

複数回連続強震を受ける鋼製橋脚の 耐荷性状に関する一検討

須藤 遼¹・反田 敦也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）

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）

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）

1. はじめに

2016年熊本地震では、数日のうちに震度7が2回、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強震を構造物が受けると、一旦軽微な損傷が生じた後にも再度、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。

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を示している。その後、複数回連続強震を受ける既設鋼製橋脚に関して、上記の観点から検討を行っている^{3), 4)}。

本研究では、連続した複数回強震を模擬した载荷パターンを考慮し、正負交番漸増载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^{5), 6)}を検討することを目的とした。既報⁴⁾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载荷パターンに加え、余震では地震動強度が若干小さくなる影響や継続時間の長短を模擬した载荷パターンに関して耐荷性状に与える影響を検討した。

2. 解析概要

本研究では、汎用有限要素解析ソフトウェア DIANA 10.1による複合非線形解析を行った。

(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、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、座屈パラメータに与えるリブ配置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正は考慮していない。

幅厚比パラメータの影響を考慮するため、 $R_f=0.6, 0.55, 0.50$ の3つのモデルを作成した。現行の基準で考えると大きな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ため、局部座屈の影響が大きいと考えられるこれらの値とした。細長比パラメータ $\lambda=0.35$ で一定とした。

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

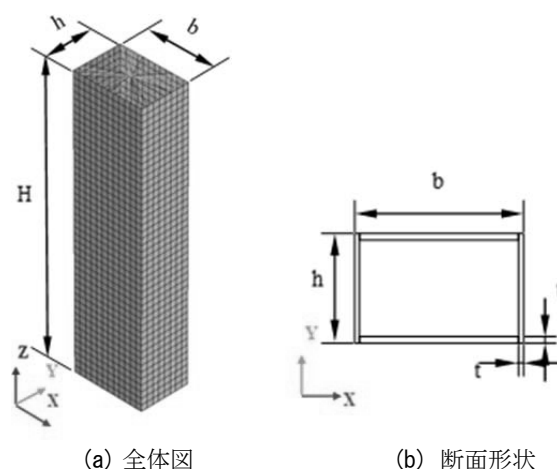


図-1 解析モデル図

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

(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。

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

3. 載荷パターン

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載荷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周期同じ変位を繰り返すものと2周期繰り返すものを考慮した。各載荷パターン名称は表-3の通りとする。

表-3 載荷パターン名称

載荷パターン	同変位の繰り返し回数		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

(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。 $R_f=0.6, 0.55, 0.5$ で、それぞれ、水平変位 $\delta/\delta_y=3.5, 3.5, 4.0$ まで変位履歴を与えることとなる。その後、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載荷パターンとした。図-2(a)に $R_f=0.6$ の場合の載荷パターンを示す。

(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、本震とされる最大震度を経験した後、本震よりも弱い余震が2度生じた場合を念頭に置いている。 $R_f=0.6$ の場合の載荷パターンを図-2(b)に示す。

(3) パターンC

図-2(c) ($R_f=0.6$ の場合) 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Aよりも繰り返し変位振幅が小さい地震を想定している。 $R_f=0.6, 0.55, 0.5$ 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。 $R_f=0.6$ の場合の載荷パターンを図-2(d)に示す。

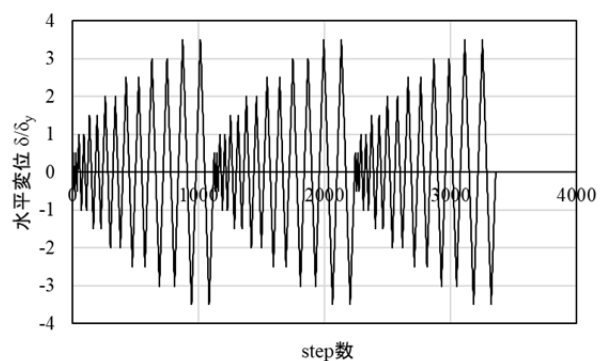
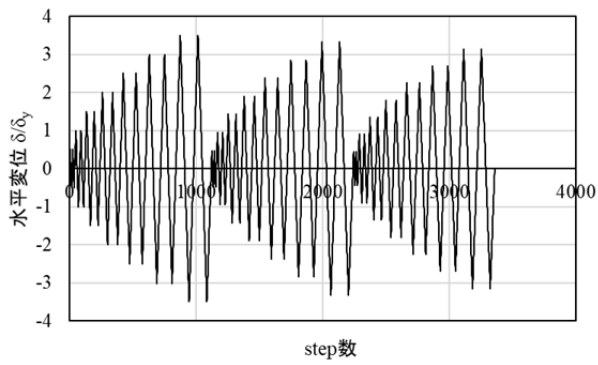
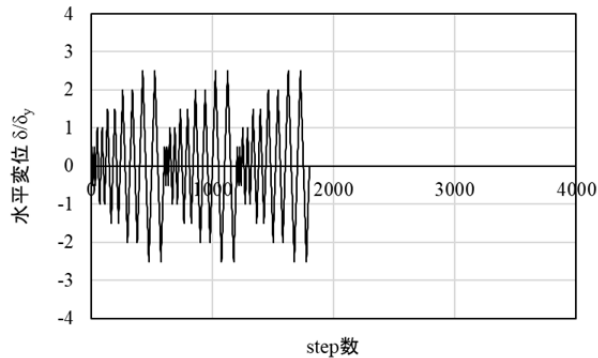
(a) パターンA-2 ($R_f=0.6$)

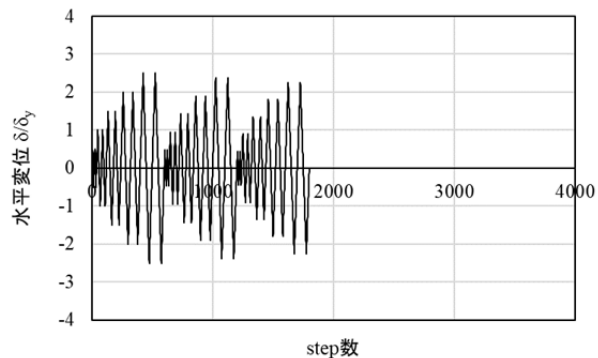
図-2 載荷パターン



(b) パターンB-2 ($R_f=0.6$)



(c) パターンC-2 ($R_f=0.6$)



(d) パターンD-2 ($R_f=0.6$)

図-2 荷重パターン (続き)

4. 解析結果と考察

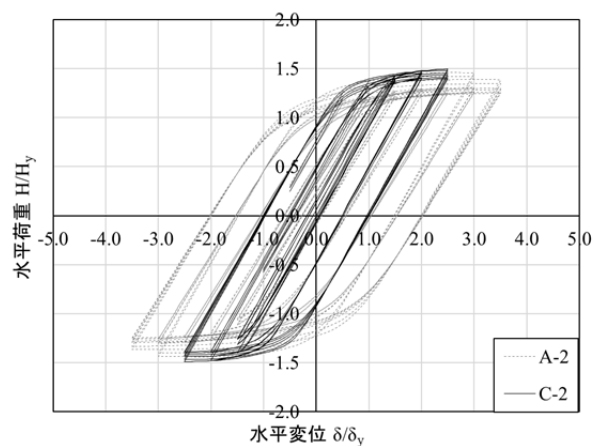
複数回連続強震として、同規模の地震強度を有する前震・本震・余震を想定し、表-3に示したような荷重パターンを考えた。同振幅に対して3周期と2周期繰り返すパターンを検討したが、ここでは継続時間が短い地震動として2回ずつ同振幅を繰り返す荷重パターンを中心に考察する。

(1) 荷重-変形関係の比較

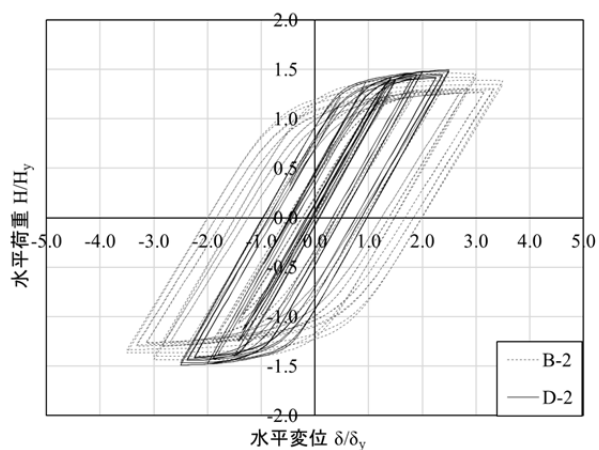
最も局部座屈が発生しやすく、荷重低下の影響が大きいと考えられる幅厚比パラメータ $R_f=0.6$ の場合の荷重-変形関係に関して、3サイクルとも同振幅の

パターンA-2とパターンC-2を比較したものを図-3(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-3(b)に示す。

図-3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荷重パターンも、最大荷重を履歴する変位振幅とした荷重パターンでも、荷重の方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 $\delta/\delta_y=2.5$ 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。



(a) 荷重パターンAとCの比較



(b) 荷重パターンBとDの比較

図-3 荷重-変位関係 ($R_f=0.6$)

(2) 耐力低下率に関する考察

つぎに、同一振幅での繰り返し荷重により同じ変位において、初期の荷重からの耐力低下の割合を求め、各サイクル毎にその低下率を示したものを図-4

に示す。

図-4より、最大荷重の90%まで耐力が低下する変位振幅まで載荷するパターンAとB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載荷パターン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、どの載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 $R_f=0.6$ がもっとも耐力低下が大きく、 $R_f=0.5$ 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. まとめ

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載荷を繰り返し与えた場合、繰り返し強震により各サイクルごと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。余震として考慮する入力強度や幅厚比パラメータのさらなる検討が課題と考えている。

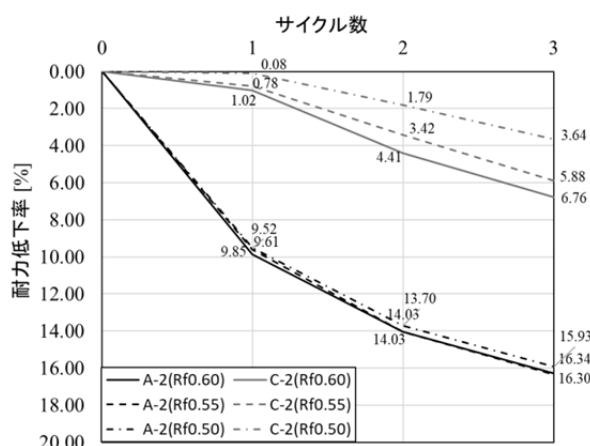
謝辞：本研究の実施には、JSPS科研費JP18K04332とJP17H03297の補助を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

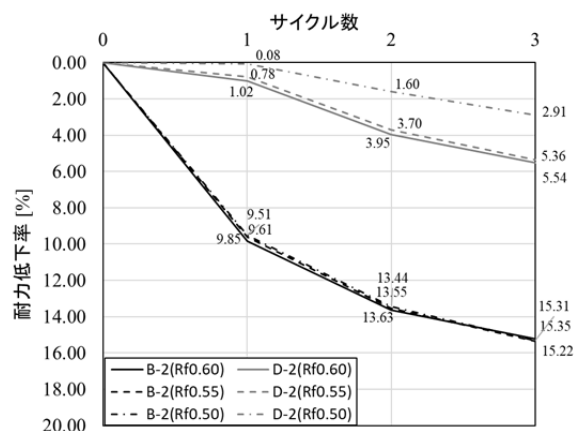
- 1) 田中賢太郎，北原武嗣，山口隆司，吉田隆信：長継続時間地震動を考慮した鋼製橋脚の耐荷性能の実験的検討，第16回鋼構造年次論文報告書，pp.291-296，2008。
- 2) 北原武嗣，岸祐介，鈴木拓馬，山口隆司：長時間地震動が作用する鋼製橋脚の耐力低下に関する解析的

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.I_807-I_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) 鈴木森晶，宇佐美勉，寺田昌弘，伊藤努，才塚邦弘：鋼製箱形断面橋脚の復元力モデルと弾塑性地震応答解析，土木学会論文集，No.549，I-37，pp.191-204，1996。



(a) 載荷パターンAとCの比較



(b) 載荷パターンBとDの比較

図-4 耐力低下率