

論文 ダブルチャンバー式加圧透水試験機による表層コンクリートの水密性と耐久性の非破壊検査法に関する研究

豊福 俊泰*1・永松 武則*2・峰村 富夫*3・添田 政司*4

要旨： 現地構造物における表層コンクリートの水密性の非破壊検査法であるダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機（WAPP）法は、「測定箇所にて遮水性シール材を貼り付けた上にダブルチャンバー部を密着させ設置することにより、構造物下面を含む全方位の透水性が、55kPaの水圧状態において20分で、表層透水係数P（P値，m/sec）を測定する加圧透水試験法」である。性能確認試験を総括した結果、WAPP法で測定されるP値（m/sec）は、2012年制定コンクリート標準示方書で規定される透水係数 K_k と適合しており、中性化速度係数などとも相関が認められ、水密性と耐久性とを診断できる非破壊検査法であることが検証された。

キーワード： ダブルチャンバー、加圧透水試験機、表層透水係数、非破壊検査法、水密性、耐久性

1. まえがき

周知のように、繰返し雨水・塩水、乾燥等の影響を受ける「水掛かり」の箇所では、コンクリートの耐久性（水の浸透や空隙が大きな影響要因となる塩害、中性化、凍害、アルカリシリカ反応、すりへりなど）が不足し、劣化が著しい。このため、土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書」（以後、示方書と略記）で「水密性と耐久性の照査法、最大の水セメント比」の規定がされているが、現地構造物の水密性（透水係数）を検査する非破壊検査法無しの問題点があった。

そこで、筆者らは、ダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機（Water/Air Pressure Permeability. 以後、WAPPと略記）を使用した非破壊検査法によって、現地構造物の表層コンクリートの水密性（表層透水係数）・

耐久性（塩化物イオン浸透深さ、中性化速度係数、すり減り速度係数など）を診断する技術を提案した^{1)~3)}。本文は、さらに多数の材齢、暴露条件を加えた性能確認試験結果から、この加圧透水試験機法（ここでは、透気試験法については省略）の有効性を総合的に検証したものである。

2. WAPP法の概要

WAPPは、図-1・写真-1に示すように、測定部が内側チャンバーと外側チャンバーを有する構造からなり、水密性は内側チャンバーの透水量によって評価される。測定面での外側チャンバーの減圧力（図-1の(ロ)）と遮水性シール材による完全密着によって、内側チャンバーからの加圧水の流出（同(イ)）が排除され、内側チャ

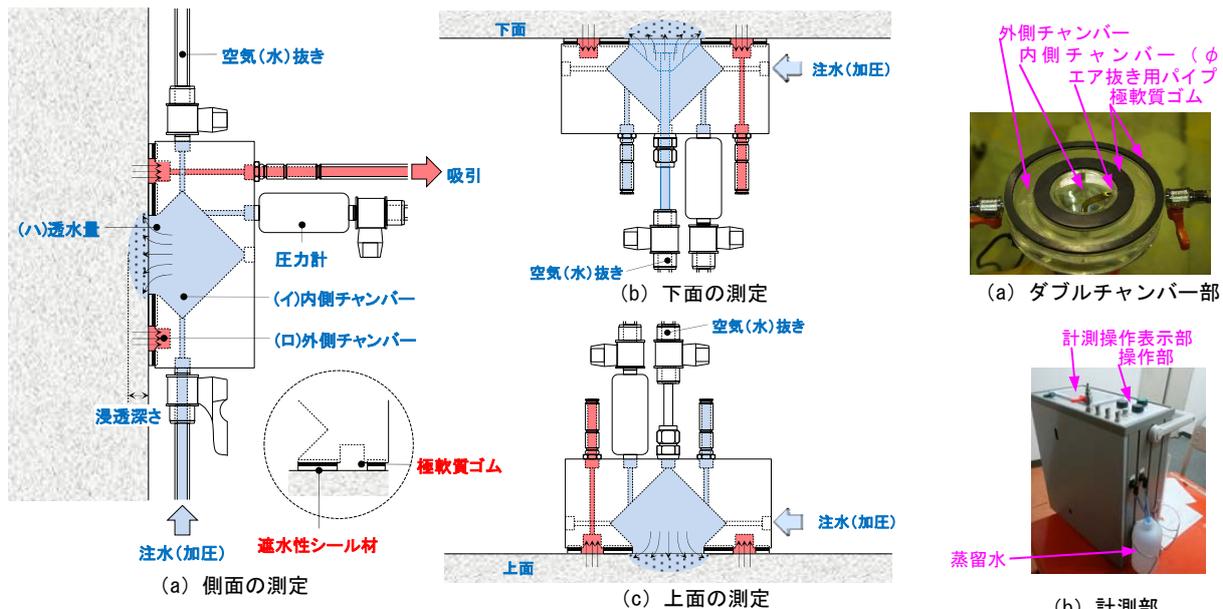


図-1 ダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機（WAPP）法の概要

写真-1 試験装置

*1 九州産業大学 名誉教授（名誉会員）

*2 建設コンサルタントアイラボ 代表（前九州産業大学建築都市工学部都市デザイン工学科 技能員）（正会員）

*3 エフティーエス株式会社 執行役員 技術開発部長（正会員）

*4 福岡大学大学院工学研究科 教授（正会員）

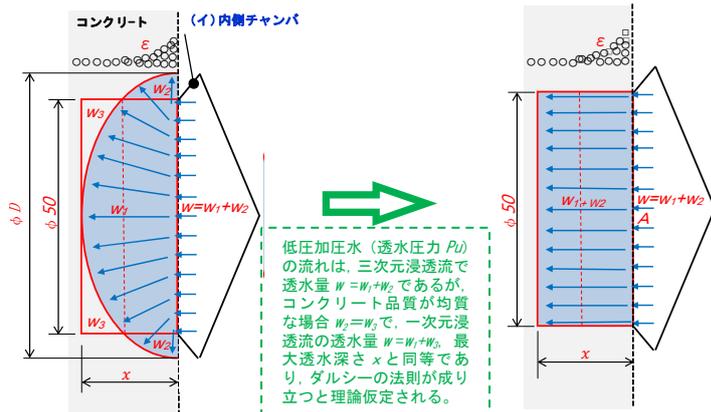


図-2 ダブルチャンバー式加圧透水試験機法の試験原理

表-1 性能確認試験(データ数 n=248)

区分	コンクリートの種類 (注)	水セメント比 W/C (%) (W/C, kg/m ³)	材齢	供試体の種類 (寸法, 測定面)	暴露条件 (測定面の養生方法)
W 増減	普通30W185	61(185/304)	4週	・柱部材(高さ 60×幅50× 20cmの片側側 面)	材齢:4週~2年 ・屋内暴露(空気 中, 屋内暴露) ・屋内暴露(5日 間湿潤養生, 屋 内暴露)
	普通30W164	54(164/304)	7週		
	普通30W150	49(150/304)	1年		
W/C 増減	普通15	87(166/192)	2年	・床部材(高さ 20×幅60× 50cmの上面・ 下面)	材齢:1~9年 ・屋外暴露(空気 中, 屋内暴露約3 か月後屋外暴露) ・屋外暴露(5日 間湿潤養生, 屋 内暴露約3か月後 屋外暴露)
	普通15	86(165/192)			
	普通22	68(165/243)			
	普通30	54(164/304)	4年	・柱部材・床部 材から採取した φ10×20cmの コア	
	普通30	52(163/314)	5年		
	普通40	45(172/383)	6年		
	普通45	38(180/474)	7年		
	普通45	37(179/484)	8年		
	普通60	30(170/567)	9年		
普通60	29(170/597)				

(注)

- ・スランブ: 8±2.5cm, 空気量: 4.5±1.5%, 粗骨材の最大寸法: 25mm, セメント: 普通ポルトランドセメント, 細骨材: 玄界灘産海砂+宍道沖産海砂, 粗骨材: 古賀産碎石, 混和剤: AE減水剤, 高性能AE減水剤(普通60のみ)を使用し, 単位セメント量C変化のコンクリート
- ・普通30W185・普通30W150: 普通30のW=164kg/m³をW=185kg/m³・150kg/m³(C=304kg/m³で一定)とし, スランブが変化のコンクリート
- ・普通30W164: 普通30のW=164kg/m³のコンクリート(スランブ: 8±2.5cm)

ンバー下に透水の流れ(同(ハ))が形成される^{1)~3)}。

この加圧水の三次元浸透流を一次元浸透流にみなすと理論仮定すると(図-2), 透水量 w (cc) が式(1)より求められ, 水が空隙(空隙率 ε)を完全に満たして最大浸透深さ x まで流れるときの関係から式(2)が, ダルシーの法則から動水勾配 i , 透水係数 K と流速 v との関係式 $v=Ki$ から式(3)が, ハーゼンの公式から式(4)が, それぞれ成り立つと仮定して式(2)~式(4)から計算すると, 表層透水係数 P (m/s, 以後 P 値と略記) が, 式(5)で定義される⁴⁾⁵⁾。

$$w = w_1 - w_0 \quad (1)$$

$$x = \frac{w}{\varepsilon A} \quad (2)$$

$$v = K \cdot \frac{P_u}{\rho x} \quad (3)$$

$$P = K \varepsilon^2 \quad (4)$$

$$P = \frac{G \rho w^2}{2 t A^2 P_u} \times 10^{-4} \quad (5)$$

ここで, w_1 : 透水終了時の水量 (cc), w_0 : 透水開始時の水量 (cc), 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), A : 内側チャンバーの断面積 (cm²), P_u : 透水水圧 (kPa)

3. 性能確認試験

3.1 性能確認試験の概要

供試体は, 実構造物を代表するように柱部材(鉛直部材), 床部材(水平部材)とし, コンクリート品質を代表するように(a)単位水量 W 増減(普通30の単位セメント量 $C=304\text{kg/m}^3$ で一定)の3配合および(b)水セメント比 W/C 増減(スランブ $8\pm 2.5\text{cm}$ で一定, 普通15~60)の10配合の合計12配合のレディーミクストコンクリートを用いて製作し, 養生条件(空气中, 5日間湿潤養生), 暴露条件(屋内, 屋外), 材齢(4週~9年)を変化させた(表-1, 写真-2)。

非破壊試験の試験面は, 柱部材側面, 床部材上面, 床部材下面の3面についてそれぞれ2箇所とし, 水分率(高周波式水分計法), P 値(透水圧力 55kPa, 透水時間 20分, 1点測定)の測定を行った後に, これらの箇所から



(a) 屋内暴露



(b) 屋外暴露

写真-2 暴露状況(九州産業大学構内, 年平均気温 17.0°C, 湿度 68%)

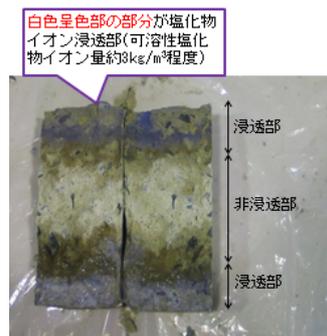
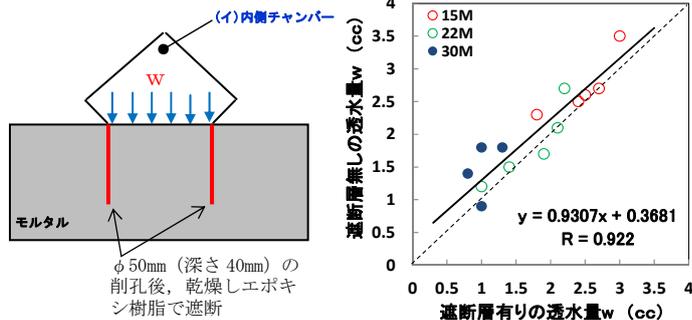


写真-3 塩化物イオン浸透深さ試験



(a) 試験方法 (遮断層有りの場合) (b) 遮断層有・無と透水量 w の関係
 図-3 遮断層有りの場合と無しの場合とを対比する透水試験
 (φ150mm×高さ50mmのモルタル供試体, M15・M22・M30)

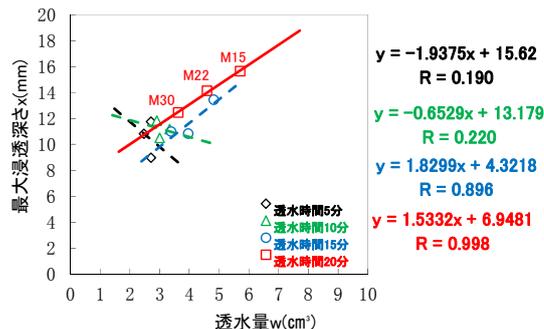


図-4 透水量と最大浸透深さ (透水時間別, 水圧 55kPa, M15・M22・M30, 方向 -90・0・90° 平均)

コア (φ10×20cm) を採取して, 中性化深さ (JIS A 1152) 試験後, 圧縮強度 (JIS A 1108) 試験を行った。さらに, 塩害の診断可能であるかを確認するため, これらの近接箇所からコア 1 個を同時に採取して, 屋内で塩化物イオン浸透深さ試験 (JSCE-G 572-2010, 1 日水中浸漬後, 濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液中に 10 日間浸漬後に, 割裂面に 0.1 mol/l 硝酸銀溶液を噴霧し, 変色境界までの平均深さを測定, 写真-3) を行った。

3.2 試験原理と試験方法の検討

WAPP 法 (図-1, 図-2) では, コンクリート面の測定箇所に遮水性シール材を貼り付け後, 外側チャンバーで吸着し, 内側チャンバー内の空気を除去して滴水直後から, 加圧して透水量を測定している。この試験原理における水の流れを確認するため, 表-1 の普通 15, 普通 22, 普通 30 のモルタル M15, M22, M30 を用いた φ150×高さ 50mm の供試体 (材齢 5 年) を使い, 内側チャンバー径 φ50mm の直下を削孔してエポキシ樹脂を充填して遮断層を設置した「遮断層有りの場合 (図-3(a)) とこれが無しの場合」とを対比する透水試験を行った。この直後に, 供試体の割裂面を観察して断面が濡れている境界にマーキングを行った結果から, 遮断層無しの場合 (WAPP 法の三次元流れ, 図-2 の $w = w_1 + w_2$) と遮断層有りの場合 (理論仮定の一次元流れ, 同図 $w = w_1 + w_3$) とを比較すると, 前者は, 後者の透水量 w と直線関係 ($w_2 \geq w_3$, 図-3(b)) で, 表面に近いほど空隙率が大きいことを表しており, 後者と同等でダルシー流れであるとみなされる。

また, 透水量 (透水水圧 55kPa, 図-4) は, 透水時間が長いほど最大浸透深さとの相関が強くなることから, 1 箇所のコンクリート品質の良, 不良を適正に評価できる最大測定時間として標準 20 分とすることに定めた。

一方, 示方書に「水密性を評価する透水係数 K_k は, 設計時に式 $\log K_k = 0.043W/C - 12.5$ で照査する」と規定されている。そこで, モルタル供試体の水セメント比 W/C から K_k を, 図-4 から式(5)によって P 値を計算し, 両者の関係 (図-5) を求めると, 透水時間 20 分の場合: 式(6)

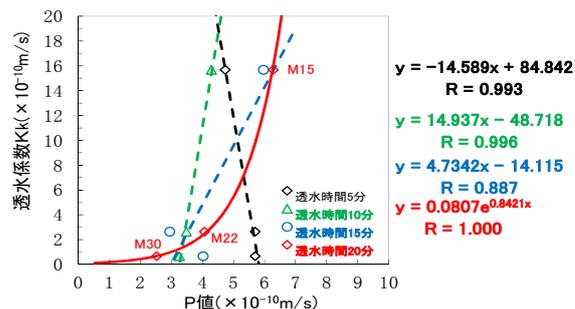


図-5 P 値と示方書式の透水係数 K_k との関係

の関係式で適合 (相関係数 $R=1.00$) しており, P 値から K_k を求める場合には, この式によって計算される。

$$K_k = 0.0807e^{0.8421P} \quad (6)$$

3.3 コンクリート品質 (W/C) と水密性 (P 値) との関係

コンクリートの表層部は, 養生完了後から乾燥が開始するが, 材齢の経過に伴う乾燥と水掛かり (降雨) に起因する水分率 M_o と P 値との変化は, 屋内の場合: コンクリートの乾燥 (空隙の増加), 屋外の場合: コンクリートの乾燥と水掛かりによる乾湿繰り返し (空隙・水の浸透の増加) が進行する。この現象に伴い, 部材設置個所の環境条件に応じて全体的には乾燥によって M_o が小さくなり, 乾燥によって生じた空隙に水が浸透しやすくなり P 値が大きくなる関係がイメージされる。全測定値からは, 図-6 の関係 (床部材上面が最大で, 柱部材側面, 床部材上面の順。 n : データ数) が求められる。

示方書の規定から, 「水密性の最大 W/C は 55% で, この他の最大 W/C は, 耐久性に対して 65%, 耐凍害性に対して 65・60・55・45%, 海洋コンクリートと化学的浸食抵抗性に対して 50・45%」であり, これらに該当する透水係数 K_k を求めると 45% : $0.27 \times 10^{-10} \text{m/s}$, 50% : $0.45 \times 10^{-10} \text{m/s}$, 55% : $0.73 \times 10^{-10} \text{m/s}$, 60% : $1.20 \times 10^{-10} \text{m/s}$, 65% : $1.97 \times 10^{-10} \text{m/s}$ となる。これらの値を W/C と P 値との関係 (図-7(1), 柱部材側面が最大で, 床部材上面, 床部材上面の順) を求め併記すると, 正の指数式関係で相関性が強く示方書式とも適合しており, これらによって品質診断できることが示されている。図-7(2) から, W

増減の場合には、W/C が 55% を超える (W が 164kg/m³ から 185 kg/m³ になる) と、急激に P 値が大きくなって

示方程式とのかい離が大きい指数式関係の傾向が認められる。一方、W/C 増減の場合は、W/C と P 値が指数式関

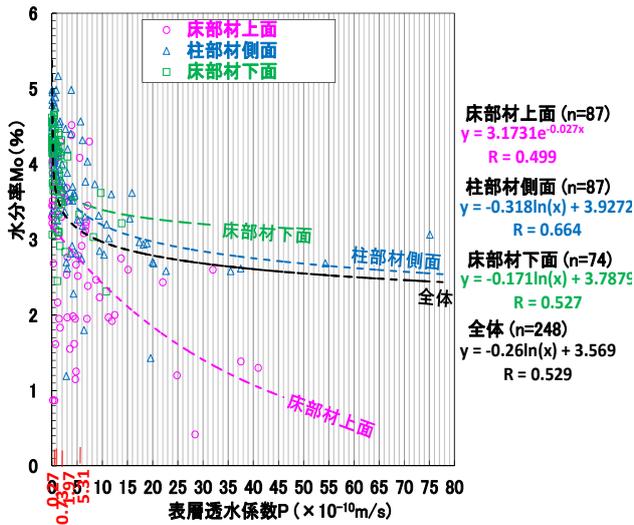


図-6 P 値と Mo との関係 (W 増減と W/C 増減の全部材, 屋内屋外暴露, 4 週~9 年)

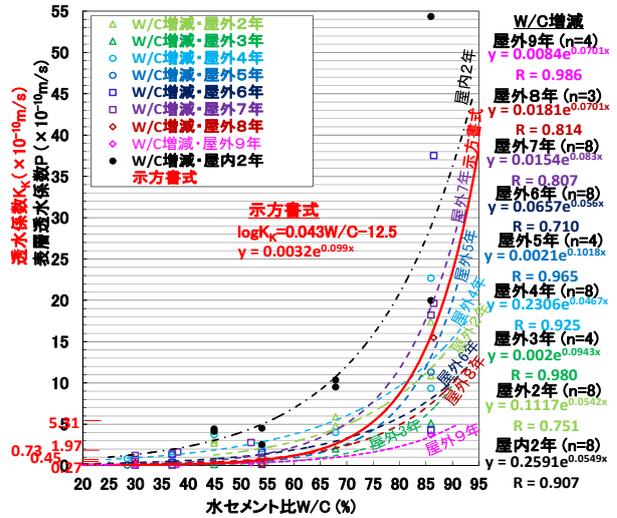


図-7(c) W/C と P 値との関係 (W/C 増減の柱部材側面, 屋内屋外暴露, 2~9 年)

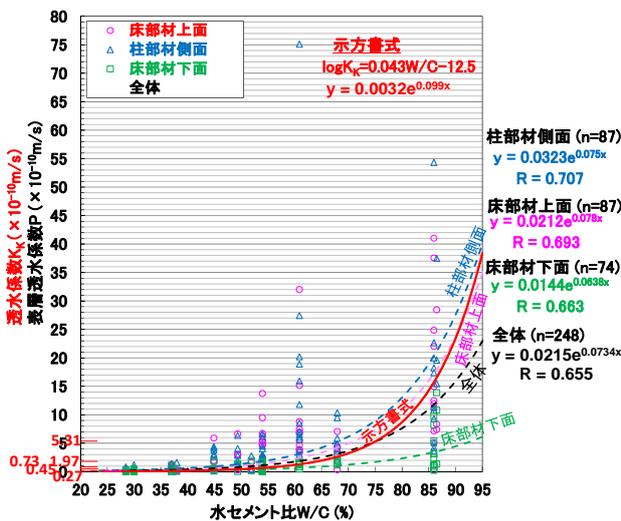


図-7(a) W/C と P 値との関係 (W 増減と W/C 増減の全部材, 屋内屋外暴露, 4 週~9 年)

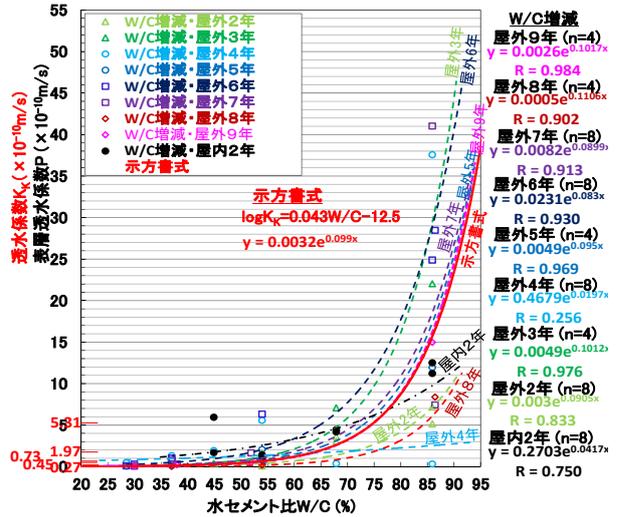


図-7(d) W/C と P 値との関係 (W/C 増減の床部材上面, 屋内屋外暴露, 2~9 年)

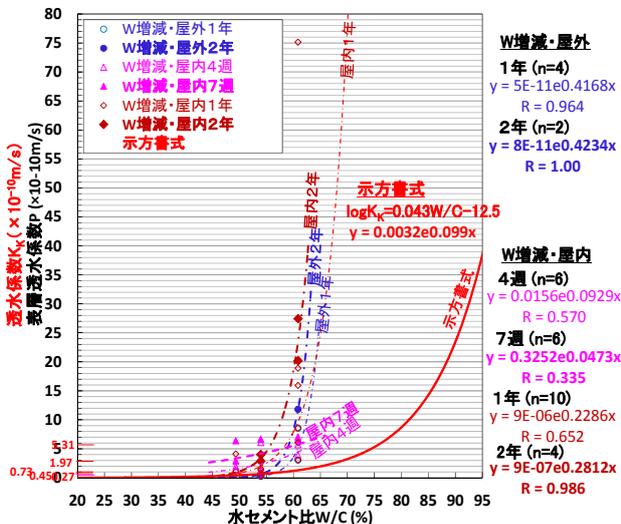


図-7(b) W/C と P 値との関係 (W 増減の柱部材側面, 屋内屋外暴露, 4 週~2 年)

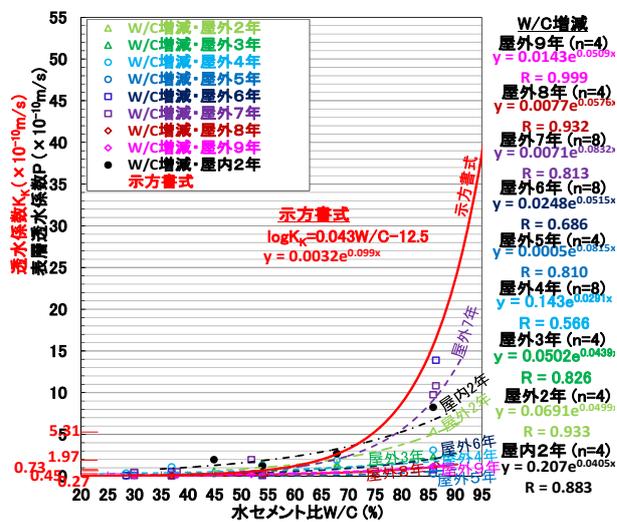


図-7(e) W/C と P 値との関係 (W/C 増減の床部材下面, 屋内屋外暴露, 2~9 年)

係にあり材齢（乾湿繰返しによる水分率 M_o の変化）によって勾配の差が生じているが、水掛かりがある柱部材側面（図-7(c)）と床部材上面（図-7(d)）の場合に、示方書式と良く適合している。一方、床部材下面（図-7(e)）の場合は、示方書式に比べ P 値が小さくなっている。

以上から、 P 値は、要因である $W/C(\%)$ の指数 $e^{W/C/100}$ 、水分率 $M_o(\%)$ 、 $W(\text{kg/m}^3)$ 、供試体の種類 S （1：柱部材側面，2：床部材上面，3：床部材下面）の4変数との関係を重回帰分析（変数増減法， $F_{in}=F_{out}=2.0$ ，取入れ順，下段の（）内は t 値）すると、式(7)となる。

$$P = -37.669 + 11.159 e^{(W/C/100)} - 2.401S - 2.498M_o + 0.213W \quad (7)$$

(-3.9) (6.3) (-4.2) (-4.3) (4.1)

(n=236, R=0.613, 残差の標準偏差 $es=6.99 \times 10^{-10} \text{m/s}$)

P 値は、 W/C との相関（正の相関。以後、相関を正負で表す）が最も強く、次に M_o （負）、 S （負）、 W （正）との関係が認められ、これらを表す指標であると言える。

3.4 水密性（ P 値）と耐久性との関係

(1) P 値と中性化深さとの関係

まず、空隙に CO_2 が浸入して生じる中性化深さ C_d (mm) は、示方書で α ：中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)、 t ：材齢 (年) として $C_d = \alpha \sqrt{t}$ 式の関係が規定されていることから、 P 値と α との関係とを求めると、正の対数式関係（図-8(a)）にあり相関性が強いが、 W/C 増減の場合（図-8(b)）も対数式関係で、材齢と暴露条件の影響があり勾配の差が生じている。

C_d の要因である $\log P$ 、 M_o 、 S （図-6 の関係から，1：床部材上面，2：柱部材側面，3：床部材下面）， \sqrt{t} の4変数との関係を重回帰分析すると、式(8)となる。

$$C_d = 5.692 - 2.8001M_o + 4.184 \log P + 3.423\sqrt{t} + 1.743S \quad (8)$$

(4.0) (8.4) (10.7) (10.1) (5.1)

(n=236, R=0.801, $es=3.78\text{mm}$)

P 値との相関（正）が最も強く、次に t （正）、 M_o （負）、 S （正）との関係が認められ、 $C_d = \alpha \sqrt{t}$ 式に替わる推定式として提案される。また、 α も、示方書式該当の P 値 0.27, 0.45, 0.73, 1.20, $1.97 \times 10^{-10} \text{m/s}$ で診断可能である。

(2) P 値とコア圧縮強度 f_c との関係

また、空隙（空気量）が多いほど強度低下することから、 P 値とコア圧縮強度 f_c との関係を求めると、負の対数式関係（図-9(a)）にあり相関性が強いが、 W/C 増減の場合（図-9(b)）も対数式関係で、材齢と暴露条件の影響があり勾配の差が生じている。

f_c の要因である $\log P$ 、 M_o 、 S （1：床部材上面，2：柱部材側面，3：床部材下面）， \sqrt{t} の4変数との関係を重回帰分析すると、式(9)となる。

$$f_c = 21.425 - 7.734 \log P + 5.836 M_o - 4.429S + 1.295\sqrt{t} \quad (9)$$

(6.5) (-8.5) (7.5) (-5.6) (1.7)

(n=236, R=0.747, $es=8.79\text{N/mm}^2$)

P 値との相関（負）が最も強く、次に M_o （正）、 S （負）、

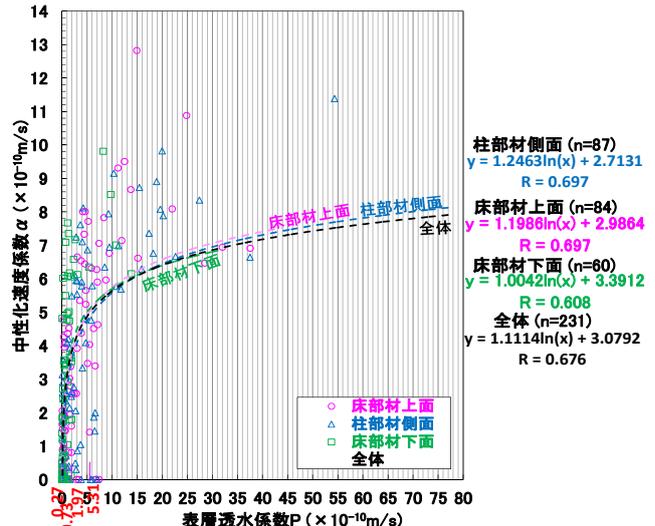


図-8(a) P 値と α との関係 (W/C 増減と W 増減の全部材，屋内屋外暴露，4週～9年)

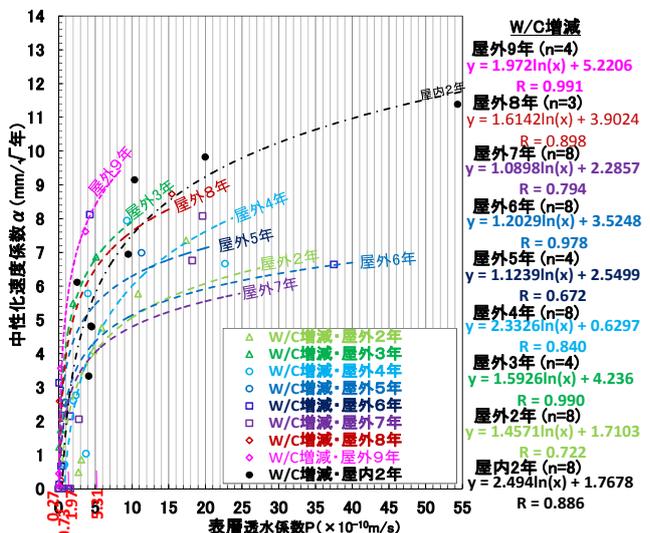


図-8(b) P 値と α との関係 (W/C 増減の柱部材側面，屋内屋外暴露，2～9年)

t （正）との関係が認められ、 CD の推定式として提案される。 F_c も、示方書式該当の P 値 で診断可能である。

(3) P 値と塩化物イオン浸透深さ CD との関係

次に、水中浸漬後に塩化物イオンが浸透して生じる塩化物イオン浸透深さ CD は、 P 値との関係を求めると、正の対数式関係（図-10(a)）にあり、床部材下面が最大で次に床部材上面，柱部材側面の順となっている。 W/C が増減の場合（図-10(b)）も、 P 値は CD と対数式関係で、材齢と暴露条件によって勾配の差が生じている。

C_d と同様に、 CD の要因である $\log P$ 、 M_o 、 S （1：床部材上面，2：柱部材側面，3：床部材下面）， \sqrt{t} の4変数との関係を重回帰分析すると、式(10)となる。

$$CD = 22.088 + 7.700 \log P - 5.257 M_o + 3.813 \sqrt{t} + 3.410 S \quad (10)$$

(7.1) (8.9) (-7.1) (5.1) (4.5)

(n=236, R=0.731, $es=8.38\text{mm}$)

P 値との相関（正）が最も強く、次に M_o （負）、 t （正）、

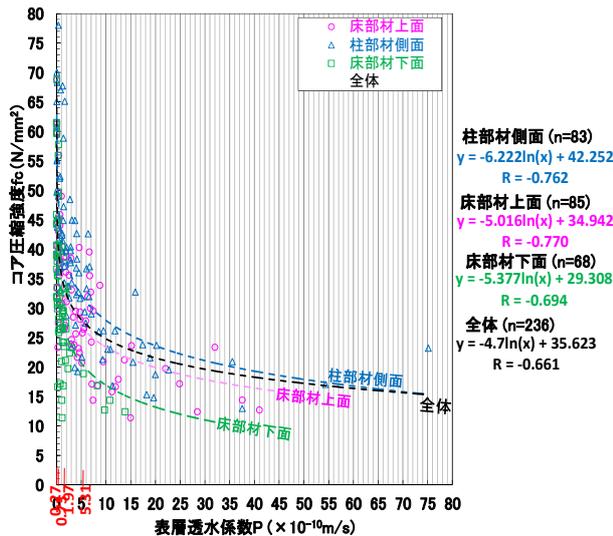


図-9 (a) P値とfcとの関係(W/C増減とW増減の全部材, 屋内屋外暴露, 4週~9年)

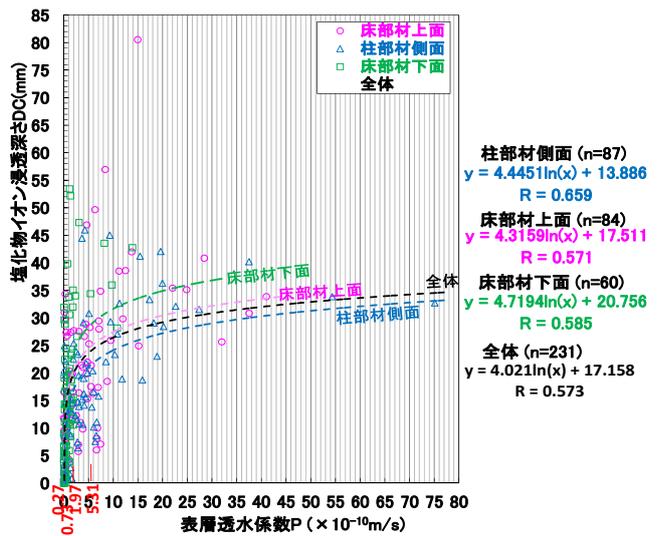


図-10 (a) P値とDCとの関係(W/C増減とW増減の全部材, 屋内屋外暴露, 4週~9年)

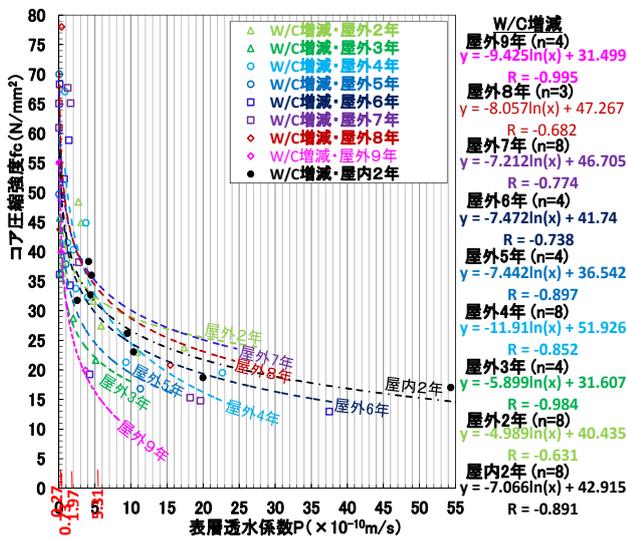


図-9 (b) P値とfcとの関係(W/C増減の柱部材側面, 屋内屋外暴露, 2~9年)

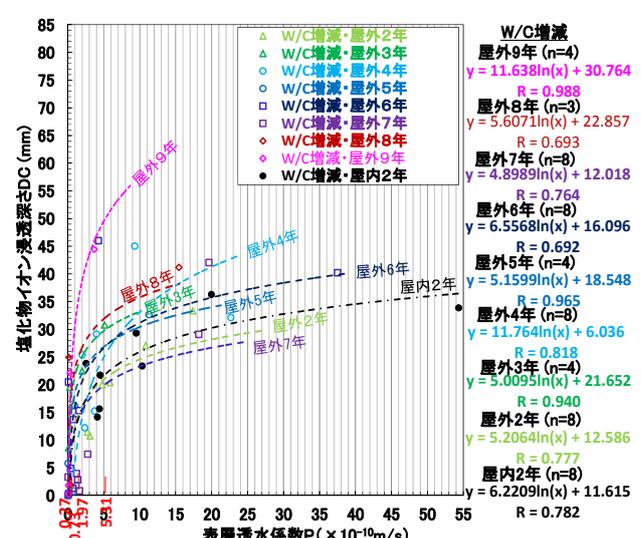


図-10 (b) P値とDCとの関係(W/C増減の柱部材側面, 屋内屋外暴露, 2~9年)

S (正) との関係が認められ, CD の推定式として提案される。CD も, 示方書式該当の P 値 で診断可能である。

4. まとめ

WAPP 法によって求められる P 値は, 式(5)で定義され, 性能確認試験の結果, 示方書規定の K_k 式と式(6)の関係式で適合しており, 測定値は式(7) となり, 水密性を表わす。また, 空隙や水の浸透が大きな影響要因となる中性化, コア圧縮強度, 塩害などの耐久性を, 示方書の最大 W/C : 45, 50, 55, 60, 65% に該当する P 値 : 0.27, 0.45, 0.73, 1.20, 1.97×10^{-10} m/s および式(8), 式(9), 式(10)によって非破壊検査できることが検証された。

参考文献

1) Toshiyasu Toyofuku et al. : Technical Development of Nondestructive Inspection Method of Cover Concrete

Using Water Permeability Tester, International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures (RCCS), FF0063, 2015.6.1-3

2) 豊福俊泰, 高橋典子, 永松武則, 細川土佐男: ダブルチャンバー透気性試験・ダブルチャンバー透水性試験による表層コンクリートの非破壊検査法の技術開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1801-1806, 2015.6

3) 高橋典子, 白谷祐太, 豊福俊泰, 永松武則: ダブルチャンバー透水性・透気性試験機による表層コンクリートの非破壊検査法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2025-2030, 2016.7

4) 伊藤義也, 越川茂雄: ダルシー浸透流によるコンクリートの透水試験方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.921-926, 1996

5) DIN 1048 Part 5 : Testing concrete, Testing of hardened concrete (specimens prepared in mould), June 1991