

腐食銅板の性能回復のための鋼板接着による補強法の適用性

契約技術職員

藤枝 洋二

The Applicability of Rehabilitation Method for Corroded Steel Plates by Adhesive and Steel Cover Plates

ABSTRACT: Corrosion is typical damage of steel structures and an important damage that affects the safety and durability of members. This paper presents a rehabilitation method for corroded steel plates by adhesive and steel cover plates. Axial tensile tests will be conducted for the corroded steel plates with or without steel cover plates, in which the corroded surface is made artificially by drilling machine the programmed drilling procedure. According to this method, the quantitative effectiveness of the rehabilitation can be clarified, because the surface unevenness of every specimen is quite the same. Moreover, this test is using several different types of cover plate in the different length. From experimental results, following remarks can be listed;

- (1) The corroded surface can be made artificially. According to this method, the quantitative effectiveness of the rehabilitation can be clarified.
- (2) Based on the tests results, this rehabilitation method can be applicable to rehabilitation for corroded steel plates.

キーワード: 性能回復技術, 当て板, 接着剤補修, 腐食鋼板

(Keywords: rehabilitation, steel cover plate, adhesive, corroded steel plate)

1. はじめに

筆者ら¹⁾は、接着剤を用いた当て鋼板補強は、腐食した鋼部材の引張強度回復に効果があることを確認した。このとき、接着剤は、腐食鋼板の凹凸表面から接着剤を介して当て板へ応力伝達する役割を担っていると判断できた。本研究では、様々な長さの当て板で接着補強した供試体で引張試験を行い、性能回復効果を定量的に把握し、鋼板接着による補強法の適用性を検討することを目的とする。

従来、接着剤を用いた補強・補修については、CFRPによる接着補強事例が多く²⁾、主として、RCあるいは鋼製橋脚の耐震補強³⁾や鋼桁の剛性の改善⁴⁾などに用いられているが、腐食した鋼板に鋼板を接着する補修はあまり採用されていない。

腐食した鋼板の当て鋼板補修は、当て板と母材を高力ボルトや溶接により補修した例が多い。ボルトと接着剤を併用した例^{5,6)}もあるが、接着剤は腐食凹

凸を埋めてその後の腐食進展を防止するために用いられており、接着剤の接着強度は期待していない。

ところで、腐食した板や部材の性能回復対策を施す場合、その対策効果すなわちどの程度まで性能が回復しているのかを、信頼性を持って定量的に把握することは難しい。それは性能回復対策が施される部材の腐食表面形状はただ一つしか存在しないために、たとえばある大きさの当て板を接着して補強した場合、回復効果があることは容易に予想できてもどの程度まで性能回復しているのかという効果の確認方法が無いことに起因する。そして、性能回復の定量的な確認方法が無いことが、腐食した部材の性能回復設計をより難しくしている要因の一つとなっている。したがって、もし同じ腐食表面を有する部材を多数用意できれば、種々の性能回復対策の効果を定量的に実験的に確認できるので、要求性能に見合う

性能回復設計が可能になる. そこで本研究では, 性能回復の対策効果を定量的に把握するために, 同じ模擬腐食表面形状を有する供試体を多数作成して, 同じ腐食形状下で性能回復した場合としない場合の比較や性能回復対策における種々の因子の効果について, 実験的に調べるための手法についても提案する.

2. 試験概要

2.1 試験供試体

今回の試験で用いた腐食部材(母材)の寸法は, 長さ1m, 幅100mm, 板厚11.7mmである. 中心付近の長さ400mmの領域を腐食区間とし, 板表面にボールエンドミルにより削孔して, 人工的に腐食表面を作り, これを当て板で補修あるいは補強して実験した(図3). 母材の鋼種はSS400であり, 母材の材料特性の試験結果を表1に示す.

表1. 母材の材料特性

母材 11.7mm	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	破断伸び (%)
No.1	265.8	417.8	204.8	0.29	44
No.2	264.1	413.1	210.2	0.28	44
平均	264.9	415.4	207.5	0.28	44

腐食表面は, 供試体の中央付近が集中的に腐食した局所型の腐食表面を作成した. 作成した供試体の板厚等高線を図1に, 供試体表面の模擬腐食形状を図2に示す.

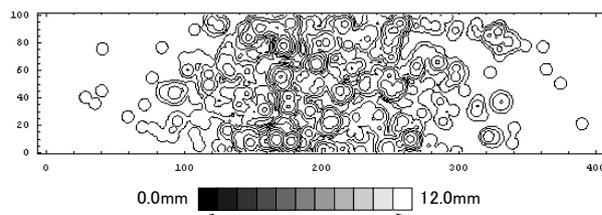
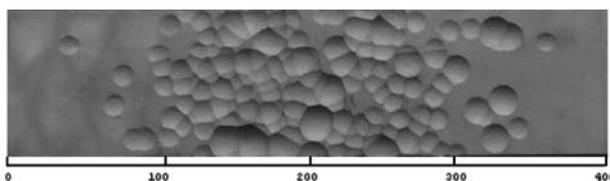
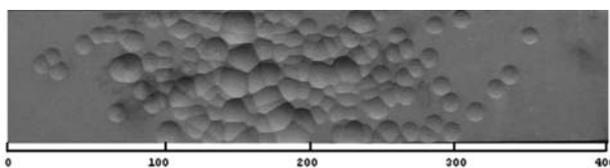


図1. 板厚等高線



a) 表面



b) 裏面

図2. 実鋼板への腐食表面再現

また, 表2に, 各供試体とその腐食部の統計量を示す. 表中のA供試体は腐食のない場合である. B供試体は局所型の腐食表面を有しており, それぞれ無補強あるいは当て板の接着長さ(接着面積)を変化させている. 表2に示すように, 各供試体の腐食統計量は若干差異があるものの, ほぼ同じ腐食表面が作成されているのがわかる. 当て板は, その中心が母材の最小断面積位置に一致するよう位置決めし, 母材の両面に2枚の当て板を接着した.

表2. 供試体

供試体 名称	腐食 状況	補強法	当て板		母材(腐食部)					実験供試体最小断面積 (母材+当て板)
			板厚 (mm)	長さ (mm)	最小断面積 (mm ²)	最小断面 平均板厚 (mm)	最小 板厚 (mm)	平均 板厚 (mm)	標準 偏差 (mm)	
A	無腐食	—	—	—	1169.0	11.69	11.69	11.69	—	1169.0
B-1	局所型	無補強	—	—	567.7	5.68	2.67	9.83	1.74	567.7
B-2		接着剤 + 当て板	3.1	500	581.6	5.82	2.20	9.85	1.74	1201.6
B-3				200	570.6	5.71	2.47	9.74	1.73	1190.6
B-4				150	593.1	5.97	2.38	10.00	1.77	1213.1
B-5				300	565.7	5.69	2.58	9.78	1.77	1185.7
B-6				400	576.5	5.80	2.59	9.82	1.72	1196.5
B-7				600	587.1	5.87	2.25	9.85	1.75	1207.1

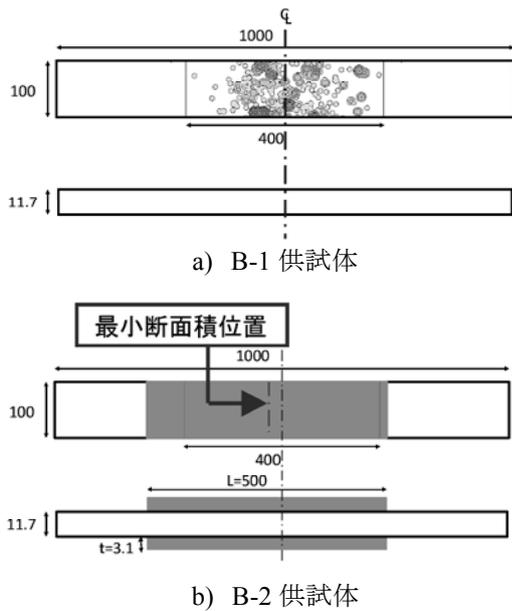


図 3. 供試体寸法(例: B-1, 2 供試体)

(1) 腐食表面の作成

藤井ら⁷⁾は、すでに鋼板の腐食表面作成モデルを提案し、これに基づいて作成した腐食表面凹凸形状は、実際の腐食の特徴を再現できており、腐食した鋼構造物の残存強度評価や将来予測に使用できることを示した。腐食表面作成モデルの概略は以下のようなのであるが、このモデルと削孔機を連携させると、今回の試験のように、同じ凹凸表面形状を持つ供試体を多数作成できる。

腐食表面作成モデルの概要は以下のようなのである。

① 湿気や飛来塩分のような腐食を引き起こす外的因子(アタック因子)が鋼表面に落下し、その地点をある深さとある領域を持って掘り下げる(図 4)。アタック因子の落下地点は、乱数を発生させて決定する。

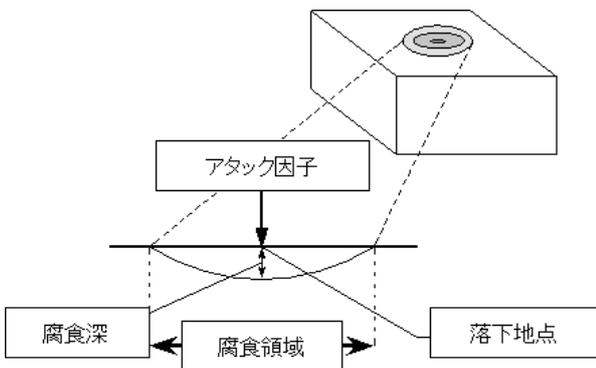


図 4. 腐食表面作成イメージ

② アタック因子は、単位面積あたり n 個落下し、 n 個の腐食穴があくことによって腐食表面の凹凸形状が形成される。

今、ボールエンドミルによってある深さまで掘削すると、その刃先形状によってある領域を持って指定された深さまで表面が削られることになり、あたかも上記のアタック因子と同じ効果が得られる。この作業を繰り返して n 個の孔をあけると同じ腐食表面を人工的に作成できる。今回は半径が 20mm のボールエンドミルを使用し、孔の個数は 200 個、腐食深(孔の深さ)を 1.4mm とした。腐食表面作成後、接着剤と母材との接着性を高めるために表面仕上げも兼ねてサンドブラスト処理を行っている。

(2) 当て板の設計

当て板は、母材の両面に配置することとし、当て板の板厚 t は、式(1)に示すように、母材の最小断面平均板厚の板厚減少量を補う板厚を基準とした。

ここで、 t_0 は母材の元板厚($t_0=11.69\text{mm}$)、 t_{smini} は母材の最小断面位置での平均板厚である。

$$t \geq \frac{t_0 t_{smini}}{2} \quad \dots\dots(1)$$

$$\tau_a b_a \frac{L}{2} \geq \sigma_{yc} t_c b_c \quad \dots\dots(2)$$

$$L \geq \frac{2 \sigma_{yc} t_c b_c}{\tau_a b_a} \quad \dots\dots(3)$$

L : 当て板の長さ σ_{yc} : 当て板の降伏応力

τ_a : 接着剤のせん断強度 t_c : 当て板の板厚

b_a : 接着幅 b_c : 当て板の幅

表 2 に示す最小断面平均板厚を基に、式(1)から当て板の必要板厚を求めると、局所型では $t \geq 3.01\text{mm}$ となる。今回は、この条件を満たす板厚($t=3.1\text{mm}$)を採用した。表 2 に示すように、試験供試体最小断面積を見ると、母材の最小断面位置での板厚減少量を補うよう当て板補強した供試体は、無腐食の A 供試体の断面積を上回っているのがわかる。

当て板の長さについては、式(3)を満足するように決定した。式(3)は式(2)を L について解いたもので

ある。式(2)は、左辺は接着剤のはく離強度を、右辺は当て板の降伏強度を表しており、接着剤のはく離強度(左辺)が当て板の降伏強度(右辺)を上回っていれば、当て板が降伏するまでは接着剤のはく離は起こらないことを示している。式(3)より当て板の長さ L を求めると、 $L \geq 78\text{mm}$ となる。今回はこの条件を満たす、長さを 150, 200, 300, 400, 500, 600mm の 6 種類とした。当て板の材料特性試験結果を、表 3 に示す。当て板の鋼種は母材と同じ SS400 である。

表 3. 当て板の材料特性

当て板 3.1mm	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	破断伸び (%)
No.1	284.2	417.5	196.2	0.28	37
No.2	276.2	413.3	197.4	0.29	31
平均	280.2	415.4	196.8	0.28	34

(3) 当て板の接着

当て板接着に使用した接着剤は、2液混合型エポキシ樹脂系接着剤である(図 5, 6)。この接着剤は常温硬化型で接着強さが大きく、揺変性があり、塗布作業が容易である。特性を表 4 に示す。

また、引張試験とは別に JIS K 6852 による接着剤の圧縮せん断試験を行い、接着剤のせん断強度を

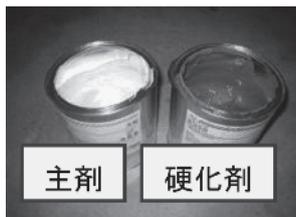


図 5. 接着剤



図 6. 接着剤混合後

表 4. 接着剤の特性

品名	ボンド E258	
主剤	エポキシ樹脂	
硬化剤	変性脂還式ポリアミンポリアミドアミン	
混合粘土	150±50 Pa・s (20℃)	
混合比	主剤：硬化剤=1：1 (質量比)	
可使時間	約50分 (20℃, 1kg)	
引張強度	規格値	20MPa以上
引張せん断強度		15MPa以上

表 5. せん断強度試験結果

供試体	No.1	No.2	No.3	平均
せん断強度 (MPa)	24.5	27.9	22.9	25.1

調べた。試験結果を表 5 に示す。試験結果より、表 4 に示す特性値を満足しているのがわかる。

施工方法については、まず母材の両表面および当て板の接着面をサンドブラスト処理し、接着表面の油分をメチルエチルケトン溶剤で除去した後、接着剤を塗布して当て板を万力にて圧着した。このとき、腐食表面の凹部には接着剤を塗り込んで空隙が残らないよう注意した。その後、恒温恒湿室(温度：20℃、湿度 50%)にて1週間養生した。養生条件を表 6、養生の状況を図 7 に示す。

表 6. 養生条件

養生期間	2010/11/26 15:00 ~ 2010/12/3
平均温度	19.9℃
平均湿度	50.3%



図 7. 養生状況

2.2 試験条件

荷重は、100tf 万能試験機を使用し供試体母材の両端に引張力を漸増させ、最高荷重後に供試体が



図 8. 試験状況

破壊するまで試験を行った。試験状況を図 8 に示す。また、母材の表裏両面と側面に、当て板については接着面と反対側の面にひずみゲージを配置した。

3. 試験結果と考察

3.1 破壊性状

試験後に当て板を剥がした母材の破壊性状を図 9 (B-1～3 供試体のみ掲載) に示す。これらの写真をみると、どの供試体も母材の断面積が最小となる位置近傍においてき裂と絞りが発生していることが確認できる。また、これらの供試体で、破断に至っていないものもあるが、これは、比較的大きなき裂が入った段階で極端に荷重が低下したため、载荷を停止したことによる。

一方、当て板については、図 10(B-2, 3 供試体のみ掲載) のように、最終的には最小断面積位置付近(写真中の赤線)まで徐々にはく離が進行した。最小断面積位置を越えてはく離が進行した後は、当て板のはく離は停止し、母材には無補強の場合と同じ箇所と同様のき裂が発生した。

3.2 接着剤による性能回復効果

当て板補強の試験結果を表 7、各供試体の荷重-ひずみ曲線を図 11, 12 に示す。各荷重段階における母材と当て板のひずみ分布を図 13 に示す。表 7

表 7. 接着剤の特性

供試体名称 (当て板長さ)	最高荷重		降伏強度	
	実験値 (tf)	低下率 (%)	実験値 (tf)	低下率 (%)
A	49.52	—	31.74	—
B-1	28.21	43.03	12.94	59.23
B-4 (L=150)	25.41	48.69	19.47	38.66
B-3 (L=200)	28.14	43.17	28.14	11.34
B-5 (L=300)	32.15	35.08	29.90	5.80
B-6 (L=400)	36.50	26.29	32.14	-1.26
B-2 (L=500)	35.90	27.50	31.87	-0.41
B-7 (L=600)	37.62	24.03	33.70	-6.18

中の降伏強度は、母材の最小断面積位置のひずみが、材料特性試験から得た母材の降伏ひずみになった時点を降伏点とし、そのときの荷重を降伏強度とした。さらに、低下率とは、A 供試体(無腐食)からの低下率である。また、図 11, 12 の横軸(ひずみ)は、供試体全体の伸びを試験機のつかみ部間の距離(長さ 800mm)で除したものを示す。

表 7 中の B-3, 4 供試体(L=150, 200mm)の供試体では、最高荷重時にはほとんど性能回復効果が確認できなかったが、降伏強度の場合は、低下率が無補強の B-1 供試体と比べ、B-4 供試体(L=150mm)では約 20%、B-3 供試体(L=200mm)では約 50%と大幅に改善されているのがわかる。そして、当て板長さが 400mm を超える B-2, 6, 7 供試体については、低下率がマイナスとなり、B-1 供試体以上の降伏

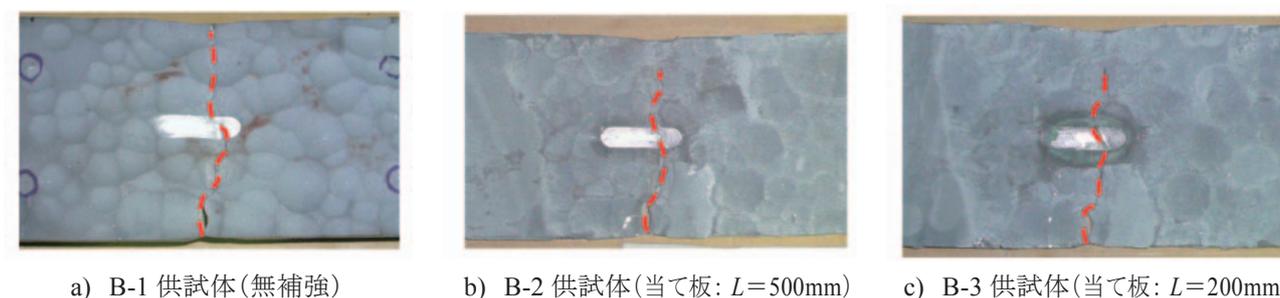


図 9. 破壊性状(B-1～3 供試体)

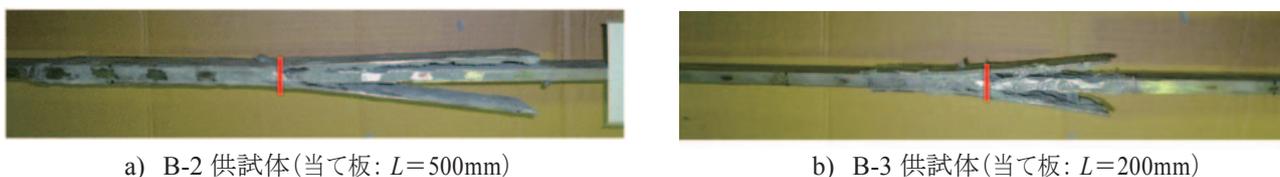


図 10. 供試体での当て板のはく離

強度を得られていることがわかり、十分な性能回復効果が確認できる。

図 11, 12 では、最高荷重を超えて荷重が段階的に低下している箇所があるが、これは当て板が母材から部分的に剥がれたことを示す。当て板が母材の最小断面位置付近まで剥がれた後は、無補強の供試体と同じ荷重-ひずみ曲線を描いている。すなわち、当て板のはく離が進行して、母材の最小断面位置付近まで剥がれた後は、強度は無補強と同じになる。そして、当て板が最小断面位置付近まで剥がれるまでに塑性変形が進展している場合には、荷重-ひずみ曲線は無補強の曲線を塑性ひずみ分だけ平行移動させた形となる。

図 13 中のひずみ分布では、最小断面位置と当て板の端部付近以外では、当て板と母材のひずみの値には大きな差異はなく、母材と当て板が一体となって挙動していることがわかり、性能回復効果が十分に発揮できている。また、5tf などの実務での使用環境下(弾性域内)では、最小断面位置の母材のひずみも当て板のひずみとほぼ同等の値となっており、十分な性能回復効果が期待できる。また、当て板端部のひずみがほとんど 0 に近い値が計測された。これは、当て板端部では接着剤の効果は十分に発揮されていないことを示している。当て板端部では接着剤の効果が発揮されず、母材から当て板へとスムーズな応力伝達が行われず、ずれが生じてしまい、図中のようなひずみの差が生じてしまっていると考えられる。これより、接着剤の効果が発揮されるにはある程度の定着距離(アクセス距離)が必要であることがわかった。

図 11, 12 より、当て板のはく離により荷重が低下していることがわかるが、この低下荷重を ΔP とし、 ΔP を接着面積 A で除したものをはく離せん断応力 τ と考える(式(4))。ここで低下荷重 ΔP と当て板の長さ L との関係を図 14 に示す。図中の青いプロット点がそれぞれの当て板長さに対する低下荷重を表しており、それらのプロット点の近似曲線を赤い線で示す。また、当て板と母材とが完全に接着され一体となっている場合の低下荷重と当て板長さの関係をオレンジの

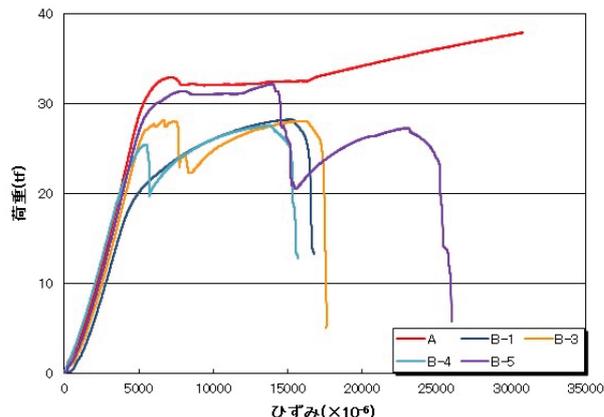


図 11. 荷重-ひずみ曲線(A, B-1, 3, 4, 5 供試体)

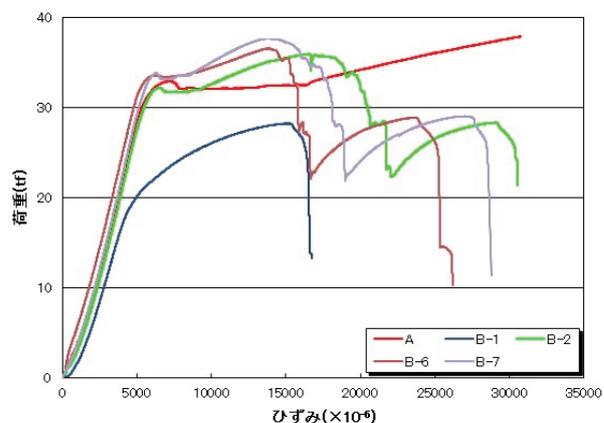


図 12. 荷重-ひずみ曲線(A, B-1, 2, 6, 7 供試体)

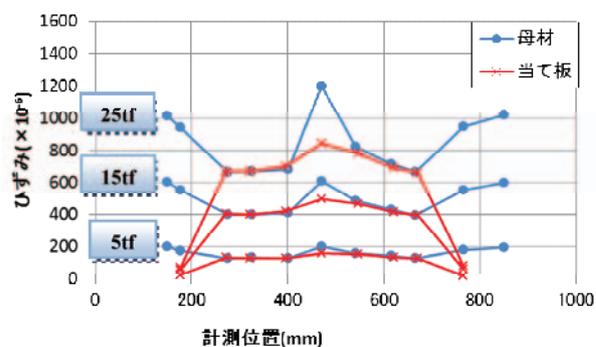


図 13. ひずみ分布(B-7 供試体)

理論曲線で示す。理論曲線の示すように、当て板の長さが 0mm の場合、荷重低下は起こらないはずである。しかし、図中に示すように近似曲線の切片は 0 にならない。これは先述したアクセス距離 ΔL に起因する。接着剤の効果が発揮されるまでにはある程度の距離が必要であり、実際に作用している当て板の長さ(有効長さ $L'=L-2\Delta L$)は実際の当て板の長さ L

表 8. アクセス距離

当て板長さ	幅	接着面積	はく離前荷重	はく離後荷重	低下荷重 ΔP	はく離せん断強度 τ	アクセス距離
(mm)	(mm)	(mm ²)	(tf)	(tf)	(tf)	(N/mm ²)	(mm)
150	100	15000	25.41	19.68	5.73	3.82	17.38
200		20000	28.14	22.29	5.85	2.93	22.70
300		30000	32.15	20.50	11.65	3.88	17.10
400		40000	36.50	22.02	14.48	3.62	18.35

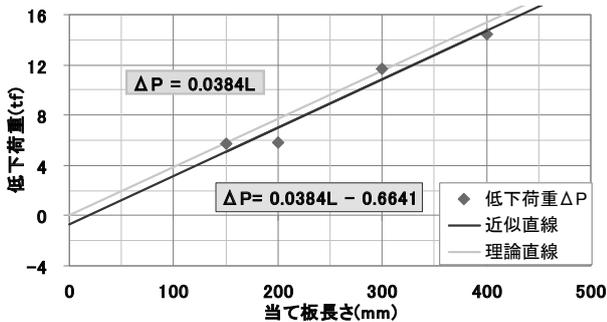


図 14. 低下荷重 ΔP と当て板長さ L の関係

からアクセス距離 ΔL を除いたものになる。よってアクセス距離分の長さが図中の切片分の荷重低下 $\Delta P'$ を引き起こしていると考えられる。式(5)から ΔL を求め、低下荷重などを示したものを表 8 に示す。アクセス距離については多少のばらつきはあるものの 17~22mm の間に落ち着いており、今回の試験条件ではアクセス距離は約 20mm と考えることができる。

$$\tau = \frac{\Delta P}{A} = \frac{\Delta P}{L \times b} \quad \dots\dots(4)$$

$$\Delta L = \frac{\Delta P'}{\tau \times b} \quad \dots\dots(5)$$

ΔP : 低下荷重
 A : 接着面積
 L : 当て板長さ
 τ : はく離せん断応力
 b : 当て板幅
 ΔL : アクセス距離

4. 結論

本研究では、腐食・減肉した鋼板に対して、当て板の接着面積に着目し、様々な長さの当て板で接着補強し、引張試験を行い、その性能回復(補強)効果を実験的に調べた。

以下に本研究の成果を示す。

(1) 本研究室で開発した腐食表面作成プログラムと削孔機を用いて連動させることにより、同じ腐食表面を有する鋼板を多数作成することを可能にした。これにより、性能回復効果を定量的に把握することが可能となった。今回の手法により作成した腐食の凹凸を考慮した腐食表面は、単純な板厚減肉よりも実際の現象に近い性能回復実験を行うことができる。

(2) 引張試験から、供試体の最終的な破壊位置は母材の最小断面積位置付近で発生することがわかった。このとき、接着剤併用の当て板補強を施した場合の供試体についても、無補強の場合と同じ位置で同じ破壊状態となった。

(3) 最高荷重を超えて当て板のはく離が進展し、当て板が母材の最小断面積位置まで剥がれた後は、荷重-ひずみ曲線は無補強の供試体とほぼ同じ挙動となる。また、それまでに塑性変形が進展している場合には、荷重-ひずみ曲線は無補強の曲線を塑性ひずみ分だけひずみを平行移動させた形となる。

(4) 応力集中が生じる母材の最小断面積位置と当て板端部を除いて、母材と当て板はほぼ一体となって挙動していることが確認できた。

(5) 引張試験を通して、接着剤を用いた当て板補強法は、腐食した鋼板の性能回復に十分適用可能であると判断できる。

謝辞

本実験を遂行するに当たり、特殊加工技術開発室石飛義明氏には、供試体製作において多大なる協力をいただき、ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 森下太陽, 藤井堅, 若原直樹: 腐食鋼材の接着

剤補修における性能回復効果の定量的把握, 鋼構造年次論文報告集文, Vol.17, pp.637-642, 2009.

2) 杉浦江, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣, 小林朗: 炭素繊維シートを用いた腐食による鋼部材断面欠損部の補修効果に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.548-554, 2008.

3) 張広鋒, 星隈順一, 堺淳一: RC 橋脚の耐震補強に用いる FRP-鋼板接着接合部の付着挙動, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.432-439, 2010.

4) 松村政秀, 北田俊行, 久部修弘: 高弾性 CFRP 板をI形断面鋼桁の貼付する補強効果に関する研究,

構造工学論文集, Vol.54A, pp.834-841, 2008.

5) 一宮充, 岩崎雅紀, 村中昭典, 皆田理: 接着剤と高力ボルトを併用した疲労損傷部の添接補強実験, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1139-1146, 2000.

6) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 腐食部材の添接板補強に関する研究, 土木学会論文集, Vol.682, pp.207-224, 2001.

7) 藤井堅, 橋本和朗, 渡邊英一, 伊藤義人, 杉浦邦征, 野上邦栄, 永田和寿, 中村秀治: 海洋環境における鋼管杭の圧縮強度の経年変化予測法, 土木学会論文集, Vol.66, No.1, pp. 92-105, 2010.