

ミャンマーに位置する鋼アーチ橋 の数値解析による耐震性能評価

大城 雄希¹・松村 政秀²・杉浦 邦征³

¹ 学生員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: ooshiro.yuuki.73e@st.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 熊本大学教授 くまもと水循環・減災研究教育センター (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪
2丁目39番1号)

E-mail: matsumura-m@kumamoto-u.ac.jp

³ 正会員 京都大学教授 工学研究科 (〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

本研究では、これまでに大きな地震が何度か発生してきたミャンマーに位置する、鋼アーチ橋の耐震性能を評価することを目的とする。ミャンマーは大地震を含む地震の多い国であり、対象橋梁はその中でもミャンマーの定める指針によって最も地盤加速度の大きい地震に対して厳しい地域に位置する。そのような地域に位置する対象橋梁の耐震性能を評価し、今後想定される地震に耐えられるかを判断する。

対象橋梁の振動特性を把握するために、現地振動実験を実施し加速度計から得られた結果を基に固有振動数および振動モードを求めた。また、有限要素モデルを用いた固有値解析を実施し得られた結果と現地振動実験により求めた結果の比較から、解析モデルの妥当性を検証した。その後、解析モデルに対しブッシュオーバー解析を実施し、各種部材の降伏状態から橋梁の降伏シナリオを解明した。

Key Words: Myanmar, numerical analysis, arch bridge, seismic performance

1. 緒言

(1) ミャンマーにおける橋梁調査

ミャンマー連邦共和国 (以下ミャンマー) は東南アジアのインドシナ半島西部に位置し、人口は約 5100 万人、面積は約 68 万 km² の国家である。国土はベンガル湾とアンダマン海に面し、隣国としてはタイ、ラオス、中国、インド、バングラデシュを持ち、長い海岸線と国境線を有する。現在ミャンマーでは多くの橋が使用されており、国土中央を南北に流れるエーヤワディー川をはじめとする川幅の大きい河川には長大橋も採用されている。それらの橋梁は人々の往来や物流において非常に重要な役割を担っている。しかし、ミャンマーでは予算や技術、制度の確立といった観点から、橋梁の維持管理に問題を抱えている。過去の橋梁点検報告^{1) 2)}によるとコンクリート部材のひび割れや剥がれ、橋台の移動や伸縮装置の損傷、鋼材の腐食や破断等の数多くの問題が報告されている。特に、2018年4月には、ミャンマーエーワディ地方域ミャウンミャ県に架かる吊り橋において、橋梁の主ケーブルがアンカレイジ定着部にて腐食による破断が生じ、

吊っていた桁が落ちる事故が発生した。また、ミャンマーにおいて、2012年と2016年はマグニチュード6.8規模の地震が発生しており、経年劣化した構造物に対して重大な被害を及ぼす可能性がある。そのため、地震に耐える橋梁の補修補強方法の策定をすることは急務となる。

(2) 研究目的

本研究では、既存の橋梁の耐震性能評価を実施し、今後想定される大地震時に橋梁が耐えられるかどうかを検討する。耐震性能評価には有限要素法を用いた数値解析を使用し、解析モデルの妥当性の検証は橋梁の現地振動実験で得られた振動特性との比較により実施する。その後、ブッシュオーバー解析の結果に基づき、各部材の降伏状態から橋梁の損傷シナリオを解明する。ここで得られた結果を今後実施する橋梁の耐震補強設計に応用する。

(3) 対象橋梁

対象橋梁はマンダレーの西部に位置し、先に述べたエーヤワディー川に架かる非常に重要なインフラ施設である。ここに、Myanmar National Building Code 2016³⁾からミヤ

ンマーにおける各地の地盤加速度を図-1 に示す。また、図中に赤色で示される対象橋梁位置での地盤加速度は $0.4g - 0.5g$ となっており、ミャンマー国内で最大の値となっている。一方で、本橋梁は設計水平震度 0.1 で設計されたと考えられ、地盤加速度から考慮される応答加速度を想定すると小さい値だと考えられる。

また、本橋梁の全体概観図を図-2 に、橋梁諸元を表-1 に示す。これらの図表から分かるように、 $224m$ のアーチ3径間で構成される主径間と、 $112m$ のトラス2径間で

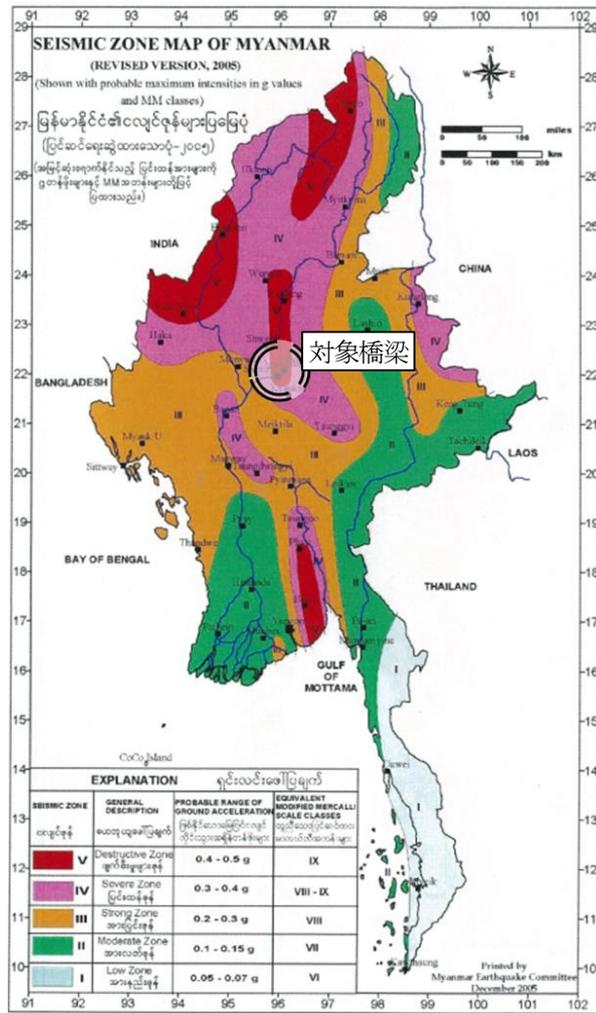


図-1 ミャンマー各地の地盤加速度

構成される側径間を有する橋梁形式となっている。

2. 現地振動実験

(1) 実験概要

走行車両により励起される橋梁の常時振動を計測するために 16 点の計測点に加速度計を設置した。加速度応答の計測には、高感度加速度計を用いた。本橋梁は、橋軸直角方向に対象である。また、 3 径間の支間中央で橋軸方向に対称であるが、境界条件のみ異なる。そのため、本実験では、限られたセンサ数、ケーブル長等の制約の中で最適な振動モニタリングを実施するために橋梁の半分にあたる 1.5 径間にのみ着目する。本橋梁はミャンマーのヤダナポン地域において交通量の多い重要な橋梁であり、交通規制を行うことができないため、多数の走行車両により励起される橋梁の常時振動を計測した。なお、本研究では、サンプリング周波数 $200Hz$ で計測された 900 秒間の振動データを用いて対象橋梁の振動特性を同定した。

橋梁の加速度応答から振動特性を同定する手法には、周波数領域の同定手法のひとつである FDD 法(Frequency Domain Decomposition)を用いた [エラー! 参照元が見つかりません。](#) FDD 法では、構造物の多点で測定した応答加速度のパワースペクトル行列を特異値分解することにより、固有モードの形状および振動数を同定する。この手法の特徴としては、狭い帯域にモードが密接するような場合でもモー

表-1 橋梁諸元

所在地	マンダレー-サガイン間, ミャンマー	
竣工年	2008 年	
橋梁形式	トラス + アーチ	
全長	1126m	
径間長	主径間 (アーチ)	$224m \times 3$
	側径間 (トラス)	$112m \times 2$
幅員	16.6m	
車線数	4 車線	

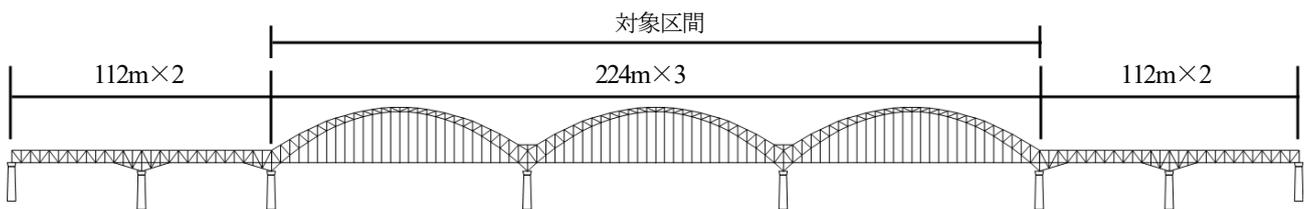


図-2 橋梁全体概観図

ド特性が同定可能である点である。

(2) 固有振動数およびモード形状

同定された固有振動数およびモード形状を図-3に示す。鉛直曲げモードは1次から3次であり、橋軸直角モードが1次から2次までを示す。次章で求める解析モデルを用いた固有値解析の結果と本結果を比較する。

3. 解析モデルの妥当性の検証

(1) モデル構築

本研究では、汎用 FEM 解析ソフトウェアである Abaqus CAE 2017 を使用し FE 解析を行った。モデルの作成は橋梁設計図面および施工図面を基に行い、地震時における挙動がより複雑であるアーチ部のみモデル化を行った。アーチ部とトラス部は非連続であるため、トラス部をモデル化しないことによるアーチ部への影響はないものとする。部材格点部は剛結とし、ガセットプレートやボルトといった結合部の詳細やダイアフラムのモデル化は省略した。また、図面に準拠した健全時のモデル

としている。FE モデルには主構造に 2 節点線形はり要素を使用し、部材の長さ方向に対して 10 分の 1 の長さでメッシュ分割を行った。ただし、アーチリブと下弦材を繋ぐ吊り材はメッシュ分割せずに 1 つの要素とした。これは、固有値解析を行う際に、吊り材のローカルなモードが大量に発生するのを防ぐためである。RC 床版は 4 節点線形シェル要素を使用し作成した。また、境界条件については、鋼製のローラー支承およびピン支承を模擬してそれぞれの方向に対して固定および移動の条件を与えた。

本解析にて、鋼部材および RC 床版に用いた材料特性を示す。使用した鋼材は中国で製造され橋梁、車両、船舶、その他幅広く利用されている Q345 材の中でも Q345C 材とした。これは、実際に橋梁に使用されている鋼材であり、その機械的性質は、密度 7850 kg/m³、弾性係数 200 GPa、ポアソン比 0.3、降伏応力 345 MPa、となっている。ここで、応力-ひずみ関係は 2 次勾配 E/100 のバイリニア型とした。また、RC 床版は、コンクリート部材として扱い、密度 2700 kg/m³、ヤング率 25GPa、ポアソン比 0.2 の弾性材料とした。使用した材料特性を表-2に示す。

表-2 解析モデルに用いた材料特性

	密度 (kg/m ³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	降伏応力(MPa)
鋼 (Q345c)	7,850	200	0.3	345
コンクリート	2,700	25	0.2	-

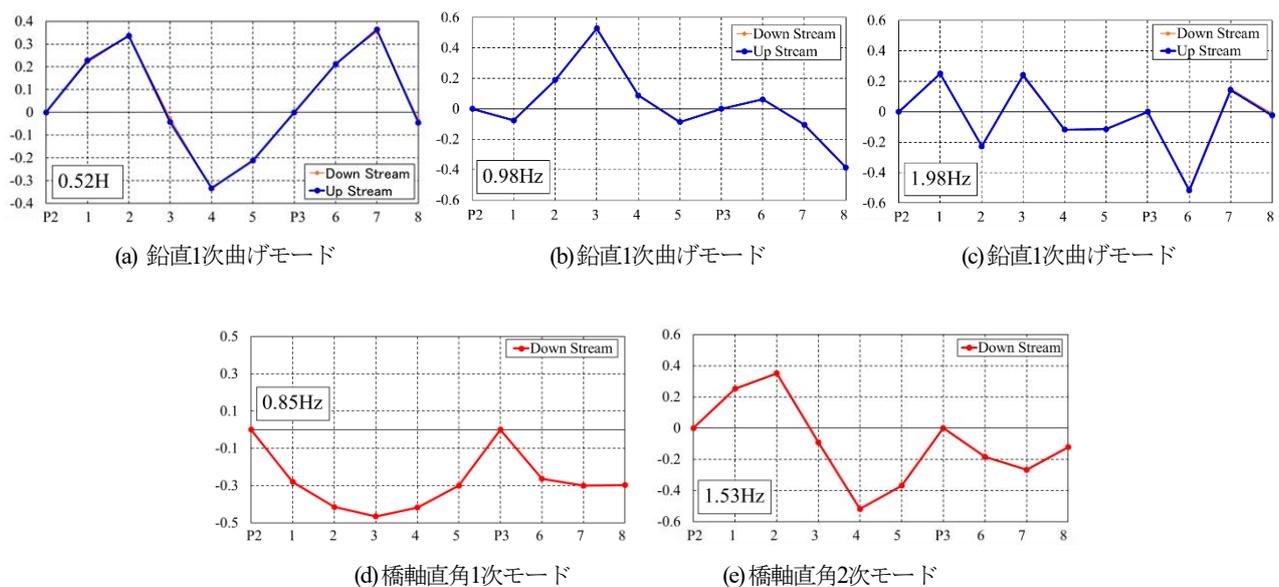


図-3 FDDによって同定された各固有振動数およびモード形状

(2) 固有振動数およびモード形状

作成した解析モデルを用いて実施した固有値解析から得られた固有振動数およびモード形状の結果を図4に示す。モードの選定は有効質量比、MAC 値およびモード形状から経験的に行った。

(3) 結果の比較

得られた結果の比較を表-3に示す。この比較結果から固有振動数は概ね一致しているものと判断した⁵⁾。従って、今後作成した解析モデルを用いてプッシュオーバー解析を実施していく。

4. プッシュオーバー解析

(1) 解析手法

手法としては、まず作成した FE モデルの各質点に橋梁鉛直下方向に重力加速度を作用させ自重を与える。その後、水平方向に加速度を同様に FE モデルの各質点に作用させ慣性力とし弾塑性解析を行った。その応答値に基づき性能を評価するが、作用させる加速度の最大値は複数部材が降伏するまでとした。荷重方向は橋軸方向と橋軸直角方向の2方向をそれぞれ異なるケースで行う。これにより、降伏応力を超える部材の算定を行う。この時、評価には Mises 応力を用いた。

(2) 解析結果

a) 橋軸方向

図-5は、アーチ3径間の中央アーチのアーチクラウン部の水平変位と水平震度の関係を示す。また、図-6は同解析時のピン支承付近のミーゼス応力コンター図を示す。ピン支承部を示した理由はローラー支承部に比べその反力の関係上高い応力が作用するからである。これより、ピン支承部付近のアーチリブは水平震度 0.5 で降伏することが分かった。

b) 橋軸直角方向

橋軸方向と同様に、図-7は水平変位と水平震度の関係を示し、図-8はピン支承付近のミーゼス応力コンター図を示す。これより、支承部横構が水平震度 0.22 で降伏し、横構と結合しているアーチリブは 0.31 で降伏に至ることが分かった。

(3) 考察

アーチリブは橋軸方向荷重時に 0.5、橋軸直角方向載

表-3 固有振動数比較

	モード次数	実験値 (Hz)	解析値 (Hz)	実験値/解析値
鉛直曲げ	1	0.52	0.54	0.96
	2	0.98	1.10	0.89
	3	1.98	2.25	0.88
橋軸直角	1	0.85	0.84	1.01
	2	1.53	1.44	1.06

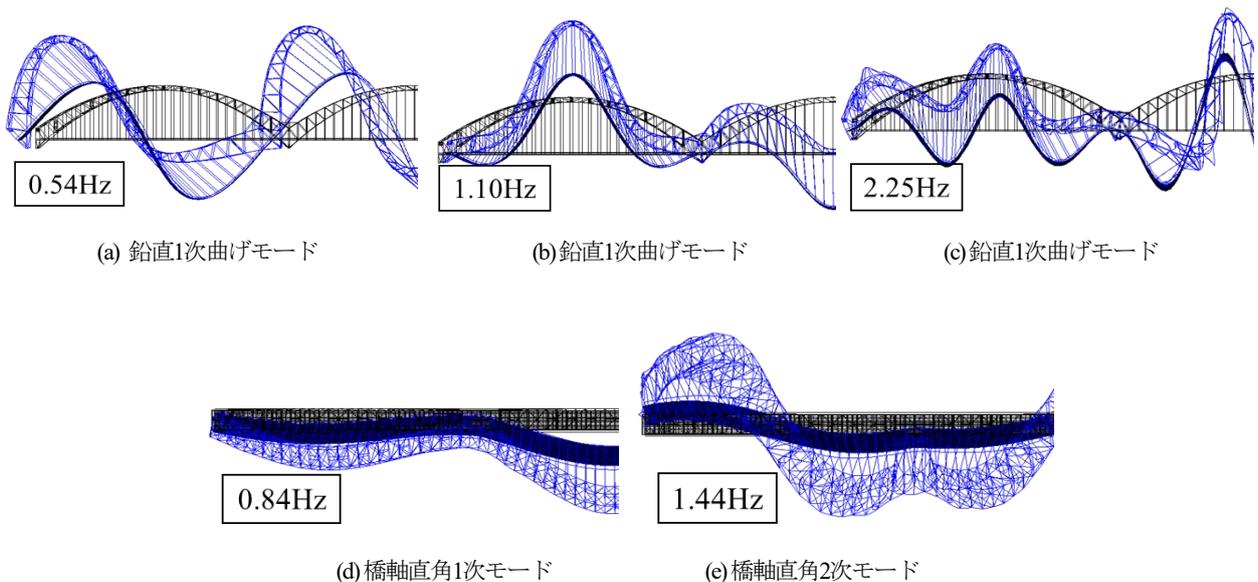


図-4 数値解析によって同定された各固有振動数およびモード形状

荷時に0.31の水平震度で降伏することが分かった。一方で、対象橋梁の位置する地域の地盤加速度は0.4 - 0.5gとされており、一般的に構造物の応答加速度は地盤加速度よりも大きくなる。また、アーチリブはアーチ橋において主部材であり、複数のアーチリブの降伏は橋梁系において深刻な損傷だと考えられる。従って、解析結果より、本橋梁は予測される地震動に対して十分に耐えられるものではなく、耐震性能を向上させるために耐震補強案を考案する必要があると考えられる。

5. 結論

本研究では、FDDとFE解析から得られた橋梁の振動特性を比較し解析モデルの妥当性を検証した後、プッシュオーバー解析により3連続鋼アーチ橋の耐震性能評価を実施した。以下に、本研究で得られた結果を要約する。

- 1) 対象橋梁のFEモデルは設計図を参照し、モデリングおよび解析を簡単にするため多くの仮定の下に構築されたが、FDDを用いて同定された固有振動数およびモード形状との比較からその妥当性が明

らかになった。

- 2) プッシュオーバー解析の結果、損傷シナリオおよび想定される地震動に対する耐震性能が不十分であることが分かった。耐震補強の必要性が明らかになったため、今後、ミャンマーで観測られた地震波を用いて地震応答解析を実施し耐震補強案を考案する。

謝辞：本研究を実施するにあたりご協力いただいた、富山大学の鈴木康夫准教授およびミャンマー建設省に感謝します。

参考文献

- 1) Ministry of Construction Myanmar: Myanmar National Building Code 2016, Part3 & Part4.
- 2) Japan International Cooperation Agency: Research study on review and application of the bridge engineering training centre project in Myanmar final report, September, 2012..
- 3) Brincker, R., Zhang, L., and Anderson, P.: Modal Identification from Ambient Response using Frequency Domain Decomposition: IMAC 18: Proceedings of the International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas, USA, February 7-10, 2000.

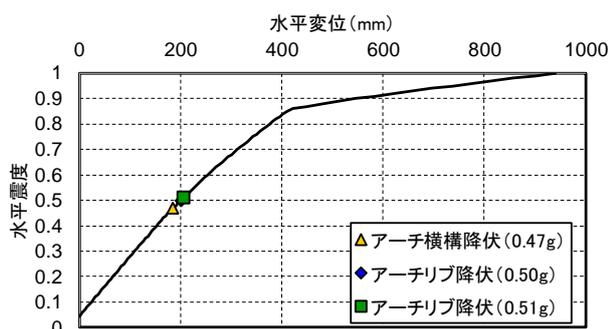


図-5 水平震度—水平変位関係 (橋軸方向載荷)

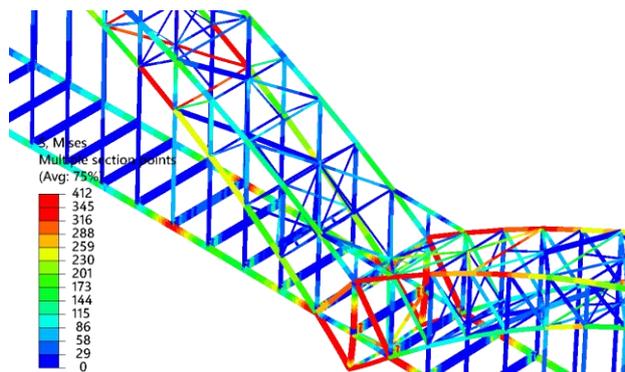


図-6 ミーゼス応力コンター図 (橋軸方向載荷)

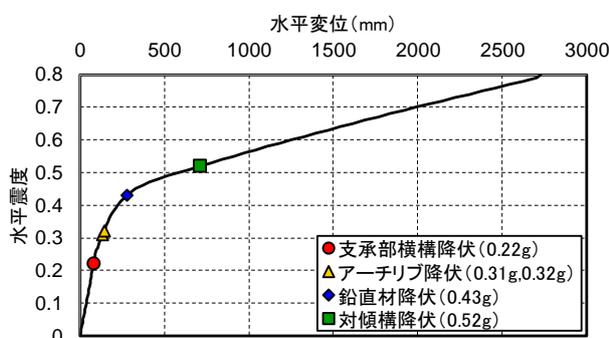


図-7 水平震度—水平変位関係 (橋軸直角方向載荷)

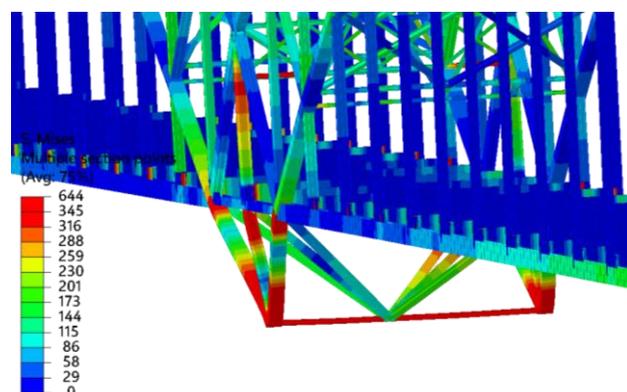


図-8 ミーゼス応力コンター図 (橋軸直角方向載荷)

- 4) Oota A., Otsuka H., Nohara H., Arai M., Morisaki H., and Mabuchi S.:
Study in the seismic retrofit design of a spandrel braced arch bridge, Journal of Structural Engineering, Vol.53A, March, 2007 (in Japanese)

(?)
(?)

SEISMIC PERFORMANCE OF STEEL ARCH BRIDGE LOCATED IN MYANMAR BY NUMERICAL ANALYSIS

Yuki OSHIRO, Masahide MATSUMURA and Kunitomo SUGIURA

This study aims to evaluate the seismic performance of one of a major steel arch bridge in Myanmar, where several major earthquakes have occurred. Myanmar is a country with many earthquakes, including major earthquakes, and the target bridge is located in an area that is severe to earthquakes with the highest ground acceleration according to the guidelines established by Myanmar. Evaluate the seismic performance of the target bridges located in such areas and determine whether they can withstand future earthquakes.

In order to understand the vibration characteristics of the target bridge, field vibration experiments were conducted and the natural frequency and vibration mode were determined based on the results obtained from the accelerometer. In addition, the validity of the analysis model was verified by comparing the results obtained by performing eigenvalue analysis using a finite element model and the results obtained by field vibration experiments. After that, pushover analysis was performed on the analysis model, and the yield scenario of the bridge was clarified from the yield state of various members.