

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

A study of seismic performance for the rectangular cross sectional steel bridge piers which have different level of damages and concrete filled repair

嶋口儀之*, 鈴木森晶**, 太田樹***, 青木徹彦****

Yoshiyuki Shimaguchi, Moriaki Suzuki, Tatsuki Ota, Tetsuhiko Aoki

*修(工), 愛知工業大学大学院, 生産・建設工学専攻 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

**博(工), 愛知工業大学教授, 工学部都市環境学科土木工学専攻(〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

***愛知工業大学大学院, 建設システム工学専攻 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

****工博, 愛知工業大学教授, 工学部都市環境学科土木工学専攻(〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

Since HYOGOKEN-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 by earthquake. The research on how to repair severely damaged steel bridge pier has been conducted by the authors, but the effectiveness of repair for the steel bridge pier that suffered minor damage has not been revealed. In this study, the repairing effect of filling concrete for rectangular cross sectional 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.

Key Words: steel bridge pier, seismic performance, repair, concrete filled

キーワード: 鋼製橋脚, 耐震性能, 修復, コンクリート充填

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^(例えば1)~4)。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^{5)~9)}。

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⁹⁾。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構造などが損傷し, 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^{5)~9)}。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, 繰り返し載荷の過程で橋脚基部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な最大水平荷重を少し超えた程度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、矩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つのレベルに分類し、各損傷レベル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、橋脚の損傷程度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の修復効果についても検討する。

1.2 損傷レベルの定義

一般に地震による鋼製橋脚の損傷は一律ではない。本研究では、道路橋示方書に示される耐震性能を基に、それに相当する損傷レベルを設定した¹⁰⁾。表-1.1および図-1.1に損傷レベルの定義の概要を示す。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。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は降伏荷重から最大荷重の70%程度までの領域を対象とする。これは耐震性能1に相当し、想定する橋脚の損傷は基部の局部座屈が目視で確認できない程度である。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を対象とし、耐震性能2に相当する。この場合の想定される橋脚の損傷は、局部座屈が目視で確認できる程度である。レベル3は最大荷重到達後の領域を対象とする。本研究では、鋼構造物の特徴である最大荷重を超えてからの粘りに期待し、荷重が95%程度に低下するまでを対象とした。このレベルにおける橋脚の損傷は、基部に局部座屈が生じ、部分的に塗装がはがれているものの、亀裂などは生じていない程度とする。レベル4は荷重が最大荷重の70%程度に低下するまでの領域を対象とし、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とする。道路橋示方書には耐震性能3に対しての修復性に関する具体的な記述は無いが、本研究では、このレベル3とレベル4が相当すると考え、余震等に対応するための応急復旧を第一の目標とし、修復方法を示す。なお、レベル3は局部座屈が生じている程度の損傷であるため、修復の方法によっては恒久的な修復になる可能性を有していると考えられる。

各損傷レベルの供試体は、降伏変位 δ_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。

表-1.1 損傷レベルの定義

損傷レベル	橋脚の耐震性能 ¹⁰⁾
1	1 力学的特性が弾性域を超えない限界の状態
2	2 確実なエネルギー吸収が可能であり、速やかに修復が可能な状態
3	3 確実なエネルギー吸収が可能な状態
4	

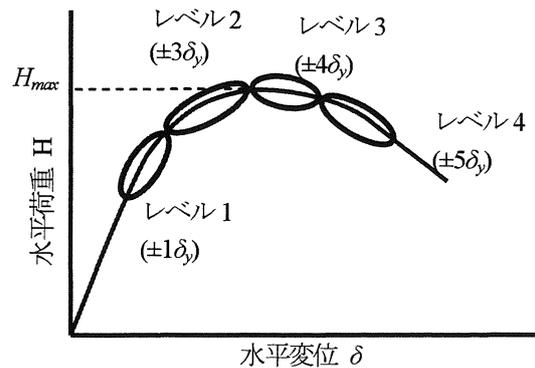


図-1.1 損傷レベルの設定

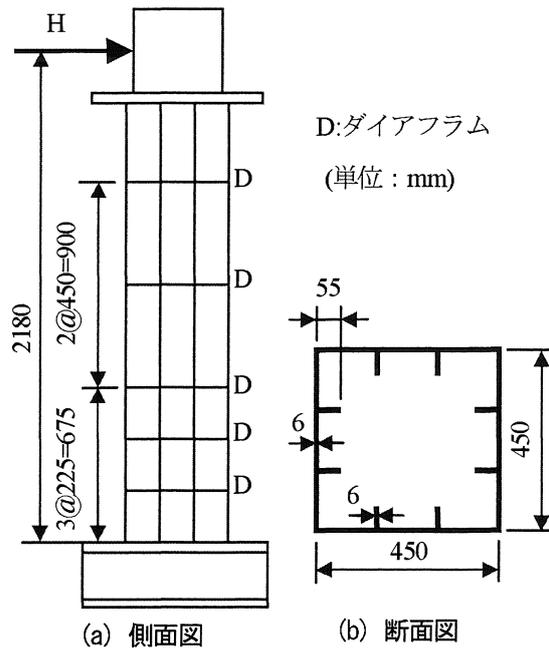


図-2.1 実験供試体

2. 実験計画

2.1 実験供試体

本研究で使用した供試体は、図-2.1に示すような補剛箱型断面鋼製橋脚である。鋼種はSM490で、ダイアフラム間隔は橋脚の基部から675mmまでは225mm、それ以

表-2.1 新品時供試体諸元

鋼種	SM490
載荷点高さ h (mm)	2180
板幅 b (mm)	450
板厚 t (mm)	6
補剛材幅 b_s (mm)	55
補剛材板厚 t_s (mm)	6
補剛材幅厚比パラメータ R_s	0.632
補剛材剛比 γ_{rl-reg}	10.5
ダイヤフラム間隔 a (mm)	225
ダイヤフラム板厚 t (mm)	6
降伏応力 σ_y (N/mm ²)	397
ヤング率 E (kN/mm ²)	216
幅厚比パラメータ R_R	0.565
R_F	0.185
細長比パラメータ $\bar{\lambda}$	0.340
降伏変位 δ_y (mm)	10.6
降伏荷重 H_y (kN)	271
軸力比 PP_y	0.175

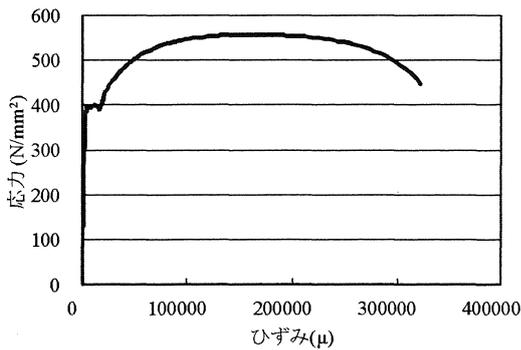


図-2.2 鋼材の応力-ひずみ関係

降は 450mm である。新品時の供試体諸元を表-2.1 に、鋼材の応力-ひずみ関係の一例を図-2.2 に示す。表中の降伏応力 σ_y およびヤング率 E は材料試験の結果であり、降伏変位 δ_y 、降伏荷重 H_y および軸力比 PP_y は II 種地盤として算出した。

供試体は損傷レベル 1 に相当するものを 1 体、レベル 2~4 に相当するものを各 2 体の計 7 体用意し、漸増繰返し載荷により所定の損傷を与えた。各供試体はレベル 1 を除き、いずれも基部から 1 段目のダイヤフラムの間に局部座屈が発生した。

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⁷⁾。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較し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¹⁰⁾。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⁷⁾。文献⁷⁾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矩形断面鋼製橋脚に対し、座屈部の直上に位置するダイヤフラム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。なお、道路橋示方書においては、最適充填率の考え方によるコンクリート充填率の決定方法が示されている¹⁰⁾。この最適充填率の考え方を本研究で使用する供試体に用いた場合、充填率は 23% 程度となり、充填高さの決定も重要な要素となる。

以上のことから本研究では、損傷部の直上である 1 段目のダイヤフラムまで充填する場合(充填率約 10%)と、より最適充填率に近い 2 段目のダイヤフラムまで充填する場合(充填率約 20%)の 2 パターンの修復を行う。損傷レベル 1 については充填率 20% のみとし、損傷レベル 2~4 については充填率 10% と 20% を各 1 体とする。各供試体のコンクリート充填率とコンクリート圧縮強度および材齢を表-2.2 に、材齢 28 日におけるコンクリートの応力-ひずみ関係を図-2.3 に示す。充填したコンクリートは呼び強度 16N/mm² 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、実際に漸増繰返し載荷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

損傷レベル	供試体名	充填率 (%)	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	材齢 (日)
1	L1-20CF	20	17.2	28
2	L2-10CF	10	17.3	30
	L2-20CF	20	18.8	35
3	L3-10CF	10	19.5	37
	L3-20CF	20	20.4	40
4	L4-10CF	10	20.6	42
	L4-20CF	20	21.0	44

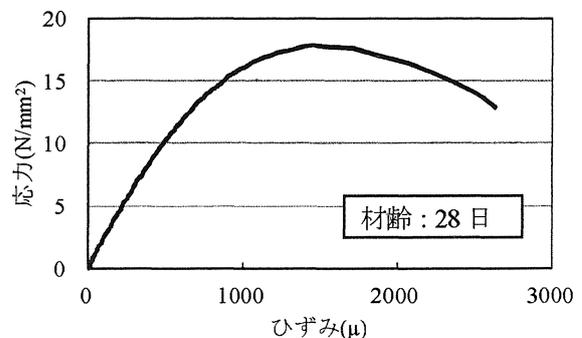


図-2.3 コンクリートの応力-ひずみ関係

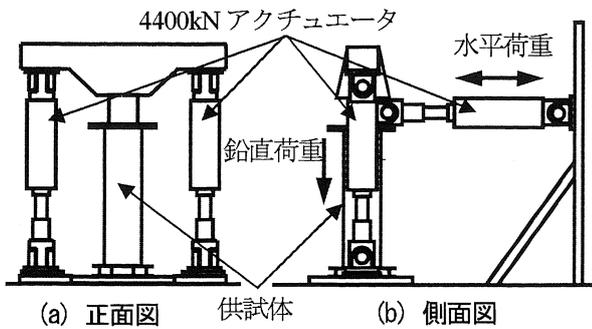


図-2.4 実験装置概要図

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-2.4 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、上部構造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、地震時の上部構造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、使用した実験装置は鉛直方向アクチュエータの傾きによる水平力成分が発生する。そのため、本研究における水平荷重は、水平力成分を差し引いた値で評価している。

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¹¹⁾。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¹⁰⁾。

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

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

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

ここで、 α : 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¹²⁾、 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 δ_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ている。

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

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

ここで、 σ_y : 降伏応力、 A : 断面積、 Z : 断面係数、 E : ヤング率表-1、 I : 断面 2 次モーメントである。なお、 σ_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 供試体の損傷状況

実験後の供試体の損傷状況を図-3.1 に示す。供試体の損傷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 つのタイプに分けられる。

<タイプ A>

このタイプは図-3.1(a)に示すように、コンクリート充填部直上に新たに座屈が発生したケースである。この場合、充填部では、引張力作用時にひずみが最大で 50000 μ 程度に達していることから、座屈部が延ばされるような挙動が確認できたが、損傷が大きく進行することはなかった。

このような損傷形態となったのは、橋脚基部の損傷が小さく、コンクリート充填部の強度が充填部より上の鋼断面部と比較して著しく増加したためと考えられる。また、図-3.1(d)に示すように、内部に充填したコンクリートに損傷は見られなかった。このタイプには L1-20CF(損傷レベル 1, 20%)、L2-10CF(損傷レベル 2, 10%)、L2-20CF(損傷レベル 2, 20%)、L3-10CF(損傷レベル 3, 10%)が該当した。

<タイプ B>

このタイプは図-3.1(b)に示すようにコンクリート充填部の座屈部においてさらに損傷が進行するとともに、充填部直上で座屈が発生したケースである。最終的には充填部の座屈部および隅角部でクラックが発生した。

これは、コンクリート充填部と充填部直上で、作用モーメントがほぼ同時に抵抗モーメントの限界に達したためと考えられる。図-3.1(e)に示すように、充填コンクリートにはクラックおよび圧壊が見られた。L3-20CF(損傷レベル 3, 20%)、L4-10CF(損傷レベル 4, 10%)がこのタイプに該当した。

<タイプ C>

このタイプは図-3.1(c)に示すようにコンクリート充填部に生じた座屈部のみでさらに損傷が進行したケースである。充填部より上の鋼断面部でのひずみは最大で 5000 μ 程度であり、大きな変形は見られなかった。

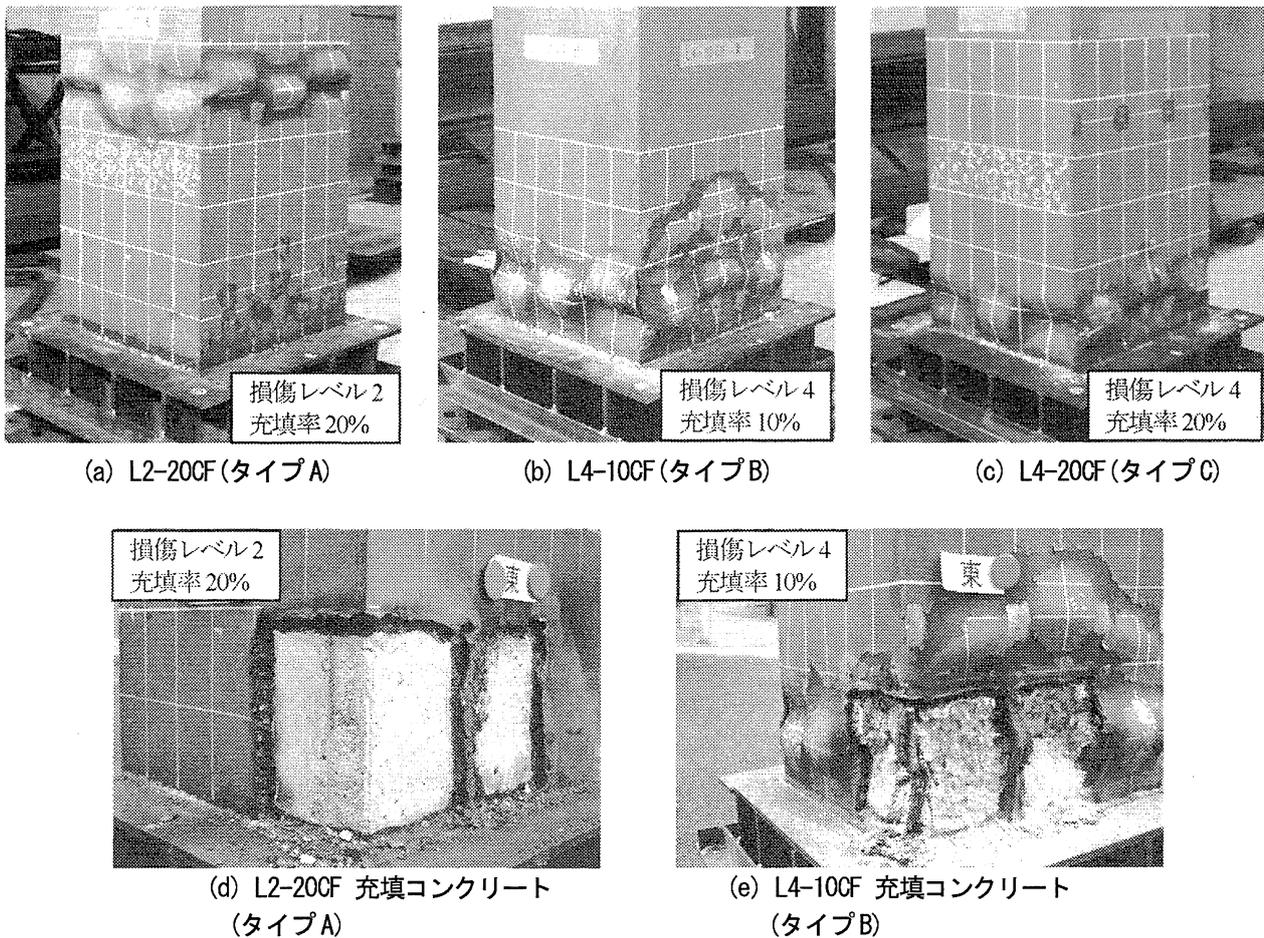


図-3.1 実験後の供試体損傷状況

これは、橋脚基部の損傷が大きく、耐力が大きく低下していたため、コンクリート充填後も基部の作用モーメントが先に抵抗モーメントの限界に達したためと考えられる。タイプBと同様に、充填コンクリートにクラックなどの損傷が見られた。L4-20CF(損傷レベル4, 20%)がこのタイプに該当した。

3.2 水平荷重-水平変位履歴曲線

実験から得られた水平荷重-水平変位履歴曲線を図-3.2に示す。なお、図の縦軸は降伏水平荷重 H_v 、横軸は降伏水平変位 δ_v でそれぞれ無次元化している。また、図-3.2(a)は新品時の履歴曲線の一例であり、比較のために修復後の履歴曲線に破線で重ねて示す。

図-3.2(b)に示すL1-20CF(損傷レベル1, 20%充填)の履歴は、図-3.2(a)の新品時と比べ最大水平荷重が大きく増加したが、履歴形状は大きな変化はなく、最大水平荷重到達後のサイクルで急激な荷重の低下が見られる。これは図-3.2(c), (d), (f)でも同様の傾向が見られた。これらはいずれも損傷タイプAに該当し、図-3.1(a)のように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

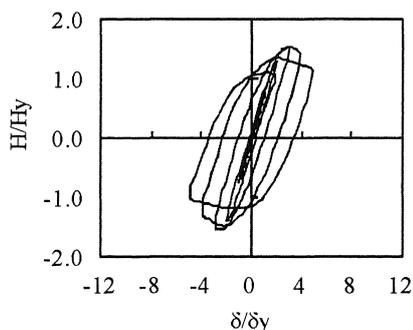
部と鋼断面部の強度差を緩和し、鋼断面部での座屈を防ぐための対策が必要である。

一方、損傷タイプBに該当する2体は、図-3.2(e), (g)に示すように、最大水平荷重到達後の荷重低下が緩やかで、 $6\delta_v$ 以降の大変位でも安定した履歴を描いており、変形性能が向上したことが分かる。このうち、L3-20CFは、 $8\delta_v$ 付近で充填部の上で座屈が発生し、その後荷重が大きく低下した。図-3.2(h)に示すL4-20Fは、充填コンクリートの損傷が進化したことで、RC柱と同様なピンチング挙動が見られた。このため、新品時より変形性能が大きく向上しているものの、横に細長い履歴を描いている。

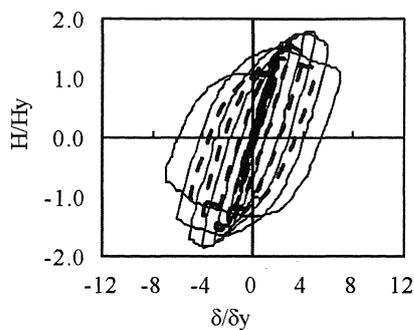
3.3 損傷レベルの違いによる比較

図-3.3にコンクリート充填率10%、図-3.4に充填率20%の場合の包絡線を示す。図中には比較のため無充填の新品時の結果も示す。

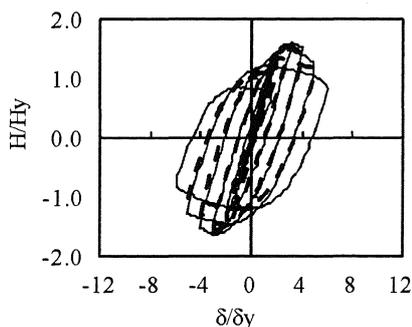
充填率が10%の場合、図-3.3より、損傷レベルによらず、最大水平荷重が無充填の新品時と同等まで回復していることが分かる。損傷レベル2(L2-10CF)は新品時とほぼ同様の曲線となったが、損傷レベルの大きい供試体は変形性能が向上する結果となった。これは、基部の損傷が大きい場合、充填部と充填部直上の強度の差が大きく



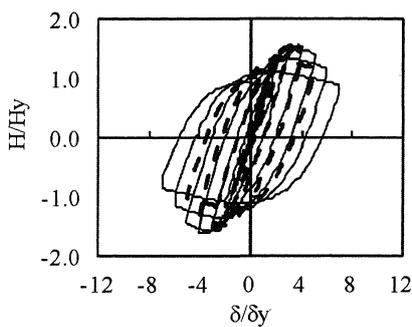
(a) 新品時



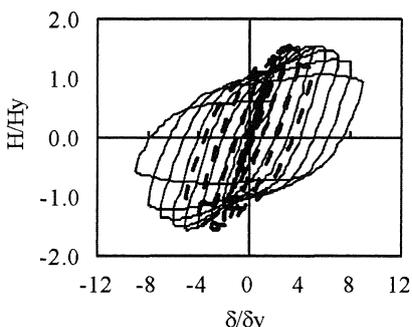
(b) L1-20CF (損傷レベル1, 20%)



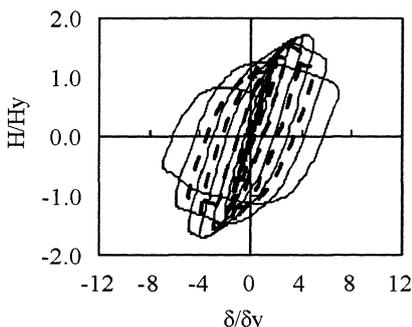
(c) L2-10CF (損傷レベル2, 10%)



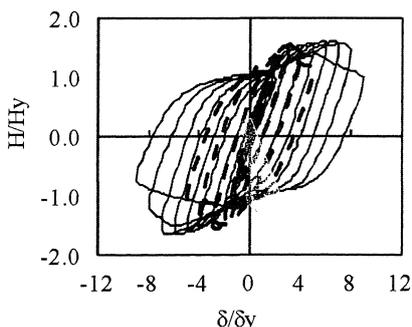
(d) L3-10CF (損傷レベル3, 10%)



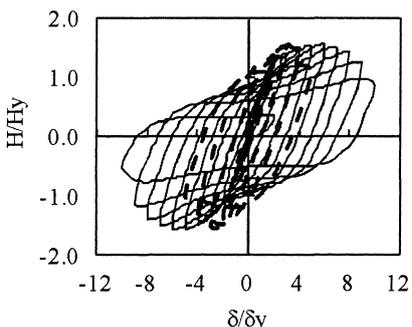
(e) L4-10CF (損傷レベル4, 10%)



(f) L2-20CF (損傷レベル2, 20%)



(g) L3-20CF (損傷レベル3, 20%)



(h) L4-20CF (損傷レベル4, 20%)

図-3.2 水平荷重-水平変位履歴曲線

ならず、図-3.1(b)に示すように、両方で損傷が進展し、効率よくエネルギーを吸収することができたためと考えられる。また、充填率が20%の場合、図-3.4より、損傷レベル1(L1-20CF)および損傷レベル2(L2-20CF)は新品時と比較して最大水平荷重が大きく増加したものの、その後の著しい荷重低下が見られる。一方、損傷レベル3(L3-20CF)は最大水平荷重が増加するとともに変形性能が大きく向上している。損傷レベル4(L4-20CF)については最大水平荷重が新品時と同等まで回復し、変形性能が大きく向上していることが分かる。

以上より、比較的大きな損傷の場合は充填率20%とすることで変形性能の向上が期待できる。しかし、損傷レベル1およびレベル2のように軽微な損傷に対して20%まで充填した場合、耐力が過大になると考えられる。

3.4 充填高さの違いによる比較

図-3.5に損傷レベル2、図-3.6に損傷レベル3の場合の包絡線を示す。

損傷レベル2の場合、図-3.5より充填率10%では $3\delta_y$ で最大水平荷重に達しており、無充填の新品時とよく似た結果となった。充填率20%では、荷重が新品時より増加し、 $4\delta_y$ で最大値となった。損傷レベル3の場合、充填率10%では $4\delta_y$ で最大水平荷重となり、変形性能が僅かに向上している。充填率が20%では $6\delta_y$ 程度で最大となっており、変形性能が大きく向上している。

以上より、損傷レベルによらず、コンクリート充填率を10%とすることで新品時と同等の性能を得ることが可能であるといえる。

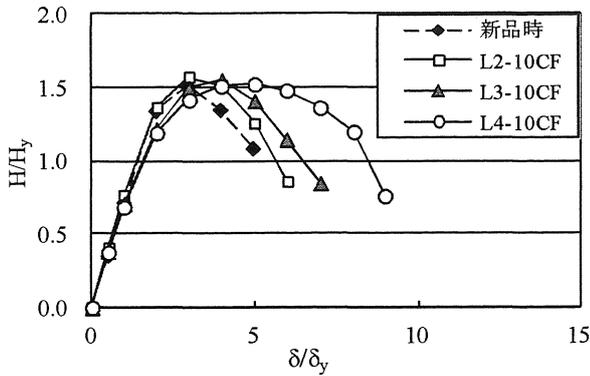


図-3.3 包絡線(充填率10%)

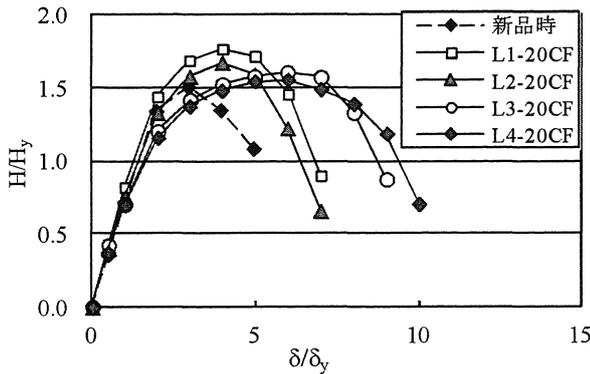


図-3.4 包絡線(充填率20%)

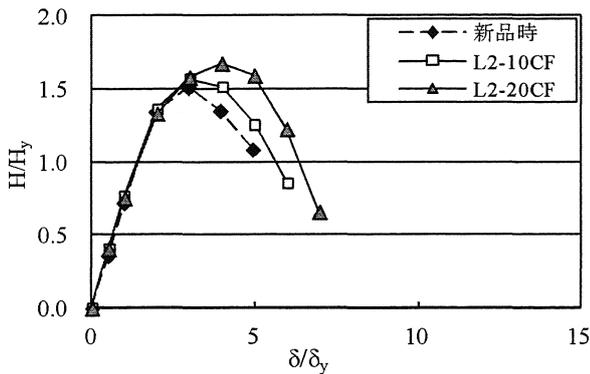


図-3.5 包絡線(損傷レベル2)

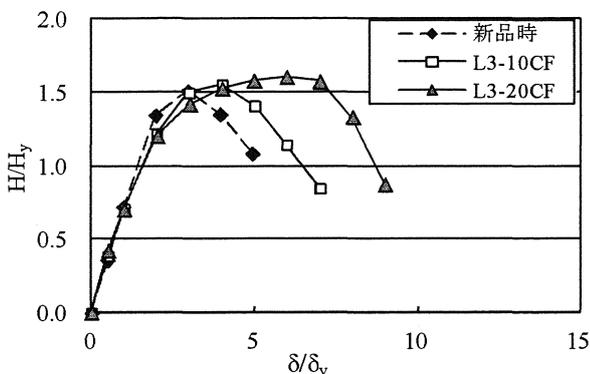


図-3.6 包絡線(損傷レベル3)

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⁹⁾。

4.1 最大水平荷重および剛性による評価

表4.1 に新品時および修復後の最大水平荷重および新品時に対する修復後の最大水平荷重の比を示す。表4.2 には損傷後の保有剛性 K_1 および修復後の初期剛性 K_2 を示す。なお、 K_1 および K_2 は新品時の初期剛性 K_0 で無次元化している。ここで、 K_0 は新品時において $1\delta_y$ まで載荷した際の荷重履歴から算出した(理論値の初期剛性 K_{0N} は式(4)および(5)より $1.34K_0$ である)。 K_1 はレベル2 からレベル4 までの所定の荷重履歴を与えた後の除荷域の荷重履歴から算出した。 K_2 は修復後に $1\delta_y$ まで載荷した時の荷重履歴から算出した。

表4.1 より、修復後の最大水平荷重で比較すると L2-10CF, L3-10CF, L4-10CF, L4-20CF の4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。一方、L1-20CFは23%、L2-20CFは16%、L3-10CFは19%増加しており、損傷レベル4の場合を除き、充填率20%では荷重が大きく増加した。

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、充填率を高くすることは望ましくないと考えられる。

修復後の剛性については表4.2 より、すべての供試体で新品時の10%以内にまで回復しており、十分な修復効果が得られた。

以上より、充填率10%であったとしても、座屈部の直上のダイヤフラムまでコンクリートを充填することで、最大水平荷重および剛性を新品時と同等の性能まで回復させることが可能であると考えられる。また、実際の地震による被害で想定される、損傷レベル2および3に相当する損傷に対しては、充填率が20%では耐力の過大な増加を招く恐れがある。

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 δ_{95} とし、式(6)より塑性率 μ_{95} を算出した。表4.3 に塑性率の一覧を示す。

修復後の塑性率は、いずれも新品時より向上し、損傷タイプBあるいはタイプCに該当するL3-20CF, L4-10CF, L4-20CFの場合、新品時の2倍程度まで向上した。一方で、損傷タイプAとなった場合の塑性率はやや小さくな

表-4.1 最大水平荷重

供試体名	新品時 H_{max}/H_y	修復後 H_{max}/H_y	修復後/新品時
L1-20CF	1.46*	1.80	1.23
L2-10CF	1.46*	1.61	1.10
L2-20CF	1.46*	1.70	1.16
L3-10CF	1.48	1.58	1.07
L3-20CF	1.36	1.62	1.19
L4-10CF	1.54	1.54	1.01
L4-20CF	1.48	1.56	1.05

*L1 および L2 は最大水平荷重に達していないため、L3 および L4 の新品時供試体の平均値を用いて比較する。

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	修復後初期剛性 K_2/K_0
L1-20CF	1.00 *	1.10
L2-10CF	0.90	1.04
L2-20CF	0.92	1.04
L3-10CF	0.84	0.96
L3-20CF	0.83	0.98
L4-10CF	0.76	0.91
L4-20CF	0.76	0.96

*L1 は弾性範囲内の載荷であるため、保有剛性 K_1 は新品時の初期剛性 K_0 と同一とする。

表-4.3 塑性率

供試体名	新品時	修復後	修復後/新品時
L1-20CF	3.19*	5.01	1.57
L2-10CF	3.19*	3.96	1.24
L2-20CF	3.19*	4.93	1.54
L3-10CF	3.21	4.67	1.45
L3-20CF	2.93	7.16	2.44
L4-10CF	3.28	6.09	1.86
L4-20CF	3.35	7.12	2.13

*L1 および L2 は最大水平荷重に達していないため、L3 および L4 の新品時供試体の平均値を用いて比較する。

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

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な座屈が生じるなどし、高い変形性能を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。

5. 結論

本研究では損傷レベルの異なる矩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、損傷レベルおよび充填高さの違い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) 損傷レベルの違いにかかわらず、座屈部の直上のダイアフラムまでコンクリートを充填することで、損傷前と同等以上の耐震性能まで回復させることができた。
- 2) 損傷レベルの大きな供試体では、新品時に対し、最大水平荷重が同等以上まで回復し、変形性能の大きな向上が見られたが、損傷レベルの小さな供試体では、最大水平荷重は増加したが、変形性能の向上は見られなかった。
- 3) 特に、損傷が小さい場合において、最適充填率程度までコンクリートを充填した場合、最大水平荷重が著しく増加するため望ましくない。
- 4) コンクリート充填部直上の鋼断面部に座屈が発生するような損傷形態となる場合、最大水平荷重のみが大きく増加することが考えられ、望ましくない。そのため、修復前と同じ部位に損傷を生じさせるなど、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。

本研究で示した修復方法は、新設橋脚に対する設計荷重やひずみレベル（最大でも 2000μ 程度）ではなく、降伏棚を超え、 10000μ 以上のひずみレベルに達したものを対象としている。しかし、このような大ひずみレベルでの挙動は明確でない部分が多く、設計に反映されていないのが現状である。今後の課題として、座屈変形量と塑性ひずみ履歴の関係について、さらにデータの収集を行い、大ひずみレベルにおける修復時許容限界ひずみの検討などを行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究は愛知工業大学耐震実験センターにおいて実施し、愛知工業大学耐震実験センター研究経費および科学研究費（基盤研究B、代表：名城大学、宇佐美勉）を使用して行いました。ここに感謝の意を表します。

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, 構造工科学論文集, 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) Suzuki, M. and Aoki, T.: Cyclic Loading Test of Steel Octagonal Section Pier Models, Proceedings of the Second International Conference in Thin-Walled structures, pp.779-786, December 1998.
- 6) 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.
- 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) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012.3.
- 11) 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.
- 12) (社)日本道路協会: 道路橋示方書. 同解説 II 鋼橋編, 2012.3.

(2012年9月28日受付)