論文 超弾性合金の形状及び付着性状が及ぼす RC 梁部材の繰返し載荷に よる変形回復能力及びひび割れの自己修復に関する研究

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

要旨:本研究では,ひび割れの全自動自己修復システム(以下,ASRS)を適用させた RC 梁部材において,主 筋に使用した超弾性合金(以下,SEA)の直径(ϕ 6, ϕ 8)が力学的性能へ及ぼす影響について検討を行った。 その結果,SEAの直径を増加させることで,強度性状が向上し,主筋に SD を使用した試験体と同等の強度を 発現した。さらに,SEAの形状記憶効果により,6回繰返し曲げ試験後の試験体において変形回復が行われ, 発生したひび割れが閉塞されたことで,高い自己修復効果を示した。

キーワード:超弾性合金,ひび割れ、自己修復システム (ASRS)、ネットワーク、変形回復率

1. はじめに

近年,高度経済成長期以前に建設された RC 構造物 が耐用年数を迎えたことで,補修・補強等のメンテナ ンスが行われている一方で,スクラップアンドビルド による建て替え工事が多く行われており,解体工事に 伴う産業廃棄物や CO₂の排出が地球環境に悪影響を及 ぼすことが懸念されている。そのため,現在では,持 続可能な社会の構築を目的とした維持保全に関する調 査・研究が進められている。しかし,RC 構造物の維持 保全に関する補修・点検作業は,時間的・経済的・人的 な負担が大きく,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。そのため,現在 RC 構造物にお けるひび割れに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。

自己修復システムの概要として, 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,ネ ットワーク内部に補修剤を内包させ、圧力を加えた状 態を維持させる。これにより、ひび割れが発生した場 合に補修剤が自動的にひび割れに充填されることで, ひび割れが閉塞されると共に曲げ強度が回復される ^{1),} ^{2), 3), 4)}。しかし、過大な変形によって生じるひび割れに 対しては、補修剤の充填性が不十分となり、自己修復 機能の低下が確認された³⁾。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 を用いる事で,除 荷後の部材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 5,6。また, 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 あることから、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として、ひ

*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 博士 (工学)(正会員)
*3日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)
*4京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 准教授 博士 (工学)(正会員)

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ー機能とその命令を 受けひび割れに補修剤を注入するアクチュエーター機 能を備えた全自動自己修復コンクリート用システム (ASRS)を開発した⁷⁾。本研究では,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直径が及ぼ す強度の影響の検討を行う。Fig.1 に当自己修復コンク リートの概要を, Fig.2 に SEA の特性を示す



Make a hollow network in concrete

Inject repair material in network

Upon cracking of concrete, repair material from the network impregnates into the crack and hardens by reacting with moisture and cement hydrates in mortar

Fig.1 Concrete Crack Self-Repair Network System





2. 試験体概要及び使用材料

Fig.3 に試験体形状及び配筋の概要を示す。また, Table 1 に補修剤の性質を示す。なお、今回使用した SEA の降伏応力 110~140MPa, 引張強度 230~250MPa, コンクリートは JIS A 1132 に従って作製し,水セメン ト比 50%の設計基準強度 24MPa の普通コンクリート を使用した。第6載荷においてひび割れ幅が大きくな るため各試験体に粘性の高い補修剤 M を用いた。試験 体は、曲げひび割れを誘発させるため、試験体中央部 100mm 間はあばら筋を無くした。SEA の直径が曲げ剛 性に与える影響を検討する為、試験体には主筋の直径 が ϕ 6 及び ϕ 8 の SEA をそれぞれ用いた。まず,引張 側主筋に SEA を用いた SEA 試験体, さらにコンクリ ートと SEA の付着性を取り除き, SEA の付着による破 壊を軽減及び変形回復能力をより発揮させるために, 引張側主筋のSEAにおいてビニルテープ及びグリース を塗布することで、コンクリートとの付着性を取り除 いた SEA-N 試験体, また, 圧縮側と引張側の両側に主 筋として SEA を用いた SEB 試験体,同様に主筋とコ ンクリートとの付着性を取り除いた SEB-N 試験体を作 製した。また、従来鉄筋を主筋として用いた SD 試験 体を比較用試験体として作製した。引張側主筋 の下部

3. 実験概要

ポキシ樹脂を用いた。

本研究では,SEAの長さ及び直径がRC梁部材の強度に及ぼす影響の検討を行い,SEA繰返し修復性を確認する。

にネットワークを設け、ひび割れ補修剤には、1液性エ

4. 実験方法

Fig.4 に実験のフローチャートを, Fig.5 に ASRS の 概要を示す。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。曲げ試験における各載荷の 層間変形角は試験体中央の変位の値より算出した。曲 げ試験時終了後,補修剤を排出し,1d 乾燥「60%, 80%(RH)] 養生及び 1d-40℃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、各載 荷における最大ひび割れ幅及び残留ひび割れ幅は、標 点距離 360mm の π型ゲージを試験体側面下位の中央 に設置し測定した。なお、各載荷において発生したひ び割れは補修剤により修復されるため、ひび割れが無 いものとみなし次の載荷に進む。さらに、試験体中央 における変位を測定し,各載荷試験終了時の残留層間 変形角を各載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。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

化率を図中の●印及び式(1)に示す。試験体側面及び底 面において図中に示す一直線上の中央から左右 75mm の位置で表面走査法により超音波の伝播時間を測定し, 超音波試験の結果から伝播時間の変化率を算出した。 なお,ひび割れの確認及び補修剤の充填性の確認のた め,各載荷,載荷前及び修復後に超音波試験を行った。

$$T_R = \frac{T_c}{T_a} \tag{1}$$

Ta: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



(Unit : mm)

Fig.3 Details of RC Beam Specimen

Table 1 Characteristics of Epoxy Resin

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







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

5. 実験結果及び考察

5.1 超音波伝播時間の変化率

Fig.8 に各試験体の超音波の伝播時間の変化率の結 果を示す。Photo1に各試験体の部材の変形の様子を示 す。各試験体における第6載荷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、写真 から主筋の降伏による部材の変形の影響から超音波伝 播時間のばらつきを確認した。一方、SEA を主筋に用 いた φ6SEB-N 試験体における超音波伝播時間は、SD 試験体に比べ、ばらつきがなく伝播時間の変化率が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。さらに、直径を大きくした φ8SEB-N 試験体においても補修剤の充填性が良いことから、 直径の大小は補修剤の充填性に影響しないと見られる。

5.2 荷重-層間変形角曲線及び変形回復率

Fig.9 に 6 回繰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。φ6 各試験体の第6載荷における変形回復率はSD試験体 30.8%, SD-N 試験体 32.9%, SEA 試験体 82.2%, SEA-N 試験体 97.4%, SEB 試験体 97.1%, SEB-N 試験体 96.7% となった。SD 試験体において第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3載荷において 63.1%,第5載荷で 53.3%, 第6載荷で30.8%となり, 低い変形回復率を示し た。SD-N 試験体の変形回復率は,第3載荷において 63.1%, 第5載荷49.1%, 第6載荷32.9%となり, SD 試 験体同様に低い変形回復率を示した。SEA 試験体の変 形回復率は,第3載荷において87.9%,第5載荷で84.5%, 第6載荷で82.2%となり,SD試験体と比べて高い変形 回復率を示した。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たと考えられる。SEA-N 試験体の変形回復率は第3載荷において91.5%,第5載 荷で 91.3%, 第6載荷で 97.4%となり, 第3載荷におい 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3 載荷において 77.5%, 第 5 載荷で 87.7%, 第 6 載荷で 97.1%となった。これは、圧縮側主筋が普通鉄筋である SEA 試験体に比べ SEB 及び SEB-N 試験体は圧縮側・ 引張側両方の主筋を SEA に代替している為,変位量の 大きい第6載荷において顕著に変形回復能力が現れた ものと見られる。SEB-N 試験体の変形回復率は第3載 荷 76.3%, 第 5 載荷 91.5%, 第 3 載荷 96.7%と SEB 試 験体同様に高い変形回復率を示した。



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



Fig.8 Rate Change of Transit Time After 6 Cyclic for SD. @6SEB-N and @8SEB-N Specimens



Photo 1 Cracking Pattern of RC Beam Specimens After 6 Cyclic Loading Test



SD-N (D6)

SEA (φ8)

1/40

1/40

SEB (ø8)

1/150①

1/1502 1/150③ 1/75① 1/75②

1/40

150D

1/1502 1/1503 1/75① 1/75②

1/40

1/40

1/40

Fig.9 Flexural Load vs. Deformation Curves of SD, SD-N, SEA, SEA-N, SEB, and SEB-N RC Beam Specimens for 6 Cyclic Loading Tests

5.3 ひび割れ閉塞率

Fig.10に直径 φ6 及び φ8 各試験体の最大ひび割れ幅 及び残留ひび割れ幅を示す。なお、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閉塞率を算 出した。第6載荷における φ6 の各試験のひび割れ閉 塞率は、SD 試験体が、第6 載荷における最大ひび割れ 幅 4.66mm, 残留ひび割れ幅 3.49mm となり, ひび割れ 閉塞率が25%となった。第1載荷において主筋が降伏 したこと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。SD-N 試験体に関しては,第 6載荷における最大ひび割れ幅 3.78mm, 残留ひび割れ 幅 2.48mm となり、ひび割れ閉塞率 34%と低い値を示 した。SEA 試験体及び SEA-N 試験体の第6載荷におけ る最大ひび割れ幅 4.56mm 及び 4.64mm, 残留ひび割れ 幅 0.62mm 及び 0.23mm となり、ひび割れ閉塞率 86% 及び 95%と SD 試験体に比べ高いひび割れ閉塞率を示 した。SEB 試験体及び SEB-N 試験体に関しては、第6

見られる。 5 5 SD (φ6) SD-N (φ6) 4 4 29% 3 3 40% <u>46%</u> 46<u>%</u> 2 2 \mathbf{V} 48% 52% 60% 58<u>%</u> <u>69%</u> 78<u>%</u> 1 1 V V \mathbf{V} 0 0 I nd Ⅲrd VIth ∏Ird ∏ nd IVth Vth I nd ∏ nd IVth Vth 5 5 SEA (**φ**6) SEA (φ8) 4 4 3 3 81% 86% 89% 2 2 79% 83% <u>86%</u> 77% 83% 50% 1 1 ↓ V \mathbf{V} \mathbf{V} 0 0 I nd IVth Vth VIth \amalg^{nd} ∏I rd I nd ∏ nd ∏I rd IVth 5 Crack Width (mm) Crack Width (mm) 0 1 2 2 9 4 5 SEA-N (φ8) SEA-N (φ6) 4 90% 3 89% 85% 2 85% 80<u>%</u> 90<u>%</u> 89% 59% 86% 1 ↓ 0 I nd I nd ∏ nd ∏II rd IVth Vth VIth ∏ nd ∏Ird IVth 5 5 SEB (φ8) SEB (φ6) 4 4 89% 3 3 86% 2 2 81% 62% 79% 88% 80% 85% 61% 1 1 \mathbf{V} \mathbf{V} 0 0 I nd $\mathrm{IV}^{\mathrm{th}}$ $\mathrm{V}^{\,\text{th}}$ I nd $\Pi^{\ nd}$ $\mathrm{I\!I\!I}^{\,rd}$ VIth ∏ nd IVth Ⅲrd 5 5 SEB-N (φ8) SEB-N (φ6) 4 4 3 3 94% 77% 86% 2 2 72% 65% 52% **86**% 67% 73% 1 ↓ 1 \mathbf{V} ¥ A 0 rd IVth Cycle IVth I nd I nd ∏ nd ∏I rd Vth ∏ nd III rd VIth Cycle

載荷における最大ひび割れ幅 4.71mm 及び 4.52mm,残 留ひび割れ幅 0.14mm 及び 0.18mm となり, ひび割れ閉 塞率96%及び95%と共に高いひび割れ閉塞率を示した。 第6載荷における φ8 の各試験体のひび割れ閉塞率は, SEA 試験体に関しては、第6載荷における最大ひび割 れ幅 4.55mm, 残留ひび割れ幅 0.15mm となり, ひび割 れ閉塞率が 96% となった。SEA-N 試験体の第6載荷に おける最大ひび割れ幅 3.87mm,残留ひび割れ幅 0.20mm となり、ひび割れ閉塞率 94%となった。SEB 試 験体の第6載荷における最大ひび割れ幅4.54mm,残留 ひび割れ幅 0.29mm となり、ひび割れ閉塞率 93%とな った。SEB-N 試験体の第6載荷における最大ひび割れ 幅 4.53mm, 残留ひび割れ幅 0.25mm となり, ひび割れ 閉塞率 94%となった。SEA と主筋を覆うコンクリート に付着性が無いことで SEA の変形回復能力が発揮さ れ、試験体のひび割れの閉塞に著しく影響するものと

34%

VIth



Fig.10 Crack Width Recovery after Repeated Loading of SD, SD-N, SEA, SEA-N, SEB, and SEB-N RC Beam Specimens

6. 結論

本研究では、SEAの形状及び付着性状が及ぼすRC梁 部材の力学的性能の検討を目的とし、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、SEAの直径を太 くした場合でもSEAの特性が維持されることを確認し た。付着性状に関しては、主筋とコンクリートとの付 着性の無い試験体の方が、付着性のある試験体に比べ 残留ひび割れ幅の抑制に効果を発揮している。

また,既往の研究^{5)、の}において SEA を主筋にした場 合,普通鉄筋を主筋に用いた SD 試験体に比べ曲げ強 度が低いことが問題視されていたが,今回, φ 8 の SEA を用いた試験体において, φ 6 の SEA を用いた試験体 の曲げ強度を上回ったことを確認した。さらに, φ 8SEB 試験体においては, SD 試験体同等の曲げ強度を発現し たことで,SEA を主筋に代替する事による既往の研究 ^{5)、の}に対する剛性の改善が確認出来た。また,SEA を用 いた RC 梁部材の繰返し修復性能が高いことが証明さ れた。

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.
- Pareek, S. and Oohira, A., "A Fundamental Study on Regain of Flexural Strength of Mortars by Using a Selfrepair Network System", Proceeding of 3rd International Conference on Self-Healing Materials, Bath, 2011.

- 第田 廣樹,大平 旭洋, Sanjay PAREEK, "ネットー 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しての検討",コンク リート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1445-1450, 2011.
- 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梁部材の付着性が及ぼす 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
- 上野 拓, 尾形 雅人, 荒木 慶一, Sanjay PAREEK,
 "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", コンクリート工学年次論文 集, Vol.37, No.1, pp.1309-1314, 2015.