

論文 ポーラスコンクリートの透水試験及び空隙率試験方法に関する研究

坂口 稔*1・天野 佑樹*2・上原 匠*3・尾澤 敏行*4

要旨: 本研究は、ポーラスコンクリートの性能評価試験のうち、各研究機関で提案されている透水試験および空隙率試験に関して精度、簡便性、再現性の観点からの試験方法の整備と向上を目的とした。透水試験については、試験装置の素材を検討し、空隙率試験については、既存の試験方法より簡便な方法を検討した。その結果を基に、透水試験では透水円筒に用いる素材として鋼製型枠、熱収縮フィルム及び円筒ゴムの利用を提案した。空隙率試験では新たに注水法を提案した。更に、注水法と既存の空隙率試験を併せた複合法により、ポーラスコンクリートの内部構造（連続空隙と独立空隙の割合）が把握可能であることを示唆した。

キーワード: ポーラスコンクリート, 透水試験, 空隙率試験

1. はじめに

近年、環境負荷低減や、自然との共生という観点から、ポーラスコンクリートが注目を浴びている。これまでに、ポーラスコンクリートの性能把握を目的に、数多くの性能評価試験が考案されてきた。それを受けて、日本コンクリート工学協会のポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会により「ポーラスコンクリートの性能評価試験案（以下、JCI 試験案）」が1995年に発刊（2003年に改訂）され¹⁾、その後、多くの研究機関では、JCI 試験案に準拠して試験を行ってきた。

ポーラスコンクリートの重要な要求性能の一つとして、透水性能が挙げられ、透水性能の評価試験（透水試験）についても、他の性能評価試験と同様に、JCI 試験案として提案されている¹⁾。透水試験は、その特性上、供試体側面を拘束する素材や、その密着程度によって得られる結果に差異が生じることが考えられる。しかし、JCI 試験案は、試験の手順や試験装置の簡単な概略図などは記述されているものの、その試験装置の形状や素材などについては、「透水円筒は供試体に十分密着し、供試体との間に隙間を生じない円筒とする。」と定性的な表現にとどまり、詳細な規定がなされていない。それ故に、各研究機関による試験装置の形状や、素材等は異なると考えられるが、既往の研究に関しても、試験装置の詳細を言及している報告は少なく、試験や追試を実施する場合、

その再現性に疑問が残る。

そこで本研究では、ポーラスコンクリートの透水試験に関して、透水円筒に3種類の素材を用いて試験を行い、透水円筒の素材や、供試体側面への密着程度が透水係数に及ぼす影響を明らかにし、各素材を用いた透水試験の妥当性を検討するとともに、再現性についても検討した。

また、透水性能とともにポーラスコンクリートの重要な要求性能である空隙率に関しては、JCI 試験案に比べ、より簡便な空隙率試験方法を新たに提案し、JCI 試験案との比較によりその妥当性の検討を行った。更に、新提案の試験方法と既存の試験方法の組み合わせにより、ポーラスコンクリートの内部構造（連続空隙と独立空隙の割合）の把握も試みた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料および配合を表-1および表-2に示す。また、それぞれの配合における締固め方法を表-2に併せて示す。なお、細骨材モルタル容積比 (s/m) をダレが生じないように、配合により変動させた。

2.2 供試体作製方法

ポーラスコンクリートの練混ぜには、容量50ℓのパン型ミキサを用い、練混ぜ方法は、先ず練混ぜ水以外をミキサに投入し、30秒間空練りした後、練混ぜ水を投入し、

表-1 使用材料

材料	記号	種類および物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm ³)
細骨材	S	砕砂(表乾密度:2.67g/cm ³ , 吸水率:1.24%, 粗粒率:2.77)
粗骨材	G	7号砕石(JIS A 5001)(粒度範囲:5mm~2.5mm, 表乾密度:2.69g/cm ³ , 実積率:55.5%)
混和剤	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻 (正会員)

*2 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻

*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻 准教授 工博 (正会員)

*4 名古屋工業大学 技術部

表-2 配合表

配合名	W/C (%)	設計空隙率 (%)	s/m (%)	W	C	S	G	SP (C×%)	締固め方法
				(kg/m ³)					
a	25	15	25.0	98	391	195	1493	0.8	A
b		20		81	324	162			
c		25		65	258	129			
d		10	21.2	120	480	196			B
e		15	20.6	103	413	162			
f		20	19.7	87	347	129			

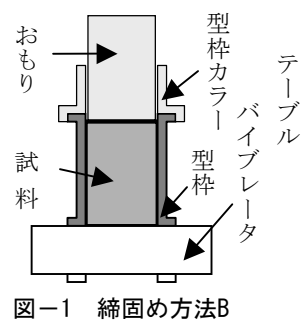


図-1 締固め方法B

更に 120 秒間練り混ぜた。ミキサから排出後、透明な円柱容器にコンクリートを投入し、後述する実際の締固めと同じ方法を用いて締固めを行い、ダレなど施工不良が生じていないことを目視で確認した後、供試体を作製した。締固めは、表-2 に示す記号 A は型枠バイブレータ（振動数 160Hz、振幅 0.8mm）で試料上面から 10 秒間振動を与え、2 層詰めで行い、記号 B は図-1 に示すような方法で、試料上に 12.5kg のおもりを置き、テーブルバイブレータ（回転能力 2800rpm、振幅 0.8mm）を用いて 10 秒間振動を与え、1 層詰めで行った。

2.3 透水試験方法

図-2 に透水試験における試験装置概略図と、各部位の素材を示す。試験手順は JCI 試験案（JCI 規準：JCI-SPO3-1）に準拠して実施した。なお、試験時の動水勾配は 0.3 以下とした。以下に、透水円筒の各素材および供試体への装着方法について示す。また、装着後の供試体の様子を、写真-1 に示す。

(1) 鋼製型枠

コンクリート供試体を鋼製型枠で作製し、コンクリートの硬化後、型枠を底面のみ外し、そのまま透水試験を実施した。ただし、供試体作製前に、試験中の漏水防止を目的に、鋼製型枠の継目に不水溶性のグリスを用いて確実に止水処理を行った。また、鋼製型枠上端に透水円筒カラーを設置する際にも、型枠と透水カラーとの隙間からの漏水防止を目的に、グリスでの止水処理を行った。ここで、この試験方法では、同一供試体による再現性の確認が困難であることから、他の試験方法との比較から、精度を含め検討を行った。

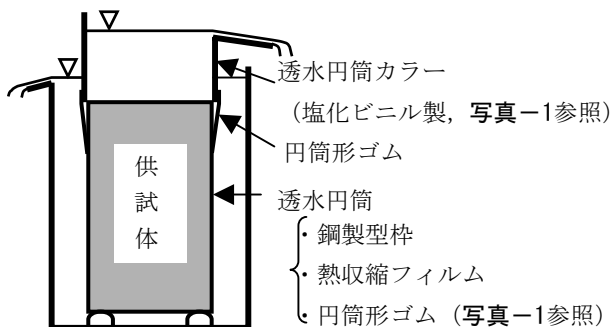


図-2 透水試験装置概略図

(2) 熱収縮フィルム

供試体側面の被覆素材として、90℃以上の高温にさらされると収縮する、厚さ 13.5×10⁻⁶m のポリオレフィン製熱収縮フィルムを用いた。供試体への装着方法は、熱収縮フィルムを長さ 1m に切り取り、供試体に巻きつけた後、90℃以上の熱風が出る工業用ドライヤーで、熱風を吹きかけフィルムを収縮させ、供試体側面を被覆した。この時、フィルムへの熱風の吹きつけが少なすぎると、フィルムが供試体をしっかり被覆しないので注意が必要である。また透水試験時において、被覆済み供試体と透水円筒カラーとの接続は、円筒形のゴムを用いて行った。

(3) 円筒ゴム

供試体の側面を、円筒形のゴムで被覆した状態で透水試験を実施した。また、透水試験時において被覆済み供試体と透水円筒カラーとの接続は、熱収縮フィルムを用いた時と同様に、円筒形のゴムを用いて行った。なお、試験材齢はそれぞれ、「(1)鋼製型枠」は 3 日、「(2)熱収縮フィルム」および「(3)円筒ゴム」は 4 日～39 日で実施した。

また、配合 d～f において、「(2)熱収縮フィルム」および「(3)円筒ゴム」を使用した試験を繰り返し実施することにより、透水円筒にこれらの素材を用いた透水試験の再現性について検討を行った。さらに、供試体を「(2)熱収縮フィルム」で被覆した状態で水中放置し、数日経過後に試験をおこなうことにより、水中での日数経過が透水係数に及ぼす影響についても検討した。

2.4 空隙率試験方法

作製した供試体についてそれぞれ、以下の 4 つの方法により空隙率を算出した。また、4 つの方法の計測時期を図-3 に示す。



(1) 鋼製型枠 (2) 熱収縮フィルム (3) 円筒ゴム

写真-1 透水試験時の供試体の様子

(1) 容積法 (JCI 試験案)

JCI 試験案 (同: JCI-SPO2-1) に準拠して実施した。容積法による全空隙率 A_t (%) は、供試体の水中質量 W_1 (g)、72 時間自然放置後の気中質量 W_2 (g)、供試体の容積 V_1 (cm³) および水の密度 ρ_w (g/cm³) (ただし、1.0 として計算した) を用いて、式(1)により算出した。

$$A_t = \left(1 - \frac{(W_2 - W_1) / \rho_w}{V_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

また、容積法による連続空隙率 A_c (%) は、供試体の水中質量 W_1 (g)、72 時間自然放置後に再び測定された水中質量 W_3 (g)、供試体の容積 V_1 (cm³) および水の密度 ρ_w (g/cm³) (ただし、1.0 として計算した) を用いて、式(2)により算出した。

$$A_c = A_t - \frac{(W_1 - W_3) / \rho_w}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

ここで、容積法における人為的誤差を少しでも小さくするために、人為的誤差が生じやすいと考えられる水中質量 W_1 計測時は、水中で供試体を転がし気泡を抜き水中質量を計測する操作を繰り返し行い、値が一定となった時点のものを採用した。また、JCI 試験案では、 W_1 計測後の自然放置期間を 24 時間としているが、今回用いた粗骨材は小粒径 (粒度: 5~2.5mm) であることから、24 時間では空隙中の水が完全に抜け切らないと考えられ、自然放置期間を 72 時間に延長し、統一条件で実施した。ただし、自然放置期間中は供試体表面が乾燥しないように、供試体を、その底面を除いて固く絞った布で覆うことにより乾燥防止を図った。

(2) 質量法 (JCI 試験案)

JCI 試験案 (同: JCI-SPO2-1) に準拠して実施した。質量法による全空隙率は A_t (%)、空気が全くないものとして計算したコンクリートの単位容積質量 T (kg/m³) および容器中の供試体の単位容積質量 W (kg/m³) を用いて、式(3)により算出した。

$$A_t = \frac{T - W}{T} \times 100 \quad (3)$$

なお、質量法から得られる空隙率は、全空隙率である。

(3) 打設時質量法 (中川案)

中川ら²⁾ は、質量法 (JCI 試験案) を応用し、供試体作成時に空隙率を測定する方法を提案している。今回、中川らが提案している方法と同原理である打設時質量法を JCI 試験案および新提案試験案との比較検討案として用いた。打設時質量法は型枠に投入した試料の質量と、締固め後の試料の容積および配合から各供試体の空隙率 (以下、打設時質量法空隙率) を計算により求めた。打設時質量法空隙率 A_m (%) は、供試体作製時に型枠に投入した試料の質量 W (kg)、空気が全くないものとして計算したコンクリートの単位容積質量 T (kg/m³) および

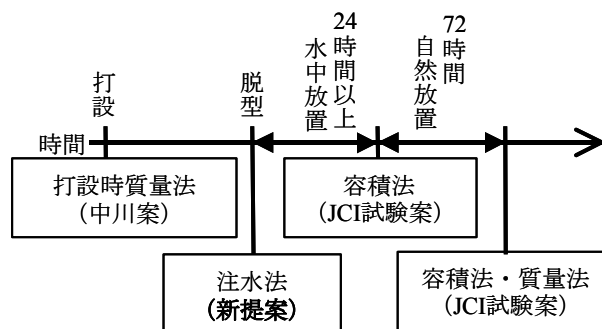


図-3 空隙率試験の時系列

供試体の容積 V (m³) を用いて、式(4)により算出した。

$$A_m = \left(1 - \frac{W/T}{V} \right) \times 100 \quad (4)$$

なお、打設時質量法から得られる空隙率は、全空隙率であると考えられる。

(4) 注水法 (新提案)

JCI 試験案と比較してより簡便な方法として、「注水法」を提案する。注水法は、コンクリート硬化後、脱型前の供試体に水を直接注入し、水の注入量から各供試体の空隙率 (以下、注水法空隙率) を求める方法である。注水法空隙率 A_w (%) は、注入水の質量 M_w (g)、水の密度 ρ_w (g/cm³) (ただし、1.0 として計算した) および供試体の容積 V (m³) を用いて、式(5)により算出した。

$$A_w = \frac{M_w / \rho_w}{V} \times 100 \quad (5)$$

なお、注水法から得られる空隙率は、連続空隙率であると考えられる。ここで、注水法は、JCI 試験案である「ポーラスコンクリートのフレッシュ時の空隙率試験 (案)」(同: JCI-SPO4) における、連続空隙率の計測と同様の原理に基づいている。ただし、注水法の試験対象が硬化後の供試体であることから、空気量測定器 (JIS A 1128 3.1) 内のフレッシュポーラスコンクリートを試験対象とする JCI 試験案と比較して注水法は、締固め方法の影響などの供試体作製方法による空隙率への影響を、より的確に判断できる試験方法であるといえる。

3. 実験結果および考察

3.1 透水試験方法

まず、図-4 および図-5 に、各配合の同一供試体を対象に、熱収縮フィルムおよび円筒ゴム使用時の透水試験を複数回繰り返し行い、各供試体から得られた透水係数の組み合わせ (m 回目と n 回目 ($m \neq n$)) の全通りを示す。検証のため、 $y = (1 \pm 0.05)x$ の領域を表す線 (以下、 $\pm 5\%$ 線) を図中に併せて示した。なお、試験回数は、同一供試体同一被覆素材につき、原則 2 回としたが、再現性の確認のため、任意の供試体に対し、最大 10 回試験を実施した。

図-4 および図-5 より、熱収縮フィルムおよび円筒ゴム使用時の両方において、±5%線の領域付近に纏まっていることから、高い再現性を持つことが確認された。ここで、図-4において、±5%の領域から大きく外れた点がいくつか見られるが、図中の白抜きの△で表された配合eの供試体は全て同一の供試体から得られた点である。この供試体は繰り返し透水試験を実施するまでに、11日間（材齢9日～20日）水中放置されており、供試体内部に、空隙孔の目詰まり等の不良が起きたことによって、±5%線の領域から大きく外れたと推察される。よって、水中養生期間が透水係数に影響することが推察される。また、この供試体は今後の考察対象から外すこととした。

次に、図-6 に熱収縮フィルムと鋼製型枠使用時の透水係数の関係を、図-7 に熱収縮フィルムと円筒ゴム使用時の透水係数の関係を示す。

図-6 より、鋼製型枠使用時と比較して熱収縮フィルム使用時は、透水係数が小さな値をとる傾向があることが明らかとなった。この理由として、せき板効果の影響が考えられ、せき板効果については、既往の研究におい

ても透水係数と深く関係していることが報告されている²⁾。従って、試験結果において、鋼製型枠使用時は供試体側面のせき板効果による影響が生じるが、熱収縮フィルム使用時は、熱収縮フィルムが供試体側面の骨材に密着する際、骨材の曲面に沿ってフィルムが張り付くため、空隙部（骨材間）はめり込むこととなり、せき板効果の影響が低減されることが明らかとなった。また、図-7より、円筒ゴム使用時の透水係数は熱収縮フィルム使用時よりも小さな値をとり、円筒ゴムを使用することによっても、供試体側面のせき板効果の影響を低減でき、その程度は熱収縮フィルムよりも大きいことが明らかとなった。図-6 および図-7 より、それぞれの試験値が同じ値を示す（破線上に重なる）ことは無いものの「鋼製型枠>熱収縮フィルム>円筒ゴム」の傾向を示すとともに、高い相関性を持つことが確認できる。また、それぞれの近似直線の傾きの差異も小さい結果となった。したがって、この3つの素材を透水円筒として用いた場合に得られる透水係数は、真値からかけ離れた値ではなく、性能評価の目安となりえると判断し、妥当であると言えよう。

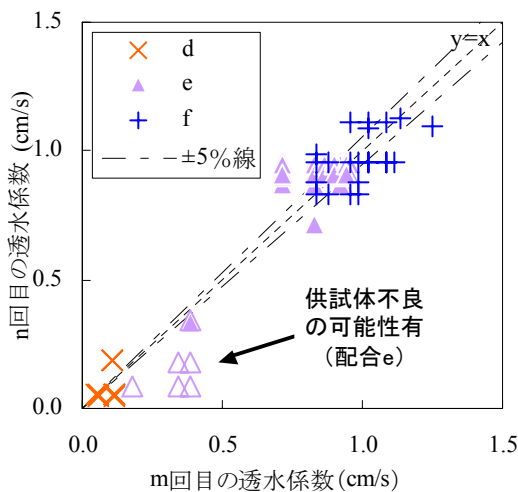


図-4 熱収縮フィルム使用時の透水試験の再現性

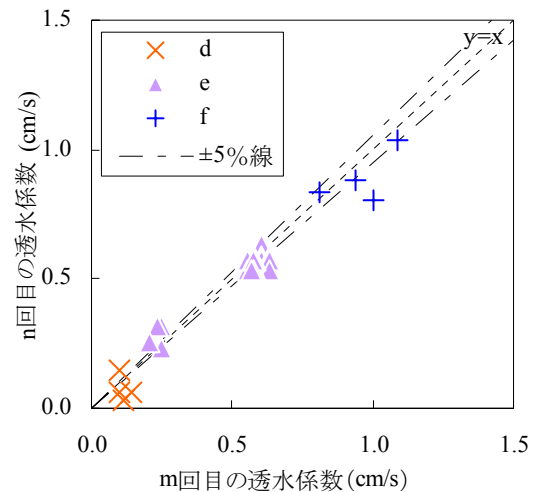


図-5 円筒ゴム使用時の透水試験の再現性

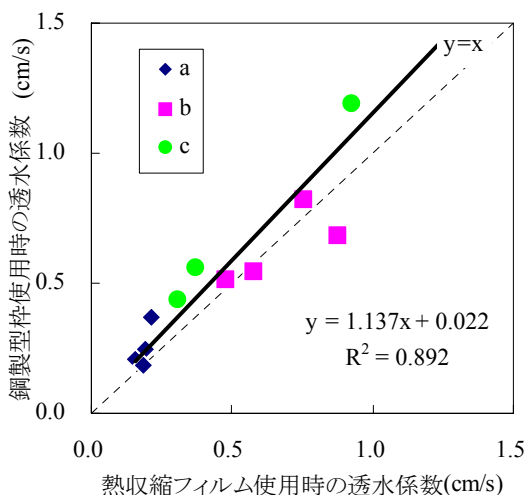


図-6 鋼製型枠および熱収縮フィルム使用時の透水係数

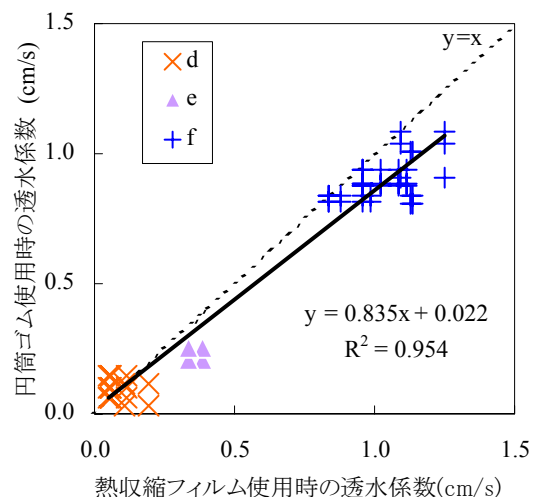


図-7 熱収縮フィルムと円筒ゴムの透水係数

ここで、図-8 に熱収縮フィルム使用時の透水係数について、熱収縮フィルム装着後に水中放置（水温 20℃一定、静水中）する日数経過の違いによる透水係数の変動を示す。これより、熱収縮フィルム装着後に水中放置することにより、透水係数は小さくなる傾向があることが明らかとなった。この理由としては、フィルム装着時の熱風による乾燥とその後の水中放置による供試体の膨張に起因した、熱収縮フィルムの供試体拘束力の変化や、供試体側面の目詰まりなどが推察でき、これは熱収縮フィルムを使用する上での注意点と言える。ここで、透水円筒として円筒ゴムを使用する場合、同一の円筒ゴムで試験回数を数多く重ねると、円筒ゴムの弾性が失われ、供試体拘束力が減少し、透水係数への影響が懸念されることから、今後もさらに試験を行い、検証が必要である。

以上の結果および考察から、透水円筒として鋼製型枠、熱収縮フィルムおよび円筒ゴムを用いることは問題ないと考えられる。さらに、鋼製型枠使用時は、特別な加工が必要ないという利点が挙げられ、熱収縮フィルムおよび円筒ゴムを使用した場合には、高い再現性を持ち、また供試体側面のせき板効果の影響が低減できることが明らかとなった。ただし、用いる素材それぞれについて、注意すべき点があることも明らかとなった。

3.2 空隙率試験方法

図-9～図-11 にそれぞれの試験より得られた空隙率の関係を示す。なお、本研究では新たに提案する試験法の妥当性を検討するために、現在、広く一般的に用いられている容積法および質量法は、十分に妥当性が確認されているものとし、容積法および質量法による空隙率を新試験方法による空隙率の比較対象とした。また、試験方法の特性上、打設時質量法からは全空隙率、注水法からは連続空隙率しか得られないため、比較検証は、全空隙率（容積法、質量法）および連続空隙率（容積法）で個々に行った。

図-9 より、打設時質量法空隙率と質量法空隙率を比較すると、中川ら²⁾の結果同様、ほぼ同様の値を示し、また、極めて高い相関を示した。これより、打設時質量

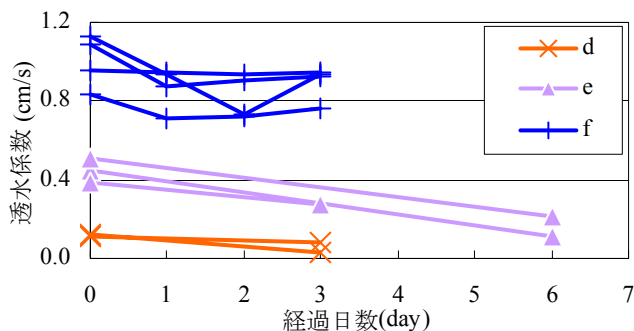


図-8 熱収縮フィルム装着後の水中放置期間の違いによる透水係数の変動

法は質量法と同様の扱いが可能であると考えられる。ここで、打設時質量法空隙率と質量法空隙率の差は、打設時質量法空隙率測定時（供試体作製時）と比較して、質量法空隙率測定時の供試体は、図-3 に示す試験材齢の差に起因する水中養生中におけるモルタルや骨材の養生

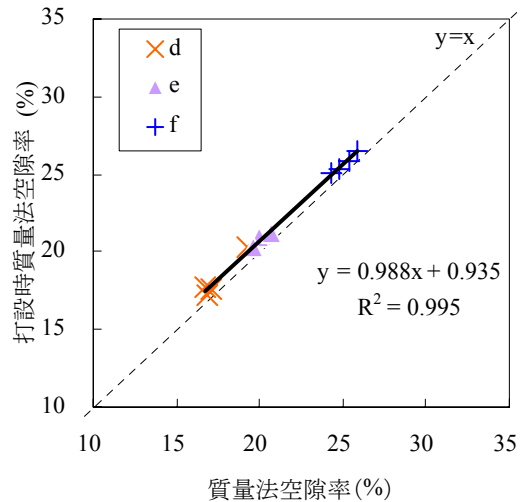


図-9 打設時質量法空隙率と質量法空隙率

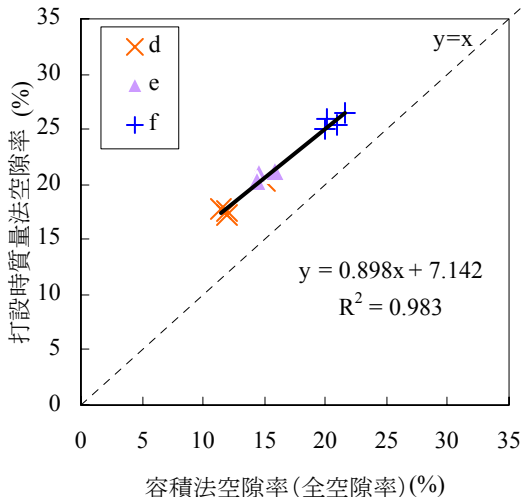


図-10 容積法空隙率（全空隙率）と打設時質量法空隙率

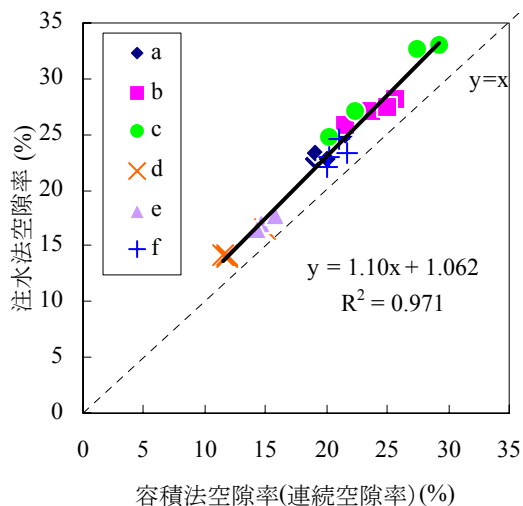


図-11 容積法空隙率（連続空隙率）と注水法空隙率

水の吸水により、供試体が飽和状態であることから生じる差異であると推察できる。

図-10 および図-11 より、打設時質量法空隙率および注水法空隙率は、容積法空隙率と比較して、5%程度大きな値を示す傾向があるものの、それぞれ容積法空隙率と非常に高い相関関係があり、打設時質量および注水法はともに、容積法と同等の再現性があることが明らかとなった。ただし、打設時質量法に関しては、その前提として、実験対象の配合設計が、モルタルのダレ等の発生しない健全な配合であることを、前述した透明な円柱容器で確認することなどで明らかにしておくことが必須条件として挙げられる。

ここでさらに、打設時質量法空隙率は全空隙率、注水法空隙率は連続空隙率であると考えられることから、この2法を組み合わせることにより、供試体の内部構造が把握可能であると推察でき、その比較検討を試みた。

図-12 に打設時質量法と注水法による空隙率の関係を示す。図-12 に見られる、2法の差は、独立空隙率と推察できる。また、過去の事例では全空隙率と連続空隙率との差（独立空隙率）は3%程度をとる¹⁾とあり、この推察は現実的であると言え、ポーラスコンクリートの内部構造（連続空隙と独立空隙の割合）を把握することが可能であることが明らかとなった。ただし、より詳細な内部構造の把握には、更なる検討が必要である。

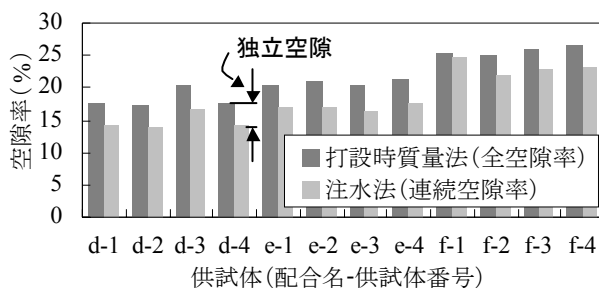


図-12 打設時質量法と注水法による空隙率

4. まとめ

- (1) 透水試験において、透水円筒の素材や供試体への密着程度は、供試体側面のせき板効果の影響を増減させ、透水係数に影響を及ぼすことが明らかとなった。
- (2) 透水円筒に鋼製型枠、熱収縮フィルム及び円筒ゴムを用いることは問題ないことが明らかとなり、熱収縮フィルム及び円筒ゴムを用いる場合、透水試験は高い再現性を持つことも明らかとなった。
- (3) 空隙率試験において、中川らの提案した打設時質量法及び本稿で提案した注水法は、その試験方法として再現性の観点から有効であることが明らかとなった。
- (4) 打設時質量法と注水法を複合することにより、ポーラスコンクリートの内部構造（連続空隙と独立空隙の割合）が把握できることが明らかとなった。

ここで、今回検討した透水円筒の素材及び空隙率試験方法の要点を表-3 にまとめる。なお、空隙率試験における打設時質量法と注水法を複合した方法を複合法として図中に示した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書，2003.5
- 2) 中川武志ほか：空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法，日本建築学会構造系論文集，vol.73，No.629，pp.1043～1050，2008.7
- 3) 越 健ほか：せき板効果を取り除くことによるポーラスコンクリートの透水試験方法の改善，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp157～162，2001

表-3 各種試験まとめ

*1:新提案,*2:JCI試験案,*3:他

	検討素材／試験方法	利点	注意点
透水試験	鋼製型枠 ^{*1}	・特殊な加工を必要としない。	・事前に型枠に止水処理が必要である。 ・せき板効果の影響が大きい。
	熱収縮フィルム ^{*1}	・せき板効果の低減が可能である。 ・高い再現性が確保可能である。	・装着後、水中放置することにより、透水係数が変動する。
	円筒ゴム ^{*1}	・せき板効果の低減が可能である。 ・高い再現性が確保可能である。 ・供試体への装着が容易である。	・同一円筒ゴムで試験回数を重ねると、供試体拘束力が低下する恐れがある。
空隙率試験	打設時質量法 ^{*3}	・打設時に空隙率が把握できる。 ・計測が容易である。	・事前の予備実験(ダレの有無)が重要である。 ・得られる空隙率は全空隙率である。
	複合法		
	注水法 ^{*1}	・計測が容易である。	・事前に型枠に止水処理が必要である。 ・得られる空隙率は連続空隙率である。
	容積法 ^{*2}	・全および連続空隙率が得られる。	・水中質量計測時に誤差が生じやすい。
	質量法 ^{*2}	・計測が容易である。	・得られる空隙率は全空隙率である。