

報告 汎用鋼板を樹脂で貼り重ねた既設鉄筋コンクリート柱の性能確認実験

醍醐 宏治*1・丸山 哲郎*2・藤間 誠司*3・笠原 薫*4

要旨：高架下を店舗や事務所として利用している箇所における鉄筋コンクリートラーメン高架橋柱の耐震補強工事では、重機を使用せずに施工できること、施工に支障する設備の撤去・復旧を最小限にとどめることなどが求められる。このような箇所に用いる耐震補強工法の1つとして、薄鋼板を樹脂系接着剤で貼り重ねる耐震補強工法がある。今回、これまで確認されていない板厚1.6mmの汎用薄鋼板について、継手性能の確認試験およびRC試験体柱の正負交番載荷試験を実施した。その結果、所要の薄鋼板の表面状態および接着長を満足することで、上記工法に適用できることを示した。

キーワード：RCラーメン高架橋、薄鋼板、耐震補強、樹脂系接着剤、ブラスト処理、正負交番載荷

1. はじめに

都市部の高架橋をはじめとして、高架下を店舗や事務所などで利用している箇所の耐震補強工事では、大型の施工機械の使用が困難であったり、補強による断面厚の増加が小さい工法が求められる。これらの課題を解決する耐震補強工法の1つとして、薄鋼板を既設鉄筋コンクリート（以降、RC）柱外周に樹脂で貼り重ねる耐震補強工法が挙げられる¹⁾。本工法は、薄鋼板を樹脂系接着剤（以降、接着剤）を用いて柱外周に接着して閉合し、必要枚数分貼り重ねることで既設RC柱のせん断耐力およびじん性を向上させるものである。本工法による耐震補強では柱断面の拡大幅が1辺あたり50mm程度以下で済むため、高架下を店舗や事務所等で利用している場合においては周辺設備の撤去や復旧を最小限に抑えられたり、補強後の高架下占有面積を広くとることができる。また、材料が軽量であり、施工に大型の重機を必要としないため、人力による運搬・取付が可能であるとともに、平行四辺形のような形状の柱にも適用できるなどの利点が挙げられる。

一方で、既往の研究¹⁾で適用性が確認されている薄鋼板厚は最大で1.0mmと薄いため、必要とされる補強鋼材量を満足するための貼り重ね層数が多くなるという課題があった。そこで、本稿では、薄鋼板として板厚1.6mmの鋼板を用いた場合に必要な継手部の接着長の確認として、試験片の引張せん断接着試験およびRC試験体柱の静的正負交番載荷試験の結果について、報告を行う。

2. 板厚1.6mmの薄鋼板を用いた継手部の接着性能

本工法は薄鋼板を接着剤で貼り重ねて既設柱部材の耐震性能を向上させるものであることから、接着剤の引張せん断接着強度が薄鋼板の降伏強度以上を確保すると

もに、所要の伸び性能を有している必要がある。薄鋼板厚を1.6mmとした場合、接着部において従来よりも大きな引張せん断力が薄鋼板に作用するため、所要の接着性能が発揮されるか不明である。そこで、板厚1.6mmの薄鋼板の接着性能を確認するため、試験片を用いた引張せん断接着試験を実施した。

2.1 引張せん断接着試験の概要

表-1に試験パラメータを、図-1に試験片の概要図を示す。全ての試験片の接着材には、表-2に示す物理的性質を有するアクリル樹脂系接着剤を用いた。

Iシリーズの試験では、接着長をパラメータとして、薄鋼板の接着性能を確認した。薄鋼板にはSS400材（JIS G3101）と溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっき鋼板（JIS G3323、以降、高耐食性めっき鋼板）の2種類を用いて試験を行った。また、SS400材については鋼材表面の酸化皮膜（以降、黒皮）の有無が接着性能に及ぼす影響について確認を行った。計算上、継手部の引張せん断接着強度が薄鋼板の引張強度以上となる接着長は42mmとなることから、試験片の接着長は42mmと2.5倍、5倍の余裕を見込んだ105mm、210mm、および本試験が準拠する試験規格JIS K 6850で標準とする12.5mmの4パターンとした。

IIシリーズの試験では、高耐食性めっき鋼板は表面にめっき加工が施されており、接着剤と薄鋼板表面との接着性能が低い可能性が考えられることから、接着性能の向上を目的として高耐食性めっき鋼板の表面にブラスト処理を施したケースである。パラメータは、施工性への影響を考慮し、ブラスト処理の程度およびブラスト処理に用いる研磨剤の粒度とした。ブラスト処理の程度は、鋼板の素地まで露出させるものと、耐食性をできるだけ損なわないことを勘案し、めっき表面の光沢がなくなる

*1 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター 工修 (正会員)

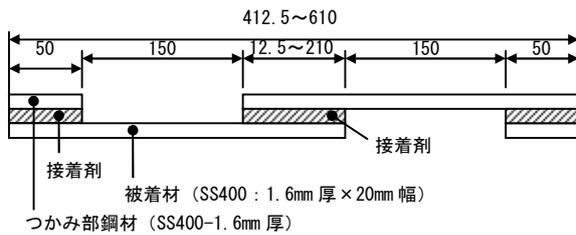
*2 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター (正会員)

*3 電気化学工業(株) インフラ・無機材料部門 技術室 特混町田研究センター センター長 工修 (正会員)

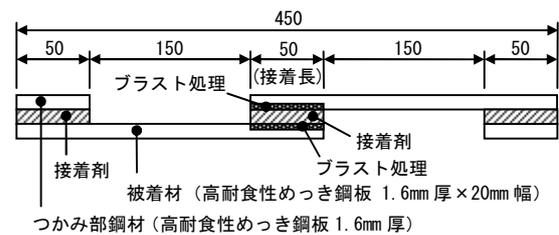
*4 東鉄工業(株) 土木本部 エンジニアリング本部 次長 (正会員)

表-1 試験パラメータおよび試験結果

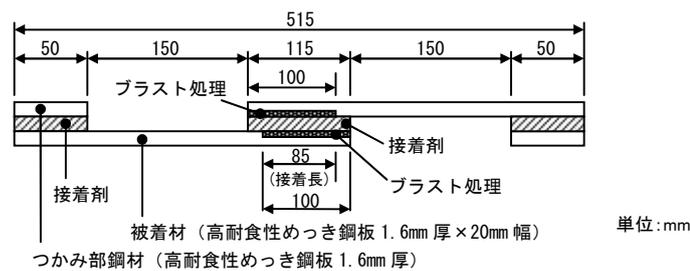
試験片番号	材質	表面状態	接着長 (mm)	降伏応力 (N/mm ²)	最大引張応力 (N/mm ²)	最大伸び率 λ_{max} (%)	破壊形態	
I-1	SS400 (板厚1.6mm)	無処理 (黒皮あり)	12.5	327	193	0.6	凝集破壊	
I-2			42.0		297	2.0	凝集破壊	
I-3			105		391	3.4	凝集破壊	
I-4			210		394	3.9	凝集破壊	
I-5		黒皮なし	12.5		257	213	0.6	凝集破壊
I-6			42.0			297	4.0	凝集破壊
I-7			105			311	6.0	凝集破壊
I-8			210			324	6.9	凝集破壊
I-9	高耐食性 めっき鋼板 (板厚1.6mm)	無処理	12.5	338		134	0.3	界面破壊
I-10			42.0			317	0.6	界面破壊
I-11			105			369	2.0	界面破壊
I-12			210			412	3.7	界面破壊
II-1	高耐食性 めっき鋼板 (板厚1.6mm)	ブラスト処理 素地露出	50.0	338	402	3.9	凝集破壊	
II-2		研磨材：F80	85.0		413	4.9	凝集破壊	
II-3		ブラスト処理 スweepブラスト	50.0		380	3.1	凝集破壊	
II-4		研磨材：F80	85.0		416	5.1	凝集破壊	
II-5		ブラスト処理 スweepブラスト	50.0		384	3.2	凝集破壊	
II-6		研磨材：F150	85.0		411	4.9	凝集破壊	



(a) I-1～I-12 試験片



(b) II-1, 3, 5 試験片



(c) II-2, 4, 6 試験片

図-1 試験片概要図

程度のスweepブラスト²⁾ (ISO (SIS) Sa1) を行うものの2種類とした。ブラスト処理に使用する研磨剤には、F80およびF150 (JIS R 6001) の2種類の粒度を用いて試験を行った。薄鋼板の接着長は、50mm および 85mm とした。なお、薄鋼板表面にブラスト処理を行った試験片の接着長は、接着剤塗布範囲のうち、貼り重ねる薄鋼板表面のブラスト処理範囲の重なる長さとして定義した。

実環境では薄鋼板の端部から腐食が始まるため、薄鋼

表-2 樹脂系接着剤の物理的性質

硬化前の粘度 (mPa・s)	20,000
固着時間 (分)	9
引張せん断接着強さ (N/mm ²)	25.9
衝撃接着強さ (kJ/m ²)	17.1
硬化物硬度 (H _D)	58

板端部の耐食性をブラスト処理によって損なわないことが望ましいと考え、No. II-4 および II-6 試験片については、鋼板の端部から 15mm の範囲のブラスト処理を行わないこととした。

2.2 試験結果

表-1 に引張せん断接着試験の試験結果を併せて示す。

(1) 破壊性状

今回の試験では、全ての試験片において母材での破断はなく、継手部での破壊であった。また、継手部の破壊は「薄鋼板と接着剤の界面で生じた破壊」(以降、界面破壊)と「接着剤の内部で生じた破壊」(以降、凝集破壊)の2種類に大別できた。前者は、薄鋼板と接着剤の端部の界面に剥離が生じ、剥離範囲が広がっていくことで接着剤が全て剥離し、破壊に至るものである。この破壊形態は、高耐食性めっき鋼板を使用した試験片のうち、ブラスト処理を行っていない No. I-9~12 試験片において確認された。後者は、接着剤の内部において外周から内部に向かって徐々に破壊していくものであり、No. I-9~12 以外の全ての試験片で確認された。これは、継手部の引張せん断接着強度が、「鋼材と接着剤の界面における引張せん断接着強度」と「接着剤内部の引張せん断接着強度」の小さい方で決定され、No. I-9~12 試験片では、鋼材と接着剤の界面における引張せん断接着強度が接着剤内部の引張せん断接着強度よりも低いために界面破壊が先行したのに対し、No. I-9~12 試験片以外では、それが高いために凝集破壊が先行したものと考えられる。

(2) 接着長による違い

I シリーズでは、接着長 42mm 以上の試験片において破壊時の発生応力が降伏応力を超えていることから、薄鋼板が降伏していることがわかる。このことから、SS400 相当の鋼材において接着長を 42mm 以上確保すれば、引張せん断接着強度が鋼材の降伏強度を上回るといえる。

(3) 試験片の伸び率

最大引張応力が試験片に発生した時の試験片の最大伸び率 λ_{max} を以下の通り算出した。

$$\lambda_{max} = \Delta l / l \quad (1)$$

ここに、

Δl : 最大引張応力発生時の試験片の伸び量(mm)

l : 試験片長さ (mm)

本稿では、継手部に要求する伸び性能について、土木学会の鉄筋定着・継手指針³⁾を参考として、一方向引張試験の伸び能力に対して SA 級相当の性能を有するよう以下の通り定めた。

$$\lambda_{max} \geq 0.04 \quad (4\%) \quad (2)$$

各試験片の伸び率と接着長の関係を図-2 に示す。

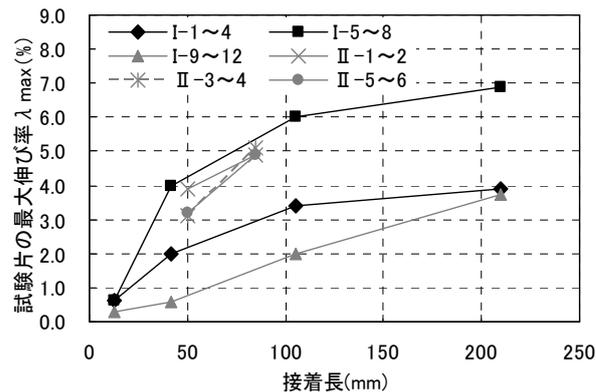


図-2 最大伸び率-接着長関係

SS400 材の黒皮ありの試験片 I-1~4 はいずれも λ_{max} が 4% を下回っており、所要の継手性能を満足しない結果となった。一方で、黒皮なしの試験片 I-5~8 の λ_{max} は、黒皮がある場合を上回っており、鋼材表面の黒皮を除去することによって継手部の伸び性能を向上させることがわかった。また、接着長が 42mm 以上の場合に λ_{max} が 4% を上回っており、所要の伸び性能を満足する結果となった。

鋼板表面が無処理の高耐食性めっき鋼板の試験片 I-9~12 は、いずれも λ_{max} が 4% を下回っており、また、同一着長における λ_{max} が全試験片の中で最も小さい。これは、I-9~13 試験片の破壊形態が他の試験体と異なる界面破壊であり、鋼材の伸びが大きくなる前に接着剤が薄鋼板との界面で剥離してしまうためであると考えられる。

鋼板表面にブラスト処理を行った高耐食性めっき鋼板の試験片 II-1~6 は、黒皮を除去した試験片 I-5~8 の λ_{max} をわずかに下回るものの、その他の試験体を上回る結果となったことより、ブラスト処理を行うことで継手部の伸び性能が改善することがわかった。また、接着長が 85mm の場合に λ_{max} が 4% を上回っており、所要の伸び性能を満足する結果となった。ブラスト処理の程度および研磨剤の粒度については、今回行った検討ケースでは優位な差は認められなかった。

3. 補強試験体に対する正負交番載荷試験

板厚 1.6mm の薄鋼板を貼り重ねることで耐震補強を行った RC 柱について、前章の試験結果をもとに継手部の接着長を定めた場合の継手部の性能について確認を行うため、RC ラーメン高架橋柱を模擬した試験体柱を製作し、静的正負交番載荷試験を行った。

3.1 試験体緒元

表-3 に試験体の諸元を示す。試験体の断面寸法は 600mm×600mm、せん断スパン比 a/d は 3.0 とした。補

表-3 試験体諸元

断面寸法	有効高さ d	せん断 スパン a	せん断 スパン比 a/d	軸方向 鉄筋	軸方向 鉄筋比	帯鉄筋	帯鉄筋 ピッチ	帯鉄筋 鉄筋比	補強鋼板の規格・厚さ・層数				
									規格	厚さ	層数 1D 区間	層数 1D 区間外	
(mm×mm)	(mm)	(mm)		(径×本)	(%)	(径×組)	(mm)	(%)		(mm)			
600×600	550	1650	3.0	D29×24	4.28	D10-1組	300	0.08	SS400	1.6	2	1	

コンクリート 圧縮強度	軸方向鉄筋 降伏強度	帯鉄筋 降伏強度	鋼板 降伏強度	軸力
(N/mm ²)				
26.8	379	385	328	0.98

強前の試験体の曲げせん断耐力比は0.56である。

補強用の薄鋼板は、厚さ1.6mmのSS400材を使用した。図-3に示すように、薄鋼板はL字形形状に加工し、アクリル樹脂系接着剤を用いて柱外周に接着して閉合し、必要枚数分貼り重ねた。高さ方向には3つに分割して貼り付けを行い、薄鋼板同士の横目地の間隔は30mmとした。

補強量は、柱の基部から1D区間(D:断面高さ)は補強後の曲げせん断耐力比が1.5以上、1D区間以外(柱基部から2,3段目)は補強後の曲げせん断耐力比が1.0以上になるように薄鋼板の貼り重ね層数を決定した。計算の結果、柱基部から1D区間(1段目)においては2層、柱基部から1D区間以外(2,3段目)においては1層という結果となった。薄鋼板の継手の接着長については、試験片による引張せん断接着試験の結果から、母材降伏後の伸び率が4.0%以上となる105mmとし、接着部の黒皮は除去した。

3.2 荷重方法

試験における荷重方法は、一定の軸力0.98N/mm²を作用させた状態で静的正負交番荷重試験を実施した。試験は、最外縁の軸方向鉄筋のひずみが、材料の試験結果から定まる降伏ひずみに達したときの正側、負側それぞれの荷重点変位の平均値を降伏変位(δ_y)とし、 $2\delta_y$ 以降は降伏変位の整数倍となる変位を変位制御にて与え、正負交番荷重試験を行った。本試験では、正側の荷重を引き、負側の荷重を押しとした。

3.3 試験結果

(1) 損傷状況

図-4に試験体損傷状況を示す。

試験体は $4\delta_y$ の引きの際に、荷重面側で薄鋼板の変形が見られ始め、 $5\delta_y$ で最大荷重に達した。 $6\delta_y$ で荷重面側の基部から高さ300mm以下の範囲で薄鋼板が外方に变形(スカート状の变形)し始め、水平荷重が低下するとともに、薄鋼板とフーチング上端の隙間からコンクリート片が落下し始めた。 $7\delta_y$ では、薄鋼板の变形範囲が一段と広がるとともに、荷重面と直交する面でも薄鋼板が外方に变形し始め、薄鋼板のコーナー部分が丸くなった。

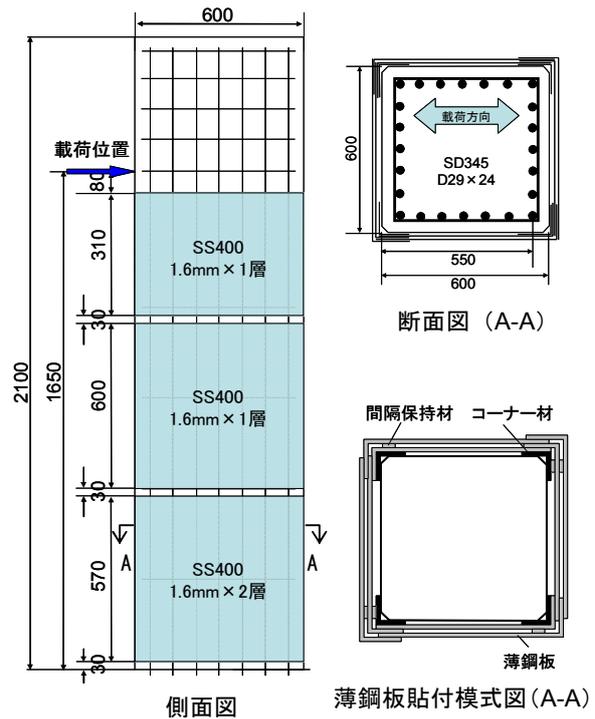


図-3 試験体寸法および補強概要

これ以降、1段目の薄鋼板の变形は顕著になり、押し側では $7\delta_y$ で降伏荷重を下回り、引側では $8\delta_y$ で降伏荷重を下回った。その後、 $12\delta_y$ では、2段目の薄鋼板でも荷重前面の下部において、外側に広がる变形が確認された。また、薄鋼板の接着部の外観を確認したところ、塑性ヒンジを形成した区間においても、接着が切れることはなかった。

試験終了後に全ての薄鋼板を剥がし、試験体の損傷状況の確認を行った。斜めひびわれは、2,3段目の補強区間にも発生していたが、その幅は大きく開いていなかった。

損傷は基部から高さ600mm(1D)までの範囲に集中しており、特に基部から高さ500mmまでの範囲で塑性ヒンジを形成していた。

(2) 荷重点における荷重と変位の関係

図-5に荷重点における荷重-変位関係を示す。 $5\delta_y$ で最大荷重となり、薄鋼板が外方に变形し始めた $6\delta_y$ で荷重が低下した。また、荷重全体を通して急激な耐力



5 δ_y 載荷時

7 δ_y 載荷時

14 δ_y 載荷時

試験終了後

図-4 試験体損傷状況

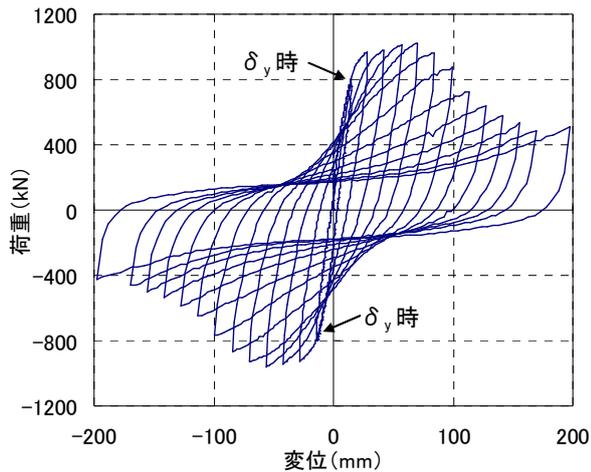


図-5 荷重-変位関係

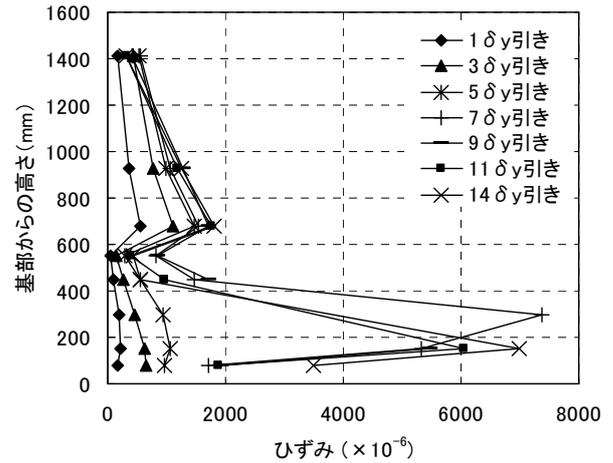


図-6 薄鋼板の水平方向のひずみ(載荷前面)

低下は生じなかった。

(3) 薄鋼板のひずみ

図-6 に薄鋼板の載荷前面で計測された水平方向のひずみの分布を、図-7 に載荷側面の水平方向のひずみの分布をそれぞれ示す。載荷前面では薄鋼板の外方への変形により 5 δ_y で降伏し、載荷側面では 14 δ_y でそれぞれ薄鋼板が降伏した。せん断力を負担する載荷側面のひずみは、載荷序盤では高さ 950mm 付近で突出しているが、載荷中盤以降は、薄鋼板の外方への変形により損傷区間 (1D) のひずみが大きくなる結果となった。また、薄鋼板に発生した最大ひずみは 8000 μ 程度であり、継手部が有する伸び性能よりも十分に小さいことが確認できた。

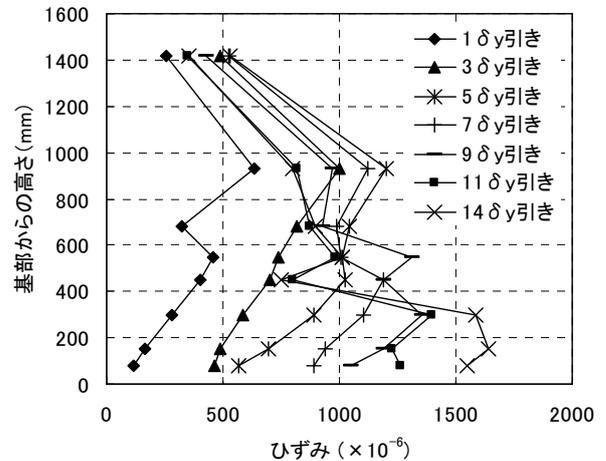


図-7 薄鋼板の水平方向のひずみ(載荷側面)

4. まとめ

今回、既設 RC 柱の外周に薄鋼板を貼り重ねる耐震補強工法について、板厚 1.6mm の薄鋼板を用いる場合に必要な接着長や薄鋼板の表面状態を検討するとともに、本工法により耐震補強を行った RC 柱の継手部の性能について確認を行った。

今回の試験の範囲内で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 厚さ 1.6mm の薄鋼板として SS400 材を用いる場合は、接着部の黒皮を除去し、かつ接着長を 42mm 以上とすることで、高耐食性めっき鋼板を用いる場合は、鋼材表面をブラスト処理を行った上でブラスト処理部の接着長を 85mm 以上とすることで、継手部の最大伸び率 λ_{\max} が 4% 以上となることを確認した。
- (2) 高耐食性めっき鋼板に行うブラスト処理は、めっき表面の光沢がなくなる程度のスウィープブラスト (ISO (SIS) Sa1) もしくは素地を露出させ、研磨剤の粒度を、F80～F150 とすることで所要の伸び性能を

満足することを確認した。

- (3) 柱外周に板厚 1.6mm の薄鋼板 (SS400) を貼り重ねる耐震補強を行った RC 柱試験体による静的正負交番載荷試験を行った結果、薄鋼板の接着長を、継手部の最大伸び率 λ_{\max} が 4% 以上となる 105mm とした場合、塑性ヒンジ区間も含め、薄鋼板の剥がれは確認されなかった。また、薄鋼板に生じた最大ひずみは 8000 μ 程度であり、継手部が有する伸び性能と比べて十分に小さかった。

参考文献

- 1) 田附伸一ほか：薄鋼板を貼り重ねる既設 RC 柱の耐震補強工法の開発，土木学会論文集，Vo62，No.2，pp.326-335，2006.5
- 2) (社)日本橋梁建設協会：スウィープブラスト処理見本写真，2000.3
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー128 鉄筋定着・継手指針[2007年版]，丸善，2007.8