

継続時間の長い地震を考慮した既設単柱式鋼製橋脚の 繰返し載荷実験

北原 武嗣¹・田中 賢太郎²・山口 隆司³・平口 未帆⁴・下町和樹⁵

¹正会員 博(工) 関東学院大学教授 工学部社会環境システム学科 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)

²正会員 博(工) 関東学院大学助手 工学部社会環境システム学科 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)

³正会員 博(工) 大阪市立大学大学院教授 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本町3-3-138)

⁴関東学院大学大学院 工学部土木工学専攻 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)

⁵関東学院大学 工学部社会環境システム学科(〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)

1. はじめに

近年、南海地震、東南海地震および東海地震に代表されるような海溝型巨大地震の発生が懸念されている。これらの海溝型巨大地震では、長周期かつ長継続時間の地震波になると考えられている^{1),2)}。実際近年において、2003年十勝沖地震では長周期地震動が観測され、これが原因と考えられる石油タンクのスロッシング現象が問題となった³⁾。また、2004年新潟県中越地震においては、関東平野で長周期かつ長継続時間の地震波が観測されている。

これまで、道路橋示方書に規定される地震波が入力されることを念頭においた、鋼製橋脚の変形性能に関して多くの実験的・解析的研究が行われ、その弾塑性性状や局部座屈性状等に関して十分な知見が蓄積されてきている⁴⁾。一方、長周期構造物に関しても、共振が懸念されるような長周期地震動が入力された場合の地震時挙動の影響もシミュレーション等により検討されつつある⁵⁾。

しかしながら、都市高架橋等の都市部に広く用いられている鋼製橋脚が長周期、長継続時間となる地震波を受けた際の挙動に関しては、未だ十分な検討が行われていないのが現状といえる。そのため、長周期、長継続時間の地震波による構造物の地震時挙動を把握することは急務の課題である。

このような背景のもと、著者らは長継続時間地震波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、都市高架橋に多用されている既設単柱式鋼製橋脚を想定した実験供試体を対象としたハイブリッド地震応答実験、および静的繰返し載荷実験を

行った。その結果、最大荷重履歴後、数十回オーダーの繰返し振幅を受ける可能性のあること⁶⁾、継続時間の長い地震波の変位履歴を模擬した繰返し振幅を数十回オーダーで履歴することにより耐力低下が生じる可能性があることを検討した⁷⁾。

本研究では、文献7)で検討した繰返し変位振幅範囲と比べて、より小さい変位振幅範囲2ケースでの繰返し載荷実験を実施した。これらの実験結果から、変位振幅範囲の違いや繰返し回数が、鋼製橋脚の耐力低下や剛性に与える影響を考察するものとした。

2. 実験概要

(1) 引張試験結果

鋼材の降伏点および応力-ひずみ関係を得るため、供試体に用いた鋼材（SS400）の引張試験を3体実施した。3体の引張試験結果の平均値として鋼材の機械的性質を求めた。降伏強度は310.0N/mm²、引張強度は434.5N/mm²、およびヤング率は1.973×10⁵N/mm²となった。

(2) 実験供試体の設計

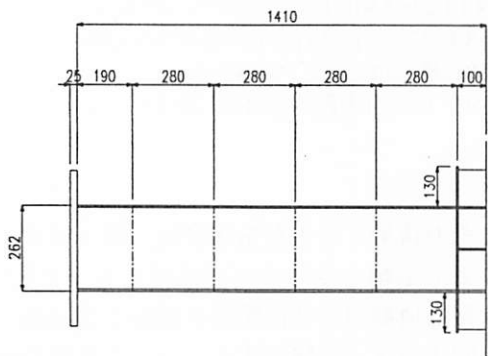
実験供試体は、都市高架橋に多用されている既設単柱式鋼製橋脚を対象として設計を行った。橋脚高さ11m程度の年高架橋の鋼製橋脚を想定し、縮尺約1/8として、1.41mの供試体（載荷治具の関係から脚長は1.572mとなる）を製作した。

耐力および変形性能に関するパラメータとして、補剛板パネル全体の幅厚比パラメータ R_p 、縦補剛材

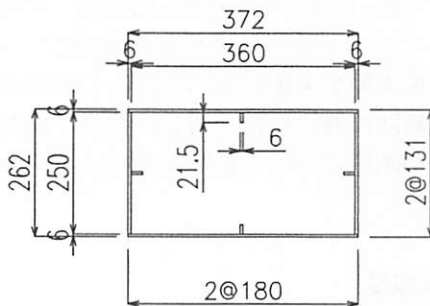
間の板パネルの幅厚比パラメータ R_F 、縦補剛材の自由突出板としての幅厚比パラメータ R_S 、縦補剛材剛比 r の弾性座屈理論から求まる縦補剛材の必要最小剛比 r^* に着目し、これらが合うように実験供試体の寸法を決定した。座屈パラメータ値を表-1に、図-1に、用いた実験供試体の側面図および断面図を示す。

表-1 実験供試体の座屈パラメータ

R_F	R_R	R_S	γ / γ^*
0.615	0.539	0.198	0.676



(a) 側面図



(b) 断面図

図-1 実験供試体の断面図

(3) 荷重装置および実験状況

実験装置と計測位置等の概要を写真-1 と図-2 に示す。写真に示すように荷重装置の関係上、供試体を水平方向に寝かした状態とした。上部構造死荷重相当の軸力を、最大荷重 1000kN かつストローク 150mm の定圧油圧ジャッキにより与えた。

また水平方向（実際の実験では鉛直方向）には、最大荷重 500kN かつストローク ± 150 mm のアクチュエーターを用いて地震荷重を与えた。変位測定においては、基部の回転を取り除くため、写真に示すようなアングル治具を基部に取り付け測定した。

実験時に与える水平変位荷重パターンを図-3 に示す。図に示すように、 $\pm 0.5 \delta_y$ 、 $\pm 1.0 \delta_y$ 、 $\pm 1.5 \delta_y$ 、 $\pm 2.0 \delta_y$ 、 $\pm 2.5 \delta_y$ 、 $\pm 3.0 \delta_y$ の変位振幅で3回ずつ繰り返し変位を与え、最大荷重を履歴することを確認する。

数十回オーダーの繰返しを模擬した振幅を与えるものとした。この際、繰返し変位履歴の振幅範囲として、 $\pm 1.6 \delta_y$ 、 $\pm 1.9 \delta_y$ 、 $\pm 2.3 \delta_y$ の3ケースを考え、それぞれ15回の繰返し振幅を与えた。ただし、 $\pm 2.3 \delta_y$ の場合のみ10回とした。

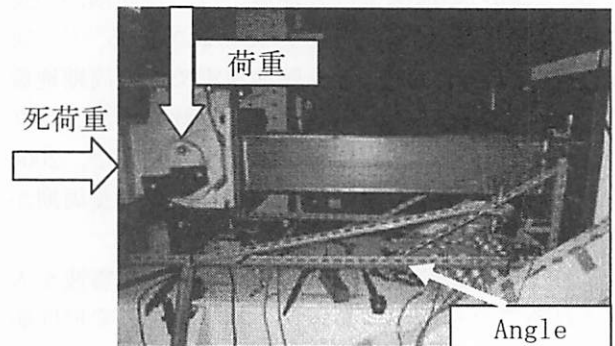


写真-1 実験概要

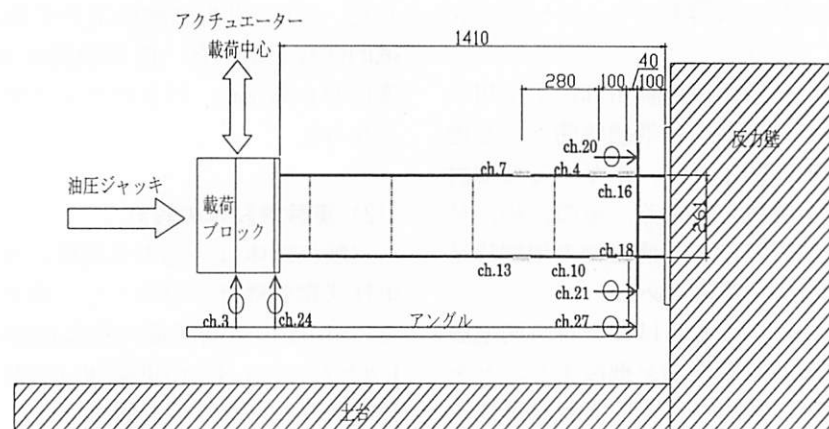


図-2 実験装置と計測位置

$\pm 1.9 \delta_y$ のケースでは、水平変位 $3.0 \delta_y$ 付近において、変位計の微振動が生じたためアクチュエーターによる制御が正確に作動できず、微振動した荷重と変位データが計測された。そのため、水平変位 $3.0 \delta_y$ 付近の数値を平均化して用いた。

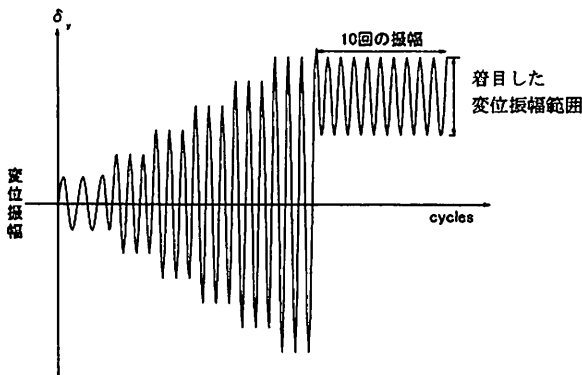


図-3 繰り返し変位のパターン

3. 実験結果とその考察

実験結果の一例として、 $\pm 3.0 \delta_y$ の変位を与えた後、 $\pm 1.6 \delta_y$ の繰返し変位振幅を15回与えた場合の荷重－変位曲線を図-4に示す。水平変位は δ_y で、水平荷重は P_y で無次元化した値を表す。この荷重－変位関係において $3.0 \delta_y$ 近傍を拡大したものを図-5に示す。図から、15回の繰返し振幅を受けることで繰返し数が増えるにしたがい耐力が小さくなっていく様子がうかがえる。今回の実験では、15回の繰返し後、約11%の低下が見られた。同様に、 $\pm 1.9 \delta_y$ 、 $\pm 2.3 \delta_y$ の変位振幅のケースでも耐力の変化率を検討した。

表-2に耐力の変化率をまとめたものを示す。表より $\pm 1.6 \delta_y$ 、 $\pm 1.9 \delta_y$ 、 $\pm 2.3 \delta_y$ の3ケースとも繰返し数が増えるにしたがい耐力低下の割合がおおくなり、10回の繰返し後には7～10%程度の耐力低下が確認された。全体的な傾向として、耐力低下に与える繰返し振幅範囲の影響は小さいように見受けられる。 $\pm 1.9 \delta_y$ のケースで、若干ではあるが耐力低下の割合が小さくなっている。これは、 $3.0 \delta_y$ 近傍で微振動が生じてしまったことが原因の一つと考えられる。

つぎに、図-6のに示すような繰返し履歴を与えた際の各繰返し振幅における最大荷重値と最小荷重値の差を検討した。これを荷重振幅範囲とみなす。表-3に各変位振幅範囲ごとの結果を、繰返し5回目、10回目について示した。表より、どのケースも繰返し数が増すごとに荷重振幅範囲も狭まっていることがわかる。ただし、耐力よりも小さい変化幅となっている。

最後に、図-7に繰返し数と剛性の関係を示す。図

中、剛性は初期剛性で除した値を表してる。図より、変位振幅範囲のすべてのケースにおいて、剛性は繰返し数によらず、ほぼ一定の値となっていることがわかる。

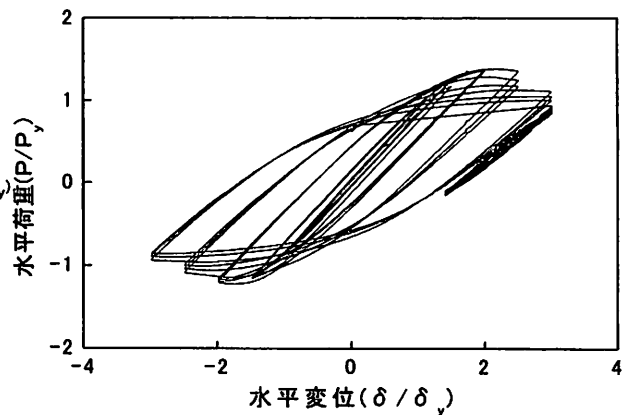


図-4 荷重－変位曲線（繰返し振幅範囲 $1.6 \delta_y$ ）

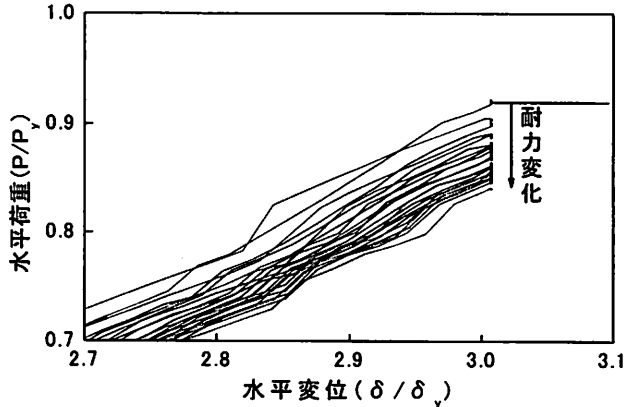


図-5 $3.0 \delta_y$ 付近拡大図（繰返し振幅範囲 $1.6 \delta_y$ ）

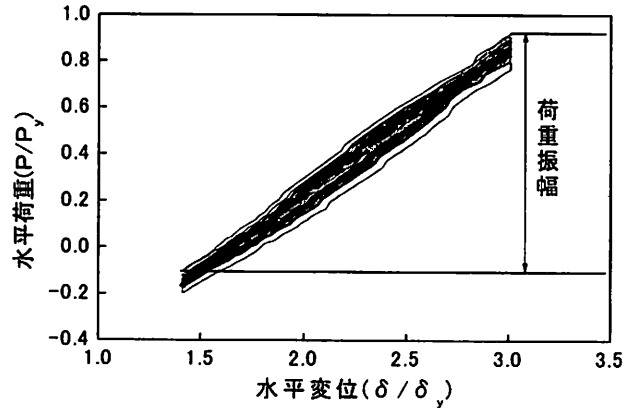


図-6 荷重振幅範囲（繰返し振幅範囲 $1.6 \delta_y$ ）

表-2 耐力の変化率(%)

変位振幅範囲	繰返し5回目の変化率	繰返し10回目の変化率
$\pm 1.6 \delta_y$	6.16	8.05
$\pm 1.9 \delta_y$	3.74	6.74
$\pm 2.3 \delta_y$	7.75	-9.50

表-3 荷重振幅の変化率(%)

変位振幅範囲	繰返し5回目の 変化率	繰返し10回目 の変化率
$\pm 1.6 \delta_y$	2.26	3.01
$\pm 1.9 \delta_y$	0.44	0.47
$\pm 2.3 \delta_y$	3.50	4.30

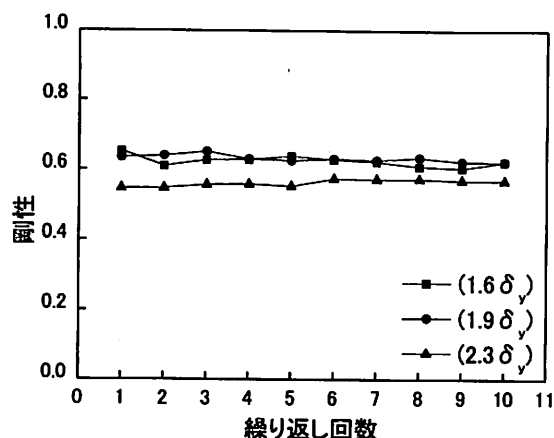


図-7 剛性の変化

4. まとめ

継続時間の長い地震動をうける鋼製橋脚の耐荷性状を検討するため、静的繰返し載荷実験を実施した。ここでは、最大荷重履歴後、数十回オーダーでの比較的小さい繰返し振幅をうける状態を想定した。

今回実験対象とした鋼製橋脚においては、最大荷重履歴後に、変位振幅範囲 $\pm 1.6 \delta_y$ 、 $\pm 1.9 \delta_y$ 、 $\pm 2.3 \delta_y$ の履歴を10回を受けることで7~10%程度、15回の履歴（変位振幅範囲 $\pm 1.6 \delta_y$ ）で11%程度の耐力低下が生じる可能性があることを示した。また、繰返し数が増すにしたがい耐力の低下が大きくなることも確認できた。一方、剛性は繰返し数にかかわらずほぼ一定の値で推移することもわかった。

今後、詳細な数値解析を実施することにより耐力低下が生じる原因の解明を計ること、他の断面形状での検討を加えること等が課題であるといえる。

謝辞：本研究の実施に際しては、平成 21 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。また載荷実験においては、大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻都市基盤工学講座橋梁工学分野の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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，2006 年度日本建築学会大会（関東），2006.
- 2) 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地震動小委員会：各種波形予測手法に基づいた海溝型巨大地震の予測強震動波形収集資料，2007.
- 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，第12 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.551-555，2006.
- 4) 宇佐美勉，板野茂，是津文章，青木徹彦：鋼製橋脚モデルの繰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.39A，pp.235-247，1993.
- 5) 二井伸一，運上茂樹，遠藤和男：長周期地震動が長大吊橋の地震時挙動に及ぼす影響に関する一考察，土木学会地震工学論文集 Vol.28，pp.1-7，2005.
- 6) 田中賢太郎，北原武嗣，山口隆司，吉田隆信，平口未帆：ハイブリッド実験による既設単柱式鋼製橋脚の長継続時間地震時挙動，第12回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.239-250，2009.
- 7) 田中賢太郎，北原武嗣，山口隆司，吉田隆信：長継続時間地震動を考慮した既設鋼製橋脚の耐荷性能の実験的検討，鋼構造年次論文報告集，Vol.16，pp.291-296，2008.