

# コンクリート充填鋼管部材の損傷時の補修方法と 復旧性評価

池田 学\* 萬代 能久\*\*  
齊藤 雅充\* 吉田 直人\*\*\*

## Repair Method and Restorability Assessment Method of Damaged Concrete Filled Tubular Steel Members

Manabu IKEDA Yoshihisa BANDAI  
Masamichi SAITO Naoto YOSHIDA

Concrete filled tubular steel (CFT) members have been applied to the columns of rigid frame structures. However, as for CFT members that were damaged during earthquakes, suitable repair methods and their effect have not been experimentally investigated. In this research, we have proposed three repair methods to install additional steel members around the damaged part of CFT members. To evaluate the performance of repaired CFT members, we carried out loading tests of CFT specimens, which were repaired after inducing damage. As a result, it has been found out that the proposed methods are effective in recovering the bending capacity and the deformation capacity of CFT members to their original ones. Considering these results, we re-evaluated restorability assessment method of CFT members.

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り，駅部等の高架橋の柱に適用されるケースが多い。CFT 部材は，以下のような利点を有している<sup>1)</sup>。

- ・ 鋼管とコンクリートの合成作用により，断面寸法に比べて大きな耐荷力が得られる。
- ・ 軸力と曲げモーメントが作用した場合に，充填したコンクリートが鋼管の局部座屈の進行を遅らせることにより，優れた曲げ変形性能が得られる。
- ・ 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を余儀なくされる施工環境の厳しい工事にも適用できる。

すなわち，大規模地震にも強く，さらに現場の施工作业性にも優れた部材である。特に施工上のメリットから，営業線に近接した箇所や工期短縮が必要な箇所等で適用されるケースが増えている。

CFT 部材の地震の影響に対する照査は，「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<sup>2)</sup>）により行っている。ここでは，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としている。

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。コンクリートを充填していない鋼管部材に関しては，例えば文献<sup>3)</sup>等において損傷に対する補修方法の検討事例はあるが，損傷を受けた CFT 部材に関して補修方法の検討は行われていない。

そのため，設計時の損傷レベルの設定のみでなく，大規模地震によって損傷を受けた場合に，どのような補修を行うのが最適かの判断が困難な状態にあった。

本研究では，円形断面の CFT 部材を対象に，既往の載荷試験結果をもとに損傷進展状況を調査した上で，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<sup>4)</sup>。また，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. 現行設計標準における CFT 部材の損傷レベル

耐震設計標準<sup>2)</sup>では，CFT 部材の損傷レベルは図 1 および表 1 のように設定される。なお，耐震設計標準は本年

\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室  
\*\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室  
(現 西日本旅客鉄道株式会社)  
\*\*\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室  
(現 東日本旅客鉄道株式会社)

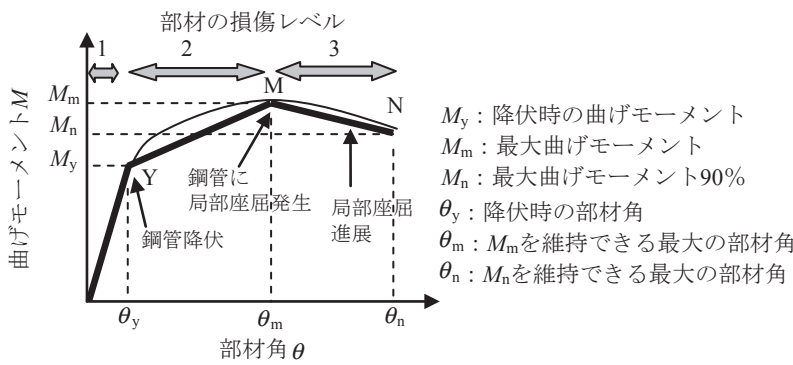
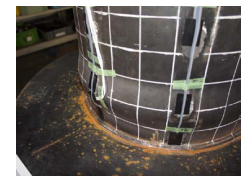


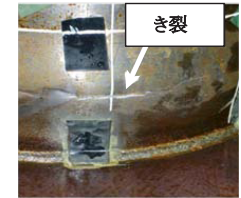
図1 CFT 部材の曲げモーメント・部材角と損傷レベル<sup>2)</sup>

表1 CFT 部材の損傷レベルと損傷状況の例および補修工法の例<sup>2)</sup>

損傷レベル	荷重変位包絡曲線上の特性	損傷状況の例	補修工法
1	45度位置の引張鋼管が降伏する点 (Y 点) まで	無損傷	無補修
2	ほぼ最大水平抵抗荷重を維持する最大変位 (M 点) まで	局部座屈の発生	場合によっては鋼管の局部座屈の修復程度
3	最大荷重の90%を維持する最大変位 (N 点) まで	局部座屈の進展	局部座屈の進展により修復およびリブ補強
4	—	—	—



(a) 鋼管基部の局部座屈



(b) 局部座屈部のき裂



(c) 充填コンクリートのひび割れ・圧壊

図2 荷重試験における損傷状況

改訂されたが、本論文では平成10年版をもとに整理する。

CFT 部材の損傷レベルは、表1のように、荷重変位関係の特性、鋼管の局部座屈の有無やその程度に応じて設定している。ここで、表1には補修工法の例も示しているが、鋼管部材の補修工法を参考としたもので、CFT 部材への適用については明確にされていない。また、CFT 部材については柱に適用されることを前提に考えているため、表1のように損傷レベル4は設定されていない。

以上のように、損傷に対する復旧性の観点から、CFT 部材の損傷レベルの設定について再度検証が必要と思われる。

### 3. CFT 部材の補修方法の考案

#### 3.1 CFT 部材の荷重試験における損傷状況の整理

CFT 部材の既往の交番荷重試験結果より損傷進展状況を整理する。鉄道総研では、今までに、高架橋の柱を対象とした CFT 部材の交番荷重試験を 30 体近く実施している<sup>例えは5)~7)</sup>。荷重時の損傷状況は、鋼管の径厚比(外径と板厚の比)や軸力等によってその進展速度や程度は多少異なるが、いずれも同様に以下の通りである。

- ・部材の降伏以降も、最大荷重までは、外観上の損傷は認められず、繰り返しによる荷重低下はほとんどない。
- ・荷重の増加が緩やかになり、ほぼ最大荷重において、鋼管基部に局部座屈が観察される。
- ・鋼管基部の局部座屈が繰り返し荷重により進展(図2(a))し、これに伴い荷重が低下する。

- ・さらに荷重を続けると、局部座屈が大きくなり、その頂部付近に低サイクル疲労によるき裂が発生するケースが多い(図2(b))。鋼管のき裂発生後は、荷重を保持できなくなるため荷重終了となる。
- ・荷重後に鋼管をはつると、鋼管が局部座屈した範囲に、充填コンクリートのひび割れ・圧壊が生じている(図2(c))。なお、鋼管が局部座屈する範囲は、端部から 0.5D (D: 鋼管外径) 以内である。

#### 3.2 補修方法の考え方

CFT 部材の損傷に対する補修方法について、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ことが重要である。
  - ・鋼管の局部座屈が大きい場合は、局部座屈の抑止のみでなく曲げ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。

#### 3.3 補修方法の考案

鋼管の局部座屈の進展抑止と施工しやすさに主眼を置いて、図3に示す3タイプの補修方法を考案した。いずれも、CFT 部材の損傷部分のみに鋼管を巻き立てる「二重鋼管方

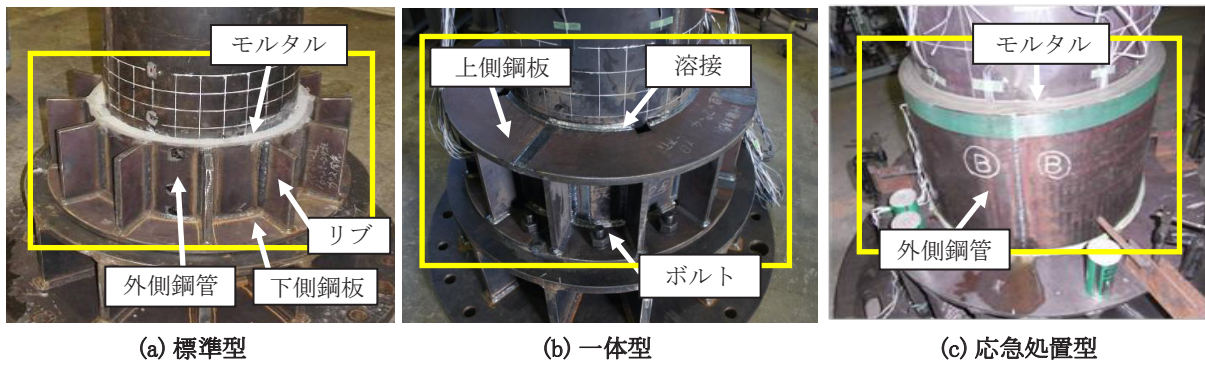


図3 3タイプの補修方法（二重鋼管方式）の構造

表2 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		
						コンクリート強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	鋼管降伏強度 $f_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	外径 <sup>*1</sup> (mm)	高さ <sup>*2</sup> (mm)	板厚 (mm)
P-1	450	9.0	50	1350 (3.0)	0.15	24.0	346.0	528	270	16 <sup>*3</sup>
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。

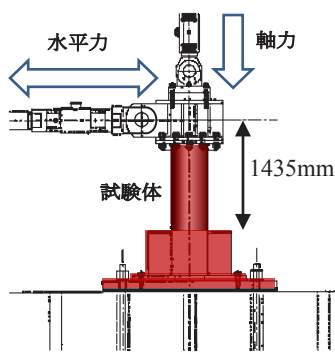


図4 载荷試験の概要

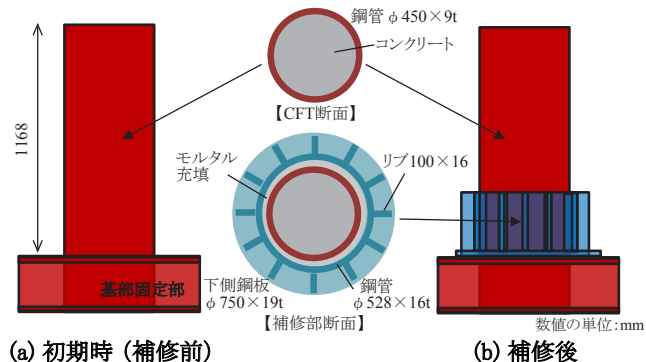


図5 試験体の概要（試験体 P-1）

式]である。以下に、それぞれの構造の概要と目的を述べる。

(a) 標準型

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。鋼管は、CFT 部材と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結合していない。

部材の損傷レベル3に対する標準的な補修方法として考案したもので、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。

(b) 一体型

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

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目的としたものである。補修部材を一体化することで、軸力や曲げモーメントによる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阻止する。

(c) 応急処置型

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を超えるような大きい損傷の場合に、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。

4. 補修効果の確認のための载荷試験

4.1 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4)。試験体は、実物の1/3程度の寸法を想定した。CFT 部材の試験体の諸元を表2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オンに設定した。ただし、軸力は、大きい方が鋼管の局部座屈の進展が早いため補修効果が

表3 各試験体の载荷方法

試験体	初期载荷	初期载荷後の 損傷レベル	補修	補修後の载荷
P-1	交番载荷試験 (2回繰り返す)	3	標準型	交番载荷試験 (3回繰り返す)
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	

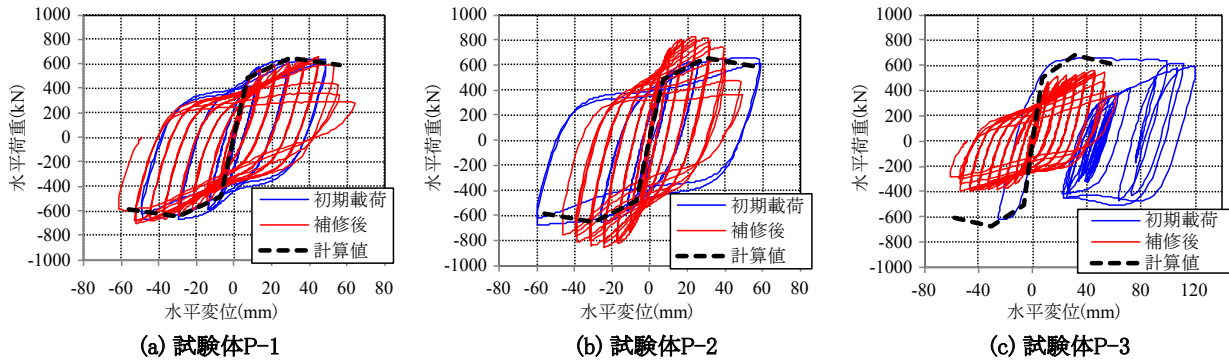


図6 初期载荷および補修後の载荷試験結果の荷重変位関係

より顕著に現れると考え、軸力比0.15と大きめに設定した。図5に試験体の一例として、試験体P-1について示す。

载荷は、初めに所定の損傷を付与するための载荷（初期载荷）を行い、補修をした後に、補修効果を確認するための载荷を行った。各試験体における载荷の方法を表3に示す。

試験体P-1,P-2の初期载荷は、局部座屈の進展を目視で確認しながら、損傷レベル3相当の変位を交番载荷で与えた。部材の降伏変位を $\delta_y$ として、 $1\delta_y$ 、 $2\delta_y$ 、 $4\delta_y$ で各ステップ2回繰り返して载荷した後、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 $\delta_y$ 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、初期载荷において損傷レベル3を大きく超える損傷を付与した。初期载荷の方法は、大変位を繰り返す交番载荷では低サイクル疲労により鋼管にき裂発生リスクがあるため、地震波を静的に inputsするハイブリッド応答試験<sup>5)</sup>で行った。入力地震波にはL2地震動<sup>2)</sup>を用いた。

補修後の载荷は、3体とも交番载荷とし、一定軸力下で、水平変位制御による繰り返し漸増载荷とした。変位制御の基準となる降伏変位 $\delta_y$ は、試験体P-1、P-2は初期载荷と同じ変位、試験体P-3は計算値より7mmとした。

また、表2には、補修部材の諸元も示している。外径は、外側鋼管の外径を示し、CFT部材とのすき間は鋼管の局部座屈の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の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。

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

ここに、 $M_{ry}$ ：補修部材の鋼管の曲げ降伏耐力で、次式により算定する。

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

ここに、 $Z_r$ ：鋼管およびリブの断面係数（リブは圧縮側にあるもの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/mm<sup>2</sup>）

$M_{m\_cft}$ ：CFT部材の曲げ耐力（図1のM点の曲げモーメント）

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、初期载荷後に荷重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。

#### 4.2 初期载荷の結果

初期载荷の試験結果の水平荷重・水平変位関係を図6に青線以示す。図には耐震設計標準<sup>2)</sup>による計算値も破線以示している。

試験体P-1、P-2とも所定の変位が付与されていることがわかる。鋼管の局部座屈の高さは、試験体P-1は18mm、試験体P-2は22mmである。また、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。

試験体P-3は、損傷レベル3を大きく超えた変位が付与され、損傷レベル4の状態である。正側に大きく変位

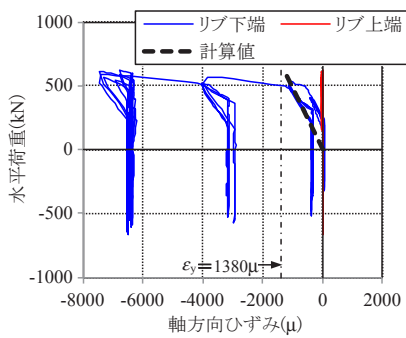


図7 リブのひずみ (P-1)

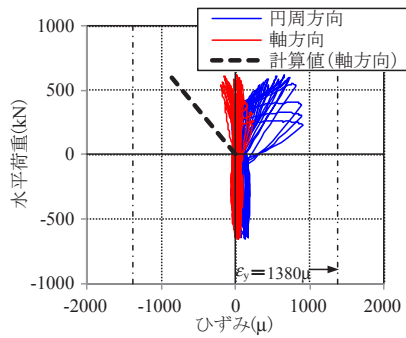


図8 外側鋼管のひずみ (P-1)

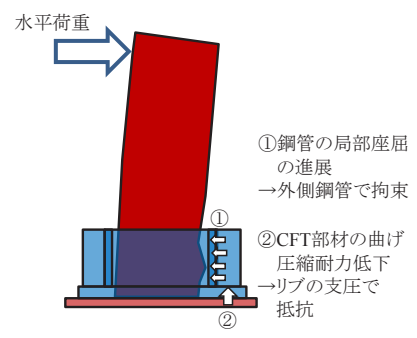


図9 抵抗メカニズム (P-1)

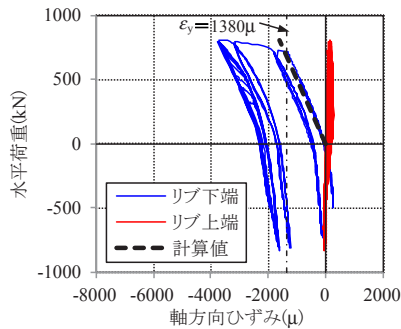


図10 リブのひずみ (P-2)

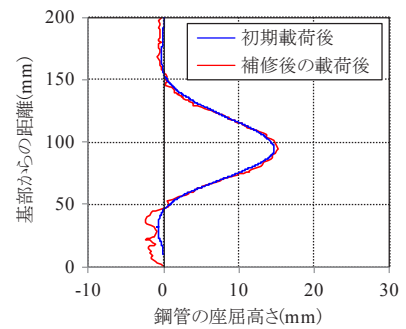


図11 補修前後の鋼管の変形 (P-2)

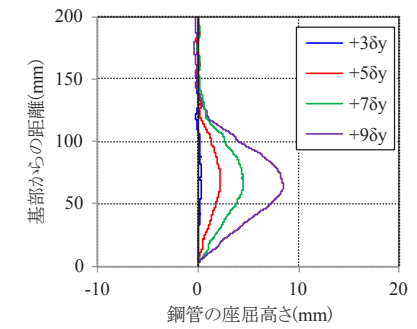


図12 補修部材の外側鋼管の変形 (P-3)

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。

### 4.3 補修後の荷重結果

初期荷重により損傷した試験体を補修した後、交番荷重により補修効果を確認した。図 6 には、補修後の荷重試験結果を赤線で示している。

補修後の試験体 P-1 は、 $7\delta_y$  ( $\cong 45\text{mm}$ ) まで緩やかに荷重は上昇し、 $8\delta_y$  ( $\cong 53\text{mm}$ ) で荷重が急激に低下したため、荷重を終了した。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。荷重後に補修部材を取り外すと、CFT 部材の鋼管の局部座屈部にき裂が生じていた。

補修後の試験体 P-2 は、外側鋼管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、荷重を終了した。荷重終了まで補修部材には損傷は認められなかった。また、CFT 部材の鋼管の局部座屈部にはき裂は生じていなかった。

補修後の試験体 P-3 は、 $7\delta_y$  ( $\cong 46\text{mm}$ ) まで荷重は緩やかに向上・維持されたが、 $8\delta_y$  ( $\cong 54\text{mm}$ ) で荷重が大きく低下したため、荷重を終了した。荷重終了時には、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もき裂が生じていた。

### 4.4 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、初期荷重時と同等まで回復している (図 6 (a))。図 7 に、外側鋼管のリブ (最外縁から 20mm の位置) の上下の軸方向ひずみ、図 8 には外側鋼管のひずみを示す。図 7 より、リブ下端には、降伏ひずみ ( $\epsilon_y$ ) を超える大きい圧縮ひずみが生じている。一方、図 8 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 9 に示す 2 つの効果を期待した構造であるが、②の CFT 部材の鋼管の局部座屈による曲げ圧縮耐力の低下をリブの支圧で補完する効果の方が、より大きく発揮されていると考えられる。

図 7 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。

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

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、 $Z_{\pi}$ : 鋼管およびリブの断面係数 (リブは圧縮側のみを有効とみなしてひずみ計測位置に着目して計算)

これらのことから、最大荷重時にリブに大きいひずみは生じているものの座屈変形は生じていないことも考えると、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、外側鋼管については、図 8 よりひずみは小さく、板厚は小さくできると考えられる。

## 特集：構造物技術

また、図7より、外側鋼管のリブの上端にはひずみがほとんど生じていない。そのため、リブ形状は、矩形でなく、三角形や台形にする方が合理的と思われる。

## (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 6 (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、図 10 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。このことは、水平荷重に対して、鋼管と圧縮側リブの補修部材のみで抵抗していることを示している。すなわち、補修部材の設計においては、鋼管と圧縮側リブのみを考慮するのがよいと考えられる。

また、図 11 に補修前後の鋼管の局部座屈部の変形量を示すが、補修前後で変わらず、その進展を抑止できている。一体型は、曲げ耐力が増大するため基礎等への影響も考慮する必要があるが、CFT 部材の鋼管に生じた局部座屈が大きい場合の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 6 (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。

図 12 より、補修部材の外側鋼管には、 $5\delta_y$  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、曲げ耐力が回復しなかったものと考えられる。

## 5. CFT 部材に関する損傷レベルの再評価

本検討結果より、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、繰り返しに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。そのため、損傷レベル 3 の限界点である N 点までは、早期の復旧が可能である。
- ・ 損傷レベル 3 を大きく超える損傷に対しても応急処置型で耐力・変形性能が概ね回復できるため、復旧性の観点から損傷レベル 4 は設定可能と考えられる。ただし、この場合、鋼管の低サイクル疲労によりき裂が発生しないことを確認する必要がある。

## 6. まとめ

円形断面の CFT 部材を対象に、部材の損傷レベルの設定の妥当性の検証、および損傷を受けた場合の補修方法の提案を目的に、損傷に対する補修方法を考案し、補修効果を確認するための載荷試験を行った。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できることを示した。
- (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) 補修部材の載荷試験結果より CFT 部材の損傷レベルを再評価し、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、また損傷レベル 4 についても設定可能であることがわかった。

## 謝辞

本載荷試験は日鉄環境エンジニアリング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。

## 文献

- 1) 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) 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），1999
- 3) 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
- 4) 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，2012.9
- 5) 村田清満：複合構造物を適用した鉄道高架橋の設計法に関する研究，鉄道総研報告特別第 42 号，2000.7
- 6) 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
- 7) 萬代能久，吉田直人，池田学：高強度材料を用いた CFT 部材の曲げ耐力・変形性能の算定に関する試み，第 9 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2011.11