

論文 ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムにおけるひび割れの自己修復性能に関する検討

熊田 廣樹^{*1}・大平 旭洋^{*1}・Sanjay PAREEK^{*2}

要旨：本研究は、RC 構造物に発生したひび割れを、自動的に修復させることを目的とし、ネットワーク及び補修剤を自己修復システムとして用いた際の自己修復性能として、1)繰り返し修復を行った際の強度回復率の変化、2)養生温度が補修剤の硬化時間に及ぼす影響、3)補修剤の粘性及びひび割れ幅の違いがひび割れへの充填に及ぼす影響について検討を行った。その結果、繰り返し修復を行うことで強度が上昇すること、ひび割れに充填された補修剤の硬化期間、並びに補修剤が修復可能なひび割れ幅の範囲について確認できた。

キーワード：自己修復、ひび割れ、ネットワーク、エポキシ樹脂、曲げ強度、強度回復率

1. はじめに

現在建設されている大半の構造物にコンクリートが用いられており、適切な配慮の下に工事がなされている。しかしながら、コンクリートはその材料強度を超える過度の引張応力、セメントの水和反応に伴う温度応力及び収縮に伴う引張応力によりひび割れが発生し、その完全な防止は非常に困難である。ひび割れはコンクリートの強度の低下や気密性の低下などの直接的な性能劣化だけでなく、中性化や塩害などによる劣化を促進し、鉄筋の錆を誘発することで早期劣化の原因となる。ひび割れによるコンクリートの早期劣化は、構造物の耐久性、安全性を低下させ、構造物の耐用年数を短いものにしてしまう。そのため、定期的な検査が必要になってくるが、その検査のほとんどが、人の手に頼っているのが現状である。そのため検査は目視に頼るものが多く、検査の信頼性は確実とはいえない¹⁾。また、核廃棄物処理施設や原子力発電所の壁面など人の手の届かない箇所にひび割れが発生する可能性があり、施設の使用期間中は、補修作業はおろか検査すらできない場合がある²⁾。ひび割れによるコンクリートの劣化は、構造物の耐用年数を短いものにするだけでなく、人々の生命や安全にも大きく関わってくるといえる。その為、コンクリートの高耐久性化への社会的要請は大きく、構造物のさらなる長寿命化が望まれている。そこで、近年注目されているインテリジェントマテリアルとよばれる材料の特性をコンクリートに付与することで、コンクリート構造物の耐久性向上の可能性について追及する。本研究では、コンクリート内に補修剤を内包したネットワークを作製することにより、インテリジェント化を図る。コンクリート打設時に、供試体内部に中が空洞で円管状のネットワーク

を作製した。**Fig.1** に自己修復システムの詳細を示す。この方法は、コンクリートにネットワークを作製し、補修剤を注入することでコンクリートにひび割れが発生した際、補修剤を内包したネットワークの内部にも亀裂が発生し、補修剤がひび割れに充填されることで修復することができる³⁾。

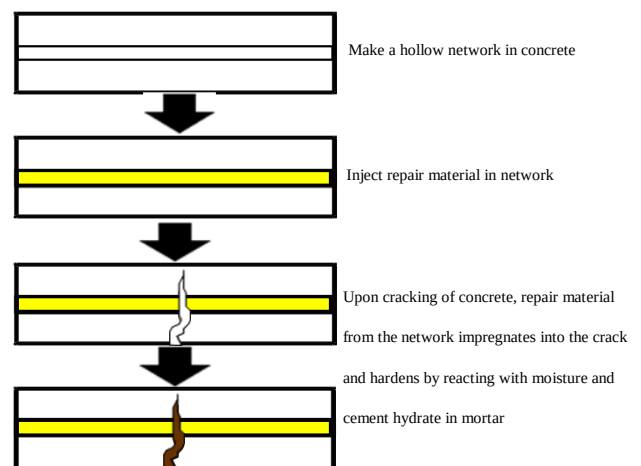


Fig.1 Concrete self-repair system

2. 実験目的

著者らは昨年、コンクリートのひび割れの補修方法として、ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムを提案し、実際にモルタル供試体にひび割れを発生させ、修復を行った際の結果に関して報告を行った³⁾。既往の研究結果より、 $40 \times 40 \times 150\text{mm}$ のモルタル供試体に**Fig.1** に示す自己修復システムを付与することで、 $0.05\text{mm} \sim 0.20\text{mm}$ のひび割れが発生した供試体の曲げ強度を 80%以上回復することを確認できた。しかし供試体に付与した自己修復システムの自己修復性能に関して

^{*1} 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

^{*2} 日本大学 工学部建築学科准教授 工博 (正会員)

不明な点が数多く見受けられた。そこで本論文では、モルタル及びコンクリート供試体にネットワークを作製し、修復を行い、

- 1) 繰り返し修復を行った際の強度回復率の変化
- 2) 養生温度が補修剤の硬化期間に及ぼす影響
- 3) 補修剤の粘性とひび割れ幅の違いがひび割れへの充填に及ぼす影響

以上のことについて検討を行い、当自己修復システムにおける自己修復性能に関して明らかにしていく。

3. 使用材料

2. 実験目的より、1)及び2)の実験ではモルタル供試体を使用し、3)の実験に関しては 0.20mm 以上のひび割れを発生させるのがモルタル供試体では困難なため、鉄筋を配筋したコンクリート供試体を使用した。**Fig.2, Photo 1**にモルタル供試体の供試体形状を、**Fig.3, Photo 2**にコンクリート供試体の供試体形状を、**Table 1, Fig.4**に使用したエポキシ樹脂の性質を示す。モルタル供試体はセメントに普通ポルトランドセメント、細骨材に豊浦硅砂を使用した。セメント：砂＝1：3（質量比）で混合し、水セメント比を 72%として練り混ぜ、練り混ぜたモルタルを 40×40×150mm の寸法で形成した。供試体の中央に、補修剤を注入するためのネットワークを 1 本作製した。コンクリート供試体は、水：174 kg/m³、セメント：318 kg/m³、細骨材：855 kg/m³、粗骨材：936 kg/m³、水セメント比 57.9%，スランプ：18.0cm，空気量：4.5%の Fc24 の普通コンクリートを用いて、80×120×370mm で形成し、主筋に D6 の SD295，あばら筋に 4φの SR295 を使用した。主筋から 15mm 程下がった箇所に、ネットワークを 2 本作製した。なお、ネットワークは、あらかじめ作製する位置にはく離剤を塗布した鉄筋を配置し、モルタルまたはコンクリートの硬化後に引き抜くことでネットワークを作製した。補修剤は空気中の水分と反応し硬化する 1 液性のエポキシ樹脂を使用し、1) 繰り返し修復を行った際の強度回復率の変化及び 2) 養生温度が補修剤の硬化期間に及ぼす影響に関しては、既往の研究より最も結果の良好だった低粘性の樹脂 (L) を、3) 補修剤の粘性とひび割れ幅の違いがひび割れへの充填に及ぼす影響に関しては、粘性の異なる 2 種類の樹脂 (M, L) を使用した。

4. 実験概要

4.1 繰り返し修復を行った際の強度回復率の変化

実際の RC 構造物を複数回修復することを想定し、ひび割れの発生と修復を 8 回ほど繰り返し、強度回復率の変化を比較することで、当自己修復システムが、その修復機能をどこまで保持できるか検討を行う。

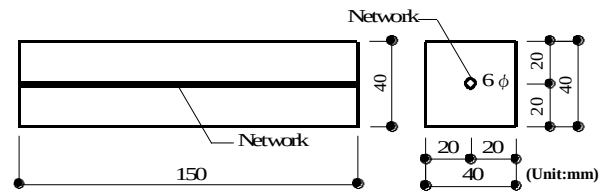


Fig.2 Outline of test specimen

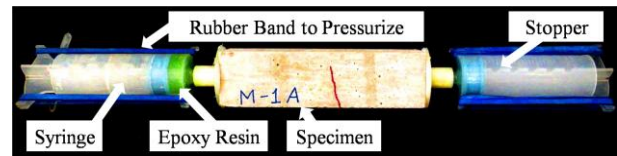


Photo 1 View of crack injection system

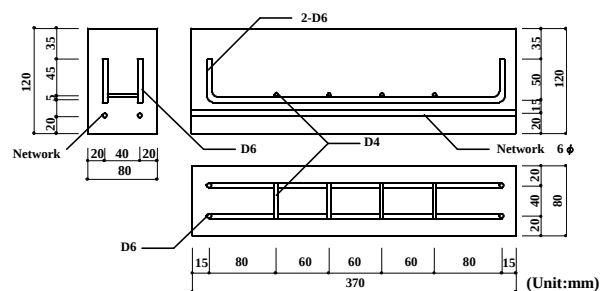


Fig.3 Shape and dimension of test specimens

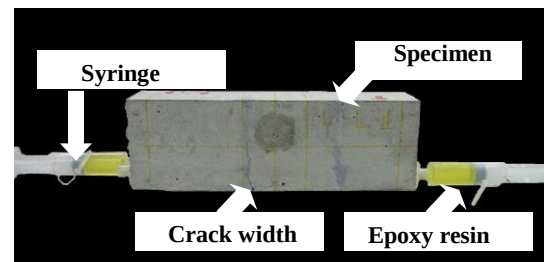


Photo 2 View of crack injection system

Table 1 Properties of epoxy resin

Type of Epoxy Resin	Hardening Mechanism	Thixotropic Index	Specific Gravity (g/cm ³ , 23°C)	Viscosity (mPa·s, 23°C)
M	Moisture	2.2	1.07	1900
L	Sensitive	1.0	1.15	150

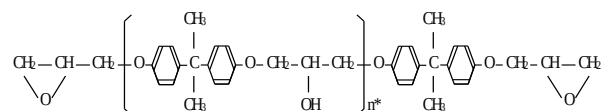


Fig.4 Constitutional formula of epoxy resin

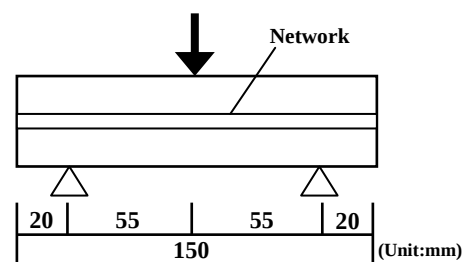


Fig.5 Loading conditions for flexural strength test

Fig.5 に供試体の設置状況を示す。まず、JIS R 5201(セメントの物理試験方法)に従い、変位制御式荷重装置を用いて、作製したモルタル供試体 3 体の第 1 荷重の曲げ試験を行い、最大荷重に達してから破壊されるまでの荷重を機械的に制御することで、ひび割れ幅 0.05mm～0.20mm のひび割れを発生させた。第 1 荷重試験後、シリンダーを用いてネットワークに補修剤を注入し、ゴムを取り付け一定の圧力を加え、ひび割れに補修剤を自動的に充填させた。1d 乾燥[20℃,60%(RH)]養生を行い、ネットワーク内の補修剤の硬化を防ぐため、ネットワーク内の未硬化の補修剤をコンプレッサーを用いて排出した。次に、4d 乾燥[20℃,60%(RH)]養生を行い、ひび割れに充填した補修剤を硬化させた。養生終了後、第 2 荷重の曲げ試験を行い、同様の作業を行った後、第 3 荷重の曲げ試験を行った。これを第 8 荷重まで繰り返し、第 1 荷重試験時の曲げ強度と、第 2～第 10 荷重時の曲げ強度を比較し、各荷重ごとの強度回復率を算出した。強度回復率に用いた算出式を式(1)に示す。

$$C = \frac{B}{A} \times 100[\%] \quad (1)$$

A：第 1 荷重の曲げ強度 B：各第 2～第 8 荷重の曲げ強度
C：強度回復率

4.2 養生温度が補修剤の硬化期間に及ぼす影響

補修剤として使用している 1 液性のエポキシ樹脂は、空気中の水分及びモルタル中の水和物と反応し硬化する。しかし、養生時の温度が補修剤の硬化に及ぼす影響及び補修剤の正確な硬化期間は明らかにされていない。そこで、各養生条件ごとに養生温度及び養生期間を設定し強度回復率を比較することで、補修剤の硬化条件に関して明らかにする。

まず、JIS R 5201 に従い、変位制御式荷重装置を用いて作製したモルタル供試体 3 体の第 1 荷重の曲げ試験を行い、最大荷重に達してから破壊されるまでの荷重を機械的に制御することで、幅 0.05mm～0.20mm のひび割れを発生させた。第 1 荷重試験後、シリンダーを用いてネットワークに補修剤を注入し、ゴムを取り付け一定の圧力を加え、ひび割れに補修剤を自動的に充填させた。次に、乾燥養生を行い、ひび割れに充填した補修剤を硬化させた。なお、養生温度は[20℃,60%(RH)]、[30℃,60%(RH)]、[40℃,60%(RH)]の 3 種類とした。養生期間は 1d, 3d, 5d, 7d の 4 種類とし、各養生温度ごとに 3 体ずつ試験を行った。養生終了後、第 2 荷重の曲げ試験を行い、第 1、第 2 荷重時の曲げ強度を比較し、式(1)の計算式を用いて、強度回復率を算出し、養生条件ごとに比較を行った。

4.3 補修剤の粘性及びひび割れ幅の違いがひび割れへの充填に及ぼす影響

既往の研究結果³⁾より、低粘性及び中粘性の補修剤(L, M)を用いることで、ひび割れ幅 0.05mm～0.20mm のひび割れを修復することができた。しかし、より大きなひび割れに対し、同様に修復を行うことができるのか、補修剤(L, M)はどの程度のひび割れまで修復することが可能なかが課題となった。そこで、鉄筋を配筋したコンクリート供試体を作製し、曲げ試験を行うことで、大きなひび割れを発生させ、粘性の異なる補修剤を用いて修復を行うことで、補修剤の粘性及びひび割れ幅の関係について明らかにする。4.1 及び 4.2 では、修復前後の強度を測定することで強度回復率を算出し、修復の目安としていたが、本研究では鉄筋が配筋されているため、強度回復率の測定ができない。そこで、ネットワークに色水(青)を注入する漏水試験を行うことでひび割れの修復を確認する。

供試体の設置状況を Fig.6、色水を用いた修復前後のひび割れの確認を Photo 3 に示す。まず、JIS R 5201 に従いアムスラー型万能試験機を用いて、2 点集中荷重による曲げ試験を行い、コンクリート供試体にひび割れを発生させた。次に、ネットワークに色水を注入し、圧力を加えることで、供試体に発生したひび割れを目視で確認した。ひび割れの確認後、シリンダーを用いて、ネットワーク内に補修剤を注入し、圧力を加えることでひび割れ

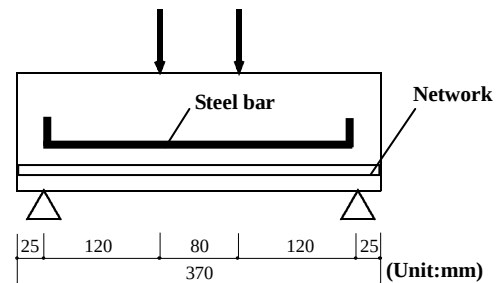


Fig.6 Loading conditions for flexural strength test

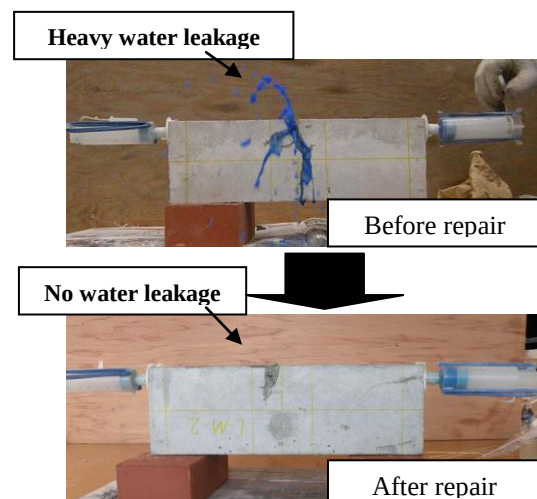


Photo 3 Test for water leakage before repair and after repair

に補修剤を充填させた。補修剤は粘性の異なる M 及び L の 2 種類を使用し、2 本のネットワーク内に、補修剤 L のみを注入したものを L-L、補修剤 M のみを注入したものを M-M、補修剤 L を注入した後に M の補修剤を注入したものを L-M、補修剤 M を注入した後に補修剤 L を注入したものを M-L とし、各 3 体ずつ試験を行った。その後、促進養生を行い、ひび割れに充填された補修剤を硬化させることで、ひび割れの修復を行った。第 2 養生後、ひび割れの確認時と同様に、着色した色をネットワーク内に注入し、圧力を加えることで、ひび割れの修復を漏水の有無により確認した。なお、促進養生の養生条件は 5d 乾燥[20℃,60%(RH)]+4h 蒸気(50℃)+20h 乾燥機(50℃)+1d 乾燥[20℃,60%(RH)]養生として行った。

5. 試験結果及び考察

5.1 繰り返し修復を行った際の強度回復率の変化

Table 2 及び Fig.7 にひび割れの発生と修復を 8 回繰り返した際の試験結果を、Photo 4 に供試体の破壊状況を示す。Fig.7 より、ひび割れの修復を 8 回繰り返し行っても高い強度回復率を示していることから、当自己修復システムは修復回数に関係なく、優れた自己修復機能を発現させることが可能であるといえる。また、各載荷ごとに曲げ強度及び強度回復率が上昇していき、第 8 載荷時には、元の強度の 2 倍近い曲げ強度を示していることが確認できる。強度上昇の要因として、Photo 5 に示すように、供試体の中央付近に発生したひび割れを繰り返し修復しているため、供試体の中央部が補修剤に用いているエポキシ樹脂の硬化により補強されたこと、低粘性の補修剤が、繰り返し修復を行う事で供試体に浸透していき、モルタル供試体の空隙を埋めたことなどが考えられる。

5.2 養生温度が補修剤の硬化期間に及ぼす影響

Table 3 及び Fig.8 に、各養生条件ごとの試験結果を示

Table 3 Details of conditions for flexural strength test

Type of Specimen	Curing Condition	1st Loading	2nd Loading	Healing Rate of Strength (%)
		Flexural Strength (N/mm ²)	Flexural Strength (N/mm ²)	
1d-20		6.62	2.95	44.6
3d-20	Normal	5.78	7.02	121.4
5d-20	(20℃)	6.91	8.51	123.0
7d-20		6.95	6.57	94.5
1d-30		5.61	7.98	142.2
3d-30	Normal	5.15	6.06	117.7
5d-30	(30℃)	6.66	6.83	102.5
7d-30		7.44	7.12	95.7
1d-40		6.24	7.17	115.0
3d-40	Normal	7.07	7.21	102.0
5d-40	(40℃)	7.12	8.18	114.9
7d-40		6.41	6.51	101.6

Table 2 Details of repeated flexural test

Loading cycle	Max load (kN)	Flexural strength (N/mm ²)	Regain of strength (%)
1st Loading	2.07	5.07	100.0
2nd Loading	2.62	6.15	121.3
3rd Loading	2.94	6.88	135.7
4th Loading	3.04	7.12	140.4
5th Loading	3.37	7.90	155.8
6th Loading	3.47	8.13	160.4
7th Loading	3.58	8.45	166.7
8th Loading	3.95	9.25	182.4

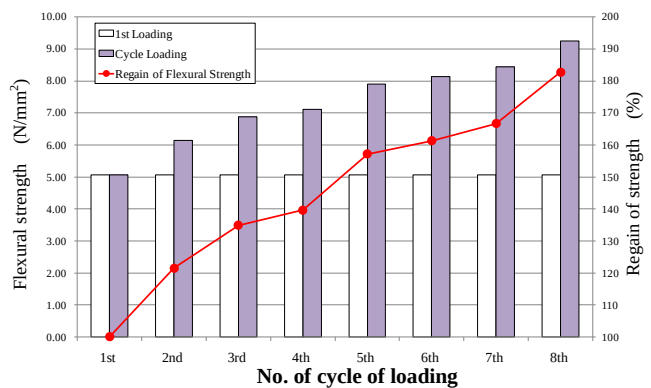


Fig.7 Details of conditions for flexural strength

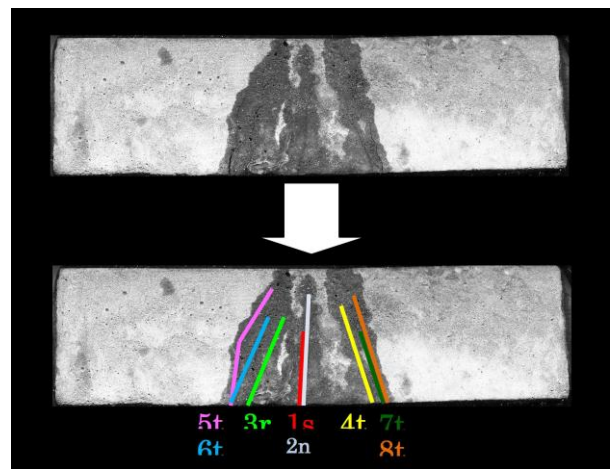


Photo 4 Specimen of after repeated 8 times flexural test

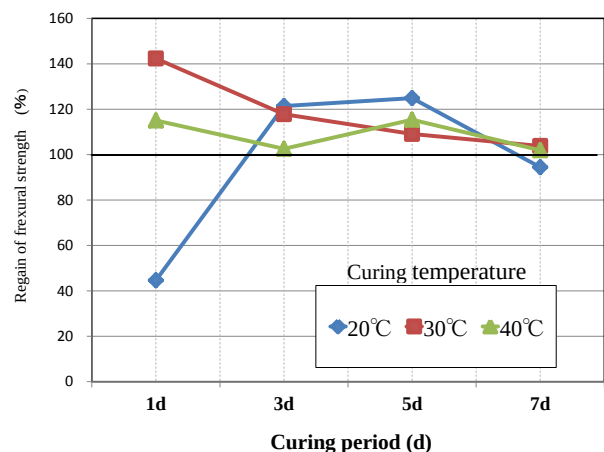


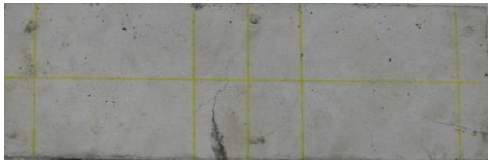
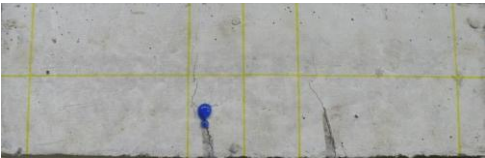
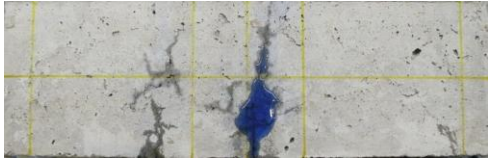
Fig.8 Effect of curing temperature on flexural strength

す。養生温度 20℃の供試体に関しては、1d の養生期間では、強度回復率は 50%以下であり、補修剤は十分に硬化していないことが確認できる。しかし、3d 以降は強度回復率は 100%以上を示しており、養生温度 20℃で補修剤を硬化させるには、3d の養生期間が必要であるといえる。養生温度 30℃、40℃の供試体に関しては、1d の養生期間で 100%以上の強度回復率を示しており、補修剤が十分に硬化していることが確認できる。このことより、養生温度が 30℃以上の場合、補修剤を硬化させるのには 1d の養生期間で十分であるといえる。養生温度により、補修剤の硬化期間に差が生じている要因として、温度が

高くなるほど、エポキシ樹脂と空気中の水分の反応が促進されるためだと考えられる。

5.3 補修剤の粘性とひび割れ幅の違いがひび割れへの充填に及ぼす影響

曲げ試験により供試体に発生したひび割れ及び色水によるひび割れの修復の確認の結果を Fig.9 及び Table 4 に示す。曲げ試験の結果、供試体に 0.17mm～0.64mm のひび割れを発生させることができた。これらのひび割れに対し、色水の注入による確認を行った結果、供試体の底面に関しては、ひび割れ幅、ひび割れの本数及び補

Evaluation of self-repair of concrete			
●	: Completely Repaired	●	
▲	: Partially Repaired		
×	: Not Repaired		
▲		×	

Specimen Identification	M-M-1			M-L-1		
Surface	Right Side	Left Side	Bottom	Right Side	Left Side	Bottom
Crack Width (mm)	a=0.54 b=0.22			a=0.49 b=0.22		
Test by Water Leakage	a: ▲ b: ●	a: ▲ b: ●	a: ● b: ●	a: × b: ●	a: ● b: ●	a: ● b: ●

Specimen Identification	M-M-2			M-L-2		
Surface	Right Side	Left Side	Bottom	Right Side	Left Side	Bottom
Crack Width (mm)	a=0.52 b=0.23			a=0.38		
Test by Water Leakage	a: ▲ b: ●	a: ▲ b: ●	a: ● b: ●	a: ●	a: ●	a: ●

Specimen Identification	M-M-3			M-L-3		
Surface	Right Side	Left Side	Bottom	Right Side	Left Side	Bottom
Crack Width (mm)	a=0.64 b=0.17			a=0.36 b=0.35		
Test by Water Leakage	a: ▲ b: ●	a: ▲ b: ●	a: ● b: ●	a: ● b: ●	a: ● b: ●	a: ● b: ●

Specimen Identification	L-L-1			L-M-1		
Surface	Right Side	Left Side	Bottom	Right Side	Left Side	Bottom
Crack Width (mm)	a=0.24 b=0.60			a=0.28 b=0.16		
Test by Water Leakage	a: ● b: ×	a: ● b: ×	a: ● b: ●	a: ● b: ●	a: ● b: ●	a: ● b: ●

Specimen Identification	L-L-2			L-M-2		
Surface	Right Side	Left Side	Bottom	Right Side	Left Side	Bottom
Crack Width (mm)	a=0.46 b=0.18			a=0.36		
Test by Water Leakage	a: × b: ●	a: × b: ●	a: ● b: ●	a: ●	a: ●	a: ●

Specimen Identification	L-L-3			L-M-3		
Surface	Right Side	Left Side	Bottom	Right Side	Left Side	Bottom
Crack Width (mm)	a=0.56			a=0.16 b=0.51		
Test by Water Leakage	a: ×	a: ×	a: ●	a: ● b: ▲	a: ● b: ●	a: ● b: ●

Fig.9 Details of self-repair of crack in concrete by self-repair system using various combination of epoxy resin for injection

修剤の粘性に関わらず、全ての供試体においてひび割れからの漏水が見られなかった。このことより、供試体の底面に発生したひび割れは完全に修復されているといえる。しかし、側面に関しては、L-Mを除くほぼ全ての供試体で若干の漏水が見られた。特に補修剤 L に関しては、補修剤が全てのひび割れに充填されているように見えるが、色水によるひび割れ修復の確認を行うと、補修剤 M より漏水の量が多い結果となった。ひび割れ幅ごとに見ていくと、補修剤 M は 0.20mm 以下の細かなひび割れを完全に修復することはできないが、0.50mm までのひび割れを完全に修復することができ、0.70mm の大きなひび割れに対しても、ある程度修復することが可能であるといえる。補修剤 L は、0.10mm 以下の細かなひび割れから、0.40mm までのひび割れを完全に修復することができるが、0.40mm 以上の側面のひび割れに対しては完全に修復を行うことができないという結果になった。Table 1 より、M の粘性は 1900mPa・s に対し L は 150mPa・s と L の粘性が低いため、ひび割れ幅の大きなものに対しては、ひび割れに浸透することができたが、

充填されずに補修剤が流れ出てしまったことが要因と考えられる。

5. まとめ

- 1) 当自己修復システムは、修復回数に関係なく自己修復機能を発現させることができる。また、繰り返し修復を行う事で供試体の強度は徐々に増加していく。
- 2) ひび割れに充填された補修剤は、20℃で 3d、30℃及び 40℃では 1d の養生期間で完全に硬化する。
- 3) 中粘性の補修剤 M は、0.20mm～0.50mm までのひび割れを完全に修復することが可能であり、0.70mm までのひび割れに関しても、ある程度の修復が期待できる。低粘性の補修剤 L は、0.05mm～0.40mm までのひび割れを完全に修復することができるが、それ以上のひび割れに関しては修復が難しいという結果になった。

本実験より、当自己修復システムの自己修復性能に関して以上の事が明らかになった。今後の課題として、実際の RC 梁を用いた試験を行う必要があると考えられる。

Table 4 Test by water leakage for different crack widths

Crack width (mm)	Epoxy L	Epoxy M
0.05～0.10	●	×
0.10～0.20	●	▲
0.20～0.30	●	●
0.30～0.40	●	●
0.40～0.50	×	●
0.50～0.60	×	▲
0.60～0.70	×	▲

● Completely repaired ▲ Partial repaired × Not repaired

参考文献

- 1) 三橋博三：スマートコンクリート—高知能コンクリート—,コンクリート工学,Vol.39,No.1,PP.110-113,2001.
- 2) セメント系材料の自己修復性の評価とその利用方研究専門委員会, 社会法人日本コンクリート工学協会
- 3) 熊田廣樹・Sanjay PAREEK：ネットワークを用いた曲げ強度の自己修復機能を有するモルタルに関する基礎的研究, コンクリート工学論文集 第32巻 第1号, PP.1871-1876, 2010