

論文 超弾性合金を用いた自己復元型 RC 梁における損傷誘導スリットが損傷性状に及ぼす影響に関する実験研究

深井 宙気*¹・岩島 良樹*²・鈴木 裕介*³・谷口 与史也*⁴

要旨：本研究は、中層 RC 建物を対象とし、地震被害を最小にとどめ、迅速に回復できる継続利用性のある損傷制御型工法の開発を目的とする。本論文では、地震荷重時に降伏ヒンジ領域となる梁端部に超弾性合金を配筋し、同領域に損傷誘導のためのスリットを設けた RC 梁部材を提案し、そのスリットの深さを変数とした静的載荷実験を通し、構造性能及び損傷性状について従来梁部材との比較検討を行った。超弾性合金を用いた部材は従来部材に比べて高い自己復元効果が確認された。また、終局状態において、従来部材ではせん断ひび割れによる損傷の進行が見られたが、超弾性合金を用いた部材では端部の曲げ変形が卓越し、損傷性状にも大きな違いが確認された。

キーワード：自己復元, 損傷制御, 損傷性状, 超弾性合金, RC 梁, RC 造建物

1. はじめに

地震被害を最小にとどめ、迅速に回復できる強靱な社会の構築を目指す上で、建物が地震後も継続して利用できることが重要である。中層程度の RC 造建物の耐震設計では、超高層建物で用いられるような免震構造などの耐震架構は総工費に対する導入コストが高く適用が難しい。また、低層建物ほどは十分な耐震壁を確保することも難しいため、各部材の損傷による靱性能にも期待した設計となるので大地震後の継続利用を志向することが難しい。東北地方太平洋沖地震においても地下 1 階、地上 6 階、塔屋 1 階の中層 RC 建物の境界梁がせん断破壊し、被災度区分判定基準で大破に分類されたため取り壊しに至った例などが挙げられる^{1,2)}。本研究では、このような中規模 RC 建物を対象に地震後の継続利用を志向した新しい損傷制御型工法の開発を目指す。

著者らはこれまで、超弾性合金 (Super-Elastic Alloy 以下, SEA) を降伏ヒンジ領域に配筋することで、部材が大変形に至った後でも、SEA の超弾性効果により変形回復しひび割れが閉塞する自己復元型 RC 部材の開発を進めている^{3,4,5)}。本研究では、この自己復元型 RC 梁に対し、梁端下端に損傷誘導のためのスリットを設けることで、SEA 配筋部に損傷集中させて自己復元効果をより高める RC 梁部材を計画する。この梁の静的載荷実験を通し、同部材の構造性能と損傷性状について検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体計画及び概要

試験体は中層 RC 造建物におけるスラブ付の梁を想定

する。図-1 に従来鉄筋を使用した梁部材と SEA を使用した提案梁部材における終局状態を示す。SEA 配筋部に損傷を集中させる目的に即し、梁端部において、下端引張のフェイス (図中の左端) では SEA の降伏が先行し、他端ではスラブ筋を含む上端筋の降伏に対し下端コンクリートの圧壊が先行するように計画する。これにより、地震時の部材の変形と損傷を梁端部下端に集約させる。図-2 に後述の SEA-RC-v25-i を例に試験体形状及び配筋図、図-3 に各試験体の断面詳細、図-4 に SEA 配筋部の詳細図を示す。試験体は水平荷重時曲げモーメント分布の反曲点までを切出した 1/3 スケールの片持ち梁とした。表-1 に各試験体諸元を示す。下端筋に異形鉄筋を用いた SD-RC、端部下端筋に SEA を配筋し、同領域に梁下端からせい方向にそれぞれ 25, 100 mm のスリットを設けた SEA-RC-v25-i (i=1,2 の 2 体), SEA-RC-v100 の計 4 体を準備した。また、本実験においてはスリット部分の SEA を露出させているが、実用の際には SEA の腐食を考慮し、応力を負担しないような、埋設材料を検討する必要がある。表-1 中には、梁端下端が圧縮側となるときの曲げ強度 (Q_{mu}) 及びせん断強度 (Q_{umin}) の設計値を示している。なお、せん断強度の算出には、荒川 min 式を用いたが、その時の応力中心間距離を、「A 案：スリットを無視した有効せい d に対し、 $j = \frac{7}{8}d$ としたもの」、「B 案：スリットによる断面欠損を考慮し、圧縮側コンクリート及び鉄筋から求められた圧縮合力と引張鉄筋合力との距離で求めたもの」の 2 案で算出している。なお、設計値は、各材料の基準強度を用いて算出した値である。各試験体の設計方針として、梁端下端が引張側

*1 大阪公立大学 大学院工学研究科 都市系専攻 (学生会員)

*2 大阪市立大学 大学院工学研究科 都市系専攻

*3 大阪公立大学 大学院工学研究科 都市系専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 大阪公立大学 大学院工学研究科 都市系専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

となる加力方向時には、4体ともに曲げ降伏が先行するよう計画した。一方で、梁端下端が圧縮側となる加力方向時には、SD-RC がせん断破壊先行、これに対しスリットを設けた SEA-RC は図-5 に示す通りスリット深さがせん断余裕度に影響することを考慮し、SEA-RC-v25-i は A 案の場合、SEA-RC-v100 は両案ともに梁端下端の曲げ圧壊が先行するよう計画した。

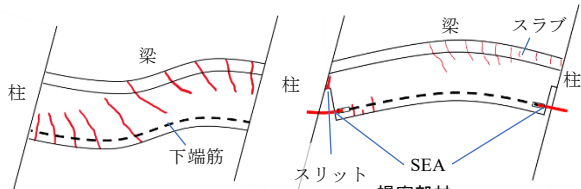


図-1 想定する梁部材の破壊モード

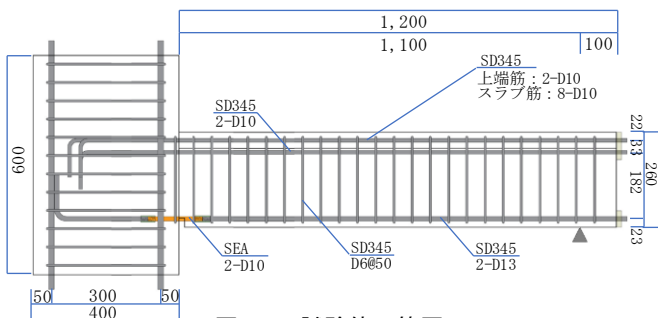


図-2 試験体配筋図

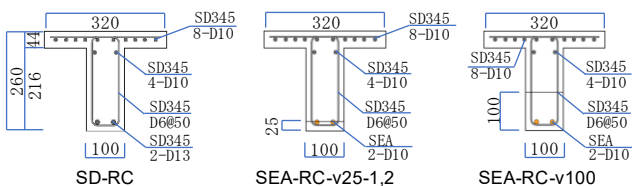


図-3 各試験体梁断面図

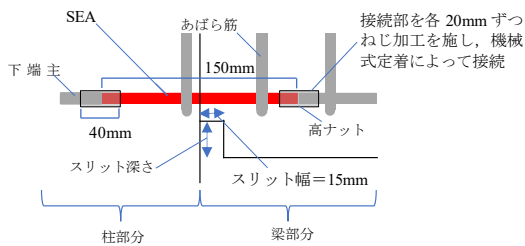


図-4 SEA 配筋部詳細

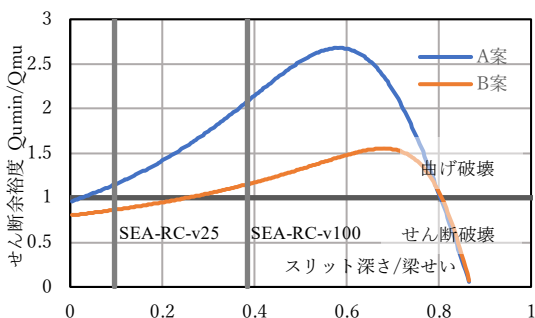


図-5 スリット深さ-せん断余裕度関係

表-1 試験体諸元

試験体名	SD-RC	SEA-RC-v25	SEA-RC-v100
梁幅 b (mm) × 梁成 D (mm)	100×260		
スラブ幅 B (mm) × スラブ厚 t (mm)	320×44		
スパン(mm)	1200		
スリット幅(mm)	15		
スリット深さ(mm)	25		100
主筋	上端筋	4-D10 (SD345)	
	下端筋 ※梁端部を除く	2-D13 (SD345) 端部:M12 切削ねじ加工	
スラブ筋	8-D13 (SD345)		
SEA(梁端部下端筋)	φ10.6mm 端部:M12 転造ねじ加工		
あばら筋	D6@50mm (SD345) 溶接閉鎖型		
曲げ圧壊時せん断力 Q_{mu} (kN)	62.7	35.9	19.8
荒川 min 式せん断終局強度 Q_{umin} (kN)	41.9	A 案 42.0	B 案 31.6
		A 案 42.9	B 案 23.2

表-3 コンクリート圧縮試験結果

基準強度 N/mm^2	材齢 日	圧縮強度 N/mm^2	圧縮強度時ひずみ度%	ヤング係数 N/mm^2
Fc24	28	37.5	0.19	28881
	33	37.7	0.20	29505
	41	38.1	0.20	28357
	45	36.5	0.19	29174
	52	35.2	0.18	29166

表-4 鉄筋引張試験結果

呼び径	ヤング係数 N/mm^2	降伏点 N/mm^2	降伏時ひずみ度%
D6	196656	421	0.21
D6 圧接	203746	443	0.22
D10	184802	385	0.21
D13	174105	391	0.22

表-5 SEA 材料特性

試験体名	No	ヤング係数 N/mm^2	降伏応力 N/mm^2	降伏時ひずみ度%
SEA-RC-v25-1	1	24857	125.2	0.50
	2	18296	151.7	0.83
SEA-RC-v25-2	3	22396	162.8	0.73
	4	18192	154.6	0.85
SEA-RC-v100	5	24950	144.4	0.58
	6	28017	143.1	0.51

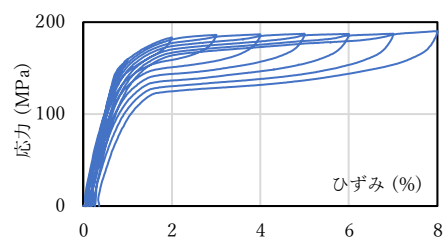


図-6 SEA 応力-ひずみ関係

2.2 使用材料特性

表-3~5 にコンクリート及び各補強筋の材料特性をそれぞれ示す。コンクリートは、設計基準強度 24 N/mm^2 とした。コンクリート及び各鉄筋の結果は試験片 3 体の平均を示している。SEA については、個体のばらつきがみられるため、使用した試験体とそれぞれの値を示している。図-6 に SEA(No.1)の応力-ひずみ曲線を示す。

2.3 荷重方法及び測定方法

図-7 に各試験体の荷重及び測定状況を示す。荷重方法として、試験体を 90 度回転させて反力床に PC 鋼棒で緊結し、反力フレームに取りつけたオイルジャッキによって正負交番の繰返し荷重を与えた。その際、オイルジャッキ位置の水平変位(δ)をスパン(l)で除した部材角 $R = \delta/l$ で梁断面の上端圧縮・下端引張となる方向を正として制御した。荷重履歴はいずれの試験体も、部材角 $R = \pm 0.125\%, \pm 0.25\%, \pm 0.5\%, \pm 1.0\%, \pm 1.5\%, \pm 2.0\%, \pm 3.0\%, \pm 4.0\%, \pm 5.0\%$ とした。測定項目は、荷重点荷重、荷重点の水平変位、梁端から 100mm 間隔 2 区間 (以下、区間 I 及び II) の部材軸方向及び 45 度方向変位、並びに、梁断面の各補強筋のひずみ度である。なお、部材軸方向変位から曲率を、45 度方向変位からせん断ひずみを算出した。

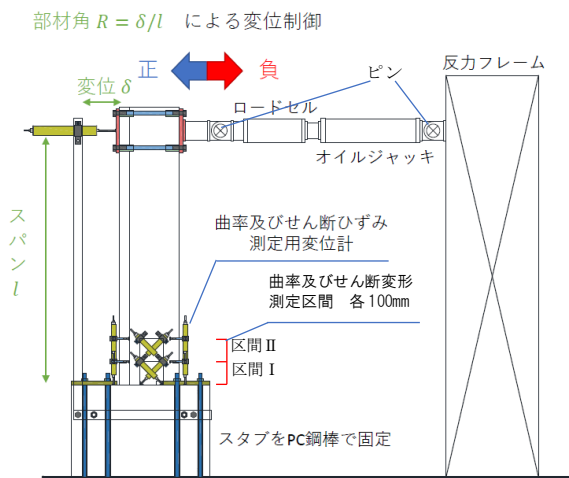


図-7 荷重試験の様子

3. 実験結果

3.1 強度結果及び荷重変形関係

表-6 に各強度結果一覧を示す。設計時に正負それぞれで想定した強度を満足するかを比較するため、表中の値は正側の下端筋降伏時、負側のせん断破壊時または下端曲げ圧壊時のせん断力のみを示している。計算値は、材料試験結果を用いて設計値を再計算したものである。曲げ圧壊時の実験値は、区間 I に取付けた部材軸方向変位の値から、圧縮側最外縁コンクリートのひずみ度を算出しこれが 0.3% に至った時のせん断力とした。図-8 に荷重-変形関係を示す。SEA-RC-v25-i の図は紙面の都合

上、1 体のみ ($i=1$) の表記としている。また、本研究では、梁部材の変形時に損傷誘導スリットが損傷性状に与える影響を検討するため、全試験体とも部材角 $R = 5.0\%$ までの荷重とし、それ以降の SEA の破断や梁部材の耐力低下については考慮しないものとする。

正側において、実験値と計算値を比較すると、いずれの試験体も同等の値を示し良い対応が見られた。荷重-変形関係を見ると、いずれも +5% まで耐力低下せず曲げ降伏型の性状が確認できた。また、SD-RC は曲げ降伏とともに安定した履歴性状を示し、最終サイクルにおいて正側ピーク荷重時の部材角に対する除荷時の残留部材角の比が 0.84 程度であるのに対して、SEA-RC の 3 体は曲げ降伏後においても SEA-RC では全試験体とも原点付近まで変形が回復しており、SEA の超弾性効果による高い自己復元能力を確認することができた。負側において、表-6 の結果を比較すると、曲げ圧壊時の実験値と計算値に差が見られる。実験値は、区間 I の変位計による平均的なひずみ度を用いているため、十分な精度が得られていない可能性がある。また、写真-1 に示す通り、実験において圧縮側最外縁コンクリートのひずみ度が 0.3% に至った時を観察すると圧壊がそれほど進行していないため、実験値は圧壊時せん断力を過小評価していると考えられる。荷重変形関係の負側を見ると、SD-RC の負側は正側に比べスリップ型の性状を示し、最終サイクルで耐力低下が見られた。せん断余裕度が 0.7 程度であり、せん断破壊を想定していたが、上端筋降伏 (負側荷重: 59.8 kN) が先行し、-5% に至るまでせん断破壊と判断できる明確な挙動は確認できなかった。この原因については引続き検討中である。SEA-RC の 3 体の負側は、当初の計画通り、スラブ筋を含む上端筋の降伏に先行して下端コンクリートの圧壊が生じた。なお、SEA-RC-v25-i は、スリットを考慮した B 案でのせん断余裕度は 0.8 程度であったが、-5% に至るまで耐力低下は見られなかったことから、スリット深さが梁せいに対して小さい内はせん断強度において影響を無視できる可能性がある。また、v100 については検討の余地があり、スリットを有する断面のせん断強度評価に課題が残る。また、正側荷重では、SD-RC に比べ、SEA-RC のエネルギー吸収能力の低下が確認されたが、本研究では、全スパンの梁部材に対する荷重試験は行っていないため、負側荷重時のエネルギー吸収能力も考慮し評価すること、同部材を適用した架構の応答評価などが、今後の課題である。

3.2 曲率及びせん断ひずみの推移

図-9 及び図-10 に部材角に対する曲率、及びせん断ひずみの推移を示す。SEA を用いた試験体 3 体に大きな差は見られなかったため、いずれの図においても、SD-RC

及びSEA-RC-v25-2の2体のみを比較して示す。

図-9から、SD-RCでは曲率区間IIにおいても曲げ変形しており、対して、SEA-RC-v25-2では曲率区間Iの曲げ変形が卓越しており、スリットによる変形誘導の効果が確認できた。また、図-10から、曲率測定区間IIにおいて、SD-RCでは、せん断変形が発生しているのに対して、SEA-RCでは、同領域のせん断変形は見られなかった。また、曲率測定区間Iにおけるせん断変形角については、区間内に曲げひび割れが多数発生しており、曲げ変形の影響が出ていると見られる。他2体においても同様の結果が得られた。

表-6 強度結果一覧

試験体名		SD-RC	SEA-RC-v25-1	SEA-RC-V25-2	SEA-RC-v100
正側	下端筋	Cal. 19.4	6.4	7.4	6.6
	降伏時	Exp. 19.7	6.5	7.8	6.7
負側	曲げ	Cal. 67.6	48.3	47.6	25.7
		Exp. 53.0	34.3	32.6	20.4
	せん断破壊時	A案 Cal. 48.1	48.2	48.0	48.9
		B案 Cal. 37.8	37.5	26.8	
せん断余裕度*	A案 0.71	1.00	1.01	1.90	
	B案	0.78	0.79	1.04	

*せん断余裕度=せん断破壊時せん断力/曲げ圧壊時せん断力 Cal.

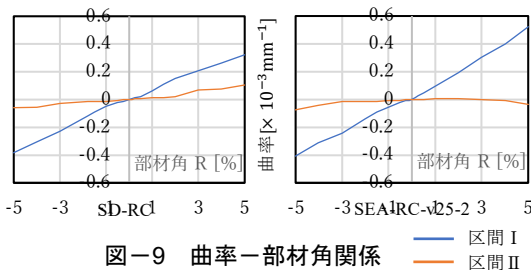


図-9 曲率-部材角関係

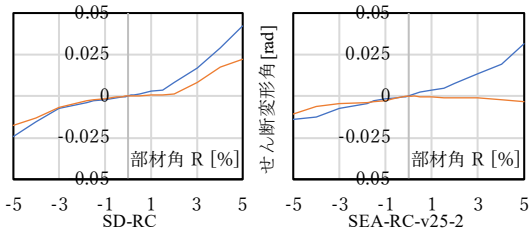
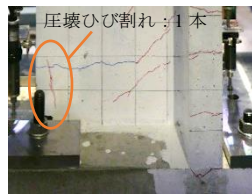


図-10 せん断変形角-部材角関係

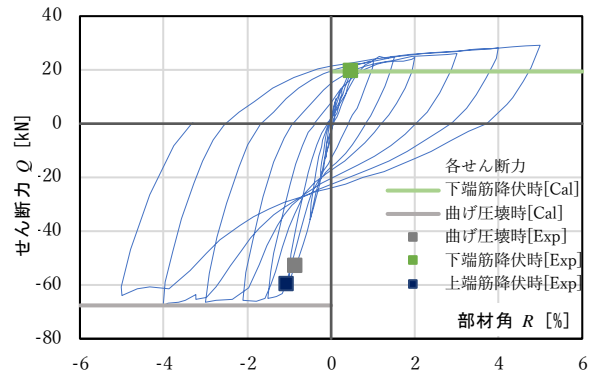


SEA-RC-v25-1

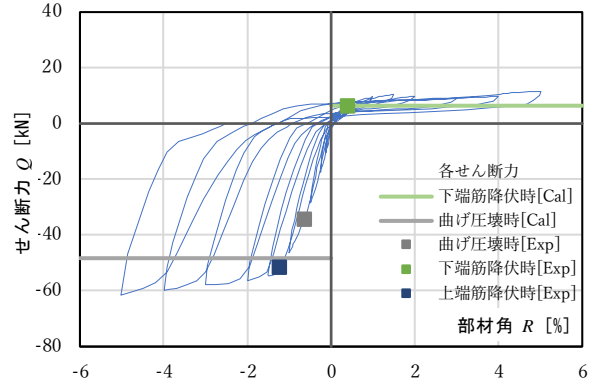


SEA-RC-v25-2

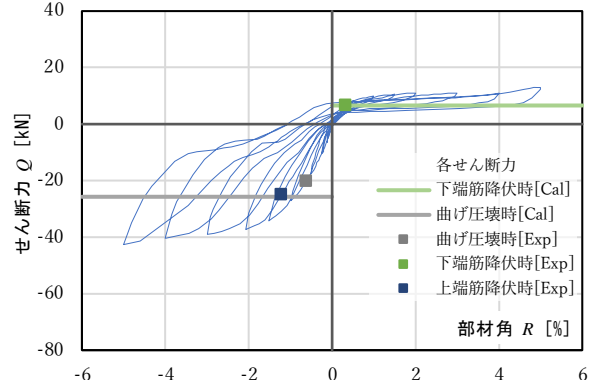
写真-1 曲げ圧壊判定時の梁端部の性状



SD-RC



SEA-RC-v25-1



SEA-RC-v100

図-8 荷重-変形関係

3.3 破壊経過及び最終破壊状況

図-11に各試験体の $R=\pm 2.0\%$ 荷重サイクル終了時におけるひび割れ状況を示す。正側の荷重サイクルについては、全ての試験体において、 $+0.125\%$ サイクル時に梁端部に初期曲げひび割れが発生した。SD-RCでは $+0.25\%$ サイクル時点で梁端部から $2D$ (D : 梁せい) の範囲に曲げひび割れが多数発生し、 $+1.0\%$ サイクルで梁端部から $3D$ の範囲に曲げひび割れが確認できた。対して、SEA-RC-v25-1,2では $+1.0\%$ サイクル時点では梁端部から $1.5D$ の範囲に曲げひび割れが発生し、最終破壊状況においては $2D$ の範囲に曲げひび割れが発生していた。SEA-RC-v100では、 $+1.5\%$ サイクルを経験した後も曲げひび割れは

端部から $1D$ の範囲にとどまっていた。最終破壊状況においては $2D$ の範囲に曲げひび割れが発生していた。曲げひび割れの本数においても SEA-RC-v100 が最も少なく、より端部に損傷が誘導されていることが確認された。また、全ての試験体において端部(スリット部)のひび割れが最も拡幅していた。

負側の荷重サイクルについて、全ての試験体において、 -0.5% サイクルでせん断ひび割れが発生し、その後 SD-RC では -2.0% サイクルで圧壊ひび割れが発生した。SEA-RC-v25 では両試験体とも -1.0% サイクルにおいて圧壊ひび割れが確認でき、SEA-RC-v100 では、 -3.0% サイクルにおいて圧壊ひび割れが確認された。

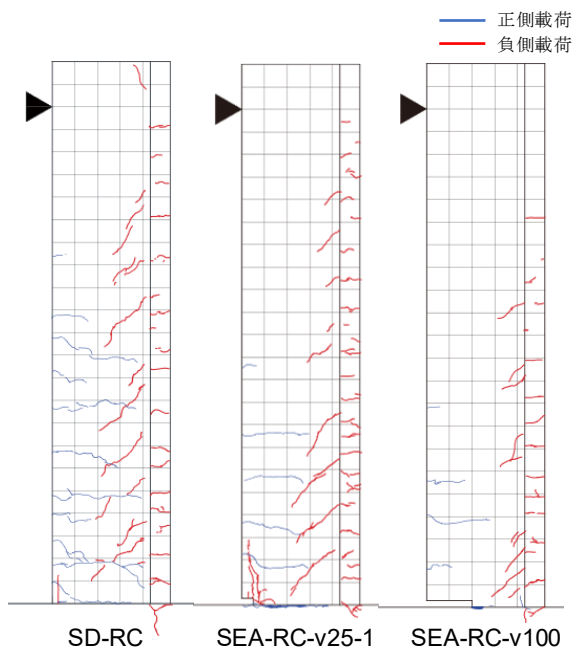


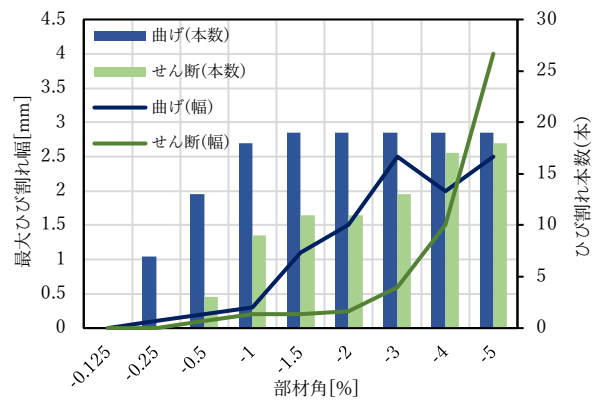
図-11 R=±2.0%経過後ひび割れ図

3.4 破壊モードの検討

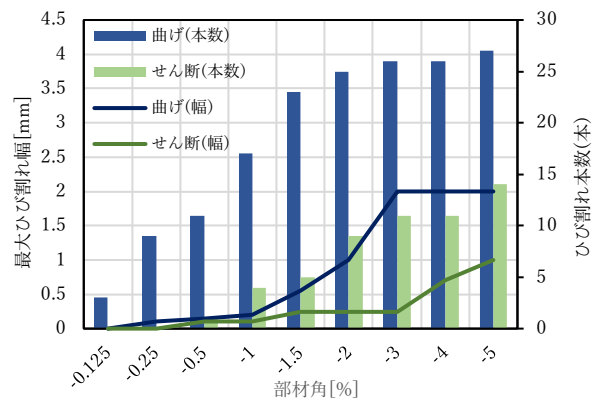
図-12 に正側荷重時における曲率(区間 I)一端部曲げひび割れ幅の関係を示す。SEA-RC-v25-i の図は紙面の都合上、1 体のみ ($i=1$) の表記としている。左図は各荷重サイクルのピーク荷重時の最大ひび割れ幅を、右図は除荷時の残留ひび割れ幅をそれぞれ示す。SD-RC のみ残留ひび割れ幅の拡幅が確認された。これに対し、SEA-RC では最大ひび割れ幅に対して、残留ひび割れ幅が大幅に抑えられていることが確認され、大変形後も部材の損傷度を小さく評価できる可能性があることを示した。

図-13 に負側荷重時における端部曲げひび割れとせん断ひび割れについて部材角との関係を示す。曲げひび割れは部材軸方向に概ね直交するものと、せん断ひび割れは部材軸方向に対し概ね 45° 方向のものと判定した。曲げ変形が卓越していた正側荷重時の変形と違い負側荷重時には、どの試験体においてもせん断ひび割れの発生が確認された。なかでも、SD-RC が最もせん断破

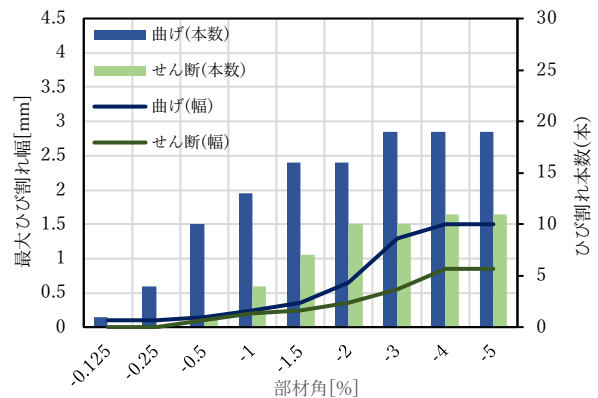
壊が進行しており、そのひび割れの本数も他の試験体に比べ、多いことが確認された。ひび割れ幅についても、SD-RC において $R=-4.0\%$ 以降端部曲げひび割れ幅を上回っている。3.1 節で述べた SD-RC の最終サイクルにおける耐力低下もせん断ひび割れの進行によるものと考えられる。対して、SEA-RC では本数、幅ともにせん断ひび割れが曲げひび割れを上回ることとはなく、 $R=-5.0\%$ サイクルにおいても $1/2$ ほどであった。また、ひび割れ幅、本数ともに SEA-RC-v100 が最も小さい値を示しており、損傷がスリット部の曲げひび割れに集約されていると考えられる。



SD-RC



SEA-RC-v25-1



SEA-RC-v100

図-13 各種ひび割れ幅及び本数一部材角関係

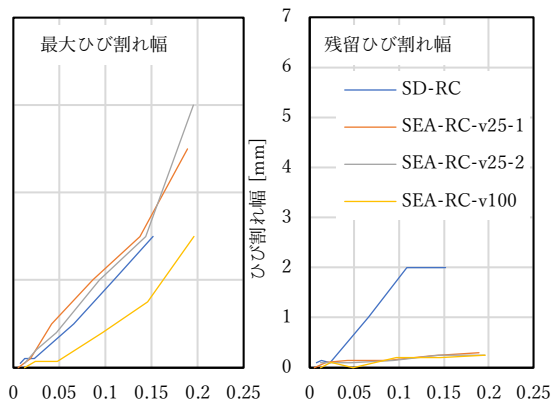
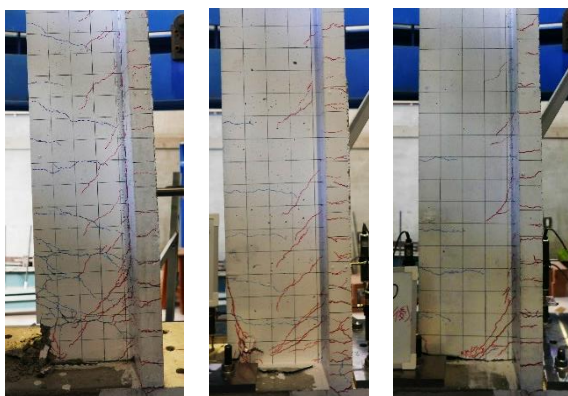


図-12 最大及び残留ひび割れ幅—曲率関係



SD-RC SEA-RC-v25-1 SEA-RC-v100
写真-2 R=±5.0%経過後ひび割れ状況

4. まとめ

本研究では、SEA をヒンジ領域の下端主筋に用い、損傷誘導のためのスリットを設けたスラブ付き梁部材の静的載荷試験を通して、スリットが損傷性状に与える影響について検討を行った。以下に得られた知見を述べる。

- 1) SEA-RC について、提案部材の指向通り、下端圧縮のフェイスでは、上端筋降伏に対して下端コンクリートの圧壊が先行し、上端圧縮のフェイスでは、上端コンクリートの圧壊に対し、下端筋降伏が先行していることが確認できた。
- 2) スリットを有する梁部材におけるせん断耐力の評価については、提案した A, B 案による荒川 min 式を用いて評価する目的であったが、その精度は十分ではなかった。
- 3) SEA-RC では、正側載荷時の主要なひび割れはスリット部に発生し、同ひび割れが拡幅することで部材の全体変形が進展していたのに対して、SD-RC では

端部以外でも曲げ変形が進展しており、スリットによる十分な損傷誘導効果が確認できた。

- 4) 負側載荷時の損傷性状について、SD-RC においては、せん断ひび割れの幅及び本数が増大していたのに対し、SEA-RC は曲げ破壊が支配的であることが確認できた。中でも v100 試験体が最もせん断ひび割れの進行が抑えられていた。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金・基板研究 (C) (課題番号: 22K04414) による助成の下で実施した。また、古河テクノマテリアル 特殊金属事業部 喜瀬 純男 氏には、本試験体の製作に当たり、超弾性合金の材料提供とともに材料特性についてのご助言など、多大なご協力を頂きました。並びに、本実験は、大阪市立大学工学部建築学科 藤田 唯菜 氏に実験実施に当たり多大なご協力を頂きました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2016.
- 2) 加藤祐子, 堀田和敬, 鈴木一希, 高橋之, 前田匡樹, 市之瀬敏勝, 東日本大震災による RC 建物の境界梁被害 その 1 境界梁付き連層耐震壁架構における強度と変形の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.199-200, 2013.
- 3) 鈴木裕介, 上野拓, Sanjay PAREEK, 荒木慶一: 超弾性合金の配筋位置によってヒンジリロケーションした RC 梁の構造性能評価に関する基礎実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1351-1356, 2017.7.
- 4) 古川敦士, 鈴木裕介, 谷口与史也, Sanjay PAREEK: 超弾性合金及びPVA繊維補強による自己復元型RC梁の構造性能に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.187-192, 2019.
- 5) 岩島良樹, 深井宙気, 鈴木裕介, 谷口与史也: 超弾性合金を用いた損傷制御型RC梁の正負交番載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, 2022, pp.209-212, 2022.7.
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018.
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性設計施工指針・同解説, 2016.