

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

北原武嗣¹・大谷友香²・岸祐介³・葛西昭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 横浜市金沢区六浦東1-50-1）

²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）

³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）

⁴正会員 博(工) 熊本大学大学院准教授 自然科学研究科（〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1）

1. はじめに

2016年4月14日に熊本地方で発生したM6.5の地震では益城町において震度7を観測した。2日後の4月16日、再び熊本地方でM7.3の地震が発生し、益城町や西原村などで震度7、震度6強や震度6弱の地点も複数観測された。この一連の地震では、表-1に示すように震度6弱以上が7回、震度5弱以上では18回の大きな揺れが続けざまに発生した。

表-1 震度6弱以上の地震（気象庁発表）

日時	震源地	マグニチュード	最大震度
4/14 21:26	熊本地方	6.5	7
4/14 22:07	熊本地方	5.8	6弱
4/15 0:03	熊本地方	6.4	6強
4/16 1:25	熊本地方	7.3	7
4/16 1:46	熊本地方	6.0	6弱
4/16 3:55	阿蘇地方	5.8	6強
4/16 9:48	熊本地方	5.4	6弱

4月14日の前震（と言われている地震）では、倒壊などの大きな損傷を免れた構造物も、16日に続けて襲われた強震によって大きな被害に進展したと考えられる被害も見受けられた。今後も、今回の熊本地方で発生した地震群のように、大きな規模の地震が複数回連続して発生する危険性があるといえる。軽微な被害を受けた後、連続して発生する地震によって繰返し振幅を受け損傷が進展する挙動を把握するため、材料、部材および構造物としての繰返し耐力劣化に関する検討を行うことが重要な課題になってくると考えられる。

一方、2011年東北地方太平洋沖地震では数分間に

も及ぶ長時間地震動が観測された。今後発生が懸念される海溝型巨大地震では、東北地方太平洋沖地震と同様に数百秒にも及ぶ長時間地震動となり数十回以上のオーダーとなる繰返し振幅を構造物が履歴することが考えられる。

以上を考慮すると、連続する複数回強震や長時間地震による繰返し振幅が、構造物の耐力低下に与える影響について把握することは、今後の耐震設計において意義のある検討であるといえる。

著者らはこのような観点のもと、特に、長時間地震動を受ける鋼製橋脚を対象として、軽微な損傷を受けた後の繰返し振幅による耐力低下に関して、実験的・解析的検討を行ってきた¹⁾²⁾。そこでは、幅厚比パラメータや繰返し履歴回数と耐力低下の関係について検討してきた。今回は、構成則として材料の繰返し劣化も精度良く表現できる修正二曲面モデルを用いて検討した結果を報告する。

2. 解析概要

(1) 解析モデル

既往の研究¹⁾²⁾と同様、図-1に示す橋脚の全長に対し基部より約1/3程度の高さまでを曲面シェル要素、上部2/3程度をはり要素でモデル化した。また、橋脚モデル断面の対象性を考慮し、橋脚高さ方向に対して断面1/2部分のみをモデル化した。また、既設の鋼製橋脚を参考に、幅厚比パラメータ $R_f=0.66, 0.52, 0.32$ 、細長比パラメータ $\lambda=0.37$ とした。表-2に各モデル構造諸元を示す。なお、今回は $R_f=0.66$ のモデルAの解析結果についてのみ報告する。

(2) 材料構成則

解析における材料構成則として、バイリニア型による移動硬化則と、鋼材の繰り返し履歴を精度良く再現可能な修正二曲面モデル^{3),4)}を用いて検討を行った。修正二曲面モデルとは Dafalias・Popov モデルを基に、累積相当塑性ひずみ概念の導入、記憶曲面と仮想曲面の導入などの修正を行ったものである(図-2 参照)。

図-3 に示した材料試験の結果および文献 3), 4) を参考にしてパラメータを設定した。表-3 に材料構成則の主なパラメータを示す。ケース 1 は文献 3) および 4) において、SS400 材として用いられているパラメータ値である。一方、今回の解析対象では、繰り返し回数やひずみレベルが文献 3) や 4) とは異なる。他数回の繰り返しにおいては、降伏曲面の減少の影響は徐々に小さくなっていくと考え、ケース 2 のパラメータを設定した。

(3) 境界条件と载荷パターン

基部部分の並進および回転方向の6自由度を拘束した。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。その条件のもと、橋脚モデル上部の水平方向に図-4に示すような漸増+繰り返し型の強制変位を与えた。繰り返し部分の振幅においては、初等はり理論における $2\delta_y$ 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。

文献1)において、海溝型巨大地震を想定した模擬地震動によるハイブリッド実験を実施した結果を参考に、設定した载荷パターンである。熊本地震のような連続して発生する複数回の強震においては、異なった载荷パターンによる検討も必要になると考えられる。

今回は、これまでの検討と同様、図-4に示す载荷パターンのうち、30回の繰り返し部分では、両振幅 $1.8\delta_y$ のパターンのみ検討するものとした。これは、連続した複数回の強震では、ある程度大きな規模の振幅を繰り返し履歴すると考えたからである。

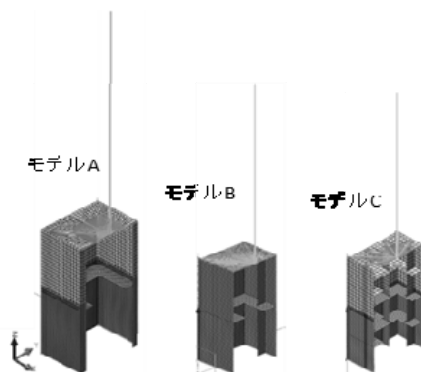


図-1 解析モデル

解析モデル	A	B	C
橋脚高さ(mm)	1572	1192	1190
降伏強度 σ_y (N/mm ²)	329.0		
ヤング率 E(N/mm ²)	2.06×10^5		
幅厚比 R_f	0.66	0.52	0.32
細長比 $\bar{\lambda}$	0.37		

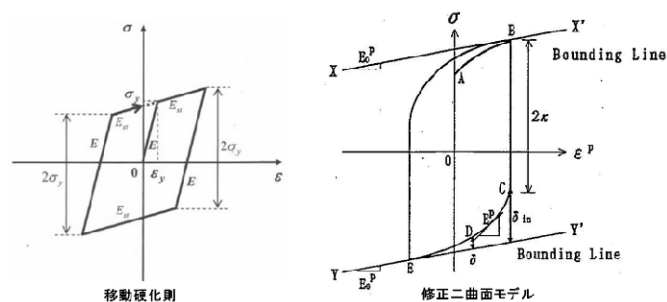


図-2 構成則の概念

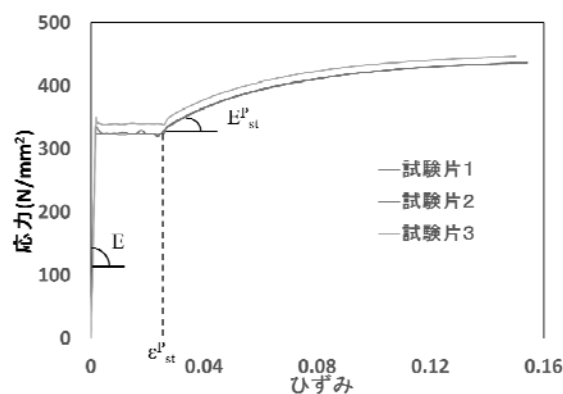


図-3 材料試験結果

表-3 修正二曲面モデルパラメータ値

	ケース 1	ケース 2
E^p_{ST}/E	0.01	0.01
σ_y (MPa)	3.29×10^2	3.29×10^2
ϵ^p_{st}	0.016	0.025
σ_u/σ_y	1.34	1.35
a	-0.505	-0.9
α	0.191	0.35

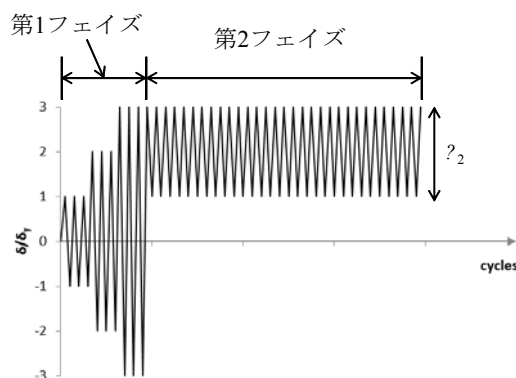


図-4 载荷パターン

3. 解析結果

図-5 に荷重－変位関係を、図-6 に繰り返し部分の拡大図を示す。図中、破線で実験結果を、青線でケース 1、赤線でケース 2 の結果を示している。これらの結果から、修正二曲面モデルの両ケースはどちらも全体的に実験の荷重－変形関係をよく再現できているといえる。拡大図をみるとケース 2 の方が実験結果の再現性が高いようにみえる。すなわち、修正二曲面モデルにおけるパラメータの設定が重要といえる。このため、材料実験等を実施してより適切かつ論理的な説明のつくパラメータ設定方法を検討することが必要といえる。

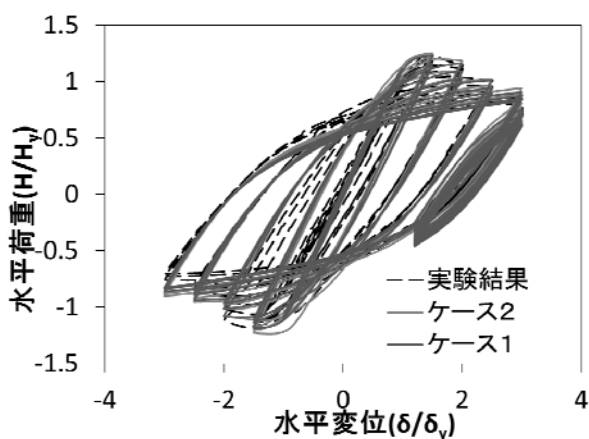


図-5 荷重－変位関係

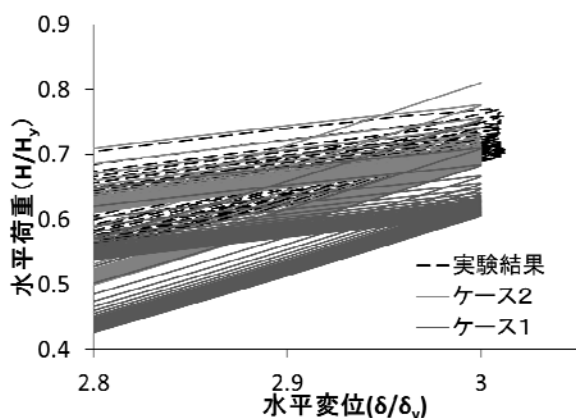


図-6 荷重－変位関係（拡大図）

着目する 30 回の繰り返し部分において、繰り返し回数により耐力低下が増加する関係を示したものが図-7 である。図中、破線で実験結果、青線でバイリニア、赤線でケース 2 の結果を、また参考のため、構成則として移動硬化型バイリニアとして検討した結果を茶線で示している。

全体的な傾向としては、実験結果およびどの構成則による解析結果もほぼ同様の結果を示している。繰り返し実験では 30 回の繰り返し载荷によって

10%程度の耐力低下が生じたが、移動硬化型バイリニアでは 3%程度、修正二曲面のケース 1 では 20%弱、ケース 2 では 15%程度の耐力低下となった。繰り返し履歴を受ける鋼製橋脚の耐震性能を考慮すると、移動型バイリニアでの検討では危険側、修正二曲面では安全側の評価になっているといえる。

これまでの著者らの検討により、繰り返しによる耐力低下の要因は、局部座屈の進展と材料としての降伏曲面の減少であると考えている。移動硬化型バイリニアでは降伏曲面の減少が考慮できないために、実験より小さな耐力低下となっている。

一方、修正二曲面では降伏曲面の減少が考慮できるが、現状用いているパラメータによる解析結果では、この降伏曲面の減少が過大評価され、実験による耐力低下よりも大きな耐力低下が生じていると考えられる。修正二曲面モデルのパラメータとして 2 ケースの解析を実施したが、降伏曲面の減少を小さく評価するパラメータのケース 2 の結果の方が、耐力低下がケース 1 よりも小さくなったことが、この傍証といえる。今後、本研究のように、累積塑性ひずみが過大、かつ繰り返し回数が大きくなるような領域に用いるべき修正二曲面モデルのパラメータ再検討が必要といえる。

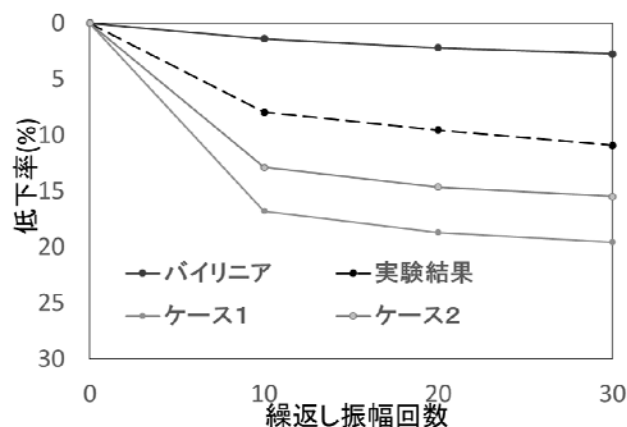


図-7 耐力低下

4. 結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 長時間地震動を受ける鋼製橋脚の耐力低下に対して、数値解析用いる構成則の影響は大きい。
- (2) 移動硬化型バイリニアモデルでは材料特性として降伏曲面の減少を考慮できず、実験結果より耐力低下を過小評価すると考えられる。降伏曲面の現象を考慮できる修正二曲面モデルでは実験結果より耐力低下が大きく、安全側の評価といえる。

- (3) 修正二曲面モデルのパラメータ，特に，降伏曲面の減少に影響するパラメータの設定が，繰返し履歴による耐力低下に大きく影響する．

今回は，既往の検討をベースとしたため，載荷パターンは長時間地震動を模したものであった．2016年熊本地震のように，連続して複数回の強震を履歴するような状況における載荷パターンも考慮し，一旦軽微な損傷を受けた後に，数十回を超える繰返し履歴を受ける構造物の耐力低下を定量的に評価できるような検討を続けていくことが重要な課題であると認識している．

謝辞：本研究を実施するにあたり，科学研究補助金（基盤研究(B) 26289143，代表：杉戸真太教授）の助成を受けた．また，当時関東学院大学大学院生鈴木拓馬氏，関東学院大学卒研究生 室谷亮太氏には数値解析に関して協力頂いた．ここに記して謝意を表す．

参考文献

- 1) 田中賢太郎，北原武嗣，山口隆司，吉田隆信：長周期・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荷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) 水野英二，沈赤，宇佐美勉，鋼素材に対する修正二曲面モデルの一般定式化，構造工学論文集 Vol.40A，pp235-248，1993．
- 4) 葛漢彬・高聖彬・宇佐美勉・松村寿男：鋼製パイプ断面橋脚の繰返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究，土木学会論文集 No.577/I-41，181-190，1997.10．