

長時間継続地震動を受ける鋼製橋脚の 耐力低下に対する座屈パラメータの影響

北原武嗣¹・岸 祐介²・大谷友香³・山口隆司⁴

¹正会員 博(工) 関東学院大学教授 理工学部土木学系 (〒236-8501 神奈川県横浜市金沢区六浦東1-50-1)

²正会員 博(工) 首都大学東京助教 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³正会員 修(工) 関東学院大学助手 理工学部土木学系 (〒236-8501 神奈川県横浜市金沢区六浦東1-50-1)

⁴正会員 博(工) 大阪市立大学大学院教授 工学研究科 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本3-3-138)

1. はじめに

我が国では1995年の兵庫県南部地震以降、従来の許容応力度設計に対し塑性域での耐力・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。特に、鋼製橋脚に関しては、都市高架橋に用いられることの多い単柱式のものなどに対し、キラーパルスの影響を考慮して、耐震性能評価に関する研究が数多く実施されてきた^{例え、1)~3)}。同時に耐震設計法の確立のため、単調載荷実験や正負交番載荷型の実験による検討が進められ、設計基準類への整備が進められてきた^{4)~6)}。ただし、繰り返し実験については通常、同一振幅の変位に対して、3回程度までの範囲内で行われてきた。

一方、近年は海溝型巨大地震の発生の際に、地震動の継続時間が長くなる現象が観測されており、構造物の応答に影響を及ぼす要因として注目されている。2011年には、東北地方太平洋沖地震において3分を超える継続時間の長い地震動が観測されている。そのような中、既存構造物の地震時応答における継続時間の長さについては検討例が少なく、構造物に及ぼす影響に関しては不明確である部分が多い。

こうした長時間継続地震動の作用による既設構造物への影響について、著者らはこれまでに鋼製橋脚の耐荷性状に関する実験を行ってきた⁷⁾。その中で、最大荷重履歴後の弾性範囲内と考えられる繰り返し振幅を数十回オーダーで受けることにより、鋼製橋脚基部に生じた局部座屈が進展し、それに伴って橋脚全体では耐力低下が生じることを確認している。

柱、はり共に局部座屈強度への影響因子として、幅厚比パラメータの影響が挙げられる⁸⁾。そこで、

幅厚比パラメータに着目し、橋脚諸元の実績データに基づいた数値モデルを作成し、3ケースの異なる幅厚比について耐力低下傾向への影響を解析的に検討した¹⁰⁾。ただし、この検討では対象の構造諸元について実績データベースでのモデル化を行っていたため、正確には幅厚比パラメータだけでなく細長比パラメータについても差異のある状態で検討を行っていた。

長時間継続地震動の作用による鋼製橋脚の耐力低下について、幅厚比パラメータによる影響を正しく評価するためには、柱としての基準を統一して評価することが必要である。そこで今回の検討では、細長比パラメータ λ を統一したモデルを用い、長時間継続地震動の作用を想定した地震時挙動を有限要素解析によって求め、橋脚全体の耐力低下傾向についての検討を行った。

2. 検討概要

本検討では、鋼製橋脚基部における局部座屈発生後の耐力低下の傾向について、幅厚比パラメータの違いが及ぼす影響を解析的に検討するものである。既往の検討⁹⁾と同様に、幅厚比パラメータの異なる3モデルを作成し、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した複合非線形解析を行うものとした。

(1) 有限要素モデル

対象は、都市高架橋等に用いられることの多い単柱式の鋼製橋脚である。断面形状は箱形断面とし、構成する補剛板の応答を詳細に追うため、有限要素解析によって検討することとした。本検討では、解析ソルバーとして汎用コードDIANA 9.4.4 (TNO

DIANA)を使用した。

これまでの解析事例より本検討での境界条件下では、局部座屈の生じる橋脚基部より上部は応力的に弾性範囲の挙動を示すことが確認されている⁷⁾。そこで計算時間を短縮するため、橋脚のモデル化においては橋脚高さに対して基部から1/3程度の高さまでアイソパラメトリック曲面シェル要素を用い、上部2/3程度の範囲をはり要素を用いて、モデルの簡略化を図っている。さらに、橋脚に対して作用させる外力が、軸力方向1成分と柱軸直角方向1成分であることを考慮し、橋脚断面の対称性を利用して図-1に示すような1/2の部分モデルとした。

(2) 座屈パラメータの設定

数値モデルの断面等の諸元は、既設の鋼製橋脚や既往の研究における実験供試体をベースに決定した^{10)~12)}。細長比パラメータを一定とした検討において、 R_f が0.5以上の範囲についても対象としたこと、および断面形状が統一されていない理由は、上記の通り旧基準における設計断面を含めた実績ベースでのモデル化を行ったためである。図-2に各モデルの断面図、表-1に解析モデルの諸元を示す。

(3) 非線形性に関する定義

材料構成則において、弾性係数および降伏値には著者らが以前の検討で行った鋼材の引張試験結果を用いた⁷⁾。応力-ひずみ関係は、図-3に示す移動硬化型のバイリニアモデルによって定義し、降伏条件はvon Misesとした。ここで、バイリニアの二次剛性は一次剛性の1/100としている。

また幾何学的非線形問題についてはTotal Lagrange法による定式化を行うこととし、収束計算にはNR法を用いた。

(4) 構成補剛板の初期不整

本研究では、曲面シェル要素を用いた橋脚基部からダイヤフラム1段目までに初期たわみを考慮し、ダイヤフラム2段目以上およびはり要素には考慮しないものとした。初期たわみは全体的なたわみ W_g と局所的なたわみ W_L を与えており、文献13)~15)よりそれぞれ式(1)、式(2)のように定義した。なお、 W_1 の許容誤差を $a/1000$ 、 W_2 の許容誤差を $(b/n)/150$ とした。

$$W_g = W_1 \cdot \sin \frac{\pi x}{a} \cdot \sin \frac{\pi y}{b} \quad (1)$$

$$W_L = W_2 \cdot \sin \frac{n\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2)$$

ここで、 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。

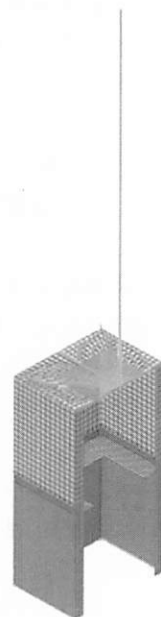


図-1 解析モデル全体図 ($R_f = 0.66$)

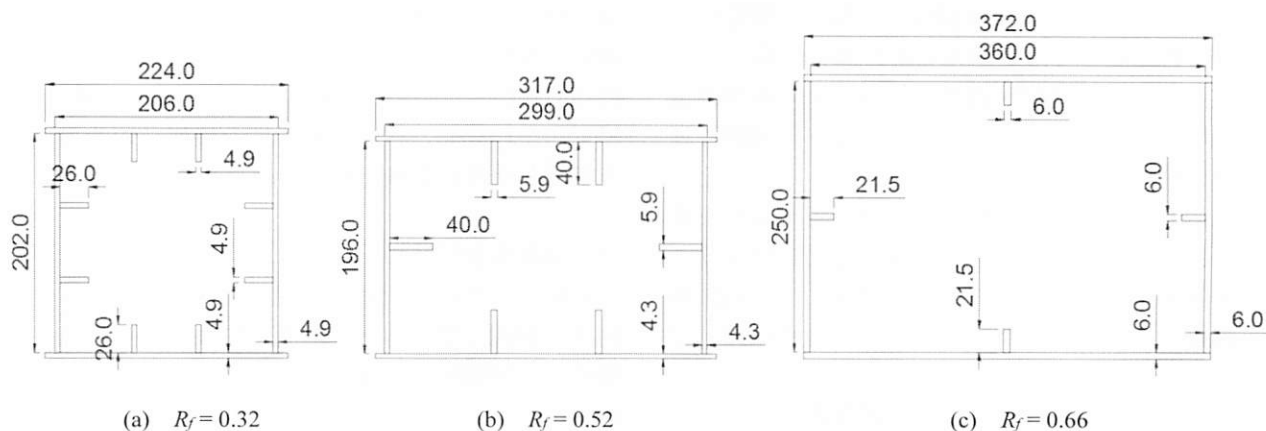


図-2 解析モデル断面図 (単位：mm)

表-1 解析モデルの諸元（細長比パラメータ一定）

幅厚比パラメータ	R_f	0.32	0.52	0.66
細長比パラメータ	$\bar{\lambda}$		0.37	
橋脚高さ	[mm]	1190	1192	1572
フランジ幅	[mm]	224	317	372
ウェブ幅	[mm]	202	196	250
板厚	[mm]	4.9	4.27	6.0
補剛材長さ	[mm]	26	40	21.5
補剛材板厚	[mm]	4.9	5.91	6.0
断面積	[mm ²]	5194	5799	7980
断面 2 次モーメント	[mm ⁴]	3426×10 ⁴	3839×10 ⁴	9215×10 ⁴
弾性係数： E_1	[N/mm ²]		2.06×10 ⁵	
2 次剛性： E_2	[N/mm ²]		$E_1/100$	
軸力	[kN]	171.4	191.4	263.3
軸力比	[P/P _y]	0.1	0.1	0.1
降伏変位	δ_y [mm]	7.14	7.41	10.07
降伏曲げモーメント	M_y [N・mm]	873.5×10 ⁵	1066×10 ⁵	2321×10 ⁵
メッシュ分割数（高さ方向）		30	30	40
メッシュ分割数（フランジ幅方向）		19	19	26
メッシュ分割数（ウェブ幅方向）		34	24	38
メッシュ分割数（縦リブ幅方向）		5	4	2
メッシュ分割数（ダイヤフラム幅方向）		6	7	8

また通常、鋼部材では断面に対して自己平衡が成立するように残留応力を定義する必要があるが、本検討では考慮していない。本検討では、最大荷重履歴後の繰返し振幅を受ける領域の挙動を対象としており、すでに塑性履歴を受けている。つまり、応力状態は決定しており、残留応力の影響は少ないものと考え、初期不整として考慮しない条件下で挙動を追跡することとした。

(5) 境界条件および荷重ステップの設定

境界条件として、基部分の並進および回転方向の6自由度を拘束した。荷重条件としては、橋脚モデル上部に上部構造の死荷重相当の軸力を与え、軸力の作用により初期応力状態を決定した。軸力作用下で橋脚モデル上部に水平変位を与え、橋脚基部での局部座屈発生およびその進展について履歴を追うものとした。水平荷重は、図-4に示すような漸増+繰返し型の強制変位を与えた。ここで、繰返し部分の振幅は初等はり理論における $2.0\delta_y$ 以内の変位を与えるものとして、 $1.4\delta_y$ 、 $1.6\delta_y$ 、 $1.8\delta_y$ の3パターンで検討を行った。

荷重パターンは、各モデルごとに水平方向への片押しによる耐荷力の履歴から定義している。弾性範囲での繰返し部分は、長時間地震動の主要動によって最大荷重履歴後、主要動より振幅の小さい後続の数百秒に及ぶ長時間振動の繰返し荷重を、簡易に

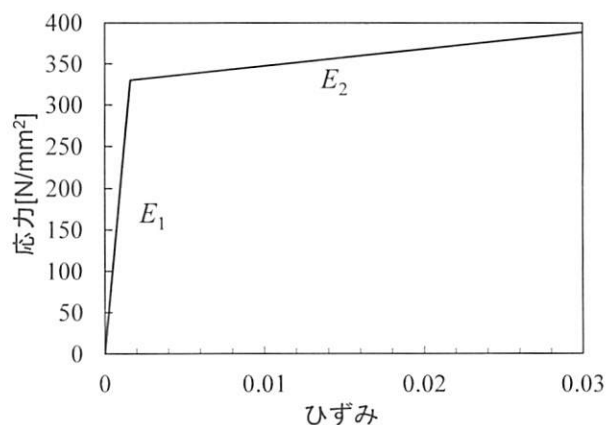
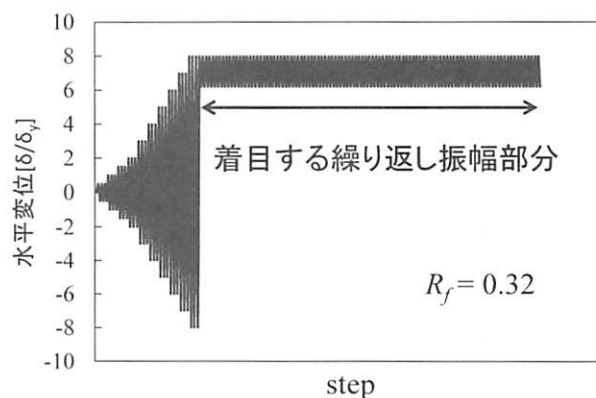


図-3 解析モデル材料構成則

図-4 漸増+繰返し型の荷重パターン ($R_f=0.32$)

模擬したものである。

3. 幅厚比パラメータの耐力低下状況への影響

(1) 弾塑性挙動および繰返し振幅に対する応答

図-5は、細長比を統一した場合における各有限要素モデルの荷重一変位関係の履歴を示している。ただし、縦軸、横軸はそれぞれ降伏水平荷重 H_y および降伏水平変位 δ_y で無次元化している。包絡線を比較すると、 $R_f = 0.32$ のモデルに対して、 $R_f = 0.52$ および $R_f = 0.66$ のモデルでは荷重が大きく低下している。橋脚を構成する板パネルに関して、断面形状に差異がある状態でも、補剛板としての幅厚比パラメータの値が最大荷重履歴後の挙動に与える影響として表れていると考えられる。

次に、 $2.0\delta_y$ 以内の繰返し変位を与えた部分（図-5中の丸枠で囲まれた範囲）について、荷重一変位の履歴を $1.4\delta_y$ 、 $1.6\delta_y$ 、 $1.8\delta_y$ の3パターンとも図-6に示す。図-6を見ると、振幅が小さいケースほど履歴が線形に近いが、いずれの振幅においても非線形性を示す履歴となっており、最大荷重履歴後は初等はり理論における弾性範囲レベルの振幅であっても、橋脚は塑性挙動を履歴することを確認した。また、幅厚比パラメータの違いに着目すると、 R_f の値が小

さいモデルほど局部座屈の発生による橋脚全体への影響が大きいと考えられる。図-6(c)の部分的な拡大図を見ると、一定の変位レベルにおいて振幅が繰返しに伴い、荷重の値が低下している。以降は、この耐力低下現象に対する幅厚比パラメータの影響について確認する。

図-7に各繰返し振幅における幅厚比パラメータごとの耐力低下状況を示す。全体的な傾向として、 R_f の値が小さいモデルでは一定回数で耐力低下率が収束する傾向がある。これに対し、 R_f の値が大き

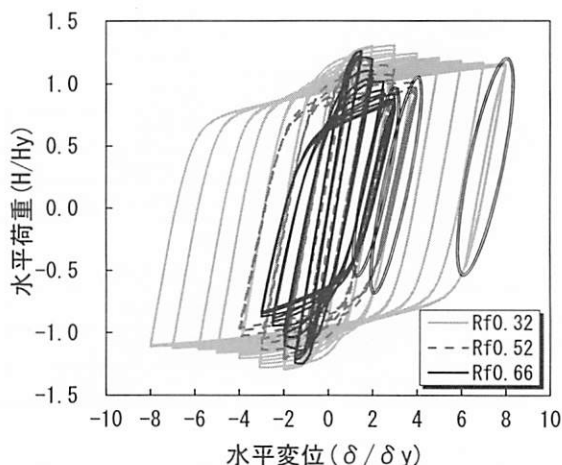


図-5 荷重一変位関係 ($1.8\delta_y$)

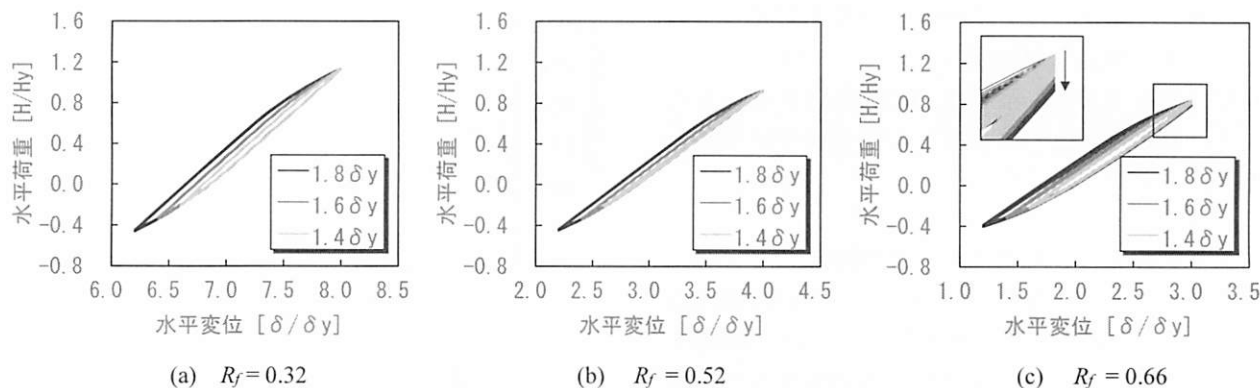


図-6 荷重一変位関係（繰返し部分拡大図）

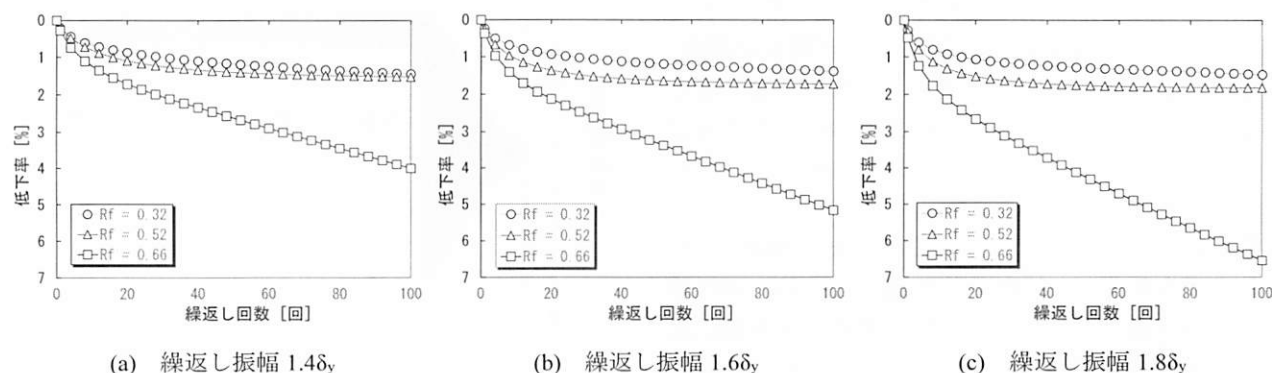


図-7 耐力低下状況

いモデルにおいては、繰返し回数の増加に伴い耐力低下の割合も大きくなり、100回の繰返し範囲内では収束しなかった。また、幅厚比パラメータの値が大きく薄肉であるほど耐力低下の割合も大きく、局部座屈の進展が大きいと考えられる。

振幅による影響に着目すると、繰返し振幅が大きいほど耐力低下率が大きくなっている。特に $R_f = 0.66$ のモデルでは、繰返し初期の20回までにおける低下の割合が大きくなっている。この結果より、繰返し振幅の大きさは最大荷重履歴後、早い段階で橋脚の耐力低下に影響を与えるものと考えられる。

(2) 局部座屈発生位置での応力－ひずみ状態

次に、局部座屈位置における応力－ひずみ状態に着目する。図-8に繰返し振幅 $1.8\delta_y$ のケースにおいて、各モデルの局部座屈最大位置における橋脚高さ方向の応力－ひずみ関係を示す。図より、履歴されたひずみ範囲は、幅厚比パラメータの値が小さいモデルの方が大きいことが確認できる。ここで、繰返し変位を受ける部分について着目する。

図-9に図-8における繰返し部分の拡大図を示す。

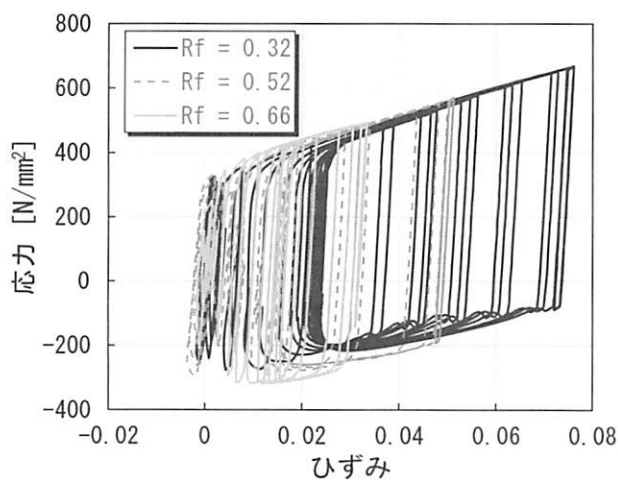


図-8 局部座屈位置の応力－ひずみ関係 ($1.8\delta_y$)

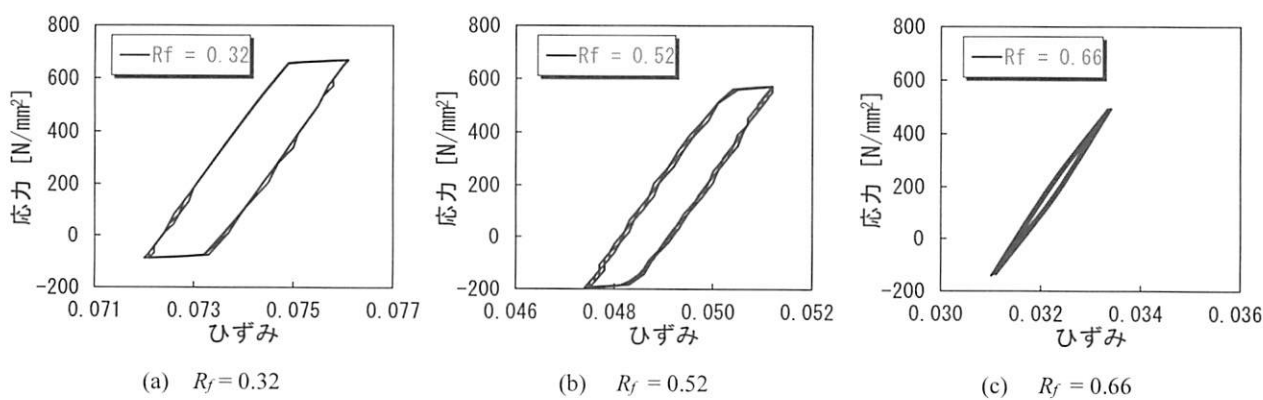


図-9 局部座屈位置の応力－ひずみ関係 (繰返し部分拡大図)

繰返し振幅部分の応力－ひずみ関係として、いずれの幅厚比パラメータにおいても、応力一定でひずみのみが増加する部分が確認できる。既往の研究^{7),9)}で確認しているように、この特徴的な履歴が耐力低下に影響すると考えられるが、幅厚比パラメータの違いに着目すると、応力範囲に差異のあることが確認できる。全体的な傾向としては、幅厚比パラメータが大きいケースほど応力範囲が小さい状態でひずみが増加している。この結果より、 R_f の値が大きく薄肉断面であるほど、小さな応力振幅で局所的にひずみが増加し、これが耐力低下傾向の違いとなって表われるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、長継続時間地震動の作用を受ける鋼製橋脚の耐力低下について、座屈パラメータによる影響を解析的に検討した。細長比パラメータ λ を統一したモデルを統一した数値モデルを用い、最大荷重履歴後に繰返し振幅を受ける橋脚の挙動を有限要素解析によって追跡した。以下に、本研究で得られた結果をまとめる。

- 1) 漸増+繰返し型の载荷における荷重－変位の履歴に対して、幅厚比パラメータの違いは包絡線の挙動に大きく影響する。
- 2) 最大荷重履歴後の繰返し振幅として初等はり理論における弾性範囲 $2.0\delta_y$ 以内の変位を作用させた結果、いずれのケースにおいても橋脚は非線形挙動を履歴し、局部座屈発生後は $2.0\delta_y$ 以内の変位が作用すると耐力低下が表れることが明らかとなった。
- 3) 幅厚比パラメータの値が耐力低下率に及ぼす影響としては、 R_f の値が大きく薄肉断面であるほど低下の割合が大きく、局部座屈の進展が大きい。

いと考えられる。また、 R_f の値が大きい場合、繰返し振幅の大きさによる耐力低下への影響も大きくなる。

- 4) 局部座屈発生位置における応力-ひずみ関係を確認すると、繰返し振幅の作用下では応力一定で局所的にひずみが増加する。このとき、 R_f の値が大きく薄肉であるほど、小さな応力振幅でひずみが増加しており、これが橋脚全体としての耐力低下傾向の違いとなっている。

構造としての局部座屈の進展以外にも、耐力低下の要因として繰返しによる降伏曲面の縮小など、材料としての挙動も考えられる。そのため、現在、鋼材の繰返し弾塑性挙動を適切に再現する構成則として修正二曲面モデルを用いた検討を進めている¹⁶⁾。

謝辞：本検討は、平成23～25年度科学研究補助金（基盤研究（B）課題番号：23360195、代表：杉戸真太（岐阜大学・教授））の助成を受けて行われたものである。また、解析実施にあたっては鈴木拓馬氏（研究当時：関東学院大学大学院、現：株式会社ピー・アイ・ティー）の協力によるところ大である。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 宇佐美勉，今井康幸，青木徹彦，伊藤義人：繰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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 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.39-I，pp.235-247，1993。
- 5) 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。
- 6) 保高篤司，Susantha, K. A. S.，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返し載荷実験，構造工学論文集，Vol.49A，pp.381-392，2003。
- 7) 北原武嗣，田中賢太郎，山口隆司，岸祐介，濱野剛：数十回オーダー繰返し載荷を受ける鋼製橋脚の耐力低下に関する基礎的研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.68，No.4（地震工学論文集，Vol.31-b），pp.1_499-1_508，2012。
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，丸善出版，2012。
- 9) 北原武嗣，岸祐介，鈴木拓馬，山口隆司：長時間地震動が作用する鋼製橋脚の耐力低下に関する解析的検討，第 34 回地震工学研究発表会発表論文集（CD-ROM），2014。
- 10) 鈴木森晶，宇佐美勉：繰返し荷重下における鋼製橋脚モデルの強度と変形能の推定式に関する研究，土木学会論文集，No.519/I-32，pp.115-125，1995。
- 11) 芝崎一也，宇佐美勉，本間大介：大地震後の残留変位を抑制した鋼製橋脚の開発ーハイブリッド地震応答実験による検証ー，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1017-1026，1999。
- 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) 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。
- 14) 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。
- 15) 北田俊行，中井博，國廣昌史，原田直樹：圧縮と曲げとを受ける無補剛・補剛薄肉箱形断面の終局強度相関曲線に関する研究，構造工学論文集 Vol.40A，pp.331-342，1994。
- 16) 北原武嗣，岸祐介，大谷友香，葛西昭：長時間地震動による鋼製橋脚の耐力低下に与える構成則の影響，JCROSSAR 2015 論文集（掲載決定）。