

# 平成28年熊本地震 橋梁構造物の被害分析

高橋良和

京都大学

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  
熊本地震による橋梁被害分析WG長

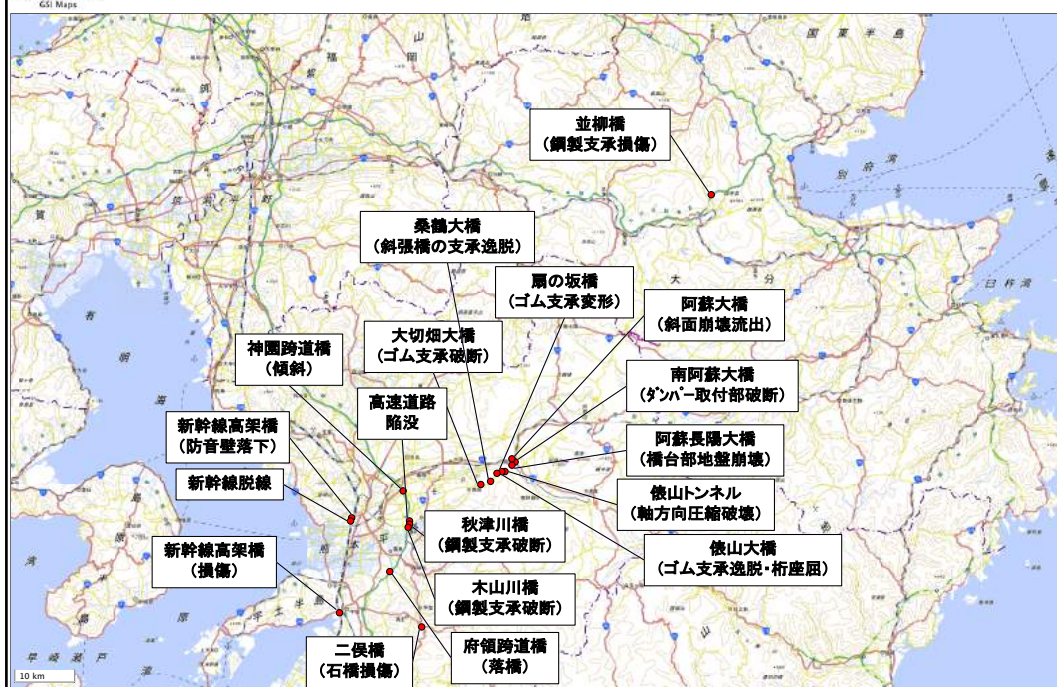
## 橋梁の被害の特徴



- 橋梁の被害は、熊本県だけでなく大分県でも発生するなど広範囲にわたり、強震による被害に加え、山岳部では地盤炎上による被害も混在している。
- 平野部では、高速道路跨道橋が落橋、高架橋の耐震補強未対策部に甚大な被害。
- 山岳部では、兵庫県南部地震以降に改訂された示方書に基づく複数の橋梁でゴム支承の破断や支承からの桁逸脱等の大きな被害が発生。大規模な斜面崩壊によりアーチ橋が消失。



## 構造物の被害状況（広域）



## 土木学会 地震工学委員会 熊本地震による橋梁被害分析WG

- 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（矢部委員長（株長大））において特別WGが立ち上がり、熊本地震で被災した橋梁の被害分析を開始した（2018年3月まで）
  - 2016年6月 WGメンバー公募開始
  - 2016年8月26日 第1回WG
  - 2017年1月26日 第2回WG
  - 2017年7月4, 5日の性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウムにて経過報告予定

# 土木学会 地震工学委員会 熊本地震による橋梁被害分析WG

## ● 検討方針

- 対象被災橋梁ごとにサブWGを立ち上げ、被災状況を整理するとともに、被災メカニズムを推定する。その際、**できれば2パターン以上のストーリー**を考える。
- 推定した被災メカニズムに応じて解析方針を決定、数値解析を行い、被災メカニズムを検討する。



## 熊本地震による橋梁被害分析WG 対象被災橋梁





# 被災橋梁架橋地点での推定地震動

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

多岐会サイトホーム 土木学会ホーム

メニュー  
ホーム

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 /  
Download website of the evaluated ground acceleration records observed around damaged bridges during the 2016 Kumamoto earthquake

2016年熊本地震で被災された皆様からご厚葬申し上げます。  
We express our condolences to the victims of the 2016 Kumamoto earthquake.

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（以下、本小委員会とする）では、2016年熊本地震で被災した橋梁の被害分析に取り組み、その活動の一環として、被災した橋梁の架橋地点周辺地点での地震動の推定を行いました。地震動の推定は、本小委員会委員である秦吉弥（大阪大学工学部地球惑星工学専攻社会基礎工学部門地震工学領域准教授）が、中心となって行なわれました。秦吉弥氏は、2016年熊本地震の本震と余震、本震後に被災地に入り、構造的に詳細な観測を行ってきており、ここに収録する推定地震動も、それらの観測結果を利用したものです。今回、秦吉弥氏のご厚意により、次に示す7箇所の架橋地点周辺地点上の推定地震動を本ホームページにて公開します。

Subcommittee on Performance-based Seismic Design Methods for Bridges and Related Structures (the Subcommittee hereinafter) is working to clarify failure mechanism of bridges which suffered damage during the 2016 Kumamoto earthquake. Based on this activity, Dr. Yoshiya HATA (Osaka University), a member of the Subcommittee, evaluates seven ground accelerations which may be observed around damaged bridges listed at the following. The Subcommittee publish evaluated ground acceleration records in this website through the courtesy of Dr. Yoshiya HATA. Dr. Yoshiya HATA went to Kumamoto just after maximum aftershocks of the 2016 Kumamoto earthquake and observed a lot of ground acceleration records at temporary stations in Kumamoto including the main shock and many aftershocks. The evaluated ground acceleration records published here resulted from those records observed by Dr. Yoshiya HATA. The Subcommittee greatly appreciates Dr. Yoshiya HATA and his activities.

1. 大切畑大橋 / Okirihata Bridge
2. 轟橋大橋 / Kumaduru Bridge
3. 轟の坂橋 / Oginozaka Bridge
4. 香山大橋 / Kawayama Bridge
5. 阿蘇島津大橋 / Aso Choyo Bridge
6. 滝尾大橋 / Minami-Aso Bridge
7. 阿蘇大橋 / Aso Bridge

推定地震動の利用にあたっては、以下のUser Policyに同意していただく必要があります。ホームページの利用申込みフォームに必要事項を記入の上、送信して頂くこと、データベースへのアクセスが限られます。なお、記入していただく個人名などの情報は、本記録の作成・発表のみに利用いたします。  
Researchers or engineers who would like to use the records are required to agree the following User Policy. Please fill in the application form of this site, and submit it. Then, you will find a download link to the digital data. We declare that any personal information obtained from this site is used only to analyze the usage of the records.

（文責：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委員 秦吉弥 氏）  
(Dr. Masashi YABE, Chair of Subcommittee on Performance-based Seismic Design Methods for Bridges and Related Structures / Translate by Dr. Tomohiko SASAKI)

**秦吉弥(大阪大学)による  
推定地震動を公開**

## SWG検討

# 大切畑大橋 熊本県道28号

## SWGメンバー

高橋良和 京都大学  
秋山充良 早稲田大学  
木内耕治 八千代エンジニアリング  
田崎賢治 大日本コンサルタント  
秦 吉弥 大阪大学  
藤倉修一 埼玉大学  
松永昭吾 共同技術コンサルタント

葛西 昭 熊本大学  
今井 隆 ビービーエム  
後藤僚一 パシフィックコンサルタンツ  
党 紀 埼玉大学  
原 暢彦 東京ファブリック工業  
松崎 裕 東北大学

# 大切畑大橋 熊本県道28号

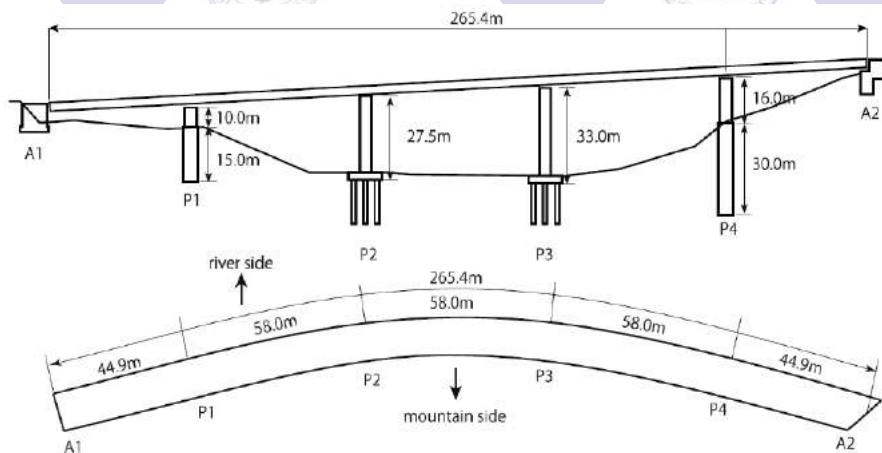


積層ゴム支承を有する5径間連続橋梁  
 竣工：2001年3月竣工  
 適用道路橋示方書：1996年版



## 橋梁一般図

Akiyama et al. (2016)



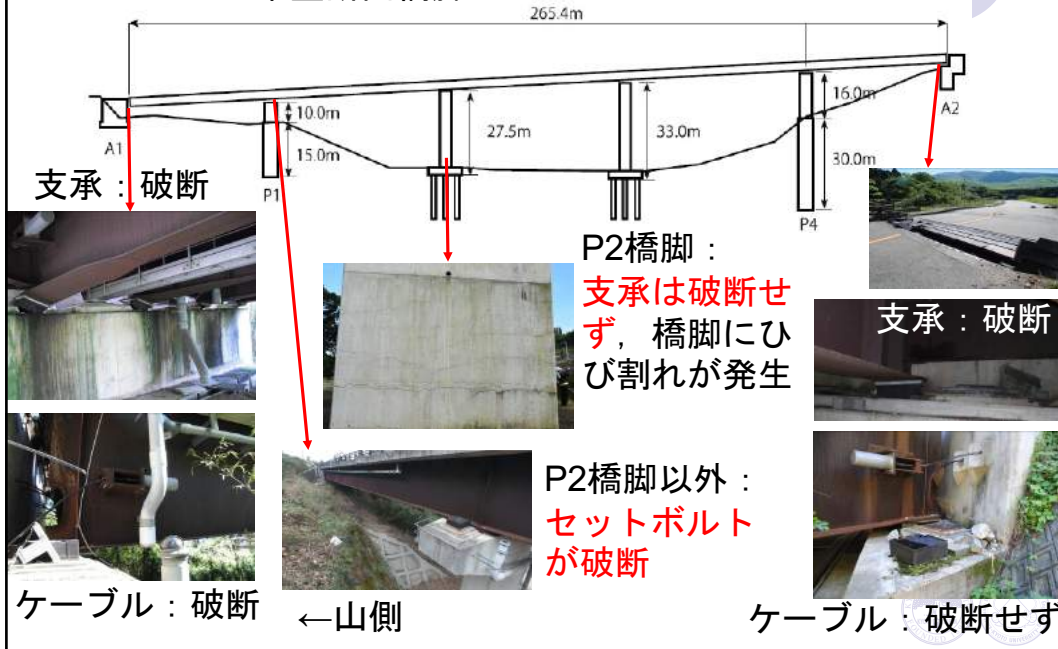
### 複雑な地震応答特性

- 曲線橋
- A2橋台側は斜角60度
- 不等橋脚
- 端部の支承は引張を受けやすい
- A2橋台-桁間の衝突により回転を伴って川側へ応答しやすい

# 主な被災状況

P2~P4 : 中空断面橋脚

Akiyama et al. (2016)



ケーブル：破断

←山側

ケーブル：破断せず

# 推定地震動の応答スペクトル特性

地盤種別：Ⅱ種地盤

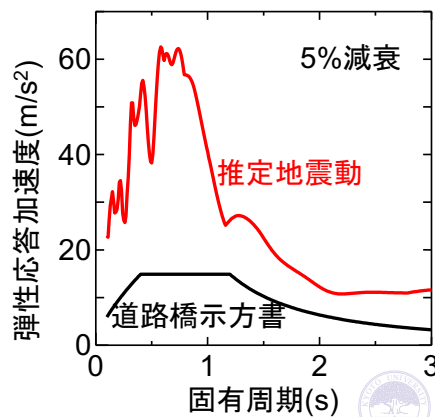
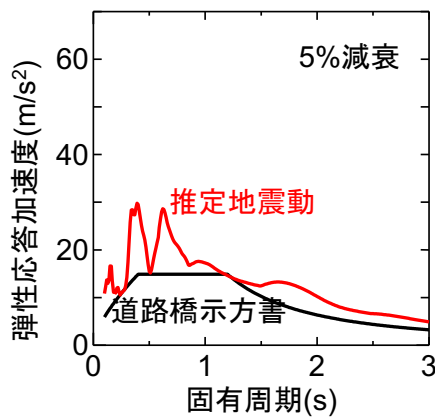
地域別補正係数：0.85を考慮した応答スペクトル

大切畑大橋の基本固有周期：橋軸・橋軸直角方向ともに1.6s

秦ら(2017)

NS成分

EW成分



## 被害分析の方針

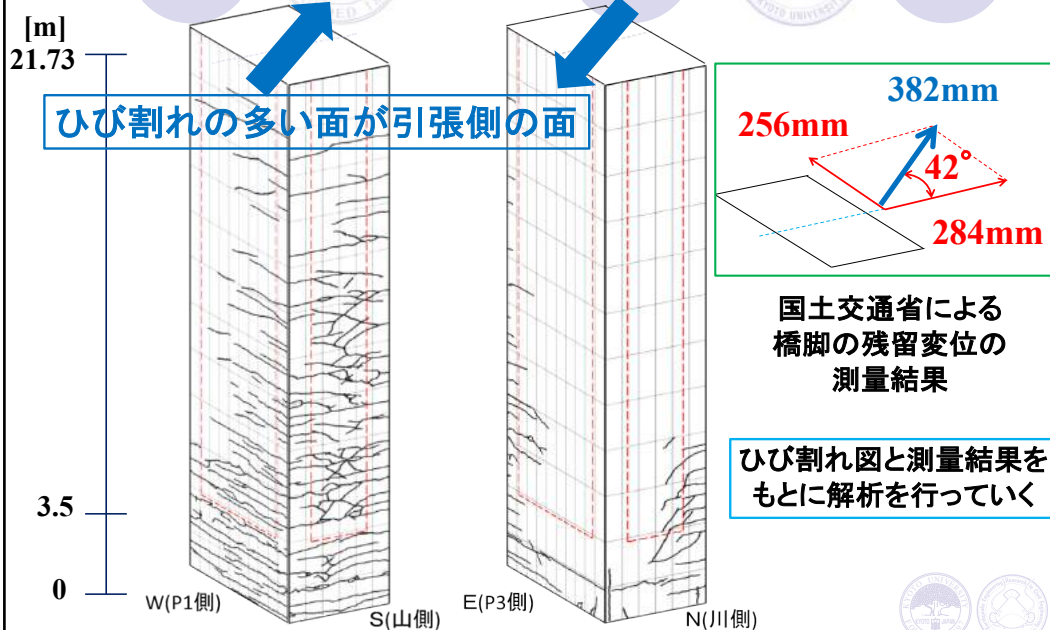
### 複数のシナリオの検討

- 加速度入力
- 変位入力(残留変形に対する測量結果も踏まえる)

### 着眼点

- 元来、橋軸方向を念頭に置いた落橋防止構造の効果？  
A2橋台側ではケーブルは破断せず、橋軸直角方向に緊張状態  
P2橋脚以外の橋脚でセットボルトが破断  
桁端部の落橋防止構造だけでどこまで持つ、持たせるべき？
- 設計で想定した損傷シナリオ通りの壊れ方？  
実挙動と設計時の想定挙動の差異、その原因
- 地動加速度、地盤変位等の超過作用に対する危機耐性の実装
- 復旧性を考慮したあるべき壊し方、そのための構造とは？  
支承上側の取付けボルトやセットボルトで壊すと、  
ベントが設置できない立地条件では、復旧が極めて困難  
損傷制御設計、部材・部位間の耐力階層化の必要性

## 現地調査によるひび割れ状況立体図



## SWG検討

# 俵山大橋 熊本県道28号

### SWGメンバー

高橋良和 京都大学  
今井 隆 ビービーエム  
佐藤 京 土木研究所  
秦 吉弥 大阪大学  
馬越一也 (株)耐震解析研究所

葛西 昭 熊本大学  
甲斐義隆 構助解析事務所  
党 紀 埼玉大学  
原 暢彦 東京ファブリック工業

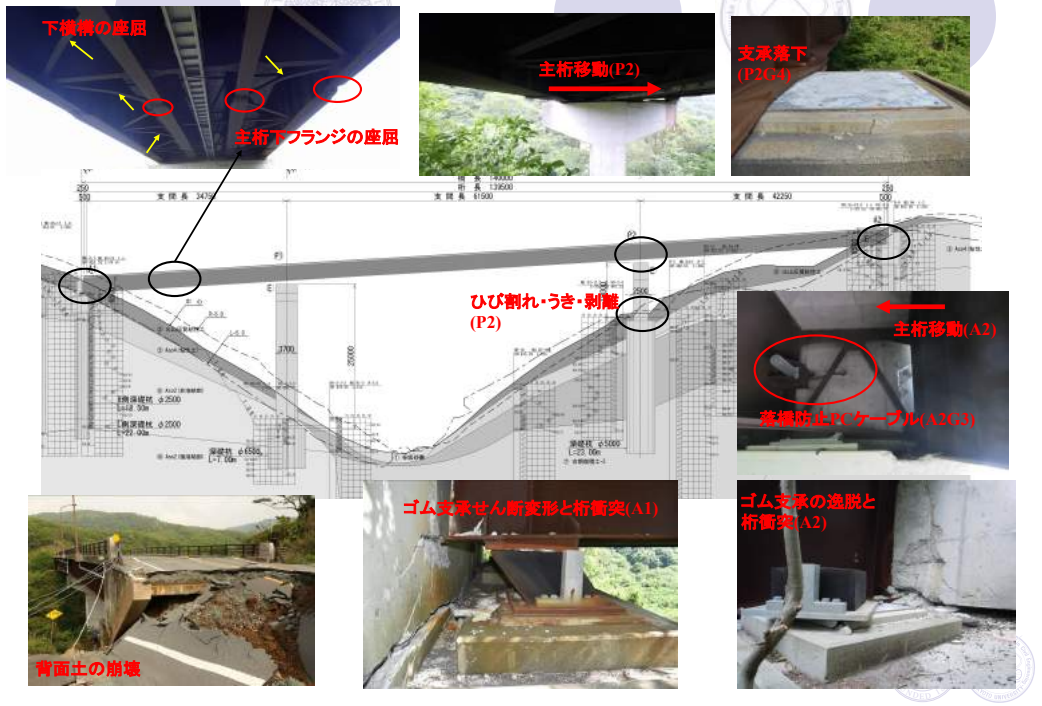
## 検討内容・着目点

橋台パラペットとの桁衝突、主桁下フランジの座屈、RC橋脚、ゴム支承といった特徴的な損傷を橋梁全体系モデルを用いた地震応答解析によって再現・評価し、被害メカニズムを解明する。



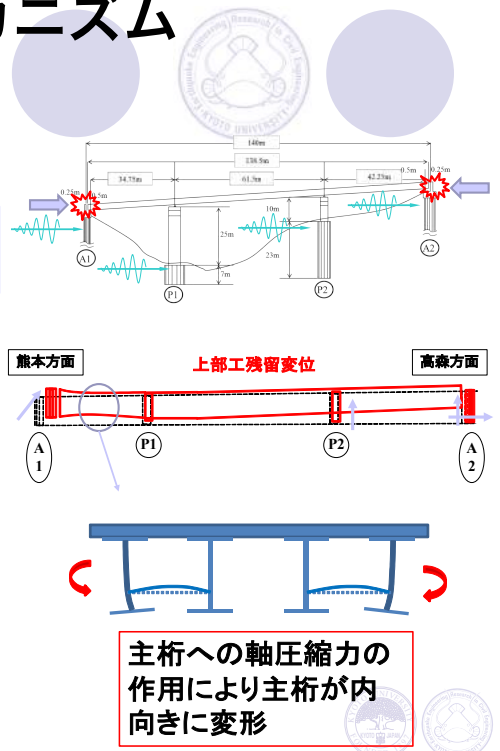
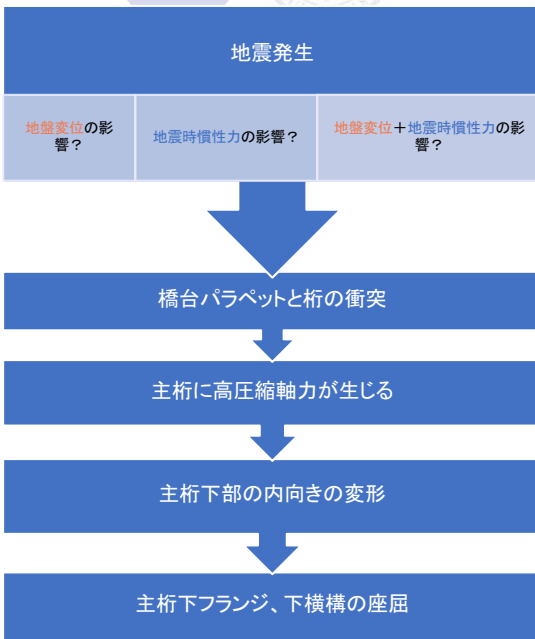


# 俵山大橋の被害概要

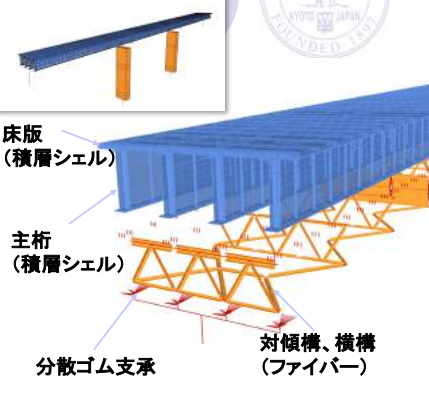


# 想定される被害メカニズム

—上部工主桁下部の損傷—



# 被害再現のためのモデル化



床版 (積層シェル)  
主桁 (積層シェル)  
分散ゴム支承  
対傾構、横構 (ファイバー)

桁衝突～主桁への高軸力～  
部材損傷を表現

**主桁下部の損傷**



断面変化位置の  
下フランジの座屈



座屈が評価できる構造要素でモデル化  
断面変化位置

**橋台パラペット～桁衝突**



衝突ばね  
主桁

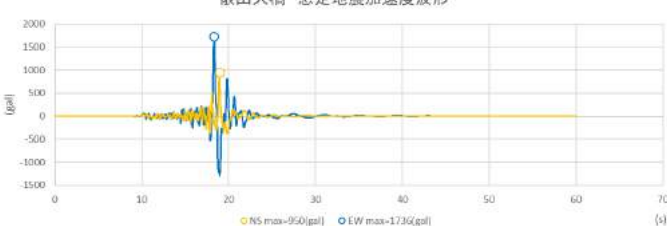


衝突ばね特性

# 入力地震動

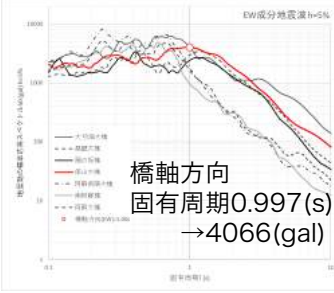
秦(大阪大学)による架橋地点推定地震動

彦山大橋 想定地震加速度波形




● NS max=95.0(gal) ● EW max=17.36(gal)

EW成分地震動 h=5%



橋軸方向  
固有周期0.997(s)  
→4066(gal)

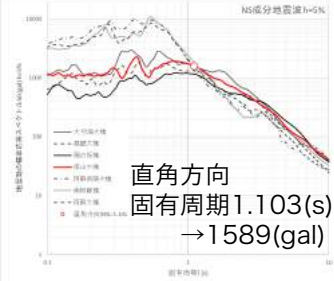
並進成分への角度補正



熊本方面  
高森方面  
彦山大橋  
A1 A2

機首方位 87.8° ≈ 90°  
EW成分→橋軸方向  
NS成分→橋軸直角方向

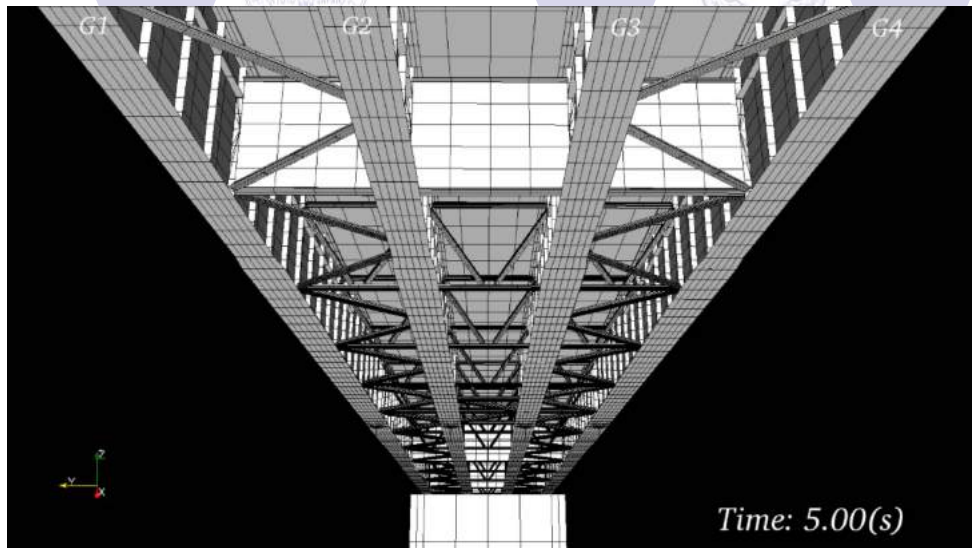
NS成分地震動 h=5%



直角方向  
固有周期1.103(s)  
→1589(gal)

加速度応答スペクトル(h=5%)

## 俵山大橋 検討事例 (再現解析\*)



\*) 本橋英樹, 野中哲也, 馬越一也, 中村真貴, 原田隆典: 熊本地震の断層近傍における地震動と橋梁被害の再現解析, 構造工学論文集, Vol.63A, 2017.



SWG検討

## 扇の坂橋 熊本県道28号

SWGメンバー

藤倉修一 宇都宮大学

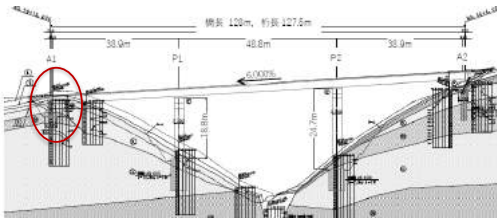
党 紀 埼玉大学

佐々木智大 大林組

田崎賢治 大日本コンサルタント

秦 吉弥 大阪大学

## 主な被害状況



パラペットの損傷



橋軸直角方向への桁移動



支承残留変位及び移動制限ブロックの損傷

## 検討内容と着目点

- 非線形動的解析による被害の再現
  - 骨組みモデルによる非線形動的解析
  - 質点とバネによる1方向五自由度非線形応答解析
- 被害分析

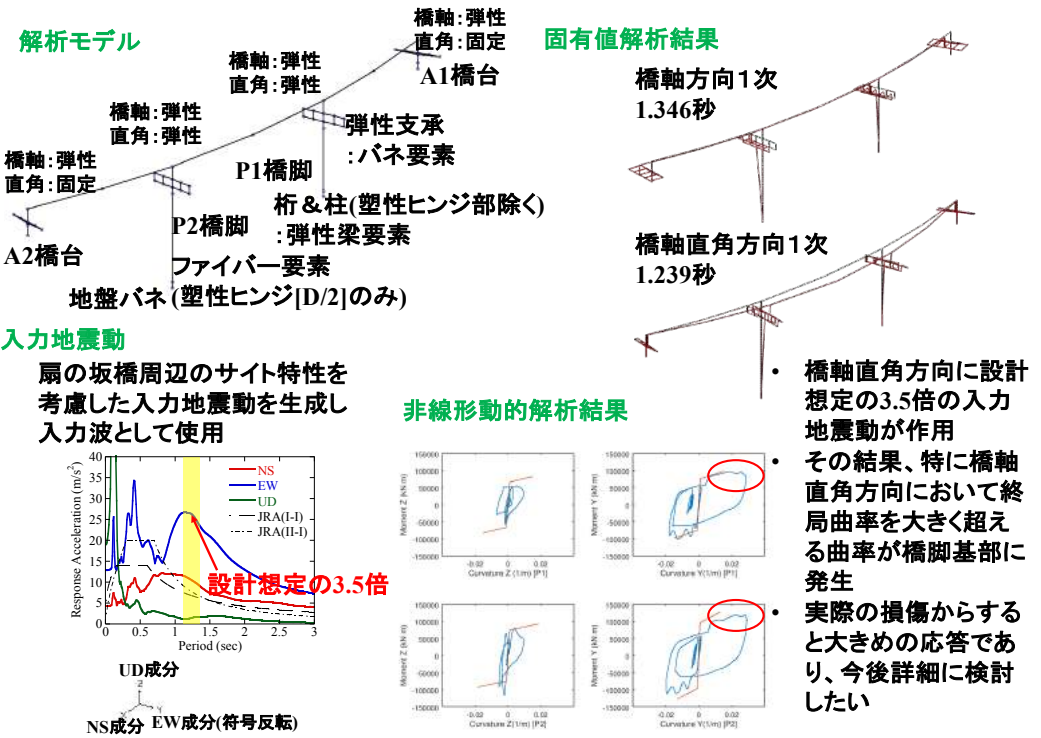




# 被害分析

- 非線形動的解析による被害の再現
  - 解析結果と被害との比較
  - 曲線橋としての回転挙動
  - 桁とパラペットの衝突
- 異なる解析手法による解析結果の比較
- 実挙動と設計想定挙動の違い
- 被害分析を基に危機耐性のありかたを考察
  - 損傷プロセス(支承の破断、部材の降伏・座屈、全体の不安定化)を把握
  - 復旧性(修復性・供用性)の観点から、望ましい損傷シナリオの提案

## 扇の坂橋のファイバー要素による再現解析



SWG検討

# 府領第一橋 熊本県道32号 九州自動車道跨道橋

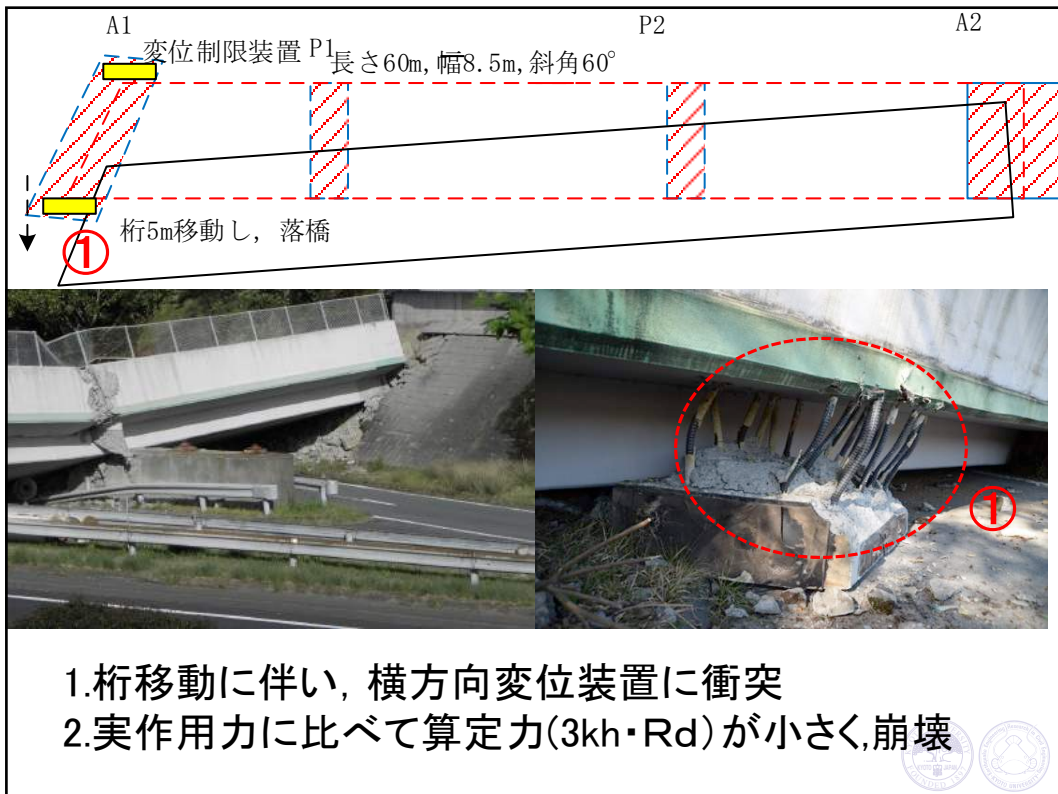
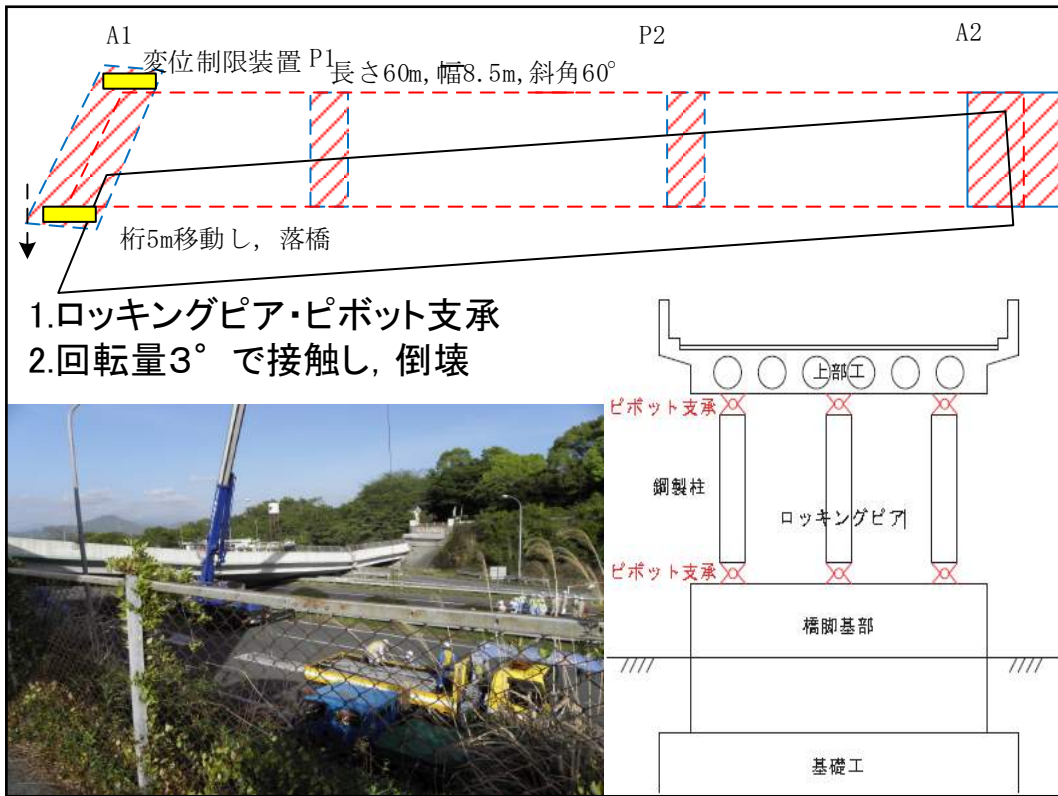
SWGメンバー

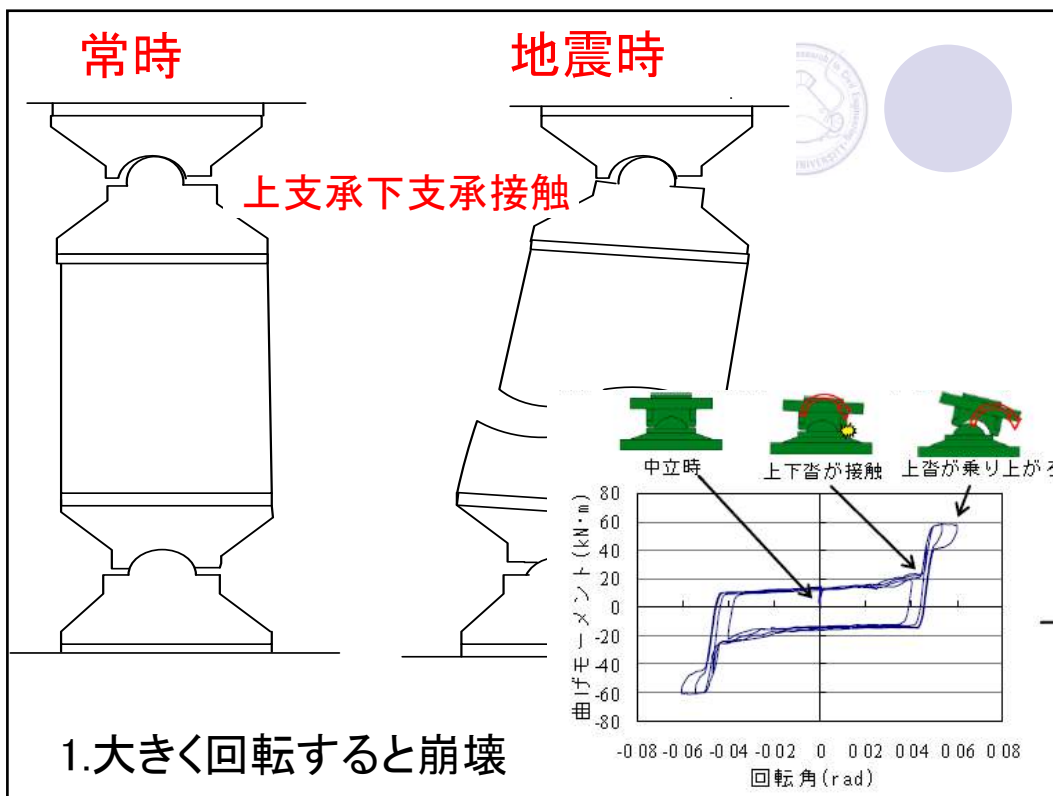
幸左賢二 九州工大  
高橋良和 京都大学  
金山亨 構造計画研究所  
後藤遼一 パシフィックコンサルタンツ

## 検討内容と着目点

- 桁衝突から落橋に至る現象を数値解析的に評価
- 変位制限・支承のモデル化
- 落橋防止システムの設計法







**1.橋座式による抵抗力**  
 $(V=V_c+V_s)$ ,  
 抵抗断面に比べて鉄筋が多すぎる  
 $V_s$ は $V_c$ 程度が上限:  
 算定法に疑問

**2.落橋を防ぐ早急な対策が必要**

アンカーボルト

45°

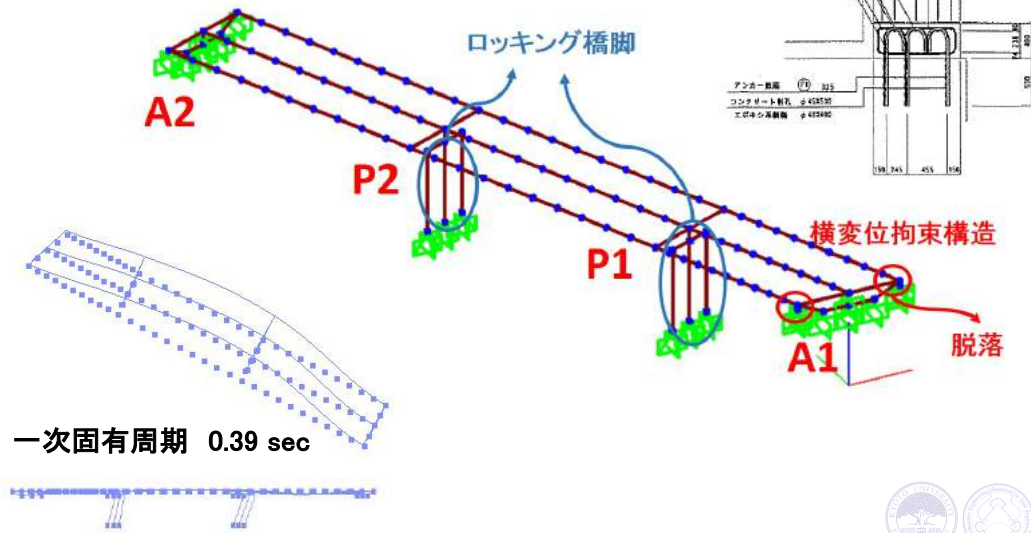
45°

コンクリートの抵抗面  
 (背面側のアンカーボルト中心から側方及び下方へ45°の広がり考慮した3つの面)



# 解析モデル

両端の支承が全部破壊される状況を想定



## SWG検討

# 桑鶴大橋 熊本県道28号

SWGメンバー

葛西 昭 熊本大学  
田崎賢治 大日本コンサルタント  
秦 吉弥 大阪大学  
松永昭吾 共同技術コンサルタント

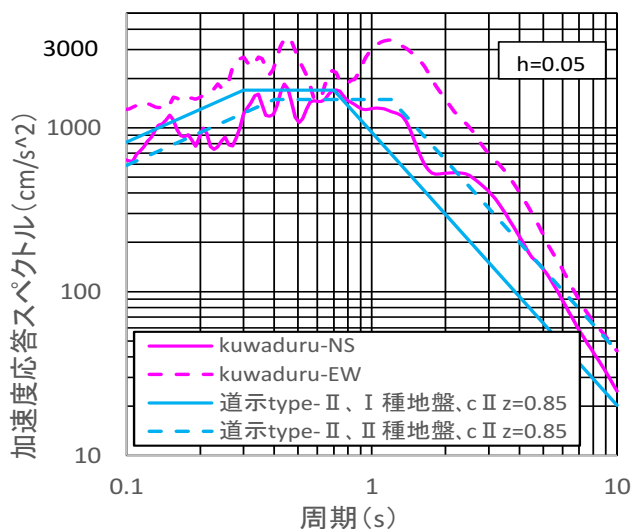
## 検討内容・着目点

熊本県道28号俵山バイパスに位置する桑鶴大橋（2径間連続鋼斜張橋、橋長160.0m）の被災状況を整理するとともに、被災メカニズムを検討することを目的とする。なお、被災メカニズムの検討手順は以下の通りとする。

- ①被災状況を整理する **【終了】**  
**【基礎の被災・地盤変状を含む】**
- ②地震発生から被災に至る2パターン以上のシナリオ（仮説）をたてる  
**【地震動・地盤変状の影響、橋軸先行・橋軸直角先行】**
- ③再現解析方針を決定する
- ④再現解析を実施し、被災メカニズムを推定する

## 地震動

秦(大阪大学)による架橋地点推定地震動



EW成分の加速度応答スペクトルは、0.4～0.5秒または1.0～1.4秒の周期において3,000(gal)を超えており、ほとんどの周期帯で道路橋示方書の標準波を上回っている。一方、NS成分の加速度応答スペクトルは、周期0.7秒以下では道路橋示方書の標準波：Ⅰ種地盤、周期0.7秒以上では道路橋示方書の標準波：Ⅱ種地盤と同等レベルとなっている

## 地盤変状



北  
↑

桑鶴大橋周辺の三角水準点の座標計測より、地震前の座標と比較すると、北東方向に約1.4mずれていた

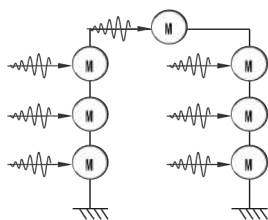
## 数値解析方針

動的解析では、加速度波形を同一入力する一般的な場合（相対変位）と、絶対変位で各基礎に多点入力する場合があるが、多点入力の場合、地盤変位を伴う地震動を入力するため、地動による地震応答解析が必要となる。

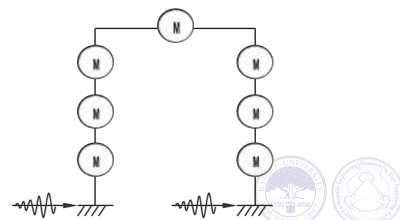
入力方法として以下のパターンが考えられる。

- ① 地震動（加速度のみ）を考慮
- ② 地盤変位のみを考慮
- ③ ①と②の同時考慮

一般的な地震応答解析



地動による地震応答解析



# FEMモデル構築

FEM解析ソフト：ABAQUS

主桁：シェル要素

横桁：シェル要素

リブ：シェル要素

主塔：梁要素

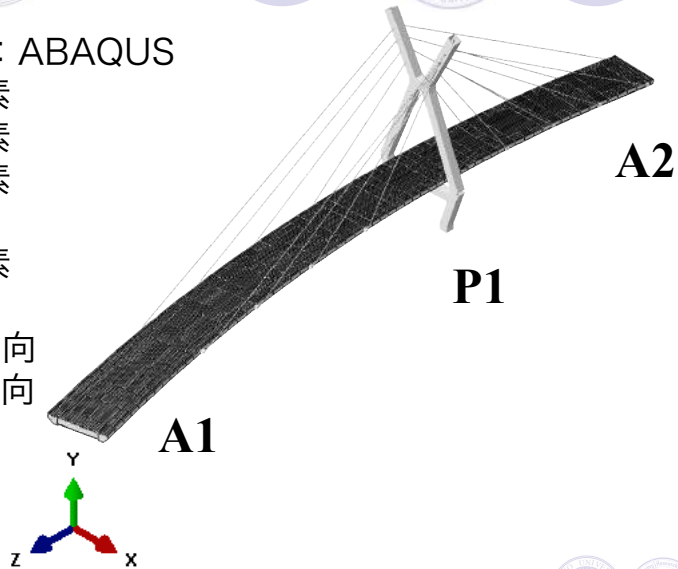
ケーブル：梁要素

支承：バネ要素

X軸：橋軸直角方向

Y軸：橋軸鉛直方向

Z軸：橋軸方向



## SWG検討

# 阿蘇大橋 国道325号

SWGメンバー

崔 準祐

藤田 亮一

千田 知弘

秦 吉弥

藤倉 修一

九州大学

エイト日本技術開発

福岡大学

大阪大学

宇都宮大学



## 調査活動概要

阿蘇大橋の場合、単純に地震動により崩壊したものではなく、断層破壊による地動や膨大な地すべりを伴った形で崩落していると思われる。 **被害原因を特定することが難しい。**

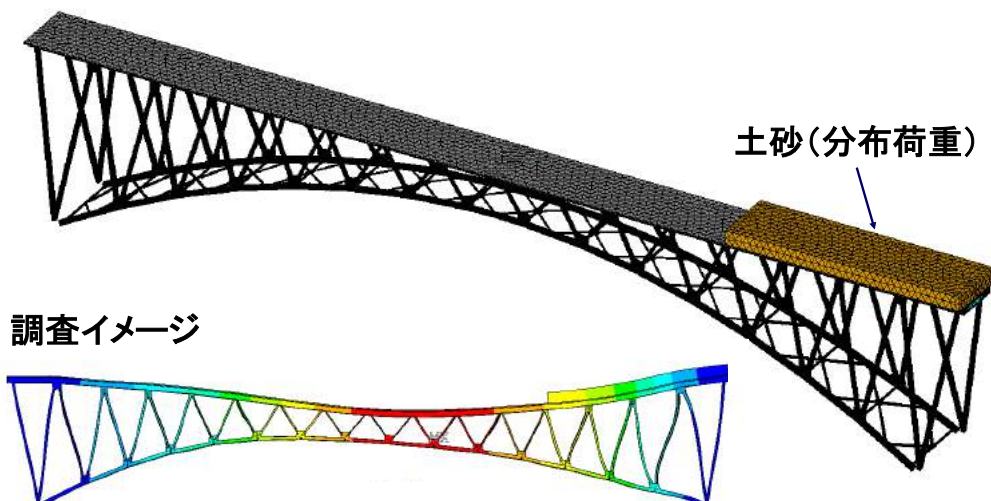


本SWGでは、阿蘇大橋の被害原因を推察するため、橋梁全体系解析により、以下の基礎検討を行っている。

- ・土砂災害による橋の崩落の可能性について  
橋に落下した土砂量を推定し、静的解析による分析
- ・地震動による橋の崩落の可能性について  
サイト特性を考慮した周辺地盤上の推定地震動(大阪大学 秦准教授らによる調査)を用いた地震応答解析

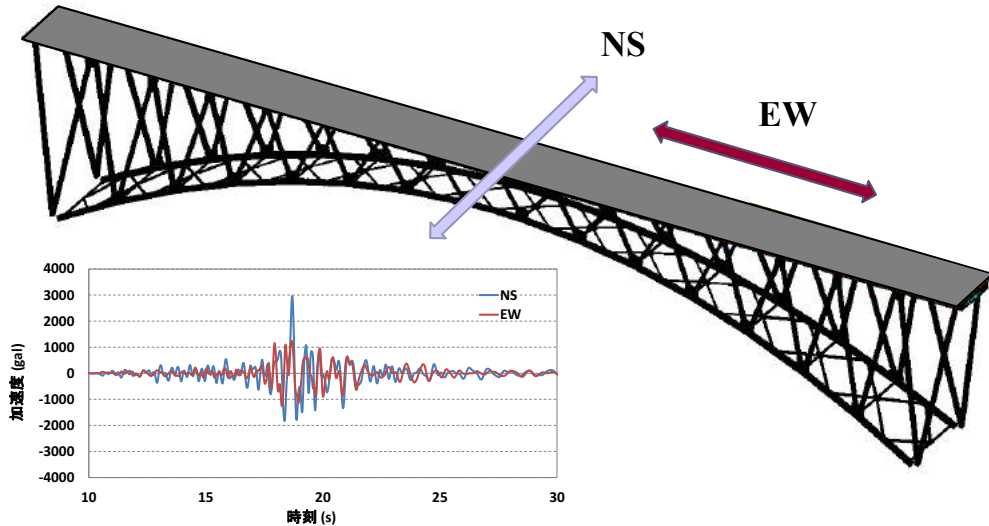
## 土砂を載荷した検討

床版に落下した土砂を分布荷重として扱い、FE解析による各部材の応力調査（土砂量、載荷範囲は推定；パラメトリック検討も考案中）



## サイト波を用いた地震応答解析

サイト特性を考慮した周辺地盤上の推定地震動(大阪大学秦准教授らによる調査)を用いた地震応答解析



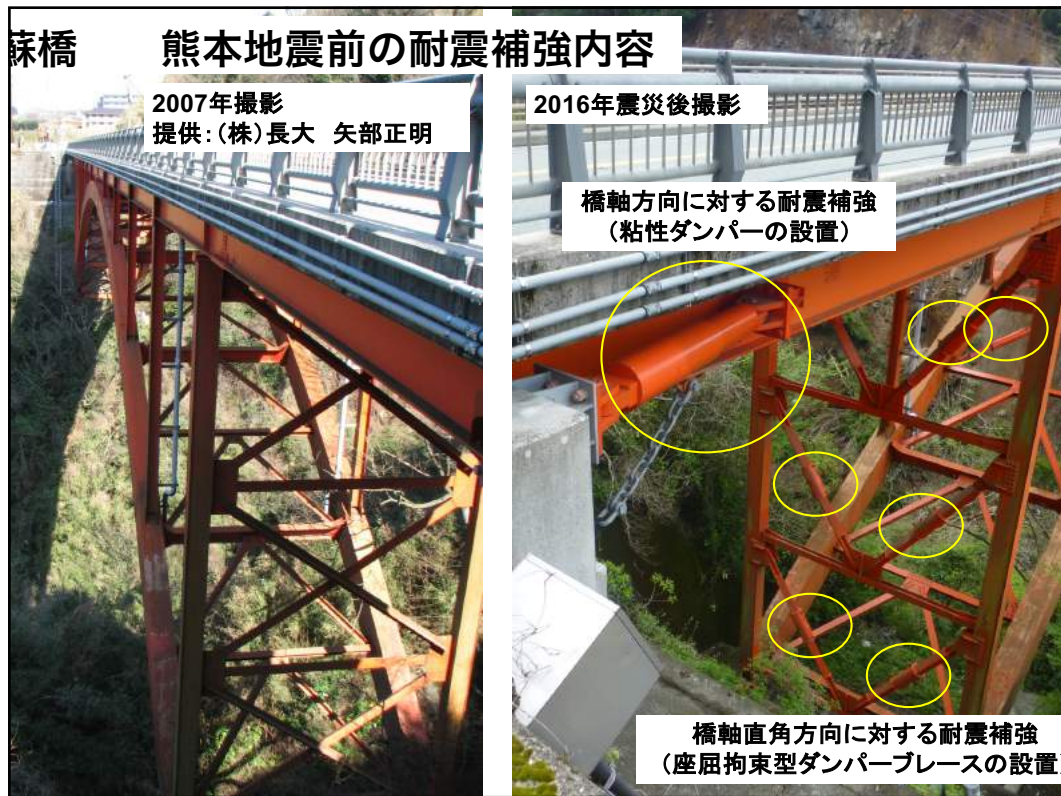
## SWG検討

### 南阿蘇橋 国道325号

#### SWGメンバー

高橋良和 京都大学  
藤田亮一 エイト日本技術開発  
秦 吉弥 大阪大学

葛西 昭 熊本大学  
秋山充良 早稲田大学





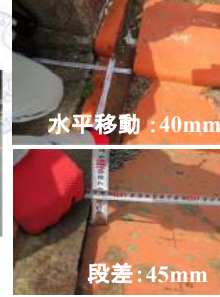
# 主な損傷状況

A1橋台ジョイント部

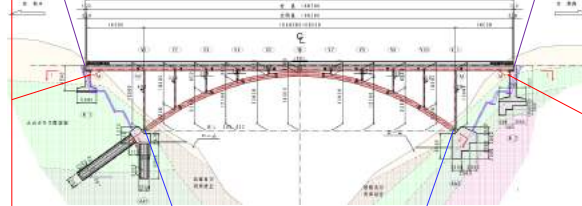


A2側と比較して損傷は軽微

A2橋台ジョイント部



A1橋台側  
ダンパー取付け部



アーチ支点のボルトの破断



A2橋台側  
ダンパー取付け部



## 南阿蘇橋

## 被害分析の着眼

2011年撮影

提供:九州大学・建設振動工学研究室

斜面崩壊に伴う橋台の橋軸方向への移動?



強震動による橋軸直角方向への過大な応答?



## 南阿蘇橋 被害分析の着眼



橋台の橋軸方向への移動？  
→ダンパーの取り外れが生じた橋台部  
はジョイントが橋軸方向に押し出され、  
損傷



強震動による橋軸直角方向への過大な応答？  
→ダンパーの取り外れが生じた橋台部に  
残る鋼製ブラケットのゴムの痕跡。

## 検討内容と着目点

### 想定する被災シナリオと検証方法

- ①地震動による損傷 ⇒ 動的解析
- ②地盤変位による損傷 ⇒ プッシュオーバー解析

- ✓ 橋軸直角方向の地震時応答変位は、桁がRC壁に衝突するほどの値に達しているのかを検証する。桁がRC壁に衝突した可能性が指摘された場合には、衝突時の速度を計算し、動的な衝突に対するRC壁の耐力について検証する。
- ✓ 想定されるアーチの損傷状態は、ボルトの破断が生じるほどのものであったのかを検証する。
- ✓ 耐震補強の効果を確認する。制震ダンパーが正しく機能した場合と、RC壁から取り外れた場合の応答の違いを検証する。座屈拘束型ダンパーブレースの果たした役割について検証する。
- ✓ 地震応答解析のみで損傷状態をどこまで再現できるのかを確認する。加えて、橋台背面から橋軸方向へ強制変位を与えるプッシュオーバー解析を実施し（橋台背面が斜面崩壊の影響により押し出されたと想定）、制震ダンパーに加わる力とRC壁の必要耐力について考察する。橋台背面の押し出しのみで制震ダンパー取付け部（RC壁）が損傷する可能性を検証する。

## まとめ



- 熊本地震による橋梁被害分析は開始したばかりであるが，
  - 中間結果は，2017年7月4，5日の性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウムにて経過報告予定
  - 最終結果は，2018年3月までに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（矢部委員長（株長大））報告書において記載する。

