

構造物中コンクリートの耐久性の非破壊検査法に関する研究

豊福 俊泰¹・白川 敏夫²・佐藤 武夫¹

¹九州産業大学工学部都市基盤デザイン工学科、²九州産業大学工学部住居インテリア設計学科

概要：本研究は、「構造物中のコンクリートの品質の非破壊検査法に関する研究」（平成8年度～）を継続し、構造物中コンクリートの耐久性に関連する品質（透気性、拡散係数、中性化深さ、透水性、締固め度）を、トレント法による非破壊試験によって評価する方法の開発研究を行うものである。本方法による品質検査法は、規格化の見込みが確実であり、コンクリートの品質向上が期待される。

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物のかぶり部分の品質を定量的に評価する方法の確立は、耐久性設計における重要事項であるが、わが国では、構造物中コンクリートの耐久性に関連する品質（中性化、塩害、凍害などに対する抵抗性）の非破壊検査法が確立されていないのが現状である^{1)~3)}。

トレント法は、R.Torrent によって開発され、わが国では豊福によって応用が図られた（2000年～現在）ものであり、コンクリート表層部の透気性を非破壊試験により測定することで、材料、配合、施工等の影響を強く受けるかぶりコンクリートの品質を把握しようとするものである^{4)~10)}。

本研究の目的は、構造物中コンクリートの品質のうち、耐久性設計に資する透気性・拡散係数・中性化深さ・透水性・締固め度さらにコア圧縮強度を、トレント法による非破壊検査法によって評価する方法を確立しようとするものである。

2. 各種気体透過試験方法

(1) ダブルチャンバーによる透気試験方法(トレント法)

トレント法の測定部は、内側チャンバーと外側チャンバーを有する構造（図1）からなり、透気性は、内側チャンバーの圧力によって評価される。内側チャンバーの圧力①と外側チャンバーの圧力②を等しくコントロールすることにより、外側から内側チャンバーへの空気の流入③が物理的に排除され、結果として図1に示すような内側チャンバー下に栓流（④の直線矢印）が形成される。この空気の流れから、次の(1)式でコンクリートの透気係数 k_t （以後、K値とする）が測定される。

$$k_t = 4 \left(\frac{V_c (dP_i / dt)}{A (P_a^2 - P_i^2)} \right)^2 \frac{\mu P_a}{\varepsilon} \int_0^t \left[1 - \left(\frac{P_i}{P_a} \right)^2 \right] dt \quad (1)$$

ここに、 V_c ：内部チャンバーと接続要素（ホース等）の容積(m^3)、 ε ：コンクリートの空隙量(m^3/m^3)、 P_i ：内部チャンバーの圧力(N/m^2)、 P_a ：大気圧(N/m^2)、 A ：仮定された栓流の断面積(m^2)

(2) 気体拡散試験方法

気体拡散試験は、酸素と窒素ガスの相互拡散によるセメント硬化体中への酸素ガスの拡散係数を求める方法として、日本コンクリート工学協会の「酸素の拡散係数試験方法(案)」¹¹⁾を一部変更して行った。

拡散試験は、図2に示すように、セメント硬化体中への酸素と窒素ガスの相互拡散となるように、中央に配した供試体を挟む二つの拡散セルにそれぞれ酸素ガスと窒素ガスを等圧（1気圧）等流量

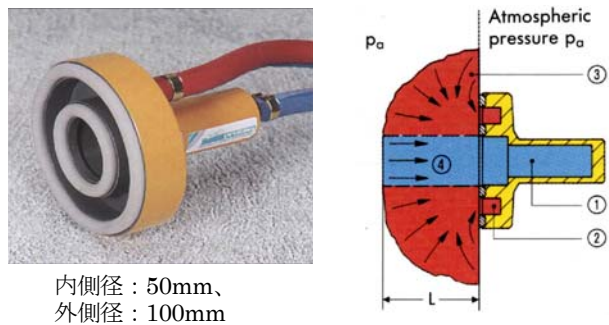


図1 トレント法による試験原理

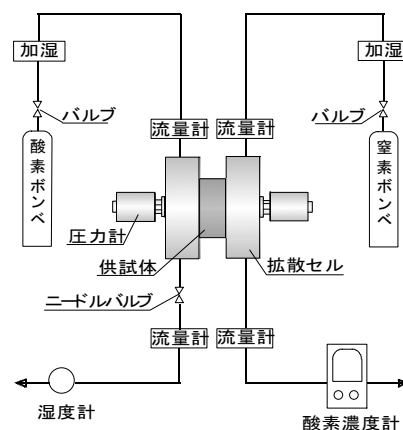


図2 透気拡散試験装置の概要

で継続して流した。なお、セメント硬化体を透過した気体は、窒素ガス中の酸素濃度を測定することにより求めた。気体の拡散係数は、定常状態において、本論では、筆者らの既往の研究¹²⁾と同様に、以下の(2)式により求めた。

$$De = \frac{R_N \cdot (C_N - C_b)(L + \delta_N + \delta_o)}{\left\{ 1 - \frac{R_N}{R_o} \cdot \left(\frac{M_o}{M_N} \right)^{1/2} (C_N - C_b) - C_N \right\} \cdot A_c} \quad (2)$$

ここに、De：気体の拡散係数(m²/s)、C_N：窒素ガス中の酸素濃度、C_b：窒素ガスボンベ中の酸素濃度、R_N、R_o：窒素および酸素のガス流量(m³/s)、M_N、M_o：窒素および酸素分子量、L：供試体の厚さ(m)、A_c：供試体の断面積(m²)、δ_N、δ_o：窒素ガス側および酸素ガス側の境界膜の厚さで、本装置および本実験条件では、それぞれ、2.1 mmとした。

(3) 透気試験方法

a) 透気試験装置

透気係数試験方法は、コンクリートの気体拡散試験を行った後、供試体を取り替えることなく求める方法を新たに考案した。

透気試験は、図2に示す透気拡散試験装置の酸素ガス側拡散セル出口に設けたニードルバルブの調整により、酸素ガス側の圧力を上昇させ、行った。両拡散セルの圧力は、両拡散セルに取り付けた圧力計で測定した。セメント硬化体を透過した気体は、拡散試験と同様に、窒素ガス中の酸素濃度を測定することにより求めた。なお、この透過量には、濃度差と圧力差による両透過量が含まれる。そこで、拡散試験結果と透気試験結果からそれぞれの透過量を求める方法を検討した。

b) 透気係数の算定方法

濃度拡散の場合の定常状態における酸素濃度分布の概念を、図3に示す¹²⁾。

ここで、ΔC₁：濃度差、L'：境界膜を含んだ供試体の厚さ、L：供試体の厚さ、δ_N、δ_o：窒素ガス側、酸素ガス側の境界膜の厚さ、C₁：窒素ガス中の酸素濃度、C₁'：酸素ガス中の窒素濃度

定常状態において、濃度差ΔC₁における気体流れは、フィックの第一法則より、次の(3)式の関係が成り立つ。

$$\frac{Q_{\Delta C_1}}{A} = D_e \frac{\Delta C_1}{L'} \quad (3)$$

ここで、Q_{ΔC1}は次式により求められる。

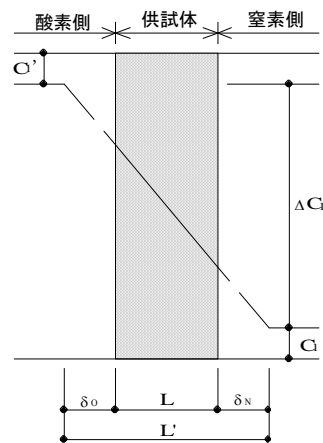


図3 拡散の場合の酸素濃度分布の概念図

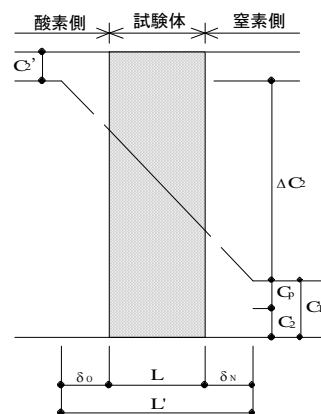


図4 拡散+透気の場合の酸素濃度分布の概念図

$$Q_{\Delta C_1} = C_1 \times R_N \quad (4)$$

ここに、Q_{ΔC1}：濃度差により透過した流量、A：断面積、De：気体の拡散係数、R_N：窒素ガス流量

濃度差ΔC₂、圧力差にΔPの場合の酸素濃度分布の概念を図4に示す。図中の記号を以下に示す。

ΔC₂：濃度差、C₂：濃度拡散により透過した窒素ガス中の酸素濃度、C₂'：酸素ガス中の窒素濃度、C_P：圧力差により透過した窒素ガス中の酸素濃度、C_T：測定される窒素ガス中の酸素濃度

定常状態において圧力差にΔPにおける気体の流れは、ダルシーの法則より次の(5)式となる。

$$\frac{Q_{\Delta P}}{A} = \frac{ke}{\mu} \frac{P_1^2 - P_2^2}{2LP_2} \quad (5)$$

ここで、Q_{ΔP}は次式により求められる。

$$Q_{\Delta P} = C_P \times R_N \quad (6)$$

$$C_P = C_T - C_2 \quad (7)$$

ここに、Q_{ΔP}：圧力差により透過した単位時間

表 1 試験供試体の種類

種類	材齢	供試体の種類 (注)	養生方法
コンクリート C15 C30 C45	11 日～ 54 日	①・②：円柱供試体 ①・②：曲げ供試体 ①：厚さ別供試体 ①：拡散・透気供試体 ②：透水供試体 ③：内部空洞供試体	トレント法 水分法 拡散・透気法 透水法 中性化
モルタル M15 M30 M45	11 日～ 78 日	①・②：円柱供試体 ①・②：曲げ供試体 ①：厚さ別供試体 ①：拡散・透気供試体 ②：透水供試体 ③：内部空洞供試体	トレント法 水分法 拡散・透気法 透水法 中性化

(注) ①透気性・拡散係数、②中性化深さ・透水性・圧縮強度、
③縮固め度 (内部空洞)

表 2 試験供試体の配合

記号	呼び強度 (N/mm ²)	W/C (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤 (AE 減水剤)
							粗砂	細砂		
M15	15	80	-	-	270	337	1045	451	-	3.37
M30	30	55	-	-	270	491	955	413	-	4.91
M45	45	35	-	-	292	833	720	312	-	8.33
C15	15	80	20	48.8	165	206	639	276	1002	2.06
C30	30	55	20	45.7	163	296	576	249	1023	2.96
C45	45	35	20	38.2	174	497	497	430	1040	4.97

あたりの流量、 k_e ：透気係数、 P_1 ：酸素ガス側の圧力、 P_2 ：窒素ガス側の圧力、 μ ：気体の粘性係数 C_2 は濃度勾配に比例することから、拡散試験で得られた C_1 、濃度差 ΔC_2 、圧力差に ΔP における試験によって得られた C_T より、(8)式で求まる。

$$C_2 = \frac{1 - C_T}{1 - C_1} C_1 \quad (8)$$

(8)式で算出した C_2 、測定された酸素ガス側圧力 (P_1) および窒素ガス側圧力 (P_2) を(5)～(7)式に代入すると、透気係数 (k_e) は求まる。

3. 平成 21 年度の試験概要

(1) 試験の概要

表 1 は、平成 21 年度に実施した試験供試体の種類であり、耐久性に関連する①透気性 (K 値、透気係数)・拡散係数、②中性化深さ・透水性・圧縮強度、③縮固め度 (内部空洞) とトレント法による K 値との関係を求めた。それぞれの試験供試体の配合は、表 1、表 2 に示すように、水セメント比 35%、55%、80% の 3 種類のコンクリート (記号：C15、C30、C45) と同水セメント比で粗骨材を除いたモルタル 3 種類 (記号：M15、M30、M45)、計 6 種類とした。

(2) 透気性 (K 値、透気係数)・拡散係数の試験

乾燥にともなうトレント法による透気係数の変化を測定するとともに、乾燥にともなう供試体内の脱水量、水分量、透気係数、および拡散係数の分布を測定し、トレント法による透気係数とそれぞれの関係を明らかにするため検討を行った。

供試体は、まず、コンクリート (モルタル) を 15×15×60cm の鋼製型枠に打設し、翌日脱型し作製した (曲げ供試体)。次いで、温度 20℃ の恒温槽でコンクリートは材齢 4 日まで、モルタルは 28 日まで水中養生した。水中養生後、図 5 に示す

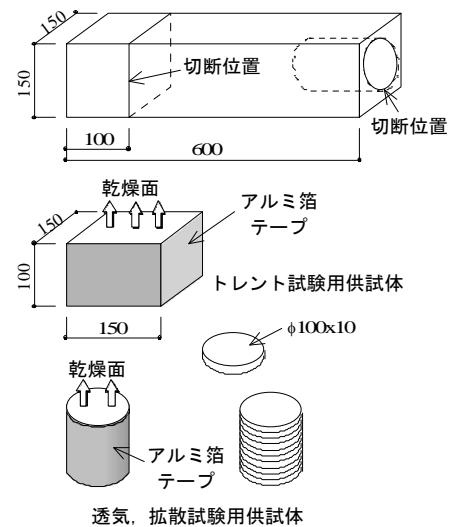


図 5 透気性・拡散係数の試験供試体

ように、トレント試験に使用する供試体は、曲げ供試体 (150×150×600mm) を 150×150×100mm にコンクリートカッターで切断して作製した。その後、側面底面をアルミ箔テープで養生し、1 面から乾燥するようにした。

乾燥にともなう供試体内の透気係数および拡散係数の分布を測定するため実験用供試体は、まず、図 5 に示すように、曲げ供試体の側面を直径 100mm 高さ 200mm の円柱を切り出した。次に、このコアを輪切りにし、厚さ約 10mm に切断した。それぞれ、厚さ、水中質量、表乾質量測定後、10 枚重ね、直径 100mm、高さ 100mm の円柱供試体を作製した。なお、トレント供試体と乾燥条件を合わせるため、側面底面をアルミ箔テープで養生し、1 面から乾燥するようにした。いずれの供試体とも乾燥は、温度 20℃、湿度 60%R.H. の恒温恒湿室で行った。乾燥期間は、モルタルは、28、49 日間、コンクリートは、7、24、49 日間とし、乾燥後それぞれの試験を行った。

透気性・拡散係数の試験用供試体は、所定の期間乾燥後、アルミ箔テープを剥がし、一枚一枚質

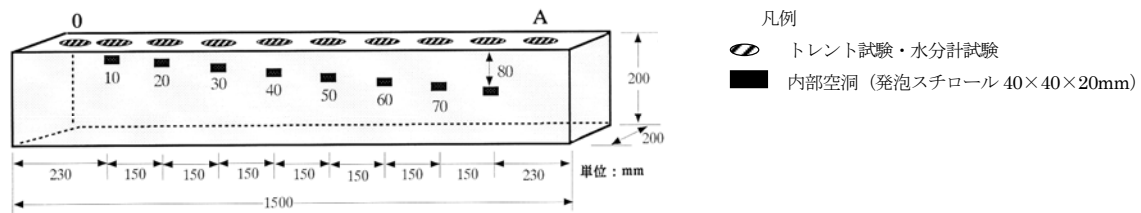


図6 締固め度（内部空洞）の試験供試体

量を測定し、乾燥の程度を明かにするとともに、水分計（高周波容量式水分計 HI-500）で水分量を測定後、トレント法、拡散法および透気法によって K 値、気体の拡散係数および透気係数を測定した。

(3) 中性化深さ・透水性・圧縮強度の試験

試験は、4 日間水中養生のコンクリート C15、C30、C45 および 28 日間水中養生のモルタル M15、M30、M45 で製作した曲げ供試体（15×15×60cm、片側側面・下面をアルミシールで被覆）および透水試験供試体（Φ15×40cm、側面・下面をアルミシールで被覆）を、乾燥材齢 1W、2W、4W、7W で行った。

トレント法・水分計法は、曲げ供試体側面の左右と上面の左右の 4 箇所測定した。水分計法は、各測定面で 3 回測定した平均値を水分量とした。次に、曲げ供試体左右の側面から直径 100mm 高さ 200mm のコアを切り出し、中性化深さ（JIS A 1152）、コア圧縮強度（JIS A 1107）の試験を行った。

透水性は、JIS A 1404 に準じ、供試体の上下両面の中央に径 5 cm の透水円孔をもつゴムガasket を当て均一に締め付けた後、294 kPa の水圧を 1 時間かけ透水量 (g) を測定する方法で試験した。

(4) 締固め度（内部空洞）の試験

コンクリート表面のかぶり部に、打込み時の締固め不足により内部空洞が生じている場合を想定し、この空洞の深さ・位置を検出できるかを試験したものである。内部空洞は、図 6 に示す 200×200×1500mm の試験供試体用の内部に設置した 40×40×20mm の発泡スチロール（深さ 10～80mm で間隔 150mm の 8 箇所）で、代表させた。

配合は、コンクリート C 15、C 30、C 45 およびモルタル M 15、M 30、M 45 とし、それぞれ 1 体供試体を製作した。供試体は、4 日間湿潤養生

後、打設上面以外にアルミシールを貼り、恒温室（温度 20℃、湿度 60%）で試験した。

4. 平成 21 年度の試験結果

(1) 透気性（K 値、透気係数）・拡散係数の試験結果

a) 透気試験方法の検証

本論提案の透気試験方法を検証するため、モルタル M15、M30、M45 を用いて透気試験を実施した。試験片は、すべて温度 105℃で 24 時間乾燥した絶乾状態で行った。検証は、それぞれ拡散試験を行った後、5 種類の圧力差により透気試験を行い、圧力勾配と流束の関係、圧力勾配と透気係数の関係を検討し、その影響がないことを明らかにすることにより行った。

図 7 はそれぞれの配合の圧力勾配と流束の関係を示す。いずれの配合も、流束は圧力勾配に比例することが分かる。なお、図中の直線は、実験結果を原点を通る直線に最小自乗近似した結果である。図に示すように、流束は圧力勾配にほぼ比例することが明らかとなった。

図 8 はそれぞれの配合の圧力勾配と透気係数の関係を示した。図より、圧力勾配に影響されずほぼ一定値を示していることが分かる。

以上のことより、本透気試験方法で透気係数を求めることが可能であることが明らかとなった。

b) 乾燥期間中の質量変化と供試体内の乾燥

拡散試験および透気試験に使用する供試体 10 枚をアルミ箔テープで養生した円柱供試体の乾燥にともなう質量変化を測定した。結果の一例として、モルタルの質量変化を図 9 に示す。なお、アルミ箔テープを剥がす際、試験片の表面部分の一部がアルミ箔テープについたため、質量変化を脱水量とするとやや過大に評価していることになるが、ここでは両者を等しいと仮定して以下検討した。図に示すように、低水セメント比で高強度の配合ほど同一乾燥期間では質量変化が小さく、乾燥が進みにくくなった。

拡散試験および透気試験に使用する供試体は

所定の期間乾燥後、アルミ箔テープを剥がし、それぞれ質量を測定し、乾燥の程度を測定した。結果の一例として、乾燥材齢 28 日におけるモルタルの結果を図 10 に示す。いずれの配合も表面に近いほど脱水量が大きく、表面から乾燥が進んで

おり、表面から 50mm 程度深部では乾燥がほとんど進んでいない。また、低水セメント比で高強度の配合ほど乾燥の程度が全体に小さくなっている。

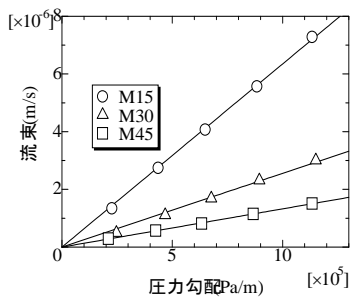


図7 圧力勾配と流束の関係

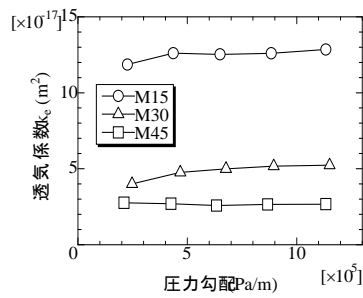


図8 圧力勾配と透気係数の関係

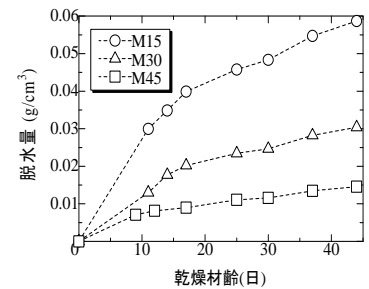


図9 乾燥収縮と脱水量の経時変化

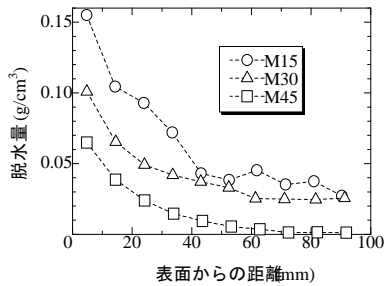


図10 供試体内の脱水量の分布 (モルタル乾燥収縮 49日)

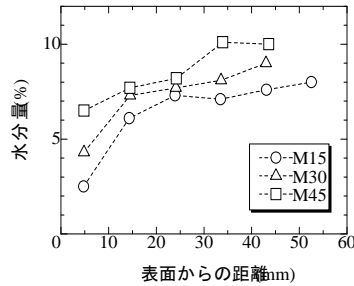


図11 供試体内の脱水量の分布 (コンクリート乾燥収縮 49日)

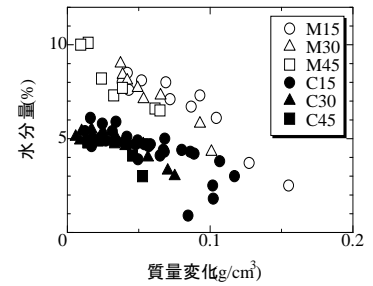


図12 供試体内の脱水量と水分量の関係

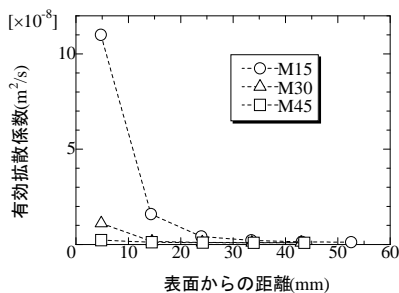


図13 供試体内の有効拡散係数の分布 (モルタル乾燥収縮 49日)

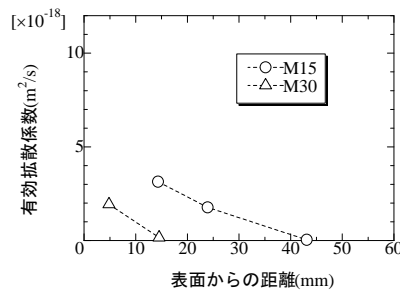


図14 供試体内の有効拡散係数の分布 (コンクリート乾燥収縮 49日)

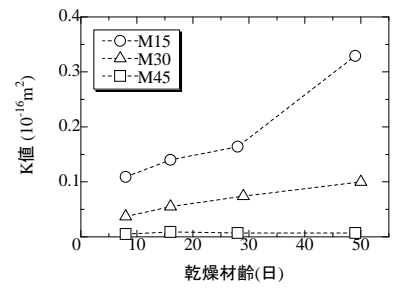


図15 乾燥収縮とK値の関係

c) 供試体内の乾燥の程度

図11に水分計で測定した供試体内の水分量分布を示す。図は、乾燥材齢49日におけるモルタルの結果である。図10と比較すると水分計により、乾燥の程度がおおよそ測定されていると考えられる。そこで、今回の実験で得られたモルタル、コンクリートの全データにおける各供試体の脱水量変化と水分量の関係を図12に示す。両者の関係は、ほぼ比例の関係にあるが、コンクリートとモルタルでは比例係数が異なる関係となった。

d) 供試体内の乾燥と気体拡散係数および透気係数

乾燥材齢49日におけるモルタルの拡散係数の供試体内の分布を図13に示す。各配合とも乾燥が進んでいない深部では、拡散係数の値は0に近い値を示し、表面になるほど乾燥が進んでいるため大きな値となった。当然のことながら、高水セメント比ほど乾燥が進んでいるため、拡散係数も大きくなった。また、M45においては、もっとも乾燥が進んでいる表面部分においても拡散係数

の値はかなり小さい値を示した。

図14に乾燥材齢49日におけるモルタルの透気係数の供試体内の分布を示す。図にはM45の実験結果を示していないが、気体の透過量が小さな為に、本試験方法では、測定できなかったため、示していない。図に示すように、供試体内の透気係数の分布も拡散係数とほぼ同じ傾向を示した。

e) トレント透気係数と透気係数、拡散係数の関係

モルタルの乾燥期間とK値の関係を図15に示す。乾燥期間が長くなるほどトレント透気係数も大きな値となっている。同一乾燥期間では、高水セメント比ほど大きな値となり、M45はM15に比べかなり小さな値となった。

トレント透気試験は、図1に示すように、コンクリート表面から気体を吸引し、透気係数を求める試験方法である。図13、図14に示すように、気体の透過する範囲は、乾燥が進んでいる表面部分であると考えられる。そこで、最表面の透気係数とK値の関係について検討した。図16に両者

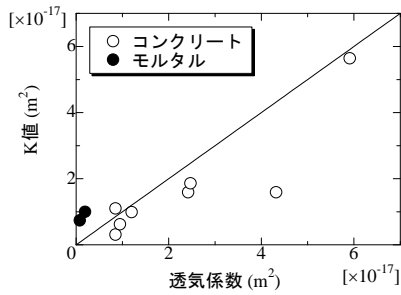


図 16 透気係数と K 値の関係

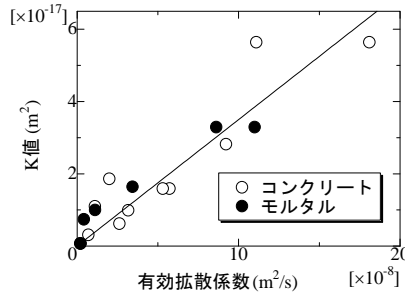


図 17 有効拡散係数と K 値の関係

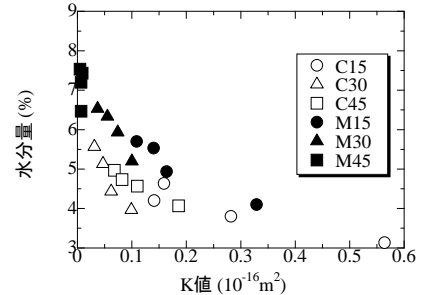


図 18 K 値と水分量の関係

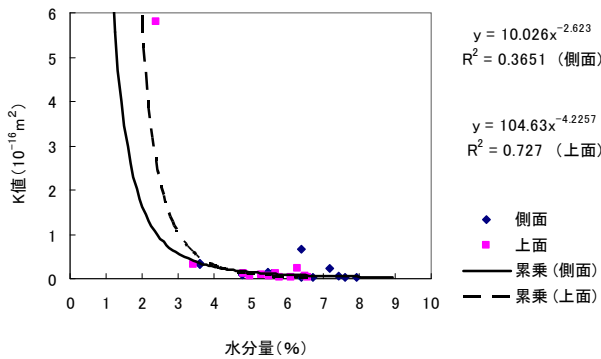


図 19 水分量と K 値の関係(モルタル)

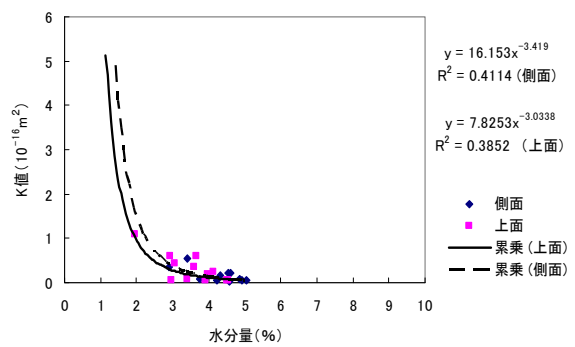


図 20 水分量と K 値の関係 (コンクリート)

の関係を示す。図中の直線は両者の関係が 1 対 1 に対応すると仮定した場合である。図中には、モルタルとコンクリートで記号を分けて示している。実験データが少ないが、ほぼ両者の関係は図中の直線に近い値を示している。本実験は乾燥材齢 49 日までの結果であり、更に乾燥が進み、深部まで乾燥した場合にはこの傾向は異なってくると考えられるが、本実験の範囲内では、表面から 10mm の範囲でトレント試験が影響されることが考えられる。

透気係数と同様に、最表面の拡散係数と K 値の関係は、図 17 に示すように、両者の関係はほぼ直線関係となった。両者の関係を最小自乗近似した結果、以下の関係が得られ、相関係数は、0.93 とかなり高い相関を示した。

$$k_t = 3.50 \times 10^{-10} \times D。 \quad (9)$$

これらのことより、トレント法により供試体内の拡散係数が推定できることが明らかとなった。

f) K 値と水分分布の関係

トレントは、K 値とコンクリート中の電気抵抗 (Wenner 法) の関係より、コンクリートを 5 段階に評価する方法を提案している。これは、K 値がコンクリート自身の緻密性以外に乾燥にも大きく影響するためと考えられる。そこで、本研究においても、水分計で測定した供試体内の水分量分布と K 値の関係を検討した。結果を、図 18 に示す。モルタルとコンクリートでは異なる傾向を示すものの、モルタルおよびコンクリートそれぞれ

では配合によらず、ほぼ一本の曲線で表されることが明らかとなった。

(2) 中性化深さ・透水性・圧縮強度の試験結果

a) 中性化深さ・透水量の試験結果

中性化深さは、本試験の材齢では 0 であった。K 値と水分量との関係は、水分量 3%程度を変曲点として水分量の減少に伴い K 値が増加する高度の相関が認められ、モルタルとコンクリートでは、モルタルの方が水分量が多いため K 値が低くなっている (図 19、図 20 参照)。

一方、透水量が増加すると、透気係数である K 値が増加する高度の相関関係が認められ、モルタルとコンクリートの同じ透水量を見比べると、モルタルの方が、K 値が大きくなっている (図 21、図 22 参照)。

b) コア圧縮強度の試験結果

透気係数である K 値は、コア圧縮強度との関係を求めると、K 値が大きくなる (透水量が増加し、水分量が減少する) と強度が低下する傾向が求められ、モルタルとコンクリートでは、同じ K 値を見比べるとモルタルの方が両面と分の残留量が多いため、水分量が多く透気係数も圧縮強度が高くなっている (図 23、図 24 参照)。

一方、水分量が多くなるとコア圧縮強度が大きくなる関係が認められ、モルタルとコンクリートでは、モルタルの方が水分量は多く含んでおり、それに伴って圧縮強度が高くなる傾向になっている (図 25、図 26 参照)。すなわち、水セメント比が小さく高強度のコンクリートは、組織が緻密

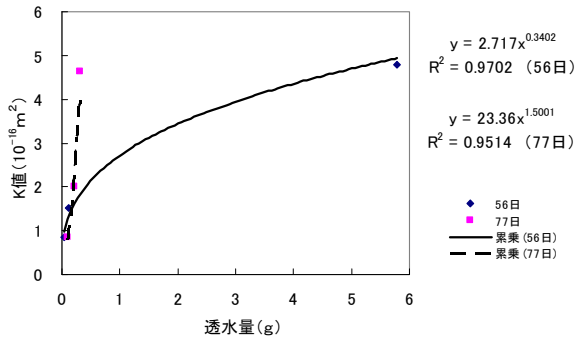


図 21 透水量と K 値の関係(モルタル)

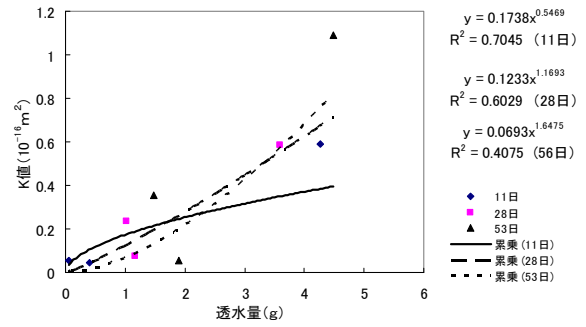


図 22 透水量と K 値の関係(コンクリート)

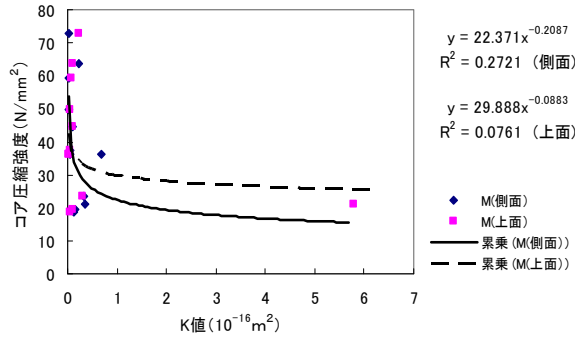


図 23 K 値とコア圧縮強度の関係 (モルタル)

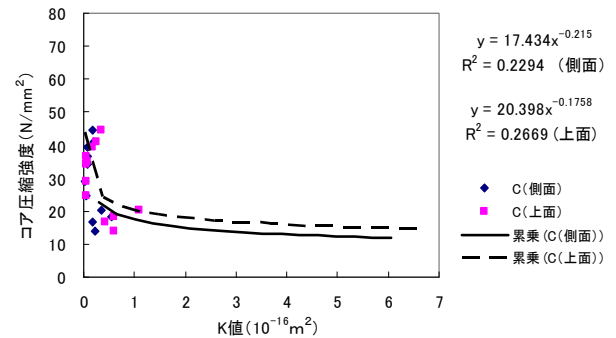


図 24 K 値とコア圧縮強度の関係(コンクリート)

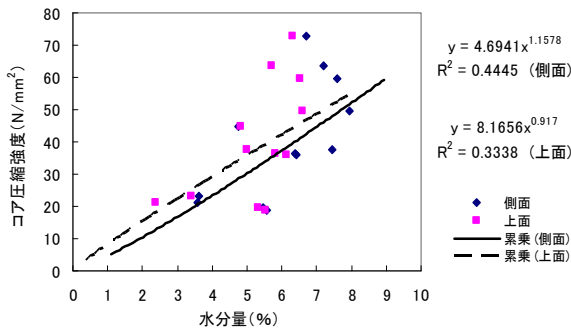


図 25 水分量とコア圧縮強度の関係(モルタル)

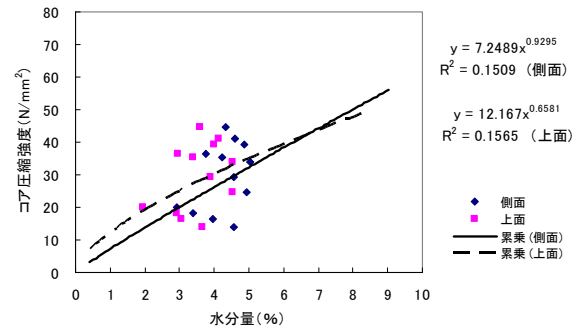


図 26 水分量とコア圧縮強度の関係(コンクリート)

なため水分の蒸発、拡散が少なく水（透気性）が小さくなっており、結果的に高強度となる関係が示されている。

(3) 締固め度（内部空洞）の試験結果

a) 内部空洞深さの試験結果

水分量の変化は、図 27～図 29 に示すように、コンクリートよりモルタルの水分量が約 1.5%多く、湿潤養生終了時から急激に減少し、材齢 10 日頃からは徐々に減少していることが判明した。全体的には、材齢 11 日：約 5.5%、材齢 31 日：約 4.5%、材齢 53 日：約 4.0%となっている。また、水分量は、内部空洞深さとの関係が認められず、ほぼ一定の値となっている（図 28～図 29 参照）。

全体の内部空洞箇所（深さ 10mm）における K 値の変化は、材齢が経過すると水和反応が進行し組織が緻密になるが、乾燥により水分量が減少す

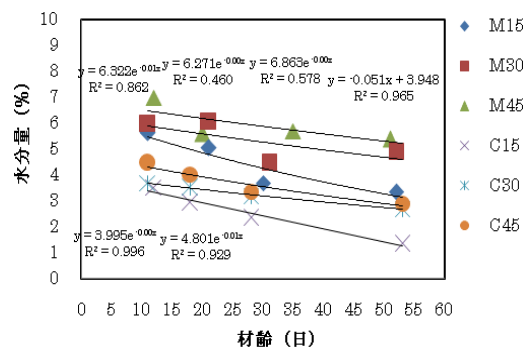


図 27 材齢と水分量の関係（内部空洞深さ 10mm）

るため、K 値が高くなっている（図 30 参照）。内部空洞深さと K 値との関係は、材齢 11 日～12 日、28 日～31 日のいずれも内部空洞 10mm の K 値が大きく測定され 30mm 以降ではほぼ一定の値となっており、深さ 20mm 箇所にある空洞まで検出できることが示されている（図 31、図 32 参照）。

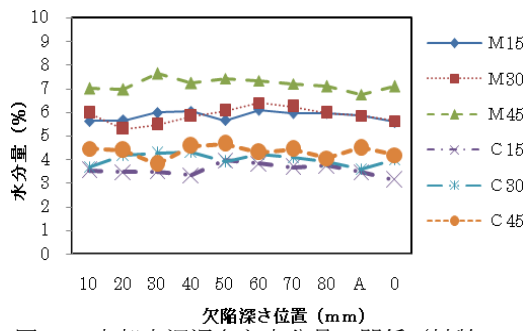


図 28 内部空洞深さと水分量の関係 (材齢 11~12 日)

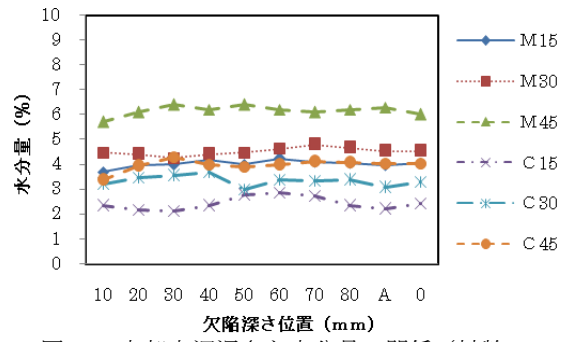


図 29 内部空洞深さと水分量の関係 (材齢 28~31 日)

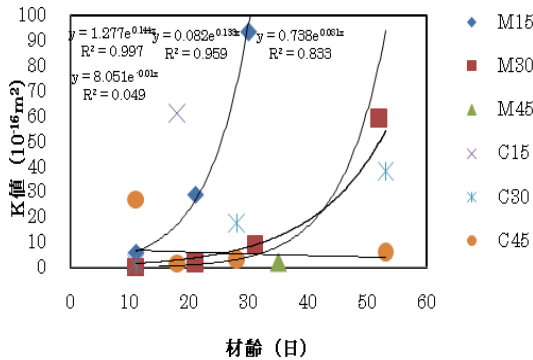


図 30 材齢と K 値の関係 (内部空洞深さ 10mm)

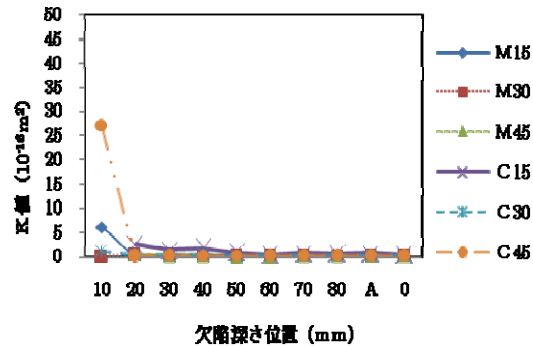


図 31 内部空洞深さと K 値の関係 (材齢 11~12 日)

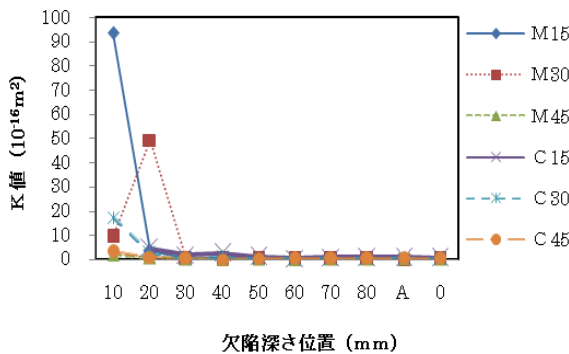


図 32 内部空洞深さと K 値の関係 (材齢 28~31 日)

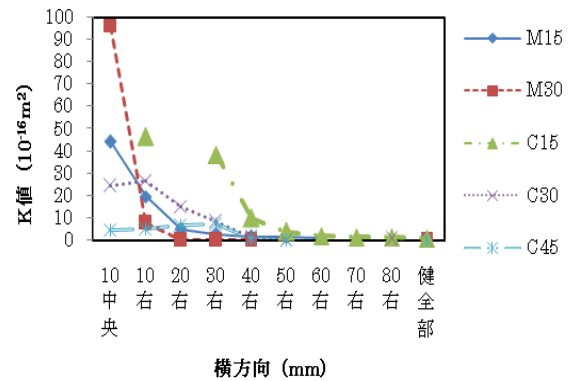


図 33 内部空洞位置と K 値の関係 (深さ 10mm)

b) 内部空洞位置の試験結果

内部空洞位置試験は、モルタル：材齢 79 日、コンクリート：材齢 51~55 日の供試体を用いて、内部空洞深さ 10 mm と 20 mm の箇所の中央位置から横方向へ 10 mm ごとに移動させて K 値が健全全部と変わらない値になるまで、K 値を測定した (図 33~図 34 参照)。内部空洞位置と K 値の関係は、欠陥深さ 10 mm のとき M30 は 30 mm 横まで影響を受けていたが、欠陥深さ 20 mm のとき 20 mm 横で影響は止まった。

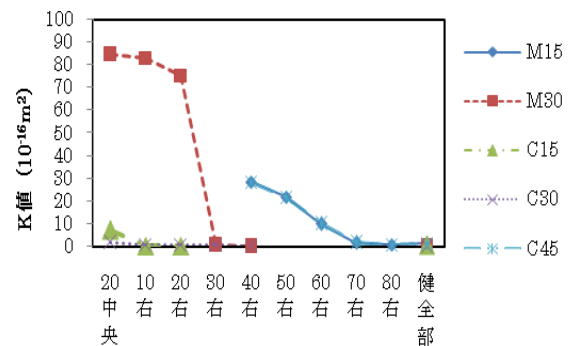


図 34 内部空洞位置と K 値の関係 (深さ 20mm)

5. 耐久性等の試験結果の総合解析

(1) 解析データ

耐久性等に及ぼす要因を検討するため、平成 21

年度に加え、平成 15~20 年度に本試験で蓄積された試験条件のデータと合わせ、表 3 に示す試験供試体について総合的な解析を行った。

K 値 (10^{-16} m^2)、中性化深さ TYU (mm)、コ

表3 試験供試体の種類(平成15~21年度)

コンクリートの種類	水セメント比(%)	材齢	供試体の種類	養生方法
普通15	86	1週	曲げ供試体 柱部材 床部材	屋内(空气中) 屋内(湿潤養生5日) 屋内(養生剤塗布) 屋外
普通20	63	2週		
普通25	54	4週		
普通30	52	7週		
普通40	38	10週		
普通45	37	2年		
普通50	31	3年		
普通60	30	4年		
		5年		
		6年		
		7年		

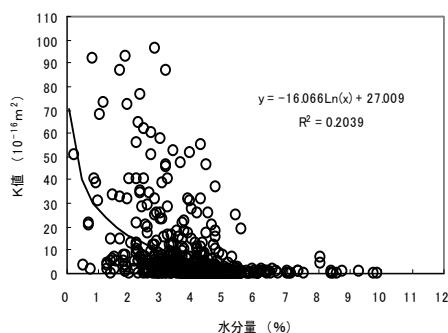


図35 水分量とK値の関係

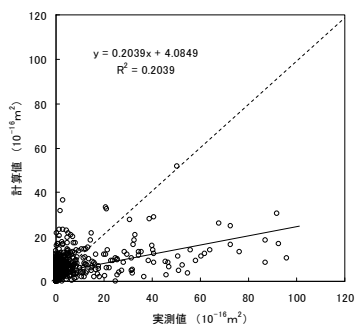


図36 (10)式の実測値と計算値

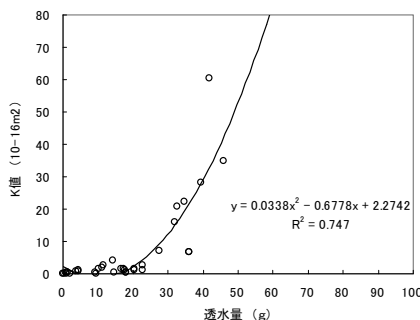


図37 透水量とK値の関係

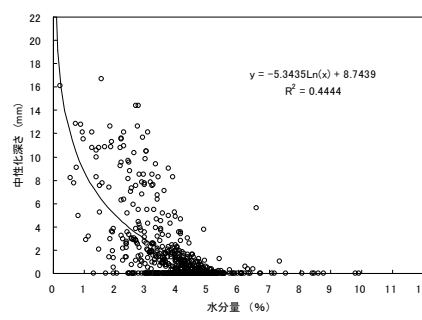


図38 水分量と中性化深さの関係

ア圧縮強度 F_c (N/mm^2) を目的変数とし、水分量 SUI (%)、材齢 ZA (日)、供試体の種類 DAS (1: 曲げ供試体・床供試体、2: 柱供試体)、養生条件 YO (1: 空气中、3.5: 養生剤 $200g/cm^2$ 、4: 5日間湿潤養生)、測定場所 SO (1: 床供試体、2: 柱供試体上部、3: 曲げ供試体、4: 柱供試体下部) を説明変数として重回帰分析 ($F_{in}=F_{out}=2.0$ 、変数増減法、n: データ数、R: 重相関係数、es: 残差の標準偏差) を行った。

(2) K値および透水量に及ぼす要因

平成15~21年度の試験結果から、K値に及ぼす要因としては、水分量との相関が一番高いことが判明した(図35、(10)式・図36参照)。

$$K = 27.010 - 36.992 \log_{10}(SUI) \quad (10)$$

(17.3) (-14.5)

$$(n=824 \quad R=0.4515 \quad es=11.155 \times 10^{-16} m^2)$$

また、透水量とK値との関係は、平成20~21年度の試験結果から、図37に示すように、透水量20g程度を変曲点として透水量の増加に伴いK値が増加する高度の相関が認められる。図35・図37から、「透水量が多いほどコンクリート中の空隙が多くK値が大きくなる」、一方、「水分量が少ないほどコンクリート中の空隙が多くK値が大きくなる」という相互の関係が求められ、透水性と透気性との相互の関係が示されている。

(3) 中性化深さに及ぼす要因

平成16~20年度の中性化深さの試験結果とK値などとの関係を求めるため、重回帰分析を行っ

た。その結果、中性化深さと相関が一番高かったのは水分量であったが、水分量にK値と材齢を組み合わせることで、さらに精度のよい値を推定できる(図38、図39、(11)式・図40参照)。

$$TYU = 5.2699 - 8.6246 \log_{10}(SUI) + 0.1028(ZA)^{0.5} + 0.3575 \log_{10}(K) \quad (11)$$

(12.6) (-14.0) (14.3) (3.6)

$$(n=675 \quad R=0.7591 \quad es=1.93mm)$$

(4) コア圧縮強度に及ぼす要因

平成15~21年度のコア圧縮強度の試験結果と、K値などの関係を求めるための重回帰分析を行った。(12)式から、コア圧縮強度と相関が一番高かったのはK値であったが、中性化深さ同様、K値、水分量、材齢を組み合わせることで、さらに精度のよい値を推定できる(図41、(12)式・図42参照)。

$$F_c = -0.3728 - 6.7464 \log_{10}(K) + 7.5636 \log_{10}(ZA) + 30.158 \log_{10}(SUI) \quad (12)$$

(-0.15) (-13.7) (13.7) (9.94)

$$(n=820 \quad R=0.7036 \quad es=9.955 N/mm^2)$$

6. 構造物中コンクリートの耐久性の非破壊検査法の提案

現場で測定したトレント法の透気係数K値は、現場で測定不能な有効拡散係数、透気係数 K_e 、透水量、締固め度(内部空洞の有無)を推定でき

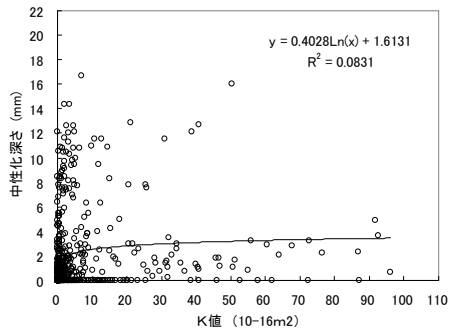


図 39 K 値と中性化深さの関係

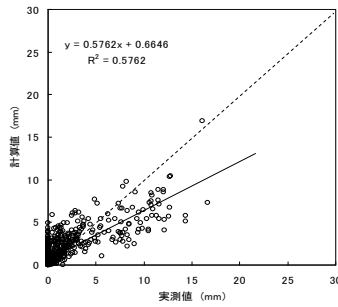


図 40 (11)式の実測値と計算値

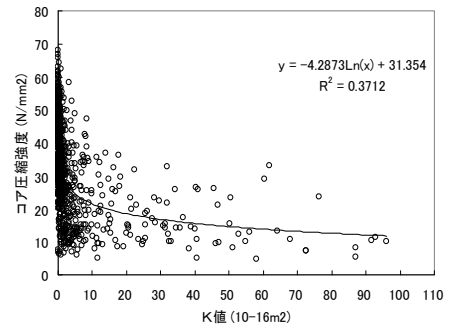


図 41 K 値とコア圧縮強度の関係

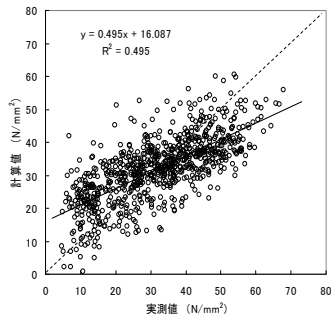


図 42 (12)式の実測値と計算値

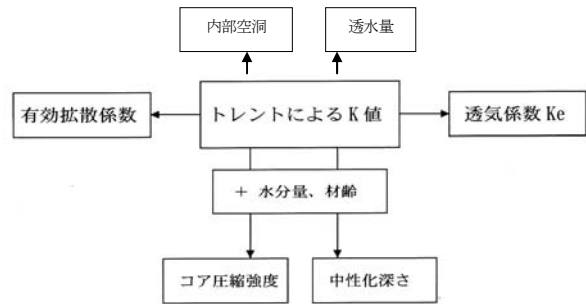


図 43 トレント法による透気係数K値と耐久性との関係

る。さらに、中性化深さ、コア圧縮強度については、K値に水分量、材齢を組み合わせた複合法で推定計算することによって高精度化が図られ、図43による非破壊検査法が提案される。

7. 結論

本研究の結果、次の結論が得られた。

- (1) トレント法のK値（透気係数）は、気体の透気係数（透気性）、拡散係数、透水量（透水性）との高度の相関関係が認められる。
- (2) 中性化深さ、コア圧縮強度は、K値との相関関係が認められ、水分量、材齢を組み合わせた複合法で推定計算することによって高精度化が図られる。
- (3) K値は、締固め度試験の結果、内部空洞深さ20 mm程度まで測定が可能であり、また、内部空洞位置をほぼ測定できる。
- (4) トレント法による構造物中コンクリートの耐久性の非破壊検査法は、規格化の見込みが確実であり、コンクリートの品質向上が期待される。

参考文献

- 1) 氏家勲・長瀧重義：コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究、土木学会論文集、第396号/V-9、1988年8月
- 2) 小野聖久・上東泰・紫桃孝一郎・原島実：コンクリートの密実性評価に関する研究、土木学会第57回年次学術講演会、pp.1043-1044、2002年9月
- 3) 土木学会コンクリート委員会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集、コンクリート技術シリーズNo. 80、土木学会、2008年4月
- 4) R. J. Torrent：A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, No. 150, pp. 358-365, July 1992
- 5) 杉功太郎・豊福俊泰・佐藤武夫：透気性試験による構造物中のコンクリートの耐久性検査法に関する研究、平成12年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、第1分冊、pp. A-576～A-577、2001年3月
- 6) 透気試験機トレント、富士物産株式会社カタログ、2001年8月
- 7) 富基次・豊福俊泰・亀井頼隆：透気性試験による構造物中のコンクリートの耐久性検査法に関する研究、平成13年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、第1分冊、pp. A-574～A-575、2002年3月
- 8) 特許「構造物のコンクリートの圧縮強度推定方法」、特願2002-064329、特許第4009118号（発明者：豊福俊泰）、2007年9月
- 9) 渡辺大輔・豊福俊泰・亀井頼隆：エコーチップ法およびトレント法による構造物中のコンクリートの耐久性試験法、平成16年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp. 855～856、2005年3月
- 10) 塩屋陽平・豊福俊泰：エコーチップ法・トレント法・水分計法による構造物中のコンクリートの品質試験法、平成17年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp. 905～906、2006年3月
- 11) JCI-DD5 酸素の拡散係数試験方法（案）、日本コンクリート工学協会、耐久性診断研究委員会報告書、pp. 29-36、1989年6月
- 12) 白川敏夫、島添洋治、麻生實、永松静也：セメントペースト硬化体中の乾燥の程度と気体拡散係数の関係、日本建築学会構造系論文集、No.524、pp.7-12、1999年10月

