

論文 トレント試験における透気深さの実験的検討

寺西 浩司*1・葛山 育海*2

要旨: 近年, コンクリートの表層品質を評価するために, 透気試験の一種であるトレント試験が幅広く使用されている。しかし, この試験の実施時に表示される透気深さは透気係数から理論的に計算される値であり, 実際の透気範囲は必ずしも明確ではない。そこで, 本研究では, トレント試験時に実際に透気の及ぶ範囲を圧力センサにより調べた。その結果, 透気深さの表示値と実際の透気深さは必ずしも一致しないことがわかった。また, その原因としては, 例えば, 測定時のコンクリート中における空気の流れが必ずしもトレント法の想定通りになっていない可能性などが考えられる。

キーワード: 透気試験, 透気係数, トレント法, 圧力センサ, 空隙率, 表層品質

1. はじめに

近年, コンクリートの表層品質を評価して, RC 構造物の耐久性を推定する動きが広まっている。また, 表層品質の評価指標の1つとして, 空気の通りやすさ, すなわち透気性が挙げられる。この透気性を評価する方法としては, トレント試験¹⁾やドリル削孔法²⁾をはじめとした様々な試験方法がこれまでに提案され³⁾, 普及しつつある。特にトレント試験は, 試験片を採取しなくても既設コンクリートの表層品質を簡便に取得できるため, 幅広く使用されている。しかし, トレント試験の実施時に表示される透気深さは, 透気係数の測定値から理論的に計算される値であり, 実際にコンクリート表層からどの程度の深さまでが測定対象となっているのかは必ずしも明確になっていない。表層品質試験の目的が, 炭酸ガスや塩化物イオンなどの劣化因子の侵入に対する表層コンクリートの抵抗性の評価であり, 中性化や塩害が最終的に鉄筋腐食に帰する劣化であることを考慮すると, 表層品質試験に本来要求される測定範囲はかぶりコンクリート部分である。これらのことを踏まえると, トレント試験の実際の測定深さを明らかにすることは, 試験結果が本質的に何を評価しているのかを明確にするうえで重要と考えられる。

そこで, 本研究では, 山崎ら⁴⁾に倣って, 表層付近に圧力センサを設置したコンクリート試験体に対してトレント試験を実施し, コンクリート内部の圧力分布を計測することで, 試験時に実際に透気が及ぶ範囲を検討した。また, その結果とトレント試験で表示される透気深さの値に差異が生じる理由について考察を試みた。

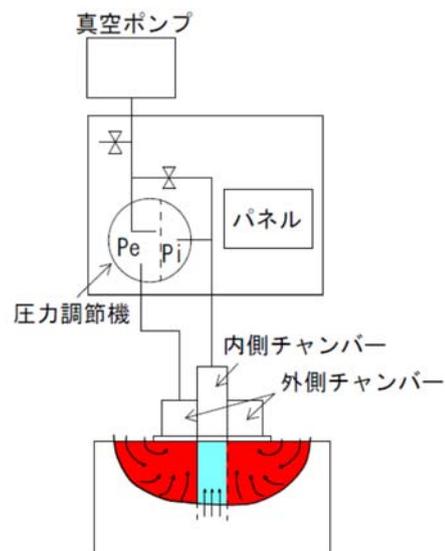
2. トレント試験の手順

図-1 に, トレント試験装置のシステム構成を示す。

また, トレント試験の流れは以下の通りである。

- ①試験開始とともに, 内側・外側のどちらのチャンバ内も真空ポンプにより 3kPa まで急速に減圧される。
- ②その後, 内側チャンバは, 真空ポンプから切り離され, 直下のコンクリート内部から空気を吸い上げることで徐々にチャンバ内が復圧していく。その際, 外側チャンバ内は, 内側チャンバ内との圧力のバランスを真空ポンプにより取り続ける。
- ③試験開始から 60 秒経過後に, この時点での内側チャンバ内の圧力を基準として圧力上昇量の計測を開始する。
- ④下記のいずれかの試験終了の判断基準に達したら, 試験中の圧力上昇量と試験時間を基に透気係数 kT および透気深さ L を算出する。

[判断基準 1] 試験中の内側チャンバ内の圧力上昇量が 2kPa (=20mbar) になる。



*1 名城大学 理工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*2 名城大学 理工学研究科建築学専攻 大学院生(正会員)

[判断基準2] 試験開始から 720 秒経過する。

3. 実験概要

3.1 実験要因とその水準

表-1 に、実験要因とその水準を示す。本実験では、コンクリート組織の緻密度を変化させるために水セメント比を 35, 50 および 65% の 3 種類とした。また、試験体の初期水中養生期間を 1, 3 および 6 日の 3 水準に、その後の気中養生期間を 1~364 日の範囲で 10 水準に変化させた。

3.2 試験体および試験手順

表-2 および 3 に、試験体コンクリートの使用材料および調合を示す。また、図-2 に試験体の概要を示す。試験体は、1 辺 150mm の立方体とした。また、試験体の側面のうちの型枠（メタルフォーム）に接していた面を試験面とし、それ以外の面はエポキシ樹脂でシールした。

試験体には、試験面の表層から 50mm の深さまで 10mm ごとにステンレスパイプ（外形φ4mm）を予め埋め込んでおいた。そして、トレント試験時に、ステンレスパイプの先端に設けたφ0.5mm×高さ 10mm の空洞内の圧力を圧力センサにより連続的に計測し、内側チャンバー直下のコンクリート内部の圧力変化の分布を調べた。なお、試験は 10 分間の間隔をおいて 3 回ずつ行い、その平均を各種の測定値とした。

3.3 実験日程

図-3 に実験日程を示す。試験体は打込みの翌日に脱型し、その後、水中養生期間の水準に従って標準養生した。そして、試験体を恒温恒湿室内（温度 20℃、湿度 60% RH）に存置して気中養生し、図-3 中に示した材齢においてトレント試験を行った。

4. 実験結果

4.1 トレント試験の結果

図-4 および 5 に、トレント試験により得られた透気係数 kT および透気深さ L と気中養生期間の関係を示す（水セメント比 50%、水中養生期間 3 日のケースは、試

表-1 実験要因とその水準

要因	水準
水セメント比 (%)	35, 50, 65
水中養生期間 (日)	1, 3, 6
気中養生期間 (日)	1, 3, 7, 14, 28, 56, 91, 182, 273, 364

表-2 使用材料

材料	記号	仕様
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	揖斐川産川砂 (表乾密度 2.63 g/cm ³ , 吸水率 1.62%, 粗粒率 2.61)
粗骨材	G	春日井産砕石 2005 (表乾密度 2.68 g/cm ³ , 吸水率 0.40%, 実積率 58.6%)
AE 減水剤 (高性能タイプ)	A1	有機酸系誘導体および芳香族高分子化合物
高性能 AE 減水剤	A2	ポリカルボン酸コポリマー

表-3 コンクリートの調合および試験結果

水セメント比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	絶対容積 (l/m ³)				混和剤 (g/m ³)		試験値		
				W	C	S	G	A1	A2	スランブ (cm)	空気量 (%)	91 日 圧縮強度 (N/mm ²)
35	60*	4.5	49.3	185	167	262	340	—	3330	59*	4.5	89.3
50	18	4.5	45.2	185	117	312	340	1480	—	20	6.0	41.9
65	18	4.5	52.6	185	90	339	340	2240	—	20	5.9	30.6

*スランブフロー (cm)

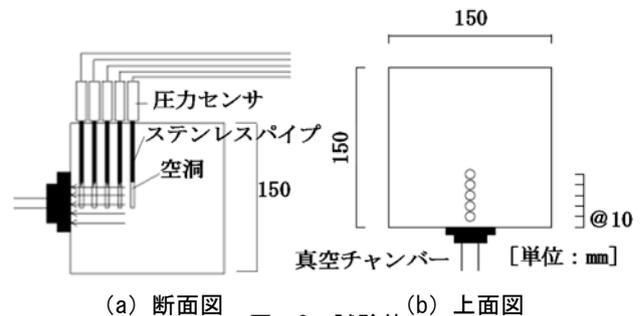


図-2 試験体

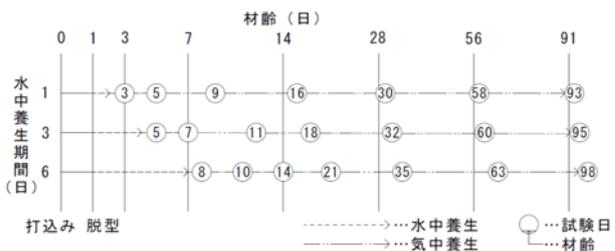


図-3 実験日程

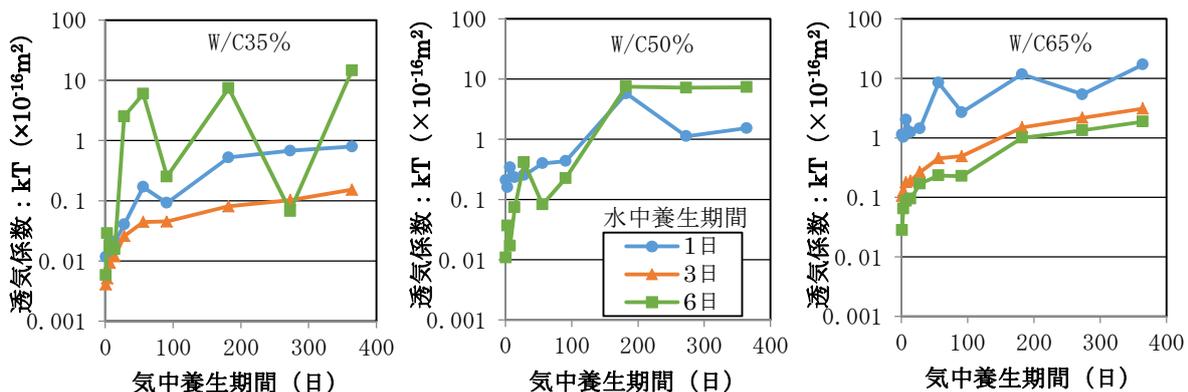


図-4 透気係数と気中養生期間の関係

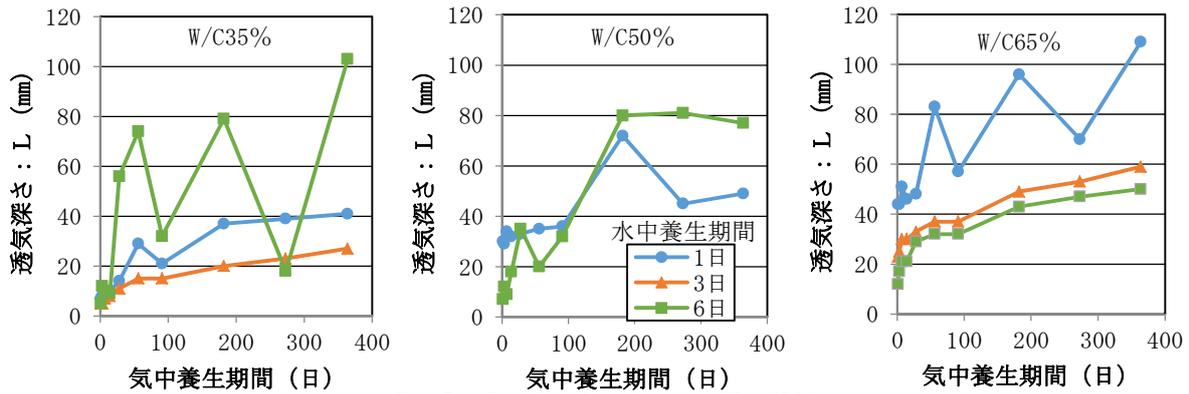


図-5 透気深さと気中養生期間の関係

験面に若干の不陸が存在し、測定に不具合が生じたため結果なし)。図中の凡例はすべての水セメント比の図に共通するものである（以降の図も同様の形式で表示する）。透気係数は、水セメント比 35%、水中養生期間 6 日のケースで、測定結果全体から見て異常に大きくて特異な結果となったが、そのほかは、水セメント比が高いほど、水中養生期間が短いほど、また、気中養生期間が長いほど大きくなる傾向となった。これは、コンクリート表層の組織がポーラスになっていることが原因と考えられる。また、透気深さも透気係数とほぼ同様の傾向であり、透気深さの個々の測定値（3 回の平均値）の変動係数は、実験全体の平均で 10%であった。

なお、本実験で別途測定した試験体の表面含水率は、気中養生 3 日まで 6~7%程度であり、その後 4%前後に収束した。コンクリートの含水率が透気係数などの測定値に対して大きな影響を及ぼすことは周知の事実であり、本実験の結果はこの影響を包含したものと見える。

4.2 コンクリート内部の圧力の計測結果

(1) コンクリート内部の圧力の経時変化

図-6 の左図に、コンクリート内部の圧力 P_c の経時変化の一例を示す。同図より、トレント試験を開始し、チャンパー内を真空引きし（経過時間 60 秒まで）、さらに内側チャンパー内が復圧する過程（この例では経過時間 720 秒まで）にかけて、コンクリート内部の圧力が徐々に低下していく様子がわかる。また、コンクリートの表層ほど圧力が低くなっており、この例では、深さ 10mm の圧力は真空 ($P_c=0\text{kPa}$) 近くまで低下している。

(2) コンクリート内部の圧力と気中養生期間の関係

図-7 に、コンクリート内部の圧力 P_c と気中養生期間の関係を示す。ここで、同図には、2 章に示した [判断基準 2] の試験終了時間である経過時間 720 秒時の値を示した。また、本実験では、深さ 10mm の圧力が大気圧に近いままで、深さ 20mm の圧力よりも大幅に高くなっているケースが散見された。この理由は定かではないが、理論上あり得ない状況と考えられるので、測定に何らかの問題があったと判断し、このようなケースでは、深さ

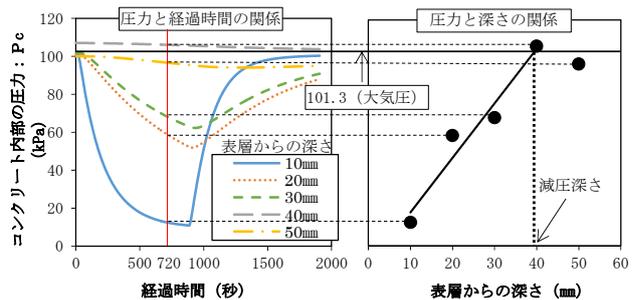


図-6 コンクリート内部の圧力と経過時間および深さの関係 (W/C65%, 水中養生期間 6 日, 気中養生期間 91 日)

10mm のデータを図から取り除いてある。なお、圧力の個々の計測値（3 回の平均値）は、本実験では、変動係数が平均的に 85%程度とばらつきの大きいものであった。

図-7 によると、計測値に大きなばらつきが見られる。また、全体としては、気中養生期間による変化に明確な傾向は見られないが、水セメント比が高く、水中養生期間の短いケースでは、深さ 20mm 以上の位置において、気中養生期間が長くなるほど、各深さの圧力が徐々に低くなる傾向となっている。すなわち、コンクリート内部のより深い位置まで減圧されている。これは、乾燥によりコンクリート内部の組織が表層から徐々にポーラスになっていくことが原因と考えられる。

(3) 減圧深さ

図-6 の右図に、コンクリート内部の圧力 P_c と表層からの深さの関係の一例を示す（経過時間 720 秒時）。同図によると、両者は概ね直線関係にある。また、このことは、トレント法においてコンクリート内部の深さ方向の圧力分布を線形と仮定している¹⁾こととも一致する。そこで、本研究では、コンクリート内部の圧力と深さの関係に対して回帰直線を描き（ただし、圧力が大気圧と見なせるデータは除いた）、その回帰直線の圧力が大気圧 ($P_c=101.3\text{kPa}$) となるときの深さを減圧深さとし、トレント試験における実際の透気範囲を評価した。

図-8 に、減圧深さと気中養生期間の関係を示す。本実験では、圧力の計測値のばらつきが大きかったことや、深さ 10mm の妥当な計測値が得られないケースがあった

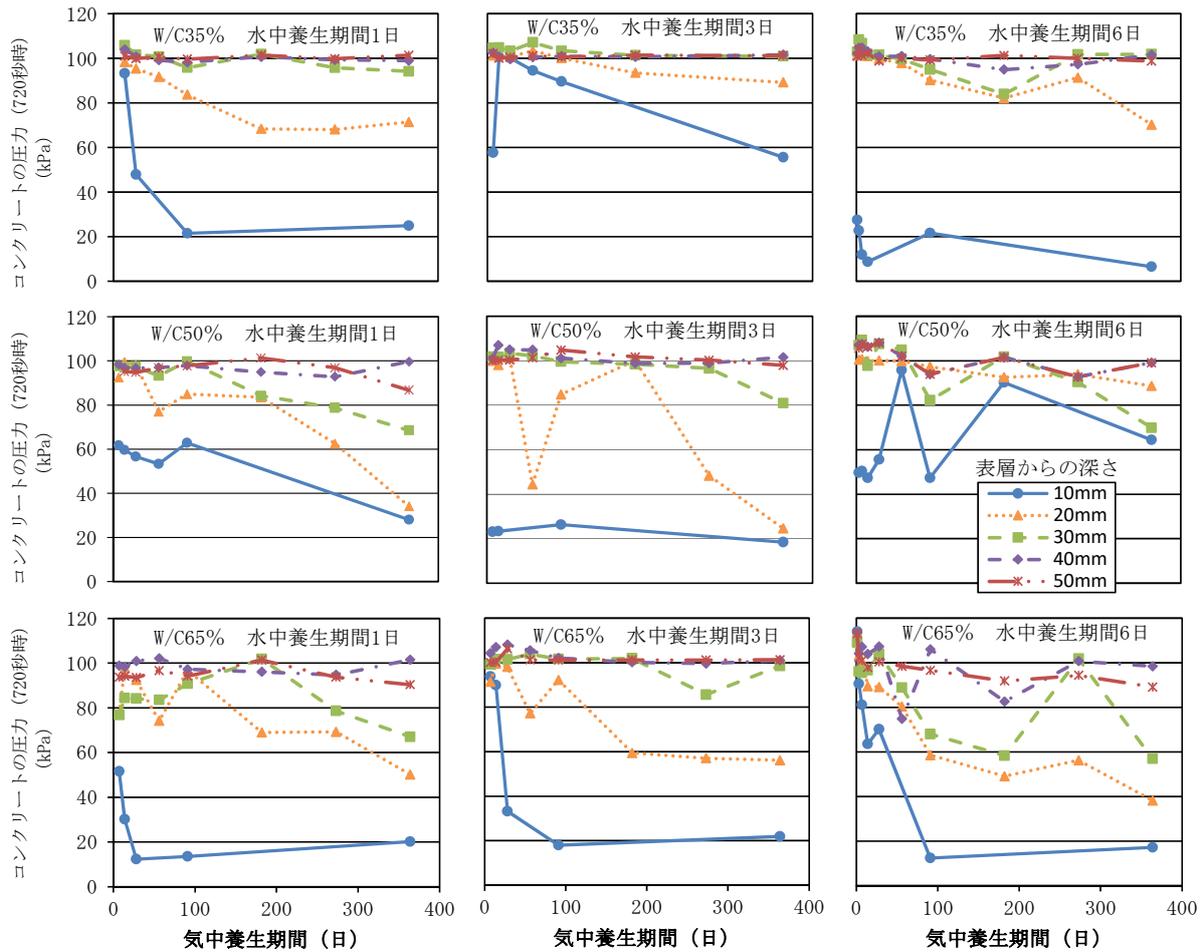


図-7 コンクリート内部の圧力と気中養生期間の関係（経過時間 720 秒時）

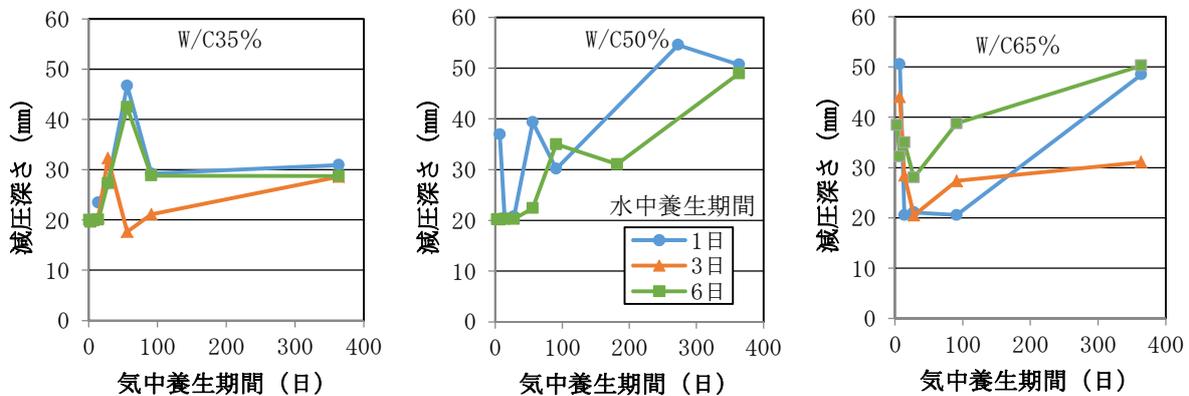


図-8 減圧深さと気中養生期間の関係

ことなどから、減圧深さを計算できないケースも多かった。また、上記の方法で減圧深さを計算すると、深さ 10mm でコンクリート中の圧力が低下し、深さ 20mm で圧力が大気圧であった場合、回帰直線は必ず深さ 20mm で大気圧と交差することになるため、減圧深さは全て 20mm と算定されることになる。すなわち、本研究の方法では、これより小さい減圧深さを検知することはできない。図-8 から、減圧深さは、概ね 50mm の範囲までに分布していることがわかる。

5. 透気深さと減圧深さの関係

トレント試験では、透気深さを、試験時間が経過し、内側チャンバーが空気を吸い上げた分だけ増大すると仮定して計算するため、この試験で表示される透気深さ L は、結果的に試験終了時間に依存する。そこで、本研究では、透気試験が終了した時間（すなわち、透気深さが算定された時間）における減圧深さを図-6 に示した方法で求め、透気深さ L との関係を検討することとした。なお、本実験では、トレント試験時に、透気係数 kT と透気深さ L の測定値しか取得していなかったため、まず、これらの値から試験終了時間を算出した。

5.1 試験終了時間の計算

Torrent¹⁾によると、透気係数 kT および透気深さ L はそれぞれ次式により計算される。

$$kT=4 \left(\frac{V_c (dP_i/dt)}{A (P_a^2 - P_i^2)} \right)^2 \frac{\mu P_a}{\varepsilon} \int_{t_0}^t \left[1 - \left(\frac{P_i}{P_a} \right)^2 \right] dt \quad (1)$$

$$L = 1000 \left\{ \frac{kT \cdot P_a}{\varepsilon \mu} \int_{t_0}^t \left[1 - \left(\frac{P_i}{P_a} \right)^2 \right] dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここに、 L ：透気深さ (mm)、 kT ：透気係数 (m^2)、 V_c ：内側チャンバーと接続要素(ホース等)の容積 (m^3)、 A ：仮定された栓流の断面積 (m^2)、 ε ：コンクリートの空隙率 (m^3/m^3)、 P_i ：内側チャンバーの圧力 (Pa)、 P_a ：大気圧 (Pa)。

ここで、実際の試験では、内側チャンバー内における $2kPa (=20mbar)$ というごく小さな圧力変動を計測するため、 $P_i \ll P_a$ と見なすことができる。このことから、透気係数 kT および透気深さ L の実用的な算出式はそれぞれ次式のようになる。

$$kT = \left(\frac{V_c}{A} \right)^2 \frac{\mu P_a}{2\varepsilon} \left(\frac{\ln \frac{P_a + \Delta P_{ieff}(t_f)}{P_a - \Delta P_{ieff}(t_f)}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}} \right)^2 \quad (3)$$

$$L = 1000 \left\{ \frac{2kT \cdot P_a \cdot t_f}{\varepsilon \mu} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここに、 ΔP_{ieff} ：試験終了時の内側チャンバー内の圧力上昇量 (Pa)、 t_f ：試験終了時間 (s)、 t_0 ：試験開始時間 (s)。

ここで、式 (3) および (4) に、試験条件から決定される値として $V_c = 1.65 \times 10^{-4} (m^3)$ 、 $A = 1.963 \times 10^{-3} (m^2)$ 、 $\mu = 2.0 \times 10^{-5} (N \cdot s/m^2)$ 、 $P_a = 101.3 (\times 10^3 Pa)$ 、 $\varepsilon = 0.15 (m^3/m^3)$ 、 $\Delta P_{ieff} = 2 (\times 10^3 Pa)$ 、 $t_0 = 60 (s)$ を入力し、 t_f と L の関係を導くと次式が得られる。

$$t_f = \left(\frac{7.741L}{L - 22.139} \right)^2 \quad (5)$$

結局、試験終了時間 t_f と透気深さ L の関係は図-9 に示すようになり、 $t_f \leq 720 (s)$ の場合 (すなわち、2章に示した [判断基準 1] により試験を終了する場合)、透気深さ L は試験終了時間 t_f により決定されることになる。

また、式 (5) に $t_f = 720 (s)$ を代入すると $L = 31.1 (mm)$ となる。すなわち、透気深さ L が $31.1mm$ より小さい場合は [判断基準 2] により、 $31.1mm$ 以上の場合は [判断基準 1] により試験が終了することになる。

5.2 減圧深さと透気深さの関係

式 (5) により各ケースにおける試験終了時間 t_f を求め、その経過時間における減圧深さを計算した。図-10 に、

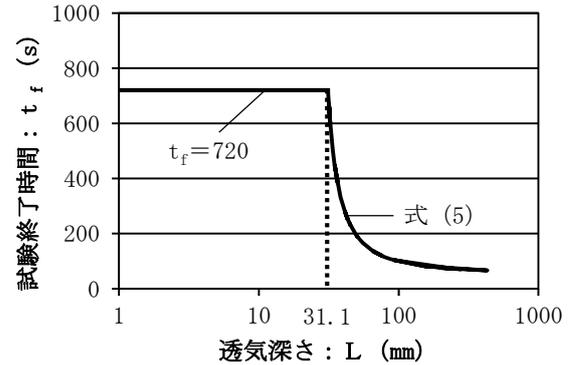


図-9 試験終了時間と透気深さの関係

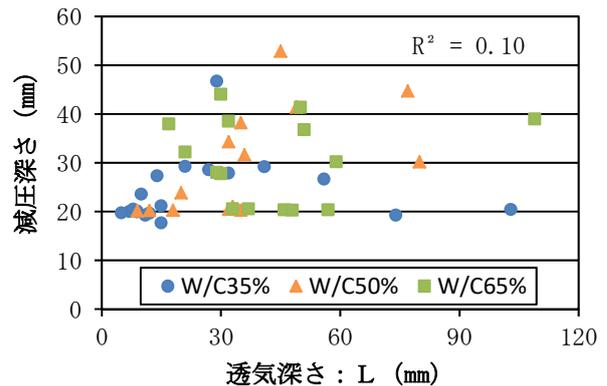


図-10 減圧深さと透気深さの関係

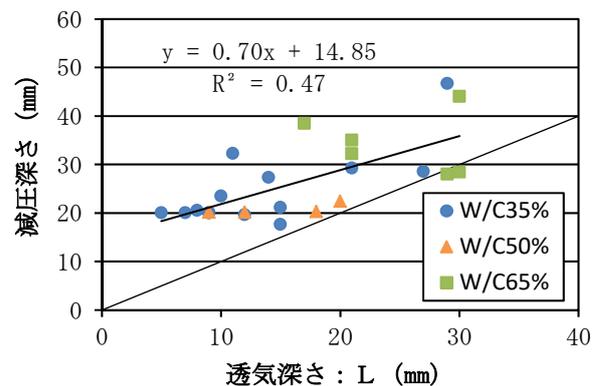


図-11 減圧深さと透気深さの関係 (L < 31.1 のケースのみ)

その結果と透気深さ L の関係を示す。同図によると、透気深さが大きくても減圧深さが小さいケースが多く見られ、両者の間に相関は見られない。そこで、透気深さ L が $31.1mm$ より小さい場合 (すなわち、[判断基準 2] に従って経過時間 720 秒で試験を終了した場合) の測定結果のみを抽出して減圧深さとの関係を調べた。その結果を図-11 に示す。同図によると、寄与率は 0.47 となっており、両者の間には図-10 の場合よりも高い相関が見られる。また、4.3 (3) に上述した理由により、減圧深さが $10 \sim 20mm$ であったものは本研究では全て $20mm$ と算定されているので、本来は、図中の回帰直線はより急勾配であり、減圧深さと透気深さの対応関係はさらに良好である可能性が高い。

以上のことを踏まえると、透気深さが $30mm$ 程度までの小さな値であった場合、透気深さの表示値は、測定時

に実際に透気が及ぶ深さと概ね一致するが、測定時に表示される透気深さの値が大きい場合は、実際には、透気はその深さまで及んでいない可能性が高いものと考えられる。なお、これと同様な傾向は、試験面の対面からドリルで供試体を削孔する深さを変化させてトレント試験の透気領域を検討した早川らの実験⁵⁾によっても得られている。

5.3 空隙率に関する考察

上述のように、透気深さの表示値が大きい場合に透気深さと減圧深さが一致しない原因として、式(4)により透気深さ L を計算する際に、コンクリートの空隙率 ϵ を 0.15 一定と仮定していることの影響が考えられる。そこで、参考までに、式(4)の L が減圧深さの値となるような空隙率 ϵ の値を計算した。図-12に、空隙率 ϵ の計算結果と透気深さ L の関係を示す。同図より、両者は、透気深さ 20mm の辺りに屈曲点をもつバイリニアの関係で表されることがわかる。また、バイリニアの第2勾配の領域では、空隙率がトレント試験の仮定値である 0.15 を超えて現実的にはあり得ないような大きな値になっている。

このような状況となる理由は定かではないが、考え得る原因としては、例えば、試験を行う際に、内側チャンパー直下のコンクリート中の空気の流れがトレント法の想定通りの栓流にはならず、周りから空気を取り込んでしまっている可能性などが挙げられる。また、温品ら⁶⁾は、試験面のごく表層に脆弱な層が存在すると、表層のチャンパー周りから空気が回り込み、透気係数が極端に大きく測定されることを報告しており、このようなことも、見かけの空隙率の上昇に影響を及ぼす可能性があるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、トレント試験時のコンクリート内部の圧力分布を圧力センサにより計測し、実際に透気が及ぶ範囲を検討した。また、その結果とトレント試験で表示される透気深さの値に差異が生じる理由について考察を試みた。本研究により得られた知見は、以下の通りである。

(1) トレント試験により得られる透気係数および透気深さは、水セメント比が高いほど、水中養生期間が短いほど、また、気中養生期間が長いほど大きくなる傾向となる。

(2) トレント試験時に実際に透気の及ぶ深さは概ね 50mm の範囲までである。また、水セメント比が高く、水中養生期間が短い場合、透気が及ぶ深さは気中養生期間が長いほど大きくなる傾向となる。

(3) 透気深さが 30mm 程度までの小さな値であった場合、その値は、測定時に実際に透気の及ぶ深さと概ね一

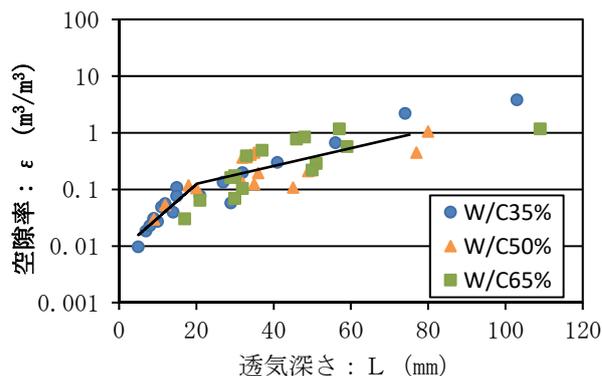


図-12 空隙率と透気深さの関係

致する。しかし、透気深さの表示値が大きい場合は、実際には、透気はその深さまで及んでいない可能性が高い。

(4) 上記の原因としては、例えば、透気深さを計算する際にコンクリートの空隙率を一定値と仮定していることの影響や、測定時のコンクリート中における空気の流れがトレント法の想定通りの栓流になっていない可能性などが考えられる。

謝辞 本研究の実施に際し、コンクリート内部の圧力測定方法について、株式会社浅沼組の山崎順二氏、株式会社八洋コンサルタントの田中章夫氏にご教示頂いた。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Torrent, R.: A Two-chamber Vacuum Cell for Measuring the Coefficient of Permeability to Air of the Concrete Cover on Site, *Materials & Structures*, Vol.25, No.150, pp.358-365, 1992.7
- 2) 野中英, 湯浅昇: ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.79, No.700, pp.689-696, 2014.6
- 3) 今本啓一: コンクリートの表層透気試験方法の現状と課題, *コンクリート工学*, Vol.53, No.7, pp.606-613, 2015.7
- 4) 山崎順二, 下澤和幸, 田中章夫, 今本啓一, 湯浅昇: 各種透気試験装置の検定方法と透気領域(その3.透気領域の検討), *日本建築学会学術講演梗概集*, A-1, pp.589-590, 2018.9
- 5) 早川健司, 水上翔太, 加藤佳孝: 表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, E2, Vol.68, No.4, pp.385-398, 2012.9
- 6) 温品達也, 坂田昇, 渡邊賢三, 柳井修司: 表層透気試験で得られたコンクリート表層品質の判定結果に関する一考察, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.34, No.1, pp.1738-1743, 2012.7