

2016年熊本地震における鋼斜張橋の損傷メカニズム

Numerical study on seismic behavior of the steel cable stayed bridge in 2016 Kumamoto Earthquake

上田智也¹, 大森貴行², 葛西昭³

Tomoya UEDA, Takayuki OHMORI and Akira KASAI

¹ 学生会員 熊本大学工学部社会環境工学科 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1)

E-mail: 138t4705@st.kumamoto-u.ac.jp

² 正会員 修士(工学) (株)オリエンタルコンサルタンツ (〒151-0071 東京都渋谷区本町 3-12-1)

E-mail: ohmori@oriconsul.com

³ 正会員 博士(工学) 熊本大学准教授 大学院先端科学研究部 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1)

E-mail: kasai@kumamoto-u.ac.jp

本研究は、2016 熊本地震に代表される直下型地震が、曲線桁を有する 2 径間鋼斜張橋に作用する際の挙動を数値解析的に予測し、同橋梁の損傷メカニズムを解明するための一助とすることを目的としている。まず、鋼斜張橋として、県道 28 号に存在する桑鶴大橋の 2016 年熊本地震における被災状況を説明した。次に、被災分析するための FEM モデルを構築した。構築にあたって、被災状況を詳細に分析するために局部変形を考慮するシェル要素でモデル化を行った。同モデルを用いて振動特性を把握するため、振動の固有値解析を実施した。その際、ケーブルのモデル化に関する議論を行った。

Key Word: Numerical study, Steel cable stayed bridge, Earthquake

1. 緒言

2016年4月14日21時26分以降に発生した熊本地方を震源とする一連の地震では、建築構造物、盛土構造物および交通インフラ施設に多くの被害が発生した。震災後、早い段階から様々な研究者により調査が行われ、被害状況が報告されている。今回の一連の地震は日奈久断層帯および布田川断層帯を期限とする地震であり、大きな地殻変動を伴った地震が観測されている。特に、4月16日1時25分に発生した地震(本震)では、モーメントマグニチュード $M_w = 7.0$ という非常に大きな値を記録した¹⁾。

活断層にほぼ並行して走る県道 28 号線(俵山バイパス)沿いには、図-1 に示すように大切畑大橋、大切畑ダム橋、桑鶴大橋、扇の坂橋、すすきの原橋および俵山大橋が架橋されている²⁾。本稿では、中でも鋼斜張橋である桑鶴大橋の損傷メカニズムを解明するため、まずは被害の状況をまとめた。また、



図-1 各橋梁の位置図(国土地理院に加盟)

分析を行うにあたって、数値解析によるシミュレーションは重要なツールである。現在、これを準備中である。そこで本稿では振動モデルに関する固有値解析の結果についてまとめる。

2. 桑鶴大橋の概要

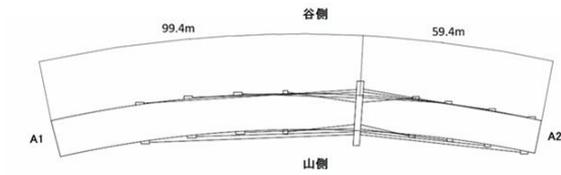


図-2 平面図

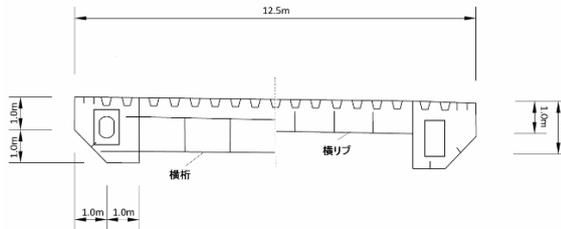


図-3 断面図

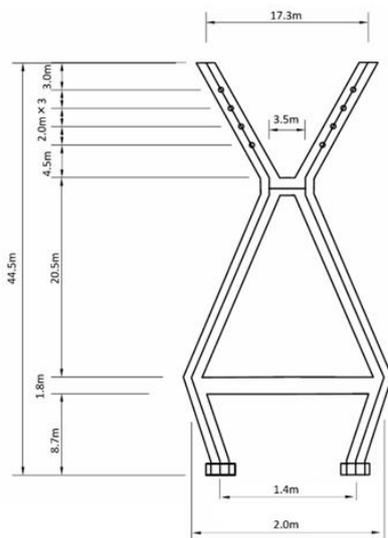


図-4 主塔平面図

桑鶴大橋について、その橋梁一般図を図-2～5に示す。本橋は、橋長160mの鋼主塔で支持された2径間連続鋼斜張橋である。緩やかな曲線橋で、A1橋台からA2橋台にかけて4.8%の上り勾配がある。H2年版道路橋示方書³⁾によって設計され1998年に竣工した。スパン割りは99.4m+59.4mで不等径間である。主ケーブルは片側4段の計16本。A1とP1は支承板支承、A2は鋼製支承を用いている。

3. 桑鶴大橋の被害

本橋梁での被害についてA1橋台、P1橋脚、A2橋台、上部構造にわけてまとめる。

(1) A1橋台

①パラペットの損傷

A1谷側のパラペット背面部のき裂が確認できる(写真-1)。ま

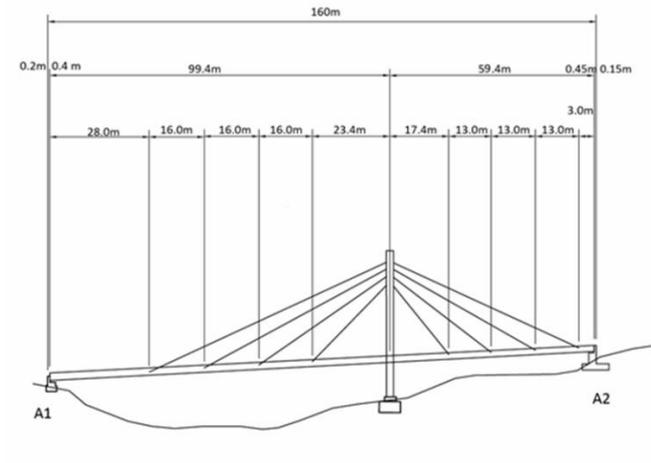


図-5 側面図



写真-1 A1パラペット



写真-2 A1谷側橋台



写真-3 A1谷側橋座

た、写真2のA1橋台谷側の舗装部分にヒビが入っていた。これらの損傷状況を踏まえて考えると、地震発生時はA1パラペットへ桁が衝突したと推測できる。

②橋座・支承部の損傷

谷側の橋座の破壊(写真-3)と山側の支承部のベアリングプレート(写真-4)が確認できた。



写真4 A1 支承

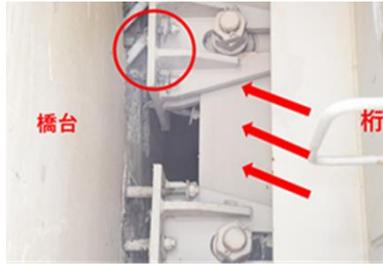


写真5 A1 鋼製ブラケット



写真6 桁の水平移動



写真7 P1 支承



写真8 桁変位制限装置



写真9 A2 谷側パラペット



写真10 A2 谷側支承



写真11 A2 谷側ブロック



写真12 A1 山側の伸縮装置

③落橋防止構造の損傷

鋼製ブラケットのボルトが破断していた(写真-5)。常時のブラケットの状態は確認できなかったが、写真-5より、桁がA1側へシフトして、橋台と衝突し、大きな力がブラケットのボルトに作用したと推測できる。

(2) P1 橋脚

①橋座・支承部の損傷

桁の谷側への約 0.8m 移動が見られた(写真-6)。写真-6はA2側から撮られたものである。この桁の移動によって支承が橋座から逸脱していた(写真-7)。

②桁変位制限装置の損傷

桁の谷側への移動(写真-6)によって桁変位制限装置の鉛直ボルトが破断していた(写真-8)。

(3) A2 橋台

①パラペットの損傷

桁がパラペット背面部に接触しており、パラペットが破壊されていた(写真-9)。このことから桁はパラペットへ衝突したことがわかる。

②橋座・支承部の損傷

パラペットの破壊によって山側のピン支承がパラペットか

ら外れ、破壊されていた(写真-10)。また山側、谷側共に支承は桁から逸脱していた。

③移動制限装置の損傷

山側の移動制限装置用コンクリートブロックがせん断破壊(写真-11)されていた。また、桁が上昇したことによってコンクリートブロックは破壊後には機能していなかったことがわかる。

(4) 上部構造

①伸縮装置の損傷

A1 谷側の伸縮装置(写真-12)、A1 山側の伸縮装置(写真-13)ともにA2へ引っ張られるようにずれていた。谷側、山側のずれを比較すると山側の方が大きくずれている。A2の伸縮装置は押されて破壊されていた(写真-14)。

②ケーブル

A1 谷側縁部のケーブルキャップが抜け(写真-15)、たわんでいた(写真-16)。

③桁の移動

A1で谷側よりも山側の方がA2へ引っ張られるようにずれている。加えて、桁が橋軸角方向には谷側へ移動していることから、桁全体の動きで見ると谷側へ回転していることになる



写真-13 A1 山側の伸縮装置



写真-15 ケーブルキャップ



写真-16 ケーブル



写真-17 A2 側の桁上昇

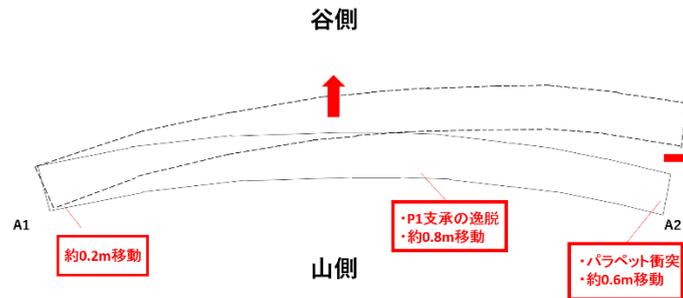


図-6 桁の移動

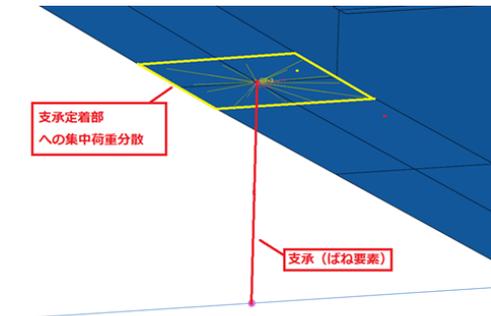


図-7 主桁のケーブル定着部

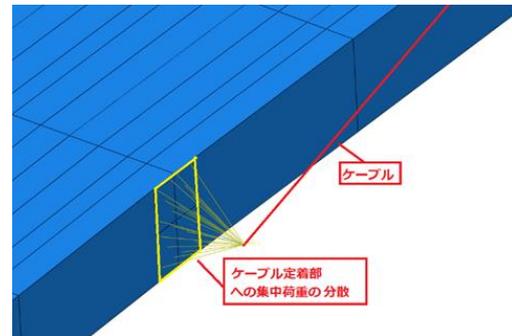


図-8 主桁のケーブル定着部

(図-6). A1, P1, A2 での谷側への移動量は約 0.2m, 0.8m, 0.6m であった。また、A2 で見ると桁は約 0.6m 上昇していた³⁾(写真-17)。

4. FEMモデルの構築

FEM モデルの構築では、本橋梁の桁端部の局所的な損傷、桁の移動を再現することを目的とした。そのため、各部材に対して再現に有効な要素を用いた。

(1) 上部構造

上部構造の解析モデルは、実現象で確認した支点部における局所的な損傷を再現するためにシェル要素にてモデル化した。その際、主桁の挙動をより精度良く再現するために、デッキプレート（Uリブ含む）や横構など2次部材についてもシェル要素を採用し、部材の挙動の再現に配慮した。

(2) 主塔

主塔は目立った損傷がなく、上部工接合部の挙動やケーブル定着部の張力の分布を明らかにする必要がある。そのため、主塔はビーム要素でモデルを構築した。また、主塔基部は完全固定とした。

(3) 支承

桁の移動を再現するため、支承部はバネ要素で構築し(図-7)、橋軸直角方向の回転を除いて固定とした。バネ要素の接合部は実際の支承の寸法へ荷重が分散するように設定した。

(4) ケーブル

ケーブルはビーム要素でモデルを構築し、固有値解析ではケーブルの座屈を抑えるため、要素数を1にした。

箱桁のケーブル定着部は剛結のままだと集中荷重がかかる可能性があったため、定着部の寸法に荷重が分散するように設定した(図-8)

(5) 材料特性

本橋梁では部材ごとにいくつかの鋼材が使用されているが、今回は耐候性鋼材 SMA490 のヤング率、ポアソン比のみを使用している。表-1 にヤング率、ポアソン比、質量密度を示す。

5. 周波数特性

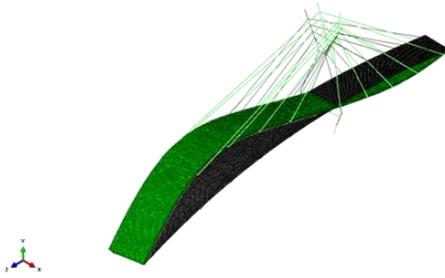


図-9 1次モード

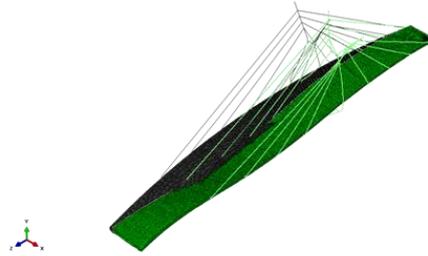


図-10 2次モード

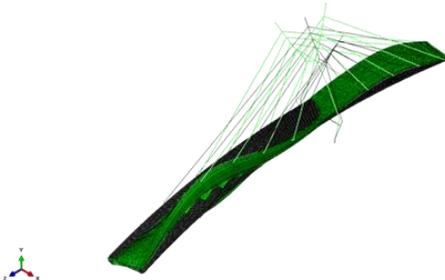


図-11 3次モード



図-12 4次モード

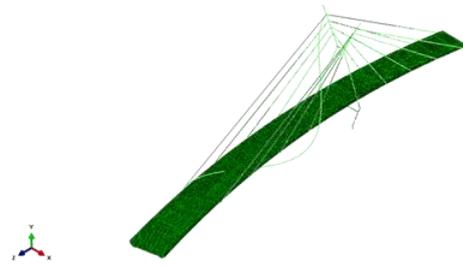


図-13 ケーブルの座屈発生

本橋梁での固有値解析の結果を表-1に示す。橋軸方向をz軸、橋軸直角方向をx軸、橋軸鉛直方向をy軸とした。また、モデルの変形倍率は20000倍に設定した。図中の緑色のモデルが変形図で、灰色のモデルが原型図である。図-9-12は変形図である。

図-9は解析モデルの1次モード図である。表-2を見ると固有値は、49.4、周期が0.89(s)であった。図-9を見ると橋軸方向へ波打っている。また有効質量比はY軸方向が0.30と大きい。これは橋軸方向へ桁が波を打っている形状になっていることが要因だと考えられる。よってこのモードは橋軸方向の1次モードだと言える。図-10は解析モデルの2次モード図である。表-2を見ると固有値は172、周期は0.48(s)であった。図-10を見ると橋軸直角方向(X軸)へ大きく移動している。有効質量比はX軸方向が0.90と大きく橋軸直角方向の1次モードだと言える。またZ軸回転の有効質量比も0.92と大きな値を示していることから橋軸方向に回転しながら橋軸直角方向へ移動していることがわかる。図-11は解析モデルの3次モード図である。表-2を見ると固有値は246、周期は0.40(s)であった。有

効質量比はY軸方向が0.05と最も大きく、これは桁のねじれが要因と考えられる。図-11を見ると他の方向へのモードであると考えられる。図-12は解析モデルの4次モード図である。表-2を見ると固有値は259、周期は0.39(s)であった。有効質量比はY軸方向が0.09と大きい。このモードは橋軸方向の2次モードだと言える。

ここで4. FEMモデル構築で述べたケーブルの要素数についての検証を行った。実際の固有値解析ではケーブルの要素数を1に設定したが、他の部材と同様の要素の分け方してみると、図-13のようになった。ケーブルの座屈が発生し、橋梁全

表-1 SMA490

ヤング率 (GPa)	200
ポアソン比	0.3
質量密度(g/cm^2)	2.4

表-2 固有解析結果

次数	周期 (s)	有効質量比					
		X軸方向	Y軸方向	Z軸方向	X軸回転	Y軸回転	Z軸回転
1	0.89	0.00	0.30	0.00	0.13	0.00	0.00
2	0.48	0.90	0.00	0.01	0.01	0.22	0.92
3	0.40	0.00	0.05	0.00	0.00	0.04	0.00
4	0.39	0.00	0.09	0.06	0.03	0.00	0.00
5	0.32	0.00	0.31	0.22	0.10	0.00	0.00
6	0.30	0.00	0.05	0.05	0.05	0.26	0.00
7	0.27	0.01	0.03	0.67	0.66	0.17	0.02
8	0.23	0.06	0.00	0.01	0.00	0.26	0.04
9	0.22	0.00	0.15	0.00	0.01	0.00	0.00
10	0.20	0.02	0.00	0.00	0.00	0.06	0.02

体のモードが把握できない状態になった。

6. 結言

2016年熊本地震により、熊本県内の多くの構造物が大きな被害を受けた。その中でも、布田川断層に並行して走る県道28号線に架橋された6橋の被害は甚大である。本稿では、鋼斜張橋である桑鶴大橋の損傷メカニズムを解明するために、被害状況分析と固有値解析を行い、その結果を分析し、考察を行った。以下にその結果を示す。

- (1) 本橋梁への固有値解析の結果から各モードにおける固有周期、変形が確認できた。また、桁のねじれが3次モード(図-11)で発生した。これはケーブル定着点の配置や橋梁の不等径間がねじれの発生要因であると考えられる。固有値解析において複雑な変形を示すことから、今後、より詳細なモデルで損傷メカニズムを解明する必要がある。
- (2) 今回の固有値解析ではケーブルの挙動を考慮していない。したがって動的解析においてケーブルの挙動を明らかにするために、要素数を変更する必要がある。またケーブルに張力を与える必要がある。
- (3) 実際の被害では桁と橋台の衝突が見られた。衝突を再現するために橋台のモデルを構築する必要がある。
- (4) 実際の被害ではP1橋脚部の桁変位制限装置のボルト破断、A2移動制限装置用コンクリートブロックのせん断破壊が見られた。したがって動的解析を行う際に落橋防止シ

ステムの有効性を確認する必要がある。

なお、本稿は、原稿執筆時のFEMモデルを参考に記述している。鋭意検討中であるため、発表当日は、さらに進めた研究成果を発表したいと考えている。

参考文献

- 1) 平成28年(2016年)熊本地震地震被害調査結果速報会：土木学会(2016.4.27).
- 2) 国立研究開発法人産業技術総合研究所：活断層DB：
https://gbank.gsj.jp/activefault/cgi-bin/segment_param.cgi?SearchTYPE=&fval_type1=218-01&segment_id=218-01&topic_list=2&search_mode=2
- 3) H2年版道路橋示方書
- 4) 藤倉修一，川島一彦：2016年熊本地震による道路橋の被害分析：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(2016年7月)，土木学会地震工学委員会，pp.164, 165, 2016.
- 5) 佐々木達生，田崎賢治，大塚久哲，幸左賢二，川神雅秀：設計者の視点でみた熊本地震における橋梁被害：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(2016年7月)，土木学会地震工学委員会，pp.234, 2016.
- 6) 吉本宏和，葛西昭，児玉喜秀：断層をまたぐ鋼斜張橋の地震時挙動に関する一考察，土木学会第67回年次学術講演会(2012年9月).

(2016.10.28 受付)