

論文 1 年間屋外曝露した養生条件が異なるコンクリートの諸物性の変化

幸田 圭司^{*1}・宮本 慎太郎^{*2}・皆川 浩^{*3}・久田 真^{*4}

要旨: 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリート (BBFS) と普通ポルトランドセメントコンクリート (OPC) を、材齢 28 日まで種々の養生を施した後に約 1 年間屋外曝露することで、養生条件と環境作用の影響を評価した。その結果、雨かきがある環境下では、 $\phi 10 \times 20$ cm のコンクリート供試体の圧縮強度は屋外曝露 1 年後では養生条件の影響が小さくなることがわかった。しかし、細孔径分布および水分逸散抵抗性の評価結果を踏まえると、特に BBFS では、耐久性と密接に関連する物質移動抵抗性は曝露 1 年後においても養生条件の影響を受けるケースがあり、曝露環境の影響はセメント種類によって異なることが示唆される結果が得られた。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, 養生, 曝露試験, 細孔径分布, 水分逸散, 圧縮強度

1. はじめに

環境負荷の低減への貢献や、グリーン購入法の特定調達品目に指定されるなどといった社会的背景から、高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材としての利用が増加している。また、その利用によって、遮塩性能の向上やアルカリ骨材反応の抑制などの耐久性の向上も期待できる^{1,2)}ことから、今後、高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材としての有効利活用はさらに増加していくと考えられる。

一方で、コンクリートが所要の性能を発揮するには一定期間の湿潤養生が不可欠であり、示方書においてもセメントの種類、施工日の気温に応じてそれぞれ適切とする湿潤養生期間が示されている³⁾。特に高炉スラグ微粉末を混和したコンクリート (以下、BFS) は、水和反応が普通ポルトランドセメントコンクリート (以下、OPC) と比較して遅く、材齢初期の強度発現性が遅延する⁴⁾ため、入念に養生を施すことが推奨されている。

養生条件が BFS の性能に及ぼす影響についてはこれまで多くの研究がなされている⁵⁻⁷⁾。これらの既往の文献を整理すると、BFS の性能は OPC と比較して、養生の影響を受けやすいことが指摘されている⁷⁾。これらの研究の多くは所定の養生直後の物性を評価しているが、構造物の供用開始後に降雨などの水の供給がある場合には、低級な養生を施された場合でも BFS の養生直後の性能は改善される可能性がある。

伊代田ら⁸⁾は、高炉スラグ微粉末の混和の有無に関わらず、セメント硬化体が材齢 28 日まで乾燥履歴を受けた場合でも、その後の水分供給によって、材齢初期から連続的に水中養生を施した場合とほぼ同等ま

で水和が進行し、緻密な細孔構造を形成することを報告している。また、郭ら⁹⁾は、乾燥環境下においても、特に BFS の場合にはコンクリート内部で水和が進行することを報告している。以上の報告に基づく、系外からの水分の供給状況によっては、屋外環境で供用される BFS の性能は、養生直後から改善される可能性がある。

以上の着眼点から、本研究では、材齢 28 日まで種々の養生を施した OPC および BFS をおよそ 1 年間降雨の影響を受ける屋外環境に曝露することで、OPC と BFS の諸物性に及ぼす養生条件と環境作用の影響を評価した。評価項目としては、物質移動に大きな影響を及ぼす細孔構造、耐久性を判断する際に必要不可欠となる水分移動抵抗性、さらには基本性能として重要な圧縮強度の 3 つの観点で評価した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表 - 1 に示す示方配合を用いて、空気量 5.0 ± 1.5 % , スランプ 8.0 ± 2.5 cm となるように普通ポルトランドセメントコンクリート (OPC) と、普通ポルトランドセメントの質量に対して 45 % (B 種相当) で高炉スラグ微粉末 (石膏添加品) を内割置換したコンクリート (BBFS) を作製した。なお、混和剤はリグニンスルホン酸系の AE 減水剤 (A_1) と、主成分がアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤の AE 剤 (A_2) を使用した。

供試体寸法は、 $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体および $100 \times 100 \times 400$ mm の角柱供試体とし、打込みから約 24 時間後に脱型を行い、 20 ± 3 °C, (60 ± 5) % R.H. で、表 - 2 に示す条件で材齢 28 日まで養生を施した。なお、

*1 東北大学 工学部工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東北大学 工学部工学研究科土木工学専攻助教 博 (工) (正会員)

*3 東北大学 工学部工学研究科土木工学専攻准教授 博 (工) (正会員)

*4 東北大学 工学部工学研究科土木工学専攻教授 博 (工) (正会員)

表 - 1 示方配合およびフレッシュ性状

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量						フレッシュ性状			
			(kg/m ³)					(g/m ³)		スランプ値 (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
			W	C	BS	S	G	A ₁	A ₂			
OPC	55	45.3	156	284	0	819	1098	909	5.68	9.0	6.3	18.1
BBFS			154	154	126	819	1098	1119	5.59	5.5	4.0	17.2

A₁ : AE 減水剤, A₂ : AE 剤

表 - 2 養生条件

記号	養生条件
28D	材齢 28 日まで気中養生
5W	5 日間水中養生後, 材齢 28 日まで気中養生
7W	7 日間水中養生後, 材齢 28 日まで気中養生
28W	材齢 28 日まで水中養生

7 日間水中養生 (7W) については BBFS のみ実施した。

2.2 曝露条件

曝露試験は宮城県仙台市の東北大学社会環境工学実験棟の屋上で、およそ 1 年間実施した。供試体は打込み底面を曝露上面とし、写真 - 1 のように角柱供試体の長辺が北向きになるように設置した。

2.3 試験項目およびその方法

養生終了後 (材齢 28 日) と曝露試験後に、細孔径分布、水分逸散量、圧縮強度を測定した。以下に、上記の試験 3 項目の詳細を示す。

2.3.1 細孔径分布

試料は図 - 1 (左下) のように表層 10 mm 部および中心 50×50 mm 部から、できる限り粗骨材が混入しないように約 5 mm 角の試料を採取し、その試料を減圧下で 30 分間アセトンに浸せきさせ、空隙内の水分をアセトンに溶解させて空隙水を取り除いた。その後、ドラフトチャンバー内で試料に付着したアセトンを十分揮発させた後、過飽和の塩化リチウム溶液で乾燥させたデシケーター内で試料を保管した。その後、凍結乾燥機で 7 日間試料を乾燥した後、水銀圧入法により細孔径分布を測定した。測定対象は、養生条件が最も異なる 28D 養生および 28W 養生の 2 水準で実施した。また、本論文では細孔径分布の評価指標として細孔率を用いた。ここで、細孔率とは、ある細孔直径以上の細孔の体積と試料体積の百分率である。

2.3.2 水分逸散量

試験供試体は、角柱供試体から湿式のコンクリートカッターで厚さ 25 mm で切り出し (寸法: 100×100×25 mm)、JSCE-G 571 3.2 に記載されている「供試体の処理」に準拠して飽水処理後、図 - 1 (右下) のように型枠面 3 面を残してエポキシ樹脂を塗布し、型枠面 3 面を開放面として水分が逸散するようにした。なお、エポキシ樹脂が硬化するまでの間、試験供試体からの水分逸散を防ぐ目的で、型枠面 3 面 (開放面) を養生



写真 - 1 供試体の曝露の様子 (降雨時)

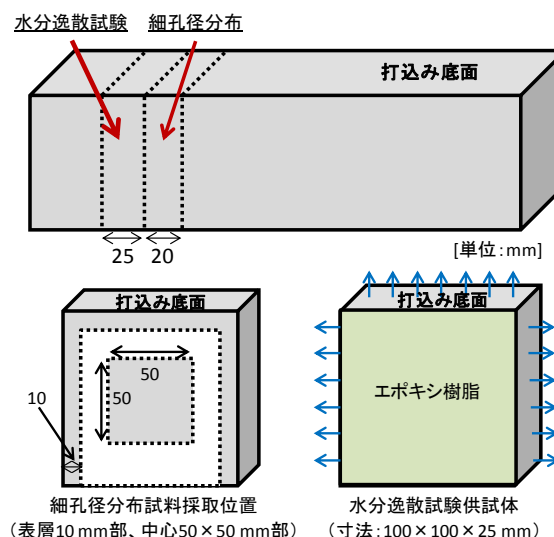


図 - 1 各試験の供試体概要

テープで保護した。エポキシ樹脂が硬化した後、20°C、60 % R.H.の恒温恒湿槽内に供試体を設置し、約 24 時間毎に計 28 日間、供試体の質量を測定した。なお、本試験では、質量変化から求められる水分逸散量を開放面積 (型枠面 3 面の合計面積) で除した値を水分逸散量 [g/cm²]と定義し、評価の指標とした。

2.3.3 圧縮強度

寸法φ100×200 mm の円柱供試体を用いて、JIS A 1108 に準拠して、圧縮強度試験を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 養生直後と屋外曝露後での細孔構造の変化

伊代田らの研究⁸⁾に基づくと、各種養生終了後の屋

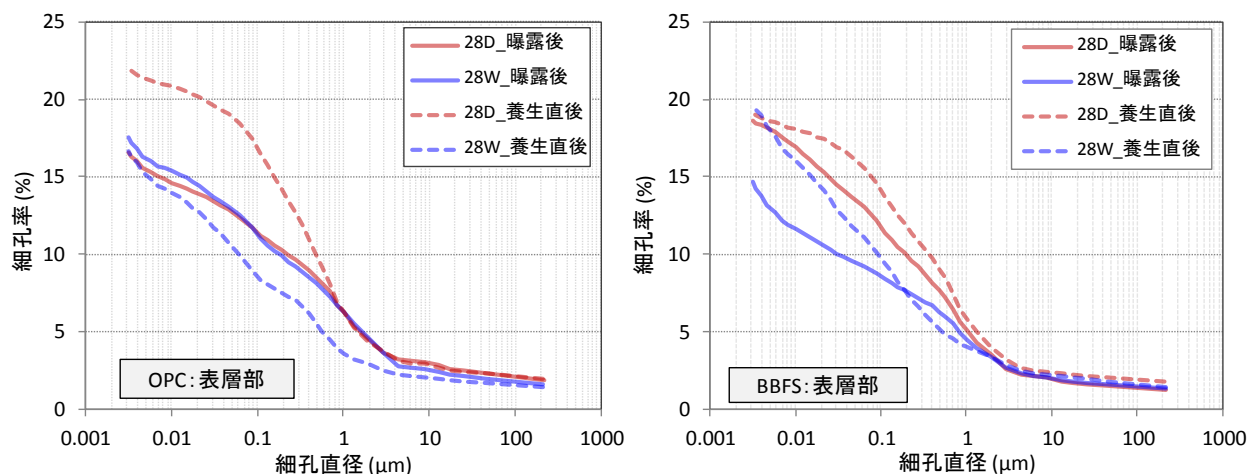


図 - 2 表層部の細孔率と細孔直径の関係（左：OPC，右：BBFS）

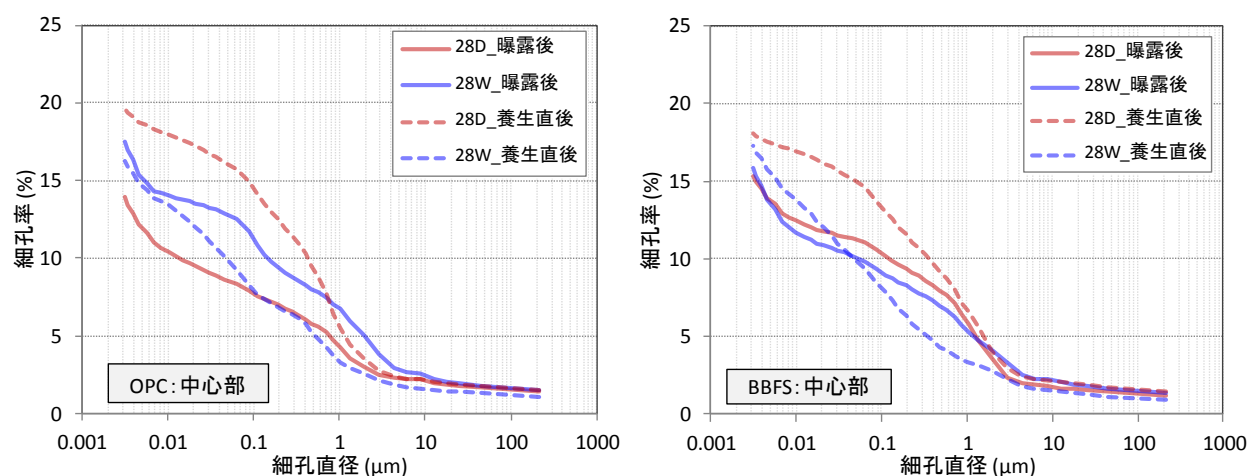


図 - 3 中心部の細孔率と細孔直径の関係（左：OPC，右：BBFS）

外曝露の影響でOPCおよびBBFSの性能が変化する場合、性能の変化に大きな影響を及ぼすと考えられる作用は水分の供給であり、その応答は細孔構造の変化である。さらに、水の影響は深さ方向に均一ではなく分布を持つ。そこで本研究では、供試体表層部（曝露表面から10 mm程度の範囲：以下、表層部）と供試体中心部（曝露表面から25 mmより奥側：以下、中心部）の2点における養生直後と屋外曝露後での細孔構造の変化を整理した。図-2および図-3に、表層部および中心部の細孔率と細孔直径の関係の比較結果をそれぞれ示す。なお、以降で用いる「総細孔率」とは、図-2および図-3に示される細孔率を表す曲線の左端部の細孔率の値を指し、細孔構造の緻密さを示す一つの指標として用いた。

(a) 表層部での細孔構造の変化

図-2によると、養生直後（図中：破線）では、既往の研究⁷⁾と同様に、OPCおよびBBFSのどちらにおいても、28D養生は28W養生と比較して総細孔率が高く、細孔構造が粗であることがわかる。このことから、屋外環境に曝露される前の細孔構造に関しては、養生の影響を強く受けることがわかった。

次に、これら供試体をおよそ1年間屋外環境に曝露した場合の結果（図中：実線）に着目すると、OPCの28D養生については、養生直後からの細孔構造の改善、すなわち、総細孔率の減少が認められた。また、28D養生と28W養生で細孔率と細孔直径の関係はほぼ同様であることから、OPCの場合には、1年間の屋外曝露により細孔構造の緻密さが養生条件に関わらず同程度になると言える。一方で、BBFSの場合はOPCとは異なり、28D養生については、屋外曝露の影響はさほど大きくならず、総細孔率はOPCほど大きく変化しなかった。曝露後の総細孔率の変化がOPCとBBFSで異なる理由の一つとして、水和反応による緻密化のプロセスの違いが考えられる。BBFSは、結合材のうち45%が潜在水硬性を有する高炉スラグ微粉末であり、それはアルカリ雰囲気において反応が活性化する¹⁰⁾とされている。ここで、JIS A 1152に準拠してBBFSの28D養生と28W養生の型枠面3面の平均中性化深さを測定した結果、それぞれ2.0 mmおよび0.8 mmであり、28D養生の方が28W養生よりも中性化の進行が顕著であった。この結果を踏まえると、特に28D養生のように細孔構造が粗な場合、屋外環境に

においては中性化の進行に伴いアルカリ性が失われ、曝露期間中の供試体表層部の BBFS の反応は十分に活性されなかった可能性が考えられる。ただし、BBFS の 28W 養生のように水が順調に進行していると考えられるものに関しては、曝露後において表層部での総細孔率が大幅に減少していた。この理由については、ポゾラン反応¹¹⁾によって細孔構造が緻密化した可能性が考えられる。すなわち、BBFS に関しては、28W 養生のように十分な養生を施し、ポルトランダイトを十分に生成させることでポゾラン反応が活性化し、その後の性能も大幅に向上する可能性が考えられる。さらに、水分逸散抵抗性については後述するが、BBFS の 28W 養生では、養生直後から高い水分逸散抵抗性を有することが確認されており、それによって屋外曝露期間中も高い含水状態が保たれ、水和反応が進行した可能性も考えられる。

(b) 中心部での細孔構造の変化

図 - 3 によると、養生直後の細孔構造（図中：破線）に関しては、OPC および BBFS のどちらの場合においても、28D 養生の方が 28W 養生のものと比較して、総細孔率が高く、細孔構造が粗であることがわかる。これは表層部と同様の結果であり、中心部においても屋外環境に曝露する前は養生の影響を強く受けると言える。

次に、これら供試体をおよそ 1 年間屋外環境に曝露した結果（図中：実線）に着目すると、OPC の 28D 養生に関しては、表層部と同様に、総細孔率が養生直後から大幅に減少しており、曝露後には 28W 養生よりも低くなっていた。この理由については、本試験は供試体数を 1 体で実施したため、測定誤差の可能性が最も高いと考えられるが、屋外環境での水分の供給量の違いが影響を及ぼした可能性もある。すなわち、OPC の 28D 養生は 28W 養生と比較して、表層部の細孔構造が粗であるため、より多くの水分が中心部まで供給されたとも考えられる。ここで、参考のため図 - 4 および図 - 5 に養生直後に実施した水分逸散試験の結果を OPC および BBFS のそれぞれについて示す。図 - 4 より、OPC の 28D 養生の水分逸散量は 28W 養生と比較して多いことがわかる。このことから、28D 養生は 28W 養生と比較して、乾燥時にはより多くの水分が逸散するものの、降雨時にはより多くの水分が内部に供給される可能性が高いと言える。そのため、曝露期間中は、28D 養生は中心部においても水分の供給が多く、水和反応が進行したため、細孔構造が緻密化したものと推察した。

他方で、BBFS については、28D 養生、28W 養生ともに養生直後から総細孔率が減少していた。この理由については、28D 養生の場合においても、供試体中心部では表層部と比較して水分の逸散が生じ難く、養生期間中に十分な量のポルトランダイトが生成されたため、28D 養

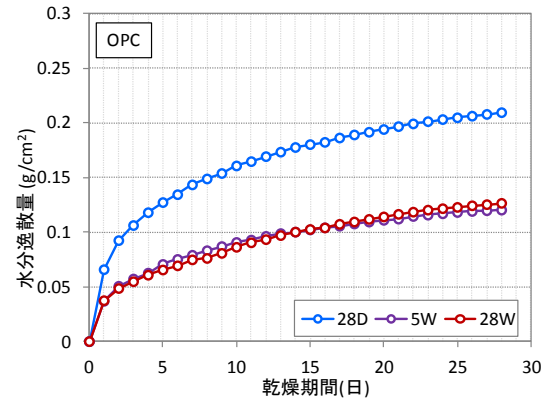


図 - 4 OPC の養生終了直後の水分逸散量

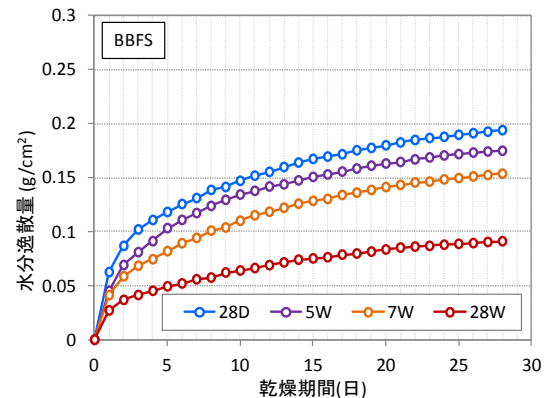


図 - 5 BBFS の養生終了直後の水分逸散量

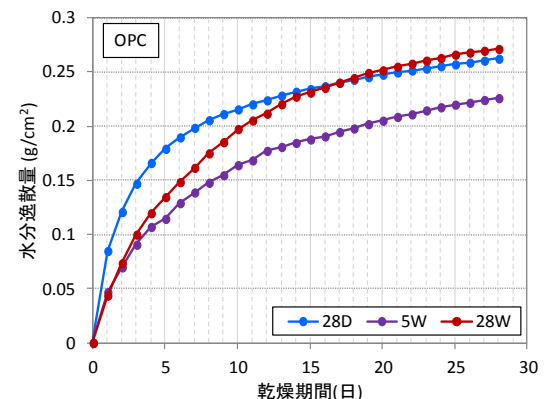


図 - 6 OPC の曝露後の水分逸散量

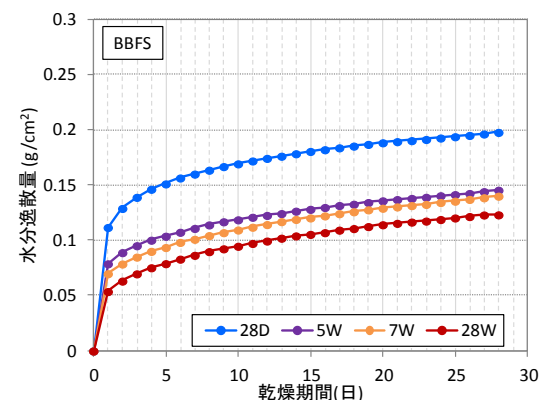


図 - 7 BBFS 曝露後の水分逸散量

生および 28W 養生ともに曝露期間中にもポズラン反応が進行し、細孔構造が緻密化したと考えられる。

3.2 屋外曝露後の水分逸散抵抗性の変化

図 - 6 および図 - 7 に、OPC および BBFS の曝露後の水分逸散量の推移を示す。図 - 6 によると、OPC については、曝露前の水分逸散量（図 - 4）と比較して、総じて水分逸散量が多くなっていることがわかる。特に、28D 養生については、曝露後に細孔構造が緻密化したにも関わらず、水分逸散量が増加していた。この理由の一つとしては、屋外環境に供試体を曝露したことによる諸要因（乾湿繰返しや凍結融解）に起因する微小ひび割れの進展の可能性が考えられる。また、細孔径分布の測定に供したコンクリート供試体中のモルタル部分と水分逸散試験で用いたコンクリート供試体の違いとして、前者はできるだけ粗骨材が混入しないように試料採取を行ったため、粗骨材界面の影響を後者よりも強く受けないと考えられる。すなわち、曝露後に水分逸散量が増加した要因としては、屋外曝露期間中の粗骨材界面等に発生する微小ひび割れの影響を受けた可能性が示唆される。ここで、28D 養生と 28W 養生で水分逸散量を比較すると、乾燥期間 28 日では 28D 養生と 28W 養生で水分逸散量はほぼ同等であったが、乾燥初期の水分逸散量は 28W 養生よりも 28D 養生の方が多かった。この結果から、低級な養生の場合には短期間で逸散する水分量が多くなると言える。

一方、BBFS については、どの養生条件においても乾燥 1 日目における水分逸散量が曝露後に増加していた。ここで、乾燥 28 日目の水分逸散量に対する乾燥 1 日目の水分逸散量の割合を図 - 8 に示す。図 - 8 より、養生条件によらず、養生直後よりも曝露後の値が大きくなっていることがわかる。このような結果となった要因として、特に高炉スラグ微粉末を多く混和した場合には水和反応が長期的に進行し、自己収縮によりひずみが生じるため、それに伴い表層部で微小ひび割れが発生した可能性が考えられる。ただし、乾燥 28 日目までの水分逸散量で評価した場合には、養生直後と曝露後の差は小さかったことから、このひび割れは深部まで進展しておらず、ごく表層部に留まったと推察した。また、OPC と BBFS で養生直後から曝露後にかけての水分逸散量の変化をそれぞれ比較すると、BBFS の場合、OPC で確認されたような養生直後からの水分逸散量の著しい増加は生じていなかった。この結果から、BBFS は OPC と比較して屋外曝露により粗骨材界面等に発生する微小ひび割れは生じにくいと考えられる。これについては、高炉スラグ微粉末を混和した場合には骨材界面が密実に充填されることが報告¹²⁾されていることから、本研究でも同様の現象が生じたと考えられる。そのため、BBFS の水分逸散抵抗性については曝露後でも養生条件の影響が残り、低級な養生

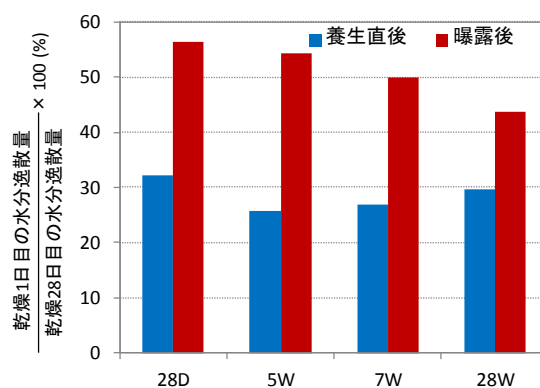


図 - 8 BBFS の乾燥 1 日目の水分逸散量の割合

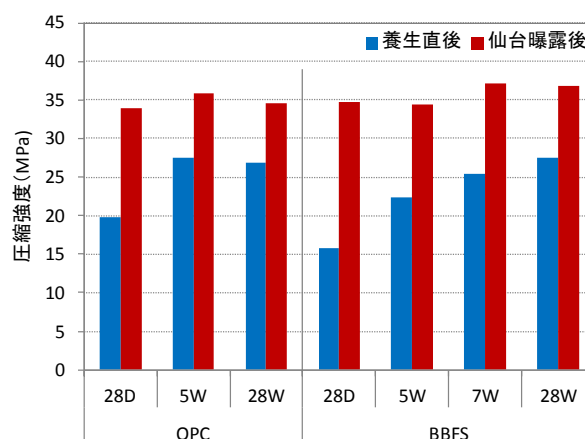


図 - 9 圧縮強度

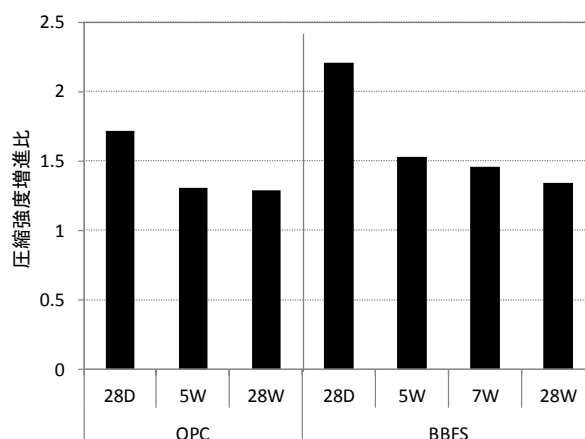


図 - 10 圧縮強度増進比

を施したもののほど水分逸散量が多くなったと推察した。

3.3 屋外曝露による圧縮強度の変化

図 - 9 に養生直後と曝露後の圧縮強度の試験結果を示す。全ての水準で養生直後からの強度増進が確認できた。曝露後の圧縮強度の養生期間ごとの差に着目すると、OPC および BBFS のどちらにおいても養生直後に顕著であった養生期間ごとの圧縮強度の差が小さくなることがわかった。図 - 10 に養生直後から曝露後にかけての圧縮強度増進比を示す。ここで、本研究における圧縮強度増

進比とは、曝露後の圧縮強度を養生直後の圧縮強度で除した値と定義した。図 - 10 より、圧縮強度増進比は養生が低級なものほど高くなっており、その傾向は BBFS で特に顕著であることがわかった。このように、BBFS では曝露後の圧縮強度が養生条件によらずほぼ同等であるにも関わらず、水分逸散抵抗性には養生条件の影響が残った。この結果は、曝露後の細孔構造の変化が圧縮強度と水分逸散抵抗性に及ぼす影響は、それぞれで異なることを示唆するものである。

4. まとめ

養生条件の異なるコンクリートを、降雨の影響のある屋外環境におよそ 1 年間曝露し、細孔径分布や水分逸散抵抗性、圧縮強度の変化を評価した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 屋外曝露 1 年後のコンクリートのモルタル部の細孔構造は、材齢 28 日までの養生直後から変化しており、その程度は養生条件によって異なる。養生条件が材齢 28 日まで気中養生であると細孔構造は屋外曝露によって緻密化するように変化する。しかし、材齢 28 日まで水中養生の場合は、必ずしも細孔構造が緻密化するとは限らない。これらの傾向は BBFS よりも OPC において顕著であった。
- 2) 材齢 28 日までの養生直後のコンクリートの水分逸散抵抗性は養生条件の影響を受け、養生期間中の水分供給が多い養生ほど、水分逸散抵抗性は高くなる。しかし、屋外曝露 1 年後のコンクリートの水分逸散抵抗性を評価した結果、OPC の水分逸散抵抗性は屋外曝露により変化し、養生の影響が不明確になった。一方、BBFS では水分逸散抵抗性に及ぼす養生の影響は、屋外曝露前後でほとんど変化がなかった。
- 3) 材齢 28 日までの養生直後の $\phi 10 \times 20$ cm のコンクリート供試体の圧縮強度は養生条件の影響を強く受け、養生期間中の水分供給が多い養生ほど、圧縮強度は高くなる。しかし、屋外曝露 1 年後のコンクリート供試体の圧縮強度は、いずれの養生条件であってもほぼ同等になった。養生直後からの圧縮強度の増進比は OPC よりも BBFS の方が大きく、さらには養生が低級なものほど大きくなる傾向を示した。
- 4) このように、降雨の影響がある環境下では、 $\phi 10 \times 20$ cm のコンクリート供試体の圧縮強度は屋外曝露 1 年後では養生条件の影響が小さくなる。しかし、水分逸散抵抗性の評価結果を踏まえると、耐久性と

密接に関連する物質移動抵抗性は曝露 1 年後においても養生条件の影響を受けるケースがあり、曝露環境の影響はセメント種類によって異なることが示唆された。

参考文献

- 1) 白木亮司，星野富夫，小林一輔：高炉セメントコンクリートの塩化物遮へい性能，土木学会第 44 回年次学術講演会，pp.250-251，1989.
- 2) 国府勝郎：高炉スラグ微粉末，コンクリート工学，Vol.26，No.4，pp.25-31，1998.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」，2012
- 4) 久我龍一郎，千葉裕人，久田真，岩城一郎：高炉セメントコンクリートの強度発現性に及ぼす養生条件の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.437-442，2006.
- 5) 加藤優典，辻貴大，浅本晋吾：高炉スラグ微粉末を用いたモルタル供試体の水分逸散と収縮特性に与える養生及び乾燥温度履歴の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.203-208，2010.
- 6) 郭度連，國府勝郎，李昌洙，李奎東：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの内部組織の形成に及ぼす置換率の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.783-788，2004.
- 7) 檀康弘，伊代田岳史，大塚勇介，佐川康貴，濱田秀則：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.
- 8) 伊代田岳史，魚本健人：乾燥による水和停止後の水分再供給による水和進行と細孔径分布の形成，生産研究，研究速報，Vol.53，No.5，pp.46-49，2001.
- 9) 郭度連，國府勝郎，宇治公隆：コンクリートの乾燥下における水分の存在状態および経時変化，コンクリート工学論文集，Vol.16，No.3，pp.1-10，2005.
- 10) 沼田晋一：高炉スラグ微粉末の利用，コンクリート工学，Vol.25，No.9，pp.28-39，1987.
- 11) 浅賀喜与志：セメントペースト硬化体とシリカフェームまたは高炉スラグ微粉末のポゾラン反応に伴う水和組織の変化，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，No.1，pp.2-8，2012.
- 12) 小林孝一，服部篤史，宮川豊章，藤井學：微粉末混和材を用いたセメントペーストと骨材の界面性状，材料，Vol.45，No.9，pp.1001-1007，1996.