

論文 欠陥を有するモルタル試験体の透気性に関する実験的考察

塚原絵万*1・加藤佳孝*2・魚本健人*3

要旨:本研究では、配合に伴うモルタルの圧縮・引張強度の変化を把握し、配合要因が強度に与える影響について検討を行った。その結果、細骨材周囲の遷移帯の連結による影響は、圧縮強度と比較して引張強度の方が敏感であることが分かった。また、潜在的および後天的内部欠陥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。実験結果より、骨材量の増加および試験体の塑性変形分の増加に伴い透気係数が増加することを示し、2次元格子状細管モデルにて欠陥を有するモルタルの透気性について考察を行った。

キーワード:透気性, 内部欠陥, 遷移帯, 直接引張試験

1. はじめに

現在、コンクリート構造物の設計体系が仕様規定から性能規定へと移行しつつある。このような動向の中で、平成11年度には土木学会のコンクリート標準示方書[施工編]¹⁾において、耐久性照査型と銘打つ設計手法が提案されている。しかし、現時点では耐久性照査型の設計手法が成熟しているとは言い難く、これはコンクリート技術者の共通の認識であるといえる。さらに、耐久性能の評価を設計に導入するという概念が認識されてから、構造設計との連成解析が重要であるという認識が高まっている。上記した示方書では、コンクリートにひび割れが発生している場合、許容ひび割れ幅以下であれば全体の拡散係数を1.5倍とすることで照査可能という記述がある。現状ではこの値に物理・化学的意味はないが、これは欠陥が構造物の耐久性能を急速に低下させる極めて危険な因子であることを示していると考えられる。以上のことより、構造物が供用を開始し様々な荷重作用により内部・外部損傷を生じた場合における、構造物の耐久性能の評価を定量的に行うことが極めて重要であると考えられる。

本研究ではモルタルを対象として直接引張試験を実施し、試験体に内部欠陥を付与する手法を採用した。これは、モルタルの引張挙動を把握し損傷レベルを定義することにより、構造解析との連成を容易に可能とする利点を有すると考えたためである。また、硬化体内部には骨材混入に伴って遷移帯と呼ばれる潜在的欠陥ができることが知られている。この領域がモルタル強度に与える影響も引張挙動において顕著に生じると考えられる。

以上のことから、まず配合に伴うモルタルの圧縮・引張強度の変化を把握し、配合要因が強度に与える影響について検討を行った。そして、潜在的および後天的内部欠陥の有無を要因として透気試験を行い、欠陥の透気性への影響度およびその評価方法について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 圧縮および直接引張試験

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0.50、モルタル中の細骨材体積割合 V_s は0.33~0.61とした。圧縮試験体は $\phi 50 \times 100$

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 工修 (正会員)
(日本学術振興会特別研究員)

*2 国土交通省 総合技術政策研究センター 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 工博 (正会員)

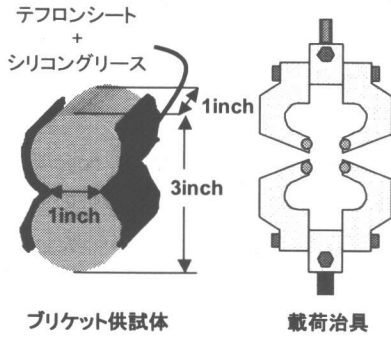


図-1 直接引張試験

mm, 直接引張試験はブリケット供試体 (図-1 左) に行った。試験体数は圧縮試験 5 本, 直接引張試験 5~7 本である。打設の際は 1cm 程度余盛りし, プリーディング終了後に表面仕上げを行った。各試験体は打設 1 日後に脱型し, 材齢 28 日まで水中養生を行った。

直接引張試験の概要を図-1 に示す。直接引張試験では载荷時の偏心が問題となるが, これを防ぐため, 载荷治具とブリケット供試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 2 枚を挟みブリケット引張試験を行った。テフロンシートによる偏心制御効果については, 予備実験により確認済みである。

2.2 透気試験

試験体の配合・材齢・養生方法は強度試験体と同様である。透気試験体はブリケット供試体により作成し, 直接引張試験により強度比 (= 負荷荷重/引張強度) 0.65 および 0.85 まで载荷することにより内部欠陥を付与した。このとき, ひずみゲージ (検長 10mm) により試験時の最大ひずみおよび残留ひずみを測定した。载荷後, 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。

透気試験結果は試験体内部水分の影響を強く受けるといわれている²⁾。本研究では湿度 50%, 40℃乾燥炉, および 65℃乾燥炉にて, 順にそれぞれの環境下で恒量となるまで供試体を約 2 ヶ月間乾燥し, それを絶乾状態として透気試験を

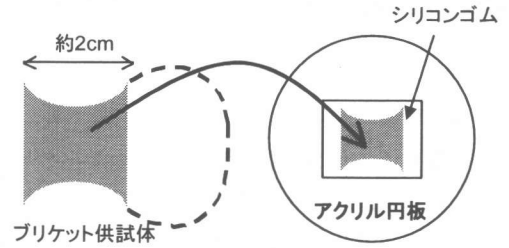


図-2 透気試験体概要

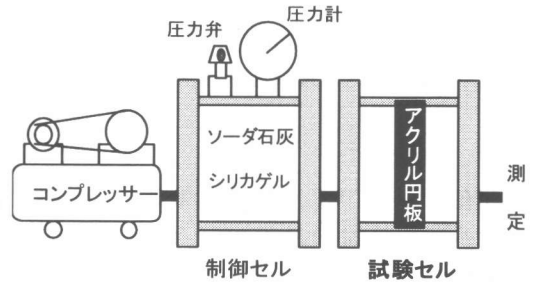


図-3 透気試験装置

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)。試験体の透気方向は打設面から型枠下面とした。

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内に設置し作成した。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 0.15N/mm^2 一定とした。試験体内部を透過した空気の流量が定常となったことを確認した上で, 水上置換法により透過空気量を測定した。透気係数は式(1)³⁾を用いて算出した。

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

ここに, K : 透気係数(cm/sec), L : 供試体厚さ (cm), P_1 : 载荷圧力(kgf/cm²), P_2 : 大気圧 (kgf/cm²), γ_A : 空気の単位体積重量($=1.205 \times 10^{-6}$ kgf/cm³), Q : 透気量(cc/sec), A : 透気面積(cm²)

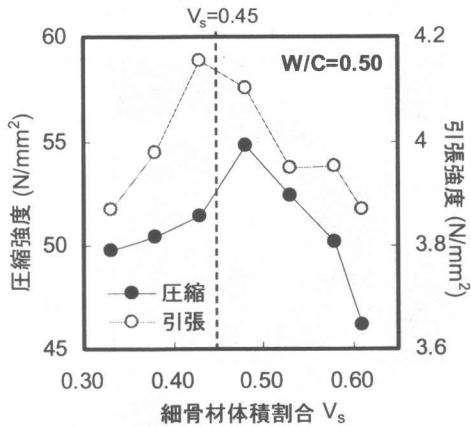


図-4 細骨材体積割合と強度の関係
(W/C=0.50)

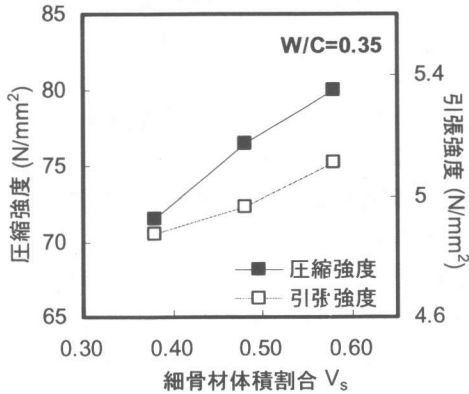


図-5 細骨材体積割合と強度の関係
(W/C=0.35)

3. 強度試験結果

図-4 にモルタルの細骨材体積割合 V_s と圧縮強度および引張強度の関係を示す。圧縮強度、引張強度ともに、細骨材体積割合の増加に伴って強度が増加するのではなく、ある骨材量で強度が最大となった。図-5 に同様に試験を行った水セメント比 0.35 の強度試験結果を示す。これより、遷移帯が存在しないといわれている水セメント比では、骨材量増加に伴って強度が増加することが分かる。したがって、図-4 における強度の低下は、骨材量増加により弱点部である遷移帯領域が増加したためと考えられる。既往の

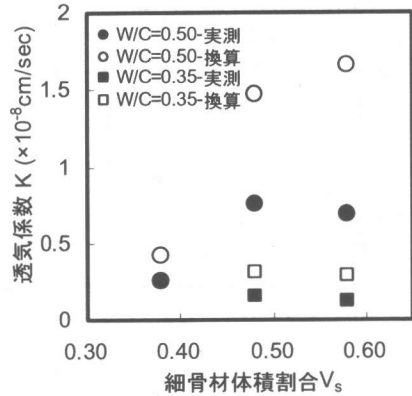


図-6 細骨材体積割合と換算透気係数の関係

研究⁴⁾によれば、水セメント比 0.50 のとき、 $V_s=0.45$ 付近ではほぼ全ての遷移帯が連結していると考えられる。これより、強度を遷移帯の連結性から考慮すると、全ての遷移帯が連結した状態が最大であり、その後強度は低下していくことが考えられる。図-4 において、引張強度は遷移帯の連結性と対応しているが、圧縮強度は低下が遅れていることが分かる。したがって、引張強度は圧縮強度と比較して作用応力の方向性が単純であるため、その影響に敏感であると考えられる。

4. モルタルの透気性評価

4.1 透気試験結果

(1) 潜在的欠陥を有する場合

図-6 に細骨材体積割合と透気係数の関係を示した。図中の換算透気係数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（水セメント比 0.35 参照）。しかし、水セメント比 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⁴⁾、連結による連続空隙が気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

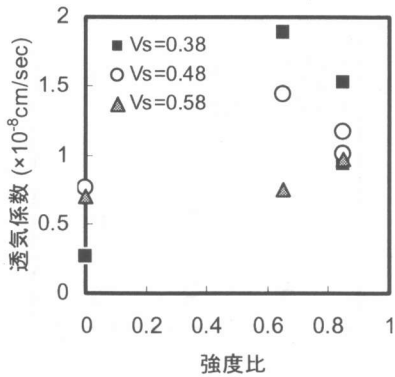


図-7 強度比と透気係数の関係

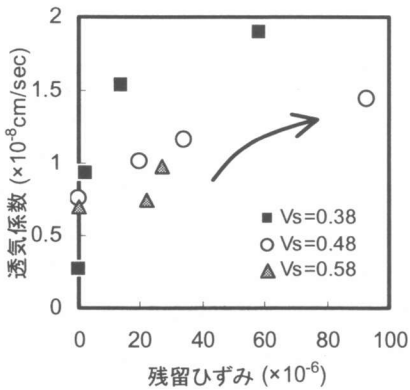


図-8 残留ひずみと透気係数の関係

向を示した⁵⁾と考えられる。

(2) 外力による欠陥を有する場合

図-7 および図-8 は、引張応力により欠陥を付与した試験体の透気係数の測定結果である。図-7 は強度比と透気係数の関係を示している。これより、引張応力を与えたものは無載荷の場合と比較して、透気係数が大きくなり、その傾向は細骨材体積割合 V_s により異なることが分かる。しかし、いずれにせよ強度比との関係は特に見られない。図-8 において横軸となっている残留ひずみは、試験体の塑性変形量を表している。これより、応力付与による透気係数の増加は試験体の塑性変形分に依存し、またその傾向は細骨材体積割合 V_s により異なることが考えられる。

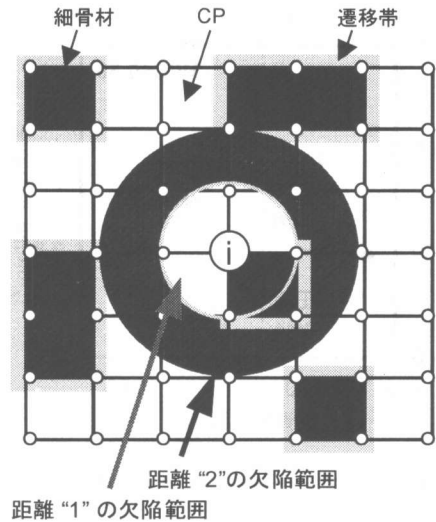


図-9 解析モデル概要

以上の実験結果より、次節において内部欠陥を有するモルタルの配合および欠陥割合と透気性状の関係について、解析的に検討を行った。

4.2 欠陥を有するモルタルの透気性評価

(1) 解析モデル

図-9 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 $50 \mu\text{m}$ 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-9 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

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

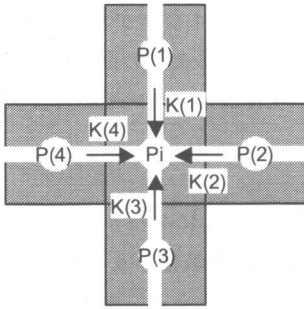


図-10 節点 i における質量保存則の概念図

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⁶⁾。

$$K = \frac{c d^2}{\mu \tau^2} \epsilon \quad (2)$$

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⁷⁾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⁸⁾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)により求めた透気係数を用いた。

解析では透気試験の定常状態を再現することとし、質量保存則から図-10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。

$$\begin{aligned} \sum Q_i &= 0 \\ &= \frac{1}{2\gamma_A L} \sum \frac{P(i)^2 - P_i^2}{P_i} A(i) K(i) \quad (3) \end{aligned}$$

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, 断面積

図-9に示したようにセメントペーストから欠陥へ変化した場合、欠陥前後で線分要素の断面積が異なる。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。

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

ここに、 Q_d : 欠陥部の流量, A_d , A_p : 欠陥, CP の断面積, 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。

(2) 解析結果

解析中の欠陥の増加は、初期(欠陥が無い場合)の透気面積に対する欠陥面積の割合で表した。

$$D = \frac{n_{pd} A_d + n_{id} A_i}{n_p A_p + n_i A_i} \quad (5)$$

ここに、D: 欠陥面積割合, A_d , A_p , A_i : 欠陥, CP, 遷移帯の断面積, n_p , n_i : 初期の CP, 遷移

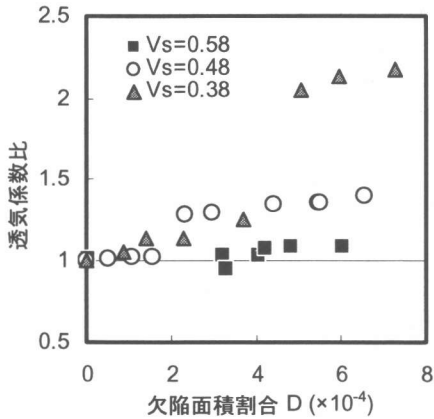


図-11 欠陥による透気係数の変化 (解析値)

帯の要素数, n_{pd}, n_{id} : 欠陥に変化した CP, 遷移帯の要素数

図-11 に欠陥面積割合と透気係数比の関係を示す。透気係数比は、各細骨材割合について、欠陥がある場合の透気係数の初期透気係数に対する割合を示している。これより、細骨材割合が減少すると、欠陥の増加に伴う透気係数の増加率が大きくなることが分かる。つまり、セメントペースト要素が多いほど、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。この傾向は図-8 に示した塑性変形量と透気係数の関係に類似しており、本手法により、骨材割合が異なる場合における、欠陥割合に対する透気係数の変化の評価が可能となった。しかし、解析における欠陥面積割合と実験における塑性変形量の関係は考慮しておらず、今後、欠陥の評価方法についてさらなる検討が必要である。

5. まとめ

本研究で得られた成果は以下の通りである。

- 1) 水メント比 0.50 のモルタルにおいて、ある細骨材量以上の場合に生じる強度低下は遷移帯の連結によるものであり、引張強度は圧縮強度と比較してその影響に敏感であることが考えられる。
- 2) 遷移帯の存在によりモルタル中セメントペ

ーストの透気係数は増加する。

- 3) 引張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考えられる。
- 4) 2次元格子状細管モデルにより、骨材割合が異なる場合における、欠陥割合に対する透気係数の変化が評価可能となった。
- 5) セメントペースト要素が多いほど、見かけの透気係数に対する欠陥の影響は顕著に表れる。しかし、欠陥評価については今後検討が必要である。

謝辞:本研究を行うにあたりご協力頂いた千葉工業大学 森弥広助教授、及び同大学卒論生 江田俊彦君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書[施工編], 2000.1
- 2) 田中 亨二 他:水分を含む状態でのセメントモルタルの透気性, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 469 号, pp.9-15, 1995
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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