

アーチアバットの滑動を考慮した阿蘇大橋崩落メカニズム の静的検討

千田 知弘¹・渡辺 浩²・谷口 亮太³・崔 準ホ⁴

¹正会員 博士（工学） 福岡大学助教 工学部社会デザイン工学科（〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1）

²正会員 博士（工学） 福岡大学教授 工学部社会デザイン工学科（〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1）

³正会員 学士（工学） 東亜コンサルタント株式会社 熊本支店 設計課（〒862-0913 熊本県熊本市東区尾ノ上4-1-21-201）

⁴正会員 博士（工学）九州大学大学院助教 工学研究院社会基盤部門（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744）

1. はじめに

2016年4月に発生した熊本地震においては、多くの橋梁が被災し、阿蘇大橋に関しては、崩落にまで至っている。現状、阿蘇大橋の崩落原因として、本震時に生じた大規模な土砂災害に巻き込まれたという説が大勢を占める。しかし、崩落現場が長らく立ち入り禁止区域であったこと、部材を谷底から引き上げることができていないこと、崩落を記録した映像媒体が無いこと等から、その原因は未だ明らかにされていないというのが実情である。

土木学会地震工学委員会・性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会では、熊本地震で大きく破損した橋梁に対し、その原因を地震動にだけ求めるのではなく、地震動を含め複数の要因である可能性を広く検討する取り組みを行っている。例えば、同小委員会・阿蘇大橋サブワーキンググループにおいては、(1)地震動による被災、(2)土砂による被災^{1), 2)}、(3)地盤変状による被災、の3種類の可能性に関して検討を行っている。本研究は(3)のテーマについて取りまとめたものである。

地震発生から一年が経過し、阿蘇大橋周辺の地盤が断層によって変位した可能性が相次いで報告されている^{3), 4), 5)}。残念ながら、阿蘇大橋のアーチアバットが断層によって滑動したという直接的な報告は無いが、阿蘇大橋の極近距離で1.2m程度の右横ずれがあったとの報告がある³⁾。よって、アーチアバ

ットの滑動が阿蘇大橋の崩落にどのように影響し得たかの検討を行うことは、十分に妥当性がある。

そこで本研究では、3次元FEMを用い、アーチアバットの滑動が崩落メカニズムに与える影響を評価した。

2. 阿蘇大橋の構造諸元

阿蘇大橋は、橋長205960mm、全幅員8800mm(有効幅員8000mm)、アーチ支間124000mmの上路式トラス逆ランガーアーチ橋である。本研究で対象とするアーチ区間の側面図を図-1に、アーチリブおよび下横構の断面詳細を図-2に示す。図-1においては、床版に配置される上弦材とアーチリブとを合成するワーレントラス部材に対し、図面左側から①～③の番号を便宜上記した。

アーチリブは、幅540mm×厚さ14～9mmの上フランジ、幅600mm×厚さ19～9mmの下フランジ、高さ600mm×幅19mm～9mmのウェブから成るボックス断面を有し、支点部から支間中央かけて断面が小さくなっていく構造となっている。アーチライズは18000mmであり、内側にそれぞれ6°傾斜させ安定化させている。

下横構の支材は、幅200mm×厚さ9mmの上フランジ・下フランジ、高さ134mm×幅9mmのウェブから成るI型断面を有する。対傾構は、幅200～204mm×厚さ10～12mmの上フランジ、下フランジ、134mm

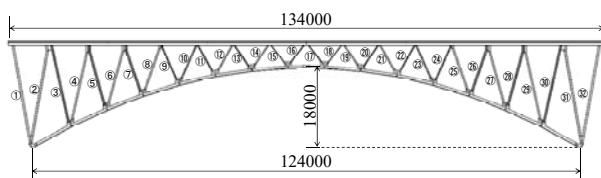


図-1 アーチ区間の側面図(単位：mm)

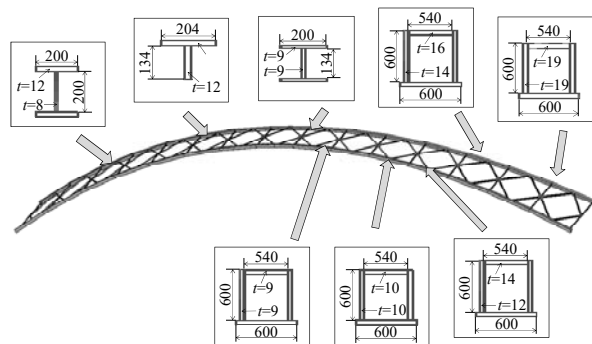


図-2 アーチリブおよび下横構の断面配置図(単位：mm)

～200mm×幅8～12mmのウェブから成るI型断面もしくはT型断面を有する。

ワーレントラスは、ボックス型断面とI型断面の二種類から構成される。図-1において、⑨、⑪、⑬、⑳、㉒、㉔の斜材がI型断面となる。各部材は、幅200mm～460mm×厚さ9mm～14mmの上フランジ・下フランジ、高さ510mm～520mm×幅9mm～28mmのウェブから成る。

3. FEM解析モデルおよび解析条件

本解析では、汎用FEM（有限要素法）解析ツールANSYS（Ver15, ANSYS, Inc）を用いて解析を行った。予備解析で弾塑性解析を行ったが、塑性箇所がアーチリブ全体に表れ、収束が困難であったため、本研究では弾性解析にとどめ、変位や応力分布の傾向を見ていくこととする。ただし、評価する上で、SS400の公称値である235MPaを超える応力を降伏応力として以後扱う。

FEM解析モデルの作成にあたっては、2章で示した寸法でモデル化した。ただし、本論文では、全体系の挙動を確認することが目的なので、アーチリブのボックス断面内のダイヤフラムはモデル化していない。また、上弦材と床版に関しては、実構造に基づき簡易的なモデルを作成した。具体的には、上弦材のモデル化に関しては、幅700mm×厚さ20mmの上フランジ・下フランジ、高さ920mm×幅10mmのウェブから成るボックス型断面とし、2本の上弦材は幅5100mm×板厚140mmの鋼板で接合するモデルとした。

表-1 解析に使用した要素形状と各材料定数

部材	要素・自由度	ヤング率(MPa)	ポアソン比	単位体積重量(MN/m ³)
鋼材	4面体10節点30自由度	206	0.3	0.077
コンクリート		25	0.25	0.025

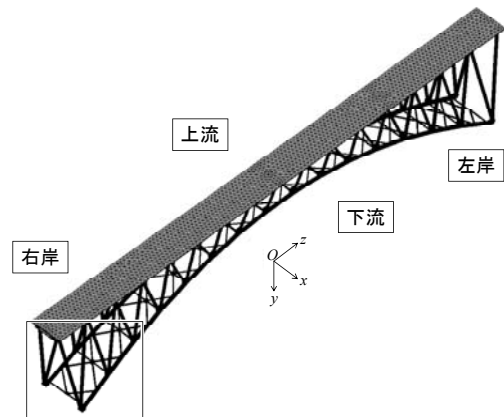


図-3 要素分割全体図

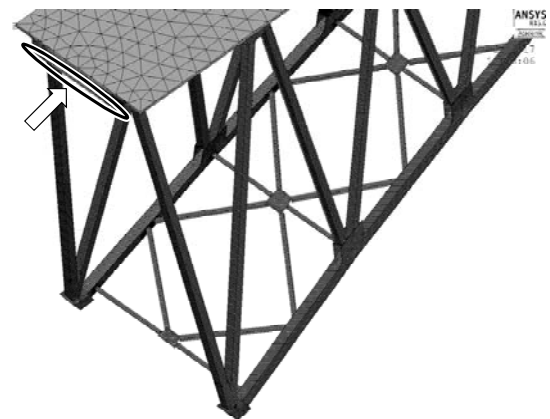


図-4 要素分割詳細および床版部の境界条件入力位置

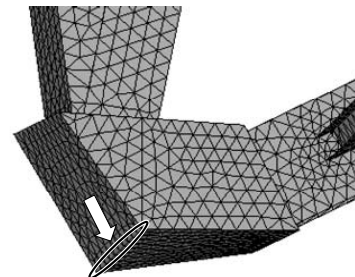


図-5 境界条件・強制変位付与条件入力位置

コンクリート床版のモデル化に関しては、幅8800mm×板厚200mmでモデル化した。アバットに関しては、ピンを除いた支承のヒンジ部までモデル化した。

FEM解析モデルの要素分割全体図を図-3に、図-3中で四角で示した箇所の詳細図を図-4に示す。座標は橋軸方向にz軸、橋軸直角方向にx軸、高さ方向にy軸を取ることにした。原点Oは、側面から見て、左右の支承のヒンジ部を繋ぐ軸線上の橋軸方向中央および橋軸直角方向中央となる図-3の位置に原点を取った。本モデルは今後様々なシチュエーションを想

定した解析で用いる予定となっており、それを踏まえ、 z 方向にプラスになる方向を左岸と定義することとする。

使用した各材料定数を表-1に示す。解析ではソリッド要素を用い、要素サイズは鋼材を50～100mm、床版のコンクリートを1000mmとした。

アーチ部材に対する境界条件および強制変位付与条件入力位置を図-5に示す。図-5中で丸囲みで示したように、ヒンジ部のピンを簡易化してモデル化し、全ての支承のエッジ部の x 方向変位、 y 方向変位、 z 方向変位を線拘束することで境界条件を与えた。なお、線拘束することでエッジ部での x 軸回りの回転を許容するモデルとなる。本研究では、アバットの滑動を支承のエッジ部に強制変位を与えてモデル化する。強制変位の条件は、右岸側の2つの支承に、①+0.25mの z 方向変位を与える、②+0.25mの x 方向変位を与える、③+0.25mの x 方向、 z 方向変位を同時に与える、の3条件とした。

床版の境界条件は、図-4に示すように床版端部の下縁に線拘束で与えた。右岸の床版端部下縁の x 方向変位、 y 方向変位線拘束し、左岸の床版端部下縁の x 方向変位、 y 方向変位、 z 方向変位をそれぞれ線拘束した。

自重は鉛直方向に重力加速度を与えることによって与えた。

4. 解析結果および考察

(1) アバットが橋軸方向に0.25m滑動した場合

図-3における右岸側の2つの支承に、+0.25mの z 方向変位を与えた場合の橋軸方向変位分布の側面図を図-6に、鉛直方向変位分布の側面図を図-7に、橋軸直角方向変位分布を x 方向に30°回転して示した図を図-8、アーチリブのみの橋軸直角方向変位分布を斜め方向から見た図を図-9に示す。

図-6においては、変位分布が緩やかに推移しており、ガセットや部材の配置等による変位の偏りは特に見られない。図-7においては、アーチ支間中央から左右対称の分布を示し、アーチ支間中央で最大0.15mの上向きの変位が見られる。

図-8においては、④、⑤、⑥、⑦のトラス部材(図-1)およびアーチ支間中央から対象位置となる②⑦と②⑧、②⑨のトラス部材に、他所のトラス部材に比して大きな変位が生じている。④～⑦のトラス部材で詳細を見ていくと、④と⑤のトラス部材は xy 断面から見て内側に変位しているが、⑥と⑦のトラス部材は外側に変位している。一方で図-9において

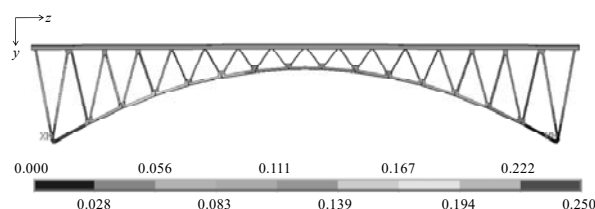


図-6 橋軸方向の変位分布(単位：m)

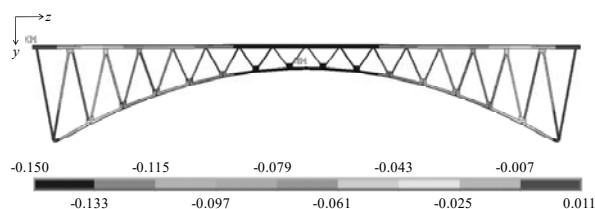


図-7 高さ方向の変位分布(単位：m)

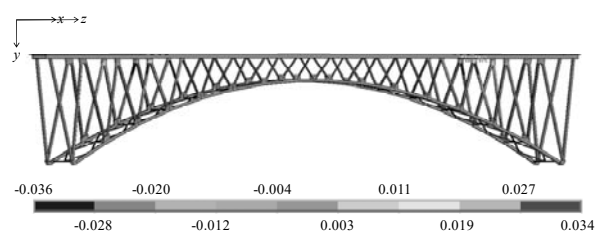


図-8 橋軸直角方向の変位分布(単位：m)

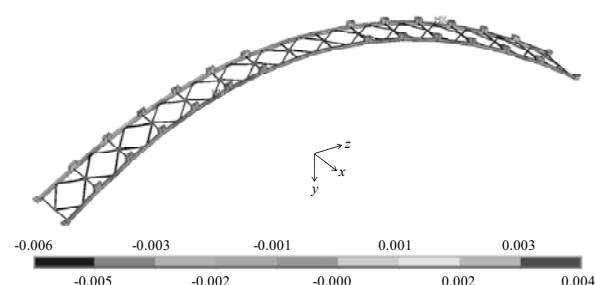


図-9 アーチリブの橋軸直角方向の変位分布(単位：m)

は、 xy 断面から見てアーチリブは全体的に内側に変位する挙動が見られる。図-8と図-9を比較すると、④～⑦のトラス部材が接合している支承から2番目と3番目のガセットの間のアーチリブの変位が減少しており、④～⑦のトラス部材がアーチリブに加わる力を分散していることが分かる。

モデル全体に生じる相当応力分布の側面図を図-10に、斜め方向から見た右岸側の相当応力分布を図-11に示す。本解析においては、生じる相当応力に比して変形が小さいため、変形と相当応力の相関が分かりづらい。よって、図-10と図-11においては、視認しやすいように、変位量を強調して表示した。

アーチリブにおいては、図-10に四角で示した箇所を除き、降伏応力を超える応力が分布する。橋軸方向の僅か0.25mのアバットの滑動でも、アーチリブに大きな損傷を与え得ることが示された。また、

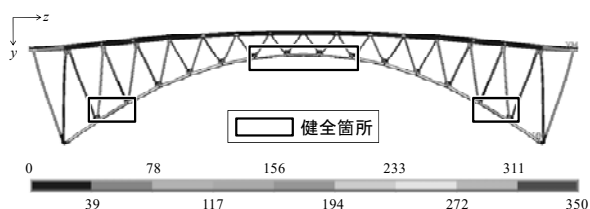


図-10 相当応力分布・変形図(単位：MPa)

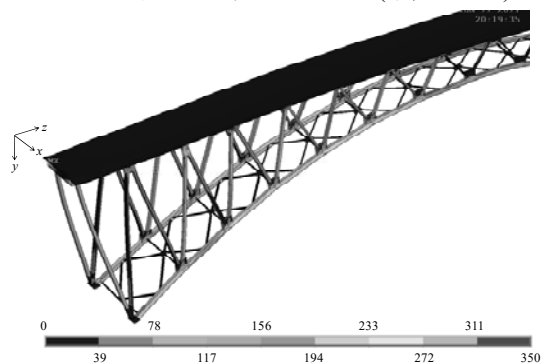


図-11 相当応力分布・変形図(単位：MPa)

図-11を見ると、アーチリブの外側よりも、内側により大きな応力が生じることが示された。しかし、左右のアーチリブを結合する横構と対傾構にほとんど応力が生じていないのも特徴的な挙動と言える。

図-10において、支承側の四角で示した箇所は、上記で④～⑦のトラス部材によってアーチリブの変位が抑制されることが示された箇所である。相当応力の分布からも、④～⑦のトラス部材が機能し、アーチリブに生じる応力を軽減させていることが分かる。ただし、⑤～⑥のトラス部材と床版の上弦材とを接合するガゼットに高い応力が集中して生じており、ガゼットの破断等でトラス機能を失い、アーチリブにより大きな応力生じる原因となり得る。

一方、トラス部材に生じる応力分布を見ると、いずれの部材も降伏応力を超えておらず、100MPa前後の応力分布が大勢を占める。橋軸方向へのアバットの滑動は、ほぼアーチリブのみで支持され、より大きな損傷をアーチリブに生じさせる可能性が示された。

(2) アバットが橋軸直角方向に0.25m滑動した場合

図-3における右岸側の2つの支承に、+0.25mのx方向変位を与えた場合の橋軸方向変位分布を図-12に、鉛直方向変位分布を図-13に、橋軸直角方向変位分布をx方向に30°回転して示した図を図-14に示す。なお、図-13には下平面図、図-14にはアーチリブのみの上平面図を加え、図-14の各図は変形を強調して視認しやすくした。

図-12においては、変位を与えた方向である下流

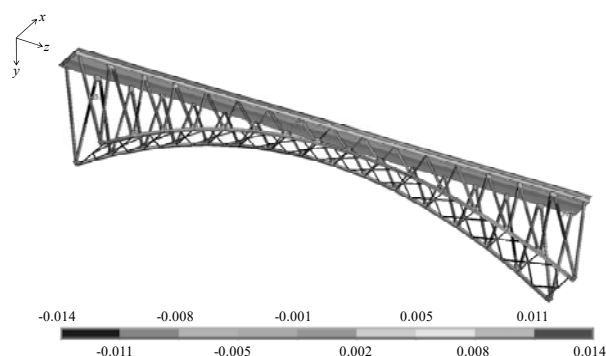


図-12 橋軸方向の変位分布(単位：m)

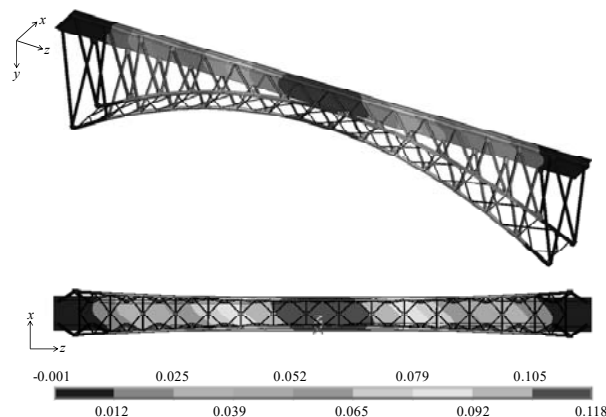


図-13 高さ方向の変位分布(単位：m)

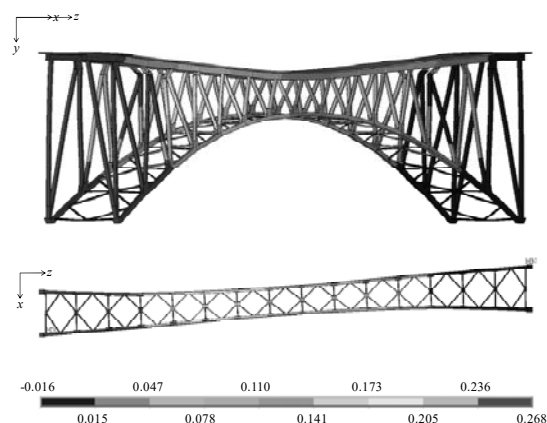


図-14 橋軸直角方向の変位分布・変形図(単位：m)

側のアーチリブとトラス部材がz方向のプラス側に変位するのに対し、上流側の各部材はz方向のマイナス側に変位している。図-13においては、高さ方向の変位分布は側面方向から見て支間中央からほぼ左右対象の分布となるが、アーチリブとトラス部材のz方向の変位の違いによって、上流側と下流側の分布は原点Oに対し点対象の分布となる(図-13下図)。また、支間中央にかけて下方向にたわむ変形を示す事が示された。

図-14においては、上平面図に示すように橋軸直角方向変位分布は、橋軸方向には上流側と下流側と

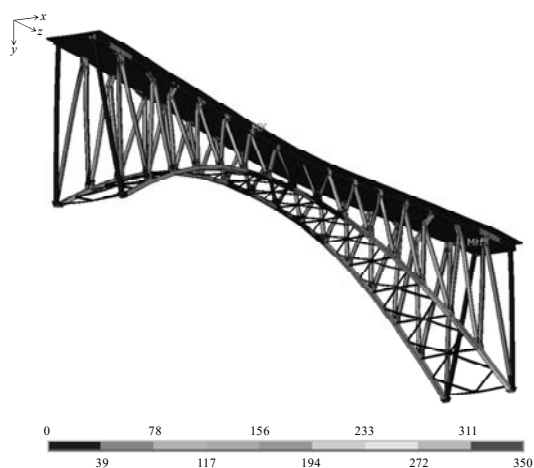


図-15 相当応力分布・変形図(単位：MPa)

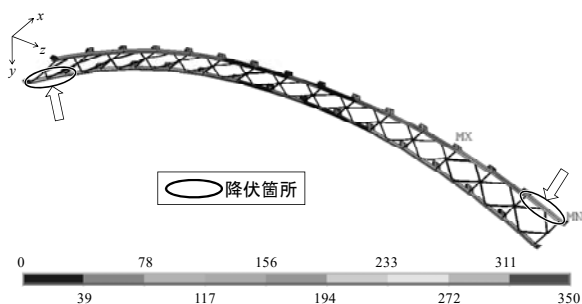


図-16 アーチリブに生じる相当応力分布・変形図(単位：MPa)

で大きな差が生じていない。しかし、トラス部材に関しては、例えば③～⑥のトラス部材を上流側と下流側と比較すると、変位量が異なる。この場合、上弦材とトラス部材とを接合するガゼットプレートの変形が大きくなることが見て取れ、同じ橋軸方向位置においては、上弦材とアーチリブの変形量が異なるのが分かる。つまり、アーチリブは上流側と下流側とで同じように変形するが、アーチリブと接合しているトラス部材やさらに上の上弦材や床版は、複雑に変位する挙動が示された。

モデル全体に生じる相当応力分布を図-15に、アーチリブのみの相当応力分布を図-16に示す。アーチリブに生じる相当応力に関しては、前節の解析(図-10)では、一部を除いたアーチリブ全体に降伏応力を超える応力が生じていたが、図-15、図-16においては、右岸・上流側と左岸・下流側の支承付近(図-16中の丸囲み)に降伏応力を超える相当応力が広く分布する。また、降伏応力を超える箇所では、変位を与えた側とは逆方向の上流側により大きな応力が生じる。

トラス部材に関しては、図-10、図-11と比して、全体的に高い相当応力が生じており、上流側の⑩と下流側の③に降伏応力を超える相当応力が分布する。また、床版の上弦材とトラス部材を接合するガゼッ

トにも降伏応力を超える相当応力が生じている。

以上より、橋軸直角方向へのアバットの滑動は、支承付近のアーチリブに大きな損傷を与える可能性が示唆されが、それ以上にトラス部材に深刻な損傷を与え、床版の剛性を保持できない可能性が示唆される。

(3) アバットが橋軸方向および橋軸直角方向に同時に0.25m滑動した場合

図-3における右岸側の2つの支承に、+0.25mのx方向変位と+0.25mのz方向変位を同時に与えた場合の橋軸方向変位分布を図-17に、鉛直方向変位分布を図-18に、橋軸直交方向変位分布をx方向に30°回転して示した図を図-19に示す。なお、図-18には下平面図、図-19にはアーチリブのみの上平面図を加え、図-19の各図は自動計算表示機能を用いて変形を視認しやすくした。

図-17においては、アーチリブの橋軸方向変位は、上流側と下流側とで若干の差が見られるが、ほぼ同じように変位する。差が生じる原因は、図-12に示すように、橋軸直角方向の変位によって、上流側と下流側とでアーチリブの変位の方法が逆に変位するような挙動が生じるためである。この挙動は、高さ方向の変位分布を示した図-18においても見られる。図-18においては、アーチ支間中央付近に最大0.152mの上向きの変位が見られる。これは、図-7に示した変位分布および値とほぼ差が無い。図-19においては、図-14と同じような挙動を示すが、全体的に橋軸直角方向の変位は減少する傾向が見られる。

モデル全体に生じる相当応力分布を図-20に、アーチリブのみの相当応力分布を図-21に示す。相当応力に関しては、4.(1)と4.(2)の解析結果の特徴がそれぞれ見られる結果となった。アーチリブに関しては、図-21中で丸囲みで記した上流・右岸側の支承付近と下流・左岸側の支承付近に降伏応力を超える相当応力が広く分布するが、それぞれの反対側の支承付近には特に高い応力分布は生じておらず、+0.25mのx方向変位を与えた場合の解析結果(図-15、図-16)の挙動と一致する。一方、図-21中で四角で示した1/4アーチ支間付近に降伏応力を超える相当応力が広く分布しており、+0.25mのz方向変位を与えた場合の解析結果(図-10、図-11)の挙動に近いが、その応力値は、本研究で行った解析中で最も高い。

トラス部材および床版の上弦材とトラス部材を接合するガゼットに関しては、降伏応力を超える相当応力は見られず、+0.25mのz方向変位を与えた場合の解析結果(図-10、図-11)の挙動に近い。

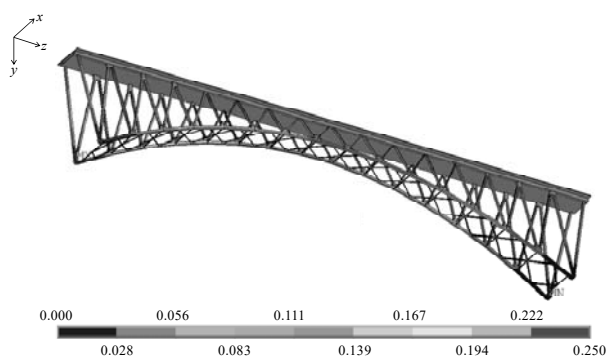


図-17 橋軸方向の変位分布(単位：m)

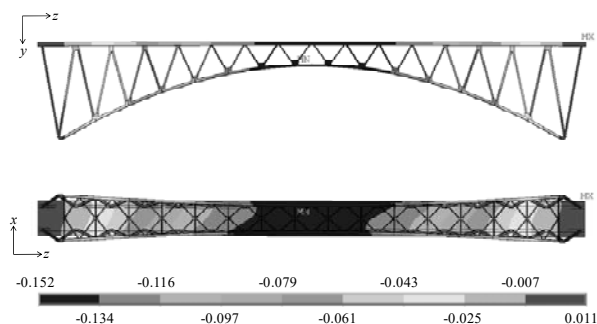


図-18 高さ方向の変位分布(単位：m)

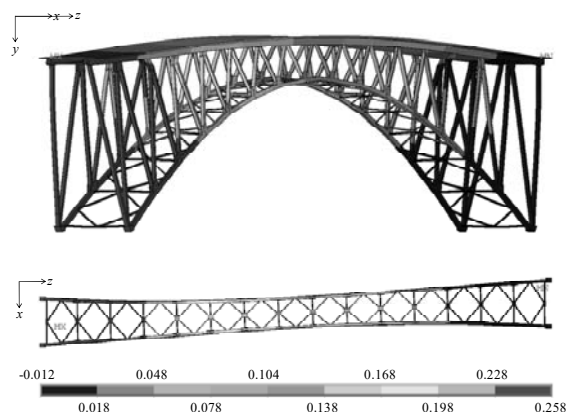


図-19 橋軸直角方向の変位分布・変形図(単位：m)

以上より、橋軸方向および橋軸直角方向の滑動が同時にアバットに生じた場合、トラス部材の損傷は小さいが、その分アーチリブの損傷が大きくなる可能性が示唆された。また、相当応力分布は原点Oについて点対象であり、降伏が生じた場合、面外にねじれる挙動が顕著に表れていく可能性が示唆される。

4. まとめ

本研究では、3次元FEMを用い、アーチアバットの滑動が崩落メカニズムに与える影響を、橋軸方向へ滑動した場合、橋軸直角方向へ滑動した場合、その両方が同時に生じた場合の3通りで評価した。

本解析では、いずれの解析でも、わずか0.25mの

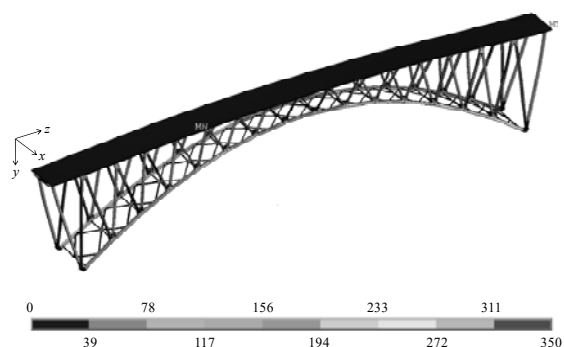


図-20 相当応力分布・変形図(単位：MPa)

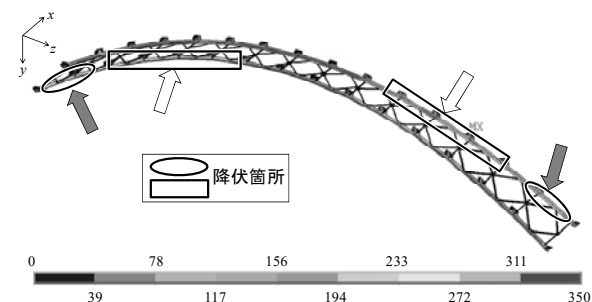


図-21 アーチリブに生じる相当応力分布・変形図(単位：MPa)

変位しか与えていないが、すべての解析でアーチリブに降伏応力を超える相当応力が広範囲に生じる得ることが分かった。また、橋軸方向への滑動、橋軸直角方向への滑動では、それぞれ異なる挙動を示すが、両方向に同時に滑動が生じた場合、それぞれの特徴を引き継ぐ挙動を示し、アーチリブにより大きな相当応力を生じさせることが示された。

謝辞：本研究の遂行にあたり、東京農工大学農学府石川芳治名誉教授に多大なるご助力を得た。ここに深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 谷口亮太, 千田知弘, 渡辺浩, 川崎巧：FEMによる阿蘇大橋の崩落メカニズムに関する静的検討, 第72回土木学会年次学術講演会, 投稿中, 2017.
- 2) 谷口亮太：FEMを用いた阿蘇大橋の崩落メカニズムの静的検討, 平成28年度福岡大学卒業論文, 2017.
- 3) 吉見雅行：断層活動・地盤変状について, 2016年熊本地震1周年報告会, 土木学会地震工学委員会, http://committees.jsce.or.jp/eec2/system/files/06_20170426JSCE-yoshimi-2in1s_0.pdf, 2017.
- 4) 石川芳治, 他45名：平成28年熊本地震による土砂災害, 砂防学会誌, Vol.69, No.3, pp.55-66, 2016.
- 5) (公社)砂防学会・平成28年熊本地震に係る土砂災害緊急調査団：平成28年熊本地震による土砂災害に関する緊急調査報告書, 2016.