

高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの自己修復効果

正会員 ○濫谷 将^{*1} 同 濱 幸雄^{*2}
同 谷口 円^{*3} 同 桂 修^{*4}
同 佐川孝広^{*5}

1.材料施工-2.モルタル・コンクリートの物性

自己修復、ひび割れ、高炉スラグ微粉末、圧縮強度、相対動弾性係数、中性化速度係数

1. はじめに

コンクリート構造物に生じる微細ひび割れが水分の供給を受ける環境下において自然に閉塞する「自己修復」の現象は古くから知られている。コンクリートは本来的に自己修復機能を有する材料であり、水セメント比の小さいコンクリートでは硬化コンクリート中にも未水和のセメントが本来的に残留しており、ひび割れの発生により追加的な水和反応が生じると特に修復を行わなくてもひび割れが閉塞する。このようなセメント系材料に特有の自己修復現象に関して、ひび割れの閉塞状況を詳しく観察、機構を解析し、自己修復現象が発現するための条件を特定する研究が成果を上げつつある。日本コンクリート工学協会では、図1のように自己修復現象に対して定義を行っている¹⁾。

既往の研究では、自律治癒に定義されるフライアッシュを用いた自己修復効果について検討されている。藤原らは、フライアッシュを混合したモルタルにおいて自己修復効果を確認し、置換率が高く、水セメント比が小さいほど修復効果が大きくなること²⁾、コンクリートとした場合には、AE剤により耐凍害性を確保することで、フライアッシュのもつ自己修復効果を有効に活用できることを報告した³⁾。また、村井らは劣化と修復のバランスを表わす自己修復効果の評価指標式を提案した⁴⁾。一方、フライアッシュの他にアルカリや硫酸塩の刺激により水と反応して硬化する潜在水硬性が自己修復効果を発揮する可能性が示唆されている。

本研究では、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性に着目し、粉末度及び置換率を変化させたモルタルの耐凍害性と自己修復性能の検証を行った。

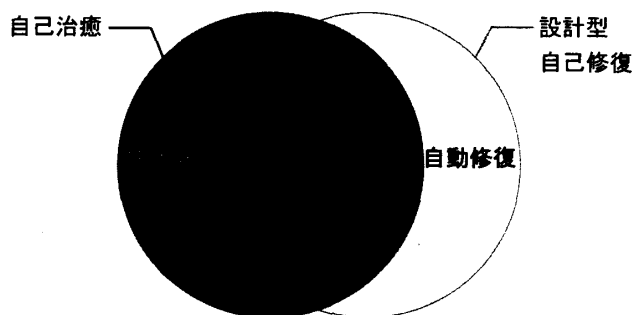


図1 自己修復コンクリートの定義

2. 実験計画及び方法

2. 1 実験計画

高炉スラグ微粉末を混入したモルタルの調合表を表1に示す。試験体は4×4×16cmの水結合材比55%、Non-AEモルタルとした。セメントは、普通ポルトランドセメント($\rho=3.17\text{ g/cm}^3$)を使用した。高炉スラグ微粉末は粉末度を3000、4000、8000 g/cm^3 の3水準とし、置換率は細骨材の一部を質量比20、45%で置換したもの(以下、外割り)及び、セメントの一部を質量比で45、70%置換したもの(以下、内割り)の4水準とした。細骨材は、登別産陸砂(表乾密度:2.69 g/cm^3 、粗粒率:2.70)を使用した。

2. 2 実験方法

耐凍害性の評価はJIS A 1148法に準じて行い、一定のサイクル毎に質量、動弾性係数及び長さの測定を行った。なお、凍結融解試験の開始材齢は4週とし、それまで20℃水中養生を行った。

自己修復性能の評価は打込みから20℃・4週水中養生後に初期性状試験を行い、凍結融解試験によって相対動弾性係数を60%程度まで低下させ、劣化後性状試験を行った。その後、20℃・1週水

表1 調合表 (高炉スラグ微粉末)

試験体記号	W/C(%)	高炉スラグ微粉末		質量比				
		粉末度(cm ² /g)	置換率(%)	水	セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材	
N	55	—	0	55	100	—	200	
3S20		3000	20	20	55	100	20	180
3S45			45	45	55	100	45	155
3S45(内)			45(内割り)	45	55	55	45	200
3S70(内)			70(内割り)	70	55	30	70	200
4S20			4000	20	20	55	100	20
4S45		45		45	55	100	45	155
4S45(内)		45(内割り)		45	55	55	45	200
4S70(内)		70(内割り)		70	55	30	70	200
8S20		8000	20	20	55	100	20	180
8S45			45	45	55	100	45	155
8S45(内)			45(内割り)	45	55	55	45	200
8S70(内)			70(内割り)	70	55	30	70	200

中または40℃・4週水中の修復養生を行い、修復後性状を測定した。なお、修復養生条件は夏期のコンクリート内部の温湿度を考慮し、20℃・1週水中養生(210°D・D)が夏期に北海道において受ける修復環境に相当するもの¹⁾とし、40℃・4週水中養生は、各材料の自己修復潜在能力を検討するための条件として設定した。測定項目は、曲げ強度・圧縮強度、一次共鳴振動数及び中性化深さとした。凍結融解試験はJIS A 1148法に準拠した。促進中性化試験はJIS A 1153法に準拠した。

3. 実験結果及び考察

3.1 耐凍害性の評価

粉末度別の耐久性指数による耐凍害性の評価を図2に示す。高炉スラグ微粉末を外割り置換した試験体は、粉末度によらず、Nと比較して高い値を示している。特に、置換率45%(外割り)は90~100と高い値であり、優れた耐凍害性を示した。一方、高炉スラグ微粉末を内割り置換した試験体の耐久性指数は、外割り置換の場合と比較して低いものの、Nと同等か高い値を示している。これらのことより、高炉スラグ微粉末を混入すると凍結融解抵抗性が向上し、特に外割り置換の場合は優れた耐凍害性を示すといえる。

3.2 自己修復性能の評価

(1) 曲げ・圧縮強度の変化

自己修復性能評価試験の各性状時における曲げ強度の変化を図3に、圧縮強度の変化を図4に示す。曲げ強度は、全ての試験体で40℃4Wの修復養生後に曲げ強度の回復がみられる。圧縮強度では、粉末度3000g/cm³の試験体で20℃1Wの修復養生後に初期性状以上の回復がみられる。しかし、粉末度8000g/cm³の試験体は40℃4Wの修復養生後でも回復していない。曲げ強度・圧縮強度の初

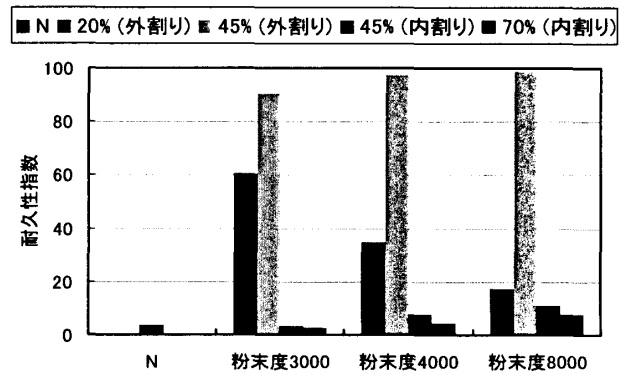


図2 耐久性指数による耐凍害性の評価

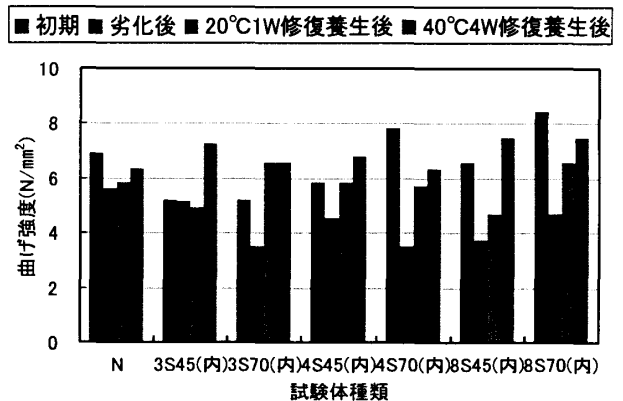


図3 曲げ強度の変化

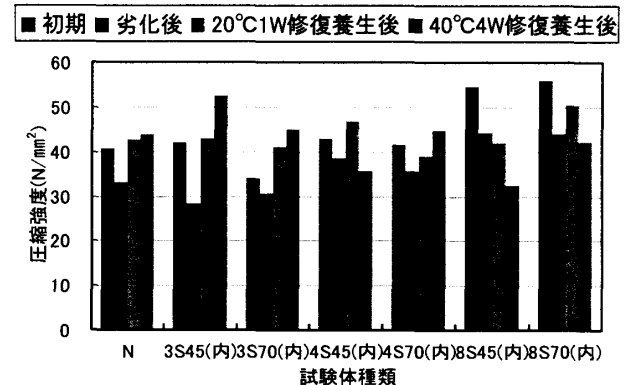


図4 圧縮強度の変化

■ 初期 ■ 劣化後 ■ 20°C1W修復養生後 ■ 40°C4W修復養生後

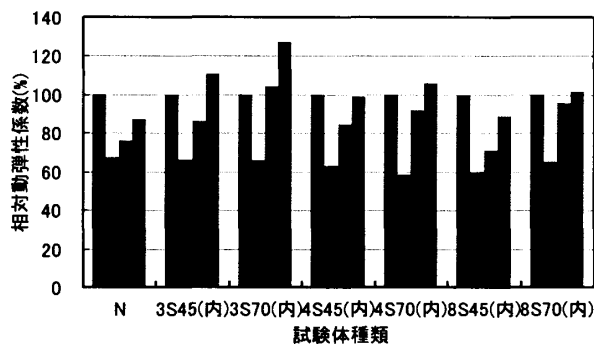


図5 相対動弾性係数の変化

期値を粉末度別に比較すると、粉末度が大きくなるにつれて初期値が大きくなっているといえる。これより、粉末度が大きいものは初期に高炉スラグ微粉末の多くが反応し、修復時には未水和の成分が少ないため修復効果が小さくなり、粉末度が小さいものについては初期に高炉スラグ微粉末がほとんど反応せず、修復時に未水和の成分が多く反応して回復程度が大きくなったと考えられる。

(2) 相対動弾性係数の変化

自己修復性能評価試験の各性状時における相対動弾性係数の変化を図5に示す。全ての試験体において、20°C1W及び40°C4Wの修復養生後に相対動弾性係数の回復が確認された。置換率の異なる45%(内割り)、70%(内割り)を比較した場合、置換率の高い70%(内割り)の回復程度が大きい。これより、高炉スラグ微粉末を高い置換率で混入することにより潜在水硬性による反応が進行しやすくなり、修復効果が大きくなったと考えられる。また、粉末度の異なる3000、4000、8000 g/cm³を比較した場合、粉末度の小さいほど回復程度が大きい傾向がみられる。粉末度が小さいものは未水和の成分が多く残っており、修復養生時にその成分が反応し回復程度が大きくなったと考えられる。

(3) 中性化速度係数の変化

自己修復性能評価試験の各性状時における中性化速度係数の変化を図6に示す。高炉スラグ微粉末を混入したすべての試験体において、修復養生後に中性化速度係数の低下がみられ、高炉スラグ微粉末を混合することで自己修復効果が高くなるといえる。粉末度別に比較してみると、粉末度が小さいほど劣化後の修復効果が大きいといえる。粉末度が小さいものは未水和の成分が多く残っており、修復養生時に未水和の成分が反応し修復効果が大きくなったと考えられる。

■ 初期 ■ 劣化後 ■ 20°C1W修復養生後 ■ 40°C4W修復養生後

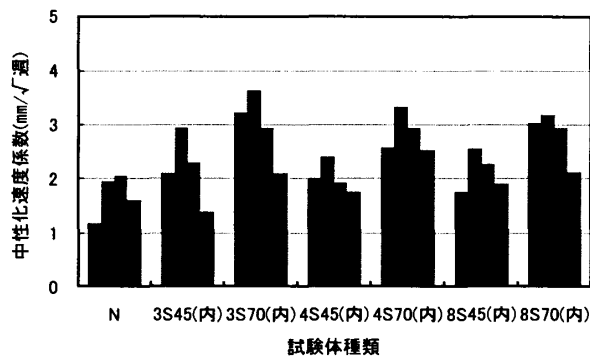


図6 中性化速度係数の変化

3. 3 自己修復効果の評価方法の提案

既往の研究⁴⁾では、コンクリート構造物の耐久性向上のために有効となる自己修復効果は、劣化抵抗性と修復効果のバランスを考慮して評価すべきであると考えられ、指標式(1)を用いて検討が行われていた。初期性状時、劣化後性状時及び40°C4Wの修復性状時の中性化速度係数をそれぞれI、D、Sとする。

$$E_s = P_s / D_1 \cdots \text{式(1)}$$

E_s : 自己修復効果

P_s : 潜在的修復性能 [= D - S]

D_1 : 劣化指数 [= D - I]

しかし、指標式(1)の劣化指数(D_1)は、凍結融解抵抗性すなわち、凍結融解試験により劣化するまでの時間的要因が考慮されていない。そこで、本研究では相対動弾性係数が任意の値まで低下するのに要する凍結融解サイクル(t)を考慮し、指標式(2)を用いて検討を行った。なお、指標式(2)におけるI、D、Sは指標式(1)と同様に、それぞれ初期性状時、劣化後性状時及び40°C4Wの修復性状時の中性化速度係数とする。

$$E_s = P_s \cdot D_1 \cdots \text{式(2)}$$

E_s : 自己修復効果

P_s : 潜在的修復性能 [= D - S]

D_1 : 劣化指数 [= (D - I) / t]

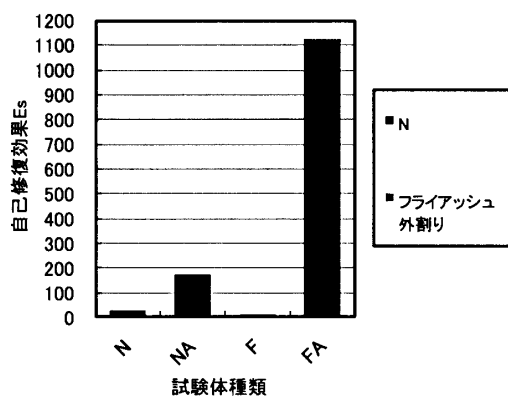
t : 劣化するまでの凍結融解サイクル [cy.]

指標式(2)による自己修復効果の評価結果を図7に示す。なお、フライアッシュを混入した場合の評価結果についても比較用として図7に示した。N、NAは普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート、F、FAは普通ポルトランドセメントにフライアッシュを外割り15%置換したコンクリートである。NAおよびFAにはAE剤が用いられた。また、劣化後性状は相対動弾性係数が80～

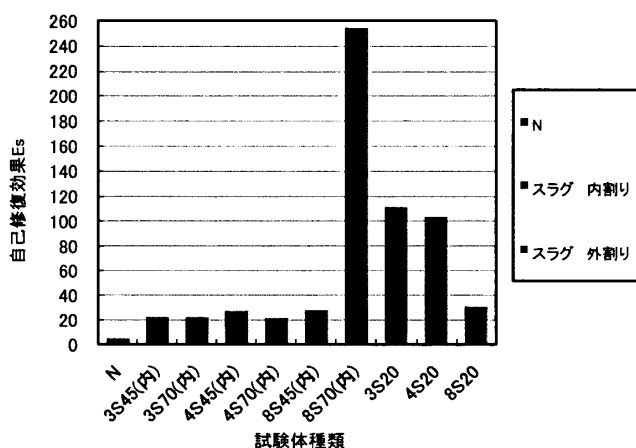
90%まで低下した状態のものとしている⁴⁾。

Fでは $E_s=14.03$ となりNの $E_s=29.19$ より小さい値を示し、フライアッシュの混入による自己修復効果を確認することはできなかった。この原因として、Fは $t=18\text{cy}$ と凍結融解抵抗性が小さいことがあげられる。しかし、FAでは $E_s=1125$ とNAの $E_s=170.49$ と比較して高い自己修復効果を有するものと評価できた。これより、フライアッシュを混入する場合には、AE剤を用いるなど耐凍害性を確保する必要があるといえる。

一方、高炉スラグ微粉末を混入した場合すべての試験体の E_s が基準Nの $E_s=4.75$ を上回り、高い自己修復効果が確認された。特に、3S20、4S20、8S70(内)では、優れた自己修復効果が確認された。ただし、8S70(内)は劣化後性状時の相対動弾性係数が60%程度まで低下していない可能性が



(a) フライアッシュを混入したコンクリート



(b) 高炉スラグ微粉末を混入したモルタル

図7 自己修復効果の評価

あり、中性化が進行せずにDの値が小さくなったため、 E_s の値が大きくなったことが考えられる。これより、高炉スラグ微粉末を外割り置換することにより、より高い修復効果を発揮すると考えられる。ただし、高炉スラグ微粉末を用いた場合の自己修復効果の持続性については明らかになっておらず、今後検討が必要と考えられる。

4. まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末の粉末度及び置換率を変化させたモルタルの耐凍害性と自己修復性能の検証を行った。その結果、以下のような知見を得た。

- 1) 高炉スラグ微粉末を混入することで凍結融解抵抗性が向上する。特に、外割りで置換した場合は優れた耐凍害性を示す。
- 2) 高炉スラグ微粉末を混入したモルタルの自己修復性能は、高炉スラグ微粉末の粉末度が小さいほど修復時に未水和の成分が多く反応して、修復養生後の修復効果が大きくなる。
- 3) 高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの自己修復性能は、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど潜在水硬性による反応が進行しやすくなり、より高い修復効果を期待できる。
- 4) フライアッシュを混入した場合はAEコンクリートとすることで、高い自己修復効果を期待できる。一方、高炉スラグ微粉末を用いたモルタルはnon-AEであっても自己修復効果を有し、特に、外割りとした場合は高い自己修復効果を発揮する。

【謝辞】

本実験を実施するにあたり、室蘭工業大学卒業生、村井洋公氏(現・株式会社栗林商会)、五十石大介氏(現・戸田建設株式会社)に多大なご協力をいただきました。記して謝意を表します。

【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) 藤原佑美ほか：フライアッシュを用いたモルタルの自己修復効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.29 No.1, PP.303-308, 2007
- 3) 藤原佑美ほか：フライアッシュを用いたコンクリートの耐凍害性と自己修復効果の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.30 No.1, PP.873-877, 2008
- 4) 村井洋公ほか：フライアッシュを用いたモルタル・コンクリートの自己修復効果に関する研究、日本建築学会北海道支部報告集、No.81, PP.5-10, 2008

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程
 *2 室蘭工業大学大学院教授 博士(工学)
 *3 北方建築総合研究所 修士(工学)
 *4 北方建築総合研究所 博士(工学)
 *5 日鐵セメント株式会社 博士(工学)

Graduate student, Muroran Institute of Technology
 Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.
 Northern Regional Building Research Institute, M. Eng.
 Northern Regional Building Research Institute, Dr. Eng.
 Nittetsu Cement Co. Ltd., Dr. Eng.