

## 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

設置期間：平成26年4月から平成30年3月まで

委員数 60名（旧委員を含むと68名）

学16名，公的機関・道路会社等9名，民間企業35名

性能設計WG 22名 既存構造WG 30名

動的解析WG 11名 熊本地震による橋梁の被害分析WG 23名

主な活動成果

- ①第17回から第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開催
- ②シンポジウムでの優秀講演者賞（40歳以下の方）の授与
- ③宮崎市の高松橋で地震計を用いた24時間連続観測の実施
- ④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活動報告書発行
- ⑤2018年7月24日～25日開催予定の第21回シンポジウム中に報告会を開催予定（報告会参加者には報告書を無料配布）

## 第I編 危機耐性を考慮した橋の実現を目指して

1. はじめに
2. 現状の耐震設計とその課題
3. 危機耐性を考慮した耐震設計の考え方
  - 3.1 危機耐性の概念
  - 3.2 社会への影響が大きい事象の想定
  - 3.3 社会への影響を小さくする方法論
  - 3.4 被害例から見たBDBEを生じる要因
  - 3.5 現行基準における危機耐性
  - 3.6 危機耐性を実現する提案技術
4. ライフサイクルにおける危機耐性
5. 危機耐性を考慮した橋の実現への課題
  - 5.1 性能の表現方法
  - 5.2 費やすべきコストに対する社会的コンセンサス
  - 5.3 枠組の構築
  - 5.4 危機耐性に必要な技術

### 3.1 危機耐性の概念

#### ■本WGにおける定義

本WGにおいては、既存の定義・考え方を基本として、橋梁を対象とした場合の危機耐性を、以下の3項目の実施により付与されるものとして定義した。

- ① 設計地震動を超える地震動や、地盤変位、斜面崩壊、その他の作用が発生することを認識する。
- ② 作用が設計で想定した範囲内かどうかにかかわらず、経時劣化、上載物、周辺環境などの影響により、設計計算で想定した応答を上回る可能性や想定した抵抗を下回る可能性があることを認識する。
- ③ 前記の作用・応答・抵抗が設計範囲外であったことにより崩壊へ至るプロセスを考慮し、社会への影響がより小さくなるように配慮すること。

### 3.1 危機耐性の概念

#### (1)想定

設計行為ではカバーし切れていない事象



設計基準外部事象  
(Beyond Design Basis Event=BDBE)

#### ■設計行為におけるBDBEとは？

- ① 設計で見込む必要性が認識されているものの、発生しうる大きさと頻度が定量的に把握できていないため、設計に見込まれていない事象
- ② 設計で見込む必要性が認識されていない事象
- ③ 全ての可能性を計算することは現実的ではないため、一定のモデル化により代替して計算している不確実性

### 3.3 社会への影響を小さくする方法論

#### 3.3.1 コラプスコントロール

危機耐性の前提条件 構造物が崩壊することを受容する

その上で「社会への影響を小さく」するには  
 ➡ 構造物が崩壊した結果生じる状態をコントロールする  
 (コラプスコントロール：崩壊制御)

#### ■コラプスコントロール：崩壊制御の方法

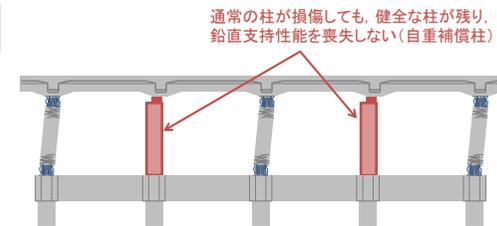
- 損傷箇所・被害モードをコントロールする方法
  - ➔ 破壊形態のコントロール
  - ➔ 自重補償機構<sup>3.7)</sup>
- 落下・倒壊方向をコントロールする方法
  - ➔ 落橋防止構造
  - ➔ 倒壊方向制御構造<sup>3.8)</sup>

### 3.6 危機耐性を実現する提案技術

#### ■提案されている技術

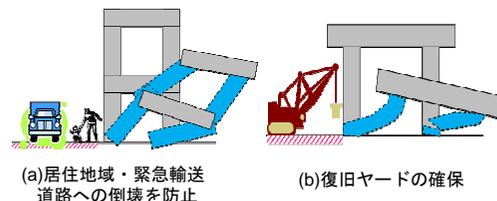
##### 自重補償構造<sup>3.7)</sup>

慣性力に抵抗せず地震時に損傷しない「自重補償柱」を設けることで、上部構造等を支持するための性能の確保を図る構造形式である。



##### 倒壊方向制御構造<sup>3.8)</sup>

倒壊が仮に生じたとしても、支障する方向には構造物を倒壊させないことで、人命損失を回避しながら構造物の回復力を高める。



### 3.6 危機耐性を実現する提案技術

#### ■危機耐性に配慮した復旧の事例（阿蘇長陽大橋）<sup>3.13)</sup>

- 熊本地震での被害
  - 斜面崩壊により橋台沈下
- 橋台の復旧計画
  - 支持層の見直し
  - 道路線形を斜面から離す方向へ
  - 構造安全性の高い5連ラーメン
  - 堅固な地盤でのラーメン支持



危機を回避する構造立案  
 +  
 危機の状況でも最悪とならないシナリオ

### 4. ライフサイクルにおける危機耐性の考慮



## 5. 危機耐性を考慮した橋の実現への課題

危機耐性を考慮した橋を実現するための課題を示す。

### <本章の構成>

#### 5.1 性能の表現方法

・・・技術的な課題として整理

#### 5.2 費やすべきコストに対する社会的 コンセンサス

・・・社会的な課題として整理

#### 5.3 枠組みの構築

・・・制度としての課題として整理

#### 5.4 危機耐性に必要な技術

・・・技術開発の方向性

## 5.4 危機耐性に必要な技術

### ■ 危機耐性の高い構造の開発

- ・ 冗長性の高い構造
- ・ 崩壊しても社会的影響を最小化できる構造

### ■ 危機耐性を評価するためのポストピーク解析技術

- ・ コラプスコントロールを定量的に説明できる技術

### ■ 危機耐性の評価手法

- ・ 定性的な評価から、定量的な評価へ
- ・ 将来的には、「配慮」でなく照査する「性能」とすべき

## 参考文献

- 3.7) 西村隆義ほか：危機耐性を高める自重保障構造の提案と成立性，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集，I-145，2015.
- 3.8) 豊岡亮洋ほか：高架橋の危機耐性向上のための倒壊方向制御構造の振動台実験，第37回地震工学研究発表会講演論文集，2017.
- 3.13) 澤田守ほか：熊本地震で被災したPCラーメン橋の復旧とモニタリングの活用，土木技術資料，60-2，pp.36-39，2018.

## 第 II 編 既存橋梁の耐震性能評価と耐震補強

### 1. 既存コンクリート建造物の耐震性能評価

- 1.1 材料劣化が鉄筋やコンクリートの力学特性に及ぼす影響
- 1.2 材料劣化が生じたコンクリート部材の構造性能に関する実験的研究
- 1.3 材料劣化が生じたコンクリート部材の構造性能に関する解析的研究
- 1.4 既存コンクリート建造物の点検・検査・診断
- 1.5 既存コンクリート建造物の補修・補強における注意点
- 1.6 既存コンクリート建造物の耐震性能評価の合理化に向けて

### 2. 免震支承や制震装置に生じる経年劣化と耐震性能評価

- 2.1 免震支承や制震装置に関連する経年劣化
- 2.2 免震支承や制震装置に生じる経年劣化が耐震性能に及ぼす影響
- 2.3 免震装置の点検・検査・診断方法の整理
- 2.4 諸外国の設計基準に採用されている免震支承や制震装置の経年劣化対策
- 2.5 橋梁用免震デバイスの耐久性向上に関する近年の進展と展望

### 3. 施工上の制約を受ける橋梁構造の耐震補強

- 3.1 施工上の制約
- 3.2 施工上の制約を受ける耐震補強事例
- 3.3 まとめ

## 1.4 既存コンクリート構造物の点検・検査・診断

### 目的意識を持った点検・検査

構造性能に大きな影響を及ぼす因子をいかに適切に把握するか？

### 診断の観点から見た点検・検査

診断を行うために必要な精度を意識し、点検・検査にフィードバック

### コンクリートの劣化

手法 外観目視, 反発硬度法等

評価指標 ひび割れ密度, ひび割れ深さ, 剛性

### 鉄筋の腐食

手法 X線, 磁気, ノギスによる直接的測定

評価指標 断面減少率, 質量減少率, ひび割れ幅による間接推定

部材の力学的特性 載荷試験・振動試験

## 1.6 既存構造物の耐震性能評価の合理化に向けて

### 既存コンクリート構造物

➤ 図面が無く、配筋が不明確な場合も少なくない。

➤ 不均一な劣化分布で、どこをどのように検査すべきか？

↓ 確度を上げるために、  
今後も更なる研究が必要不可欠

➤ 荷重・作用の実態評価、  
作用／耐力分布の評価に基づく点検・検査の実施

➤ 補修・補強部材単体だけでなく、構造物全体系の挙動の視点

➤ 確実に補修・補強部材を機能させるための耐力階層化

## 2.1 免震支承や制震装置に関連する経年劣化事例

### (1) ゴム支承の経年劣化

a) 鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）の経年劣化  
側面の一部がふくらむ、鉛プラグ突出



## 2.1 免震支承や制震装置に関連する経年劣化事例

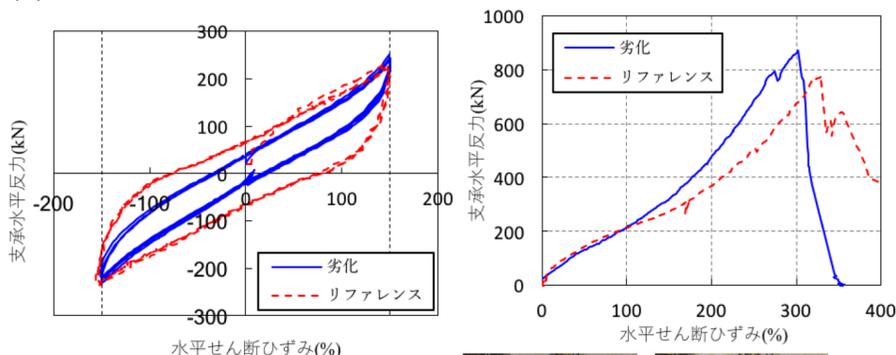
### (1) ゴム支承の経年劣化

b) 天然ゴム支承NR（リング沓）の劣化事例  
きれつ深さ最大で21mm

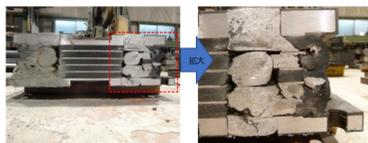


## 2.2 耐震性能に及ぼす影響

### (1) 経年劣化したゴム支承の復元力履歴



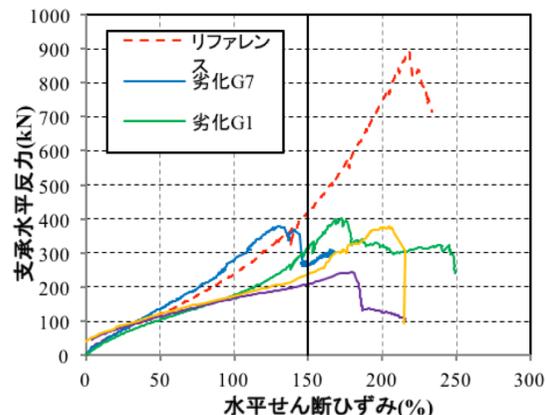
a) LRB  
 載荷実験により剛性の増加と減衰性能の低下がみられた。



## 2.2 耐震性能に及ぼす影響

### (1) 経年劣化したゴム支承の復元力履歴

b) リング沓：許容値を下回る131%で破断があったが、個体差も存在することが分かった。



## 3.2 施工上の制約を受ける耐震補強事例

### 補強対象や制約・解決の説明

|  |  |
|--|--|
| <p><b>制約が生じた背景・経緯</b></p> <p>【補強の概要】</p> <p><b>補強の概要</b></p> <p>【施工上の課題】</p> <p><b>施工上の課題</b></p> <p>【課題の解決方法】</p> <p><b>課題の解決法</b></p> <p>【その他、特記事項等】</p> <p><b>参考文献・特記事項など</b></p> | <p>図面やポンチ絵による<br/>                 施工上の制約を受ける事例<br/>                 の説明</p> |
|--|--|

## 3.2 施工上の制約を受ける耐震補強事例 1/2

### 事例1：跨道橋（パイルベント橋脚）の耐震補強

橋脚構造による補強工法の制約，近接構造物が多い，作業用水の確保や水処理が難しい

### 事例2：高架下利用施設を有する高架橋橋脚の耐震補強

近接構造物も多く，空頭制限もあり重機の使用に制限を受け，適用できる工法が限られる

### 事例3：高架下利用等の狭隘な箇所での高架橋柱の耐震補強

高架下の空間が店舗利用されており，火気や重機の使用が困難．近接構造物もあり，従来の補強工法の適用が困難

### 事例4：高架下利用等の建物に近接した箇所での高架橋柱の耐震補強工法の併用

高架下の空間が店舗利用され，構造上の制約もあり，柱上部と柱下部では異なる耐震補強工法を併用して実施

### 事例5：在来線電化区間に並行する新幹線鉄道高架橋の橋脚（柱）の耐震補強

当初工法を現場の制約により変更して耐震補強を実施

## 3.2 施工上の制約を受ける耐震補強事例 2/2

### 事例6：レンガ橋脚を有する鉄道橋の耐震補強

建築限界や河川阻害率による制約を受ける中で、橋梁全体の地震時挙動を考慮して補強を実施

### 事例7：河川内橋脚基礎の耐震補強

現橋の供用、低空頭による制約、騒音・振動防止なども要求されたRC製壁式橋脚と木杭基礎に対する補強

### 事例8：河川内橋脚の耐震補強

資材搬入が困難、取水施設や漁場が隣接し、水質管理も求められる中、施工期間も限定

### 事例9：3径間連続非合成钣桁橋の耐震補強

上部構造補強、支承交換、河川内の橋脚補強を、河川阻害率と施工可能時期による制約のもと実施

### 事例10：回転した斜橋の補修

地震により回転移動が生じた橋梁上部構造（斜橋）の位置修正と支承交換等を限定された作業時間で実施

### 事例11：斜面浸食による橋脚基礎の耐震補強

影響範囲の土地地権者の同意や斜面浸食の防止対策も必要

## 第Ⅲ編 橋の地震応答観測の普及を目指して

1. 構造物の地震応答観測の現状
2. 橋の地震応答観測の必要性
3. 地震観測の普及を目的とした地震計を用いた連続観測の試行

3.1 2016年熊本地震の際に高松橋で観測された地震応答とその分析

3.2 高松橋での連続観測データの維持管理への活用案

3.3 高松橋での地震応答観測の展開

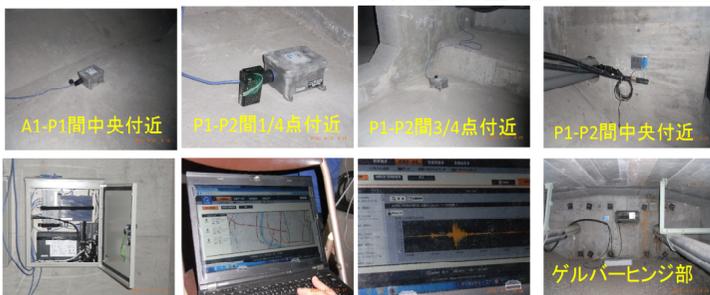
3.3.1 スマートデバイスを用いた高松橋の地震観測システムの構築と観測結果の利用

3.3.2 高松橋近傍の地震観測と揺れ特性評価

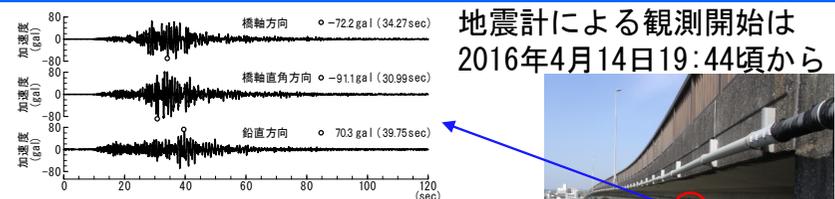
4. 橋の地震応答観測のための地震計設置時の留意点

性能設計WGと既存構造WGが担当

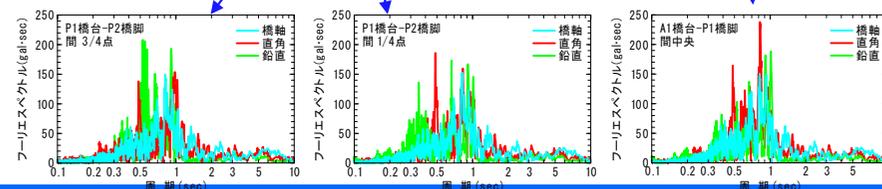
## 3. 地震観測の普及を目的とした地震計を用いた連続観測の試行



## 3.1 2016年熊本地震の際に高松橋で観測された地震応答とその分析



2016年熊本地震の本震



### 3.2 高松橋での連続観測データの維持管理への活用案

高松橋に設置した加速度の常時計測システムにより長期で構造物の固有振動数を逐一推定しその統計的性質を調べ、将来的に簡易に推定可能な固有振動数情報に基づいた異常検知の実現に結び付く可能性のある分析方法について検討する。

図-1は、高松橋のP1橋脚に最も近い地震計で計測された常時微動の加速度データの一例である。計測期間は2016年4月14日から同年8月2日までの約三か月半である。

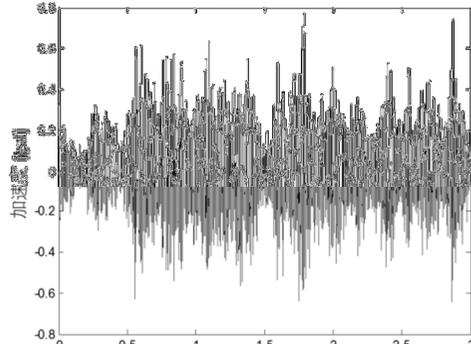
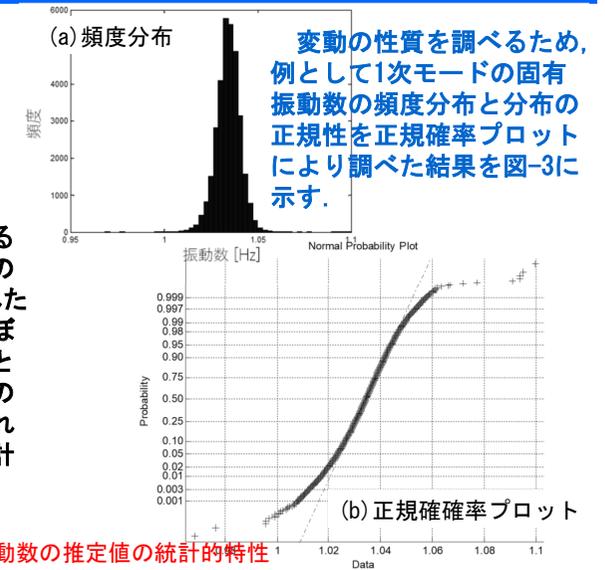


図-1 計測期間2016年4月14日から同年8月2日までのデータ

### 3.2 高松橋での連続観測データの維持管理への活用案

図の(a)より分布はほぼ左右対称で平均値周りにほぼ均等に出ており、図の(b)より平均値に近いほど正規分布に近い分布になっていることがわかる。



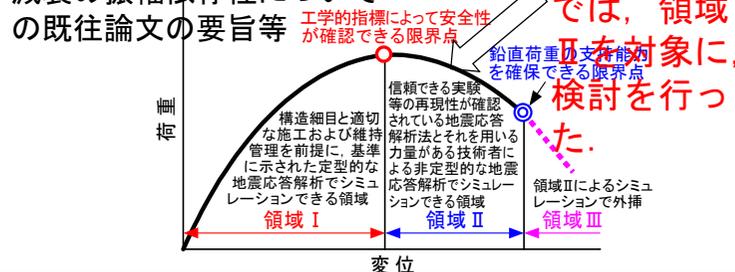
一方で平均値から離れるほど正規性が失われるものの、(a)の分布でも見られた通り、平均値に対してほぼ左右対称になっていることがわかる。これが、今回の常時微動から「推定」される固有振動数の変動の統計的性質である。

図-3 1次モードの固有振動数の推定値の統計的特性

## 第四編 良質な地震応答解析を目指して

1. 地震応答解析の現状
2. 構造物の耐震設計に用いる橋の減衰に関する調査
3. 地震応答解析による被災状況の再現性
4. 大型模型を用いた加震実験や正負交番載荷実験の再現性
5. 耐震設計に用いる地震応答算出の高度化
6. 構造物の地震応答特性に関する検討
7. 動的プッシュオーバー解析の検討例

附属資料 減衰の振幅依存性について



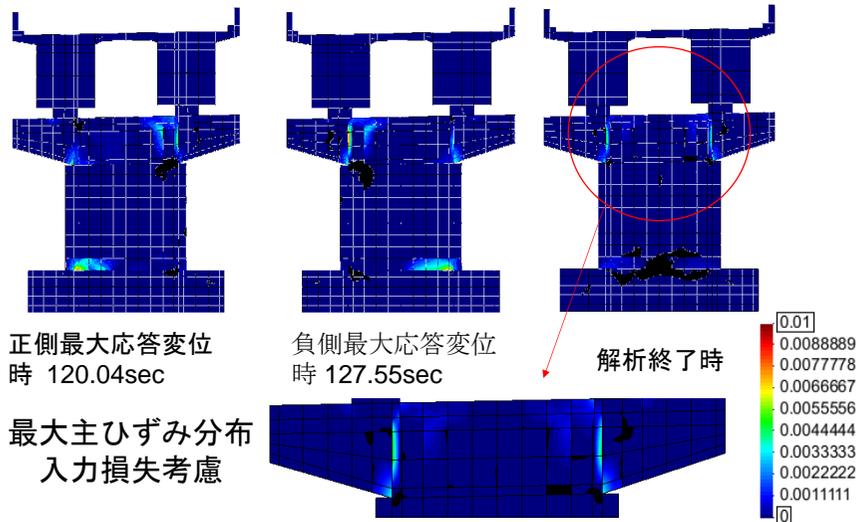
### 3.1 2次元非線形有限要素を用いた地震応答解析によるRC橋脚 横梁部の損傷



図-3 P5 橋脚の損傷状況

出典：篠原聖二，張広鋒，星隈順一：柱躯体部が耐震補強されたT形RC橋脚における横梁の地震時損傷メカニズム，土木学会構造工学論文集，Vol. 60A，pp. 316-325，2014. の図-3

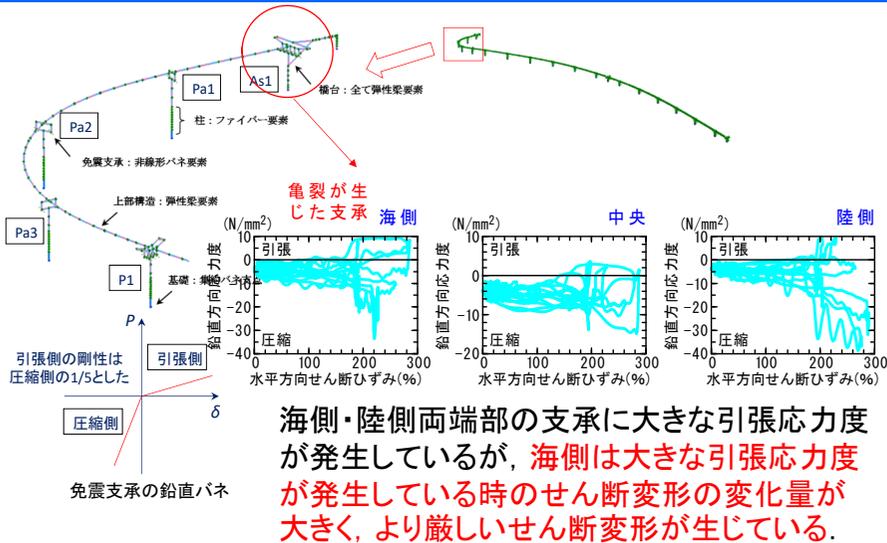
### 3.1 2次元非線形有限要素を用いた地震応答解析によるRC橋脚横梁部の損傷



### 3.2 非線形梁要素を用いた地震応答解析による曲線橋を支持する免震支承の損傷の再現性



### 3.2 非線形梁要素を用いた地震応答解析による曲線橋を支持する免震支承の損傷の再現性



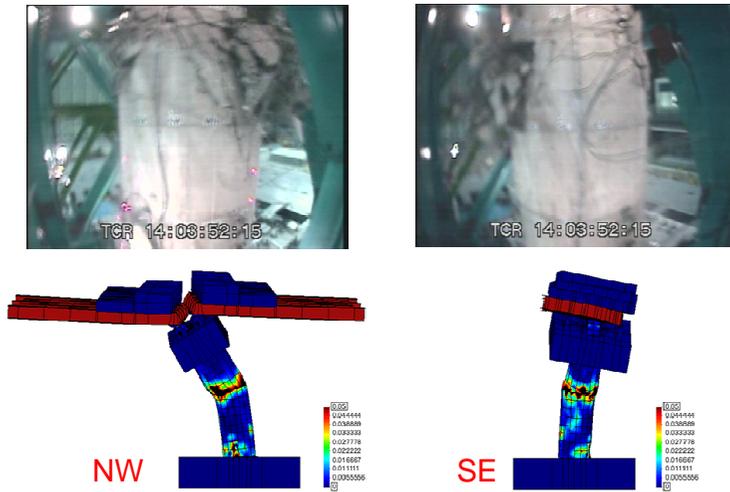
### 4. 大型模型を用いた加震実験や正負交番载荷実験の再現性

#### 4.1 RC橋脚の実大模型を用いた曲げせん断破壊型震動破壊実験の再現性



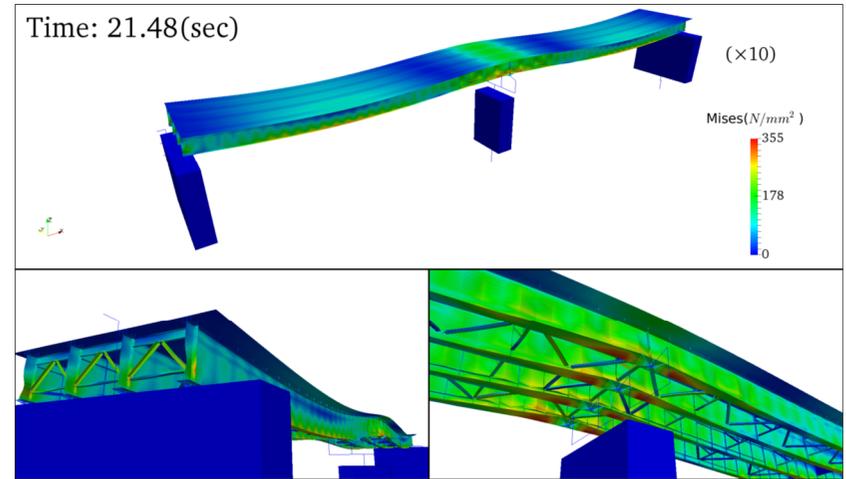
E-Defense C1-2 実験加震後の全景

#### 4.1 RC橋脚の実大模型を用いた曲げせん断破壊型震動破壊実験の再現性



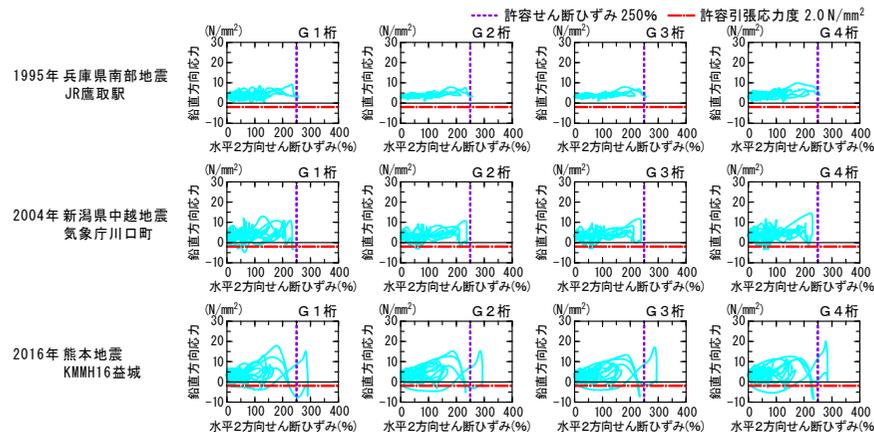
実験映像と変形図 6.87秒：せん断破壊発生時

#### 5.1 上部構造の詳細モデルを用いた積層ゴム系免震支承の地震応答の推定



上部構造変形と相当応力分布：2016年 熊本地震 KMMH16益城

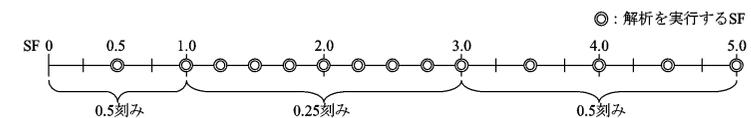
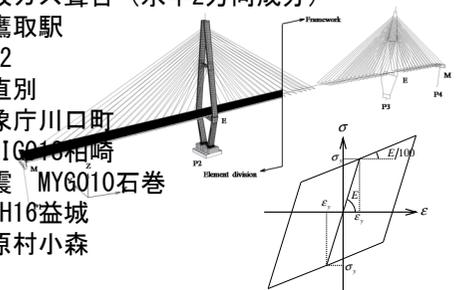
#### 5.1 上部構造の詳細モデルを用いた積層ゴム系免震支承の地震応答の推定



中間橋脚P1上に設置された積層ゴム系免震支承の桁位置と水平方向一鉛直方向応答履歴

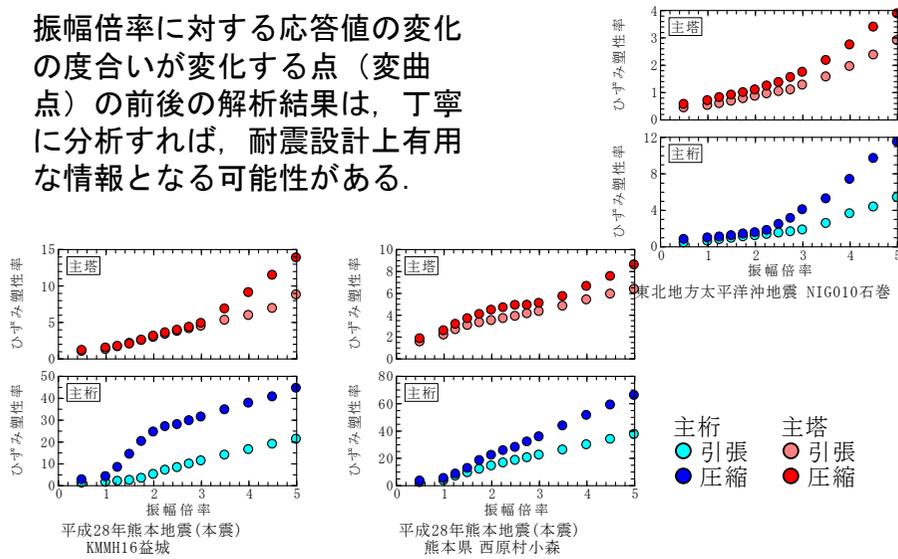
#### 7. 動的プッシュオーバー解析の検討例

- 1) 1995年兵庫県南部地震 大阪ガス葺合 (水平2方向成分)
- 2) 1995年兵庫県南部地震 JR鷹取駅
- 3) 1999年台湾集集地震 TCU052
- 4) 2003年十勝沖地震 HKD086直別
- 5) 2004年新潟県中越地震 気象庁川口町
- 6) 2007年新潟県中越沖地震 NIG016相崎
- 7) 2011年東北地方太平洋沖地震 MYGQ10石巻
- 8) 2016年熊本地震 (本震) KMMH16益城
- 9) 2016年熊本地震 (本震) 西原村小森



## 7. 動的プッシュオーバー解析の検討例

振幅倍率に対する応答値の変化の度合いが変化する点（変曲点）の前後の解析結果は、丁寧に分析すれば、耐震設計上有用な情報となる可能性がある。



## 第V編 熊本地震による橋梁被害の分析

### 1. 検討概要

1. 検討概要
2. 大切畑大橋の被害分析
3. 俵山大橋の被害分析
4. 扇の坂橋の被害分析
5. 府領第一橋梁の被害分析
6. 南阿蘇橋の被害分析
7. 阿蘇大橋の被害分析
8. 桑鶴大橋の被害分析
9. まとめ

### ～検討方針～

被害が発生した橋梁を対象に、唯一の被害メカニズムを特定しようとするのではなく、できる限り**複数のアプローチによる被害分析**を行い、被害状況の説明を試みた。

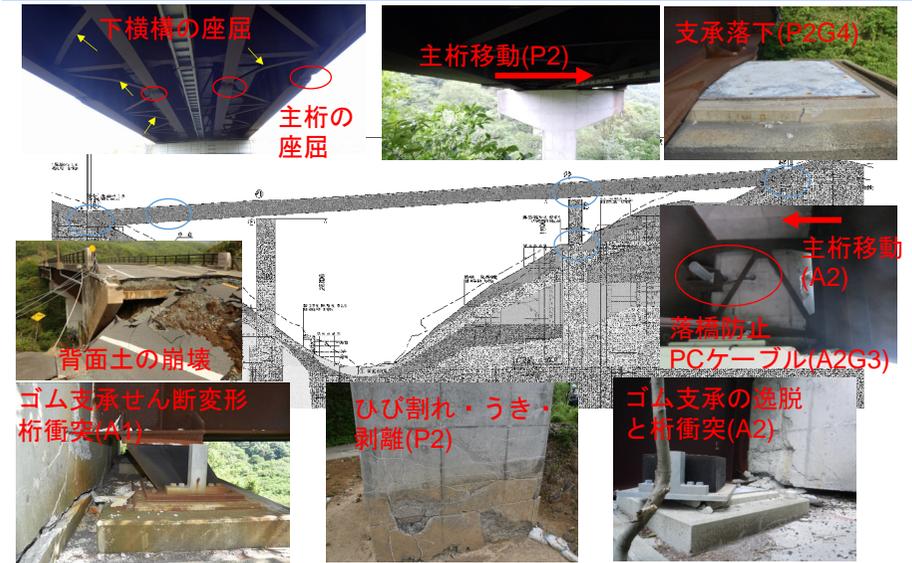
### ～検討方針～

推定した被災メカニズムに応じて解析方針を決定し、数値解析を行って、被災メカニズムを検討した。

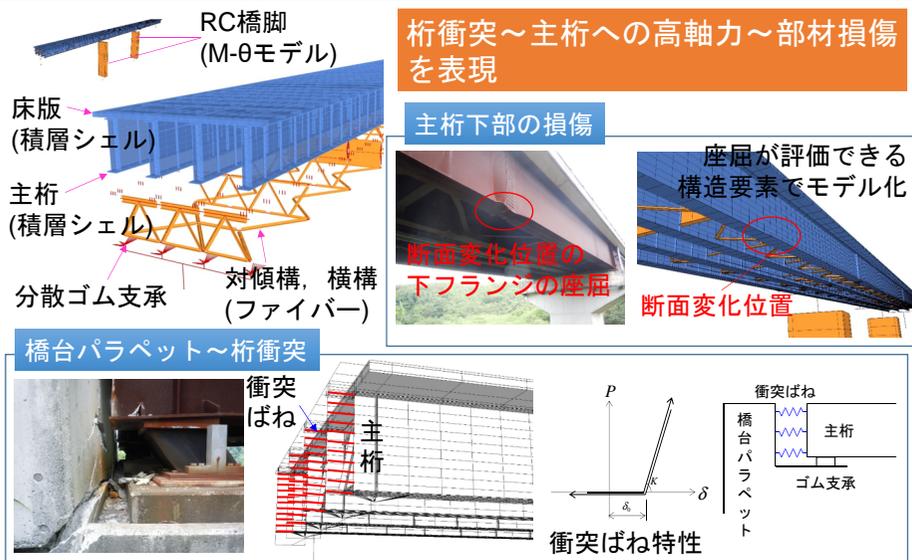
## 1. 検討概要



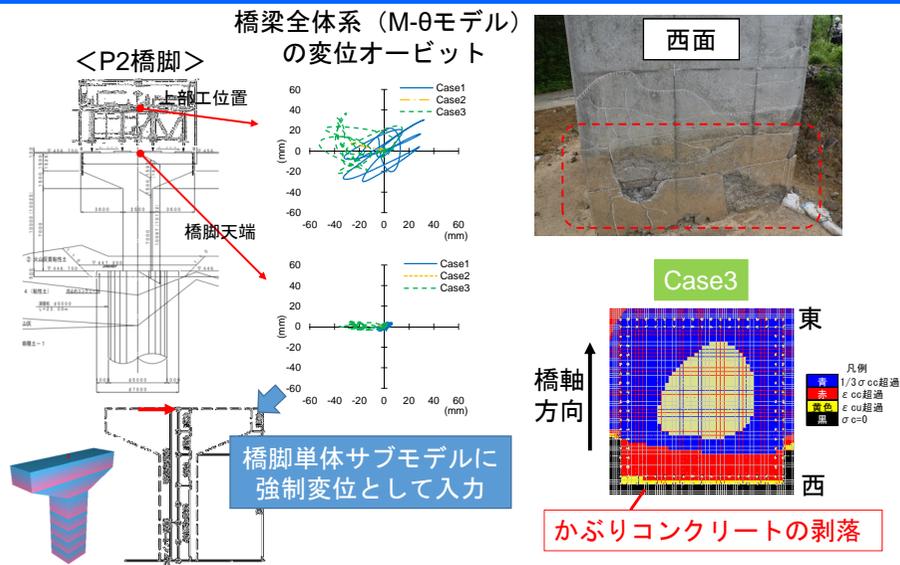
## 3.1 橋梁全体の被災状況



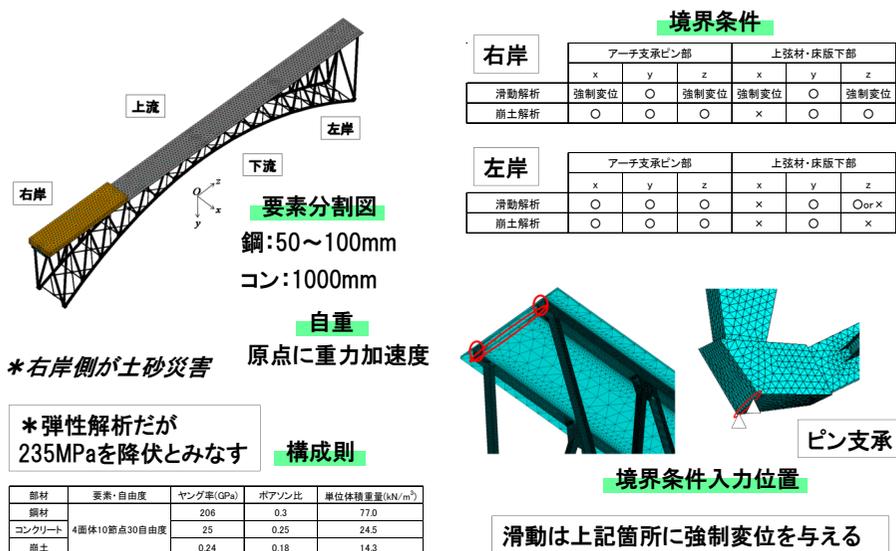
### 3.3.1 橋梁全体系解析モデルの構築



### 3.3 RC橋脚に着目した詳細検討

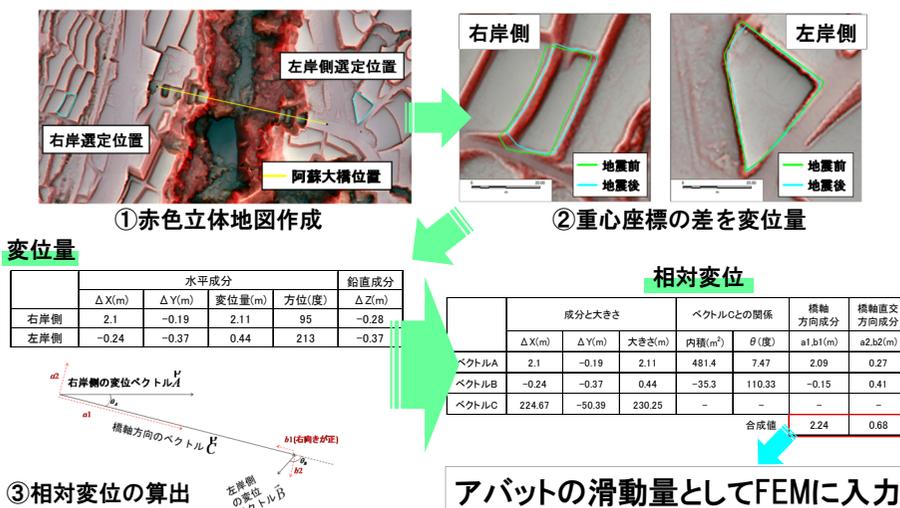


### 7.2 (2) FEM解析モデルおよび解析手法



### 7.3 (1) 航空レーザ測量データを用いた阿蘇大橋右岸・左岸の相対変位の算出

2013年1~2月の計測データ(国交省九地整)と2016年4月の計測データ(林野庁)を比較



## 9. まとめ

---

本編では、2016年熊本地震により被災した橋梁を対象に複数のシナリオを想定して被害分析を行った。各橋で想定したシナリオや着目したパラメータは以下のとおりである。

- 2章 大切畑大橋 : 地盤変位, 地震動
- 3章 俵山大橋 : 地盤変位, 地震動およびその組み合わせ
- 4章 扇の坂橋 : 基礎毎に異なる地震動, 桁端衝突, 桁の回転
- 5章 府領第一橋梁 : 橋軸直角方向の変位制限構造の耐力
- 6章 南阿蘇橋 : 地盤変位, 地震動
- 7章 阿蘇大橋 : 崩土の載荷, 地盤変位
- 8章 桑鶴大橋 : 支承や変位制限構造の損傷の順番

これらの検討結果が今後の被害分析, 耐震設計の一助となれば幸いである。

---

# ご清聴を感謝します。