

**平成29年3月9日最終講義 223教室**

# **アーチに魅せられて40年**

**ー 鋼アーチから石橋まで ー**

**熊本大学大学院先端科学研究部**  
**教授 山尾 敏孝**

## お話の内容

- 大学でのあゆみ
- 研究内容など
- 熊本地震の経験
- 大学で学んだもの

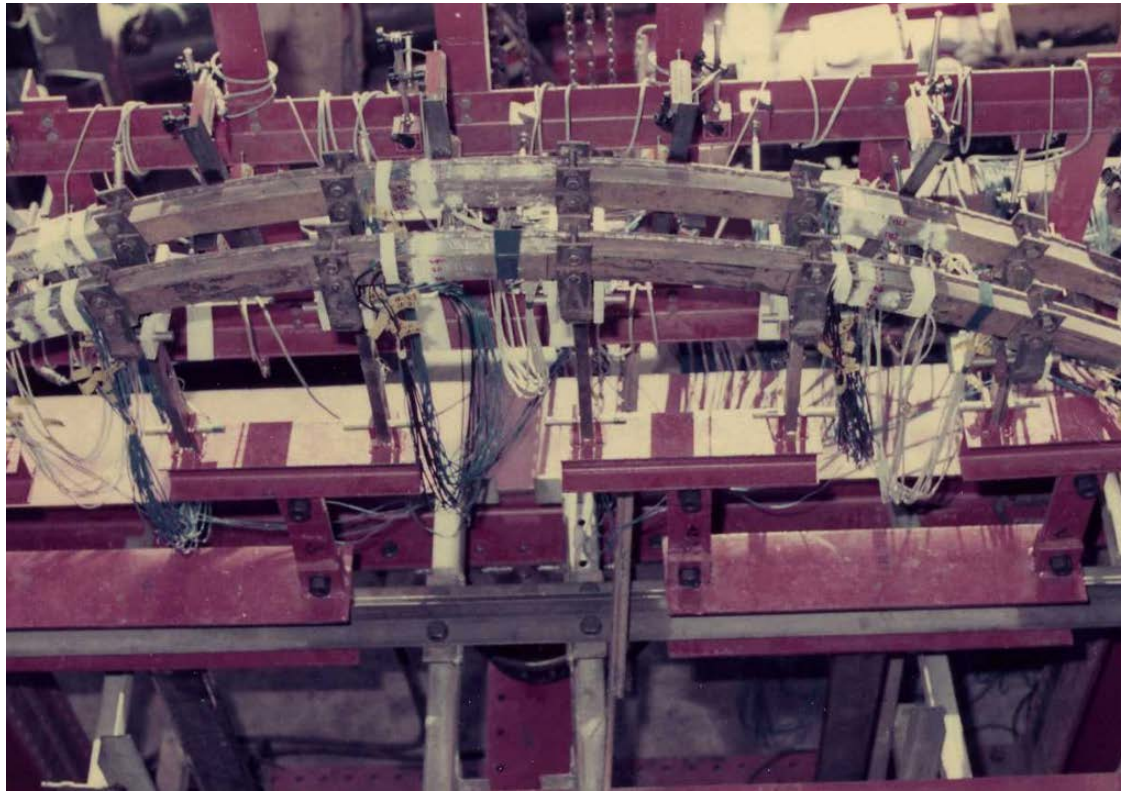
# 1. 学部・大学院

## ➤ 工学部土木工学科(1970.4～1974.3)

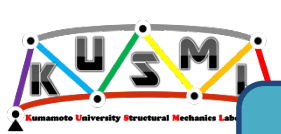
- 工友寮，部活動
- 卒業研究：平井一男教授  
振動の研究

## ➤ 大学院土木工学専攻(1974.4～1976.3)

- 鋼アーチの実験 ➡ 研究テーマの変更
- 修士論文：崎元達郎講師（1973.4赴任）
- 就職失敗から助手へ



鋼アーチの面外座屈実験 (1974. 11)



## 2. 助手(1976.4-1988.4)

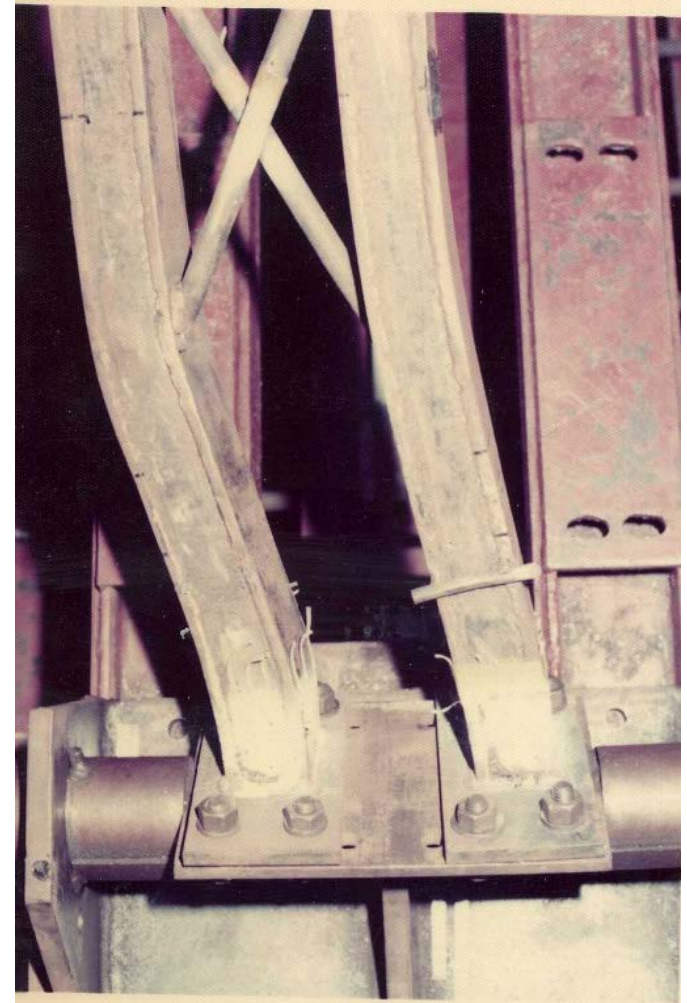
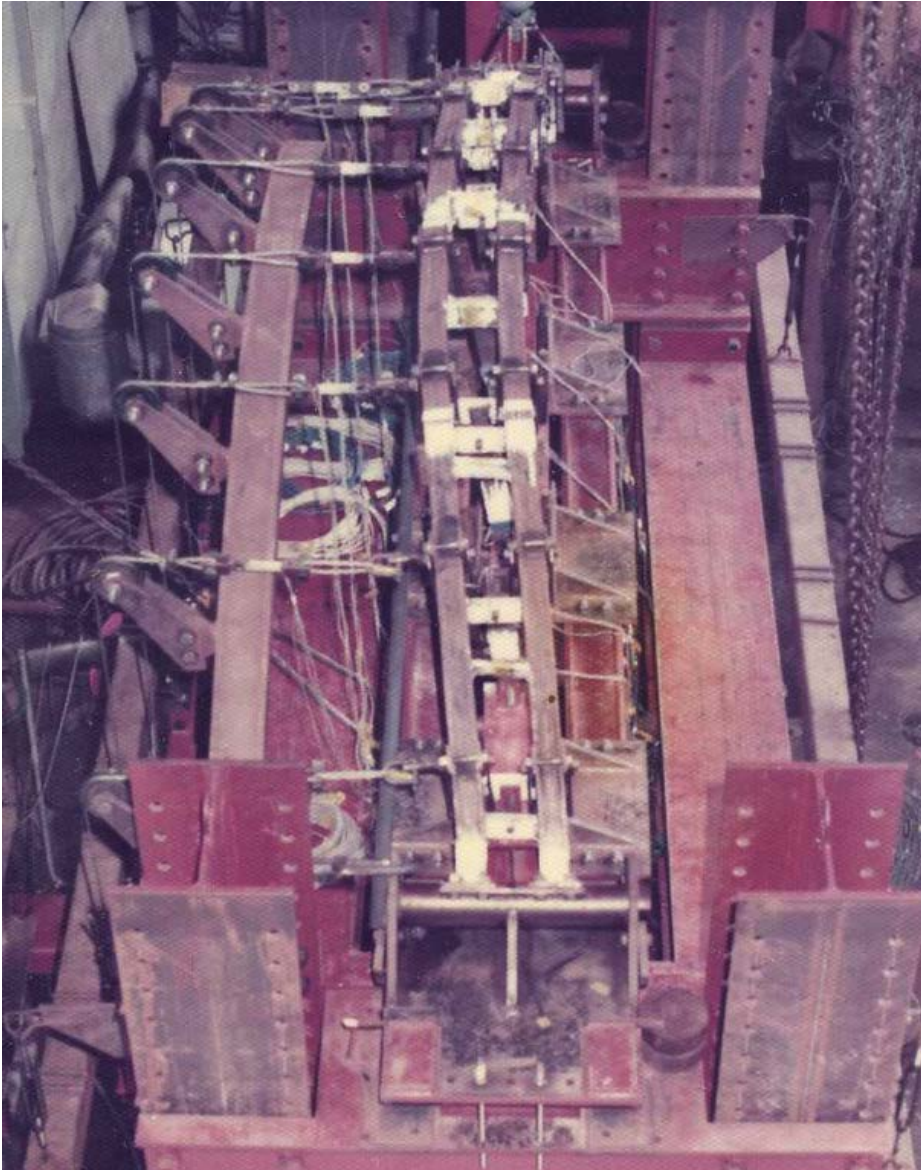
【1976～1980】

### ①鋼アーチの面外座屈強度と終局挙動の研究 (座屈と耐荷力:解析と実験)

- ・ 助手としての最初の仕事は？
- ・ 崎元先生の学位論文に関する研究  
＜鋼アーチの実験及び解析＞
  - ➡解析は九州大学の大型計算機使用
- ・ 実験と図面作成：宮崎技官の支援

**\* エピソード① カードリーダーと計算機！**





鋼アーチの面外座屈実験 (1976)

【1976～1980】

## ②箱型断面部材の連成座屈及び部材の ねじり挙動実験

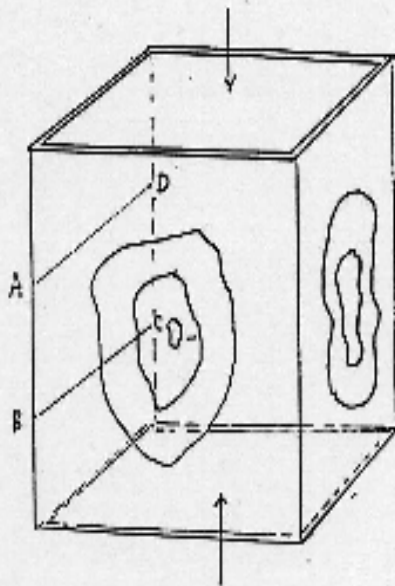
- ・ 崎元先生の留学（1979.4～1981.3）  
    ➡この間学生指導！
- ・ 座屈実験とねじり実験の載荷装置の開発

＊エピソード② 実験は徹夜！？

# 連成座屈とは



部材座屈



局部座屈



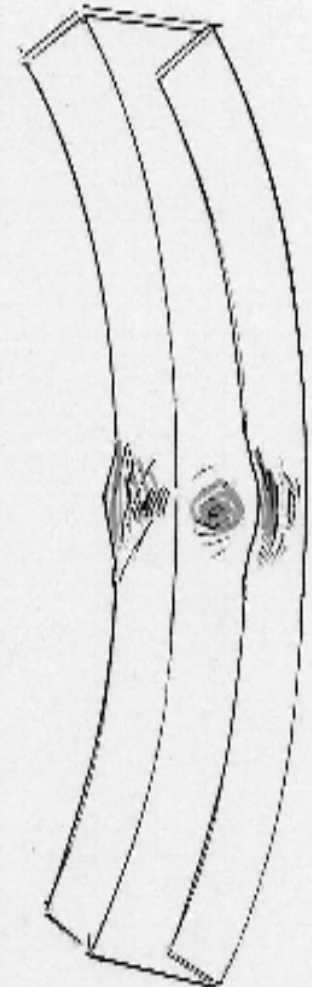
局部座屈



部材座屈

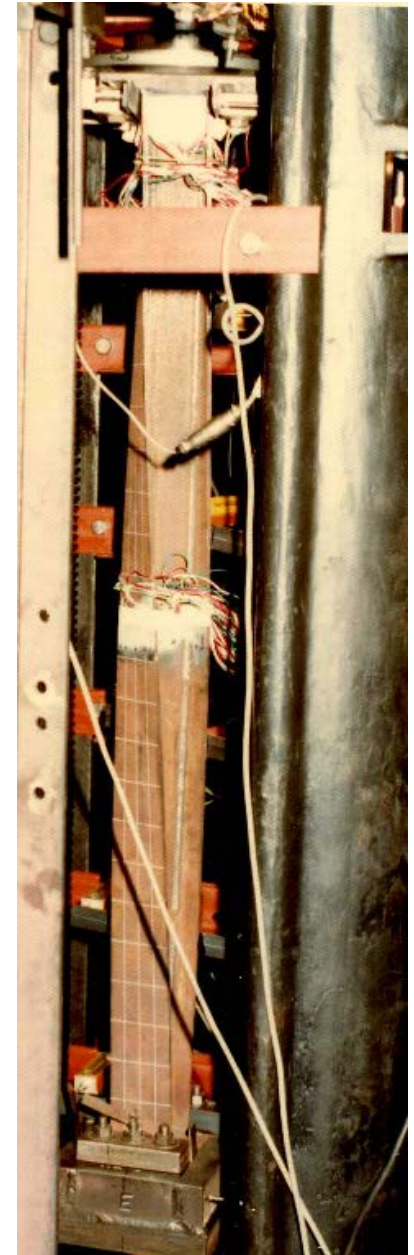
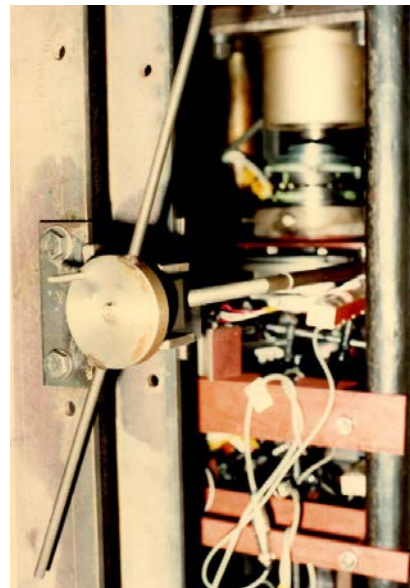
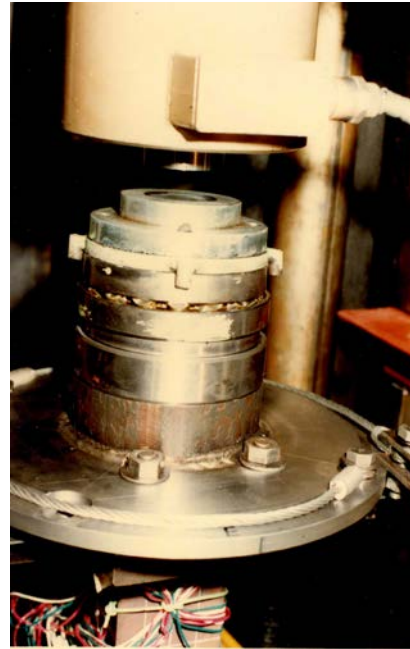


連成座屈  
(Interactive buckling)





# ねじり実験



【1980～1986】

## ② 薄肉H型部材の連成座屈に関する研究 (学位論文)

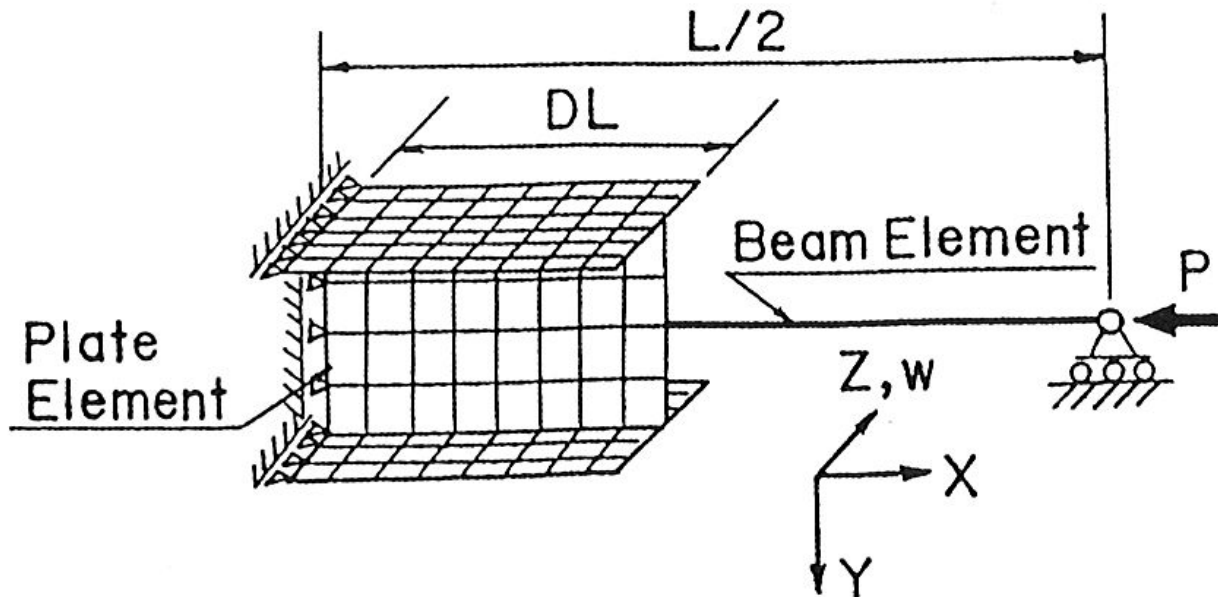
- 部材の全体座屈と板要素の局部座屈の連成座屈挙動と強度推定式の提案(解析と実験)
  - 棒要素解析と板要素解析を結合した結合解析プログラムの開発
- ➡ プログラム開発で悪戦苦闘！

\* エピソード③ 九大での解析費用？

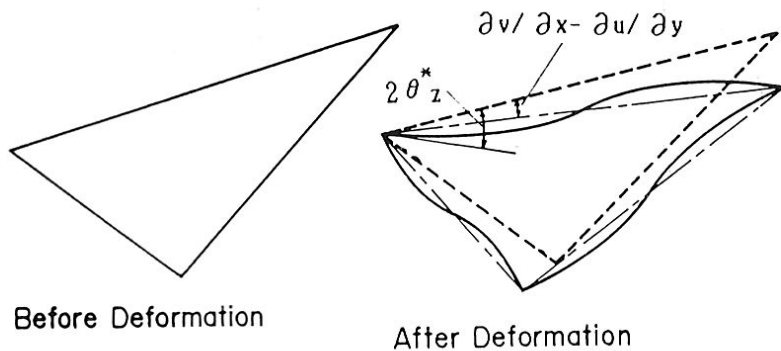
# 研究概要

## 【有限変位弾塑性解析手法】

- 部材座屈と板要素の局部座屈の両方が生じる連成座屈挙動と強度を求めることが可能
- 板要素に面内回転を導入し，6自由度へ！



# 棒要素と板要素の結合



板要素の回転導入

$$u_i = u_k - Y_i \theta_{zk} + Z_i \theta_{yk} - Y_i Z_i \theta'_{xk}$$

$$v_i = v_k - Z_i \theta_{xk}$$

$$w_i = w_k + Y_i \theta_{xk}$$

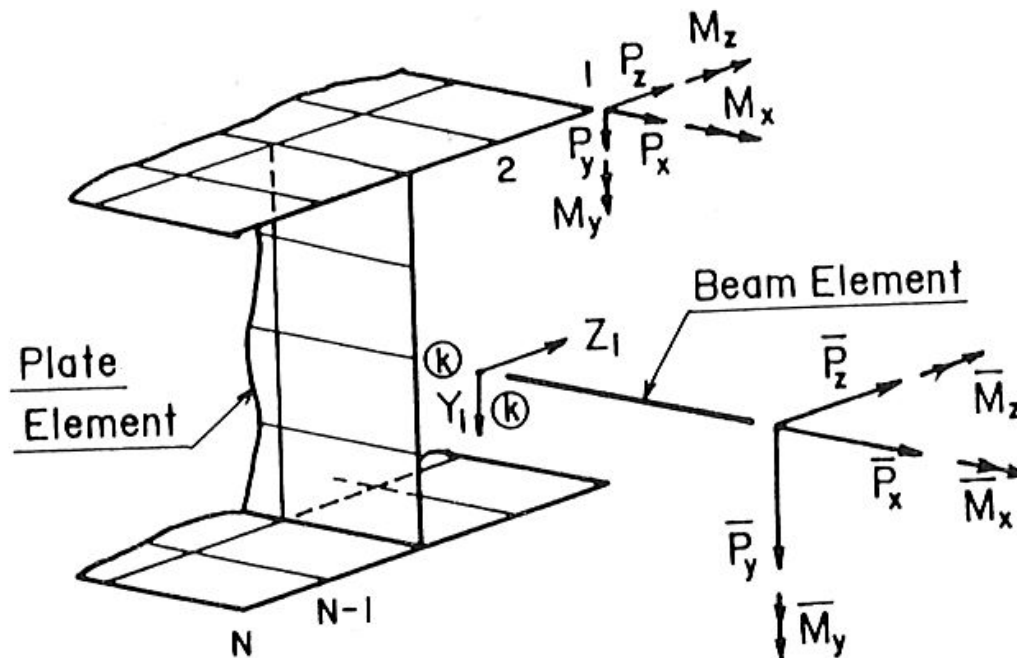
$$\theta_{xi} = \theta_{xk}$$

$$\theta_{yi} = \theta_{yk} - Y_i \theta'_{xk}$$

$$\theta_{zi} = \theta_{zk} - Z_i \theta'_{xk}$$

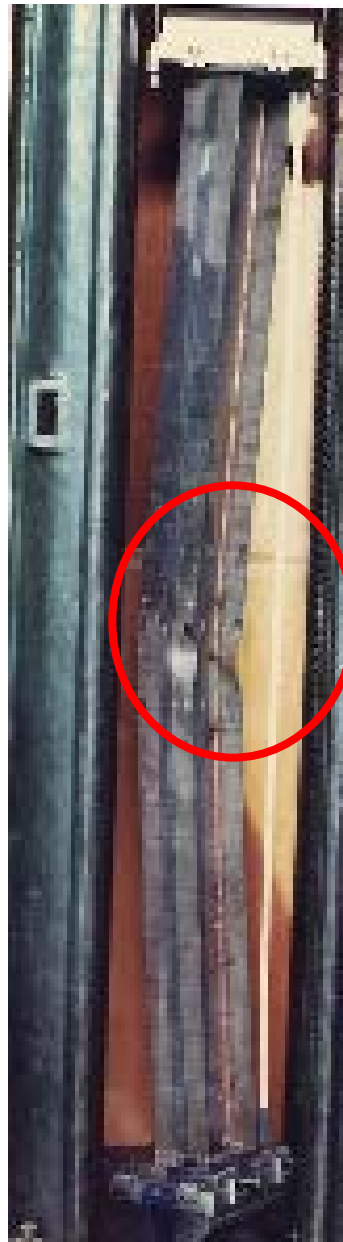
$$i = 1 \sim N \text{ (except } k \text{)}$$

変位の適合条件式



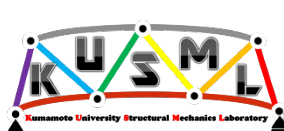


# 連成座屈実験 (H型)



局部座屈の例





## その他の出来事

- 1980. 8 土木教室チーム工学部教職員のソフトボール大会で初優勝
- 1982. 7 教室旅行で下田温泉で宿泊，大水害と遭遇（**長崎大水害発生**）
- 1983～ 九州橋梁・構造工学会（KABSE）の研究分科会活動の開始

**\* エピソード④ 雨男？ 雪男？**

## 内地留学と学位の取得

【1986. 5-1987. 2】 名古屋大学に内地留学

- 名古屋大学から学位(1986. 12)
- 福本先生, 宇佐美先生, 山田先生, 加藤先生, 伊藤先生, 青木先生との出会い, 交流
- 「若手耐荷力の会」を伊藤義人先生らと設立!



構造力学研究室 昭和63年度(1988年)



### 3. 助教授(1988.5-1995.3)

【1987～1999】

#### ②薄肉H型部材の連成座屈に関する研究

軽量薄肉鋼や低降伏比鋼を用いたH型断面部材の圧縮、曲げ挙動、塑性変形能力(継続)

【1987～1994】

#### ③合成桁の解析法開発とR C床版架け替え時の全体挙動解析

## 留学と病気

### 【カナダとイギリスへ留学1990-1991】

- ・ カナダ（トロント大学）
- ・ イギリス（インペリアルカレッジ）
- ・ 家族を連れての引越し！

### \* エピソード⑤ 磁気テープ消去事件

### 【最初の病気で入院・手術 1991.10】

# トロント大学



# イギリスと橋梁



インペリアルカレッジ



コンウェイ橋



フォース橋



## 4. 教授(1995.4-)

【1994～2006】

### ④タイで結合した曲がり部材の軸力構造体の開発と応用

(解析と実験) ➡ 平井教授との共同研究

#### 【構造の特徴】

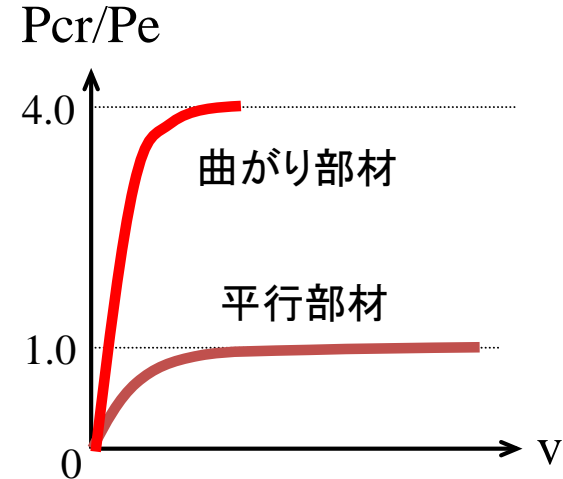
- ・両端ヒンジで曲り部材を繋ぐだけで良い
- ・面外の変形量を抑えることが可能
- ・座屈強度の上昇可能
- ・モデルは法隆寺の柱(エンタシス)からヒント
- ・鋼製橋脚やアーチ橋にも応用可能

# 研究概要

## 曲がり部材の特徴

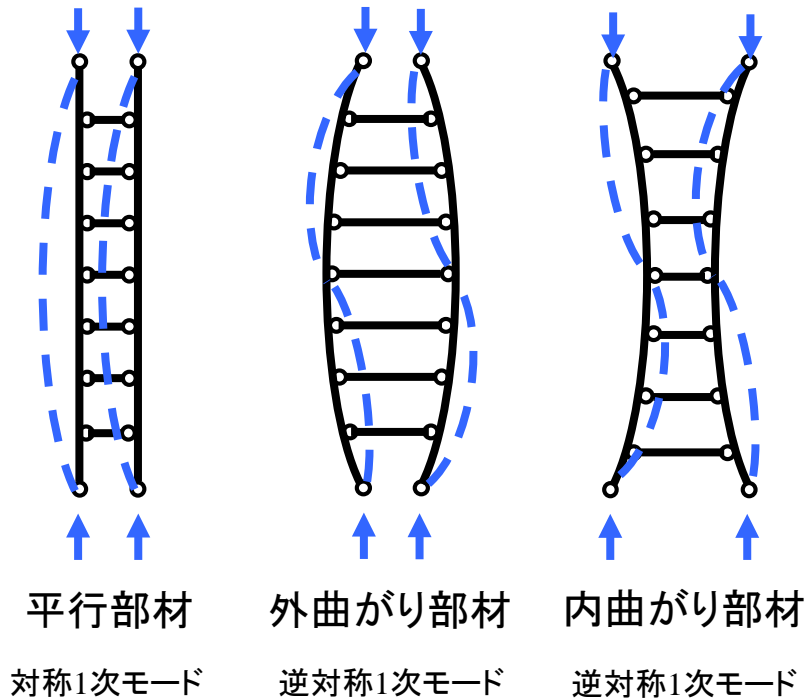
⇒ タイで繋ぐことにより軸圧縮力に強い構造

### ・座屈強度の上昇



### ・変形量の抑制

部材中央部において変位なし

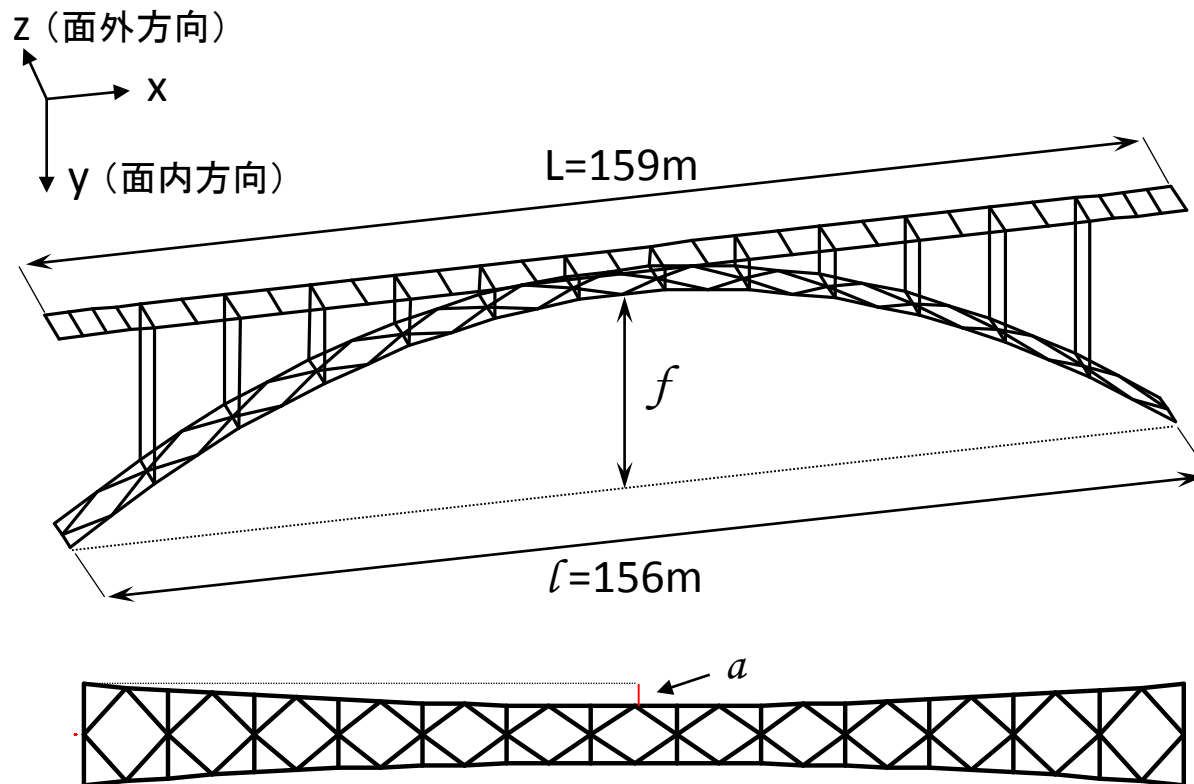


曲がり部材は2次の座屈モード  
つまり,飛移座屈が発生

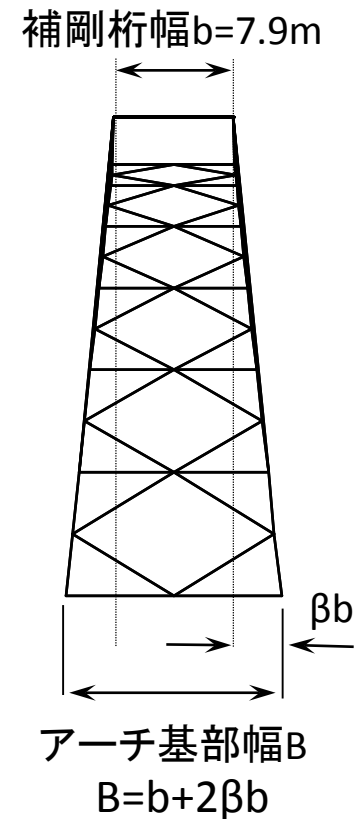
## 研究成果

- ・タイで結合した曲がり部材の橋脚やアーチ橋への応用と耐震設計の研究
- ・平行リブを持つ複弦アーチ橋との比較
- ・性能照査法の耐震設計の検討
- ・石原完君(故人)の研究 ➡ 石原元君の博士論文
- ・H12-H14 科研費(基盤C) アーチの研究
- ・石原元, 山尾敏孝, 平井一男: タイで結合した一対の曲がり部材の圧縮力に対する挙動と一解析法, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.143-3154 (2000)  
この研究の論文数: 上記を含む計8本(圧縮部材)

# 解析モデルとパラメータ

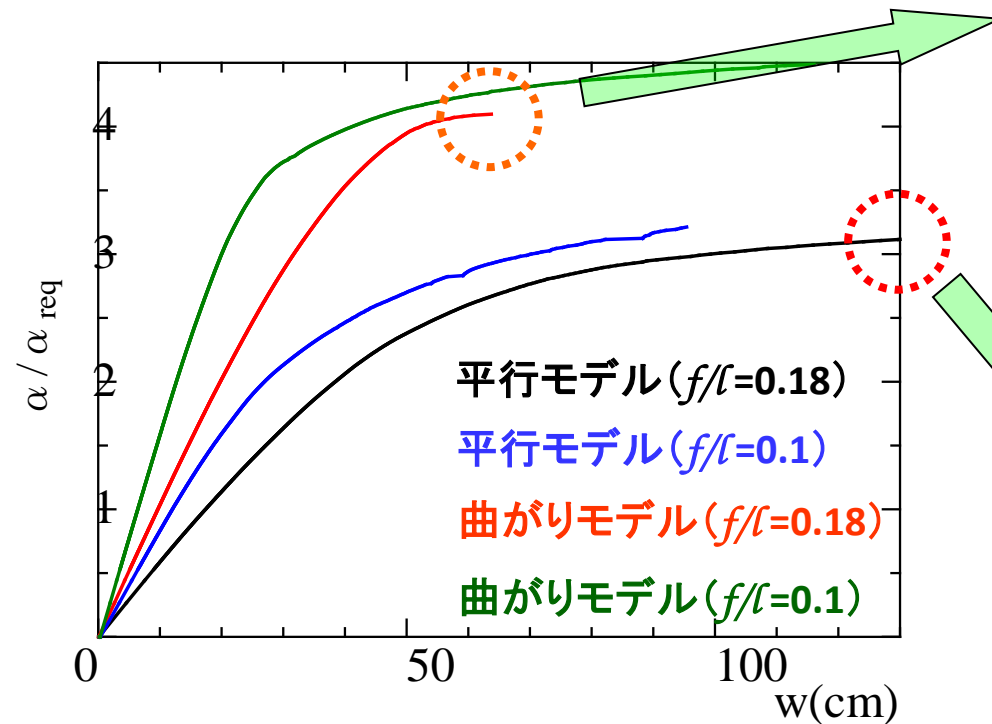


内曲がりアーチリブ平面図

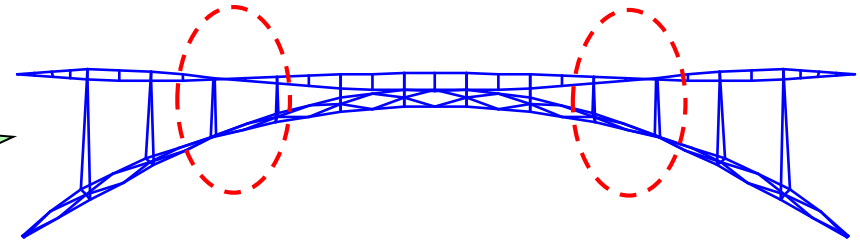


スパンライズ比 $f/l$	0.18, 0.10, 0.08
スパン曲がりライズ比 $a/l$	0.02, 0.03, 0.04, 0.05
アーチ基部突出幅係数 $\beta$	0.3, 0.4, 0.5, 0.6

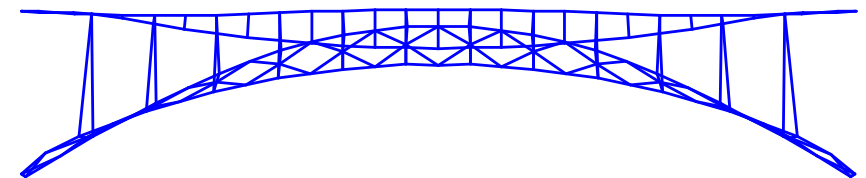
# 面外挙動の比較



面外荷重一面外変位曲線

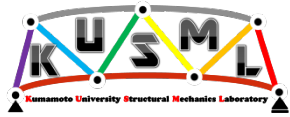


橋軸直角方向の変形



橋軸直角方向の変形





## 卒論・修論・博論

**圧縮構造体**：長田 光弘, 野口 哲治(1995), 桂原 和幸, 高橋 功(1996), 石原 完(修論1996), 小串 正明(1997), 佐藤宇紘(2003), 坂本 恵(2004), 佐藤弘平(修論2004)

石原元「一對の曲がり部材で構成された構造体の強度および挙動特性に関する基礎的研究」(2001)

**鋼製橋脚**：永田 涼二(1997), 小寺 孝志(1998), 桂原 和幸(修論1990), 河崎 貴仁(1999), 谷本一輝(2000), 伊東 宗昭(修論2001), 佐藤弘平(2002), 石澤 慶保(修論2002)

廣田 武聖「面外力を受ける逆L形鋼製橋脚のコンクリート充填率の提案」(2005)

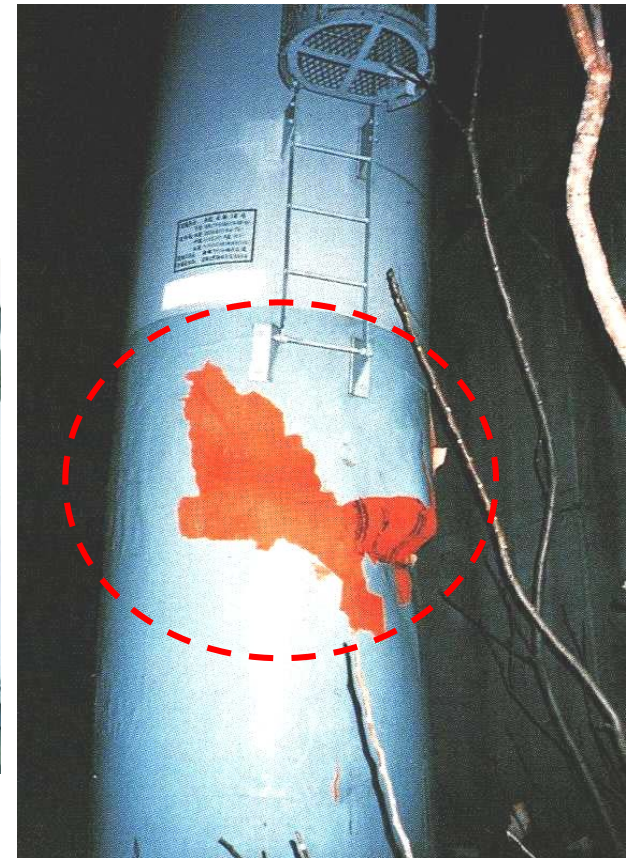
遠藤 史「曲がり部材の実構造物への適用へ向けた研究」(2011)

# 兵庫県南部地震による被害

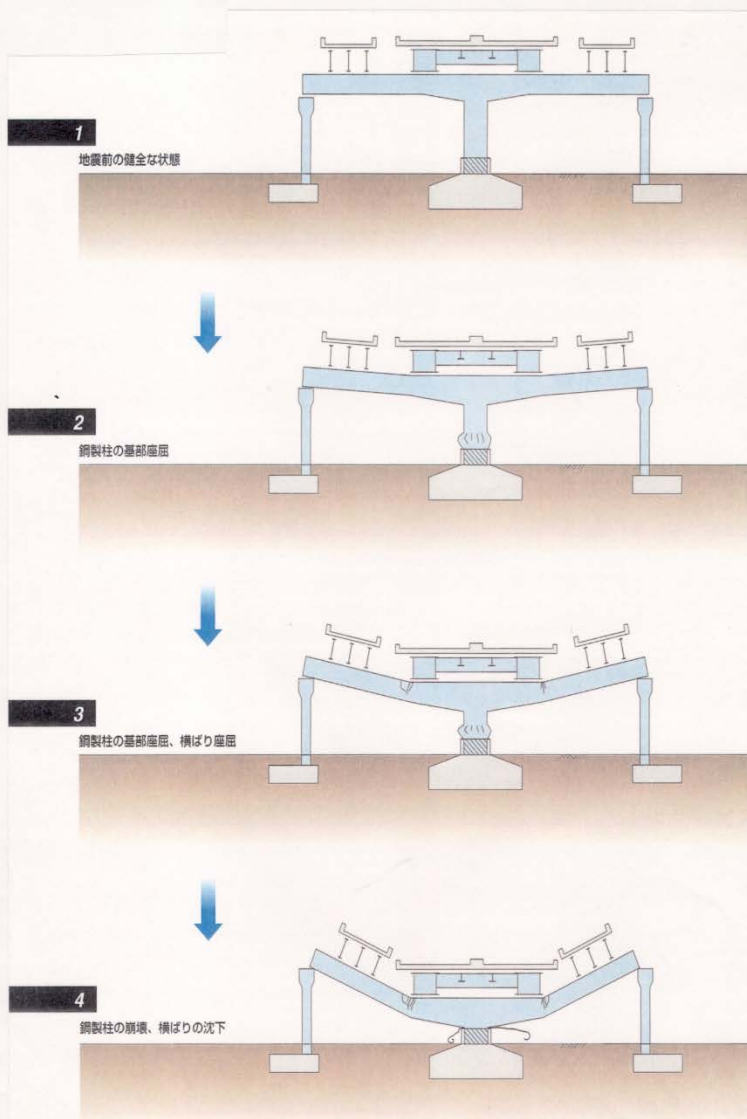
## ●阪神淡路大震災の発生(震度7) 1995. 1. 17



鋼製箱形断面橋脚の  
局部座屈



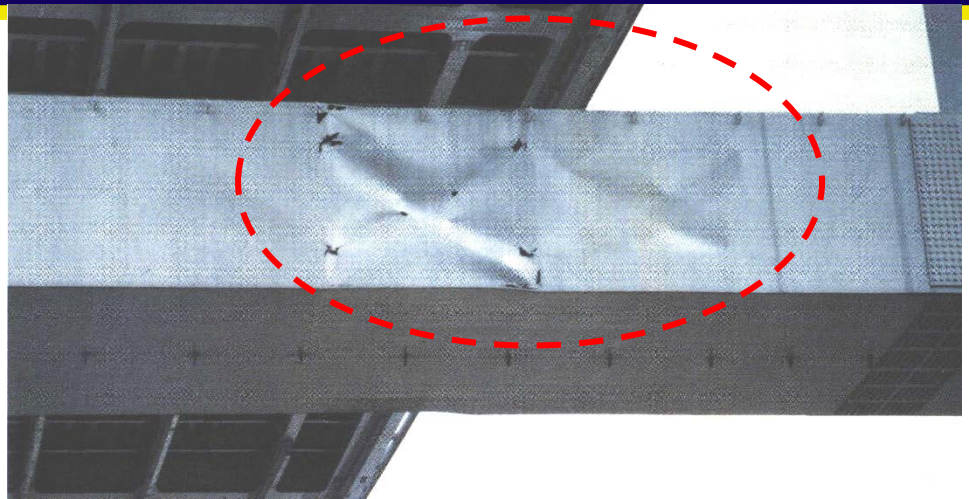
円形鋼製橋脚の局部座屈



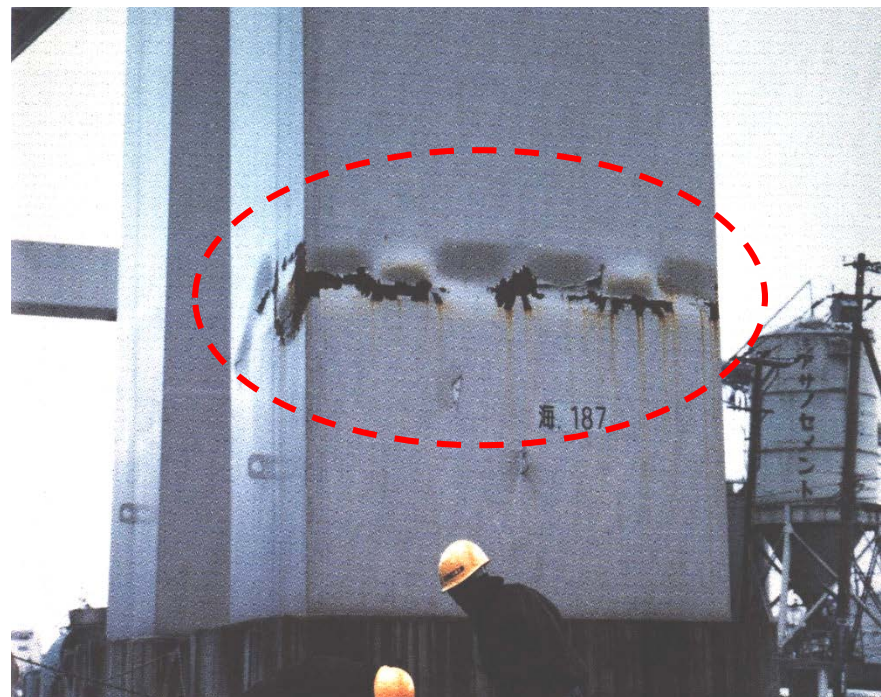
## 箱形断面橋脚の崩壊



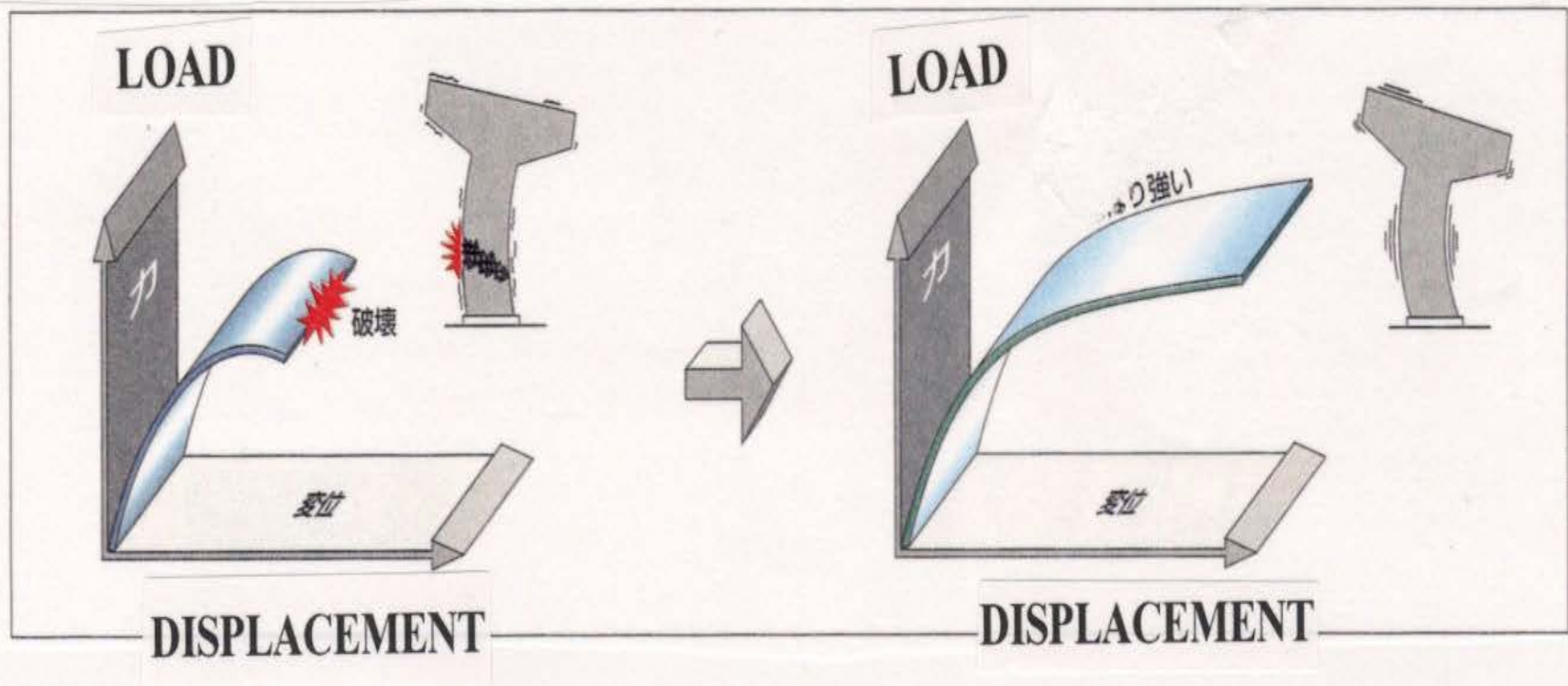
## ラーメン橋脚の せん断座屈



## 鋼製箱形断面橋 脚の局部座屈



# 橋脚の耐震設計の概念





## 【1995～2007】 大地震後の研究

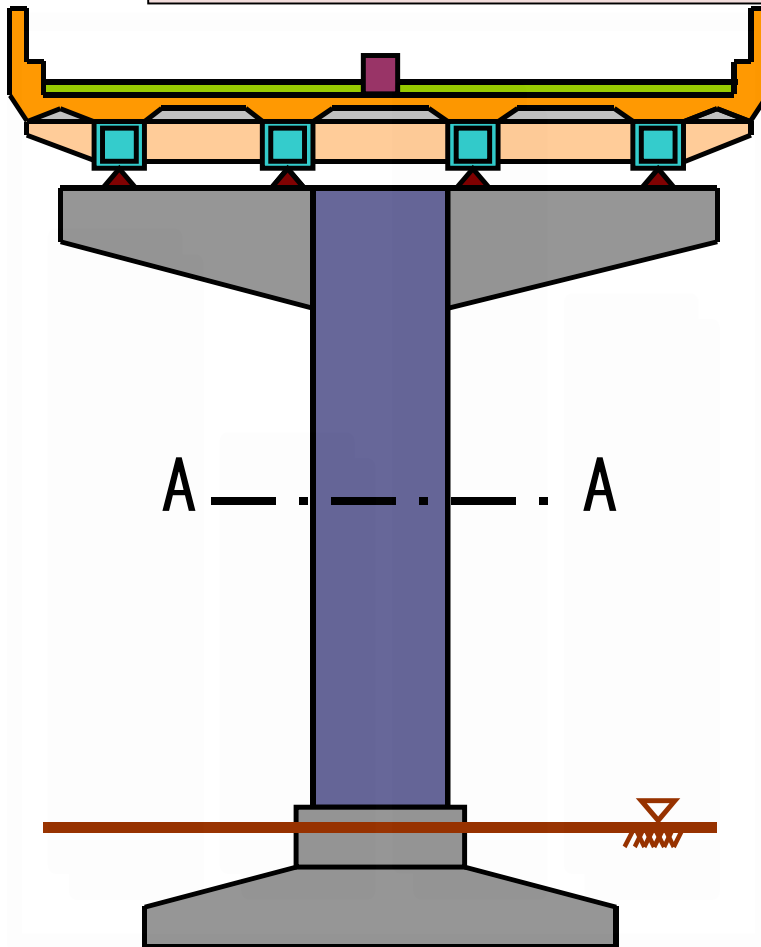
### ⑤耐震性能を向上させる橋脚の開発 十字型補剛を有する鋼製橋脚の提案 と耐震性能検討(解析と実験)

- ・鋼箱型断面部材繰り返し強度と挙動

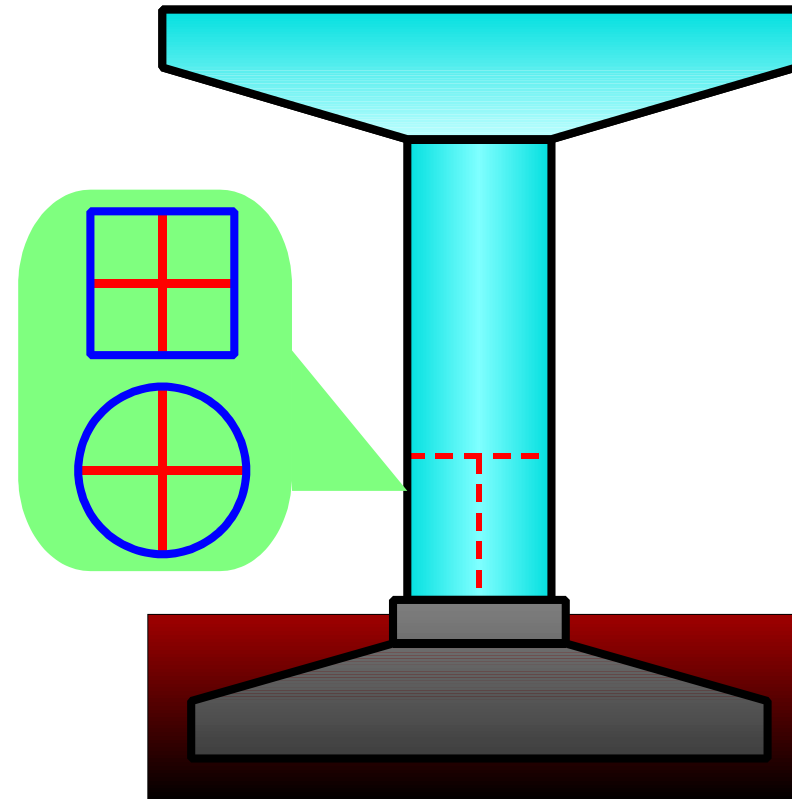
#### 【十字型の特徴と成果】

- ・耐震性能の向上策の一つ
- ・鋼製橋脚の基部の局部座屈の発生を抑制
- ・基部にコンクリートを充填する方法と同等な効果

# 十字型補剛壁を有する橋脚の開発

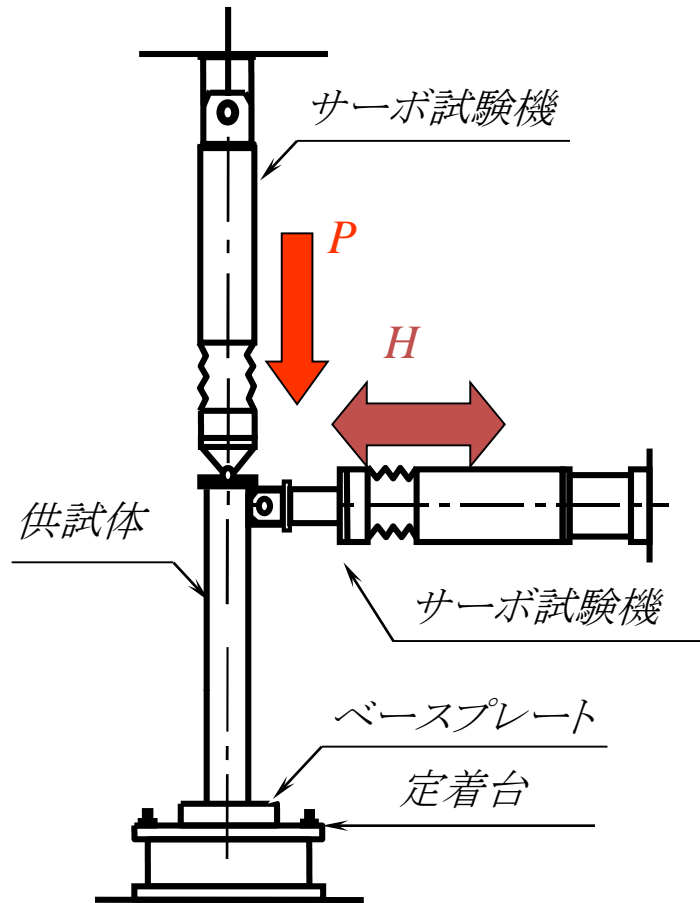


鋼製橋脚

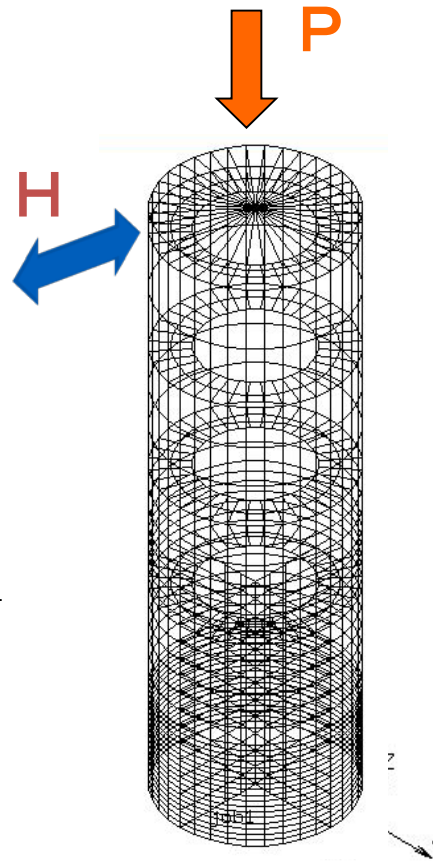


地震に強い十字型補剛を有する鋼製橋脚の開発・提案

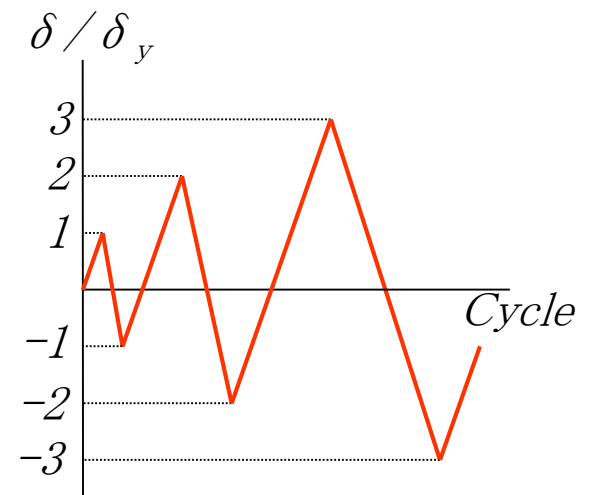
# 載荷方法



載荷実験

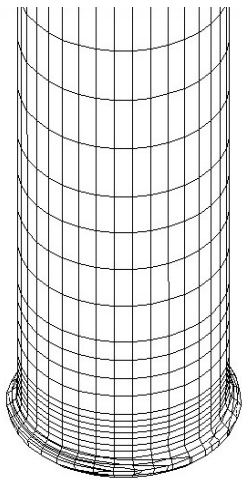


FEM解析

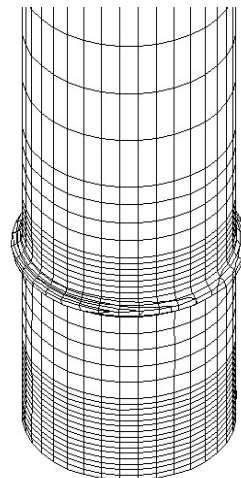


載荷パターン

# 変形の比較

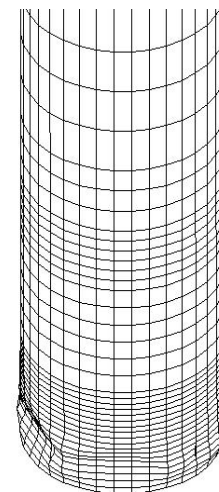


PNS692

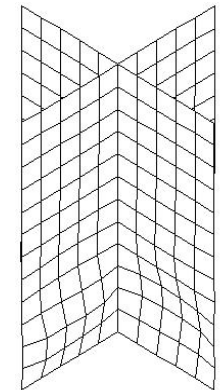
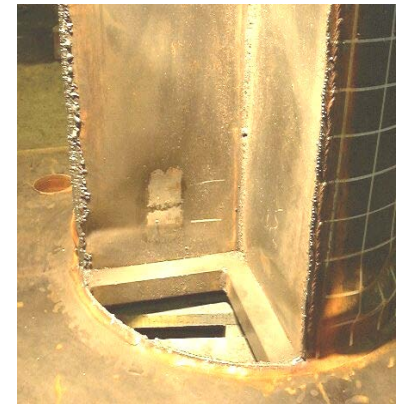


PCS692-27

実験と解析に差異  
ダイヤフラムの影響

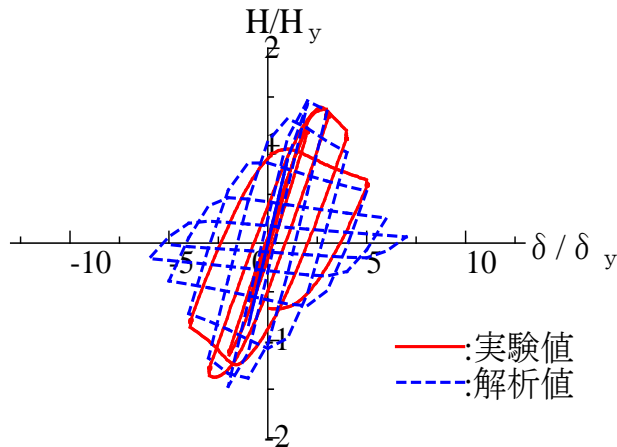


PCS692-35

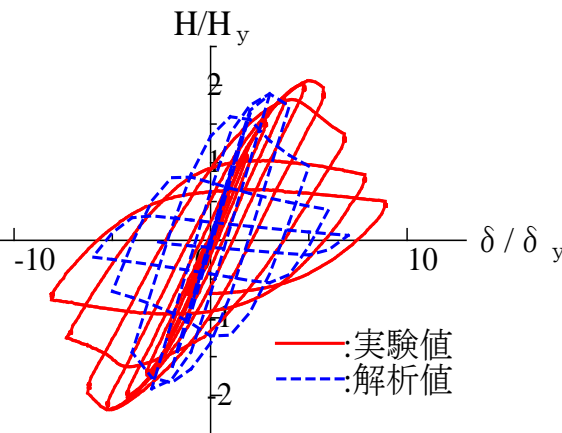


十字型補剛壁  
(PCS692-35)

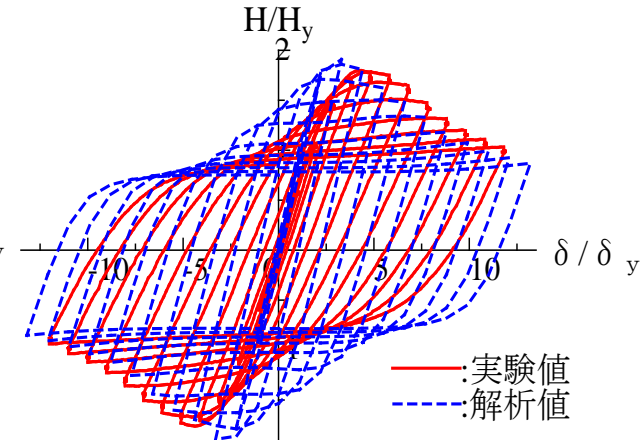
# 荷重変位履歴曲線の比較



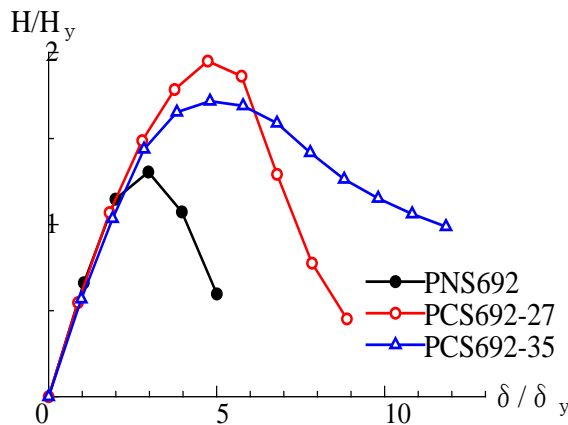
PNS692



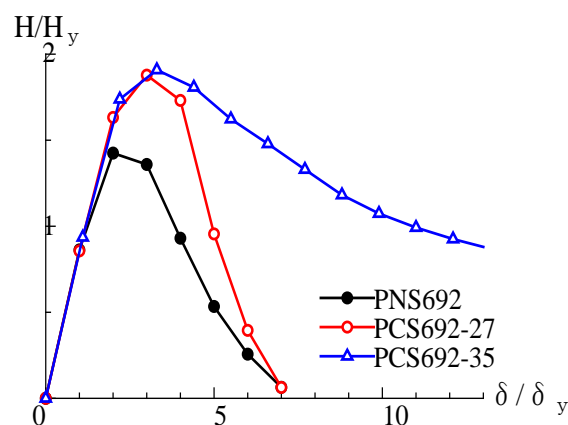
PCS692-27



PCS692-35



包絡線 - 実験値



包絡線 - 解析値

$R_t=0.15$	载荷実験	FEM解析
	$H_{max}/H_y$	$H_{max}/H_y$
PNS692	1.31	1.35
PCS692-27	2.06	1.78
PCS692-35	1.72	1.81

包絡線 - 最大強



# 博士論文

内山 義博「精度向上を目指した有限要素法解析手法  
の開発とその応用に関する研究」(2002)

原田 秀則「軸力変動を考慮したM- $\phi$  復元力モデルと相関強度  
曲線を用いた補剛箱形断面部材の非線形動的解析法に  
関する研究」(2008)

松村 新也「十字型補剛壁を有する鋼製橋脚の繰返し挙動特性  
と耐震性能に関する基礎的研究」(2004)

王 占飛「十字型補剛壁を有する鋼製橋脚の耐震性  
能照査法の検討」(2007) 中国

【2007～2014】

## ⑥折り曲げ片持ちのせん断構造体の開発

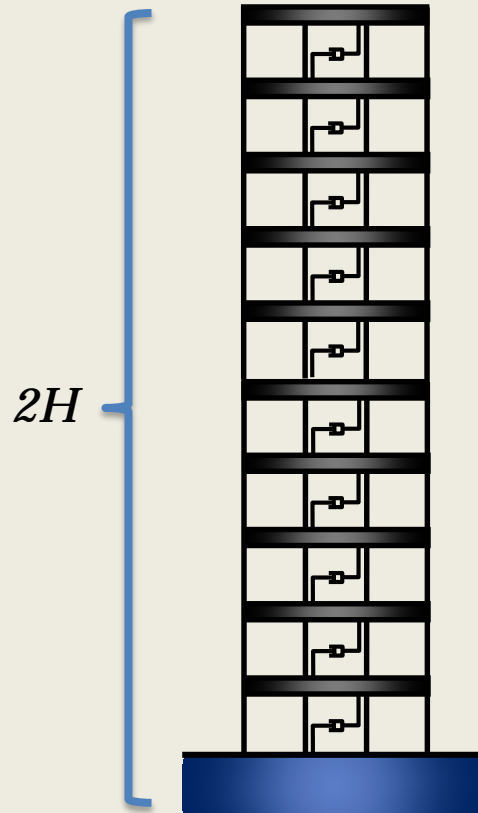
- 片山拓郎先生との共同研究
- 固定した部分構造と完全免震の可動構造
- 一つの構造で基部の免震と合成手法を組み合わせた折り曲げ構造体

## ⑦橋梁の免震支承の開発や制振（減衰）装置の開発

- 磁粉体を用いた制震装置開発（平井先生）
- 新ダンパー開発（片山先生）
- 特許取得

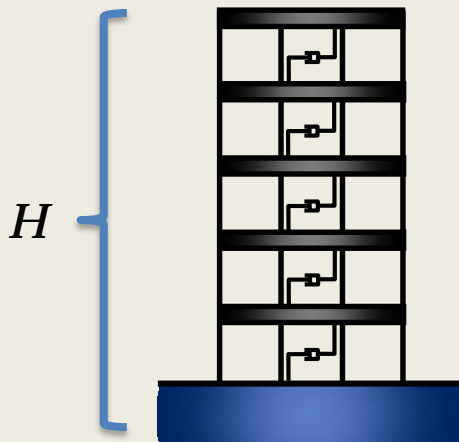
# 折り曲げ片持ちのせん断構造体

$2n$  stories  
natural period,  $2T$



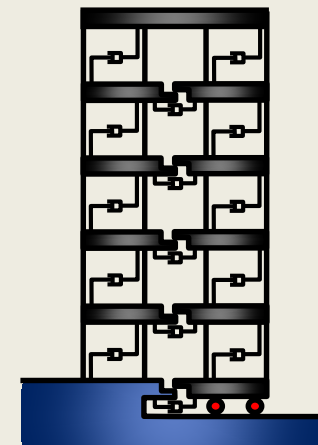
OCSS

$n$  stories  
natural period,  $T$



OCSS

$n$  stories  
natural period,  $2T$



FCSS

## 博士論文

Ercan Serif KAYA(2013) トルコ

**Seismic Performance Investigation of the Folded Cantilever Shear Structure Which Consists of Fixed and Movable Sub-Frames**

Ming Narto Wijaya(2014) インドネシア

**Seismic Performance of the Folded Cantilever Shear Structure with Fixed-Movable-Fixed Sub-Frames**

廣田 武聖「面が威力を受ける逆L形鋼製橋脚のコンクリート  
充填率の提案」(2005)

上月 裕「ライフサイクルマネージメントに基づいた木歩道橋  
の研究」(2007)

## 特許の取得

- 発明の名称：振動減衰装置  
登録番号／登録日：  
特許第5286487号／2013/6/1  
発明者：山尾敏孝、片山拓朗、東康二  
(米国と中国でも特許取得)
- 発明の名称：耐震性構造物  
登録番号／登録日：  
特許第5339406号／2013/8/16  
発明者：山尾敏孝、片山拓朗、岡林拓也

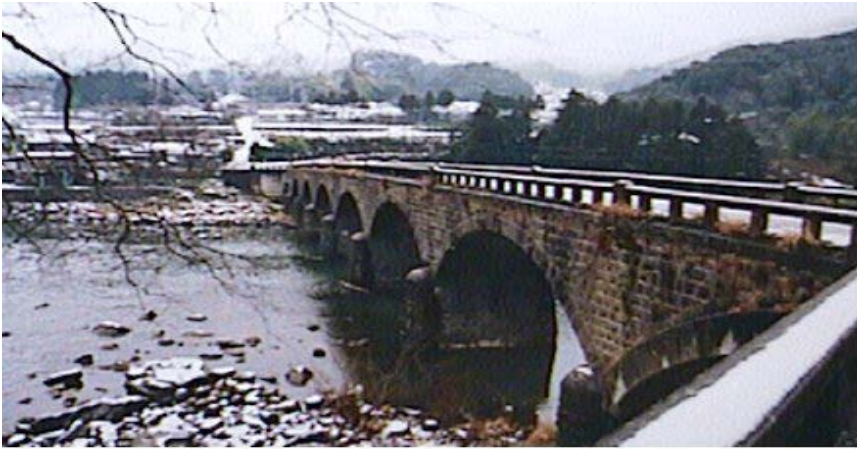


【1994～2007】

## ⑧近代化土木遺産の評価と保存活用

- ・江戸時代末期～昭和20年までの土木構造物の現地調査と評価（全国調査の一環）
- ・九州の熊本県，大分家，福岡県，佐賀県，長崎県の土木遺産を現地調査
- ・橋梁，隧道，水門・閘門，堰堤，河川・海岸，建屋
- ・技術，意匠，系譜・地域性で評価

# 土木遺産の例(1)



耶馬溪橋(大分県)



南河内橋(福岡県)



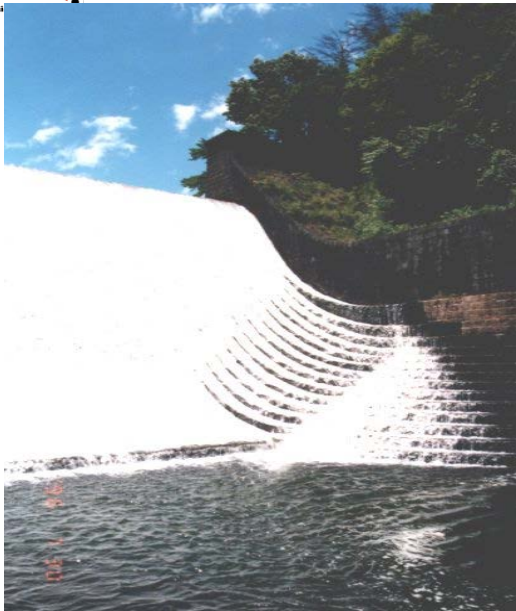
宮田山トンネル(福岡県)



郡築二番樋門(熊本県)



## 土木遺産の例(2)



白水ダム(大分県)



三角西港(熊本県)



白川発電所(熊本県)



筑後川導流堤(福岡県)

【2005～2009】

## ⑨バイオ菌の発熱効果を用いた鋼床版表面部の結露凍結防止

- ・ 松岡正裕氏からベンチャー企業紹介
- ・ 低温で発熱するバイオ菌の利用
- ・ 山田文彦先生から解析支援

古賀 淳(卒論2006, 修論2008)

【本論文を発表した国際学会でHighly Commendable Paper Award 受賞】

田上 剛(2008), 重松映輝(2009)

# 実験概要

## ケース1. 鋼板付き箱型模型

野外(日なた)で測定

## ケース2. 鋼板付き箱型模型

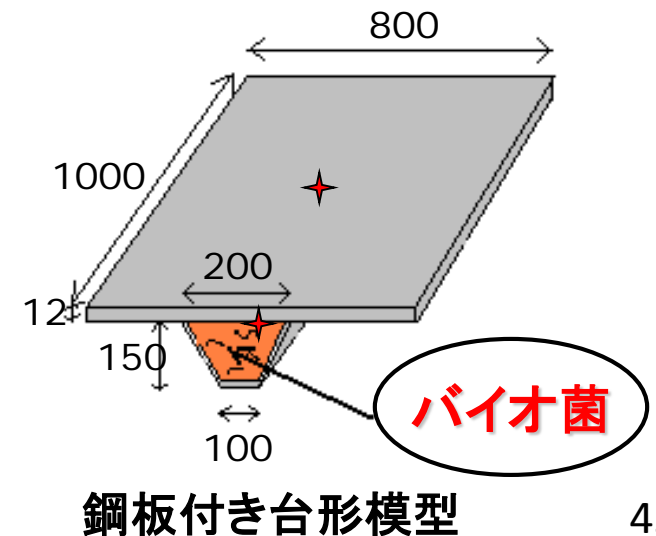
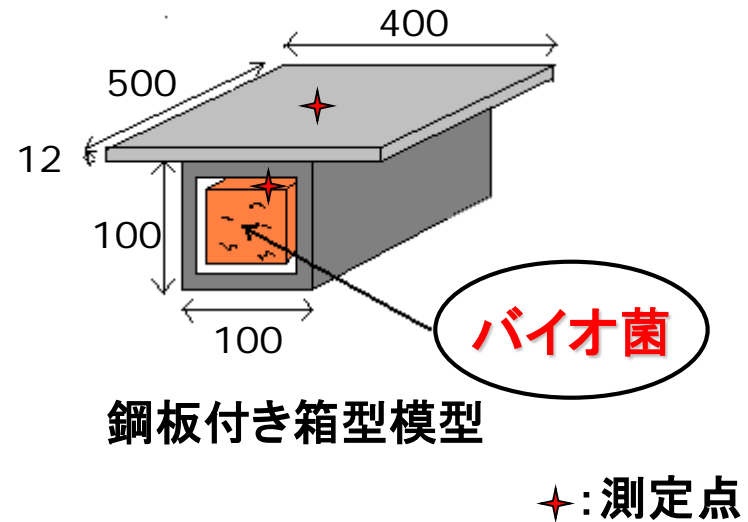
室内(冷蔵庫)で測定

(ケース1との比較: 空気の循環の有無)

## ケース3. 鋼板付き台形模型

野外(日なた)で測定

(ケース1との比較: バイオ菌の使用量の違い)





【2007～2015】

## ②ラーメン，アーチ橋の連成座屈挙動解析（継続）

- ・ 留学生の研究
- ・ ABAQUSを用いた静的・動的解析の実施
- ・ 一つの構造で基部の免震と合成手法を組み合わせた折り曲げ構造体

## 博士論文

Osama Mohamed 「Performance-based Seismic Design of Upper-deck Steel Arch Bridges」 (2006) エジプト

Sujaritpong Atavit 「 Seismic Behaviors and a Performance Evaluation Method of a Deck-Type Steel」 (2007) タイ

【本論文の一部を発表した国際学会で Highly Commendable Paper Award 2006 受賞】

Evi Nur Cahya 「Seismic Response Behavior Investigation of Half-Through Type Steel Arch Bridges under Strong Earthquake」 (2014) インドネシア

Hamid Afzali 「Behavior investigation of steel rigid frame with brace member」 (2014) イラン

## 博士論文

足立 正和「八角形断面橋脚の終局挙動と簡易解析法の提案」(2003)

濱本 朋久「桁端衝突による道路橋の動的挙動および橋台の抵抗特性に関する基礎的研究」(2014)

Desy Setyowulan「Static and Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Abutments with the Wing Wall」  
(2015) インドネシア

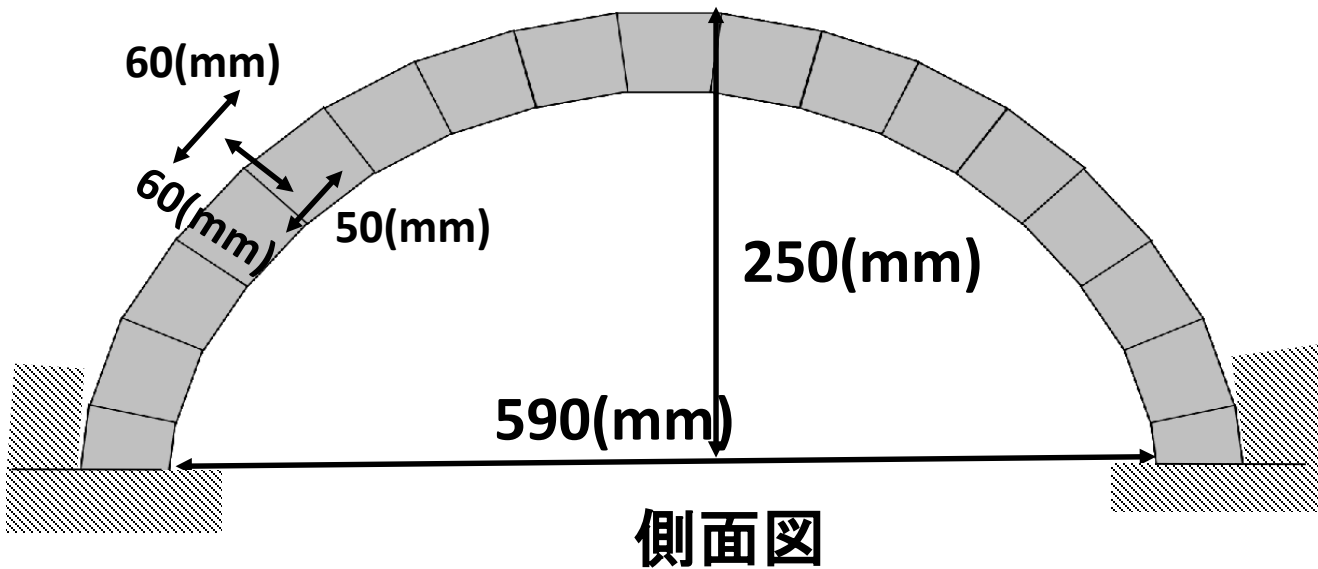
【2006～】

## ⑩石橋の健全度評価と保存活用及び文化財との関わり

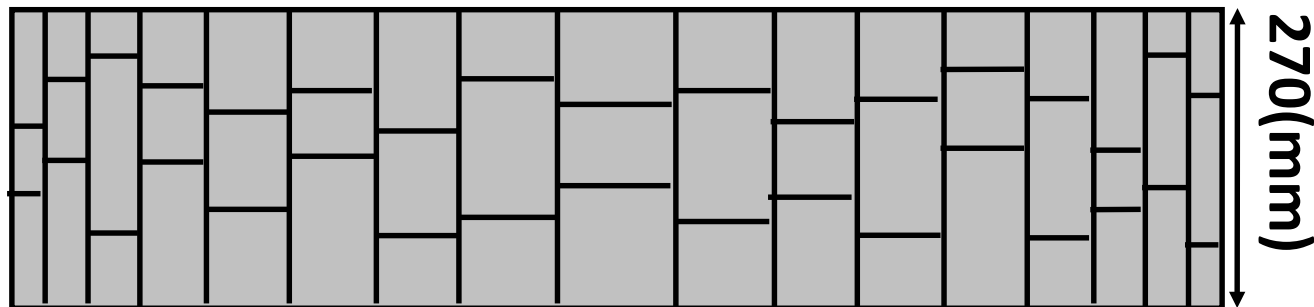
- ・損傷した石橋の健全度を模型実験と解析手法により評価する手法の開発
- ・尾上一哉(尾上建設社長)氏の模型利用
- ・KABSE研究分科会の活動と研究協力

# 3列のアーチ輪石模型実験

## 本邦初！



平面図



新しいアーチ輪石模型 スパンライズ比:0.42<sub>50</sub>

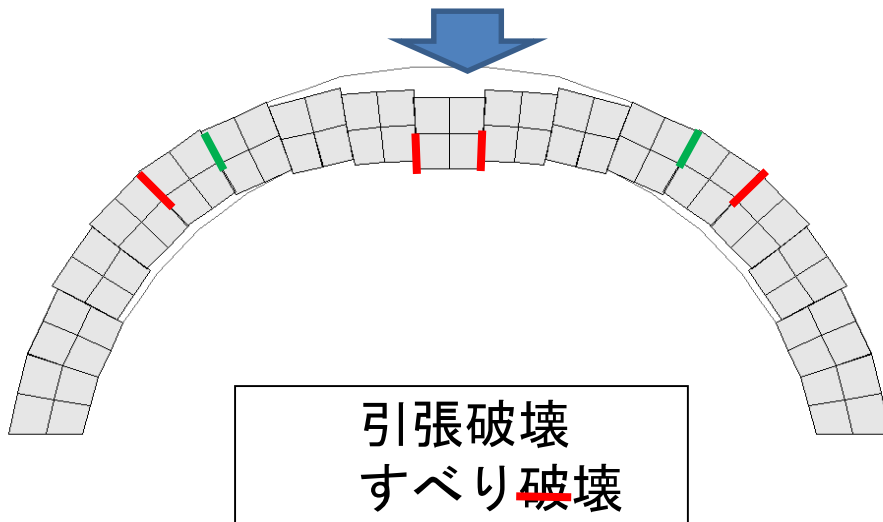


# アーチ輪石の耐力は？

解析： **2500kg**のとき  
1/4径間部4カ所のばねが破壊

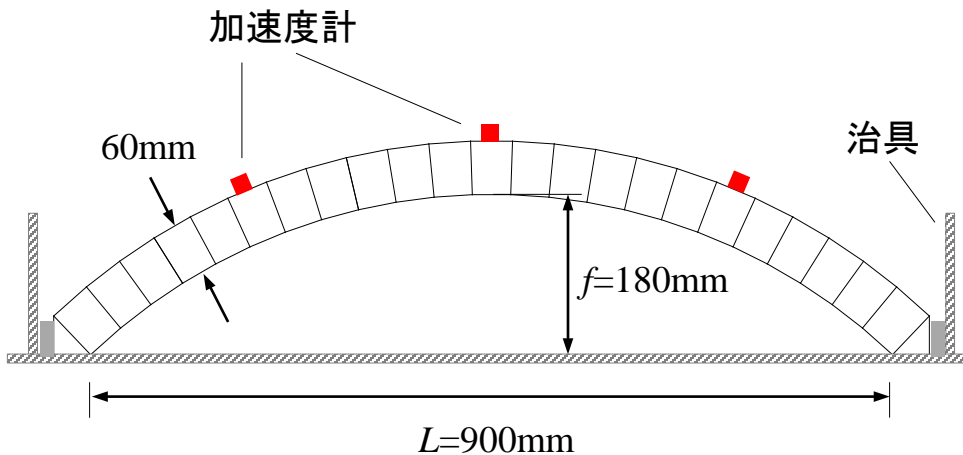
模型実験(崩壊時まで載荷)

**1100kg**:アーチ輪石の崩壊

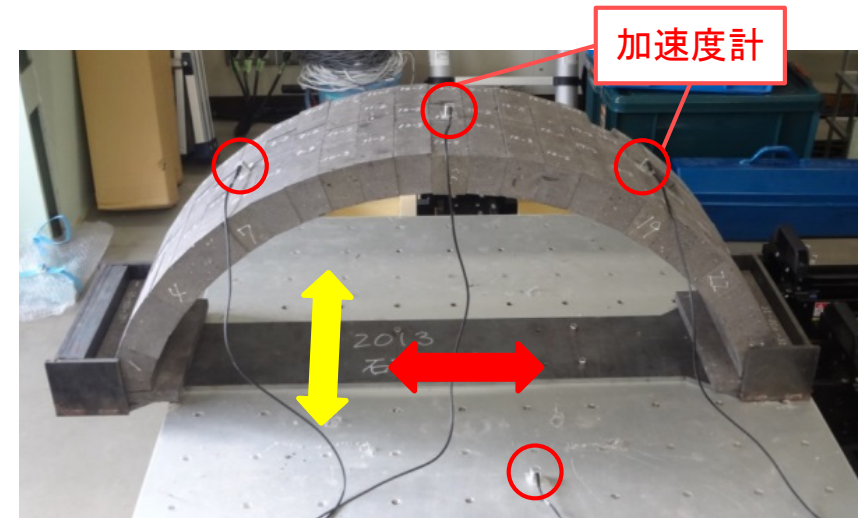


結果：**活荷重の約10倍が崩壊荷重**

# 実験模型概要



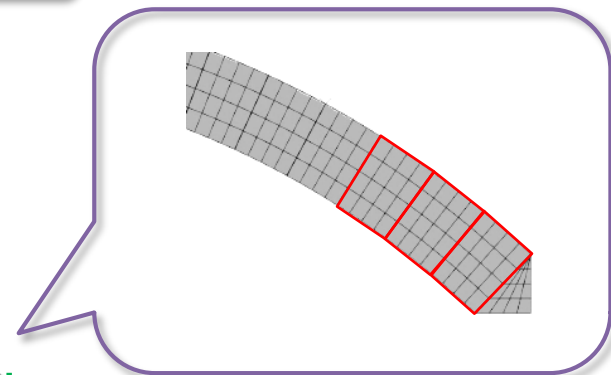
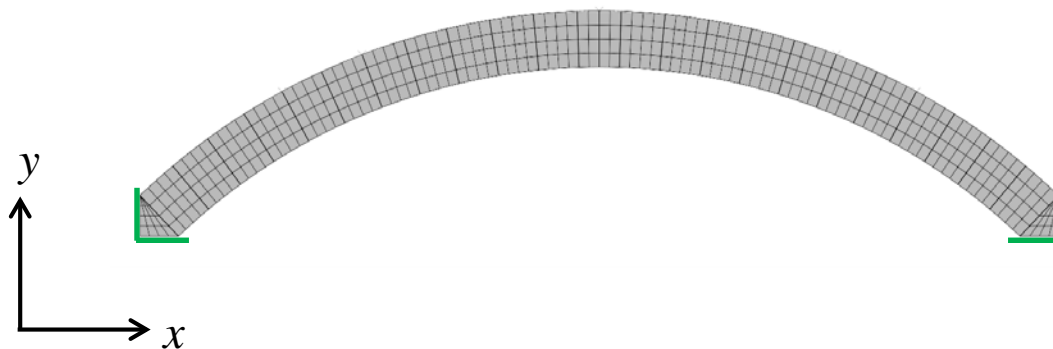
$f/L=0.2$ アーチ輪石模型



石アーチ模型の様子

- 使用石材：阿蘇溶結凝灰岩 (Aso4)
- スパンライズ比：  $f/L=0.2, 0.35$
- 加速度計：  $L/4$ 点,  $L/2$ 点,  $3L/4$ 点と振動台上の4箇所を設置
- 測定方向：アーチ接線方向

## 2次元アーチ輪石モデル



メッシュ分割  
(1石材を4×4分割)

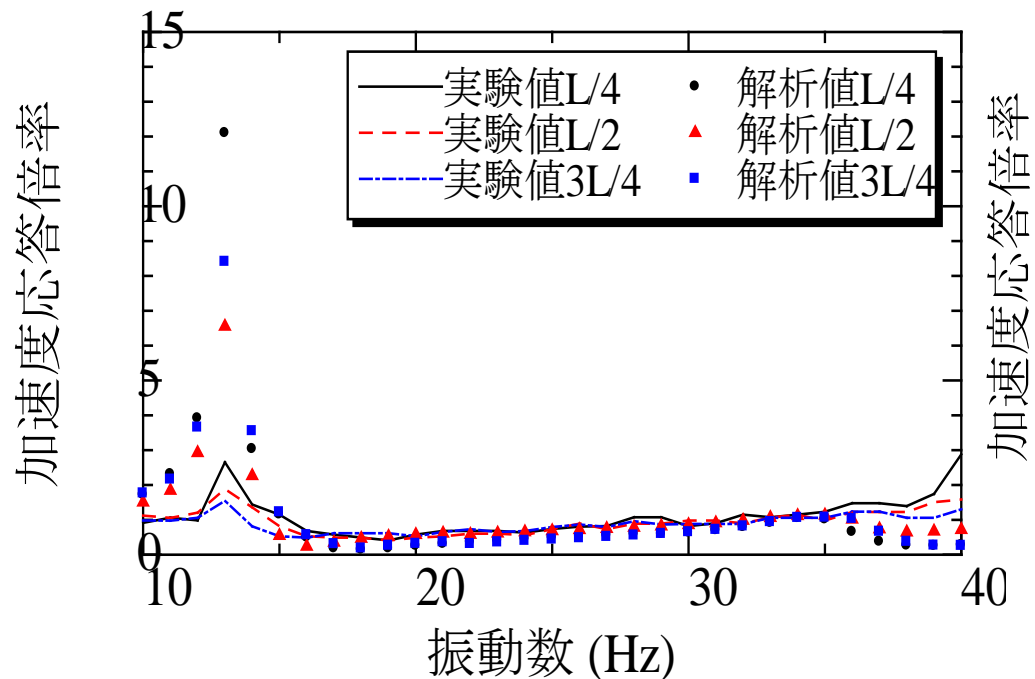
### 2次元動的解析概要

- 汎用解析プログラムABAQUSを使用
- 2次元ソリッド要素表面に**接触・摩擦モデル**を導入した接触解析を実施
- アーチ基部に**剛体要素**を設定し、それを介して外力を入力
- 正弦波, 地震波を**橋軸方向**に入力

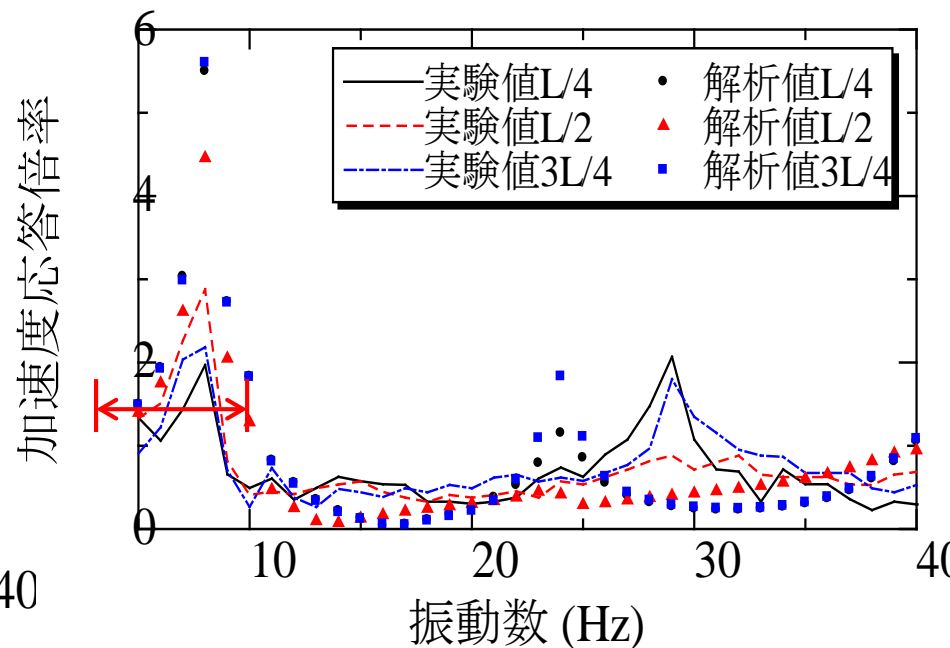
### 解析諸元

ヤング率 $E(\text{N/mm}^2)$	17140
ポアソン比 $\nu$	0.16
密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	1.90, 2.17
静摩擦係数 $\mu$	0.65
すべり発生変位 $U_s(\text{mm})$	0.36

## 共振曲線の比較(橋軸方向)

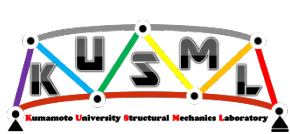


スパンライズ比0.2モデル



スパンライズ比0.35モデル

- 応答倍率に多少差はあるものの、ピークを捉えることができた
- 最初のピークは対応した、2つめのピークにずれが生じた。要検討



## その他の取組み

- 平成10年度～ 4度実施  
カセサート大学での大学院集中講義
- 平成18年度～平成20年度  
特色ある大学教育支援プログラム  
工学教育から発信する大学教育の質保証への取組
- 平成22年度～  
「Japan Steel Bridge Competition」参加  
～鋼製橋梁の製作・架設を通して、  
その強さや美しさを競う大会～



# カセサート大学での講義 記念写真2004.8



# 本取組みについて

教育の質を累積的に向上できるサイクル工学部独自の  
「ポジティブ・フィードバック型の組織的質保証システム」

◎『教育の質保証』という課題に対して、工学部の組織的な教育改善の取組

◎工学部はポジティブ・フィードバック型組織的質保証という教育の質を累積的に向上させる質保証システムを独自に構築

◎熊本大学全体のカリキュラム設計・成績評価の改善を目指し、工学部の教育改善・質保証システムを導入・改善・実施

# 実施事業

## <目標>

各種文書データ保存・蓄積し，活用可能な**文書管理システムの開発**及び文書管理システムのデータ及びSOSEKIの成績データとリンクさせた**工学部独自の質保証システムの構築**

- (1) 学生用eポートフォリオの開発及び学生の学力診断支援システムの開発
- (2) 英語D対応の技術英語習熟システムの開発
- (3) 成績の評価手法や評価項目の内容に関する検討
- (4) 授業の理解度・授業改善アンケートの内容の改善と試行システムの構築

# 特色GP 成果報告書





# ブリコンで製作した橋梁模型



2010年  
名古屋大会

デザインテーマ  
「Kumamoto Fire Bridge」



2011年  
京都大会

デザインテーマ  
「Asommetry Bridge」



2012年  
東京大会

デザインテーマ  
「Aso Dela Bridge」

2013年  
名古屋大会



2014年  
大阪大会



2015年  
熊本大会



2016年  
前橋大会



- 橋梁が好き
- ものづくりや設計に興味がある
- 解析してみたい
- 夏休みを有意義なものにしたい
- 研究室の雰囲気味わってみたい
- 他大学の学生と交流したい. . .

etc

この競技大会と一緒に参加しませんか?!







Atavitさん帰国2007.9



留学生と学生を我家に招待2009.3





Mingさん, Eviさん, Hamidさん

# 熊本地震による主な 石橋の被災状況

- ・ 通潤橋
- ・ 二俣福良渡
- ・ 門前目鑑橋
- ・ 安見下鶴橋
- ・ 銭瓶橋

# 熊本県内の石橋の被災状況

2016年8月15日現在

番号	市町村名	文化財名称	区分	発生日	要因	被害状況
1	天草市	祇園橋	国	H28.4.16	地震	橋路面石材の割れ
2		施無畏橋	県	H28.4.14	地震	アーチ輪石にずれとすき間
3	山都町	通潤橋	国	H28.4.14	地震	通水管の漏水と通水管埋土の亀裂 手摺石(橋上の縁石)の孕み
4		立野橋	町	H28.4.14	地震	壁石垣の一部崩落
5	菊池市	永山橋	県	H28.4.16	地震	路面の隆起、欄干の欠落、損壊
6		立門橋	県	H28.4.16	地震	路面の亀裂、欄干の欠落・損壊、詰め石の崩落、側面のふくらみ、石材の亀裂
7	美里町	霊台橋	国	H28.4.16	地震	路面山砂のひび割れ、基部付近の壁石垣の孕み
8		二俣福良渡	町	H28.4.16	本震	右岸側の壁石垣崩落
9		馬門橋	町	H28.4.16	本震	欄干の転落・破損
10		大窪橋	町	H28.4.16	本震	欄干の転落・破損
11	宇土市	船場橋	市	H28.4.16	本震	欄干の転落・破損、壁石の孕み
12	宇城市	安見下鶴橋	市	H28.4.16	本震	左岸側の壁石垣崩落とアーチ輪石の損傷と大きなすき間、石橋流出
13		誉ヶ丘橋		H28.4.16	本震	壁石垣が一部崩落や孕み、輪石に亀裂
14		須の前橋		H28.4.16	本震	復元下アーチ部分の輪石が崩落
15	御船町	門前川目鑑橋	県	H28.4.16	本震	抑え板と壁石の一部孕み、アーチ輪石のすき間
15		八勢目鑑橋	県	H28.4.14	地震	壁石垣の一部崩落 過去に崩落・修復した場所とほぼ同一箇所
17		下鶴眼鏡橋	町	H28.4.14	地震	欄干の転落・破損
18		銭瓶橋		H28.4.16	地震	壁石がほぼ全域崩落、輪石に亀裂の隙間
19	南阿蘇村	仮屋1号橋		H28.4.16	地震	壁石一部崩落、輪石に隙間、壁石の孕み
20		濁川橋		H28.4.16	地震	輪石に割れが多数、壁石が外側に孕みだし
21	熊本市	明八橋		H28.4.16	地震	欄干の転落・破損

# 震源地と主な被災石橋の位置





# 通潤橋の漏水状況





# 二俣橋(福良渡)の被災(美里町)



下流側の壁石崩壊

壁石垣部が半分層崩. 上流側の壁石垣部に大きな膨らみが有り, これが影響



# 銭瓶橋の被災状況 (南阿蘇村)



# 大学で学んだもの

- ✓ 研究は**解析と実験**が両輪
  - ➡ 実現象から本質をどのように把握するか！
- ✓ **運・鈍・根と出会い**を大切に！
- ✓ 大学の研究は、**学生に支えられている！**
  - ➡ 学生の教育とエンカレッジ
- ✓ **大きな服を着て！**
- ✓ **可能性のある限り挑戦しよう！**

ご清聴誠にありがとうございました