

高炉スラグ細骨材の使用がモルタルのひび割れ修復に及ぼす効果の検証

熊本大学 ○清水 悠翔 熊本大学大学院 尾上 幸造
熊本大学大学院 堤 亮祐 熊本大学 友田 祐一

1. 目的

高炉水砕スラグ細骨材（以下、BFS）はアルカリ環境下における潜在水硬性を有しており、コンクリートの細骨材として用いた場合、骨材とペースト界面の遷移帯が改善され、長期強度が増進する¹⁾ことが知られている。内閣府 SIP におけるインフラ維持管理・更新・マネジメント技術においても、BFS を細骨材として用いる超耐久プレキャスト部材の実装に向けた研究開発²⁾が進められている。

一方、BFS の破砕値は天然骨材よりもやや高い、言い換えると荷重を受けた際に破砕しやすいことが確認された。このことから、荷重作用によって高炉スラグ細骨材にフレッシュな破断面が形成された後、アルカリ性の水分と接することによって潜在水硬性が刺激され、破断面が閉塞する（ひび割れ自己修復性）可能性が示唆される。

以上より本研究では、BFS を用いたモルタル（以下、BFS モルタル）の繰返し圧縮荷重によるひび割れ導入後の再養生によるひび割れ自己修復性の有無について、基礎的な検討を実施した。具体的には、再養生前後における超音波伝搬速度を比較した。

2. 実験概要

(1) 使用材料およびモルタルの配合

普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³）、高炉スラグ微粉末 4000（密度：2.91 g/cm³，比表面積：4160 cm²/g），BFS（JIS A 5011-1 における 1.2 mm 高炉スラグ細骨材，表乾密度：2.78 g/cm³，吸水率：0.21%，粗粒率：2.13，破砕値：25.9%），天然川砂（表乾密度：2.57 g/cm³，吸水率：3.4%，粗粒率：2.30，破砕値：16.7%）を用いた。ここで、破砕値に関する JIS 規格は存在しない。そこで本研究では、1.2～0.6 mm の乾燥試料を 10 分間に 100 kN の割合で荷重したものを 0.3 mm ふるいでふるい分け、最初の試料質量に対するふるい目を通したものの質量百分率を破砕値（%）とした。BFS の破砕値は 25.9%，天然川砂の破砕値は 16.7%であり、BFS の破砕値の方が天然川砂よりも大きく、骨材自体の強度は小さいことが確認された。モルタルの配合条件と単位量を表-1 に示す。本研究では、モルタルの水セメント比を 35%とした。

(2) 実験方法

本実験の実験フローを図-1 に、また、供試体条件を表-2 に示す。モルタルは打設から 24 時間後に脱型し、28 日間 20℃室内にて水中養生した。養生後、モルタル角柱を半分にカットし、両端面を研磨して 40 mm × 40 mm × 約 75 mm の供試体を作製した。

図-2 に超音波伝搬速度試験の状況を示す。発信子から出た超音波パルスが受信子まで到達するのにかかる時間を計測し、測定距離で除して超音波伝搬速度を算出した。一般に、一軸圧縮応力下において、微細ひび割れの発生は荷重軸方向に卓越する。このことを踏まえ、荷重軸方向と直角方向の超音波伝搬速度を測定した。

供試体にひび割れを導入することを目的に、繰返し圧縮荷重を行った。予め 3 本の供試体より求めた平均強度の 85%に相当する荷重を荷重し、ひび割れ供試体を作製した。図-3 に荷重回数と超音波伝搬速度低下率の

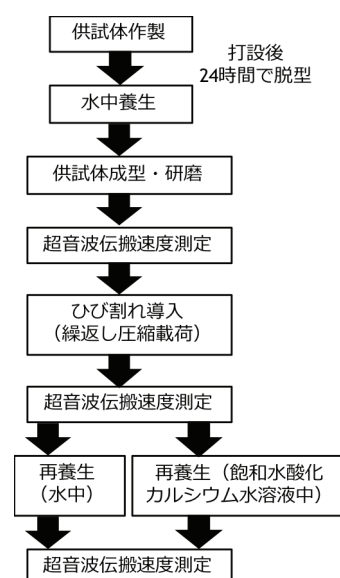


図-1 実験フロー

表-1 モルタルの配合条件と単位量

細骨材の種類	W/C (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	高炉スラグ微粉末 (kg/m ³)
川砂	35	341	976	896	0
BFS	35	311	889	1131	0
BFS	35	311	445	1098	445

表-2 供試体条件

条件	BFS 混入率 (%)	高炉スラグ微粉末 置換率 (%)	再養生条件	28日圧縮強度 (N/mm ²)	ひび割れ導入前の超音波伝搬速度 (km/s)	圧縮強度あたりの超音波伝搬速度
1	0	0	水中	70.9	4.21	0.059
2	0	0	飽和Ca(OH) ₂ 水溶液中	67.0	4.20	0.063
3	100	50	水中	71.8	4.70	0.065
4	100	50	飽和Ca(OH) ₂ 水溶液中	70.4	4.30	0.061
5	100	0	水中	71.9	4.91	0.068
6	100	0	飽和Ca(OH) ₂ 水溶液中	75.3	4.83	0.064

関係の一例を示す。初回の繰返しで超音波伝搬速度は5%程度低下し、その後はほぼ横ばいとなり、ある回数を越えると急激に低下率が增大することが確認された。本研究では、超音波伝搬速度が急激に増大し始めた時点で繰返し载荷を中止し、ひび割れ供試体とした。1条件につき2～3本のひび割れ供試体を作製した。ひび割れ導入後、供試体を水中または飽和水酸化カルシウム水溶液中で再養生した。再養生期間中は、1～2週間毎に超音波伝搬速度を測定した。ひび割れを導入していない無損傷供試体についても同様の条件で養生し、超音波伝搬速度を測定した。



図-2 超音波伝搬速度の測定状況

3. 結果及び考察

表-2 において、ひび割れ導入前の超音波伝搬速度は、条件3～6の方が条件1, 2よりも若干大きくなっている。これは、高炉スラグ微粉末やBFSを用いたことで、コンクリートが緻密化したためと考えられる。圧縮強度あたりの超音波伝搬速度はほぼ同等であった。

図-4 に再養生期間にともなう超音波伝搬速度比の変化を示す。ここで、超音波速度比は、同日に測定した損傷供試体の超音波伝搬速度と無損傷供試体（同配合）の超音波伝搬速度の比であり、セメントの水和による影響をキャンセルすることを意図して指標とした。図中の1つのプロットは、ひび割れ供試体2～3本の平均である。繰返し圧縮载荷によって、超音波伝搬速度は、無損傷供試体の87%～95%に低下した。いずれの条件においても、再養生0日から14日にかけての超音波伝搬速度比の増加が大きく、その後はほぼ横ばいとなった。再養生63日における超音波伝搬速度比は98～101%となり、ひび割れ供試体は無損傷供試体と同等の超音波伝搬速度を示した。

図-5 に再養生63日と0日における超音波伝搬速度比の差 Δ_{63-0} を示す。再養生0日における超音波伝搬速度比が同等であれば、 Δ_{63-0} が大きいほどひび割れ修復の程度が大きいといえる。条件1と5を比較すると、超音波伝搬速度比の初期値ならびに Δ_{63-0} はほぼ同等であることから、水中養生した場合にはBFSの使用による効果は表れていない。一方、条件2, 5と条件6を比較すると、条件6の Δ_{63-0} が条件2, 5のそれらよりも有意に大きくなっており、飽和水酸化カルシウム水溶液中で養生したことでBFSの潜在水硬性が刺激された可能性がある。

4. 結論

モルタルに静的強度の85%の圧縮応力を繰返し負荷することでひび割れを導入し、再養生期間中の超音波伝搬速度の変化を調べた。いずれの実験ケースにおいても、再養生により、ひび割れ供試体の超音波伝搬速度は無損傷供試体と同等まで回復するが、ひび割れの入ったBFSモルタルを飽和水酸化カルシウム水溶液中で養生する場合には、その回復の程度が大きくなることが示された。

参考文献

- 1) 上野敦, 沢木大介, 下山善秀, 國府勝郎: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの30年試験結果, セメント・コンクリート, No.828, pp8-13, 2016
- 2) 戦略的イノベーション創造プログラム インフラ維持管理・更新・マネジメント技術「超耐久性コンクリートを用いたプレキャスト部材の製品化のための研究開発」(<http://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/kadai/k07-38.pdf>, 2019年1月11日確認)

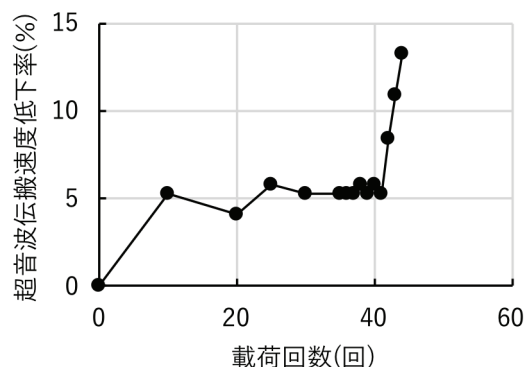


図-3 超音波伝搬速度低下率と载荷回数関係の一例 (供試体条件5)

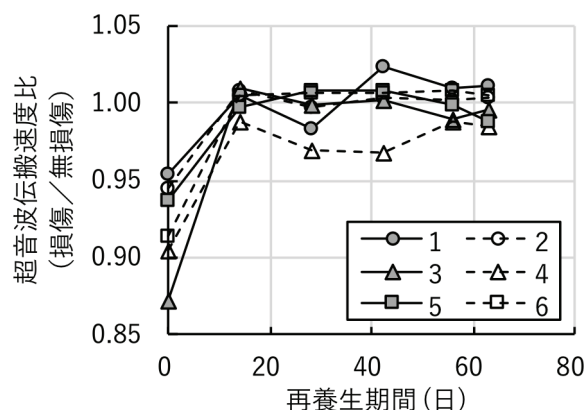


図-4 超音波伝搬速度比の変化

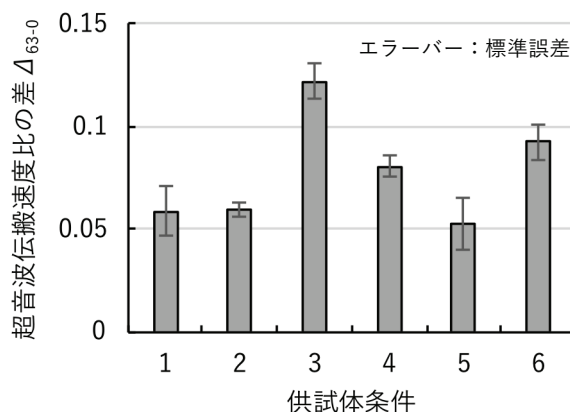


図-5 再養生63日と0日における超音波伝搬速度比の差