モルタルの透気性に及ぼす細骨材量の影響

INFLUENCE OF FINE AGGREGATE CONCENTRATION ON AIR PERMEABILITY OF CEMENT MORTAR

田中 享二*¹, 国田 洋行*², 橋田 浩*³

Kyoji TANAKA, Hiroyuki KUNITA and Hiroshi HASHIDA

Influence of fine aggregate concentration on air permeability of cement mortar is experimentally and analytically studied. The air permeability of cement mortar specimens of various fine aggregate concentrations were first measured. It was found out that an increase of concentration slightly reduced air permeability of the mortars in the range of lower concentration and, on the contrary, noticeably increased it in the higher concentration range. This results suggest that air permeability affected by the existence of boundary layers, which are considered to be highly porous, around the fine aggregates. Then, the two dimensional model composed of three components such as cement paste, fine aggregate and boundary layer was proposed, and the air permeability were calculated for mortars of various fine aggregate concentrations. Finally, the influence of concentration on air permeability of mortars was quantitatively discussed on the basis of the measured and calculated results.

Keywords: Air permeability, Cement mortar, Fine aggregate concentration, Pore structure, Boundary layer, Two dimensional model

透気性、セメントモルタル、細骨材量、細孔構造、境界層、2次元モデル

1 はじめに

セメントペーストは多孔体であり、微量ながらも気体を透過させる性質をもつ。一方、通常の粗骨材、細骨材はそれに比べると、透気性ははるかに小さい。従って、骨材とセメントペーストの複合体であるコンクリートやモルタルでは、基本的には透気性はペーストと骨材の割合により決定されることが考えられる。

すなわち、骨材量の増加はセメントペースト容積を相対的に低下させるため、透気しうるペースト部分の容積を減少させると考えられ、透気性を低下させると推定される。しかし一方で、骨材近傍および界面には組織が粗な領域が存在するといわれており^{1, 2)}、その考えに従えば、骨材量の増加は透気しやすい容積を増加させることになるため、逆に透気性を増加させるとも考えられる。両者相反する影響が類推されるのである。このことに関して現状では、透気性に対する骨材量の影響に関する研究が十分なされておらず、明確な結論は得られてはいない。

透気性の問題は前報³⁾でも述べたとおり、強度や乾燥収縮といった実用面に直結する項目ではないため、ともすれば看過されやすいが、コンクリートの耐久性の分野、特に最近では、コンクリートを下地として施工される各種仕上げ材の分野で、それらの欠陥発生に影響を与える重要な要因として、これらの知見が強く要望されるようになってきている。

セメント硬化体の透気性は、基本的には硬化セメントペーストの細孔量と分布、および環境湿度に応じた細孔内部の水分状態により決定される。しかしモルタルやコンクリートでは、必ず骨材との共存状態で使用される。そうすると骨材の量が、特に骨材とペーストの界面の量や性状がどのような影響を及ぼすのかが、きわめて重要になる。本研究ではこの点に着目し、研究の第一段階としてモルタルを例とし、骨材量の透気性に及ぼす影響を明かにすることを目的とする。

既往の研究についてであるが、透水性については骨材の影響が検討されており、一般に骨材量の増加は透水性を単純に増加させると報告されている^{4, 5)}。また興味深い結果として、Houst 等⁶⁾はモルタルの拡散性について骨材量の影響を拡散係数との関係で調べ、ペーストに少量の骨材を混入する範囲では、拡散係数は減少するが、多量の骨材量の範囲では逆に拡散係数は増加する傾向を明かにしている。しかしながら透気性の観点からの骨材量の影響に関する研究は、国内外を問わず、筆者等の知る範囲ではほとんどない。

2 試験の概要

2.1 試験体の種類

試験体は豊浦標準砂を用いたモルタルである。砂量は、砂とセメントペーストの容積比率 (S/P) で 0.45、0.70、1.22、および砂を入

*¹ 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

*² 榊大林組(元東京工業大学大学院) 工修

*³ 清水建設(株)技術研究所 工修

Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Ohbayashi Corporation, M. Eng.

Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

れないもの（セメントペーストのみで $S/P=0$ ）の4水準とした。またこれらモルタルのペースト部分の水セメント比は 45、60、75 % の3水準とした。表1に本研究に用いたモルタルの調合を示す。なおこの中で、砂量の最も多い（ $S/P=1.22$ ）の場合は充填性が悪く空気量も多くなっており、通常施工されるモルタルの物性からは多少離れているが、砂量の影響を検討する目的から、本研究では、あえて試験体に加えている。

2. 2 試験体の作成

セメントペーストおよびモルタルは、直径180mm 高さ70mmの塩化ビニル製円筒型枠に打ち込み、1日封かん養生後脱型し、8週間水中養生を行った。その後直径30mmのコアを採取し、コンクリートカッターで、ブリージングの影響の少ない中央部分から厚さ3～10mmの試験体を切り出した。

2. 3 透気試験

透気量は前報³⁾で示したとおり、内部水分の影響を強く受ける。そのため、ここでは恒温恒湿室（ $20 \pm 2^\circ\text{C}$, $75 \pm 10\% \text{ R.H.}$ ）内に、重量測定によりその値が一定となるまで放置した。重量が安定するまでにはほぼ一ヶ月要したが、さらにもう一ヶ月、恒温恒湿室内に静置し十分に安定させた後で、各種測定を行った。

透気量の測定には、図1に示す透気試験装置を用いた。試験体が比較的薄いため、測定中、空気圧による曲げひび割れが生じるおそれがある。その予防のため、多数の孔の開けられた真鍮製の背板を補強として使用した。

試験片の側面はエポキシ樹脂により完全にシールし、側面からの空気の流入を防いだ。測定は負荷圧力0.05MPa～0.3MPaの範囲で行い、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。なお試験体数は原則として2個ずつとしたが、測定に失敗することもあり、その場合には試験体を追加した。

透気性はダルシー則に空気圧縮性を考慮した次式⁷⁾より得られる透気係数で評価した。

$$k = 2 L \mu P_2 Q / (P_1^2 - P_2^2) A \quad (1)$$

ここに Q : 透気量、 m^3/sec

k : 透気係数、 m^2

図2 細骨材量と透気係数の関係

P_1 : 載荷圧力、Pa

P_2 : 大気圧、Pa

L : 試験体厚さ、m

A : 面積、 m^2

μ : 空気の粘性係数、 $1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{sec}$

3 測定結果

図2に透過気係数と細骨材量との関係を示す。砂/ペースト比（ S/P ）がゼロの位置はセメントペーストのみであることを意味する。ペースト部分の水セメント比により多少の違いはあるが、砂の

表1 試験体および調合

試験体の種類	W/C 重量%	S/P 容積比	セメント(C)・ g	水(W) g	砂(S) g	空気量 %
セメント	45	0	1823	820	0	0.2
ペースト	60	0	1523	914	0	0.1
	75	0	1310	983	0	0.4
豊浦標準砂*1	45	0.45	1257	566	1189	1.0
モルタル	45	0.70	1071	490	1576	3.8
	45	1.22	822	370	2103	7.9
	60	0.45	1050	630	1189	0.4
	60	0.70	896	538	1576	0.2
	60	1.22	686	412	2103	7.2
	75	0.45	903	678	1189	0.8
	75	0.70	770	578	1576	0.2
	75	1.22	589	442	2103	8.0

*1 山口県豊浦産（絶対比重2.72、吸水率0.54）

*2 普通ポルトランドセメント（比重3.16）

図1 透気試験の概要

混入は一時的に透気係数を低下させる。しかし、さらなる増加は逆に透気係数を大きくさせる。すなわち適当な砂量の時に透気性は極小になる傾向がうかがえる。ただし透気係数を極小とする砂ペースト比は、水セメント比により異なり、水セメント比が大きくなるにしたがって、その比は増加する傾向がみられる。

4 考察

4.1 モルタルの細孔構造におよぼす砂量の影響

(1) 水銀圧入法による細孔容積測定

ここでの試験体は、湿度75%RHの環境下に長期間保管されており、細孔の内部には雰囲気湿度と平衡となる水分が含まれている。そのため細孔容積の測定は、既報⁹⁾で述べた、水分を含む状態での細孔構造を調べるための、水銀圧入法に工夫を加えた方法によった。測定方法の特徴は、その手順の概略を図3に示すように、水分散逸を少なくするために通常の測定で行われるDドライ処理を割愛していること、また水銀圧入前の減圧のレベルを950 μ mHg程度に弱めていること、測定途中でわずかではあるが、散逸する水分量については、その量を測定して補正する点にある。なお測定にはマイクロメリテックス社製ポロシメーター9310型を使用した。

(2) 細孔容積分布

図4に測定より得られたセメントペースト、モルタルの細孔容積分布を示す。砂を混入していないセメントペーストだけの場合は、水セメント比にかかわらず、0.01 μ m前後の細孔径が卓越して存在している。砂を混入した場合、砂量の増加にともなってそのピークの高さが低下し、大きな細孔径領域の量も増加する。この傾向は、水セメント比が大きくなるに従って顕著となる。一方砂量が極端に多い試験体(S/P:1.22)の場合は、特定の細孔径に極値をもたず、広い領域にわたり粗な細孔構造をもつ。

4.2 モルタルの透気モデルを用いた透気性の評価

(1) 計算モデル

セメントペースト、細骨材より構成され、さらにそれに骨材界面近傍の組織の粗な領域を考慮した、一辺の長さが100 μ mの2次元格子状細管モデルに置換した。その単位断面は図5に示すように、そのサイズを細骨材の最大粒径の1.5倍程度とし、3mm $\times$ 3mmの断面積を900(30 $\times$ 30)分割したものとした。また計算モデルは、計算量低減化はかるため、この単位断面部分が試験体の断面積と等しくなるまで繰り返され、断面が構成されるものとした。

(2) 細孔のモデル化

モルタルの細孔は、それらが連続した時、空気の通り道となる。この連続する細孔をすべてハーゲン・ポアズイユの法則が成立する細管で置き換える。この細管を流れる流体の定常流の時の流量は、次式で与えられる。

$$Q = \pi \Delta P d^4 / 128 \mu l \quad (2)$$

ここに Q : 流量、 m^3/sec

ΔP : 圧力差、Pa

d : 細管の直径、m

l : 細管の長さ、m

μ : 粘性係数、 $Pa \cdot sec$

図3 水分を含む状態での細孔構造測定方法

図4 セメントペースト、モルタルの細孔容積分布

細孔測定結果では、モルタル中には非常に小さな細孔も存在するが、文献⁹⁾によれば、透気に関与する細孔は約 50nm より大きな直径のものであるといわれており、ここでは 50nm より大きい空隙について検討した。

一方最大空隙径についてであるが、大きい径のものは独立しており、透気の観点からは不連続状態にあることが多い。そのため、どの程度の径から連続した空隙として取り扱うことができるかが問題となる。この点について、Dullien¹⁰⁾は水銀圧入法により得られる累積細孔曲線において、図6に示すように急激な増加を示す点が、いわゆる細孔のくびれ部分に水銀が流入し始める点であり、ここから測定される空隙が連続した細孔であると考えられると述べている。本研究でもこの考えに基づき、各試験体について調べたところ、その値が累積細孔曲線の微分値、 $dV/d \log D$ でほぼ 0.005 を越えると、比較的安定して細孔量が増加するため、この点を透気に関与する最大直径判定基準とし、この細孔直径以下のものを連続細孔として判断した。

つぎに骨材界面近傍の細孔構造についてであるが、セメントペーストと細骨材の境界は、完全にセメントペーストが細骨材に密着していないことが多いといわれている。例えば、骨材近傍のペースト部分には、水酸化カルシウム水和物が多く形成され、大きい細孔を多く有する、いわゆる遷移帯と呼ばれる領域が形成される¹¹⁾、あるいはペーストに含まれる余剰水は、内部の水移動により、結果として骨材周囲、特にその下側に粗な組織を作る¹²⁾等のためである。従って透気性を評価する場合、この骨材近傍の粗となる細孔構造の存在を考慮することが重要である。

ところで、ポロシメーターによるモルタル部分の細孔構造の測定では、この骨材近傍の粗となる細孔を含んでいる。従ってモルタル内部の骨材近傍の細孔構造は、図7に示すように、モルタルの細孔量からセメントペースト部分の細孔量を差し引いた、残りの部分と

して考えることができる。すなわち、モルタルの累積細孔曲線とペースト部分の累積細孔曲線の差として得られる。この考え方に基づき得た、差の部分を微分表現で表し、図8に示す。これによると、砂量の多い砂ペースト比が 1.22 の試験体を除けば、骨材近傍の細孔構造は約 0.02 μm から 0.5 μm 程度までのものがかなりを占めると考えられる。また、砂ペースト比が 1.22 の場合は、全体としてブロードになり、その細孔径範囲も広がり、最大径 10 μm 近くまで及ぶと考えられる。

またその厚さは、一般に遷移帯では骨材から 50 μm 程度といわれており¹³⁾、ここでのモデルでは、細骨材周りを上述の粗な細孔構造をもつ組織が 50 μm の厚さで取り巻いていると仮定した。

なお透気計算では、各格子を構成する連続細管 (50nm から前述の最大直径までの範囲のもの) を、計算の簡素化をはかるため 4 分割し、その各々の平均値の細管で構成される透気モデルとした。すなわち、4 分割した領域での細孔量からその平均径に置換した時の本数を求め、それら 4 種類の細管が図9に示すように、並列して細管束を形成し、接点で連結・合流するものである。

またモルタル各構成要素の細孔は、次によりその具体的な数値を与えた。

・ペースト部分

ペースト部分は、測定より得られた細孔容積分布を用いる。

・細骨材部分

図6 連続細孔径の最大値の判定

図5 単位断面(3mm×3mm)のモデル化の例

図7 骨材近傍の細孔構造推定の概念図

ここで用いた骨材は、豊浦標準砂であり、ペーストに比べてはるかに緻密であり、透気はほとんどしないものと考えた。なお細骨材の粒度分布は図10に示すとおり、125 μm ~ 225 μm の範囲のものがほとんどであるため、モデルではその簡素化をはかり、その細骨材粒径を 200 μm で代表させた。

・骨材界面近傍

骨材界面近傍の領域（遷移帯）に対しては図8の細孔容積分布を用いた。

・気泡

試験体には、表1に示すとおり空気量の大きいものもあり、その影響は無視できないものと思われる。ただし一般に気泡は球形で独

図8 推定される骨材近傍の細孔構造

図9 各格子の細孔モデル

(4種類の細管の束として単純化)

立しており、その数も水銀圧入法で測定される細孔容積に比べて非常に少ない。それゆえ、気泡は連結した空気の通り道として影響をおよぼすと考えるよりは、試験体の実質的なマトリックス部分を減らす効果として考えるほうが妥当であると思われる。そのためここでは、空気量をその分だけ試験体の厚さが減じたものとして取り扱った。

(3) 計算方法

透気の計算は以下の手順によった。

①セメントペースト、遷移帯を構成する細管束の各々の透気係数をハーゲンポアズイユ則によって求める。

②細骨材の位置を乱数により決定する。

③接点を中心とする単位領域の透気係数を決定する。この時セメントペースト部分、遷移帯部分は各々の透気係数を、細骨材は0を与える。

④質量保存則から各接点の流量 Q の総和は0となるので、図11に示す i 接点では次式が成り立つ。

$$\sum Q = \sum \frac{(k_i - k_j))}{2} (P_i - P_j) = 0 \quad (3)$$

ここで k は透気係数、 P は圧力、 (j) は i 点まわりのすべての接点

図10 細骨材（豊浦標準砂）の粒度分布

図11 i 接点とその周りの接点領域

図1-2 モルタルの透気係数の測定値と計算値

を表す。

⑤この関係はすべての接点について成立することから、接点数分の連立一次方程式が得られる。

⑥連立方程式を解き、各接点の圧力 $P(i)$ を求める。

⑦求められた圧力 $P(i)$ と透気係数 $k(i)$ から、流入面から流出面方向に垂直な断面の流れについて総和を計算し、モデル全体の流量を求める。

⑧流量からモデルの透気係数を求める。

(4) 計算結果および考察

図1-2に標準砂モルタルの透気係数の測定値と計算値を示す。セメントペースト単体の状態から細骨材が増加してゆく初期の段階では、透気性はほとんど増加せず、試験体によっては逆に低下するものもある。しかしさらに細骨材量が増加すると、特に細骨材量の多い領域での透気性が急激に増加する。

当初の細骨材量の増加が必ずしも透気性を増加させなかったのは、ほとんど透気しない細骨材量の増加により、透気の期待されるセメントペースト量の減少によるためと考えられる。また、骨材量のある程度の量からの透気性の急激な増加は、きわめて透気のしやすい、骨材とペースト界面近傍の細孔構造の粗な領域の増加、およびそれらの領域がつながり、連続する頻度が多くなるためと推定される。

ここで得られた計算結果は、実験値と完全に一致するものではないが、その傾向をよく再現していると思われる。

5 結論

セメントモルタルの透気性に及ぼす細骨材量の影響について検討した、本論文で得られた結論は以下のとおりである。

(1) 細骨材量は透気性に強い影響を与える。すなわち砂量の少ない領域では、多少の砂量の増加は透気性をほとんど変化させないか、もしくは低下させる。砂量の多い領域では透気性を急激に増加させる。

(2) 細骨材量の透気性に及ぼす影響は、ペースト容積と細骨材容積との割合を変化させること、および、細骨材とペースト界面近傍の組織が粗である領域の容積を変化させることに起因すると考えられる。

(3) 細骨材、ペースト、その界面より構成されるモデルを用いた

解析により、モルタルの砂量の透気性に及ぼす影響をある程度定量的に評価できることを示した。

謝辞

本研究を実施するにあたり、北海道大学、名和豊春先生、秩父小野田セメント(株)、羽原俊祐氏の討論および実験上の協力を得ました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) K.L.Scrivener and P.L.Pratt: Characterisation of interfacial microstructure; RILEM REPORT 11・Interfacial Transition Zone in Concrete, E&FN SPON, pp.3-17, 1996
- 2) 菅谷秀幸: 骨材-セメントペースト界面; セメント・コンクリート, No.567, pp.46-48, 1994
- 3) 田中享二、端直人、橋田 浩: 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
- 4) B.K.Nyame: Permeability of normal and lightweight mortars; Magazine of Concrete Research, Vol.37, No.130, pp.44-48, 1985
- 5) J.P.Ollivier and M.Massat: The effect of the transition zone on transfer properties of concrete; RILEM REPORT 11 Internal Transition Zone in Concrete, E&FN SPON, pp.117-131, 1996
- 6) Y.H.Houst, H.Sadouki and F.H.Wittman: Influence of Aggregate Concentration on the Diffusion of CO_2 and O_2 ; Interfaces in Cementitious Composites, RILEM, E&FN SPON, pp.279-288,
- 7) R.K.Dhir, P.C.Hewlett and Y.N.Chan: Near surface characteristics of concrete, Intrinsic permeability; Magazine of Concrete Research, Vol.41, No.147, pp.87-97, 1989
- 8) 田中享二、端直人、橋田 浩: 若材齢モルタルの乾燥途中における細孔構造と水分状態; 日本建築学会構造系論文報告集、第460号, pp.11-18, 1994
- 9) P.Kumer Metha: CONCRETE-Structure, Properties and Materilas; PRETICE-HALL, pp.26-27, 1986
- 10) F.A.L.Dullien: Porous Media-Fluid, Transport and Pore Structure; Academic Press, Inc., 1992
- 11) 内川 浩、羽原俊祐、沢木大介: 硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さと強度との関係の検討; コンクリート工学論文集、Vol.4, No.2, pp.1-8, 1993
- 12) 星野昌幸、苔米地 司: 微視的観察にもとづくセメントペーストと骨材の界面の形成過程と強度; 材料, Vol.135, No.355, pp.12-18, 1983
- 13) J.Grander and P.Ollivier: Orientation of Hydration Products near Aggregate Surface; Proc.7th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol.3, pp.63-68, 1980

(1997年10月10日原稿受理、1998年3月26日採用決定)