

論文 自己修復システムによる超弾性合金を用いた RC 梁部材の開発

上野 拓*1・尾形 雅人*2・荒木 慶一*3・Sanjay PAREEK*4

要旨: 既往の研究において、超弾性合金（以下、SEA）を引張側主筋に代替することで、RC 梁部材の形状回復及びひび割れ閉塞を確認した。本研究では、発生したひび割れを検知し、自動的に修復を行う自己修復コンクリート用システム（以下、ASRS）を開発し、引張側主筋に SEA を用いた RC 梁部材の曲げ試験を行った。その結果、SEA の特性により、除荷後の変形回復率が高くなり、ひび割れの自己修復が容易に行う事が出来た。又、ASRS を用いる事で常時ひび割れをセンサー監視する事により、ひび割れの検出から補修剤の注入までの過程を完全自動化で素早く行う事が可能となった。

キーワード: 自己修復システム (ASRS), ひび割れ, ネットワーク, 超弾性合金, 超音波試験

1. はじめに

近年、スクラップアンドビルドを背景に、解体工事における産業廃棄物や CO₂ の排出による環境への悪影響が問題視されており、持続可能な社会の構築が求められている。また、近年では RC 構造物の性能低下に応じて補修を施す維持管理体制が確立されつつあるが、既存の RC 構造物への点検や補修作業には人的・時間的・経済的なコストが発生し、大規模な構造物においては莫大なコストが必要とされる。以上の背景から、現在、コンクリート構造物にひび割れの自己修復機能を付与した自己修復コンクリートが注目されている¹⁾。

Fig.1 に本研究で対象とする自己修復システムの概要を、Fig.2 に SEA の性質を示す。本研究では、RC 梁部材の引張側主筋の下部に中空路（以下、ネットワーク）を設け、曲げ破壊によってひび割れが発生した場合に、自動的に補修剤がネットワークに注入され、ひび割れに充填されることで、ひび割れの閉塞とともに曲げ強度が回復される自己修復システムの開発を行ってきた²⁾。しかし、過大な変形によって発生したひび割れにおいては、補修剤の充填が不十分となり、自己修復機能の低下が確認された^{3)・4)}。そこで、RC 梁部材の引張側主筋に形状記憶機能を有する SEA を用いることにより、除荷後の変形が回復し、残留ひび割れの閉塞による自己修復機能の向上を確認した⁵⁾。SEA を用いた自己修復システムの実構造物への適用に際し、耐久性維持のため、迅速にひび割れの修復を行う必要がある。そのためには、ひび割れの発生に伴い、自動的に補修剤をネットワークに注入するシステムの構築が重要である。そこで本研究では、ひび割れ発生に対するセンサー機能、そしてひび割れ幅から判断し命令を下すプロセッサ機能とその命令を受けひび割れに補修剤を注入するアクチュエータ機能を備えた

全自動自己修復コンクリート用システム（以下、ASRS）を提案する。また、実用化に際し、コスト的な問題から SEA の選択的な配置及び配置箇所における曲げひび割れの誘発が必要となる。そのため、曲げひび割れの発生箇所を供試体中央とし、中央部 100mm 間は、あばら筋を配筋しないことで、選択箇所における曲げひび割れの誘発を試みる。また、引張側主筋に SEA を用いた RC 梁部材に曲げひび割れを発生させ、ASRS によるひび割れの全自動修復の有用性について検討を行う。

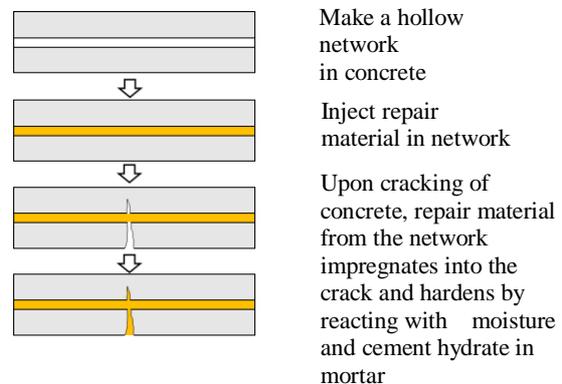


Fig.1 Concrete Self-Repair Network System

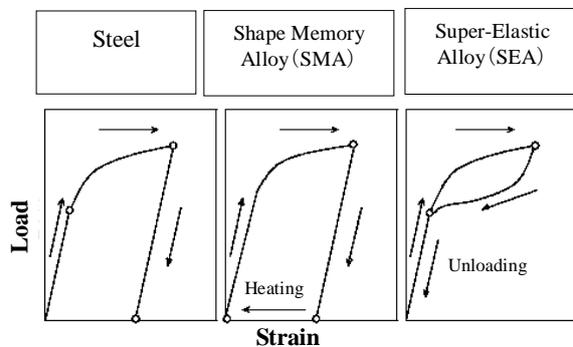


Fig.2 Load vs. Strain Curves of Steel, SMA and SEA

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*3 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 日本大学 工学部建築学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

2. 試験体概要及び使用材料

Fig.3 に試験体形状及び配筋を, Table 1 に補修材の性質を示す。曲げひび割れを誘発するため, 試験体中央部 100mm 間はあばら筋を無くした。試験体として, 引張側主筋に用いた SEA を用いた SEA 試験体と, その引張側主筋全体においてグリースを塗布することでコンクリートとの付着性を取り除きコンクリートからはみ出す部分をボルトで固定した SEA-N 試験体, 圧縮側と引張側の主筋として SEA を用いた SEB 試験体, 比較用として従来鉄筋を主筋として用いた SD 試験体の計 3 種類を作製した。ネットワークは引張側主筋の下部に設け, ひび割れ補修剤には, 1 液性エポキシ樹脂を用いた。

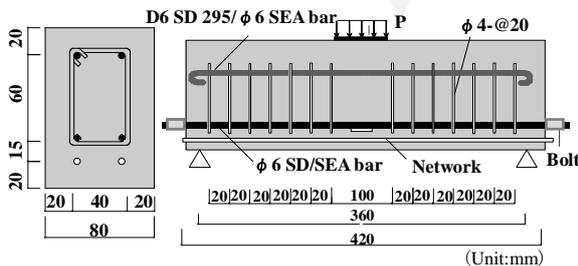


Fig.3 Details of RC Beam Specimen

Table 1 Characteristics 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 |

3. 実験概要

既往の実験では, 超弾性合金の形状記憶効果による RC 梁部材のひび割れ閉塞及び形状回復が確認された⁵⁾。本研究では, 実用化に向けて SEA の設置箇所におけるひび割れの誘発が必要になることから, 供試体中央から両端に 50mm の間のあばら筋を無くして曲げひび割れを誘発させる。また, SEA を用いた各種供試体において誘発させた曲げひび割れの閉塞及び変形回復効果を明らかにする。さらに, ひび割れの検出から補修までを自動的に行うことが可能である ASRS の有用性を検討する。

4. 実験方法

Fig.4 に実験のフローチャートを, Fig.5 に RC 梁用完全自動化による自己修復システム(ASRS)を示す。

曲げ試験の各载荷の層間変形角は試験体中央の変位計の値より算出した。第 1 载荷は, 層間変形角 $\theta = 1/150\text{rad}$ 载荷後除荷しひび割れの自己修復を行った後, 第 2 载荷を $\theta = 1/75\text{rad}$, 第 3 载荷を $\theta = 1/40\text{rad}$ まで実施した⁶⁾。ASRS による自己修復に関して, 曲げ試験時に, センサーユニットの π 型ゲージの値よりひび割れ幅を算出し, ひび割れ幅の一定以上の増加に伴い, ポンプより補修剤がネットワークに送られ, ひび割れが補修剤により充填

される過程を自動修復のプロセスとした。Fig.6 にひび割れ幅に対する ASRS による補修剤の注入条件を示す。まず, 第 1 载荷においては, ひび割れ幅 0.5~1.0mm, 第 2 载荷は 1.2~1.7mm, 第 3 载荷は 2.5~3.0mm の範囲において, 自動的に注入を行った。曲げ試験終了後, 補修剤を排出し, 1d 乾燥[60°C, 80% (RH)] 養生及び 1d-40°C の乾燥機内で養生を行い, 補修剤を硬化させた。また, 曲げ試験において, 各载荷における最大ひび割れ幅及び残留ひび割れ幅を測定し, 残留ひび割れ幅を最大ひび割れ幅で除することによりひび割れ幅がどの程度閉塞したかが分かるひび割れの閉塞率を算出した。さらに, 試験体中央における変位を測定し, 各载荷試験終了時の層間変形角を各载荷の最大層間変形角で除することにより層間変形角の変形回復率を算出した。また, ひび割れの検出及び補修材の充填状況の確認のため, 载荷前及び修復後に超音波試験を行う。超音波試験の結果から超音波伝播時間を測定し, 伝播時間の変化率を算出する。

Fig.7 に超音波試験における測定箇所及び修復後における伝播時間の変化率を丸及び式(1)に示す。なお, 各面の測定順番を丸数字で示す。

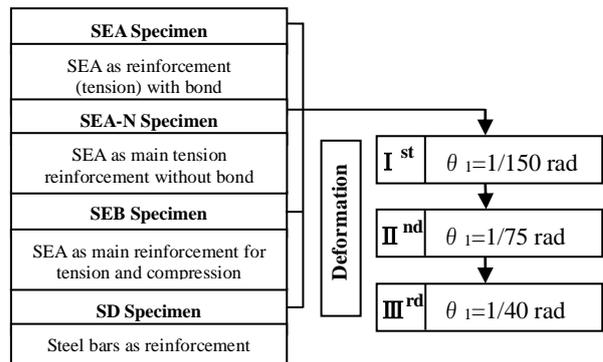


Fig.4 Flowchart of Experiment

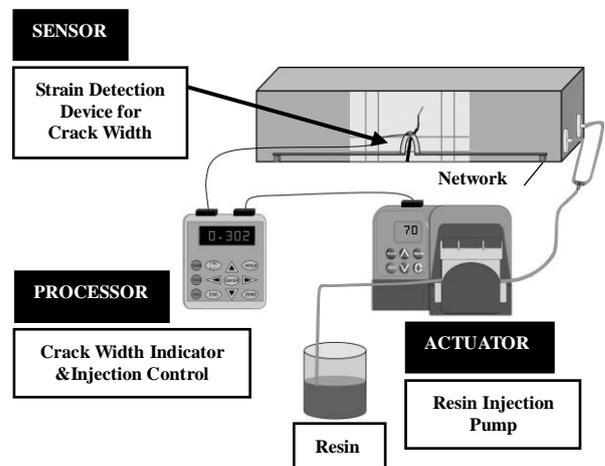


Fig.5 Auto Self-Repairing System (ASRS) for RC Beam

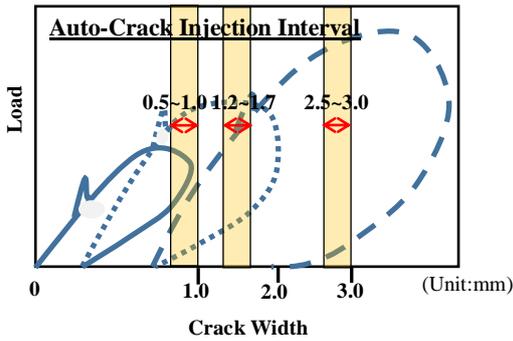


Fig.6 Auto-Crack Injection of RC Beams by ASRS

また、各載荷の試験結果から、従来配筋である SD 試験体及び超弾性合金を用いた SEA 試験体、SEA-N 試験体、SEB 試験体との比較から、変形回復率及びひび割れ閉塞率の向上について検討を行う。さらに、各載荷において発生したひび割れの箇所から、曲げひび割れの誘発が可能であるか、また、超音波試験の結果から、ASRS によるひび割れの修復効果を確認する。

$$T_R = \frac{T_c}{T_a} \quad (1)$$

T_a : 載荷前の伝搬時間

T_c : 修復後の伝搬時間 T_R : 伝搬時間の変化率

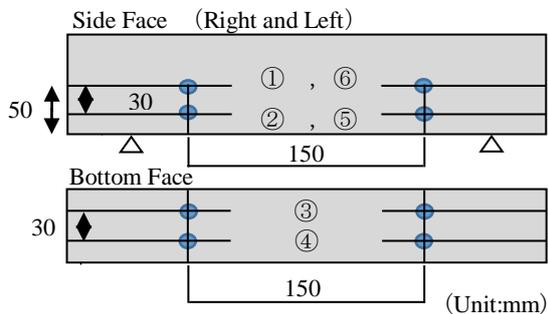


Fig.7 Measurement Points for Ultrasonic Non-Destructive Testing

5. 実験結果及び考察

Fig.8 に 3 回繰り返し載荷試験における各試験体の荷重(P)-層間変形角(θ)曲線を示す。

各試験体の最大層間変形角及び残留層間変形角から変形回復率を算出した。各試験体における第3載荷における変形回復率は SD 試験体 18.30%, SEA 試験体 77.09%, SEA-N 試験体 80.01%, SEB 試験体 88.23% となった。SD 試験体において第1載荷で降伏していることが分かる。また、第1載荷から永久ひずみが発生し、比較的大きな残留変形が確認された。変形回復率について、第1載荷において 56.0%, 第2載荷で 32.6%, 第3載荷で 18.5% となり、低い変形回復率を示した。SEA 試験体の変形回復率は、第1載荷において 71.7%, 第2載荷で 74.9%, 第3載荷で 77.1% となり、SD 試験体と比べて高い変形回復率

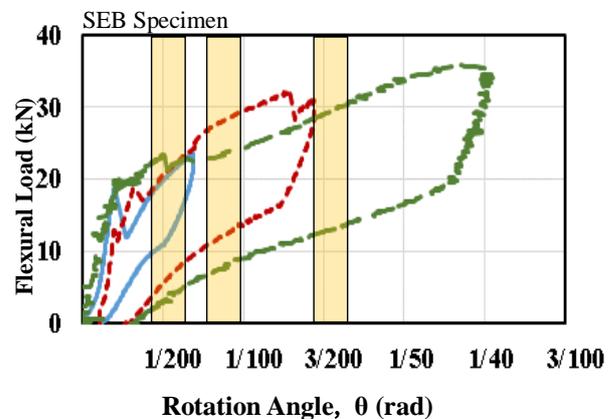
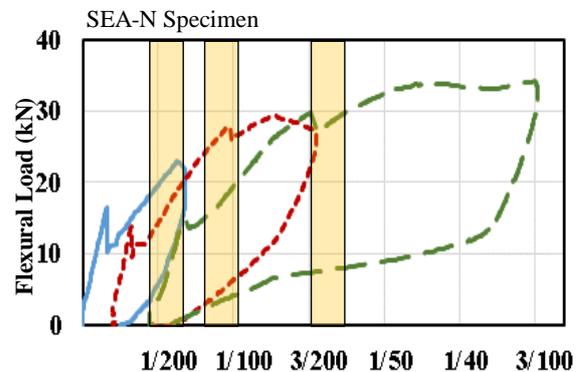
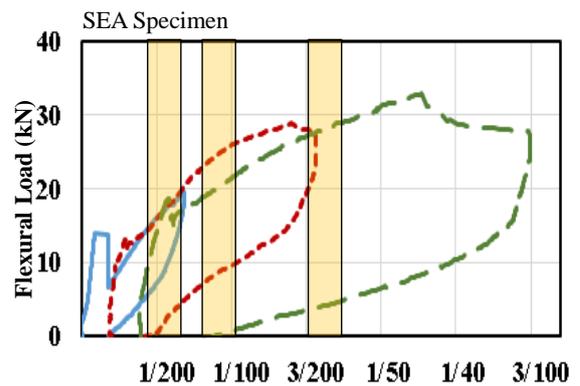
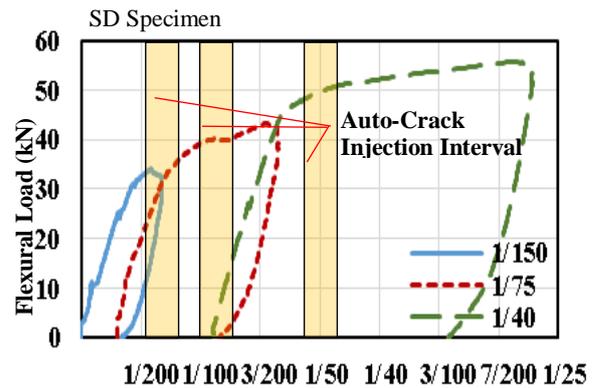


Fig.8 Load vs. Deformation of Auto Self-Repaired RC Beam Specimens

を示した。これは、SEA の弾性力が高いことから除荷後の残留変形が抑制されることが考えられる。SEA-N 試験体の変形回復率は第 1 载荷において 69.5%，第 2 载荷で 70.4%，第 3 载荷で 80.0% となり、第 3 载荷においては、SEA よりも高い変形回復率を示した。原因として、主筋とコンクリート間の付着性が取り除かれることで SEA 本来のエネルギー吸収能力が発揮されることによりひずみが抑制され変形回復率が向上したと考えられる。さらに SEB 試験体の変形回復率について、第 1 载荷において 84.4%，第 2 载荷で 82.1%，第 3 载荷で 88.2% となった。特徴として圧縮側・引張側両方の主筋を SEA に代替している為、より高い変形回復率を確認することが出来た。

Photo 1 に 3 载荷後の各試験体のひび割れの状況を示す。SD 試験体において、第 1 载荷時に無補強部分にひび割れが起きたことによりひび割れ箇所に補修剤が注入されたことで補修剤が養生後硬化した。第 1 载荷で起きたひび割れは硬化すると高強度となるため、第 2 载荷では第 1 载荷時に起きたひび割れを避けるようにひび割れが起きる。第 3 载荷におけるひび割れは SD 試験体中央

から大きく斜めにひび割れが起きている。このことから SD 試験体の耐力はコンクリート部分では耐えられなくなっていることが分かる。SD 試験体は第 1 载荷時に降伏していることから本研究の ASRS を用いた RC 梁部材の開発には不向きである事が分かる。SEA 試験体において、第 1 载荷時のひび割れが SEA 試験体中央に起きたことで完璧な曲げ破壊の誘発を確認した。SD 試験体同様に補修剤が養生後硬化した。SD 試験体と同様に第 1 载荷時に起きたひび割れとは別の箇所に新たなひび割れが起きた。第 3 载荷も新たなひび割れが起きた。SEA 試験体に関しては本研究の ASRS を用いた RC 梁部材の開発の検討の余地があることを確認した。

SEA-N 試験体において、SD 試験体及び SEA 試験体同様の 3 回繰り返し载荷の実施及びひび割れを確認した。

写真からも分かるように SEA-N 試験体におけるひび割れは全て SEA-N 試験体中央に起きている。これは、主筋に用いた SEA のコンクリートとの付着性を取り除いたことで SEA 本来のエネルギー吸収能力が発揮されコンクリートが受ける荷重をコンクリートとの付着性を取り除いた SEA が受け持ったためと推察される。本研究の

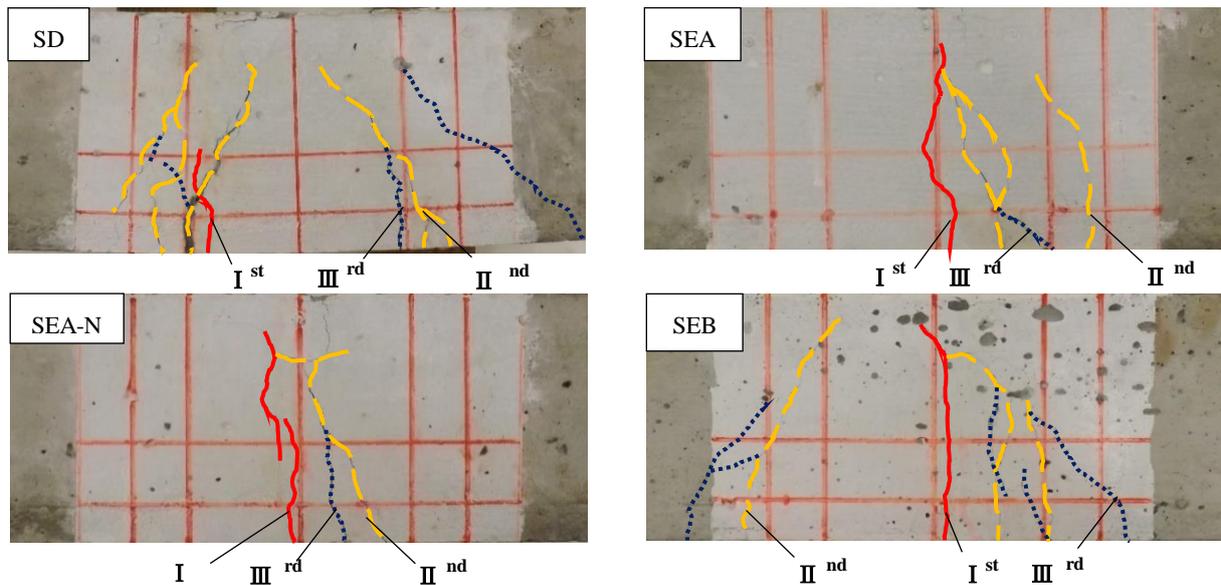


Photo 1 Crack Pattern of RC Beams for Ist, IInd and IIIrd Loading

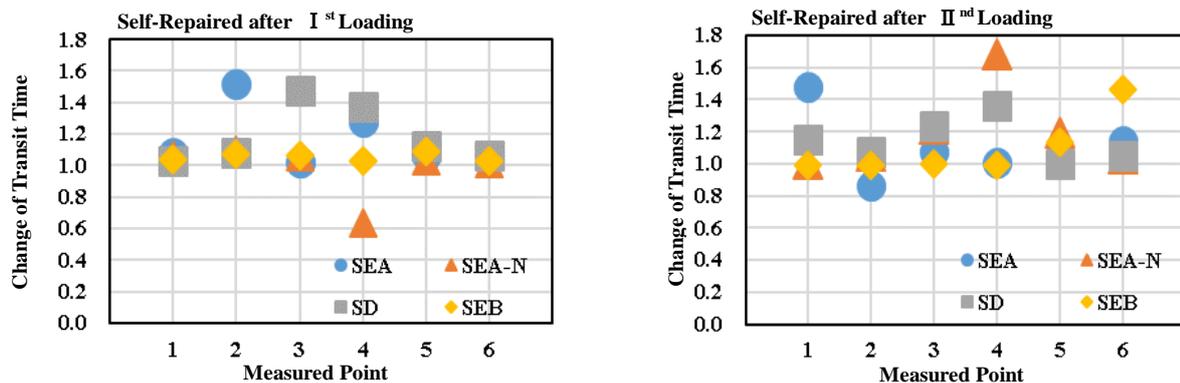


Fig.9 Rate Change of Transit Time of Auto Self-Repaired RC Beams

ASRS を用いた RC 梁部材の開発には検討が可能であることを確認した。SEB 試験体においては、SD 試験体と同程度のひび割れが起きたが SD 試験体に比べるとひび割れ閉塞率は高い。

Fig.9 に各試験体の超音波試験の結果を示す。各試験体における修復後の超音波伝播時間から変化率を算出した。SD 試験体においては、第 1 荷重時における降伏の影響により超音波伝播時間にばらつきを確認した。また、SEA 試験体及び SEA-N 試験体におけるばらつきに関しては、補修剤が硬化した際に超音波の測定位置で硬化していたことにより、超音波伝播時間に遅れが生じた。さらに、SEB 試験体における変化率は 1 に近い値を示していることから、補修剤の充填性が良いことを確認した。

Fig.10 に各荷重試験における最大ひび割れ幅及び残留ひび割れ幅を示す。

第 3 荷重における、各試験体の最大ひび割れ幅及び残留ひび割れ幅からひび割れの閉塞率を算出した。各試験体におけるひび割れ閉塞率は SD 試験体 15%、SEA 試験体 78%、SEA-N 試験体 81%、SEB 試験体 70%となった。

SD 試験体に関しては、第 3 荷重における最大ひび割れ幅が 6.9mm、残留ひび割れ幅が 5.9mm となり、ひび割れ閉塞率が 15%となった。第 1 荷重の降伏により残留ひび割れ幅が大きく残りひび割れ閉塞率が低い値を示したと考えられる。一方、SEA 試験体及び SEA-N 試験体の第 3 荷重における最大ひび割れ幅が 5.3mm 及び 6.0mm、残留ひび割れ幅は 1.2mm 及び 1.1mm となり、ひび割れ閉塞率は 70%及び 81%と SD 試験体に比べて高い閉塞率を示した。現段階では両者に大差が無いことからひび割れ閉塞率に対して主筋とコンクリートの付着性の影響は関係無いことが推察される。SEB 試験体に関して、ひび割れ閉塞率が第 1 荷重後で 86%、第 2 荷重後で 77%、第 3 荷重後で 70%と荷重を繰り返す毎にひび割れ閉塞率が低くなっている。これは、引張側主筋の SEA が荷重エネルギーを吸収したことで本来荷重を受けるコンクリートではなく、SEA のエネルギー吸収能力により荷重を受け持ったためと推察される。

6. まとめ

本研究では、ASRS を用いた RC 梁部材の開発を目的とし各実験を行った。

まず、変形回復率及びひび割れ閉塞率に関して、既往の研究と同等の値を示したことにより ASRS の自己修復能力は満足するものであることを確認した。

さらに、センサー及びプロセッシングユニットにより常時、ひび割れ幅を監視する事が可能となり、また、ひび割れ幅や部材変形角に応じた補修剤の種類及び注入方法の選択に有効であることを確認した。

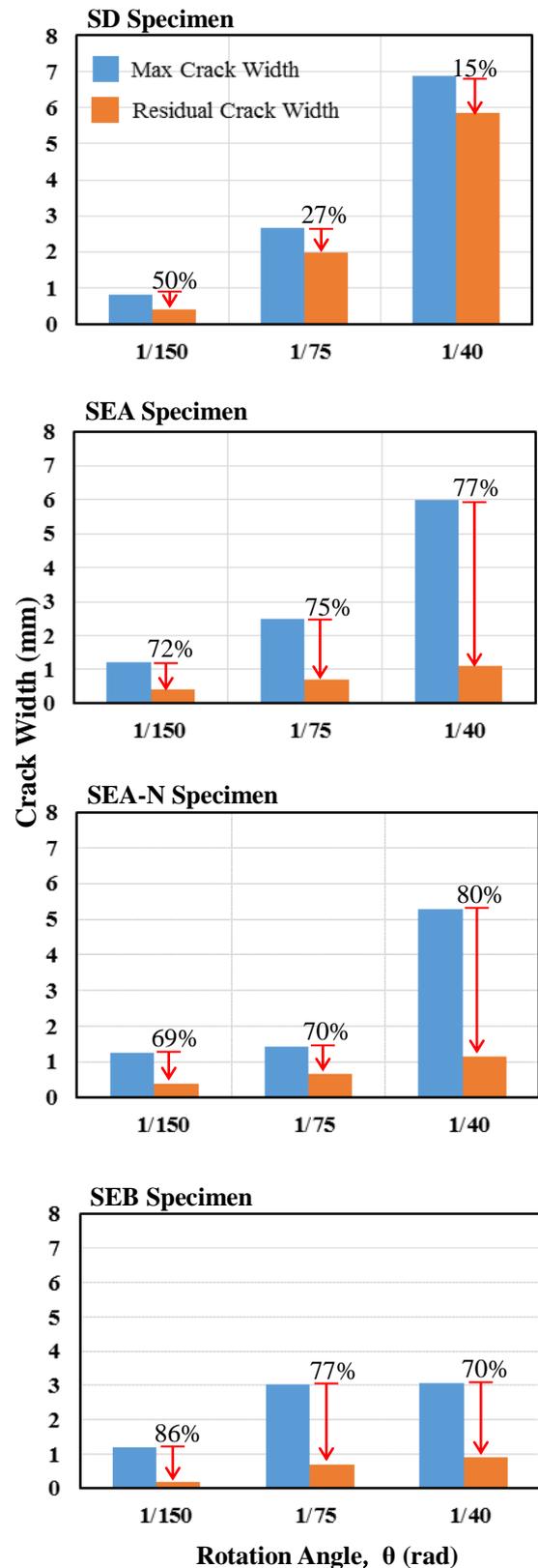


Fig.10 Crack Width Recovery after Repeated Loading of RC Beam Specimens

今後の課題として、補修剤の硬化時間の検討及び繰り返し補修機能の検討が挙げられる。これらの補修剤の検討を行うことで、ASRSを用いたRC梁部材の開発がより実用的なものへと進化を遂げることを期待できる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、日本学術振興会の科学研究費（B）24360226号のご助成を受けた。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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集, Vol.32, No.1, pp.1871-1876, 2010.
- 2) Pareek, S. and Oohira, A., “A Fundamental Study on Regain of Flexural Strength of Mortars by Using a Self-repair Network System”, Proceeding of 3rd International Conference on Self-Healing Materials, Bath, 2011.
- 3) 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.
- 4) 西脇 智哉, 熊田 廣樹, 大平 旭洋, Sanjay PAREEK, “連結材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研究”, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1463-1468, 2011.
- 5) Sanjay PAREEK, 三浦裕騎, 荒木慶一, Kshitij SHRESTHA: 超弾性合金及び自己修復ネットワークシステムを用いたRC梁部材の付着性及び曲げ性状, コンクリート工学年次論文集 Vol.36, No.1, pp.1642-1647, 2014
- 6) Kshitij C. SHRESTHA, Sanjay PAREEK, Toshihiro OMORI and Yoshikazu ARAKI: FEASIBILITY OF SELF-REPAIR NETWORK SYSTEM IN CONCRETE BEAMS WITH Cu-Al-Mn SUPERELASTIC ALLOY BARS, コンクリート工学年次論文集 Vol.34, No.1, pp.1438-1443, 2012