

論文 コンクリート充填鋼管部材の補修方法に関する実験的検討

池田 学^{*1}・萬代 能久^{*2}・斉藤 雅充^{*3}・吉田 直人^{*4}

要旨: コンクリート充填鋼管 (以下, CFT) 部材は, 鋼管とコンクリートの合合作用により, 断面寸法に比べて大きな耐荷力が得られ, 変形性能にも優れている。一方, 地震時等により損傷が生じた場合の補修方法やその効果については明らかにされていない。そこで, CFT 部材の損傷度に応じた 3 タイプの補修方法を考案し, 補修効果を確認するため載荷試験を実施した。補修方法は, 鋼管に局部座屈が生じた部位の外側に鋼管を巻き, すき間をモルタルで充填する二重鋼管方式を基本とした。載荷試験の結果, 損傷が生じた CFT 部材を補修することにより, 初期時の耐力や変形性能と同等レベルまで回復できることを確認した。

キーワード: コンクリート充填鋼管部材, 補修, 二重鋼管方式, 復旧性, 損傷レベル

1. はじめに

コンクリート充填鋼管 (以下, CFT) 部材は, 円形あるいは矩形断面の鋼管の中に, コンクリートを全体にわたって隙間なく充填した部材である。CFT 部材は, 鋼管とコンクリートの合合作用により, 断面寸法に比べて大きな耐荷力が得られ, 変形性能にも優れている。また, コンクリート打込み時に鋼管が型枠の役割を果たすため, 狭隘な箇所での施工や急速施工等の施工環境の厳しい箇所にも適用でき, 鉄道駅部の高架橋柱等で円形断面の CFT 部材が適用されるケースが増えている¹⁾。

CFT 部材の地震の影響に対する照査は, 「複合構造標準示方書」(以下, 複合示方書)²⁾や「鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)」(以下, 耐震設計標準)³⁾によると, 部材の損傷レベルを補修の要否や難易度に応じて設定し, 想定される地震動に対して, 主として復旧性の観点から所要の損傷レベル以内であることを確認することにより行う。この場合, 復旧性の観点から, 部材の損傷レベルをどのように設定するかが重要となる。しかしながら, CFT 部材の補修方法やその効果については明らかにされていない。

CFT 部材の補強の検討事例としては, 鋼繊維を混入した構造⁴⁾, 充填コンクリートに鉄筋を挿入した構造⁵⁾等があるが, いずれも新設構造であり, 損傷が生じた場合の補修としての適用は困難である。一方, コンクリート無充填の円形鋼管については, 鋼管の外側にすき間をあけて鋼板を巻立てる構造⁶⁾, 鋼管に炭素繊維シートを巻き立てる構造^{7),8)}等が提案されている。また, 文献 9)においては, 損傷を受けた鋼製橋脚の補修方法について, 実験および解析による検討が行われている。いずれも, 鋼管の局部座屈の発生や進展を抑制することを目的とし

た構造である。このように, 参考となる検討事例はあるものの, CFT 部材を対象とした損傷に対する補修方法の検討は, 著者が知る限り行われていない。

過去の地震で CFT 部材に損傷が生じた事例は認められていないが, 大規模地震に対して軽微な損傷を許容した設計が行われており, 今後, 大規模地震時に損傷が生じる可能性はある。このような場合に, 最適な補修方法を判断することが現状では困難であると思われる。

以上のように, 地震時に損傷が生じた場合に適切な補修方法を判断できるようにするため, また設計時の部材の損傷レベルの設定根拠を明らかにするために, CFT 部材の損傷に対する補修方法とその効果を明らかにすることが重要である。

そこで, 本研究では, 円形断面の CFT 部材を対象に, 損傷を受けた場合の補修効果を確認するために載荷試験により検討を行った。はじめに, 既往の載荷試験における CFT 部材の損傷状況を考慮して, 損傷度に応じた 3 タイプの補修方法を考案した。これらの補修方法について載荷試験を実施し, 補修効果を確認した¹⁰⁾。これを踏まえ, 復旧性の観点から, CFT 部材の損傷レベルの設定について再評価した。

2. CFT 部材の補修方法の考案

2.1 補修における基本的な考え方

CFT 部材の損傷に対する補修方法について, 既往の交番載荷試験結果^{例えば 11),12)}等から判断すると, 耐力・変形性能の回復の観点から, 以下のことが考えられる。

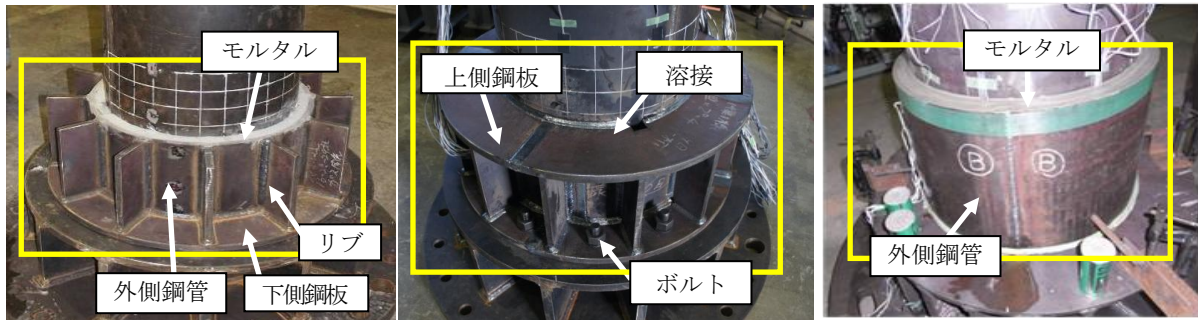
- ・鋼管の局部座屈が発生していなければ, 曲げ耐力は低下しないため補修は不要である。
- ・鋼管の局部座屈の発生後は, 繰り返しに伴い局部座

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造(正会員)

*2 西日本旅客鉄道株式会社 大阪工事事務所 (前 鉄道総合技術研究所)

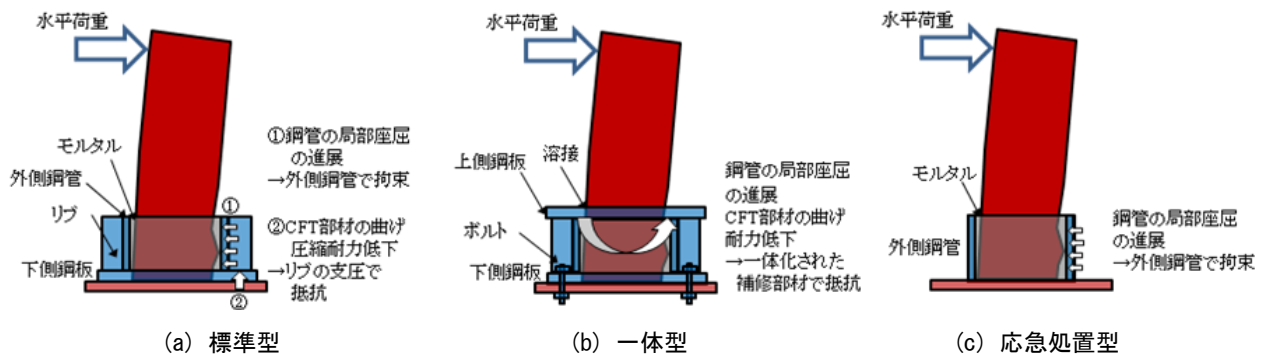
*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造

*4 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 (前 鉄道総合技術研究所)



(a) 標準型 (b) 一体型 (c) 応急処置型

図-1 3タイプの補修方法（二重鋼管方式）の構造



(a) 標準型 (b) 一体型 (c) 応急処置型

図-2 各補修方法の抵抗メカニズム（想定）

屈が進展し荷重が低下する。そのため、曲げ耐力や変形性能の低下を抑えるためには、鋼管の局部座屈の進展を抑える補修が必要である。

- ・鋼管の局部座屈が大きい場合は、局部座屈の進展抑止のみでなく耐力を回復できる補修が必要である。

また、補修作業は狭隘空間で行う場合が多く想定されるため、補修方法には施工しやすさも求められる。

2.2 補修方法の考案

鋼管の局部座屈の進展抑止と施工性に主眼を置き、部材の損傷レベルに応じて、図-1に示す3タイプの補修方法を考案した。これらは、図-2に示す抵抗メカニズムを想定したものである。いずれも、CFT部材の鋼管の局部座屈部分の外側に鋼管を巻き立てる「二重鋼管方式」である。以下に、それぞれの構造の概要と目的を述べる。

(1)標準型の補修方法

CFT部材の外側に鋼管を巻き、すき間にモルタルを充填する。外側の鋼管にはリブを設け、下側には鋼板を設ける。CFT部材とはモルタルを介して結合しており、外側鋼管や下側鋼板とは直接結合していない。

本構造は、部材の損傷レベル3（後述の図-12、表-3参照）に対する標準的な補修方法を想定したもので、外側鋼管でCFT部材の鋼管の局部座屈を拘束するとともに、リブの支圧でCFT部材の曲げ圧縮耐力の低下を補完することを期待した構造である。

(2)一体型の補修方法

標準型の構造に、下側鋼板をボルトで固定し、さらに外側鋼管の上側にも鋼板を設けてCFT部材の鋼管に溶接で結合して、補修部材とCFT部材の一体化を図った構造である。

本構造は、部材の損傷レベル3で特に局部座屈が大きい場合の補修を想定したもので、補修部材を一体化することで、曲げモーメント等によるCFT部材の損傷部分への負荷を軽減し、鋼管の局部座屈進展を抑止する。

(3)応急処置型の補修方法

CFT部材の外側に鋼管を巻き、すき間にモルタルを充填する構造で、3タイプの中で最も施工が容易である。CFT部材の鋼管の局部座屈を拘束することで、その進展を抑えようとするものである。部材の損傷レベル3を超えるような損傷が大きい場合に、主に余震への対策として、本復旧までの応急的な処置を目的とした構造である。

なお、CFT部材は、ラーメン高架橋の柱に適用されるケースが多いため、非補修部位への負担軽減等の観点から、補修後に剛性や耐力があまり変化しない補修方法が望ましい。

3. 補修効果の確認のための载荷試験

3.1 試験概要

3タイプの補修方法について模型試験体を製作し、片持ち柱形式において、交番载荷試験を実施した(図-3)。試験体は、実物の1/3程度の寸法を想定した。CFT部材

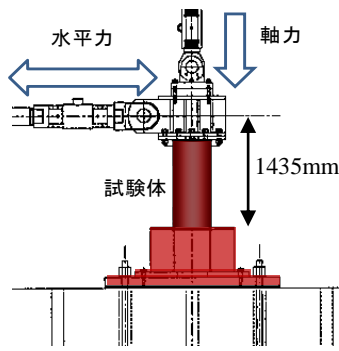
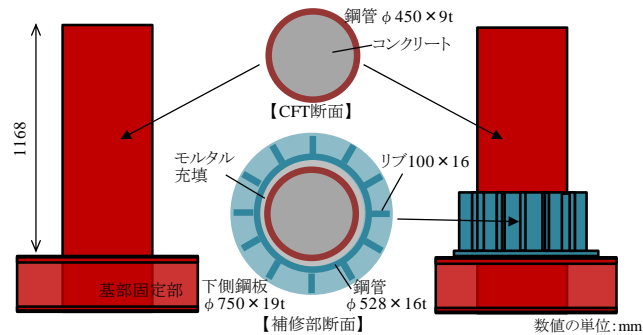


図-3 荷重試験の概要



(a) 初期時（補修前） (b) 補修後
図-4 試験体の概要（試験体 P-1）

表-1 試験体の諸元

試験体	外径 D(mm)	鋼管厚 t(mm)	径厚比 D/t	せん断スパン L(mm) (L/D)	軸力比 N'/N'y	材料強度		補修部材		
						コンクリート f'_c (N/mm ²)	鋼管降伏強度 f_{sv} (N/mm ²)	外径*1 (mm)	高さ*2 (mm)	板厚 (mm)
P-1	450	9.0	50	1350 (3.0)	0.15	24.0	346.0	528	270	16*3
P-2										
P-3										

注)*1 CFT部材と補修部材の鋼管のすき間は、試験体P-1,P-2は46mm（片側23mm）、試験体P-3は58mm（片側29mm）。

*2 試験体P-1,P-2の補修部材の高さは0.6D、試験体P-3は0.7D。

*3 試験体P-1,P-2の補修部材の板厚は鋼管とリブの両方を表す。

表-2 各試験体の荷重方法

試験体	初期荷重	初期荷重後の 損傷レベル	補修	補修後の荷重
P-1	交番荷重試験 (2回繰り返し)	3	標準型	交番荷重試験 (3回繰り返し)
P-2		3(局部座屈大)	一体型	
P-3	ハイブリッド	4	応急処置型	

の試験体の諸元を表-1に示す。CFT部材は実構造物に用いられる標準的なプロポーションに設定した。図-4に、試験体の一例として、試験体P-1について示す。

荷重は、初めに所定の損傷を付与するための荷重（初期荷重）を行い、補修をした後に、補修効果を確認するための荷重を行った。各試験体の荷重の方法を表-2に示す。

試験体P-1,P-2の初期荷重は、局部座屈の進展を目視で確認しながら、損傷レベル3相当の変位を交番荷重で与えた。部材の降伏変位を δy として、 $1\delta y$ 、 $2\delta y$ 、 $4\delta y$ で各ステップ2回繰り返しして荷重した後、試験体P-1は $6\delta y$ 相当の変位、試験体P-2には損傷レベル3の設計限界値（N点）である $8\delta y$ 相当の変位を与えた。降伏変位 δy は、試験体P-1は8.1mm、試験体P-2は7.2mmである。

試験体P-3の応急処置型は、損傷が大きい場合を想定し、初期荷重において損傷レベル3を大きく超える損傷を付与した。初期荷重の方法は、変位漸増の交番荷重では大变位の繰り返し数が実地震波と比べて多くなるため、地震波を静的に入力するハイブリッド応答試験¹³⁾で行った。入力地震波にはL2地震動³⁾を用いた。

補修後の荷重は、3体とも交番荷重とし、一定軸力下

で、水平変位制御による繰り返し漸増荷重とした。変位制御の基準となる降伏変位 δy は、試験体P-1、P-2は初期荷重と同じ変位、試験体P-3は計算値より7mmとした。

また、表-1には、補修部材の諸元も示している。外側鋼管とCFT部材のすき間は、鋼管の局部座屈の張出し高さ（以下、局部座屈高さ）をもとに設定した。応急処置型（試験体P-3）の外側鋼管は、他試験体よりも局部座屈高さが大きいためすき間を大きくし、施工性を考慮して板厚を小さくした。

標準型の外側鋼管とリブの断面は、CFT部材の曲げ耐力の7割の断面力に対して抵抗できるように、以下の式を満足するように設定した。

$$M_{ry} \geq 0.7M_{m,cf} \quad (1)$$

ここに、

M_{ry} : 補修部材の曲げ降伏耐力で次式により算定する。

$$M_{ry} = Z_r \cdot f_{sy} \quad (2)$$

Z_r : 鋼管およびリブの断面係数（圧縮側のリブを有効とみなしてリブ圧縮縁に着目して計算）

f_{sy} : リブの降伏強度（276N/mm²）

$M_{m,cf}$: CFT部材の曲げ耐力で複合示方書や耐震設計標準に基づき算定する。

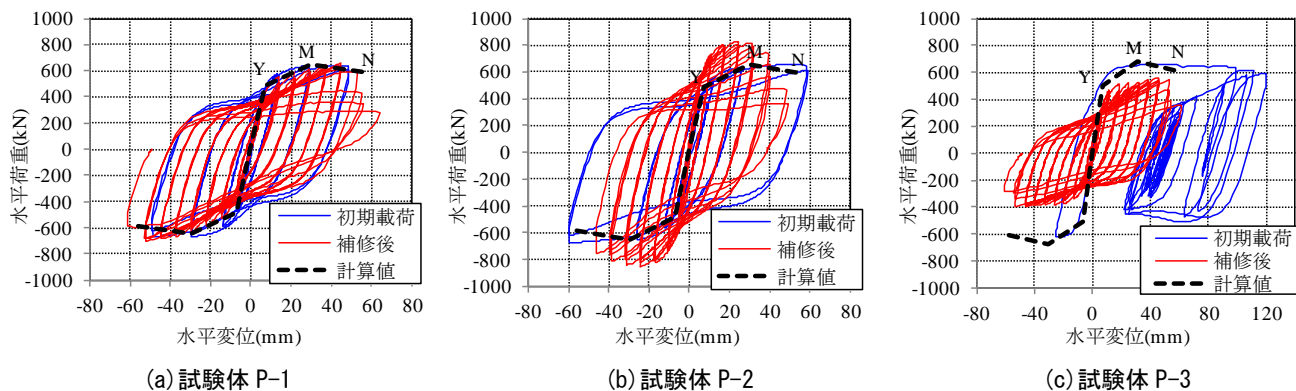


図-5 初期載荷および補修後の載荷試験結果の荷重変位関係

ここで、CFT 部材の曲げ耐力の 7 割に設定したのは、損傷を受けた CFT 部材自体の荷重分担も考慮したものである。なお、補修部材は、曲げモーメントに対して設計しており、軸力については CFT 部材で負担できるものとして考慮していない。一体型についても、外側鋼管とリブの断面は、標準型と同じ方法で断面を設定した。

いずれの補修部材も、初期載荷後に荷重 0 まで除荷した後に取り付けており、外側鋼管を半割にして、CFT 部材の外側から設置した後に、鋼管同士を溶接している。

3.2 初期載荷の結果

初期載荷の試験結果の水平荷重・水平変位関係を図-5 に青線で示す。図には複合示方書や耐震設計標準による計算値も破線で示している。

試験体 P-1、P-2 とも、最終ステップの 2 ループ目で荷重が低下しており、耐力が低下している状態にある。また、鋼管の局部座屈高さは、試験体 P-1 は 18mm、試験体 P-2 は 22mm である。

試験体 P-3 は、正側に大きく変位し、N 点の計算値の変位 (57.5mm) の 2 倍程度まで最大荷重を維持しているが、その後は繰り返しにより耐力の低下が認められる。

3.3 補修後の載荷結果

図-5 に、補修後の載荷試験結果を赤線で示す。

補修後の試験体 P-1 は、 $7\delta_y$ ($\approx 45\text{mm}$) まで緩やかに荷重は上昇し、 $8\delta_y$ ($\approx 53\text{mm}$) で荷重が急激に低下したため、載荷を終了した。この時点で、外観上は、補修部材の外側鋼管やリブに損傷は認められなかった。載荷後に補修部材を取り外すと、CFT 部材の鋼管の局部座屈部でき裂が生じていた。

補修後の試験体 P-2 は、補修部材の上側鋼板の直上の CFT 部材において、鋼管に新たに局部座屈が発生した。その後は、この局部座屈が進展し、最終的にはき裂が発生したため、載荷を終了した。載荷終了まで補修部材には損傷は認められなかった。

補修後の試験体 P-3 は、 $7\delta_y$ ($\approx 46\text{mm}$) まで荷重が緩やかに上昇したが、 $8\delta_y$ ($\approx 54\text{mm}$) で荷重が大きく低下

したため、載荷を終了した。載荷終了時には、外側鋼管にも局部座屈が生じていた。補修部材を取り外したところ、CFT 部材の鋼管の局部座屈部にき裂が生じていた。

3.4 補修効果に関する考察

(1) 標準型の補修方法

試験体 P-1 は、曲げ耐力・変形性能ともに、初期載荷時と同等まで回復している (図-5 (a))。図-6 に、外側鋼管の最外縁のリブの上下の軸方向ひずみ、図-7 には外側鋼管のひずみ (円周方向は基部から 112.5mm (= 0.25D, D: CFT 部材の外径), 軸方向は基部から 15mm の位置のひずみ) を示す。図-6 より、リブ下端には、降伏ひずみ (ϵ_y) を超える大きい圧縮ひずみが生じている。ただし、リブは載荷終了まで座屈変形は生じていない。一方、図-7 より、外側鋼管は円周方向の引張ひずみが生じているが、降伏ひずみと比較してかなり小さい。これらの結果から、標準型は図-2 (a) の 2 つの効果のうち、②の方がより大きく発揮されていると考えられる。

また、図-5 (a) より、補修後の剛性や曲げ耐力は、補修前と同等であるため、本補修はラーメン高架橋の柱にも適用できるものと考えられる。

図-6 より、リブの圧縮ひずみは、弾性域においては計算値より小さい。これは、損傷した CFT 部材である程度抵抗しているためと考えられる。ここで、ひずみの計算値は次式により求めた。

$$\epsilon = H \cdot L / (E_s \cdot Z_{rr}) \quad (3)$$

ここに、

H : 水平荷重, L : せん断スパン

E_s : 鋼材 (リブ) のヤング係数

Z_{rr} : 鋼管およびリブの断面係数 (圧縮側のリブを有効とみなしてひずみ計測位置に着目して計算)

以上より、損傷した CFT 部材での負担が少なからず期待できること、載荷終了時までリブに座屈変形は生じていないことから、本構造のように幅厚比が比較的小さい場合には、式(1)を用いてリブの板厚を決定しても実用上問題ないと考えられる。ただし、CFT 部材の曲げ耐力の

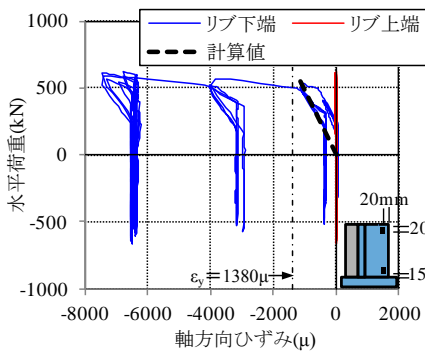


図-6 リブのひずみ (P-1)

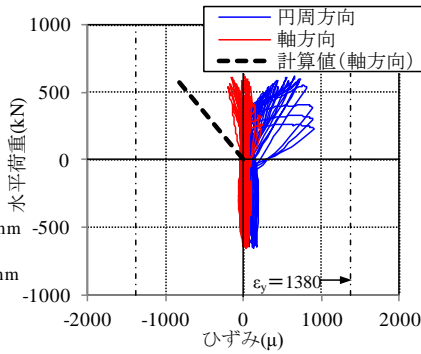


図-7 外側鋼管のひずみ (P-1)

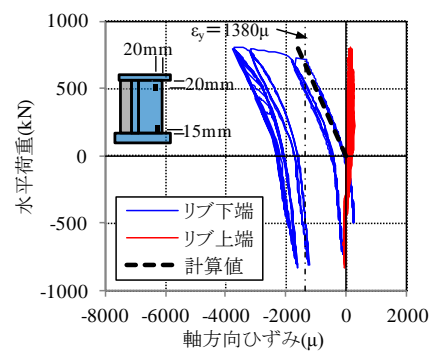


図-8 リブのひずみ (P-2)

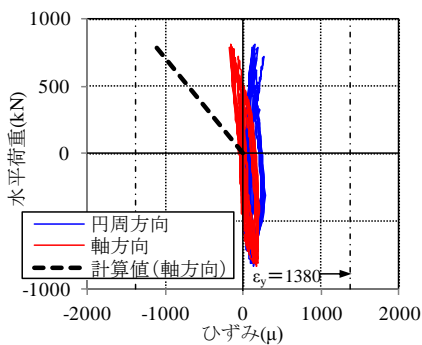


図-9 外側鋼管のひずみ (P-2)

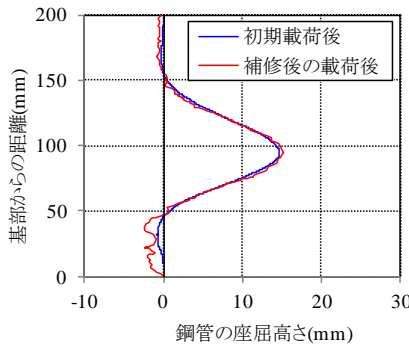


図-10 補修前後の鋼管の変形 (P-2)

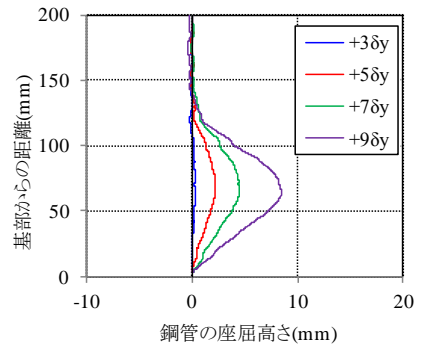
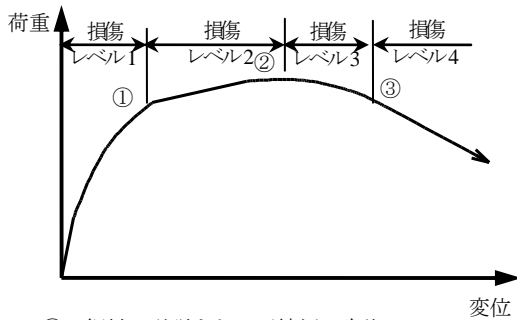


図-11 補修部材の外側鋼管の変形 (P-3)



- ①：鋼材の引張または圧縮側の降伏
- ②：鋼管の局部座屈点
(ほぼ最大荷重となる点に相当)
- ③：鋼管の局部座屈が進展する点
(最大荷重の90%の耐力を維持できる最大変形点)

図-12 荷重・変位包絡線と損傷レベルの関係^{2),3)}

7割の妥当性については今後の検討課題としたい。

(2)一体型の補修方法

試験体 P-2 は、補修後の最大荷重は初期時より 25% 増大している (図-5 (b))。これは、補修部材直上の CFT 部材の鋼管に局部座屈が発生していることから、せん断スパン比が小さくなったためである。実際に、補修部材上面を固定端とすると、補修後のせん断スパンは初期時より 25% 小さく、この比率と一致する。また、補修後の終局変位が小さくなっているが、これもせん断スパン比が小さくなったことによるものである。

図-8 にリブのひずみを示すが、弾性域において計算値 (式(3)) とほぼ一致している。また、図-9 に外側鋼管のひずみを示すが、円周方向および軸方向ともに小さ

表-3 損傷レベルに応じた損傷状況と修復行為の関係の例²⁾

損傷レベル	損傷状況	補修工法
1	無損傷	無補修 (必要により耐久性上の配慮)
2	場合によっては補修が必要な損傷	必要により局部座屈の修復
3	補修が必要な損傷	局部座屈の程度により補修
4	補修が必要な損傷、場合によっては部材の取替えが必要な損傷	補修、場合により部材の取替え

い。このことから、標準型と同様に、鋼管と圧縮側リブの補修部材のみで抵抗するものとして、補修部材の断面を設計して問題ないと考えられる。

図-10 には、補修部における補修前後の鋼管の局部座屈部の変形量を示す。補修後は補修部より上方で局部座屈が発生・進展しており、補修部では補修前後で変わらず、その進展を抑制できている。

一体型は、補修後に剛性や曲げ耐力が増大するため非補修部位や基礎等への影響を考慮する必要があるが、CFT 部材の損傷レベル 3 の限界点程度の鋼管の局部座屈が大きい場合でも有効な補修方法と考えられる。

(3)応急処置型の補修方法

試験体 P-3 は、補修後の最大荷重は初期載荷時の 8 割程度であるが、初期載荷後の残存耐力相当は保持できている。一方、変形性能は、N 点の変位の計算値まで有しており、損傷前と同等である (図-5 (c))。そのため、構造物の崩壊を防ぐ応急処置として適用可能と考えられる。なお、負側より正側の荷重が大きいのは、鋼材のバウシinger 効果によるものと考えられる。

図-11 より、補修部材の外側鋼管には、5 δ y 時に局部座屈の変形が生じ、載荷終了までその変形が進展している。このことから、初期載荷時に生じた CFT 部材の鋼管の局部座屈を抑止できなかったため、曲げ耐力が十分に回復しなかったものと考えられる。

4. CFT 部材の損傷レベルの再評価

複合示方書や耐震設計標準では、CFT 部材の損傷レベルは図-12 および表-3 のように設定される。これらは、既往の交番載荷試験結果等をもとに、荷重変位関係の特性や損傷程度に応じて設定されたものである。

限られた試験体数であるが、本試験結果に基づき、CFT 部材の損傷レベルを再評価すると、以下のようになる。

- ・ 損傷レベル 3 については、繰り返しの伴い耐力が低下するため補修が必要である。
- ・ 損傷レベル 3 の損傷状態に対して、標準型や一体型の補修により耐力・変形性能が回復・向上できる。これらの補修は、CFT 部材の外側から施工可能で、短期間での施工が可能である。なお、一体型についてはボルト固定が可能であることが前提である。そのため、損傷レベル 3 の限界点(図-12③)までは、早期の復旧が可能と考えられる。
- ・ 損傷レベル 4 の損傷状態においても、部材の取替えをせずに、応急処置型の補修で耐力・変形性能を概ね回復させることができる。

5. まとめ

円形断面の CFT 部材を対象に、損傷を受けた場合の補修方法の提案と部材の損傷レベルの設定の妥当性の検証を目的に、損傷程度に応じた補修方法を考案し、その効果を確認するため載荷試験を行った。本論文で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) CFT 部材の補修方法は鋼管の局部座屈の進展抑止が重要であり、局部座屈の程度に応じて 3 タイプの二重鋼管方式の補修方法を考案した。
- (2) 標準型の補修により、部材の損傷レベル 3 の損傷に対して、損傷前の耐力・変形性能に回復できる。また、補修部材の断面の設定の考え方を示した。
- (3) 一体型の補修により、部材の損傷レベル 3 の限界点の損傷に対して、損傷前の耐力以上に回復・向上できる。また、標準型と同様に補修部材を設計して問題ないことを示した。なお、補修後に剛性や曲げ耐力が増大するため、適用にあたっては非補修部位への影響等を考慮する必要がある。
- (4) 応急処置型は、部材の損傷レベル 3 を大きく超える損傷に対して、損傷前の耐力の 8 割程度まで回復でき、変形性能は同等まで回復できる。

- (5) 本試験結果より CFT 部材の損傷レベルを再評価し、その妥当性を確認するとともに、損傷レベル 3 の損傷状態に対して提案する補修方法で早期に回復できることを示した。ただし、補修方法によっては、施工性や非補修部位への影響等について注意を要する。

謝辞

本載荷試験は日鉄環境エンジニアリング株式会社(現日鉄住金環境株式会社)にご協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼とコンクリートの複合構造物)，1998
- 2) 土木学会：複合構造標準示方書，2009.12
- 3) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，2012.9
- 4) 木村秀樹，高津比呂人：鋼繊維を混入した超高強度コンクリート充填鋼管短柱の中心圧縮実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1103-1104，2002.8
- 5) 長谷川明，塩井幸武，工藤浩，鈴木拓也：鉄筋コンクリート充填鋼管の曲げ耐力試験，第 8 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2009.11
- 6) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.3
- 7) 小野紘一，杉浦邦征，大島義信，三木亮二，若原直樹，小牧秀之：炭素繊維シート巻き立てによる損傷鋼管の補修効果に関する検討，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，2002.9
- 8) 西野孝仁，古川哲仁，三谷勲：CFRP によって局部座屈形成を抑制した円形鋼管柱材の変形能力(その 1)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.463-464，2000.9
- 9) 嶋口儀之，鈴木森晶，太田樹，青木徹彦：局部座屈が生じた円形断面鋼製橋脚の修復方法に関する研究，構造工学論文集，Vol.58A，pp.277-289，2012.3
- 10) 萬代能久，吉田直人，池田学：損傷した CFT 部材の補修方法に関する交番載荷試験，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，2012.9
- 11) 村田清満，山田正人，池田学，瀧口将志，渡邊忠朋，木下雅敬：コンクリート充填円形鋼管柱の変形性能の再評価，土木学会論文集，No.640，I-50，pp.149-163，2000.1
- 12) 池田学，萬代能久，吉田直人：短柱 CFT 部材の曲げ耐力・変形性能の算定法の検討，コンクリート工学年次論文報告集，第 33 巻，2011.6
- 13) 才塚邦宏，伊藤義人，木曾英滋，宇佐美勉：相似則を考慮したハイブリッド地震応答実験手法に関する考察，土木学会論文集，No.507，I-30，pp.179-190，1995.1