

第5回定期研究会

平成 29 年度 第 5 回 SGST 定期研究会 議事録

日 時：平成 30 年 2 月 16 日(金) 15:00～17:00

場 所：名古屋工業大学 NITechHall (旧講堂)

出席者：伊藤(眞)，岡本(道)，鎌田，日下部，櫻井，菱川，松村，学生【瀧上工業】小畠，後藤，海老澤【名工大】，岡本(利)【橋梁調査会】，加藤(正)，小塙【中日本 H】，川瀬【日中 C】，木下，学生二名【岐阜大】，小枝，萬谷【川田工業】，嶋口，鈴木(森)【愛工大】，谷川【コベルコ科研】，中村【住友理工】西嶋，中野【宇野重工】，鈴木(五)，野月，水谷(明)，山下【名高速】，花輪【日本鉄塔工業】，村瀬，松崎【日車】，松田【中部地整】，水野【ケミカル工事】，山辺【徳倉建設】，渡邊【愛知県】

以上 37 名(敬称略)

1. 高架橋モデルの大型加振実験による橋脚と支承部の地震時終局挙動の解明と予測解析

講演時間：15:00～15:40

講 演 者：後藤芳顯 先生

(名古屋工業大学 プロジェクト教授)

講演内容

以下のように、本研究委員会設置の背景、目的、活動内容、及び成果の報告を受けた。

1995 年の兵庫県南部地震での都市内高架橋への衝撃的な被害を受け、鋼製橋脚で指示された都市内高架橋の耐震設計の高度化の研究を進めてきた。そのうえで、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震を契機とし、下記のような新たな課題が露呈した。

1) 橋脚が終局状態に到達する前のゴム支承部の相次ぐ破壊

2) 南海トラフ巨大地震の強烈な極大想定地震道の公表

これらを受け、極大地震時の高架橋の現実的な崩壊制御設計法の提示をした。

想定外の極大地震動による高架橋の大規模崩壊防止対策としては、設計で無視されている橋脚間の荷重再分配性能向上による全体系のロバスト性を高めることが現実的である。これらを解析するために、高架橋の大型供試体による加振実験を行った。

実験の結果、橋脚間の荷重再分配性能を向上させるためには下記のような対応が重要であることが分かった。

- a) 高架橋が終局状態以降の倒壊挙動を把握する。
- b) 橋脚が終局状態に到達した後も支承部の機能を確保する。
- c) 橋脚の終局状態到達以降のエネルギー吸収能を向上させる。
- d) 橋脚の終局状態到達後の挙動を予測できる解析法を開発する。

2. スーパーコンピュータ「京」を用いた耐震解析法

講演時間：15：40～16：20

講 演 者：野中哲也 先生

(名古屋工業大学 教授)

講演内容

以下のように、本研究委員会設置の背景、目的、活動内容、及び成果の報告を受けた。

通常のコンピュータより計算を 1000 倍速くできるスーパーコンピュータ「京」を用いた解析を行った。「京」を使用するうえで、地震応答解析の基礎理論である地震応答解析の運動方程式（連立 1 次方程式）を如何に早く解くかが重要である。

超大規模トラス橋モデルの静的解析では DDM 法を用いて解析を行った。超大規模モデル実行のためのポイントを以下に列挙する。

①「京」上での並列化効率の向上のため DDM を採用（行列演算も並列化）

→本解析では 868 ノードを使用 ⇒ 並列数 : $6944 = 868 \times 8$

②超大規模モデルの作成

→変換プログラムを用いてファイバーモデルからシェルモデルへ変換

③膨大な解析結果の処理

→1800 万節点の解析結果を表示するため別途表示プログラム（暫定版）を使用

高架橋モデルの地震応答解析では高架橋へ DDM を適用し解析を行った。長さ 20 km (2 径間の高架橋の数 : 156 橋、3 径間の高架橋の数 : 80 橋) の高架橋モデルを作成し解析を行った。全体のモデル規模は約 2000 万節点であり、使用した計算ノード数は 1024 であった。

また、広域道路ネットワークの地震応答シミュレーションを行い、解析を行った。

3. ゴム支承の大変形解析の適用

講演時間：16：20～17：00

講 演 者：小畠誠 先生

(名古屋工業大学 教授)

講演内容

以下のように、本研究委員会設置の背景、目的、活動内容、及び成果の報告を受けた。

兵庫県南部地震以降、耐震性向上策として積層ゴム支承が多くの橋梁に採用されてきている。

ゴム支承の要素としては、300 %程度の歪みをうける大変形、繰返し荷重、超弾性、塑性、粘性、変形による材料劣化挙動（Mullins 効果）等があげられるが、すべてを考慮して適切に計算する手法が必要である。また、マクロモデル（ばねモデル）は構造物全体の挙動解析に適用するためには充分であるが、局所的な支承の限界挙動についての議論には適用できないうえ、ゴム材料そのものの特性を考慮したモデルの構築が必要である。

上記で挙げたものに対して下記のモデルや表現を適用した。

- ・大変形の記述としては、変形勾配テンソル F を直交テンソル R と対称テンソル U に分解し、さらに歪みテンソル E は U の関数として定義。
- ・超弾性とは応力と歪みの関係が歪みエネルギー関数によって関係づけられるものである。ゴムの超弾性では Mooney 型（ C の不变量の多項式で表現）または Ogden 型（ U の固有値のべき乗式で表現）による。
- ・ゴムの塑性部分についてはミゼスの降伏条件、流れ理論、移動硬化則+等方硬化則による。
- ・増分型応力歪み関係の問題に対しては Jaumann 変化率及び弾塑性材料の増分型応力歪みの関係式へ Green-Naghdi 変化率を導入し、さらに Rivlin の恒等式を用いて U の微分を解く。
- ・ゴム材料の変形による劣化に対しては Ogden-Roxburgh の関係式へ損傷局面を導入する。

上記で提案したモデルを用いて、 $130 \times 130 \text{ mm}$ および $120 \times 120 \text{ mm}$ の積層ゴム支承をモデルとした数値計算を行った。このモデルでは、材料定数の決定、一軸の繰返し（損傷曲面がある場合とない場合）および 2 方法載荷で数値の解析を行った。

以上

高架橋モデルの大型加振実験（Phase I, II）による
橋脚と支承部の地震時終局挙動の解明と予測解析

名古屋工業大学 次世代耐震工学研究所
後藤 芳穎

（内閣府）

（内閣府）

鋼製橋脚で支持された都市内高架橋の耐震設計の
高度化の流れ(名工大 1995～)

・鋼製橋脚とCFT橋脚単柱の
終局・崩壊挙動の解明
(1998～2012)

・高架橋システムの終局・崩壊挙動の解明
(橋脚、支承、上部構造の相互作用)
(1998～2008)

・ゴム支承の終局・破壊挙動の解明
(2009, 2010, 2012)

・ゴム支承の終局・破壊挙動の解明
(2012～)

1995兵庫県南部地震での都市内高架橋の衝撃的な被害

（内閣府）

（内閣府）

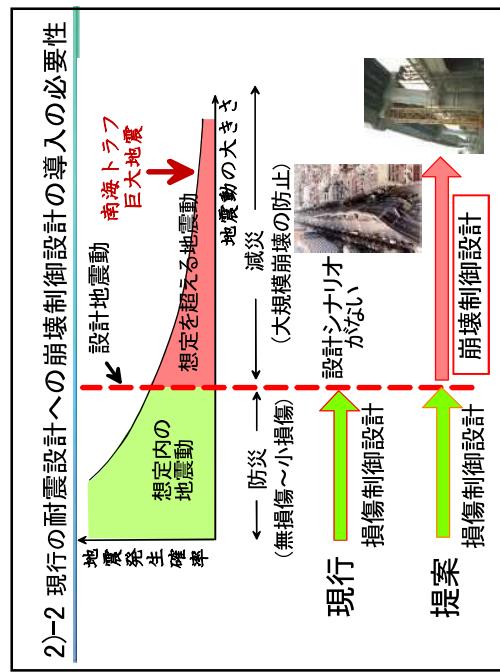
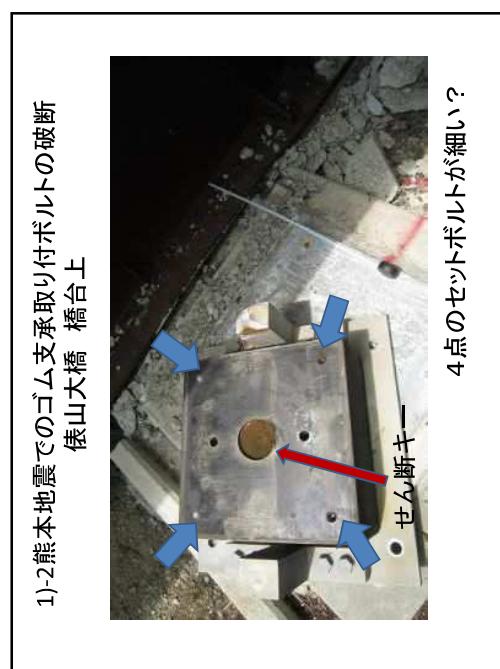
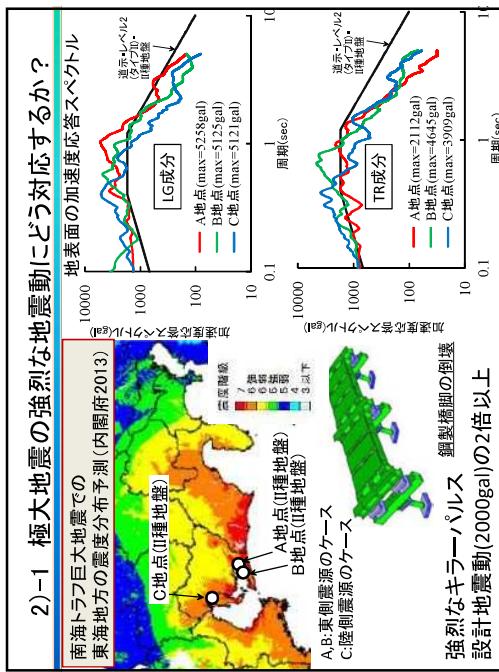
東北地方太平洋沖地震の発生(2012)を契機とした
新たな課題

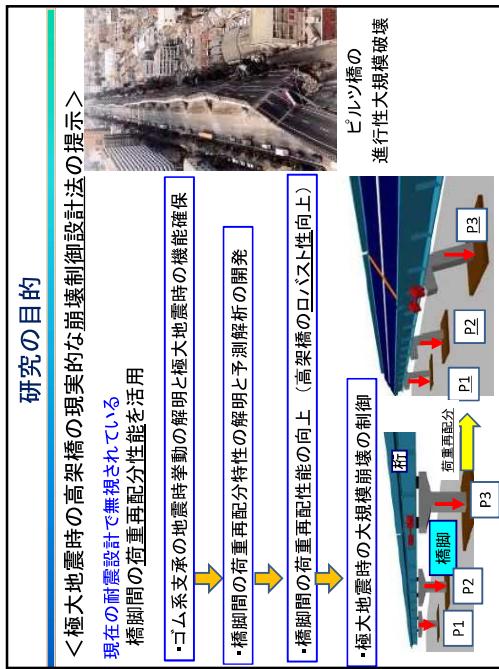
1) 橋脚が終局状態に到達前の相次ぐゴム系支承部の破壊
(東北地方太平洋沖地震2012, 熊本地震2015)

・免振設計・荷重分散設計のシナリオ破綻の恐れ.
・支承部の破壊原因の解明と防止対策

2) 南海トラフ巨大地震の強烈な極大想定地震動の公表
(内閣府2013)

・高架橋の大規模崩壊の恐れ.
・大規模崩壊挙動の解明と防止対策





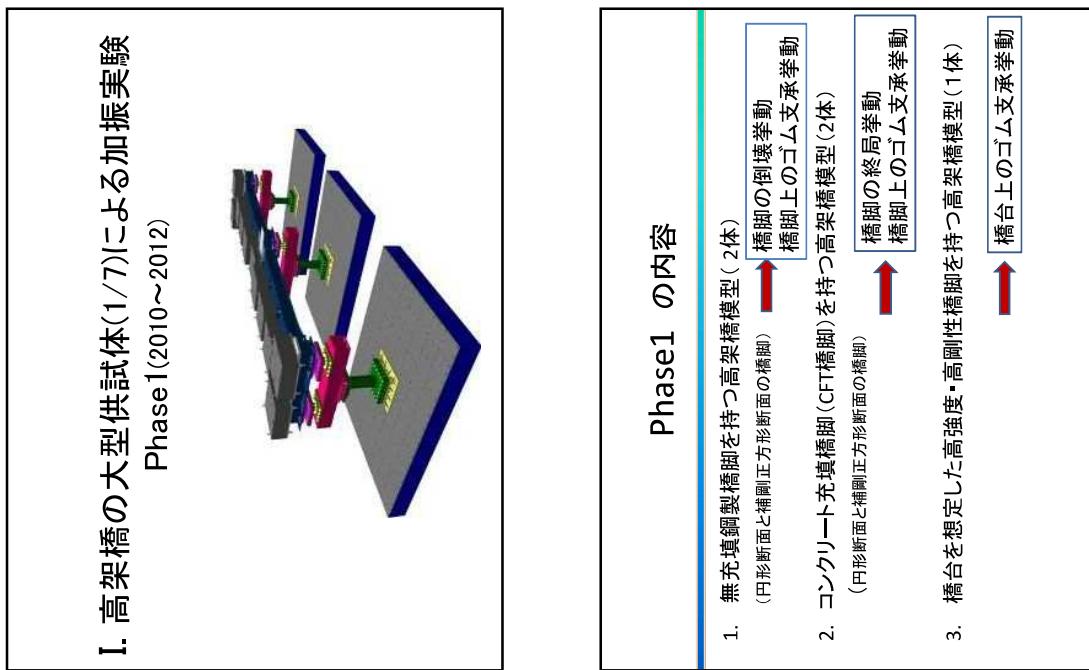
本日の話題

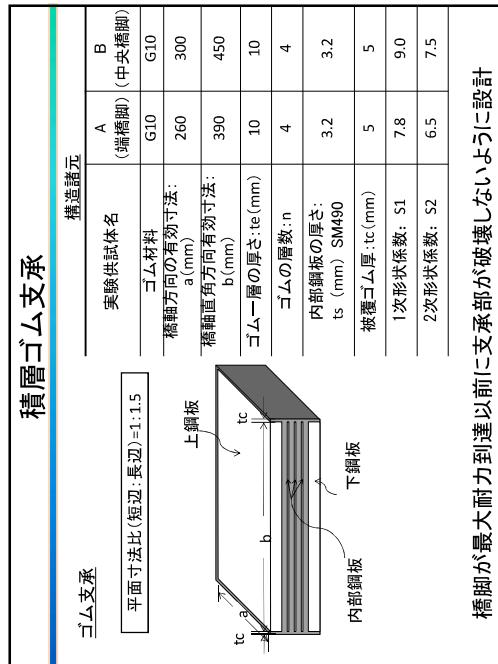
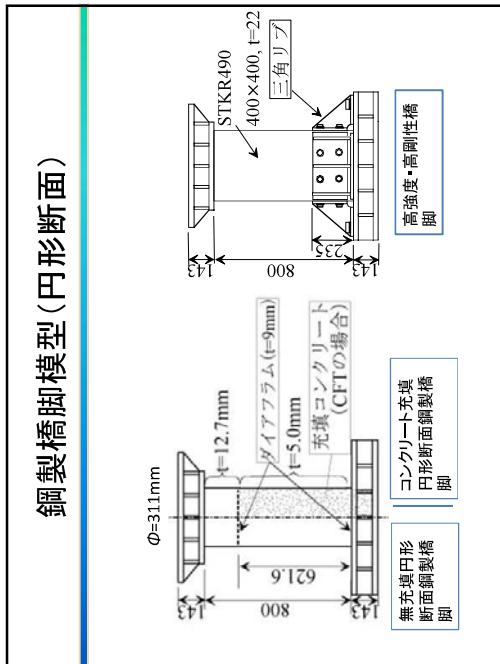
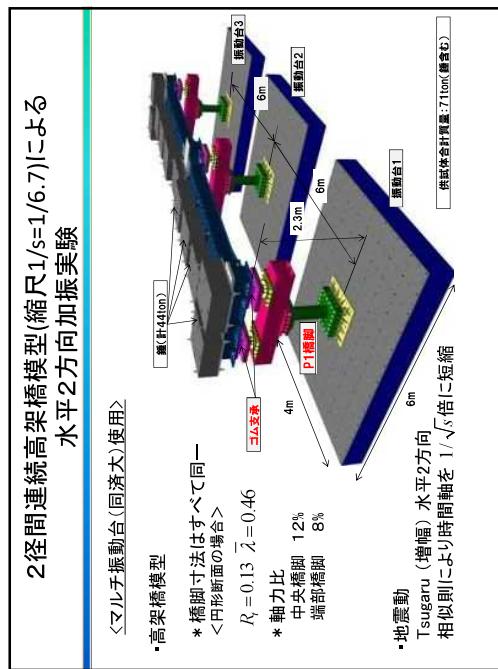
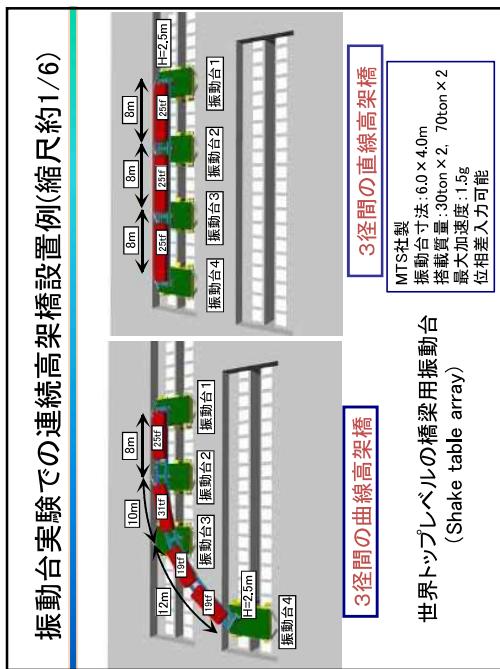
高架橋の大型加振実験 Phase I, II による検討

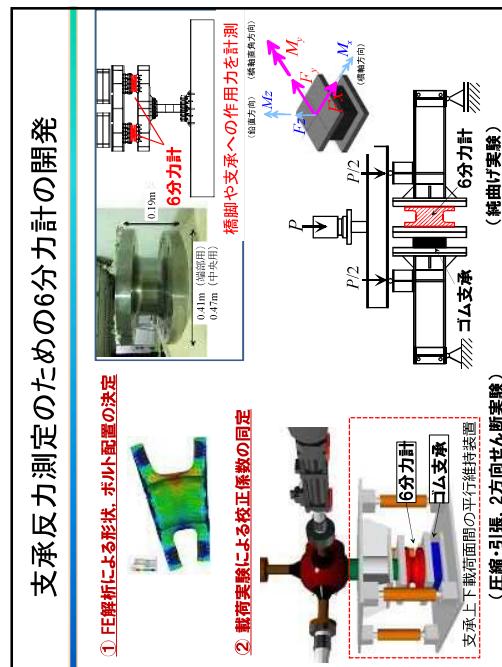
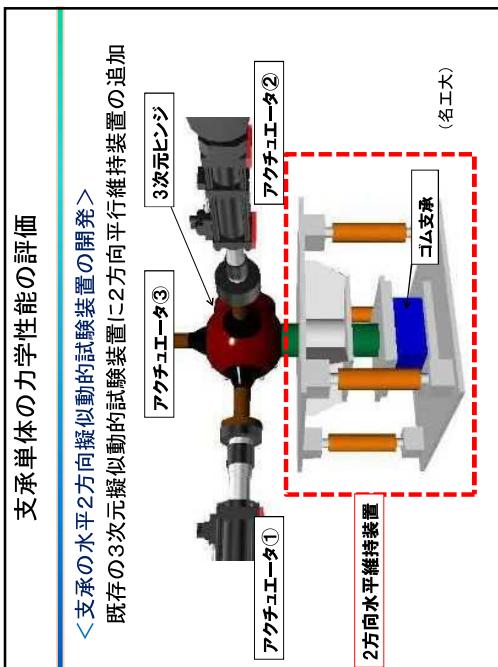
Phase1 (2013～2014)
Phase2 (2016～2017) 速報

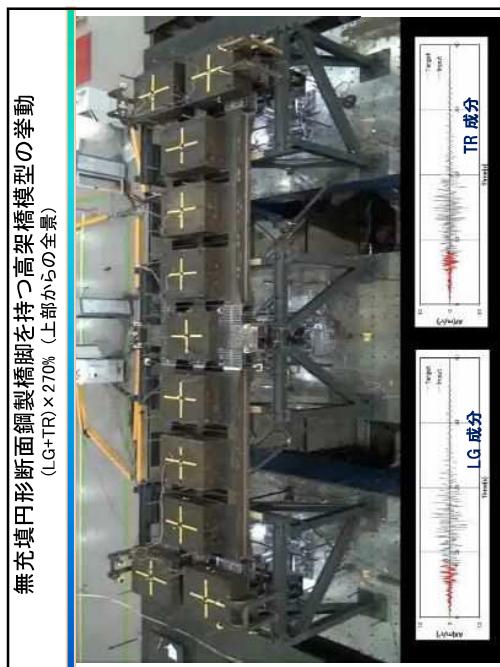
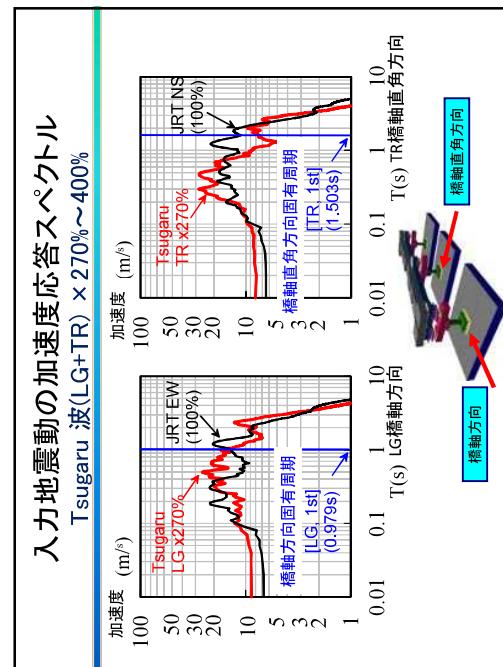
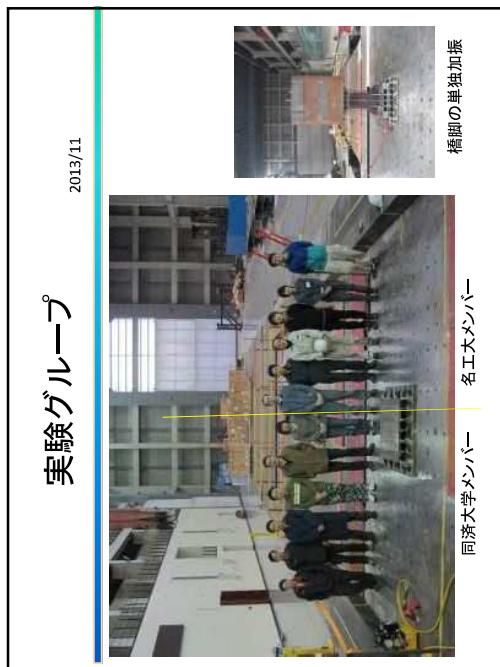
<検討内容>

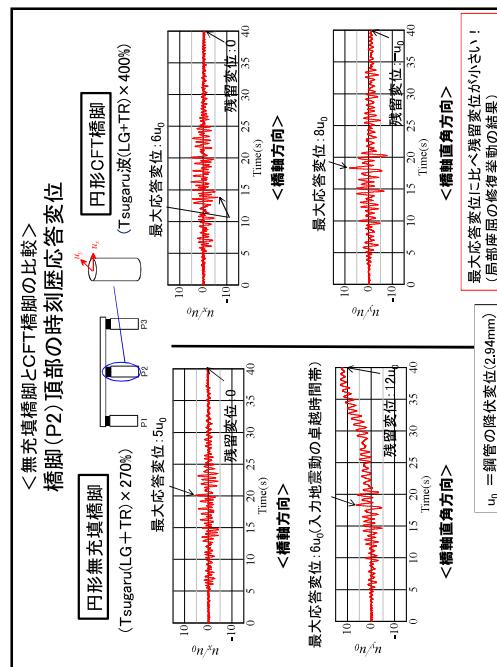
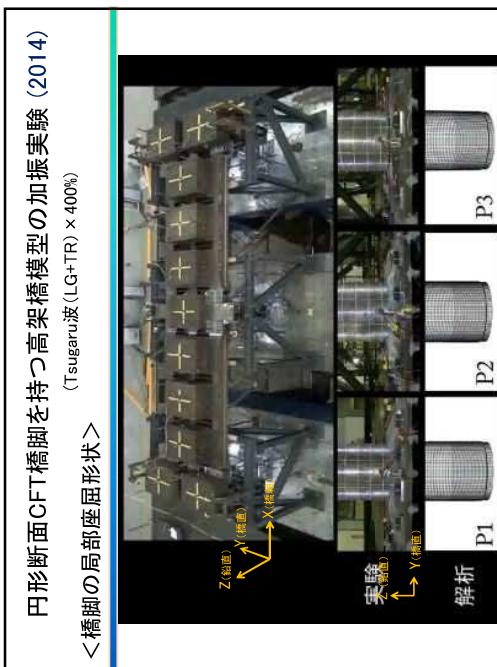
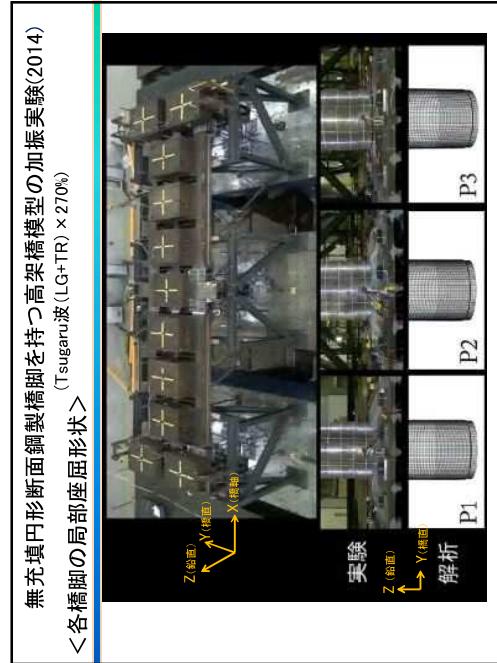
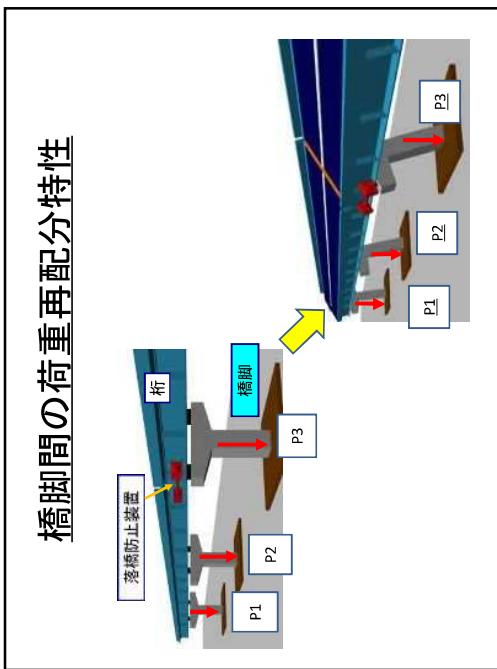
1. 橋脚+ゴム支承+析の相互作用と橋脚間の荷重再配分特性
2. 倒壊までの橋脚間の荷重再配分挙動の解析
3. 橋台を想定した高強度・高剛性橋脚を持つ高架橋模型（1体）

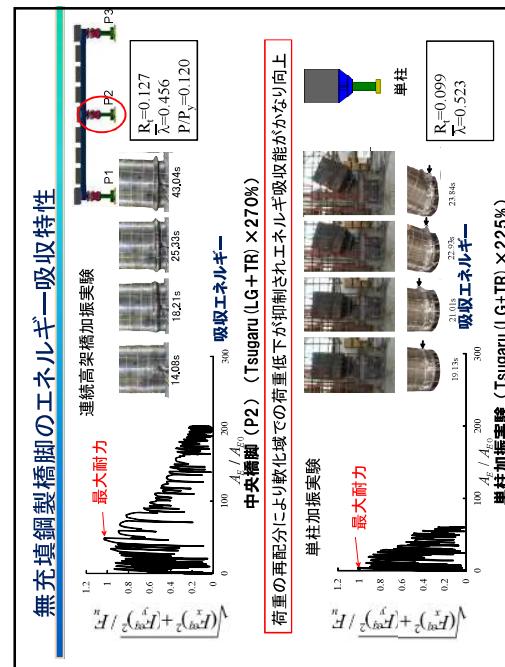
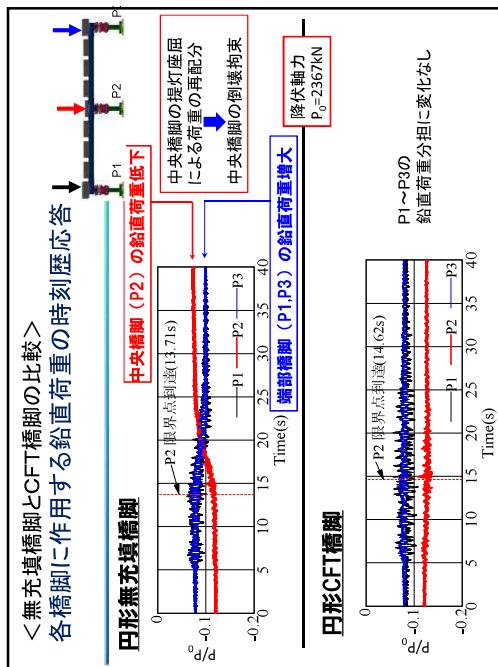
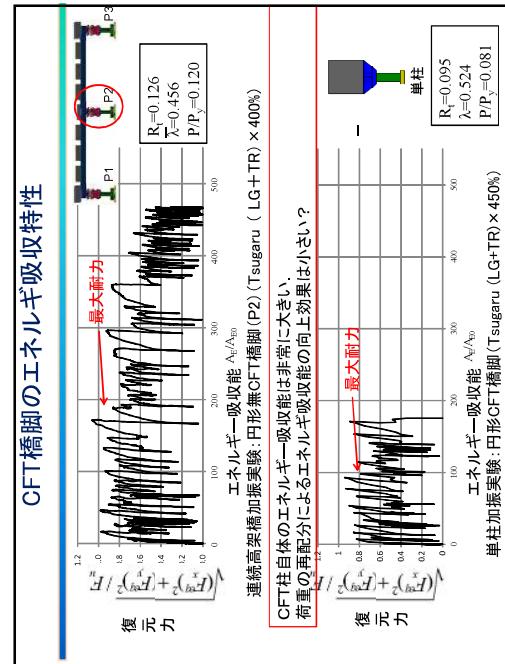
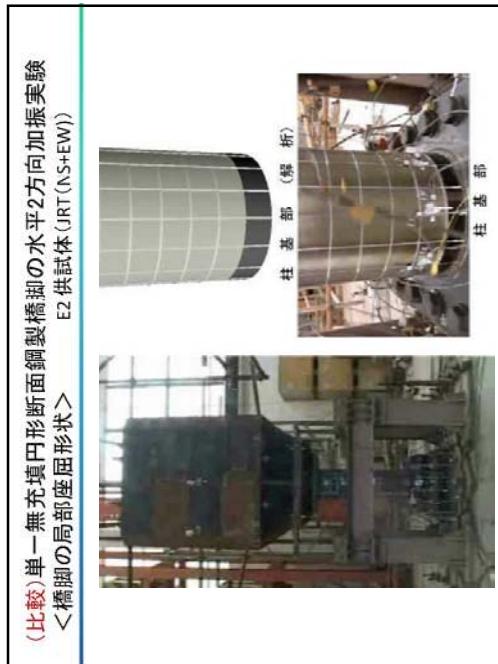


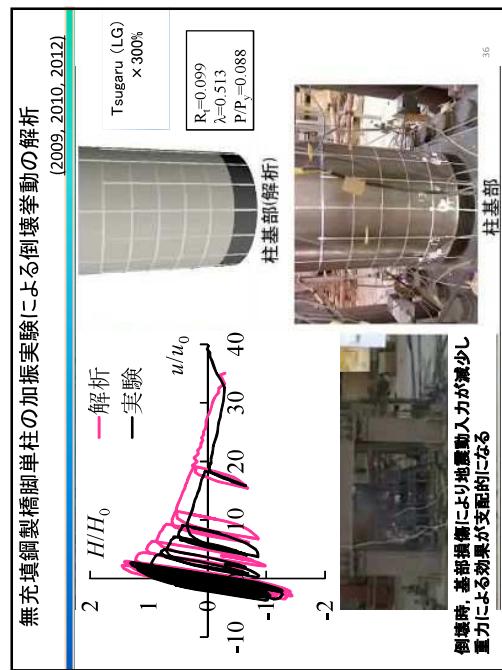
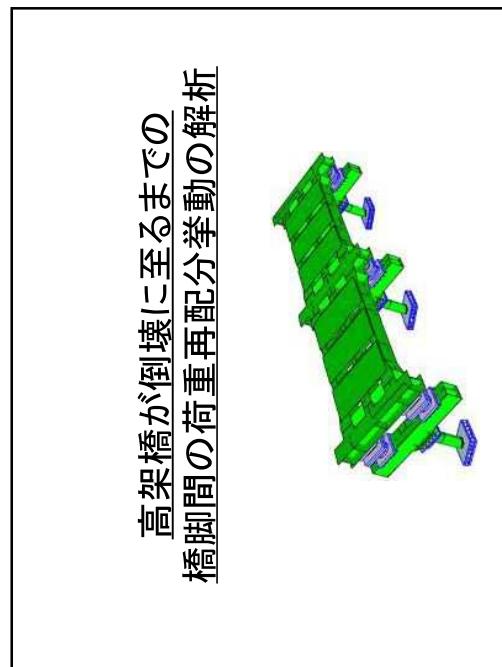
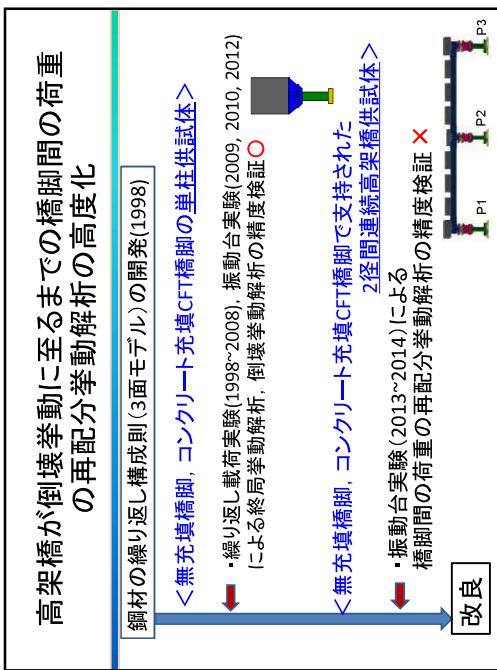


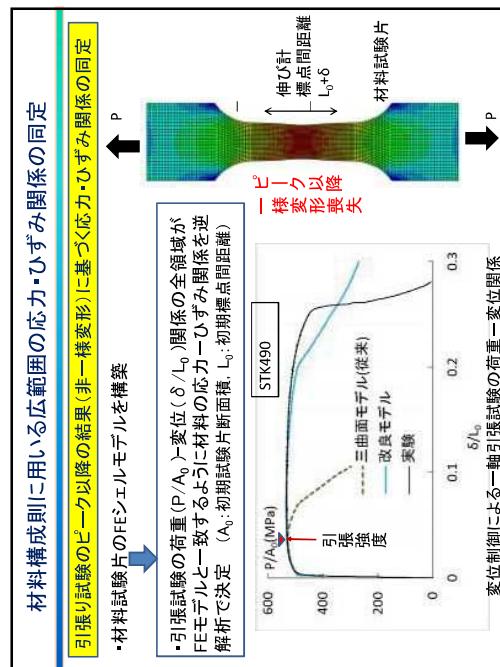
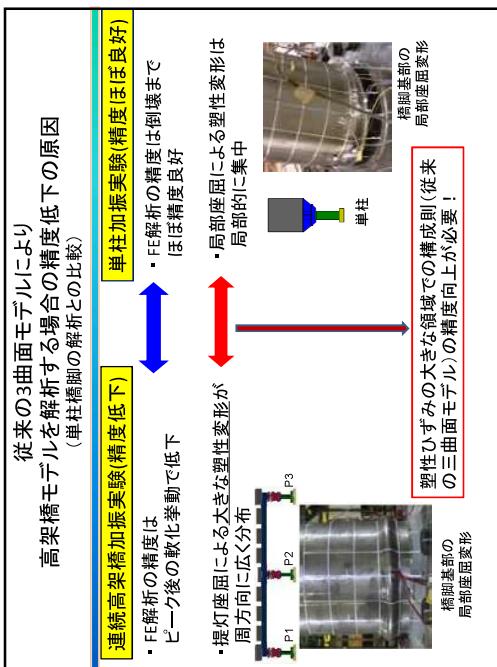
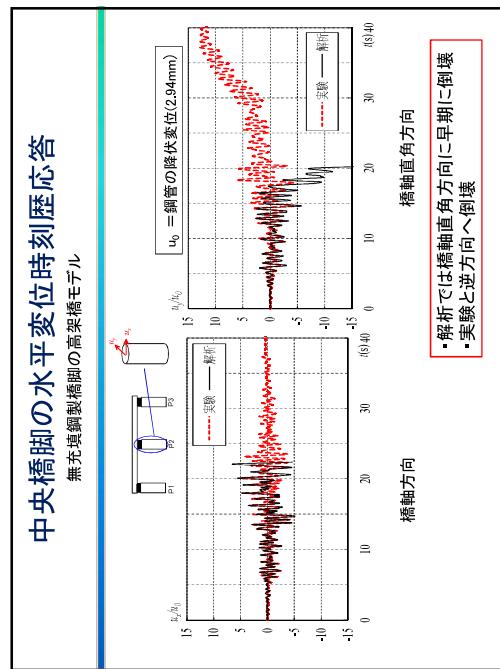
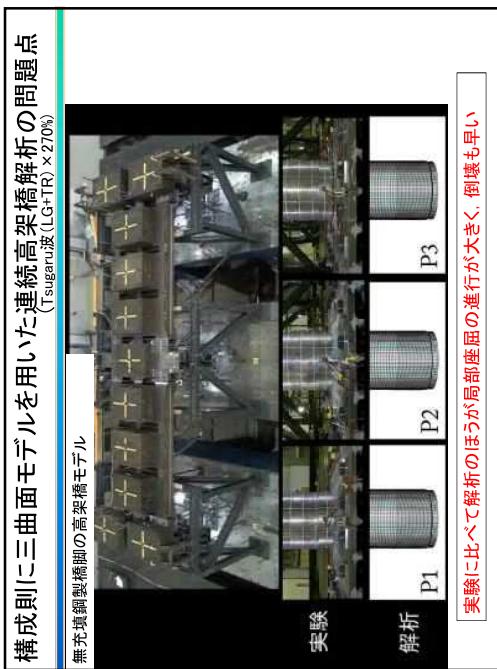


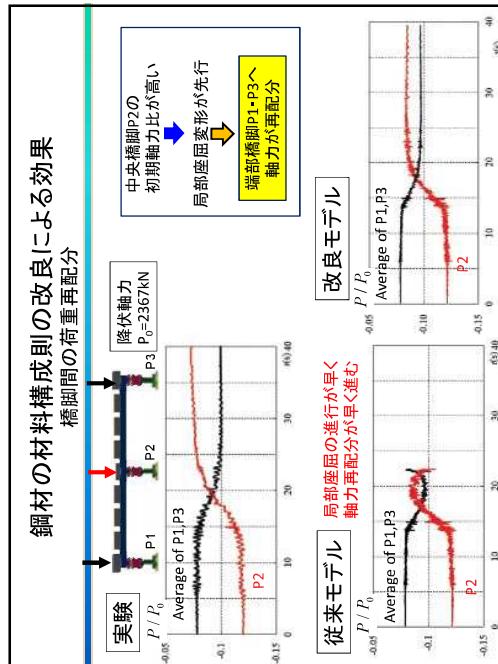
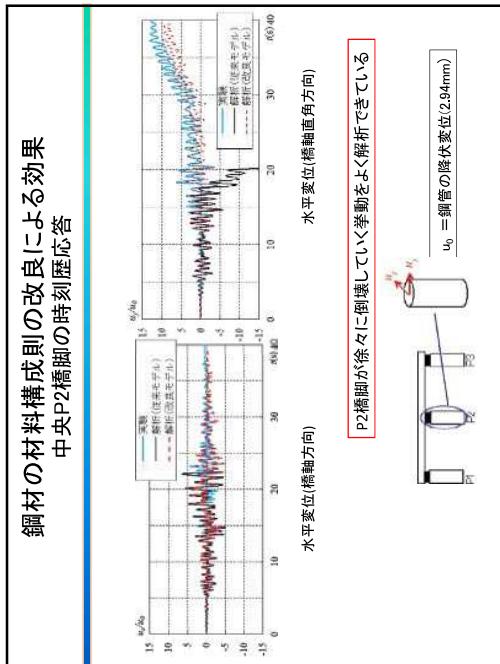
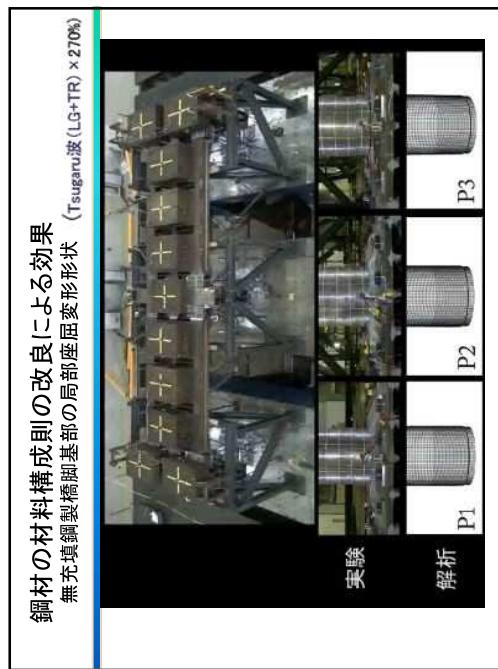
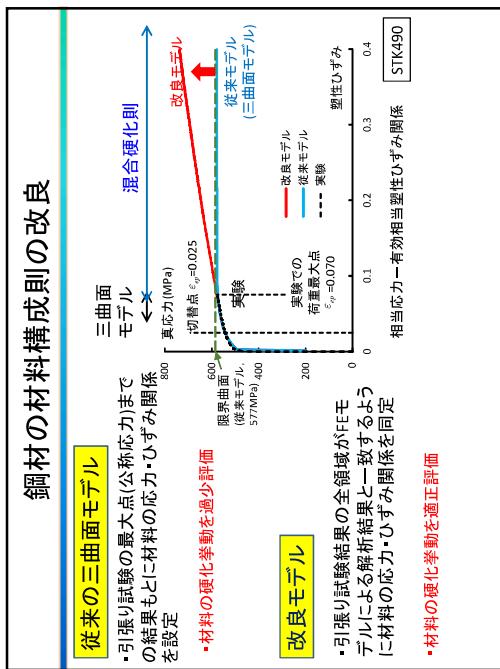


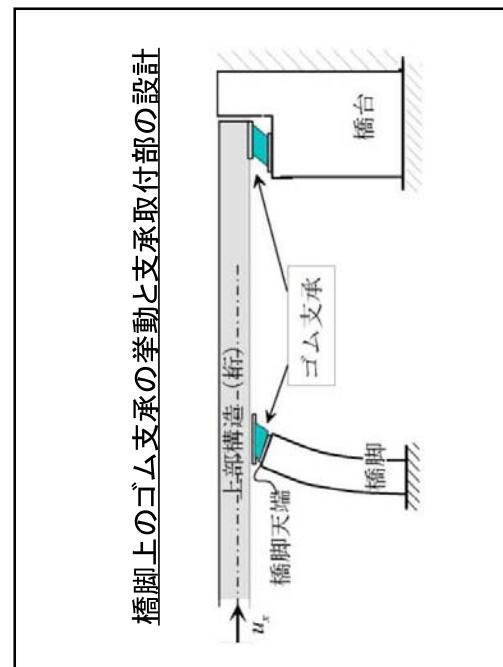
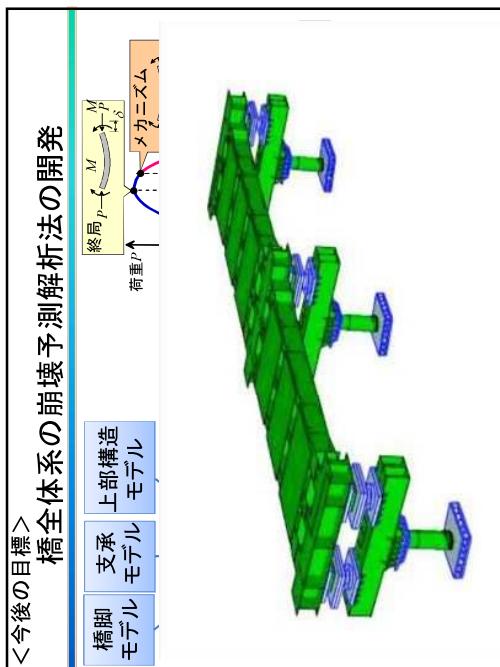
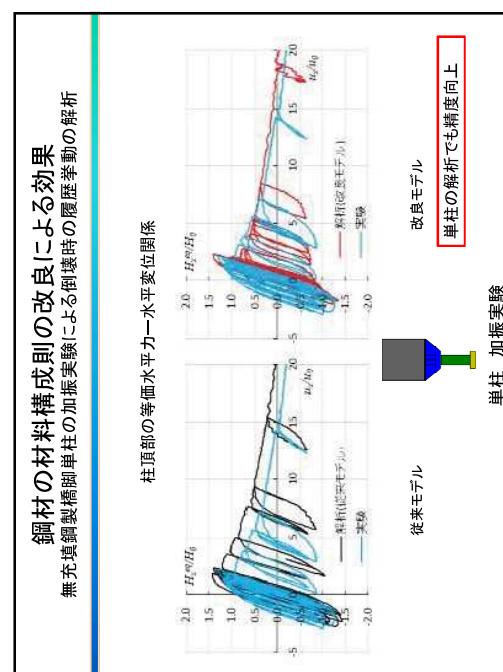
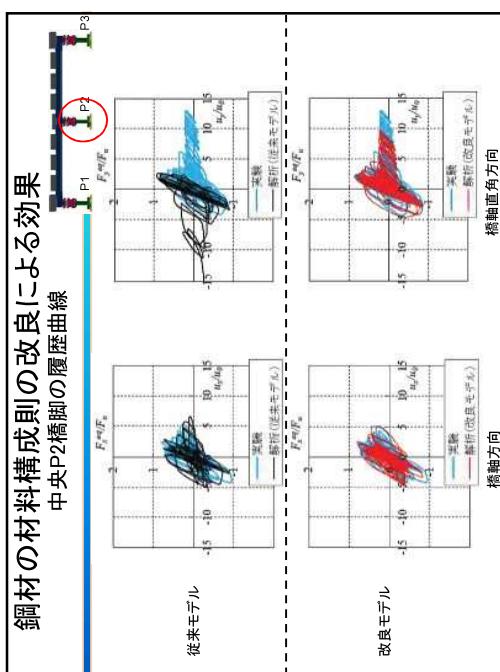


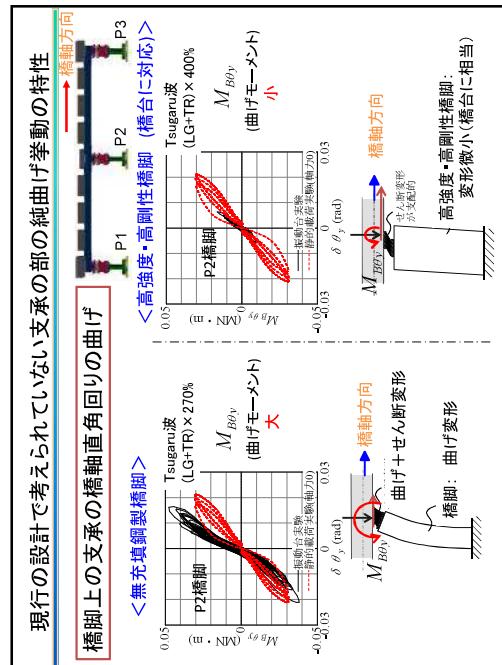
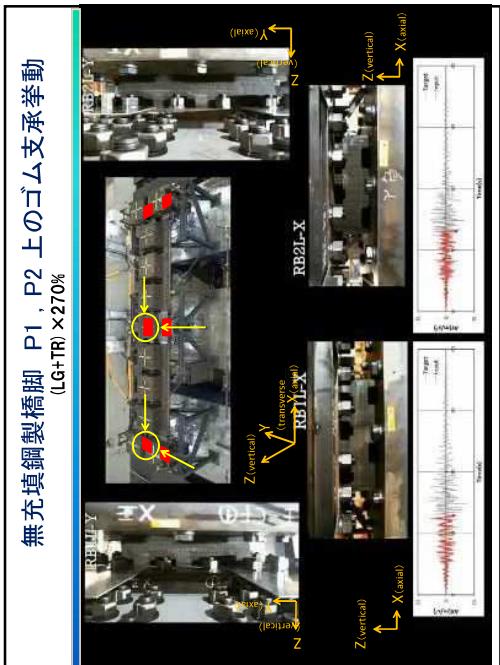
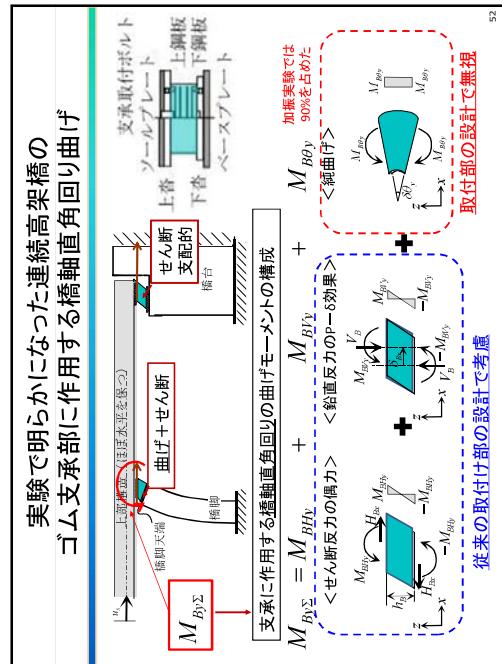
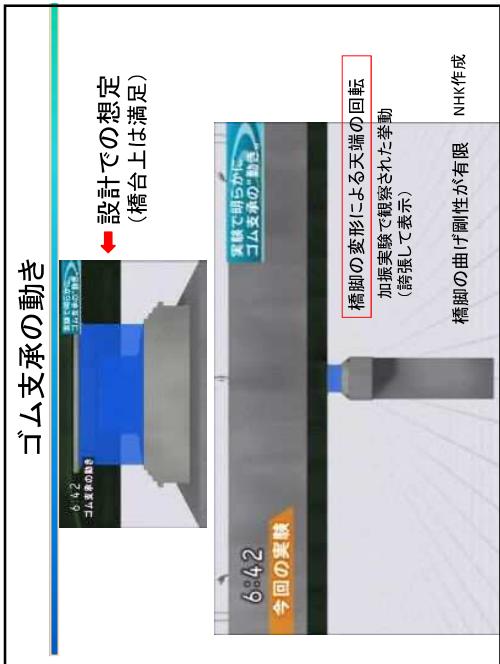










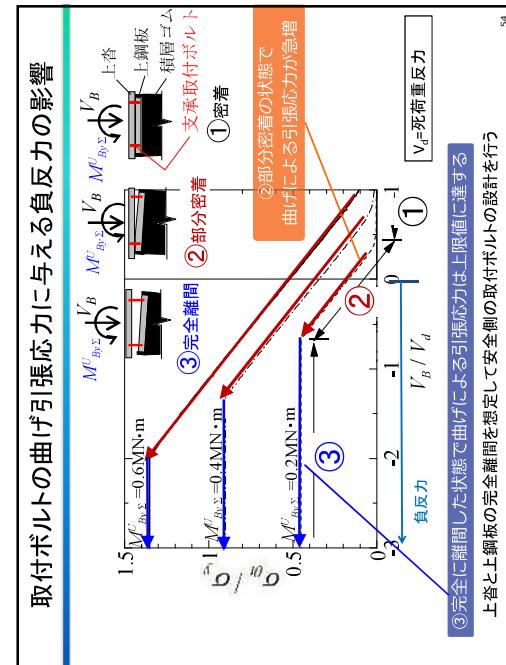
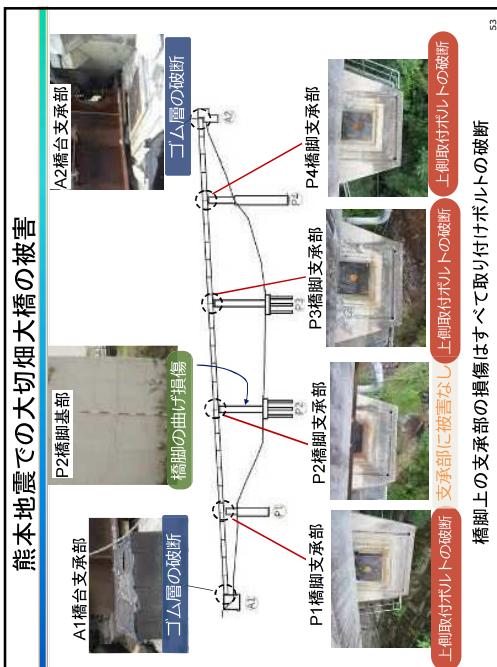


結びび

- 想定外の極大地震動による高架橋の橋脚間の荷重再配分性能向上による全体系設計で無視されている橋脚間の荷重再配分性能向上による全体系のロバスト性を高めることが現実的である。
- 橋脚間の荷重再配分性能を向上するには?
 - 高架橋の終局状態以降の倒壊挙動の把握
 - 橋脚が終局状態に到達後も支承部の機能を確保
 - 橋脚の終局状態到達以後のエネルギー吸収能向上
 - 橋脚の終局状態到達以後の挙動が予測できる解析法の開発

今後、Phase2の実験結果の分析を進め早い時期に最終報告をまとめたい

上側取付ボルトの破断
上側取付ボルトの破断
上側取付ボルトの破断



「数値解析による橋の耐震性能のシミュレーション」
公開講座 2018/02/16

スーパーコンピュータ「京」 を用いた耐震解析法

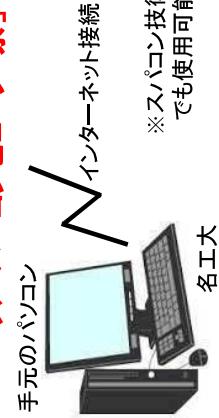
名古屋工業大学
野中 哲也

内 容

1. スーパーコンピュータ「京」とは？
2. スーパーコンピュータ「京」上の解析手法
3. 超大規模トラス橋モデルの静的解析
4. 高架橋モデルの地震応答解析
5. 広域道路ネットワークの地震応答シミュレーション
6. まとめ



スーパーコンピュータ「京」 (神戸)



※スーパコン技術者以外
でも使用可能。

1. スーパーコンピュータ「京」とは？

スーパーコンピュータとは、
普通のコンピュータより、
1000倍、計算が速い！



パソコン

計算の速さの単位:FLOPS
スーパーコンピュータ「京」
10.51PFLOPS
=1.051京

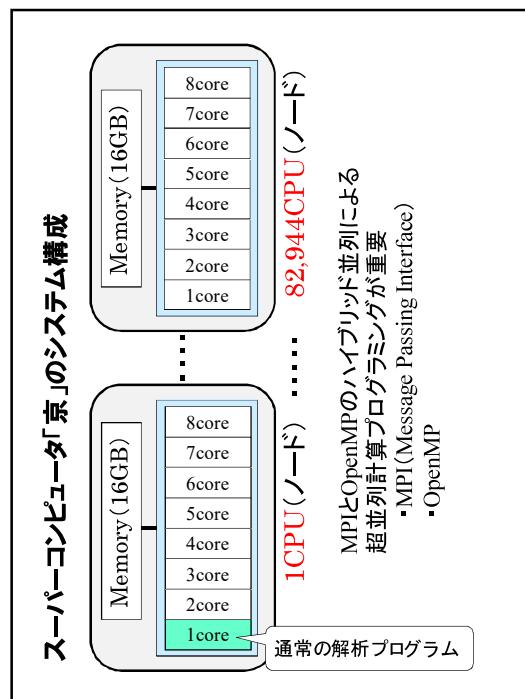
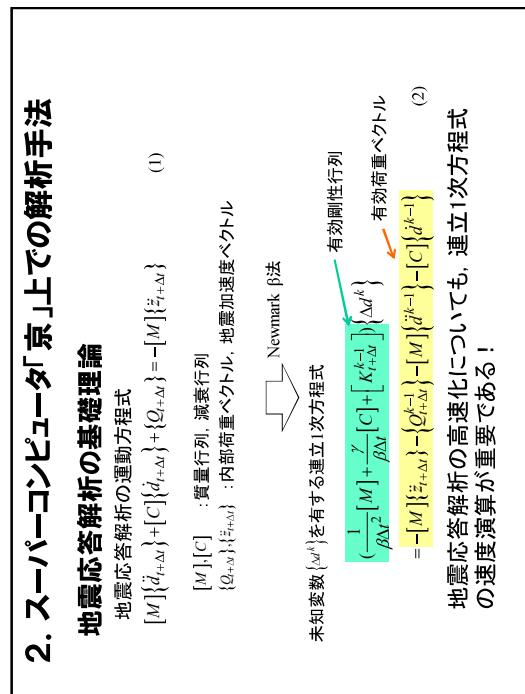


スーパーコンピュータ「京」



「京」を用いた構造・地震応答解析を実施。 「京」利用採択一覧	
年度	採択ID
2013年度	hp130031 重要施設を含む広域3次元津波シミュレーション hp140073 遠隔ビューリモート環境による阪神高速道路岸洋線の地震応答シミュレーション
2014年度	hp140088 巨大地震による阪神高速道路岸洋線の地震応答シミュレーション hp50102 地震と津波の阪神高速道路長大橋の地震応答シミュレーション
2015年度	hp150099 巨大地震による阪神高速道路長大橋の地震応答シミュレーション
2016年度	hp160109 地震と津波の巨大地震時における阪神高速道路長大橋の地震応答シミュレーションへの高精度化 hp160105 地震と津波の巨大地震時における阪神高速道路長大橋の地震応答シミュレーションの開発
2017年度	hp170092 想定を超える巨大地震作用時の構造物への規範明確化シミュレーションの開発 hp170089 南海トラフ震源所層地を考慮した長大橋津浦車道路の大規模地震応答シミュレーション

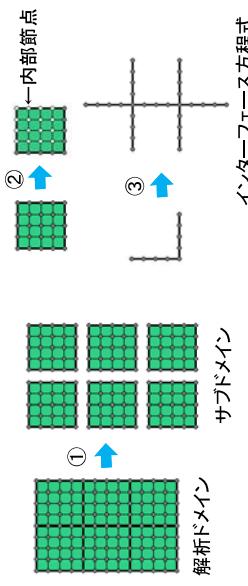
※採択されれば、無料で使用できる。



DDM(Domain Decomposition Method)とは?

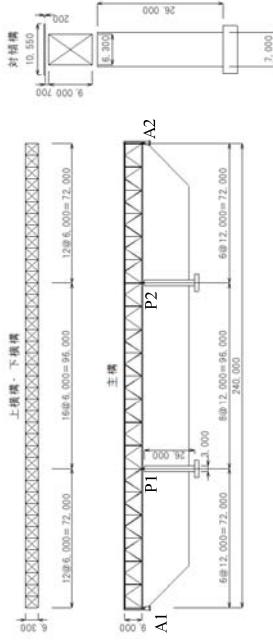
- ①全体構造(解析メイン)→部分構造(サブドメイン)
- ②内部節点の削除

- ③サブドメイン方程式の縮退→インターフェース方程式
- ④各サブドメインにおける内部節点の変位の決定



3. 超大規模トラス橋モデルの静的解析

対象橋梁:一般的な上路式トラス橋

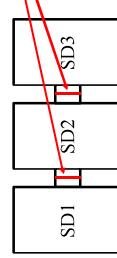


DDM法のトラス橋への適用

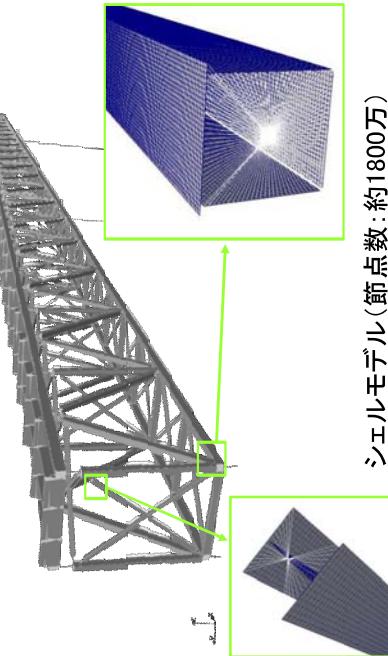
- ・ サブドメイン=1部材 = 1ノード
- ・ ロードバラインがよい、
- ・ インターフェース方程式の次数が小さい。



- ・ トラス橋は、DDMに向いている。



超大規模モデルの構築



超大規模モデル実行のためのポイント

- ①「京」上での実行速度を上げる(並列化効率の向上)
→並列計算させるためDDMを採用(行列演算も並列化)
本解析では、868ノードを使用

並列数: 6944 (=868 × 8スレッド)

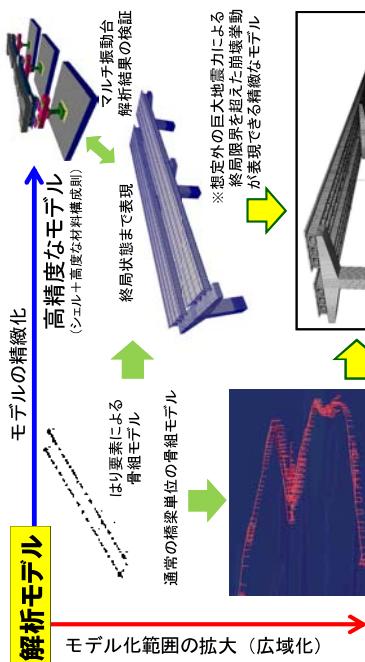
- ②超大規模モデルの作成
→変換プログラムを用いてファイバーモデルから
シェルモデルへ変換

- ③膨大な解析結果の処理
→1800万節点の解析結果を表示するため,
別途表示プログラム(暫定版)

超大規模トラス橋モデルの解析結果



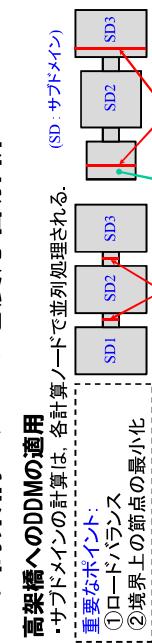
今後の解析モデル



路線全体の骨組モデル
※道路ネットワークとしての評価

将来の高精度な解析モデル

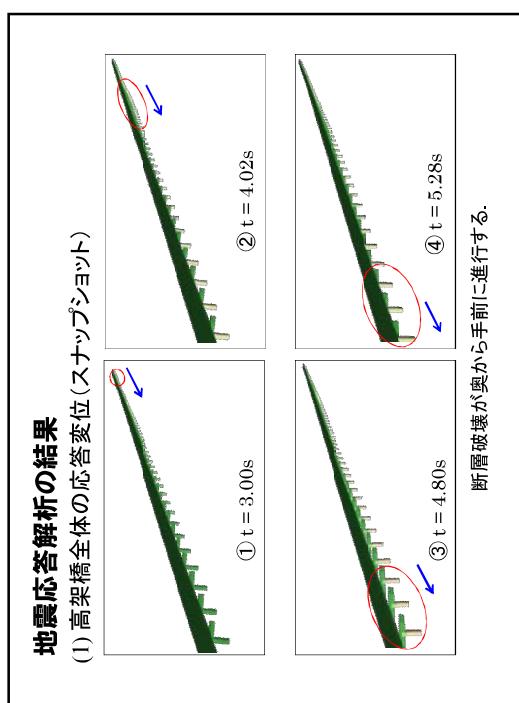
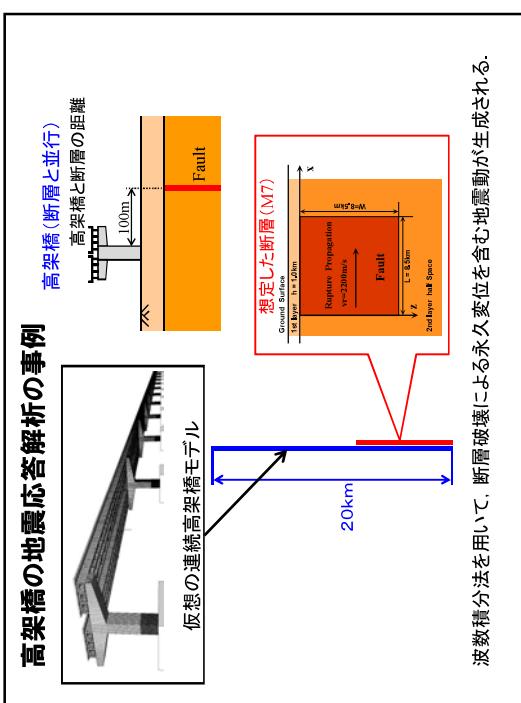
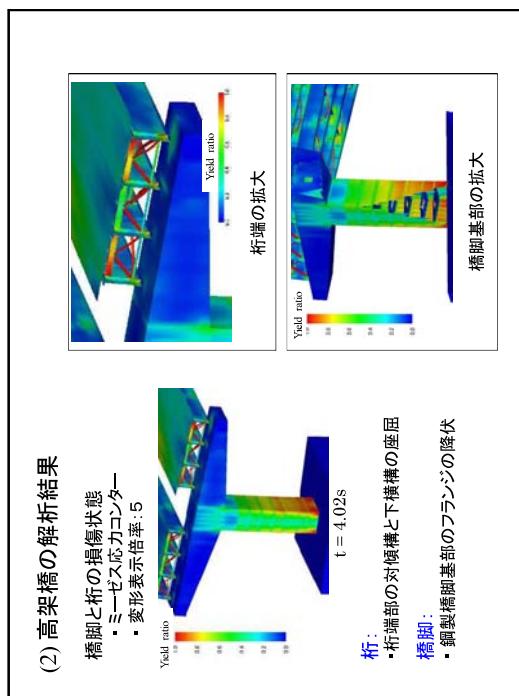
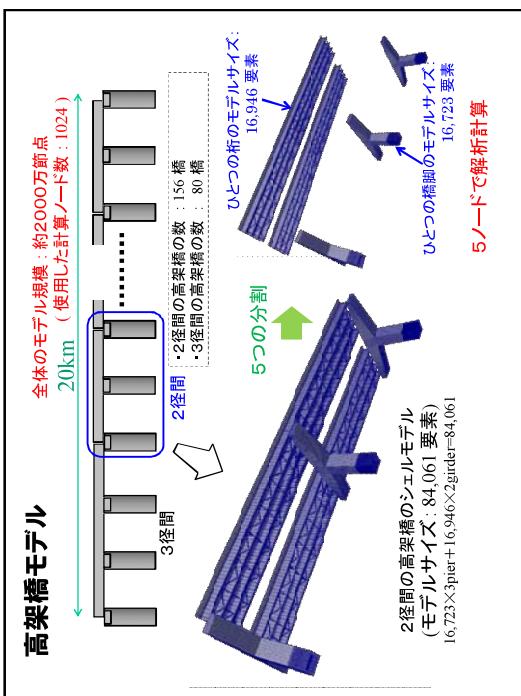
4. 高架橋モデルの地震応答解析



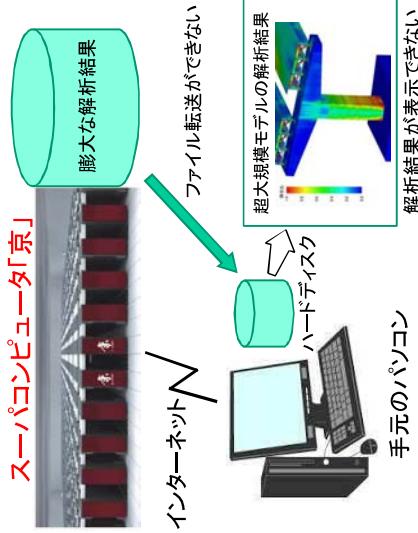
連続高架橋は、この2つの条件
を満足する。



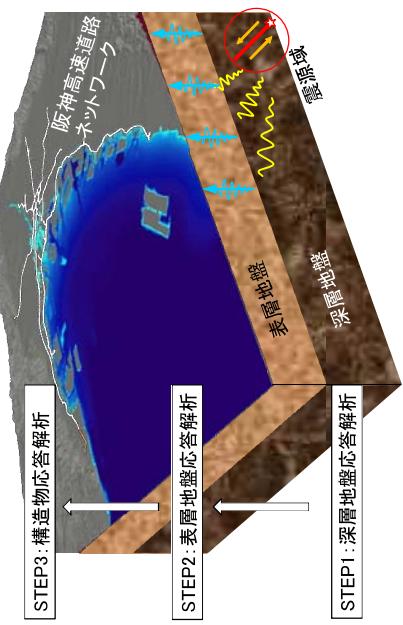
都市高速の連続高架橋



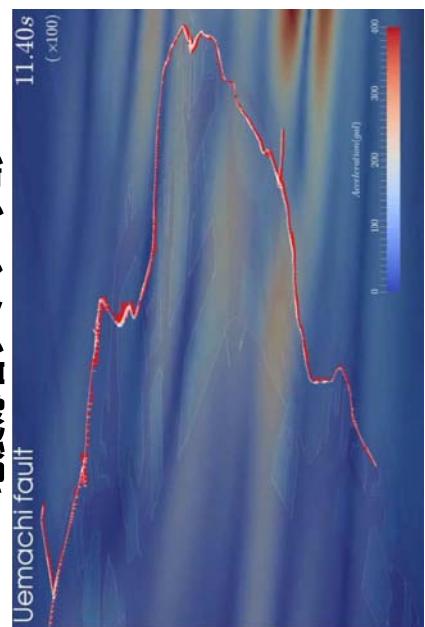
前述したポイント③(問題点) スーパコンピュータ「京」



5. 広域道路ネットワークの地震応答シミュレーション



地震応答シミュレーション



4.まとめ

- (1) **スーパーコンピュータの定義**は、通常のコンピュータの演算速度の1000倍以上と言われている。解析規模が1000倍になると、数値解析のノベーションが生まれるのでは。
- (2) 応力集中や変化が大きいところの要素分割を細かくしてきたが、本トラス橋モデルのように、細かいシェル要素で橋梁全体をモデル化してもよい。
- (3) 実験が再現できる高精度な解析モデルの構築が容易になる。
→そのモデルで実際の高架橋をモデルすればよい。
- (4) 広域での全体系数値シミュレーションが可能となる。
→道路ネットワークとしての評価が、防災上からも重要な要素である。
- (5) 今後は、ツールの整備、ツールを使う技術者、研究者の育成が必要である。

若い技術者、研究者に期待したいこと：

コンピュータは道具！



買い物、旅行に便利



高速バス



F1マシン



大型コンピュータ



スーパーコンピュータ「京」

はじめに

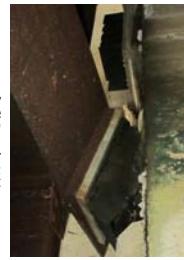
兵庫県南部地震以降、耐震性能向上策として複層ゴム支承が多くの橋梁に採用されてきている

ゴム支承への大変形解析の適用

名古屋工業大学 小畠誠



東北地方太平洋沖地震



熊本地震

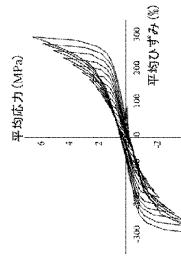
理解を深める必要

ゴム支承とは

- ゴムと鉄板を交互に配置して圧縮力に耐えながらゴムの特性をせん断変形に活かしたもの

ゴム支承の要素

- 数100%のひずみ（超大変形）
- 繰返し荷重
- 超弾性
- 塑性、粘性
- 変形による材料劣化挙動（Mullins効果）

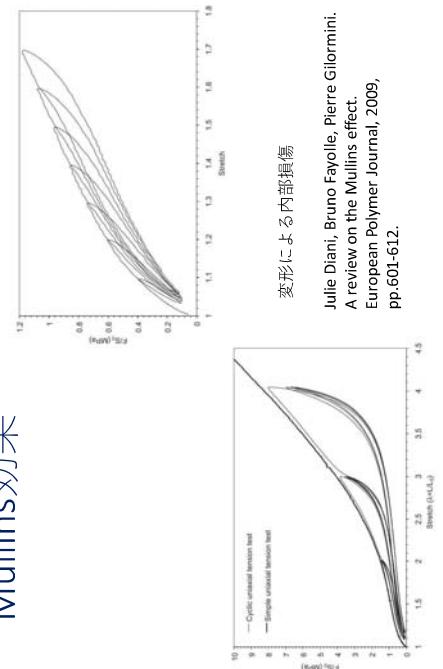


すべてを考慮して適切に計算する手法が必要

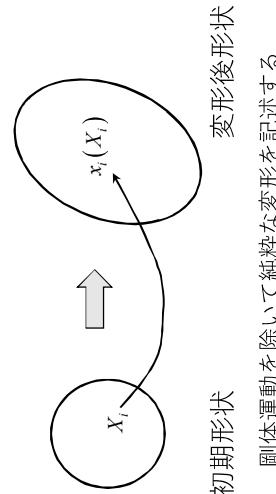
300%程度の大変形を受ける



Mullins効果



大変形の表現 1



$$\vec{F} = \frac{\partial \vec{x}}{\partial \vec{X}} \quad \text{変形勾配テンソル}$$

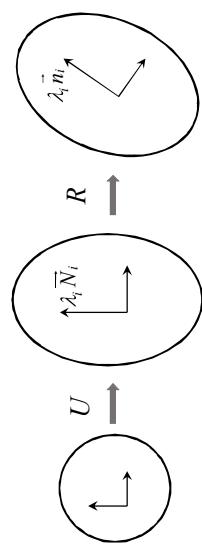
- ・マクロモデル（ばねモデル）は構造物全体の挙動解析に適用するためには十分であるが、局所的な支承の限界挙動について議論には適用ができない。

- ・ゴム材料そのものの特性を考慮したモデルの構築が必要

大変形の表現 2

$$F = RU \quad \text{極分解}$$

R 剛体回転に対応 U 純粹な変形に対応
直交テンソル



大変形の表現 3

ひずみテンソルは U の関数として定義

$$E = f(U) \quad f(x) = \frac{1}{2m} (x^{2m} - 1) \quad (\text{Seth \& Hill})$$

$$m=0 \quad E = \ln U = \sum_i \ln \lambda_i \vec{N}_i \otimes \vec{N}_i \quad \text{対数ひずみ}$$

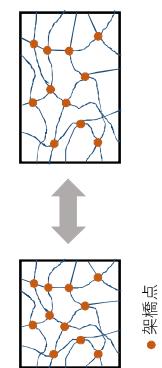
$$m=1/2 \quad E = U - I \quad \text{工学ひずみ}$$

$$m=1 \quad E = \frac{1}{2} (U^2 - I) = \frac{1}{2} (C - I) \quad \text{グリーンひずみ}$$

$$C = F^T F \quad \text{コーシー-グリーン-テンソル}$$

ゴムの弾性

ゴム分子の鎖の目としての変形が弾性変形となる。超弾性とされる。



● 架橋点

超弾性とは

応力とひずみの関係がひずみエネルギー関数によって関係づけられるもの

$$\tau_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}}$$

$$W \quad \begin{array}{l} \text{ひずみエネルギー関数} \\ \tau_{ij}, \varepsilon_{ij} \quad \text{互いに供換な応力およびひずみテンソル} \end{array}$$

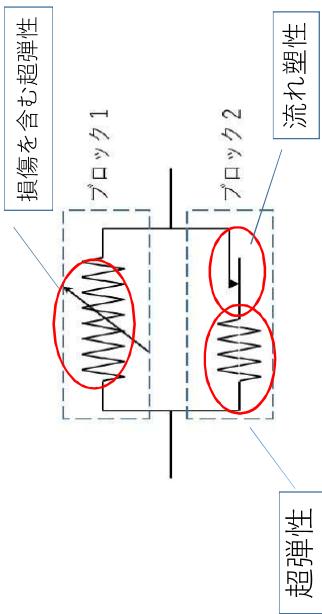
超弾性とは 2

$$\tau = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon}$$

ε グリーンのひずみ
 τ 第2種のピオラ = キルヒホフ応力

$$\sigma = \frac{1}{\rho_0} F_i F_j' \quad \text{コーシー応力}$$

ゴム材料の構成モデル



ゴムの超弾性 1

$W = W(C)$
 $W = W(I_1, I_2, I_3)$ Mooney型, C の不变量
 多項式で表現

$$W = \sum_k \frac{\mu_k}{\alpha_k} (\lambda_1^{\alpha_k} + \lambda_2^{\alpha_k} + \lambda_3^{\alpha_k} - 3)$$

Ogden型, U の固有値の
 べき乗式で表現

アフィン綱目理論がベースと思われる。

超弾性部分 1

圧縮性部分と被圧縮性部分を分離して考える。
 (ゴム材料はほぼ非圧縮性を示す)

$$W = E_{iso}(\bar{F}_{ij}) + U_{vol}(J)$$

非圧縮部分	$\bar{F}_{ij} = J^{-1/3} F_{ij}$
圧縮部分	$\bar{C}_{ij} = \overline{F_{ki} F_{kj}}$
$J = \det F_{ij}$	

超弾性部分 2

一般化されたMooneyのポテンシャル関数

$$E_{iso} = \sum_{m+n=1}^3 A_{mn} (\tilde{I}_1 - 3)^m (\tilde{I}_2 - 3)^n$$

$$U_{wl} = \sum_{m=1}^3 \frac{(J-1)^{2m}}{D_m}$$

一般にはOgden型のポテンシャル関数が良いという認識がある。
オリジナルのMooney-Rivlinがテンシャルが1次項（線形項）のみだった。

塑性部分 1

ミゼスの降伏条件、流れ理論、
移動硬化則 + 等方硬化則

$$f = \sqrt{\frac{3}{2} (\sigma_{ij}' - \alpha_{ij}) (\sigma_{ij}' - \alpha_{ij}) - \sigma_y (-p)} \\ \sigma_{ij}' = L_{ijkl} - \left(\frac{L_{ijpq} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} L_{mnkl}}{h + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} L_{rsiu} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{tu}}} \right) D_{kl} \quad h = \frac{d\sigma_y}{d\varepsilon_p}$$

塑性部分 2

大胆な仮定の導入

拡大 (等方硬化)

+ 移動 (移動硬化)

α_{ij} 降伏曲面のオフセット

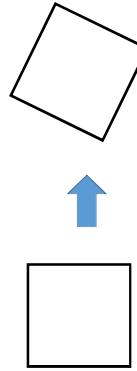
初期降伏曲面

実際の挙動に合うように h や α の動きを調整していく。

増分型応力ひずみ関係の問題 1

$$\overset{\nabla}{\tau}_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} + \sigma_{ik} W_{kj} - W_{ik} \sigma_{kj} \quad \text{Jaumann 変化率}$$

$$\overset{\nabla}{\tau}_{ij} = K_{ijkl} D_{kl}$$



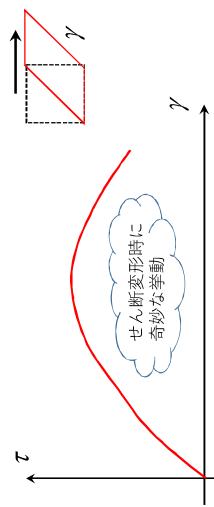
剛体回転時

ひずみ増分 = 0
応力増分 ≠ 0

増分型応力ひずみ関係の問題題 2

$$\overset{\nabla}{\tau}_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} + \sigma_{ik}\overset{\nabla}{W}_{kj} - W_{ik}\sigma_{kj} \quad \text{Jaumann 変化率}$$

$$\overset{\nabla}{\tau}_{ij} = K_{ijkl}D_{kl} \quad \text{弾塑性材料の増分型応力ひずみ関係}$$



増分型応力ひずみ関係の問題題 2

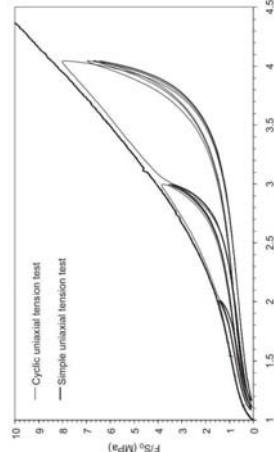
$$\overset{*}{\tau}_{ij} = \dot{\tau}_{ij} + \tau_{ik}\Omega_{kj} - \Omega_{ik}\tau_{kj} \quad \text{Green-Naghdi 変化率を導入}$$

$$\Omega_{ij} = \dot{R}_{ik}R_{jk} = W_{ij} - \frac{1}{2}R_{ik}(U_{km}^{-1} - U_{km}^{-1}\dot{U}_{mn})R_{jn}$$

$$\dot{U}U^{-1} + U^{-1}\dot{U} = 2R'DR$$

から Rivlin の恒等式を用いて \dot{U} を解く

ゴム材料の変形による劣化 1



Julie Dianini, Bruno Favolle, Pierre Gilormini,
A review on the Mullins effect.
European Polymer Journal, 2009,
pp.601-612.

Rivlin の恒等式

$$\dot{U}U^{-1} + U^{-1}\dot{U} = 2R'DR$$

$AX + XA = B$ の解 X は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} 2\Pi_A(\Pi_A - \Pi_A)X &= \Pi_A A^2 B A^2 - \Pi_A^2 (A^2 B A + A B A^2) \\ &\quad + (\Pi_A \Pi_A - \Pi_A)(A^2 B + B A^2) \\ &\quad + (\Pi_A^3 + \Pi_A) A B A - \Pi_A^2 \Pi_A (A B + B A) \\ &\quad + (\Pi_A^2 \Pi_A + \Pi_A \Pi_A^2 - \Pi_A \Pi_A) B \end{aligned}$$

Π_A, Π_A, Π_A $A\sigma$ 不变量

ゴム材料の変形による劣化 2

Ogden-Roxburgh を参考

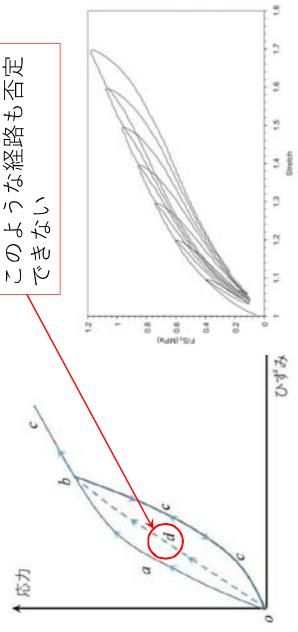
$$S_{ij} = 2\eta \frac{\partial W}{\partial C_{ij}}$$

飽和型の劣化関数

$$\eta = \begin{cases} 1 - D_f \tanh(D_s(W_{\max} - W)) & W < W_{\max} \\ 1 & W = W_{\max} \end{cases}$$

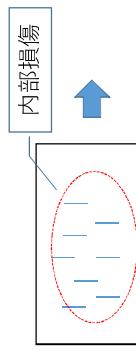
問題点 1

このような経路も否定できない



問題点 2

初期状態



変形後

損傷の影響は等方的と考えにくく、

損傷曲面の導入

$$\eta = \begin{cases} 1 - f_d D_f \tanh(D_s(E_{\max} - E)) & E < E_{\max} \\ 1 & E = E_{\max} \end{cases}$$

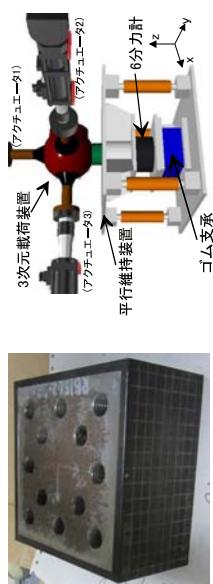
$$f_d = \underbrace{\left(1 - (R_{ew} / R_{\max})^n\right)}_{\text{緩和部分}} (1 + \cos 2\theta) / 2$$

まったく同じひずみ経路を通り
ほぼ同じ応力はひずみ曲線を通るが、
異なる経路では応力ひずみ曲線も異なる。

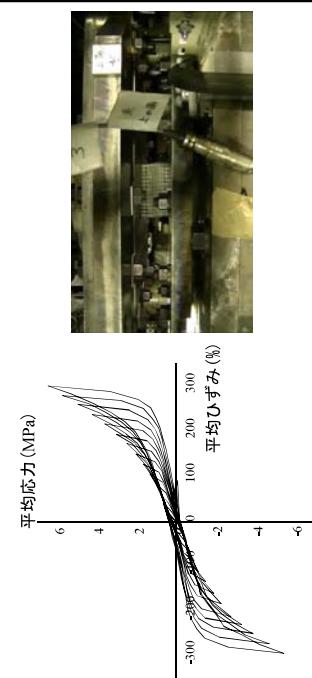
$$\text{損傷曲面 } g(\bar{C}_{ij}, \boldsymbol{\theta}) = 0$$

数値計算例の対象

- 130×130mm,120×120mm積層ゴム支承
- ゴム層は天然ゴム(G10)
- 周囲に厚さ5mmの被覆ゴムあり

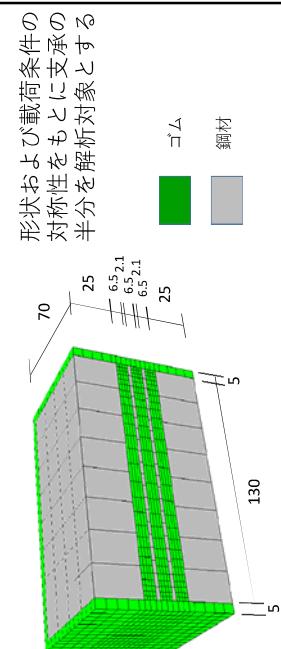


実験結果

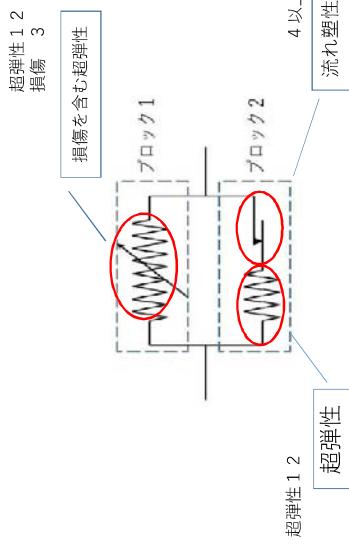


解析モデル：1方向繰り返し

ABAQUS6-14 C3D8,C3D8Hを使用
構成モデルはユーザーサブルーチンで実装



材料定数の決定

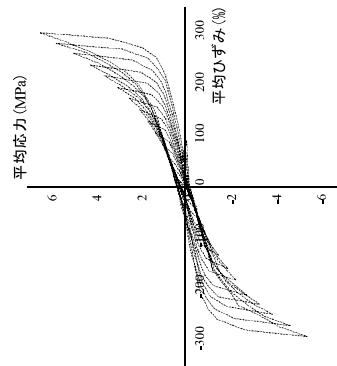


材料定数を決める手順

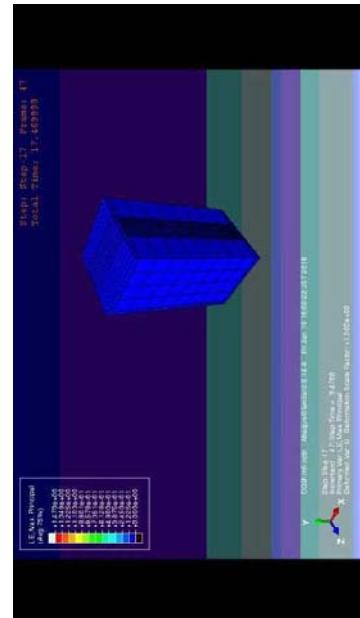
40個を超える材料パラメータ
なんらかの戦略が必要

超弾性 (複数の実験結果から決定)
塑性
ダメージ

対象とする実験結果 (1軸繰返し)



解析結果 (1軸繰返し) 1

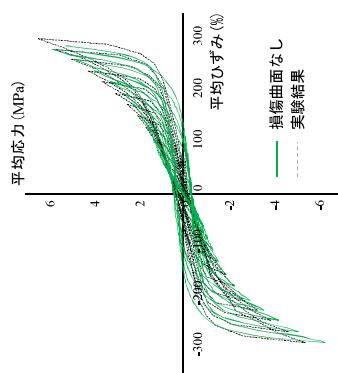


解析結果 (1軸繰返し) 2

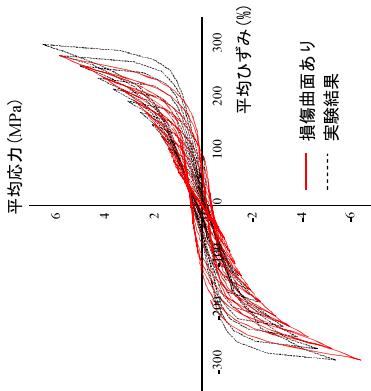


ひずみ分布 (主ひずみ)
ミゼス応力の分布

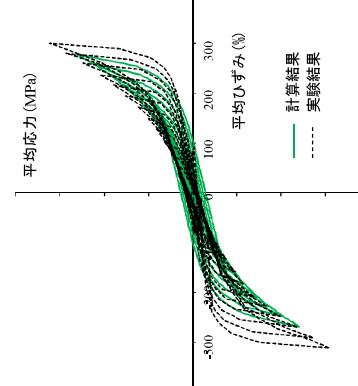
損傷曲面なし



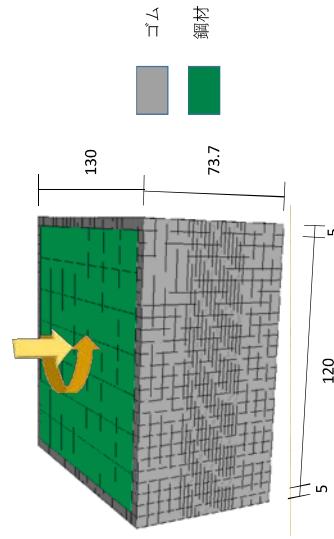
損傷曲面あり



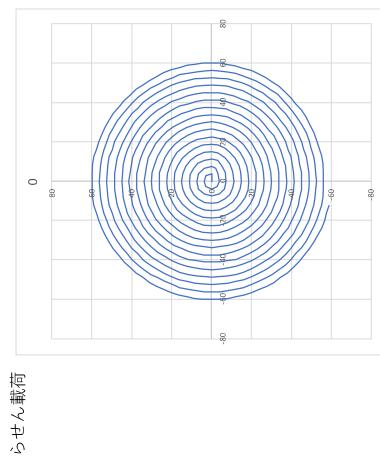
一軸の解析結果



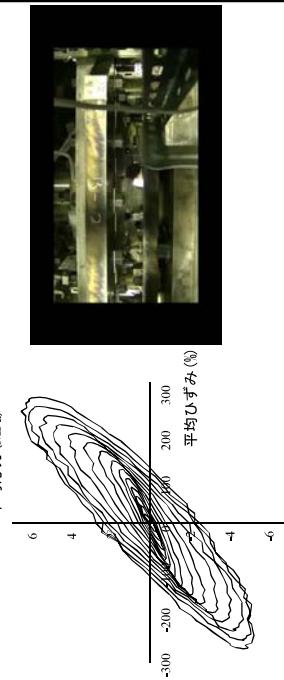
解析モデル：2方向載荷



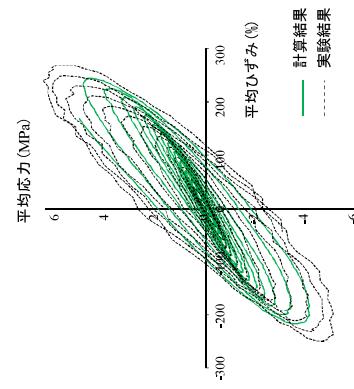
2方向載荷



2方向載荷 実験結果



二軸の解析結果



まとめ

ゴム材料の内部損傷を想定した材料劣化を含む構成モデルを提案しその計算例を示した。