

# ダイアフラムを有する円形断面鋼製橋脚の コンクリート充填修復と耐震性能に関する研究

A Study on Seismic Performance of Circular Steel Bridge Piers with Diaphragm which have Concrete Filled Repair

太田樹<sup>†</sup>, 鈴木森晶<sup>††</sup>, 嶋口儀之<sup>†††</sup>, 青木徹彦<sup>††</sup>  
Tatsuki OTA, Moriaki SUZUKI, Yoshiyuki SHIMAGUCHI, Tetsuhiko AOKI

**Abstract** Since HYGOKEN-NANBU Earthquake in 1995, a large number of researches on the seismic performance of steel bridge pier have been carried out. However, there is very few research for the repair method of the steel bridge pier that has been damaged in earthquake. The research on how to repair severely damaged steel bridge pier has been conducted by the authors, but the repair effect for the steel bridge pier that suffered minor damage has not been revealed.

In this study, the repairing effect of filling concrete for circular steel bridge piers which have different degrees of damage is to be verified. First, four damage levels were assumed from general load-deflection relationship. Static cyclic loading tests until reaching their predetermined damage levels were conducted. After filling the concrete inside the specimens, the same static cyclic loading tests were carried out to clarify the seismic performance of repaired piers.

## 1. 序論

### 1・1 はじめに

鋼製橋脚は市街地の高架道路や鉄道など重要構造物に多用されており、震災後の鋼製橋脚の早期復旧は人命救助、都市機能の回復のために極めて重要である。1995年の兵庫県南部地震では鋼製橋脚を含む多くの土木構造物が被害を受けた。それ以降、鋼製橋脚の耐震性能に関する研究が精力的に行われてきた。しかし既往の研究の多くは、地震による損傷のない既存橋脚の補強および新設橋脚を対象としたものである<sup>1)~4)</sup>。一方で、地震により損傷した鋼製橋脚の修復方法とその耐震性能についての研究は、筆者らが行った事例を除き非常に少ない。

これまで筆者らは、地震により基部に局部座屈が生じた円形および矩形断面鋼製橋脚を対象として、早期の応急復旧が可能な修復方法について研究を行ってきた<sup>5)~10)</sup>。その中で、修復後の耐震性能は損傷前と同等まで回復させることとし、損傷前と比較して最大水平荷重を±10%、剛性を±20%以内とすることを目標としてきた<sup>9)</sup>。

これは損傷した橋脚が適切に設計されたものであれば、修復後に本震と同等の余震が発生した場合において、損傷前と同様の挙動を示すことが望ましいと考えるからである。例えば、橋脚の耐力が損傷前と比較して著しく増加するような修復を行った場合、相対的に弱くなった支承部や基礎工などが損傷し、より重大な破壊形態となる恐れがあると考えられる。

筆者らはこれまでに種々の修復方法を提案してきた<sup>5)~10)</sup>。その中でも特にコンクリート充填による修復は、橋脚内部にコンクリートを充填するだけの簡便な方法であるが、目標とする性能が得られることを示してきた。しかし、これまでの研究では、繰り返し载荷の過程で橋脚基部付近の局部座屈が進行し、耐力が著しく低下したような、損傷の大きな鋼製橋脚に対するものが中心であり、実際の地震動が作用した場合のように、最大水平荷重付近での比較的軽微な損傷に対する修復および耐震性能の検証は行っていない。そのため、これまでの研究で優れた修復効果を得られた方法が、軽微な損傷を有する鋼製橋脚に対しても、同様の効果を得ることができるかを明らかにする必要がある。

そこで本研究では、円形断面鋼製橋脚を対象として、損傷度合が異なる橋脚に同一の修復を施した場合の耐震性能を明らかにすることを目的とする。損傷度合は4つの

† 愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻  
†† 愛知工業大学 都市環境学科 土木工学専攻  
††† 愛知工業大学大学院 生産・建設工学専攻

レベルに分類し、損傷レベル2~4に相当する荷重履歴を供試体に与える。その後、筆者らの研究で大きな修復効果が得られたコンクリート充填修復を施し、橋脚の損傷度合が異なる場合に対する修復効果を比較・検討する。また、コンクリート充填高さを変えた場合と、ダイヤフラムの有無による修復効果の違いについて検討する。

### 1・2 損傷レベルの定義

一般に地震により鋼製橋脚に生じる損傷は一律ではないため、本研究では損傷度合いの大きさに応じた損傷レベルを設定した。図-1.1 および表-1.1 に損傷レベルの概要を示す。損傷レベルは図-1.1 に示すように、一般的な鋼製橋脚の水平荷重-水平変位関係に沿って設定した。また、表-1.1 には道路橋示方書に示される橋の耐震性能と、それに対応する損傷レベルを示す<sup>11)</sup>。本研究で設定した損傷レベルについてまとめると以下ようになる。

損傷レベル 1 は降伏荷重( $H_y$ )から最大水平荷重( $H_{max}$ )に達する前の70%程度までの領域とする。これは耐震性能1に相当し、想定する橋脚の損傷は基部付近の局部座屈が目視で確認できない程度である。損傷レベル2は最大荷重の70%程度から最大荷重程度までの領域とする。これは耐震性能2に相当し、想定する橋脚の損傷は局部座屈が目視で確認できる程度である。損傷レベル3は最大荷重から最大荷重の95%程度まで荷重が低下する領域とする。想定する橋脚の損傷は基部に局部座屈が生じ、部分的に塗装はがれているものの、亀裂などは生じていない程度である。損傷レベル4は荷重が最大荷重の70%程度まで低下する領域とする。想定する橋脚の損傷は、局部座屈が大きく進行し、部分的な亀裂の発生が考えられる程度である。損傷レベル3,4については耐震性能3に相当する。

各損傷レベルの供試体は、降伏変位 $\delta_y$ を基準とした漸増繰り返し载荷により、所定の荷重履歴(損傷)まで载荷を行う。図-1.1 には本研究で実際に载荷した変位を示す。

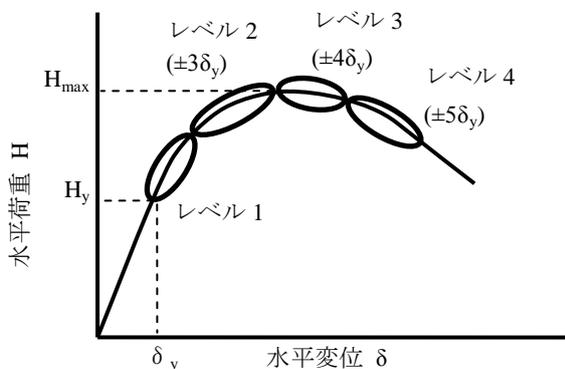


図-1.1 損傷レベルの設定

表-1.1 損傷レベルと橋の耐震性能<sup>11)</sup>

損傷レベル	橋の耐震性能 <sup>11)</sup>
1	1 ・ 橋全体の力学的特性が弾性域を超えない
2	2 ・ 塑性化を考慮する部材にのみ塑性変形が生じる* ・ 損傷の修復を容易に行い得る限界の状態
3	3 ・ 塑性化を考慮する部材にのみ塑性変形が生じる*
4	3 ・ 橋脚の水平耐力を保持できる限界の状態

\*本研究における塑性化を考慮する部材は橋脚である。

## 2. 実験計画

### 2・1 実験供試体

本研究では、図-2.1 に示すような円形断面鋼製橋脚と図-2.2 に示すようなダイヤフラムを有する円形断面鋼製橋脚の2種類の供試体を使用した。新品時の供試体諸元を表-2.1 に示す。また、ダイヤフラムの設置高さは基部から254mm(0.5D)と508mm(1.0D)の2種類を用意した。表中の降伏応力 $\sigma_y$ およびヤング率Eは材料試験の結果であり、降伏変位 $\delta_y$ 、降伏荷重 $H_y$ および軸力比 $P/P_y$ はII種地盤として算出した。

2種類の供試体は区別するため、ダイヤフラムの無い供試体をUシリーズ(Unstiffened)、ダイヤフラムが有る供試体をSシリーズ(Stiffened)と表記する。供試体は漸増繰り返し载荷により所定の損傷を与え、Uシリーズ、Sシリーズに対しそれぞれ損傷レベル2~4に相当する供試体を各2体、計12体用意した。表-2.2 および表-2.3 に供試体一覧を示す。

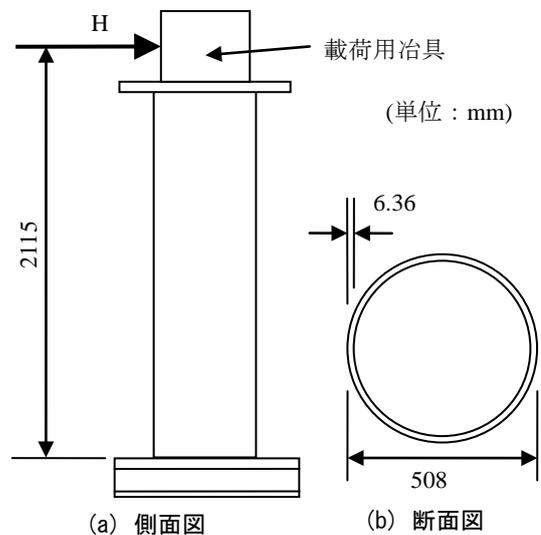


図-2.1 実験供試体(Uシリーズ)

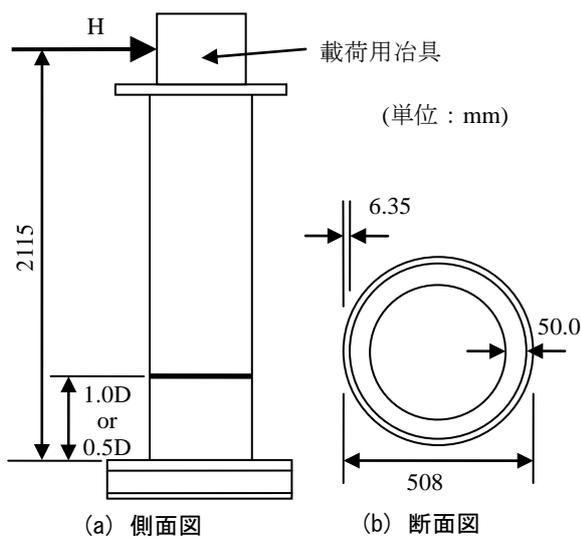


図-2.2 実験供試体(Sシリーズ)

表-2.1 新品時供試体諸元

	U シリーズ	S シリーズ
鋼種	STK400	
荷重点高さ h (mm)	2115	
外形 D (mm)	508	
板厚 t (mm)	6.36	6.35
ダイアフラム	無し	有り
ダイアフラム設置高さ a (mm)	—	254 or 508
ダイアフラム幅 b <sub>d</sub> (mm)	—	50.0
ダイアフラム板厚 t <sub>d</sub> (mm)	—	9.0
降伏応力 σ <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	342	325
ヤング率 E (kN/mm <sup>2</sup> )	207	206
径厚比パラメータ R <sub>t</sub>	0.109	0.104
細長比パラメータ λ	0.309	0.302
降伏変位 δ <sub>y</sub> (mm)	8.09	7.73
降伏荷重 H <sub>y</sub> (kN)	167	159
軸力比 P/P <sub>y</sub>	0.166	0.166

## 2・2 コンクリート充填修復

本研究では修復方法として、コンクリート充填修復を用いる<sup>7)</sup>。鋼製橋脚にコンクリート充填修復を施す場合、コンクリートの充填高さおよび強度が重要なパラメータとなる。このうち強度については、道路橋示方書において、充填部の強度が充填部より上の鋼断面と比べて著しく大きくなることを避けるため、低強度のコンクリートを用いるのが良いとされている<sup>11)</sup>。また、過去に筆者らが行った研究でも低強度のコンクリートで十分な修復効果が得られた<sup>7)</sup>。

文献9)では、損傷レベル4に相当する比較的大きな損傷を有する円形断面鋼製橋脚に対し、直径の1.5倍(1.5D)

の高さまでコンクリートを充填することで高い修復効果が得られた。一方、損傷レベル2,3のような最大荷重付近までの荷重履歴を有する橋脚では、損傷レベル4と比べて橋脚基部の残存耐力が大きい。そのため充填高さが1.5Dより低い場合でも十分な修復効果が得られると考えられる。文献10)では、損傷レベル1~4に相当する矩形断面鋼製橋脚に対しコンクリート充填修復を行い、充填率が20%と低い場合でも優れた修復効果を得ることができた。これは、ダイアフラムにより充填コンクリートが拘束され、最大耐力後も座屈の進行が抑制されるためと考えられる。同様に、円形断面鋼製橋脚の場合でもダイアフラムを設けることにより充填高さを低くすることが可能であると考えられる。文献9)では、損傷レベル4に相当する円形断面鋼製橋脚に対し、ダイアフラムに相当するものとしてジベルを設け、充填高さが直径の0.5倍(0.5D)と低い場合でも優れた修復効果が得られた。

以上のことから本研究では、直径の1.0倍(1.0D)と0.5倍(0.5D)の2種類の充填高さでコンクリート充填修復を行う。実験供試体はダイアフラムの有無でそれぞれ、損傷レベル毎に1.0Dと0.5Dを各1体とする。表-2.2および表-2.3に各供試体のコンクリート充填高さおよびコンクリート圧縮強度および材齢を示す。充填したコンクリートは呼び強度16N/mm<sup>2</sup>で、普通養生で28日以上経過したものを使用した。表中のコンクリート圧縮強度は、実際に荷重実験を行った時点で材料試験を行ったものである。

表-2.2 実験供試体一覧(Uシリーズ)

損傷レベル	供試体名	充填高さ	コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢 (日)
2	CL2-CF0.5D-U	0.5D	20.2	61
	CL2-CF1.0D-U	1.0D	19.1	63
3	CL3-CF0.5D-U	0.5D	18.2	65
	CL3-CF1.0D-U	1.0D	21.0	84
4	CL4-CF0.5D-U	0.5D	21.7	89
	CL4-CF1.0D-U	1.0D	21.8	93

表-2.3 実験供試体一覧(Sシリーズ)

損傷レベル	供試体名	充填高さ	コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢 (日)
2	CL2-CF0.5D-S	0.5D	16.9	48
	CL2-CF1.0D-S	1.0D	16.5	50
3	CL3-CF0.5D-S	0.5D	17.9	59
	CL3-CF1.0D-S	1.0D	17.3	57
4	CL4-CF0.5D-S	0.5D	18.1	52
	CL4-CF1.0D-S	1.0D	17.2	55

## 2・3 実験方法

### 2・3・1 実験載荷装置

各損傷レベルの供試体の作成および修復後の漸増繰り返し載荷実験には、図-2.3 に示す載荷装置を使用した。実験では載荷梁を介して鉛直方向に設置した 2 基の 4400kN アクチュエータを用いて、上部工重量を想定した一定鉛直荷重を載荷する。そして、水平に設置した 1 基の 4400kN アクチュエータを用いて、地震時の上部工重量の慣性力を想定した水平繰り返し載荷を行う。アクチュエータの両端はピン構造になっており、供試体の大変形にも対応できる。また、水平荷重は鉛直方向アクチュエータの傾きによる水平成分を考慮し、補正した値で評価している。

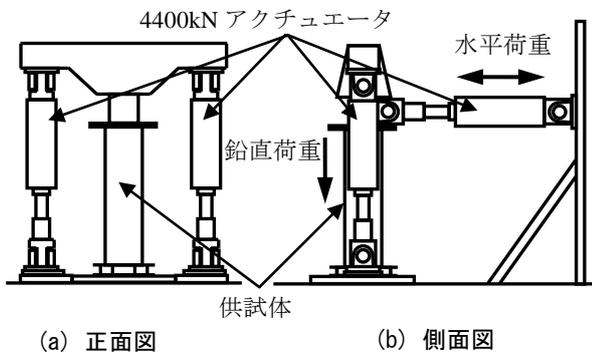


図-2.3 実験装置概要図

### 2・3・2 鉛直荷重および降伏水平荷重、変位の算定

一定鉛直荷重  $P$  は有効座屈長の概念に基づき、式(1)～式(3)に示す局部座屈を考慮しない「はり-柱」強度相関より算出し、小さいほうの値を鉛直荷重として載荷した<sup>12)</sup>。なお、本研究では地盤種別をⅡ種と想定し、設計水平震度  $k_h$  を 0.25 とした<sup>11)</sup>。

$$\frac{\alpha P}{P_u} + \frac{C_m \alpha M}{M_y (1 - \alpha P/P_E)} \leq 1.0 \quad (1)$$

$$\frac{\alpha P}{P_y} + \frac{\alpha M}{M_y} \leq 1.0 \quad (2)$$

$$M = k_h P h \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$ ：安全率(=1.14)、 $P_E$ ：オイラーの座屈強度、 $P_y$ ：降伏軸力、 $P$ ：鉛直荷重、 $P_u$ ：道路橋示方書に示される局部座屈の影響を考慮した中心軸圧縮強度<sup>13)</sup>、 $C_m$ ：等価モーメント修正係数(=0.85)、 $M$ ：柱基部の曲げモーメント、 $M_y$ ：降伏モーメント、 $k_h$ ：震度法に用いる設計水平震度(=0.25)、 $h$ ：載荷点高さである。

降伏水平荷重  $H_y$  は鉛直荷重の影響を考慮し、式(4)よ

り、繰り返し載荷の基本変位となる降伏水平変位  $\delta_y$  は、弾性理論から式(5)より算出した。また、実験では、基部の剛体変形を含んだ状態で繰り返し載荷を行っているが、結果を整理する際は、剛体変形を補正した値で評価した。

$$H_y = (\sigma_y - \frac{P}{A}) \frac{Z}{h} \quad (4)$$

$$\delta_y = \frac{H_y h^3}{3EI} \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_y$ ：降伏応力、 $A$ ：断面積、 $Z$ ：断面係数、 $E$ ：ヤング率、 $I$ ：断面 2 次モーメントである。なお、 $\sigma_y$  および  $E$  は表-2.1 に示した材料試験の値を用いた。

## 3. 実験結果

### 3・1 ひずみ値による損傷レベルの判定

本研究では、供試体の載荷方向の圧縮および引張側に、基部から 750mm の高さまで 50mm 間隔でひずみゲージを設置し、ひずみの計測を行った。図-3.1 に示すように、座屈部の上部、頂部、下部で計測されたひずみをそれぞれ  $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_t$ 、 $\epsilon_b$  とする。また、新品時の供試体に対して、損傷レベル 4 に相当する損傷を与えた実験から得られたひずみ-水平変位曲線を図-3.2 に示す。なお、繰り返し載荷により鋼断面には圧縮力と引張力が交互に作用するが、図-3.2 は圧縮力が作用する時の結果を示しており、2 体の供試体の平均値を用いている。

図-3.2 より、損傷レベル 2 に相当する変位( $3\delta_y$ )では、ひずみの値は-10000  $\mu$  程度であり、これは見た目でもわずかに座屈が確認できる程度である。損傷レベル 3 に相当する変位( $4\delta_y$ )では、ひずみの値は-30000  $\mu$  程度であり、これは見た目でも座屈の進行が確認できる程度である。また、 $4\delta_y$  では座屈頂部のひずみ( $\epsilon_m$ )が  $3\delta_y$  よりも減少していることが確認できる。これは、座屈の進行により、座屈の頂部付近で鋼断面が伸ばされる挙動を示すためである。損傷レベル 4 に相当する変位( $5\delta_y$ )では、圧縮ひずみは-70000  $\mu$  程度に達し、座屈頂部における引張ひずみの値も 30000  $\mu$  程度まで増加している。

以上のことから、地震時に橋脚に生じるひずみの値は損傷レベルの判定資料として有効であると考えられるため、橋脚のひずみ測定方法に関する検討が今後の課題であると言える。なお、本研究で使用したひずみゲージによるひずみの測定は、実物の橋脚では計測器の設置やコストの問題が生じるため、使用することは難しい。実際には、見た目でもひずみレベルが判断できることが望ましいため、例えば、塗料に生じるクラックなどで判定できる方法の開発などが望まれる。

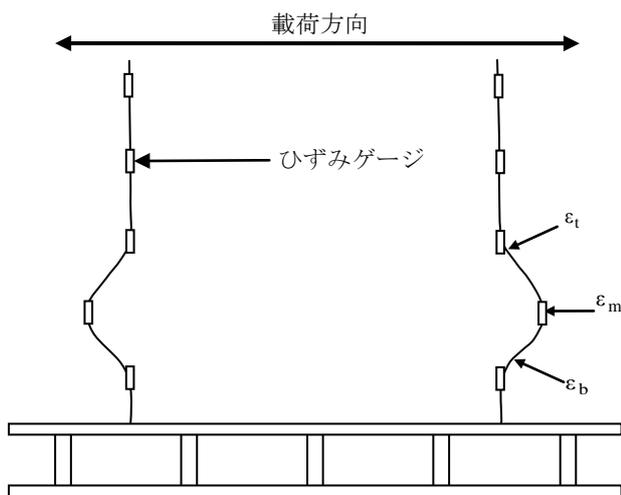


図-3.1 ひずみ計測位置

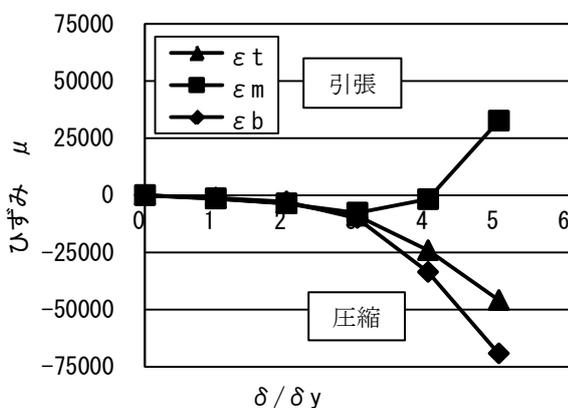


図-3.2 ひずみ-水平変位曲線 (損傷レベル 4)

### 3・2 修復後供試体の損傷状況

実験後の供試体の損傷状況を図-3.3 に示す。ダイヤフラムが有る場合では、損傷形態は、損傷レベルおよびコンクリート充填高さにより異なり、大きく次の3つの損傷タイプに分けられる。損傷タイプについて以下に示す。

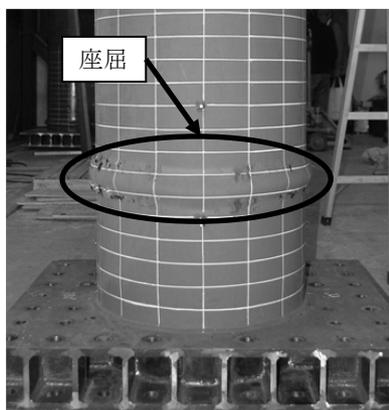
#### (1) 損傷タイプ A

このタイプは図-3.3(a)に示すように、コンクリート充填部では座屈は進行せず、充填部直上に新たに座屈が発生したケースである。損傷レベル 2 のように、基部にある程度の耐力が残っている橋脚に対して、充填高さが低い場合にこのような損傷が生じた。これは、コンクリート充填部の強度が著しく増加すると、充填部が基部と同様の働きをするため、結果的に橋脚が短くなり、最大水平荷重は新品時と比較して増加し、相対的に弱くなった充填部直上で座屈が生じたと考えられる。このような場合には、コンクリート無充填部で損傷が進行するため、新品時以上の変形性能は期待できない。このタイプには CL2-CF0.5D-S (損傷レベル 2, 0.5D) が該当した。

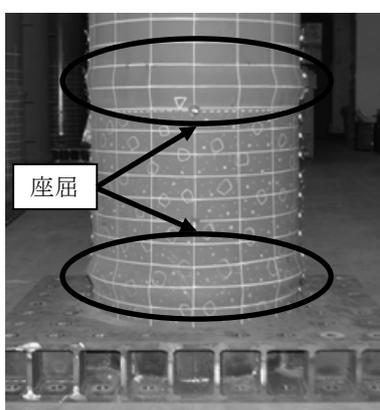
充填部に生じた座屈部では、圧縮ひずみは最大でも  $-10000\mu$  程度であり、最大水平荷重到達後も増加することは無かった。一方で、充填部直上の鋼断面部では、最大水平荷重到達直後のサイクルから著しく増加し、最大  $-40000\mu$  程度まで達した。

#### (2) 損傷タイプ B

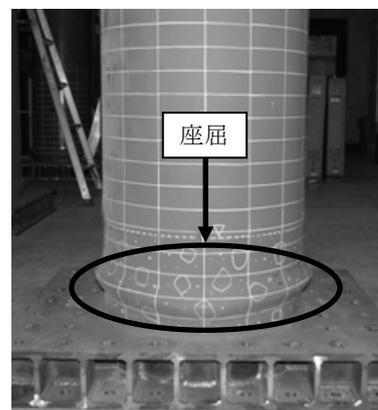
このタイプは図-3.3(b)に示すように、コンクリート充填部の座屈がさらに進行するとともに、充填部直上の鋼断面部でも座屈が発生したケースである。このタイプでは、最大荷重に到達する前の変位までは充填部でのみ座屈が進行し、最大荷重以降では充填部直上で新たに座屈が発生する損傷形態となる。これは、充填部で損傷が進行しているものの、ダイヤフラムによる充填コンクリートの拘束効果により、座屈部の圧縮ひずみが  $-25000\mu$  程度に達した以降、充填部ではそれ以上損傷が進行しなくなる。この段階で、損傷タイプ A と同様に、充填部が基部と同じ働きをするため、最大水平荷重は新品時よりも高くなり、充填部直上でも座屈が発生したと考えられる。このタイプには CL2-CF1.0D-S (損傷レベル 2, 1.0D),



(a) 損傷タイプ A (CL2-CF0.5D-S)



(b) 損傷タイプ B (CL3-CF1.0D-S)



(c) 損傷タイプ C (CL4-CF0.5D-S)

図-3.3 実験後の供試体損傷状況

L3-CF0.5D-S(損傷レベル 3, 0.5D), CL3-CF1.0D-S (損傷レベル 3, 1.0D) が該当した。

充填部において、座屈上部および下部では、最大-25000  $\mu$  程度の圧縮ひずみが生じ、座屈頂部では 100000  $\mu$  以上の引張ひずみが生じた。また、充填部直上の鋼断面部では、最大-50000  $\mu$  程度の圧縮ひずみおよび 25000  $\mu$  程度の引張ひずみが生じた。

### (3) 損傷タイプ C

このタイプは図-3.3(c)に示すようにコンクリート充填部で生じた座屈部のみでさらに座屈が進行したケースである。これは、橋脚基部にある程度の損傷が生じているため、コンクリート充填により充填部の強度が新品時に対して著しく増加することなく、充填部と充填部より上の鋼断面部の強度差が小さくなったためであると考えられる。このタイプには CL4-CF0.5D-S(損傷レベル 4, 0.5D), CL4-CF1.0D-S(損傷レベル 4, 1.0D)が該当した。

この損傷タイプでは、充填部に損傷が集中し、充填部におけるひずみの増減が著しく、大変位レベルではひずみの値は得られなかった。一方で、充填部直上ではひずみの増減は小さく、10  $\delta_y$  以降の大変位レベルでも-10000  $\mu$  程度にとどまった。

なお、U シリーズの損傷形態は一様で、全ての供試体が損傷タイプ C に該当した。これは、充填コンクリートのみの修復であり、ダイヤフラムによる鉛直方向の拘束力が無いため、繰り返し载荷の過程で充填コンクリートがずれ上がり、結果的に最初に生じた座屈が進行することとなり、損傷が充填部に集中したと考えられる。

### 3・3 水平荷重-水平変位履歴曲線

実験から得られた水平荷重-水平変位履歴曲線の一部を図-3.4 および図-3.5 に示す。なお、図の縦軸は降伏水平荷重  $H_y$ 、横軸は降伏水平変位  $\delta_y$  でそれぞれ無次元化している。また、比較のために U シリーズでは CL4-CF1.0D-U, S シリーズでは CL4-CF1.0D-S の新品時(無充填)の履歴曲線を破線で重ねて示す。

U シリーズでは、図-3.4(a)に示すように、損傷レベル 2 の充填高さが 0.5D の場合では、新品時と似た履歴形状となった。同様の傾向は、図-3.4(b), (c)に示す損傷レベル 3, 4 の充填高さが 0.5D でも見られた。一方、図-3.4(d)に示す損傷レベル 2 の充填高さが 1.0D の場合では、RC 柱特有のピンチング挙動が見られ、新品時と比べて横に長い履歴形状となった。図-3.4(e), (f)に示す損傷レベル 3, 4 の充填高さが 1.0D でも同様の傾向が見られた。

S シリーズでは、前項に示した損傷タイプと履歴形状に関係性が見られた。図-3.5(a)のように、損傷タイプ A に該当する CL2-CF0.5D-S(損傷レベル 2, 0.5D)では、新品時に比べて最大水平荷重は大きく増加したが、履歴形状に大きな変化は無く、最大荷重到達後のサイクルで急激な荷重の低下が見られる。これは、コンクリート充填部より上の鋼断面部に座屈が発生したことで、充填コンクリートによる座屈拘束効果が発揮されなかったためと考えられる。このような場合には、充填部と鋼断面部の強度差を緩和し、鋼断面部での座屈を防ぐための対策が必要である。図-3.5(e)のように、損傷タイプ B に該当する CL3-CF1.0D-S(損傷レベル 3, 1.0D)では、新品時よりも大きな変位で最大水平荷重に到達し、横に長い履歴形

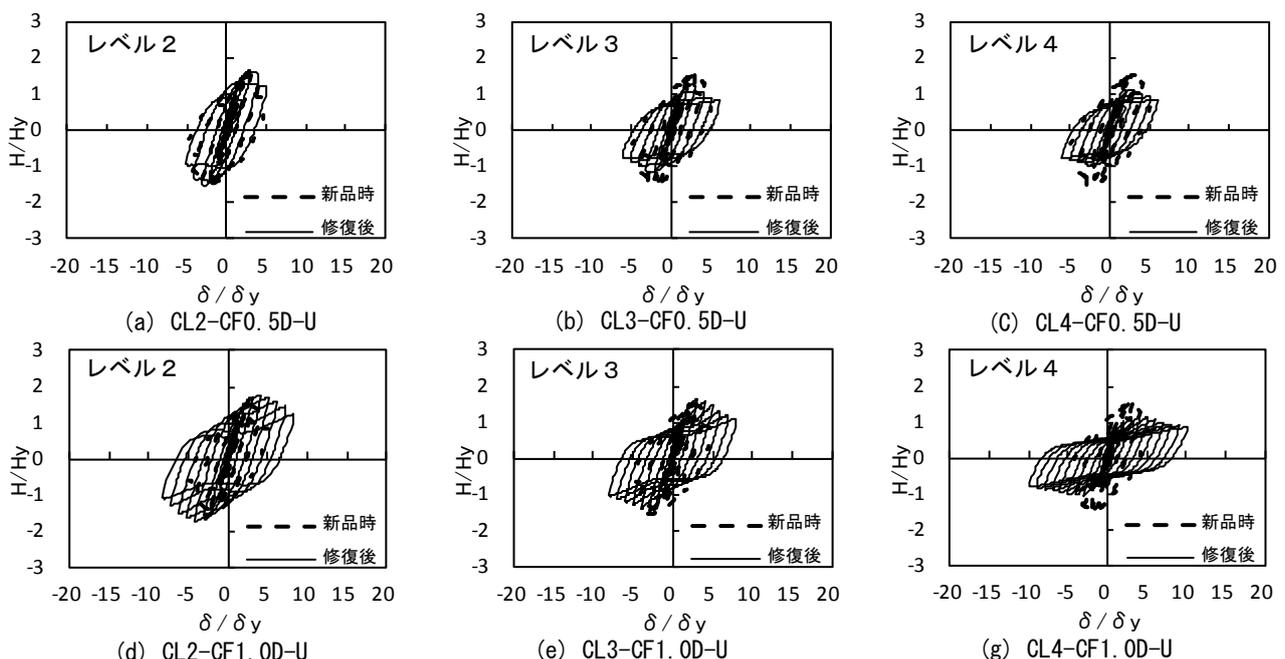


図-3.4 水平荷重-水平変位履歴曲線 (U シリーズ)

状となった。なお、CL2-CF1.0D-S(損傷レベル 2, 1.0D), CL3-CF0.5D-S(損傷レベル 3, 0.5D), CL4-CF0.5D-S(損傷レベル 4, 0.5D)でも同様の傾向が見られた。図-3.5(f)のように、損傷タイプ C に該当する CL4-CF1.0D-S(損傷レベル 4, 1.0D)では、コンクリート充填部に発生した座屈部でのみ損傷が進行するため、最大荷重後の荷重の低下が著しく小さく、非常に優れた変形性能を示している。なお、CL4-CF0.5D-S(損傷レベル 4, 0.5D)でも同様の傾向が見られた。

### 3・4 損傷レベルおよび充填高さの違いによる比較

図-3.6 に損傷レベル毎の包絡線を示す。また、比較のために CL4-CF1.0D-U の新品時の結果を破線で示す。

図-3.6(a) に示す損傷レベル 2 では、充填高さが 0.5D の場合よりも 1.0D の方が最大水平荷重が高く、最大水平荷重に大きな変位で到達する結果となった。これは他の損傷レベルでも同様の傾向が見られた。U シリーズの充填高さ 0.5D の供試体 (CL2-CF0.5D-U) では、新品時とほぼ同様な曲線となり、その他の供試体では、新品時に対して最大水平荷重が 10% 以上高くなる結果となった。

図-3.6(b) に示す損傷レベル 3 では、U シリーズの充填高さ 1.0D の場合では、新品時と同等まで最大水平荷重が回復しているのに対し、0.5D の場合では 7 割程度までの回復にとどまった。S シリーズでは、充填高さ 0.5D, 1.0D 共に新品時に対してそれぞれ 14% および 23% 高くなる結果となった。

図-3.6(c) に示す損傷レベル 4 では、U シリーズでは充填高さが 0.5D, 1.0D 共に最大水平荷重は新品時に対して

7 割程度となった。一方、S シリーズでは、充填高さが 0.5D, 1.0D 共に新品時と同等まで回復する結果となった。

### 3・5 ダイアフラムの有無による比較

図-3.6 より、全ての損傷レベルにおいて、S シリーズの方が U シリーズに対して最大水平荷重が高く、さらに、大きな変位で最大水平荷重に到達する結果となった。

なお、S シリーズでは最大荷重後に荷重が急激に低下している供試体が多いことがわかる。これは損傷形態による影響で、前述したように、損傷タイプ A, B のようにコンクリート充填部直上の鋼断面部で座屈が発生したためである。

また、損傷タイプにより荷重が急激に低下する変位の違いが見られる。損傷タイプ A では、コンクリート充填部では損傷が進行せず、充填部直上の鋼断面部に損傷が集中するため、早い段階で荷重が低下すると考えられる。損傷タイプ B では、最大荷重付近まではコンクリート充填部で損傷が進行した後に充填部直上で損傷が進行する。そのため、損傷タイプ B では損傷タイプ A のよりも大変位レベルにて急激な荷重の低下が発生すると考えられる。なお、損傷タイプ B に該当する CL4-CF0.5D-S(損傷レベル 4, 0.5D)では、充填部直上で座屈が発生する変位が大きく、損傷が進展する前に実験を終了したため、急激な荷重の低下は見られていない。

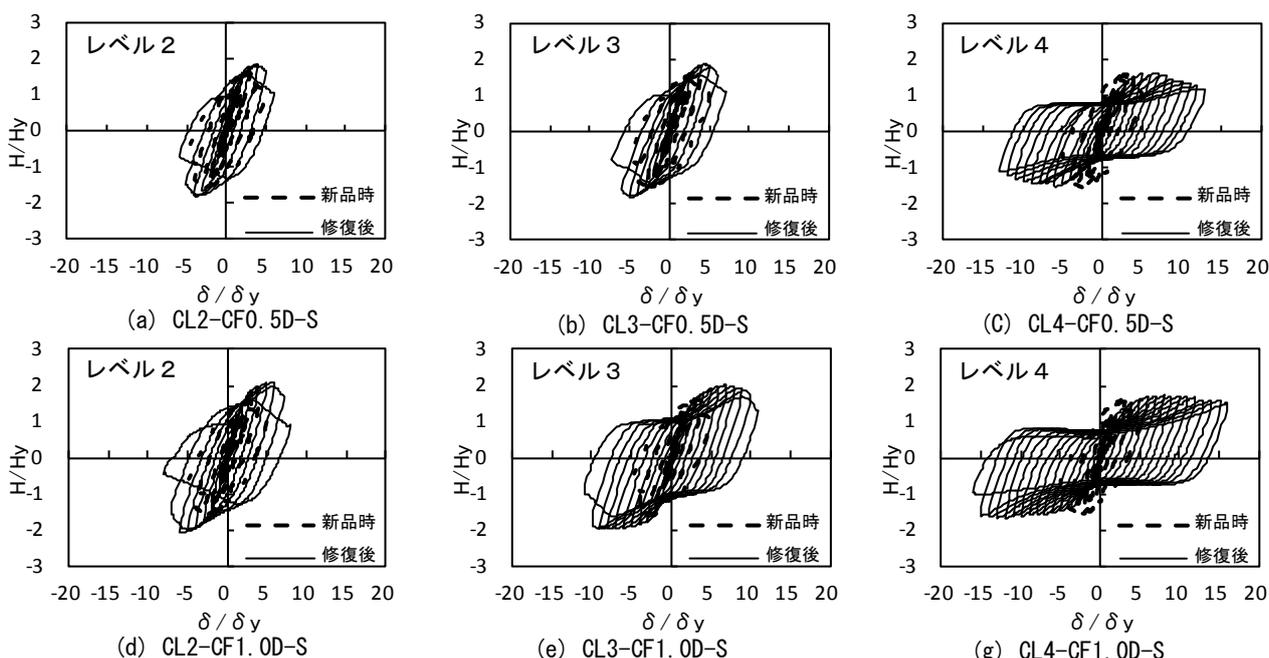
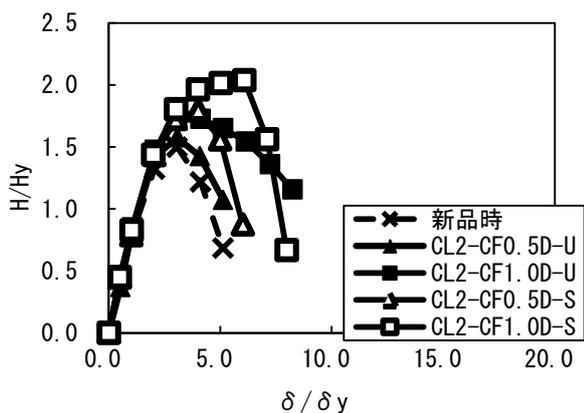
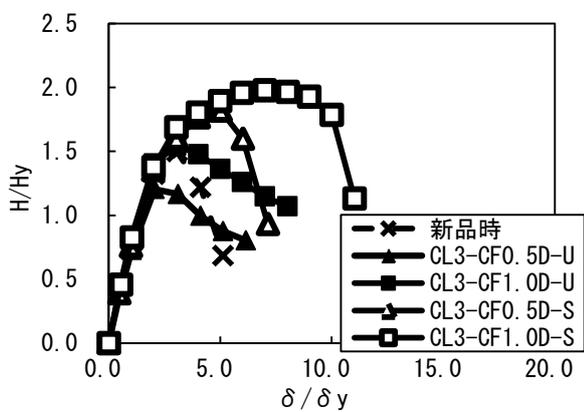


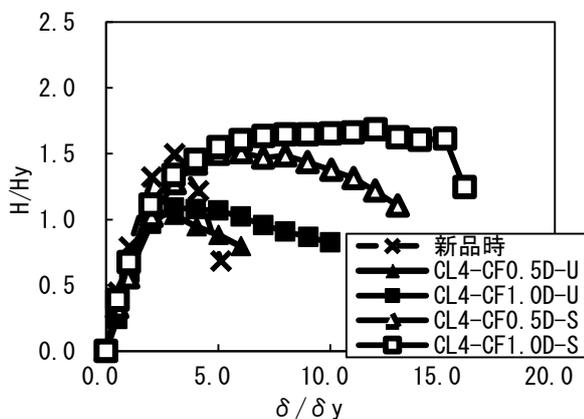
図-3.5 水平荷重-水平変位履歴曲線 (S シリーズ)



(a) 損傷レベル2



(b) 損傷レベル3



(c) 損傷レベル4

図-3.6 包絡線

#### 4. 修復方法の評価

本研究で行った損傷レベルの異なる場合のコンクリート充填修復について、最大水平荷重、剛性および塑性率の値を基に評価する。新品時と同等の耐震性能まで回復させるという視点から、新品時に対して最大水平荷重は±10%、剛性は±20%、塑性率は新品時以上が望ましいものとして評価する<sup>9)</sup>。

#### 4・1 最大水平荷重および剛性による評価

表-4.1 に新品時に対する修復後の最大水平荷重の比および損傷後の保有剛性に対する修復後の初期剛性の比を示す。

表-4.1 より、修復後の最大水平荷重で比較すると、Uシリーズでは CL2-CF0.5D-U, CL3-CF1.0D-U の2体は新品時に対して10%以内となり、目標性能を満足する結果となった。また、CL2-CF1.0D-U は16%増加している。一方、CL3-CF0.5D-U は21%、CL4-CF0.5D-U は29%、CL4-CF1.0D-U は28%減少している。Sシリーズでは、CL4-CF0.5D-S, CL4-CF1.0D-S の2体が新品時に対して10%以内となった。CL2-CF0.5D-S および CL3-CF0.5D-S では、それぞれ12%および14%増加しており、目標とする性能に近い結果となったが、いずれも損傷がコンクリート充填部直上に集中している(損傷タイプ A)。一方、CL2-CF1.0D-S および CL3-CF1.0D-S では、それぞれ28%および23%増加する結果となった。

新品時と比較して最大水平荷重が著しく増加することは、相対的に弱くなった支承部、フーチングおよびアンカーボルトなどの新たな箇所にも損傷が生じることも考えられる。そのため、特に損傷が小さい橋脚に対しては、充填高さを高くすることやダイヤフラムを設けることは望ましくないと考えられる。

表-4.1 最大水平荷重比(修復後/新品時)

供試体名	新品時 $H_{max}/H_y$	修復後 $H_{max}/H_y$	修復後/新品時
CL2-CF0.5D-U	1.50*	1.60	1.07
CL2-CF1.0D-U	1.50*	1.74	1.16
CL3-CF0.5D-U	1.54	1.21	0.79
CL3-CF1.0D-U	1.42	1.55	1.09
CL4-CF0.5D-U	1.50	1.07	0.71
CL4-CF1.0D-U	1.52	1.09	0.72
CL2-CF0.5D-S	1.62*	1.81	1.12
CL2-CF1.0D-S	1.62*	2.07	1.28
CL3-CF0.5D-S	1.62	1.84	1.14
CL3-CF1.0D-S	1.62	1.99	1.23
CL4-CF0.5D-S	1.62	1.57	0.97
CL4-CF1.0D-S	1.60	1.71	1.07

\*損傷レベル2は最大水平荷重に達していないため、それぞれ損傷レベル3, 4の新品時供試体の平均値を用いて比較する。

\*\*CL4-CF0.5D-Uでは、新品時の供試体に対してpushoverで損傷を与えたため、評価の段階では新品時の値にCL4-CF1.0D-Uの結果を用いている。

修復後の剛性については表-4.1より、UシリーズではCL4-CF1.0D-Uで新品時の24%とやや低い結果となったものの、その他の供試体で20%以内にまで回復しており、十分な修復効果が得られた。Sシリーズでは、CL4-CF0.5D-SおよびCL4-CF1.0D-Sでは新品時に対して約20%、その他の供試体においては10%以内にまで回復している。

以上より、損傷レベル2に相当する比較的軽微な損傷に対しては、ダイアフラムを設けない場合では充填高さを1.0D以上、ダイアフラムを設ける場合では0.5D以上とすることで耐力が過大に増加してしまう恐れがある。

損傷レベル3に対しては、ダイアフラムを設けない場合では、充填高さが0.5Dでは十分な耐力の回復は期待できないため、1.0Dとすることが望ましい。ダイアフラムを設ける場合では、充填高さを0.5D以上とすることで耐力が過大に増加してしまう恐れがある。

損傷レベル4に対しては、ダイアフラムを設けない場合では、1.0Dまでの充填高さでは十分な耐力の回復は期待できない。一方、ダイアフラムを設ける場合では、充填高さを0.5Dとすることで耐力は十分に回復する。

表-4.2 損傷後保有剛性および修復後初期剛性

供試体名	損傷後保有剛性 $K_1/K_0$	修復後保有剛性 $K_2/K_0$
CL2-CF0.5D-U	0.96	1.02
CL2-CF1.0D-U	0.94	1.00
CL3-CF0.5D-U	0.87	0.95
CL3-CF1.0D-U	0.83	1.05
CL4-CF0.5D-U	0.59**	0.84**
CL4-CF1.0D-U	0.59	0.76
CL2-CF0.5D-S	0.94	0.96
CL2-CF1.0D-S	0.92	1.00
CL3-CF0.5D-S	0.85	0.93
CL3-CF1.0D-S	0.83	0.98
CL4-CF0.5D-S	0.69	0.79
CL4-CF1.0D-S	0.62	0.90

#### 4・2 塑性率による評価

最大水平荷重に達した後、最大水平荷重の95%となった時の水平変位を $\delta_{95}$ とし、式(6)より塑性率 $\mu_{95}$ を算出した。表-4.2に塑性率比の一覧を示す。

$$\mu_{95} = \delta_{95} / \delta_y \quad (6)$$

修復後の塑性率は、Uシリーズでは、充填高さが0.5Dの供試体において、新品時と同等まで回復したが、充填

高さが1.0Dの場合では、いずれの供試体も新品時よりも向上した。Sシリーズでは、全ての供試体において新品時よりも向上し、CL3-CF1.0D-Sでは272%、CL4-CF1.0D-Sでは380%まで増加した。

ダイアフラムの無い円形断面鋼製橋脚では充填高さが0.5Dのように低い場合、充填コンクリートと鋼断面の接触面が少ないため摩擦が小さくなり、座屈の進行が抑制できず、高い変形性能が得られないと考えられる。

ダイアフラムを設けた場合では、充填部で損傷が進行する損傷タイプでは変形性能が大きく向上する(損傷タイプBおよび損傷タイプC)。これは、ダイアフラムにより充填コンクリートに拘束力が生じ、損傷の進行が緩やかになるためと考えられる。一方、損傷タイプAとなった場合の塑性率はやや小さくなっている。このことから、鋼製橋脚の損傷が比較的軽微な場合においては、コンクリートを充填するだけの修復では、コンクリート充填部より上の鋼断面部に新たに座屈が生じるなどし、高い変形性能が得られない場合がある。変形性能を向上させるには、例えば、修復後の損傷を修復前と同じ部位に生じさせるなど、充填部より上の鋼断面部での座屈を防止するための対策が必要である。

表-4.3 塑性率比(修復後/新品時)

供試体名	新品時	修復後	修復後/新品時
CL2-CF0.5D-U	3.54*	3.46	0.98
CL2-CF1.0D-U	3.54*	5.16	1.46
CL3-CF0.5D-U	3.28	3.19	0.97
CL3-CF1.0D-U	3.10	4.05	1.31
CL4-CF0.5D-U	3.27**	3.25	1.00
CL4-CF1.0D-U	3.27	5.66	1.73
CL2-CF0.5D-S	3.37*	4.32	1.28
CL2-CF1.0D-S	3.37*	6.24	1.85
CL3-CF0.5D-S	3.32	5.37	1.62
CL3-CF1.0D-S	3.40	9.24	2.72
CL4-CF0.5D-S	3.34	6.40	1.92
CL4-CF1.0D-S	3.40	12.93	3.80

\*損傷レベル2は最大水平荷重に達していないため、それぞれ損傷レベル3、4の新品時供試体の平均値を用いて比較する。

\*\*CL4-CF0.5D-Uでは、新品時の供試体に対してpushoverで損傷を与えたため、評価の段階では新品時の値にCL4-CF1.0D-Uの結果を用いている。

## 5. 結論

本研究では損傷レベルの異なる円形断面鋼製橋脚を対象として、コンクリート充填修復を施し、損傷レベル、充填高さの違いおよびダイアフラムの有無による修復効果についての比較、検討を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 鋼製橋脚の損傷レベルは、橋脚の鋼断面に生じる座屈部のひずみ値から判定できると考えられる。一方で、ひずみの実用的な計測方法は無く、容易にひずみレベルが分かるような手法の開発が今後の課題であると言える。
- 2) 損傷した鋼製橋脚にコンクリート充填修復を行う際、修復後に生じる損傷は新品時と同様の箇所(コンクリート充填部)で生じるのが望ましい。すなわち、新品時と同等の耐力まで回復させることが重要である。
- 3) 比較的損傷の小さい損傷レベル2では、ダイアフラムの有無に関わらず、コンクリート充填修復では耐力が増加しすぎてしまうことが考えられるため注意が必要である。
- 4) 損傷レベル3では、ダイアフラムを設けない場合では充填高さを1.0Dとすることで十分な耐力の回復と変形性能の向上が期待できる。ダイアフラムを設ける場合では、充填高さが0.5Dでは最大荷重に達した直後(6 $\delta_y$ 程度)に充填部より上の鋼断面部で座屈が生じてしまうため望ましくない。
- 5) 損傷レベル4では、ダイアフラムを設けない場合では、1.0Dまでの充填高さでは十分な耐力の回復は期待できない。ダイアフラムを設ける場合では、0.5Dまでの充填高さで耐力は十分に回復し、非常に優れた変形性能が得られることが期待できる。

## 参考文献

- 1) 宇佐美勉, 鈴木森晶, Iraj H. P Mamaghani, 葛漢彬: コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案, 土木学会論文集, No. 525/I -33 pp. 69-82, 1995. 10.
- 2) 松村政秀, 北田俊行, 澤登善誠, 中原嘉郎: 無充填区間を有するコンクリート充填工法による既設鋼製橋脚の耐震補強法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 35-44, 2001. 3.
- 3) 北浦雅司, 折野明宏, 石澤俊希: コンクリートを部分充填した円形鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する研究, 土木学会論文集, No. 696/I -58, pp. 285-298, 2002. 1.

- 4) 忠和男, 櫻井孝昌: 既設円筒鋼製橋脚の鋼板貼り付けによる耐震補強法, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 139-144, 2003. 3.
- 5) 鈴木 森晶, 青木 徹彦, 野村 和弘: 簡易補修後鋼製ラーメン橋脚の耐震性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 135-142, 2000. 3.
- 6) 森下益臣, 青木徹彦, 鈴木森晶: コンクリート充填円形鋼管柱の耐震性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 73-83, 2000. 3.
- 7) 尾松大道, 鈴木森晶, 青木徹彦: 損傷した矩形断面鋼製橋脚の修復後の耐震性能に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 52A, pp. 445-453, 2006. 3.
- 8) Moriaki Suzuki, Yoshiyuki Shimaguchi, Tetsuhiko Aoki: RESIDUAL STRENGTH OF DAMAGED STEEL BRIDGE PIER WITH CIRCULAR CROSS SECTION AND ITS REPAIR METHOD, JOINT CONFERENCE PROCEEDINGS 7CUEE&5ICEE, pp. 2011-2016, March 3-5, 2010.
- 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) 嶋口儀之, 鈴木森晶, 太田樹, 青木徹彦: 損傷レベルが異なる矩形断面鋼製橋脚のコンクリート充填修復と耐震性能に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 59A, 投稿中
- 11) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012. 3.
- 12) 宇佐美勉: 鋼平面ラーメン構造物の極限強度評価式の実験データによる検証, 構造工学論文集, Vol. 36A, pp. 79-88, 1990. 3.
- 13) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2012. 3.

(受理 平成 25 年 3 月 19 日)