

論文 異なるレベルの損傷を有する鋼製円形橋脚の繰返し曲げ載荷下でのコンクリート部分充填補修効果に関する実験的研究

近藤 貴紀^{*1}・水野 英二^{*2}

要旨：本研究では、異なるレベルの損傷を有する鋼製円形橋脚モデルの繰返し曲げ（一方向・二方向）載荷下でのコンクリート部分充填補修効果に関する実験を実施し、「載荷形態」および「充填高さ」を要因としてその効果を検証した。また、一方向載荷下で、鋼材特性の違いによる補修効果も検証した。結果として、1) 損傷レベル2の場合には、0.5D（D：鋼管外径）および1.0D 高さの充填補修は二方向載荷下でも効果がある、2) 損傷レベル3の場合には、二方向載荷下では、1.0D 高さまで充填しても十分な回復度が得られない、3) 低降伏比鋼を使用すると、損傷レベル2および3の鋼管柱に対して1.0D 高さの充填補修は耐荷特性を改善できる、など多くの知見を得た。

キーワード：鋼製橋脚、損傷レベル、コンクリート部分充填補修、二方向載荷、耐荷特性、低降伏比

1. はじめに

鋼製橋脚は、鉄筋コンクリート（RC）柱と同様、高速道路および鉄道などのラーメン高架橋を構成する主要な構造部材であるため、今後は激震時においてもそれらの最大耐力以降の領域（以下、ポストピーク領域）、特に大変位領域に至るまで急激な強度低下を抑制することができる、高い耐震性能（補修効果も含む）を有する鋼製橋脚を開発・採用することは重要な課題の一つである。

これまで、新設鋼製橋脚の耐震性能を向上するために、例えば、1) コンクリートを部分充填した円形断面鋼製橋脚の耐震性能に関する研究²⁾、2) コンクリート充填高さならびにダイアフラムの有無が橋脚の耐力に与える影響に関する研究³⁾などが行われている。一方、既設鋼製橋脚の耐震性能を改善するために、鋼板または炭素繊維シートを貼り付けることによる耐震補修法の提案⁴⁾も行われている。しかし、異なる大きさの損傷を有する既設鋼製橋脚に対する補修方法および補修後の耐震性能（以降、補修効果）に関する研究は少ない^{例えば、5)}。地震により損傷した円形断面鋼製橋脚の補修に関する研究⁵⁾によれば、鋼板巻き立てによる補修の他にも、強度の低いコンクリートの部分充填が有効な補修手段となると報告している。ここでは、プレピークおよびポストピーク領域での損傷度合い、充填高さ、ダイアフラムの有無および径厚比パラメータなどを要因として繰返し一方向載荷下での補修効果を検討している。ただし、繰返し二方向載荷下での補修効果および鋼管の材料特性の違いによる補修効果への影響などについては言及されておらず、これらを検討することも必要かと考える。

それゆえ、本研究においては、低降伏比の鋼材を用いてダイアフラムの無い鋼製円形橋脚供試体（以下、新品供試体）を作製した後、繰返し曲げ載荷（2種類）下で図-1に示すような異なるレベルの損傷（3種類：例え

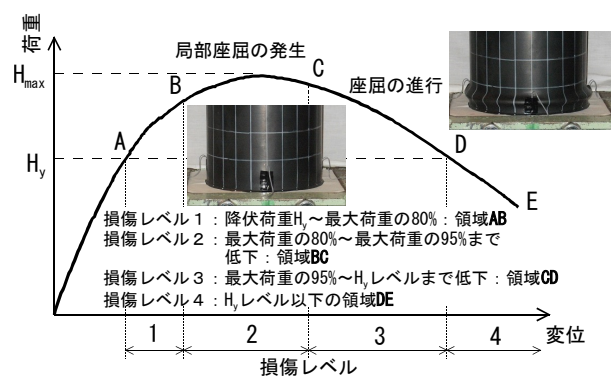


図-1 鋼管柱の損傷レベル

ば、図-1に設定した損傷レベル2～4)を生じさせるための載荷実験（損傷実験）を実施した。続いて、これら損傷した供試体に対して柱基部より異なる高さ（2種類）まで強度の低いコンクリートを充填して補修を施すことにより補修供試体を作製し、繰返し曲げ（一方向・二方向）載荷下でのコンクリート部分充填補修効果に関する実験（補修実験）を実施した。「載荷形態」および「充填高さ」の違いによるその補修効果を比較・検証するとともに、材質の異なる円形断面鋼製橋脚モデルの繰返し一方向載荷下でのコンクリート部分充填補修効果に関する実験結果⁵⁾と比較し、鋼の材料特性の違いがポストピーク以降の耐荷特性に及ぼす影響についても検証した。

2. 実験供試体および材料定数

本実験で用いた新品供試体は、実寸大鋼製橋脚の1/10程度を目安とした縮小モデルである。供試体の概要を図-2に示す。供試体の鋼材として引張強度に対する降伏強度の比が小さいSTKM13Aを用い、文献5)に示す実験結果と比較するため、径厚比パラメータ（0.11）および細長比パラメータ（0.31）を合わせ、外径寸法（D）244.4 mm、板厚（t）3.2 mm、有効高さ1,000 mmとした。ちなみに、文献5)で用いられた鋼管の材質はSTK400、外径

*1 レックスサポート株式会社 修士（工学）（正会員）

*2 中部大学 工学部都市建設工学科 教授 Ph.D.（正会員）

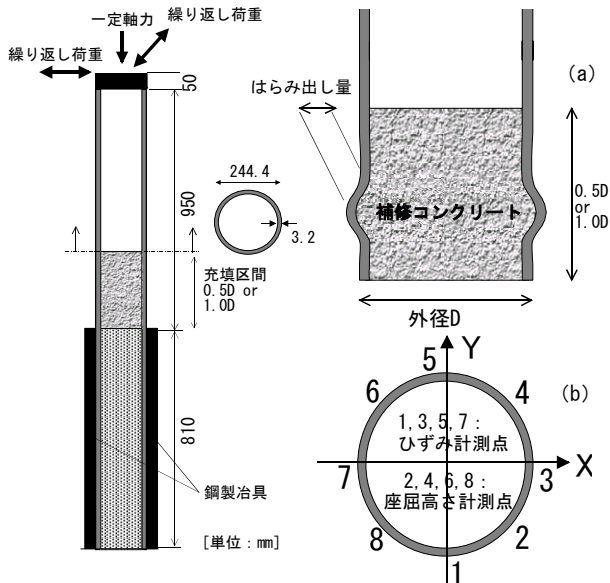


図-2 鋼管柱の概要 図-3 鋼管柱基部詳細

寸法 (D) 508 mm, 板厚 (t) 6.36 mm, 有効高さ 2,115 mm であり, 本実験供試体のおよそ 2 倍である。一方向載荷または二方向載荷により鋼管柱基部の塑性ヒンジ部分に特定のレベルまで損傷を与えた後に, 図-3 (a) に示すように, 柱基部より 0.5 D または 1.0 D (D : 外径) の区間に強度の低いコンクリートを充填することにより補修鋼管柱を作製した。なお, 柱基部の軸方向にひずみゲージを貼付した箇所およびはらみ出し形状を計測した箇所を図-3 (b) に番号で示す。補修コンクリートには, 補修部分の剛性を高くしないためにも設計基準強度 $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ を有するコンクリート (20~28 MPa) を用いた。

表-1 損傷変位および補修高さ

繰返し載荷	損傷変位 (柱頭の水平変位)	補修充填高さ (D : 外径)
一方向載荷	$4\delta_y, 6\delta_y, 7\delta_y, 8\delta_y$	0.5D, 1.0D
二方向載荷	$4\delta_y, 6\delta_y, 8\delta_y$	0.5D, 1.0D

注) δ_y : 降伏変位 3.5 mm に準ずる変位 2.48 mm

表-2 材料定数および載荷軸力

鋼管柱	STKM13A 鋼管	補修コンクリート	載荷軸力 [kN]
Uni4-0.5D ~ Bi8-1.0D など 14 体	降伏強度 [MPa] 引張強度 [MPa]	圧縮強度 [MPa]	
	275 495	20 ~ 28	113

注) STK400 鋼管 : 降伏強度 342MPa, 引張強度 472MPa

本実験では, 載荷形態 (2 種類 : 3.2 節の載荷経路), 損傷変位 (柱頭の水平変位 : 4 種類ないし 3 種類) および補修コンクリート充填高さ (2 種類) を要因として, 計 14 体の補修供試体を作製した。以降, 載荷経路-損傷変位-充填高さを組み合わせることにより補修供試体を呼称する。例えば, 3.2 節で説明するように, 一方向載荷下で柱頭に水平変位 $4\delta_y$ までの変位履歴 (以下, 損傷変位 $4\delta_y$) を受けた鋼管柱の基部より高さ 0.5 D までコンクリート充填した補修供試体を Uni4-0.5D 柱と称する。また, 二方向載荷下で損傷変位 $8\delta_y$ を受けた鋼管柱の基部より高さ 1.0 D までコンクリート充填した補修供試体を Bi8-1.0D 柱と称する。損傷変位および充填高さを表-1, 鋼管および補修コンクリートの材料定数などを表-2, それら材料の応力-ひずみ曲線を図-4 に文献 5) のデータと併せて示す。鋼材料の違いとして, STKM13A 鋼管の降伏比 (0.56) は STK400 鋼管 (降伏強度 : 342MPa) のそれ (0.73) と比べ低いことが挙げられる。

3. 載荷実験

3.1 載荷方法

鋼管柱 (図-2) を鋼製治具に固定し, 鉛直ジャッキにより軸力を柱頂部に作用させると同時に, 写真-1 に示す二方向載荷装置を用いて二方向 (X 方向および Y 方向) からの水平変位を柱頂部に与えることにより, 繰返し二方向載荷実験を実施した。鉛直軸力の大きさは累加軸耐力の 16.9 % (113 kN) とし, 次節の載荷経路に基づいて変位制御により水平荷重を作用させた。

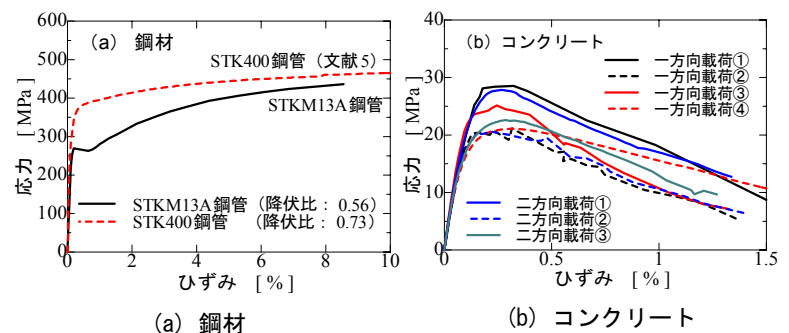


図-4 材料特性

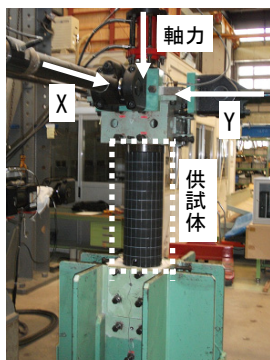


写真-1 二方向載荷装置

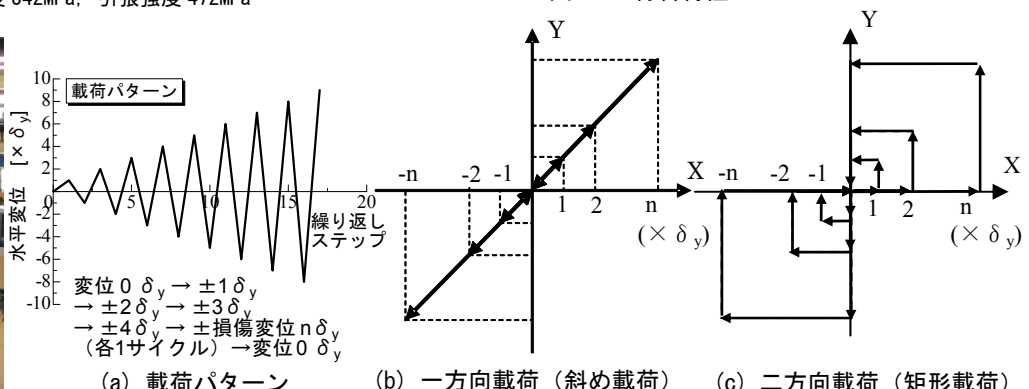


図-5 載荷経路

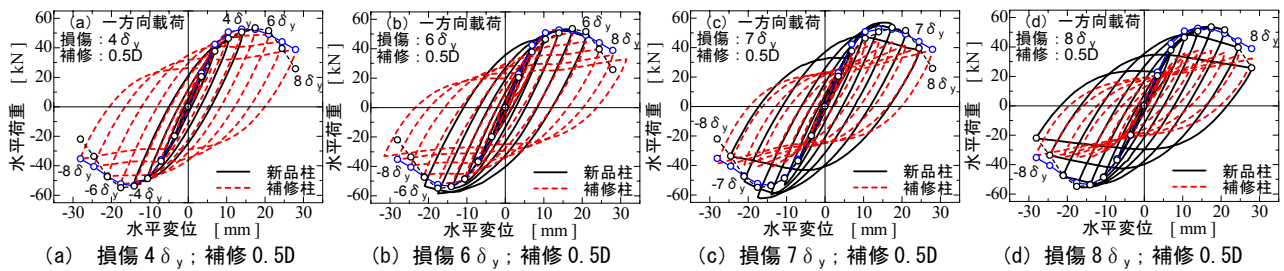


図-6 荷重－変位関係（一方向載荷：0.5D）

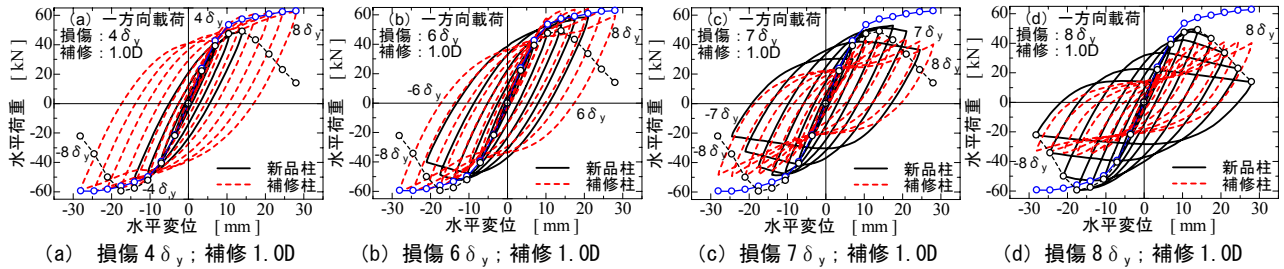


図-7 荷重－変位関係（一方向載荷：1.0D）

3.2 載荷経路

図-5に示す、2種類の載荷経路、(1) 一方向載荷下での経路（45° 斜め載荷経路）および (2) 二方向載荷下での経路（矩形載荷経路）を設定した。図-5 (a) および図-5 (b) に示すように、一方向載荷では、X 方向および Y 方向に同時に同一変位を（ $0 \rightarrow +1\delta_y \rightarrow -1\delta_y \rightarrow +2\delta_y \rightarrow -2\delta_y \rightarrow \dots \rightarrow n\delta_y \rightarrow -n\delta_y$ ）のサイクル順に所定の変位レベル $n\delta_y$ まで柱頂部に与えた。一方、二方向載荷（図-5(c)）では、第1象限と第3象限にて順に大きさ $1\delta_y$, $2\delta_y$, ..., $n\delta_y$ の矩形により 8 の字を描くように X 方向および Y 方向の変位を変化させて実験を実施した。ここで、「 δ_y 」とは、一方向載荷経路下の変位点（ $+1\delta_y$, $+1\delta_y$ ）で鋼管柱の圧縮側が初期降伏する合成変位 $\sqrt{2}\delta_y$ （本実験では、3.5 mm）の X 方向（または Y 方向）の水平変位を意味する。よって、 $\delta_y = 2.48 \text{ mm}$ を採用した。

4. 損傷実験ならびに補修実験の結果および考察

4.1 繰り返し変形特性

(1) 一方向載荷下での変形特性

一方向載荷下での損傷実験（損傷変位： $4\delta_y$, $6\delta_y$, $7\delta_y$, $8\delta_y$ を新品柱に与える載荷実験）およびその補修実験（充填高さ：0.5D, 1.0Dの補修柱の変位 $8\delta_y$ までの載荷実験）から得た、水平荷重－水平変位関係（斜め 45° 方向成分）を充填高さ別に図-6 (a) ～ (d) および図-7 (a) ～ (d) に示す。本実験の損傷変位 $4\delta_y$ および $6\delta_y$ は図-1に示す損傷レベル 2, 損傷変位 $7\delta_y$ は損傷レベル 3, さらに損傷変位 $8\delta_y$ は損傷レベル 4 に相当する。図中、黒実線は損傷実験による各損傷変位（ $4\delta_y$, $6\delta_y$, $7\delta_y$ および $8\delta_y$ ）までの荷重－変位曲線（以降、損傷曲線）、赤破線は補修実験による変位 $8\delta_y$ までの荷重－変位曲線（以降、補修曲線）をそれぞれ示す。なお、図-6

および図-7中のシンボル○付き黒破線は、新品柱の損傷変位 $8\delta_y$ までの損傷曲線の包絡線を示す。さらに、図中のシンボル○付き青実線は、Uni4-0.5D 柱および「新品柱（損傷変位 $0\delta_y$ ）を充填高さ 1.0D で補修（補強）した」Uni0-1.0D 柱の補修曲線の包絡線をそれぞれ示す。

異なるレベルの損傷を有する鋼管柱の充填高さの違いによる変形特性として、以下のことが挙げられる。

- i) 図-1に示す損傷レベル 2 に相当する Uni4-0.5D 柱および Uni6-0.5D 柱の場合、その補修曲線（図-6 (a) および (b)：赤破線）の包絡線は新品柱の損傷変位 $8\delta_y$ までの損傷曲線（図-6 (d)：シンボル○付き黒破線）の包絡線と比較して同等か多少高い強度特性を呈しており、充填高さ 0.5D の補修により補修柱は新品柱の強度特性を回復する。
- ii) しかし、Uni4-0.5D 柱および Uni6-0.5D 柱とも、変位 $4\delta_y$ および $6\delta_y$ までの損傷を受けて剛性低下した鋼管の座屈および圧縮側コンクリートの強度発現により、荷重－変位曲線のレベルでは、S 字曲線を描くようになる。
- iii) 損傷レベル 3 および 4 になると、さらに剛性低下した鋼管と圧縮側コンクリートにより明確な S 字曲線を描くとともに、Uni7-0.5D 柱および Uni8-0.5D 柱の補修曲線（図-6 (c) および (d)：赤破線）の包絡線は新品柱の損傷曲線（損傷変位 $8\delta_y$ ）の包絡線（図-6 (d)：黒破線）よりも低い強度特性を呈するようになる。ただし、各補修曲線の包絡線の低下勾配は、新品柱の包絡線のそれよりも緩やかである。
- iv) 充填高さ 1.0D の補修による場合（図-7 (a) ～ (d)）も上述の i) ～ iii) と同様な傾向がある。ただし、新品柱を充填高さ 1.0D で補修（補強）した Uni0-1.0D 柱の補修曲線の包絡線（シンボル○付き青実線）は、

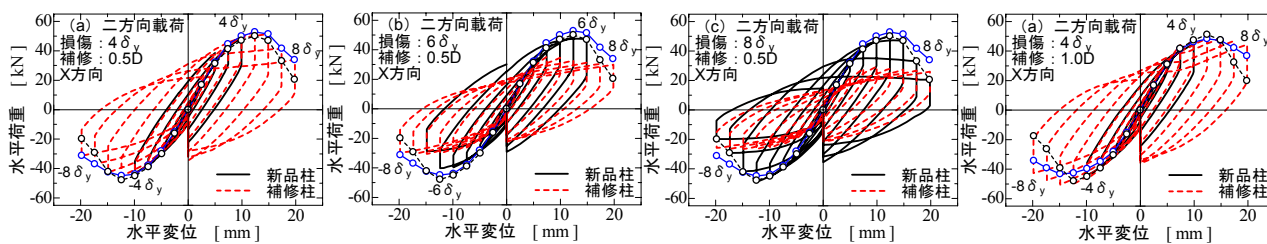


図-8 (a) 荷重-変位関係 (二方向載荷: $4\delta_y$; $0.5D$) 図-8 (b) 荷重-変位関係 (二方向載荷: $6\delta_y$; $0.5D$) 図-8 (c) 荷重-変位関係 (二方向載荷: $8\delta_y$; $0.5D$) 図-9 (a) 荷重-変位関係 (二方向載荷: $4\delta_y$; $1.0D$)

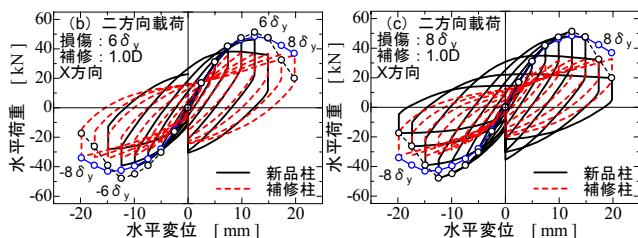


図-9 (b) 荷重-変位関係 (二方向載荷: $6\delta_y$; $1.0D$) 図-9 (c) 荷重-変位関係 (二方向載荷: $8\delta_y$; $1.0D$)

新品柱の変位 $8\delta_y$ までの損傷曲線の包絡線 (黒破線) と比較して、強度上昇を伴う曲線となっており、損傷変位 $6\delta_y$ までの鋼管柱 (Uni4-1.0D 柱および Uni6-1.0D) に対する補修では新品柱の最大荷重を上回る荷重-変位曲線を呈する。一方、損傷変位 $7\delta_y$ を超えた Uni7-1.0D 柱および Uni8-1.0D 柱に対する補修では新品柱の最大荷重を下回る荷重-変位曲線を呈するが、包絡線の耐力以降の低下勾配は新品柱のそれよりも低く、ほぼ強度の低下はない。

(2) 二方向載荷下での変形特性

二方向載荷下での損傷実験 (損傷変位: $4\delta_y$, $6\delta_y$, $8\delta_y$) およびその補修実験 (充填高さ: $0.5D$, $1.0D$) から得た、水平荷重-水平変位関係 (X 方向成分) を充填高さ別に図-8 および図-9 に示す。本実験の損傷変位 $4\delta_y$, $6\delta_y$, $8\delta_y$ はそれぞれ図-1 に示す損傷レベル 2, 3, 4 に相当する。一方向載荷と比べ、同じ損傷変位でも累積変位が大きい二方向載荷下での損傷レベルが高い。図中、黒実線、赤破線、シンボル○付き黒破線および青実線は、一方向載荷 (図-6 および図-7) の場合と同様の構成である。異なるレベルの損傷および充填高さの違いによる変形特性として、以下のことが挙げられる。

- i) 充填高さ $0.5D$ および $1.0D$ による補修の場合、損傷変位 $4\delta_y$ を有する鋼管柱 (Bi4-0.5D 柱および

Bi4-1.0D) の補修曲線 (図-8 (a) および図-9 (a) : 赤破線) の包絡線は、それぞれ新品柱の $8\delta_y$ までの損傷曲線 (図-8 (c) および図-9 (c) : 黒破線) の包絡線と比較して最大荷重まで概ね同じ強度特性を、それ以降は多少高い強度特性を呈する程度で、両包絡線間の差異は充填高さ $0.5D$ および $1.0D$ による補修の場合ともに認められない。

- ii) 一方向載荷の場合と同様、損傷レベル 2 にある損傷柱に対しては充填高さ $0.5D$ および $1.0D$ の補修により新品柱の強度特性に回復する。
- iii) 損傷レベル 3 以上の場合、充填高さ $1.0D$ の補修を施しても一方向載荷の場合と同等の補修効果は認められない (図-8 (b), (c) および図-9 (b), (c))。

4.2 座屈進展特性

本実験では、一方向載荷ならびに二方向載荷下ともに鋼管の座屈 (はらみ出し) は柱基部から $70\sim 75\text{ mm}$ の範囲に亘って、円周上に概ね均等に生ずる (写真-2)。写真は、Uni6-1.0D 柱および Bi6-1.0D 柱の実験終了時 (変位 $8\delta_y$) における+X 軸面からの変形状態を示す。また、全実験を通して、載荷形態に関係なく座屈によるはらみ出しの最大は概ね基部から 30 mm 上の箇所で見られる。

一例として、二方向載荷下での損傷実験および補修実験を通じた、Bi6-1.0D 柱のはらみ出し量 (最大値) の進展を図-10 に示す。図中の値は図-3 (b) に示す測定点 4 の最大はらみ出し量である。損傷実験では、図-10 より分かるように、最大耐力を迎える前の変位 $4\delta_y$ までは座屈は発生せず、その後に徐々にはらみ始め、損傷実験終了時の変位 $6\delta_y$ にて $6\sim 7\text{ mm}$ 程度の最大はらみ出し量が生ずる。コンクリート充填 ($1.0D$) 後の補修実験では、最大点を迎える変位 $4\delta_y$ からのはらみ出しが再度始まり、補修実験終了時の変位 $8\delta_y$ にて 10 mm 程度の最大

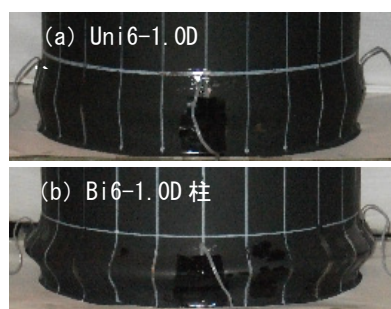


写真-2 座屈状況 (載荷形態の違い)

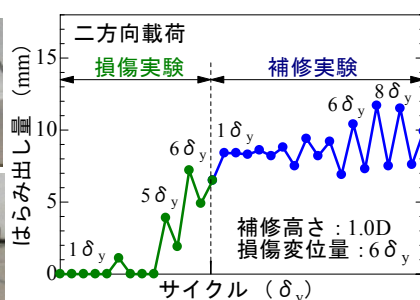


図-10 はらみ出しの進展 (一例)

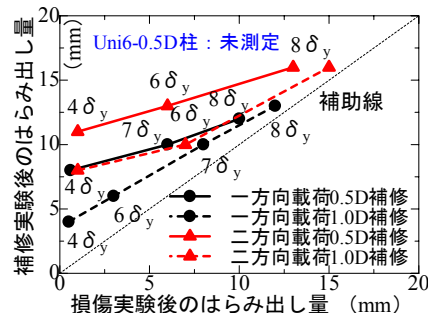


図-11 損傷・補修実験後のはらみ出し量

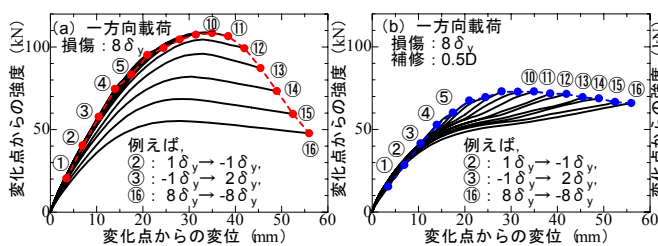


図-12 強度－変位曲線（一方向載荷：一例）

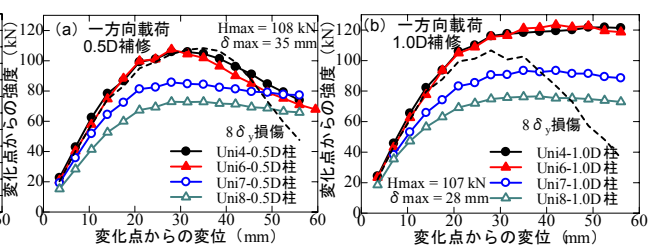


図-13 包絡線（一方向載荷：0.5D, 1.0D）

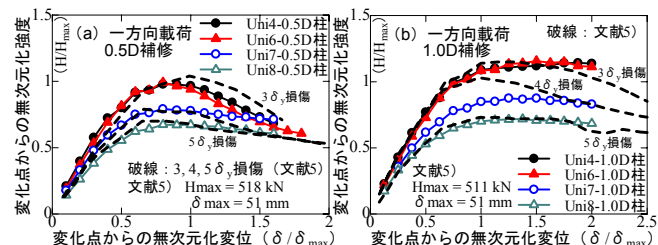


図-14 無次元化包絡線の比較（一方向載荷：0.5D, 1.0D）

はらみ出し量が生ずる。14 供試体に対して、載荷形態と充填高さを要因として異なる損傷変位に対する損傷・補修実験終了時の最大はらみ出し量をプロットした結果を図-11 に示す。図より以下のことが分かる。

- 載荷形態と充填高さに関わらず、損傷変位が大きくなるに従い損傷実験および補修実験終了時の最大はらみ出し量は増加する。なお、一方向載荷よりも累積変位が大きい二方向載荷の方が、また充填高さ 1.0D よりも 0.5D の方が最大はらみ出し量は大きい。
- 一方、補修実験で生ずる最大はらみ出し量（図-11 中の補助線からの大きさ）は載荷形態と充填高さに関わらず、損傷変位が大きくなるに従い減少する。
- 損傷レベルが 2 と低い場合は、1.0D 充填補修を施した補修実験終了時の最大はらみ出し量を、一方向載荷下では新品柱のそれと比べおよそ 3 割程度に、二方向載荷ではおよそ 5 割程度に抑えることが出来る。

4.3 載荷方向の変化点を基準とした強度－変位曲線

本節では、図-6～図-9 に示す、載荷区間ごとの荷重－変位曲線（補修曲線）の開始点（載荷方向の変化点）を基準として整理・分類した「抵抗強度（以降、強度と称す）－変位曲線」⁹⁾を用いて、一方向載荷ならびに二方向載荷下での鋼管柱の耐荷特性を損傷変位と充填高さを要因として比較・考察する。ここで、強度とは変化点以降の荷重と載荷方向の変化点での荷重との差である。

(1) 一方向載荷下での耐荷特性

一例として、一方向載荷下での新品柱および Uni8-1.0D 柱の強度－変位曲線（ $8\delta_y$ まで）をそれぞれ図-12 (a) および (b) に示す。ここで、強度および変位は、X および Y 方向成分を合成した量である。なお、図中の数字（①～⑯）の奇数および偶数は変位がそれぞれプラス側およびマイナス側に漸増する強度－変位曲線を意味する。これら曲線の終点を結んだ包絡線（図-12：黒破線、青破線）を応用して、0.5D および 1.0D の充填補修を施した

鋼管柱（8 体）の強度（H）－変位（ δ ）曲線を整理した包絡線を図-13 に示す。なお、図中に新品柱の強度－変位曲線（ $8\delta_y$ まで）の包絡線を黒破線にて示す。

一方向載荷下での包絡線による耐荷特性として、0.5D 充填高さに補修した場合（図-13 (a)）、1) Uni4-0.5D 柱および Uni6-0.5D 柱の包絡線の最大強度（107 kN）は新品柱のそれ（108 kN）と概ね同じである、2) 繰り返し変位幅が増えるに従い新品柱の包絡線の強度は低下するのに対し、4 つの補修柱の強度とも一定の残留強度（ここでは、60 kN）に低減する傾向にある、などが挙げられる。一方、1.0D 充填高さに補修した場合には、1) Uni4-1.0D 柱および Uni6-1.0D 柱の包絡線の強度は新品柱のそれよりも大きく、一定の強度（120 kN）に漸近する、2) Uni7-1.0D 柱および Uni8-1.0D 柱の包絡線の最大強度（93 kN および 76 kN）は新品柱のそれよりも小さいが、最大強度後に強度低下が緩やかな曲線を呈する（図-13(b)）。

太田らの実験データ⁵⁾と比較するため、各新品柱の包絡線の最大強度 H_{max} とその点の変位 δ_{max} にて各補修柱の包絡線を無次元化して充填高さ別に整理した結果を図-14 に示す。図中の実験データの包絡線（黒破線）との比較から分かるように、両補修（0.5D, 1.0D 充填高さ）ともに、1) 各包絡線の最大強度までは同様な傾向を呈する、2) しかし、最大強度以降は、本実験の鋼管柱の方が低減率は低く、特に 1.0D 充填高さ補修の包絡線ではその差異が顕著である。この理由としては、鋼材特性の違い、とくに降伏後の引張強度に達するまでの挙動の違い（図-4 (a): 降伏比の違い）にあると考えられる。すなわち、図-3 (b) に示した柱基部のひずみゲージ貼付位置での損傷後の軸圧縮ひずみは、損傷変位が大きくなるに従い、1%→10%の区間を漸増しており、損傷変位が小さい場合には、残量ひずみが小さく、硬化勾配の大きな状態が補修実験開始時の鋼材に保たれているためと考える。

(2) 二方向載荷下での耐荷特性

図-15 に示すように、二方向載荷の 1 サイクルは 4 種類の載荷経路（1）経路 A（P3→P4→P5→P6）、（2）経路 B（P7→P8→P1→P2）、（3）経路 C（P4→P5）および（4）経路 D（P8→P1）の組み合わせである⁹⁾。

以下では、一方向載荷と等価である、経路 A の耐荷曲線（X 方向成分）および経路 B の耐荷曲線（Y 方向成分）を比較する。一例として、二方向載荷下での新品柱の強

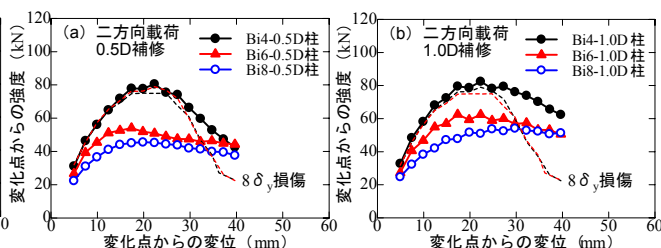
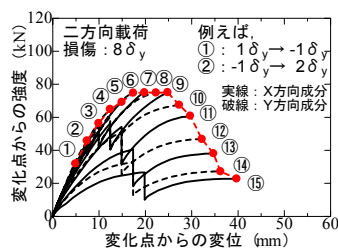
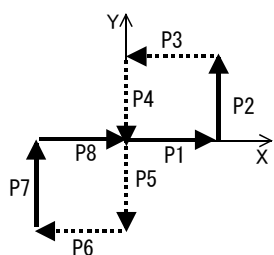


図-15 二方向載荷経路の構成 図-16 強度-変位曲線（二方向載荷）

図-17 包絡線の強度特性（二方向載荷）

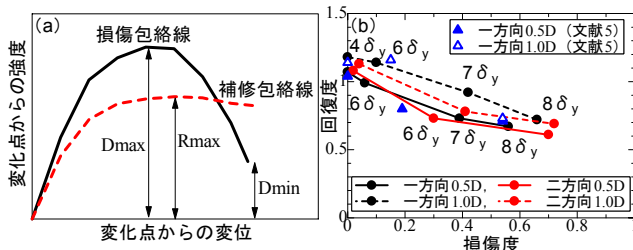


図-18 損傷度-回復度（定義と結果）

度-変位曲線（ $8\delta_y$ まで）を図-16に示す。なお、図中の数字（①～⑮）の奇数および偶数は変位がそれぞれ経路Aおよび経路Bにて変動する強度-変位曲線を意味する。これら曲線の終点を結んだ包絡線（図-16：赤破線）を応用して、0.5Dおよび1.0Dの充填補修を施した鋼管柱（6体）の強度-変位曲線を整理した包絡線を図-17に示す。なお、図中に新品柱の強度-変位曲線（ $8\delta_y$ まで）の包絡線を黒破線にて示す。

二方向載荷下での耐荷特性として、1) Bi4-0.5D柱およびBi4-1.0D柱の強度-変位曲線の包絡線は最大強度（80 kN）まで新品柱の包絡線と同じ耐荷特性を呈し、それ以降は新品柱の包絡線よりも強度特性は高いが、強度低下する、2) 損傷変位 $6\delta_y$ および $8\delta_y$ を有する4つの柱では、最大強度（45 kN～60 kN）の包絡線へと大きく低下する、3) 最終的に6つの包絡線とも一定の残量強度（40 kN～50 kN）へと低下する、などが挙げられる。

4.4 損傷度と回復度

鋼管柱の損傷度および補修後の回復度を評価するために、本研究では、図-18(a)に示すように、損傷度を図中の損傷包絡線の最終耐力 D_{min} と最大耐力 D_{max} とを用いて $(1-D_{min}/D_{max})$ により、一方、回復度を補修包絡線の最大耐力 R_{max} と損傷包絡線の最大耐力 D_{max} との比 (R_{max}/D_{max}) により定義する。

載荷経路および充填高さ（0.5D、1.0D）の違いにより損傷度-回復度関係を整理した結果を図-18(b)に示す。図中に、文献5)のデータも比較のため青色シンボル▲、△にて示す。図より、1) 損傷度が0.1程度と小さい場合には、両載荷下の（0.5D、1.0D）充填補修とも回復度が1.0を上回る、2) 損傷変位 $6\delta_y$ （二方向載荷）および損傷変位 $7\delta_y$ （一方向載荷）以上の補修柱では、回復度が0.6程度まで徐々に低減する、3) 二方向載荷下では、一方向載荷の場合と比べ1.0D高さの充填補修を施しても $7\delta_y$ 前後の損傷には回復度は高くない、などが分かった。

5. まとめ

- 1) 損傷レベル2の鋼管柱に対しては、コンクリート部分充填（0.5D、1.0D）による補修は、一方向載荷および二方向載荷の下で新品柱の変形特性を回復する。
- 2) 損傷レベル3および4の下では、充填高さ（0.5Dおよび1.0D）による補修は、両載荷下とも荷重-変位曲線の最大強度は新品柱のそれを回復できないが、最大強度以降の包絡線は強度低下の小さい曲線となる。
- 3) 損傷レベルが2の下では、1.0D充填補修柱の最大はらみ出し量を、一方向載荷下では新品柱のそれと比べ3割程度に、二方向載荷では5割程度に抑える。
- 4) 一方向載荷下での補修効果を実験データ⁵⁾と比較した結果、低降伏比を有する鋼材は最大耐力後の強度低下を抑えることが可能であることを確認した。
- 5) 載荷経路および充填高さを要因とした損傷度-回復度関係を定量的に考察した。二方向載荷では、1.0D充填補修を施しても回復度は高くないことが分かった。

謝辞：本研究に際し、中部大学特別研究費Aの研究助成を得た。また、愛知工業大学・鈴木森品教授には貴重な実験データを提供していただいた。ここに、謝意を表す。

参考文献：

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書 同解説 V耐震設計編，2012。
- 2) 井浦雅司，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。
- 3) 森下益臣，青木徹彦，鈴木森品：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。
- 4) 松村政秀，北田俊行ら：炭素繊維シートを円周方向に貼付する橋脚鋼管柱の耐震補強法に関する実験的研究，土木学会論文集，No.766/I-68，pp.17-31，2004。
- 5) 太田樹ら：異なる損傷度合の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，土木学会論文集A2(応用力学)，Vol. 69，No. 2，I_381-I_390，2013。
- 6) 亀田好洋，水野英二：軸方向鉄筋の破断防止に主眼を置いた鉄筋コンクリート柱の繰返し二軸曲げ耐荷特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.36，No.2，pp.121-126，2014。