

論文 加圧式透水試験装置による透水性評価方法と配合要因が硬化モルタル表層の透水性に及ぼす影響に関する研究

早矢仕 啓太*1・安江 歩夢*2・犬飼 利嗣*3・藤森 繁*4

要旨：市販されている透水試験装置GWT-4000は、その透水試験による評価方法に関して詳細に記述された文献は数少ない。そこで本報では、GWT-4000を用いた透水試験による透水性評価方法を検討するとともに、配合要因が硬化モルタル表層の透水性に及ぼす影響について検討した。その結果、異なる水圧を加えて透水試験を行っても同傾向が得られること、透水開始後10分における透水フラックスにより、適切に透水性評価ができることを確認した。また、水セメント比および単位細骨材量などの配合を要因とした実験結果から、透水フラックスと水セメント比は強い相関関係にあることが分かった。

キーワード：表層、透水試験、GWT-4000、透水性、透水フラックス、配合

1. はじめに

コンクリート構造物を長期にわたって供用するには、品質や耐久性の適切な診断が必要である。鉄筋コンクリート構造物の耐久性は、塩化物など外部から侵入する劣化因子による影響を強く受けるので、コンクリート表層部の物質移動抵抗性により評価されることが多く、その評価方法の一つとして、透水試験が挙げられる。

透水試験は、これまでに様々な試験方法が開発されている。例えば、コンクリート表面の吸水試験方法は、英国建築研究所のGranvilleによって開発され、その後、LevittによるISAT (Internal Surface Absorption Test) 法が規格化されている¹⁾。この試験では、吸水開始後10, 30, 60, および120分後の吸水量と吸水時間の関係から、吸水特性を表面吸水速度によって評価している。また林ら²⁾は、鉛直面にも適用可能な吸水試験方法SWAT (Surface Water Absorption Test)を開発している。SWATは、非破壊試験であり、吸水開始600秒後の表面吸水速度により吸水特性を評価している。この他にも豊福³⁾が開発したダブルチャンバー式加圧透水試験機(WAPP)による透水試験があり、55kPaの水圧を加え20分間透水試験した結果から算出した表層透水係数によって透水特性を評価している。

本研究では、コンクリート表層部の物質移動抵抗性を評価する上で、まずはモルタルを試料として、市販されているGWT-4000を用いた透水試験を試みた。GWT-4000は、材料表面に一定の水圧を加えて水を透水させる試験装置であり、一定の水圧は透水量をマイクロメータの押し込み量に置換することで、透水量はマイクロメータの読みの差を透水量に換算することで得られる。この試験は、構造物を損傷することのない非破壊試験であり、水

平ならびに鉛直面にも適用できるので、実構造物表層の物質移動抵抗性を評価する試験方法として期待がもたれる。しかし、GWT-4000を用いた透水試験の評価方法に関する文献は数少なく^{1, 4, 5)}、透水時間やデータの取り扱いには不明確な点が多い。したがって、適切に透水性を評価する上では、詳細な検討が必要である。

そこで本報では、GWT-4000を用いた透水試験による透水性評価方法を検討するとともに、配合要因が硬化モルタル表層の透水性に及ぼす影響について検討した。

2. 硬化モルタル表層の透水性評価

2.1 透水試験方法

硬化モルタル表層の透水試験は、以下の手順で行った。

標準水中養生28日後気中養生を経た材齢3ヶ月のモルタル試験体(直径100mm×高さ200mm)を、図-1に示すようにGWT-4000に打込み面を上にして設置する。圧力室(断面積3018mm²)に注水し圧力室を木槌で軽く叩いて空気泡を取り除き、10分間の自然吸水を行う。自然吸水終了後レンチで蓋を締め、所定の水圧まで加圧する。本実験では、50および75kPaとした。一定の水圧は透水量をマイクロメータの押し込み量に置換することで、透水量はマイクロメータの読み値を透水量に換算することで得る。したがって測定できる範囲は、マイクロメータの最大値である目盛25mmまでとなり、透水量に換算すると1.965mlとなる。測定時間は本試験では30分間または透水量が1.965mlに到達するまでとし、30秒ごとにデジタルカメラでマイクロメータの目盛を撮影した。透水量は試験終了後に撮影した写真を参照し、式(1)により算出した。

$$V_i = a(g_1 - g_2) \quad (1)$$

*1 岐阜工業高等専門学校 専攻科先端融合開発専攻 (学生会員)

*2 岐阜工業高等専門学校 建築学科 (学生会員)

*3 岐阜工業高等専門学校 建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*4 大同大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

ここに、 V_t ：時間 t における透水量(ml)

a ：マイクロメータ内のピンの断面積(cm^2)

g_1 ：当初のマイクロメータの値(cm)

g_2 ：時間 t におけるマイクロメータの値(cm)

2.2 評価方法の検討

林ら⁶⁾が開発した自然吸水法である表面吸水試験(SWAT)では、表面吸水速度により、コンクリート表層の吸水特性を評価している。表面吸水速度は、式(2)に示すように、単位面積あたりの吸水量を微小時間で微分したもので、刻々と変化する微小時間における吸水量の変化率を表している。

$$p = dw/dt \quad (2)$$

ここに、 p ：表面吸水速度($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$)

w ：単位面積あたりの累積吸水量(ml/m^2)

t ：時間(s)

しかし、本試験装置では、透水性が低く透水量の小さい供試体では、微小時間における透水量を適切に測定できないことが予想される。文献5)によれば、ある時間に対する水のフラックス(流束)によって透水性を評価できるとしている。そこで、本実験では、ある時間における透水量を用いた透水フラックス($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$)により、硬化モルタル表層の透水性評価を検討することとした。透水フラックスとは式(3)に示すように、透水開始時間から時間 t の区間における透水速度を表している。したがって、試験終了時の透水量のみを対象とした透水フラックスで透水性を評価できれば、透水量の経時変化を記録する必要がなく透水試験そのものが容易になると考えられる。

$$q_t = V_t / A / t \quad (3)$$

ここに、 q_t ：時間 t における透水フラックス($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$)

V_t ：時間 t における透水量(ml)

A ：加圧室の断面積(m^2)

t ：透水開始からの経過時間(s)

水セメント比65%のモルタル試験体を用い、水圧50および75kPaにて透水試験を行った。

図-2に、透水量と経過時間の関係を示す。50および75kPaのいずれの水圧においても、経過時間にともない透水量の増加量は小さくなる傾向にある。

図-3に、透水フラックスと経過時間の関係を示す。また図中には、べき関数で回帰分析した回帰式と相関係数の絶対値 r も示した。透水フラックスと経過時間は両軸を対数目盛で表すと直線関係となり、SWATで測定した表面吸水速度と同様の傾向を示している⁷⁾。したがって、透水フラックスは、表面吸水速度と同様にして式(4)により求めることができる。

$$q = at^n \quad (4)$$

ここに、 q ：透水フラックス($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$)

a, n ：定数

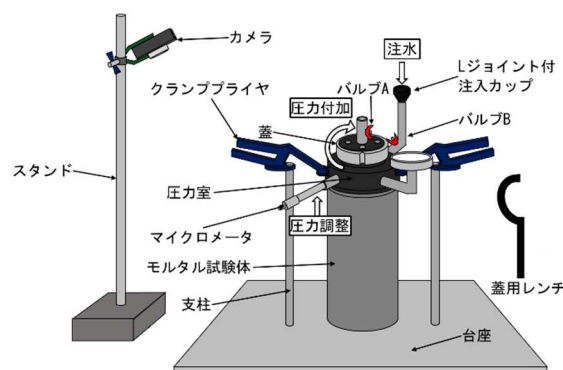


図-1 透水試験装置GWT-4000

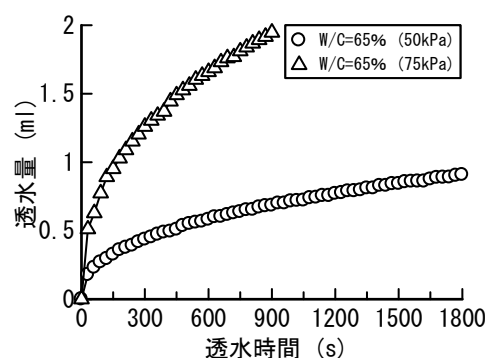


図-2 透水量と経過時間の関係

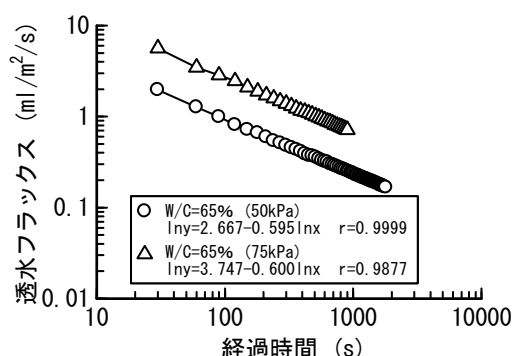


図-3 透水フラックスと経過時間の関係

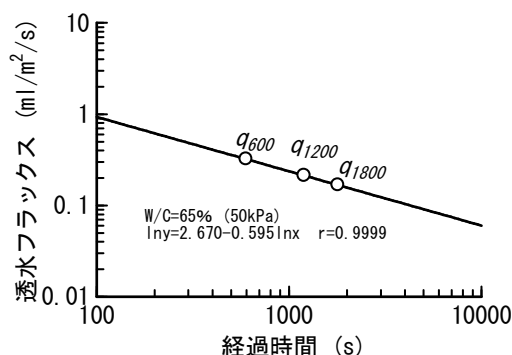


図-4 10, 20, 30分における透水フラックスと経過時間の関係

また、相関係数の絶対値 r から分かるように、50および75kPaのいずれの水圧においても透水フラックスと経過時間には強い相関関係がみられる。したがって、透水性

は水圧が異なっても、適切に評価ができると考えられる。ただし、複数のモルタル試験体を相対的に評価する場合には、同水圧における透水フラックスによって評価する必要があるため、以降は水圧を一律に75kPaとして試験を行うこととした。

図-4に、透水開始から10, 20, 30分間における透水フラックスと経過時間の関係を示す。図中に示した相関係数の絶対値 r から、透水フラックスと経過時間は強い相関関係にあることが分かる。したがって、10~30分の範囲では透水時間を短くしても同様の評価ができると考えられるので、透水フラックスと経過時間が強い相関関係にある場合には、透水開始から10分間での透水フラックス q_{600} により透水性を評価することとした。

3. 水セメント比が透水フラックスに及ぼす影響(実験1)

3.1 実験要因

実験要因は水セメント比とし、それぞれ35, 45, 55, および65%とした。

3.2 モルタルの使用材料および配合

表-1にモルタルの使用材料を、表-2に配合を示す。なお、単位細骨材量はいずれも同一とし、空気量(8±2%)とフロー値(190±20)も一定の範囲内に収まるよう単位混和剤量で調整した。

3.3 実験方法

(1) モルタルの練混ぜおよびフロー試験

モルタルの練混ぜおよびフロー試験は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法(10.4.3. 練混ぜ方法および11. フロー試験)」に準じて行った。

(2) フレッシュモルタルの空気量試験

空気量は、JIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材(5.12. d. モルタルの単位容積質量の測定)」に準じて単位容積質量を測定し、JIS A 1116「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の質量による試験方法(質量方法)(6.2. 空気量)」により算出した。

(3) 硬化モルタル表層の透水試験

硬化モルタル表層の透水試験は、2.1に示した試験方法で行い、透水フラックスと経過時間に強い相関関係があることが確認できた場合は、透水開始から10分間での透水フラックス q_{600} により透水性を比較検討した。

3.4 実験結果および考察

図-5に、透水量と経過時間の関係を示す。図から分かるように、いずれの水セメント比においても経過時間とともに透水量の増加量は小さくなる傾向にある。また、水セメント比が大きくなると透水量も大きくなっている。

図-6に、透水フラックスと経過時間の関係を示す。図中に示した相関係数の絶対値 r から分かるように、いずれ

表-1 モルタルの使用材料(実験1~3)

材料名	種 類	備 考	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3480cm ² /g	C
細 骨 材	乾燥珪砂(4号, 5号)	総乾密度:2.54g/cm ³ , 混合比率 1:1	S
混 和 剤	AE剤(1種)	樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤	AE
	消泡剤AFK-2	密度:0.97~1.01g/cm ³	AFK
水	高性能減水剤(1種)	主成分:ポリカルボン酸コポリマー	AD
	上水道水	-	W

表-2 モルタルの配合(実験1)

No.	W/C (%)	Air (%)		FL		S/C (wt)	単位量 (kg/m ³)			
		目標値	実測値	目標値	実測値		C	W	S	AD
1	35	8 ± 2	7.5	190 ± 20	202	2.06	622	218	1284	6.24
2	45		7		180	2.38	540	243	1284	3.01
3	55		9		183	2.68	479	263	1284	1.62
4	65		9.4		204	3.00	428	278	1284	0.43

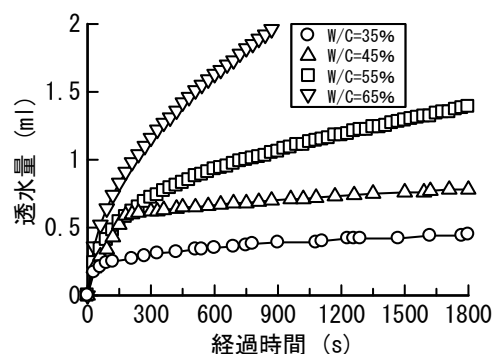


図-5 透水量と経過時間の関係(実験1)

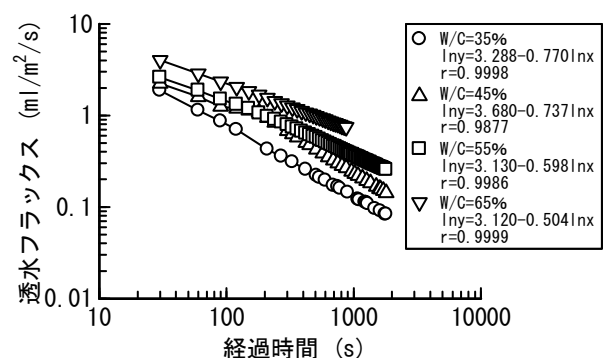


図-6 透水フラックスと経過時間の関係(実験1)

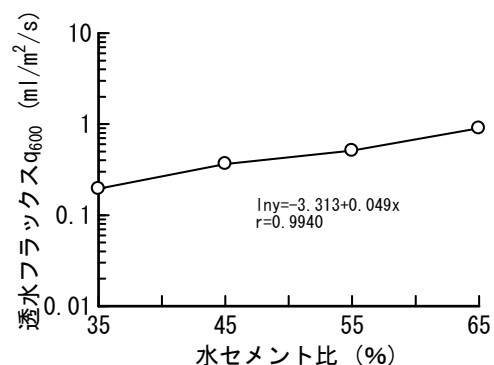


図-7 透水フラックス q_{600} と水セメント比の関係(実験1)

の水セメント比においても透水フラックスと経過時間には強い相関関係がみられる。

図-7に、透水フラックス q_{600} と水セメント比の関係を示す。図から分かるように、水セメント比が大きくなると透水フラックス q_{600} も大きくなる傾向にある。これは、水セメント比の増大にともなう単位水量の増加によるものと考えられる。また、図中に示した相関係数の絶対値 r から分かるように、水セメント比と透水フラックス q_{600} には強い相関がみられる。したがって、透水フラックス q_{600} は、水セメント比が透水性に及ぼす影響をよく捉えていると考えられる。

4. 単位細骨材量が透水フラックスに及ぼす影響(実験2)

4.1 実験要因

表-3に実験要因を示す。なお、単位細骨材量は実験1で示した配合(表-2参照)の単位細骨材量 $1284\text{kg}/\text{m}^3$ を基準とし、 1244 , 1204 , $1164\text{kg}/\text{m}^3$ を含めた4水準とした。

4.2 モルタルの使用材料および配合

モルタルの使用材料は、実験1と同様とした。表-4に、モルタルの配合を示す。

4.3 実験方法

実験方法は、実験1と同様とした。

4.4 実験結果および考察

図-8に、透水量と経過時間の関係を示す。図から分かるように、いずれの水セメント比においても時間の経過とともに透水量の増加量は小さくなる傾向にある。ま

た、いずれの単位細骨材量においても、水セメント比が大きくなると透水量も概ね大きくなる傾向にある。しかし、単位細骨材量が 1164 および $1244\text{kg}/\text{m}^3$ では、水セメント比が 35% より 45% のほうが透水量は小さくなっている。これには明らかではないが、モルタル試験体上面のコテ仕上げによる表層品質への影響などが考えられる。

図-9に、透水フラックスと経過時間の関係を示す。図中に示した相関係数の絶対値 r から分かるように、いずれ

表-3 実験要因(実験2)

因子	水準
水セメント比(%)	35, 45, 55, 65
単位細骨材量(kg/m^3)	1164, 1204, 1244, 1284

表-4 モルタルの配合(実験2)

No.	W/C (%)	Air (%)		FL		S/C (wt)	単位量 (kg/m ³)			
		目標値	実測値	目標値	実測値		C	W	S	AD
1	35	8 ± 2	8.0	190 ± 20	200	1.68	693	243	1164	4.21
2			7.0		176	1.80	669	234	1204	4.74
3			9.7		201	1.93	646	226	1244	5.25
4			7.5		202	2.06	622	218	1284	6.24
5	45		8.3		188	1.93	603	271	1164	0.65
6			6.9		188	2.07	582	262	1204	2.62
7			8.2		187	2.22	561	252	1244	3.12
8			7.0		180	2.38	540	243	1284	3.01
9	55		7.2		216	2.18	533	293	1164	0.05
10			6.9		207	2.34	515	283	1204	0.04
11			6.9		206	2.50	497	273	1244	1.52
12			9.0		183	2.68	479	263	1284	1.62
13	65		8.1		241	2.44	477	310	1164	0.07
14			8.1		231	2.61	461	300	1204	0.05
15			7.7		206	2.79	446	290	1244	0.04
16			9.4		204	3.00	428	278	1284	0.43

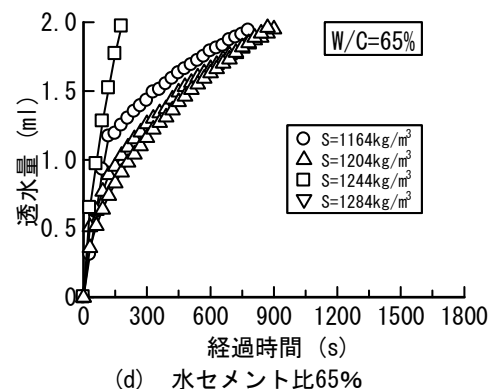
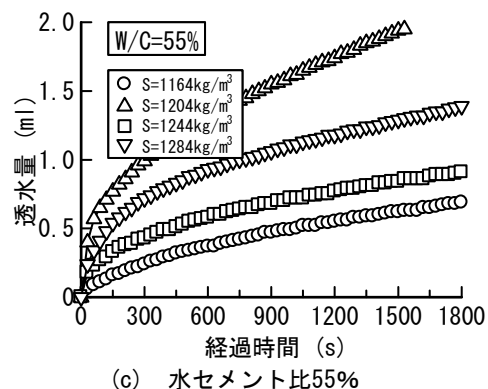
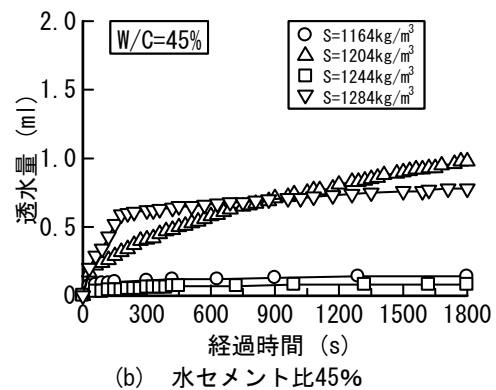
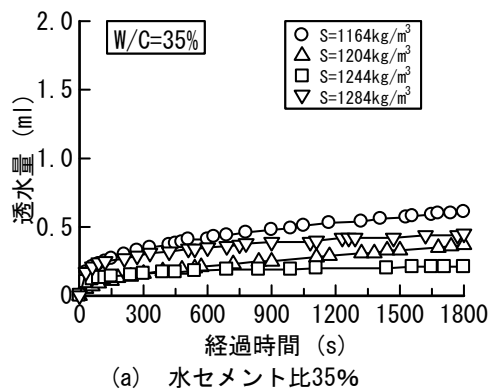
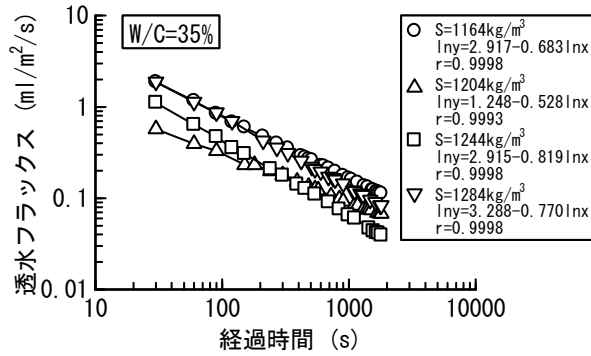
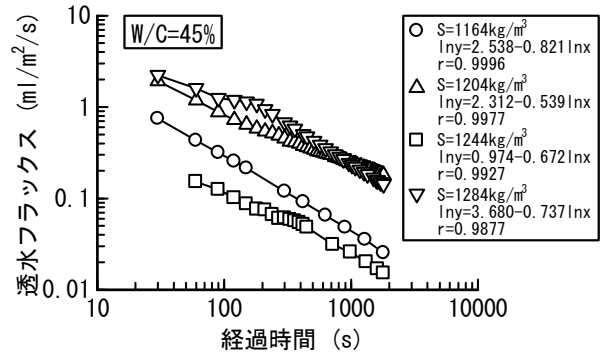


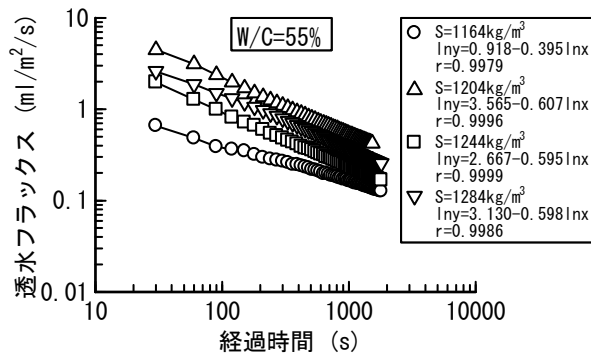
図-8 透水量と経過時間の関係(実験2)



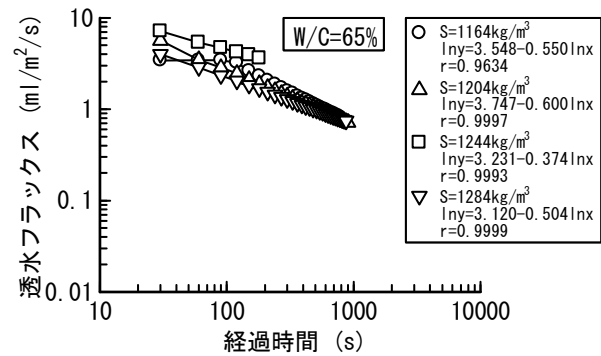
(a) 水セメント比35%



(b) 水セメント比45%



(c) 水セメント比55%



(d) 水セメント比65%

図-9 透水フラックスと経過時間の関係(実験2)

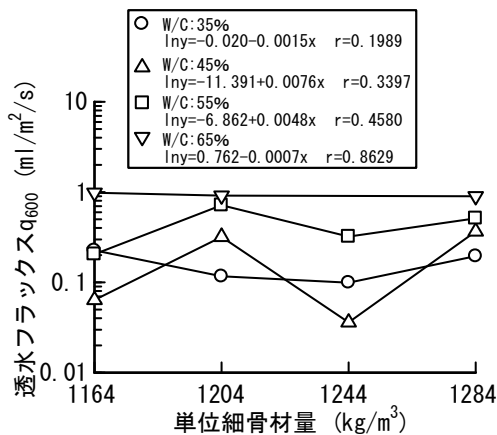


図-10 透水フラックス q_{600} と単位細骨材量の関係(実験2)

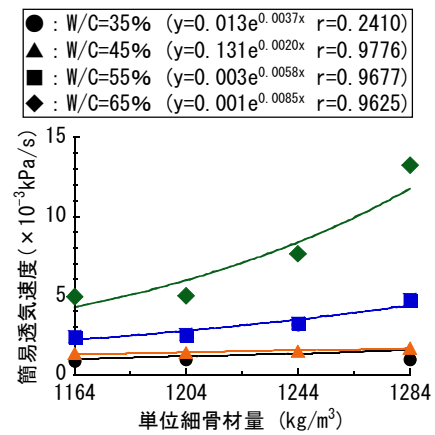


図-11 簡易透気速度と単位細骨材量の関係^{B)}

の水セメント比および単位細骨材量においても透水フラックスと経過時間には強い相関関係がみられる。

図-10に、透水フラックス q_{600} と単位細骨材量の関係を示す。なお、水セメント比65%で単位細骨材量1244kg/m³の条件では、180秒の経過時間で透水量が1.965mlに到達したので透水フラックス q_{600} は算出していない。図から分かるように、いずれの水セメント比においても、単位細骨材量が透水フラックス q_{600} に及ぼす影響には一様な傾向はみられず相関係数も小さい。これは、文献8)で示した試験体中層表面の簡易透気速度と単位細骨材量の関係(図-11に再掲)とは異なる傾向である。詳細に検討する

必要はあるが、これにもモルタル試験体上面のコテ仕上げによる表層品質への影響などが考えられる。

5. まとめ

本実験結果から、以下の知見を得た。

- 1) 経過時間にともなう透水量の増加量は、いずれの実験要因においても小さくなる傾向にある。
- 2) 透水フラックスと経過時間にはいずれの実験要因においても強い相関関係がみられ、経過時間を10分にしても適切に透水性の評価ができる。
- 3) 水セメント比が大きくなると、透水フラックス q_{600} も大

きくなる傾向にある。また、水セメント比と透水フラックス q_{600} には強い相関関係がみられ、透水フラックス q_{600} は、水セメント比が透水性に及ぼす影響をよく捉えている。

- 4) 単位細骨材量が透水フラックス q_{600} に及ぼす影響は一樣ではなく、単位細骨材量と透水フラックス q_{600} には一樣で強い相関関係はみられない。
- 5) 一連した実験結果から、透水フラックス q_{600} により硬化モルタル表層の透水性評価ができることが示された。

謝辞

本実験に協力していただいた大塚史織君、堀了也君、武藤美里君、山本大貴君(いずれも岐阜工業高等専門学校学生)に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会：新コンクリートの非破壊検査試験，pp.192-195，2010.3
- 2) 林 和彦，細田 暁：コンクリート構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1769-1774，2011.7
- 3) 豊福俊泰，永松武則，峰村富夫，添田政司：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1719-1724，2018.7

- 4) RILEM Report 40, Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover, State of the Air Report of RILEM Technical Committee TC 189-NEC“Non-Destructive Evaluation of the Concrete Cover”, (ed. by R.Torrent and L.Fernandez Luco), 2007
- 5) 株式会社マルイ：コンクリート透水試験機GWT(型式：MIN-183-0-01)取扱説明書
- 6) 林 和彦，細田 暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集E2，Vol.69，No.1，pp.82-97，2013
- 7) 井川倫宏，玉岡優児，細田 暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価基準に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，Vol.29，pp.101-109，2018
- 8) 澤田 陽，田中愛美，片桐彰吾，犬飼利嗣：フレッシュモルタルの透水係数と硬化モルタルの透気性の関係に及ぼす配合要因の影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第16巻，pp.251-256，2016.10