

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の非破壊試験によるコンクリートひび割れの自己修復性の評価

大平 旭洋*1・三浦 裕騎*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)モルタル供試体を用いた非破壊試験によるひび割れ修復の確認, 2)1m 鉄筋コンクリート梁供試体の 6 回繰り返し載荷及び修復について評価を行った。その結果, 非破壊試験の測定結果から補修剤の充填性及び強度回復率に相関性があること, 1m コンクリート梁供試体においてもひび割れの繰り返し修復が行えることを確認した。

キーワード: 自己修復, ひび割れ, ネットワーク, 補修剤, 伝搬時間, 強度回復

1. はじめに

従来のスクラップアンドビルドを行うことで, 取り壊しの際にコンクリート塊または, 工事を行うことで CO₂ が排出され環境に悪影響を及ぼすことから, 環境問題への意識が高まっている。これにより, 環境に配慮が必要な時代となり, コンクリート構造物の高耐久性化への社会的要請は大きく, さらなる長寿命化が望まれている。

しかし, コンクリート構造物にひび割れが発生すると, 性能低下や早期劣化の原因となり, 耐久性を低下させ, 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とされるが, 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などは, 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⁾。そこで, ひび割れの自己修復機能をコンクリート構造物に付与することで, 耐久性向上の可能性について追求する。

近年, 自動的な補修作業を行うデバイス類をコンクリート内に埋設し, ひび割れを自己修復させる研究が行われている²⁾。形状記憶合金を供試体の主筋に用いることで, 載荷により大きなひび割れ及び変形が生じて, 除荷後の残留変形がほぼゼロに戻り, ひび割れの閉塞が行われる^{3),4)}。補修剤を内包したマイクロカプセルなどを供試体内に埋設することで, ひび割れの発生に応じて保護材が破損し, 補修剤の放出が行われ, ひび割れの修復が行われる^{5),6)}。他には, 発熱デバイスによる連結ユニットを利用したひび割れの修復方法^{7),8)}など, 様々な手法が提案されている。今後の課題としては, 実物大の RC 構造部材にこれらのシステムを適用した場合, ひび割れの修復が行われるか確認をしていく必要がある。

本研究では, ネットワーク及び補修剤による自動的な補修作業を行うデバイスをコンクリートに付与し, ひび割れの自己修復性について検討を行う。ネットワークとは, 供試体内部に設けた, 空洞で円管状の孔(つきぬけた穴)を示す。Fig.1 に当自己修復システムの詳細を示す。

Fig.1 より, 打込み時に供試体内部に作製したネットワークに補修剤を注入し, 補修剤を内包する。そして, ひび割れ発生時に, 補修剤を内包したネットワークに亀裂が発生する。すると, 中から補修剤が放出し, ひび割れに充填され硬化し, 修復が行われる⁹⁾。このような手法で, 人の手による補修作業を必要とせず, 補修剤がひび割れに自動的に充填し, ひび割れの修復を行う。

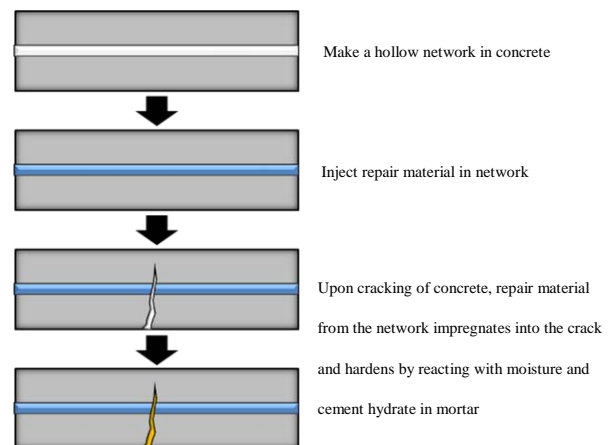


Fig.1 Concrete Self-Repair System

2. 実験目的

筆者らは, 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, ひび割れの修復結果に関して報告を行った^{9),10)}。

*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 / (現) デルフト工科大 客員教授 工博 (正会員)

文献⁹⁾より、モルタル供試体に当自己修復システムを付与することで、0.05mm~0.20mmのひび割れを修復し、曲げ強度が80%以上回復することを報告した。この強度回復率をひび割れ修復の目安としていたが、強度回復率の算出には破壊試験を行う必要がある。そのため、実際のRC梁部材に当自己修復機能を付与した場合、ひび割れの修復状況を確認できない問題が挙げられる。

また、文献¹⁰⁾より、モルタル供試体に繰り返し载荷及び修復を行うことで曲げ強度が上昇し、新たなひび割れが発生することを報告した。しかし、当自己修復システムを付与したコンクリート供試体に繰り返し载荷及び修復を行った場合、モルタル供試体と同様の結果を示すか確かめる必要がある。

本論文では、当自己修復システムを付与したモルタル及び1mコンクリート梁供試体を用いて実験を行い、以下に示す1)及び2)について検討を行う。

- 1) モルタル供試体を用いた非破壊試験によるひび割れ修復の確認
- 2) 1m鉄筋コンクリート梁供試体の6回繰り返し载荷及び修復についての検討

3. 使用材料

上記より、1)の実験ではモルタル供試体を使用し、2)の実験に関しては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**にモルタル供試体及び**Fig.3**にコンクリート供試体の詳細を示す。**Table 1**及び**Fig.4**には補修剤として使用した1液性の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、細骨材に豊浦珪砂を使用した。セメント：砂=1：3(質量比)で混合し、水セメント比を72%として練り混ぜた。そして、練り混ぜたモルタルを40×40×150mmの寸法で形成し、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。

1mコンクリート梁供試体は、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、120×200×1000mmの寸法で形成した。主筋にはφ6mmのSD295、あばら筋にφ4mmのSR295を使用した。主筋から20mm程下がった位置に、ネットワークを2本作製した。

また、ネットワークは、作製する位置にはく離剤を塗布した鉄筋を配置し、モルタル又はコンクリートの硬化後に引き抜くことで作製した。

補修剤は空気中のわずかな水分と反応し硬化する、1液性のエポキシ樹脂を使用した。1)の実験では、粘性の異なる3種類の補修剤(H,M及びL)を、2)の実験では、補修剤(L)のみを使用した。

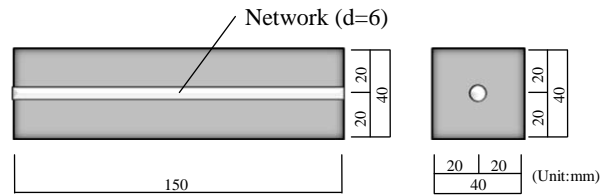


Fig.2 Outline of Mortar Specimen



Photo 1 View of Repair Material Injection System

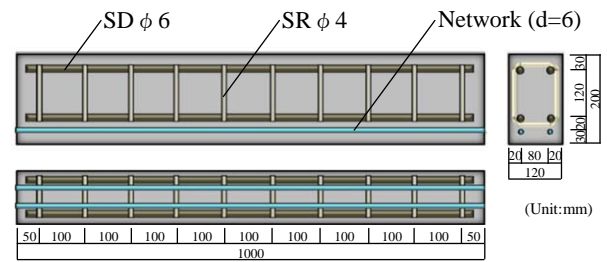


Fig.3 Outline of RC Beam Specimen

Table 1 Properties of Epoxy Resin

Type of Epoxy Resin	Hardening Mechanism	Thixotropic Index	Specific Gravity (g/cm ³ , 23°C)	Viscosity (mPa·23°C)
H	Moisture Sensitive	6.5	1.07	14000
M		2.2	1.07	1900
L		1.0	1.15	150

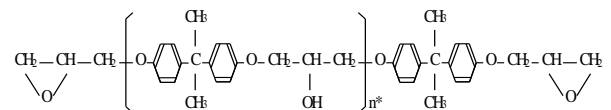


Fig.4 Constitutional Formula of Epoxy Resin

4. 実験概要

4.1 モルタル供試体を用いた非破壊試験によるひび割れ修復の確認

超音波試験機を用いて非破壊試験を行い、伝搬時間の測定結果から、ひび割れの修復確認が行えると考えられる。

そこで本実験では、自己修復機能を付与したモルタル供試体の载荷前・後及び修復後の伝搬時間の測定を行う。その測定結果から伝搬時間の変化率及び回復率を算出する。そして、ひび割れの修復目安としていた強度回復率と算出した値を比較することで、非破壊試験によるひび割れ修復確認方法の有用性を検討する。

Fig.5に载荷時の設置状況、**Fig.6**に非破壊試験の測定箇所を示す。まず、超音波試験機を用いて载荷前のモルタル供試体に、**Fig.6**に示す測定箇所の伝搬時間の測定を行う。測定後、JIS R 5201(セメントの物理試験方法)に従い、自動アムスラー型万能試験機を用いて、モルタル供試体の第1载荷の曲げ試験を行った。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 0.13mm~0.25mm のひび割れを発生させた。第 1 載荷後、ひび割れを発生させた供試体の伝搬時間の測定を行う。

次に、シリンダーを用いてネットワーク内に補修剤 (H,M 及び L) を注入する。注入の際に、ゴムを取り付け一定の圧力を加えることで、ひび割れに補修剤を自動的に充填させた。そして、1 日乾燥養生 [20°C,60%(RH)] を行い、コンプレッサーを用いてネットワーク内の補修剤を排出した。これは、ネットワーク内で補修剤が硬化するのを防ぐためである。排出後、6 日乾燥養生 [20°C,60%(RH)] を行い、ひび割れに充填した補修剤を硬化させた。

乾燥養生後、ひび割れを修復した供試体の伝搬時間の測定を行い、第 2 載荷の曲げ試験を行った。

第 1 載荷の曲げ強度と、第 2 載荷の曲げ強度を比較し、強度回復率を算出した。また、非破壊試験結果の載荷前・後及び修復後の伝搬時間の値から、変化率及び回復率を算出した。強度回復率に用いた算出式を式(1)、変化率の算出式を式(2)及び伝搬時間の回復率を式(3)に示す。

$$S_R = \frac{S_B}{S_A} \times 100 [\%] \quad (1)$$

S_A : 第 1 載荷の曲げ強度 S_B : 第 2 載荷の曲げ強度
 S_R : 強度回復率

$$T_C = \frac{T_b}{T_a} \quad (2)$$

T_a : 載荷前の伝搬時間 T_b : 修復後の伝搬時間
 T_C : 伝搬時間の変化率

$$T_R = \frac{T_b - T_h}{T_b - T_a} \times 100 [\%] \quad (3)$$

T_a : 載荷前の伝搬時間 T_b : 載荷後の伝搬時間
 T_h : 修復後の伝搬時間 T_R : 伝搬時間の回復率

4.2 1m 鉄筋コンクリート梁供試体の 6 回繰り返し載荷及び修復についての検討

文献¹⁰⁾のモルタル供試体のように、繰り返し修復が行われ、新たなひび割れが発生するか確認を行う。また、非破壊試験によるひび割れの修復確認を行う。これにより、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。

1m コンクリート梁供試体の設置状況を Fig.7 及び非破壊試験の測定箇所を Fig.8 に示す。超音波試験機を用いて載荷前の供試体に Fig.8 に示す測定箇所の両側面及び底面について伝搬時間の測定を行う。

次に、シリンダーを用いてネットワーク内に補修剤を注入し、ゴムを取り付け一定の圧力を加えた。圧力を加えた状態のまま、アムスラー型万能試験機に供試体を設置し、第 1 載荷の曲げ試験を行った。載荷を続け、ひび

割れがネットワークまで到達し、一定の圧力で注入されている補修剤が中から放出され、ひび割れに自動的に充填されたことを目視で確認後に載荷を止めた。

1 日乾燥養生 [20°C,60%(RH)] を行い、コンプレッサーを用いてネットワーク内の未硬化の補修剤を排出した。排出後、6 日乾燥養生 [20°C,60%(RH)] を行い、ひび割れに充填した補修剤を硬化させた。

乾燥養生後、修復された箇所にも補修剤が充填されているか確認を行うため、超音波試験機を用いて伝搬時間の測定を行った。また、漏水試験として、シリンダーを用いてネットワーク内に着色した色水を注入し、ゴムを取り付け一定の圧力を加え、ひび割れから色水が漏水するか確認を行った。

修復確認後、同様の作業を行い、第 2 載荷の曲げ試験を行った。これを第 6 載荷まで繰り返し、ひび割れの発生状況及び漏水量を確認した。また、非破壊試験による伝搬時間の変化率を算出し、補修剤の充填状況を確認した。変化率の算出に用いた算出式を式(2)に示す。

5. 試験結果及び考察

5.1 モルタル供試体を用いた非破壊試験による補修剤の充填性の確認について

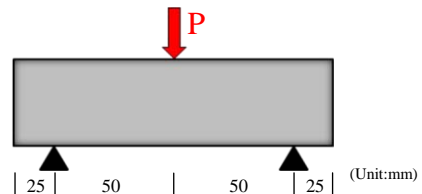


Fig.5 Loading Conditions for Flexural Strength Test of Mortar Specimen

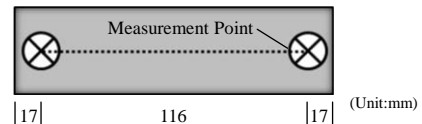


Fig.6 Measurement Points by Ultrasonic Non-Destructive Testing

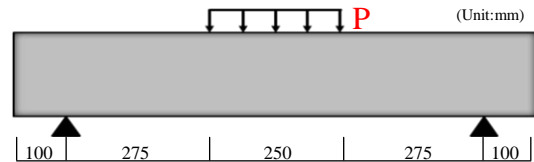


Fig.7 Loading Conditions for Flexural Strength Test of RC Beam

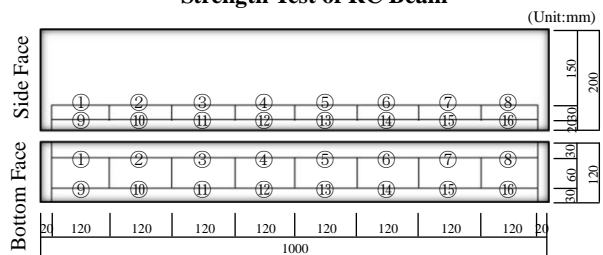


Fig.8 Measurement Points by Ultrasonic Non-Destructive Testing

Table 2 に曲げ試験の結果及び Table 3 に非破壊試験の結果を示す。Fig.9 に伝搬時間の変化率と強度回復率の比較及び Fig.10 に伝搬時間の回復率と強度回復率の比較を示す。なお、変化率は載荷前の値を 1.00 とする。伝搬時間の回復率は、100%を超えるものは、完全に修復されたとして 100%に、0%以下のものは、修復されていないものとして 0%と表示する。

Table 3 より、全ての供試体において、載荷後の超音波の伝搬時間は、載荷前よりも遅くなっていることが確認できる。これは、超音波がひび割れの先端を迂回して伝わることで、伝搬時間が遅くなったと考えられる。

修復後の試験結果より、M-2、M-3、L-1、L-2 及び L-3 の伝搬時間が、載荷前と同等の値を示した。これは、ひび割れに補修剤が十分に充填されたことで、超音波がひび割れの先端を迂回することなく、載荷前の供試体と同様の伝搬が行われたと考えられる。しかし、H-1、H-2、H-3 及び M-1 は、載荷後と修復後の伝搬時間が同等の値となった。これは、ひび割れに補修剤があまり充填されていないことから、修復後と載荷前の伝搬時間が異なる値を示したと考えられる。

Fig.9 及び Fig.10 より、強度回復率が 14%~30%と低い値を示した H-1、H-2、H-3 及び M-1 は、伝搬時間の回復率においても 18%以下を示し、変化率では 1.24 以上を示した。それに対し、強度回復率が 117%~140%と高い値を示した M-2、M-3、L-1、L-2 及び L-3 は、伝搬時間の回復率においても 98%以上を示し、変化率では 1.00 付近を示した。

強度回復率が 100%を超えていた供試体は、ひび割れ修復時の伝搬時間が載荷前と同等の値を示した。そして、伝搬時間の回復率においても 100%に近い値を示し、変化率では 1.00 付近を示した。よって、高い強度回復率を示した供試体は、補修剤がひび割れに十分に充填されていると考えられる。このことから、変化率が 1.00 付近を示すことで伝搬時間の回復率が高い値を示し、強度回復率も高い値を示すと言える。

以上の結果から、載荷前及び修復後の伝搬時間が同等の値を示すことで、強度回復率が高くなることが裏付けられる。また、強度回復率は補修剤の充填状況に左右されると言える。これらのことから、伝搬時間の回復率及び変化率は強度回復率と高い相関性があり、非破壊試験を行うことでひび割れの修復確認が行えると考えられる。

粘性が異なる補修剤(H、M 及び L)による強度回復率のばらつきは、補修剤の粘性とひび割れ幅の関係性が起因していると考えられる。粘性が高い補修剤は大きなひび割れに対して充填が行われる。しかし、小さなひび割れに対しては、高い粘性により隙間に入りやすく充填がされにくい。本実験の曲げ試験によって、発生させたひび割れ幅に適している補修剤は、3 種類の中で粘性の低い L であった。また、文献¹⁰⁾より、補修剤 M でひび割れを修復する場合、0.20mm 以上が適している。そのため、補修剤 M を用いて 0.20mm 以上のひ

び割れを修復した供試体は、高い強度回復率を示した。よって、補修剤 H 及び M を用いた供試体はひび割れに補修剤が充填されなかったことで、低い強度回復率を示したと言える。

5.2 1m 鉄筋コンクリート梁供試体の 6 回繰り返し載荷及び修復結果について

Photo 2 に第 6 載荷後の供試体のひび割れ発生状況、

Table 2 Experimental Results of Flexural Test

Type of Specimen	Repair Material	1st Loading		2nd Loading		Regain of Flexural Strength (%)
		Max Load (kN)	Flexural Strength (N/mm ²)	Max Load (kN)	Flexural Strength (N/mm ²)	
H-1	H	2.51	5.88	0.54	1.27	22
H-2		1.99	4.66	0.34	0.80	17
H-3		2.36	5.53	0.34	0.80	14
M-1	M	2.72	6.37	0.83	1.95	31
M-2		2.19	5.13	2.55	5.98	117
M-3		2.69	6.30	3.07	7.19	114
L-1	L	2.43	5.69	3.39	7.94	140
L-2		2.48	5.81	3.16	7.41	128
L-3		2.56	6.00	3.21	7.52	125

Table 3 Experimental Results of Change of Transit Time

Type of Specimen	Repair Material	Transit Time (μs)			Change of Transit Time (%)	Regain of Transit Time (%)
		Before Loading	After Cracking	After Crack Repair		
H-1	H	30.1	39.8	42.4	1.41	0
H-2		30.7	39.8	38.2	1.24	18
H-3		27.5	37.1	37.2	1.35	0
M-1	M	27.4	35.4	38.5	1.41	0
M-2		31.8	35.2	31.5	0.99	100
M-3		29.0	37.0	29.2	1.01	98
L-1	L	30.0	38.2	29.7	0.99	100
L-2		27.0	37.1	27.2	1.01	98
L-3		27.7	37.2	27.7	1.00	100

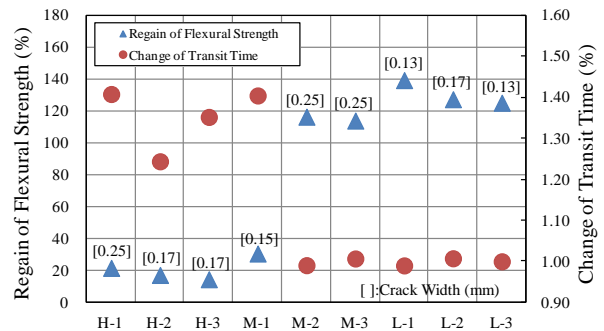


Fig.9 Comparison of Regain of Flexural Strength with Change of Transit Time (%) for H,M and L Epoxy

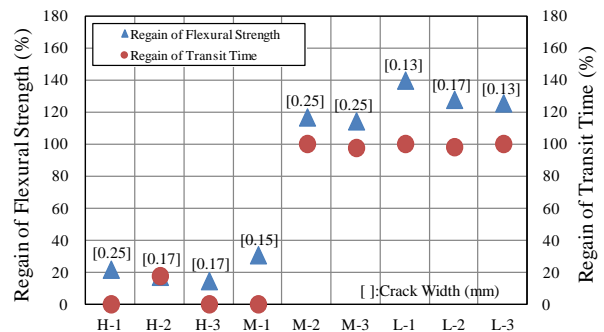


Fig.10 Comparison of Regain of Flexural Strength with Regain of Transit Time for H,M and L Epoxy

Photo 3 に第 6 載荷終了後の供試体及び修復をしていない供試体の漏水試験の様子を示す。Table 3 に第 6 載荷後の伝搬時間の変化率及び Photo 4 に供試体両側面及び底面の非破壊試験による補修剤の充填状況を示す。また、Photo 4 では、伝搬時間の変化率が 1.10 以上は少々充填、1.06~1.09 はある程度充填されている、1.05 以下は十分に充填されていると評価を行った。これは、5.1 モルタル供試体を用いた非破壊試験による補修剤の充填性の確認を参考に、充填状況の評価基準とした。

Photo 2 より、第 6 載荷後にはひび割れが 9 本発生し、載荷及び修復を繰り返すごとにひび割れが増えていることが確認できる。これは、載荷時に発生したひび割れが修復されたことで、強度が回復し、載荷を行う度に新たなひび割れが発生したと考えられる。

Photo 3 より、修復をしていない供試体はひび割れから漏水が確認できる。しかし、第 6 載荷後の供試体に漏水試験を行ったが、漏水が全く見られなかった。これにより、ひび割れが補修剤によって修復及び閉塞が行われたことで、漏水が見られなかったと考えられる。また、内部から漏水がないため、外部からの劣化要因の侵入を防ぐことができるのではないかと推察される。

Table 3 より、供試体の右側面は変化率が全体的に 1.00 以下を示している。左側面も全体的に 1.00 以下を示したが、一部に 1.10 以上を示す部分があった。底面は変化率が 0.85~1.18 を示し、ばらついた結果となった。

底面の変化率がばらついた要因として、ひび割れに充填し硬化した補修剤に、微細なひび割れが発生したことが考えられる。これは、修復部分が繰り返し載荷によって強度が低下し、硬化した補修剤に微細なひび割れが発

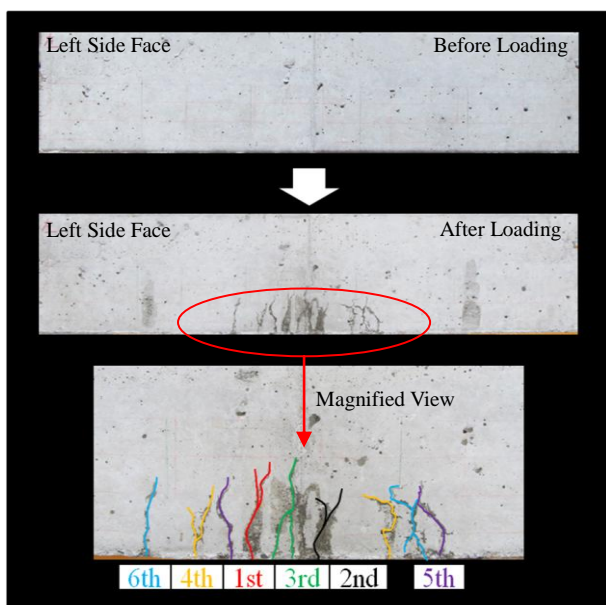
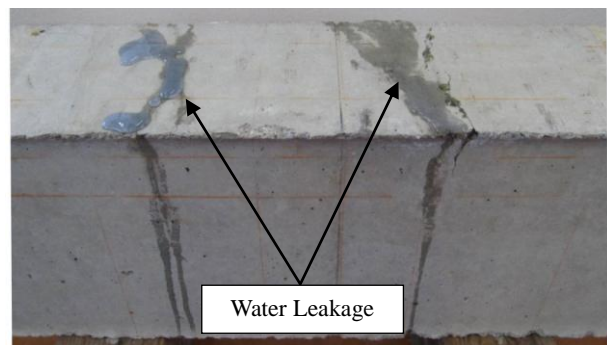


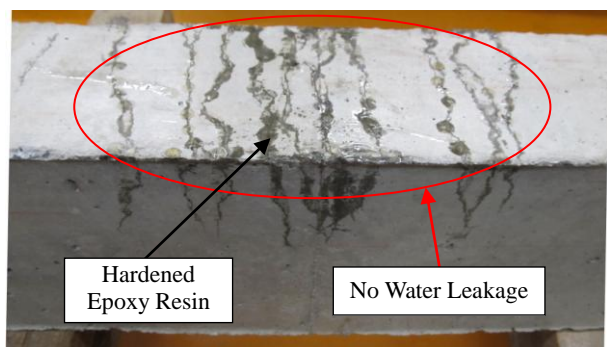
Photo 2 RC Beam Specimen After 6 Times Repeated Flexural Test and Self-Repair

生したことで、伝搬時間が遅くなり、変化率がばらついたと考えられる。

変化率が 1.00 付近を示した要因として、補修剤が十分に充填されたことが挙げられる。これにより、ひび割れを迂回することなく、載荷前と同様に超音波が伝播されたと考えられる。また、補修剤がひび割れ上部まで充填されていることが確認できる。変化率が 1.10 以上の箇所は少々充填されていると評価したが、漏水試験を行っても漏水が見られなかった。これは、ひび割れが閉塞されていると考えられる。しかし、補修剤があまり充填していないことから、強度の回復に関しては期待できないと言える。



Un-Repaired Crack of RC Beam Specimen



Completely Repaired Crack of RC Beam Specimen After 6th Loading

Photo 3 Test for Water Leakage

Table 3 Test Results of Self-Repair of RC Beam by Ultrasonic Non-Destructive Testing

Before Loading		6th After Repair		Change of Transit Time (%)	
Left Side Face		Left Side Face		Left Side Face	
④	⑤	④	⑤	④	⑤
23.2	24.3	22.5	28.3	0.97	1.16
⑫	⑬	⑫	⑬	⑫	⑬
28.5	26.2	22.3	22.9	0.78	0.87
Right Side Face		Right Side Face		Right Side Face	
④	⑤	④	⑤	④	⑤
31.7	30.4	28.9	24.8	0.91	0.82
⑫	⑬	⑫	⑬	⑫	⑬
31.1	28.7	25.0	24.2	0.80	0.84
Bottom Face		Bottom Face		Bottom Face	
④	⑤	④	⑤	④	⑤
27.3	23.7	23.3	25.3	0.85	1.07
⑫	⑬	⑫	⑬	⑫	⑬
25.6	23.4	26.9	27.6	1.05	1.18

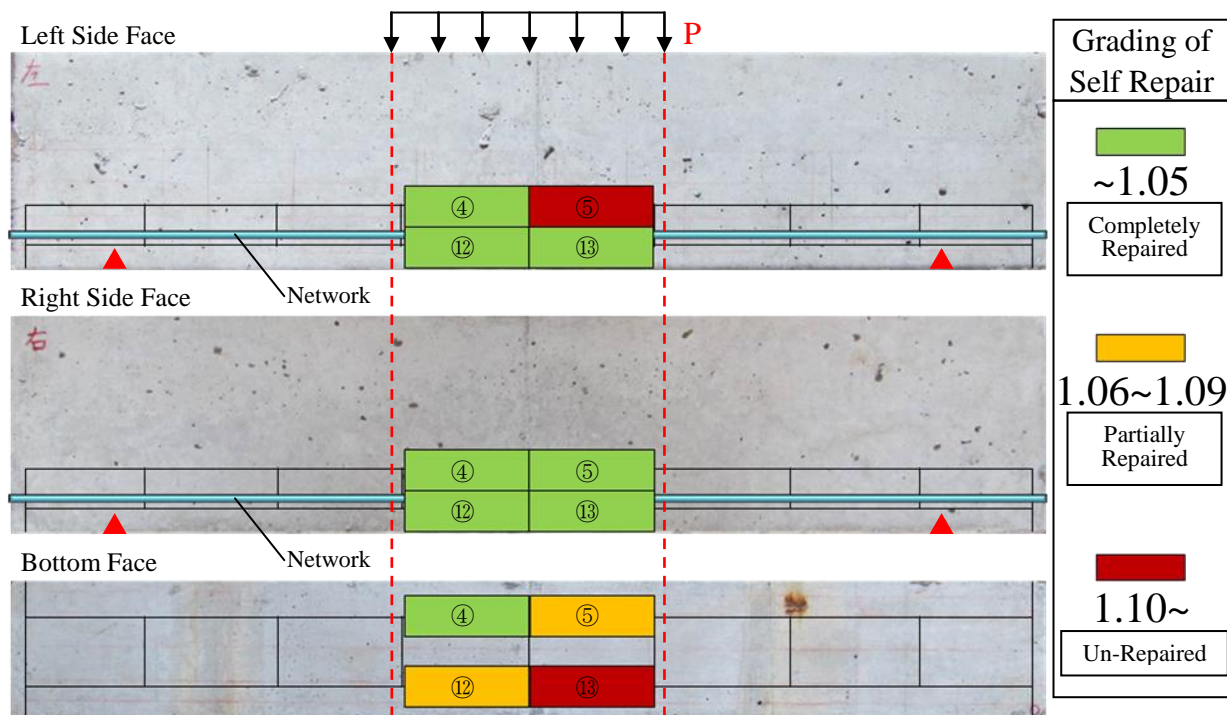


Photo 4 Evaluation of Self-Repair by Zoning from Ultrasonic Non-Destructive Testing(RC Beam)

6. まとめ

1) ひび割れ発生前及び修復後の伝搬時間が同程度になることで、補修剤がひび割れに十分に充填されていると評価できる。また、伝搬時間の変化率が1.00付近の値を示すことで、強度回復率も高い値を示す。これらのことから、非破壊試験によるひび割れの修復確認が行える。

2) 修復により強度回復が行われ、繰り返し载荷によって新たなひび割れが発生した。このことから、1m 鉄筋コンクリート梁供試体においても、当自己修復システムは自己修復機能を発現させることが可能と言える。しかし、補修剤の充填状況にばらつきが見られた。これに対する改善点として、補修剤の注入方法及び注入時の圧力の変更などが挙げられ、今後の検討課題である。

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, 2001.1
- 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, 社団法人日本コンクリート工学協会
- 3) 田尻清太郎, 高橋潤, 塩原等, 小谷俊介：形状記憶合金を主筋したコンクリートはりの正負繰り返し载荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1615-1620, 20026
- 4) Yachuan Kuang, Jinping Ou : Self-repairing performance of concrete beams strengthened using superelastic SMA

wires in combination with adhesives released from hollow fibers, J Cent South Univ Technol, Vol.15, No.3, pp.411-417, 2008.4

- 5) 沼尾達弥, 福沢公夫, 三橋博三：補修剤封入による自己修復機能付加に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.1, pp.97-102, 1999
- 6) Sze Dai, Phuoc Thao, Tran Diep, Ser Tong : Self-healing concrete structural elements, Third International Conference Self-Healing Materials, pp.322-323, 2011.6
- 7) 西脇智哉, 三浦和晃, 三橋博三, 奥原芳樹：自己修復コンクリートの開発を目的とした発熱デバイスに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.2111-2116, 2006.7
- 8) 西脇智哉, 熊田廣樹, 大平旭洋, Sanjay PAREEK : 連結ユニットを用いた自己修復コンクリートの RC 構造物への適用に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1463-1468, 2011.7
- 9) 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, コンクリート工学年次論文, Vol.32, No.1, pp.1871-1876, 2010.7
- 10) 熊田廣樹, 大平旭洋, Sanjay PAREEK : 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1445-1450, 2011.7