論文　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

熊田　廣樹[*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，その基礎的研究として，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，モルタル供試体の曲げ強度の自己修復機能の発現及びネットワーク内の補修剤を長期間貯蔵させる方法に関して検討を行なった。その結果，粘性の低い補修剤を用いることで，曲げ強度の自己修復機能の発現を確認することができた。さらに，ネットワーク内を，表面処理剤を用いて被覆することで，補修剤の貯蔵期間の向上が可能であることを確認できた。

キーワード：モルタル，ひび割れ，ネットワーク，エポキシ樹脂，表面処理剤，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，僅かなひび割れであっても空気中の炭酸ガスや酸性雨，あるいは塩分などが躯体に入り込みやすくなることで，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[3)]。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。

インテリジェントマテリアルとは，「環境変化に知的に応答し，機能を発現する能力を有する新物質・新材料」として，1989 年に日本で提案された新しい概念である。すなわちこの材料は，単に強度や耐久性といった物理的な性能のみならず，材料自らが異変や要求の情報を察知してそれに対応し，必要な行動を実行する機能を合わせ持っているところに特徴がある。このような「インテリジェントマテリアル」の働きを実現するために，外部の環境及び内部の情報を検知する「センサー機能」，その情報に応じて次にどのような行動をとるべきかを判断し命令を下す「プロセッサ機能」，その命令を受けて実際に行動を実行する「アクチュエータ機能」という一連の機能が材料自体に内蔵されている必要がある[4)]。コンクリートのインテリジェント化を行い，今後新たに建造される構造物に適用することで，コンクリートの品質を維持し，ひび割れによる構造物への影響を抑制することが期待できると考えられる。

2. インテリジェント化の手法

コンクリートをインテリジェント化させる研究は各地で行われており，1988 年の大濱嘉彦・出村克宣・渡邊宗幸・三橋博三らの論文[5)]では，硬化剤無添加エポキシ樹脂をモルタルに混入することでエポキシ樹脂を自己カプセル化させ微小ひび割れの自己修復機能を持たせる方法が示されている。これは，硬化剤無添加エポキシ樹脂が，セメントの水和反応によって生じる水酸化カルシウムによって硬化する性質を利用するものであり，モルタル中では，硬化剤無添加エポキシ樹脂の表面は硬化し，その硬化部分が殻の役割を持つため，その内部では未反

*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)

応なエポキシ樹脂を補修剤として保存可能な状態にすることができるというものである。自己カプセル化の長所としては，硬化剤無添加エポキシ樹脂をモルタルに混入するだけなので施工が容易であること，同時に発生する複数個所の反応が可能になることが挙げられる。短所としては，カプセルが独立しているため，補修剤がカプセルに補給できない，補修剤の量はカプセルに内包された量が上限であり，ひび割れの体積を充填するのに十分な量とは必ずしもいえないという点が挙げられる。

2000 年の三橋博三･金子佳生･西脇智哉･大塚浩司らの論文[6]では，コンクリートに強度の自己修復機能を付加するため，コンクリート中に予め補修剤を未反応の状態で内包したガラス管を埋設し，コンクリートの破壊に応じてその補修剤を機能させるシステムを考案している。ガラス管の長所は，コンクリートの内部に外部とのネットワークを構成することで内包補修剤の外部からの補給が可能な点である。短所としては，ガラス管という脆性材料を使用するため施工時の取り扱いが難しい点が挙げられる。

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。施工性と複数回使用することを想定し，ガラス管のような装置を埋没させるのではなく，打節時に直接ネットワークの円管を作製した。**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。これは人体が傷を負うと傷口から血液が流れ出し，瘡蓋を形成することで傷を治すという人体の自己修復機能を参考にしている。ネットワークが血管，補修剤が血液の役割を果たしている。ここで重要となるのが，血液の役割を果たす補修剤の選定である。

本研究では，補修剤として，空気中の水分に反応して硬化する 1 液性のエポキシ樹脂を使用した。1 液性のエポキシ樹脂を使用する利点としては，空気中の水分と反応し硬化するため湿気を遮断してしまえば，樹脂を硬化させずにネットワーク内での保存が可能だと考えられ，ひび割れ発生時は，モルタル中に含まれる水酸化カルシウムなどの水和物と反応してひび割れを補修することができるからである。さらに，硬化後のエポキシ樹脂は湿気を遮断してくれるため，ひび割れが発生しても，ネットワーク内の樹脂が全て硬化することはないと考えられる。また，1 液性のため主剤と硬化剤の 2 液混合を必要とせず，安定したひび割れの補修効果が得られると予想される。しかし，ネットワーク内における補修剤の貯蔵期間は未知数なため，供試体にひび割れが発生する前にネットワーク内の補修剤が全て硬化してしまう可能性が懸念される。補修剤として用いる 1 液性エポキシ樹脂は，モルタル中の水和物と反応し硬化する。そこで，表面処理剤を用いてネットワークの内壁に薄い膜を形成することで，補修剤とモルタル内の水和物が反応するのを遮ることができるのではないかと考えられる。表面処理剤を用いてネットワーク内部を被覆させることで，補修剤の硬化を防ぎ，ネットワーク内の補修剤を長期間貯蔵することが可能になると考えられる。

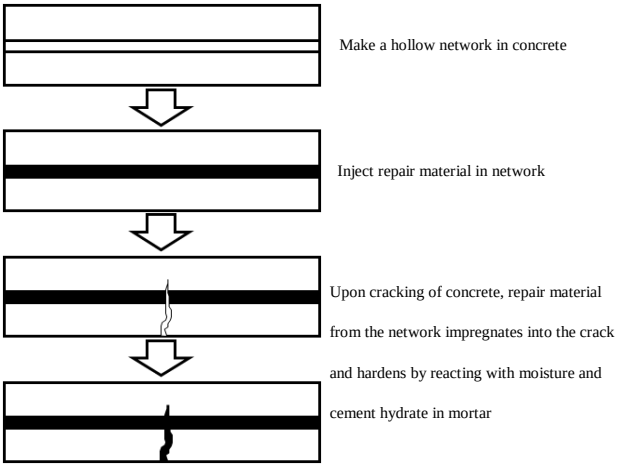

Fig.1 Concrete self-repair system

3. 実験概要

3.1 実験目的

本稿では，前述したネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムを実際にモルタル供試体に設置し，ひび割れを発生させ，自己修復システムによるひび割れの自己修復機能の発現が可能か否かについて検討を行った。なお，ひび割れは曲げ試験により発生させ，自己修復システムを用いたひび割れの補修による曲げ強度の回復を，自己修復として定義した。自己修復システムとして，モルタルにネットワークを作製し，補修剤を注入し，外部からネットワーク内の補修剤に，常に一定の圧力を与えることで，ひび割れ発生時に補修剤を自動的に充填させ，曲げ強度の回復を目指した。

本実験は，ネットワークを用いた曲げ強度の自己修復機能の発現が可能であるかを確認する為，補修剤の貯蔵期間を設けず試験を行ったもの，自己修復システムを長期間使用することを想定し，補修剤の貯蔵期間を設けて試験を行ったものの 2 種類を行った。

(1) 補修剤の貯蔵期間を設けず試験を行ったものは，モルタルの曲げ強度の自己修復機能における，ネットワーク内への補修剤の注入条件（第 1 載荷前・後に注入），養生条件（普通養生・促進養生），及び粘性の異なる 3 種類の補修剤によるモルタルの曲げ強度回復率の影響につ

いて検討を行う。

(2)補修剤の貯蔵期間を設けて試験を行ったものは，補修剤の貯蔵期間を普通コンクリートの養生期間と同等の 28d とし，表面処理を行うことにより，貯蔵期間後も，ネットワーク内の補修剤が硬化することなく強度を回復させることができるか否かについて検討を行う。

3.2 使用材料

Table 1 に使用した 3 種類の 1 液性エポキシ樹脂の性質を示し，**Table 2** に使用した表面処理剤の性質を示す。セメントは普通ポルトランドセメント，細骨材は豊浦硅砂，補修剤は粘性の異なる 3 種類(A，B 及び C)の 1 液性エポキシを使用した。表面処理剤は 3 種類のシラン系表面含浸剤(B1,B2, B3)，2 種類のポリマーディスパージョン(P1, P2)，カチオン系アクリルポリマーセメントモルタル(P3)，補修剤と同等の C の 1 液性エポキシ樹脂(EC)を使用した。

3.3 供試体概要

Fig.2 及び **Photo 1** に供試体形状を示す。供試体は，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 の寸法で作製した。

3.4 試験方法

Fig.3 に補修剤の保存期間を設けていない供試体の実験手順を示す。なお，**Fig.3** 中に，後述するシリーズ(F, I)，使用したエポキシ樹脂(A～C)，及び養生条件(N，S)によって定義した供試体名称(FA-N 等)を併記する。試験方法として，はじめに，作製した供試体の第 1 養生を行い，モルタルを打ち込んでから 3 週間後にネットワーク内を，紙ウェスとアセトンを用いて，左右から各 3 回ずつ清掃を行った。第 1 養生終了後，JIS R 5201(セメントの物理試験方法)に従い，全自動圧縮試験機を用いて第 1 載荷の曲げ試験を行い，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。なお，**Fig.3** に示すように，第 1 載荷の曲げ試験を行った後，ネットワーク内に補修剤を注入し，パテで密閉したものを F シリーズ，補修剤を注入し，パテで密閉した後，第 1 載荷を行ったものを I シリーズとした。第 1 載荷試験後，シリンダーに輪ゴムを取り付け，ネットワーク内に一定の圧力を加え，ひび割れに補修剤を充填させ，第 2 養生を行った。第 2 養生は養生条件の違いによる強度回復率への影響を検討するため，F シリーズ，I シリーズ共に普通養生(N)と促進養生(S)の 2 種類を行い，養生後，第 2 載荷の曲げ試験を行った。第 1 載荷と第 2 載荷の試験結果より曲げ強度を比較し，強度回復率を算出した。

Fig.4 に補修剤の貯蔵期間を 28d 設けた際の実験の手順を示す。まず，ネットワーク内に表面処理剤を注入し，ネットワーク内の表面処理を行った。表面処理の時間は

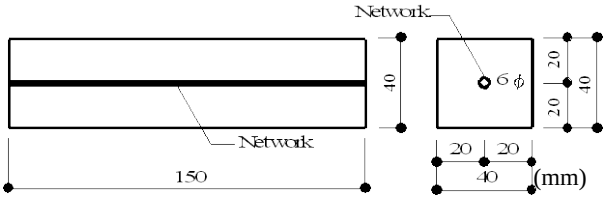

Fig.2 Outline of test specimen

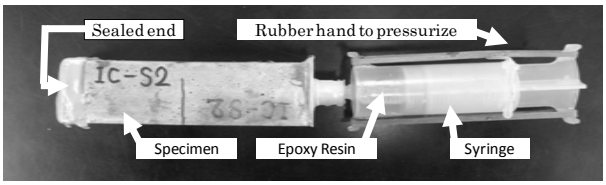

Photo 1 View of crack injection system

Table 1 Properties of epoxy resin

Type of Epoxy Resin	Hardening Mechanism	Thixotropic Index	Specific Gravity	Viscosity (mPa・s,23℃)
A	Moisture Sensitive	6.5	1.07	14000
B		2.2	1.07	1900
C		1.0	1.15±0.05	150±100

Table 2 Properties of network surface treatment materials

Identification	Density (g/cm^3)	Average Penetration Drpth (mm)	Viscosity (mPa・s)
B1	0.880	5～10	0.95
B2	0.882	5～10	1.0～10
B3	0.885	5～10	1.2
P1	1.02	9.0	200
P2	—	7.0～9.0	200
P3	1.06	6.9	200

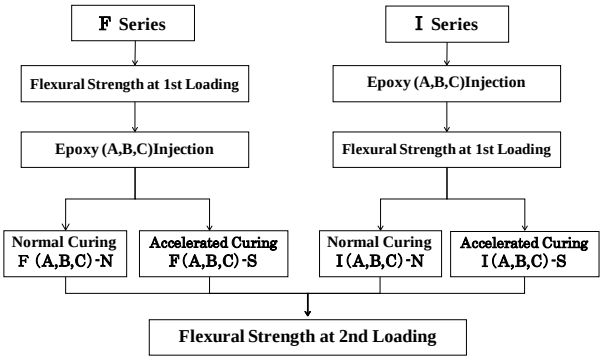

Fig.3 Test program to investigate the basic conditions of repair material and curing conditions

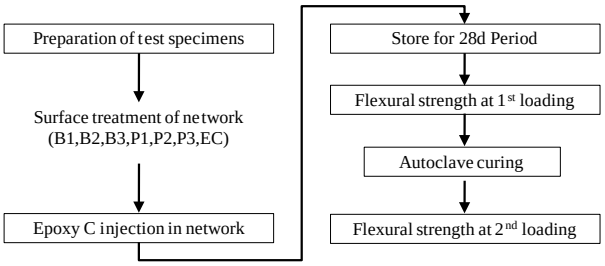

Fig.4 Test program to investigate the storage time of material in network

表面含浸剤(B1,B2,B3)30min，エポキシ樹脂及びポリマーディスパージョン(P1,P2,P3,EC)15min とし，乾燥機(30℃)に 1d 静置した。表面処理後，供試体のネットワークに補修剤 C を注入し，パテを用いて密閉した。シリンダーにゴムを取り付け，常に圧力が加わっている状態にした後，貯蔵期間として 28d 乾燥室[20℃,60%(RH)]に保存した。28d 経過した後，自己修復機能の発現を確認する為，JIS R 5201 に従い，全自動圧縮試験機を用いて，供試体の第 1 載荷の曲げ試験を行い，ひび割れを発生させ，促進養生を行った。養生後，第 2 載荷の曲げ試験を行い，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，各表面処理剤が 28d の保存期間内で，補修剤の硬化にどのような影響を与えるかについて検討を行った。

養生条件及び強度回復率の算出に必要な計算式，数値の説明は以下に示す。第 1 養生は，2d 湿空[20℃,90%(RH)]+5d 水中(20℃)+21d 乾燥[20℃,60%(RH)]養生として行った。第 2 養生は，普通養生：7d 乾燥[20℃,60%(RH)]+7d 湿空[20℃,90%(RH)]+7d 乾燥[20℃,60%(RH)]養生，または促進養生：5d 乾燥[20℃,60%(RH)]+4hAutoclve(50℃)+20h 乾燥機(50℃)＋1d 乾燥[20℃,60%(RH)]養生として行った。

$$C=\frac{B}{A}\times 100[\%]$$

A:Avg.Flexural Strength at 1st Loading
B:Avg.Flexural Strength at 2nd Loading
C:Regain of Flexural Strength

4. 実験概要

Fig.5 及び **Table 3** に，補修剤の貯蔵期間を設けていない供試体の第 1 載荷試験及び第 2 載荷試験の結果と算出した強度回復率を示す。試験結果より，C の樹脂を用いた供試体は，曲げ強度を 80%以上回復させることができたのに対し，A 及び B の樹脂を用いた供試体では，曲げ強度の回復はあまり見られなかった。**Fig.5** に示すように樹脂の粘性が低いものほど，強度回復率の値も大きくなっている。これは，最も粘性の低い C の樹脂はひび割れに十分充填され，優れた自己修復機能を発現させることができたのに対し，A の樹脂はひび割れ幅に対して粘性が高すぎるため，ひび割れに樹脂が充填されず自己修復機能を発現させることができなかったためであると推察される。B の樹脂は多少の強度回復率を示すが，C の樹脂に比べて，ひび割れにしっかりと充填されているとはいえず，充分な自己修復機能を発現できていないと推察される。また，促進養生を行った供試体は，普通養生と比較して，同等または多少上回る強度回復率が見られた。このことより，養生条件の違いによる強度回復率への影響は，大きなものではないといえる。補修剤を注入してから第 1 載荷を行った I シリーズは，第 1 載荷後に補修剤を注入した F シリーズより，多少ではあるが高い

Table 3 Flexural Strength test results and regain of flexural strength of test specimens

Type of Specimen	Curing Condition	Dimensions (cm)	1st Loading Max.Load (kN)	1st Loading Flexural Strength (N/mm²)	2nd Loading Max.Load (kN)	2nd Loading Flexural Strength (N/mm²)	Regain of Strength (%)
FA-N	Normal	4×4×15	2.51	5.88	0.16	0.39	6.6
FB-N	Normal		2.83	6.62	0.38	0.86	13.0
FC-N	Normal		2.54	5.94	2.10	4.91	82.7
FA-S	Autoclave		3.21	7.52	0.29	0.61	8.1
FB-S	Autoclave		2.86	6.71	1.04	2.47	36.8
FC-S	Autoclave		3.21	7.49	3.00	7.04	94.0
IA-N	Normal		2.39	5.65	0.44	1.02	18.1
IB-N	Normal		2.54	5.98	0.74	1.74	29.1
IC-N	Normal		2.40	5.62	2.41	5.65	100.5
IA-S	Autoclave		2.32	5.44	0.11	0.26	4.8
IB-S	Autoclave		2.73	6.41	0.66	1.56	24.3
IC-S	Autoclave		2.75	6.45	3.01	7.06	109.5

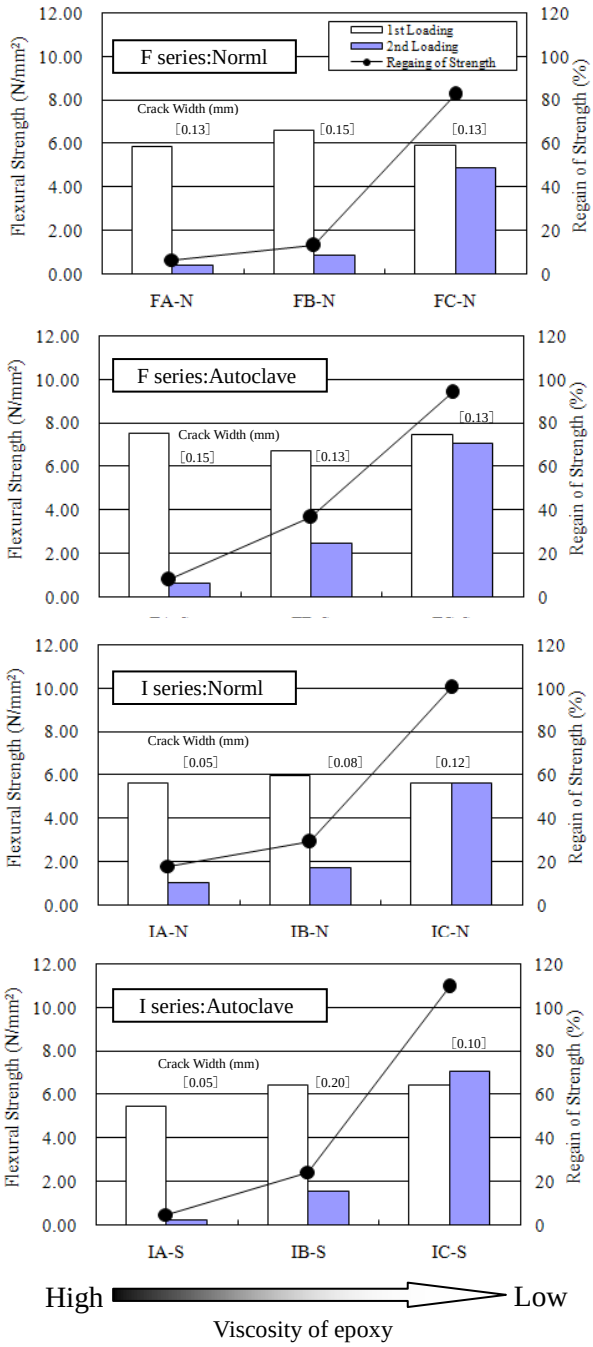

Fig.5 Influence of viscosity and curing condition on regain of flexural strength

強度回復率を示した。

Fig.6 及び **Table 4** に，補修剤の貯蔵期間を 28d とした際の供試体の第 1 載荷試験と第 2 載荷試験の結果と算出した強度回復率を示す。補修剤の貯蔵期間を設けず試験を行ったときには，ほぼ全ての供試体において 80%以上の強度回復率を示した C の樹脂だが，補修剤の貯蔵期間を 28d とすることで，全体的に著しい強度回復率の低下が確認できた。しかし，表面処理剤に B1，B2 及び EC を用いた供試体では 28d の貯蔵期間にも関わらず，高い強度回復率を示している。これは B1 及び B2 の表面含浸剤が，ネットワーク内に水を撥水させる膜を作り，補修剤と水分の接触を妨げることで，ネットワーク内の補修剤が硬化するのを防ぐことができたため，強度を回復させることができたからだと考えられる。表面処理剤に EC を用いた供試体は，B1 及び B2 のように水を撥水させる膜を作りだすことはできないが，エポキシ樹脂が硬化することで，ネットワーク内に形成された膜がガラス管の役割を果たし，補修剤と水分の接触を妨げることで，補修剤の硬化を防ぎ，強度を回復させることができたと考えられる。逆に P1,P2,P3 及び B3 を表面処理剤に用いた供試体は，ネットワーク内の補修剤が完全に硬化した為，曲げ強度をほとんど回復させることができなかった。このことから，P1，P2，P3 及び B3 を表面処理剤に用いて，ネットワーク内の表面処理を行っても，補修剤と水分の接触を妨げることは難しいと考えられる。表面処理剤に B1，B2 及び EC は，高い強度回復率を示しているが，最大で 100%以上の強度回復率を示しているのに対し，最少では 40%程度の強度回復率しか示しておらず，強度回復率に大きなばらつきが生じているのが確認できる。これは表面処理を行う際，ネットワーク内の被覆が十分にされていなかったため，水分との接触を完全に防ぐことができず，強度回復率に大きなばらつきが生じたと考えられる。

Photo 2 に試験後の供試体の断面を示す。断面はネットワークの断面積に対し，硬化した樹脂の割合によって算出した。表面処理を行っていない供試体は FC-N を除き，ネットワーク内の補修剤が完全に硬化していた。表面処理を行った供試体は B1 及び B2 の補修剤がほぼ未硬の状態だったが，EC の補修剤は半分ほど硬化していた。これは，表面処理による膜の形成が不十分で，補修剤と水和物が接触する箇所ができた為だと推察される。

5. まとめ

1） 本実験では，ネットワークに粘性の低い C の樹脂を用いることで，供試体に自己修復機能を発現させることが出来たが，養生期間中において，ほぼ全ての供試体の樹脂が，モルタル中に含まれる水酸化カルシウムなどの水和物と反応することで硬化してしまい，補修剤の貯蔵

Table 4 Flexural Strength test results and regain of strength of test specimens at 28d storage after injection of repair material

Type of Specimen	Curing Condition	Dimensions (cm)	1st Loading Max.Load (kN)	1st Loading Flexural Strength (N/mm²)	2nd Loading Max.Load (kN)	2nd Loading Flexural Strength (N/mm²)	Regain of Strength (%)
P1-a	Autoclave	4×4×15	2.67	6.26	0.27	0.63	10.1
P1-b			2.73	6.40	0.18	0.42	6.6
P1-c			2.85	6.68	0.04	0.09	1.3
P2-a			2.90	6.80	0.09	0.21	3.1
P2-b			2.81	6.59	0.43	1.01	15.3
P2-c			2.72	6.37	0.89	0.89	14.0
P3-a			2.67	6.26	0.39	0.91	14.5
P3-b			2.51	5.86	0.30	0.70	11.9
P3-c			3.16	7.41	0.41	0.96	13.0
B1-a			2.69	6.30	1.78	4.17	66.2
B1-b			2.83	6.63	3.28	7.69	116.0
B1-c			2.41	5.65	1.74	4.08	72.2
B2-a			2.83	6.63	1.18	2.77	41.8
B2-b			2.36	5.53	2.32	5.44	98.4
B2-c			2.86	6.70	1.74	5.62	83.9
B3-a			2.68	6.28	0.08	0.19	3.0
B3-b			3.32	7.78	0.24	0.56	7.2
B3-c			2.83	6.63	0.03	0.07	1.1
EC-a			3.15	7.38	1.97	4.62	62.6
EC-b			2.69	6.30	2.99	7.01	111.3
EC-c			3.19	7.48	1.48	3.42	45.7

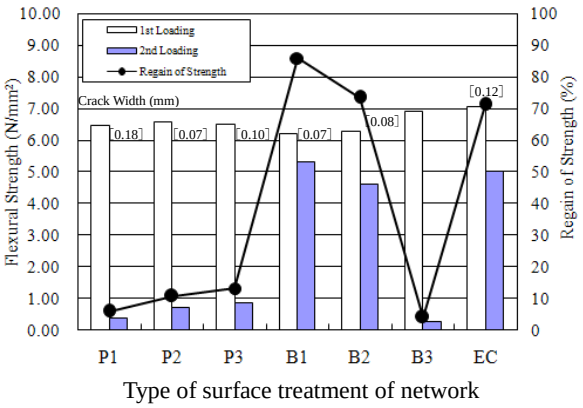

Fig.6 Influence of surface treatment of network on regain of strength after 28d storage

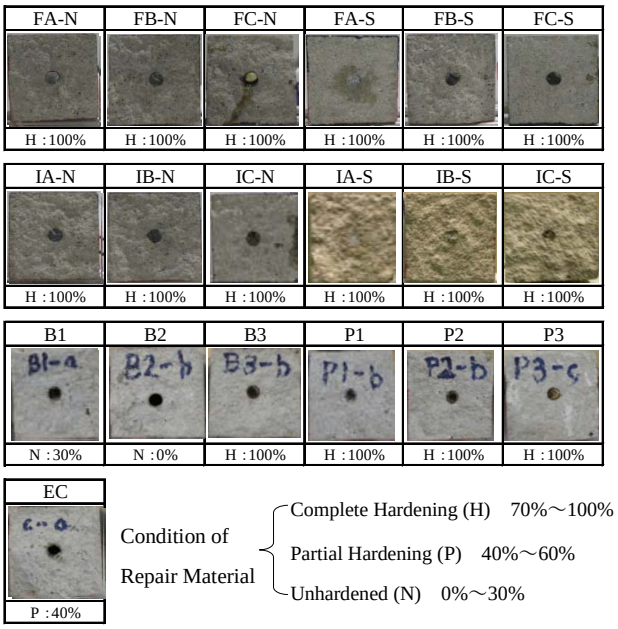

Photo 2 Cross section of specimens and condition of repair material in netowork

方法に関して課題が残った。今後，ネットワーク内における補修剤の貯蔵性を明らかにし，補修剤を長期貯蔵させる方法を考案する必要がある。

2） B1，B2 及び EC の表面処理剤を用いて，ネットワーク内の表面処理を行うことで，28d の貯蔵期間においても，最大で 100%に近い強度回復率を示すことができた。このことから，表面処理を行い，ネットワークを被覆させることで，補修剤の硬化を防ぐことが可能であるといえる。しかし，強度回復率に大きなばらつきが生じてしまい，また，表面処理を行っていても，補修剤が若干硬化してしまうなど，ネットワーク内の表面処理を行う方法をさらに改善していく必要がある。

謝辞

本実験の実施にあたり，コニシ株式会社の松浦信輝所長，安田忠志氏，堀井久一氏，マルイ株式会社の長見直樹氏には多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

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）杉田捻：インテリジェント・コンクリート, コンクリート工学，Vol.32,No.7,PP.146-149,1994.

3）工業調査会：ここまできた自己修復材料―信頼性と経験性を高めるキーマテリアル,PP159-180,2003

4）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

5）大濱嘉彦･出村克宣･渡邊宗幸･三橋博三：自己修復機能を有する硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの開発，日本建築学会東北支部研究報告集(61),PP.351-354，1986.6

6）三橋博三･金子佳生･西脇智哉･大塚浩司：強度の自己修復機能を有するインテリジェントコンクリートの開発に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，第 11 巻，第 2 号，PP.21-27，2000.5