

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのひび割れ自己修復性

Self-Repairing of Crack in Concrete Containing Ground Granulated Blast-furnace Slag

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 ○正 員 吉田 行 (Susumu Yoshida)
国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 正 員 山内 稜 (Ryo Yamauchi)

1. はじめに

コンクリートの施工段階で生じる初期ひび割れは、水分や塩分等の劣化因子の侵入を容易にし、劣化を促進してコンクリート構造物の耐久性を低下させるため、長寿命化のためにはひび割れを抑制する必要がある。

初期ひび割れは、コンクリートの締固めや養生等の施工を丁寧に実施することで相当程度防ぐことが可能であるが、構造物が置かれる環境や構造条件等により有害なひび割れが生じることもある。この場合、より積極的な対策を講じる必要があり、自己収縮や乾燥収縮によるひび割れに対しては、膨張材や収縮低減剤などの混和材(剤)の利用も有効である。

一方、コンクリート構造物に生じたひび割れに水分が供給された場合に、未水和セメントが反応したり炭酸カルシウムが析出したりするなどして、ひび割れが自然に閉塞する現象が生じることがある。また、このような現象を積極的に促進させるために、コンクリートにあらかじめひび割れを充填する機能を有したあるいは付与した材料を仕込んでおけば、ひび割れ発生時に自動的に閉塞させることも可能となる。このような現象全体をコンクリートの自己治癒・自己修復¹⁾と言い、自動的にひび割れを閉塞させる方法としては、セメント系材料の再水和を期待して水セメント比を小さくしたり、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を利用したりする研究などが行われている^{1,2)}。これら混和材の利用は、耐久性向上対策としても有効であり、環境負荷低減にも寄与する。一方、高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいと反応速度が早く、ひび割れが生じた後の自己修復性を考慮すると比表面積は小さい方が回復効果は高いことが報告されている³⁾。そこで、本研究では、2013年にJIS化された比表面積3000cm²/gの高炉スラグ微粉末に着目してひび割れの自己修復性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

ベースとなるセメントは普通ポルトランドセメント

(密度3.16g/cm³、比表面積3,420cm²/g、以下、普通セメント(記号N)と記述)とした。混和材として、高炉スラグ微粉末(密度2.92g/cm³、比表面積3,110cm²/g、活性度指数82%(材齢28日)、112%(材齢91日)、以下、スラグ(記号BS)と記述)を使用し、置換率はセメント内割で50%とした。細骨材は苫小牧樽前産の陸砂(密度2.70g/cm³、吸水率0.90%)、粗骨材は小樽市見晴産の碎石(密度2.68g/cm³、吸水率1.65%、粗骨材最大寸法25mm)を用いた。また、自己修復に関する研究としてフライアッシュを用いた事例も多いため、本研究ではフライアッシュセメントB種(密度2.96g/cm³、比表面積3,380cm²/g、以下、フライアッシュセメントと記述)を用いたケースについても比較した。

表-1に配合を示す。水結合材比は55%の1水準として、単位水量を155kg/m³に固定した。目標スランプは8から12cmを目安とし、目標空気量は4.5±1.0%として、AE減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体)とAE助剤(変性ロジン酸化合物系)を適宜用いてそれぞれ調整した。なお、表-1には実測のスランプと空気量も示している。

2.2 供試体の作製方法と自己修復の評価項目

本研究では、自己修復効果を確認するために、事前にひび割れを導入した供試体を作製し、一定期間水中と屋上に暴露した後、目視によりひび割れの充填状況を確認した。以下に詳細を示す。

(1)供試体の作製方法

供試体の作製は、既往の研究³⁾を参考に、図-1に示した塩化ビニル管(VU管、内径202(外径216)×高さ100mm、以下、塩ビ管と記述)に塗装合板を一液型液状シリコンゴムで接着して作製した型枠にコンクリートを打込み、湿気養生槽で1日静置後、底板を取り外し、塩ビ管のまま(上下面開放)ひび割れ導入まで20℃水中養生を行った。

若材齢で生じたひび割れの方が未水和の結合材が残存しているためひび割れ修復力は高いと考え、ひび割れ導入材齢は若材齢の7日と標準材齢28日の2水準とした。

表-1 配合

記号	セメントの種類	高炉スラグ 微粉末 置換率 (%)	水結合 材比 W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					AE 減水剤 B×%	AE 助剤 B×%	実測 スラン ^o (cm)	実測 空気量 (%)	目標 空気量 (%)
					水 W	結合材(B)		細骨材 S	粗骨材 G					
						セメント C	高炉スラグ BS							
N55A45	普通ポルトランド	－	55	45	155	282	－	864	1047	－	0.0075	9.1	4.5	4.5
N55A45s5		50				141	141	864	1047	0.07	0.0075	10.5	4.5	4.5
F55A45	フライアッシュB種	－				282	－	857	1039	－	0.0250	11.5	4.6	4.5

写真-1 にひび割れ導入時の状況を示す。圧縮強度試験機により塩ビ管のまま供試体側面に手動载荷した。荷重計と目視により割裂ひび割れが生じたことを確認した段階で载荷を保持し、除荷後にひび割れが閉塞しないように 0.1mm 厚のアルミテープを貼り合わせて厚さ 0.2mm 相当にして、供試体打込み面と底面のひび割れ 2 カ所ずつに挟んだ後除荷した。

(2) 供試体の暴露

ひび割れの自己修復性を確認するため、寒地土木研究所（札幌市豊平区平岸）の実験棟屋上（4 階相当）に暴露するとともに、自己修復のポテンシャルを確認するために、20℃恒温室内に設置したコンテナ内で水中暴露した。写真-2 にひび割れ供試体の暴露状況を示す。供試体は、いずれも打込み面を上にして静置した。なお、供試体の作製は 1 月下旬から 2 月中旬にかけて行ったため、ひび割れ導入直後の供試体の含水が高い状態で屋上に暴露すると凍結融解作用により劣化する可能性が高いことから、ひび割れ導入後材齢 91 日まで温度 20℃、相対湿度 60% に設定された恒温恒湿室に静置し、4 月下旬から 5 月中旬にかけて屋上、水中ともに暴露を開始した。

(3) 自己修復性の評価項目

本研究では、結合材の再水和によるひび割れ修復に着目したため、水和の進行度を把握することは自己修復のポテンシャルを評価する一つの目安になる。ここでは水和度を簡易的に把握するために、圧縮強度発現による評価を行った。圧縮強度試験は、ひび割れ供試体と同配合で作製した $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体を用いて、水中養生材齢 7、28、56、91 日の 4 材齢に加え、ひび割れ供試体と同様、水中養生 7 日または 28 日以降恒温恒湿室で気中養生した円柱供試体についても各材齢で実施した。

ひび割れ供試体のひび割れ修復状況については、一定期間暴露したひび割れ供試体を目視で観察する事により行った。写真-3 に示すように、ひび割れ導入後、供試体の打込み面、底面それぞれ任意で 3 カ所（一部 4 カ所）に印をつけてひび割れ充填状況を写真撮影するとともに、自己修復可能なひび割れ幅の目安を確認するためにクラックスケールにより暴露前の表面ひび割れ幅を測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度発現

図-2 に各コンクリートの圧縮強度を示す。X 軸の記号 W は水中養生、D は気中養生を示しており、各記号の前の数値はそれぞれの養生日数を示している。また、材齢は圧縮強度試験を実施した材齢である。水中養生のみの場合（記号 W のみ）、普通セメントに比べてスラグやフライアッシュセメントを用いたコンクリートは、材齢初期の強度発現が小さいが、長期的には強度差が小さくなるのがわかる。一方、気中養生を行ったものは、材齢初期の水中養生期間が短いほど長期強度の増加は小さい傾向があり、特にスラグやフライアッシュセメントを用いた場合にその傾向が顕著だった。

図-3 に水中養生した場合の材齢 28 日の圧縮強度に対する各材齢のコンクリート強度比を示す。フライアッシュセメントの材齢 7 日の強度比は普通セメントより低い

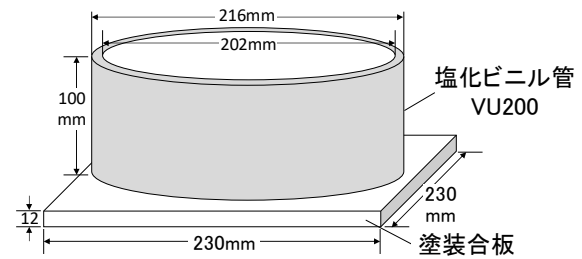


図-1 供試体用型枠



写真-1 ひび割れ導入時の状況（中央に割裂ひび割れ）



屋上暴露

水中暴露

写真-2 ひび割れ供試体の暴露状況



写真-3 暴露開始前のひび割れ幅測定状況

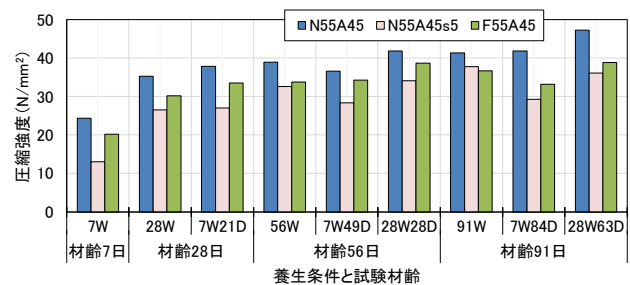


図-2 各養生条件と材齢における圧縮強度

が、56 日以降は普通セメントと同程度以上になった。また、スラグを用いた場合、材齢 7 日の強度比は最も小

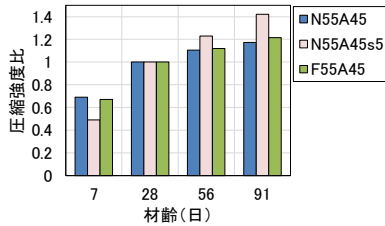


図-3 水中養生した場合の圧縮強度比

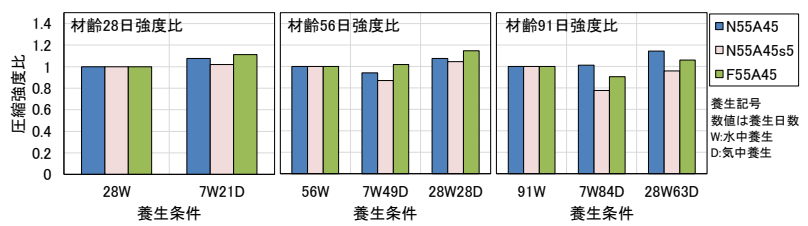


図-4 気中養生した場合の水中養生に対する圧縮強度比

さいが、56日以降は強度比が最も大きくなった。

図-4に各材齢における水中養生のみの強度に対する気中養生を実施した場合の圧縮強度比を示す。材齢28日の強度比は、気中養生を行ったものの方が水中養生のみの場合よりも高かったが、水中養生は最も結合材の水和が進行するため、乾燥に伴う見かけの強度増加が影響したものと思われる。これに対して、材齢56日以降の強度比は、気中養生を実施したものは水中養生のみの場合よりも小さくなり、その傾向は材齢初期の水中養生期間が短く、長期材齢になるほど顕著になった。特に、スラグを用いた場合の強度比は小さく湿潤養生日数の影響を大きく受けるのに対し、普通セメントは材齢長期の強度比の低下がほぼみられず、湿潤養生日数が7日程度あれば、長期強度発現に及ぼす影響は小さいことがわかる。なお、材齢56日以降においても、気中養生を行ったものの方が水中養生のみの場合よりも強度比が高いものがみられるが、これについても乾燥に伴う見かけの強度増加が影響していると考えられる。

以上から、圧縮強度発現を結合材の水和度の目安として評価すると、いずれの結合材も長期的に強度は増加しており、材齢7日や28日に導入したひび割れに対して自己修復するポテンシャルを有していると推察されるが、普通セメントは材齢28日以降の強度増進が小さいことに加え、水中養生7日でも水和水度は高く、自己修復ポテンシャルは比較的低いと考えられる。一方、フライアッシュセメントやスラグを用いた場合は、普通セメントよりも長期的な強度増加が大きく、特にスラグは材齢初期の水中養生日数が少なくその後乾燥の影響を受けた場合、強度増加は停滞し未水和水状態で多数残存していると考えられるため、自己修復ポテンシャルは高いと思われる。

3.2 暴露後のひび割れ修復状況

表-2に暴露開始前に測定した各供試体の初期ひび割れ幅と暴露3か月後のひび割れ自己充填状況を示す。着色したセルは自己充填がみられた箇所であり、色が濃いほど密に充填されていることを示している。なお、表には参考としてひび割れ導入時の荷重から算定した割裂引張強度も示した。いずれの配合も底面側のひび割れに水和水物が析出しやすく、打込み面側のひび割れ充填はスラグを用いたN55A45S5の水中暴露の一部でしか確認できなかった。本研究では、各暴露環境において打込み面を上側にして暴露したため、水中暴露では水和水生成物が重力により下方に移動しやすいたが、屋上暴露では雨水等による水分がひび割れ下方に流れ下面に水和水物が析出するためと考えられる。普通セメントのN55A45はひび割れ導入材齢の影響が小さく全体に自己充填するケース

表-2 初期ひび割れ幅と暴露3か月後の充填状況
(着色部がひび割れ充填箇所)

配合 記号	ひび割れ 導入材齢 (日)	暴露 環境	番号	引張 強度 N/mm ²	ひび割れ幅mm(打込み面) 左右基準:ラベル手前				ひび割れ幅mm(底面) 左右基準:ラベル手前に裏返			
					左	中央	右	右	左	中央	右	右
					左右基準:ラベル手前				左右基準:ラベル手前に裏返			
N55A45	7	水中	1	2.68	0.10	0.10	0.20		0.15	0.15	0.15	
			2	2.69	0.15	0.10	0.10		0.15	0.15	0.05	
			3	2.72	0.10	0.10	0.15		0.20	0.15	0.10	
		屋上	4	2.71	0.20	0.15	0.10		0.10	0.10	0.05	
			5	2.54	0.15	0.15	0.10		0.20	0.20	0.10	
			6	2.84	0.15	0.15	0.20		0.15	0.20	0.15	
	28	水中	7	3.72	0.20	0.20	0.15		0.25	0.20	0.05	
			8	3.66	0.25	0.15	0.15		0.15	0.20	0.15	
			9	3.57	0.15	0.15	0.15		0.20	0.15	0.10	
		屋上	10	3.79	0.15	0.15	0.10		0.15	0.15	0.10	
			11	3.5	0.05	0.15	0.10		0.30	0.25	0.10	
			12	3.76	0.20	0.20	0.15		0.20	0.20	0.10	
N55A45S5	7	水中	1	1.53	0.20	0.25	0.25		0.20	0.15	0.15	
			2	1.47	0.30	0.20	0.25		0.15	0.35	0.15	
			3	1.6	0.15	0.20	0.20		0.20	0.15	0.10	
		屋上	4	1.63	0.10	0.15	0.20		0.15	0.20	0.10	
			5	1.53	0.20	0.20	0.10		0.15	0.20	0.15	
			6	1.55	0.15	0.15	0.20		0.15	0.15	0.15	
	28	水中	7	2.51	0.15	0.20	0.10		0.20	0.15	0.10	
			8	2.79	0.20	0.20	0.15		0.20	0.15	0.05	
			9	2.65	0.20	0.15	0.15		0.25	0.25	0.15	
		屋上	10	2.74	0.05	0.20	0.10		0.10	0.20	0.20	
			11	2.69	0.15	0.20	0.15		0.25	0.20	0.15	
			12	2.58	0.30	0.10	0.25		0.35	0.40	0.30	
F55A45	7	水中	1	2.58	0.15	0.20	0.15		0.15	0.15	0.20	
			2	2.51	0.10	0.15	0.15		0.20	0.20	0.15	
			3	2.58	0.10	0.25	0.20	0.15	0.25	0.25	0.25	
		屋上	4	2.49	0.15	0.20	0.10		0.05	0.15	0.20	0.05
			5	2.45	0.20	0.25	0.35		0.15	0.15	0.15	
			6	2.48	0.25	0.20	0.20		0.15	0.25	0.30	
	28	水中	13	3.31	0.20	0.20	0.15		0.20	0.20	0.15	
			14	3.04	0.15	0.15	0.15		0.25	0.25	0.10	
			15	3.21	0.10	0.15	0.15		0.20	0.20	0.15	
		屋上	16	3.06	0.10	0.15	0.15		0.25	0.20	0.10	
			17	3.12	0.15	0.20	0.25		0.15	0.25	0.20	
			18	3.02	0.20	0.25	0.15		0.35	0.35	0.20	

※打込み面から底面までの貫通ひび割れとしては、打込み面の左と底面の右が対応

が多いが、水和水反応が他の配合よりも速く再水和水も速いことや、再水和水前から存在していたものも含め水酸化カルシウムの生成量が多く、ひび割れ下面に溶出した際に二酸化炭素と反応し炭酸カルシウムとして析出したためと考えられる。一方、スラグやフライアッシュセメントを使用したものは普通セメントよりも未充填箇所が多く、ひび割れ導入材齢7日の方が28日より充填しやすい傾向が確認された。これらの結合材は、強度発現から推定したように、水和水反応が遅く未水和水物が比較的多く残存していることや、潜在水硬性やポゾラン反応により普通セメントよりも水酸化カルシウムの生成量が少ないため表面的な水和水物の析出も少なかったものと推察される。

その後暴露2年程度経過した時点で、自己修復ポテンシャルが高いと考えられる材齢7日でひび割れを導入した供試体の一部を回収し、ひび割れ充填状況を観察するとともに、ひび割れ直交方向に切断して内部のひび割れ充填状況を確認した。写真-4に暴露2年後に回収した供試体底面のひび割れ充填状況を暴露3か月目の状況と併せて示す。水中暴露供試体は、3か月時点よりひび割れが確実に自己充填されていることが確認できる。一方、屋上暴露した供試体は一見すると大きな違いはなかったが、スラグやフライアッシュセメント供試体では半透明

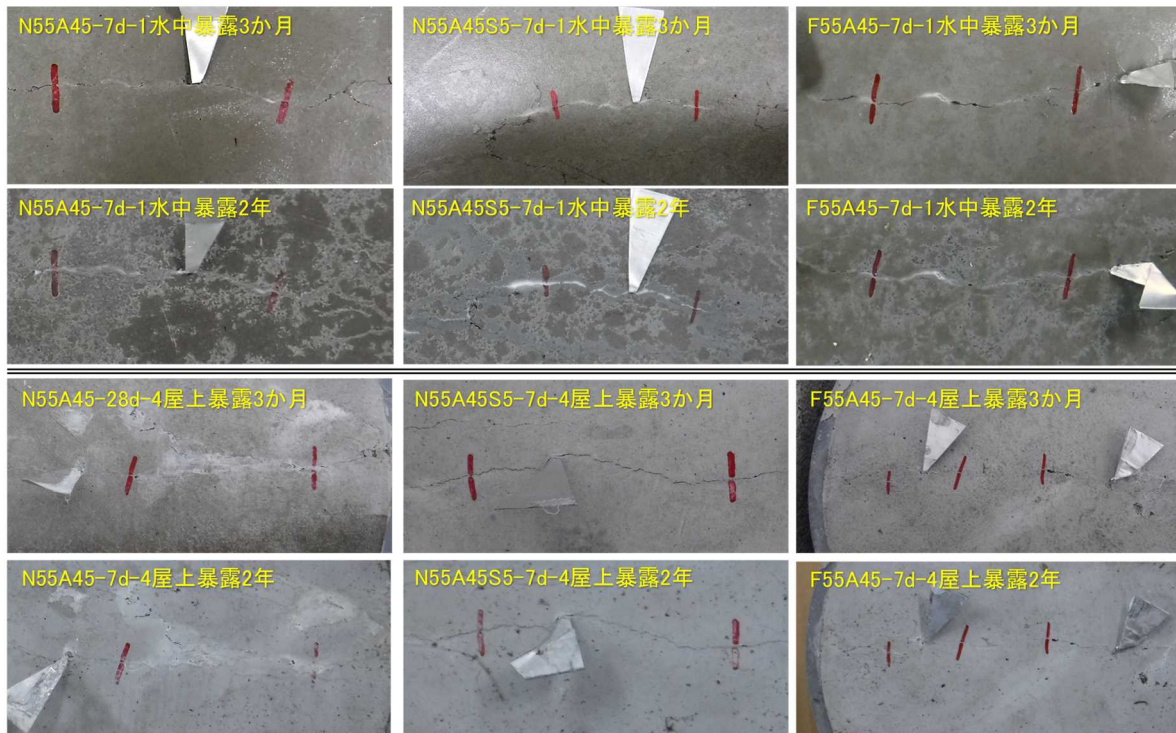


写真-4 暴露3か月と2年後の底面のひび割れ自己充填状況

上の水和物がひび割れに析出していることが確認された。また、ひび割れ直行方向に切断して内部を観察した結果、暴露環境によらずひび割れ内部は未充填であり、ひび割れの閉塞はほぼ表面部分に限られていた。

表-3にさらに半年経過した2年半後のひび割れ充填状況を示す。表-2の3か月後の充填状況と比べると、底面はほぼひび割れが閉塞し、打込み面でもひび割れの閉塞が確認され、特に、スラグ供試体の自己充填割合が高く、スラグの自己修復ポテンシャルが高いことが確認できた。また、修復可能なひび割れ幅については、本研究では一部ではあるが0.35mmまで閉塞が確認された。

4. まとめ

本研究では、比表面積 $3000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末に着目してひび割れの自己修復性について検討した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 本研究で検討した結合材はいずれも自己修復ポテンシャルを有しているが、特にスラグは長期的に未水和状態で残存しているため、自己修復ポテンシャルは高いと考えられる。
- 2) 貫通ひび割れは供試体底面側から閉塞し、普通セメントは早期にひび割れが閉塞するが、これは再水和が速いことに加え、水酸化カルシウム生成量が多く、ひび割れ下面に溶出した際に炭酸カルシウムとして析出するためと考えられる。
- 3) スラグを用いた場合、長期的には打込み面のひび割れの閉塞割合が高く、自己修復ポテンシャルが高いことが確認された。
- 4) ひび割れの閉塞はほぼ表面部分に限られ、修復可能なひび割れ幅は0.35mm程度だった。

表-3 暴露2年半後のひび割れ充填状況

配合 記号	ひび割れ 導入材 齢 (日)	暴露 環境	番号	引張 強度 N/mm ²	ひび割れ幅mm(打込み面) 左右基準:ラベル手前					ひび割れ幅mm(底面) 左右基準:ラベル手前に裏返				
					左	中央	右	右	右	左	中央	右	右	右
N55A45	7	水中	1											
			2	2.69	0.15	0.10	0.10			0.15	0.15	0.05		
			3	2.72	0.10	0.10	0.15			0.20	0.15	0.10		
		屋上	4											
			5	2.54	0.15	0.15	0.10			0.20	0.20	0.10		
			6	2.84	0.15	0.15	0.20			0.15	0.20	0.15		
	28	水中	7	3.72	0.20	0.20	0.15			0.25	0.20	0.05		
			8	3.66	0.25	0.15	0.15			0.15	0.20	0.15		
			9	3.57	0.15	0.15	0.15			0.20	0.15	0.10		
		屋上	10	3.79	0.15	0.15	0.10			0.15	0.15	0.10		
			11	3.5	0.05	0.15	0.10			0.30	0.25	0.10		
			12	3.76	0.20	0.20	0.15			0.20	0.20	0.10		
N55A45S5	7	水中	1											
			2	1.47	0.30	0.20	0.25			0.15	0.35	0.15		
			3	1.6	0.15	0.20	0.20			0.20	0.15	0.10		
		屋上	4											
			5	1.53	0.20	0.20	0.10			0.15	0.20	0.15		
			6	1.55	0.15	0.15	0.20			0.15	0.15	0.15		
	28	水中	7	2.51	0.15	0.20	0.10			0.20	0.15	0.10		
			8	2.79	0.20	0.20	0.15			0.20	0.15	0.05		
			9	2.65	0.20	0.15	0.15			0.25	0.25	0.15		
		屋上	10	2.74	0.05	0.20	0.10			0.10	0.20	0.20		
			11	2.69	0.15	0.20	0.15			0.25	0.20	0.15		
			12	2.58	0.30	0.10	0.25			0.35	0.40	0.30		
F55A45	7	水中	1											
			2	2.51	0.10	0.15	0.15			0.20	0.20	0.15		
			3	2.58	0.10	0.25	0.20	0.15		0.25	0.25	0.25		
		屋上	4											
			5	2.45	0.20	0.25	0.35			0.15	0.15	0.15		
			6	2.48	0.25	0.20	0.20			0.15	0.25	0.30		
	28	水中	13	3.31	0.20	0.20	0.15			0.20	0.20	0.15		
			14	3.04	0.15	0.15	0.15			0.25	0.25	0.10		
			15	3.21	0.10	0.15	0.15			0.20	0.20	0.15		
		屋上	16	3.06	0.10	0.15	0.15			0.25	0.20	0.10		
			17	3.12	0.15	0.20	0.25			0.15	0.25	0.20		
			18	3.02	0.20	0.25	0.15			0.35	0.35	0.20		

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究委員会報告書、2009
- 2) 澁谷将ほか：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの自己修復効果、日本建築学会北海道支部研究報告集 No.83、pp.47-50、2010.7
- 3) 藤井隆史ほか：微細なひび割れを持つコンクリート試験体の作製方法と試験方法、土木学会第67回年次学術講演会、V-451、pp.901-902、2012.9