

7.3 巻末資料－3 非破壊試験による表層品質の確認方法

コンクリートの養生の効果を把握する手段として、非破壊試験を実施することが望ましい。

7.3.1 非破壊試験の現状

- (1) 国土交通省東北地方整備局「コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）（トンネル覆工コンクリート編）令和5年3月」において、コンクリートの養生の効果を把握する手法として、緻密性を適切に評価できる「非破壊試験」を行うことが望ましいとされており、代表的な手法として「表層透気試験」「表面吸水試験」が紹介されている。コンクリートの「圧縮強度」と耐久性に影響を与える表層の「緻密性」とは必ずしも相関が高くないためである。特に施工の影響を受けるため、完成した構造物を用いてチェックを行うことが望ましい。
- (2) これらの非破壊試験の開発は日進月歩であり、上記の手引き発行後も各種の手法が開発されており、製品として販売され入手可能な手法は増えてきている。また、学協会において規格化が進められている手法もあるが、その手法を用いた結果の統一的な評価基準が定められているわけではない。
- (3) 現時点では、購入した製品を用いて簡単に確定的な表面品質の判定ができる状態にはなっておらず、測定位置、測定回数、評価可能なコンクリートの材齢や含水状態などを留意しなければならないため、それらの知識を有するコンサルタントや大学等の研究機関に相談をすることが望まれる。ここでは、製品化の有無や規格化の有無にかかわらず、関連する学協会において、コンクリートの緻密性や養生の効果を判定することを目的として発表されている手法を紹介する。
- (4) これらの目的のための非破壊試験には、大きく分けて、気体の動きを計測する透気試験、水の動きを測定する吸水・透水試験がある。それ以外に、弾性波や超音波を用いて強度・硬度を推定する手法もあり、それが表層緻密性と関連があるという結果が示された手法もある。

7.3.2 表層品質を確認するための非破壊試験

(1) 透気試験

- 1) コンクリート構造物原位置での透気試験装置には、大きく分けてダブルチャンバー法、シングルチャンバー法、ドリル削孔法およびその他の手法が提案されている。
- 2) 国内規格として、日本非破壊検査協会にて「表層透気性試験方法研究委員会」ならびに本手法に関する「NDIS原案作成委員会」が活動を進めており、透気試験の有効性および国内規格化に向けた活動を行っている。

表 7.3.1 国内で販売・研究されている主な透気試験法

| 区分 | ダブルチャンバー法 | | シングルチャンバー法 | ドリル削孔法 | その他 (四国で研究されている手法) |
|--------------|--|---|--|--|--|
| | 減圧法 | 加圧法 | | | |
| | (Torrent法) | (WAPP法) | | | |
| 市販品 | <ul style="list-style-type: none"> ・ダブルチャンバー式減圧透気試験機「パーマトールAC」 販売元：エフティーエス(株)評価項目：透気係数 | <ul style="list-style-type: none"> ・ダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機「WAPP」(透気透水両用) 販売元：ユニセンス(株)評価項目：透気速度 | — | <ul style="list-style-type: none"> ・「ポロスコープ」(透気透水両用) 販売元：(株)マルイ評価項目：透気時間 | — |
| 研究・提案されている手法 | — | — | <ul style="list-style-type: none"> ・シングルチャンバー法 (東京理科大学) 評価項目：透気速度 | <ul style="list-style-type: none"> ・Figg-Poroscope法評価項目：透気時間 ・削孔法 (日本大学) 評価項目：透気速度 | <ul style="list-style-type: none"> ・シール法に基づく表層透気試験 (愛媛大学) 評価項目：透気速度 ・シリンダを用いた簡易透気試験 (徳島大学) 評価項目：透気時間 |

(2) 吸水・透水試験

- 1) コンクリート構造物原位置での媒体に水を用いた試験方法には、圧力をほとんど掛けない吸水試験と圧力をかけた透水試験の両方が存在する。
- 2) 国内規格として、日本非破壊検査協会にて表記を検討する委員会が活動を進めており、表層品質を確認するための吸水・透水試験の有効性および国内規格化に向けた活動を行っている。

表 7.3.2 国内で販売・研究されている主な吸水・透水試験法

| 区分 | 吸水試験 | 加圧透水試験 | ドリル削孔透水試験 | 散水試験 |
|----------------------|--|--|---|---|
| 市販品 | <ul style="list-style-type: none"> ・表面吸水試験 「SWAT」販売元： (株)丸東製作所評価項目： 吸水速度 | <ul style="list-style-type: none"> ・ダブルチャンバー式加 圧透水・透気試験機 「WAPP」 (透気透水両用) 販売 元： ユニセンス(株)評価項 目： 表層透水係数 ・「GWT」販売元： (株)マルイ評価項目： 透水量 | <ul style="list-style-type: none"> ・「ボロスコープ」(透 気・透水両用) 販売元： (株)マルイ評価項目： 透水時間 | — |
| 研究・提案されてい る 手法 | <ul style="list-style-type: none"> ・表面吸水試験 (九州産業大学) 評価項目： 吸水速度 | — | <ul style="list-style-type: none"> ・削孔法 (日本大学) 評価項目： 透水時間 | <ul style="list-style-type: none"> ・散水試験A法、B法 (鉄道総合技術研究所) 評価項目：散水回数 ・流下試験 (東京大学生産技術研究 所) 評価項目： 流下長さ |

(3) 接触時間試験方法

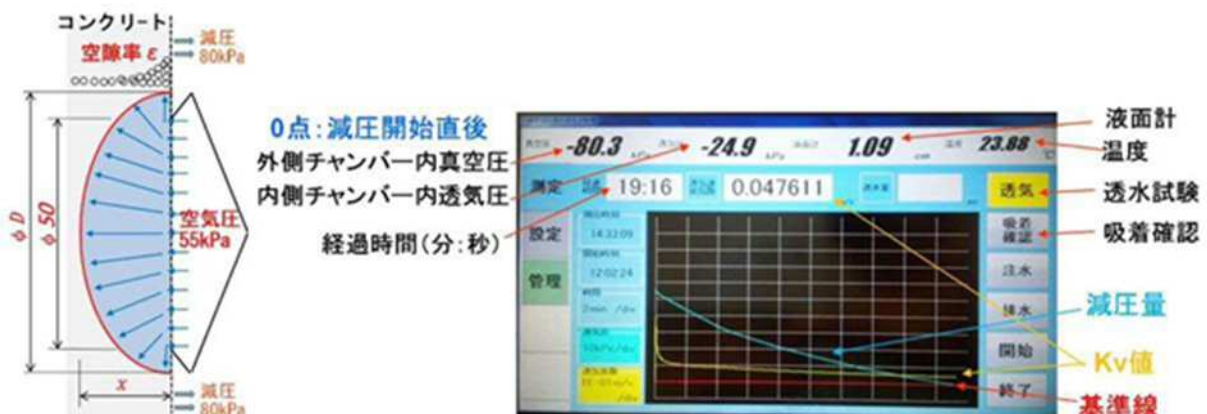
- 1) 日本非破壊検査協会規格としてNDIS3434-2コンクリートの非破壊試験—打撃試験方法—第2部：接触時間方法がある。その中で、附属書A(参考)としてコンクリートの硬さ比較試験方法が記載されており、コンクリート表面を打撃した際の接触時間がコンクリートの表層緻密性と関連があることが解説p. 24-27に示されているが、現時点では市販されている装置はなく、研究者が提案する手法に留まっている。

7.3.3 非破壊試験の手法

- (1) 以降に、各種の非破壊試験の手法について概要を示す。なお、「表層透気試験」および「表面吸水試験」の概要については、本編「5.3養生による緻密性の向上」中に記載している。

(2) ダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機 (WAPP) による加圧透気試験^{49) 50)}

- 1) ダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機 (WAPP) による加圧透気試験法は、ダブルチャンバー式減圧透気試験機 (Torrent) 法の問題点を解決した改良試験法であり、コンクリート表面に特殊シール材を貼り付け後に外側チャンバー内の減圧 (80kPa) によってダブルチャンバー部を吸着させて、内側チャンバー内を P_1 (標準55kPa) に加圧後、気圧が P_2 (最小値0kPa) に低下するまでの時間 T (最大値20分) から、透気速度 K_v 値 (kPa/s) を $K_v=(P_1-P_2)/T$ 式によって算出する手法である (試験原理は下図、試験装置は後掲のWAPPによる加圧透水試験を参照)。
- 2) Torrent法の場合、以下の問題点がある。
 - ・空気の流れは、内部からの一次元流れと仮定して透気係数を定義しており、実際の空気の流れと異なる。コンクリート品質は均質でどの箇所でも空隙率 $\varepsilon = 0.15$ と仮定しているが、品質変動や乾燥により ε と透気係数が変動する。
 - ・コンクリート表面は凹凸があるため空気漏れし、測定不能や透気係数の変動が生じる。これに対しWAPP法の場合、以下のようにそれぞれ改良が図られている。また、WAPP法は、同一箇所において「加圧透気試験法の透水速度 K_v 値」と「加圧透水試験法の表層透水係数 P 値」とを、1台で測定することが可能な唯一の完全非破壊検査法である。
 - ・空気の流れは、実際通り外部からの三次元流れとして透気速度を定義しているため、実際の空気の流れに近似して測定される。
 - ・コンクリート品質は、不均質で空隙率 ε が変動しても、透気速度には ε の測定を含んでおり、透気性を正しく評価が可能である。
 - ・凹凸 (小穴) があるコンクリート表面であっても、特殊シール材を貼り付け (厚さ0.7mm、小穴は内部に充填) 後、ダブルチャンバーを設置して測定し、試験完了後シール材を綺麗に剥がすため、常に測定可能である。
- 3) WAPPの表示部は、下図に示すように、減圧量と K_v 値の変化とが時系列で表示されるため、勾配の変化を観察することによってコンクリートの均質性 (空隙率の変動) を判定可能である。



WAPP 法による加圧透気 WAPP 法による加圧透気試験 (減圧量と K_v 値の変化を、時系列表示) 試験の試験原理

図7.3.1 ダブルチャンバー式加圧透気試験 (WAPP) の概要

(3) ダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機 (WAPP) による加圧透水試験^{51) 52)}

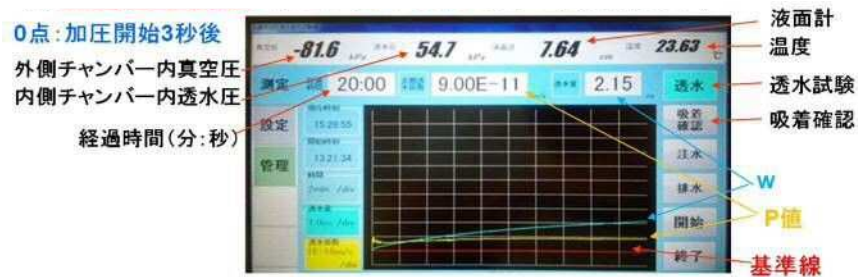
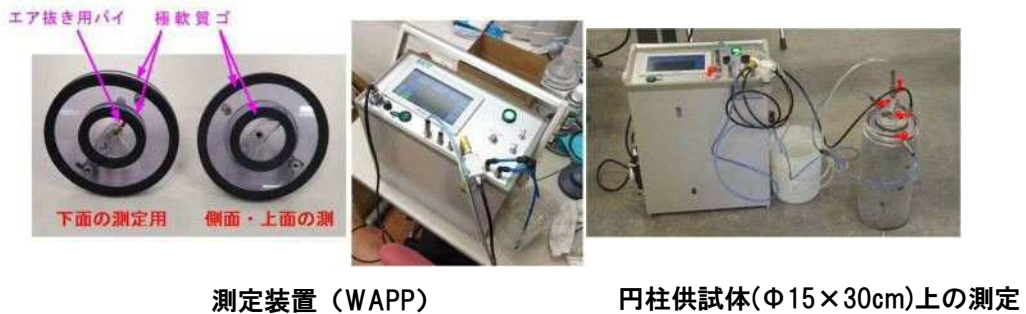
1) ダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機 (WAPP) による加圧透水試験は、コンクリート表面に特殊シール材を貼り付け後に外側チャンバー内の減圧 (80kPa) によってダブルチャンバー部を吸着させて、内側チャンバー内を満水後 P_u (標準55kPa) に加圧することによって試験を開始し、水圧 P_u を保った状態における透水時間 t (標準20分) の透水量 w から、表層透水係数 P 値 ($\times 10^{-10}$ m/s) を次式より求める非破壊検査法である。

2)

$$P = \frac{\rho}{2tA^2P_u} \times \frac{G}{w^2} \times 10^{-4}$$

ここで、 w : 透水量 (cc、加圧開始 3 秒後 0 点)、 G : 重力加速度 (m/sec²)、
 ρ : 水の単位容積質量 (g/cm³)、 t : 透水時間 (sec、標準 20 分)、 A :
 内側チャンバーの断面積 (cm²)、 P_u : 透水水圧 (kPa、標準 55kPa)

3) WAPPの表示部は、透水量 w と P 値の変化とが系列で表示されるため、勾配の変化を観察することによってコンクリートの水密性を判定可能である。また、 P 値によって水密性・耐久性を判定することが可能である。



WAPP 法による加圧透水試験 (w と P 値の変化を、時系列表示)

図 7.3.2 ダブルチャンバー式加圧透水試験 (WAPP) の概要

表 7.3.3 水密性・耐久性から規定される最大水セメント比 W/C に対応した表層透水係数 P 値の判定
(NETISS 登録番号 QS-170036-A)

| 土木学会コンクリート標準示方書で、最大水セメント比が規定されるコンクリートの種類 | 最大水セメント比 W/C | 最大表層透水係数 P 値 ($\times 10^{-10} \text{m/s}$) ※ |
|---|----------------|--|
| 海洋コンクリート（一般の現場施工の場合で、環境区分が海上大気中・飛沫帯および干満帯。工場製品の場合で、環境区分が飛沫帯および干満帯）、化学的侵食抵抗性（凍結防止剤を用いる場合）、耐凍害性（凍結融解試験における相対動弾性係数90%） | 45%以下 | 0.27以下 |
| 一般的な環境下における耐久性を満足する通常のコンクリート構造物（柱、はり、スラブ）、海洋コンクリート（一般の現場施工の場合で、環境区分が海中。工場製品の場合で、環境区分が海上大気中・海中）、化学的侵食抵抗性（ SO_4 として0.2%以上の硫酸塩を含む土や水に接する場合）、一般の水中コンクリート | 50%以下 | 0.45以下 |
| 一般的な環境下における耐久性を満足する通常のコンクリート構造物（橋脚）、 <u>水密性を有するコンクリート</u> 、耐凍害性（凍結融解試験における相対動弾性係数85%） | <u>55%以下</u> | <u>0.73以下</u> |
| 耐凍害性（凍結融解試験における相対動弾性係数70%） | 60%以下 | 1.20以下 |
| 耐凍害性（凍結融解試験における相対動弾性係数60%） | 65%以下 | 1.97以下 |

※土木学会コンクリート標準示方書の透水係数 Kk (m/s) の規定式

$\log Kk = 4.3W/C - 12.5$ および水密性・耐久性を満足する最大水セメント比 W/C の規定値から計算

(4) ドリル削孔法 (ポロスコープ) 53) 54) 55) 56)

- 1) ポロスコープを使用した透気および透水試験は、コンクリート表面を電動式振動ドリルにて削孔し、その削孔内部を用いて透気試験や透水試験を行うものである。透気試験では削孔内の空気を減圧後、所定の圧力に回復するまでの時間を測定する。透水試験では削孔内を水で満たした後、コンクリートに0.01ml透水するのにかかる時間を測定する。
- 2) ポロスコープを使用した透気・透水試験評価では、下記の表で透気時間または算出されたコンクリートの空気排除率 (AER: AirExclusionRating)、透水時間から算出された吸水率 (WAR: WaterAbsorptionRate) について、暫定表層評価を行うものである。暫定評価を示す表を合わせて示す。
- 3)

$$AER = \frac{t}{\left(\frac{55V}{50} - V\right) \left(\frac{52.5}{100}\right)} = 19.05 \frac{t}{V}$$

式(1)

$$AER = 0.247 t$$

ただし t =測定時間(s)、 V =体積(ml)=77.1ml (定められたドリル径および深さの場合) 」

$$WAR = 100t(\text{secs/ml})$$

式(2) t =測定時間(s)

表 7.3.4 ポロスコープ法によるコンクリートの品質評価値

| Concrete Category | Protective Quality | Air | Permeability | Water |
|-------------------|--------------------|----------|-------------------|--|
| | | Time (s) | AER* Value (s/ml) | Absorption Rate 10 ³ (sec/ml) |
| 0 | Poor | <30 | <8 | <3 |
| 1 | Not Very Good | 30-100 | 8-25 | 3-10 |
| 2 | Fair | 100-300 | 25-75 | 10-30 |
| 3 | Good | 300-1000 | 75-250 | 30-100 |
| 4 | Excellent | >1000 | >250 | >100 |

*Air Exclusion Rating

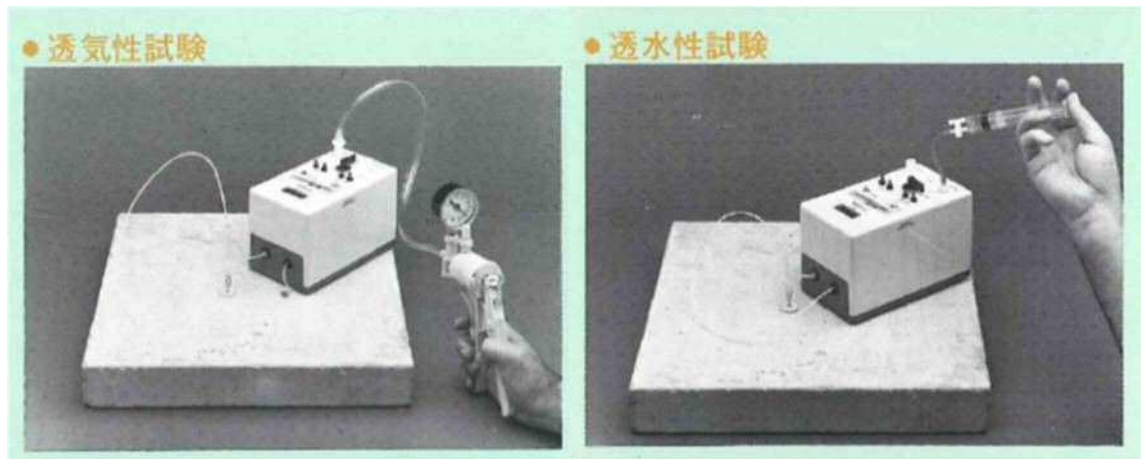


図 7.3.3 計測の状況

(5) シリンダを用いた簡易的な表層透気試験^{57) 58)}

- 1) シリンダを用いた簡易透気試験方法は、コンクリート表面に配管パテ等で設置したシリンダの吸引によってコンクリート表層を真空状態にし、一定時間経過後、シリンダ内部に流入した空気量によって表層の透気性について定性的に算出する手法である。
- 2) 測定結果はコンクリートの含水率に影響を受けるため、含水計でコンクリートの含水率を計測し、5.5%以下であることを確認したうえで計測を行う必要がある。また、測定は材令28日程度以降で行うことが望ましい。ただし、材令が十分に経過した場合でも、夏期では屋外とトンネル坑内の温度差により水滴が付着し、含水率が高くなる場合があるため、注意が必要である。
- 3) 測定箇所を選定する際は、測定結果がコンクリート表面の微細なひび割れや打重ね線などの影響を受けることも考慮する必要がある。定性的な値として出力されるため定量的な評価とするためには、トレント法などによる透気係数との相関を確認しておくことが望ましい。
- 4) 測定は複数箇所で行い、品質のばらつきを把握するためにも、平均値ではなく全ての測定結果を記録に残しておくことが望ましい。また、流入空気量と合わせて含水率も記録に残しておくことが望ましい。



測定に使用するシリンダの例

試験の状況

図 7.3.4 シリンダを用いた簡易透気試験の概要

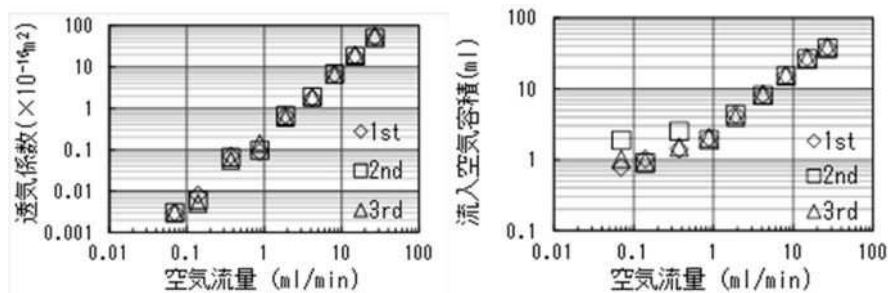


図 7.3.5 空気流量を変化させた際のダブルチャンバー法(左)および簡易透気試験(右の結果の比較)

- 5) 上記の文献の後に、パテの成型や測定時にシール材の塗布、測定値のノギスでの読み取りの手間を省略する等の改良がなされている。図7.3.6 に示す試験装置は外径 $\phi 100\text{mm}$ のシリコンリング、アルミ製のアタッチメント、シリンダ、および内部ピストンの固定器具で構成されている。コンクリート表面への設置の時間、測定の手間が大幅に軽減されている。



図 7.3.6 改良された試験装置の概略図

(6) シール法に基づく表層透気試験^{59) 60)}

- 1) 本手法は、コンクリート表面を円形状に気密処理して、その中心から吸引して透気量を測定するものである。計測された透気量に関するコンクリート内部の透気領域を明確し、それに基づき、透気量から透気係数を算出しているところに、他の手法との大きな違いがある。
- 2) シングルチャンバー法やトレント法など、いずれの手法においても透過領域を明確化していないか、透気係数を計算上仮定しているため、手法や寸法の相違に依存しない透気係数による評価が難しいことや正しくないという問題があったが、本手法は透気領域が明確なため最も正確である。
- 3) 気密性を高めるためのシール材も除去が容易であり、コンクリートに痕跡を残さないことも特徴的である。また、透気係数から、例えばコンクリートの塩化物イオン拡散係数への換算なども可能である。

従来の透気試験の問題点

× 既往のシングルチャンバー、ダブルチャンバー方式
→ 透気領域が不明

透気領域が単純ではないため透気係数K(透気性の直接的指標)による絶対評価がされていない

透気面積A=?

タルシー則 $Q = K \frac{\partial P}{\partial x}$

→ 氏家・岡崎は、透気領域を明確にし、透気係数を算出できる手法を提案(2008, 2009セメントコンクリート論文集など)

提案する現場透気試験方法①

○ シール法

コンクリート表面に円形のシールをすることで透気領域を半球状に

シール ラテックス樹脂による気密処理

真空ポンプへ

チャンバー

透気量 Q

タルシー則 $Q = K \frac{\partial P}{\partial x}$

半球の表面積 $2\pi r^2$

点々から点状にして両辺を積分

■ 透気係数の推定式

$$K = \frac{P_2}{2\pi(P_2^2 - P_1^2)} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) Q$$

シール内容 r_1 シール半径 r_2

大気圧 P_2 チャンバー内気圧 P_1

図 シール法の透気領域



シール法による透気試験と透気係数算出

- これまでの透気試験では透気領域が不明瞭 → 表面に円形シール透気領域を半球状に限定 → 透気係数算出
- 安価
- 単純な機構 → 試験者の技量を問わず

シール法による透気試験と透気係数算出

$$K = \frac{P_2}{2\pi(P_2^2 - P_1^2)} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) Q$$

シール内容 r_1 シール半径 r_2

大気圧 P_2 チャンバー内気圧 P_1

シール法の透気領域

実験室

塩化イオン浸透係数 $[cm^2/year]$

透気係数 $[cm^2]$

含水率 3.5% (▲)

含水率 2.5% (□)

含水率増加

透気係数, 含水率, C拡散係数の関係を実験室であらかじめ求める

評価基準図

透気係数 $[cm^2]$

含水率 (%)

拡散係数大

拡散係数小

現場で、含水率と透気係数を計測 → C拡散係数が推定できる!

図 7.3.7 シール法に基づく表層透気試験の概要

(7) 表層透水試験装置 (GWT) ⁶¹⁾

- 1) 装置をアンカーまたは真空ポンプによる治具で固定し、チャンバー内に水を満たした後、圧力調整用の栓を閉めることによりチャンバー内部の圧力を調整 (50kPaから100kPa) し、マイクロメータを廻すことにより圧力を一定に保ちながらコンクリート表層部の透水性を測定するものである。

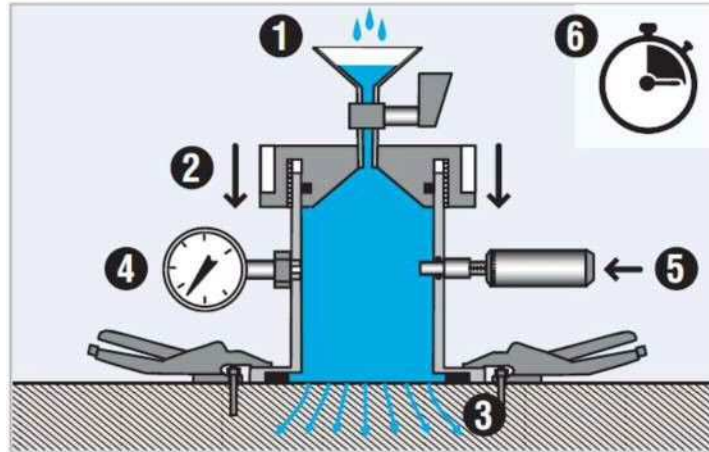


図7.3.8 装置の概要図

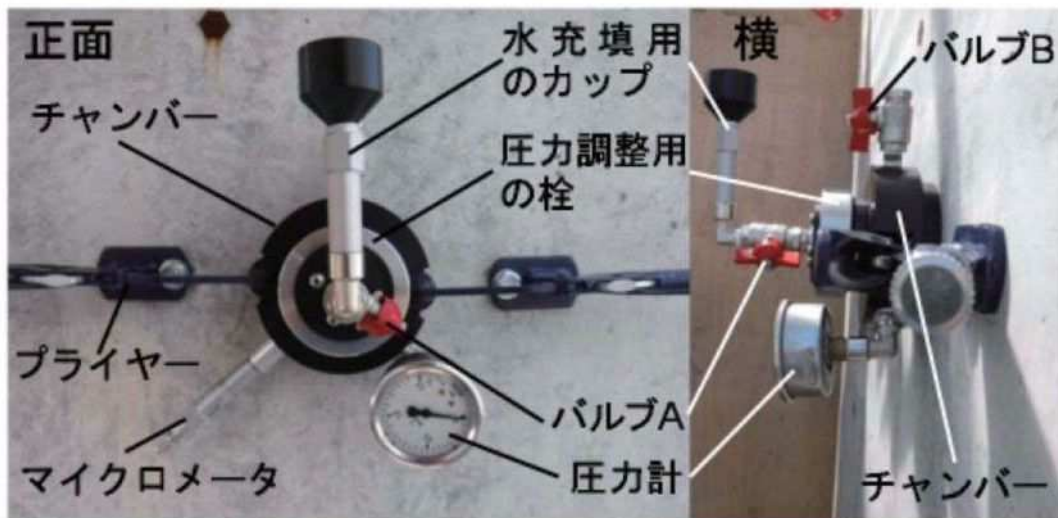


図7.3.9 装置の設置状況

- 2) 文献61においては、水を注入してから10分静置した後測定を開始する「従来法」および水を注入してから60秒で1回目の測定を開始して、計2回測定する手法が提案されており、後者の1回目の結果は表層部の品質の違いを検討することに適し、2回目の結果は従来法と比較できるとしている。

(8) 散水試験^{62) 63) 64)}

1) 散水試験A法は、乾燥したコンクリート表面にスプレーにより約 $0.1\text{mg}/\text{mm}^2$ の水を同一箇所で繰り返し散布し、コンクリート表面における微量水分の吸水性状の評価を目視によって行う方法である。



図7.3.10 測定の概要

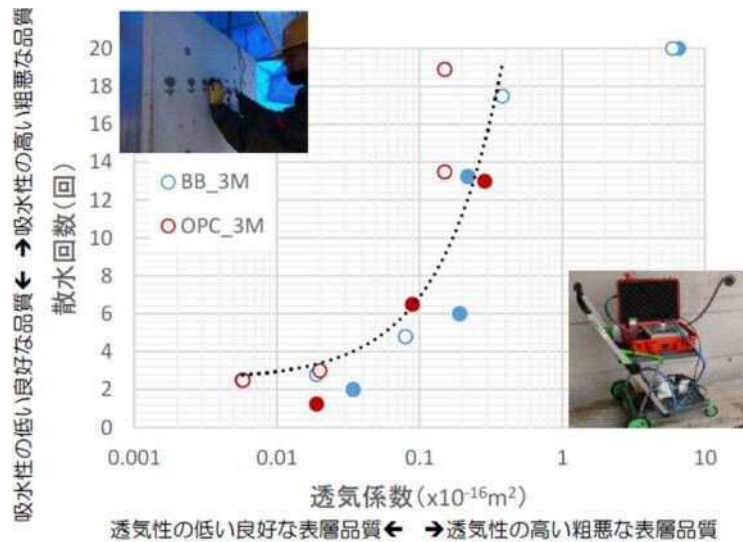


図 7.3.11 群馬県試行工事における散水試験と透気試験の相関

2) 品質確保に関する適用先としては、J R西日本における目視評価法と併せた品質確保の試行⁶³⁾や、群馬県における新設コンクリートの品質確保の試行工事での検証⁶⁴⁾として用いられている。