

論文 簡易透気試験機を用いたコンクリート表層評価の基礎的実験とその適用性に関する研究

相澤 雅俊*1・武田 三弘*1・海沼 飛鳥*2

要旨：本研究は、コンクリート表層の品質評価について、現場で簡易に使用可能な非破壊検査の確立を目的とし、供試体に対して独自で開発した簡易透気試験機を用いて、その特性と適用性について実験を行った。また、型枠の種類や塗布する剥離剤がコンクリート表層の密実性や透気係数に与える影響についても検証した。その結果、簡易透気試験はトレント法と高い相関を示し、測定結果より 100mm 程度までの表層の品質評価が可能であると考えられる。型枠と剥離剤との影響は、型枠と剥離剤の組合せによって、表層の密実性が確保される場合と低下する場合が確認され、このような表層の密実性を簡易透気試験機で評価ができた。

キーワード：定簡易透気試験、測定深さ、合板型枠、型枠剥離剤

1. はじめに

社会基盤を支えるインフラの多くは、高度経済成長期以降に建設・整備されたものであり、建設から 50 年以上が経過するインフラの割合は、2040 年には道路橋で約 75%、トンネルで約 52%、港湾施設で約 68% に達すると予測されている。今後、建設から 50 年以上が経過する設備の割合が加速度的に増加する中で、さまざまなインフラの老朽化が急速に進行することが懸念される。このような状況において、適切な構造物の維持管理が重要な課題となっている。

コンクリートの耐久性を評価するにあたっては、劣化因子（例えば、コンクリートの中性化を引き起こす二酸化炭素や、塩害をもたらす塩化物イオンなど）の浸透特性を実際の構造物で正確に把握することが必要である。

近年ではコンクリート表層の品質評価における非破壊検査の重要性が高まっている。しかし、現在提案されているコンクリートの透気性や透水性を評価する非破壊検査手法には、高価な機器の使用や測定前の機器の暖機準備に時間がかかるといった課題があり、現場で簡易に検査できる機器は未だ実用化されていないのが現状である。これらの課題を解決するためには、現場で容易に使用できる非破壊検査技術の開発が急務であり、その実用化に向けた研究が求められている。

本研究では、独自に開発した簡易透気試験機を用いて簡易透気係数を求める実験を行い、その特性と適用性等を検討した。さらに、型枠の種類及び型枠の打設面に塗布する剥離剤等の種類によって、コンクリートの表層の密実性に与える影響を確認するとともに、簡易透気係数との関係についても検証した。

具体的には、次の内容について実験を行った。

- ・簡易透気試験機の特性及び適用性の検証
- ・型枠と剥離剤等の種類がコンクリート表層の密実性に与える影響と簡易透気係数との関係

2. 簡易透気試験機の概要

筆者らが開発した簡易透気試験機の構造を写真-1 に示す。本試験機は、呼び径 100mm の硬質塩ビ排水継ぎ手とつまみ付き掃除口排水用塩ビ継ぎ手を本体とし、これに 2 本のコック（負圧用及び負圧調整用）と負圧計を取り付けた構造である。また、試験機の端部には軟質シリコーンを接着させて一体化し、コンクリート表面との密着性を高めたシングルチャンバー形式を採用している。

(1) 測定の手順

測定の手順は以下の通りである。

- ・試験機のシリコーン部分を測定面に密着させた状態で、負圧用コックを開放し、真空ポンプを用いて減圧する。
- ・負圧計の値が -80kPa を超えた段階でコックを閉じて、真空ポンプの電源を停止する。
- ・負圧計の値が -80kPa から -60kPa まで増圧するのに要した時間（秒）を測定する。
- ・この増圧量（20kPa）を経過時間で除して、簡易透気係数（kPa/sec）を算出する。
- ・増圧量が 20kPa に達しないほど緻密なコンクリートの場合、測定時間は最大 5 分（300 秒）までとし、その時点での増圧値を 300 秒で除して簡易透気係数を求める。

(2) 試験機的主要特徴

本試験機的主要特徴は以下の通りである。

- ・材料費を含めた製作コストが 1 台あたり 1 万円以下と低コストである。
- ・使用時に暖機運転を必要とせず、簡便に操作できる。

*1 東北学院大学 工学部 環境建設工学科 (正会員)

*2 東北学院大学 工学部 環境建設工学科 (学生会員)

- ・最大測定時間は、5分で短時間での測定ができる。
- ・複数台の試験機を同時に使用することで効率的な測定ができる。
- ・手動式の吸引装置を使用すれば、電源が確保できない環境でも測定ができる。



写真-1 簡易透気試験機

3. 簡易透気試験機の特性及び適用性の検証

3.1 実験概要

(1) 使用材料及びコンクリートの配合

使用材料は、普通ポルトランドセメント（密度 3.14g/cm³）、砕石（最大骨材寸法 20mm、表乾密度 2.91 g/cm³）、砕砂（表乾密度 2.55 g/cm³）を使用した。練り混ぜ水は、一般水道水とし、混和剤は AE 減水剤を使用した。コンクリートの配合を表-1 に示す。水セメント比は 40%、50%、60%の 3 配合とし、目標スランプ及び目標空気量は、それぞれ 10cm、4.5%とした。

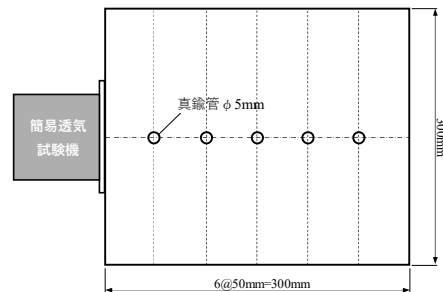
表-1 コンクリートの配合

| 水セメント比 W/C (%) | 細骨材率 s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------------|-----------|----------|----------|-----------|
| | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 AE |
| 40.0 | 41.6 | 187 | 468 | 657 | 1052 | 0.019 |
| 50.0 | 43.6 | 187 | 374 | 721 | 1065 | 0.015 |
| 60.0 | 45.6 | 187 | 312 | 778 | 1059 | 0.012 |

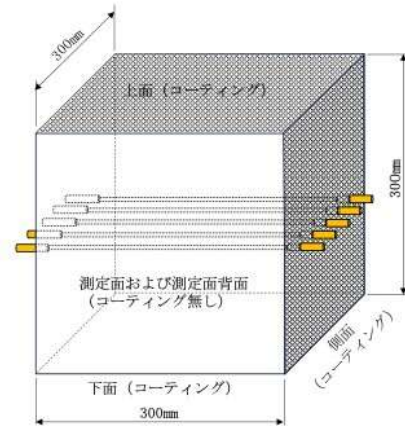
(2) 試験体製作及び養生方法

試験体は、図-1 に示すように 300mm×300mm×300mm の正方形とし、簡易透気試験機の測定深さを確認するため、試験体の両側面に長さ 50mm、直径 5mm の真鍮管を 5 本ずつ所定の位置に設置し、真鍮管を貫通させるようにφ3mm の真鍮棒を差し込み、コンクリートの打込みを行った。コンクリートの打込みには棒状振動機で締め固めた後、型枠に振動を与えず温度 20℃の室内に静置した。脱型は材齢 7 日に行い、真鍮棒を抜き取ることで供試体中に 50mm 間隔でφ3mm の人工の空洞を設け

た。脱型後に試験体の 2 面（測定面及び測定面の背面）を除いた他の 4 面をエポキシ樹脂でコーティングした。養生は、試験体をコーティングした後、温度 20℃、湿度 60%の室内に気中養生とした。なお、試験体は水セメント比 40%、50%、60%をそれぞれ 1 体ずつ合計 3 体作製した。



(試験体を横から見た図)



(試験体のコーティング位置)

図-1 試験体の製作

(3) 試験体の測定

試験体の測定は、下記の項目順に実施した。

- ・コンクリート表層の水分率（以下、表層水分率）測定
- ・トレント法による表層透気試験
- ・簡易透気試験

表層水分率の測定は、静電容量式の機器を用いて行った。トレント法による表層透気試験は、簡易透気試験との比較のため実施した。

簡易透気試験及びトレント法による透気試験は、水分率が透気試験結果に与える影響を確認するため、それぞれ 5.5%程度、4.5%程度、3.5%程度の表層水分率で透気試験を行い、そのときの測定材齢がそれぞれ 14 日、47 日、145 日であった。

簡易透気試験における測定深さの検証は、図-2 に示すように、試験体側面の真鍮管とピペットをゴムチューブで繋ぎ、ピペットを水の中に 20mm 程入れた状態で行われた。透気試験によってコンクリート内部に負圧が伝わると、人工の空洞の空気が吸い込まれることで、ピペ

ットの先端から水が吸い上げられる。その水位を測定することで内部の圧力を求めた。なお、内部の圧力は、既往の研究によりピペットの水位が 1mm 上昇すると試験体の空洞に 9.8Pa の圧力がかかることを確認している²⁾。

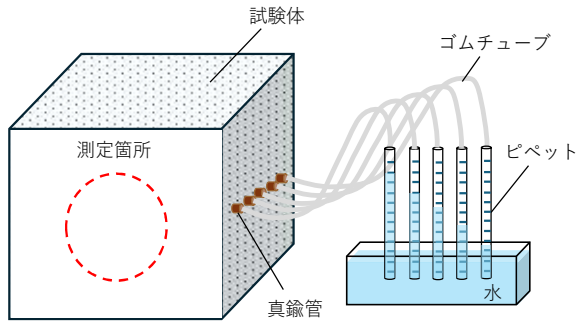


図-2 試験状況

3.2 実験結果

(1) 水セメント比の違い

水セメント比と簡易透気係数の関係を図-3 に示す。簡易透気係数は、水セメント比が増加するにつれて大きくなる傾向を示した。これは、水セメント比の違いがコンクリート表層部の密実性に影響を与えるもので、表層品質を的確に反映する透気試験の特性を示していると考えられる。したがって、簡易透気試験を用いることで、コンクリート表層の密実性を効率的に評価可能である。なお、本研究における表層部とは、コンクリート表面から 50mm 程度の範囲を示している。

(2) 表層水分率の違い

表層水分率と簡易透気係数の関係を図-4 に示す。水分率は、機器の仕様より、20mm 程度までの深さを測定範囲としている。これより、水セメント比 60% の場合、水分率の低下に伴い、簡易透気係数はやや増加する傾向を示した。一方、水セメント比 40% 及び 50% では、表層水分率が約 5.5% から約 4.5% に低下した際、簡易透気係数が増加する傾向を示したが、表層水分率が約 3.5% まで低下すると、簡易透気係数の増加が見られず、横ばいとなった。渡邊らの研究³⁾では、コンクリートの水分量が表層透気試験の測定値に及ぼす影響を検討しており、透気係数に影響を及ぼす質量含水率は対象物により異なるが概ね 4.0~5.5% であるとの報告がある。これらより、表層水分率が約 3.5% まで低下すると簡易透気係数が横ばいとなる現象は、コンクリートの水分量が一定の値を下回ると、透気係数への影響が減少するためと考えられる。つまり、コンクリート内部の水分が減少すると、空隙が増加し、空気の通り道が確保されるため、透気係数が増加するが、ある程度以上水分が減少すると、これ以上空隙が増加せず、透気係数も一定になると推察される。

(3) 簡易透気試験と透気試験（トレント法）との比較

図-5 は、測定材齢における簡易透気試験とトレント法による透気試験の結果を比較したものである。両試験から得られた透気係数は指数近似曲線の結果、決定係数が 0.98 と高い相関を示しており、簡易透気試験はトレント法による透気試験と整合性があると考えられる。

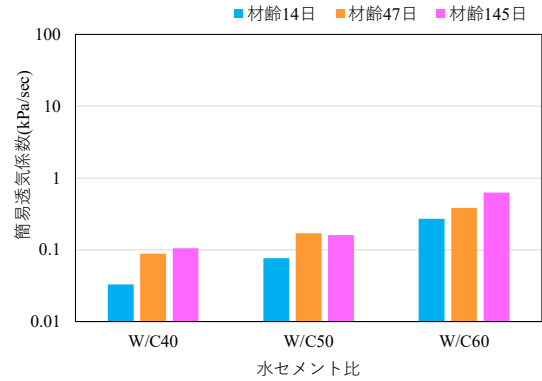


図-3 水セメント比と簡易透気係数

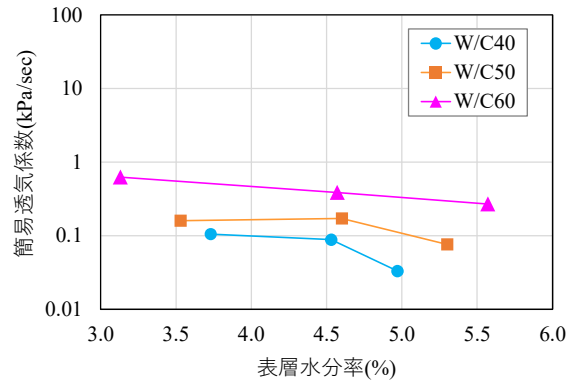


図-4 表層水分率と簡易透気係数

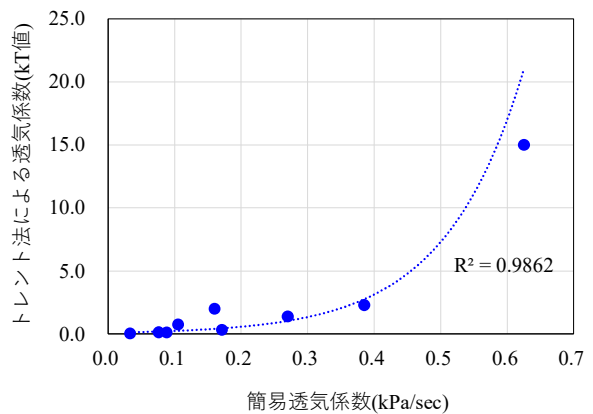


図-5 簡易透気係数とトレント法による透気係数

(4) 測定深さ

簡易透気試験の測定深さは、測定材齢における各試験体 (W/C=40%, 50%, 60%) の表層水分率がほぼ同じ値である 4.5% の条件下で、簡易透気試験の圧力分布により検証した。簡易透気試験の圧力分布結果を図-6 に、トレント法による透気試験の圧力分布結果を図-7 に示す。これより、コンクリートの密実性が内部の圧力分布

に与える影響を確認した結果、次の知見が得られた。

トレント法は、W/C=40%の条件では、負圧による空気の流れは見られず、深さ 250mm まで圧力はほぼ一定であった。W/C=50%の条件では、負圧の影響が全体に伝播し、空気が流出する状態となった。W/C=60%の条件では、負圧分布が奥行き 100mm 程度まで負圧が確認され、奥行き方向への透気性が低下する傾向が見られた。

簡易透気試験は、W/C=40%の条件では、トレント法と同様に負圧による空気の流れは見られず、深さ 250mm まで圧力はほぼ一定であった。水セメント比が小さい場合、透気性が低くなるため、通常は負圧が内部に伝わりにくいと考えられる。しかし、今回の実験では、真空が十分に確保された環境において、コンクリート内部の空隙構造にかかわらず、圧力が深さ方向に均等に伝播した可能性が示唆された。水セメント比が小さい場合、表層が密実であると、空隙が少ないため、表層部での圧力の損失が小さくなり、負圧が深部まで伝わりやすい可能性も考えられる。W/C=50%の条件では、負圧の伝播が 100mm まで確認された。これは、トレント法と比較し、測定時の負圧が小さいことから、トレント法のような圧力分布の傾向は見られなかったものと考えられる。W/C=60%の条件では、トレント法と同様に負圧分布が奥行き 100mm 程度までの負圧が確認された。水セメント比が大きい場合、表層の空隙量の増加により、負圧が表層部に集中し、奥行き方向に透気性が伝わりにくくなったものと考えられ、表層部の空隙構造が圧力分布に大きな影響を与えることを示しているものと推察される。

以上より、簡易透気試験は、W/C=50%及び W/C=60%の条件では、測定深さが 50mm までが支配的で、100mm までの透気性が評価されているものと考えられる。

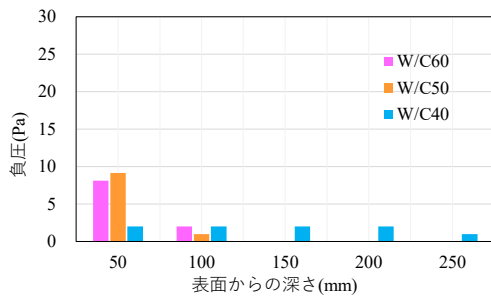


図-6 簡易透気試験の圧力分布

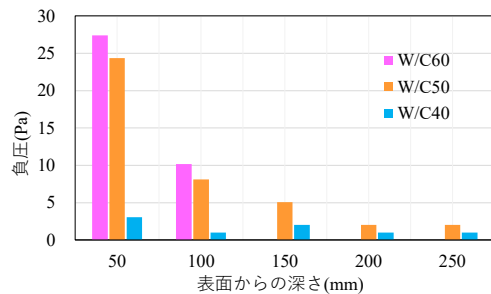


図-7 トレント法による透気試験の圧力分布

4. 型枠と剥離剤がコンクリートの表層の密実性に与える影響と簡易透気試験結果との関係

4.1 実験概要

(1) 使用材料及びコンクリートの配合

使用材料は、3.1 で使用した材料を基本とした。粗骨材については、2種類の砕石 (G1 粗骨材寸法 5~15mm, G2 粗骨材寸法 10~20mm) を混合し使用した。

コンクリートの配合を表-2 に示す。配合は水セメント比 60%の1つの配合とした。また、目標スランプ及び目標空気量は、それぞれ 10cm, 4.5%とした。

(2) 試験体製作及び養生方法

試験体寸法は、300mm×1200mm、厚さ 100mm とした。型枠下面の材料は、コンクリートパネル、合板、鉄板の3種類とした。コンクリートパネル (以後、コンパネ) は、耐水性のある塗装が施された表面が滑らかな仕上げのものを使用した。合板は、シナ合板を用いており、表面が比較的すべすべした面を使用した。コンパネ上への施工は、コンクリート打設前に図-8 に示すように、食品用ラップフィルム敷 (以後、ラップ敷)、グリース塗布、剥離剤2種類塗布の計4ケースした。また、合板及び鉄板上の施工は、図-9 に示すように、それぞれに剥離剤2種類塗布の計4ケースとした。

表-2 コンクリートの配合

| 水セメント比 W/C (%) | 細骨材率 s/a (%) | 単用量 (kg/m ³) | | | | | |
|----------------|--------------|--------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G1 | 粗骨材 G2 | 混和剤 AE |
| 60.0 | 45.6 | 180 | 300 | 789 | 397 | 594 | 0.012 |

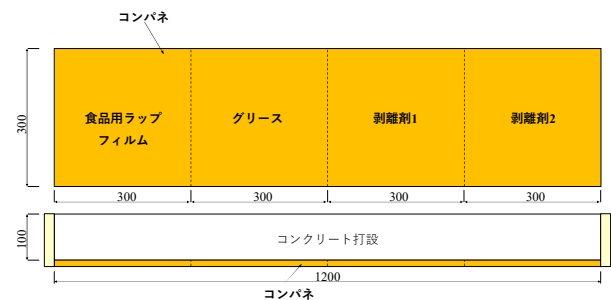


図-8 コンパネ上への剥離剤等の施工

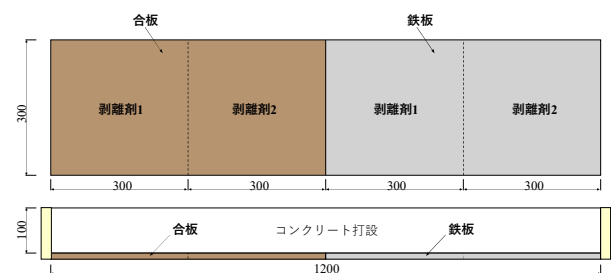


図-9 合板及び鉄板上への剥離剤等の施工

剥離剤は、剥離剤1が植物油由来合成エステルを主成

分とした材料を、剥離剤 2 がニュートラル潤滑油用基油（鉱油系）を主成分とした材料を使用した。グリースは、鉱物油を主成分とした材料を使用した。養生方法については、コンクリートの打込み後、材齢 7 日で脱型し、その後、温度 20℃、湿度 60%の室内に気中養生とした。また、材齢 43 日以降、試験体の表層水分率が 4.5%程度となるまで、室温 40℃の高温室（湿度 10%程度）に静置させた。

(3) 試験体の測定

試験体の測定は、下記の項目とし、図-10 に示すように、試験体を逆さにして試験体下面（型枠に接した面）で実施した。

- ・表層水分率測定
- ・簡易透気試験

コンクリート表層水分率測定は、試験体の脱型後、適宜測定を行い、表層水分率の変化を確認した。簡易透気試験は、材齢 14 日、21 日、28 日、54 日で実施した。

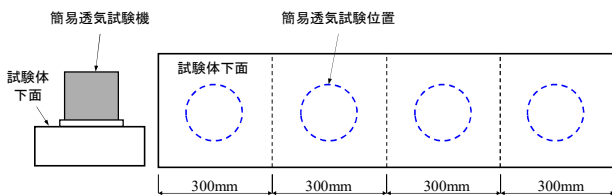


図-10 試験体の測定

4.2 実験結果

(1) 試験体下面の状況

コンパネ型枠の試験体について、試験体下面を撮影した画像及び高画質接写画像を図-11 に、合板及び鉄板型枠の試験体について、試験体下面を撮影した画像及び高画質接写画像を図-12 に示す。

コンパネ型枠の試験体では、ラップ敷の場合、表面はやや濃いグレー色を呈し、グリース及び剥離剤を塗布した場合、薄いグレー色であった。接写画像では、いずれの表面も平滑であったが、ラップ敷を除き、表面に気泡が確認された。特に、剥離剤 1（植物油）を塗布した場合には気泡が大きく、グリース及び剥離剤 2（鉱油）では気泡が小さい傾向にあった。

合板及び鉄板型枠の試験体について、合板に剥離剤を塗布した場合、表面はやや薄い茶色を呈し、鉄板に剥離剤を塗布した場合は薄いグレー色であった。接写画像では、鉄板に剥離剤を塗布した場合、表面にやや細かい気泡が見られるものの、全般に緻密で平滑な状態であった。

一方、合板に剥離剤を塗布した場合、表面は多孔質で粗面な状態となった。表面が粗面な状態となった原因として、剥離剤の塗布によって合板から樹液が溶け出し、表層のモルタル部分が硬化不良を起こした可能性が考えられる。その結果、この表層のモルタル部分がポーラスな状態となったものと推察される。

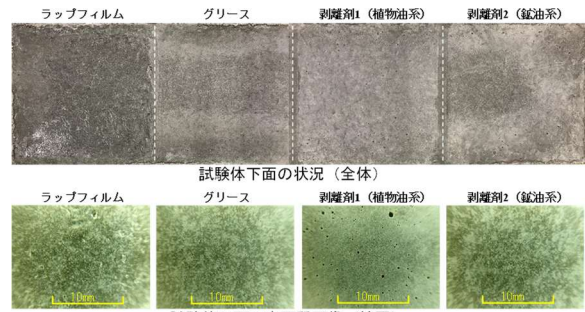


図-11 試験体下面の状況（型枠：コンパネ）

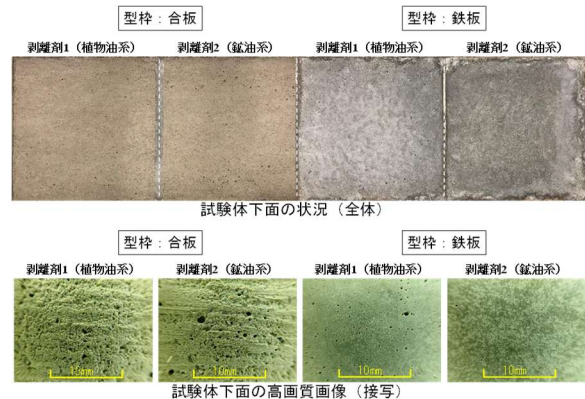


図-12 試験体下面の状況（型枠：合板及び鉄板）

(2) 表層水分率

コンパネ型枠の試験体の表層水分率の変化を図-13 に、合板及び鉄板型枠の試験体の表層水分率の変化を図-14 に示す。

コンパネ型枠の試験体では、材齢 7 日から材齢 43 日にかけて表層水分率が全般に緩やかに低下し、ラップ敷がグリース及び剥離剤 1、剥離剤 2 の塗布に比べて、やや大きな低下傾向を示した。試験体を室温 40℃の高温室（湿度 10%程度）に静置した影響から、材齢 54 日の表層水分率は概ね 4.5%となった。

一方、合板型枠の試験体では、剥離剤 1 及び剥離剤 2 を塗布した場合、脱型直後は約 7.0%であった表層水分率が翌日には約 5.0%まで急激に低下し、その後、材齢 43 日までほぼ横ばいの状態であった。また、室温 40℃の高温室（湿度 10%程度）に静置後の材齢 54 日の表層水分率は、いずれも 4.0%を下回った。

鉄板型枠の試験体では、剥離剤 1 塗布が、剥離剤 2 塗布よりもやや低い傾向があるが、合板型枠で見られるような脱型直後の水分率の大幅な低下は確認されなかった。

(3) 簡易透気試験

コンパネ型枠の試験体の簡易透気試験結果を図-15 に、合板及び鉄板型枠の試験体の簡易透気試験結果を図-16 に示す。コンパネ型枠の試験体では、材齢 14 日から材齢 28 日にかけて、簡易透気係数に剥離剤等の塗布による差は見られず、いずれも約 0.01 kPa/sec であった。

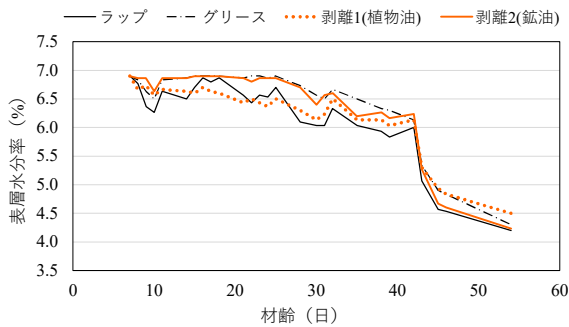


図-13 表層水分率 (型枠：コンパネ)

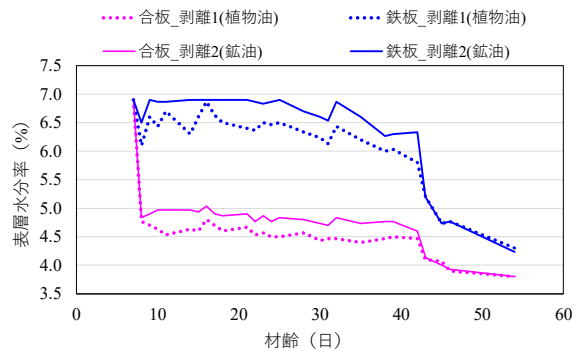


図-14 表層水分率 (型枠：合板及び鉄板)

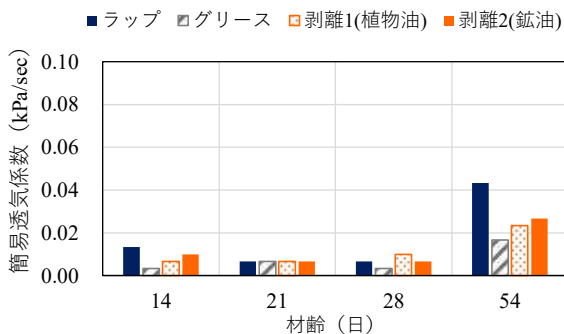


図-15 簡易透気試験結果 (型枠：コンパネ)

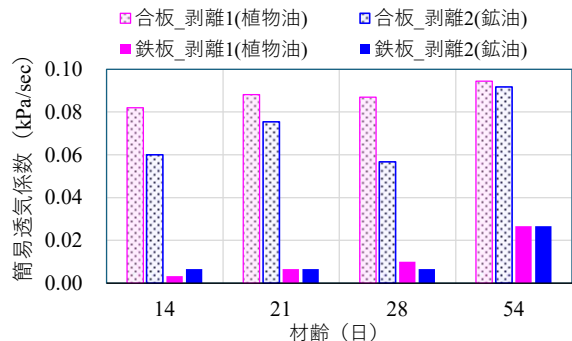


図-16 簡易透気試験結果 (型枠：合板及び鉄板)

材齢 54 日では水分率の低下に伴い、ラップ数が最も高く、次いで剥離剤 1 (鉱油)、剥離剤 2 (植物油)、グリースの順に低い値を示す傾向が見られた。

一方、合板型枠の試験体では、簡易透気係数が剥離剤 1 及び剥離剤 2 ともに、材齢 14 日から材齢 21 日にかけて増加し、材齢 28 日で減少したものの、材齢 54 日で増加した。また、合板に剥離剤を使用した場合、材齢 54 日で約 0.09 kPa/sec と、コンパネ型枠に剥離剤 1 使用時の約 4 倍であった。鉄板型枠の試験体では、材齢 28 日まで簡易透気係수에剥離剤 1、剥離剤 2 の間で顕著な差はなく、いずれも約 0.01 kPa/sec であった。

以上より、鉄板型枠とコンパネ型枠における簡易透気係数はほぼ同程度であり、合板型枠が最も低い結果となった。剥離剤の種類による簡易透気試験への影響は比較的小さいものと考えられる。

5. まとめ

本研究は、独自に開発した簡易透気試験機を用いて、その特性と適用性等について実験を行った。また、使用する型枠の種類及び塗布する剥離剤の種類によって、コンクリート表層の密実性に与える影響、簡易透気係数との関係について検証を行った。本実験の結果から、次のことが言える。

- (1) 測定材齢における簡易透気係数は、トレント法による透気係数と比較し高い相関を示し、簡易透気試験はトレント法による透気試験と整合性を有していた。
- (2) 透気試験において、W/C の違いによりコンクリート

内部の圧力分布が変化することを明らかにすることができた。また、表層水分率 4.5%、W/C=50%及び W/C=60%の条件では、測定深さは 50mm までが支配的であり、100mm までの深さの透気性が評価されているものと考えられる。

- (3) 使用する型枠と剥離剤の組合せによっては、コンクリート表層の密実性が確保される場合と低下する場合があることが確認された。また、このような表層の密実性を簡易透気試験機で評価することができた。

謝辞：本研究は、東北学院大学工学部環境建設工学科、斎藤俊希、菊池佳音と、測定にあたり国土交通省東北技術事務所のご協力を頂きました。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 社会資本の老朽化の現状と将来 (国土交通省 HP) : https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html (閲覧日：2024 年 12 月 2 日)
- 2) 海沼飛鳥, 武田三弘：簡易透気試験を用いたコンクリート表層評価における測定深さに関する研究, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, V-832, 2024.09
- 3) 渡辺晋也, 野島伸二, 藤原貴史, 谷倉泉：コンクリートの水分量が表層透気試験の透気係数及び測定深さにおよぼす研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp2001-2006, 2016