

論文 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの水分浸透性に関する評価

平本 真也*1・大塚 勇介*1・植村 幸一郎*2・檀 康弘*3

要旨：コンクリート標準示方書の鋼材腐食の限界照査に水の浸透に伴う照査が追加され、水分浸透速度係数を用いて、構造物の必要かぶり厚さを算定できるようになった。同示方書では N, BB, FB の水分浸透速度係数が同じ値となっているが、高炉スラグ微粉末を用いると、一般的に水分浸透抵抗性は高くなるとされている。そこで本検討では、高炉スラグ微粉末置換率及び養生条件を変えたコンクリートを用いて、JSCE-G 582-2018 に準拠し水分浸透性を評価した。その結果、N と比較して高炉スラグ微粉末を用いた結合材は水分浸透抵抗性に優れ、水分浸透速度係数が小さくなることが確認された。

キーワード：水分浸透, 圧縮強度, アルキメデス法, トレント法, 質量変化, 高炉スラグ微粉末

1. はじめに

土木学会のコンクリート標準示方書が改訂され、コンクリート中の鋼材腐食の限界照査に水の浸透に伴う照査が追加された。同示方書において、水分浸透を表す指標としては水分浸透速度係数が用いられている。また、コンクリートに使用する結合材が普通ポルトランドセメント（以下、N）、高炉セメント B 種（以下、BB）、フライアッシュセメント B 種（以下、FB）の場合には、水結合材比を変数とした水分浸透速度係数の予測式を用いて算出してもよいとされている。これ以外の材料を用いる場合に関しては、JSCE-G 582-2018「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案）」を実施することにより、水分浸透速度係数を算出する。この係数を用いることで、RC 構造物の必要かぶり厚さを算定することができる。

前述したように、N, BB, FB は同一の予測式により水分浸透速度係数を算出することができるが、これはいくつかの既往の報告結果を用いて作成しており、統一的な試験における結果ではない。そのため、予測式と実測値の間には最大で±1.5 倍程度の差が生じている。高炉セメントなどの混合セメントは生成されるケイ酸カルシウム水和物（以下、C-S-H）の CaO/SiO₂ モル比が低く、その結果としてゲル空隙の複雑性が増す²⁾ことで、水の浸透は抑制されると推察される。また、BB を用いた場合の水分浸透抵抗性は N と比較して高くなると報告³⁾されているが、養生の影響については検討されていない。

そこで、本検討では、高炉スラグ微粉末の置換率及び現場環境における変動要因として考えられる養生条件を変化させたコンクリートを用いて水分浸透試験を実施し、各条件が水分浸透性に与える影響を明らかにすることを目的とした。

表-1 使用材料

材料名	記号	材料諸言
普通ポルトランドセメント	N	密度3.14g/cm ³ 、 比表面積3450cm ² /g
高炉スラグ微粉末	GGBS	SO ₃ =2.5%、密度2.91g/cm ³ 、 比表面積4290cm ² /g SO ₃ の調整は無水せっこうを使用
細骨材	S1	表乾密度2.58g/cm ³ 、FM1.56
	S2	表乾密度2.65g/cm ³ 、FM3.41
粗骨材	G	表乾密度2.73g/cm ³ 、FM6.84

表-2 試験水準

目標SL (cm)	試験 シリーズ	セメント 種類	W/C(%)		
			40	50	60
12	1	N	○	○	○
		BA	○	○	○
		BB	○	○	○
		BC	○	○	○
	2	BB3.5	-	○	-
BB4.5		-	○	-	
18	3	N	-	○	-
		BA	-	○	-
		BB	-	○	-
		BC	-	○	-

2. 試験概要

2.1 使用材料及び試験水準

本試験で使用した材料を表-1 に示す。結合材は普通ポルトランドセメント（以下、N）、高炉スラグ微粉末（以下、GGBS）を用いた。また、GGBS の SO₃ 量の調整は無水せっこうを用いた。細骨材は海砂（S1）及び海砂と砕砂を等量混合した混合砂（S2）を用い、粗骨材は硬質砂岩（G）を用いた。

試験水準を表-2 に示す。N 及び N に対して GGBS を 25, 45, 65% 置換することで高炉セメント A, B, C 種(以

*1 日鉄住金高炉セメント（株） 技術開発センター（正会員）

*2 日鉄住金高炉セメント（株） 技術開発センター

*3 日鉄住金高炉セメント（株） 技術開発センター 工博（正会員）

下、それぞれ BA, BB, BC)を試製し、W/C=40~60%のコンクリートを作製し試験に供した。なお、シリーズ1は目標スランプ12cmで実施した。また、高炉セメントの品質を改善することを目的として、結合材中のSO₃量を増加させるケース⁴⁾がある。そこで、その影響を評価するために、シリーズ2ではGGBSのSO₃量を3.5, 4.5%まで増加させ、Nに対してGGBSを45%置換することでBB(以下、それぞれBB3.5, BB4.5)を試製し試験に供した。シリーズ3は単位水量が増加したケースを想定し、目標スランプ18cmで実施した。

2.2 コンクリート配(調)合

表-3に本試験で用いたコンクリート配(調)合及びフレッシュ性状を示す。シリーズ1ではW/Cを40, 50, 60%とし、各W/Cにおいて単位水量を一定とし、結合材種類を変化させた。シリーズ2ではW/Cを50%とし、配(調)合を同一として結合材種類を変化させた。シリーズ3ではW/Cを50%とし、単位水量を一定として結合材種類を変化させた。なお、目標空気量は4.5%として、高性能AE減水剤及びAE助剤を用いて調整した。

2.3 試験項目

試験は水分浸透試験、圧縮強度試験、アルキメデス法による空隙量測定、トレント法による透気試験、透気試験用試験体を用いた質量測定について行った。なお、本試験では各結合材種類における養生の影響を把握するために、養生条件S(封かん養生期間3日)、コンクリート標準示方書に示されている養生期間とした養生条件M(N及びBA:封かん養生期間5日, BB:封かん養生期間7日, BC:封かん養生期間9日)、養生条件L(封かん養生期間28日)の3種類の養生を施した試験体を用いて各試験を実施した。

水分浸透試験は、φ10×20cmの円柱供試体を用いてJSCE-G 582-2018に準拠し実施した。試験体は脱型後、試験体底面から25mmの位置を切断した後、20℃、R.H60%環境下に91日間静置した。その後、24時間の質量変化が0.1%以下であることを確認し、試験体側面をテープで被覆し、同環境下において試験を実施した。

圧縮強度試験は、水分浸透試験体と同養生を施したものをを用いて、浸漬開始時にJIS A 1108に準拠し実施した。

アルキメデス法による空隙量測定は、水分浸透試験体と同じ処理を施した試験体を用いて、浸漬開始時に図-1に示すように、湿式カッターを用いてコンクリート側面から2cm程度除外するように切断した後、浸漬面から1cm間隔で深さ方向に5層分採取した試験片を用いて実施した。採取後、直ちに40℃で1週間乾燥させ、恒量になったことを確認し乾燥質量(W₁)を測定した。その後、減圧により試験体へ吸水処理を施し、恒量になったことを確認し飽水質量(W₃)を測定した。次に、水中質量(W₂)

表-3 コンクリート配(調)合

目標SL (cm)	W/C (%)	結合材 種類	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						SL (cm)	Air (%)	C.T (°C)
				W	N	GGBS	S1	S2	G			
12	40	N	42.3	176	440	-	423	282	1007	13.5	4.0	20.8
		BA		176	330	110	421	281	1002	12.5	3.8	20.7
		BB		176	242	198	420	280	999	12.5	4.6	19.7
		BC		176	154	286	418	279	996	13.0	4.4	21.3
	50	N	45.9	174	348	-	482	322	988	10.0	3.8	20.4
		BA		174	261	87	481	321	986	11.0	3.7	20.6
		BB		174	191	157	479	319	983	12.0	3.4	19.9
		BC		174	122	226	478	318	980	12.5	3.7	20.9
	60	N	48.1	172	287	-	521	348	980	10.0	4.5	20.7
		BA		172	215	72	520	347	977	11.5	4.3	20.7
		BB		172	158	129	518	346	977	12.0	4.7	19.7
		BC		172	100	186	517	345	975	13.0	4.8	21.0
18	50	BB3.5	45.9	174	191	157	479	319	983	11.0	3.7	21.5
		BB4.5		174	191	157	479	319	983	11.0	4.0	21.5
		N		184	368	-	490	327	931	17.0	4.5	20.0
		BA		184	276	92	489	326	925	18.0	4.3	20.0
		BB		184	202	166	487	325	925	17.5	3.7	19.9
		BC		184	129	239	485	324	923	19.5	4.5	20.1

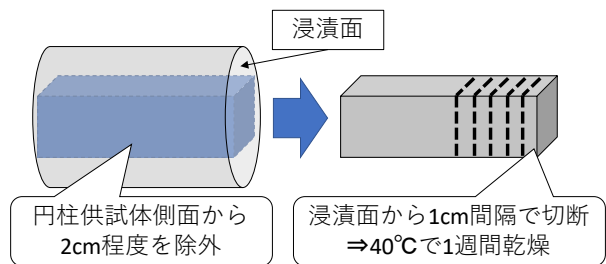


図-1 空隙量測定用試料採取手順

を測定し、式(1)により見かけの空隙量を算出した。

$$\text{見かけの空隙量} = [(W_3 - W_1) / (W_3 - W_2)] \times 100 \quad (1)$$

透気試験は15×15×10cmの角柱供試体を用い、水分浸透試験体と同じ養生を施し、ダブルチャンバー方式のトレント法により、浸漬時の表面透気係数を測定した。加えて、質量減少率は同試験体を用いて、脱型時及び浸漬開始時の質量変化から算出した。

3. 結果及び考察

3.1 GGBS置換率の影響(シリーズ1)

(1) 水分浸透速度係数

図-2に各条件における浸漬時間の平方根と水分浸透深さの関係を示す。図-3~5に結合材種類及びW/C別に各養生条件における水分浸透速度係数(A)及び定数(B)を示す。ここで、水分浸透速度係数及び定数は図-2に示す各浸漬時間の3点から算出できる傾き及び切片をそれぞれ意味し、定数は水分浸透速度係数の妥当性を検証できるように記載することが試験方法に書かれているため付記する。なお、図中の結合材種類と共に示す数字はW/Cを表す。

図-3より、養生期間が短い場合、結合材種類に関わらず、W/Cの増加に伴い、水分浸透速度係数が増加する傾向が確認された。結合材種類の影響に関しては、BC、

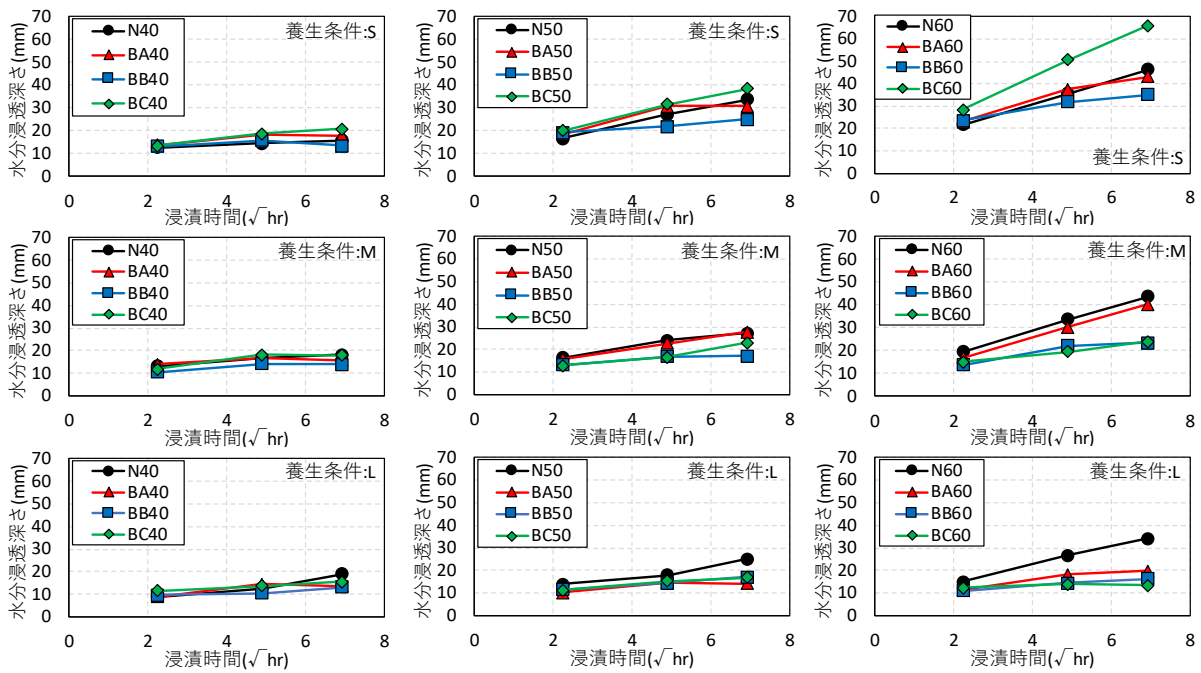


図-2 浸漬時間と水分浸透深さの関係（上：養生条件S，中：養生条件M，下：養生条件L）

N, BA, BB の順に水分浸透速度係数が小さくなる傾向にあった。GGBS を用いた結合材は初期養生が不十分な場合コンクリート物性が低下すると報告⁹⁾されているが、本試験結果では BC のみその様な傾向が確認された。水分浸透抵抗性に関しては、初期養生期間が3日間と短い場合でも GGBS 置換率45%までであれば低下しないことが確認された。ただし、BC 以外においても、コンクリート作製時の条件などによっては、水分浸透速度係数が比較的大きくなる場合があると予測されるため、初期養生を怠らないことは重要である。

図-4 より、示方書に示された養生期間とした場合、N 及び BA に関しては、W/C の増加に伴い、水分浸透速度係数が増加する傾向にあった。また、BB 及び BC においては W/C が増加した場合でも、N 及び BA の水分浸透速度係数と比較して大きくならないことが確認された。コンクリート標準示方書に定められている初期養生を適切に施すことによって、BB 及び BC の水分浸透抵抗性は向上することが確認された。

図-5 より、十分な養生を施した場合、N は W/C の増加に伴い水分浸透速度係数が増加する傾向が確認された。また、GGBS を用いた結合材に関しては、W/C が増加した場合でも水分浸透速度係数は N と比較して大きくならないことが確認された。

養生条件及び結合材種類によって程度は異なるが、基本的に GGBS を用いた結合材は水分浸透抵抗性が N と比較して優れている傾向が確認された。また、養生条件ごとに各 GGBS 置換率の水分浸透抵抗性が異なった要因は、

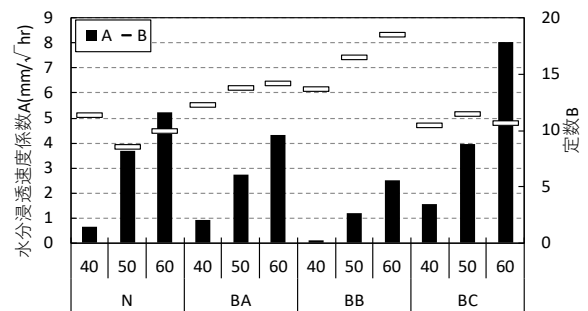


図-3 水分浸透速度係数と定数（養生条件S）

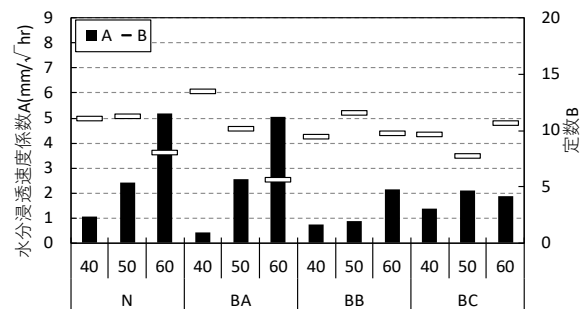


図-4 水分浸透速度係数と定数（養生条件M）

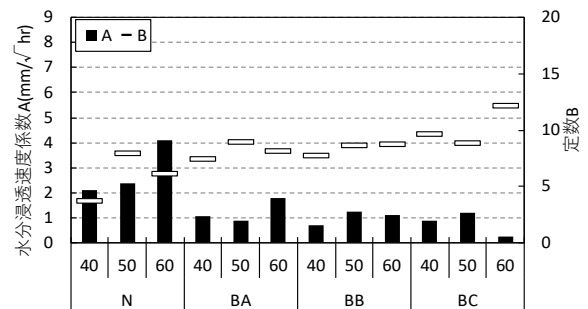


図-5 水分浸透速度係数と定数（養生条件L）

GGBS の置換率及び反応率の影響であると推察されるが、この関係を明らかにすることは今後の課題である。

(2) 圧縮強度と水分浸透速度係数の関係

図-6 に浸漬時の圧縮強度と水分浸透速度係数の関係を示す。養生条件 S の場合、強度の増加に伴い、水分浸透速度係数が小さくなる傾向にあった。また、BB 以外の水準において同様な傾向が確認されたが、BB に関しては強度に対する水分浸透速度係数が小さい傾向にあった。養生条件 M の場合、N 及び BA は養生条件 S と同様な傾向にあったが、BB 及び BC に関しては、強度に対する水分浸透速度係数が小さい傾向にあった。養生条件 L の場合、N と比較して、GGBS を用いた結合材は比較的強度が低くても水分浸透速度係数が小さい傾向にあった。

強度と水分浸透速度係数は概ね負の関係を示しているが、結合材種類や養生条件が異なることでその程度も変わるため、強度だけでは評価ができないことが確認された。

(3) 見かけの空隙量と水分浸透速度係数の関係

図-7 にアルキメデス法による見かけの空隙量と水分浸透速度係数の関係を示す。なお、ここで示す空隙量は水分浸透試験によって浸水した深さまでの各層の平均値を用いている。

養生条件 S の場合、結合材種類に関わらず、空隙量の増加に伴い、水分浸透速度係数が大きくなる傾向にあった。また、GGBS 置換率が高くなることに伴い、計測された空隙量に対する水分浸透速度係数が小さくなる傾向にあった。

養生条件 M の場合、概ね養生条件 S と同様に空隙量の増加に伴い水分浸透速度係数は大きくなる傾向にあるが、

BB 及び BC に関しては、空隙量が多いにも関わらず、水分浸透速度係数は小さい傾向にあった。

養生条件 L の場合、N と比較して、GGBS を用いた結合材は空隙量が多くなる傾向にあったが、水分浸透速度係数は小さくなる傾向にあった。

GGBS を結合材として用いた場合、空隙が緻密になることで気体やイオンなどの拡散抵抗性が向上すると報告例⁶⁾されているが、本研究の水の浸透に関しては、比較的空隙量が多くなる場合でも、GGBS を用いることで水の浸透抵抗性が向上する傾向が確認された。つまり、GGBS を用いた場合、空隙を緻密にするため水分浸透抵抗性が向上したのではなく、空隙の容積としては増加するが、C-S-H のゲル空隙を複雑にすることにより、水の移動を抑制したためであると推察されるが、今後の確認が必要である。

(4) 表面透気係数と水分浸透速度係数の関係

図-8 に表面透気係数と水分浸透速度係数の関係を示す。養生条件 S の場合、表面透気係数の増加に伴い、水分浸透速度係数が増加する傾向にあった。また、BB 以外は同様な傾向であるが、BB に関しては透気係数に対する水分浸透速度係数が小さい傾向にあった。

養生条件 M 及び L の場合、養生条件 S の様な透気係数と水分浸透速度係数の明確な関係は確認されなかった。ここで、図-9 に W/C 別に全ての養生条件及び結合材種類の表面透気係数と水分浸透速度係数の関係を示す。なお、図中の塗りつぶしプロットは N を表す。透気係数の値が 0.3 程度を境に水分浸透速度係数の変動傾向に差が生じ、表面透気係数が 0.3 以下における水分浸透速度係数は概ね 1~2 程度と一定になることが確認された。

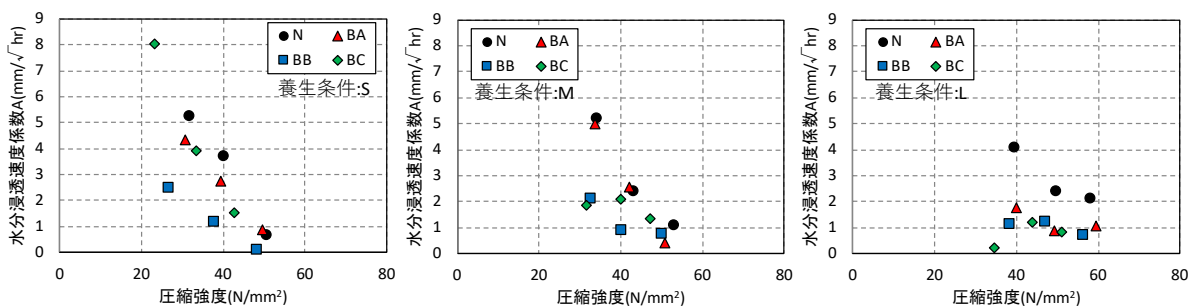


図-6 各養生条件における圧縮強度と水分浸透速度係数の関係 (左から、養生条件 S, M, L)

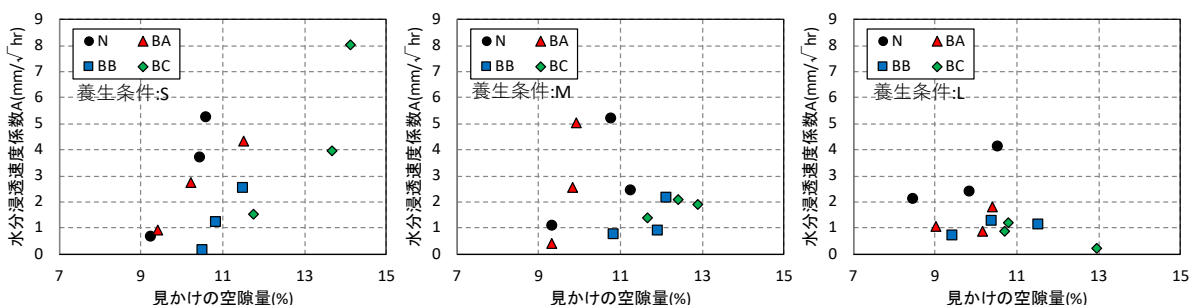


図-7 各養生条件における見かけの空隙量と水分浸透速度係数の関係 (左から、養生条件 S, M, L)

(5) 質量減少率と水分浸透速度係数の関係

図-10 に脱型時を基準として 91 日間乾燥させた際の質量減少率と水分浸透速度係数の関係を示す。なお、図中の塗りつぶしプロットは N を表す。

W/C50%及び 60%の場合、質量減少率が低くなることに伴い、水分浸透速度係数が小さくなる傾向にあり、W/C40%では質量減少率に関わらず水分浸透速度係数が1~2程度と一定になった。また、GGBS を用いた場合、条件によって程度は異なるが、Nと比較して質量減少率が低くなる傾向が確認された。図-7の空隙量の結果では、GGBSを用いた結合材は空隙量が増加する傾向にあり、水分逸散量は多くなると考えられたが、その関係性は確認されなかった。

混和材を用いた結合材は N と比較して、総空隙量は増加するが空隙の連続性が減り、複雑性が増すことによって、水の移動が抑制される傾向にあると報告されている。本試験においても、GGBSを用いることで空隙量は増加するが、空隙構造が複雑になることで水分の浸透を抑制したと推察される。水の浸透に関して、硬化体の含水状態の影響も含まれている可能性もあるが、本研究範囲内ではその影響度合いについては特定できていない

め、今後確認が必要である。

3.2 GGBS 中の SO₃ 量の影響 (シリーズ 2)

図-11 に浸漬時間の平方根と水分浸透深さの関係を示す。図-12 に浸漬時間及び浸透深さの関係から算出した、養生条件 M の結合材種類毎の水分浸透速度係数 (A) 及び定数 (B) を示す。

GGBS 中の SO₃ 量が増加した場合における水分浸透速度係数は BB (SO₃=2.5%) と比較して、BB3.5 及び 4.5 どちらも同等となることが確認された。水分浸透抵抗性に関して、GGBS 中の SO₃ 量は、GGBS 置換率の様に影響を及ぼす要因ではないと考えられる。

3.3 配 (調) 合の影響 (シリーズ 3)

図-13 に浸漬時間の平方根と水分浸透深さの関係を示す。図-14 に浸漬時間及び浸透深さの関係から算出した、養生条件 M の目標 SL=12 及び 18cm の水分浸透速度係数 (A) 及び定数 (B) を結合材種類別に示す。なお、図中の結合材種類と共に示す数字は目標 SL を表す。

SL=18cm の場合、SL=12cm と比較して水分が浸透しやすくなる傾向にあった。水はコンクリート中の粗骨材を避け、モルタル中の連続空隙内を移動すると考えられる。そのため、SL=18cm では単位水量の増加に伴うモルタル

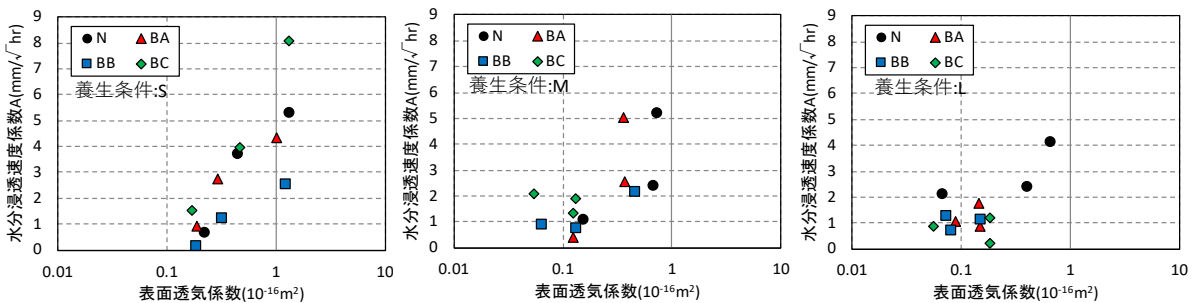


図-8 各養生条件における表面透気係数と水分浸透速度係数の関係 (左から、養生条件 S, M, L)

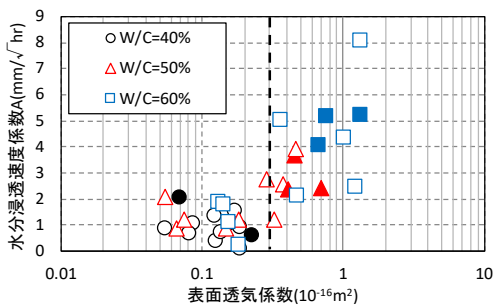


図-9 表面透気係数と水分浸透速度係数の関係

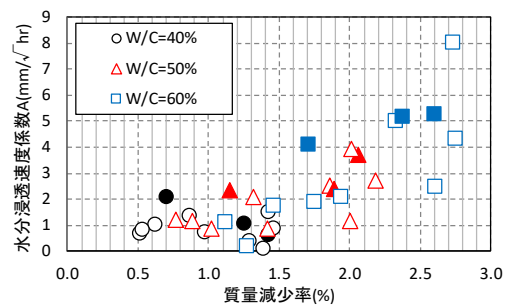


図-10 質量減少率と水分浸透速度係数の関係

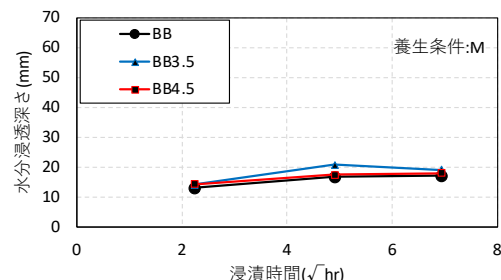


図-11 SO₃ 量が水分浸透深さに与える影響

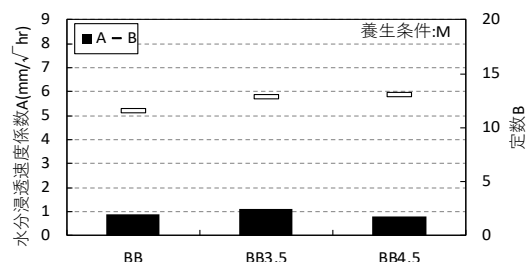


図-12 SO₃ 量が水分浸透速度係数に与える影響

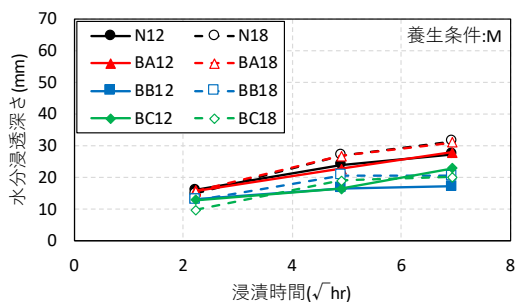


図-13 スランプが水分浸透深さに与える影響

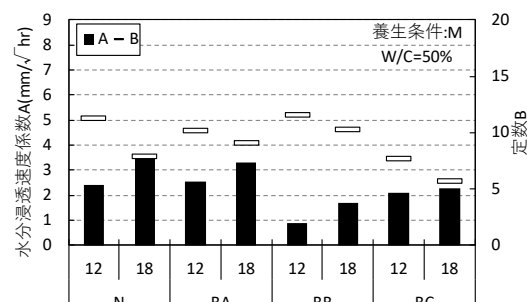


図-14 スランプが水分浸透速度係数に与える影響

分の増加，加えて，単位粗骨材量の減少に伴う粗骨材の障害が減少することで水分浸透深さが増し，水分浸透速度係数が大きくなったと推察される。

単位水量を増加させた場合，結合材種類に関わらず水分浸透速度係数は増加する傾向にあるが，結合材種類の相対関係は SL=12cm と同じであることが確認された。

4. まとめ

結合材種類及び養生条件などを変えた場合におけるコンクリートの水分浸透性を調査した結果，本検討内において以下の知見が得られた。

- (1) GGBS を用いた場合，養生条件によって程度は異なるが，N と比較して水分浸透抵抗性が向上し，水分浸透速度係数が小さくなる傾向にあることが確認された。
- (2) 圧縮強度及びアルキメデス法による見かけの空隙量では水分浸透速度係数を一義的に評価することが困難であった。GGBS を用いた結合材は N と比較して，強度発現性が低い，また空隙量が多い場合においても水分浸透抵抗性に優れていることが確認された。
- (3) 表面透気係数の値が 0.3 を下回ることで水分浸透速度係数は 1~2 程度と一定になった。空隙構造が複雑になることで，水の浸透を抑制したためと推察された。
- (4) BB に用いる GGBS 中の SO₃ 量が 2.5 から 4.5% まで増加した場合，水分浸透速度係数は同等であった。
- (5) 単位水量が増加した場合 (SL=18cm)，結合材種類に関わらず水分浸透抵抗性が低くなり，水分浸透速度係数が大きくなることが確認された。また，結合材種類の相対関係は SL=12cm の場合と同様であるこ

とが確認された。

本検討内において，N と比較して GGBS を用いた結合材の水分浸透抵抗性は優れることが確認されたが，浸透抑制メカニズムについては明らかにならなかった。水分浸透抵抗性と各 GGBS 置換率における反応性や生成する C-S-H との関係性を明らかにすることが今後の課題である。

参考文献

- 1) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書改訂資料設計編・施工編，コンクリートライブラリー149，pp.53-74，2018.3
- 2) 真島耕平，川原真一，菊池道生，佐伯竜彦：高炉スラグ微粉末およびシリカフュームを用いたセメント系硬化体の塩分浸透抵抗性，セメントコンクリート論文集，Vol.66，pp.452-459，2012
- 3) 江口康平，加藤佳孝，伊東篤史：高炉スラグ微粉末を混合したコンクリート中への水分浸透に関する実験的検討，第 72 回セメント技術大会講演要旨，pp.246-247，2018
- 4) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016，pp.203-208，2016.11
- 5) 檀康弘ほか：高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係，土木学会論文集 E，Vol.65，No.4，pp.431-441，2009.10
- 6) 土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会報告書，コンクリート技術シリーズ 89，pp.132-140，2010.5
- 7) Olsson.N et al.: Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume, Cement and Concrete Research, Vol.106, pp.23-32, Apr.2018