

(11) CFRPによって補修された鋼管構造部材の 曝露試験と力学性能評価

中野 大希¹・三枝 玄希²・松本 幸大³・藤本 信介⁴・松井 孝洋⁵

^{1,2} 日本建築学会正会員 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建築・都市システム学専攻
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)
E-mail:d143534@edu.imc.tut.ac.jp,g155503@edu.imc.tut.ac.jp

³ 土木学会正会員 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)
E-mail:y-matsu@ace.tut.ac.jp

⁴ 日本建築学会正会員 東レ建設 技術部 (〒530-8222 大阪府大阪市北区中之島 3-3-3 中之島三井ビル 19階)
E-mail:shinsuke_fujimoto@tcc.toray.co.jp

⁵ 土木学会正会員 東レ ACM 技術部 (〒103-8666 東京都中央区日本橋室町 2-1-1)
E-mail:Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

近年、鋼構造物の経年による減肉・性能低下が社会問題となっている。これに対し、CFRPを用いた補修・補強技術が多く提案・適用されている。筆者らは、工作物等に多く用いられている溶融亜鉛メッキ円形鋼管で構成されるトラス構造物を対象としたCFRPによる補修工法の研究・開発を進めている。本論文では、塔上での補修施工を行った鋼管トラス部材について、(1)弾性曲げ試験による補修前後の剛性評価、(2)補修材について約2年半の屋内・屋外曝露を行い経年による剛性の変化、(3)曝露後の軸圧縮試験による効果の検証を行った結果を報告する。

Key Words : CFRP, repair, exposure test, bending stiffness, buckling strength

1. はじめに

我が国の高度成長期に建設された構造物は、半世紀以上を経てきており、構造材料の経年劣化やそれに伴う構造性能低下が指摘されてきている。こうした材料の劣化や性能低下は、重大な事故に発展する可能性があり、特に社会基盤構造物の場合は、それに伴う経済損失も大きい。鋼構造分野において、経年による劣化の代表は腐食であり、防錆処理が施された鋼材であっても、立地条件などによっては数十年経過することで著しい腐食が生じている例が報告されている^{1,2)}。こうした状況において、社会基盤構造物の維持管理は極めて喫緊且つ早急に対策を行う必要があると言える。一方で、高度成長期に大量に建設された構造物を短期間で補修・補強また更新することは困難であり、個々の構造物の重要度や損傷度、また、残存強度や施工性等を調査して管理運用を行うアセットマネジメントが必要である。その際、短時間で重機などを必要としない簡便な延命化技術が確立されることは、合理的なアセットマネジメントの一助となると考え

られる。腐食した鋼部材の耐力評価やCFRPによる補強に関しては、H形断面や山形断面等の開断面で部材表面に平面を多く有する鋼材に対する補強効果が述べられてきている^{3,4)}。一方、構造部材として、円形鋼管が用いられている構造物も多数存在するが、こうした曲面状の鋼部材に対する補強法は、開断面部材に比べ知見が少なく、筆者らは、工作物等にも用いられる溶融亜鉛メッキ鋼管に対するCFRP補修を対象とした補修工法の検討を行ってきている^{5,7)}。本論では、既往の力学特性に関する実験分析成果を経て、実証試験に関する結果を報告する。対象とするCFRPで補強された鋼管部材は、実構造物に使用された状態で高所作業により施工されたものとして、その部材に対して、短期間の応急対策を前提として、施工の簡便性を優先し、保護塗装等を行わない状況で、2年半の屋外および屋内曝露試験を実施した。半年毎に非破壊曲げ試験を行い部材の圧縮耐力に影響を及ぼす曲げ剛性の評価を3点曲げ試験で行うとともに、屋内外の代表部材に対して非破壊圧縮試験を行い、座屈耐力と設計式との比較を行った。

2.試験体概要、剛性評価方法

表-1 断面性能

	断面積 [mm ²]	断面2次モーメント [mm ⁴]	弾性係数 [GPa]
鋼管	420.50	178000	205
CFシート	125.06	58465	440
CFRP	651.95	332111	88

試験体はφ60.5×2.3mmの溶融亜鉛メッキ鋼管を使用し、CFRPシート（UM46-40G）を含浸樹脂（E2500）を用いてハンドレイアップ成形によって3層巻いたものを作成し屋内養生，屋外曝露を行う．その試験体について定期的に3点曲げ試験及び圧縮試験を行った．

屋外曝露した試験体は，紫外線等の影響により樹脂が劣化し，剛性の低下が予想されることから，劣化状態にある屋外曝露試験体と屋内養生試験体とでの剛性の比較を行う．また，経時変化による剛性率の変動を確認する．

剛性の評価方法としてCFシート評価とCFRP評価を行うものとした．CFシート評価とは樹脂を考慮しない評価方法で，シートの総厚を0.217mm×3層で算出し，弾性係数は公称値の440GPaを用いて断面性能の理論値を算出する．CFRP評価とは繊維体積含有率を20%，樹脂の弾性係数を0と仮定し，CFRP評価時の総厚は0.217mm×5×3層となる．この2種の評価方法で剛性を評価し，どちらの評価方法がより実験値と一致するかを検討する．表-1に鋼管，CFシート，CFRPの断面性能を示す．

3.曲げ試験

(1) 試験概要

曲げ試験における試験体図を図-1に示す．曲げスパンは3660mmとし，屋外曝露試験体と屋内養生試験体を半年ごとに部材性能を確認するため曲げ試験を行った．

（成形直後の1回目試験2015年2月，2回目試験2015年10月，3回目試験2016年3月，4回目試験2016年9月，5回目試験2017年3月，6回目試験2017年8月）また，荷重方向をH方向（曝露面が圧縮側），V方向（曝露面が側面）の2方向とする．試験体総数は無補修のものを1体，屋内養生の試験体を5体，屋外曝露の試験体5体の計11体とした．荷重部はCFRPにより表面が平滑でないことから図-4に示すようにPPバンドを用いて荷重した．荷重は10kNロードセルを用いて計測し，図-1に示すように変位は荷重点より±150mm，±1050mm，±1700mmの位置で計測した．図-2は2017年8月時点での屋内外条件下での試験体の状態であり，図-2 (d)では樹脂痩せが確認できる．図-3は屋外試験体の曝露状況であり，図-4は3点曲げ試験時のスパン中央の荷重時の様子である．

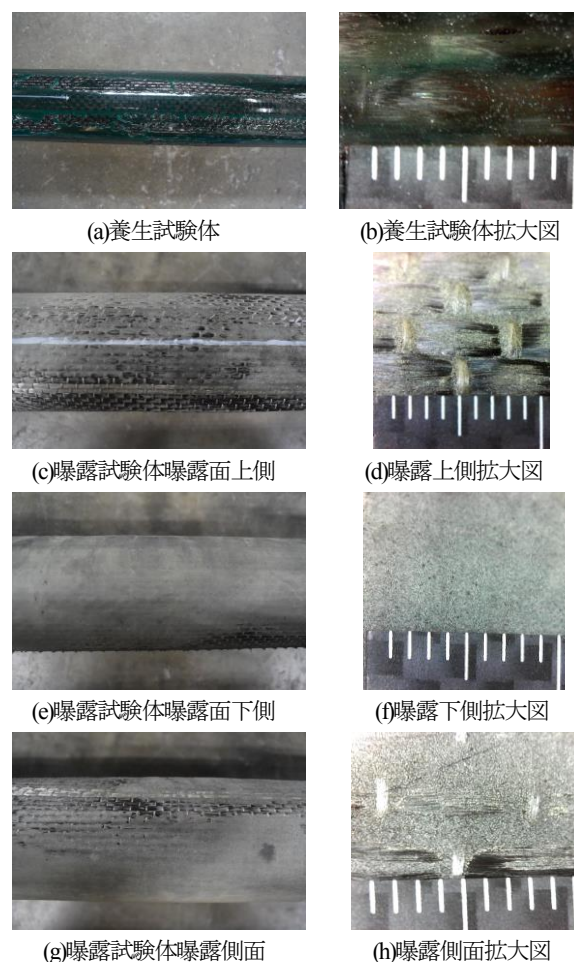


図-2 試験体写真



図-3 屋外曝露状況

図-4 スパン中央の荷重状況

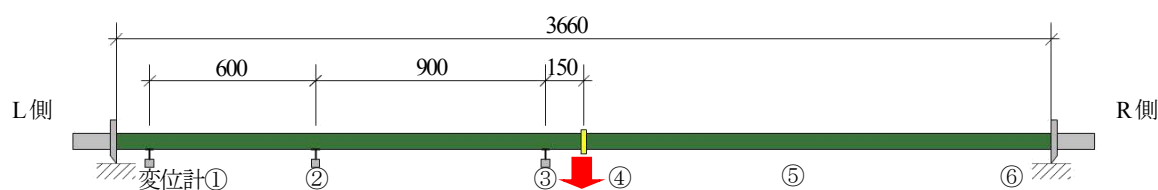


図-1 試験体

(2) 試験結果

図-5には屋外曝露試験体の1回目、6回目試験のH、V方向の荷重変位関係を示す。図中には2種の理論値と実験値が描かれており、これらは図-1の6箇所の変位計位置と対応している。無補修試験体は1000N程度で降伏するが、補修試験体については2000Nの載荷後も線形弾性であり、曲げ剛性はCFRP評価と比較的一致している。また、表-2にはCFシート、CFRP評価に対する比、全試験体の変動係数を示す。相関係数を荷重が100Nから最大荷重（約2000N）までの範囲で算出し、全試験を通した全ての試験体で相関係数が99.9%以上であり、線形弾性状態で評価できている。変動係数は1~2%程度となっており、極めて安定した結果が得られたと言える。また1, 2, 4, 6回目試験における剛性の評価はCFRP評価と比較的一致しており、CFシート評価によって安全側評価となることが分かる。これはCFシートとCFRPでは軸剛性（弾性係数×断面積）は等しいが、鋼管の外側に補修材が配されることから、曲げ剛性（弾性係数×断面2次モーメント）はCFRP評価の方が大きくなるためであり、実際の状態に近いと考えられる。しかし、冬季に試験を行った3, 5回目試験ではCFシート評価に比較的一致していたことが表-2から確認できる。また、補修施工時の方向の違いであるH方向、V方向と関連性のあるバラつきなどは見受けられない。図-6は経過時間を横軸、剛性を縦軸にとり方向別に分析したものである。図-6から、1回目試験から3回目試験にかけて年月が経過すると剛性が低下していることが確認できる。しかし、3回目から4回目にかけては剛性が回復し4回目から5回目にかけては再度剛性が低下していることが確認できる。このことから、夏季に実験を行うことで剛性が高く、冬季に実験を行った際には剛性が低いという結果となった。表-3はH、V方向別の初回試験時に対する剛性比を示したものでV方向（曝露面が側面）に比べH方向（曝露上面が圧縮側）の剛性低下率の方が大きいことが確認できる。この剛性低下の原因として、紫外線による樹脂劣化の影響が考えられる。

表-4は屋内外方向別の初回試験時に対する剛性比を示したもので、屋内養生に比べ屋外曝露試験体の剛性低下率が大きいことが分かる。屋外曝露試験体の剛性低下率は1番高いもので3回目試験と1回目試験とを比較したときに8%程度であり、直近の6回目試験と1回目試験との比較では低下率は5%程度となっている。また、屋内養生試験体の外観に変化はなく、屋外曝露試験体ほどではないが若干の剛性低下がみられた。年月の経過による剛性変化の挙動も屋外曝露試験体と類似しており、夏季の試験時には剛性が高くなり冬季の試験時では剛性は低い結果となった。

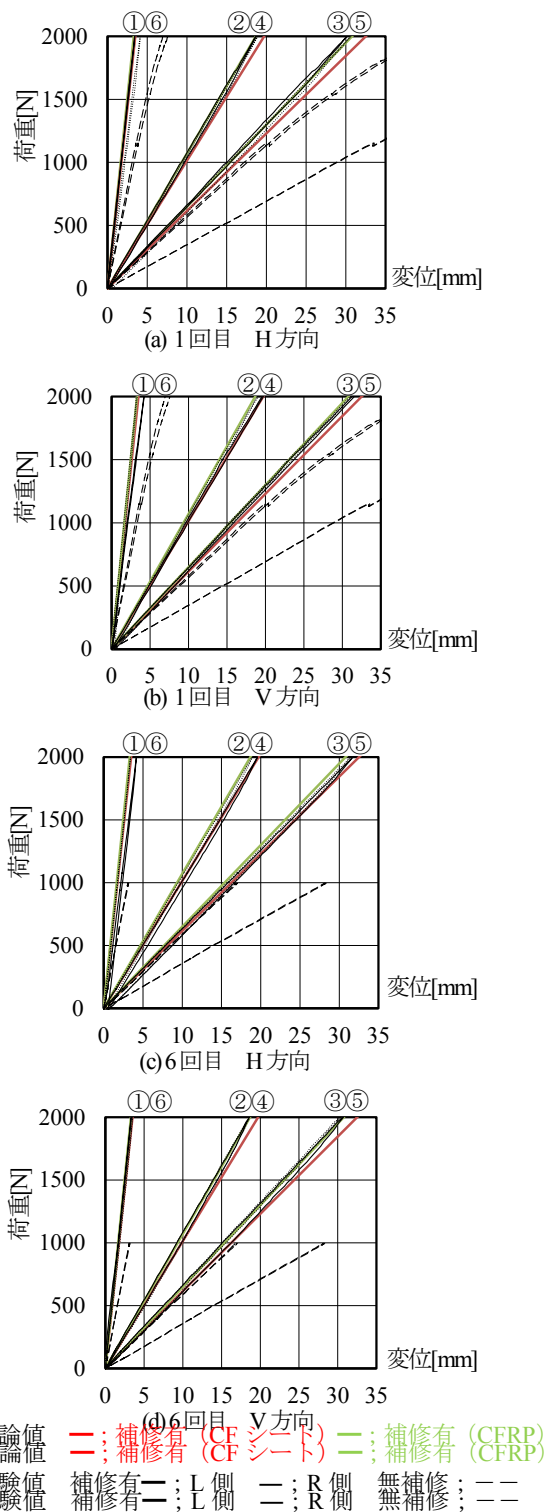


図-5 屋外曝露試験体の荷重-変位関係

表-2 剛性の比較結果、変動係数

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目
CFシート比	1.066	1.055	0.988	1.041	0.998	1.033
CFRP比	1.009	0.999	0.936	0.985	0.945	0.978
変動係数[%]	1.144	0.942	0.935	1.385	1.280	2.015

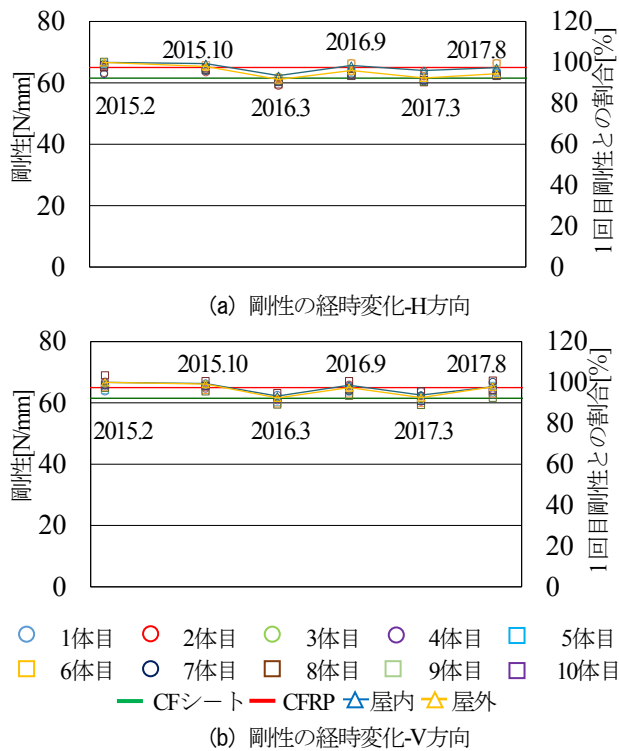


図-6 各載荷方向別の曲げ剛性

表-3 H, V方向別剛性比

回数	1	2	3	4	5	6
H方向	1.00	0.987	0.926	0.972	0.941	0.959
V方向	1.00	0.993	0.929	0.981	0.932	0.978

表-4 屋内外別剛性比

回数		1	2	3	4	5	6
屋外	H	1.00	0.98	0.92	0.96	0.92	0.94
	V		0.99	0.92	0.97	0.93	0.98
屋内	H		0.99	0.93	0.98	0.96	0.97
	V		0.99	0.93	0.99	0.94	0.98

4.圧縮試験

(1) 試験概要

図-8に圧縮試験における試験体図を示す。変位計は曲げ試験と同じ位置に配置し、歪ゲージは試験体中央から±400mm, ±900mm, ±1400mmに貼付した。試験体は試験体両端部のガセットプレートにより治具と固定する。圧縮試験用治具として、試験体端部にナイフエッジを取り付け両端ピン支持とした。試験体は屋内養生試験体、屋外曝露試験体を6回目の曲げ試験による剛性評価を行った結果から、平均に近いものを圧縮試験を行う試験体とした。また、熔融亜鉛メッキ鋼管の試験体1体を加えた

計3体とした。圧縮試験は2017年8月に行い、補修試験体は2年半が経過している。試験は70MPa油圧式ジャッキを用いて準静的載荷とした。図-9には補修試験体の最大荷重時の変形状況を示す。

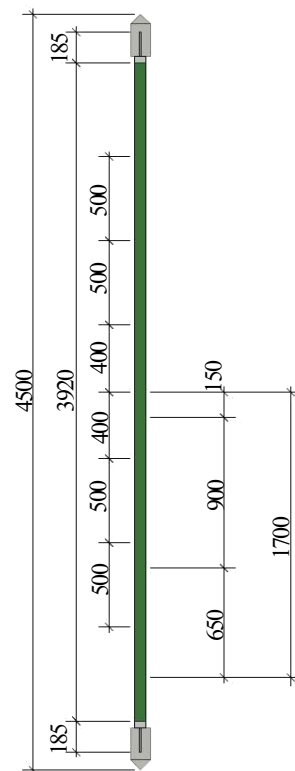


図-8 試験体

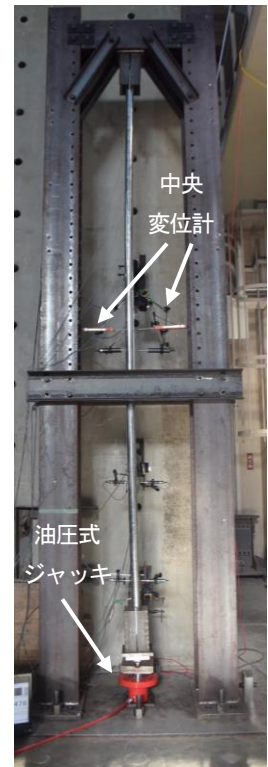


図-9 試験の様子

(2) 設計式

本研究で対象とする鋼管トラス構造の圧縮耐力は以下の式が用いられている。対象部材が弾性座屈となることから(1)式によりオイラー座屈応力度 σ_E を算出する。(2)式は日本建築学会鋼構造設計規準¹⁰⁾における短期許容応力度を示し、オイラー座屈応力度 σ_E に対する安全性を加味した応力 σ_{ES} である。そして、(3)式は送電用支持物設計標準¹¹⁾における設計座屈応力を1.5倍した強風時荷重、着雪時荷重の設計応力 σ_{kas} である。これらの設計式を用いて許容座屈応力度曲線を描き実験値との比較及び検討を行う。

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{ES} = \frac{0.277}{0.6} \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \cong \frac{9}{13} \sigma_E \quad (2)$$

$$\sigma_{kas} = \frac{1.5}{2.2} \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (3)$$

ここに、 λ は細長比 ($\lambda=L/i$)、 L は座屈長さ、 i は断面二次半径、 E は弾性係数とする。本研究で対象とした部材は $L=4500\text{mm}$ 、 $i=20.57\text{mm}$ 、 $E=205000\text{N/mm}^2$ とする。

(3) 試験結果

図-10は溶融亜鉛メッキ鋼管、屋内養生及び屋外曝露試験体の荷重面外変位、荷重歪関係を示したものである。載荷は鋼材が降伏する前に除荷し、載荷除荷を3回繰り返す、変位及び歪の挙動を確認した。面外変位及び歪は、共に安定した挙動を示しており、全ての試験体で残留歪も生じず、弾性曲げ変形で一定荷重を保持している状態となっていることが確認できる。さらに、載荷後の補修試験体ではCFRPの損傷も見当たらなかった。溶融亜鉛メッキ鋼管、屋内養生、屋外曝露試験体の最大荷重はそれぞれ20.2kN、26.5kN、28.5kNであり、溶融亜鉛メッキ鋼管に対して屋内養生試験体は1.31倍、屋外曝露試験体は1.41倍の座屈耐力となった。

図-11は前節の設計式から得た座屈応力度曲線と実験値を比較したものである。実験値には5種のプロットがされており、屋内養生試験体、屋外曝露試験体それぞれを2章で示したCFシート評価、CFRP評価の評価方法を用いて算出した。また、表-5には実験値と設計値を比較するため、最大強度を設計式から得られた圧縮強度で除したものを示している。表-5より全ての試験体、評価方法で(1)式に対して実験値/設計値が0.82～1.14に収まっており設計値と一致していることが確認できる。また、(2)～(3)式に対して実験値/設計値が全ての試験体、評価方法で1.0を上回っており安全側で評価されることが確認できた。

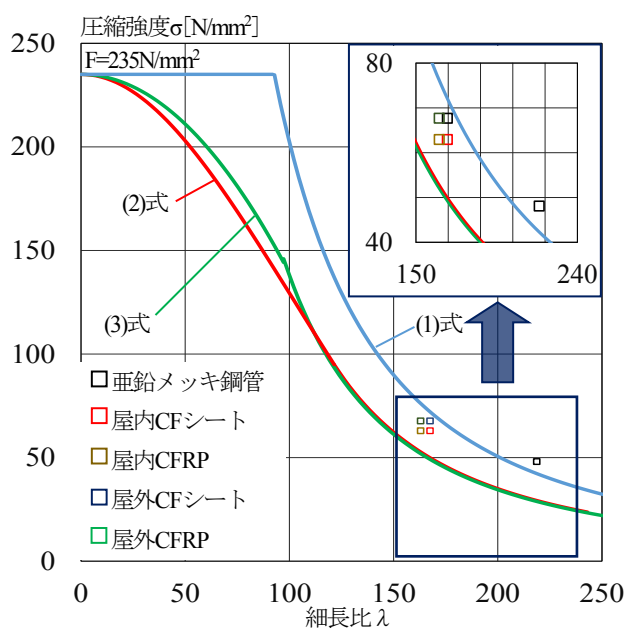


図-11 設計値と実験値の比較

表-5 設計値に対する実験値

実験値/設計値		(1)式	(2)式	(3)式
亜鉛メッキ鋼管		1.14	1.64	1.67
屋内	CFシート	0.87	1.26	1.28
	CFRP	0.82	1.19	1.21
屋外	CFシート	0.94	1.36	1.38
	CFRP	0.89	1.28	1.30

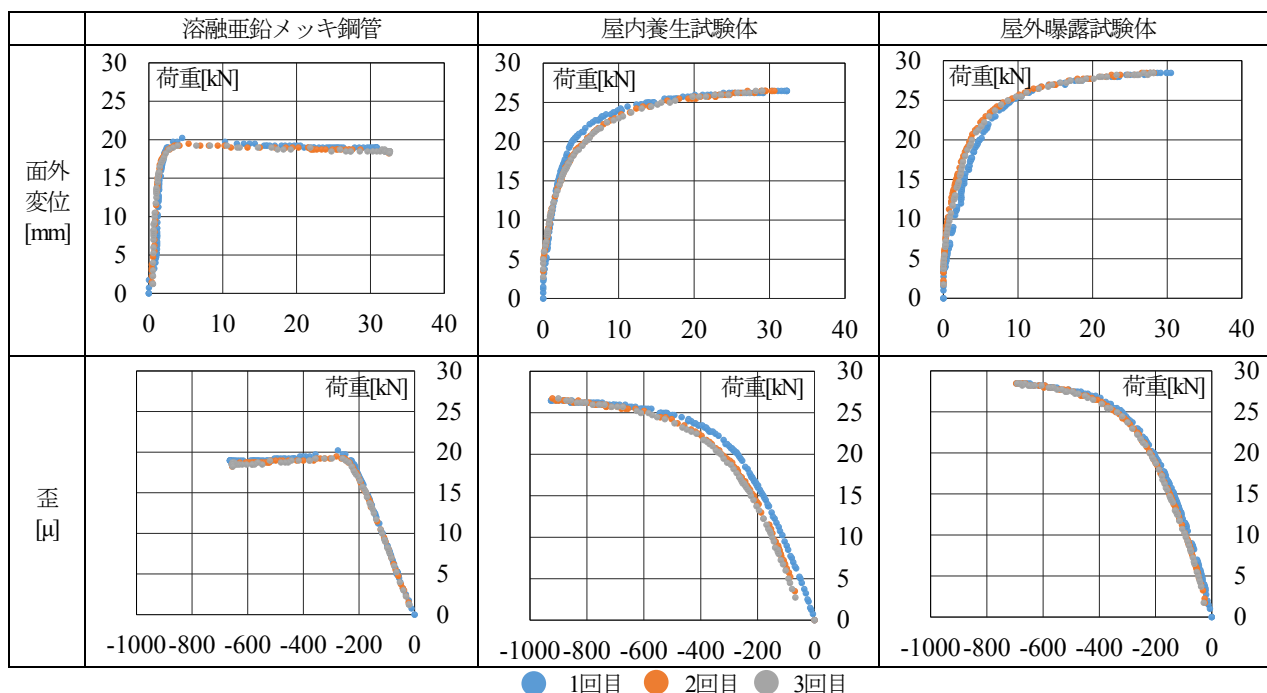


図-10 荷重-面外変位、歪関係

5.おわりに

本研究ではCFRPによって補修施工を行った鋼管トラス部材について、弾性曲げ試験による補修前後の剛性評価、補修材について約2年半の屋内・屋外曝露を行い経年による剛性の変化、曝露後の軸圧縮試験による効果の検証及び考察を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 3点曲げ試験において、初期値の剛性評価はCFRP評価したものに良く一致しており、経時についてはCFシート評価によって安全側評価となることを示した。また、屋外曝露試験体の方が屋内養生試験体よりも剛性低下率が大きく、V方向と比べてH方向側の剛性低下率が大きいことも示した。しかし、その低下率は表面の塗装等を施さなくとも1割に満たないことが明らかになった。
- 2) 圧縮試験において、屋内養生試験体、屋外曝露試験体の座屈耐力は溶融亜鉛メッキ鋼管に対して有効に機能し耐力向上に寄与した。また、全ての試験体で短期外力が作用する場合の設計式に対して安全側評価となることを確認した。

謝辞：本研究の実施にあたっては、関西電力株式会社、株式会社美貴本 山口 信之氏に有用な助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造シリーズ18 腐食した鋼構造物の耐久性調査マニュアル，2009.
- 2) 電気学会：電気学会技術報告 架空送電設備の鋼材腐食・摩耗現象，2009.
- 3) 服部明生，玉井宏章，高松隆夫：炭素繊維プレートによる化学プラント架構小梁補強の実施工例，日本建築学会技術報告集 第18巻 第39号，pp.559-564, 2012.
- 4) 杉浦江，小出宜央，安森浩，加藤健；樹脂ブロック補強による隅肉溶接継手の疲労強度向上，第9回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム 講演集，土木学会・日本建築学会，2011.
- 5) 松井孝洋，松本幸大，古賀惟彬，服部明生，山口信之，山田勝：断面欠損を有する鋼管部材のCFRPによる補修効果，日本鋼構造協会 鋼構造論文集，第21巻第83号，pp.1-10, 2014
- 6) 松井孝洋，山本展久，服部明生，松本幸大：溶融亜鉛メッキ鋼材とCFRPとの接着強度に関する考察，日本建築学会 技術報告集，第21巻 第47号，pp.141-144, 2015
- 7) 松本幸大，山本展久，藤本信介，服部明生，松井孝洋，山口信之，山田勝：CFRPによる鋼管トラス構造の補修工法，第11回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集(CD-ROM), 2015.11
- 8) 土木学会：複合構造標準示方書2014年版，2015
- 9) Xiao-Ling Zhao and Lei Zhang: State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures, Engineering Structures 29, pp. 1808-1823, 2007.
- 10) 日本建築学会：鋼構造設計規準 一許容応力度設計法一，2005
- 11) 電気学会：送電用支持物設計標準 JEC-127，1979.

MECHANICAL CHARACTERISTICS AND EXPOSURE TEST OF STEEL PIPE STRENGTHENED BY CFRP

Daiki NAKANO, Genki MIEDA, Yukihiro MATSUMOTO,
Shinsuke FUJIMOTO and Takahiro MATSUI

Recently, thickness and performance reduction due to aging of steel structure is becoming a social problem. In contrast, many repair and reinforcement technique using CFRP have been proposed and applied. The authors conduct research and development of repair method using CFRP for truss structure consisting of by galvanized steel pipes. In this study, (1) stiffness evaluation with/without CFRP strengthening according to elastic bending test, (2) variation of stiffness due to aging caused by exposure test (3) verification of the effect of after the exposure according to axial compression test are reported. Then, firstly, it was made clear that two kinds of evaluation method for bending stiffness were proposed and corresponded to experimental result, and the bending stiffness deterioration rate of exposed specimen turned out to be larger than non-exposed specimen through the three-point bending test. Secondly, it was confirmed that CFRP can efficiently increase buckling strength and buckling strength can be evaluated by the design standard of AIJ and JEC.