第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

支承部の損傷痕から推定する道路橋の地震時挙動の考察

中尾　尚史[1]・河原井　耕介[2]・大住　道生[3]

[1]正会員　博(工)　(研究当時)国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター　専門研究員
現　舞鶴工業高等専門学校　建設システム工学科　講師（〒625-8511　京都府舞鶴市字白屋234番地）
[2]正会員　修(工)　国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター　交流研究員
（〒305-8516　茨城県つくば市南原1-6）
[3]正会員　博(工)　国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター　上席研究員
（〒305-8516　茨城県つくば市南原1-6）

1. はじめに

2016年熊本地震では，地震動や地盤変状により橋の機能が喪失する被害が生じた．被害が生じたことを真摯に受け止め，技術の発展につなげていくためには，橋の損傷メカニズムを検証することが重要である．例えば，損傷制御設計では部材の損傷過程を制御することが必要となるが，そのためには実地震において橋がどのような損傷過程を経たかを実証することが重要となる．

橋の損傷に至る挙動を明らかにする方法は幾つかあるが，方法の1つとして応答解析からアプローチする方法がある[1),2)]．このアプローチは，橋の構造条件や地震動等の作用条件を設定することで，時刻歴の橋の挙動や各部材の応力や変位等を明らかにすることができる．ただし地震動の特性や部材の剛性など橋の物性については仮定することになるため，解析により得られた結果と実際の挙動は異なる可能性がある．

別の方法として，損傷痕からアプローチする方法がある[3),4)]．このアプローチは，損傷痕や部材の損傷状態から得られた事実を積み重ねることで，橋の挙動や損傷箇所における力の作用状態を明らかにすることができる．ただし，時刻歴の挙動や部材に生じた応力は一定の範囲までしかわからない．

土木研究所では，熊本地震により被害を受けた橋の調査を行っており[5)]，道路橋の損傷状態に関する記録を収集している．そこで本研究では，熊本地震で被害を受けた大切畑大橋のP1橋脚に着目して，橋に残された損傷痕や支承の損傷状態から地震時の挙動や損傷メカニズムの推定を試みた．

2. 大切畑大橋の概要

大切畑大橋は，熊本県の県道28号に位置する橋長265.4mの5径間連続非合成曲線鈑桁橋(R=250m)である(**写真-1**)．本橋は平成8年道路橋示方書を基に設計されており，2001年に竣工した．橋梁一般図を**図-1**に示す．本橋の支承形式は水平力分散ゴム支承，下部構造形式は逆T式橋台及び張出し式橋脚，基礎形式はA1,P2及びP3は場所打ち杭，P1,P4及びA2は深礎杭であった．また，橋台上の支承にはサイドブロック，桁と橋台をつなぐ落橋防止ケーブルが設置されていた．

3. P1橋脚上の支承の損傷

写真-2にP1橋脚上の支承の損傷状態を示す．P1橋脚上の支承は全て損傷，かつ桁は支承から脱落し，A1G1側に落下していた．P1橋脚上の支承は他の支点の支承と異なり，**写真-2**に示したように支承の損傷状態が各支承で異なっていた．G1桁の支承は，上沓及び下沓取付ボルトの一部が抜け出し，その他は破断し，ゴム支承本体が上下反転した状態になっていた．G2桁の支承は，上沓取付ボルトが一部は抜け出し，その他は破断したことで主桁が支承から脱落



写真-1　被災前の大切畑大橋

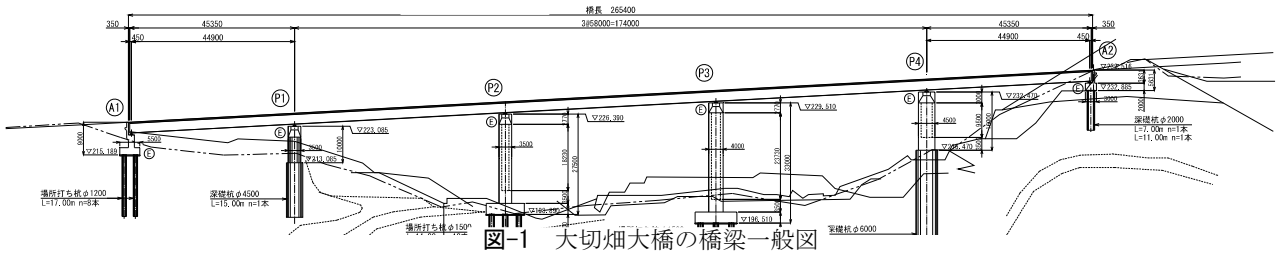


図-1　大切畑大橋の橋梁一般図

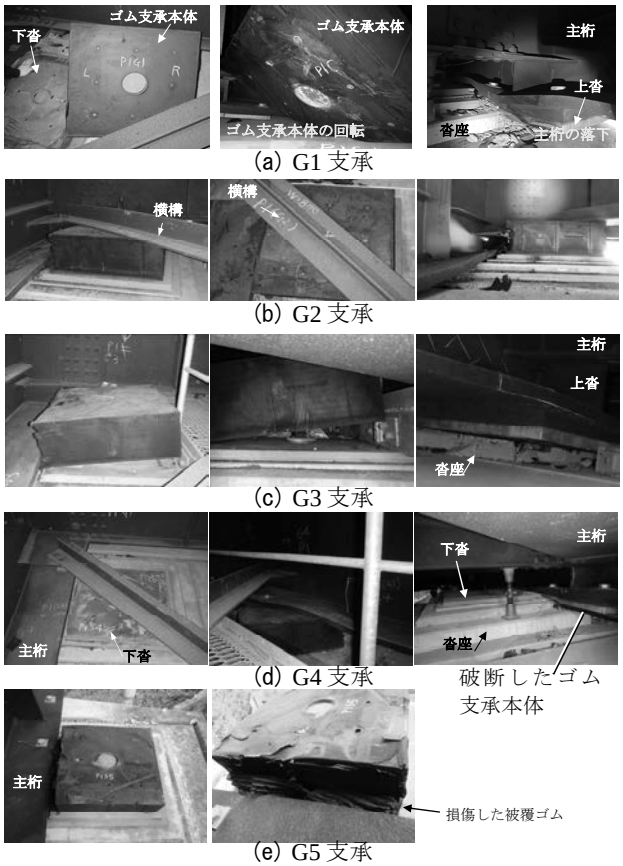


写真-2　P1 橋脚の支承の損傷状態

し，横構がゴム支承本体上に載っていた．G3桁の支承は，上沓及び下沓取付ボルトの一部が抜け出し，その他は破断していた．G4桁の支承は，上沓及び下沓取付ボルトの一部が抜け出し，その他は破断していた．さらに，ゴム支承本体の上部で破断していた．G5桁の支承は，上沓取付ボルトで一部は抜け出し，その他は破断し，主桁はゴム支承本体から脱落していた．また，G1側側面の被覆ゴムが損傷していた．

4. 支承の損傷痕から推定する各支承部の挙動

(1) G1支承部の挙動

写真-3は，ゴム支承本体上面の損傷状態である．なお，以降の写真に示した損傷の痕跡については，実際のせん断キーや損傷した取付ボルトを用いた検証等を行い，原因を特定できたものを示している．写真より，G1側のせん断キーを設置する穴(本論文では，せん断キー穴と呼称)に変形した跡が見られる．このような変形は，せん断キーが傾かない限り

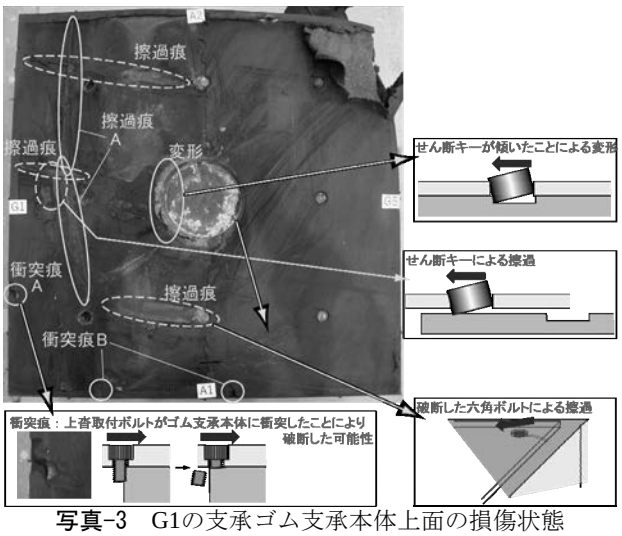
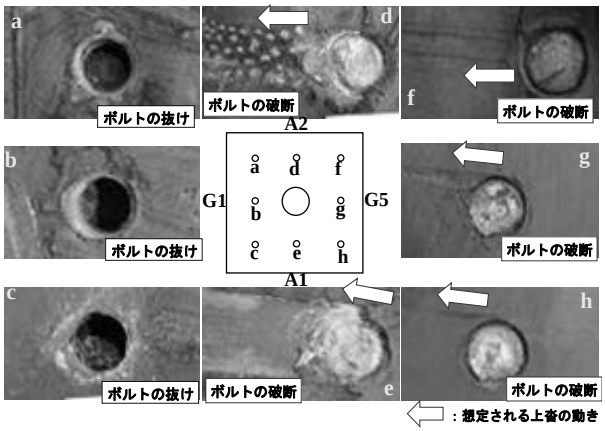


写真-3　G1の支承ゴム支承本体上面の損傷状態

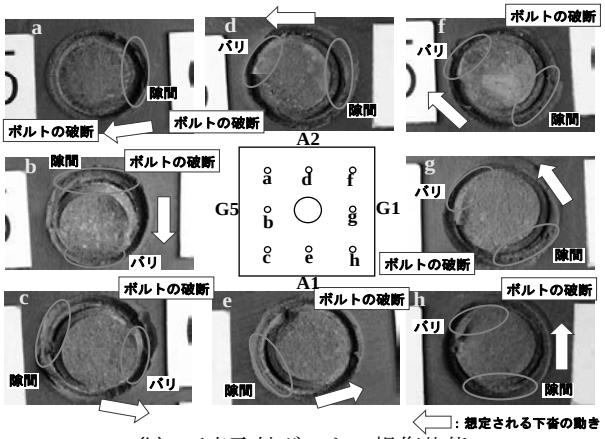
生じない．そのため，G1側に傾いたせん断キーが，せん断キー穴に押し付けられたことにより変形したと考えられる．また，G1側の側面及びA1側の側面に衝突痕が見られる(衝突痕A及び衝突痕B)．これらは，後述するゴム支承本体から抜け出した上沓取付ボルトがゴム支承本体側面に衝突したことにより生じたと考えられる．

写真-4は上沓及び下沓取付ボルトの損傷状態である，**写真-4(a)**に示した上沓取付ボルトの損傷状態を見ると，aからcの取付ボルトが抜けており，それ以外の取付ボルトは破断していた．別途実施したゴム支承の載荷実験[6)]では，取付ボルトが引き抜けた側にゴム支承がせん断変形していたことが分かっている．そのため，これらの損傷状態から，上部構造が相対的にG1側に移動したと考えられる．また，**写真-3**に示した衝突痕Bを見ると，衝突痕Bの間隔は上沓取付ボルト穴の間隔とほぼ一致したことから，後述のように支承が90°回転した可能性と併せて考えると，抜け出した上沓取付ボルトのa,b又はb,cが衝突したと推測される．ここで，ボルトcがゴム支承本体のG1側の側面に衝突した場合，ボルトa,bが衝突した痕跡もG1側の側面に生じるはずだが，これら衝突痕は確認できなかった．そのため，G1側の側面(衝突痕A)は抜け出した上沓取付ボルトaが衝突したと推定できる．

写真-4(b)に示した下沓取付ボルトの損傷状態を見ると，全てゴム支承本体下面で破断している．ボルトの破断面を見ると，ボルト穴に隙間及び破断し



(a) 上沓取付ボルトの損傷状態



(b) 下沓取付ボルトの損傷状態

写真-4 上沓及び下沓取付ボルトの損傷状態(P1G1)

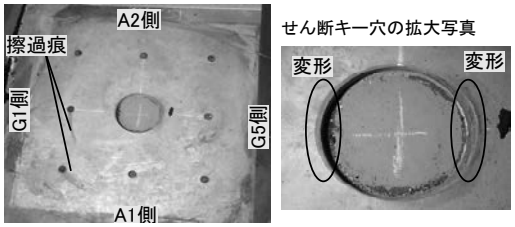


写真-5 G1支承下沓の損傷状態(被災後の現地写真)

たボルトにバリが見られる．別途実施した六角ボルトの載荷実験[7]では，六角ボルトをせん断破断させた場合，変位した方向にバリが生じることがわかっている．そのため，下沓取付ボルトは矢印の方向に変形して破断したと考えられる．

写真-5は下沓の損傷状態である．写真より擦過痕及びせん断キー穴のG1,G5側に変形した痕跡を確認できる．これら痕跡から，上部構造が反時計回りに回転したことと，G1及びG5方向に移動したことが考えられる．ここで，下沓に生じた擦過痕の長さに着目すると，上沓取付ボルトが損傷せずゴム支承本体と上部構造が繋がっていると仮定した場合，このような長さの擦過痕が生じるためには上部構造が40°程度以上の回転しなければ起こりえない．上部構造や他の下部構造にそのような痕跡はないため，この擦過痕が生じた時点で上沓取付ボルトは，抜け出し及び破断していたと考えられる．**写真-3**に示した衝突痕Aから，抜け出した上沓取付ボルトがG1側の側面に衝突したことによりゴム支承本体が回転したことで下沓に擦過痕が生じたと考えられる．ただし，上沓取付ボルト1本で加えられる力により下沓取付ボルト全てが破断したとは考えられない．そのため，上沓取付ボルトがゴム支承本体のG1側の側面に衝突するまでに，下沓取付ボルトが上部構造の回転(下沓取付ボルトが破断する程度の回転)により破断していたと推定できる．なお，上部構造に回転が生じた要因は，支承線の挙動として5章で示す．

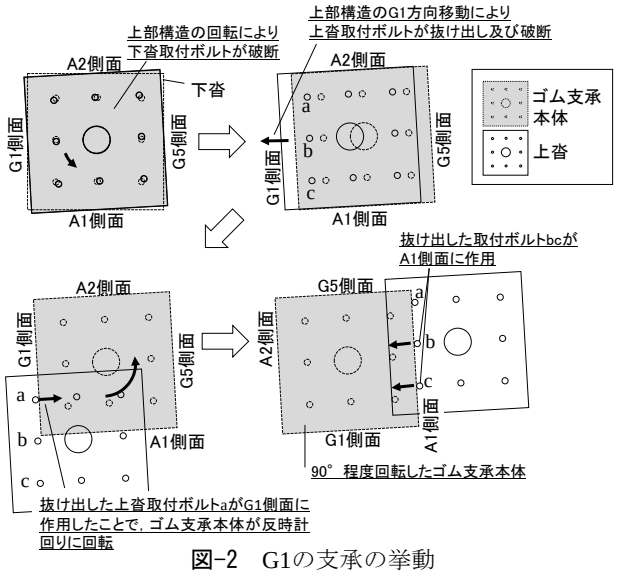


図-2 G1の支承の挙動

以上の結果をまとめると，G1支承の挙動は**図-2**に示すように，G1方向に上部構造が移動したことで抜け出した上沓取付ボルト(図中に示したボルトa)が，G1側の側面に衝突（衝突痕A）したことで，ゴム支承本体が反時計回りに回転し，その後，G1方向に移動したことでA1側の側面に上沓取付ボルトが衝突（衝突痕B）したと推定できる．A1側の側面に上沓取付ボルトが衝突したことを考えると，支承本体の反時計回りの回転は90°程度であったと推定される．また，**図-2**の最後に示した上沓の移動方向は，擦過痕A(**写真-3**)の方向と整合するため，擦過痕Aはボルトcによるものである可能性も考えられる．

(2) G2支承部の挙動

写真-6は，ゴム支承本体上面の損傷状態である．写真を見ると，円弧状の擦過痕が見られる(擦過痕A,B)．せん断キーの形状とほぼ一致したことから，せん断キーは少なくとも擦過痕A及びBの位置まで移動していたと考えられる．また，A1側端部を見ると，ゴムが削られた痕跡，擦過痕及び衝突痕が見られる(擦過痕C，衝突痕A,B)．擦過痕C及び衝突痕A,Bの間隔は上沓取付ボルトの取付位置の間隔とほぼ等しいことが確認できた．そのため，これら痕跡

は後述する抜け出した上沓取付ボルトによるものと考えられる．また，衝突痕Bにおいて，内部鋼板のへこみ，ゴム支承本体側面に衝突痕を確認できる．これら損傷状態及び抜け出した上沓取付ボルトがねじ部で破断していた事実から， 上部構造がA1方向及びA2方向に移動したことにより抜け出した取付ボルトがゴム支承本体に衝突，そして上沓取付ボルトがせん断破断したと考えられる．

写真-7は上沓取付ボルトの損傷状態を示したものである．上沓取付ボルトの損傷状態を見ると，A1側(写真のc,e,h)の上沓取付ボルトは抜け，それ以外の上沓取付ボルトは破断していた．別途実施した六角ボルトのせん断載荷実験[7]の結果と取付ボルトの損傷状態を照合した結果，破断したボルトはせん断破断したと考えられる．また，せん断キー穴のA1側が変形していた(**写真-6**)．このことから，上部構造がA1側又は下部構造がA2側に移動したことで，上沓取付ボルトが損傷したと考えられる．なお，下沓取付ボルトには損傷は見られなかった．

(3) G3支承部の挙動

写真-8は，ゴム支承本体上面及び下面の損傷状態を示したものである．ゴム支承本体上面において(**写真-8(a)**)，A2 側のせん断キー穴に変形した跡が見られた．これは，せん断キーが A2 方向に傾いたことにより変形したと考えられる．また，**写真-9**に**写真-8(a)**の A 部を拡大した写真を示す．写真より，上鋼板に変形した痕跡が確認できる．確認したところ，せん断キーの形状と一致した．これより，この部分にせん断キーが衝突したといえる．また，A2 側の側面に衝突痕を確認できる(**写真-10**)．水平の短い痕跡が上沓取付ボルトのねじピッチと同じ間隔で残っていることから，抜け出した上沓取付ボルトが衝突した時に生じたものと推定できる．

ゴム支承本体下面には**写真-8(b)**に示すように，せん断キーを中心とした円弧状の擦過痕を確認できる．下沓取付ボルトの設置位置から擦過痕が生じていることから，せん断破断した下沓取付ボルトにより生じたものと考えられる．また円弧状の擦過痕から，下沓取付ボルト破断後に，ゴム支承本体が回転していたことが確認できる．このような円弧状の擦過痕は，**写真-11** に示す被災後における下沓の現地写真にも確認できる．支承本体が回転する原因としては，上部構造又は下部構造の回転，又はゴム支承本体側面に外力が作用することが考えられる．しかし，上部構造や下部構造に大きな回転が生じた痕跡はない．一方，**写真-9** に示したせん断キーの衝突痕から，支承本体には反時計回りの回転モーメントが作用したと推定できる．これは**写真-12(b)**に示す

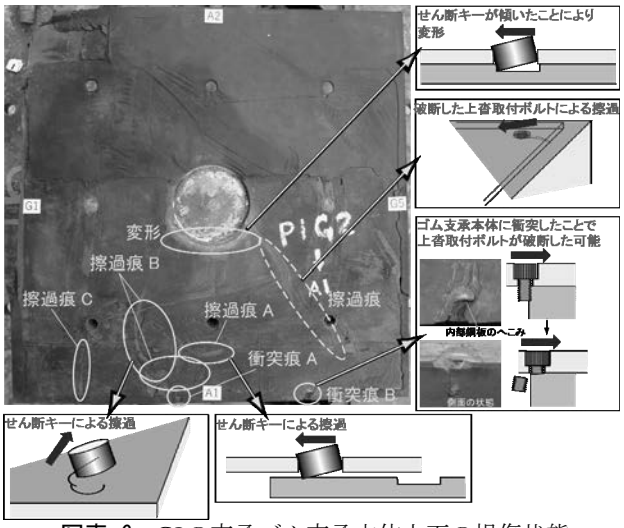


写真-6　G2の支承ゴム支承本体上面の損傷状態

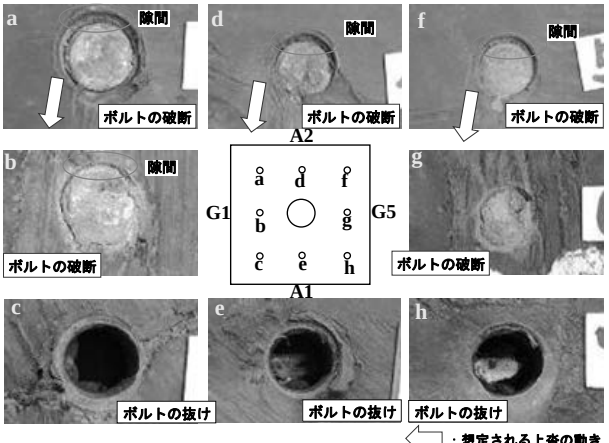
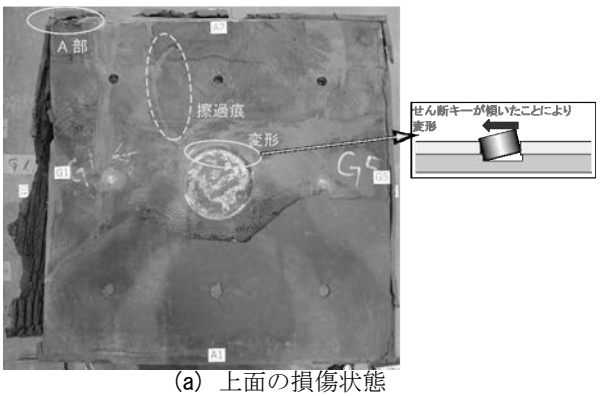
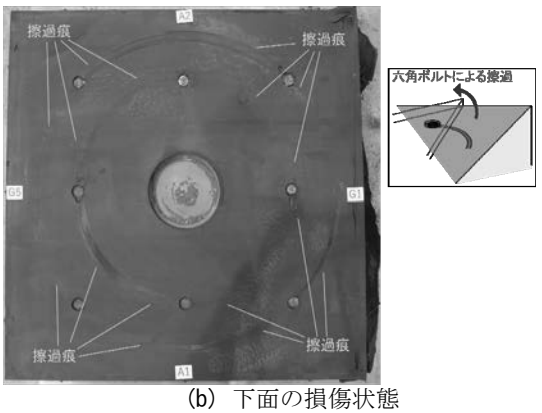


写真-7　上沓取付ボルトの損傷状態(P1G2)



(a) 上面の損傷状態



(b) 下面の損傷状態

写真-8　G3支承のゴム支承本体上下面の損傷状態

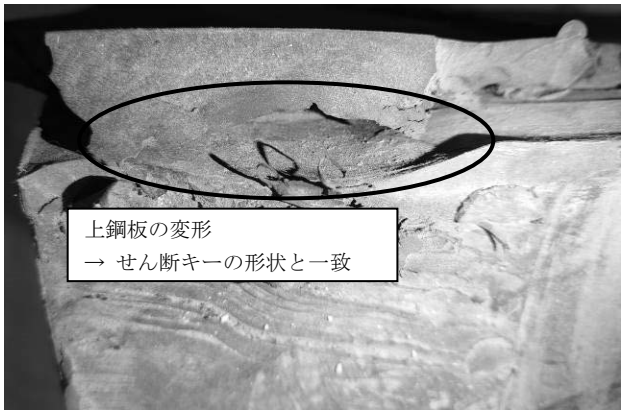


写真-9　ゴム支承本体上面A部の拡大写真

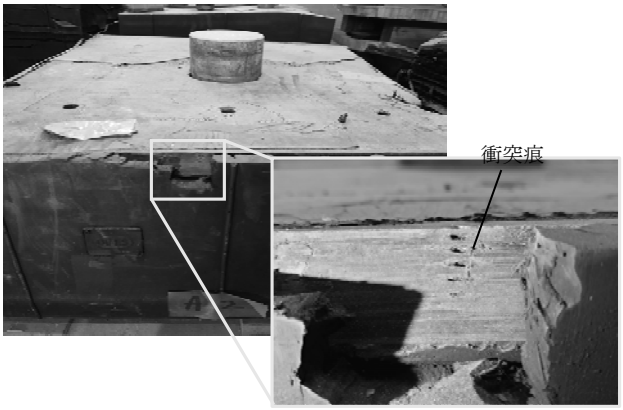


写真-10　A2側面の損傷状態

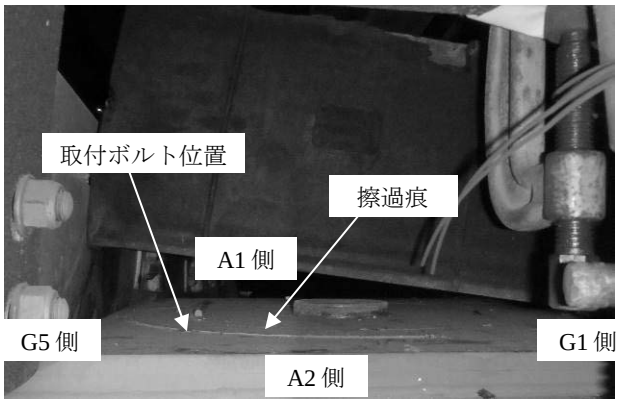
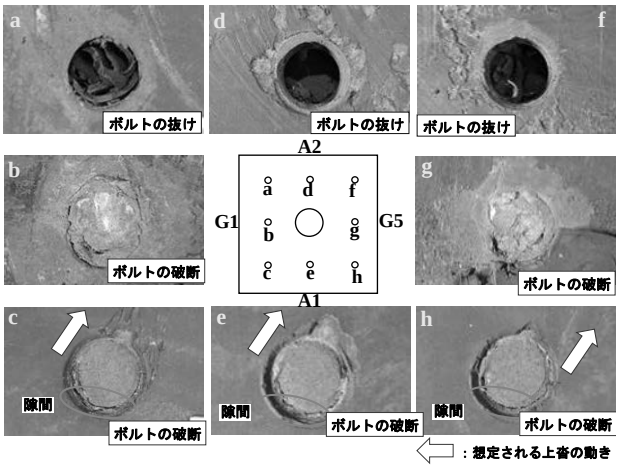


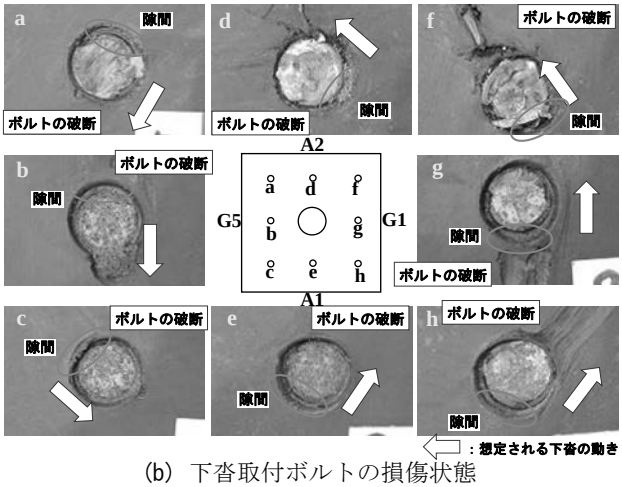
写真-11　G3の支承下沓の損傷状態(被災後の現地写真)

下沓取付ボルトの破断方向(後述)とも整合的である．以上より，せん断キーの衝突により下沓取付ボルトが破断し，ゴム支承本体が反時計回りに回転したと推定できる．この時の回転角は，**写真-11**に示した擦過痕から50°程度と推定できる．一方，**写真-11**や**写真-8**では，取付ボルト位置から時計回りの方向にも擦過痕が確認され，反時計回りに回転後，時計回りにも回転したと考えられる．**写真-11**の擦過痕から，反時計回りに50°回転した位置から時計回りに90°程度回転したものと推定できる．ただし，時計回りの回転の要因を示す痕跡は確認できなかった．

写真-12は上沓及び下沓取付ボルトの損傷状態を示したものである．**写真-12(a)**に示す上沓取付ボルトの損傷状態を見ると，A2側の上沓取付ボルト(写真のa,d,f)は抜け，それ以外の上沓取付ボルトは破断していた．別途実施した六角ボルトのせん断載荷実験[7]の結果と上沓取付ボルトの損傷状態を照合した結果，破断したボルトはせん断破断したと考えられる．また，せん断キー穴のA2側が変形していた．これら損傷状態から，上部構造がA2方向に移動したと考えられる．**写真-12(b)**に示す下沓取付ボルトの損傷状態を見ると，全てゴム支承本体下面で破断している．ボルトの破断面を見ると，ボルト穴に隙間及び破断したボルトにバリが見られる．別途実施した六角ボルトの載荷実験[7]では，六角ボルトをせん断破断させた場合，変位した方向にバリが生じることがわかっている．そのため，下沓取付ボルトは矢印の方向に変形して破断したと考えられる．



(a) 上沓取付ボルトの損傷状態



(b) 下沓取付ボルトの損傷状態

写真-12　上沓及び下沓取付ボルトの損傷状態(P1G3)

以上より推定される，G3支承の挙動を**図-3**に示す．A2方向に上部構造が移動し上沓取付ボルトが破断してゴム支承本体から逸脱したせん断キーがA2側の側面に衝突して下沓取付ボルトが破断し，ゴム支承本体に反時計回りの回転が生じた後，時計回りにも回転したと推定される．ただし，時計回りの回転が生じたメカニズムの特定には更なる分析が必要である．なお，別途調査した資料から，上沓が支承本体から

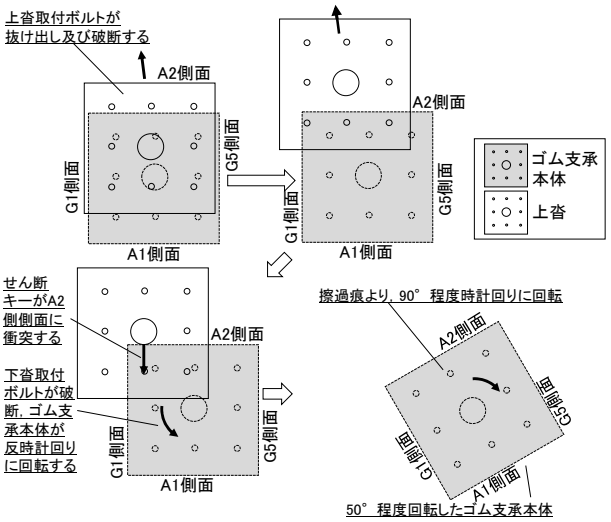


図-3　推定されるG3支承の挙動

完全に外れた状態においてもせん断キーがせん断キー穴から落下せず，上沓についている状態であったことを確認している．

(4) G4支承部の挙動

写真-13はゴム支承本体の損傷状態を示したものである．**写真-13(a)**のゴム支承本体上面の損傷状態を見ると，せん断キー穴付近に擦過痕が見られる(擦過痕A,B)．せん断キーの形状と一致したことから，せん断キーによる擦過痕と推定できる．そのため，せん断キーが**写真-13(a)**に示したように，A1方向に移動したと考えられる．**写真-13(b)**のゴム支承本体下面の損傷状態を見ると，A2側のせん断キー穴に変形した跡が確認できる．そのため，上部構造がA1方向に移動したと考えられる．

写真-14は上沓及び下沓取付ボルトの損傷状態を示したものである．**写真-14(a)**に示す上沓取付ボルトの損傷状態を見ると，上沓取付ボルトの穴に隙間と破断した上沓取付ボルトにバリが確認できる．既往の実験[7]を参考にすると，上沓取付ボルトは矢印の方向に変形したと考えられる．**写真-14(b)**に示す下沓取付ボルトの損傷状態を見ると，A2側の取付ボルト(写真のa,d,f,g)が抜け，それ以外の取付ボルトは破断していた．これらの損傷状態から，上部構造がA1方向に移動したと考えられる．

また，**写真-15**に示すようにG4支承はゴム支承本体の上方で破断していた．仮に，上下沓の取付ボルトが先に損傷した場合，せん断キーによる反力のみで切れた可能性は考えにくい(ゴム支承本体が水平軸周りの回転をするため)．**写真-2(d)**に示した支承部の損傷状態等から，下沓取付ボルトの損傷後，ゴム支承が台座等に衝突した可能性が考えられる．**図-4**に示すように，台座等との衝突によりゴム支承本体が破断し，その後上沓側に残ったゴム支承本体の

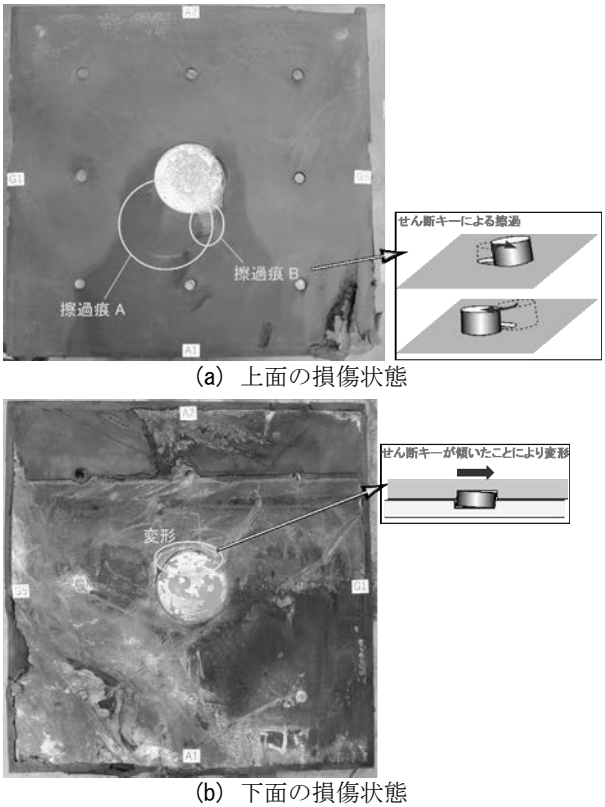


写真-13　G4支承のゴム支承本体上下面の損傷状態

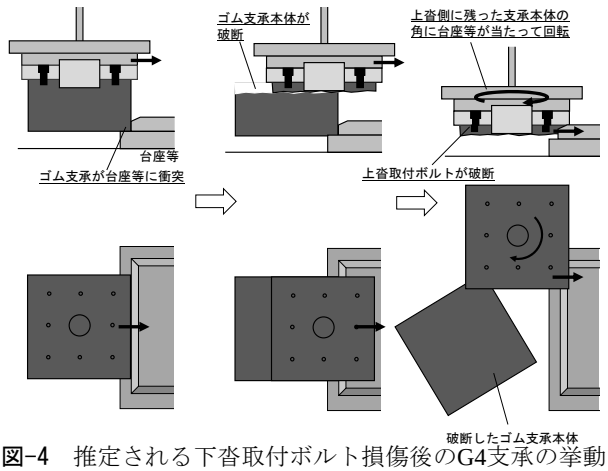


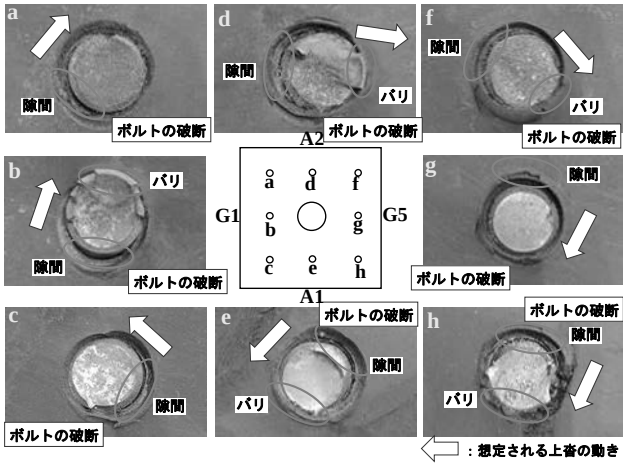
図-4　推定される下沓取付ボルト損傷後のG4支承の挙動

角が台座等に衝突して回転モーメントが作用し，上沓取付ボルトが破断したと考えると，**写真-14(b)**の損傷状態等とも整合する．

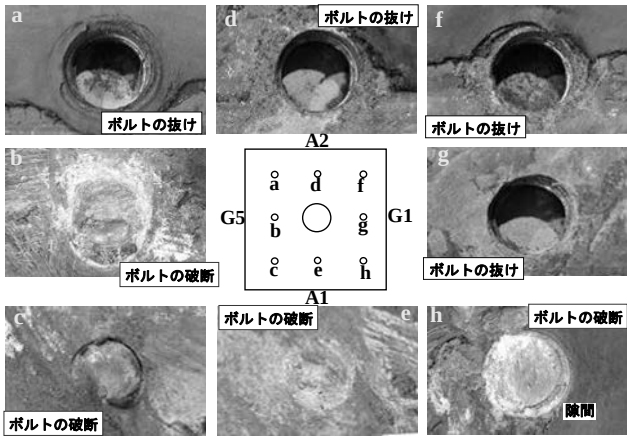
(5) G5支承部の挙動

写真-16はゴム支承本体上面の損傷状態を示したものである．なお，ゴム支承本体下面には損傷は見られなかったため，ここでは示していない．

写真より，せん断キー穴のA1側に変形した痕跡が見られる．そのため，せん断キーはA1側に傾いたと推定できる．擦過痕Aを見ると，円弧状の擦過痕が見られる．せん断キーの形状と一致したため，せん断キーによる擦過痕と確認できた．また，円弧状の擦過痕上に斜めの擦過痕(擦過痕C)が存在している



(a) 上沓取付ボルトの損傷状態



(b) 下沓取付ボルトの損傷状態

写真-14 上沓及び下沓取付ボルトの損傷状態(P1G4)

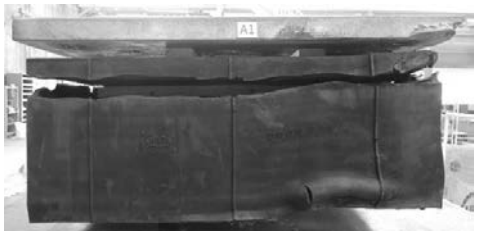


写真-15 ゴム支承本体の破断状況(A1側から撮影)

ことが確認できる．そのため，せん断キーは，円弧状の擦過痕を付けた後に，斜めの擦過痕を付けたと考えられる．また，擦過痕Bにも円弧状の擦過痕が存在している．詳しく見ると，内部鋼板に変形した痕跡が見られた．このような損傷は，せん断キーが**写真-16**に示した図のように，A2側に傾かない限り生じない．そのため，せん断キーはA1方向に移動してゴム支承本体から逸脱したのち，再びA2方向に移動したと考えられる．

A1側端部のゴム支承本体上面及び側面を見ると，衝突痕(衝突痕A)が見られる．損傷痕の形状および大きさから，上沓取付ボルトがゴム支承本体側面に衝突したことにより生じ，それにより取付ボルトが破断したと考えられる．抜け出した上沓取付ボルトも破断していたこととも整合が取れる．

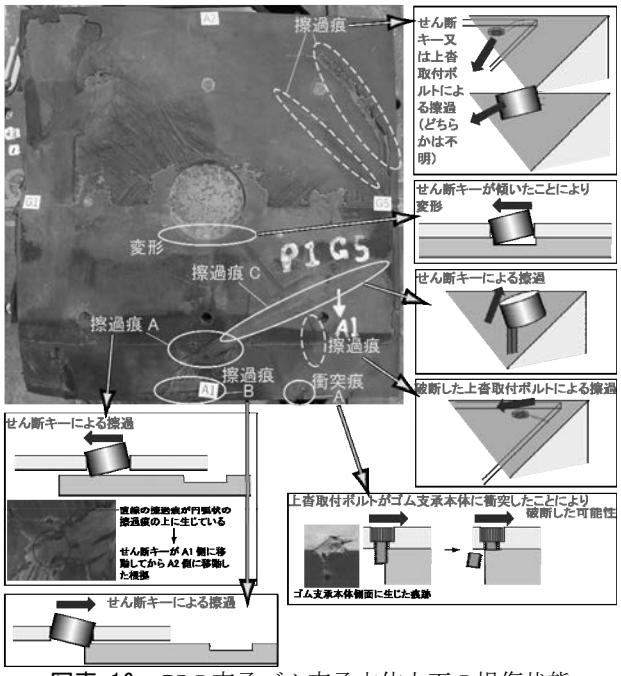


写真-16 G5の支承ゴム支承本体上面の損傷状態

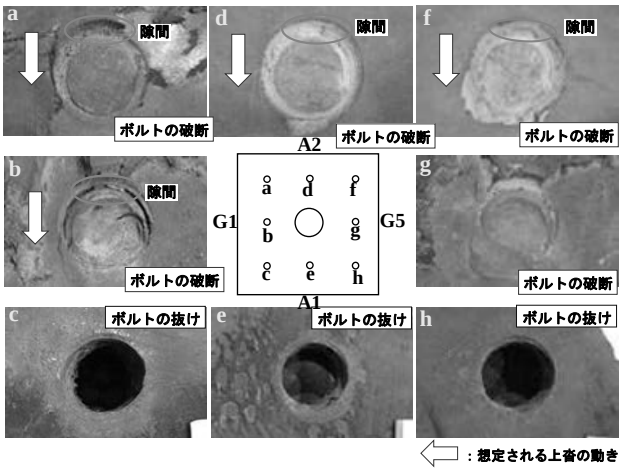


写真-17 上沓取付ボルトの損傷状態(P1G5)

写真-17に上沓取付ボルトの損傷状態を示す．損傷状態を見ると，A1側の上沓取付ボルト(写真のc, e, h)は抜け出し，それ以外の上沓取付ボルトは破断していた．別途実施した六角ボルトのせん断載荷実験の結果[7]と上沓取付ボルトの損傷状態を照合した結果，上沓取付ボルトはせん断破断したと考えられる．また，破断した上沓取付ボルトをみると，A2側に隙間を確認できる．そのため，これらの事実から，上部構造がA1側に移動したと考えられる．

5. P1橋脚支承線上の挙動分析

本章では，前章で推定した支承毎の挙動を基に，P1橋脚支承線の挙動を推定する．時系列に可能性のある挙動を考え，矛盾が生じた場合は消去し，矛盾の生じない挙動を求める．**図-5**はそのような方法で挙動を推定した結果の一例を示したものである．



図-5　推定される P1 橋脚部の挙動

本橋は，地震に伴い地盤変位の影響を受けており，P1橋脚においても沈下が確認されている．沈下量はG1側よりG5側の方が約4%大きい．前章では水平変位に着目して考察を行ったが，鉛直変位も併せて考えるとG5側の方が先行して破断する可能性も考えられる．**図-5**は，この仮定の下，上部構造の水平方向の応答に伴いG5側から破断が生じると考えて整理したものである．支承毎の考察では原因が推定できなかったG1の回転挙動についても，G1支承が最後に損傷することから，支承線中心からの偏心により回転モーメントが作用したと考えると矛盾は生じない．

ここで，支承毎の最初の損傷部位に着目すると，上沓側で取付ボルトの抜け出し及び破断が生じた支承(G2, G3, G5)と，それが下沓側である支承(G4)，及び回転モーメントにより下沓取付ボルトが破断した支承(G1)が確認できる．上沓及び下沓取付ボルトは，規格及び本数とも同一であり，上沓側と下沓側のどちらが先に破断するかは，ボルト強度のばらつき等の偶然的な不確実性に起因するものと考えられる．また，支承本体と上沓・下沓との間のせん断力の伝達は，取付ボルトとせん断キーが協働していると想定されるが，上沓側及び下沓側のせん断キーの構造の差異が，せん断キーの穴から外れる挙動に与える影響の不確実性は大きいと考えられ，損傷順序の推定は困難である．G1支承は，回転モーメントが作用したことで取付ボルトが破断したが，上沓側ではなく下沓側のボルトで破断が生じた要因は，偶然的な不確実性によるものと考えられる．

6. まとめ

本研究では，熊本地震で被害を受けた大切畑大橋のP1橋脚に着目し，支承部の損傷痕から，損傷状態と大きな矛盾のない，起こり得たであろう橋の挙動及び各支承の損傷メカニズムを推定できた．損傷痕という限られた情報からの推定であるため，全ての損傷メカニズムを明らかにできた訳ではないが，支承を構成する各部材間の衝突により損傷するメカニズムは，解析的検討では推定が難しいと考えられ，損傷痕からの挙動推定の有用性を示すものといえる．また，ここで得られた実地震による損傷メカニズムや，支承毎の損傷モードの不確実性等の知見は，損傷制御設計法の開発等において橋の損傷過程を考える上で参考になるものと考える．

謝辞：本研究の実施にあたり，九州地方整備局 熊本復興事務所より大切畑大橋の被害写真等のデータを提供頂きました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 藤原昌紀, 須田郁慧, 西山聡一郎, 秋山充良：2016年熊本地震により被災した南阿蘇大橋・制振ダンパー取り付け部の3次元FEM解析, 第21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, pp.371-374, 2018.
2) 松田泰治, 玻座真翼, 崔準祜, 内藤伸幸：平成28年熊本地震における俵山大橋の損傷メカニズムに関する基礎的研究,第38回地震工学研究発表会, p.1338_1-7, 2018.
3) 大住道生, 星隈順一：熊本地震により被害を受けた道路橋の損傷痕に基づく要因分析, 第20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, pp.121-128, 2017.
4) 中尾尚史, 森屋圭浩, 井上崇雅, 星隈順一：支承およびダンパーの損傷跡に基づく気仙大橋の津波による挙動の推定，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.72, No.4（地震工学論文集第35巻）, pp.I_129-I_139, 2016.
5) 平成28年（2016年）熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料No.967／土木研究所資料No.4359, 2017.
6) 二宮智大, 余野智哉, 中尾尚史, 大住道生：地震の被害を受けた支承の損傷原因に関する実験的検討, 第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.13-20, 2019.
7) 中尾尚史, 余野智哉, 大住道生：支承に用いる六角ボルトを複数設置した場合の耐力に関する検討, 第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.461-468, 2019.