

1. はじめに

わが国では、高度経済成長期に架設された多数の鋼橋の老朽化が問題となっている。鋼橋の損傷事例で多くを占めるのは腐食である。写真1に鋼橋の腐食事例を示す。腐食は、特に桁端部や主桁下フランジ近傍で多く発生している。腐食による減厚が進行すると強度や剛性が低下するため、早期の対策が必要である。腐食損傷への対策として補修が一般的であり、腐食減厚が進行している場合は、当て板の設置や部材の交換などにより補修を行っているが、母材へのボルト用の孔明けや重機等の準備が必要となり、大規模な工事となる。そこで、本研究では、老朽化による腐食損傷対策の増加への対策として、効率的かつ所定の要求性能を有する補修法の検討を目的として、性能回復の評価法を実験に基づき検討する。

図1に腐食減厚した鋼部材の劣化曲線と性能回復曲線を示す。本研究では、新設の健全状態を1.0としたとき、腐食減厚の進行による剛性および強度が低下した鋼部材に対して、補修により健全相当まで回復可能で、且つ実用的な性能回復評価法の提案を目指す。

2. 要求性能と補修材料の選定

2.1 要求性能

本研究では、腐食減厚した鋼部材に対して、剛性および強度の回復を第一の要求性能とする。まず、静的引張試験により各補修工法に対する剛性および強度の回復に関する基本性能評価を行う。図2に示すように、剛性および強度回復は荷重と変位の関係および荷重とひずみの関係から評価し、補修材と合成された鋼部材に対する剛性および強度評価法を検討する。

次に、補修材料の選定については、腐食耐久性、補修の容易性(軽量)、施工性(接着接合現場での作業が容易で重機等の持込はしない)を満たす材料とする。

2.2 補修材料の選定

選定した4つの補修材料を以下に示す。また、各補修材料の性能を表1に示す。

超高強度繊維補強コンクリート(ダクトアル):超高強度(圧縮強度 210N/mm²)、耐塩害性が高く、プレキャスト製のため補修材としての形状の自由度が大きい。

鋼:強度が高く(引張強度 400N/mm²以上)、薄板でもその効果を十分に発揮でき、軽量化が図れる。また、腐食対策として鋼の表面に 5%Al-1%Mg-94%Zn (SGメッキ)+ナイロン(N12)コーティングによる耐腐食対策を行う。

高強度炭素繊維、高弾性炭素繊維:炭素繊維シートは強度が高く、塩害による腐食がない。また、軽量



a)鋼プレートガードラー橋 b)桁内部の腐食状況
写真1 鋼橋の腐食事例

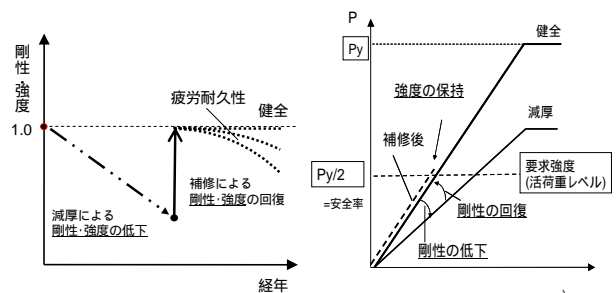


図1 劣化および性能回復曲線 図2 性能評価方法

表1 各補修材性能表

項目	鋼	ダクトアル	高強度炭素繊維	高弾性炭素繊維
弾性係数	2 × 10 ⁵ N/mm ² (1.00)	0.5 × 10 ⁵ N/mm ² (0.27)	2.45 × 10 ⁵ N/mm ² (1.23)	6.4 × 10 ⁵ N/mm ² (3.20)
密度	7.8 g/cm ³ (1.00)	2.6 g/cm ³ (0.33)	1.8 g/cm ³ (0.23)	1.8 g/cm ³ (0.23)
引張強度	400N/mm ² (1.00)	引張10.8 圧縮210	3400N/mm ² (8.50)	1900N/mm ² (4.75)

で、施工性に優れている。

2.3 接着工法

本研究では、現場での作業が容易で重機等の必要がなく、ボルト孔を必要としない接着剤による当板接着工法を採用した。また、接着剤の要求性能は、一般的に使用されている付着強度 1N/mm²以上とした¹⁾。

3. 補修鋼部材における基本性能実験

3.1 実験方法

前項で選定した4種類の剛性と強度を有する補修材を用いて引張試験体を作成した。試験体はJIS 1号試験片の両側に表面研磨を施し、接着剤を用いて補修材を接合した。表2に試験体パラメータ、写真2に試験体一例を示す。試験は2000kN 万能試験機を用いて変位制御により1mm/分の載荷速度とした。実験は試験体の破断や補修材の剥離が発生するまで載荷を続け、試験中のモニタリングとして、ダクトアル試験体は10kNごとに多孔質表面探傷剤を用いて微細なひび

割れ確認を行った。

3.2 実験結果

(1)破壊特性

図3に荷重-ひずみ特性および破壊形態の一例を示す。図より、母材と鋼板は完全合成された挙動を示し、ある荷重に到達すると剥離が発生し、補修材がはがれ合成効果はなくなっているのがわかる。ダクトル補修は、鋼とダクトルの完全合成された初期挙動後、100~200 μ に到達するとダクトルに微細なひび割れが生じた。ただし、ひび割れ後も合成効果は保ったまま母材の降伏まで到達している。高強度炭素繊維は、完全合成したまま降伏付近まで到達し、その後炭素繊維が剥離した。高弾性炭素繊維は、完全合成したまま降伏付近まで到達し、その後炭素繊維の破断が発生した。

(2)剛性評価および評価法の提案

補修鋼部材の剛性評価

無補修鋼材および補修鋼材の剛性は、構造力学上のつり合い条件より、以下の剛性算出式(1)より算出できる。なお、弾性係数の異なる補修材料における剛性の算出についても、合成断面を鋼の断面に換算して、以下の式より算出できる。

$$P/\delta = E_s \{ t_s \cdot b_s + 2(t_m \cdot b_m \cdot E_m / E_s) \} / L \quad (1)$$

ここで、Pは荷重、 δ は変位増分、 E_s は鋼の弾性係数、 t_s は鋼母材の板厚、 b_s は鋼母材の幅、 t_m は補修材の板厚、 b_m は補修材の幅、 E_m は補修材の弾性係数を示す。補修鋼部材における剛性を図4に示す。

腐食減厚鋼部材の剛性回復式

健全時の鋼部材の剛性と、減厚後合成された鋼部材の剛性が等しいとした場合、以下の式が成り立つ。

$$t_m = \Delta t \cdot E_s / 2E_m \quad (2)$$

ここで、 t_m は補修材の板厚、 t は鋼母材の減厚量、 E_s は鋼の弾性係数、 E_m は補修材の弾性係数を示す。式(2)に基づいて作成した腐食減厚した鋼部材の剛性回復曲線を図5に示す。縦軸は補修材の弾性係数、横軸は補修材の片面あたりの板厚を示す。また、同図には、母材板厚9mmに対する減厚量10~70%の曲線を示す。図より、補修材に使用する弾性係数が決まれば、剛性回復に必要な補修材の板厚を算出できる。

例として、母材の板厚が9mmから50%減厚したときの各補修材料の必要板厚の算定を示す。図を用いると、鋼板補修の場合、片面あたり2.3mm厚の鋼板を使用すると剛性を回復できる。ダクトル補修について、弾性係数 $E=5.4 \times 10^5$ より、母材の板厚が9mmから50%減厚したとき、片面あたり9mmのダクトルを使用すると剛性を回復できることになる。炭素繊維については板厚を層厚に換算する必要があり、高強度炭素繊維

表2 試験体パラメータ

試験体名	補修材		母材		試験体数
	材料	板厚mm	材質	板厚mm	
SM ₄₉₀ t2.3/SM ₄₉₀ t9	鋼板	2.3	SM490	9	3
SS ₄₀₀ t9/SM ₄₉₀ t9		9			4
U _{FC} t10/SM ₄₉₀ t9	ダクトル	10			5
U _{FC} t20/SS ₄₀₀ t9		20			2
S _{FRP} L1/SM ₄₉₀ t9	高強度炭素繊維	1層			3
S _{FRP} L3/SM ₄₉₀ t9		3層			3
S _{FRP} L6/SM ₄₉₀ t9		6層			3
E _{FRP} L1/SM ₄₉₀ t9	高弾性炭素繊維	1層			3
E _{FRP} L3/SM ₄₉₀ t9		3層			3
E _{FRP} 6/SM ₄₉₀ t9		6層	3		

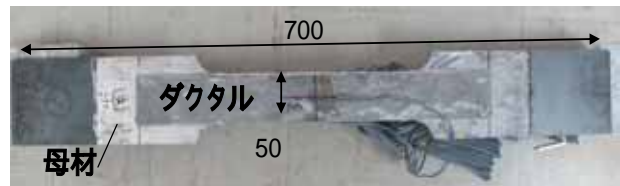


写真2 引張試験体一例

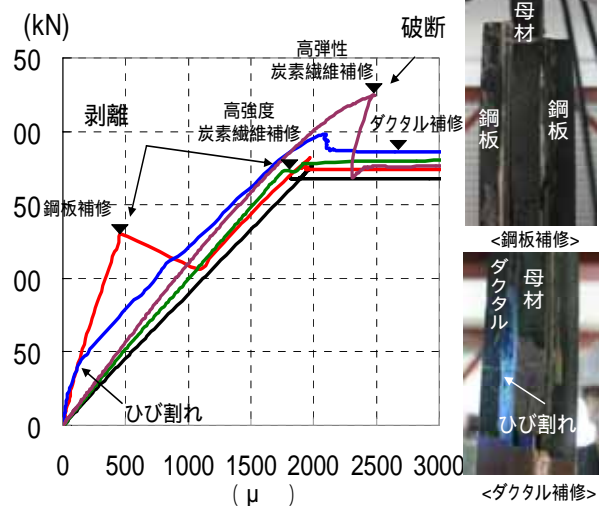


図3 荷重ひずみ特性および破壊形態

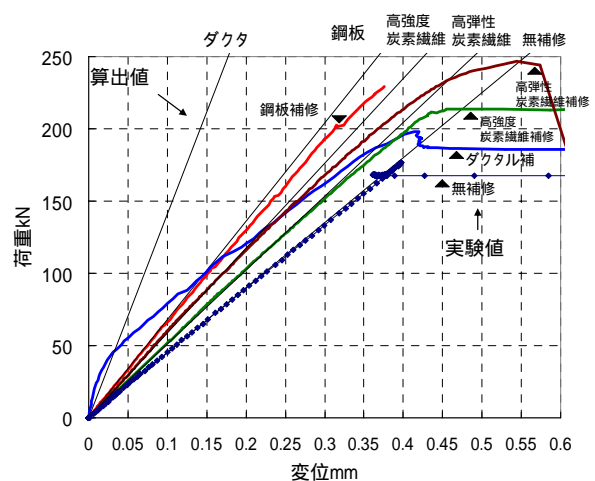


図4 補修鋼部材の剛性

補修は1層当り0.174mmであるので、層数と必要板厚の関係より求める。高弾性炭素繊維の場合、補修材の片面あたりの板厚 t_m は、図より1mmである。よって、高弾性炭素繊維1層当りの厚さは0.143mmより、層数= $t_m/0.143\text{mm}=1\text{mm}/0.143=7$ 層となる。以上のように、剛性回復曲線を用いて剛性の異なる補修材料を用いた必要板厚を求めることができる。

(3) 強度評価法の検討

実験結果における強度評価

図6に各補修の実験結果を示す。各補修の強度について、鋼板補修は剥離、ダクタル補修はひび割れ、炭素繊維補修は剥離や破断の発生までとした。炭素繊維および鋼板補修は降伏荷重 P_y レベルを超えて剥離または破断した。ダクタル補修は、要求強度レベル近傍でひび割れが発生した。よって、すべての補修材で本研究のSM490材における要求強度(活荷重レベル)を概ね満足した。

強度評価法の検討

図7に示すように鋼板補修および炭素繊維補修は接着面の端部から剥離が発生した。これは、接着端部のひずみ集中に影響し、剥離発生時のひずみを上回ったためである。この強度特性より、剥離発生時のひずみ、縦軸に横軸に板厚比(鋼板板厚/母材板厚)としてプロットし、相関曲線を求めた。図8は母材中央の剥離発生ひずみと板厚比の相関曲線を示す。図より、剥離に関する強度評価が可能である。

例として、母材の板厚9mmに対し、2.3mm厚の鋼板を接着合成すると、図より板厚比は $2.3\text{mm}/9\text{mm}=0.26$ となる。板厚比0.26に対して、剥離発生ひずみ ϵ は 1800μ となり、鋼の弾性係数 $E=2 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ および合成後の断面積 $A=680\text{mm}^2$ (幅50mm)としたとき、 $P=\epsilon EA=245\text{kN}$ となり、剥離強度を算出できる。

また、降伏荷重レベルを超えるように鋼板の板厚を決定する場合、SM490材(降伏応力 $\sigma_y=245\text{N/mm}^2$)の降伏ひずみは $\epsilon_y=\sigma_y/E=1225\mu$ 、図より板厚比は0.4である。よって母材の板厚9mmより、剥離強度が降伏荷重レベルを超える鋼板の板厚は片面あたり $0.4 \times 9\text{mm}=3.6\text{mm}$ となる。

以上のように、板厚比と剥離強度の相関曲線を用いて、剥離強度を算出することができ、剥離に対する強度評価が可能である。

4. せん断耐力実験における鋼桁の回復効果検証

4.1 目的

3章で示した剛性および強度回復の結果を踏まえて、板厚2.3mmの鋼材と10mm厚のダクタルで補修された鋼桁についてせん断耐力実験を実施し、補修鋼部材の回復性能を検証する。

4.2 実験方法

使用した1000kN試験機および試験体を写真3に示

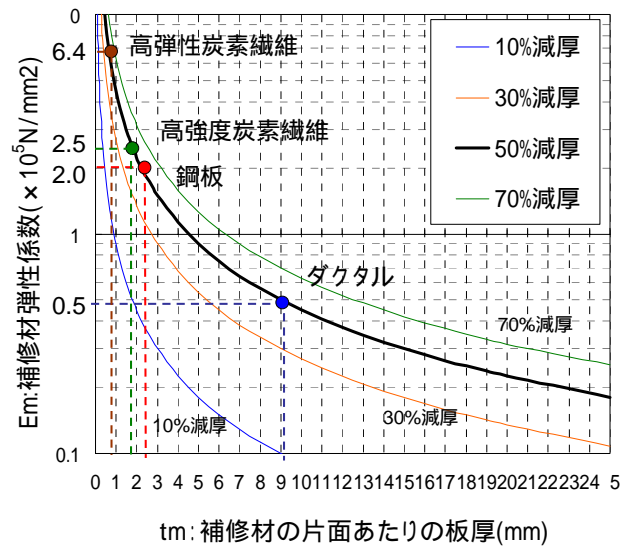


図5 母材板厚9mmの減厚に対する剛性回復曲線

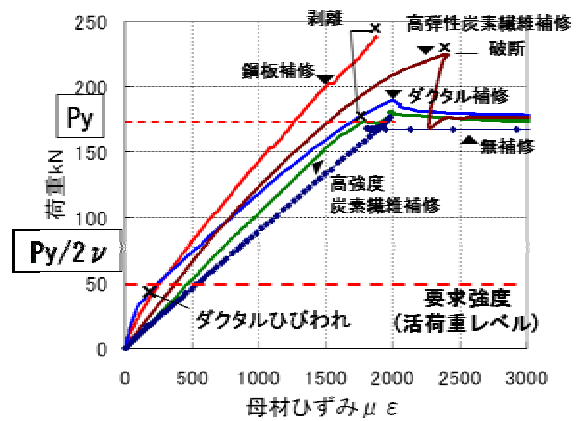


図6 各補修における強度レベルの一覧

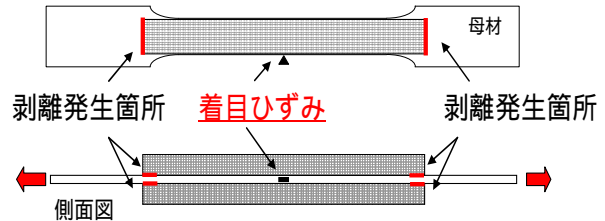


図7 剥離発生箇所および着目ひずみ位置

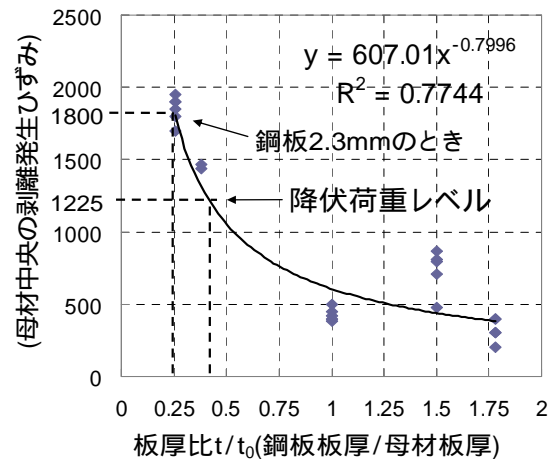


図8 剥離発生ひずみと板厚比の相関曲線

す。着目パネルにせん断力を曲げモーメントより支配的に作用させた。試験は2台の試験機による同時変位制御で行い、せん断座屈を発生させた。試験体パラメータは、健全タイプ、腐食減厚を模擬した下部欠損タイプ(下フランジが腐食により欠損)、ダクトル補修および鋼板補修とした。補修は、下部欠損タイプに対し、L字型のダクトル($t=10\text{mm}$)および鋼板($t=2.3\text{mm}$)を、両側から接着した。図9に試験体の一覧を示す。

4.3 実験結果(耐荷力の回復)

載荷機2の荷重-鉛直変位の関係を図10に示す。健全タイプ1.0に対して、下部欠損モデルは耐荷力が0.83に低下した。その下部欠損モデルに対して、2.3mm厚の鋼板補修を行うと、0.91まで耐荷力が回復した。10mm厚のダクトル補修を適用すると、1.05まで回復した。図11に荷重-腹板中央面外変位の関係を示す。下部欠損モデルで、荷重が低下したのに対し、補修後は荷重が増加しているのが分かる。

4.4 破壊特性

健全タイプは、パネル全体にかけてせん断座屈が生じ、斜め張力場が形成された。

下部欠損タイプは、健全タイプ同様せん断座屈が生じ、斜め張力場が形成されたが、変位11mmに到達すると下部欠損部から亀裂が発生した。

ダクトル補修は、350kN付近から微細なひび割れが発生し、変位6mmにはダクトルとウェブ接着面の端部から剥離が発生し、変位9.4mmのときウェブ側のダクトルが完全剥離した。変位10mmではダクトルの中央部にひび割れが発生し、終局に至った。

鋼板補修は、荷重400kNを越えた頃、剥離が発生した。その後変位6mmに到達すると、ウェブ面との接着面から剥離した。終局変位17mmでは、さらに片側の鋼板が完全に剥離し、落下した。試験終了後の破壊状況を写真4に示す。

5. 結論

本研究は、補修により健全相当まで回復可能で、且つ実用的な性能回復評価法の提案を目的として、各種実験を行った。得られた結論を以下に示す。

- (1)弾性係数と強度の異なる補修材料に対する必要剛性および強度の評価法について示した。
- (2)鋼桁で最も腐食する桁端部に対するせん断耐荷力実験により、各補修材の耐荷力回復を確認した。



写真4 各補修における破壊状況

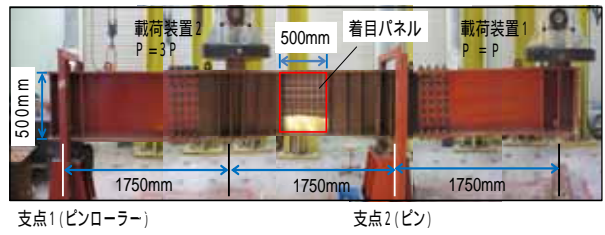


写真3 試験体概要

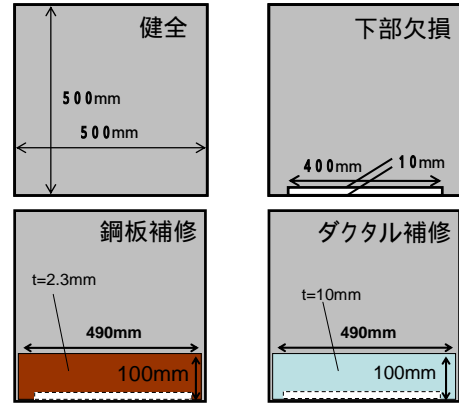


図9 試験体パラメーター一覧

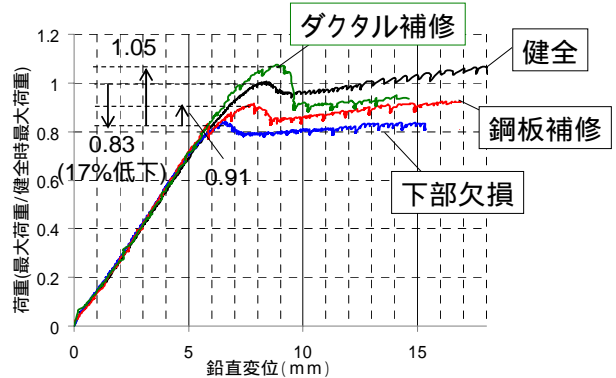


図10 荷重と鉛直変位関係

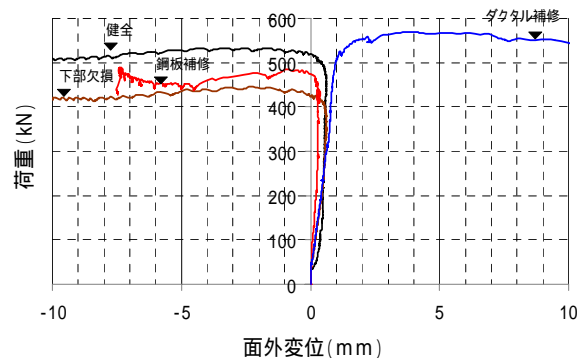


図11 荷重と腹板中央面外変位関係

参考文献

- 1)土木学会:腐食した鋼構造物の残存性能評価および性能回復技術,2007年5月
- 2)島袋秀也,下里哲弘,勝山真規:「接着合成鋼板の回復評価手法に関する実験的研究」第2回土木学会西部支部沖縄会技術発表講演会(平成24年10月)