論文　透水シートによるコンクリート表層の品質改善に及ぼす再振動の効果

田中　亮一[*1]・井手　宏樹[*2]・羽渕　貴士[*3]・福手　勤[*4]

要旨：コンクリート表層を改質し，コンクリートの品質・耐久性向上を図る手法として透水シートを用いた工法がある。本研究では，透水シートによるコンクリート表層の品質改善効果を確認するとともに，上部の品質改善を目的として再振動を併用したときの品質改善効果を検討するために，コンクリート試験体を用いて排水量の測定，透気試験，促進中性化試験，塩化物イオン浸透深さ試験および細孔径分布測定を実施した。その結果，再振動により透気性，中性化の進行や塩化物イオンの浸透に対する抵抗性および細孔構造が改善されることが明らかとなった。

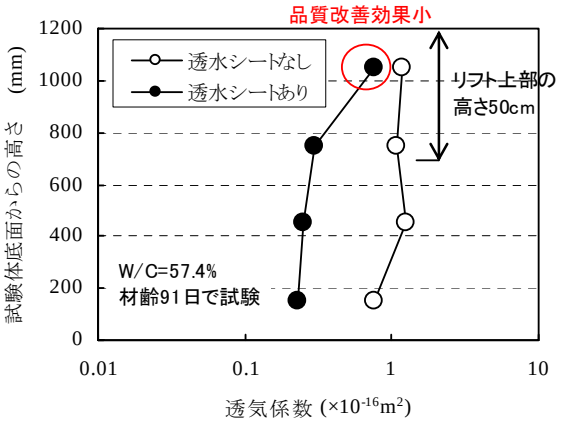
キーワード：透水シート，再振動，透気係数，中性化深さ，塩化物イオン浸透深さ，細孔径分布

1. はじめに

近年，コンクリートの品質・耐久性向上が強く求められており，様々な対策が講じられている。透水シートを用いた透水型枠工法もそのひとつであり，これまでに多くの構造物に適用されてきた。この工法の概要は，不織布などを組み合わせた透水シートを型枠に貼り付けることで，コンクリートの打上りにともなって型枠に作用する側圧と内部振動機による締固めにより，余剰水と気泡を透水シートを介して外部に排出させるものである。これにより，コンクリートの表面気泡を減少させ，またコンクリート表層部を緻密化させる。透水シートを用いたコンクリート表層の品質改善効果については，これまでに多くの研究[1),2)]で明らかにされており，また筆者らは，非破壊検査手法である透気試験を利用することで，実構造物において耐久性（中性化の進行や塩化物イオンの浸透に対する抵抗性）を定量的に評価できる可能性を示唆した[3)]。

しかし，上述したとおり，透水型枠工法はコンクリートの打上りにともなう側圧の作用を利用しているため，コンクリートの打上り高さ方向で品質の改善効果に差が生じ，特に側圧の影響が小さくなるリフト上部の 10～20cm程度では，品質改善効果が小さくなることが知られている[1)]。ここで透気試験の結果の一例を**図－１**に示す。この結果からも既往の知見と同様に高さ方向で品質改善効果に差があり，最上部でその効果は小さくなっていることが明らかである。

そこで本研究では，リフト上部の高さ 50cm 部分をモデル化した試験体を用いて，最上部の品質改善を図る手法について実験的検討を行った。具体的には，再振動を利用し，再振動による品質改善効果と再振動を実施するタイミングが品質改善効果に与える影響を把握するための検討を行った。



図－１　透気試験の結果の一例[3)]

2. 実験概要

透水シートと再振動の併用による品質改善効果を確認するため，リフト上部の高さ 50cm をモデル化したコンクリート試験体に透水シートを用いて，3 つのシリーズで実験を行った。シリーズ 1 は再振動を実施するタイミングを変えたときの影響を把握する目的で，シリーズ 2 はコンクリートの練上りから打込みまでの時間間隔が再振動の効果に与える影響を確認する目的で，シリーズ 3 は再振動を行ったときに耐久性に与える影響を把握する目的で行った。

*1 東亜建設工業（株）　技術研究開発センター新材料・リニューアル技術グループ　(正会員)
*2 東洋大学　工学部環境建設学科
*3 東亜建設工業（株）　技術研究開発センター新材料・リニューアル技術グループリーダー　博(工)　(正会員)
*4 東洋大学　理工学部都市環境デザイン学科教授　工博　(正会員)

2.1 コンクリートの配合

試験体の製作に使用したコンクリートの配合を**表－１**に示す。コンクリートは水セメント比 55%，スランプ 10cmの普通コンクリートとした。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3），細骨材は君津産陸砂（S1, 表乾密度 2.62g/cm^3, 粗粒率 2.58）と児玉産山砂（S2, 表乾密度 2.59g/cm^3，粗粒率 2.74），粗骨材は東京都青梅市産砕石 2013（G1，表乾密度 2.68g/cm^3，粗粒率 6.97）と東京都青梅市産砕石 1305（G2，表乾密度 2.67g/cm^3，粗粒率 6.11），混和剤はリグニンスルホン酸系AE減水剤を用いた。

表－１　コンクリートの配合

W/C	単位量(kg/m^3)						AD
(%)	W	C	S1	S2	G1	G2	(C×%)
55	162	295	438	433	490	489	1.0

※粗骨材の最大寸法 20mm，空気量 4.5%

2.2 試験体

試験体の形状を**図－２**に示す。シリーズ 1 およびシリーズ 2 の試験体の形状は 200×200×500mm とし，シリーズ 3 の試験体は 400×200×500mm とした。型枠は木製型枠とし，シリーズ 1 およびシリーズ 2 は鉛直面の相対する 2 面に透水シートを貼り付けた。シリーズ 3 は，400×500mm の鉛直面を試験面とした。

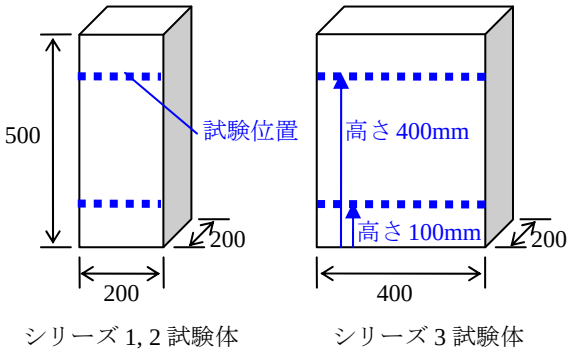
コンクリートの打込みは，1 層あたり 250mm の 2 層で行い，棒径 25mm の内部振動機を用いて各層 5 秒間（シリーズ 3 は 5 秒間×2 箇所）の締固めを行った。再振動は，コンクリート打込み後の適当なタイミングに棒径 27mm，振動部の長さ 461mm の内部振動機を，深さ 400mm まで挿入してから引き抜くまで 1 箇所あたり 10 秒間の加振を行った。再振動の実施位置を**図－３**に示す。本研究では，再振動はかぶり部へ内部振動機を挿入して行うことをイメージし，**図－３**のように型枠から 5cm 離れた位置で密に行った。

コンクリート硬化後の養生は，材齢 5 日まで天端面は封緘養生して側面の型枠は存置し，その後室内で気中養生した。

2.3 試験ケースおよび試験項目

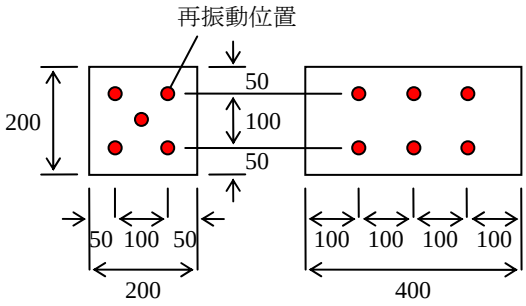
(1) シリーズ 1

シリーズ 1 の試験ケースおよび試験項目を**表－２**，**表－３**に示す。コンクリートの打込みは，練上りから 30 分後に行った。再振動のタイミングは，再振動なし，打込み完了 40 分後，60 分後，90 分後および 3 時間後とした。なお打込み完了 3 時間後は，試験体製作と並行して実施したブリーディング試験におけるブリーディングの終了時間である。



シリーズ 1, 2 試験体　　シリーズ 3 試験体

図－２　試験体の形状



シリーズ 1, 2 試験体　　シリーズ 3 試験体

図－３　再振動の実施位置

表－２　試験ケース（シリーズ 1）

ケース名	型枠条件	再振動のタイミング
1-1	透水シートなし	再振動なし
1-2	透水シートあり	
1-3		打込み完了 40 分後
1-4		打込み完了 60 分後
1-5		打込み完了 90 分後
1-6		打込み完了 3 時間後

表－３　試験項目（シリーズ 1 および 2）

試験項目	試験方法
排水量の測定	打込み後に型枠最下面より排出される水の質量を測定
透気試験	トレント法[4]

排水量の測定は，コンクリートの打込み後に透水シート内を通って型枠の最下面より排出される水を採取し，質量を測定して排水量とした。

透気試験は，トレント法[4]により実施した。測定は試験体の最下面より 100mm，400mmの高さ（**図－２**参照）で材齢 28 日に行った。

(2) シリーズ 2

シリーズ 2 の試験ケースおよび試験項目を**表－４**，**表－３**に示す。コンクリートの打込み時間を練上りから 30

表－４　試験ケース（シリーズ 2）

ケース名	型枠条件	コンクリートの打込み時間
2-1	透水シートあり（再振動は打込み完了 40 分後に実施）	練上りから 30 分後
2-2		練上りから 1 時間後
2-3		練上りから 1.5 時間後
2-4		練上りから 2 時間後

分後，1 時間後，1.5 時間後および 2 時間後とし，再振動は打込み完了 40 分後に実施した。シリーズ 2 の試験は，シリーズ 1 と同様の項目を実施した。

(3) シリーズ 3

シリーズ 3 の試験ケースおよび試験項目を**表－５**，**表－６**に示す。Case3-4 は，試験体の高さ方向の上半分（最下面より 250～500mm の位置）にリフト上部の排水を促進させる目的で透水シートを 2 枚重ねにしたケースである。シリーズ 1 と 2 の結果をふまえて，コンクリートの打込みは練上りから 30 分後，再振動は打込み完了 40 分後に行った。

透気試験および反発度試験は，試験体の最下面より 100mm，400mm の高さ（**図－２**参照）で材齢 28 日に行った。そのあと透気試験を行った高さで直径 75mm のコアを 3 本採取し，促進中性化試験，塩化物イオン浸透深さ試験および細孔径分布測定を行った。促進中性化試験および塩化物イオン浸透深さ試験は，採取したコアの試験面（型枠面）以外をエポキシ樹脂で被覆し，試験体と

表－５　試験ケース（シリーズ 3）

ケース名	型枠条件	再振動
3-1	透水シートなし	なし
3-2	透水シートあり	
3-3		あり（打込み完了 40 分後）
3-4	透水シートあり 上部（最下面より 250～500mm）のみ 透水シート 2 枚重ね	

表－６　試験項目（シリーズ 3）

試験項目	試験方法
透気試験	トレント法[4]
反発度試験	JIS A 1155 に準拠
促進中性化試験	JIS A 1153 に準拠
塩化物イオン浸透深さ試験	JIS A 1171 に準拠 溶液：10%NaCl 溶液
細孔径分布測定	水銀圧入法

表－７　フレッシュコンクリートの性状と凝結特性

シリーズ	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	ブリーディング量 (cm^3/cm^2)	凝結(時，分) 始発時間	凝結(時，分) 終結時間
1	9.0	4.2	28.0	0.17	4, 40	6, 15
2	9.0	4.0	16.5	0.15	5, 30	8, 05
3	12.0	5.4	22.0	0.18	－	－

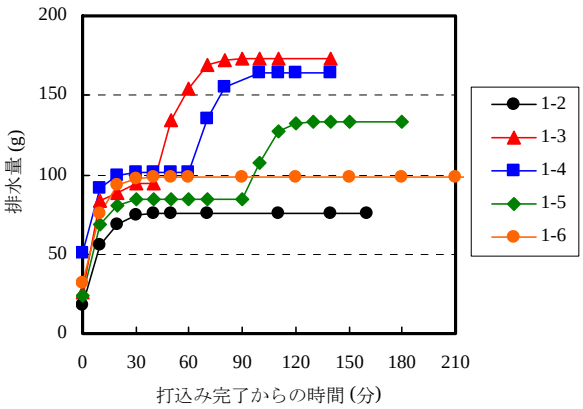
した。促進中性化試験は 20℃，60%RH，CO_2濃度 5%に管理された試験機に 56 日間暴露し，塩化物イオン浸透深さ試験は 10%NaCl溶液に 56 日間浸漬した。暴露期間終了後，中性化深さおよび塩化物イオン浸透深さを測定した。細孔径分布は，採取したコアの型枠面より 0～10mm の範囲から 5mm程度の大きさのモルタル粒を切り出し，水銀圧入法によって測定した。

3. 実験結果

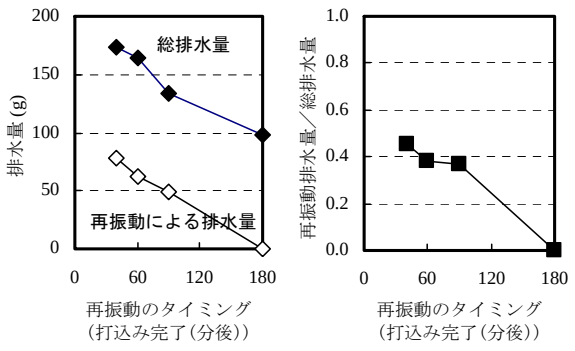
シリーズ 1～3 の試験体製作時のフレッシュコンクリートの性状を**表－７**に示す。

3.1 シリーズ 1 の結果

排水量の測定結果を**図－４**および**図－５**に示す。



図－４　排水量の測定結果（シリーズ 1）



図－５　再振動のタイミングと排水量（シリーズ 1）

Case1-3～1-5 の測定結果より，再振動を行うことで排水量が増加することが確認された。しかし，打設完了 3 時間後に再振動を行った Case1-6 では，排水量の増加はなかった。再振動は一般にブリーディングが終了するまでの間に行うとよいとされているが，透水シートによって余剰水の排水が促進されたことが，再振動の適切な施工のタイミングから外れてしまったのではないかと推察される。また，打込み完了の 40 分後以降の早いタイミングで再振動を行ったものほど若干ではあるが排水量が多い結果となり，再振動のタイミングが早いほどコンクリート表層の余剰水の排水は促進されたと考えられる。

透気試験の結果を**図－６**に示す。試験結果より，透水シートを用いることで透気係数は小さくなり，再振動を行うとさらに透気係数が小さくなることが確認できた。これにより，再振動を行うことでコンクリート表層がより緻密化されたと考えられ，また Case1-3 の透気係数が若干ではあるが一番小さいため，再振動のタイミングが早いほど効果があったのではないかと考えられる。

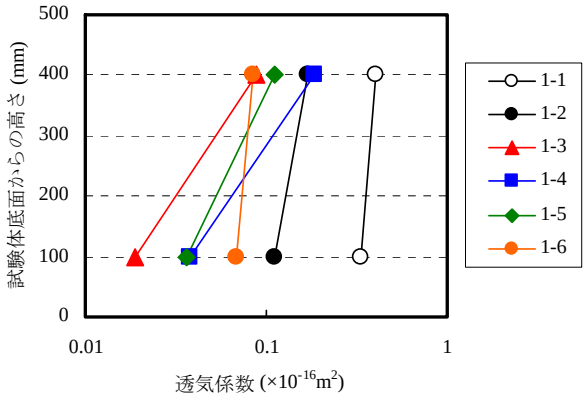
透気係数と排水量の関係を**図－７**に示す。試験体下部（高さ 100mm）においては排水量が多くなれば透気係数が小さくなる傾向があるが，試験体上部（高さ 400mm）においてはその傾向は見られなかった。本試験では，再振動を行う際に内部振動機を深さ 400mm まで挿入していることから，上部に比べて下部の排水が促進され，上記のような傾向が現れたのではないかと推察される。

実験中の再振動作業において，打込み完了 90 分後では内部振動機をコンクリートに挿入するときの抵抗がやや大きくなり，さらに打込み完了 3 時間後に再振動を行ったケースではコンクリート表面に穴が残ってしまった。上述したとおり打込み完了 3 時間後では再振動による排水量の増加がなかったことから，透水シートを用いてコンクリート施工を行う際は，通常のコンクリート施工で行うよりも早いタイミングで再振動を行う必要があると考えられ，本実験結果より打込み完了 90 分程度までに行うことが望ましいと考えられる。

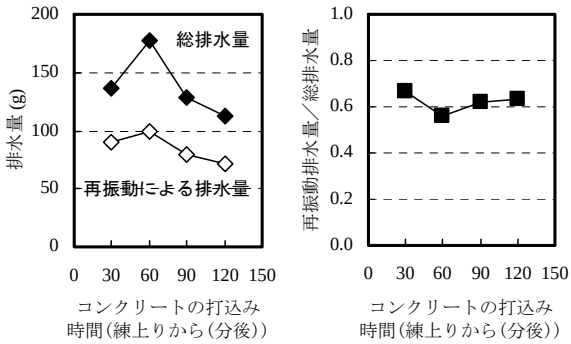
3.2 シリーズ 2 の結果

排水量の測定結果を**図－８**に示す。試験結果より，コンクリートの打込み時間が遅くなるほど若干排水量が減少しているものの，打込みが練上りから 2 時間後であっても再振動により十分に排水されることが確認できた。

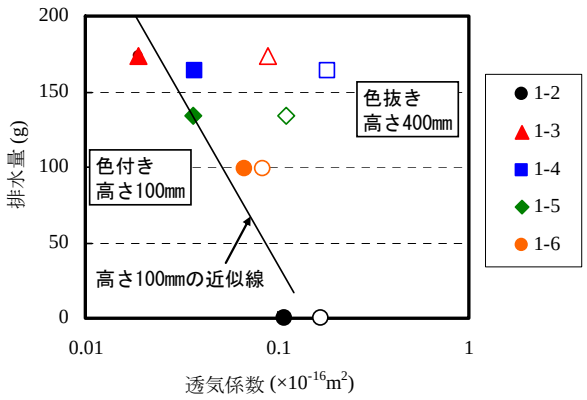
透気試験の結果を**図－９**に示す。試験結果より，おおむねすべてのケースで透気係数は同程度であることが確認された。このことからもコンクリートの打込みが練上りから 2 時間以内（一般的な施工の範囲（コンクリート



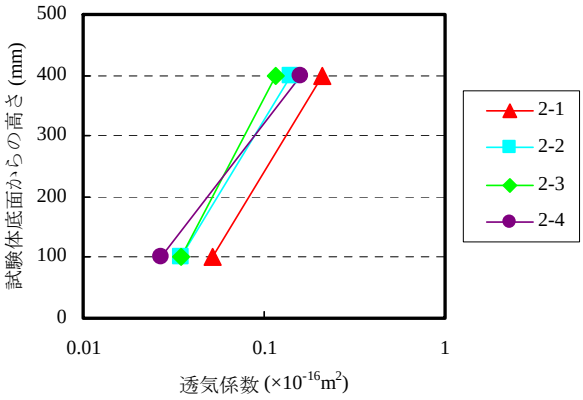
図－６　透気試験結果（シリーズ 1）



図－８　コンクリートの打設時間と排水量（シリーズ 2）



図－７　透気係数と排水量の関係（シリーズ 1）



図－９　透気試験結果（シリーズ 2）

標準示方書)）であれば，再振動の効果が得られることが確認できた。

3.3 シリーズ 3 の結果

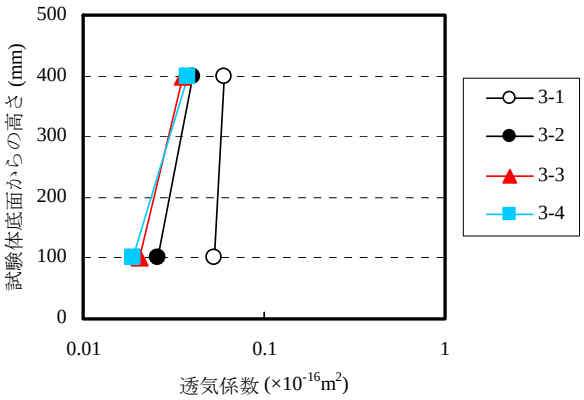
透気試験の結果を**図－１０**に示す。試験結果より，透水シートを用いることで透気係数は小さくなり，再振動を行うとさらに透気係数は小さくなったが，試験体下部に比べて上部での改善効果は小さいようであった。この傾向は，再振動において内部振動機を深さ 400mm まで挿入して行っていることが影響しているのではないかと推察される。Case3-3 と Case3-4 の透気係数は同程度だったことから，リフト上部の排水を促進させる目的で上部のみ透水シートを 2 枚重ねにした効果は得られなかった。

反発度試験の結果を**図－１１**に示す。試験結果より，透水シートを用いることで，試験体下部の反発度は向上したが，上部はほぼ同程度となった。また，再振動による反発度の改善効果は確認できなかった。

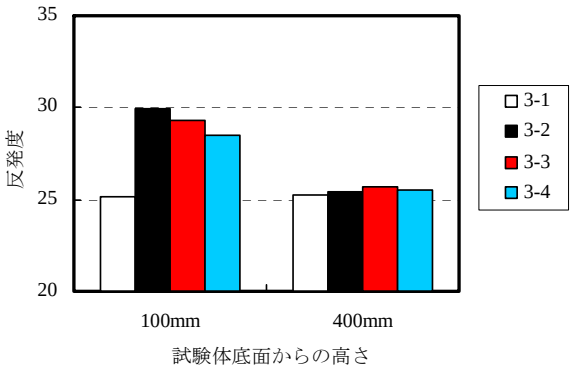
細孔径分布測定の結果を**図－１２**に示す。測定結果より，試験位置の高さに関係なく細孔直径 0.06～2μm の範囲の細孔量が，透水シートを用いることで減少している結果となった。またその細孔量は，高さ 100mm では Case3-1＞（Case3-2，Case3-3，Case3-4），高さ 400mm では Case3-1＞Case3-2＞(Case3-3, Case3-4) となっており，試験体上部において再振動により細孔量が減少していると考えられる。また高さ方向で比較すると，試験体下部のほうが全体的に細孔量は小さかった。

促進中性化試験の結果を**図－１３**に示す。試験結果より，透水シートを用いることで中性化深さが小さくなり，再振動を行うとさらに中性化深さが小さくなることが確認できた。特に試験体上部において，再振動による中性化深さの品質改善効果が大きかった。また，細孔径分布と非常に密接な関係があることが確認でき，細孔直径 0.06～2μm の範囲の細孔量の減少が中性化深さを小さくした要因と推察される。既往の研究[5]では，0.1μm以上の空隙が炭酸化に関与するとあり，本試験結果はこの指摘に合致した結果と言える。

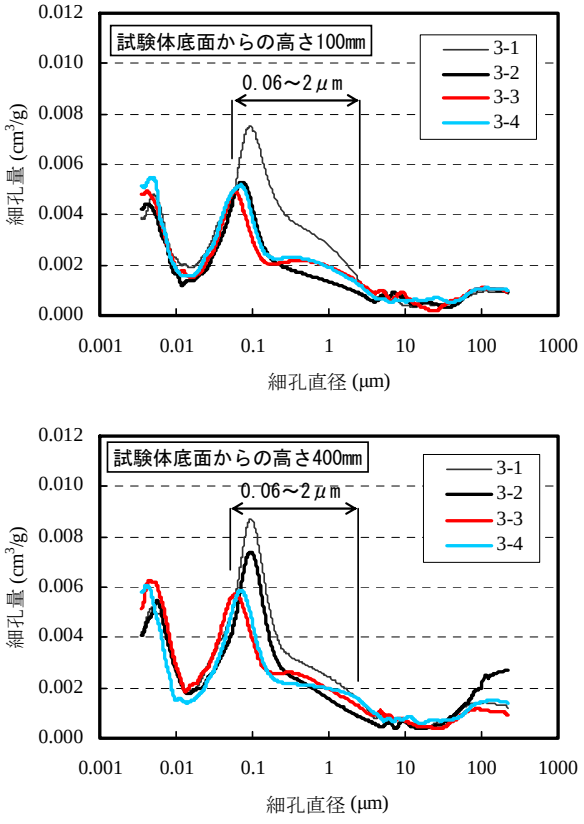
塩化物イオン浸透深さ試験の結果を**図－１４**に示す。試験結果より，透水シートを用いることで塩化物イオン浸透深さは小さくなることが確認できた。しかし，試験体上部のCase3-2～Case3-4 の値はほぼ同程度であることから，促進中性化試験の結果とは異なり，再振動による品質改善効果は試験体上部まで発揮されなかったと考えられる。既往の研究[6]では，0.05～2μm の範囲の空隙が塩化物イオンの透過性に影響を与えるとあり，試験体下部の結果とは合致したが，試験体上部の結果とは合致しなかった。この要因については不明であるが，本試験においては内部振動機を深さ 400mmまで挿入して再振動を行っていることが一因ではないかと推察される。その



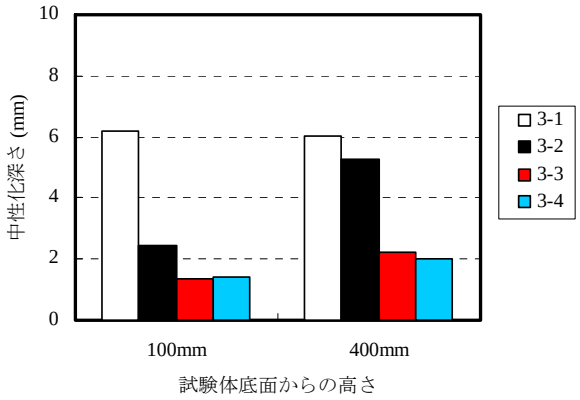
図－１０　透気試験結果（シリーズ 3）



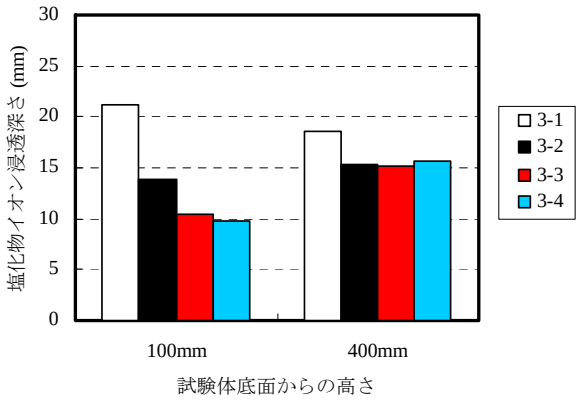
図－１１　反発度試験結果（シリーズ 3）



図－１２　細孔径分布（シリーズ 3）



図－１３　中性化深さ（シリーズ 3）



図－１４　塩化物イオン浸透深さ（シリーズ 3）

場合，最上部の 10～20cm 程度の位置で再振動を行うことで，最上部の塩化物イオンの浸透に対する抵抗性を向上できる可能性が考えられるが，この点については今後の課題である。

4. まとめ

本研究は，透水シートを用いたときの最上部の品質改善を目的として再振動を併用したときの品質改善効果を検討するために，各種試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

(1) 再振動によって透気係数は改善され，コンクリートの打込み完了後 90 分程度までに再振動を行うのが効果的と考えられる。

(2) コンクリートの練上りから打込みまでの時間間隔が 2 時間以内であれば，再振動による品質改善効果を得られることが確認できた。

(3) 再振動によって細孔構造の改善と中性化深さが小さくなることが確認でき，リフト最上部においても大きな品質改善効果を得られることが確認できた。

(4) 塩化物イオン浸透深さは，再振動により下部の品質改善効果は確認できたが，最上部における品質改善効果は得られなかった。これは再振動における内部振動機の挿入深さが一因ではないかと考えられるが，この点については今後の課題である。

謝辞

本研究を行うにあたり，（株）中研コンサルタントの皆様に多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 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委員会報告書，日本コンクリート工学協会，2004.9

2) 竹田宣典，平田隆祥，十河茂幸，芳賀孝成：透水性シートを用いた型わくによるコンクリート表面の品質改善，コンクリート工学年次論文集，Vol.11，No.1，pp.683-688，1989

3) 田中亮一，羽渕貴士，網野貴彦，福手　勤：透水型枠によるコンクリート表層の改質効果とその評価手法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.653-658，2011

4) Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Mater. & Struct., v.25, n.150, pp.358-365, July 1992

5) 内川　浩：混合セメントの水和および構造形式に及ぼす混合材の効果（その４），セメント・コンクリート，No.488，pp.33-48，1987.10

6) 羽原俊祐：硬化コンクリートの組織および空隙構造と物性の関係に関する研究，慶応大学学位論文，1992