

欠陥を有するモルタル試験体の透気性に関する一考察

A Study on Air Permeability of Mortar Considering at Aggregate-Cement Pest Interface and Internal Crack

塚 原 絵 万*・加 藤 佳 孝**・魚 本 健 人***

Ema TSUKAHARA, Yoshitaka KATO and Taketo UOMOTO

1. はじめに

コンクリート中の欠陥が構造物の耐久性能の急速な低下を招く危険な因子であることは周知の事実である。しかし、欠陥を有するコンクリートの定量的な耐久性能評価は未だ確立されていない。

本研究では基礎研究としてモルタルを対象とし、潜在的欠陥である遷移帯と外力による後天的内部欠陥（表面に現れないひび割れ）の有無を要因として透気試験を行い、その影響度および評価方法について検討を行った。

2. 実験概要

試験体は普通ポルトランドセメントおよび富士川産川砂を用いたモルタルである。水セメント比は0.35・0.50、モルタル中の細骨材体積割合 V_s は0.38・0.48・0.58とした。試験体はブリケット供試体により作成し、28日まで水中養生を行った後、直接引張荷重により内部欠陥を付与した。供試体および荷重治具を図1に示す。直接引張試験では荷重時の偏心が問題となるが、これを防ぐため、治具と試験体との間にシリコングリースを塗布したテフロンシートを挟んだ。内部欠陥の付与は強度比（=負荷荷重/引張強度）を0.65および0.85まで荷重することにより制御し、ひずみゲージ（検長10mm）により除荷後の残留ひずみを測定した。除荷後、図2左に示すようにブリケット供試体の中央部分（治具接触部の間）を切り出して、これを透気試験体とした。試験体は湿度50%、40°Cおよび65°Cの順にそれぞれの環境下で恒量となるまで乾燥し、これを絶乾状態として透気試験を行った。乾燥終了後、アクリル円板内にシリコンゴムを用いて固定した（図2右）。透気試験装置を図3に示す。試験セルは透気試験体を固定

したアクリル円板をシリコンゴムにてアクリル製セルに設置し作成した。流入空気中の二酸化炭素および水分を除去するため、セル内部にソーダ石灰とシリカゲルを配した。空気圧は圧力弁制御により0.15 N/mm²一定とし、透気方向は試験体打設面から型枠下面とした。透気係数は定常時の透過空気量から式(1)を用いて算出した¹⁾。

$$K = \frac{2LP_2 \gamma_A Q}{P_1^2 - P_2^2 A} \dots \dots \dots (1)$$

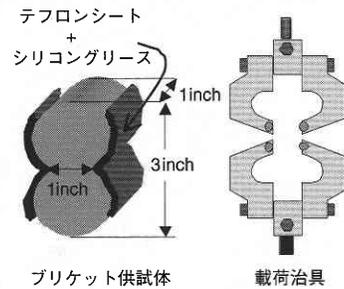


図1 直接引張試験

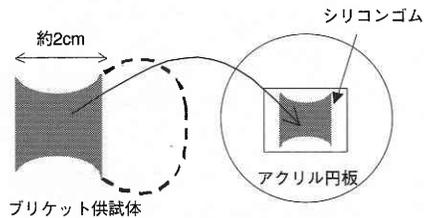


図2 透気試験体概要

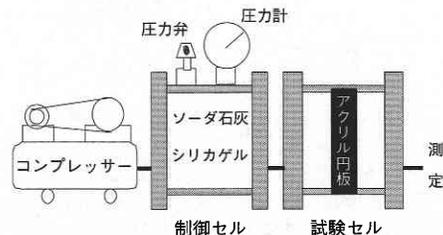


図3 透気試験装置

*東京大学大学院工学系研究科
**国土交通省国土技術政策総合研究所
***東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

研究速報

ここに、 K ：透気係数 (cm/sec), L ：供試体厚さ (cm), P_1 ：載荷圧力 (kgf/cm²), P_2 ：大気圧 (kgf/cm²), γ_A ：空気の単位体積重量 (= 1.205 × 10⁻⁶kgf/cm³), Q ：透気量 (cc/sec), A ：透気面積 (cm²)

3. 欠陥を有するモルタルの透気性に関する実験的検討

3.1 潜在的欠陥を有する場合

図4に細骨材体積割合と透気係数の関係を示す。図中の換算透気係数とはセメントペースト単位体積あたりの透気係数 $K/(1-V_s)$ を表す。モルタル中で透気性を持つ構成要素はセメントペーストの空隙のみと仮定すると、 $K/(1-V_s)$ は骨材量によらず一定となるはずである (水メント比 0.35 参照)。しかし、水メント比 0.50 の場合、設定した細骨材体積割合 V_s は遷移帯連結率が急激に増加する範囲にあり²⁾、連結による連続空隙が气体の透過を受け持つようになったため、ペースト単位体積あたりの透気係数は見かけ上大きくなり、骨材量に伴って増加する傾向を示した³⁾と考えられる。

3.2 外力による欠陥を有する場合

図5に引張応力を付与したモルタル試験体の残留ひずみと透気係数比 (無載荷時の透気係数に対する割合) の関係

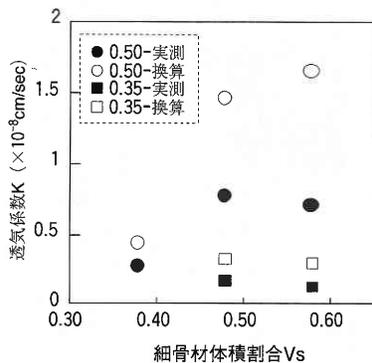


図4 細骨材体積割合と透気係数の関係

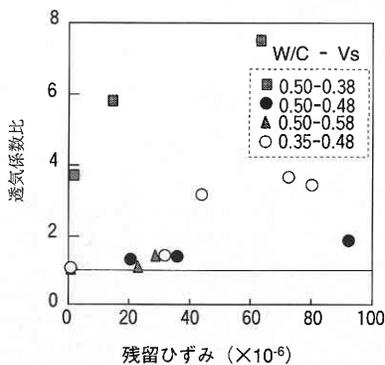


図5 残留ひずみと透気係数比の関係

を示す。残留ひずみは試験体の塑性変形量を表すと考えると、応力の付与によりモルタルの透気係数は増加し、それは試験体の塑性変形分に依存することが分かる。つまり、塑性変形分が多い程、内部欠陥が存在することが考えられる。また、その増加割合は水セメント比の違いおよび細骨材体積割合 V_s 、すなわち遷移帯の有無と連結性により異なることが考えられる。

以上の実験結果をもとに、次節において潜在的・後天的内部欠陥を有するモルタルの配合および欠陥量と透気性状の関係について、解析的に検討を行った。

4. 欠陥を有するモルタルの透気性に関する解析的検討

4.1 解析モデル

図6に解析モデルの概要を示す。解析モデルはセメントペースト、細骨材、および遷移帯により構成され、さらに内部欠陥を考慮した2次元格子状細管で表現されるとした。細骨材はモデル内にランダムに配置し、遷移帯は細骨材全周囲に厚さ 50 μm 一定で存在するとした。内部欠陥は塑性ひずみによる欠陥数の差を表現するために、接点 i を基点とする欠陥範囲を順に拡大することにより設定した。ここで、接点 i はモデル中で最小骨材間距離を形成する接点群からランダムに選択される。これは、骨材周囲に存在する遷移帯がモデル中の最弱点部であり、その距離が短い要素ほど破壊しやすいと考えたためである。欠陥は設定距離を半径とする範囲内 (図6参照) の接点に属するセメントペースト要素、および遷移帯要素に発生する。なお、単位設定距離 (距離 "1") はセメントペースト要素の設定サイズに依存する。以上の欠陥発生条件により、硬化体中の欠陥の先端から微細ひび割れが成長し、骨材と比較してセメントペーストおよび遷移帯により構成される部分が破壊しやすいという現象を簡単に表現した。硬化体内の細孔構造を反映する形で透気係数を表すと式 (2) のように表せる⁴⁾。

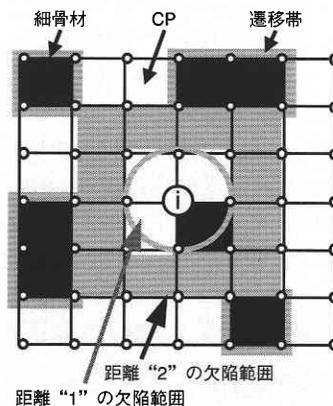


図6 解析モデル概要

$$K = \frac{c}{\mu} \frac{d^2}{\tau^2} \varepsilon \dots\dots\dots (2)$$

ここに、d：空隙径，ε：空隙率，c：形状係数，μ：粘性係数，τ：屈曲度

全構成要素において c, μ, τ は一定と仮定すると、各要素の透気係数は空隙径 d と空隙率 ε により表すことができる。

後藤⁵⁾によれば、細孔構造を表現するためには、しきい細孔径に細孔が集中すると仮定するのがよいとされている。したがって、セメントペーストおよび遷移帯のしきい細孔径を用いて、式 (2) により透気係数を算出することとした。しきい細孔径 D および空隙率 ε は、既往の研究⁶⁾を参考に表 1 のように設定した。欠陥部については、ひび割れ幅を 10 μm と設定し、他要素と同様に式 (2) により透気係数を求めた。

解析では透気試験の定常状態を再現し、質量保存則から図 7 に示す節点 i における流量の総和が 0 となるような圧力 P_i を各節点について求め、最終的に解析モデル全体の流れを表現することとした。ここで、各節点における流量が Darcy 則に従うとすれば、各節点において式 (3) が成立する。

$$\Sigma Q_i = 0$$

$$= \frac{1}{2\gamma_A L} \Sigma \frac{P(i)^2 - P_i^2}{P_i} A(i) K(i) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、P_i：i 節点の圧力，P(i)，K(i)，A(i)：i 点まわりの節点の圧力，節点間を結ぶ線分要素の透気係数，断面面積 図 6 に示したようにセメントペーストから欠陥へ変化

表-1 解析に用いたパラメータ

	CP	TZ	欠陥
ε	0.26	0.38	1.0
D (μm)	0.18	5.0	10*
透気係数 (比)	1	1000	12000

* 但し、ひび割れ幅として

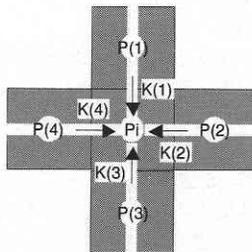


図 7 節点 i における質量保存則の概念図

した場合、欠陥前後で線分要素の断面面積が異なる。そのため、欠陥の流量の算出は、式 (4) に示すように欠陥とセメントペーストの流量の和とした。

$$Q_d = \frac{1}{2\gamma_A L} \frac{P(i)^2 - P_i^2}{P_i} \times (A_d K_d + (A_p - A_d) K_p) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、Q_d：欠陥部の流量，A_d，A_p：欠陥，CP の断面面積，K_d，K_p：欠陥，CP の透気係数全体の流れの算出として、求められた圧力 P(i) と透気係数 K(i) を用い、流入面から流出面への垂直断面における流量に関して総和を計算し、式 (1) により全体の見かけの透気係数を求めた。

解析における欠陥量の指標としては、欠陥面積 AD および欠陥面積割合 D を使用した。但し、AD および D と実験における残留ひずみの関係は現段階では考慮していないため、欠陥量の指標については今後更なる検討が必要である。

$$A_D = n_{pd} A_d + n_{id} A_i$$

$$D = \frac{n_{pd} A_d + n_{id} A_i}{n_p A_p + n_t A_t} \dots\dots\dots (5)$$

ここに A_D：欠陥面積，D：欠陥面積割合，A_d，A_i：欠陥，TZ の断面面積，n_{pd}，n_{id}：欠陥に変化した CP，TZ の要素数

4.2 解析モデルの確認

本研究では前節のような解析モデルを用いて、内部欠陥が見かけの透気係数に及ぼす影響を検討した。しかし、①解析構成要素数は妥当か、また、②欠陥表現方法は適切か、という疑問が残る。なぜなら、①取り扱う欠陥レベルに応じて健全部の移動特性の表現方法を考慮する、すなわち解析構成要素を選択する必要がある (例えば、ひび割れを有するコンクリートへの Cl-浸透の場合、ひび割れ部を境界条件とすれば、健全部はコンクリート全体の見かけの拡散係数を用いて Cl-浸透を表現することが可能⁷⁾)、②破壊の形態は透気係数に多大な影響を与える、と考えるためである。そこで、①1 要素構成と 3 要素構成、②欠陥が基点から発生する場合とランダムに発生する場合、について比較を行った。なお、要素毎の透気係数および管径は前節と同様であり、骨材割合は全て同様 (0.48) とした。1 要素構成についてはモルタル透気係数を使用した。

図 8 に各解析モデルの計算結果を示す。1 要素構成の場合、欠陥面積と透気係数比はほぼ比例関係を示した。実験結果 (図 5, W/C = 0.50 - V_s = 0.48) と比較すると、欠陥の増加に対する透気係数比の増加及び停滞は、3 要素構成において適切に表現されていることが分かる。また、欠陥の発生方法について透気係数比で比較すると、基点から発生・進展する場合の方が実験結果により近い傾向を示すことが分かる。したがって、潜在的小および後天的欠陥を有するモルタルの透気性評価に対し、構成要素数および欠陥

研 究 速 報

発生方法は、3要素-基点発生である4.1のモデル化で妥当であると考えられる。

以上をまとめると、解析において内部欠陥は見かけの透気係数（1要素構成）で表現することはできず、取り扱う欠陥レベルに応じて構成要素を細分化する必要があることを示すことが出来た。また、欠陥の表現については、実現象に近い形でモデル中の欠陥進展を表現する必要があるといえる。

4.3 内部欠陥による透気係数の増加に及ぼす配合的要因

まず、配合的要因として遷移帯の有無、すなわち水メント比について検討する。図9に欠陥面積ADと透気係数比の解析結果を示す。ここでは、遷移帯が無い場合を表現す

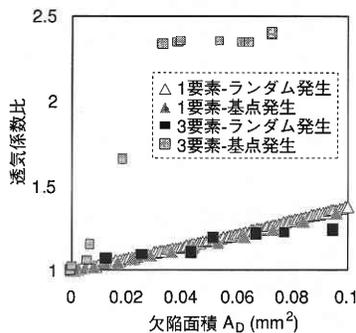


図8 各解析モデルの比較

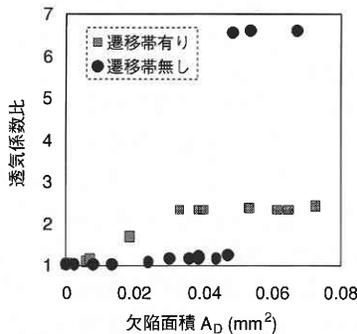


図9 欠陥面積と透気係数比 (W/Cの比較-計算値)

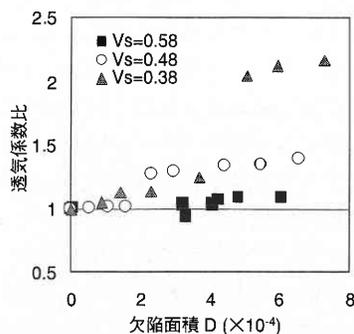


図10 欠陥面積割合と透気係数比 (Vsの比較-計算値)

るために、骨材周囲の要素にもCP透気係数を用いて計算を行った。骨材割合(=0.48)は一定であり、図中横軸の透気係数比は初期透気係数に対する割合を示す。なお、初期および欠陥を付与した場合の透気係数共に、透気係数自体は遷移帯の有る場合の方が大きい値を示すことをここに特記する。実験結果(図5)と同様、欠陥の発生に伴って透気係数比は大きくなり、また遷移帯が存在しない場合の方が透気係数比の増加割合は大きくなるのが分かる。これは、粗な領域である遷移帯に欠陥が発生する場合と比較して、CP中に欠陥が発生する場合の方が見かけ(全体)の透気係数に大きく影響を及ぼすためと考えられる。

次に、細骨材量の違いについて検討した結果を図10に示す。これも実験結果と同様に、骨材量が減少すると、欠陥の増加に伴う透気係数比の増加率が大きくなるのが分かる。前述のように遷移帯に欠陥が発生の方が、見かけの透気係数に与えるダメージは小さい。したがって、遷移帯要素が少ない、すなわちCP要素が多いほど、見かけの透気係数に対する欠陥の影響が顕著に表れるといえる。

5. ま と め

本研究では、モルタル供試体を用いて遷移帯と内部欠陥の有無を要因とした透気試験を行い、その影響度および評価方法について実験および解析的検討を行った。その結果、モルタル表面に現れない内部欠陥の危険性と、内部欠陥による透気係数の増加に及ぼす配合的要因を定量的に評価することが出来たと考える。

(2001年5月10日受理)

参 考 文 献

- 1) JCI長期耐久性に関する研究委員会：コンクリートの試験・分析マニュアル，2000.5.
- 2) 加藤佳孝，魚本健人：遷移帯の特性に着目した硬化体の物質移動特性のモデル化，土木学会論文集，No. 655/V-48，pp.13-21，2000.8.
- 3) 石田哲也，前川宏一：物質移動特性から見たコンクリートの微小空隙構造，土木学会第49回年次学術講演会概要集第5部，pp.1020-1021，1994.
- 4) 河野俊一，氏家 勲：乾燥によるコンクリートの透気係数の変化に関する研究，JCI年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.847-852，1999.
- 5) 後藤孝治：セメント水和反応の強度発現のモデル化に関する研究，東京大学学位論文，1996.
- 6) 加藤佳孝，魚本健人：数値解析による骨材表面に存在する遷移帯特性の評価に関する研究，土木学会論文集，No. 641/V-46，pp.77-86，2000.2.
- 7) 塚原絵万，魚本健人：ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋腐食に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，Vol.11 No.1，pp.75-84，2000.1.