

複数回連続強震を受ける無補剛箱形断面鋼製橋脚の耐荷性状に関する解析的検討

須藤 遼¹・北原 武嗣²・大谷 友香³

¹学生会員 関東学院大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)
E:mail: m18J4007@kanto-gakuin.ac.jp

²正会員 博(工) 関東学院大学教授 理工学部土木学系 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)
E:mail: kitahara@kanto-gakuin.ac.jp

³正会員 修(工) 関東学院大学助手 理工学部土木学系 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)
E:mail: ohtani@kanto-gakuin.ac.jp

2016年熊本地震では数日間に強震が繰り返し発生し、気象庁によれば、震度6弱以上の強震が7回観測されている。連続した複数回の強震が発生すると、最初の地震によって損傷が生じた構造物が再び塑性域に達する振幅を受けることも想定される。そこで本家乳では、連続した複数回強震を模擬した静的繰返し載荷による複合非線形FEM解析を行い、鋼製橋脚の複数回連続強震に対する耐荷性状を把握することを目的とした。ここでは、既設の鋼製橋脚を対象とし無補剛の薄肉箱型断面にモデル化し、座屈パラメータとして幅厚比パラメータを考慮した。結果として、幅厚比パラメータが大きいほど、また各サイクルにおける繰返し数が多いほど繰返し履歴による耐力低下が大きくなることが確認できた。

Key Words: steel bridge pier, multiple continuous strong earthquakes, non-linear FE analyses

1. はじめに

2016年熊本地震では、4月14日に続いて16日にも震度7の強震が発生、これを含め震度6弱以上で7回、震度5強以上では12回もの強震が観測された。このように連続した複数回の連続した強震を構造物が受けると、当初の地震により一旦損傷が生じた後にも、複数回の塑性域に及ぶ強度を有した強震を履歴することとなり、耐力低下などを引き起こすことが懸念される。現状の設計基準においてこれらは考慮されておらず、研究事例も少ない状況にある。

これまでに著者らは、2011年東北地方太平洋沖地震に代表されるような海溝型巨大地震を想定した長時間継続地震動による、構造物の耐力低下に与える影響を検討してきた¹⁾²⁾。そこでは都市高速道路の高架橋に用いられるような鋼製橋脚を対象とし、最大荷重履歴後の長時間継続の地震動によって局部座屈が進展することで、弾性範囲の繰り返し履歴でも耐力低下が生じること、これらの影響に与える座屈パラメータの影響などを明らかにしている。

また、バイリニア型移動硬化則と修正二曲面モデルの

2種類の材料構成則が耐力低下に及ぼす影響についての検討³⁾⁴⁾も行い、修正二曲面モデルの方が実験結果⁵⁾の再現性が高いことなども示した。

これらの検討を元にして、熊本地震以降、複数回連続強震を受ける鋼製橋脚を対象とし、解析的検討によって繰返しによる耐力低下に関して行っている。

本研究では、連続した複数回強震を模擬した載荷パターンを考慮し、正負交番漸増載荷による複合非線形FEM解析により、既設鋼製橋脚の耐荷性状を検討することを目的とした。既報⁶⁾に示した同じ強度の強震が3回連続生じることを想定した載荷パターンに加え、余震では地震動強度が小さくなる影響や継続時間の長短を模擬した載荷パターンに関して耐荷性状に与える影響を、加えて座屈パラメータの影響も検討した。

2. 解析モデル

本研究では、汎用有限要素解析ソフトウェアDIANA 10.1を用いて、幾何学および材料非線形を考慮した複合非線形解析により検討を行った。

(1) 解析モデル

都市高速道路に用いられる既設の鋼製橋脚を対象とし、より厳密な断面を再現するため、橋脚全体を曲面シェル要素（板厚方向には7分割）でモデル化した。ここではモデルの断面形状を簡略化することや、リブ配置による局部座屈の発生形状の違いなどの影響を除外するため、補剛材やダイヤフラムを有しない薄肉箱型断面形状とした。初期たわみや残留応力などの初期不整は考慮していない。

幅厚比パラメータの影響を考慮するため、 $R_f=0.60$, 0.55 , 0.50 の3つのモデルを作成した。現行の設計基準⁹⁾で考えると若干大きめの幅厚比パラメータとなっているが、既設橋脚を対象としていることから、局部座屈に与える影響が大きいと考えられる幅厚比パラメータの値とした。細長比パラメータ $\bar{\lambda}=0.35$ で一定とした。

図-1に解析モデル図を、表-1に各モデルの構造諸元をそれぞれ示す。解析モデル基部（z方向最下端）を完全固定とした。

(2) 材料特性および構成則

解析に用いた材料特性は文献¹⁾を参考にして、各モデル共通に表-2のように設定した。また、材料構成則は複数回連続強震に対する鋼材の弾塑性履歴を確認するため、非線形特性をバイリニア型、ひずみ硬化則を移動硬化則とした。降伏条件にはvon Mises塑性モデルを適用し、二次剛性を $E/100$ とした。

3. 荷重パターン

初期状態として、上部構造の質量相当の軸力をモデル最上面中央節点のZ軸方向に与えた。この節点は、シェル要素上端にある各節点と剛体要素で結合させている。その後、同じ節点のY軸方向に橋脚の水平変位として強制変位を与える。この強制変位は後述の4パターン作成した。同等の規模の強震が3回続けて発生したと仮定し、3サイクル連続の強震を模擬した荷重パターンとしている。また、1回の強震（加振）において継続時間の長短を考慮するため、各サイクルにて3周期同じ変位を繰返すものと2周期繰返すものを考慮した。各荷重パターン名称は表-3の通りとする。

(1) パターンA

最初の強震で局部座屈が生じ、最大耐力を履歴した後、に最大耐力の90%耐力まで低下するような地震動強度を考える。 $R_f=0.60$, 0.55 , 0.50 で、それぞれ、水平変位 $\delta_y=3.5$, 3.5 , 4.0 まで変位履歴を与えることとなる。そ

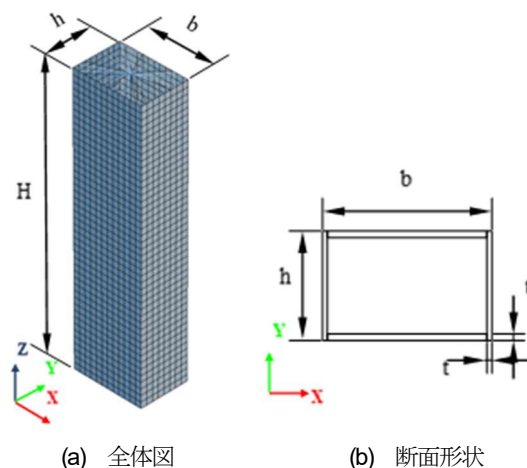


図-1 解析モデル図

表-1 解析モデル 構造諸元

解析モデル		A	B	C
橋脚高さ H	mm	681	669	612
フランジ幅 b	mm	184	168	154
ウェブ幅 h	mm	122	112	102
板厚 t	mm	6.5		
幅厚比パラメータ R_f		0.60	0.55	0.50
細長比パラメータ $\bar{\lambda}$		0.35		
降伏曲げモーメント M_y	N・mm	4.57×10^7	4.38×10^7	3.65×10^7
降伏水平荷重 H_y	N	6.71×10^4	6.54×10^4	5.96×10^4
降伏水平変位 δ_y	mm	3.65	3.84	3.53

表-2 材料特性

ヤング係数 E N/mm ²	ポアソン比 ν	質量密度 ρ g/mm ³
2.06×10^5	0.273	7.7×10^3

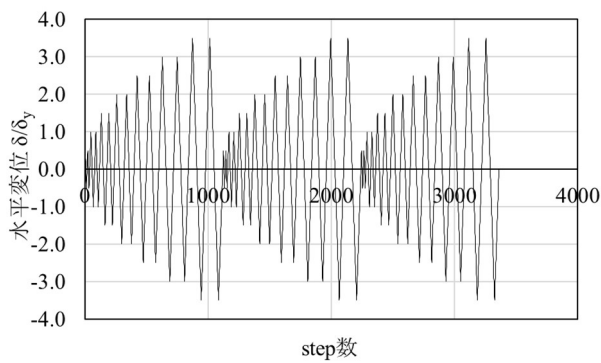
表-3 荷重パターン名称

荷重パターン	同変位の繰返し回数		与える最大変位振幅	入力強度低下考慮の有無
	3回	2回		
A	A-3	A-2	90%耐力変位	無
B	B-3	B-2	90%耐力変位	有
C	C-3	C-2	最大荷重時変位	無
D	D-3	D-2	最大荷重時変位	有

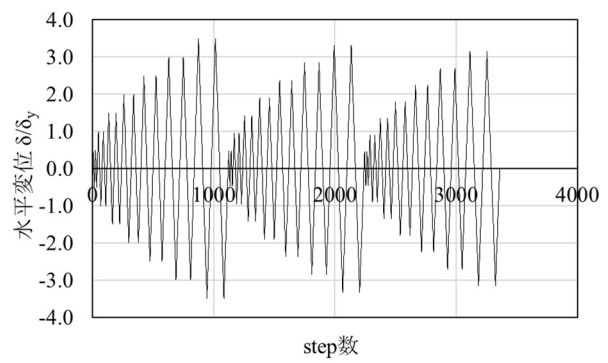
の後、同じ地震動強度を有する強震が2回発生するような複数回連続強震を模擬した荷重パターンとした。図-2(a)に $R_f=0.60$ の場合の荷重パターンを示す。

(2) パターンB

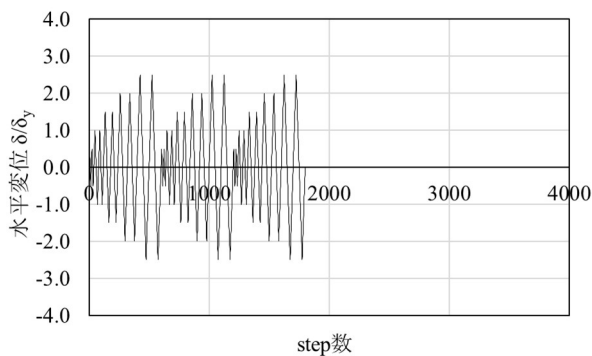
パターンAと同様、最初の地震動強度として、最大耐力履歴後90%まで耐力が低下する変位振幅とした。2サイクル目の変位振幅は1サイクル目の95%、同様に3サイクル目は90%の変位振幅とした。これは、本震とされる



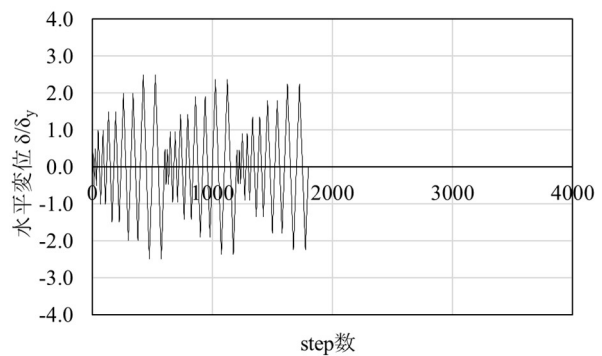
(a) パターンA-2 ($R_f=0.60$)



(b) パターンB-2 ($R_f=0.60$)



(c) パターンC-2 ($R_f=0.60$)



(d) パターンD-2 ($R_f=0.60$)

図-2 载荷パターン

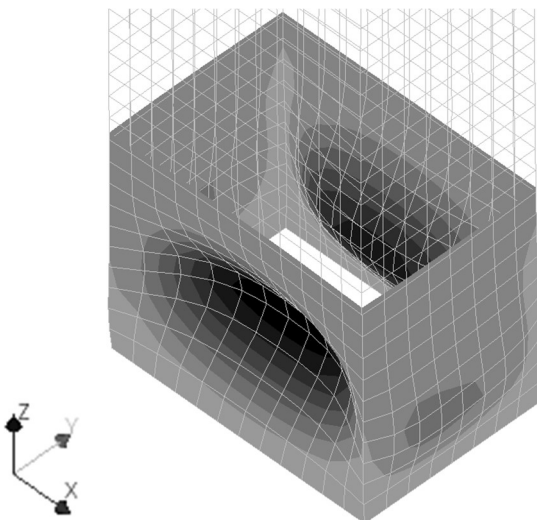


図-3 モデル基部における変形図

最大震度を経験した後、本震よりも最大強度の小さい余震が2度生じた場合を念頭に置いている。 $R_f=0.60$ の場合の载荷パターンを図-2(b)に示す。

(3) パターンC

図-2(c)に示すように、最大耐力を履歴する変位振幅となるような強度を有する地震動を考える。パターンCはパターンAよりも繰り返し変位振幅が小さい地震動を想

定している。 $R_f=0.60$, 0.55 , 0.50 いずれにおいても、 $\delta/\delta_y=2.5$ である。

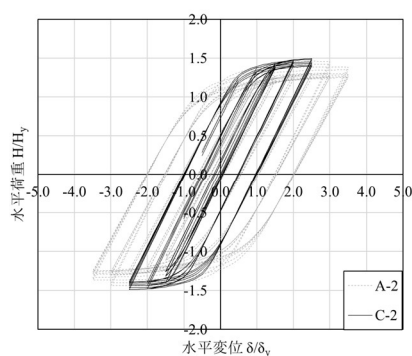
(4) パターンD

パターンCと同様、初期の地震動は最大耐力を履歴する変位振幅となる強度を考え、その後の2サイクル目、3サイクル目はパターンBと同様、初期地震動よりも小さな強度を有する余震を考慮するものとし、それぞれ95%、90%となる変位振幅を与えるものとした。 $R_f=0.60$ の場合の载荷パターンを図-2(d)に示す。

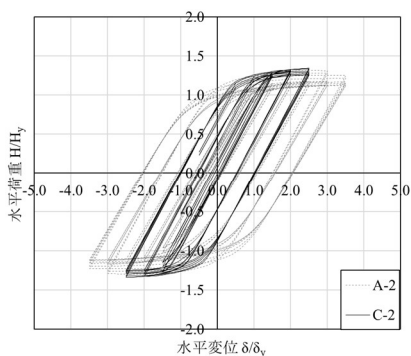
4. 解析結果

複数回連続強振として、同規模の地震強度を有する前震・本震・余震を想定し、表-3に示したような载荷パターンを与えた。同振幅に対して3周期と2周期繰り返すパターンを検討したが、鋼製橋脚の耐力低下に関してほぼ同様の傾向を示したため、ここでは継続時間が短い地震動として2回ずつ同振幅を繰り返す载荷パターンを中心に考察する。

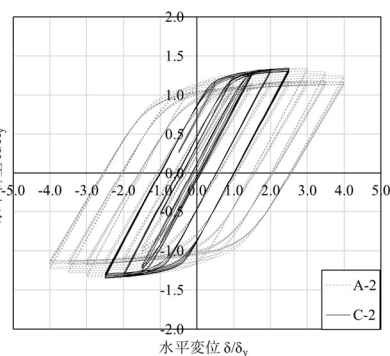
$R_f=0.60$ のモデルにおける载荷パターンA-2の3サイクル目終了時のモデル基部変形図を図-3に示す。変形倍率を



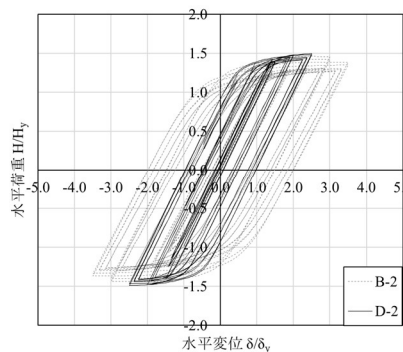
(a) パターンAとC



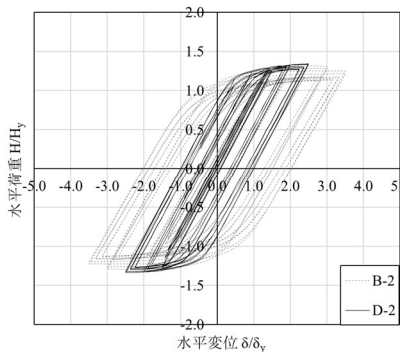
(a) パターンAとC



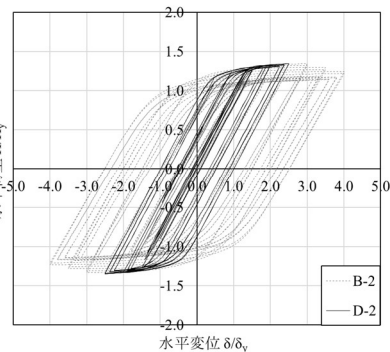
(a) パターンAとC



(b) パターンBとD



(b) パターンBとD

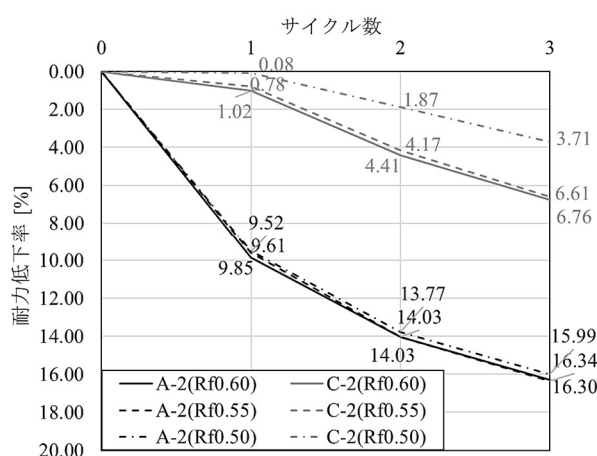


(b) パターンBとD

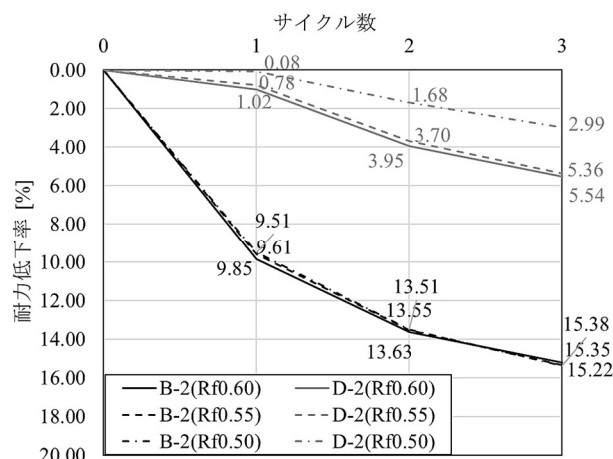
図4 荷重-変位関係 ($R_f=0.60$)

図5 荷重-変位関係 ($R_f=0.55$)

図6 荷重-変位関係 ($R_f=0.50$)



(a) 载荷パターンAとCの比較



(b) 载荷パターンBとDの比較

図7 耐力低下率

5倍として示している。フランジには凹型局部座屈が、ウェブには凸型局部座屈が発生していることがわかる。この局部座屈が連続して入力される強震によって進展していくことを確認している。

(1) 荷重-変位関係の比較

最も局部座屈が発生しやすく、荷重低下の影響が大きいと考えられる幅厚比パラメータ $R_f=0.60$ の場合の荷重-変位関係に関して、3サイクルとも同振幅のパターンA-2とパターンC-2を比較したものを図4(a)に、サイクル毎

に入力強度が低下するパターンB-2とパターンD-2を比較したものを図4(b)に示す。同様に、 $R_f=0.55$ の場合の荷重-変位関係を図5(a), (b)に、 $R_f=0.50$ の場合の荷重-変位関係を図6(a), (b)にそれぞれ示す。

図4～図6より、最大荷重履歴までは、最大耐力の90%まで低下する変位振幅を与える载荷パターンも、最大荷重を履歴する変位振幅とした载荷パターンでも、荷重の包絡曲線はほぼ同様となっていることがわかる。しかし、最大荷重を履歴する $\delta/d_y=2.5$ の変位振幅において比較すると、2サイクル目、3サイクル目と複数回の振幅

を履歴することで耐力低下の生じていることがわかる。これは、各サイクルにおいて $\delta/\delta_y=3.5$ までの大きな変位振幅を受けることで局部座屈の進展が生じているためと考えられる。

(2) 耐力低下に関する考察

同一振幅での繰り返し载荷による同じ変位において、初期の载荷からの耐力低下の割合を求め、サイクル毎の低下率を示したものを図-7に示す。

図-7より、最大荷重の90%まで耐力が低下する変位振幅まで载荷するパターンAとCは、1サイクル目で9.5%程度以上、3サイクル目では15~16%程度の耐力低下率となっている。一方、最大荷重履歴までの変位振幅を与えた载荷パターンBとDでは、1サイクル目では1%未満とほとんど耐力低下は生じていないが、3サイクル目では3~6%程度の耐力低下となっていることがわかる。これらは、より大きな最大荷重を超えるような大きな変位履歴により局部座屈の影響が大きく生じたためと考えられる。

つぎに、幅厚比パラメータで比較すると、どの载荷パターンにおいても局部座屈が生じやすいと考えられる $R_f=0.60$ がもっとも耐力低下が大きく、 $R_f=0.50$ が最も小さくなっているが、これらの差異は小さい。より小さな幅厚比パラメータでの検討も必要と思われる。

本震後の余震による繰り返し強震として、同程度の入力強度の場合と、本震より95%、90%と入力強度が小さくなる場合を考えたが、この程度の入力強度の差異であれば、繰り返し強震による耐力低下率にはあまり大きな影響は生じなかった。

5. 結論

既設の鋼製橋脚を対象とした複合非線形FEM解析を行った結果、複数回連続強震を受ける鋼製橋脚の耐荷性状に関して、最大荷重を超え90%耐力となるような変位振幅をもつ载荷を繰り返し与えた場合、繰り返し強震によりサイクル毎に最大耐力は低下し、1サイクルでも10%

弱、3サイクルでは15%強の耐力低下率となることを示した。

本研究では、考慮した複数回連続強震を模した载荷パターンの検討は十分ではない。例えば余震として考慮すべき入力強度や同一振幅での繰り返し数などもより詳細に検討する必要がある。また現状で規定されているような幅厚比パラメータ有する鋼製橋脚を対象とした検討などが課題であるといえる。

謝辞：本研究はJSPS科研費JP17H03297の補助を受けた。また鋼製橋脚のモデル化に際して、関東学院大学大学院反田敦也氏の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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書, pp.291-296, 2008.
- 2) 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, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.71, No.4, 地震工学論文集, Vol.34, pp.1-807-1-814, 2015.
- 3) 北原武嗣, 大谷友香, 岸祐介, 葛西昭: 連続した複数回強震や長時間地震を想定した繰り返し振幅による鋼製橋脚の耐力低下, 第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.549-552, 2016.
- 4) 反田敦也, 北原武嗣, 大谷友香: 複数回連続強震を受ける鋼製橋脚の耐荷性状に関する解析的検討, 第45回土木学会関東支部技術研究発表会, pp.1-67, 2018.
- 5) 宇佐美勉, 坂野 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.39A, pp.235-247, 1993.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋・鋼部材編, 丸善, 2017.

LOAD-BEARING PROPERTIES OF STEEL BRIDGE PIERS SUBJECTED TO MULTIPLE CONSECUTIVE STRONG GROUND MOTIONS

Ryo SUDO, Takeshi KITAHARA and Yuka OHTANI

In the 2016 Kumamoto earthquake, strong ground motions occurred consecutive within a few days. According to the Japan Meteorological Agency, earthquakes with JMA seismic intensity of 6- or more were observed 7 times. When multiple consecutive strong earthquakes occur, the structure damaged by the first earthquake will again undergo amplitude reaching the plastic zone.

This study evaluated load-bearing characteristics of existing steel bridge piers by non-linear FE analyses using static cyclic-load simulating multiple sequential strong motions. In numerical calculation, 3 target steel piers with the different of width-thickness ratio parameter and slenderness ratio parameter as buckling parameter were prepared. These piers were the simple box type cross-section without ribs and the width-thickness ratio parameter were 0.50, 0.55, and 0.60. As a result, it is found that the load-bearing capacity decreases with cyclic loading as the width-thickness ratio parameter is larger and the number of loading in each cycle is larger.