

論文 促進劣化によるひび割れ補修材の評価に関する研究

流田 靖博*1・大久保 孝昭*2・藤本 郷史*3

要旨: 本研究は RC 構造物に生じたひび割れの補修において、合理的なひび割れ補修材を選定するためには、補修直後の補修効果（初期性能）のみならず、その持続性を評価することの必要性に着目した基礎的な研究である。本報では、ひび割れ補修材として汎用されている 11 種類の材料を抽出し、補修材料単体及びひび割れ補修を施したモルタル試験体に対し、実験室レベルで過酷な気象環境をシミュレーションした促進劣化外力を与えた。その結果、促進劣化外力による補修材単体の変化や補修効果の低下が補修材ごとにかなり異なることを明らかにし、補修効果の持続性を評価することの重要性を示している。

キーワード: ひび割れ, 補修材料, 耐久性, 凍結融解試験, 促進耐候性試験

1. はじめに

我が国の建築物は、高度経済成長期以降に建築ラッシュが訪れ、その後スクラップ&ビルドを繰り返してきた。近年は、ストック&リノベーションの考えが主流となり、特に住宅分野では品確法や長期優良住宅制度など、建築物をできる限り長期に使用する行政施策が施されている。この方針は、土木、建築及び新設、既存に関わらず、全ての建設生産に該当することには議論の余地はない。

構造物の長寿命化を達成するためには、新築時における確かな耐久設計と合理的な維持管理が重要である。本研究は、維持管理段階におけるコンクリート構造物の長寿命化の一つであるひび割れ補修に絞っている。

ひび割れ補修箇所は、補修直後から気温、湿度、日射、降雨などによる気象の影響を受け、補修箇所の露出面においては日射による紫外線の影響を受けやすい状況である。したがって、補修材料や工法の評価には、補修技術の向上と共に補修箇所が長期間に渡り健全な状態で維持されることを検討することが重要である。これまで、ひび割れ補修材料の研究は多くなされているが、その多くは健全な試験体を用いた初期性能の評価に留まっているものが多い。耐久性を考慮した研究は、エポキシ樹脂注入試験体を用いて補修部の耐疲労性に及ぼす温度、気象劣化に着目した研究成果¹⁾があるものの、ひび割れ補修部の気象環境条件を考慮した補修効果の持続性を検討した研究は少ない。また、補修が必要なコンクリート構造物は、日本各地での様々な気象環境の中にあり、例えば、北海道における診断改修技術に関するアンケート調査²⁾では寒冷地における補修材料の性能、耐久性、補修効果等に関する情報が少ないことが示されている。

本報では、これらを背景に実験室レベルで再現した過酷な気象作用がひび割れ補修部の耐久性に及ぼす影響について、促進劣化外力としての凍結融解試験及び促進耐

候性試験を行い考察を行った。

2. 研究概要

コンクリート構造物に発生したひび割れの幅は、コンクリートの伸縮や気象作用により微少ではあるが常に動いている。筆者らはコンクリート躯体のひび割れ挙動の調査を行い、気象作用との関係を報告した^{3),4)}。その挙動は、壁体面が顕著であり、図-1に示すように気象作用及びコンクリートの伸縮により壁体面のひび割れ貫通部には、曲げ挙動と同様の圧縮力と引張力の繰り返しによる挙動が生じやすいことを明らかにした。本研究は、壁体面に発生したひび割れの曲げ挙動が気象作用によることに着目し、2 片のモルタルをひび割れ補修材で一体化した試験体（以下、補修試験体）並びに補修材料単体（以下、補修材単体）に対し促進劣化外力を与えた後、曲げ強度試験や補修材単体の色差の変化による評価を行った。

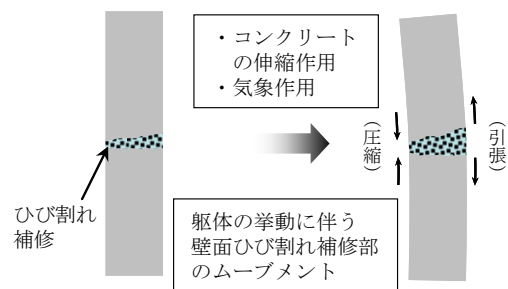


図-1 外壁に生じたひび割れの挙動概念

2.1 補修材料及び試験体

2.1.1 補修材料

試験に用いた補修材の種類を表-1に示す。選定した補修材は、11種類で試験体記号A~Iはエポキシ樹脂、Jは変性アクリル樹脂、Kはポリマーセメント系である。

*1 (財) 建材試験センター 西日本試験所 (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 教授 工博 (正会員)

*3 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 助教 博士(工学) (正会員)

2.1.2 試験体

試験に用いた試験体の種類をまとめて表-2に示す。
各試験体の詳細は下記の通りである。

表-1 補修材の種類

補修材の種類	試験体記号	特徴
エポキシ樹脂	A	揺変性
	B	パテ状
	C	低粘度
	D	水中硬化型低粘度
	E	高粘度
	F	
	G	可とう性揺変性
	H	可とう性
	I	
変性アクリル樹脂	J	中粘度
ポリマーセメント系	K	

表-2 試験体の種類

促進劣化外力	種類及び寸法	試験体記号	評価項目
凍結融解	補修試験体 40×40×160mm	A~K	曲げ強度
	モルタル 40×40×160mm	L	
促進耐候性	補修試験体 40×40×160mm	A~K	曲げ強度
	モルタル 40×40×160mm	L	
	補修材単体 40×40×160mm	A~K	
	補修材単体 50×70×10mm	A~K	色差

(1)補修試験体

補修用の試験体は普通モルタル（以降、モルタル）で、作製には表-3に示す割合により JIS R 5201:1997 に準拠し、40×40×160mm の形状に成形後、温度 20℃ の水中で 28 日間以上の養生を行ったものである。同表に示すように、モルタルには AE 剤を混入し、耐凍結融解性能を高めた。養生終了後、図-2 に示すように長さ 160mm を折半するように載荷し割裂した。その後、JIS A 6024:2008 に準拠し、接着層の厚さが 0.5mm になるように試験体 2 辺中央端部にスペーサーを挿入し、選定した補修材を用いて接着を行った。実際にはこれらの補修は低圧注入工法によることが多いが、ここでは施工法による影響を除外するために上記の方法で試験体を作製した。なお、接着後の試験体は、温度 20℃ の室内で 14 日間の養生を行った。

表-3 普通モルタルの割合

W/C (%)	S:C	単位量 kg/m ³			
		水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	AE 剤
40	2:1	262	656	1313	0.052

- ・セメント：普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）
- ・細骨材：東広島市黒瀬産砕砂（密度：2.58g/cm³，吸水率：0.96%）

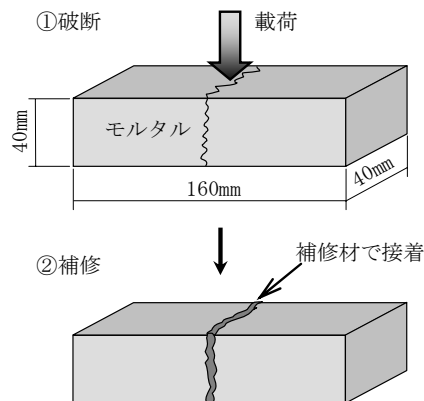


図-2 補修試験体の作製方法

(2)補修材単体

補修材単体は、JIS R 5201:1997 に規定される鋼製型枠を用いて 40×40×160mm の形状に成形した。なお、補修材単体の内、評価項目が色差の試験体については、50×70×10mm の樹脂製の型枠を用いて作製し、温度 20℃ の室内で 14 日間の養生を行った。

2.2 実験内容

2.2.1 促進劣化外力の要因と水準

促進劣化外力の与え方は、凍結融解試験及び促進耐候性試験の 2 種類とした。要因と水準をまとめて表-4 に示す。

表-4 促進劣化外力の要因と水準

試験体記号	凍結融解 (サイクル数)				促進耐候性 (照射時間)			
	0*1	30	50	100	0*1	1000	1500	2000
A	○	○	○	○	○	◎	○	◎
B	○	—	—	○	○	◎	—	◎
C	○	—	—	○	○	◎	—	◎
D	○	—	—	○	○	◎	—	◎
E	○	—	—	○	○	◎	—	◎
F	○	—	—	○	○	◎	—	◎
G	○	○	○	○	○	◎	○	◎
H	○	—	—	○	○	◎	—	◎
I	○	—	—	○	○	◎	—	◎
J	○	○	○	○	○	◎	○	◎
K	○	○	○	○	○	◎	○	◎
L	○	—	—	○	○	—	—	—

*1 : 試験開始前の初期値
◎ : 補修試験体及び補修材単体で実施

2.2.2 凍結融解試験による劣化外力

凍結融解試験条件を表-5に示す。試験条件は、コンクリート構造物のひび割れ補修部を壁体面の雨がかりの程度の激しいところを想定し、JIS A 1435:1991の気中凍結気中融解（シャワーリング）法に準拠して100サイクルまでの凍結融解繰返し試験を行った。凍結融解試験の1サイクルの所要時間は3時間とし、冷却時間は2時間、融解時間は1時間とした。融解中は散水し、融解用の水の温度は10℃とした。試験中は、熱電対を埋め込んだモルタルの中心温度を1サイクルのそれぞれの行程中に測定し、所定の時間内で試験体の中心温度が所定の温度に達していることを確認した。なお、試験開始に先立ち、試験体を20℃の水中に24時間浸漬させた。

2.2.3 促進耐候性試験による劣化外力

促進耐候性試験条件を表-6に示す。試験は、JIS A 1415:1999に準拠し、2000時間までの連続照射を行った。試験条件は、光源としてキセノンアークランプを用い、直接屋外暴露のシミュレーションによるWX-Aとした。

2.2.4 促進劣化試験後の補修材の評価方法

(1) 曲げ試験

本研究では、促進劣化による補修効果の持続性の評価として、補修試験体の曲げ強度の変化で評価する方法とした。曲げ試験方法を図-3に示す。荷重方法は、JIS R 5201:1997に準拠し2等分1線荷重法とし、試験体支持スパンは100mm、荷重速度は50N/sとした。なお、補修試験体の荷重位置は補修部とした。促進耐候性試験後の補修試験体及び補修材単体は、荷重面を非照射面側とし、引張り縁を照射面側とした。

(2) 色差

促進耐候性試験による補修材単体の変化は曲げ強度と色差で評価した。曲げ試験は前節の方法と同様とし、色差はJIS K 7105:1981に準拠し、照射時間が500時間毎に試験体を試験機から取出し測定を行った。なお、色差の算出は、CIE1976L*a*b*系の色差式を用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 凍結融解試験後の補修材の評価

凍結融解試験結果を図-4及び表-7に示す。図-4は、先の表-4に示した凍結融解繰返し水準における各補修試験体の曲げ強度を示し、表-7は、曲げ試験後の補修試験体の破断箇所を示したものである。なお、図示はしていないがモルタル自体は100サイクル終了後も曲げ強度の低下が認められないことを確認している。

図-4に示すように揺変性エポキシ樹脂A、高粘度エポキシ樹脂E及びF、可とう性エポキシ樹脂G、H及びI、変性アクリル樹脂J、ポリマーセメント系Kは、いずれも凍結融解繰返しにより曲げ強度の低下が認められた。

表-5 凍結融解試験条件

準拠規格	JIS A 1435 : 1991 建築用外壁材料の耐凍害性 試験方法（凍結融解法）	
試験方法	気中凍結気中融解法	
冷却条件 （気中）	温度	-20℃
	時間	2時間
融解条件 （気中）	温度	+10℃
	時間	1時間

表-6 促進耐候性試験条件

準拠規格	JIS A 1415 : 1999 高分子系建築材料の実験室光源による 暴露試験方法	
光源	キセノンアーク光源 記号：WX-A	
放射照度	550W/m ² （波長域 290～800nm）	
B P T	63℃	
相対湿度	50%	
水噴霧 サイクル	102分照射後、18分照射及び水噴霧	

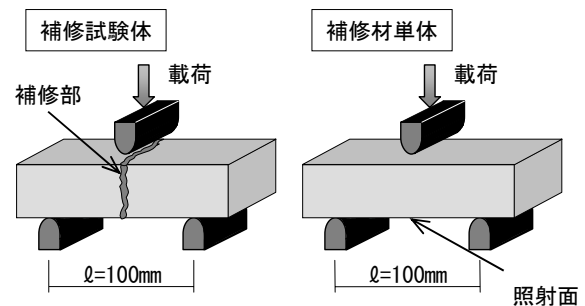


図-3 曲げ試験方法

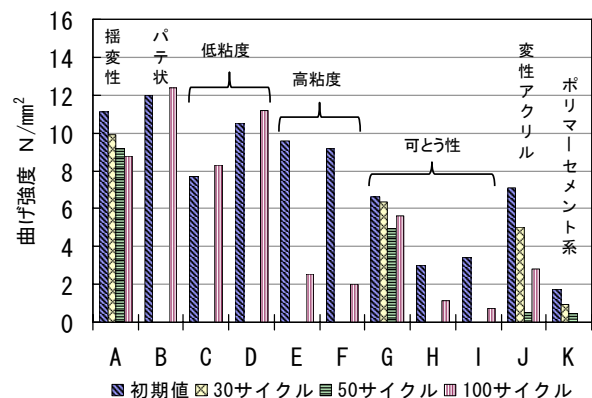


図-4 補修試験体の凍結融解試験結果
（凍結融解繰返しサイクル毎の各試験体の曲げ強度）

特に高粘度エポキシ樹脂，可とう性エポキシ樹脂及び変性アクリル樹脂を用いた補修試験体の曲げ強度の低下は顕著である。一方，パテ状エポキシ樹脂 B 及び低粘度エポキシ樹脂 C 及び D の曲げ強度の低下は，モルタル同様認められなかった。また，曲げ強度試験結果及び表-7 に示す補修試験体破断箇所の観察結果から曲げ強度の低下が顕著な試験体は，初期値（0 サイクル）では，「モルタルの凝集破断」であったが，100 サイクル後は，「モルタル界面」または，「補修材の凝集破断+モルタル界面」と変化している。これは，凍結融解の繰返しにより，ひび割れ補修部に浸水しやすい状態が生じ，劣化が進展したものと考えられる。一方，曲げ強度の低下が認められなかったパテ状エポキシ樹脂 B 及び低粘度エポキシ樹脂 C は 100 サイクル終了後も試験開始前の初期値（0 サイクル）と同じ破断箇所であり，曲げ強度との関係からも凍結融解の抵抗性が高いと考えられる。

3.2 促進耐候性試験後の補修材の評価

(1) 補修試験体の促進耐候性試験結果

補修試験体の促進耐候性試験結果を図-5 及び表-8 に示す。図-5 は，表-4 に示す促進耐候性照射時間の水準における各補修試験体の曲げ強度を示し，表-8 は，曲げ試験後の補修試験体の破断箇所を示したものである。

図-5 に示すように，各試験体とも照射時間と曲げ強度の関係にバラツキはあるものの，揺変性エポキシ樹脂 A，高粘度エポキシ樹脂 E 及び F，可とう性エポキシ樹脂 G 及び変性アクリル樹脂 J の照射 2000 時間後の曲げ強度は，いずれの試験体も試験開始前の初期値（照射時間 0）に対して，低下が認められた。試験体 A，E，F 及び G の初期値に対する曲げ強度の低下は，約 10%～約 20%程度に留まっている。しかし，変性アクリル樹脂 J は，初期値に対し照射 2000 時間後の曲げ強度は約 40%低下し，強度の変化が他の補修試験体に比べ顕著である。一方，パテ状エポキシ樹脂 B 及び低粘度エポキシ樹脂 C 及び D は，前項 3.1 の凍結融解繰返しと同様に曲げ強度の低下は認められなかった。

変性アクリル樹脂 J の曲げ強度が他の試験体に比べ大きく低下した原因は，表-8 に示すように，試験開始前の初期値（照射時間 0）では破断箇所が「モルタルの凝集破断」であったが，照射 2000 時間後では，「モルタル界面+モルタルの凝集破断」と変化している。これは，促進耐候性試験によるひび割れ補修部への紫外線の影響と同時に照射面への水噴霧の影響と考えられる。このように，実験室での過酷な試験条件であるが，屋外の気象作用により耐久性の低下が生じると推察される。一方，パテ状エポキシ樹脂 B 及び低粘度エポキシ樹脂 C 及び D の曲げ強度の低下が認められない原因は，本実験での試験体のひび割れ幅が 0.5mm であるため，補修材の暴露面積

表-7 凍結融解試験結果（破断箇所）

試験体 記号	破断箇所			
	0 サイクル	30 サイクル	50 サイクル	100 サイクル
A	a	a	b+c	b
B	a	—	—	a
C	a	—	—	a
D	a	—	—	b+c
E	a	—	—	b
F	b+c	—	—	b+c
G	a	b+c	b+c	b+c
H	b+c	—	—	b
I	b+c	—	—	b+c
J	a	b+c	b+c	a
K	c	c	b+c	

a : モルタルの凝集破断
a+b : モルタル界面+モルタルの凝集破断
b : モルタル界面
b+c : 補修材の凝集破断+モルタル界面
c : 補修材の凝集破断

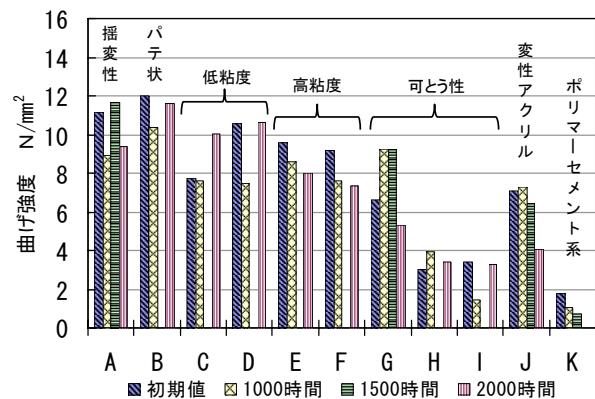


図-5 補修試験体の耐候性試験結果（照射時間毎の各試験体の曲げ強度）

表-8 促進耐候性試験結果（破断箇所）

試験体 記号	破断箇所			
	0 時間	1000 時間	1500 時間	2000 時間
A	a	a	a	a
B	a	a	—	a
C	a	a	—	a
D	a	a	—	a
E	a+b	a+b	—	a+b
F	a+b	b+c	—	a+b
G	a	b+c	a+b	b
H	b+c	b+c	—	b+c
I	b+c	c	—	c
J	a	a	a	a+b
K	c	c	c	

a : モルタルの凝集破断
a+b : モルタル界面+モルタルの凝集破断
b : モルタル界面
b+c : 補修材の凝集破断+モルタル界面
c : 補修材の凝集破断

が小さいため影響が少なかったと考えられる。これは実構造物のひび割れ補修にも同様のことが想定され、今後ひび割れ幅の条件を増やし、実験・検討が必要と考えられる。

(2) 補修材単体の促進耐候性試験結果

補修材単体の促進耐候性試験時間と曲げ強度の関係を図-6に示す。

図-6に示すように、エポキシ樹脂 A, C, D, E, F 及び G の促進耐候性試験後の曲げ強度は、試験開始前の初期値（照射時間 0）に対して、約 60%~80%まで低下し、他の試験体に比べ顕著である。また、照射 1000 時間後及び 2000 時間後の曲げ強度には大きな差はなく、初期の照射により急激な変化をすることが明らかになった。一方、パテ状エポキシ樹脂 B, 可とう性エポキシ樹脂 H 及び I には、大きな変化は認められなかった。また、変性アクリル樹脂 J 及びポリマーセメント系 K についても同様で、促進耐候性に対する抵抗性が大きいと考えられる。これらから、曲げ強度の低下の大きい補修材は、実構造物のひび割れ補修後、暴露面の保護などによる措置が必要であると考えられる。

次に、促進耐候性試験時間と色差の関係を図-7に、色差と曲げ強度変化率の関係を図-8に示す。

図-7に示すように、何れの試験体も照射時間の増加に伴い、色差が大きくなり、照射時間が 500 時間終了後において色差が大きく変化し、曲げ強度の結果と同様、照射初期に試験体表面の劣化進展したものと考えられる。色差と曲げ強度の関係は、図-6の曲げ強度からも明らかなように、エポキシ樹脂 A, C, D, E, F 及び G は、色差が大きくなるに従い、曲げ強度が大きく低下することが明らかとなった。また、図-8からもエポキシ樹脂は、色差が大きくなるに従い曲げ強度が急激に低下することが解る。促進耐候性試験によって、揺変性及び可とう性エポキシ樹脂は僅かな色差の変化で曲げ強度が急激に低下し、低粘度及び高粘度エポキシ樹脂は、色差、曲げ強度ともに急激に変化した。一方、エポキシ樹脂でもパテ状のエポキシ樹脂、変性アクリル樹脂及びポリマーセメント系は、他の試験体と同様に促進耐候性試験により色差は照射時間に比例して増加するが、色差と曲げ強度変化率との間に明確な関係は認められなかった。以上のことからエポキシ樹脂は、気象作用の中の紫外線に対して変化しやすい性質であることが解り、以上の結果より補修箇所の耐久性を考慮した施工が必要と考えられる。

(3) 補修試験体と補修材単体の曲げ強度の相関

図-9、図-10及び図-11に補修試験体と補修材単体の曲げ強度の関係を示す。図-9には初期値の関係を、図-10には 1000 時間照射後の関係を、図-11には 2000 時間照射後の関係を示す。

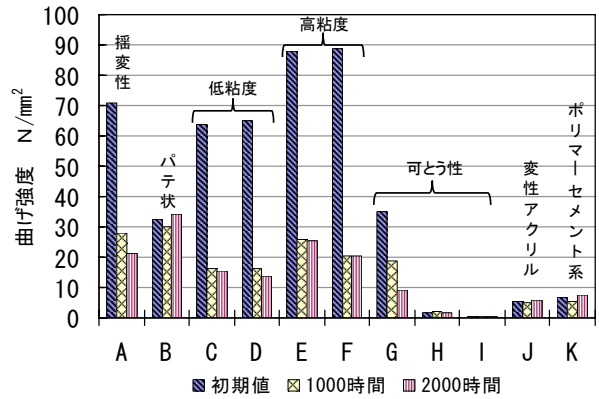


図-6 補修材単体の促進耐候性試験結果 (照射時間毎の各試験体の曲げ強度)

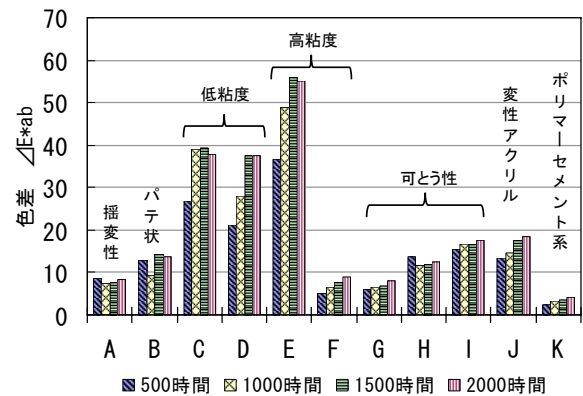


図-7 補修材単体の促進耐候性試験結果 (照射時間毎の各試験体の色差)

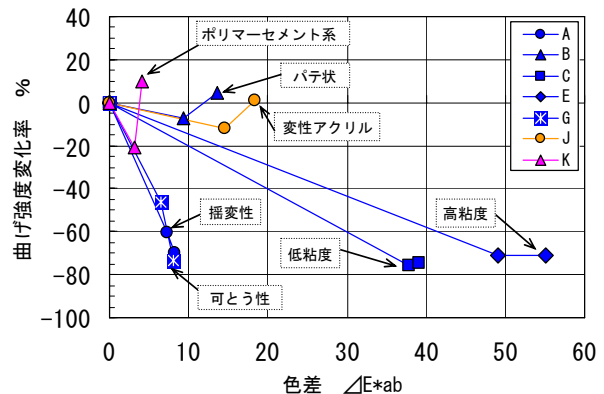


図-8 補修材単体の色差と曲げ強度変化率

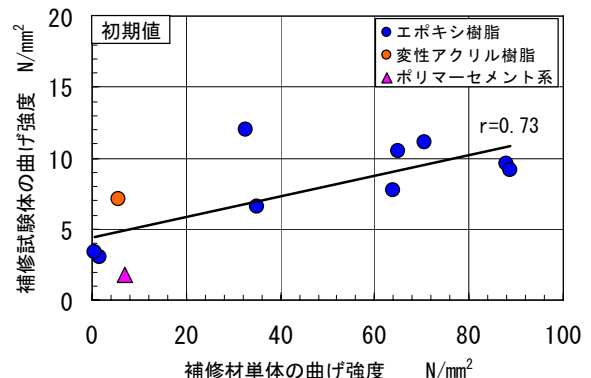


図-9 補修材単体と補修試験体の曲げ強度の関係

これらの図から、補修材単体の曲げ強度と補修試験体の曲げ強度には強い相関が認められた。また、図-9～図-11 から促進耐候性試験による曲げ強度の低下は、補修試験体に比べて補修材単体の方が著しいことが明らかである。これは、前述したように補修試験体は補修材の暴露面積が小さいため紫外線と水噴霧の影響が少なかったと考えられる。一方、補修材単体の曲げ強度の変化から推察すると紫外線による劣化は著しいものと考えられる。

コンクリート構造物の補修箇所は、本実験で用いた補修材単体のように補修材料自体が広い面積で暴露されることは少ないが、これらの実験結果からも確認できるように補修材単体の促進耐候性試験を行い耐久性を確認することで、補修試験体の紫外線に対する耐久性能を把握することが可能と考えられる。逆に健全な試験体を用いた補修材の初期性能を確認することだけでは、長期間の日射に暴露される補修箇所の性能を把握することは困難と言える。以上の結果より補修材料の耐久性能を把握し評価することは、非常に重要なことであると考えられる。

4. まとめ

本報では、エポキシ樹脂補修材 9 種類、変性アクリル樹脂補修材 1 種類及びポリマーセメント系補修材 1 種類を用いた補修試験体及び補修材単体の促進劣化試験を行い耐久性能の検討を行った。本実験の範囲では主として下記のような知見が得られ、ひび割れ補修において補修材を選定する際には各補修材の外気環境に対する耐久性（補修効果の持続性）を考慮することの重要性を示すデータが得られた。

- (1)凍結融解試験後の曲げ試験では、高粘度のエポキシ樹脂 E、F と変性アクリル樹脂 J が、特に初期値に対する強度低下が大きかった。
- (2)パテ状エポキシ樹脂 B、低粘度エポキシ樹脂 C は、凍結融解試験及び促進耐候性試験ともに、促進劣化後の曲げ強度は初期値に対して大きな低下は示さなかった。
- (3)ポリマーセメント系 K は凍結融解試験及び促進耐候性試験ともに、促進劣化サイクル数の増大に伴い曲げ強度は徐々に低下した。
- (4)本実験で用いた 9 種類のエポキシ樹脂補修材単体の曲げ強度は、いずれも促進耐候性試験により低下しやすい傾向を示した。

本研究成果は、ひび割れが生じたコンクリート構造物の補修にあたり、気象作用に対する耐久性を考慮した材料選定に役立つものであると考える。今後も更に実験を行い、データを蓄積する予定である。

謝辞

本稿を纏めるにあたり広島大学大学院修士課程の西内

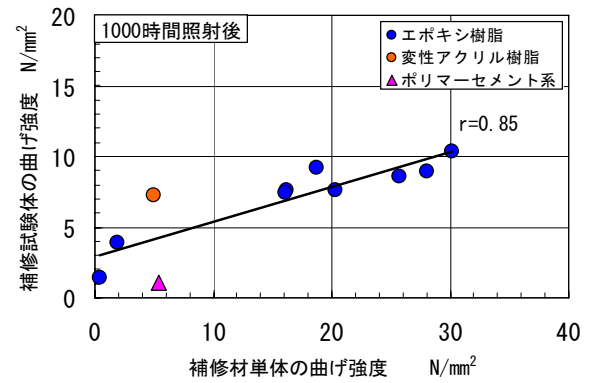


図-10 補修材単体と補修試験体の曲げ強度の関係 (1000 時間照射後)

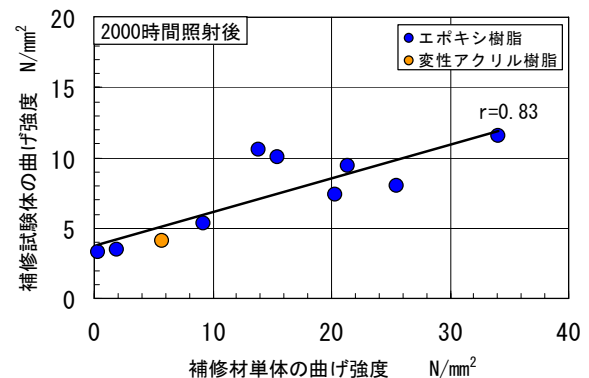


図-11 補修材単体と補修試験体の曲げ強度の関係 (2000 時間照射後)

佑太さん、(財)建材試験センター西日本試験所の井上英雄副所長、同 杉原大祐さんのご協力をいただいた。また、本研究の一部には科学研究助成費（基盤研究 B19306250）の助成を受けた。末尾ながら記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 申 洪澈, 宮内博之, 田中享二: エポキシ樹脂注入補修部の疲労耐久性に及ぼす気象劣化の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 580 号, pp.29-34, 2004.6
- 2) 森久保良希, 浜 幸雄, 鈴木邦康, 十河哲也, 竹内慎一: 既存建築物の保全および長期活用を目的とした診断改修技術に関するアンケート調査, 日本建築学会技術報告集, 第 23 号, pp.43-46, 2006.6
- 3) 森濱直之, 神田憲二, 大久保孝昭, 松本慎也, 根本かおり: 挙動のあるひび割れに対する補修工法の特性に関する研究 その 1 実構造物におけるひび割れの挙動測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.555-556, 2006.9
- 4) 頼 明峰, 森濱直之, 大久保孝昭, 松本慎也, 藤本郷史, 流田靖博: 挙動のあるひび割れに対する補修の評価に関する基礎的研究 その 1 ひび割れの挙動計測と透気試験の合理化の検討, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 31 巻, 2008.3