ, 空気量: 3.7%

表－3に実験要因および測定項目を示し、表－4に調合表を示す。実験要因は、処理工法および圧密圧力 p とした。処理工法は加圧脱水および真空脱水とし、加圧脱水の圧密圧力 p は0.1MPa（大気圧相当）および極力大きな値として0.5MPaの2水準とした。なお、試験体サイズは $\phi 150 \times 180\text{mm}$ の円柱で行ったが、型枠と砂利の摩擦の影響が懸念されたため、ボックス型（ $300 \times 460 \times 180\text{mm}$ ）の試験体を用いて加圧脱水（圧密圧力：0.5MPa）を行い、円柱試験体の結果の妥当性を確認した。

4.2 実験方法

写真－1にボックス型の加圧脱水実験の様子を示す。試料の上面に透水マットを敷いた上に載荷版を設置し万能試験機により載荷を行った。載荷開始時期はブリーディング終了時（練混ぜ後90分）とした。円柱型もボックス型と同様とした。脱水量は試験体上部に溜まった水をスポイトにより採取し計測した。

真空脱水実験は、図－4に示すモルタルの実験装置と同様とし、試験体サイズは $\phi 150 \times 180\text{mm}$ とした。処理開始時期はブリーディング終了時（練混ぜ後90分）とした。なお、真空脱水を行った試験体の真空度は約85%であった。また、図－11にコア試験体の概略図を示す。コア試験体は、コンクリートのためサイズを $\phi 50 \times 50\text{mm}$ とし、1試験体から3体採取した。密度の計測は、材齢3週間後に行った。

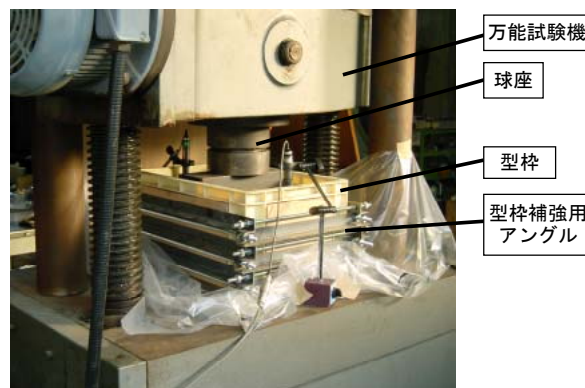
4.3 実験結果

(1) 脱水率

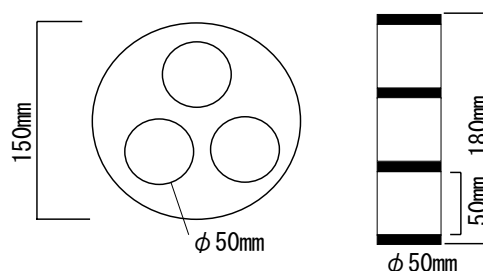
図－12に脱水率を示す。同図によれば、モルタルの結果と同様に加圧脱水では圧密圧力が大きいほど脱水率は大きくなっている。また、真空脱水の脱水率は0.1MPaの加圧試験体と同程度となっている。

(2) 密度分布

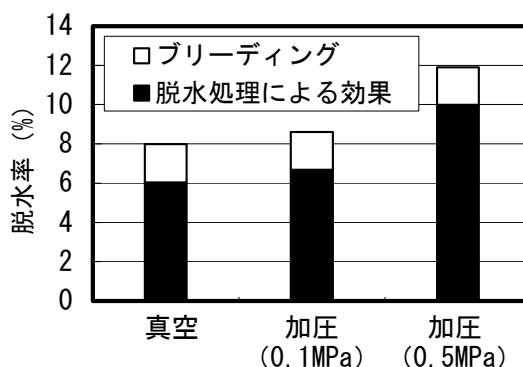
図－13に無処理試験体と加圧試験体の密度分布の差（＝0.5MPa加圧試験体の密度－無処理試験体の密度）を示す。同図より円柱試験体とボックス型試験体の値はほぼ一致していること



写真－1 加圧脱水実験の様子
（コンクリート，ボックス型）

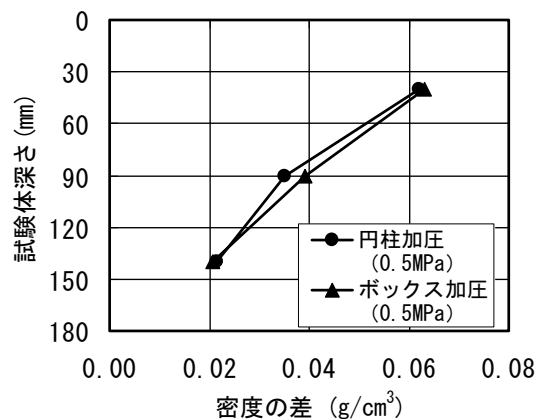


図－11 コア試験体の概略図（コンクリート）



図－12 脱水率

（コンクリート， $\phi 150 \times 180\text{mm}$ 試験体）



密度の差＝0.5MPa加圧試験体の密度－無処理試験体の密度
図－13 無処理試験体と加圧試験体の
密度分布の差の比較

から、 $\phi 150\text{mm}$ の円柱試験体による加圧実験結果は型枠面の摩擦の影響などはほとんど無いものと判断できる。

図-14 に密度分布の比較を示す。同図によれば、加圧脱水試験体の密度分布は 0.1MPa および 0.5MPa 試験体ともに無処理試験体よりも大きくなり、両者がほぼ同程度となっていることから、 0.1MPa 程度でほぼ圧密量の限界に達しているものと考えられる。また、密度分布が深さ方向に一定となっていることから、圧密理論の適用が可能であると考えられる。

真空脱水試験体の密度分布は、モルタルと同様に最下層では無処理試験体と同程度となっており、最上層では 0.1MPa の加圧試験体と同程度となっていることから、真空脱水では、コンクリートの場合でも深さ方向に真空度（間隙水圧）の分布が発生していることが考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に列挙する。

(1) モルタルを用いた脱水実験

- 圧縮量と時間の関係は、処理開始時期をブリーディング終了時とした場合においても実験値と理論値は比較的よく一致した。
- 加圧脱水による脱水率は、圧密圧力の増大率ほどの脱水効果は期待できないと思われる（これは、コンクリートにおいても同様の傾向が見られた）。
- 加圧脱水による処理終了時の密度分布の推測値は実験値と比較的よく一致した。
- 真空脱水（真空度 90～95%）による密度分布は、最下層で無処理と同程度となり、最上層で 0.1MPa の加圧脱水試験体と同程度となった（これは、コンクリートにおいても同様の傾向が見られた）。

(2) コンクリートを用いた脱水実験

- 加圧脱水による密度分布の推定には、

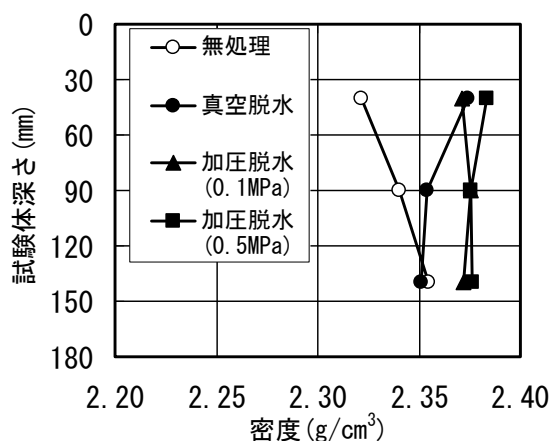


図-14 密度分布

(コンクリート、 $\phi 150 \times 180\text{mm}$ 試験体)

モルタルと同様、圧密理論の適用が可能であると思われる。

- 本実験の範囲では、加圧脱水では 0.1MPa 程度でほぼ圧密量の限界に達していると考えられる。

- 加圧脱水と真空脱水の密度分布および脱水率の比較から、真空脱水の場合には深さ方向の真空度（間隙水圧）の分布が発生していると予想される。

謝辞

本研究は、日本コンクリート工学協会「透水・脱水によるコンクリートの品質改善に関する研究委員会」（委員長：畑中重光）の一環として行われたものである。本研究費の一部は、2002 年度セメント協会研究奨励金（代表：三島直生）によった。本研究に際し、原田哲夫先生（長崎大学教授）の御助言を得た。本実験に際して和藤浩技官の御助力を得た。付記して謝意を表する。

参考文献

- 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
- 三笠正人：軟弱粘土の圧密，鹿島出版会，1963
- 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
- 服部宏己，畑中重光，三島直生，和藤浩：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，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，No. 1，pp. 881-886，2003
- 土質試験の方法と解説，地盤工学会，2001