

論文 廃瓦粗骨材の内部養生による高炉 B 種コンクリートの性能向上について

重松 明*1・温品 達也*2・木村 守*3・佐藤良一*4

要旨: 今日、環境負荷低減が重要視されるようになり、高炉スラグは活用が進み実構造物に広く使用されている。高炉スラグは十分な湿潤養生を必要とするが、実構造物においては工期短縮が求められ、養生が十分に行われない傾向にある。本研究では、水結合材比(W/B)55%付近での高炉 B 種コンクリートの粗骨材に対し廃瓦粗骨材を置換し、力学的性能の向上を把握することを主目的として、圧縮強度試験、細孔径分布・容積測定、コンクリート長さ変化試験を行った。その結果、廃瓦粗骨材の内部養生効果による強度増加や細孔構造の緻密化が確認できた。

キーワード: 高炉スラグ、廃瓦粗骨材、内部養生、圧縮強度、細孔径分布

1. はじめに

今日、建築リサイクル法やグリーン購入法などの個別リサイクル法が制定され、環境負荷低減が重要視されるようになり、高炉スラグは活用が進み実構造物に広く使用されている。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは普通ポルトランドセメント単味の場合より水和反応が遅いため、水和に長期間を要する傾向にあり、強度発現は、養生中、特に乾湿の影響を強く受ける傾向がある。一般のコンクリート以上に養生、特に初期材齢における湿潤養生の良否が、硬化後のコンクリートの品質に大きな影響を及ぼす。初期に乾燥を受けると、その後湿潤状態を保っても、強度発現が悪くなるとともに、耐久性の低下および乾燥収縮が増大することもある。このため高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの湿潤養生期間は普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートの場合よりも長くする必要がある¹⁾が、実構造物においては工期短縮が求められ、養生が十分に行われない傾向にある。

また近年、高含水率の人口軽量骨材を内部養生材として用い、圧縮強度の増加や自己収縮低減を行う手法が提案されている²⁾。これは乾燥中のセメントペーストへ内部養生材から水分を供給し、自己乾燥を抑制しようという手法である。内部養生の効果は収縮低減だけでなく、強度発現、水密性の向上、化学抵抗性にも及ぶことが報告されている³⁾。しかし一方で既存の軽量骨材の置換率を大きくすると、圧縮強度の頭打ちなどの問題があることも報告されている⁴⁾。そこで適度な含水率と強度を持つ廃瓦を使用し、廃瓦粗骨材によるコンクリートの内部養生効果を検討した研究により、圧縮強度増進および収

縮低減などの成果が報告されている⁵⁾。

そこで本研究では、水結合材比(W/B)55%付近での高炉 B 種コンクリートに対する廃瓦の内部養生効果を実験的に検討し、内部養生法と塗膜養生の併用の効果を確認する。この効果が認められ、自重を支える強度が出ていれば、早期脱枠を可能とし、さらにその後も湿潤養生することとなる。実験により高水結合材比での最適な廃瓦置換率および実構造物に則した養生条件下での内部養生効果による力学特性の向上を把握することを目的とする。

2. 実験概要および試験方法

2. 1 使用材料

表-1 に使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメント(OPC)、高炉セメント B 種(BF)を使用する。細骨材には、石英砕砂(S)と石灰砕砂(LS)を使用した。粗骨材は、石英砕石(G)と廃瓦粗骨材(CG)を使用した。写真-1 に廃瓦粗骨材を、図-1 に廃瓦粗骨材のふるい分け試験結果を示す。廃瓦粗骨材は島根県江津産で、カオリン粘土を焼成して作製した瓦の不適合品を破碎して、7日間吸水させたものを使用した。



写真-1 廃瓦粗骨材

*1 広島大学 工学部第四類 (学生会員)

*2 広島大学 工学研究科社会環境システム専攻 (学生会員)

*3 国土交通省 中国地方整備局 中国技術事務所 (正会員)

*4 広島大学 工学研究科社会環境システム専攻 工博 (正会員)

表-1 使用材料

使用材料	種類	性質	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³	OPC
	高炉セメントB種	密度 3.02g/cm ³	BF
細骨材	砕砂 (広島県東広島市黒瀬町産)	表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 1.06%	S
	石灰砕砂 (戸高鉱山産)	表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 1.22%	LS
粗骨材	砕石 (広島県東広島市黒瀬町産)	表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 0.69%	G
	廃瓦粗骨材 (江津産)	表乾 2.26g/cm ³ , 吸水率 9.44%	CG
混和剤	AE剤	ポリアルキレングリコール誘導体	
	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体	

表-2 配合表

配合記号	W/(C+BF)	s/a	単位量(kg/m ³)							
			W	C	BF	混合砂			G	CG
						S	LS	S+LS		
55OPC	0.55	0.471	175	318	-	499	339	838	942	-
55BF	0.55	0.467	175	-	318	492	334	826	942	-
55BF-G20	0.55	0.467	175	-	318	492	334	826	753	162
55BF-G10	0.55	0.467	175	-	318	492	334	826	848	81

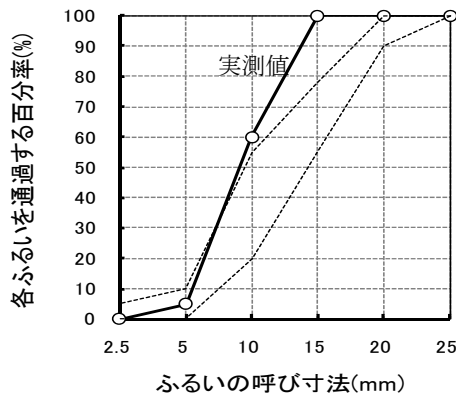


図-1 廃瓦粗骨材ふるい分け試験結果

2.2 配合

配合を表-2に示す。検討する水結合材比(W/B)は55%とし、配合はW/B=55%で4種類とした。単位水量は同一量の175kg/m³とした。表-3に配合と水結合材比、廃瓦の置換率を示す。普通コンクリートをOPC、高炉B種コンクリートをBFと表記し、BF-G10、BF-G20は廃瓦粗骨材を10%、20%置換したことを意味する。また55OPCの頭の数字はW/B=55%を意味する。

2.3 試験方法

(1) 圧縮強度

図-2に養生条件と試験材齢について示す。圧縮強度は、円柱供試体φ100mm×200mmを用い、試験材齢および養生条件は、図-2に示すように圧縮強度は3・7・28日材齢で測定した。養生は材齢3日気中暴露・材齢7日気中暴露・封緘・水中の4養生とし、材齢3日気中暴露(以下、3日気中暴露とする)は、材齢3日まで封緘、その後は気中で養生し、現場での早期脱枠を想定した養生条件である。養生は、温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室にて行った。

表-3 配合名および廃瓦置換率

配合名	W/B(%)	使用セメント	廃瓦置換率(%)
55OPC	55	普通ポルトランドセメント	0
55BF	55	高炉B種	0
55BF-G10	55	高炉B種	10
55BF-G20	55	高炉B種	20

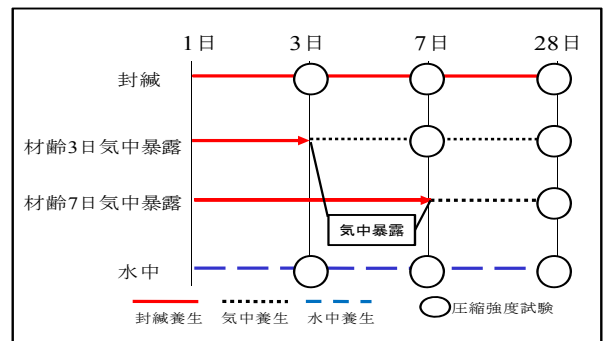


図-2 試験材齢および養生条件

(2) 細孔容積・分布測定

各配合のモルタルの累積細孔容積および分布を水銀圧入式ポロシメータによって測定した。サンプリング対象は、各養生条件下における各配合の材齢7・28日における強度試験後の供試体から採取したモルタルである。

(3) 長さ変化

図-3にレーザー変位計による長さ変化の測定概要を示す。100×100×400mmのコンクリートの長さ変化(自己・乾燥ひずみ)を凝結開始から3日間をレーザー変位計1/1000mm精度)、その後はコンタクトゲージ法によって測定した。養生条件は、温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室にて封緘養生と、材齢3日および7日まで封緘養生しその後は気中養生とする3種類とした。脱枠は打設後2日目に行い、その後はアルミ粘着テープによって

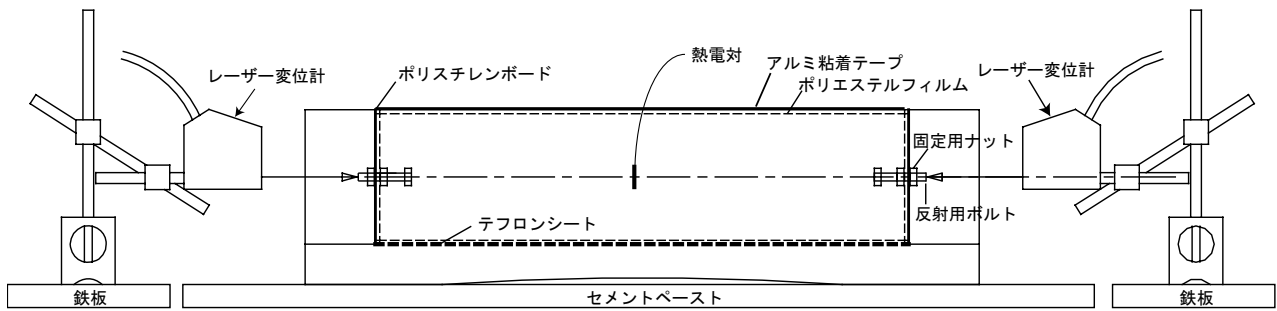


図-3 コンクリートの長さ変化試験概要

シールした。コンクリートの温度変化に伴う体積変化は、コンクリート中心部に設置した熱電対にて測定した温度変化を JCI 案⁷⁾に準拠し、線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として補正した。

3 試験結果および考察

3.1 圧縮強度試験結果

(1) 圧縮強度 3日気中暴露

図-4に W/B=55%, 3日気中暴露における4配合の圧縮強度発現性状を示す。図-5に3日気中暴露における55OPCの圧縮強度を1とし各圧縮強度の比をとったものを示し、図-6に3日気中暴露における55BFの圧縮強度を1とし各圧縮強度の比をとったものを示す。

材齢7日における55BF-G10の圧縮強度は55OPC, 55BFに対し、それぞれ-7%, +8%である。また、55BF-G20の圧縮強度は55OPC, 55BFと比較し、-11%, +4%であった。一方、材齢28日における圧縮強度では、55BF-G10, 55BF-G20ともに55OPC, 55BFに対し10%, 15%程度の強度増加があることが分かった。材齢7日において55BF-G10および55BF-G20は55OPCに対して強度増加は認められなかったが、材齢28日において強度増加が確認された。

一般的に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは潜在水硬性の性質を持ち、十分な湿潤養生を行うことで、普通コンクリートと同等かそれ以上の強度が得られる。しかし材齢3日に気中暴露した結果、材齢28日において55BFの圧縮強度は55OPCに対し、4%強度が低下していた。これに対し材齢28日において廃瓦を置換した55BF-G10, 55BF-G20は55OPCに対し10%の強度増加が確認できた。廃瓦粗骨材からの水分供給により水和反応が促進されたためであると考えられる。廃瓦置換率の差による強度の差は材齢28日では認められなかったが、比較的早期の材齢7日では55BF-G10の55BF-G20に対する強度増加が確認された。

(2) 圧縮強度 封緘

図-7に W/B=55%, 封緘養生における4配合の圧縮強度の発現性状を示す。図-8に封緘養生における55OPC

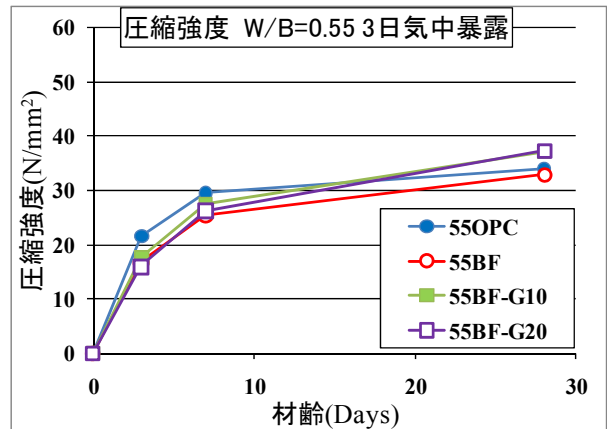


図-4 W/B=55% 3日気中暴露

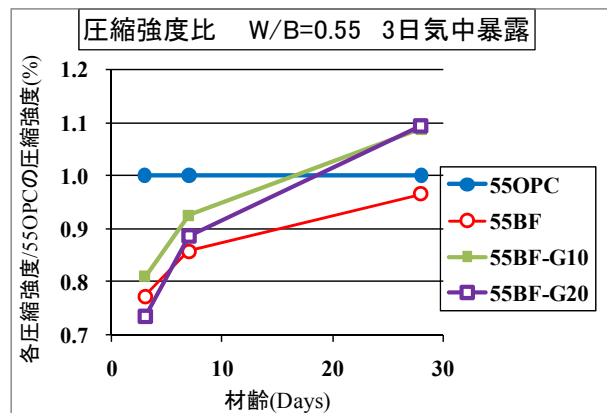


図-5 W/B=55% 3日気中暴露 圧縮強度比

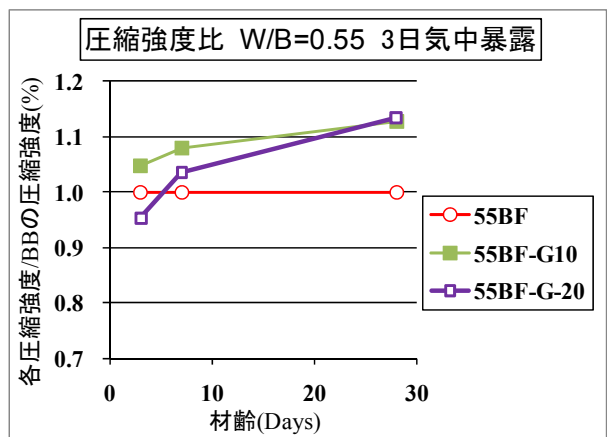


図-6 W/B=55% 3日気中暴露 圧縮強度比

の圧縮強度を1としたときの各圧縮強度比をとったものを示し、図-9に封緘養生における55BFの圧縮強度を1としたときの各圧縮強度比をとったものを示す。材齢7日において55BF-G10の圧縮強度は55OPC, 55BFに対し、-4%, +7%であり、55BF-G20では55OPC, 55BFに対して-10%, +1%であった。また材齢28日において55BF-G10の圧縮強度は55OPC, 55BFに対し、+10%, +7%であり、55BF-G20では55OPC, 55BFに対して、+10%, +7%であった。材齢7日、28日に渡って、廃瓦を置換した高炉B種コンクリートの圧縮強度は廃瓦を置換しないものと比較し、同等かそれ以上であることが確認された。材齢7日において55BF-G10および55BF-G20の圧縮強度は55OPCと比較し、低下する傾向がみられた。しかし材齢28日では、55BF-G10および55BF-G20が55OPCと比較し強度が増加することが分かった。廃瓦置換率の差による強度への影響は、3日気中暴露における圧縮強度発現と同様に、比較的早期の材齢では廃瓦置換率10%が20%より大きい。また材齢28日では廃瓦置換率10%および20%に差はほとんど認められなかった。

3日気中暴露、封緘ともに55BF-G10の圧縮強度は55BFに対して増加する傾向がある。これは廃瓦粗骨材の内部養生による強度増加であると考えられる。封緘養生した55BF-G10の圧縮強度は55BFに比べ、材齢7日、28日において7%, 6%の増加であるのに対し、3日気中暴露の増加は8%, 15%であった。また図-10より3日気中暴露における55BF-G10の強度発現は、封緘養生の55BFと同等である。以上より、廃瓦の内部養生効果はコンクリートが乾燥に曝されていると効果が大きいと考えられる。

3.2 細孔容積・分布測定結果

図-11, 図-12, 図-13にW/B=55%, 3日気中暴露、材齢7日、28日における細孔容積、分布、容積率の結果を示す。3日気中暴露、材齢7日における55BF-G10, 55BF-G20の累積細孔容積は55BFと比べほぼ同程度であった。また、圧縮強度との相関が高いといわれている $0.02\mu\text{m}$ 以上の細孔径⁷⁾の容積率は55BFで66%, 55BF-G10で71%, 55BF-G20で69%で、材齢7日では廃瓦の内部養生効果による組織の緻密化は確認されなかった。一方、材齢28日においては、廃瓦粗骨材を置換することで総空隙量が減少し、 $0.02\mu\text{m}$ 以上の細孔容積は、55BFに対し55BF-G10および55BF-G20ともに83%であった。また累積細孔容積は、55BFに対し、前者は83%, 後者は80%であり、廃瓦を置換することで約20%の空隙減少が確認された。これは廃瓦の内部養生効果により水和反応が促進され、緻密な組織が形成されていると考えられる。材齢7日、28日の累積細孔容積において廃瓦の置換率(10%, 20%)による大きな差は認められなかった。

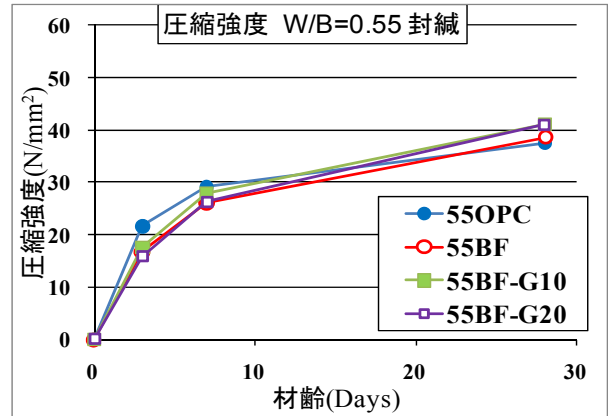


図-7 W/B=0.55 封緘

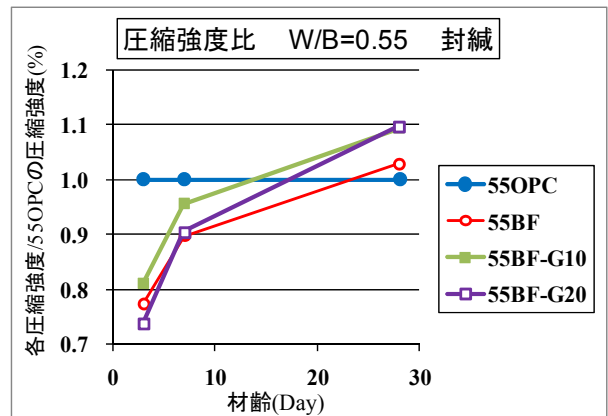


図-8 W/B=0.55 封緘 圧縮強度比

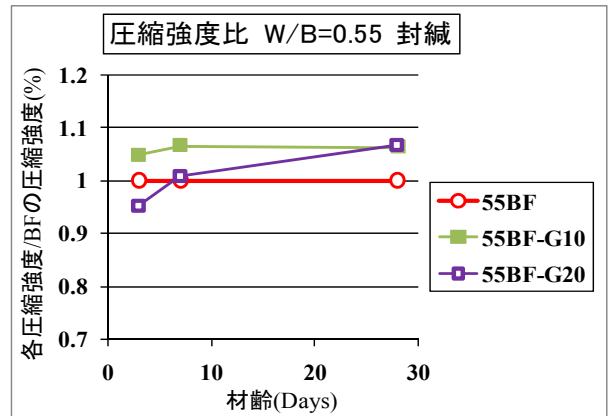


図-9 W/B=0.55 封緘 圧縮強度比

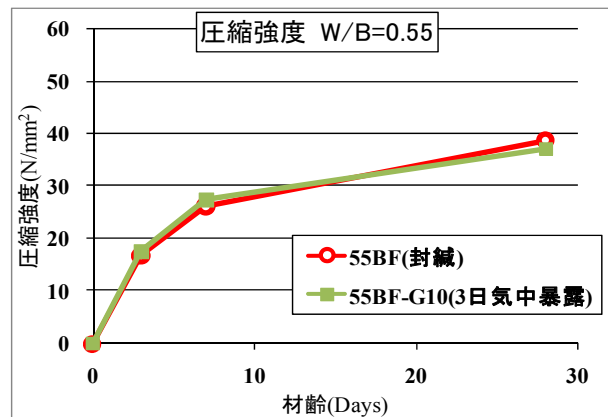


図-10 W/B=0.55 圧縮強度発現

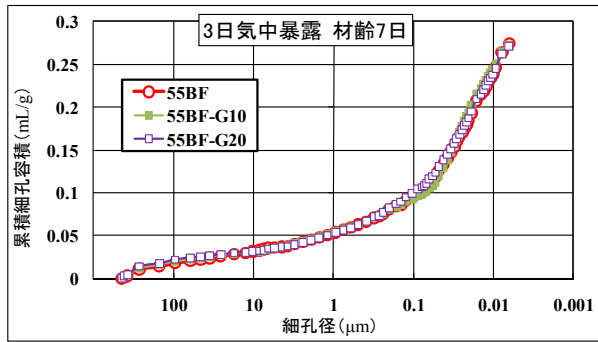


図-11 3日気中暴露 材齢7日累積細孔容積および細孔径分布

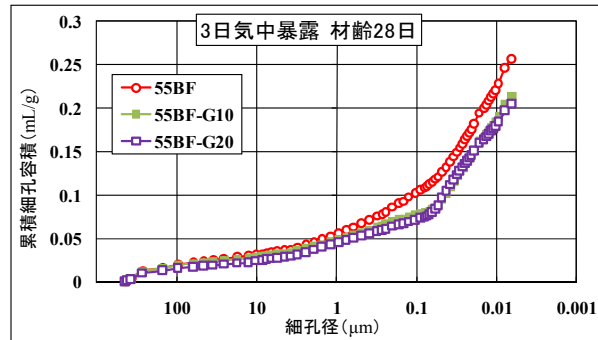
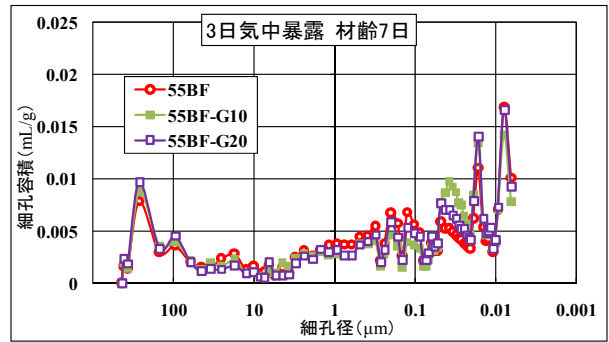


図-12 3日気中暴露 材齢28日累積細孔容積および細孔径分布

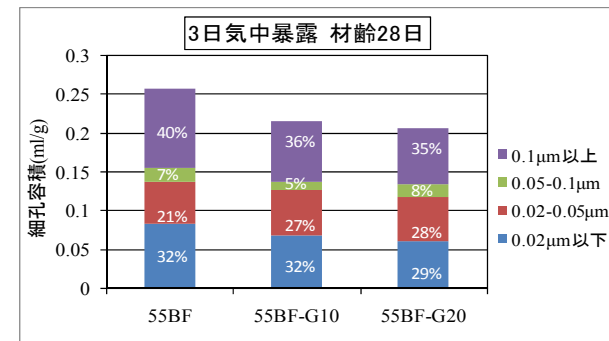
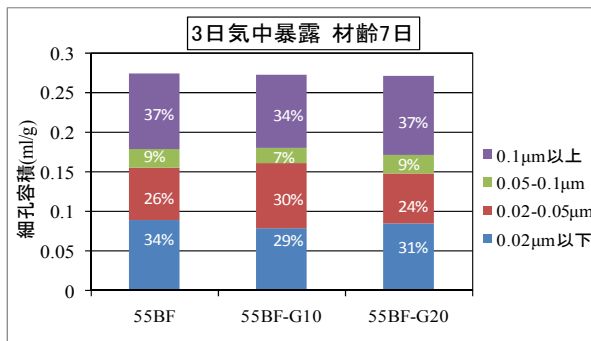
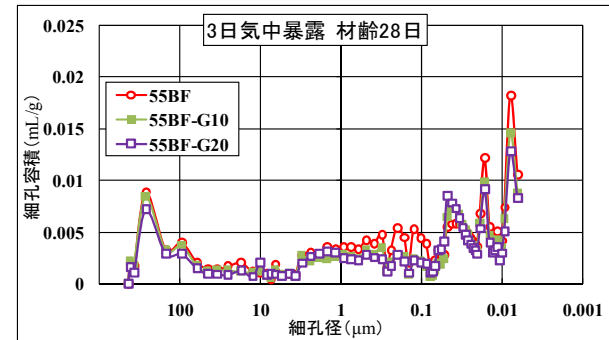


図-13 3日気中暴露 材齢28日累積細孔容積および細孔径分布

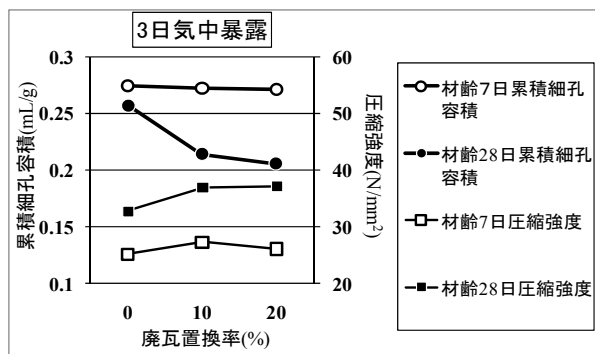


図-14 累積細孔容積と圧縮強度の関係

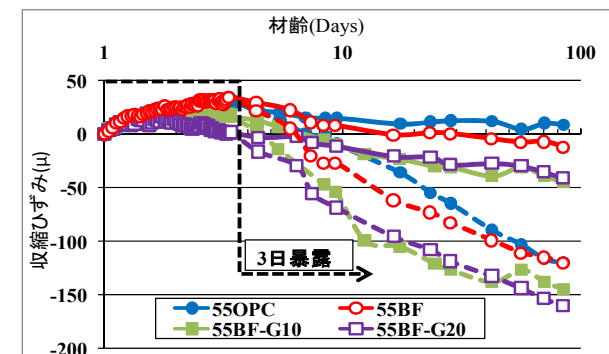


図-15 収縮ひずみ

3. 細孔径と圧縮強度の関係

図-14 に W/B=55%, 3日気中暴露における 55BF, 55BF-G10および55BF-G20の累積細孔容積および圧縮強度と廃瓦置換率の関係を示す。材齢7日において廃瓦の置換率の増加とともに累積細孔容積が減少する傾向が若干みられるが、大きな差ではない。一方、材齢7日の圧縮強度に関しては 55BF-G10 および 55BF-G20 が若干

増加する傾向にあった。一方材齢 28 日においては廃瓦の置換率の増加に伴い累積細孔容積が減少しており、BF に対し、55BF-G10 は 83.1%, 55BF-G20 は 79.8%である。圧縮強度は廃瓦を置換することで強度増加が確認され、55BF に対し、55BF-G10 および 55BF-G20 は 113%の強度増加であった。以上より廃瓦の内部養生によりコンクリート内部の空隙量が減少し、圧縮強度の増加に寄与して

いると推察される。

3. 4 収縮ひずみ

図-15に W/B=55%における4配合の収縮ひずみと材齢の関係を示す。実線は自己収縮、材齢3日で分岐した破線は乾燥収縮を示している。自己収縮において55BF-G10および55BF-G20は、55OPCおよび55BFに対し、大きく収縮する傾向がみられる。乾燥収縮も自己収縮と同様に廃瓦を置換した場合、収縮量が增大するようと思われるが、乾燥前の膨張の影響を取り除けば収縮量に差はみられなかった。廃瓦に吸水させた水分がコンクリート中へ全て浸出した場合、見掛けの水結合材比が大きくなり乾燥収縮が増大する可能性があるが、本研究では水分供給量が確認できないため、今後検討していく必要がある。

4 まとめ

普通コンクリート、高炉B種コンクリート、粗骨材を廃瓦で置換したコンクリートの圧縮強度、細孔径分布、収縮ひずみを実験的に検討した。本研究の範囲内で明らかになったことをまとめると以下の通りである。

(1)材齢7日、28日、W/B=55%で3日気中暴露および封緘養生し、廃瓦粗骨材を10%および20%置換した高炉B種コンクリートは、無置換に対し、同等かそれ以上の強度が確認された。

(2)材齢7日においては、W/B=55%で3日気中暴露および封緘養生し廃瓦粗骨材を置換した高炉B種コンクリートは普通コンクリートよりも低い強度であったが、材齢28日では普通コンクリートに対し強度増加が確認された。

(3) W/B=55%において、廃瓦を置換した高炉B種コンクリートの強度増加を、3日気中暴露と封緘養生したもので比較した場合、3日気中暴露での強度増加が大きかった。従って廃瓦の内部養生による効果は、乾燥に曝された場合に大きくなるという事が推察される。

(4) W/B=55%において、3日気中暴露した廃瓦置換率10%高炉B種コンクリートの強度発現は、封緘養生した廃瓦無置換高炉B種コンクリートの強度発現と同等であ

るということがわかった。

(5) 材齢7日、W/B=55%、3日気中暴露における累積細孔容積は廃瓦無置換高炉B種コンクリートと廃瓦を置換したものはほぼ同等であるが、材齢28日では減少することがわかった。

(6) W/B=55%において、廃瓦置換率10%および20%では細孔構造の空隙量減少に差は認められなかった。

(7) W/B=55%において、廃瓦置換による自己収縮低減は認められなかった。

参考文献

- 1) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，Vol.17，No.5，pp.87-95，1979.5
- 2) P.Lura， K.van Breugel;The Influence of Moisture Flow from the LWA to the Paste on the early-age Deformations, 6th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete, pp, 1149-1160, 2002
- 3) Dale P.Bentz , P.Lura , Jhon W.Roberts: mixture prorortioning for Internal Curing, Concrete International, Vol.27, No.2, pp.35-40, 2005
- 4) 日紫喜剛啓ほか：自己収縮を低減した150N/mm²級超高強度コンクリートに関する実験的検討，土木学会論文集，No.781，V-66，pp.101-112，2005
- 5) 鈴木雅博ほか：廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの変形と拘束応力に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp 651-656，2007
- 6) 温品達也，清木祥平ほか：廃瓦粗骨材によるフライアッシュ混入コンクリートの内部養生効果，土木学会第63回次学術講演会公演概要集，5-233，pp.465-466(2008)
- 7) 内川 浩，羽原 俊祐ほか：混合セメントモルタル及びコンクリートの硬化体構造が強度発現性状に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集 No.44，1990