

熊本地震で被災した南阿蘇橋の損傷メカニズムの検討

(株) エイト日本技術開発 ○木野村宏昭
(株) エイト日本技術開発 藤田 亮一

論文要旨

本論文は「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」が立ち上げた「熊本地震による橋梁被害分析ワーキング」のワーキンググループの検討成果の一部を取りまとめたものである。2016年の熊本地震で被災した南阿蘇橋は平成22年に制震ダンパーによる耐震補強がなされた。しかし、熊本地震の影響でダンパー取付け部のRCブロックが破壊し、その機能が十分に発揮されたかどうかなどは未解明のままである。本稿では、骨組みモデルによるサイト波を用いた動的解析や橋台の押し出しを模擬したプッシュオーバー解析を実施し、地震による橋の損傷原因や補強効果について検討する。

キーワード：熊本地震，制震ダンパー，動的解析，損傷

まえがき

2016年に発生した熊本地震では、斜面崩壊による道路網の寸断や橋梁の落橋など、土木構造物に大きな被害をもたらした。現在では、復旧作業が進められ社会基盤施設は概ね整備されつつあるが、未だに被災時のまま復旧の手が付けられていない構造物も存在する。その一つに南阿蘇橋があげられる。

南阿蘇橋は、過去に耐震補強が施され、制震ダンパーや座屈拘束ブレースなどが設置された。しかし、熊本地震の影響により、耐震補強時に設置されたダンパーの取付け部のRCブロックが損傷し、現在に至ってもなお通行止めとなっている。取付け部の破壊に至った損傷過程や、地震時にダンパーそのものの機能が十分に発揮されたかどうか

などは未解明のままである。

そこで本論文では、橋梁全体を模擬した骨組みモデルによる再現解析を実施し、地震による損傷シナリオや過去に実施された補強効果について検討する。

1. 南阿蘇橋の概要と損傷状況

(1) 橋梁概要

南阿蘇橋は熊本県阿蘇郡南阿蘇村の国道325号上に位置し、黒川支流の濁川に架けられている。その橋長は110m、総幅員は9m、構造形式は上路式2ヒンジアーチ橋である。本橋は1971年に完成し、2009年度に耐震補強が実施され、制震ダンパーや座屈拘束ブレースが設置された。一般図を図-1に示す¹⁾。

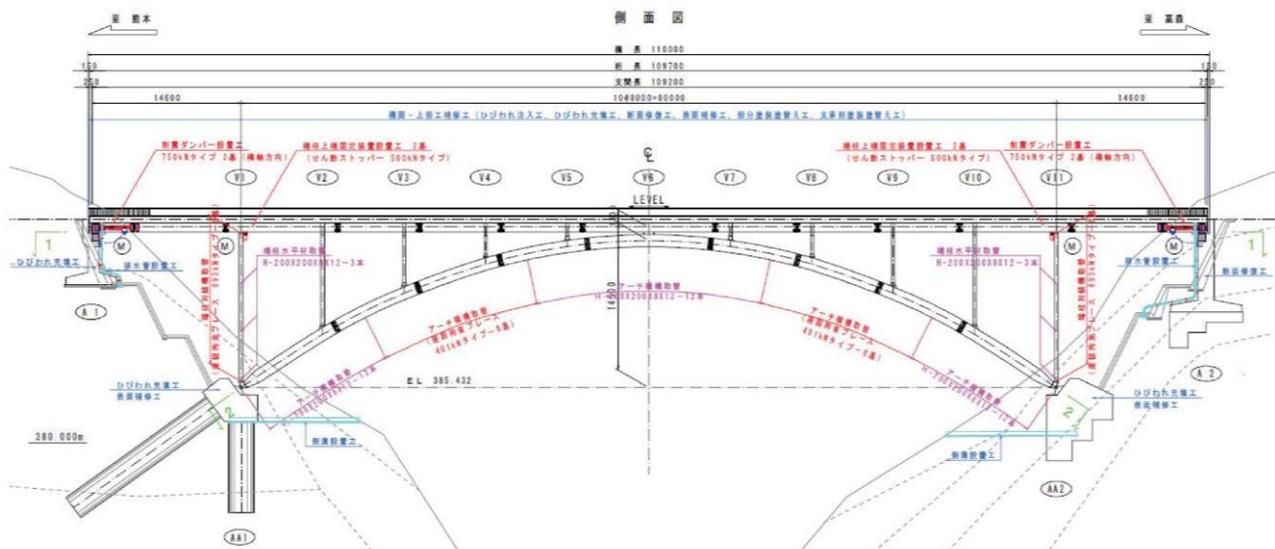


図-1 南阿蘇大橋 補修補強計画一般図¹⁾

(2) 南阿蘇橋の損傷状況

a) ジョイント部の水平移動と段差

橋梁ジョイント部の損傷状況を写真-1, 2 に示す。写真からわかるように A1 橋台側の被害は A2 橋台側と比較して軽微であった。A2 橋台側ではジョイント部にずれが生じ、写真-2 に示すように橋軸直角方向に 40mm の水平変位と 45mm の段差が生じていた。

b) ダンパー取付け部のRCブロック

ダンパー取付け部のRCブロックの損傷状況を写真-3 に示す。A1 橋台側では、補強時に施工された部分のRCブロック隅角部よりひび割れが生じ、上流側においては一部コン

クリートが剥落していた。A2 橋台側では、ダンパー取付け部のRCブロックが破壊し、下流側においては、橋台から脱落し、主桁ウェブとの取付け部にぶら下がっている状態となっていた。

c) ピン支承部の接合ボルト

ピン支承の接合ボルトの損傷状況を写真-4 に示す。A1 橋台側の下流側を除いて、ピン支承とアーチ端支柱との接合ボルトが写真-4 に示すように全て破断し、外れていた。一方、ピン支承とアーチリブとの接合ボルトは、接合面に隙間は確認されたものの、すべてのボルトが残存していた。



(a) A1 橋台側 (b) A2 橋台側

写真-1 ジョイント部の損傷状況



(a) 直角方向水平変位 (40mm) (b) 橋台との段差 (45mm)

写真-2 A2 橋台側に生じた水平変位と段差



(a) A1 橋台側 (上: 上流 下: 下流)



(b) A2 橋台側 (上: 桁下より 左下: 上流 右下: 下流)

写真-3 ダンパー取付け部の RC ブロックの損傷状況



(a) A1 橋台側 (上流側)



(b) A2 橋台側 (下流側)



(c) セットボルトの破断 (A2 橋台側)

写真-4 ピン支承接合ボルトの損傷状況 (端支柱との接合部)

2. 解析モデルと固有地解析

本論文では、可動支承部である橋台を除いて、橋梁全体系を図-2に示すように骨組みモデルによりモデル化し、再現解析を実施する。以下に解析条件を示す。

(1) 部材のモデル化

南阿蘇橋を構成する鋼部材およびRC床版は線形梁要素でモデル化した。床版と補剛桁は図-3のようにモデル化した。また、南阿蘇橋に用いられた制振装置である粘性ダンパーおよび座屈拘束ブレースは非線形ばね要素でモデル化し、その特性は図-4に示すとおりである。

(2) 動的解析手法

本論文で実施する時刻歴応答解析の数値積分法にはNewmark-β法(β=0.25)を用い、積分時間間隔はΔt=0.01(s)とした。また、解析方向は橋軸方向と橋軸直角方向(以後直角方向と称する)の2方向を考慮し、減衰には要素別レーリー減衰を適用した。

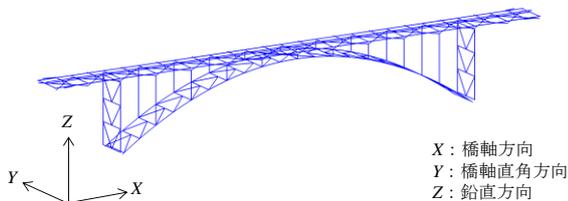


図-2 解析モデル

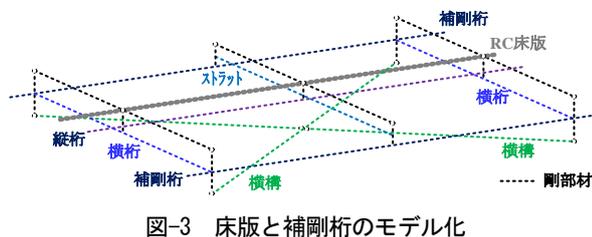
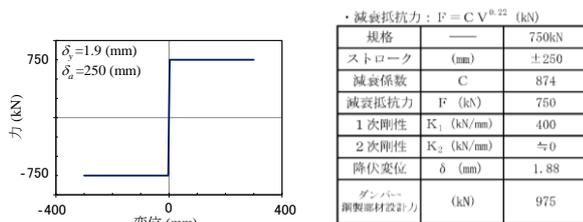
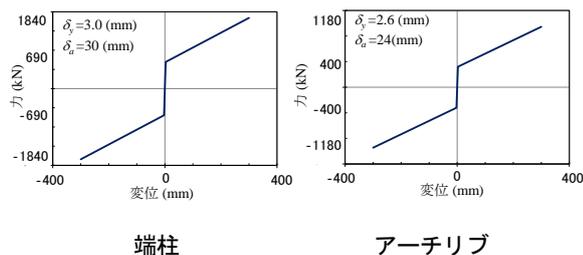


図-3 床版と補剛桁のモデル化



(a) 粘性ダンパー



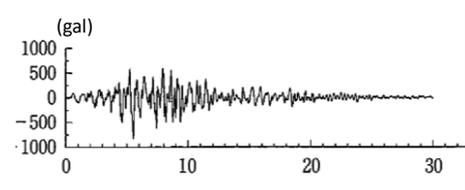
(b) 座屈拘束ブレース

図-4 制振装置の履歴特性

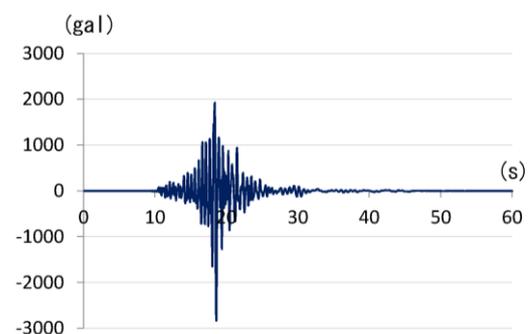
(3) 入力地震動

本論文で利用する入力地震動を図-5に示す。図-5(a)に示す波は道路橋示方書(以下、道示と称する)で定められたレベル2地震動タイプII地震のI種地盤1波目である²⁾(以下、道示波と称する)。南阿蘇橋の地域区分はB地域(熊本県阿蘇郡)で地盤種別はI種地盤であり、2009年度の耐震補強時の検討でタイプII地震の影響を大きかったという報告が得られていることから、図-5(a)に示す波を道示波の代表として利用した。図-5(b), (c)に示す波は、秦³⁾によって再現された熊本地震時の推定波であり、推定のための解析手法は文献4)に示されている。

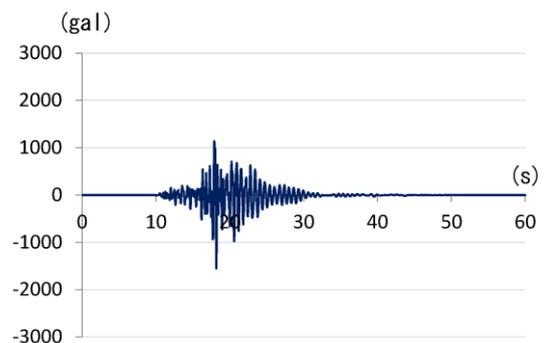
橋軸方向には図-5(a)の道示波(地域別補正係数 $c_z=0.85$ を乗じる)と図-5(b)のサイト波のNS成分(以下、NS波と称する)を、直角方向には図-5(a)の道示波(地域別補正係数 $c_z=0.85$ を乗じる)と図-5(c)のサイト波のEW成分(以下、EW波と称する)を入力波として利用する。



(a) 道示波(L2タイプII-I-1) [橋軸・直角加振]²⁾



(b) 熊本地震サイト波(NS成分) [橋軸加振]³⁾



(c) 熊本地震サイト波(EW成分) [直角加振]³⁾

図-5 入力地震動

(4) 固有値解析とレーリー減衰

粘性ダンパーの初期剛性が橋梁の周期特性に影響を及ぼさないよう、固有値解析を実施した。図-6に固有値解析から得られた橋軸方向および直角方向の1次モードを示す。また、表-1にレーリー減衰で剛性マトリクス、質量マトリクスを定めるモード特性と定数 α 、 β を示す。

3. 動的解析結果

橋軸方向には道示波、NS波を、直角方向には道示波、EW波を作用させ動的解析を実施し、橋梁に生じる被害を評価した。その際、粘性ダンパーの非線形ばねは速度依存型でモデル化した。

(1) 主要部材の降伏判定

道示波、NS波、EW波に対する主要部材に生じる最大曲げ応力と降伏応力の比(超過率=応答値/降伏応力)を表-2に示す。

設計地震動である道示波を作用させた場合は橋軸方向、直角方向ともにどの主要部材も超過率が1.0未満となり、降伏には至らない。これは、二次部材も含めすべての部材で同様の結果であった。補強前の現況照査の結果では、設計地震動に対する照査で耐震性を満足しない部材があったことから、補強による効果を確認できた。

一方、推定地震動であるサイト波を作用させた場合、橋軸方向、直角方向ともに複数の部材で超過率が1.0を超え、降伏する結果となった。特に、橋軸方向にサイト波を作用させた場合の超過率の値が大きく、直角方向の場合と比較してかなり厳しい結果であった。これは、サイト波のNS成分の最大加速度がEW成分よりかなり大きな値となっていることに起因する。

これらのことから、南阿蘇橋を構成する部材は設計時の地震動では損傷しないが、サイト波では降伏限界を超え損傷することがわかった。

(2) ダンパー取付け部(RCブロック)に生じる力

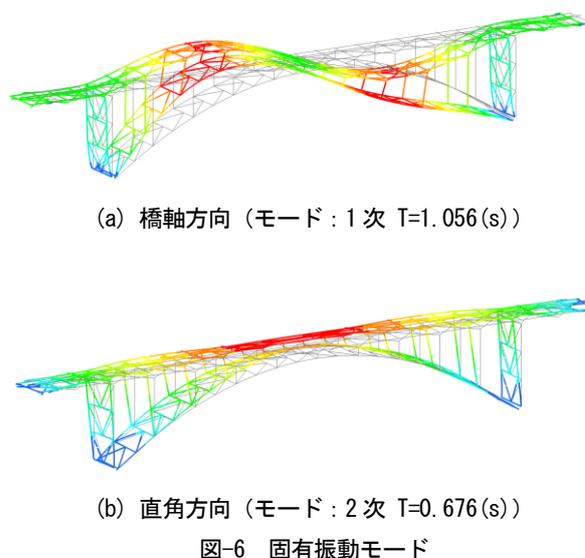
a) 橋軸方向の水平力の影響

A1、A2橋台の支承はどちらも可動支承で、端部に働く橋軸方向の力はダンパーに生じる水平力のみとなる。橋軸方向に道示波およびNS波を作用させた場合のダンパーの荷重-変位関係の応答図を図-7に示す。また、RCブロックの設計時の橋軸方向の耐力は1080kNである。

ダンパーに生じた最大応答変位は、道示波の場合(図-7(a))で約25mm、サイト波の場合(図-7(b))で約115mmであった。ダンパーのストロークは図-2(a)に示したように±275mmであり、ダンパー本体は損傷しない。

ダンパーに生じる水平力が最大となったのは、NS波を作用させた場合で、883kNであった(図-7(b))。これは、

粘性ダンパーの規格である750kNを超えた数値である。このように、速度依存の粘性ダンパーでは応答した速度によっては、規格値を超える水平力が作用することがあることに留意する必要がある。しかし、橋軸方向に対するRCブロックの耐力は1080kNであることから、より実際の挙動に近い速度依存モデル化した場合でも、橋軸方向の水平力(883kN)ではRCブロックは損傷しない。ただし、ジョイント部の損傷からも推察できるように、橋台が橋軸方向に押し出されており、この影響でRCブロックが損傷した可能性は考えられる。



(a) 橋軸方向 (モード: 1次 T=1.056(s))

(b) 直角方向 (モード: 2次 T=0.676(s))

図-6 固有振動モード

表-1 レーリー減衰に用いる定数 α 、 β

方向	モード次数	振動数	固有周期	定数	
				α (質量M)	β (剛性K)
橋軸	1	0.947	1.056	0.20945	0.0011428
	7	4.182	0.239		
直角	2	1.48	0.676	0.34338	0.0005456
	18	7.084	0.141		

表-2 主要部材に生じる曲げ応力の超過率

部材	Case 1 (道示波・橋軸加振)			Case 2 (道示波・直角加振)		
	曲げ 応力 σ (N/mm ²)	降伏 応力 σ_y (N/mm ²)	超過率 (σ/σ_y)	曲げ 応力 σ (N/mm ²)	降伏 応力 σ_y (N/mm ²)	超過率 (σ/σ_y)
アーチリブ	208.9	235	0.889	212.6	235	0.905
補剛桁	243.7	315	0.774	130.0	315	0.413
端支柱	111.3	235	0.473	178.5	235	0.760
アーチ鉛直材	63.3	235	0.269	50.8	235	0.216
アーチカラウ	191.1	315	0.607	135.9	315	0.431
部材	Case 3 (NS波・橋軸加振)			Case 4 (EW波・直角加振)		
	曲げ 応力 σ (N/mm ²)	降伏 応力 σ_y (N/mm ²)	超過率 (σ/σ_y)	曲げ 応力 σ (N/mm ²)	降伏 応力 σ_y (N/mm ²)	超過率 (σ/σ_y)
アーチリブ	796.4	235	3.389	301.0	235	1.281
補剛桁	1252.5	315	3.976	315.6	315	1.002
端支柱	471.4	235	2.006	341.7	235	1.454
アーチ鉛直材	177.6	235	0.756	78.4	235	0.334
アーチカラウ	948.2	315	3.010	221.4	315	0.703

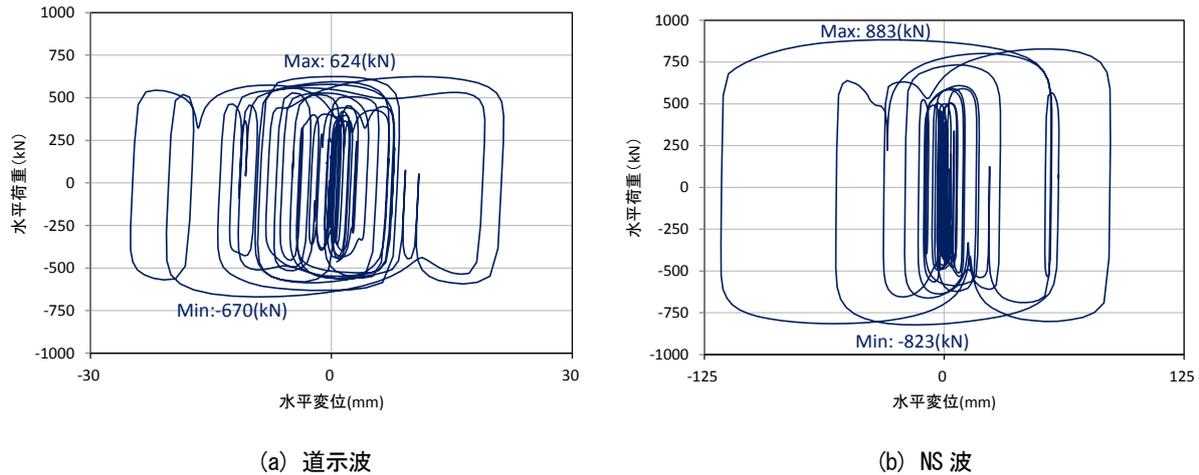


図-7 粘性ダンパーの時刻歴応答

b) 直角方向の水平力の影響

ダンパー取付け部の RC ブロックに作用した直角方向の水平力を評価する。直角方向に道示波, EW 波を作用させた場合の桁端部の支承部に生じる直角方向の反力を表-3 に示す。実際の被害状況において支承部は損傷していなかったことから, ここでは, 支承部に生じる反力がすべて RC ブロックに伝達されると仮定している。

表-3 からわかるように, 道示波を作用させた場合は超過率は 0.7 未満であり, RC ブロックは損傷しない。一方, サイト波である EW 波を作用させた場合, 全ての端部で超過率が 1.6 を超え, RC ブロックのせん断耐力を超える力が作用する。以上より, RC ブロックは直角方向の水平力に対し設計時の地震動では損傷しないが, サイト波では損傷することがわかった。

(3) アーチ基部ピン支承のセットボルト

直角方向に道示波, EW波を作用させた場合のアーチリブおよび端支柱の接続ボルトに作用する引き抜き力を表-4にまとめる。ここで, ピン支承部のセットボルトの有効径は27.7mm, 1本当たりの断面積は604mm², 材質はSS400である。

表-4の超過率に着目すれば, 道示波を作用させた場合, アーチリブとの接合面のセットボルトは健全である。それに対し, 端支柱部直下の接合面では, 超過率が1.0を超え, 損傷する結果となった。一方, サイト波であるEW波を作用させた場合, アーチリブ, 端支柱部直下, どちらの接合面のセットボルトも超過率が1.0を超え損傷する結果となった。接合面に生じる引張応力の値は端支柱部の方がアーチリブより大きな値となり, 破断荷重を大きく上回っている結果となった。

以上のことから, 直角方向にサイト波が作用すれば, アーチリブ, 端支柱どちらのセットボルトも損傷するが, 端

表-3 桁端部に生じる直角方向の反力

入力波	位置		桁端部に生じる直角方向の最大水平反力(kN)	RCブロックのせん断耐力(kN)	超過率
道示波 (Case 2)	A1橋台	上流側	1060	1612	0.658
		下流側	1099		0.682
	A2橋台	上流側	1061		0.658
		下流側	1099		0.682
EW波 (Case 4)	A1橋台	上流側	2660		1.650
		下流側	2638		1.636
	A2橋台	上流側	2648		1.643
		下流側	2641		1.638

表-4 引き抜き力によるセットボルトの損傷

入力波	部材	位置	引き抜き力 kN	ボルト本数	引張応力 N/mm ²	降伏応力 N/mm ²	超過率 (引張/降伏)	
道示波 (Case 2)	アーチリブ	AA1	上流側	53	8	11	235	0.047
			下流側	0	8	0	235	0.000
		AA2	上流側	54	8	11	235	0.047
			下流側	0	8	0	235	0.000
	端支柱	AA1	上流側	1168	4	484	235	2.058
			下流側	1145	4	474	235	2.018
AA2		上流側	1165	4	482	235	2.052	
		下流側	1141	4	472	235	2.010	
EW波 (Case 4)	アーチリブ	AA1	上流側	2327	8	482	235	2.050
			下流側	2102	8	435	235	1.851
		AA2	上流側	2326	8	482	235	2.049
			下流側	2100	8	435	235	1.850
	端支柱	AA1	上流側	1516	4	627	235	2.670
			下流側	1520	4	629	235	2.677
		AA2	上流側	1503	4	622	235	2.649
			下流側	1507	4	624	235	2.655

支柱部の方がより大きな損傷を受ける傾向がみられた。これは, 道示波の結果からも同様のことが言える。実際のセットボルトの被害状況は写真-4 に示すように, 端支柱部のセットボルトのみが破断していて, これは解析上で再現したセットボルトの損傷の傾向と一致している。

4. プッシュオーバー解析結果

橋台部が橋軸方向に押し出されたことによる損傷を検討するため, 桁端部を橋軸方向へ強制変位させ, プッシュオーバー解析を実施した。南阿蘇橋の主桁とパラペットとの遊間は 150mm であり, 桁と橋台部が衝突した後は橋軸方向の荷重を橋台部の可動支承が受け持つよう, 支承をギ

ヤップ要素でモデル化した。

衝突後に橋台部に生じる水平力が、RCブロックにそのまま作用した場合を考える。その際、橋台部の押し出しによる影響でダンパーが突っ張り、十分な性能を発揮できなかったと仮定している。RCブロックにそのまま作用した場合を考える。衝突時の変形図を図-8に、桁端部の強制変位量と衝突後に生じる水平力との関係を図-9に示す。

図からわかるように、150mmの遊間が埋まり、桁と橋台が衝突すれば、衝突したその瞬間から、過大な水平荷重が橋台部に作用することとなる。RCブロックの設計時の橋軸方向の耐力は1080kNであることから、この荷重がRCブロックに作用したとすれば、衝突した後すぐに、RCブロックは損傷する。これらのことから、橋台の押し出しによりRCブロックが損傷する可能性は大いにあり得るが、実際の損傷状況では、桁と橋台の衝突による痕跡は見られなかったため、このような仮定で損傷したとは考えにくい。そのため、あらゆる損傷の可能性、要因を如何にモデル化するかを十分に検討する必要がある。

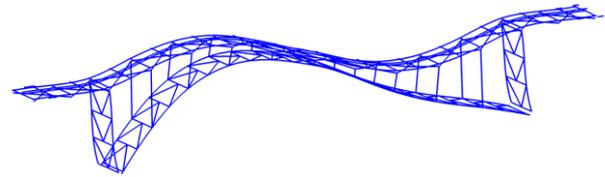


図-8 衝突時の変形図

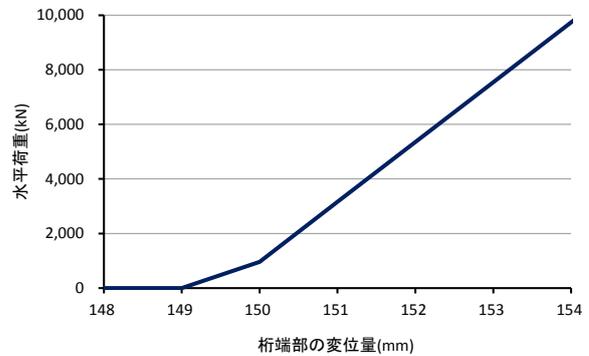


図-9 桁端部の変位量と水平荷重

表-5 ダンパー、セットボルトの損傷シナリオ

損傷箇所	考えられる損傷シナリオ	損傷シナリオに対する解析的なアプローチ
ダンパー取付け部 RCブロックの破壊	地震力による 支承部とRCブロックの衝突	サイト波による動的解析(直角方向)
	橋台の橋軸方向への押しだし	ブッシュオーバー解析(橋軸方向)
	斜面崩壊による橋梁全体の 直角方向への引っ張り	ブッシュオーバー解析(直角方向)
	ダンパーを介してRCブロックに 作用した想定以上の荷重	サイト波による動的解析(橋軸方向) ※ダンパーを剛部材としてモデル化
ピン支承部 セットボルトの破断	地震力により発生した上揚力	サイト波による動的解析(直角方向)
	斜面崩壊による橋梁全体の 直角方向への引っ張り	ブッシュオーバー解析(直角方向)

あとがき

熊本地震で被災した南阿蘇橋を対象に、設計地震動である道示波と熊本地震の推定地震動であるサイト波を用いた動的解析や、橋台の押し出しを模擬したブッシュオーバー解析を実施し、その損傷状態について再現解析から評価した。以下にその結果をまとめる。

- (1) 南阿蘇橋を構成する部材は設計地震動では損傷しないが、サイト波では降伏限界を超え損傷する。特に、橋軸方向にサイト波を作用させた場合の超過率が大きく厳しい結果であった。
- (2) ダンパー取り付け部のRCブロックは、ダンパーが正常に機能していたとすれば、橋軸水平方向の力ではサイト波の場合でも損傷しない。一方、直角方向に作用する力では、RCブロックは設計時の地震動では損傷しないが、サイト波では損傷する。ただし、アバットの押し出しによる損傷など様々な可能性が考えられるため、検討が必要である。
- (3) 解析から得られたセットボルトの損傷状態の傾向は、実際の被害状況の傾向と一致しており、損傷するプロセスを解析によって再現することができた。
- (4) 橋軸方向への橋台部の押し出しを模擬したブッシュオーバー解析を実施し、限定された仮定のもと損傷の程度を評価した。
- (5) ダンパーやセットボルトの損傷シナリオは表-5に示すように様々な要因や可能性が考えられる。これらの可能性を一つ一つ評価し、最も妥当な損傷シナリオを推定することが今後の課題として挙げられる。

謝辞

本論文で実施した動的解析では、大阪大学 大学院工学研究科 秦吉弥准教授が作成した熊本地震のサイト波を利用させていただいている。ここに記し、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人土木研究所:平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告, 国総研資料第967号, 土木研究所資料第4359号, 2017-3.
- 2) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2012-3.
- 3) 臨時余震観測に基づく2016年熊本地震本震時の被災橋梁架橋地点での推定地震動ダウンロードサイト/
<http://committees.jsce.or.jp/eec204/node/44>
- 4) 秦吉弥:臨時余震観測に基づく2016年熊本地震における西原村および南阿蘇村の被災橋梁に作用した地震動の評価, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp.265-278, 2017.