

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04450

研究課題名(和文) コンクリートの圧密特性及び透水・脱水工法による品質改善効果予測に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study on consolidation characteristics of concrete and on prediction of quality improvement effects in concrete by permeable form/vacuum dewatering method

研究代表者

坂本 英輔 (SAKAMOTO, Eisuke)

広島工業大学・工学部・教授

研究者番号：40583539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：フレッシュモルタルおよびコンクリートの圧密特性を明らかにするため、研究代表者が既報で用いた圧密試験装置の主な問題点を改善した改良型圧密試験装置を作製して、圧密試験を実施した。これにより、調合条件および圧密圧力がフレッシュモルタルおよびコンクリートの脱水量や硬化後の単位容積質量、圧縮強度およびセメント水比に及ぼす影響が明らかになった。また、透水・脱水工法による品質改善効果を把握するため、水セメント比の異なる真空脱水コンクリートおよび透水性型枠コンクリートの実大模擬供試体を用いた実験を実施した。これにより、処理面からの単位容積質量、圧縮強度およびセメント水比分布が定量的に明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

改良型圧密試験装置を作製して、フレッシュモルタルおよびコンクリートの圧密試験を実施し、調合条件および圧密圧力がフレッシュモルタルおよびコンクリートのフレッシュ性状や硬化後の性状に及ぼす影響を明らかにした。また、真空脱水コンクリートおよび透水性型枠コンクリートの実大模擬供試体を用いた実験を実施することで、それぞれの工法による品質改善効果を定量的に把握した。これらの成果により、透水・脱水工法を行ったコンクリートの表層からの品質改善効果を定量的に評価・推定するためのモデル構築の前段階に至ったと言える。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the consolidation properties of fresh mortar and concrete, we constructed an improved consolidation test apparatus that improved the main problems of the consolidation test apparatus used in previous reports by the principal investigator, and conducted consolidation tests. The effects of mixing conditions and consolidation pressure on dewatering amount of fresh mortar and concrete, unit mass after hardening, compressive strength and cement water ratio were clarified. In addition, in order to understand the quality improvement effects in concrete by permeable form/vacuum dewatering method, experiments were conducted using simulated specimens of vacuum dewatered concrete and permeable formwork concrete. As a result, the unit mass, compressive strength and cement-water ratio distribution from the treated surface were quantitatively clarified.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：モルタル コンクリート 改良型圧密試験装置 調合推定 単位容積質量 圧縮強度 セメント水比

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

通常のコンクリートでは、従来と変わらず十分なワーカビリティを得るという施工上の要求からある一定の単位水量が必要となり、セメントの水和反応に必要な水量以上の水(以下、余剰水)を使用している。この余剰水は、コンクリートの表面・内部強度の低下、乾燥収縮の増大、耐久性の低下など、コンクリートの性能を低下させる要因の一つとなっている。特に近年では、骨材事情が悪くなる一方で、ポンプ圧送、大規模な構造物の出現、さらに高度な耐震性能の要求による過密配筋などによって、流動性の良いコンクリートが要求されており、その結果、単位水量の多いコンクリートが使用されるようになり、コンクリートの品質低下が懸念されている。この問題を解決するために、施工時にコンクリート内部の欠陥となる余剰水の挙動を制御し、余剰水を人為的にある方向へある量だけ抜く、真空脱水処理工法や透水性型枠工法などの透水・脱水工法が提案・実用されている。同工法によって得られるコンクリートは、透水・脱水面からの品質改善効果が連続的に変化し、最も耐久性が必要である表層での品質改善効果が最大となることから、材料の持つ潜在能力を最大限に活かし切ることが可能であり、生産効率と環境負荷を考慮すれば極めて有効な手法であるといえる。

畑中ら(応募者を含む)は、真空脱水コンクリートの圧縮強度分布と密度分布の間に相関性が見られることに着目し、土質工学で用いられる圧密理論をフレッシュコンクリートに適用して、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、一連の基礎実験によって例証している。その後、応募者は、真空脱水コンクリートのみではなく、各種透水・脱水工法によるコンクリートの品質改善メカニズムを系統的に捉えるための統一化理論の構築を目指し、圧密試験装置を考案し、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特性の解明、およびこれに基づいた各種透水・脱水工法による品質改善効果の推定手法の提案を試み、改良型透水・脱水モデルを提案した。既報で検討した調査条件では、フレッシュコンクリートについては検討要因が不十分であったため、コンクリートへの適用は限定的であった。また、ブリーディングの品質改善効果の推定において、表層からの圧縮強度分布を再現することができたが、絶対値は一致しなかった。この原因として、用いた圧密試験装置ではこの原理を利用したため、装置の自重で小さな圧密圧力での試験が行えなかったこと、および 0.05MPa であっても試験体が小さかったため型枠面周囲の摩擦の影響が無視できなかったことなどが考えられる。

2. 研究の目的

本申請課題では、既報の研究成果を実用段階に前進させるため、より幅広いコンクリートの調査条件を検討するとともに、前述の問題点の修正を行った改良型圧密試験装置を作製し、フレッシュコンクリートの圧密特性を明らかにする。研究の目的は、透水・脱水工法を行ったコンクリートについて、これまでに応募者が提案した改良型透水・脱水モデルの適用範囲を拡張し、表層からの品質改善効果を定量的に評価・推定することができるモデルを構築することである。また、実大模擬供試体を作製し、表層からの強度分布およびセメント水比分布を確認することにより、モデルの妥当性を実験的に検証する。

3. 研究の方法

(1) 透水・脱水コンクリートの品質改善効果の把握

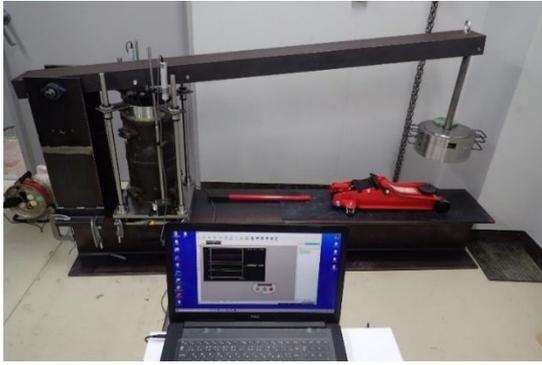
真空脱水処理を行った実大模擬供試体実験を行った。実大模擬供試体の寸法は、510×510×高さ180mmとした。気密性を増すためのトップシートは380×380mm、セメント粒子の流失を防ぐためのアンダーマットは350×350mmとした。真空脱水処理の開始タイミングは、軟練りコンクリートにおいて、真空脱水処理による最も良好な強度性状を発揮するブリーディングほぼ終了時とした。なお、真空脱水処理の継続時間は5分間とした。

また、透水性型枠を使用したコンクリートの実大模擬供試体実験を実施した。実大模擬供試体の寸法は、幅350×厚さ150×高さ1000mmの壁状とし、型枠はコンクリート型枠用合板と鋼製型枠を組み合わせて作製した。透水性型枠を使用した供試体については、透水シートを1面に貼付した。透水性型枠からの排水は型枠最下部のみとし、それ以外の型枠接合部はシリコン樹脂にて漏水防止を施した。コンクリートを鋼製型枠に2層で打込み、棒状パイプレータを用いて、高さ約250mm、500mmおよび750mmの位置で12秒間締固めを行った。

(2) 改良型圧密試験装置の設計・作製と圧密試験の実施

写真1に示す改良型圧密試験装置を設計し、作製した。本装置は、アームの先端にウェイトを載荷することで、この原理により供試体型枠に挿入した加圧蓋に荷重がかかる仕組みとなっている。加圧ステージは分離式となっており、小さな圧密圧力での試験の場合、ウェイトによる直接載荷も可能とした。加圧蓋の対角線上の2か所に接触型変位計を設置し、載荷時の加圧蓋の上がり量を計測するとともに、載荷時に加圧蓋の中央の穴から排出される水は吸引機を用いて採取し、最終的な採取量を脱水量として計測した。また、鋼製型枠を載せるステージ直下に小型のロードセルを設置し、載荷時の荷重をモニタリングした。

表1に実験の要因および水準を示す。モルタルの基本水準は、水セメント比 W/C : 55%、細骨材容積比 s/m : 0.50、セメント種類 : 普通、フロー値 FL : 220mm、圧密圧力 : 100kPa である。こ



(a)装置の全景



(b)鋼製型枠の周辺



(c)加圧蓋からの排水の様子

写真1 改良型圧密試験装置

表1 実験の要因および水準

(a)モルタル

要因	実験水準
水セメント比(%)	45, <u>55</u> , 65
細骨材容積比	0.45, <u>0.50</u> , 0.55
セメント種類	低熱, 普通, 早強
フロー値(mm)	180, <u>220</u> , 260
圧密圧力(kPa)	5, 50, <u>100</u>

[註] 下線は基本水準を示す。

表2 調合表

(a)モルタル

セメント	W/C (%)	s/m	目標値		単位質量(kg/m ³)			混和剤添加率		実測値		
			FL (mm)	Air (%)	W	C	S	SP/C (%)	AE/C (%)	FL (mm)	Air (%)	Mo温度 (°C)
普通	45	0.50	220	6.8	254	564	1300	0.52	0.010	222.5	7.8	22.0
		0.45			306	556	1170	0.08	0.040	228.8	5.4	22.0
	55	0.50			274	499	1300	0.20	0.020	208.5	6.2	21.0
		0.55			243	441	1430	0	0.018	180.3	5.5	21.0
	65	0.50			291	447	1300	0.62	0.022	268.0	6.4	22.0
		0.55			276	503		0.30	0.013	206.6	6.9	23.0
低熱	55	0.50	220	6.8	274	497	1300	0	0.040	217.0	6.2	21.0
早強					274	497		0.17	0.025	230.7	5.5	22.0
								0.37	0.019	207.9	6.9	24.5

[註]W/C: 水セメント比, s/m: 粗骨材容積比, 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: 空気運行情剤, Mo温度: モルタル温度

(b)コンクリート

要因	実験水準
水セメント比(%)	45, <u>55</u> , 65
骨材容積比	0.63, <u>0.67</u> , 0.71
細骨材率(%)	45, <u>50</u> , 55
セメント種類	低熱, 普通, 早強
スランプ(cm)	8, <u>18</u>
粗骨材最大寸法(mm)	10, <u>20</u>
圧密圧力(kPa)	5, 50, <u>100</u>

[註] 下線は基本水準を示す。

(b)コンクリート

セメント	W/C (%)	a/c	s/a (%)	Gmax (mm)	目標値		単位質量(kg/m ³)					混和剤添加率		実測値		
					SL (cm)	Air (%)	W	C	S	G小	G大	SP/C (%)	AE/C (%)	SL (cm)	Air (%)	Co温度 (°C)
普通	45	0.67	50.0	20	18	4.5	167	372	871	319	592	0.78	0.0040	20.0	4.1	22.0
							206	375	819	300	557	0.05	0.0080	19.0	3.1	22.0
	55	0.67	50.0	20	18		181	329	871	319	592	0.35	0.0050	18.5	4.5	22.0
							0	0.0100	8.0	3.7	22.0					
	65	0.67	50.0	20	18		156	283	923	338	628	0.60	0.0025	17.5	4.8	20.5
							192	295	958	287	533	0.58	0.0025	19.5	5.0	20.0
低熱	55	0.67	50.0	20	18	182	332	871	319	592	0.10	0.0080	20.0	3.9	24.0	
早強						180	328	871	319	592	0.36	0.0070	19.5	4.9	21.5	
											0.88	0.0040	20.0	4.5	23.0	

[註]W/C: 水セメント比, H: 供試体高さ, a/c: 骨材容積比, s/a: 細骨材率, 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: 空気運行情剤, Co温度: コンクリート温度

ここで、細骨材容積比とは、モルタルに占める細骨材容積の比のことである。コンクリートの基本水準は、水セメント比 W/C : 55% , 骨材容積比 a/c : 0.67 , 細骨材率 s/a : 50% , セメント種類 : 普通 , スランプ SL : 18cm , 粗骨材最大寸法 : 20mm , 圧密圧力 : 100kPa である。ここで、骨材容積比とは、コンクリートに占める細骨材+粗骨材の容積の比のことである。

表2にモルタルおよびコンクリートの調合表を示す。試料の練混ぜには、二軸強制練ミキサーを用いた。試料を、供試体高さ 200mm になるように鋼製治具で底上げした 200×400mm 鋼製型枠に、2層に分けて各層 40 回突き棒で締め固めて打ち込んだ。各水準において 200×200mm の無処理供試体と圧密処理供試体をそれぞれ 1 体ずつ作製するとともに、モルタルでは 50×100mm をコンクリートでは 100×200mm の円柱供試体をそれぞれ 3 体作製した。圧密処理供試体は、打込直後に改良型圧密試験装置を用いて、事前に所定の圧密圧力となるように決定したウェイトを載荷することで圧密処理を行った。圧密試験は、温度 20±2°C , 相対湿度 60±5% の恒温恒湿室で実施し、データロガーを用いて加圧蓋の下がり量および荷重データを除荷するまで収録した。上記の供試体打込み時にブリーディング試験用の供試体も打込んだ。ブリーディング試験は、打込み 60 分間までは 10 分ごとに、それ以降は 30 分ごとにコンクリート上面に浮上したブリーディング水をスポイトで吸い取った。

単位容積質量および圧縮強度試験のため、無処理供試体および圧密処理供試体は、型枠内で封緘養生し、材齢 2 日で脱型後は材齢 28 日まで水中で養生した。材齢 14~27 日の間に、コアドリルを用いて、無処理供試体および圧密処理供試体それぞれから、60mm の単位容積質量・圧縮強度試験用コア 3 本、50mm の調合推定用コア 1 本の合計 4 本を採取した。単位容積質量・圧縮強度試験用コア供試体はコンクリートコア cutter を用いて、上中下層に三等分し、材齢 28 日まで直径、高さ、気中質量を計測し、材齢 28 日に圧縮強度を実施した。

調合推定用コア供試体は、単位容積質量・圧縮強度試験用コアの各高さの中心から厚さ 20mm のスライス試料を 1 か所合計 3 枚切り出した。次にスライス試料を乾燥させた後、試料が 105μ フルイを通過するまで微粉碎し、粉碎試料を塩酸に加えて溶解した溶液をろ過した。ろ液は EDTA 標準液を用いた滴定により酸化カルシウム量を定量してセメント量を算出した。また

残留物を $1000 \pm 50^\circ\text{C}$ の電気炉で強熱し、強熱後の質量から骨材量を算出した。算出した骨材量を用いて、コンクリートの単位質量からセメント量と骨材量を差し引いて結合水量を算出した。以上の調査推定で算出したセメント・結合水・骨材の値を用いて、供試体の各層ごとの水セメント比およびセメント水比を算出し、表層からのセメント水比分布を分析した。

4. 研究成果

(1) 透水・脱水コンクリートの品質改善効果の把握

図 1 に真空脱水コンクリートの実大模擬供試体実験の結果の一部を示す。得られた知見の一部を以下に示す。真空脱水コンクリートの各層の密度は、水セメント比によらず、無処理の密度より大きくなった。真空脱水コンクリートの各層の圧縮強度は、水セメント比によらず、無処理の圧縮強度より大きくなり、改善効果は上層ほど大きくなった。真空脱水処理によるセメント水比の改善効果は、水セメント比によらず、表層ほど顕著であった。真空脱水処理の有無によらず、圧縮強度とセメント水比には相関があった。

図 2 に透水性型枠を使用したコンクリートの実大模擬供試体実験の結果の一部を示す。得られた知見の一部を以下に示す。密度分布では、透水性型枠による改善効果が小さかった。圧縮強度分布では、無処理より透水性型枠の方が大きくなり、その改善効果は、実大模擬供試体の底部ほど、または透水性型枠近傍ほど大きくなった。セメント水比分布では、無処理より透水性型枠の方が大きくなり、その改善効果は、バラツキはあるものの、型枠近傍で大きくなった。

密度、圧縮強度ともにセメント水比と相関があった。

(2) 圧密試験

図 3 に圧密試験結果の一例を示す。得られた知見の一部を以下に示す。モルタルの脱水量は、水セメント比が大きいほど、細骨材容積比が小さいほど、フロー値が大きいほど、水和反応の遅いセメントほど、圧密圧力が大きいほど、多くなった。コンクリートの脱水量は、水セメント比が大きいほど、骨材容積比が小さいほど、水和反応の遅いセメントほど、スランプが大きいほど、粗骨材寸法が大きいほど、圧密圧力が大きいほど、多くなった。なお、細骨材率の影響

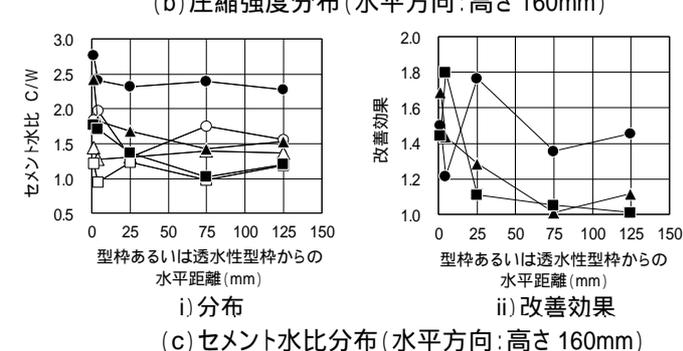
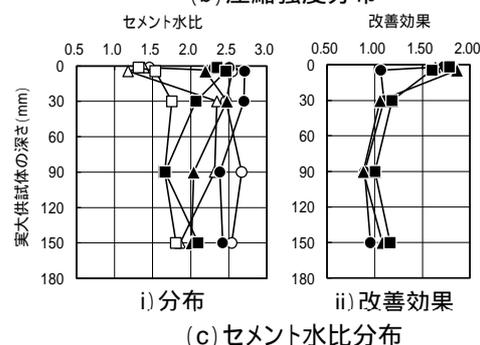
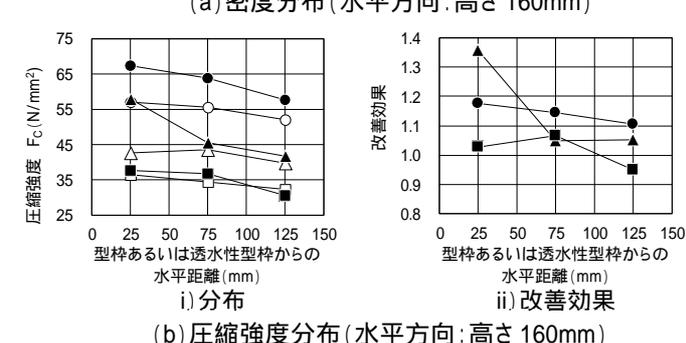
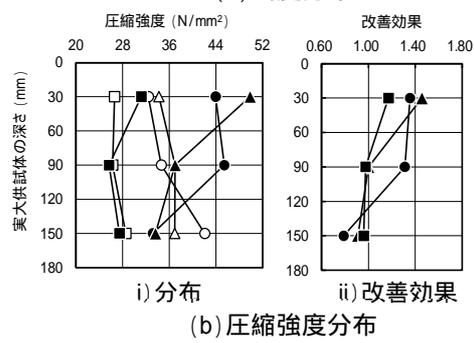
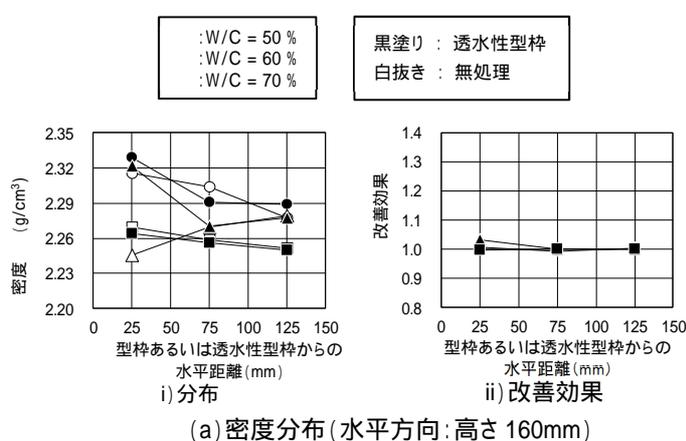
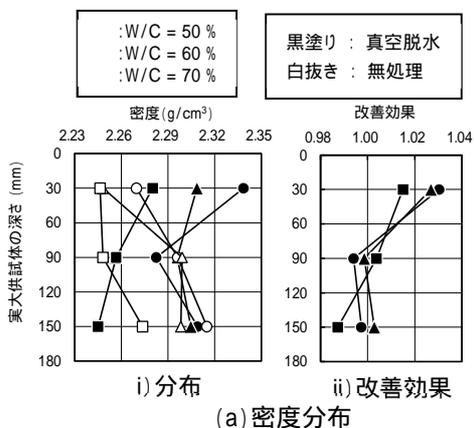


図 1 真空脱水コンクリート

図 2 透水コンクリート

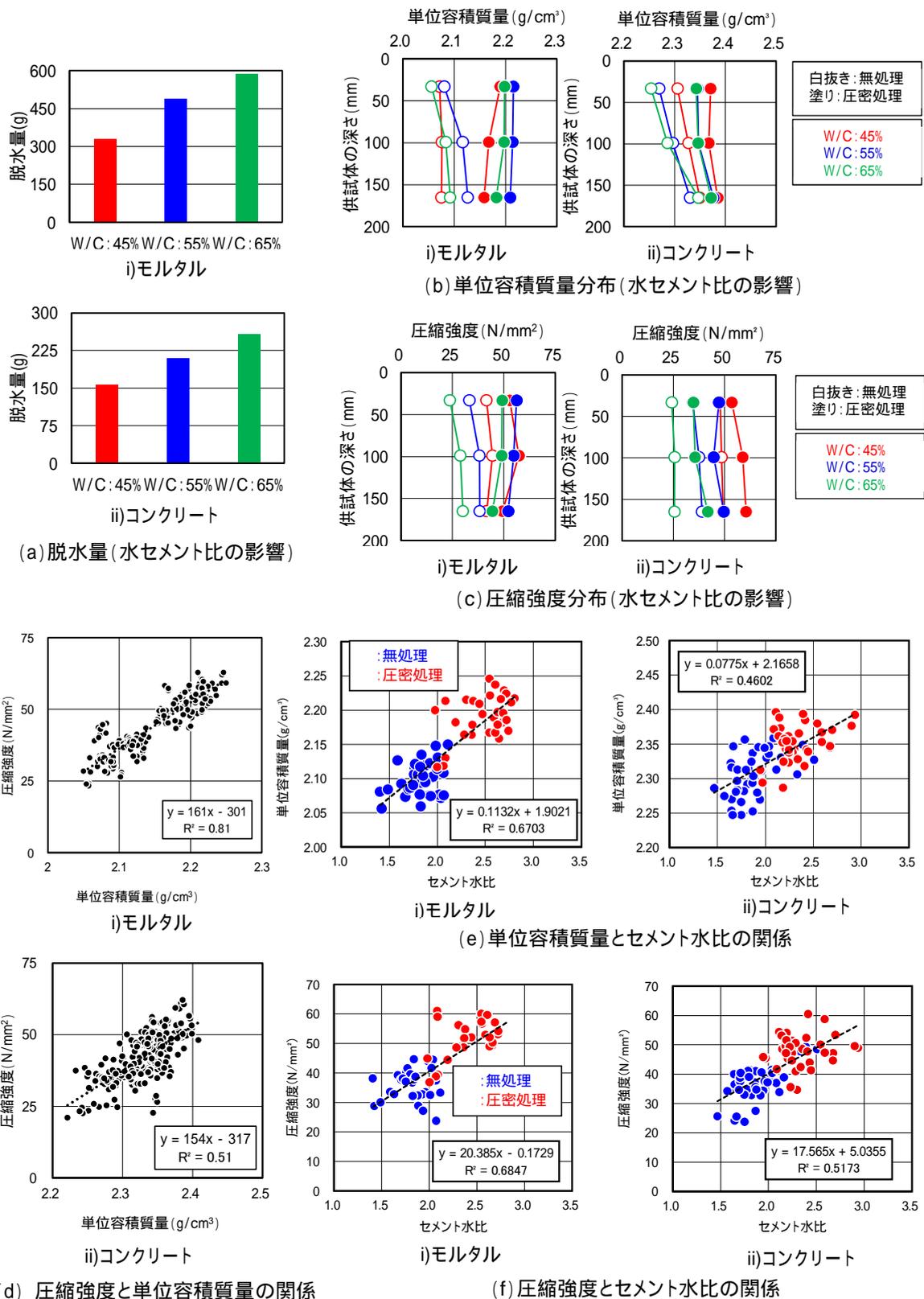


図3 圧密試験結果の一例

はほとんどなかった。脱水量と単位水量には、強い相関が見られた。バラツキはあるが、モルタルおよびコンクリートによらず、無処理では、ブリーディングの影響で上層ほど若干単位容積質量が小さくなるが、圧密処理を行うと、全層にわたって単位容積質量が大きくなった。バラツキはあるが、モルタルおよびコンクリートによらず、無処理では、ブリーディングの影響で上層ほど若干圧縮強度が小さくなっているが、圧密処理を行うと、全層にわたって圧縮強度が大きくなった。モルタルおよびコンクリートによらず、単位容積質量が大きいほど、圧縮強度が大きくなった。モルタルおよびコンクリートによらず、単位容積質量とセメント水比には相関関係がある。モルタルおよびコンクリートによらず、圧縮強度とセメント水比には相関関係がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 坂本 英輔	4. 巻 材料施工
2. 論文標題 水セメント比および供試体高さがコンクリートの圧密特性に及ぼす影響に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022年度日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）	6. 最初と最後の頁 129-130
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 前田 颯太, 此本 拓未, 坂本 英輔	4. 巻 46
2. 論文標題 調合条件および圧密圧力がモルタルの圧密特性に及ぼす影響に関する基礎的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2022年度日本建築学会中国支部研究報告集	6. 最初と最後の頁 57-60
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 此本 拓未, 前田 颯太, 坂本 英輔	4. 巻 46
2. 論文標題 調合条件および圧密圧力がコンクリートの圧密特性に及ぼす影響に関する基礎的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2022年度日本建築学会中国支部研究報告集	6. 最初と最後の頁 49-52
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 坂本 英輔	4. 巻 材料施工
2. 論文標題 改良型圧密試験装置を用いた水セメント比がフレッシュモルタルの圧密特性に及ぼす影響に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021年度日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）	6. 最初と最後の頁 117-118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 坂本 英輔	4. 巻 材料施工
2. 論文標題 真空脱水処理を行ったコンクリートの圧縮強度および中性化速度係数とセメント水比の関係	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020年度日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）	6. 最初と最後の頁 165-166
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 坂本 英輔	4. 巻 材料施工
2. 論文標題 透水性型枠を使用したコンクリートの密度および圧縮強度とセメント水比の関係	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019年度日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）	6. 最初と最後の頁 135-136
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 武村 文太, 坂本 英輔	4. 巻 43
2. 論文標題 透水性型枠を使用したコンクリートのセメント水比分布に関する一考察	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2019年度日本建築学会中国支部研究報告集	6. 最初と最後の頁 25-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 三浦 大登, 坂本 英輔	4. 巻 42
2. 論文標題 真空脱水コンクリートにおける品質とセメント水比の関係	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2018年度日本建築学会中国支部研究報告集	6. 最初と最後の頁 71-74
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 此本 拓未
2. 発表標題 調合条件および圧密圧力がコンクリートの圧密特性に及ぼす影響に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前田 颯太
2. 発表標題 調合条件および圧密圧力がモルタルの圧密特性に及ぼす影響に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂本 英輔
2. 発表標題 水セメント比および供試体高さがコンクリートの圧密特性に及ぼす影響に関する研究に関する研究
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会（北海道）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本 英輔
2. 発表標題 改良型圧密試験装置を用いた水セメント比がフレッシュモルタルの圧密特性に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本 英輔
2. 発表標題 透水性型枠を使用したコンクリートの密度および圧縮強度とセメント水比の関係
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会（北陸）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦 大登
2. 発表標題 真空脱水コンクリートにおける品質とセメント水比の関係
3. 学会等名 日本建築学会中国支部
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関