

論文 フレッシュモルタルおよびコンクリートの圧密挙動に関する基礎的研究

坂本 英輔^{*1}・畑中 重光^{*2}・三島 直生^{*3}・内藤 理子^{*4}

要旨: 本研究では、圧密理論に基づく真空脱水処理による品質改善効果の推定を目的として、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密試験を実施することにより、各調合条件がフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密挙動に及ぼす影響を把握することを試みた。その結果、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密挙動に及ぼす主要因の影響が明らかになるとともに、脱水過程の推定には既往の圧密理論が適用できることが分かった。

キーワード: 真空脱水処理, 圧密試験, 圧密理論, 最終圧縮量, 圧密係数

1. はじめに

筆者らは、コンクリート床スラブの品質改善を目的として、これまでに軟練りコンクリートにも適用可能な真空脱水処理工法を提示¹⁾し、一連の実験によって、真空脱水処理されたコンクリートの品質改善効果の把握およびそのメカニズムの解明を試みてきた。既報^{2),3)}では、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートに対して、土質工学で用いられる圧密理論⁴⁾を適用することによって、真空脱水処理による品質改善効果を定量的に推定する手法を提案し、例証した。圧密理論に基づくこの品質改善効果の推定手法は、真空脱水工法だけではなく、加圧脱水工法、透水型枠工法などの各種透水・脱水工法に適用できると考えられるが、調合条件や施工条件がフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密挙動に及ぼす影響に関しては、不明な点が多い。

既往の研究^{5),6)}によれば、モルタルの圧密挙動はいくつか報告されているが、その挙動について系統的に明らかになっているとはいえない。また、コンクリートについては、ほとんど報告

がないのが現状である。

このため本研究では、各調合条件がフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密挙動に及ぼす影響をより系統的に把握することを目的として、圧密試験を行った。

2. 圧密理論

2.1 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

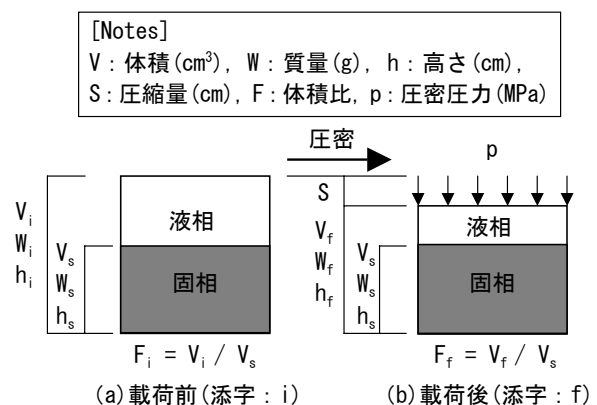


図-1 圧密現象の概念図²⁾

*1 三重大学大学院 工学研究科システム工学専攻 日本学術振興会特別研究員 工修 (正会員)

*2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 工博 (正会員)

*3 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻助教 博士(工学) (正会員)

*4 東京都世田谷区役所 財務部施設営繕課 (非会員)

が排出され、体積を減らして密度を増加させる現象とされている。

2.2 圧密方程式

本研究では、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⁴⁾。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されていない。

図-2 に、式(1)の解から求めた圧縮ひずみを最終圧縮ひずみで除したもの $\varepsilon/\varepsilon_f$ (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、層厚 h ($= H/2$) の片面透水では式(2)で定義される。

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

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)

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

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-2 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-3 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 および圧密係数 c_v が既知であれば、式(2)および図-3 より圧縮量 S と時間 t の関係を導くことができる。

ここで、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⁷⁾により、これを求めることとした。圧密係数 c_v は、曲線定規法では、片面透水の場合、式(3)で表される。

$$c_v = \frac{0.197 \cdot \bar{h}^2}{t_{50}} \quad (3)$$

ここに、 $\bar{h}$: 試験体の平均高さ (cm),

t_{50} : 理論圧密度 50%になる時間 (s)

3. 実験概要

3.1 要因水準および調査表

表-1 に要因水準を、表-2(a), (b)に調査表を示す。要因については、圧密挙動に影響を及

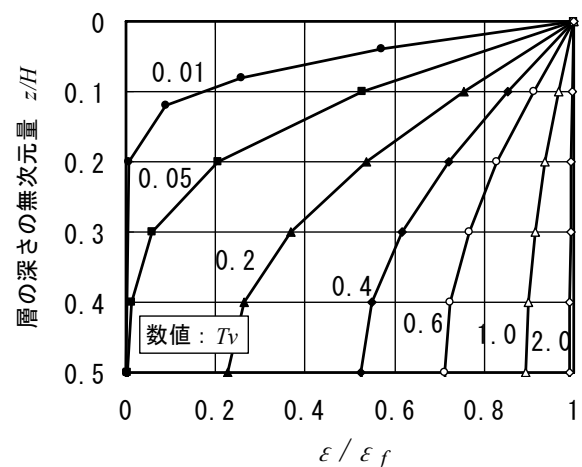


図-2 $\varepsilon/\varepsilon_f$ と z/H の関係²⁾

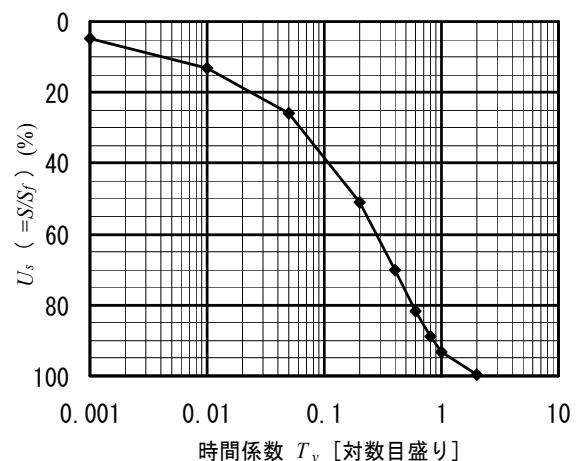


図-3 圧密度 U_s と時間係数 T_v の関係²⁾

表-1 要因水準

要因		水準
モルタル	水セメント比 (%)	35, <u>50</u> , 65
	圧密圧力 (MPa)	0.05, <u>0.10</u> , 0.15
	細骨材容積比	0.45, <u>0.50</u> , 0.55
	フロー値 (mm)	180, <u>220</u> , 260
	処理開始時期	打設直後, プリーディング終了時*
コンクリート	粗骨材最大寸法 (mm)	13, 20

[註]下線は基本水準を示す。

* 打設後190分(プリーディング試験は、JIS A 1123に準拠)

表-2 調査表

(a) モルタル

W/C (%)	s/m	FL (mm)	設計Air (%)	単位量(kg/m ³)			混和剤			実測値	
				W	C	S	SP/C (%)	AE/C (%)	AF/C (%)	FL (mm)	Air (%)
35	0.50	220	6.8	227	648	1295	0.84	0.0005	0	216.4	6.8
50	0.45	220		295	590	1166	0	0.009	0	213.4	5.6
	0.50	180		265	529	1295	0	0.010	0	184.5	5.8
		220					0.60	0.006	0	219.9	5.8
		260					0.63	0.008	0	252.4	6.7
	0.55	220		234	468	1425	1.00	0.002	0.001	214.4	6.0
65	0.50	220		291	447	1295	0	0.012	0	213.9	3.9

[註]W/C:水セメント比, s/m:細骨材容積比, FL:フロー値, Air:空気量, W:水, C:セメント, S:細骨材, SP:高性能AE減水剤, AE:空気連行剤, AF:消泡剤

(b) コンクリート

W/C (%)	s/a (%)	s/m	G _{max} (mm)	目標 SL (cm)	設計 Air (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤			実測値	
						W	C	S	G	SP/C (%)	AE/C (%)	AF/C (%)	SL (cm)	Air (%)
50	50	0.50	13	18.0	4.5	176	353	863	887	0.85	0.001	0.002	16.0	3.8
			20							0.60	0.001	0.002	18.5	5.2

[註]W/C:水セメント比, s/a:細骨材率, s/m:細骨材容積比, G_{max}:粗骨材最大寸法, SL:スランプ, Air:空気量, W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材, SP:高性能AE減水剤, AE:空気連行剤, AF:消泡剤

ぼすと考えられる圧密処理開始時期および粗骨材最大寸法を選んだ。処理開始時期には、セメントの水和の影響を考慮した。また、粗骨材最大寸法の影響については、基準調合のモルタルおよび粗骨材最大寸法の異なる2種類のコンクリートを用いて実験を行った。なお、基本調合のモルタルに関しては、2回の圧密試験を行った。

3.2 試験体概要

写真-1に圧密試験装置の概要を示す。本装置は、この原理を利用して、作用点にある試料に所定の圧密圧力を加えることができる。なお、作用点での荷重は、ロードセルを用いて、事前に確認した。

実験室内でモルタルおよびコンクリートを練り混ぜ、それらを鋼片により50mm底上げしたφ150×300mmの鋼製型枠に高さ180mmまで打設したものを試験体とした。試験体を、打設後すぐに、温度20℃・湿度60%の恒温恒湿槽内に移動して、圧密が終了するまで持続荷重を行った。図-4に、圧密時の試験体周囲の拡大図を示す。持続荷重圧密時の水の流れおよびセメント分の流出を考え、試験体表面にろ過マットを敷いて実験を行った。なお、打設後から加圧脱水開始までの所要時間は、処理開始時期がブリーディング終了時のものを除くと、約35分未満で



写真-1 圧密試験装置

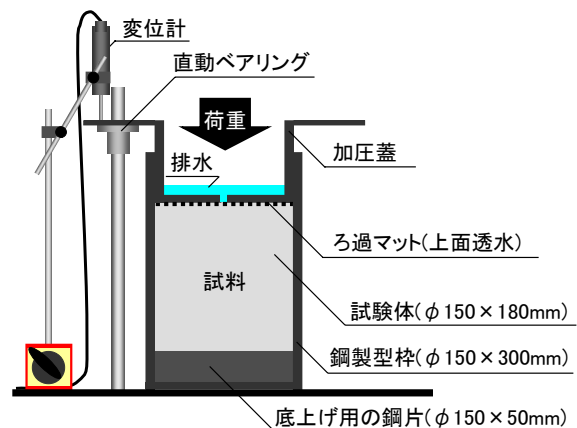


図-4 圧密時の試験体周囲の拡大

あり、圧密開始直前の試験体表面には、ブリーディング水はほとんど見られなかった。

3.3 測定項目

測定項目は、最終脱水量および圧縮量である。最終脱水量は、加圧蓋内に溜まる排水をスポイトで採取した合計量から固形分量を差し引いて

補正したものである。圧縮量は、ストローク 25mm の接触型変位計を対角線上の 2 箇所で計測し、その平均値とした。

4. 実験結果および考察

圧縮量と時間の関係、および最終脱水量と最終圧縮量の関係からモルタルおよびコンクリートに対する圧密理論の適用性について検討する。また、最終圧縮量と圧密の速さを支配する圧密係数 c_v に及ぼす各種調合条件の影響について検討する。

4.1 圧縮量と時間の関係

図-5 に、圧縮量と時間の関係の一例を示す。なお、実測値のサンプリング周期は 5Hz であるが、見やすくするためにプロットを減らしてある。同図によれば、最終段階に至るまでの圧縮量の増加傾向は、コンクリートおよびモルタルともに実験値と理論値が比較的良好に一致している。また、モルタルの実測値 (No.1, 2) の比較からは、測定方法および試料のバラツキはそれほど大きくないことが分かる。他の水準に関してもほぼ同様の結果となったことから、モルタルおよびコンクリートの脱水過程には、圧密理論の適用が可能であると考えられる。また、本実験の圧密圧力 0.05~0.15MPa の範囲では、モルタルおよびコンクリートともに、粘性を示す土骨格の圧縮に起因すると考えられている 2 次圧密⁷⁾がほとんど起こらないことが分かる。これは、モルタルおよびコンクリートともに、初期水和によって形成される骨格の影響であると考えられる。以上の結果より、モルタルおよびコンクリートでは、一度骨格が形成されれば、それ以降はほとんど圧縮されないと仮定して、圧縮量がほぼ一定値に収束したときの値を最終圧縮量と定義した。

4.2 最終脱水量と最終圧縮量の関係

本節では、本試験方法による脱水量の測定誤差および試料内部の空気が圧密挙動に及ぼす影響について検討する。

図-6 に、全データに関する最終脱水量から算

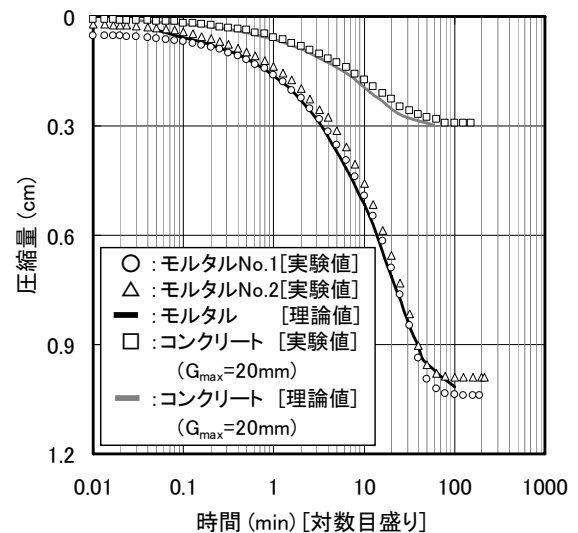


図-5 圧縮量と時間の関係の一例
(圧密圧力:0.1MPa, W/C : 50%)

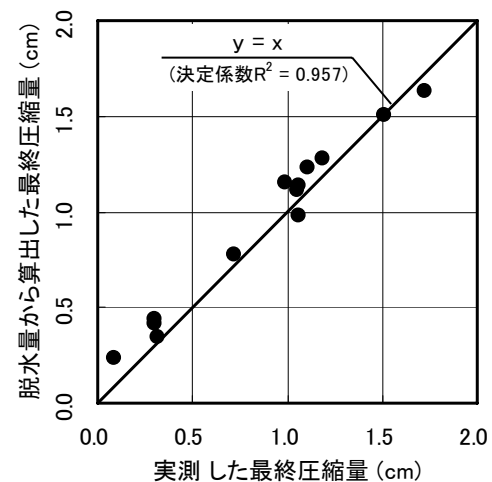


図-6 脱水量から算出した最終圧縮量
と実測した最終圧縮量の関係

出した最終圧縮量と実測した最終圧縮量の関係を示す。なお、ブリーディング終了時から圧密を開始した試験体の最終圧縮量は、ブリーディング水を取り除いた脱水量から計算した。ここで、圧密処理時に試料内部の空気が排出あるいは圧縮される場合、および排水が適切に採取できていない場合には、最終脱水量から算出した最終圧縮量は、実測値より小さくなると考えられる。しかし、同図によれば、両者の間には、強い相関が見られるものの、そのような測定誤差および空気量の影響は見られなかった。以上のことから、本試験装置による圧密挙動の把握は可能であり、試料内部の空気が圧密挙動に及ぼす影響はほとんどないものと考え、以下の議

論を進める。

4.3 最終圧縮量および圧密係数 c_v

基本調合のモルタルに関する最終圧縮量および圧密係数 c_v は、2 回の圧密試験結果の平均値から求めた。

(1) 水セメント比の影響

図-7 によれば、水セメント比が大きいほど、最終圧縮量および圧密係数 c_v が大きくなるのが分かる。すなわち、水セメント比の大きなモルタルほど、最終圧縮量が大きく、それに到達する時間が短い。

(2) 圧密圧力の影響

図-8 によれば、圧密圧力が最終圧縮量に及ぼす影響は小さいが、圧密圧力が大きいほど圧密係数 c_v は大きくなる。すなわち、同調合のモルタルを用いた場合、圧密圧力が大きいほど早く最終圧縮量に達するが、最終圧縮量はほぼ一定である。

(3) 細骨材容積比の影響

図-9 によれば、細骨材容積比が大きいほど、最終圧縮量および圧密係数 c_v が小さくなる。すなわち、モルタル中の砂の容積が大きいほど、最終圧縮量は小さくなり、最終圧縮量に達する時間が長くなる。

(4) フロー値の影響

図-10 によれば、フロー値が最終圧縮量に及ぼす影響はほとんど見られないが、フロー値が大きいほど圧密係数 c_v は小さくなる。

(5) 処理開始時期の影響

図-11 (a), (b) によれば、処理開始時期が遅くなると、最終圧縮量が小さくなり圧密係数 c_v が大きくなる。ブリーディング終了時から圧密を開始した試験体では、他の試験体に比べて、最終圧縮量および理論圧密度 50% になる時間 t_{50} が極端に小さくなるため、圧密係数 c_v が大きくなる。

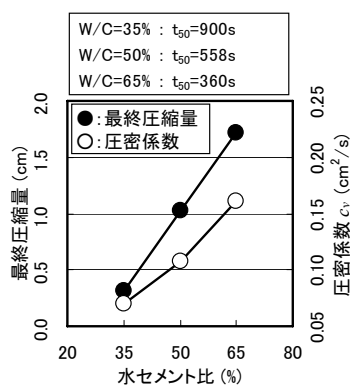


図-7 水セメント比の影響

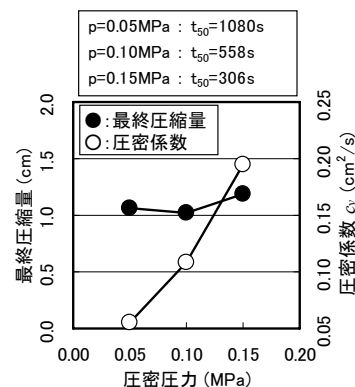


図-8 圧密圧力の影響

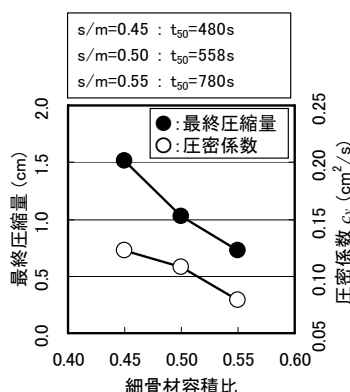


図-9 細骨材容積比の影響

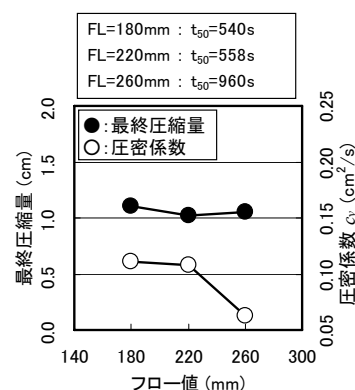
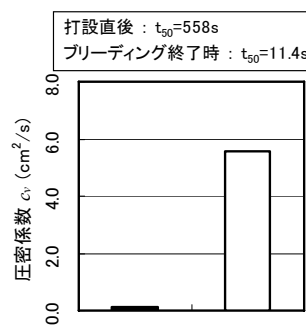
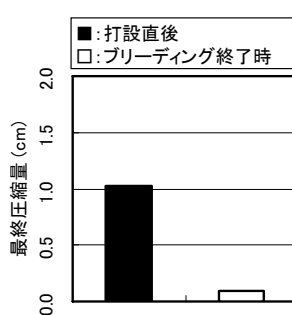
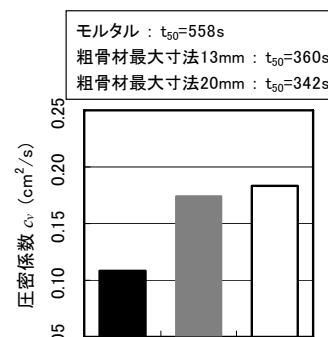
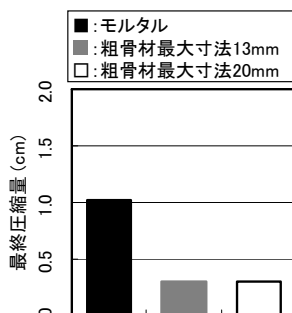


図-10 フロー値の影響



(a) 最終圧縮量 (b) 圧密係数

図-11 処理開始時期の影響



(a) 最終圧縮量 (b) 圧密係数

図-12 粗骨材の影響

これは、初期水和によって形成される骨格の影響であると考えられる。

(6) 粗骨材の影響 (コンクリートの圧密特性)

図-12(a), (b)によれば, 粗骨材の混入により, 最終圧縮量が小さく, 圧密係数 c_v が大きくなる。また, 粗骨材最大寸法が最終圧縮量および圧密係数 c_v に及ぼす影響はほとんどないことが分かる。

4.4 最終圧縮量と単位水量の関係

図-13 に, 最終圧縮量と単位水量の関係を示す。なお, ブリーディング終了時から圧密を開始したものの単位水量は, ブリーディング量 (22.8g) を差し引いている。図中の近似直線は, コンクリートおよびブリーディング終了時から圧密を開始したモルタルのデータを除いたものから求めた。同図によれば, 最終圧縮量と単位水量には, 強い相関が見られる。すなわち, 水セメント比, 圧密圧力, 細骨材容積比, フロー値によらず, 調合中の液相が多いほど, 最終圧縮量が大きくなる。ただし, 水和反応の影響の大きな試料 (ブリーディング終了時から圧密を開始したもの) および粗骨材のインターロッキング効果が生じるもの (コンクリート) においては, この傾向が当てはまらない。

5. まとめ

本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) モルタルおよびコンクリートの脱水過程には既往の圧密理論の適用が可能である。
- (2) 圧密係数 c_v は, 水セメント比および圧密圧力が大きいほど, 大きくなり, 細骨材容積比およびフロー値が大きいほど, 小さくなる。また, 処理継続時間が遅く, 粗骨材を混入すると, 大きくなる。
- (3) 調合中の液層 (単位水量) が多いほど, 最終圧縮量が大きくなる。

謝辞

本研究費の一部は, 平成 17・18 年度科学研究費補助金特別研究員奨励費 (坂本英輔) によった。本実験に際して犬飼利嗣氏 (東海コンクリート工業株式会社), 古市護君 (三重大学大学院生), 和藤浩氏 (三重大学技術員) に御協力頂いた。付

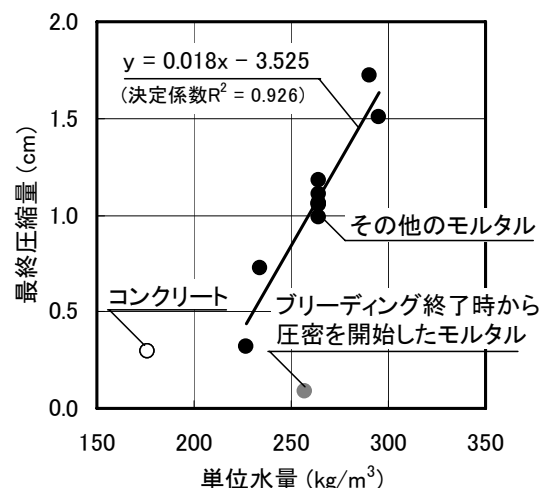


図-13 最終圧縮量と単位水量の関係

記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 畑中重光ほか: 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情改善に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.558, pp.7-14, 2002
- 2) 服部宏己ほか: 圧密理論を適用した真空脱水工法の脱水メカニズムに関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.585, pp.7-13, 2004
- 3) 畑中重光ほか: 圧密理論を適用した真空脱水コンクリート中の圧縮強度分布の発生メカニズムに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.596, pp.1-8, 2005
- 4) 三笠正人: 軟弱粘土の圧密, 鹿島出版会, 1963
- 5) 河井徹: モルタルおよびコンクリートの加圧脱水のメカニズムに関する研究, 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シンポジウム」, pp.307-314, 2004.9
- 6) 神代泰道ほか: 加圧ブリーディング試験による CFT 造充填コンクリートの充填性評価に関する基礎的研究, 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シンポジウム」, pp.315-320, 2004.9
- 7) 土質試験の方法と解説, 地盤工学会, 2001