

ASI-Gauss法による阿蘇大橋崩落プロセスの検証

Verification on Collapse Process of Aso Bridge during the 2016 Kumamoto Earthquake by ASI-Gauss Method

原倅平¹⁾, 浅井光輝²⁾, 磯部大吾郎³⁾, 田中聖三⁴⁾

Kohei Hara, Mitsuteru Asai, Daigoro Isobe, and Seizo Tanaka

- 1) 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744, E-mail: harasaki@doc.kyushu-u.ac.jp)
- 2) 九州大学大学院准教授 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744, E-mail: asai@doc.kyushu-u.ac.jp)
- 3) 筑波大学教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天文台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)
- 4) 筑波大学助教 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天文台1-1-1, E-mail: stanaka@kz.tsukuba.ac.jp)

The 2016 Kumamoto Earthquake caused serious damages not only for private houses but also for infrastructures in Kumamoto prefecture. For example, a huge landslide happened after the earthquake and Aso Bridge, which was constructed in the same location of the landslide, totally collapsed. Since there is no observation data, it is difficult to get consensus on the main reason of Aso Bridge's collapse. On the other hand, it is important in earthquake-resistant designing of bridges to investigate critical factors and failure processes. Therefore, in this paper, a numerical analysis of the Aso Bridge failure is conducted by ASI-Gauss method in order to verify the collapse process.

Key Words : Aso Bridge, The 2016 Kumamoto Earthquake, ASI-Gauss method, elasto-plastic analysis

1. はじめに

2016年4月に発生した熊本地震では、熊本地方全域に大きな被害が生じた。地震動により多くの橋梁が被害を受けており、本研究ではその中でも本震直後に崩落した阿蘇大橋に着目した(図-1)。阿蘇大橋崩落の原因として、これまでの調査研究等[1,2]により以下の4つが大きく関与しているものと推測されている。

- (1) 地震動による主要部材の損傷
- (2) 地盤変動による主要部材の損傷
- (3) 崩土(斜面崩壊土砂)による荷重増大
- (4) 基盤崩壊による支持部欠損

阿蘇大橋に最も近い観測点で得られた観測地震波[3]は、三成分合成最大加速度が1995年兵庫県南部地震の約1.5倍と非常に大きいものであり、地震動による主要部材の損傷が考えられている。また阿蘇大橋直下には活断層が存在する可能性があり、活断層により阿蘇大橋の基礎地盤が大きく変動したことが推測されている。そのため基礎地盤の大きな変動により主要部材への損傷も考えられている。さらに本震直後には阿蘇大橋背面の斜面が大規模に崩壊し、阿蘇大橋の架設されていた場所にも大量の土砂が流れ込んでいた(図-2)。そのため床版に堆積した大量の土砂の死荷重によって阿蘇大橋に加わる荷重が増大したことによる崩落の可能性が考えられている。さらに斜面崩壊の影響で、阿蘇大橋の右岸側の基礎地盤も崩壊しており、橋梁支承部からの崩壊の可能性も考えられている。これらの4つの可能性のうち、いずれかが阿蘇大橋崩落の原因になったと推測されている。

阿蘇大橋の崩落プロセスを解明し、その崩壊要因を特定することは、今後の山間部の橋梁の耐震設計の見直しの検討のために重要である。これまでも、現地調査より崩壊要因の特定を試みられているが、崩壊自体の目撃情報はなく、また崩壊現象までを通常の有限要素法では再現することが困難なため、崩壊要因の特定までには至っていない。そこで本研究では、磯部らによって開発された骨組構造の動的崩壊解析で実績のあるASI-Gauss法[4]を用い、阿蘇大橋の崩落プロセスの検証を実施した。



図-1 崩落前の阿蘇大橋



図-2 阿蘇大橋背面の斜面崩壊[5]

2. 阿蘇大橋及び解析モデル

(1) 阿蘇大橋の概要

阿蘇大橋は1971年に完成した全長205.9m、幅8.8m、谷底からの高さ76mの上路式トラス逆ランガーアーチ橋である。支間割は左岸から順に、桁橋18.020m、アーチ橋132.260m、桁橋18.020m×3桁となっている(図-3)。本橋は昭和39年鋼道路橋梁設計示方書に基づき設計されており、その後、渋滞対策や耐震補強のため2009年から補強工事が開始し、2015年4月から供用されていた。その耐震補強工事により、1995年兵庫県南部地震のような地震動が作用したとしても、阿蘇大橋の耐震性能は保障されていた。しかし2016年4月16日1時25分に発生した熊本地震本震直後に阿蘇大橋は崩落した。

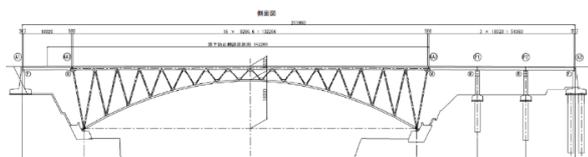


図-3 阿蘇大橋の図面[6]

(2) 解析モデル

本研究で用いたASI-Gauss法は磯部らによって開発されたFEM解析手法である[4]。1部材を2つの線形要素に分割し、数値積分点を順応的にシフトすることで部材の弾塑性挙動を低い計算コストで高精度に表現でき、またUpdated Lagrangianの定式化により崩壊に至るまでの大変形挙動を解析可能な有限変形弾塑性解析法である。

本研究では図-4に示すように、はり要素により、阿蘇大橋のアーチ区間(132m)をモデル化した。モデル右側が斜面崩壊側である。コンクリート床版はモデル化しておらず、床版の荷重が作用する部材の密度を調整することで、床版の死荷重を付与した。はり要素によりモデル化しているため、各部材の接合部の詳細まではモデル化しておらず、各部材は剛結させている。解析モデルの要素数1372、節点数696、部材数686、部材形状数は52種類である。この52種類の断面積、断面2次モーメント、塑性断面係数などの解析に必要な諸元は、設計図面[6]に記載された部材寸法から忠実にモデル化している。境界条件としてアーチ支承部節点の、回転を含む全方向変位を拘束している。主要部材である補剛桁とアーチリブ部材には、降伏応力が315MPaであるSM490鋼材、その他の部材は235MPaであるSM400、SS400鋼材の物性値を用いている。

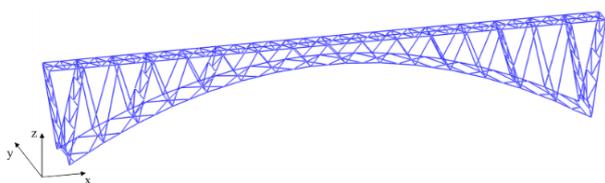


図-4 阿蘇大橋モデル

3. 解析条件

阿蘇大橋崩落の主因として考えられている(1)地震動による部材損傷、(2)地盤変動による部材損傷、(3)崩土による荷重増大、(4)基盤崩壊による支持部欠損のうち、どのプロセスが致命的な崩落要因を与えたかを数値解析により検証した。この4つの推測されている影響を地震動・地盤変動・崩土・基盤崩壊の順序で時系列に発生したと仮定し、各プロセスで与えられた損傷を次のプロセスへと継続させることで連続シナリオとして数値解析を実施した。

(1) 地震動

地震動の影響は、観測加速度を慣性力として付与した地震応答解析により議論した。観測加速度波形としては、熊本地震本震、阿蘇大橋に最も近い南阿蘇村河陽で観測されたものを用いた(Site Code:93011)[3]。この観測地点は震央からの距離約25.1km、阿蘇大橋からの距離は約3.4kmの地点に位置している(図-5)。加速度成分は、南北成分1111.8gal、東西成分954.6gal、上下成分654.4gal、三成分合成最大加速度1316.3galであり、震度6強の地震波である。表-1に示すように、この観測加速度波形は震源からの距離が十分にあるが、震度7を観測した益城町に匹敵するほどの強い加速度が観測されている。兵庫県南部地震で観測された三成分最大加速度の約1.5倍であり、また同じ観測点でも熊本地震前震や余震と比較しても非常に大きいことがわかる。このことは阿蘇大橋の真下に未知の活断層があり、活断層がずれたことにより、活断層周辺の地震波が大きくなったと考えられている。この観測地震波を用いて地震応答解析を実施した。

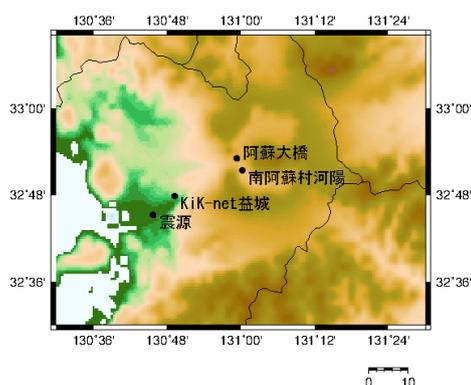


図-5 阿蘇大橋、観測地点、震源の位置関係

表-1 地震波の比較

観測データ[3,7]	三成分合成最大加速度 [gal]
熊本地震本震(南阿蘇村河陽)	1316.3
兵庫県南部地震(JMA KOBE)	891.0
熊本地震本震(KiK-net 益城)	1362
熊本地震前震(南阿蘇村河陽)	266.0
熊本地震余震(南阿蘇村河陽)	333.4

(2) 地盤変動

次に実施した地盤変動の影響は、強制変位解析を行うことで評価する。モデル支持部に与える変位量には航空レーザ測量データを用いて算出された推定地盤変位量を使用した[8]。左岸支持部に橋軸方向0.15m、橋軸直交方向0.41m、右岸支持部（斜面崩壊側）に橋軸方向-2.09m、橋軸直交方向-0.27mの強制変位を与えることで解析を行った（図-6）。その際、強制変位を与える節点の上下方向（z軸方向）と回転の変位量は0とした。地盤変動時間が1.0秒であると仮定し、強制変位解析を実施した。

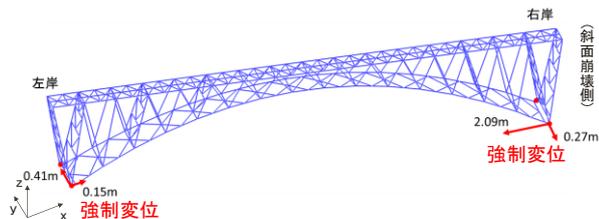


図-6 強制変位入力方向

(3) 崩壊土砂

崩土の影響は、堆積土砂の分布荷重を床版からの荷重を受け持つ上部工の部材に対し静的に作用した。現地調査によって崩土は1~2m程度の高さでの堆積が確認されている[9]。また阿蘇大橋の落下防止フェンスの高さが約2mであることから、堆積土砂の高さの上限値を2.0mとした。アーチ区間全域132mのうち、どのあたりまで崩土が届いたかは特定されていないのが現状である。そこで土砂がアーチ区間半域66mまで堆積した場合（図-7）とアーチ区間全域132mにわたり堆積した場合（図-8）を想定し、静的に等分布荷重を与えた。その際、土砂堆積高さを1.0m~2.0mまで0.1m刻みで変化させ、それぞれのケースについて解析を行った。崩土の密度は 1800kg/m^3 、幅は有効幅員と同じ8.0mとする。桁橋に堆積した土砂の死荷重は、桁橋と連結しているアーチ橋端部の部材に加えることにした。

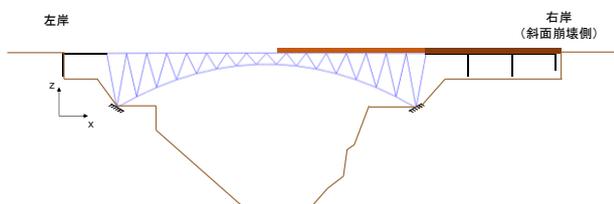


図-7 アーチ区間半域に堆積した場合

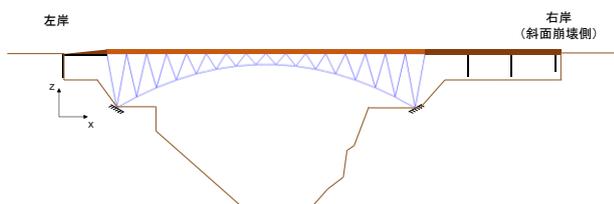


図-8 アーチ区間全域に堆積した場合

(4) 基盤崩壊

最後に実施した基盤崩壊の影響は、基盤崩壊の影響は、斜面崩壊側である右岸支持部の拘束を解除することで、橋の崩落を再現した。実現象においても右岸側の地盤が崩壊し、それに伴い右岸支持部が崩落していることが確認できている。支承部の拘束の解除は、任意のステップで境界条件を再設定し、拘束節点を左岸支承部のみにすることで行っている。

4. 解析結果

各推定したプロセスでの結果を整理し、崩落の要因を与えたと予想される過程について考察を行った。

(1) 地震動による部材損傷評価

図-9で示すように、一部降伏している主要部材（アーチリブ）が確認できた。主要部材であるアーチリブ、補剛桁の全要素数264要素のうち4要素（1.5%）が降伏したが、降伏した部材の多くは二次部材であった。阿蘇大橋周辺の多くの橋梁にも被害が生じているが、地震動が原因によって落橋した橋はない。また同橋は、2015年に完了した耐震補強工事によって1995年兵庫県南部地震のような地震に対しても十分な耐震性能を有するように補強されていた。以上のことから総合的に判断し、阿蘇大橋は主要部材に損傷はあったものの、損傷は限定的であったと推測でき、地震動によって崩落した可能性は低いと考える。図中の赤色の部材は塑性負荷状態であることを示す。

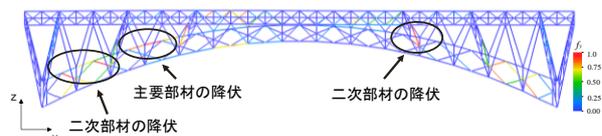


図-9 地震応答中の解析結果

(2) 地盤変動による部材損傷評価

モデル支持部に強制変位を作用させてところ、新たに主要部材が50要素降伏し、合計54要素（20.4%）降伏した。図-10で示すように、主要部材であるアーチリブや補剛桁の部材が多く降伏しており、多数の塑性ヒンジが生じていることを確認した。そのことから阿蘇大橋は地震動および地盤変動を連続的に受けることで主要部材にも大きな損傷を受けていたことが推測できる。しかし、本解析ではモデルが破断し、崩落に至るまでの結果はなかったことから、地震動および地盤変動により崩落した可能性は低いと考える。ただし地盤変動により阿蘇大橋は修復が困難なほど主要部材に致命的な損傷を受けており、落橋していなくても新たに橋を架け変える必要があるほど、損傷はしていたと予想する。

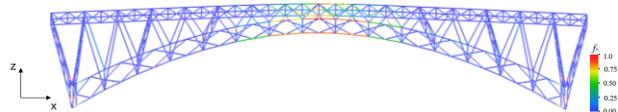


図-10 地盤変動後の解析結果

(3) 崩壊土砂による荷重増大の影響評価

これまでの累積損傷した状態にさらに崩土に対応する荷重を裁荷した。積範囲が半域(図-11)、全域(図-12)のどちらの場合においても、土砂の高さの上限値 2.0m まで裁荷しても崩落はしなかった。どちらのケースにおいても主要部材が新たに 10 要素降伏し合計 64 要素(24.2%)が降伏した。図に示すように阿蘇大橋は崩壊土砂の流出範囲の中心からずれて位置しており、崩壊土砂の大部分は川に流れ込んでいる(図-13)。そのためアーチ区間の全長 132m にわたって高さ 2.0m の土砂が堆積するとは考え難いものの、このような厳しい条件においても崩落には至らなかった。しかしながら、崩土を等分布荷重として死荷重のみを付与しており、斜面崩壊中の崩土の動的な作用までは考慮できていないため、荷重設定方法の見直しが今後必要であると考えられる。

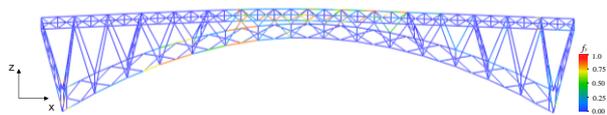


図-11 等分布荷重作用後の解析結果(半域)

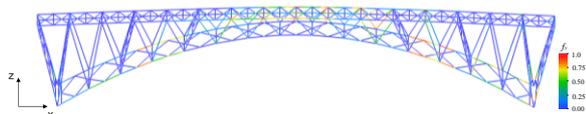


図-12 等分布荷重作用後の解析結果(全域)



図-13 崩壊土砂の流出範囲

(4) 基盤崩壊による支持部欠損の影響評価

斜面崩壊側の支持部の拘束を解除した結果、(図-14)に示すように橋全体が崩落した。同図から、基盤崩壊が発生していない側のアーチリブの根本部材が破断しており、これは被害調査での報告と整合した現象であった。

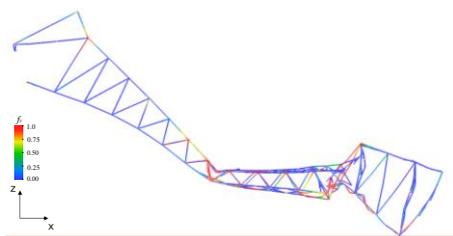


図-14 基盤崩壊時の解析結果

5. 結言

ASI-Gauss 法により、地震動、崩土、地盤変動、基盤崩壊の影響を連続的に解析し評価した結果、地震荷重や地盤変動、堆積土砂の死荷重などでは阿蘇大橋が崩落する可能性は比較的低いとの結果を得た。また、橋台を支える地盤が崩れた場合、阿蘇大橋が崩落することが再現できた。現状では崩土を静的荷重として与えているなど、荷重条件が実現象に即していない恐れもあるため、今後は崩土の動的な作用を考慮し、解析結果の信頼性を高めることで、崩落要因を特定していく予定である。

表-2 解析結果のまとめ

崩落プロセス	主要部材の累積降伏部材数		可能性
地震動による落橋	4	1.5%	低い
地盤変動による落橋	54	20.4%	低い
崩土による落橋	64	24.2%	低い
基盤崩壊による落橋	-	-	高い

謝辞: 研究に一部はJPS科研費・基盤研究(B)17H02061の助成を受けたものです。また本研究に用いた観測地震波は気象庁強震観測データより取得しました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- [1] 森口周二, 寺田賢二郎: 平成28熊本地震調査報告書(速報)~東北大学災害科学国際研究所 構造物・土砂災害調査チーム~, pp.3-12, 2016.
- [2] 日経BP社: 日経コンストラクション, 2016年5月23日号(640号), 2016.
- [3] 気象庁強震観測データ(南阿蘇村河陽), http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/1604160125_kumamoto/data/Q4160125_93011.csv, 2017年12月21日閲覧.
- [4] 磯部大吾郎: *Progressive Collapse Analysis of Structures - Numerical Codes and Applications*, Elsevier, 2017.
- [5] The Mainichi, <https://mainichi.jp/english/graphs/20160416/hpe/00m/0dm/001000g/32>, 2018年4月9日閲覧.
- [6] いであ株式会社: 平成21年度国道325号地域活力基盤創造交付金(橋梁補修)委託 他合併, 2010.
- [7] 防災科学技術研究所, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/kyoshin.shtml>, 2017年12月21日閲覧.
- [8] 千田知弘, 崔準祐ら: 航空レーザ測量に基づく地盤変動と斜面崩壊による崩土を考慮した阿蘇大橋崩落の可能性に関する検討, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.74 受理.
- [9] (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.