

数十回オーダー繰り返し载荷を受ける鋼製橋脚の耐力低下に関する基礎的研究

北原 武嗣¹・田中賢太郎²・山口 隆司³・岸 祐介⁴・濱野 剛⁵

¹関東学院大学工学部社会環境システム学科教授 (〒236-8501 神奈川県横浜市金沢区六浦東1-50-1)

E-mail:kitahara@kanto-gakuin.ac.jp

²摂南大学理工学部都市環境工学学科講師 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

E-mail:tanaka@civ.setsunan.ac.jp

³大阪市立大学大学院工学研究科教授 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本町3-3-138)

E-mail:yamaguti@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

⁴関東学院大学工学部社会環境システム学科助手 (〒236-8501 神奈川県横浜市金沢区六浦東1-50-1)

E-mail:kishi@kanto-gakuin.ac.jp

⁵関東学院大学大学院工学研究科 (〒236-8501 神奈川県横浜市金沢区六浦東1-50-1)

E-mail:m1145088@kanto-gakuin.ac.jp

近年、構造物の地震応答に関して、海溝型巨大地震により励起される長周期かつ長継続時間の地震動の与える影響が注目されている。海溝型巨大地震では、数百秒程度の継続時間となることが予測されており、その際、構造物が最大荷重を履歴した後も数十回～数百回オーダーでの繰り返し振幅を受けると考えられている。一方、鋼製橋脚の耐震設計として実施されてきた繰り返し载荷実験では、主に3回程度の繰り返しを行ってきた。そのため、海溝型巨大地震に対する鋼製橋脚の耐震設計に関しては、十分に解明されていないのが現状である。そこで本研究では、海溝型巨大地震のような継続時間の長い地震動を受ける既設高架橋の耐震性能を把握することを目的として、都市高架橋に多用されている単柱式鋼製橋脚を検討対象とし、数十回オーダーの繰り返し振幅が構造物の耐荷性能に与える影響について検討を行った。

Key Words : *steel bridge pier, dozens of cyclic loading, long-duration time motions, huge ocean-trench earthquake*

1. はじめに

本年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では甚大な地震被害が生じ、今も復旧・復興に向けた再生が進められている。政府の専門調査委員会では、近い将来に東海・東南海・南海地震の発生を予想しており、先の地震被害を鑑みるまでも無く、海溝型巨大地震の発生した場合における対策が急務である。

近年、構造物の地震応答に関して、海溝型巨大地震により励起される長周期かつ長継続時間の地震動の与える影響が注目されている。長周期・長継続時間地震動の特徴として、1.0 秒以上の長周期が数分以上続くことが挙げられる。このような地震動に対して、高層ビル、長大橋梁、石油タンク等の長周期型構造物に及ぼす影響が懸念されており、それらへの耐震対策が現状の課題となっている¹⁾。たとえば、

2003 年に発生した十勝沖地震では、長周期地震動が原因とされる石油タンクの液面揺動（スロッシング）が発生し、浮屋根とリング状の側壁の間に生じた隙間からタンク内の原油に引火して火災が生じ、重大な被害となった^{2),3)}。また、2004 年の新潟県中越地震においては、関東平野で長周期、長継続時間の地震波が観測されている。前述のように、大規模地震の際には中・遠距離地点でも条件によって振幅が大きくなる可能性がある。また、地震動の周期と長周期型構造物の周期が共振し、被害が拡大する恐れがある。

一方、鋼製橋脚に関しては、1995 年兵庫県南部地震において、初めて大きな被害を受けている。この被害を受け、鋼製橋脚についても鉄筋コンクリート橋脚と同様に、塑性域での耐力・変形性能を考慮した耐震設計法の導入の必要性が改めて認識された。そこで、鋼製橋脚の耐震設計法開発のため、基本的

な構造である単柱形式の鋼製橋脚を対象として、耐震性能評価に関する研究が数多く実施されてきた⁴⁾⁶⁾。また、上記のような新設の鋼製橋脚を対象とした耐震設計法の他、既設鋼製橋脚の耐震補強法開発のための研究も行われている⁷⁾。さらには、鋼製橋脚の耐震設計として、単調載荷実験や繰り返し載荷実験結果から定量的に評価され、設計基準類に整備されてきた⁸⁾¹¹⁾。ここでの繰り返し実験は通常、同一振幅の変位に対して、3回程度までの繰り返しを考慮することが多かった。

しかしながら、海溝型巨大地震では、数百秒程度の継続時間となることが予測されており、その際、数十回～数百回オーダーでの繰り返し振幅を受けると考えられている。そのため、これら海溝型巨大地震に対する鋼製橋脚の耐震設計に関しては、基礎的資料が不十分であるため基準化されていないのが現状である。

そこで本研究では、継続時間の長い地震動を受ける既設高架橋の耐震性能を把握することを目的として、都市高架橋に多用されている単柱式鋼製橋脚を検討対象とし、継続時間の長い地震動による作用が構造物の繰り返し耐荷性能に与える影響について検討を行った。

2. 長継続時間地震動を考慮した繰り返し載荷を受ける鋼製橋脚の耐荷性能に関する実験

継続時間の長い地震動による構造物の応答を考えると、一旦、軽微な損傷を受けた後も数百秒におよぶ地震動による作用を受けるため、数十回～数百回にもおよぶ繰り返し振幅を受けると考えられる。

そこで本研究では、既設鋼製橋脚を検討対象とし、継続時間の長い地震波の載荷パターンを想定した漸増繰り返し載荷実験を行い、耐荷性能の検討を行った。

(1) 実験供試体

実験供試体は、既設の単柱形式の鋼製橋脚を想定し、橋脚高さ11 m程度の橋脚を約1/8に縮小した実験供試体を使用した。

耐荷力および変形性能に影響をおよぼすパラメータとして、補剛板パネル全体の幅厚比パラメータ R_F 、縦補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータ R_R 、縦補剛材の自由突出板としての幅厚比パラメータ R_S 、柱の強度を表すための細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ 、縦補剛材剛比 γ の弾性座屈理論から求まる縦補剛材の必要最小剛比 γ^* に対する比 γ/γ^* に着目し、これらが実物橋脚と実験供試体とで一致するように供試体寸法を決定した。これらのパラメータの算定式を次式(1)～(4)に示す。また、対象とした実物橋脚の座屈パラメータを表-1に示す。

表-1を目標として供試体を設計した結果、実際の供試体の断面高さ262mm、幅372mmとなり、ダイヤフラム間隔は280mmピッチとした。また補剛材寸

法は、補剛材高さ21.5mm、板厚は6mmとした。実験供試体の断面寸法を図-1に示す。

実験供試体の材料特性を把握するため、供試体作成に用いた鋼材(SS400材)の材料試験を行った。載荷ケースと供試体作成の都合上、2種類の鋼材を用いて供試体を作成したため、それぞれに対応する試験片を用いて引張試験を行った。試験結果を、それぞれ、表-2および図-3に示す。

設計した供試体断面形状、および材料試験の結果から、実験供試体の実際の構造諸元を表-3に、座屈パラメータに関する諸量を表-4に示す。

$$R_F = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\mu^2)}{k^2 \pi^2}} \quad (1)$$

$$R_R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\mu^2)}{4n^2 \pi^2}} \quad (2)$$

$$R_S = 1.663 \frac{h}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (3)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{\ell}{r} \quad (4)$$

ここに、 b ：フランジ板幅、 t ：フランジ板厚、 σ_y ：鋼材の降伏応力、 E ：ヤング率、 μ ：鋼材のポアソン比、 k ：座屈係数、 n ：補剛材で囲まれたサブパネル数、 h ：部材長、 ℓ ：座屈長、 r ：回転半径。

表-1 座屈パラメータ (設計値)

R_F	R_R	R_S	$\bar{\lambda}$	γ/γ^*
0.615	0.539	0.198	0.362	0.676

表-2 材料試験結果

		$1.4\delta_y$	$1.6\delta_y, 1.8\delta_y$
降伏強度	N/mm ²	294.7	330.0
引張強度	N/mm ²	423.9	443.0
弾性係数	N/mm ²	197.0×10^3	205.5×10^3
ポアソン比	—	0.29	0.28
伸び率	%	43	41

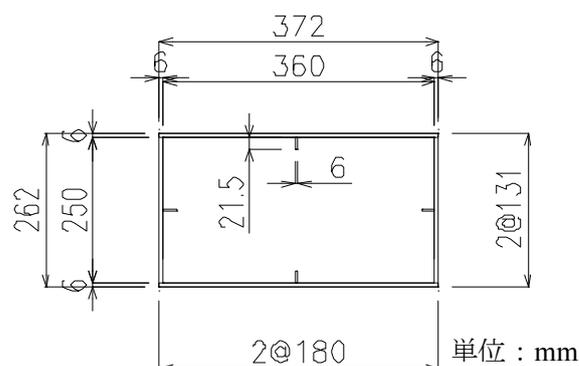


図-1 実験供試体 (断面図)

(2) 実験装置および実験方法

写真-1に示すように、実験供試体に対して最大荷重1,000 kN、ストローク150 mmの定圧油圧ジャッキを用いて死荷重分の軸力を与え、地震水平変位は、最大荷重500 kN、ストローク±150 mmのアクチュエーターを用い、強制変位を与えた。変位およびひずみゲージの測定状況図を図-3に示す。基部にアングル治具を取り付け、基部の回転を取り除いた状態で計測を行った。

ch.4~6およびch.10~12は、橋脚基部から40mmの高さ部分のひずみを計測している。また、ch.7~9およびch.13~15は、橋脚基部から140mmの高さ部分のひずみを計測している。ch.16~19までは、橋

脚基部の回転変位を計測し、ch.20, 21は、変位測定用アングルの変位量を計測している。ch.22は、変位測定用アングルから载荷ブロックと実験供試体との接合部を、ch.23は载荷ブロック中心の変位量を計測している。

表-3 構造諸元 (実験供試体)

		1.4 δ_y	1.6 δ_y , 1.8 δ_y
断面積	mm ²	7501	7581
断面2次モーメント	mm ⁴	8643×10 ⁴	8738×10 ⁴
図心軸	mm	130.6	130.7
軸力	kN	225.6	249.5
降伏応力	N/mm ²	294.7	330.0
降伏曲げモーメント	N・mm	1751×10 ⁵	1986×10 ⁵
降伏水平耐力 (P_y)	kN	111.4	126.4
降伏水平変位 (δ_y)	mm	8.5	9.1

表-4 座屈パラメータ (実験供試体)

	R_F	R_R	R_S	$\bar{\lambda}$	γ/γ^*
1.4 δ_y	0.720	0.663	0.243	0.361	0.783
1.6 δ_y	0.742	0.674	0.246	0.373	0.760
1.8 δ_y					

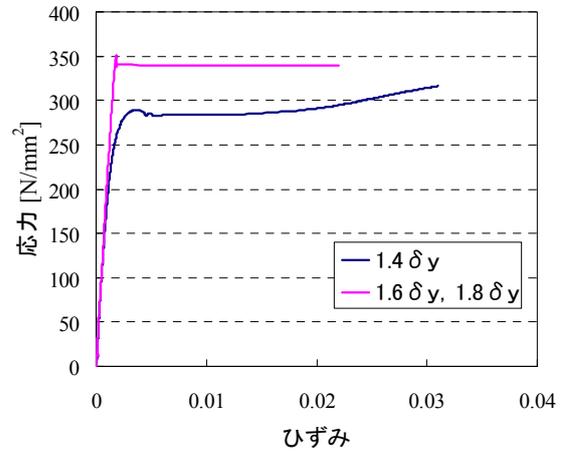


図-2 鋼材の応力-ひずみ関係

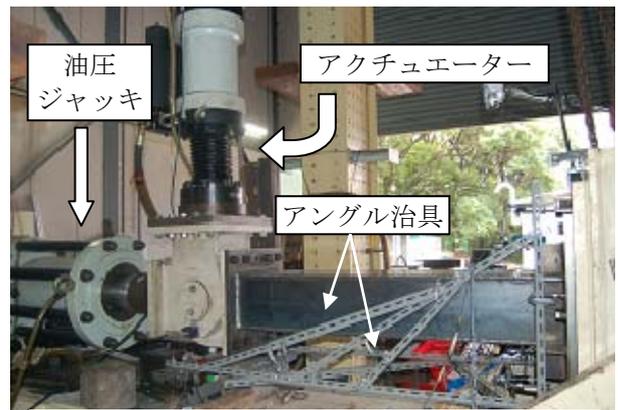


写真-1 実験状況

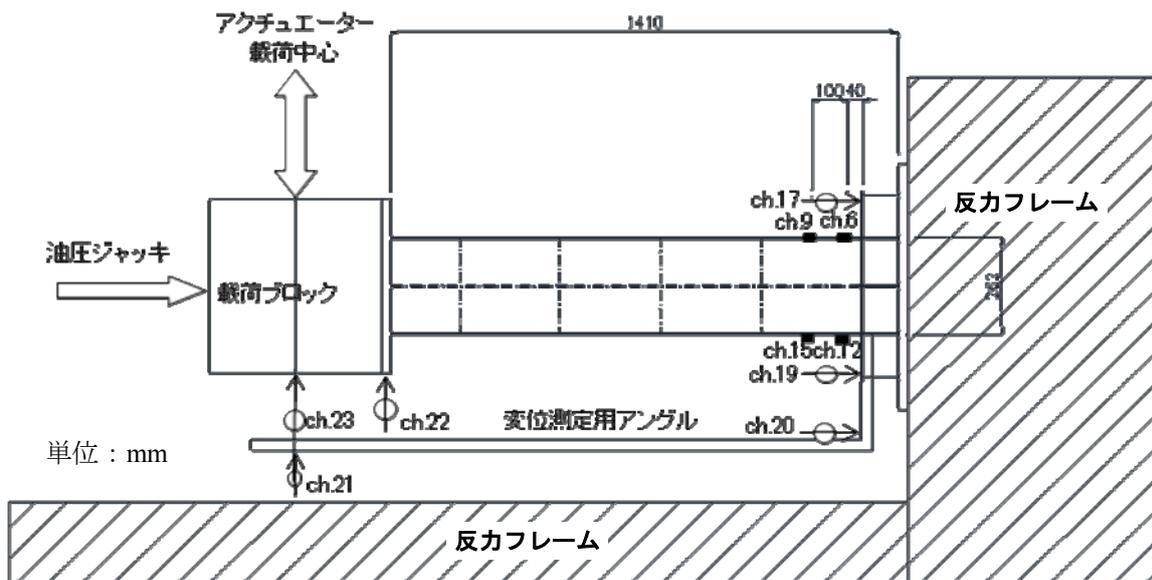


図-3 実験概要図

(3) 漸増繰り返し载荷実験

文献 12)では海溝型巨大地震を対象とした模擬地震波を入力とした鋼製橋脚のハイブリッド実験を行っている。対象とした実験供試体の諸元は本研究のものとはほぼ同一である。ハイブリッド実験では、最大荷重を履歴後、 $1.5\delta_y \sim 2.5\delta_y$ の変位振幅範囲で合計100回を超えるオーダーの振幅が確認されている。また、東日本大震災時にも、3分を越えるような長い継続時間で、主要動後も100回を越えるような繰り返し振幅の加速度波形が観測されている。

本実験では、文献 12)の結果を参考に、最大荷重を履歴後、長い継続時間の影響による数十回オーダーの繰り返し振幅を受けるような载荷パターンを用いるものとした。具体的には、まず $\pm 0.5\delta_y \sim \pm 3.0\delta_y$ まで $0.5\delta_y$ 刻みの変位振幅を3回ずつ繰り返し与え、最大荷重を履歴することを確認した。その後、数十回オーダーとして30回の繰り返し振幅を与えるものとした。

本研究では、主要動後の繰り返し振幅を対象と考えているので、振幅範囲は、初等はり理論において弾性応答を示す範囲とした。また、繰り返し振幅で与える振幅範囲が耐力に与える影響を検討するために、繰り返し振幅範囲をパラメータとした。具体的には、 $1.4\delta_y$ 、 $1.6\delta_y$ 、 $1.8\delta_y$ の3ケースの繰り返し振幅範囲で実験を行った。

(4) 繰り返し载荷実験結果

a) 荷重-変位関係および耐力変化

実験結果として、繰り返し振幅を与えた場合の荷重-変位関係を図-5に示し、その繰り返し部分を

拡大した荷重-変位関係を図-6、図-7に示す。図中の水平荷重および水平変位は、表-3に示した P_y および δ_y により無次元化した。

結果の一例として $1.8\delta_y$ のケースに着目すると、図-5より、漸増载荷の過程において、一旦は水平変位 $1.49\delta_y$ のときに最大荷重 $1.25P_y$ に達しており、その後繰り返し振幅では、およそ $1 \sim 3\delta_y$ の範囲で値が推移している。

繰り返し振幅過程を取り上げた図-6を見ると、水平変位 $3.0\delta_y$ 付近での繰り返し载荷1回目の荷重値とその後では荷重値が変化している。水平変位 $3.0\delta_y$ 付近での拡大図である図-7を確認すると、繰り返し载荷1回目は $0.79P_y$ であるが繰り返し30回目では $0.69P_y$ となり耐力が低下している。耐力の低下は変位反転時に生じており、この繰り返し振幅範囲での耐力低下は、 $1.4\delta_y$ および $1.6\delta_y$ のケースでも確認された。

繰り返し1振幅目を基準として、繰り返し回数別

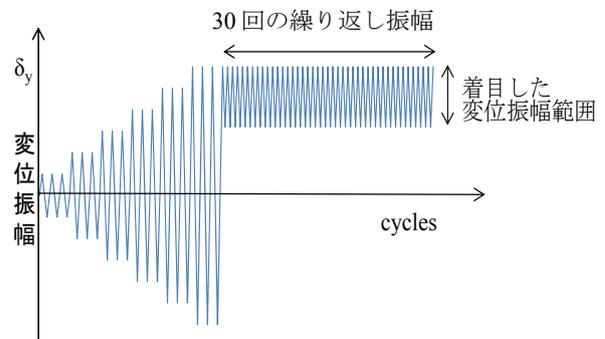


図-4 繰り返し载荷パターン

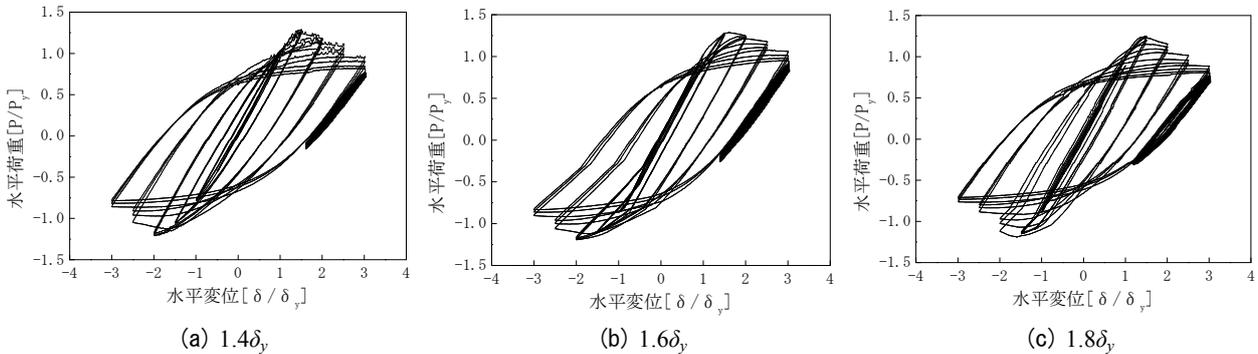


図-5 荷重-変位関係

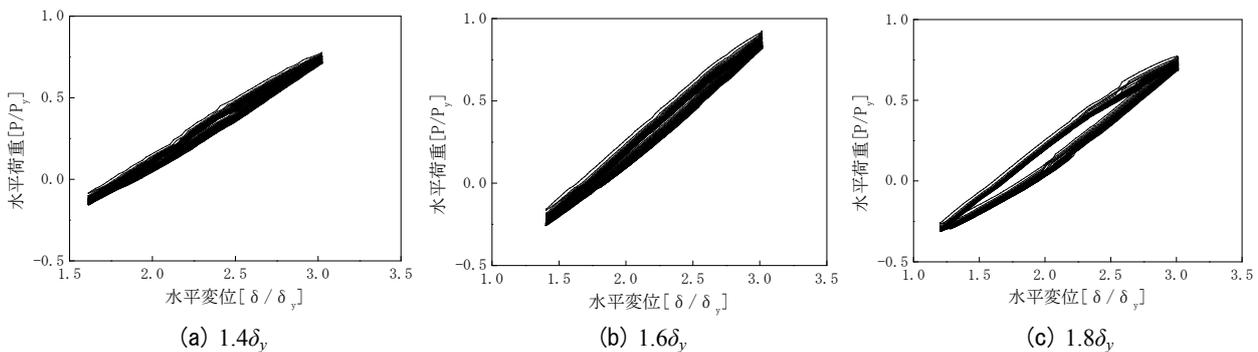


図-6 荷重-変位関係 (繰り返し部分)

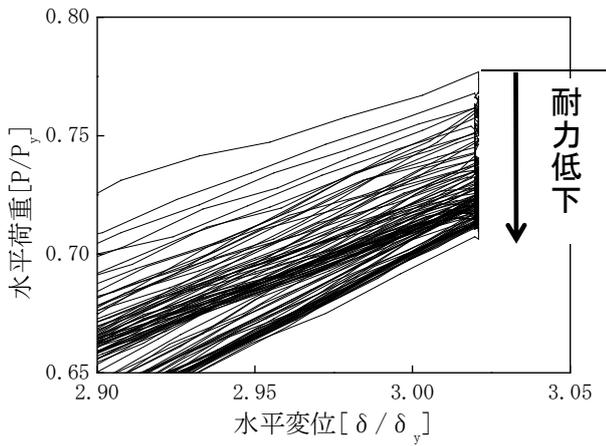


図-7 繰り返し振幅拡大図

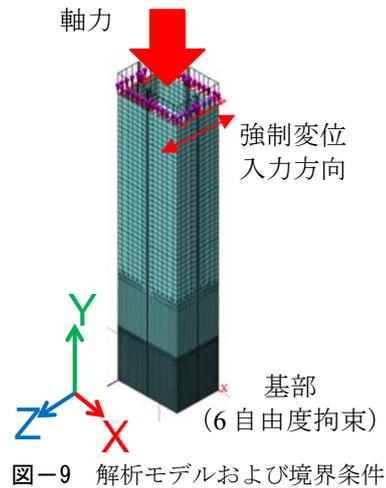


図-9 解析モデルおよび境界条件

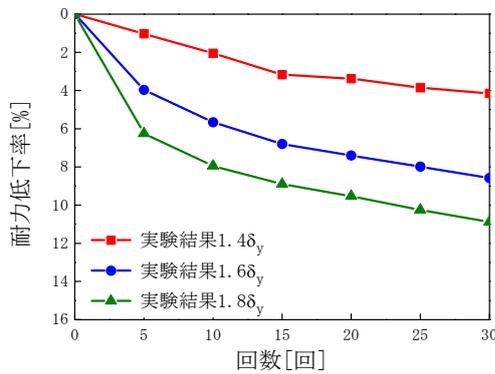


図-8 耐力低下率 (実験)

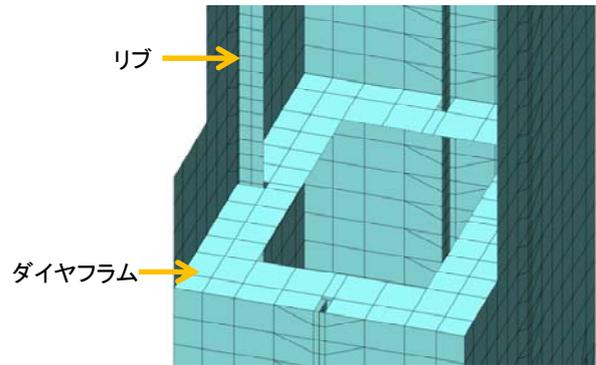


図-10 リブ、ダイヤフラムの設置状況



写真-2 フランジ部分での座屈 (1.8δ_y)

の耐力を百分率で表したものを耐力低下率とし、繰り返し振幅3ケースすべてまとめたものを、図-8に示す。図-8を見ると、3ケースとも繰り返し数が増えるにしたがい耐力低下の値が大きくなり、30回の繰り返し後には3~10%程度の耐力低下が確認された。また図-8より、与える繰り返し振幅の変位が大きくなるに伴い、耐力低下の値が増加していることが確認できる。

b) 変形状

写真-2 に繰り返し振幅 1.8δ_y のケースにおける、ダイヤフラム 1 段目の実験供試体フランジ部分の座屈状況を示す。なお、ここに示した変形状は繰り返し載荷実験終了後のものである。繰り返し載荷実験終了後の供試体には、フランジおよびウェブ部分

に局部座屈が確認できた。また、若干ではあるがリブ部分にも変形が生じていた。

これらの変形状は 1.4δ_y および 1.6δ_y のケースにおいても確認された。ただし、き裂は発生していないことを確認している。

3. 有限要素法による繰り返し載荷実験の模擬解析

前章の繰り返し載荷実験から得られた、長継続時間地震波の作用による既設鋼製橋脚の耐力低下の傾向に関して、そのメカニズムの詳細な検討を行うため有限要素法による非線形解析を行った。

解析にあたっては、汎用有限要素構造解析ソフト DIANA9.4.2 を用いて材料非線形と幾何学的非線形を考慮した複合非線形解析を行い、耐力変化を再現することを試みた。

(1) FEM 解析

a) 解析モデル

モデルの作成には、DIANA のプリポストである midas Fx For DIANA Ver. 3.0.0 を用い、実験供試体のモデル化を行った。また、実験供試体の再現として、リブとダイヤフラムについてもモデル化を行った。寸法については、2章で示した供試体寸法を用いた。なお、解析モデルの橋脚長さは供試体基部か

らアクチュエーターの中心（載荷点）までの、1,572 mmとしている。図-9に解析モデル全体図を、図-10にリブ、ダイヤフラムの設置状況を示す。

解析モデルの構成要素は、主として4節点四辺形アイソパラメトリック曲面シェル要素を用い、メッシュサイズ変更の境界部分およびリブ接合部に3節点三角形アイソパラメトリック曲面シェル要素を使用した。

メッシュサイズに関して、基部よりダイヤフラム1段目までを平均要素サイズを7×7 mmとし、それ以上は段階をつけて要素のサイズを変更し、橋脚上部は平均要素サイズが28×28 mmとなっている。

境界条件として解析モデルの基部部分では並進および回転の6自由度を拘束し、他の節点は自由とした。荷重条件として、実験状況を再現するため解析モデル上部に上部構造の死荷重として軸力を与え、軸力の作用により初期応力状態を決定した。その条件のもと、橋脚モデル上部に水平方向の強制変位を与えて、実験と同じく繰り返し振幅1.4δ_y、1.6δ_y、1.8δ_yの3ケースを行った。図-9に強制変位の入力方向を示す。

b) 材料特性

解析モデルの材料特性は、2章で示した引張試験結果を用いた。さらに、2章で用いた実験供試体の構造諸元となるように解析モデルを作成した。

材料の非線形構成則は図-11に示すバイリニア型の応力-ひずみ関係を用い、ひずみ硬化則は移動硬化則を適用した。降伏条件はVon Misesとし、二次剛性は一次剛性の1/100と設定した¹³⁾。

c) 初期たわみ

鋼構造物には、鋼材の製造、部材の制作・組立、

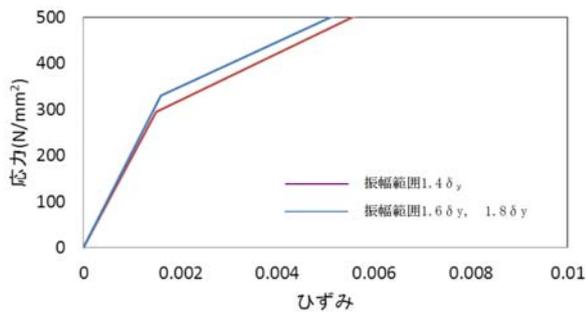


図-11 材料非線形構成則

および架設時などに初期不整が生じる^{14),15)}ため、複合非線形問題では初期不整をいかに考慮するかが解析結果に大きな影響を与えることになる。

本研究では、実験供試体のモデル化において鋼構造部材の初期たわみを考慮した。初期たわみは図-15に示すように局所的なたわみ W_g と全体的なたわみ W_L を与えている。たわみ量は文献¹⁴⁾より以下の式(5)、式(6)を用いて与えている。 W_1 の許容誤差を $a/1000$ 、 W_2 の許容誤差を $(b/n)/150$ とした。

また、今回は残留応力の考慮は行っていない。

$$W_g = W_1 \cdot \sin \frac{\pi x}{a} \cdot \sin \frac{\pi y}{b} \quad (5)$$

$$W_L = W_2 \cdot \sin \frac{\pi n x}{a} \cdot \sin \frac{\pi n y}{b} \quad (6)$$

ここに、 a ：ダイヤフラム間隔、 b ：補剛板幅、 n ：補剛板分割数、 W_1 ：全体系最大縦距、 W_2 ：局所系最大縦距。

(2) FEM 解析結果

a) 荷重-変位関係および耐力変化

荷重-変位関係の実験結果、解析結果を重ね合わせたものを図-13に示す。図中の水平荷重および水平変位は、2章と同様に表-2に示した P_y および δ_y により無次元化した。

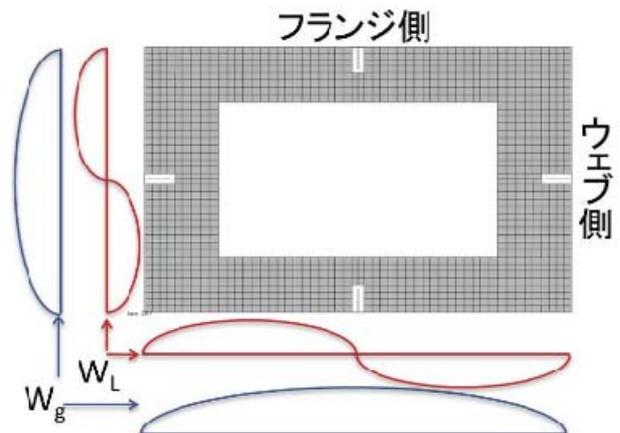


図-12 初期不整モデル

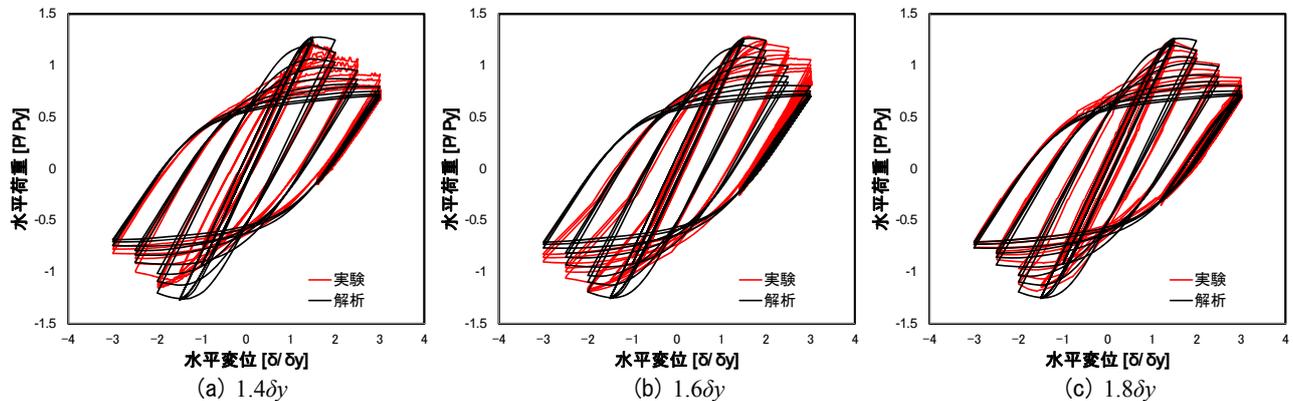


図-13 荷重-変位関係の比較

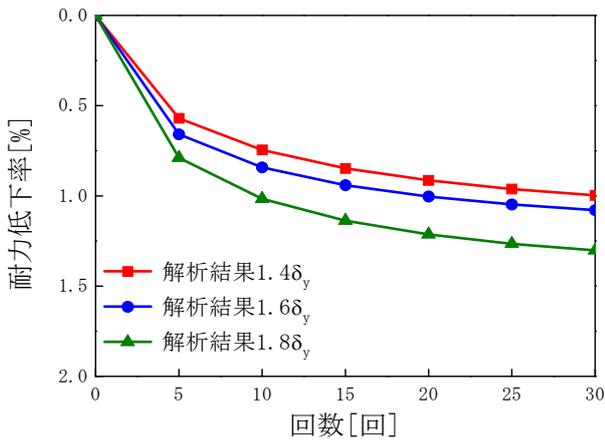


図-14 耐力低下率 (解析)

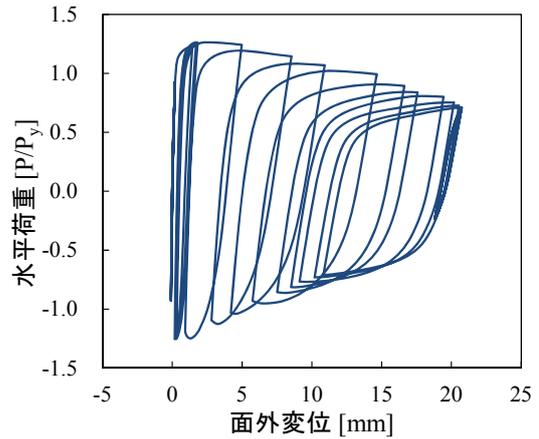


図-16 荷重-変位関係

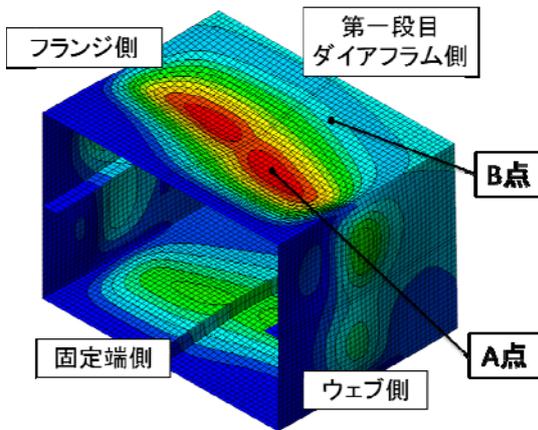


図-15 解析モデルの変形形状

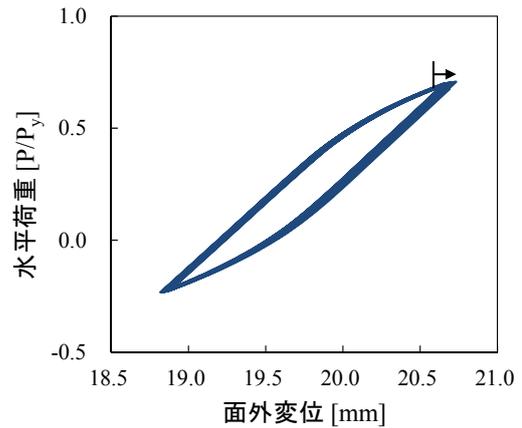


図-17 繰返し変形による座屈の進展状況

図-13 について見てみると、 $1.6\delta_y$ のケースにおいて水平荷重の低下に差異が認められるものの、実験、解析ともに荷重-変位関係はおおむね一致しており、実験を再現できていると考えられる。

図-14 に繰返し振幅 3 ケースの耐力低下率を示す。図-14 をみると、いずれのケースにおいても繰返し回数が増えるにしたがい耐力低下の値が大きくなっており、実験結果の特徴を捉えている。また、繰返し振幅の値が大きくなるにつれ、耐力低下が増加していく傾向も実験結果と整合している。しかし、実験結果と解析結果では耐力低下率の値に差異が生じており、この原因を明らかにすることが、今後の課題として挙げられる。

b) 変形形状

つぎに、解析モデルの変形形状について検討する。図-15 は、繰返し振幅 $1.8\delta_y$ の解析での終了時における変形を示している。柱のフランジ部分が大きく変形しており、FEM 解析においてもよく再現できていることがわかる。図-16 は、FEM 解析において座屈が一番大きく、変形していた箇所の荷重-変位関係を示している。横軸に、節点変位量を示し、縦軸には、水平荷重を示している。载荷の最初のほうは、あまり変位していないが、実験供試体の変形量が多くなるにしたがい、柱の局部座屈が発生し、座屈箇所の節点変位量が徐々に増加しているこ

とがわかる。図-17 には、繰返し変形による座屈の進展状況を示している。図に示すように、弾性範囲内の繰返し振幅範囲を与えている場合でも、若干ではあるが、変位量で 1%程度の座屈が進展していることが見て取れる。この座屈の進展が柱全体の耐力低下に起因しているのではないかと考えられる。

c) 応力-ひずみ関係

前項の結果を踏まえ、解析で最も大きな局部座屈変形が生じた要素位置における応力-ひずみ関係について見てみる。図-15に示すA点、B点の要素について、繰返し振幅範囲 $1.8\delta_y$ の解析結果として、それぞれ橋脚長さ方向の応力-ひずみ曲線を描いた(図-18a、図-18b)。図-18aを見ると、A点(局部座屈発生箇所)では、ひずみが0.005付近で+側でドリフトしており、以降は0.04近くまでひずみが増大している。一方、図-18bを見るとB点ではひずみは0.005より大きな値にはなっていない。

つぎに、30回の繰返し部分を拡大した応力-ひずみ関係を図-18c、図-18dに示す。図-18cより、A点では30回繰返し载荷を受けている間、最大応力はほぼ一定値を繰返していることが確認できる。しかし、最大応力はほぼ一定であるにも関わらず、ひずみは繰返しごとに徐々に大きくなっている。ここで、最大応力が 500N/mm^2 に達しているのは、二次剛性を初期剛性の1/100と設定したため、応力の値

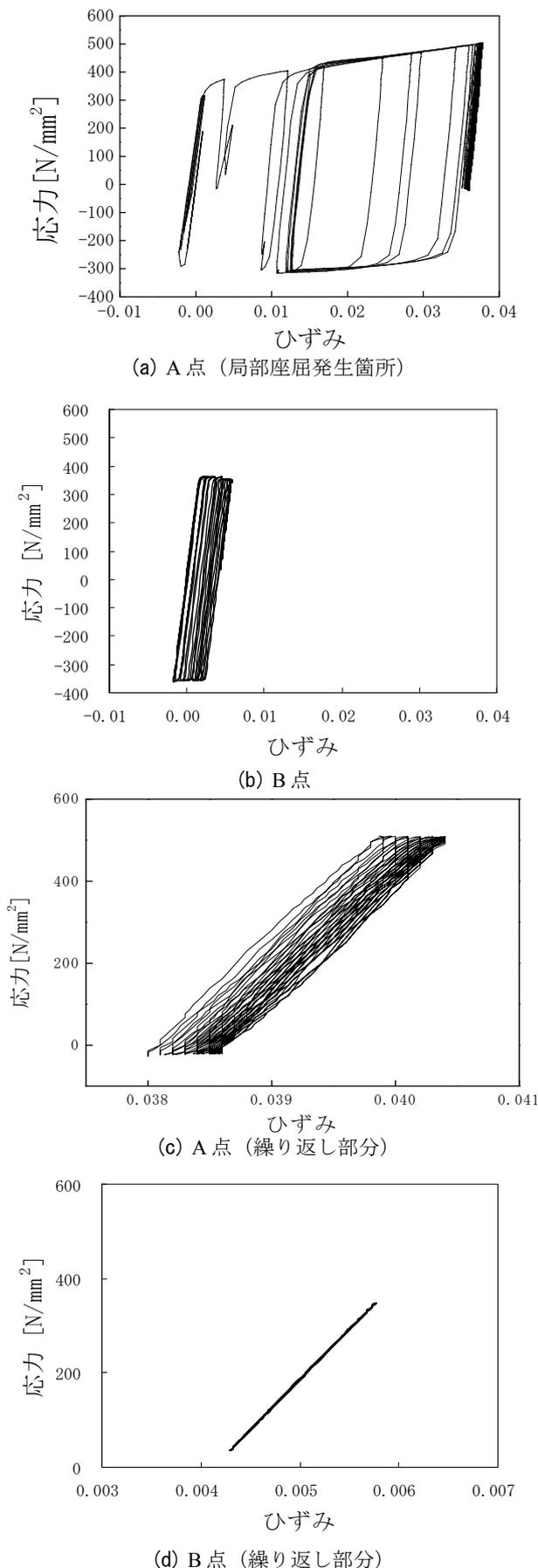


図-18 応力-ひずみ関係 (振幅範囲 $1.8\delta_y$)

が大きくなったと考えられる。一方、図-18dを見るとB点ではひずみの増大は見受けられない。このことから、局部座屈発生位置での局所的なひずみの増大が、耐力低下の一因となっていると考えられる。また、この繰り返し载荷を受けることによって、剛性が低下することは無かった。

4. まとめ

本研究では、継続時間の長い地震動を受ける既設高架橋の耐震性能を把握することを目的として、都市高架橋に多用されている単柱式鋼製橋脚を検討対象とし、数十回オーダーに及ぶ繰り返し振幅が構造物の耐荷性能に与える影響について検討を行った。以下に本研究で明らかとなったことを記す。

- (1) 最大荷重履歴後の数十回の繰り返し変位を考慮し、漸増繰り返し载荷実験を行った結果、繰り返し回数が増加することにより耐力低下が生じた。この際、実験供試体フランジ部分およびウェブ部分に局部座屈が生じたが、き裂は発生しなかった。
- (2) 変位振幅範囲 $1.4\delta_y$, $1.6\delta_y$, $1.8\delta_y$ の3ケースの結果を比較した結果、変位振幅範囲が大きいほど耐力低下の度合いも大きくなることが明らかとなった。さらに、同じ変位振幅範囲であれば、繰り返し階数が増える毎に耐力低下の度合いも大きくなった。今回の実験結果では、最大で10%程度の耐力低下が生じた。
- (3) FEMによる複合非線形解析において、最大荷重履歴後の数十回オーダーの繰り返し変位を与えた結果、耐力低下に関して実験結果と同様の傾向を再現することができた。ただし、全体的な傾向は同じであったが、耐力低下率の値は解析の方が小さくなる結果となった。
- (4) 座屈形状に関しても、解析モデルのフランジ部分およびウェブ部分に実験結果と同様の局部座屈が確認できた。また、座屈発生箇所に関して応力-ひずみ関係を求めた結果、局部座屈が局所的に増大しており、座屈発生位置の要素では、一定応力でのひずみの増大を確認した。この影響により、橋脚全体では同一変位振幅で耐力が低下していると考えられる。

実験結果と解析結果では、耐力低下の値に差異が認められた。この原因を明らかにするため、残留応力など初期不整の設定条件や影響、材料構成則の検討など、より詳細な解析的検討を行う予定である。また、今回は一つの断面形状のみ検討を行ったが、異なる断面形状についても検討する必要がある。

謝辞：本研究の実施に際しては、(財)先端建設技術センター平成17年度研究助成、(財)海洋架橋・橋梁調査会平成22年度橋梁技術に関する研究開発助

成, および平成20~22年度科学研究補助金(基盤研究(C) 課題番号: 20560451)の助成を受けた。また実験や解析の実施にあたっては, 研究当時, 関東学院大学の学生であった吉田隆信氏(H20年度M2), 下町和樹(H21年度B4), 平口美帆氏(H22年度M2)に協力を得た。また載荷実験の実施に際しては, 大阪市立大学応用工学研究室の学生諸氏の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 庄司学, 小木智史: 長周期地震動に対する PC 斜張橋の地震応答特性, 地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, Vol.11, pp.1-8, 2008.
- 2) 堀郁夫, 川端鋭憲: 地震による石油タンク火災の技術的考察と社会問題, 社会技術論文集, Vol.2, pp.414-424, 2004.
- 3) 座間信作: 石油タンクのスロッシングに係るやや長周期地震動の設計スペクトル, 日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.12, pp.551-555, 2006.
- 4) 宇佐美勉, 今井康幸, 青木徹彦, 伊藤義人: 繰り返し荷重を受ける鋼圧縮部材の強度と変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.37-I, pp.93-106, 1991.
- 5) 小玉乃理子, 依田照彦: 局部座屈の影響を考慮した箱型断面鋼製橋脚の地震時動的応答解析, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.169-184, 2003.
- 6) 高橋実, 村越潤, 西川和廣, 松田宏: 角補強を施した矩形断面鋼製橋脚の変形性能に関する数値解析, 鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, Vol.2, pp.77-84. 1998.
- 7) 日本建築学会, 東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会: 巨大地震による長周期地震動の予測と既存建築物の耐震性と今後の課題, 日本建築学会大会資料, 2006.
- 8) 宇佐美勉, 板野茂, 是津文章, 青木徹彦: 鋼製橋脚モデルの繰り返し弾塑性挙動におよぼす荷重履歴の影響, 構造工学論文集, Vol.39-I, pp.235-247, 1993.
- 9) 小松定夫, 牛尾正之, 北田俊行: 補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究, 土木学会論文報告書, No.265, pp.25-35, 1977.
- 10) 青木徹彦, 大西哲広, 鈴木森晶: 水平 2 方向荷重を受ける正方形断面鋼製橋脚の耐震性能に関する実験的研究, 土木学会論文集 A, Vol.63, pp.716-726, 2007.
- 11) 保高篤司, K.A.S.Susantha, 青木徹彦, 野村和弘, 高久達将, 熊野拓志: 長方形断面鋼製橋脚の耐震性能に関する繰り返し載荷実験, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.381-392, 2003.
- 12) 田中賢太郎, 北原武嗣, 山口隆司, 吉田隆信: 長周期・長継続地震動を考慮した鋼製橋脚の耐荷性能の実験的検討, 第 16 回鋼構造年次論文報告集, pp.291-296, 2008.
- 13) JIP テクノサイエンス株式会社事業開発部: DIANA9 ユーザーマニュアル日本語参考資料, 2005.
- 14) 社団法人土木学会: 座屈設計ガイドライン改訂第 2 版, 丸善出版, 2005.
- 15) 土木学会 構造工学委員会 継続教育小委員会: 構造工学における有限要素法の基礎と応用, 構造工学技術シリーズ No.44, pp.186-187, 2005.

FUNDAMENTAL STUDY ON LOAD CARRYING CAPACITIES OF STEEL BRIDGE PIERS UNDER DOZENS OF CYCLIC LOADING

Takeshi Kitahara, Kentaro Tanaka, Takashi Yamaguchi,
Yusuke Kishi and Tsuyoshi Hamano

Recently, long-period and long-duration time seismic waves caused by huge ocean-trench earthquakes have been observed in Japan, and the dozens of cyclic shaking were occurred by these waves. However, seismic performances of structures subjected to long-duration time seismic waves are not clear. Therefore, this paper discusses the load bearing capacities of steel bridge piers during dozens of cyclic loading. Cyclic load carrying tests and a pseudo-dynamic test were carried out in order to investigate the cyclic load bearing capacity of steel bridge piers. Moreover, complex nonlinear analyses were conducted to simulate the experimental tests. Consequently, the results figure out the deterioration of load bearing capacity was encouraged from local buckling due to increase the strain without the stress promotion.