

論文 FRP スtrandシートを用いたあと施工せん断補強におけるエポキシ樹脂モルタルが定着に与える影響

東 洋輔*1・藤嶋 涼*2・立石 晶洋*3・三宅 央真*4

要旨：本論では腐食しない材料で既設部材のせん断耐力を補強する工法である，両端を拡底した繊維補強ポリマーStrandシートを用いたあと施工せん断補強工法において，施工性を改善することを目的に，樹脂の種類や骨材の種類を変えて施工性を評価した。さらに，変更した樹脂および骨材の仕様で引抜き試験や高応力繰返し載荷試験を行い，定着性能を評価した。結果として，含浸接着用のエポキシ樹脂に珪砂 6 号を重量比 2 対 1 で混合したエポキシ樹脂モルタルを用いれば，材料分離が無く補強材内部への充填性を確保し，その定着性能は補強材の保証耐力を確保でき，高応力繰返し載荷による評価も満足した。

キーワード：せん断補強，あと施工，FRP，エポキシ樹脂モルタル，定着

1. はじめに

経年劣化や設計基準の変化に伴い補強が必要となる場合，既設構造物を対象にするが故に施工上の制約を考慮しなければならない。例えば，鉄筋コンクリート（以下，RC）中空床版橋では，活荷重の変更，幅員や壁高欄形状の変更に伴う死荷重の増加を受け，脆性的な破壊形態に至る可能性のあるせん断耐力が不足する橋梁が存在する。せん断補強工法としては，桁外面に繊維シートを貼付けてせん断耐力を増加させる工法が挙げられるが，外面の面積に限りがある場合，外面繊維シート補強では補強量が不足するため，桁内部に補強材を設置してせん断耐力を増加させる工法が望まれ，さらには既設部材の配筋状況や施工空間確保の観点から，一方端からの施工で部材内部に補強材を配置する補強方法が求められる。

一方端側から既設部材内部にせん断補強が可能な方法として，穿孔内にあと施工プレート定着型せん断補強鉄筋を配置してモルタルを充填し一体化する補強工法¹⁾や，あと施工型せん断補強鉄筋用無機系モルタルカプセルおよびせん断補強鉄筋を用いた補強工法²⁾などが挙げられる。しかしながら，RC 中空床版の床版天端から補強材を配置する場合，腐食要因物質が天端から浸透するため補強材が鋼材である限り腐食が懸念される。

以上の背景を踏まえて，腐食しない補強材である繊維強化ポリマー（以下，FRP）の中でもすだれ状に加工された FRP スtrandシート³⁾（写真-1）に選定した。これは，穿孔内に補強材が自立して挿入できる剛性を持ち，穿孔が多少蛇行していても撓りながら挿入が可能のため鋼材の場合と比較して穿孔径が最小限になり，既設の条件から穿孔長が変更となっても補強材の再手配が必要な

く補強材の長さを現場で容易に切断加工できるため，工期が制限されている工事において，有意性が発揮されるなどの複数のメリットを創出できるためである。筆者らはこの FRP スtrandシートを用いたあと施工せん断補強工法を成立させるため，FRP スtrandシートを束状に丸める際に両端を拡張させこれを定着体とすることを考案してきた。既往の検討では，両端を拡張した FRP スtrandシート（Expansion Fiber Reinforced Polymer Strand Sheets，以下，ExSS）を穿孔内に配置し，引抜き試験による定着性能評価から弾性エポキシパテ製の成形材（以下，渦巻拡底材）を用いた拡底方法で拡底角度を 3° とすると FRP スtrandシートの保証耐力を確保できること⁴⁾，RC 桁内部に対して ExSS によりあと施工せん断補強を行い，補強の有無によるせん断載荷試験評価から，ExSS によるあと施工せん断補強によって無補強に対してせん断耐力が増加すること⁵⁾を明らかにしてきた。

本論では ExSS を用いたあと施工せん断補強工法において，従来の方法よりもさらに施工性を改善することを目的に，樹脂の種類や骨材の種類を変えて施工性を評価



写真-1 FRP スtrandシート

*1 オリエンタル白石（株） 本社 技術本部 技術研究所 主任研究員（正会員）

*2 オリエンタル白石（株） 本社 技術本部 技術研究所 研究員

*3 日鉄ケミカル&マテリアル（株） コンポジット事業部 社会資本材料部 補強材料グループ（正会員）

*4 日鉄ケミカル&マテリアル（株） コンポジット事業部 社会資本材料部 材料技術センター

した。さらに、変更した仕様で引抜き試験や高応力繰返し載荷試験を行い、定着性能を評価した内容を示す。

2. FRP スtrandシートによるせん断補強工法の概要

FRP スtrandシートを用いたせん断補強工法について説明する。せん断補強工法の概要は図-1 に示すとおりで、既設鉄筋に干渉しない位置を決定しコアドリルにより削孔し、既設部材内部に補強材を配置する。例えばRC 中空床版橋であれば、中空部ではないコンクリートウェブの位置となり、鉛直方向に削孔する。その後、穿孔内に ExSS を配置するが、ExSS は FRP スtrandシートを端部に設置した厚みを有する渦巻拡底材と一緒に束状に丸めることで両端部を拡底させ、この形状によって定着体として機能させている。ExSS の定着機構はこれまでの検討⁴⁾から、図-2 に示すようになる。すなわち、ExSS に引張作用(黒矢印)が発生した際、コンクリートと樹脂界面の付着(赤矢印)、樹脂と ExSS 界面の付着(緑矢印)、拡底部がくさび形状であり拡底に直交する方向で発生する支圧(青矢印)の3成分が抵抗する。ExSS を設置した以降はエポキシ樹脂により一体化するが、エポキシ樹脂は厚みが大きくなると反応熱による硬化物性への悪影響が懸念されたため、従来の検討においては ExSS と穿孔部との隙間に呼び1分5厘の骨材(砕石)を充填しておき、残りの隙間に対してケミカルポンプを用いてエポキシ樹脂により充填することで一体化していた。しかしながら、骨材を充填する工程やケミカルポンプでの注入工程の際に時間を要し施工性が悪くなるといった課題があった。そこで、本検討では砕石を充填する工程や充填作業時間を減ずることを目的に、穿孔部にエポキシ樹脂あるいは骨材を含んだエポキシ樹脂モルタルを流し込む方法で先入れし、その後 ExSS を挿入設置する方法を検討することとした。さらに、エポキシ樹脂の種類や配合割合を変えたエポキシ樹脂モルタルを用いて引抜き試験を行い、定着性能に及ぼす影響を評価した。

3. 使用材料および ExSS の諸元

本論では樹脂の施工評価、引抜き試験による定着性能評価、一軸引張を繰返し与える高応力繰返しによる定着性能評価の3種類について行った。

使用材料を表-1 に示す。FRP スtrandシートは炭素繊維とエポキシ樹脂で構成され、引張強度 4620 N/mm² (保証強度: 3400N/mm²)、引張弾性率 263kN/mm² (規格: 221~282kN/mm²) である。樹脂は常温硬化型のエポキシ樹脂を3種類(含浸接着用、汎用プライマー、湿潤面用プライマー)用意した。エポキシ樹脂に添加する骨材は2種類(珪砂6号、珪砂5号)用意したが、骨材を使用する目的としては、エポキシ樹脂使用量を減ずることで

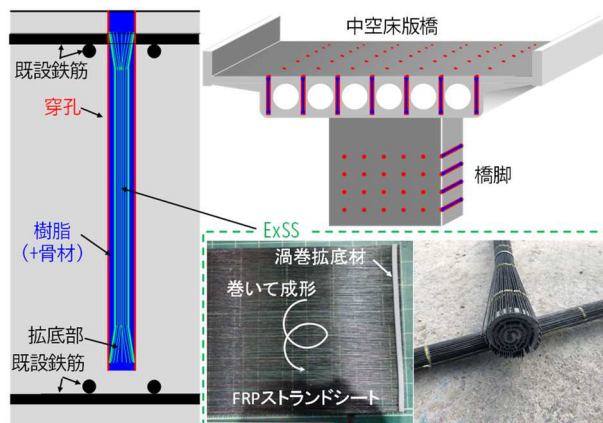


図-1 ExSS 工法の概要

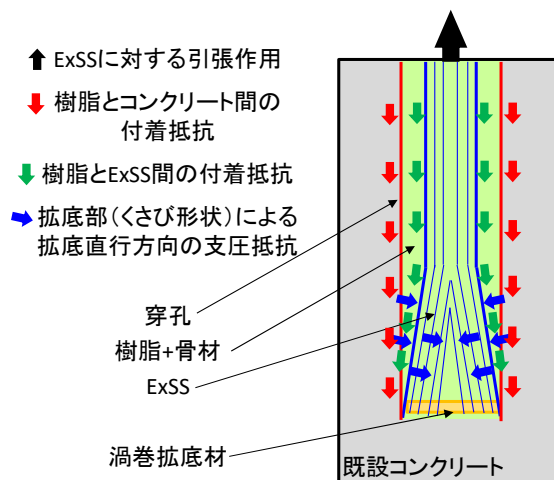


図-2 ExSS の定着機構⁴⁾

表-1 使用材料

材料名	性状と物性
コンクリート	レディーミクストコンクリート、普通24-12-20H、試験時(材齢19日)圧縮強度37.9N/mm ²
鉄筋	SD345、D19、降伏強度383N/mm ² 、引張強度536N/mm ² SD345、D32、降伏強度415N/mm ² 、引張強度582N/mm ²
FRP スtrandシート	炭素繊維とエポキシ樹脂によるFRP、繊維目付616g/m ² 、引張強度4620N/mm ² 、引張弾性率263kN/mm ²
樹脂A	含浸接着用エポキシ樹脂、2液混合、常温硬化型、引張強度54.0N/mm ² 、引張せん断強度20.4N/mm ²
樹脂B	汎用プライマーエポキシ樹脂、2液混合、常温硬化型、引張強度58.8N/mm ² 、引張せん断強度13.6N/mm ²
樹脂C	湿潤面用プライマーエポキシ樹脂、2液混合、常温硬化型、引張強度45.3N/mm ² 、引張せん断強度13.6N/mm ²
骨材	砕砂、珪砂6号、珪砂5号
渦巻拡底材	弾性エポキシパテ材、2液混合、常温硬化型、引張強度3.6N/mm ² 、引張伸び率141%、幅5mm、厚さ2.5mm

反応熱を緩和すること、エポキシ樹脂の剛性を向上すること、樹脂量を減じ経済性を改善することである。次に、ExSS の諸元を表-2 に示す。ExSS の繊維量は設計要領第二集⁶⁾に準じて設計強度を 2040N/mm² (保証強度 3400N/mm² の60%) として扱い、SD345 の鉄筋と同程度以上の強度を確保するよう設定している。本実験で検証した補強量は Ex16 (D16 相当)、Ex22 (D22 相当)、Ex29 (D29 相当) および Ex32 (D32 相当) の4種類とした。

4. エポキシ樹脂（モルタル）の施工評価

従来行ってきたケミカルポンプでの注入作業と骨材の先入れ作業の代替手法として、エポキシ樹脂（モルタル）を流し込む方法で先入れし、ExSS をあと挿しする施工方法を考案した。本章では上記施工方法で ExSS 内部へ充填が確実にできるエポキシ樹脂（モルタル）を選定するため施工性の評価（材料分離試験、流動性試験、充填確認試験）を行った。

4.1 実験概要

材料分離試験では、骨材をエポキシ樹脂と混合した場合に材料分離が発生しないか確認を行った。試験水準は表-3 に示すとおりで、樹脂 3 種類、骨材 2 種類を組合せた計 5 水準とした。試験方法は 23℃環境の室内で内径 51mm×高さ 100mm の容器にエポキシ樹脂モルタルを充填し、硬化後に切断した断面において骨材の分離状況を目視確認した。

流動性試験では、23℃あるいは 5℃環境の室内で漏斗に一定量 (0.20) のエポキシ樹脂（モルタル）を入れた状態から流下させ、全てのエポキシ樹脂（モルタル）が流れ切った時間を流下時間として評価した（写真-2）。試験水準は図-3 に示すとおりで、樹脂 3 種類、骨材 2 種類、評価温度 2 種類を組合せた計 23 水準とした。

充填確認試験では、エポキシ樹脂（モルタル）に対して ExSS をあと挿しした際に、ExSS 内にエポキシ樹脂（モルタル）が充填されているかを確認した。試験水準は表-4 に示すとおりで、樹脂 A および C の 2 種類、骨材珪砂 6 号を組合せた計 6 水準とした。温度条件は粘性が高くなる低温度で施工管理限界の 5℃環境下で行い、内径 51mm 高さ 400mm の容器の中にエポキシ樹脂（モルタル）を充填しておき、その後 ExSS (Ex32) の長手方向が鉛直方向となるように容器の上面から自重によりあと挿入し、硬化させた。硬化後は鉛直方向に供試体を切り出し、断面に対して充填状況を目視評価した。

4.2 実験結果

材料分離試験の結果を表-3 に示す。硬化後の供試体の断面観察から、樹脂 B において樹脂層と骨材層が上下に分離し、それ以外の組み合わせでは分離することなく一様に分散した状態が維持されていた。

流動性試験の結果を図-3 に示す。樹脂の種類の影響として、樹脂 C、樹脂 A、樹脂 B の順で流下時間は短くなった。材料分離試験で樹脂 B において材料分離を確認したが、樹脂 B は流動性が高いためこれが影響したものと考えられる。次に、珪砂の混合割合の影響として、混合割合が高くなると流下時間が長くなり、珪砂の混合によって粘性が高くなった影響を受けたものと考えられる。また、珪砂種類の影響として、珪砂 6 号単体と比較して珪砂 5 号と 6 号を混合した場合に流下時間が短くなる傾

表-2 ExSS の諸元

項目	単位	呼び名			
		Ex16	Ex22	Ex29	Ex32
FRPストランドシート幅	mm	110	200	330	410
設計厚さ	mm	0.333	0.333	0.333	0.333
設計断面積	mm ²	36.63	66.60	109.89	136.53
設計強度	N/mm ²	2040	2040	2040	2040
設計荷重	kN	75	136	224	279
保証強度	N/mm ²	3400	3400	3400	3400
保証荷重	kN	125	226	374	464
定着長（拡底部長さ）	mm	110	135	160	185
拡底角度	°	3			
穿孔径	mm	28	34	41	53

表-3 材料分離試験水準および結果

樹脂A: 珪砂6号 2:1	樹脂A:珪砂5 :珪砂6号 2:0.5:0.5	樹脂B: 珪砂6号 1:1	樹脂C: 珪砂6号 2:1	樹脂C:珪砂5 :珪砂6号 2:0.5:0.5
分離無し	分離無し	分離	分離無し	分離無し



写真-2 流動性試験

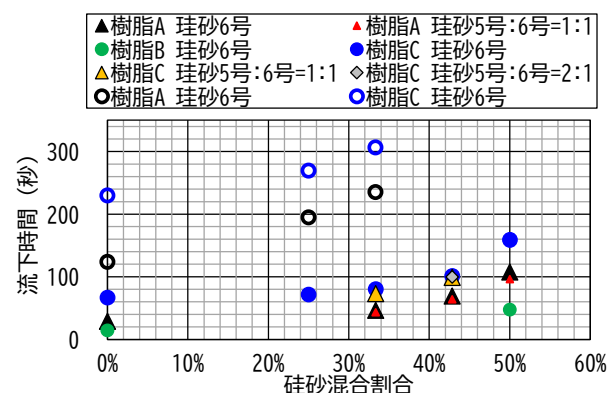


図-3 流動性試験水準および結果

(凡例：塗りつぶし 23℃環境、白抜き 5℃環境)

向を示したが、樹脂種類や珪砂の混合割合よりも影響度は小さくなった。最後に、評価温度の影響として、23℃

環境の場合よりも 5℃環境の方が流下時間は長くなっており、充填性を踏まえると冬場の環境は施工条件として厳しい環境であることが分かる。

充填試験の結果を表-4 に示し、充填状況の例として樹脂 A : 珪砂 6 号=2:1 の ExSS 拡底起点箇所を写真-3 に示す。充填試験では流下時間が長くなる 5℃環境下で実施した 6 水準全てにおいて ExSS のストランドシート内に樹脂や骨材が隅々まで充填されており、表-4 に示す材料であれば樹脂と骨材を併用したエポキシ樹脂モルタルを穿孔内に先に充填し、ExSS をあと挿入したとしても充填性に問題ないことを確認した。

以上の結果から、材料分離試験も良好で充填性試験も良好であった表-4 の水準を合格として扱う。この合格した材料を用いる場合、ExSS1 本あたりの施工時間（削孔工は除く）が従来工法の 1/5 程度に短縮できる。なお、樹脂 B は材料分離試験の結果から不適とし、珪砂 5 号は珪砂 6 号の方が粒度が細かく ExSS 内部への充填性を確実にできると判断し、以降の評価から除外した。

5. 引抜き試験による定着性能評価

本章では 4 章の材料分離試験や ExSS への充填性試験を満足したエポキシ樹脂（モルタル）を用いた時の定着性能を引抜き試験にて評価した。

5.1 実験概要

供試体および試験概要を図-4 に示す。図中には穿孔径や定着長は水準によって異なるため明記していない。供試体は幅 600mm×長さ 1050mm×高さ 600mm のコンクリート製（普通 24-12-20N）とし、部材片側からの施工を再現するため、コアドリルにより鉛直方向に長さ 550mm の削孔を行い、下端からのかぶり 50mm を確保した。穿孔内の下端から所定の定着区間（定着長、コンクリートと樹脂が接着する区間）を確保し、それ以外の区間は樹脂を充填する際にコンクリートとの付着を切るため、穿孔内壁にポリエチレンシートを多層重ねて配置した。その後、穿孔内にエポキシ樹脂（モルタル）を先に流し込みで充填し、ExSS をあと挿入した。ExSS の供試体から出た区間はコルゲート管を用いて樹脂を充填した。樹脂充填時および養生中は樹脂の管理温度範囲内となるよう管理した。なお、穿孔部内部は基本的に乾燥条件としたが、含水状態の影響を評価するため、一部の水準において穿孔内に水を溜めておき、エポキシ樹脂（モルタル）を充填する直前に全ての水を排水して滞水がない状態（穿孔内は濡れている状態）でエポキシ樹脂（モルタル）を施工した。

ExSS 定着部の評価として図-4 に示す引抜き試験を行った。ExSS 上部部に鋼管を膨張材にて定着し、センターホールジャッキを用いて一軸方向への単純引張载荷を

表-4 充填試験水準および結果

樹脂種類	樹脂:珪砂	珪砂種類	充填性
樹脂A	1:0	-	○
	3:1	6号	○
	2:1	6号	○
樹脂C	1:0	-	○
	3:1	6号	○
	2:1	6号	○

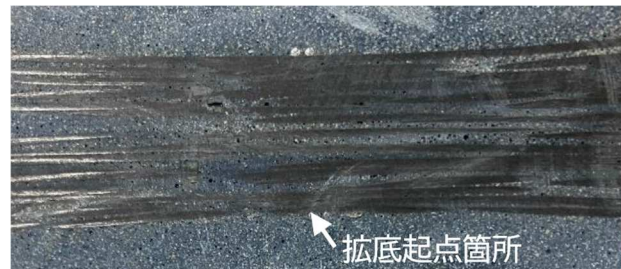


写真-3 充填試験状況の例（樹脂 A : 珪砂 6 号=2:1）

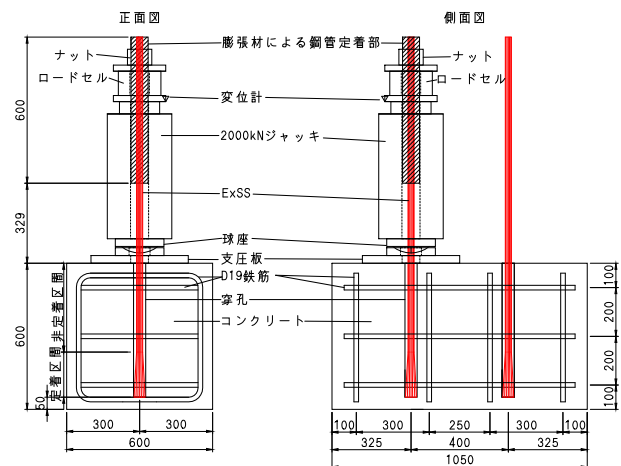


図-4 供試体および試験概要（単位：mm）

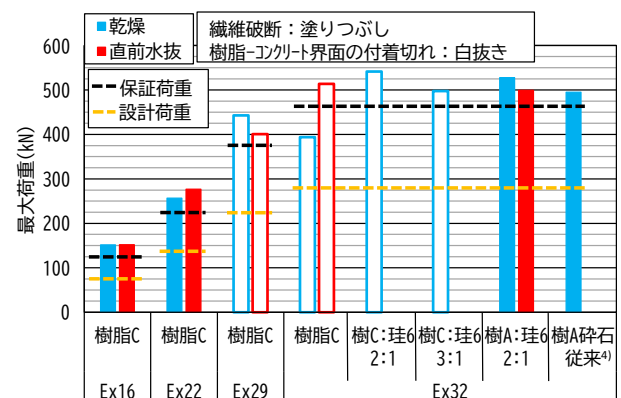


図-5 引抜き試験結果

行った。なお、ジャッキ下には支柱板を設置しコンクリートのコーン破壊ではなく、ExSS 定着部での破壊となるよう配慮した。結果の評価としては、本実験において得られた引抜き試験の最大荷重が保証強度を上回れば定着性能は十分であるとして扱った。

評価は鉄筋定着・継手指針 [2020 年版] ⁷⁾ に示される、「30 回目の上限応力時の抜け出し量 (δ_{30}) が評価基準フックの場合の値以下、かつ 30 回目と 1 回目 (δ_1) の上限応力時の抜け出し量の差が評価基準フックの場合の値以下」であることを指標とした。

6.2 実験結果

高応力繰返し試験の結果一覧を表-5 に、荷重と抜け出し量の関係について基準フック水準を図-7 に、Ex32 で載荷条件が設計強度水準を図-8 に示す。基準フック水準では試験本数が 2 本実施し平均値を扱ったが、 δ_{30} は 2.04mm、 $\delta_{30}-\delta_1$ は 1.00mm となった。これに対し Ex32 で設計強度水準では下端に設置した高感度変位計の中心部と最外部の測定結果の平均値を扱ったが、 δ_{30} は 0.18mm、 $\delta_{30}-\delta_1$ は 0.10mm となり、J フック水準よりも各指標において小さい値を示し、指標を満足することを確認した。したがって、ExSS の定着部は設計荷重に対して、繰返し高応力載荷に耐え得ることが分かった。

7. まとめ

本研究では ExSS を用いたあと施工せん断補強工法において、従来の方法よりもさらに施工性を改善することを目的に、エポキシ樹脂 (モルタル) の種類を変えて施工性を評価し、引抜き試験や高応力繰返し載荷試験を行い定着性能を評価した。本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) 本研究で用いた含浸接着用のエポキシ樹脂に珪砂 6 号を重量比 2 対 1 で混合したエポキシ樹脂モルタルであれば、材料分離はなく、エポキシ樹脂モルタル先入れ ExSS あと挿しの施工であっても ExSS 内部にエポキシ樹脂モルタルは充填される。
- 2) ExSS の引抜き試験から、本研究で用いた含浸接着用のエポキシ樹脂に珪砂 6 号を重量比 2 対 1 で混合したエポキシ樹脂モルタルで施工した Ex32 であれば、ExSS の保証耐力を確保し、破壊形態が ExSS の破断となる。
- 3) ExSS の高応力繰返し載荷試験から、本研究で用いた含浸接着用のエポキシ樹脂に珪砂 6 号を重量比 2 対 1 で混合したエポキシ樹脂モルタルで施工した Ex32 であれば、比較基準とした SD345、D32 の J 型フックと同等以上の性能であることを示した。

参考文献

- 1) 河村圭亮, 畑明仁, 土屋正彦, 岡本晋: 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋を用いた耐震補強工法の開発と技術の信頼性向上への取り組み, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.1, No.1, pp.269-277, 2022.3

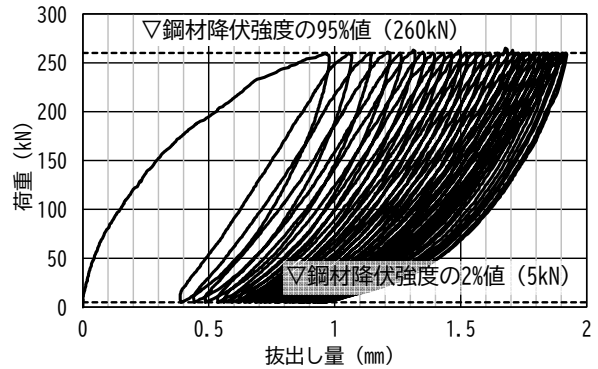


図-7 高応力繰返し載荷結果 (基準フック)

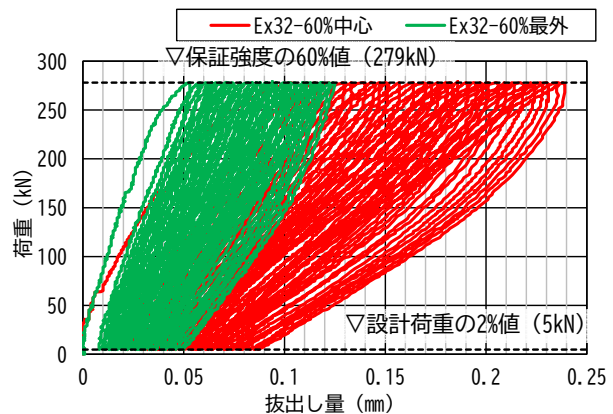


図-8 高応力繰返し載荷結果 (Ex32-60%)

- 2) 土木研究センター: 建設技術審査証明報告書 (土木系材料・製品・技術, 道路保全技術) 第 1203 号 あと施工型せん断補強鉄筋用無機系モルタルカプセルおよびせん断補強鉄筋「RMA」, 2022.8
- 3) 小林朗, 佐藤靖彦, 高橋義裕, 立石晶洋: FRP スtrandシート の材料特性と RC 梁の曲げ補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1561-1566, 2008
- 4) 東洋輔, 渡瀬博, 立石晶洋, 三宅央真: FRP スtrandシートを用いたあと施工せん断補強材における定着方法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.2, pp.721-726, 2024
- 5) 東洋輔, 井隼俊也, 立石晶洋, 三宅央真: FRP スtrandシートを用いたあと施工せん断補強材のせん断補強効果に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.24, pp.653-658, 2024.10
- 6) 東日本高速道路 (株), 中日本高速道路 (株), 西日本高速道路 (株): 設計要領第二集 橋梁保全編 令和 2 年 7 月版, pp.8-54-8-55, 2020.7
- 7) 土木学会: コンクリートライブラリー156 鉄筋定着・継手指針[2020 年版], pp.65-761, 2020.3