

# 論文 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 梁部材の付着性が及ぼす曲げ性状

Sanjay PAREEK\*1・三浦 裕騎\*2・荒木慶一\*3・Kshitij SHRESTHA\*4

**要旨**：既往の研究で、自己修復ネットワークシステムを付与した RC 梁における補修材の充填性と強度回復率に相関性があることを確認した。また引張側主筋を Cu-Al-Mn 超弾性合金で代替することで、RC 梁の形状回復及びひび割れ閉塞が可能となることを確認した。本研究では RC 梁に用いる合金の付着を取り除くことで、より良好な形状回復及びひび割れ閉塞を示すことと自己修復機能をさらに向上できることを確認した。

**キーワード**：自己修復, ひび割れ, ネットワーク, 超弾性合金

## 1. はじめに

従来のスクラップアンドビルドでは、取り壊しや建設の際に多量の CO<sub>2</sub>を排出することから、環境問題としての取り組みや研究開発が活発化している。近年では RC 構造物を対象に様々な検討が行われ、性能低下に応じて適切な補修を施す維持管理体制が確立されつつある。しかし、既存 RC 構造物の維持管理は大きな負担を伴うため、全ての構造物に対してこれを実施することは困難である。この様な背景から構造物の長寿命化や維持管理工程の負担軽減を目的として、RC 構造物に自己修復機能を付与させる研究が注目されるようになって来た<sup>1)</sup>。

著者らは、RC 構造物における梁部材の下部に補修材の充填孔(以下、ネットワーク)を設け、ひび割れ発生後、自動的に補修材がひび割れに充填し、強度を回復させる自己修復システム(Fig.1)の研究開発を行ってきた<sup>2)</sup>。初期の研究において、過大なひび割れや変形が加わった場合補修材の充填性が不十分となり、自己修復機能の低下を引起すことが問題点として確認された<sup>3,4)</sup>。この問題点の克服のため、RC 梁部材が塑性化した後の残留ひび割れ及び残留変形を抑制する工法として、超弾性合金(以下、SEA)を主筋の一部として代替する工法に着目し基礎的検討を行い、引張側主筋を Cu-Al-Mn 超弾性合金で代替することで、形状回復効果及び残留ひび割れの閉塞が可能となることを示した。形状記憶合金(以下、SMA)では、加熱による形状回復効果が発現するのに対し、SEA では常温で除荷によって形状回復効果を発揮する(Fig.2)ため、本研究では SEA を使用する。

従来の研究<sup>3,4)</sup>では全ねじにより付着をとっていたが、この場合、超弾性合金はひび割れが生じた範囲でのみ形状回復効果を発揮するため、ひび割れ発生位置以外での超弾性合金の形状回復効果が有効に活用されていない。

本論文では、超弾性合金の一部の付着を取り除き、超弾性合金の持つ形状回復効果を発揮させる範囲を多くすることにより、RC 梁部材の残留ひび割れの抑制及び形状回復効果を向上させることを目指し、実験による検討を行う。

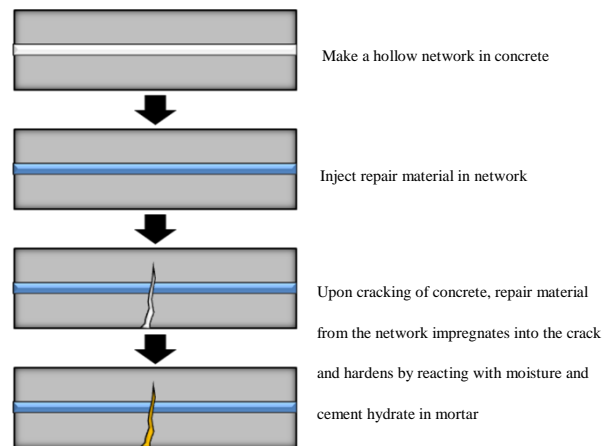


Fig.1 Concrete Self-Repair Network System

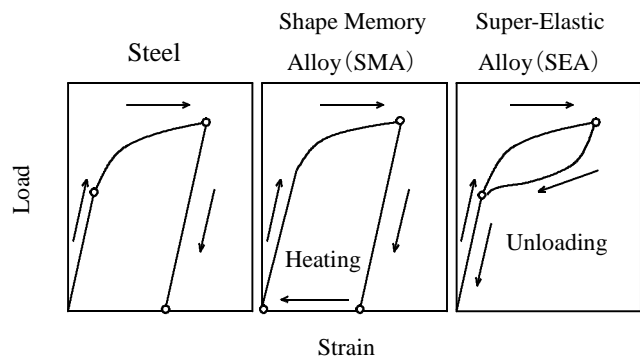


Fig.2 Load vs. Strain Curves of Steel, SMA and SEA Bars

\*1 日本大学 工学部建築学科 准教授 博士(工学) (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 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 博士(工学) (正会員)

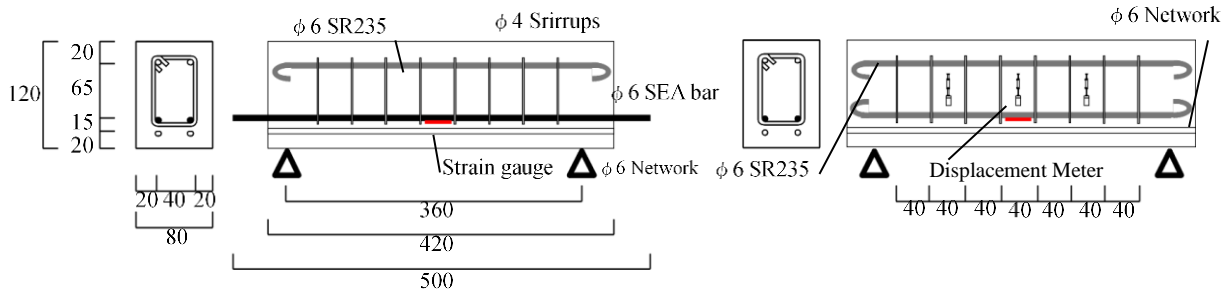


Fig.3 SEA Beam and RC Beam Specimen Reinforcement Details

## 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示す。試験体は引張側主筋に Cu-Al-Mn 合金を用いた超弾性 (SEA) 試験体及び比較用として従来配筋の SD 試験体, 引張側主筋とコンクリートとの付着を一部取り除いた SEA-N 試験体及び SD-N 試験体を用いた。付着を取り除く範囲は, 既往の実験の結果から曲げひび割れが発生すると予測される試験体中央部のみとし, 本実験では中央 200mm とする。ネットワークは引張側主筋の下部に設け, 補修材として 1 液性のエポキシ樹脂 (Table 1) を使用した。

Table 1 Characteristics of Epoxy Resin

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

## 3. 実験

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<sup>5)</sup>。本実験では, 引張側主筋のコンクリートとの付着性を取り除いた RC 梁部材縮小モデル化コンクリートを用いて以下の項目を検討するものとする。

- 1) 超弾性合金を用いた RC 梁部材における主筋とコンクリートの付着性の有無が及ぼすひび割れ閉塞及び形状回復効果について検討を行う。
- 2) 自己修復ネットワークシステムによる強度回復について検討を行う。

### 3.1 実験概要 1

実験計画 1 では, 合金を付与した RC 梁部材縮小モデルにおいてコンクリートと主筋との付着が形状回復効果及び残留ひび割れの抑制に及ぼす影響を検討する。試験は 3 回の繰返し載荷とし, 各載荷の振幅を変形角  $\theta = 1/150\text{rad}$ ,  $1/75\text{rad}$  及び  $1/40\text{rad}$  と定める。各載荷における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, SEA 試験体及び SEA-N 試験体また従来配筋の SD 試験体及び SD-N 試験体との比較から, 形状回復効果及びひび割れ閉塞の向上について検討を行う。実験計画 1 のフローチャートを Fig.4 に示す。

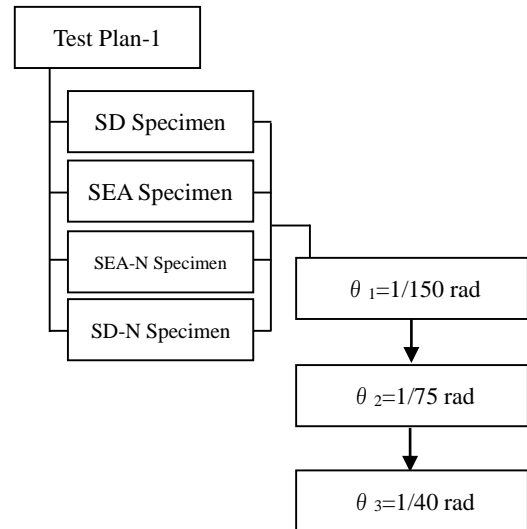


Fig.4 Details on Test Plan-1

### 3.2 実験概要 2

実験計画 2 では, ひび割れ修復後の強度回復について検討を行う。載荷条件として 3 パターンの条件を計画した。(1) 第 1 載荷  $\theta = 1/150\text{rad}$ , 第 2 載荷  $\theta = 1/75\text{rad}$ , (2) 第 1 載荷  $\theta = 1/75\text{rad}$ , 第 2 載荷  $\theta = 1/40\text{rad}$ , (3) 第 1 載荷  $\theta = 1/40\text{rad}$ , 第 2 載荷  $\theta = 1/40\text{rad}$  とした。第 1 載荷試験後, 自己修復ネットワークシステムによる修復を行い, 補修材が硬化後に第 2 載荷を行うものとする。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, 載荷前, 載荷後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, 伝播時間の回復率を算出する。

これらの試験では形状回復が及ぼす修復後の強度の発現への影響について検討を行うものとする<sup>6)</sup>。以上のことから Cu-Al-Mn 超弾性合金を用いた RC 造梁部材の有用性について検討する。また, 形状回復による自己修復機能の向上, 変形回復率による強度回復率の挙動から, ネットワークと超弾性合金の適用性及び主筋のコンクリートとの付着性が及ぼす影響について検討を行うものとする。Fig.5 に実験計画 2 のフローチャートを示す。

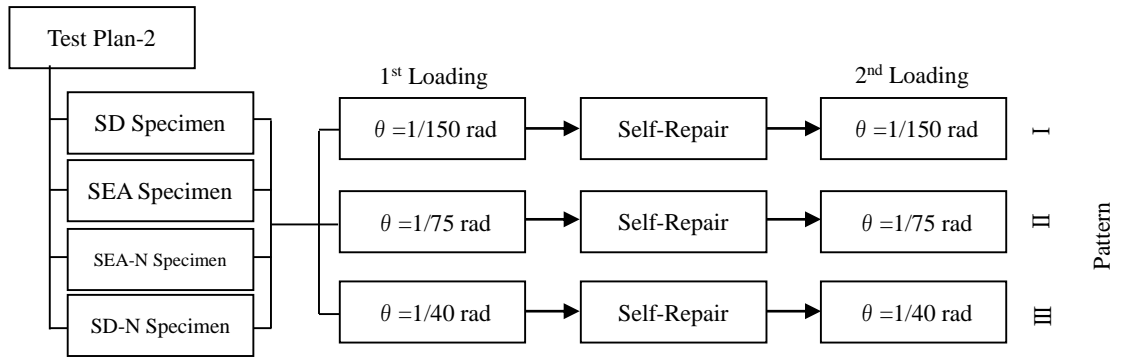


Fig.5 Details of Test Plan-2

強度回復率の算出に用いた式(1), 超音波伝播時間回復率の算出に用いた式(2)を以下に示す。Photo 1 に超音波試験機を, Fig.6 に超音波試験における測定箇所を示す。

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

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

$$T_R = \frac{T_b - T_h}{T_b - T_a} \times 100[\%] \quad (2)$$

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



Photo 1 Ultrasonic Testing Machine

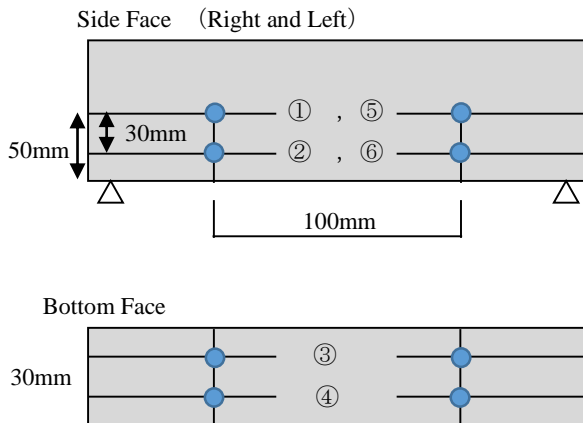


Fig.6 Measurement Points by Ultrasonic Non-Destructive Testing

## 4. 実験結果及び考察

### 4.1 実験概要 1

Fig.7 に実験計画 1 の 3 回繰返し载荷試験における各試験体の荷重( $P$ )-層間変形角( $\theta$ )曲線を示す。

なお SD-N 試験体における第3 载荷試験の際に引張側主筋が破断したため, ひび割れ幅の測定データは記載しない。

SD 試験体において第1 载荷で降伏していることが分かる。また, 第1 载荷から永久ひずみが残る, 残留変形が大きくなることが確認された。SEA 試験体においては SD 試験体と比べ剛性が低いが, 降伏後の残留変形が抑制された。SD-N 試験体において, SD 試験体と同様, 降伏後に永久ひずみが発生し, 残留変形が载荷ごとに大きくなっていることが分かる。また, 第3 载荷時に引張側主筋が破断した。SEA-N 試験体における変形回復は SEA 試験体に比べ, より顕著に現れていることが分かる。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。各試験体における変形回復率は SD 試験体 20.55%, SD-N 試験体 21.22%, SEA 試験体 73.61%, SEA-N 試験体 93.01%となった。既往の結果からも SEA 試験体は従来配筋のものよりも変形回復効果が現れたが, 主筋とコンクリートとの付着を一部取除くことで, 変形回復効果がより顕著に現れた。

Fig.8 に各载荷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。

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。SD 試験体及び SD-N 試験体のひび割れの閉塞率は 20%となった。比べて SEA 試験体は 82%, SEA-N 試験体は 86%と良好な結果となった。

RC 梁部材の引張側主筋に超弾性合金を用いることで形状回復及び残留ひび割れの抑制に多大な効果を発揮することが分かった。また, 超弾性合金とコンクリートとの付着を一部取り除くことによりその効果の向上が図れることが分かった。

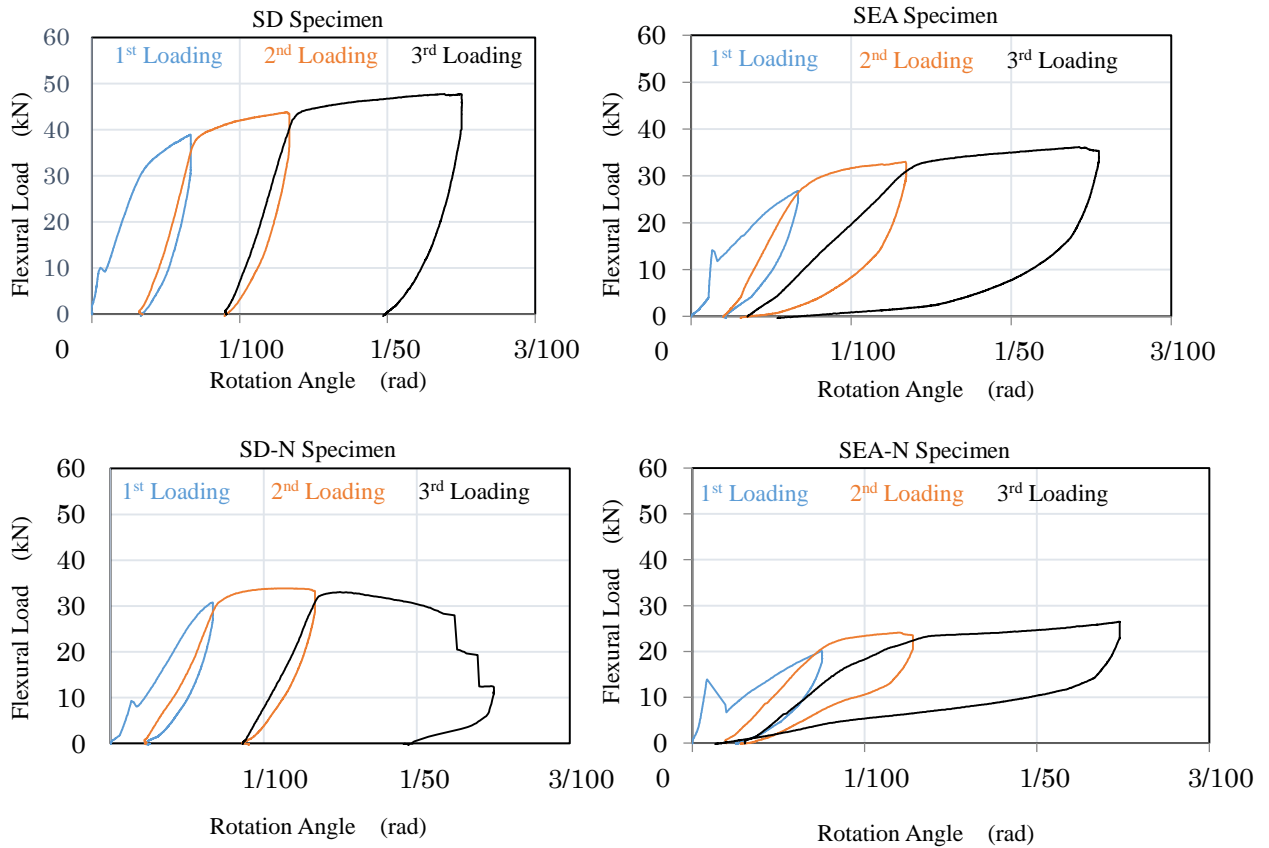


Fig.7 Load vs. Rotation Angle of Unrepaired Beam Specimens

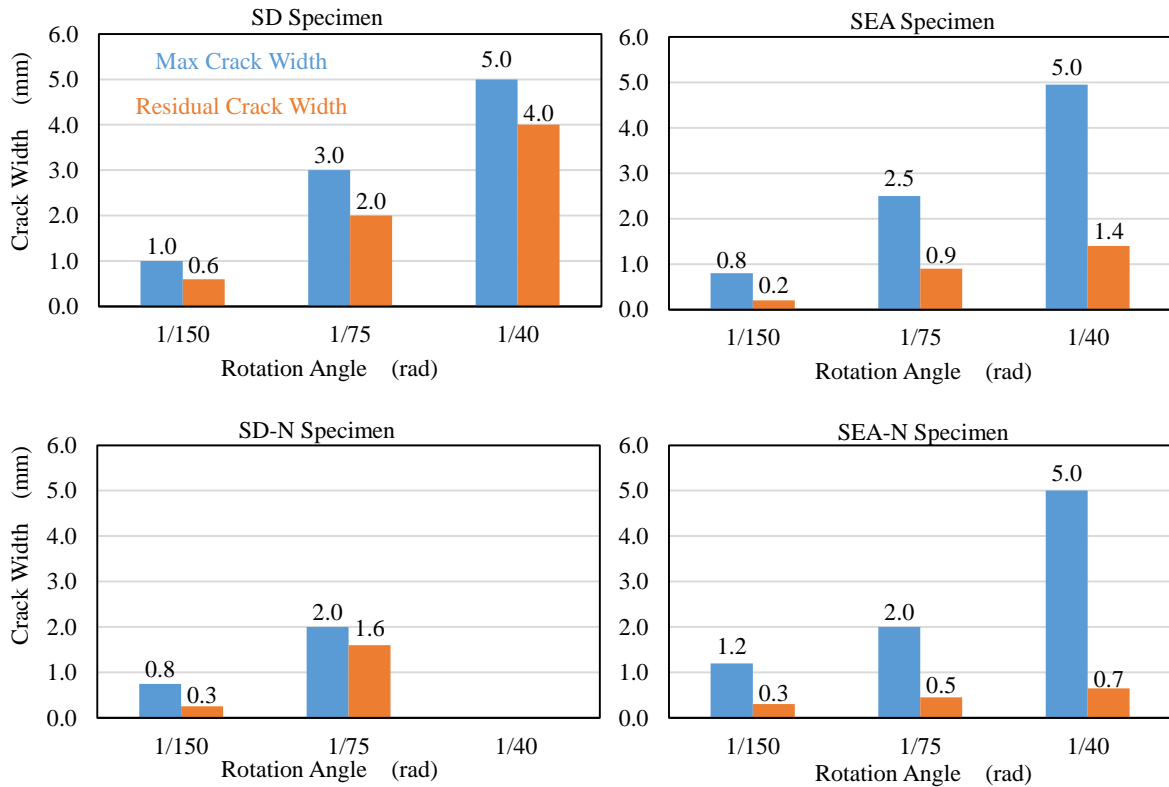


Fig.8 Crack Width Recovery after Repeated Loading of Beam Specimens

#### 4.2 実験概要 2

Fig.9 に実験計画 2 の荷重試験における荷重( $P$ )-変位( $mm$ )曲線を示す。

なお、SD-N 試験体及び SEA 試験体において荷重時に引張側主筋が破断したため、破断後の荷重試験の結果は記述しない。

SEA 試験体及び SEA-N 試験体の試験結果より、残留変形に大きな差が生じた。実験計画 1 と同様に変形回復率を算出した。荷重条件(2)における変形回復率は SD 試験体 21.56%, SD-N 試験体 25.34%, SEA 試験体 55.61%, SEA-N 試験体 80.36%となった。

第 1 荷重試験及び第 2 荷重試験におけるひび割れ強度より強度回復率を算出した。SD 試験体の各荷重試験における強度回復率は全ての荷重パターンにおいて 0%と

なった。SD-N 試験体においても全ての荷重パターンで 0%, SEA 試験体では 111.18%及び 73.62%, SEA-N 試験体では 103.5%, 80.0%及び 38.2%となった。

また、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。SD 試験体で 65.0%, 10.86%, 23.1%となり、SD-N 試験体では 33.3%, 4.0%となった。SEA 試験体では 78.0%, 84.4%となり、SEA-N 試験体では 90.0%, 95.0%及び 87.0%となった。

超音波試験結果を Fig.10 に示す。各試験体の超音波伝播時間の平均回復率を算出した。SD 試験体 48.4%, SD-N 試験体 62.2%, SEA 試験体 79.0%, SEA-N 試験体 88.6%となった。

Fig.9 より異形鉄筋を用いた SD 試験体及び SD-N 試験体において、低いひび割れ閉塞率が算出され、修復後の

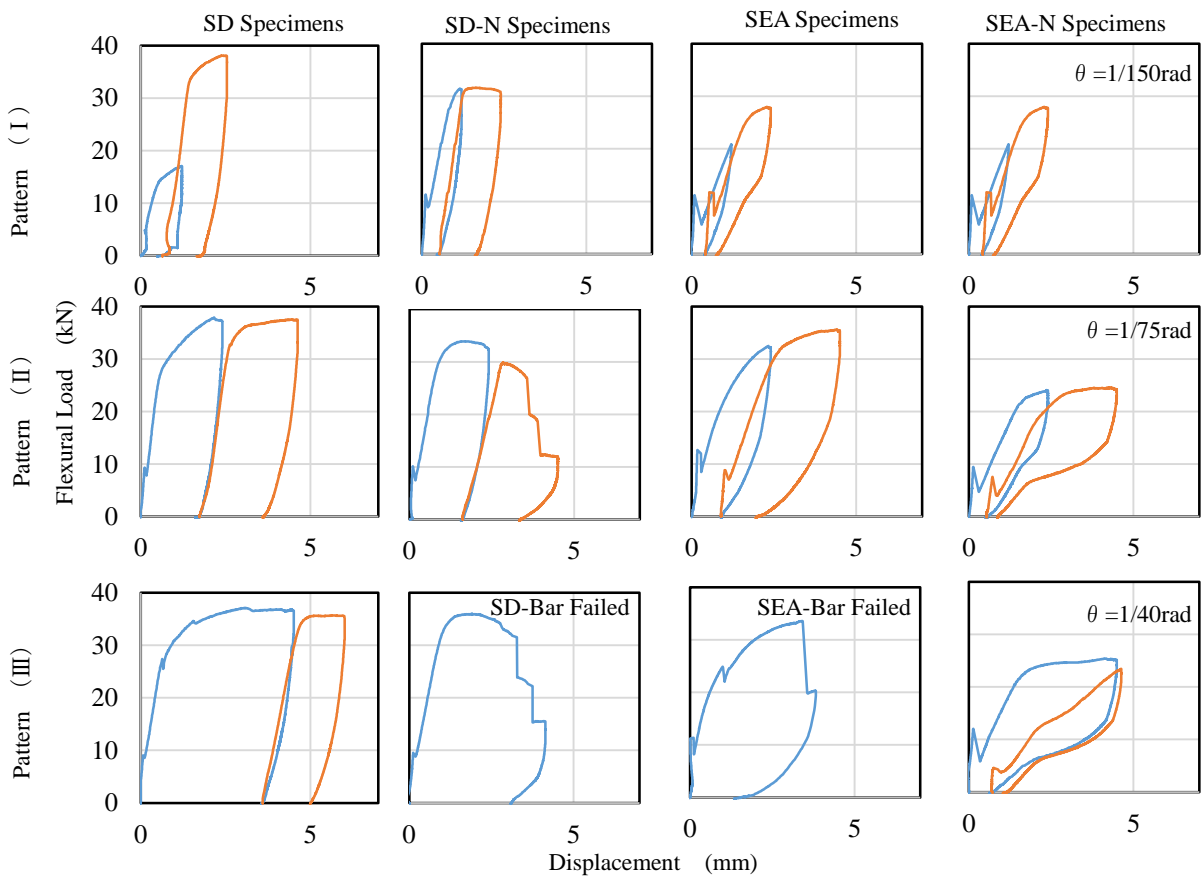


Fig.9 Load vs. Rotation Angle of Self-Repaired Beam Specimens

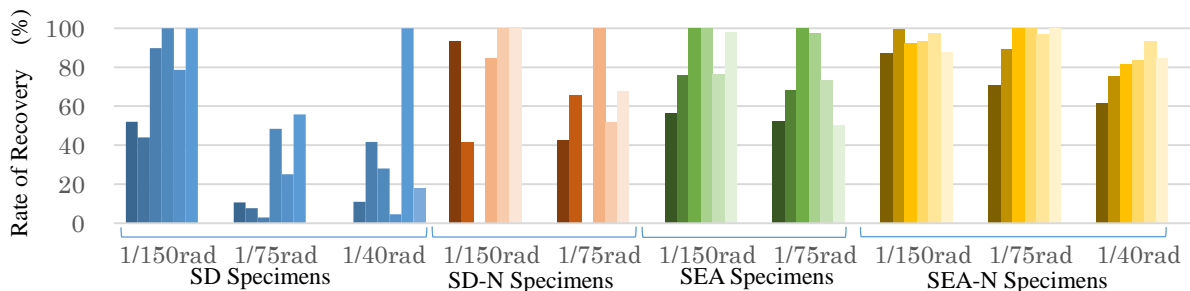


Fig.10 Rate of Recovery of Ultra-Sonic Time of Crack Self-Repaired Beams

強度回復が見られなかった。超弾性合金を用いた試験体において、荷重パターン(1):  $\theta = 1/150\text{rad}$  で強度回復率が100%を超えた。これはひび割れが小さくなり、補修材の充填の際に毛細管現象が生じ、修復が完全なものとなった。また、SEA-N 試験体においては荷重パターン(3)で主筋が破断せず、高い変形回復率及びひび割れ閉塞率を示し、自己修復機能の向上が確認された。

以上の結果から、主筋に使用する超弾性合金のコンクリートとの付着を一部取り除くことにより、残留ひび割れが抑制され、自己修復ネットワークシステムによる補修材の充填性が良好となり、強度回復率及び超音波伝播時間回復率が高くなることが確認された。

## 5. まとめ

本研究から得られた知見を以下に述べる。

- 1) 従来配筋の試験体では引張側主筋の降伏後の挙動において、大きな残留変形及び残留ひび割れを示した。
- 2) 超弾性合金を引張側主筋に代替した試験体では、従来配筋型において塑性変形域に達するまで加圧した場合であっても、除荷後の残留変形及び残留ひび割れ幅を著しく抑制することが可能である。
- 3) SEA 試験体において、ひび割れ修復後の第2荷重試験に高い強度回復率を示したことから、自己修復ネットワークシステムと超弾性合金の併用の有用性を示唆した。
- 4) 超弾性合金とコンクリート間の付着を一部取り除くことにより、主筋が破断しにくくなるとともに、形状回復力及びひび割れ抑制力が向上する。
- 5) Cu-Al-Mn 超弾性合金を引張側主筋に使用し、かつ、自己修復ネットワークシステムを付与した構造部材は、過度な変形が加わった後であっても、経済的且つ早期的な復旧が可能な部材になると考えられる。

## 謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B) 24360226 の助成の下で実施した。

## 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) 大平 旭洋, Sanjay PAREEK, “自己修復コンクリートの非破壊試験法による補修剤の充填性の評価”, 日本建築学会東北支部研究報告集, 構造系 (74), pp.153-154, 2011.
- 6) Kshitij C. SHRESTHA, Yuki MIURA, Sanjay PAREEK, Yoshikazu ARAKI, “ACTIVATED NETWORK SELF-HEALING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH SUPER-ELASTIC ALLOY BARS”, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1399-1404, 2013.