

建築構造の耐震性能評価に向けた実験の再現解析


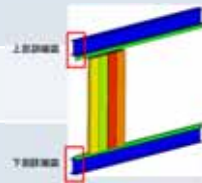
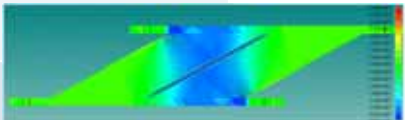
宮村倫司(日本大学)

2023年数値震動台研究開発プロジェクト成果発表会
令和5年3月27日, 建築会館ホール

建築WGのメンバー

- 主査:宮村倫司(日本大学)
- 委員:
 - 大崎 純(京都大学)
 - 小檜山雅之(慶應義塾大学)
 - 田川浩之(武庫川女子大学)
 - 磯部大吾郎(筑波大学)
 - 山下拓三(防災科学技術研究所)
 - 藤原淳(防災科学技術研究所)
- 企業委員:
 - 山本雅史(竹中工務店)
 - 安田 聡(大成建設)

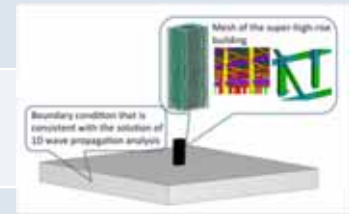
2013年の成果発表会の内容

解析対象			
31層鋼構造骨組			JR鷹取波入力 of 解析(東大T2K)
4層鋼構造骨組			E-ディフェンス実験を良好に再現
鉄骨合成梁			試解析
ALCパネル外壁			完了
角形鋼管の局部座屈解析のverification			完了
積層ゴム免震支承の解析(天然ゴム)			完了
延性破断の解析			試解析
CFT柱の解析			試解析(Drucker-Prager則)
構成則開発	複合硬化鋼材		Semi-implicit型区分線形複合硬化則 
	鋼材延性破断		SMCS基準に基づく構成則の開発開始

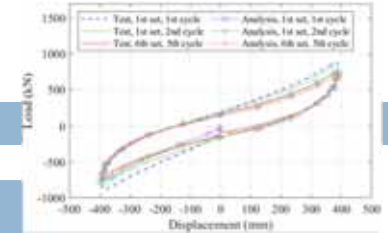
(詳細FEMをベースとした数値震動台の開始が2006年)

2018年の成果発表会の内容

解析対象		
31層鋼構造骨組		南海トラフ地震波入力解析
31層鋼構造骨組+地盤 (「京」戦略分野3)		鷹取波入力解析
4層鋼構造骨組解析結果とE-ディフェンス多点計測データとの比較		結果の紹介
10層RC骨組のE-ディフェンス実験		 
鉄骨合成梁		完了
高減衰積層ゴム免震		試行錯誤中
構成則開発	複合硬化鋼材	Semi-implicit型区分線形複合硬化則の実用化
	鋼材延性破断	引き続き研究
	コンクリート	Drucker-Prager則+損傷力学による圧壊の表現+簡易的なクラックの表現



今回の内容(赤字の部分を発表)



解析対象		
31層鋼構造骨組	論文発表	
高減衰積層ゴム免震	一区切り, 論文発表	
鉄骨延性破断	一区切り, 論文発表	
CFT柱の解析	論文発表	
10層RC骨組のE-ディフェンス実験	一区切り, 論文発表	
10層RC骨組+家具		
4層鋼構造骨組解析結果とE-ディフェンス多点計測データとの比較	E-Validatorとしてソフトウェア化(山下さんの発表参照)	
構成則開発	コンクリート	新しい引張クラック
	高減衰ゴム	材料パラメータ同定
	鉄骨延性破断	一区切り, 論文発表

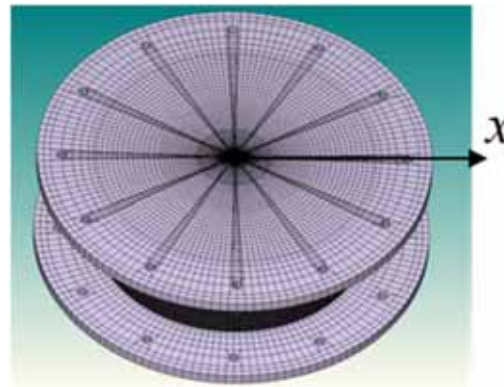
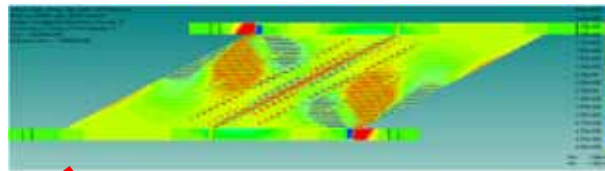
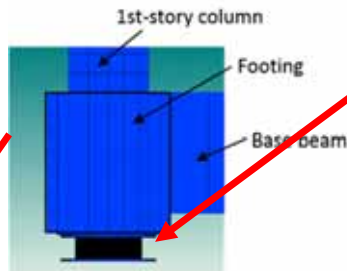
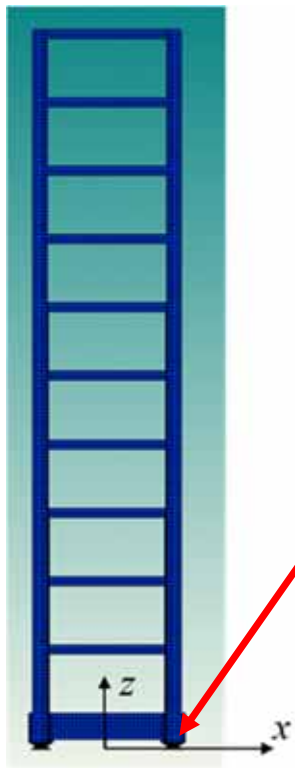
建築構造の耐震性能評価に向けた実験の再現解析

- 詳細にモデル化することで**実験をよく理解**できる
 - 不適切な構成則, 形状の簡略化等をするといくらパラメータを調整しても合わない
- 詳細解析の妥当性確認(**Validation**)
- E-ディフェンス実験は通常, 同じ条件では1ケースのみ
 - 確率的な**ばらつきの影響**を観察できない
 - Validateされた解析でばらつきを見る(**実験の補完**)ことができないか?
- **サロゲートモデル開発**につなげる

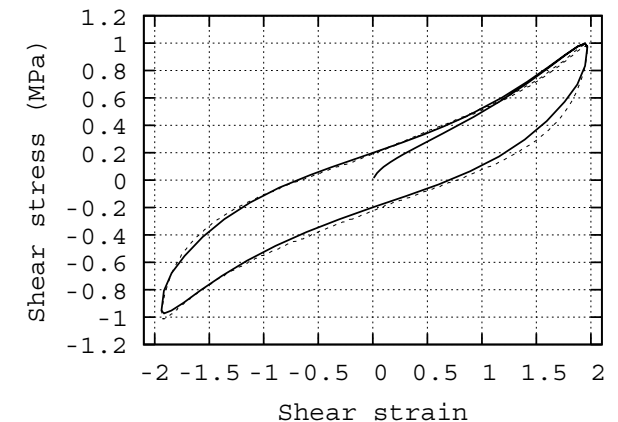
高減衰ゴム免震支承の構造・熱連成解析とEディフェ ンス実験の比較

Tomoshi Miyamura, Makoto Ohsaki, Jun Fujiwara, and Masashi Yamamoto,
“Coupled structural and heat conduction FE analysis of laminated high
damping rubber bearing,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,
Vol. 50, Issue 9 (2021.6.25), pp. 2462–2487 (DOI: 10.1002/eqe.3455)
(Published online: 18 May 2021)

積層高減衰ゴム免震支承(HDRB)



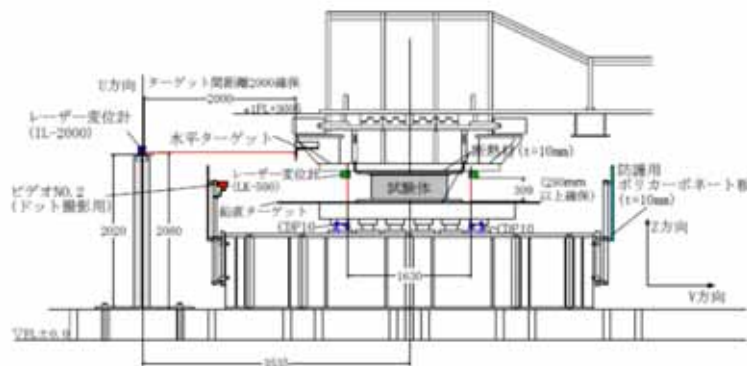
- 免震層における大きなせん断変形に追従する
- 建物を支える
- ダンパーとして働く



Ohsaki et al., High precision finite element analysis of elastoplastic dynamic responses of super high rise steel frames EESD, 44 (2015), pp. 1881-1898 (天然ゴム+建物)

E-ディフェンスで実施された実大高減衰積層ゴム免震支承の加振実験

- 防災科研E-ディフェンスにおいて2012年に実施:
 - 長周期地震動の下での挙動を明らかにする
 - 複数回の繰り返し载荷
 - 高減衰ゴムの消費エネルギーによる温度変化を測定

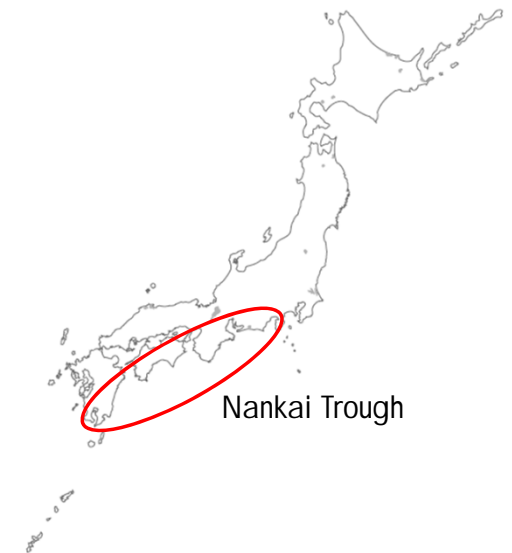


長周期・長時間地震動

- 南海トラフエリアでマグニチュード8～9クラスの地震が30年以内
に起こる確率は70-80% (HERP 2018)
 - 長周期の強地震動
 - 長時間(シミュレーションでは500s)

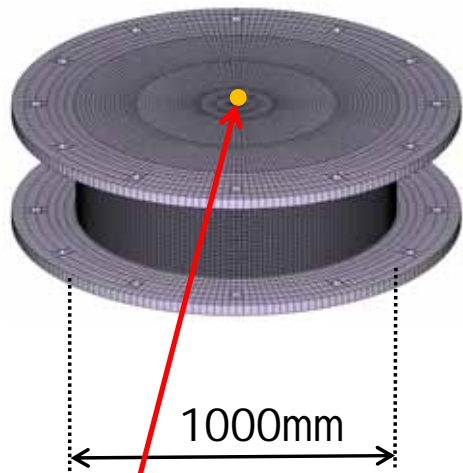


- 固有周期4秒の免震建物のHDRBは100回程度の
繰り返し载荷を受ける
- 温度上昇は70 to 80 °C 程度となり無視できない

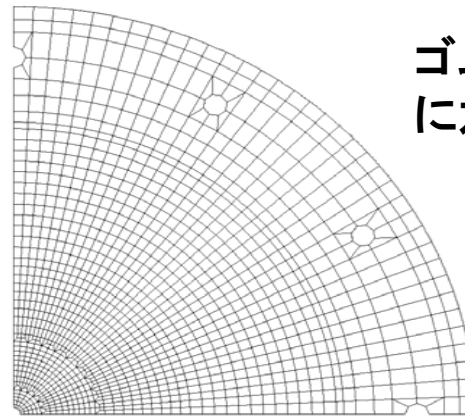


三次元ソリッド要素による高減衰ゴム免震支承の詳細解析モデル

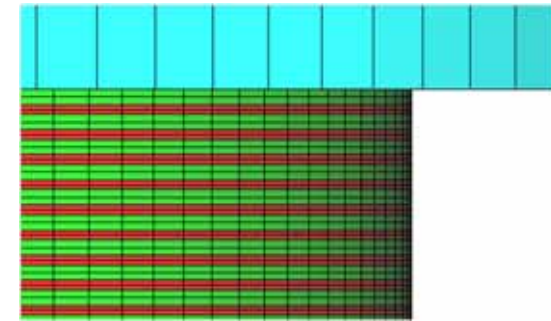
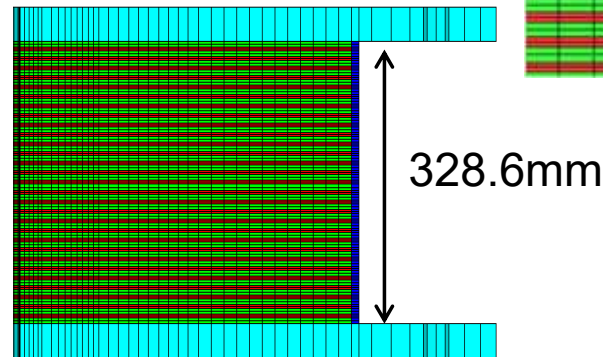
要素数	564,384
節点数	585,061



周りの節点と剛体梁で接続した仮想節点



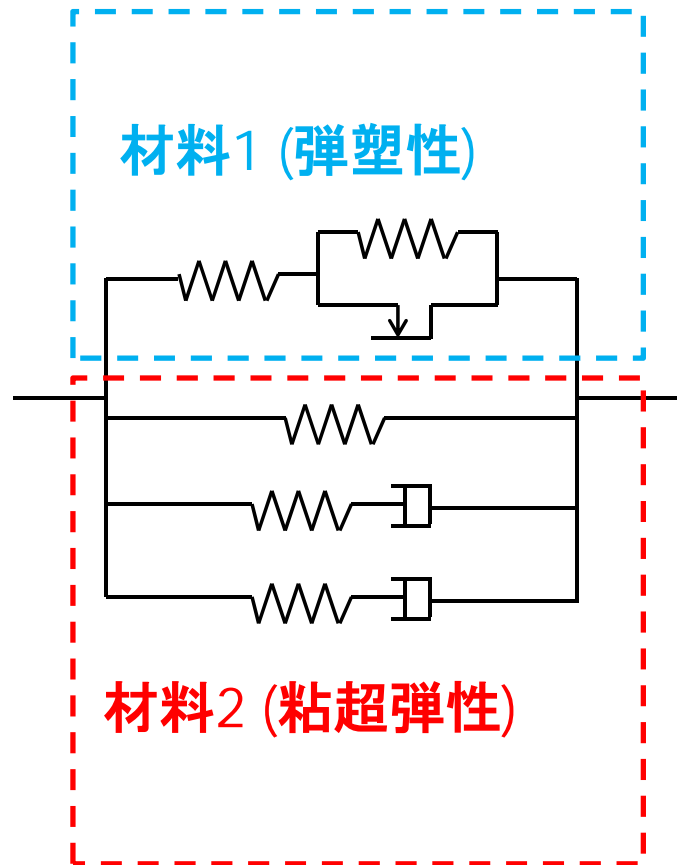
ゴム, 鉄板の1層分を厚さ方向に六面体1次要素2要素に分割



- フランジ
- ゴム (30層)
- 鉄板

弾塑性＋超粘弾性構成則

12



2個の要素を重ねる(オーバーレイモデル)

1要素内で構成則を重ねることで同様の効果になるようにしている

□材料1(弾塑性)

□ミーゼスの降伏条件

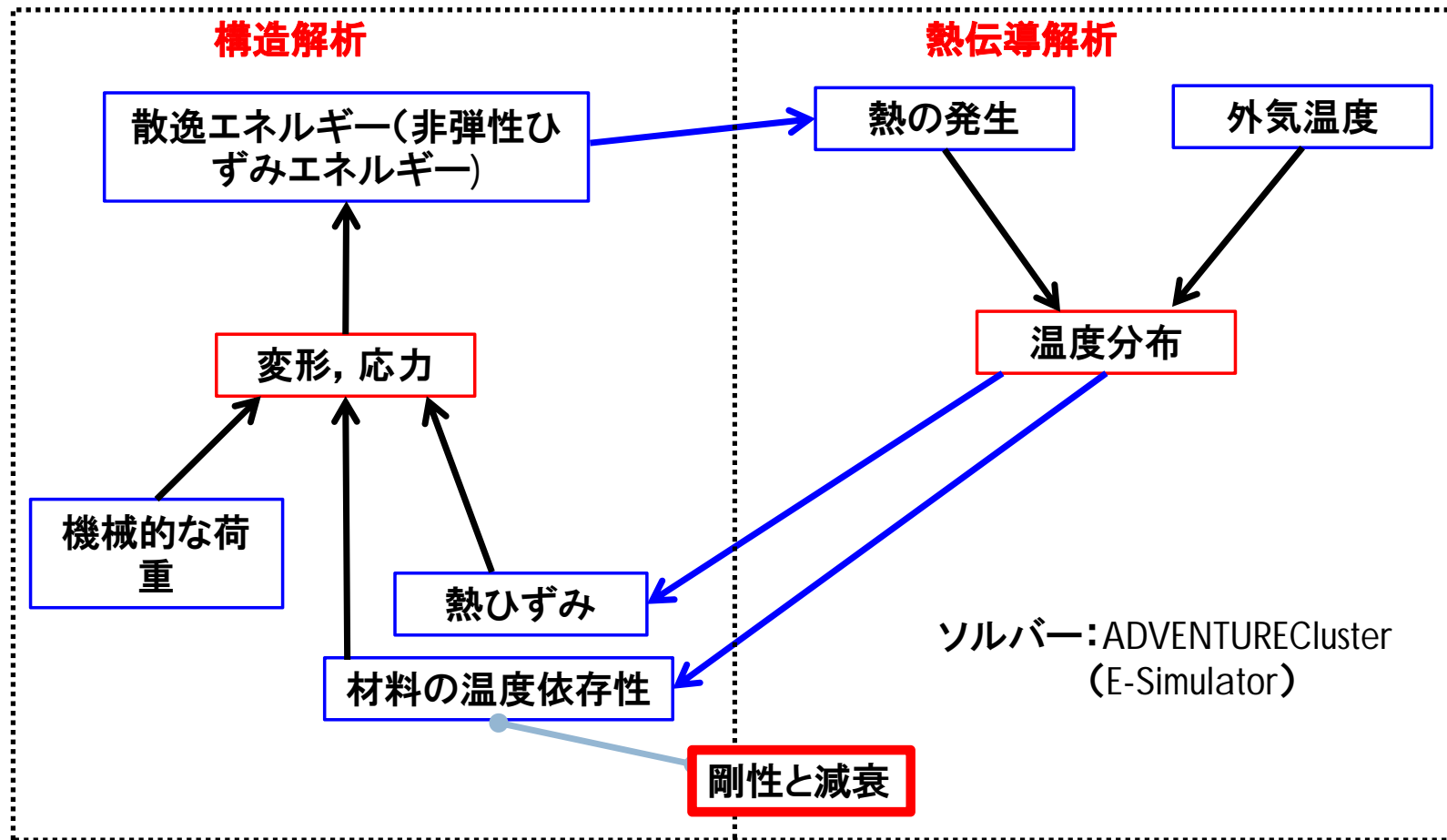
□移動硬化則＋線形硬化

□材料2 (粘超弾性):

□超弾性Ogdenモデル+ 2個のMaxwellモデル

構造・熱伝導連成解析

スタガード法による弱連成解析



等価剛性, 等価減衰定数に対する温度依存性の実験式に基づく材料パラメータの温度依存性

- 構造に対するパラメータである等価剛性, 等価減衰定数の温度依存性の実験式(E-ディフェンス実験)に合わせて材料パラメータの温度依存性を決める
- 1方向加振実験に合わせる

等価剛性に掛ける係数(温度が上がるほど剛性は低下)

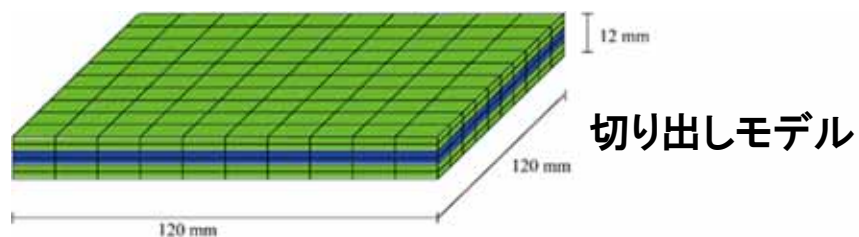
$$\begin{cases} C_K(T) = 1.0 - 0.0144(T - 20) & (T \leq 20^\circ\text{C}) \\ C_K(T) = 1.668 - 0.548\log(T - 3.45) & (T > 20^\circ\text{C}) \end{cases} \rightarrow \text{ヤング率, Ogden体のせん断弾性係数に適用}$$

等価減衰定数に掛ける係数(温度が上がるほど値は減少)

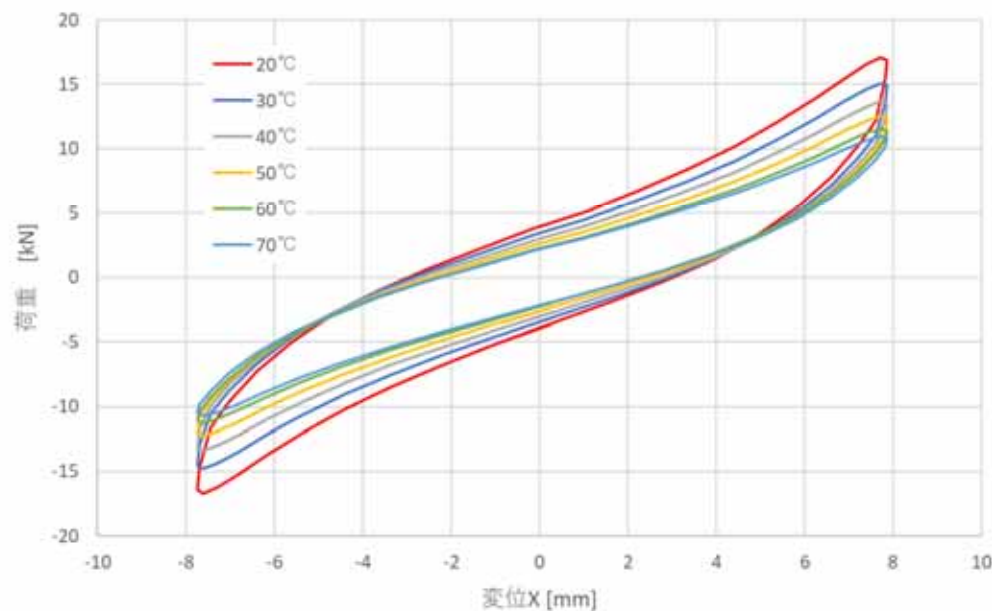
$$C_H(T) = 1.0 - 0.0065(T - 20)$$

→ **降伏応力の温度依存性を設定することにより弾塑性体のみにより消費エネルギーを調整**

切り出しモデルによる各種温度に対する荷重-変位曲線

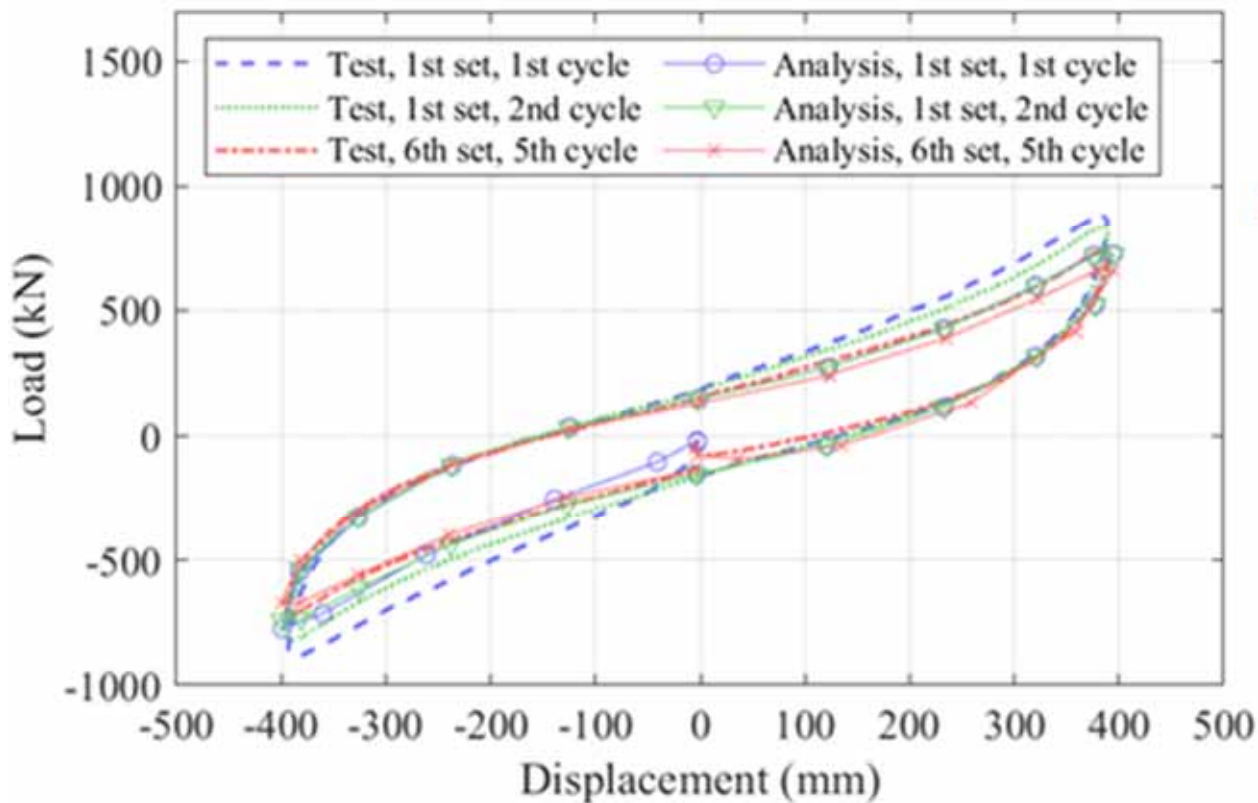


材料パラメータは、切り出しモデルで一方向載荷実験の結果を再現するように同定

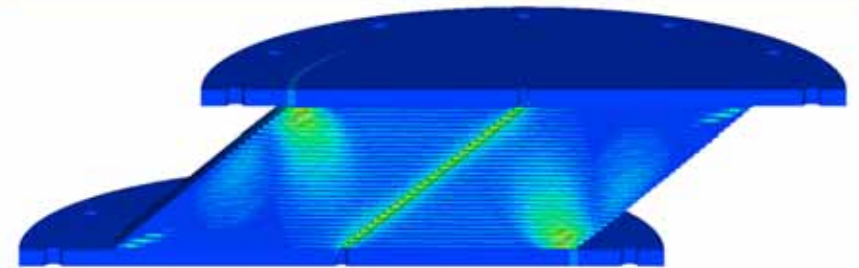


荷重-変位曲線(弾塑性+粘弾性)

1方向載荷実験に対する解析結果



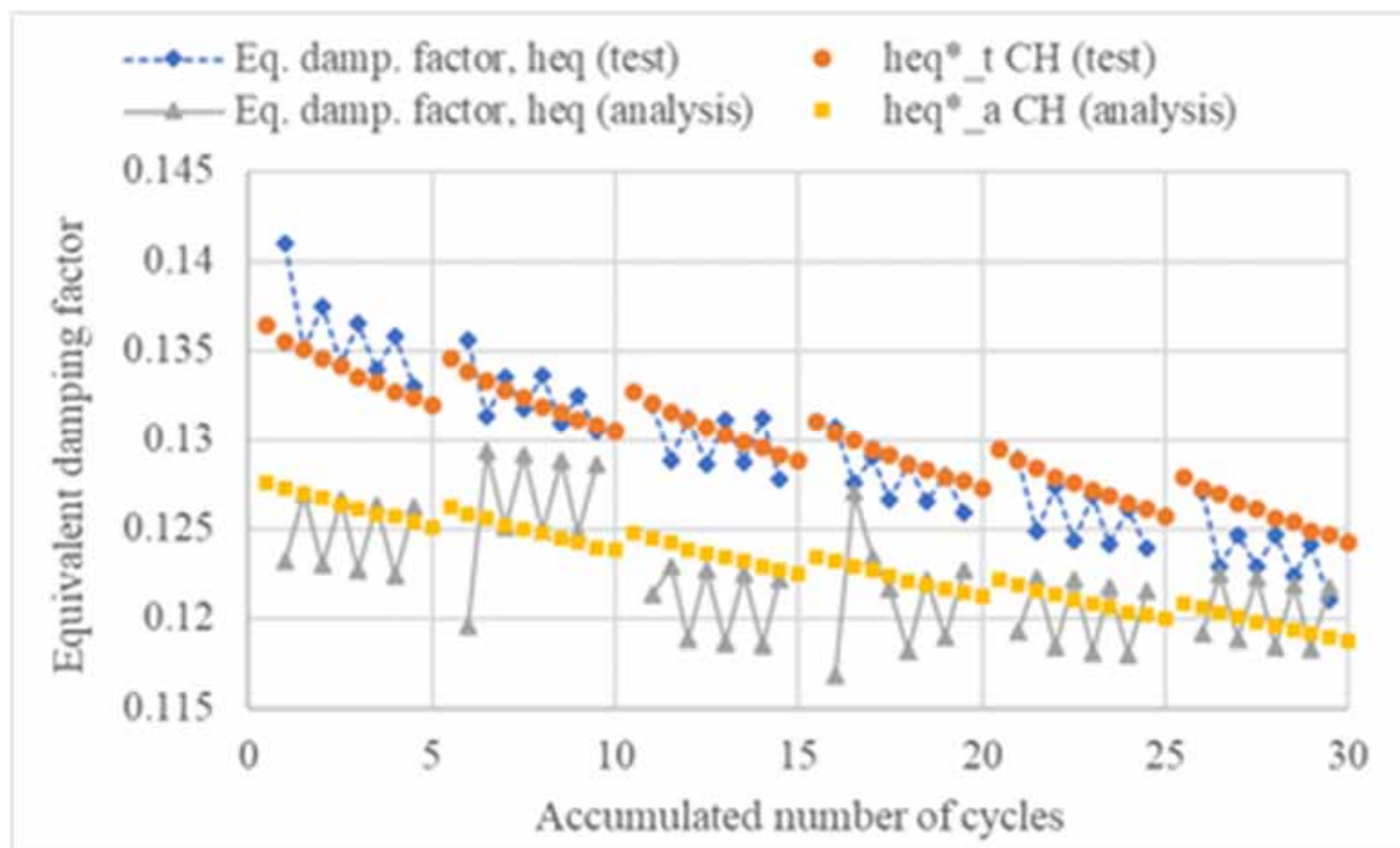
荷重変位曲線



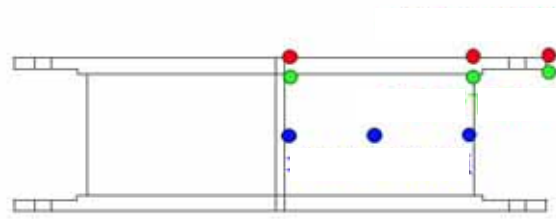
変形と相当応力

- Scraggingがされていない第1サイクル以外はよく合っている
- 温度上昇により等価剛性と等価減衰が減少している

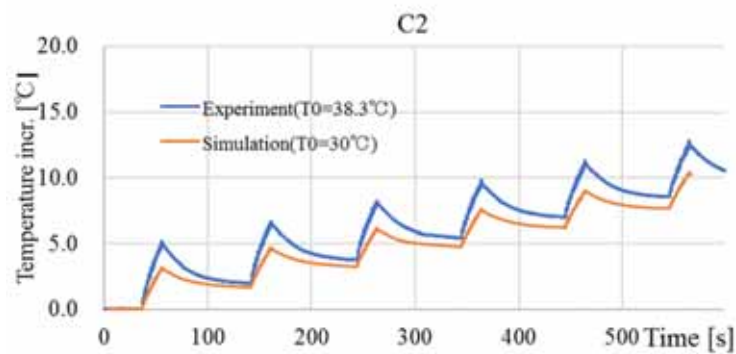
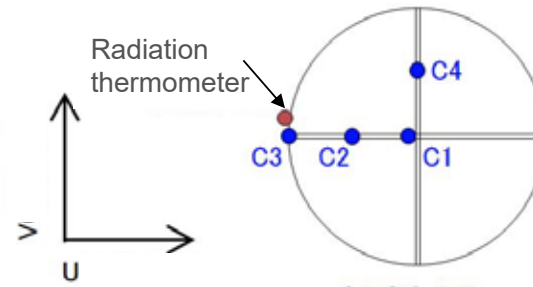
等価減衰定数の比較



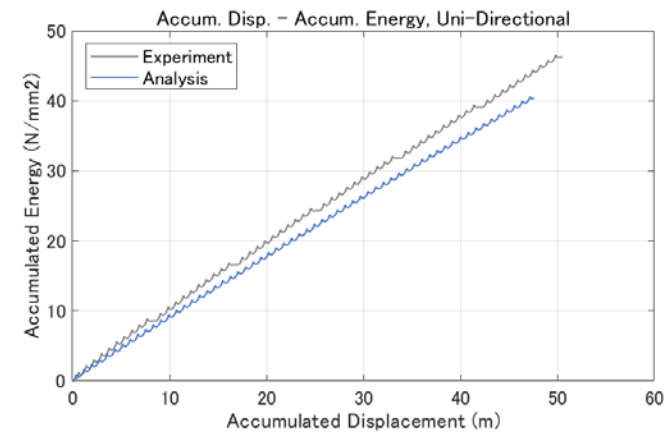
温度の時刻歴と累積消費エネルギーの比較



Arrangement of thermocouples

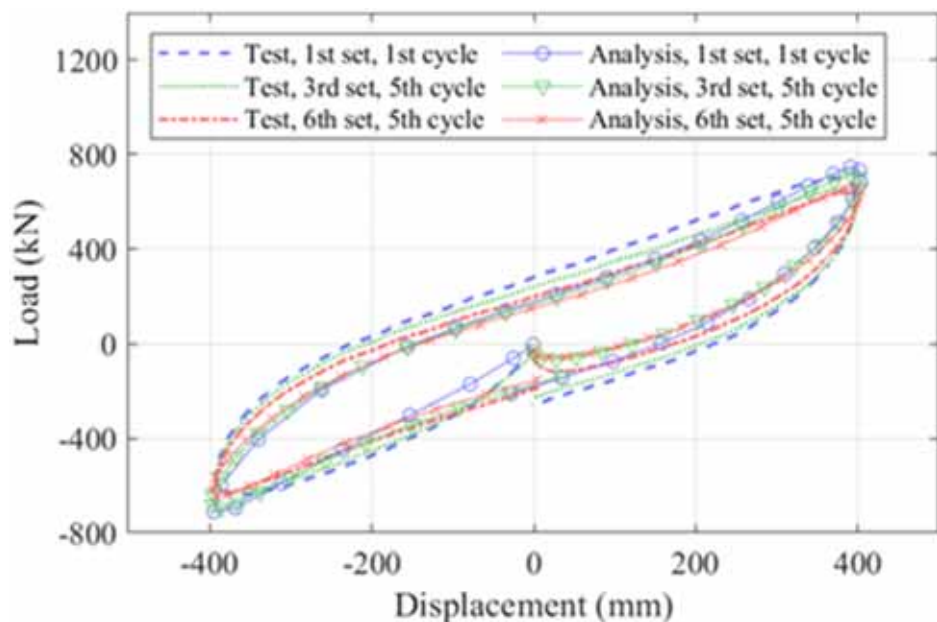


Comparison of time histories of temperature at point C2 for test and simulation

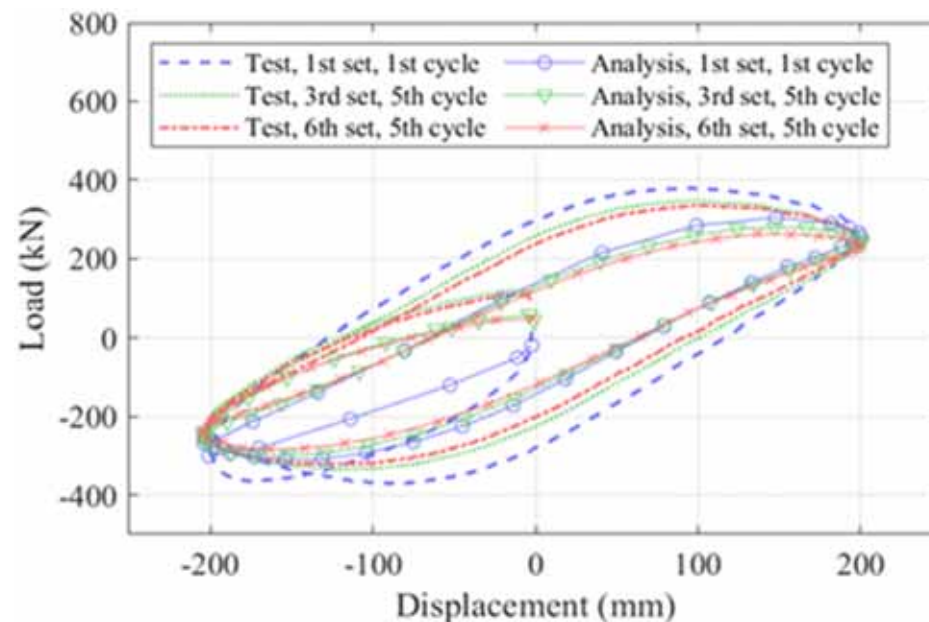


accumulated dissipation energy

楕円加振の結果



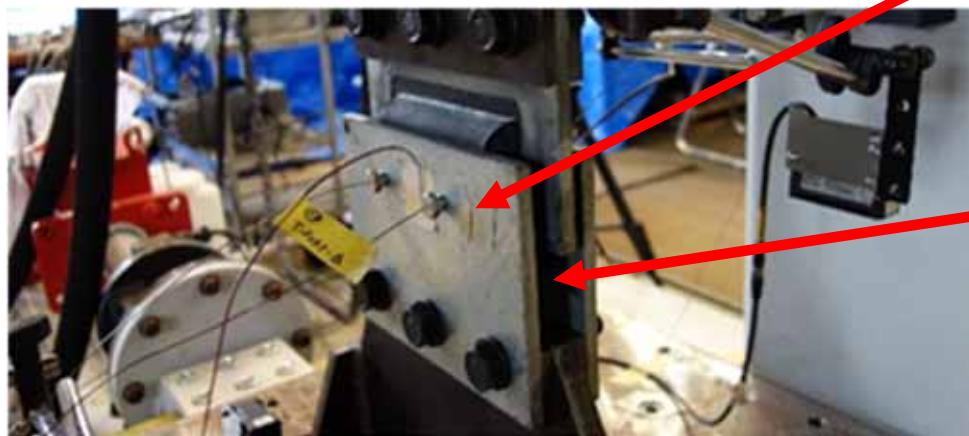
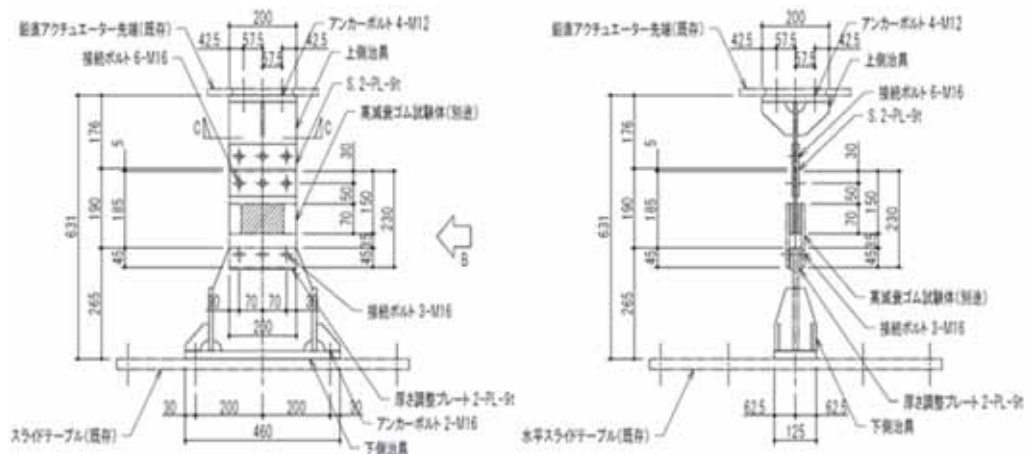
長辺方向



短辺方向

短辺方向の解析によるヒステリシスが細すぎる

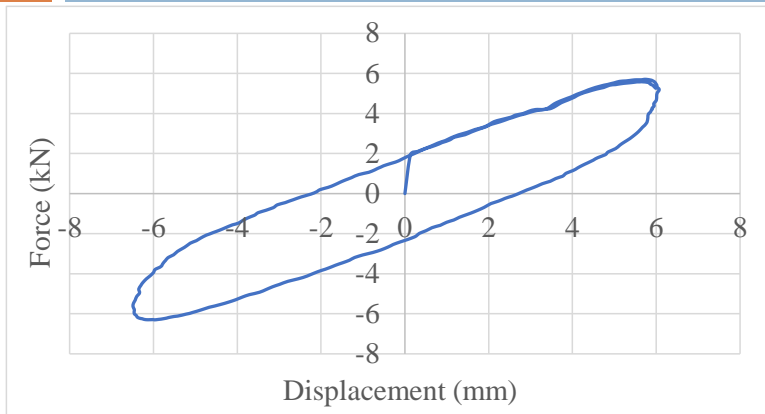
高減衰ゴムの材料試験



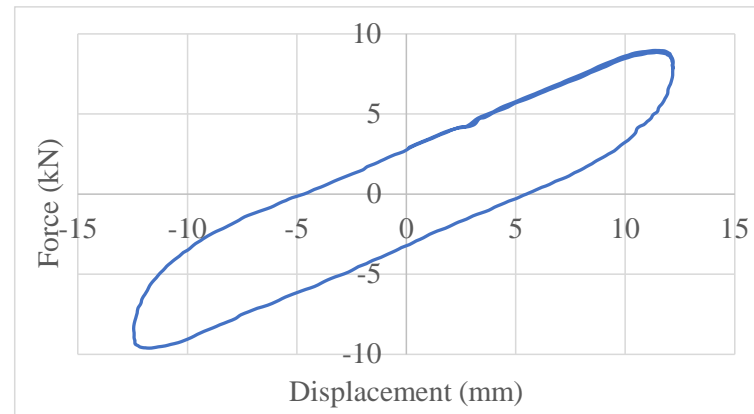
Thermocouple

Two layers of rubber and steel plates

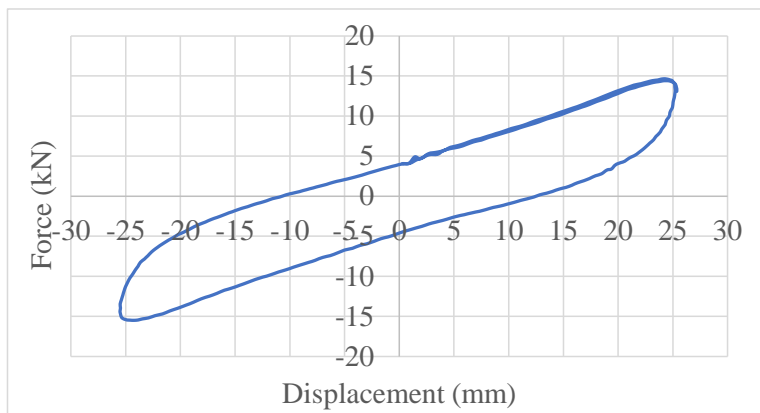
色々な振幅の1方向載荷試験(色々なひずみ速度)



Case 50%: Maximum shear strain is 50%



Case 100%: Maximum shear strain is 100%



Case 200%: Maximum shear strain is 200%

- Period: 4s for all cases
- Maximum displacements (shear strain) are different
- ➡ Loading speeds are different
- ➡ Parameters for viscoelasticity can be identified

焼きなまし法(SA)による材料パラメータ同定

目的関数

$$f(s_1, s_2, \dots) = \sqrt{\sum_{i=1}^{\text{All time steps for 3rd cycle}} \left(p_i^{\text{test}} - p_i^{\text{FEM}} \right)^2}$$

設計変数(5パラメータ):

- Ogden体の2パラメータ
- Maxwell体の緩和時間が2個
- 降伏応力

ステップ*i*の実験と解析の荷重の差

近傍数:5

冷却ステップ数:50

目的関数の設定

- **Case 1**: Case 200%のみを使う

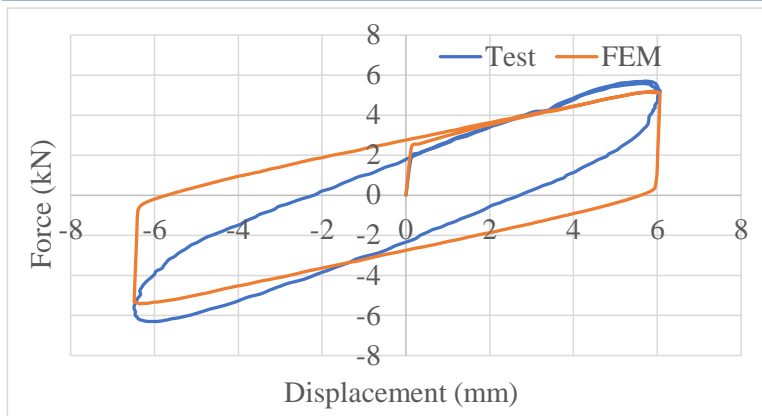
$$f(s_1, s_2, \dots) = f_{200\%}(s_1, s_2, \dots)$$

- **Case 2**: Cases 50, 100, and 200 % を全て使う

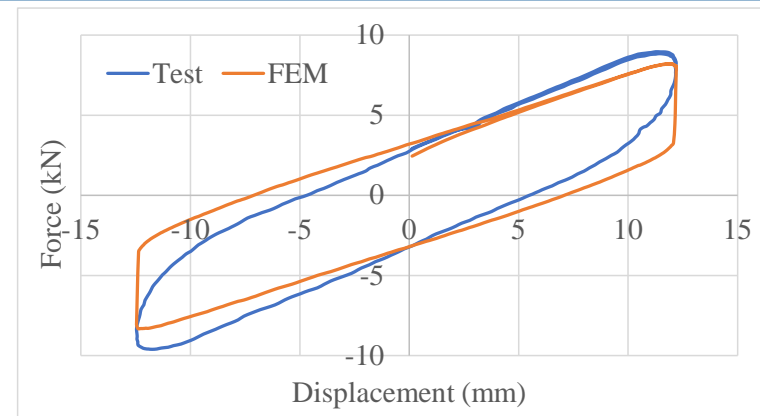
- 異なる载荷速度の実験に同時に合わせることで、粘超弾性の材料パラメータをうまく同定する

$$f(s_1, s_2, \dots) = f_{50\%}(s_1, s_2, \dots) + f_{100\%}(s_1, s_2, \dots) + f_{200\%}(s_1, s_2, \dots)$$

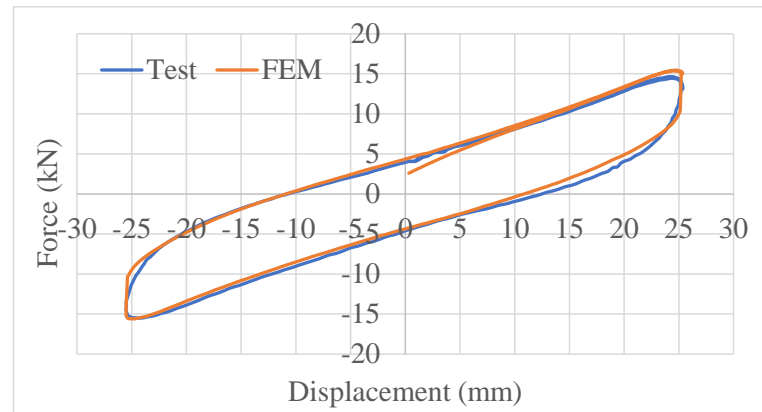
同定結果(Case 200%のみで同定)



Case 50%: Maximum shear strain is 50%



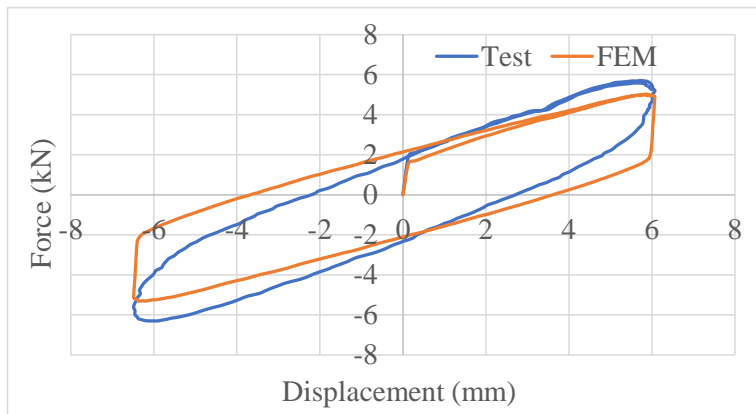
Case 100%: Maximum shear strain is 100%



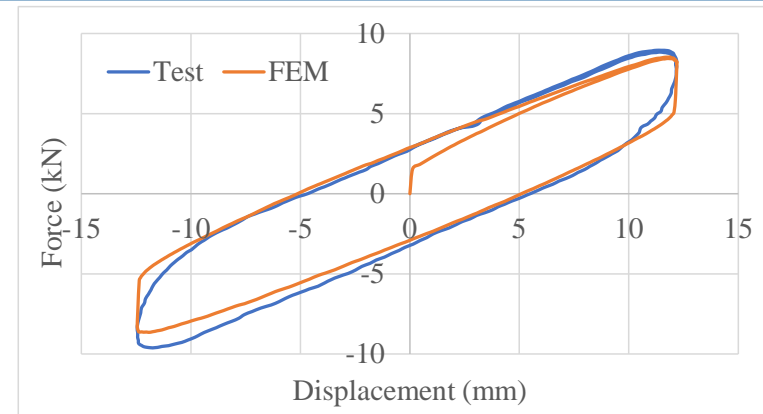
Case 200%: Maximum shear strain is 200%

- オレンジ:解析, 青:実験
- Case 200%はよく合っているがCases 50%, 100%はいまひとつ

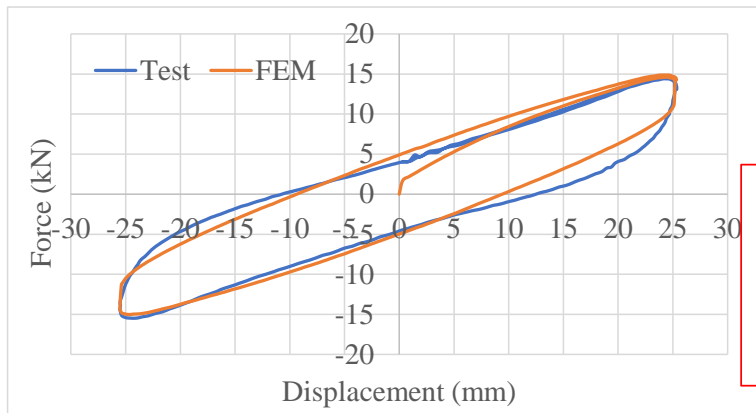
同定結果(Cases 50%, 100%, 200%を使って同定)



Case 50%: Maximum shear strain is 50%



Case 100%: Maximum shear strain is 100%



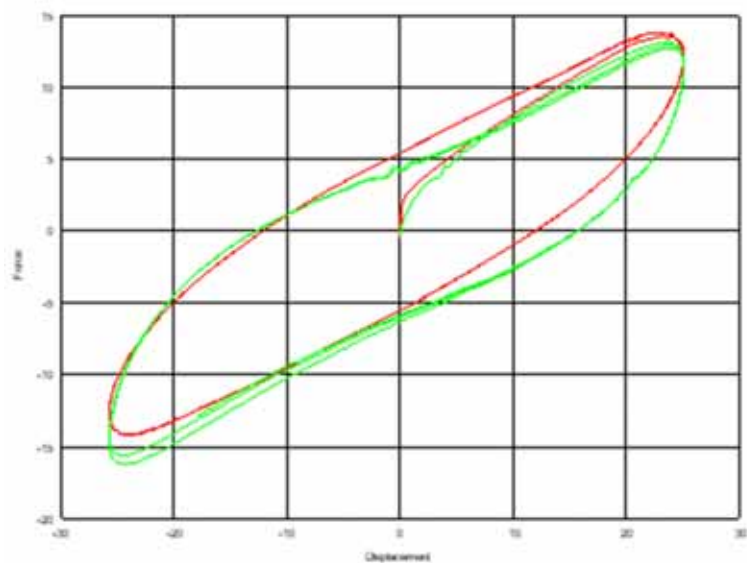
Case 200%: Maximum shear strain is 200%

200%については前のスライドよりもずれがある

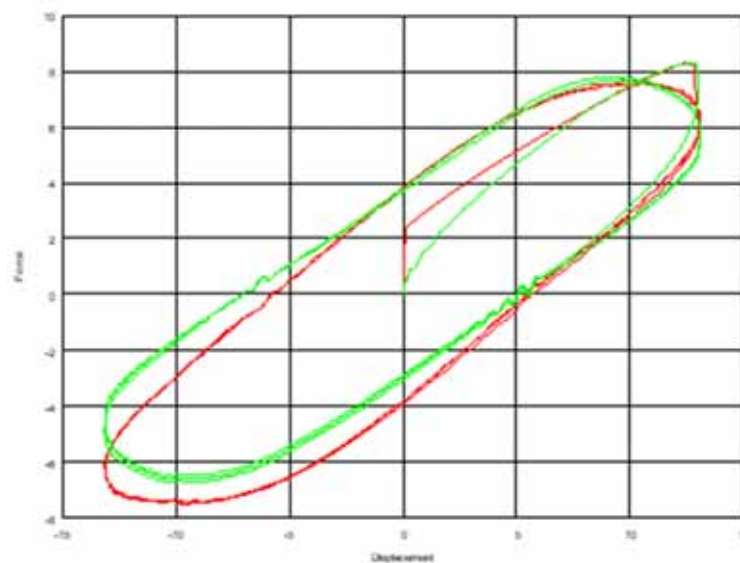
前のスライドよりもCases 50%, 100% はよく合っている

材料試験供試体の楕円载荷の結果

Case 200%のみで同定した材料パラメータによる



長辺方向 (200%)



短辺方向 (100%)

予想に反し、よく合っている。実機のゴムは本材料試験供試体よりも扁平だから？

損傷力学に基づく構成則

- 鋼材の延性破断
- コンクリートの圧壊, クラック

損傷力学

D : Isotropic damage degradation parameter **損傷変数(空隙を表す)**

σ : Stress tensor, $\tilde{\sigma}$: Effective stress tensor

$$\tilde{\sigma} = [1 / (1 - D)] \sigma$$

E_0 : Initial elastic stiffness tensor

$E = (1 - D)E_0$: Effective elastic stiffness tensor **損傷変数により弾性**

ε^e : Elastic strain tensor **係数が低減される**

$$\tilde{\sigma} = E_0 \varepsilon^e, \quad \sigma = E \varepsilon^e = (1 - D)E_0 \varepsilon^e$$

損傷により強度と応力が共に低減される

J. Lee and G. Fenves, Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures, J. Struct. Eng., Vol. 124(8), pp. 892-900, 1998.

損傷を考えた弾塑性

降伏条件

$$F(\tilde{\boldsymbol{\sigma}}, \boldsymbol{\alpha}, \kappa) = 0$$

$\boldsymbol{\alpha}$: Back stress tensor, κ : Size of yield surface



$$\tilde{F}(\boldsymbol{\sigma}, \hat{\boldsymbol{\alpha}}, \hat{\kappa}) = 0$$

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}} = (1 - D) \boldsymbol{\alpha}, \quad \hat{\kappa} = (1 - D) \kappa$$

陰的有限要素法向け時間積分アルゴリズム

```
for 時間増分ループ(時間ステップ $k$ )  
  for Newton-Raphson反復ループ ( $D$ は固定)  
    変位増分の計算  
    応力積分, 塑性ひずみ増分  
    不釣り合い力の計算  
  end for
```

損傷変数 D_k の計算

```
if  $D_k > D_{k-1}$   
   $R = (1 - D_k) / (1 - D_{k-1})$   
   $\sigma = R\sigma, E = RE$ 等
```

不釣り合い力の計算(次の時間ステップに持ち越す)

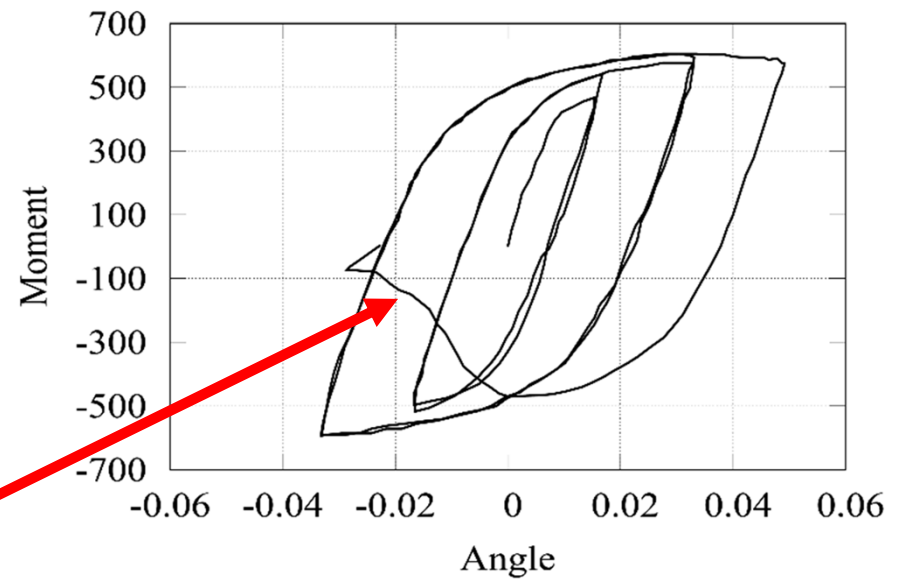
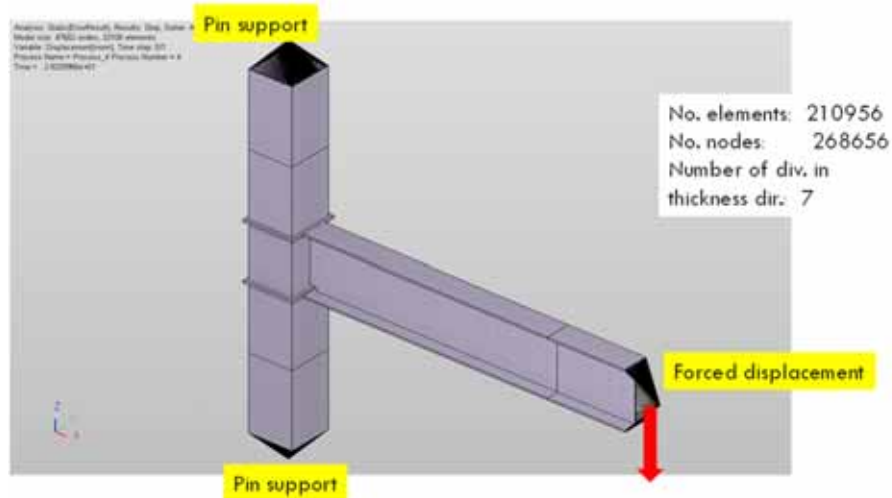
```
end if
```

- 損傷変数は陽的に更新する
- 延性破断を考慮した鋼材, コンクリートの圧壊と引張クラックに対して共通のアルゴリズムになっている
- コンクリートの圧壊については, 損傷変数 D を Newton-Raphsonループの中の応力積分で陰的に求める手法も開発している

延性破断を考慮した鋼材構成則

Makoto Ohsaki, Jun Fujiwara, Tomoshi Miyamura, and Hisashi Namba, "Implicit integration analysis of ductile fracture of steel frame under cyclic deformation," *Japan Architectural Review*, Vol. 5, pp. 150–163 (2022) (DOI: [10.1002/2475-8876.12264](https://doi.org/10.1002/2475-8876.12264))

研究背景と目的



- 実験をすると低サイクル載荷でも鋼材の延性破断により急激に耐力が低下している
- 長周期, 長時間地震動により多数の繰り返しができる可能性がある



延性破断を考慮した鋼材の構成則,
時間積分手法の開発とV&V

延性破断モデル

- Linear cumulative damage rule
 - ▣ S-N curve, Minor's rule, modified Minor's rule
- Mason-Coffin rule
 - ▣ Relation between strain amplitude and number of cycles
- Computational damage model
 - ▣ Gurson model: Damage due to void growth
- Fracture index
 - ▣ Index using plastic strain and stress triaxiality (応力3軸度)
 - ▣ SMCS (stress modified critical strain)

SMCSに基づく損傷指標 (1)

σ_m : Mean stress, σ_e : Equivalent stress (von Mises stress)

$T = \frac{\sigma_m}{\sigma_e}$: Stress triaxiality **応力3軸度**

(1/3 for uniaxial tension, 2/3 for uniform biaxial tension)

$\varepsilon^c = \beta \exp(-1.5T)$: fracture strain

- J. W. Hancock and A. C. Mackenzie, On the mechanism of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 24, pp. 147-169, 1976.

SMCSに基づく損傷指標 (2)

損傷条件 $\hat{\varepsilon}^p \geq \varepsilon^c = \beta \exp(-1.5T)$

$\hat{\varepsilon}^p$: accumulated plastic strain for tension state $\sigma_m > 0$

➡ $\alpha \geq \beta$ $\exp(1.5T)$ を両辺にかけた。 β は材料定数。

($\alpha = \hat{\varepsilon}^p \exp(1.5T)$): deformation parameter)

Uniaxial tension: $T = 1/3 \Rightarrow \alpha = e^{0.5} \hat{\varepsilon}^p = 1.649 \hat{\varepsilon}^p$

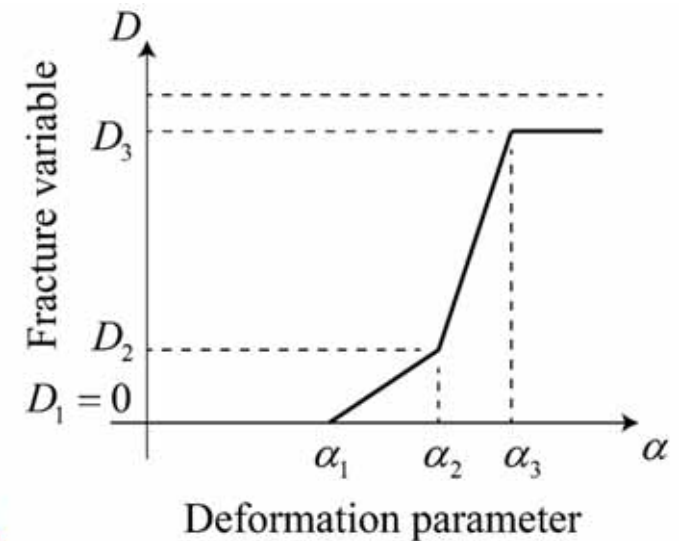
- A. M. Kanvinde and G. G. Deierline, Void growth model and stress modified critical strain model to predict ductile fracture in structural steels, J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 132(12), pp. 1907-1918, 2006.
- S. El-Tawil, E. Vidarsson, T. Mikesell and S. K. Kunnath, Inelastic behavior and design of steel panel zones, J. Struct. Eng, ASCE, Vol. 125, No. 2, pp. 183-193, 1999.

損傷指標を用いた損傷モデル

D : 損傷変数

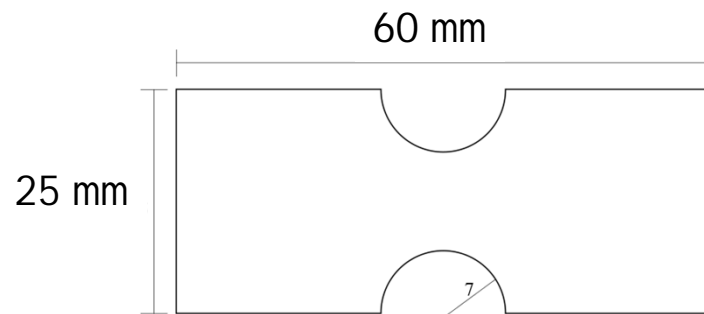
$$D = \begin{cases} 0 & (\alpha \leq \alpha_1) \\ \frac{D_2}{\alpha_2 - \alpha_1}(\alpha - \alpha_1), & (\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2) \\ \alpha_2 + \frac{D_3 - D_2}{\alpha_3 - \alpha_2}(\alpha - \alpha_2) & (\alpha_2 \leq \alpha \leq \alpha_3) \\ D_3 & (\alpha_3 \leq \alpha) \end{cases}$$

β に相当する



区分線形モデル(急激な応力の変化による数値的な不安定を避ける)

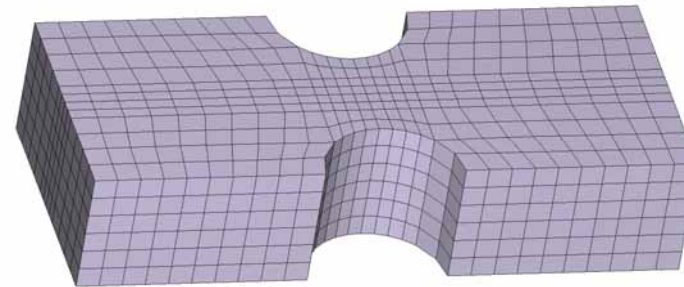
Obata等のノッチ付き棒モデル



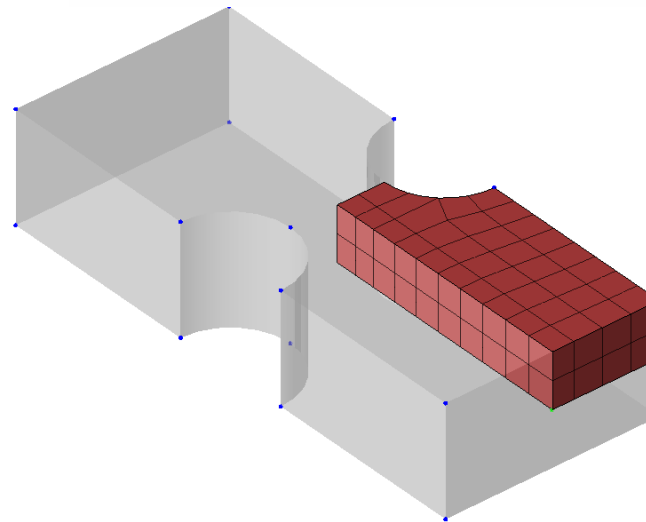
Thickness = 12.7 mm

Notched rod model

1/8 model:
No. elements: 71680
No. nodes: 78710



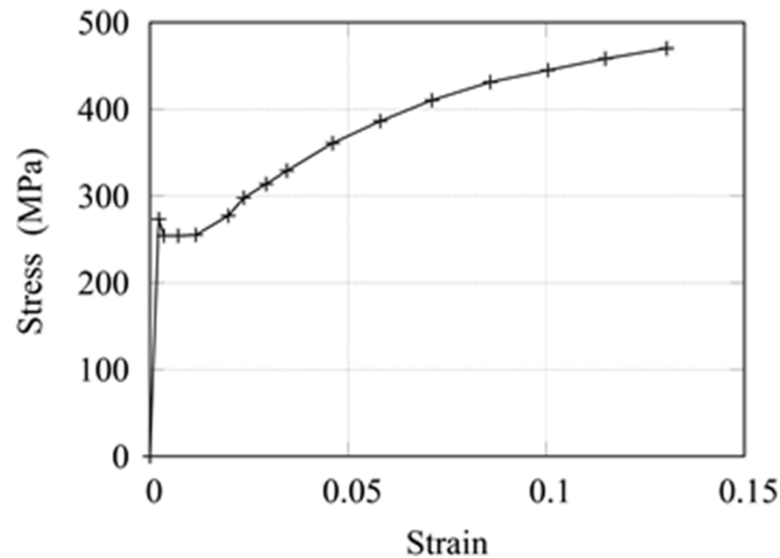
Young's modulus $E = 200$ GPa
Poisson's ratio = 0.3



No. mesh in thickness dir.: 16

M. Obata, A. Mizutani and Y. Goto, The verification of plastic constitutive relation and its application to FEM analysis of plastic fracture of steel members, J. JSCE, No. 626/I-48, pp. 185-195, 1999. (in Japanese)

ノッチなし棒モデルの解析による硬化係数の同定

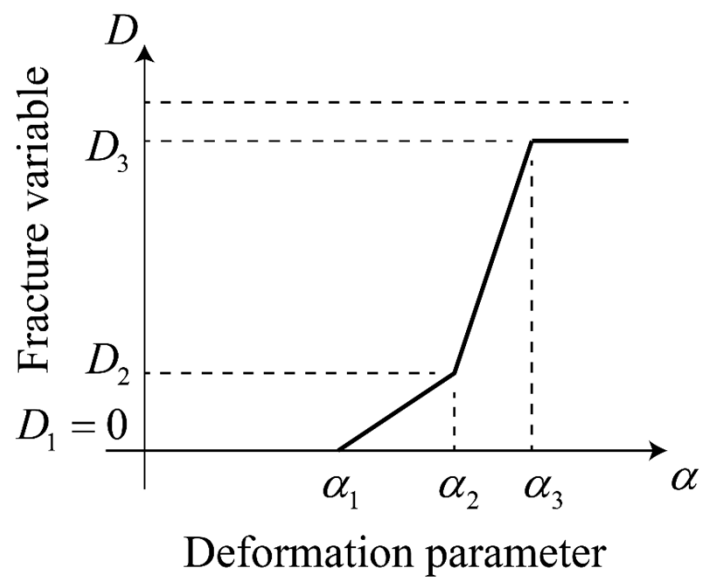


- この曲線に合うように区分線形近似された硬化係数を同定
- 降伏棚もモデル化できる複合硬化則を使用
- 軟化のない硬化曲線になっている

実験結果(真応力, 真ひずみ関係)

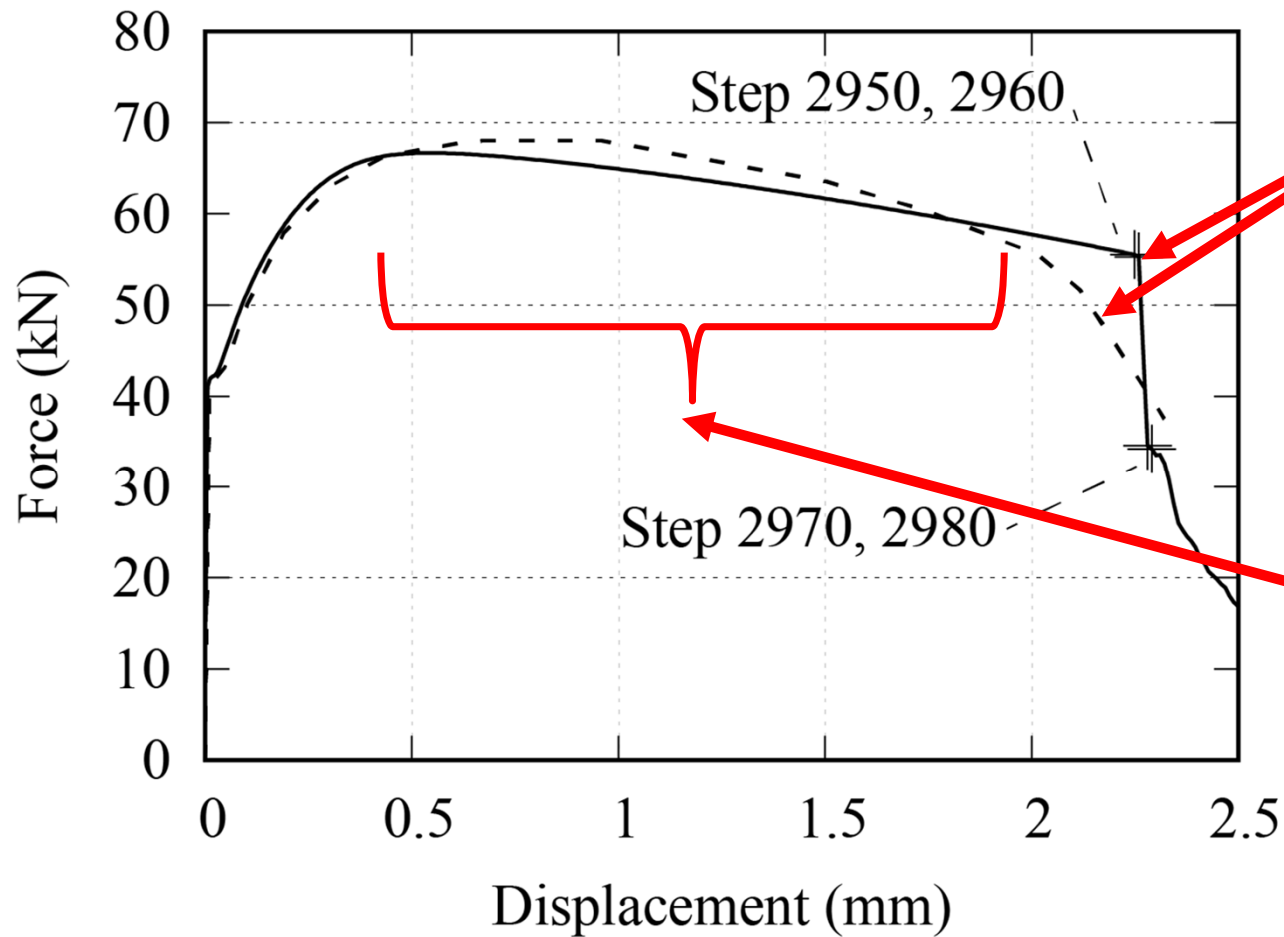
M. Ohsaki, T. Miyamura and J. Y. Zhang, A piecewise linear isotropic-kinematic hardening model with semi-implicit rules for cyclic loading and its parameter identification, Computer Modeling and Engineering, Vol. 111(4), pp. 303-333, 2016.

区分線形損傷モデルのパラメータ



	α	D
0	0	0
1	2.4	0
2	2.45	0.2
3	2.5	0.9

荷重変位関係

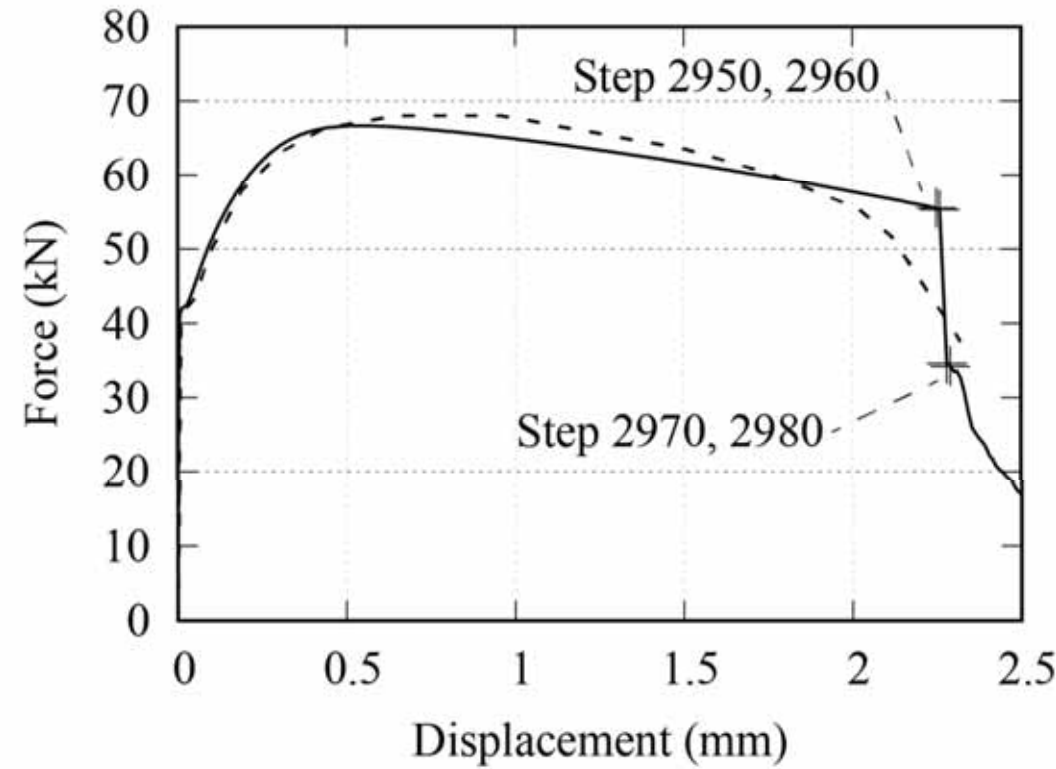
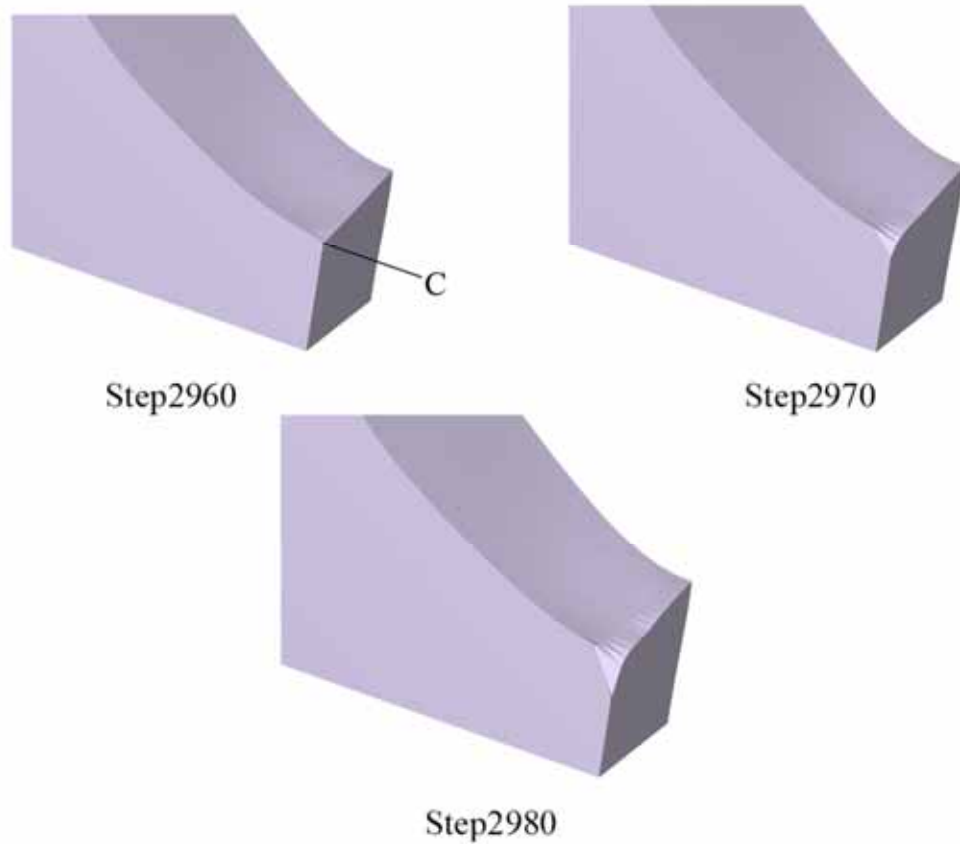


破線:実験
実線:解析

損傷による軟化

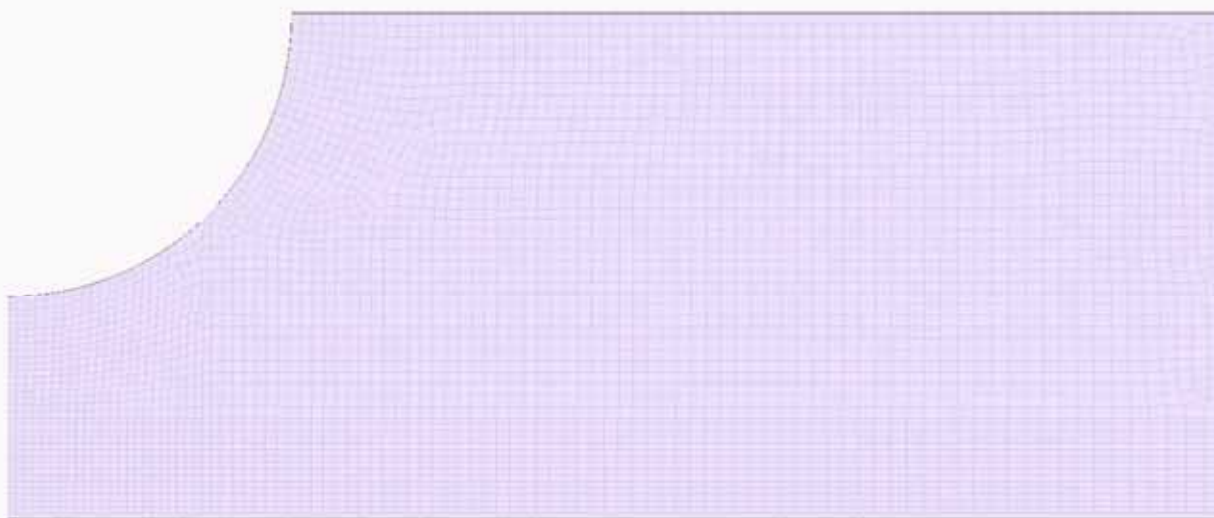
損傷による軟化ではなく、ネッキングによる軟化(真応力は増加している)

変形

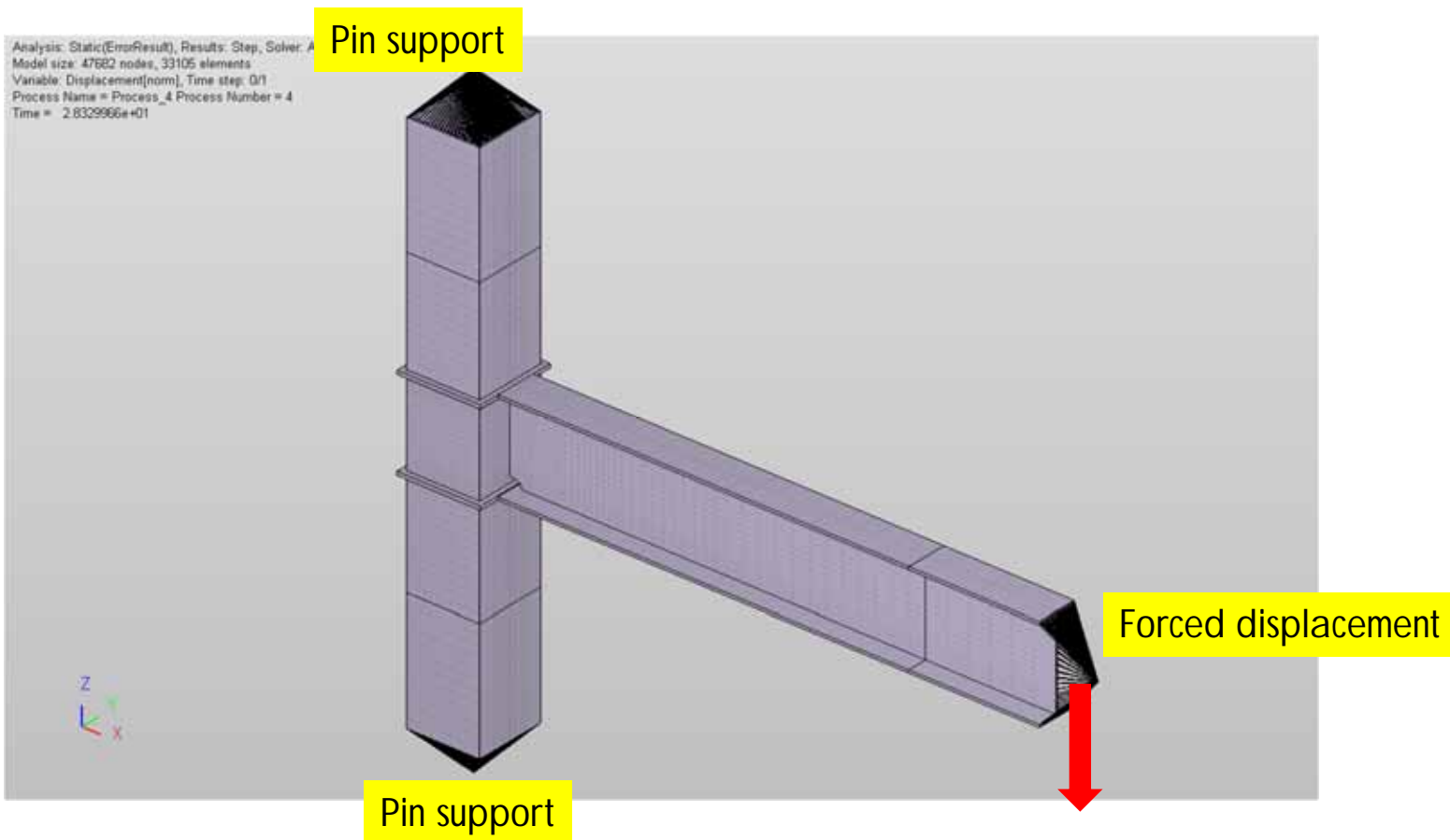


動画

Analysis: Static, Results: Step, Solver: ADVC Solver 2019-R1.0
Model size: 79711 nodes, 71690 elements
Variable: Displacement[s], Time step: 0.573
Process Name = Process_0 Process Number = 0
Time = 1.000000e-02
Deformation factor = 1.000000e+00



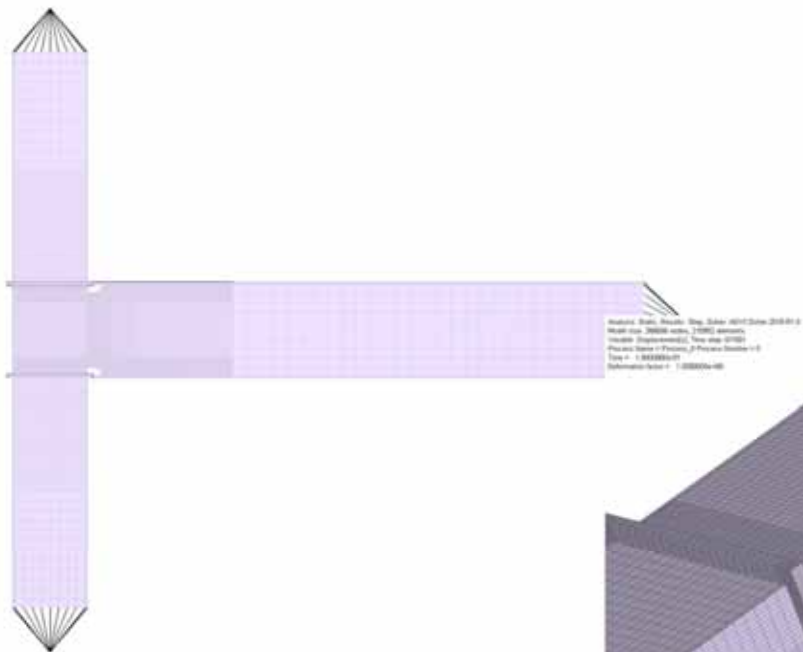
梁柱モデルの解析



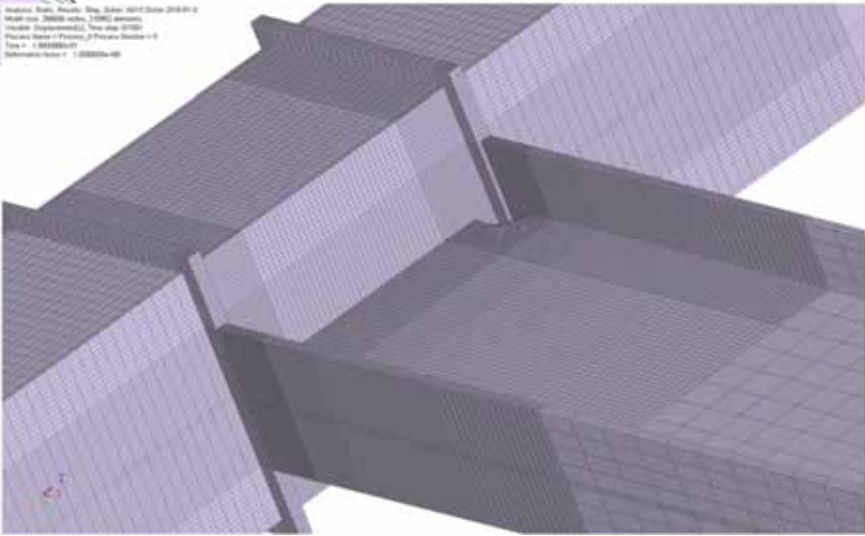
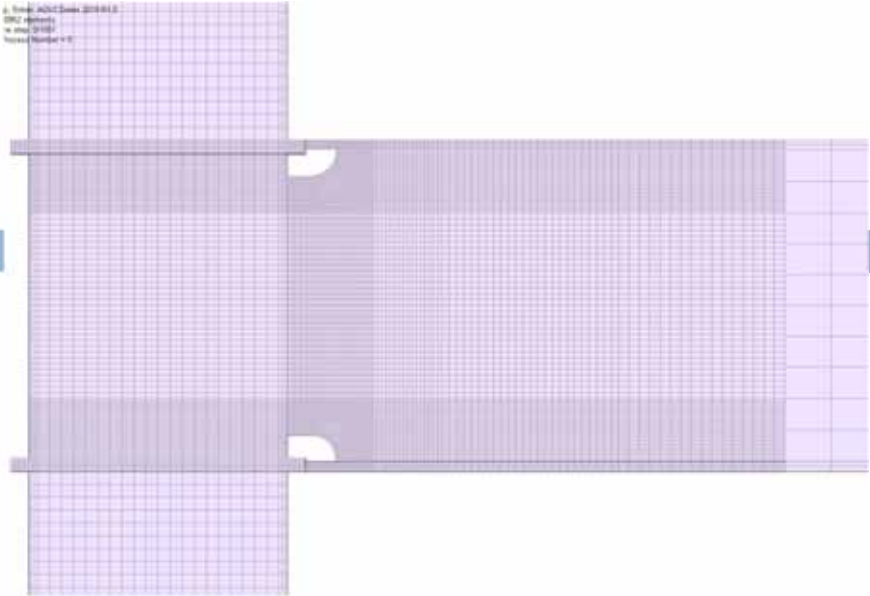
No. elements: 210956
No. nodes: 268656
Number of div. in
thickness dir.: 7

福岡大祐, 難波尚, 森川
翔平, 「複数回の強震動に
より累積損傷を受ける実
大3層鋼骨組のEディフェン
ス加振実験 その2 柱梁
部分架構実験」, 日本建築
学会大会梗概, 構III, 977-
978, Paper No. 22489,
2014

メッシュの詳細

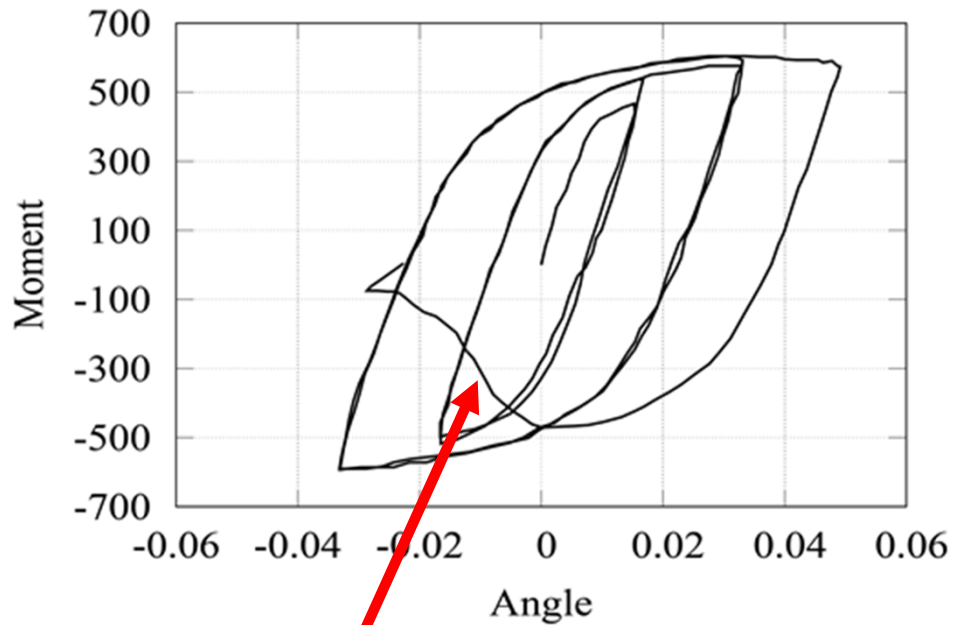


Mesh Size: 20000 nodes, 21000 elements
Mesh Size: 20000 nodes, 21000 elements
Mesh Size: 20000 nodes, 21000 elements
Mesh Size: 20000 nodes, 21000 elements

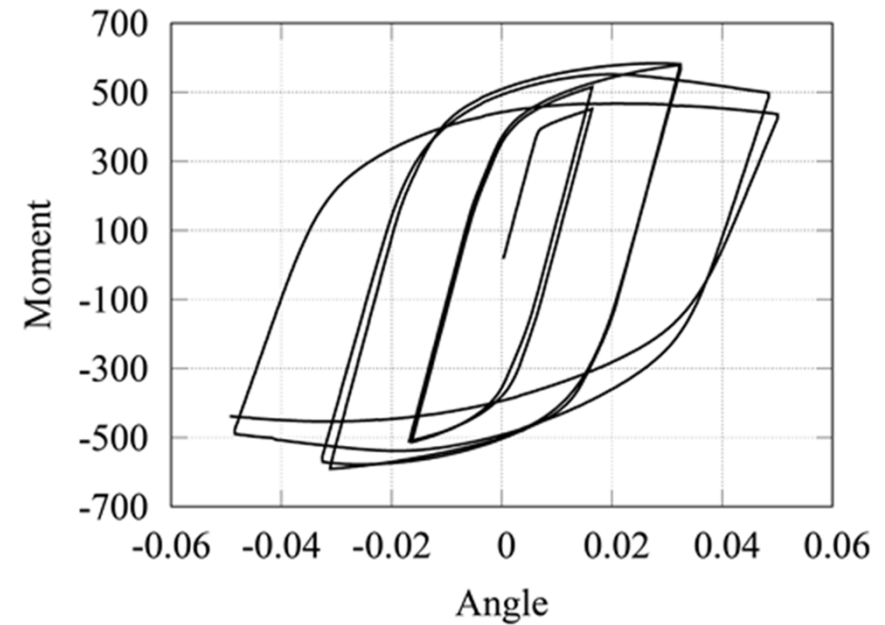


モーメント回転角関係

実験



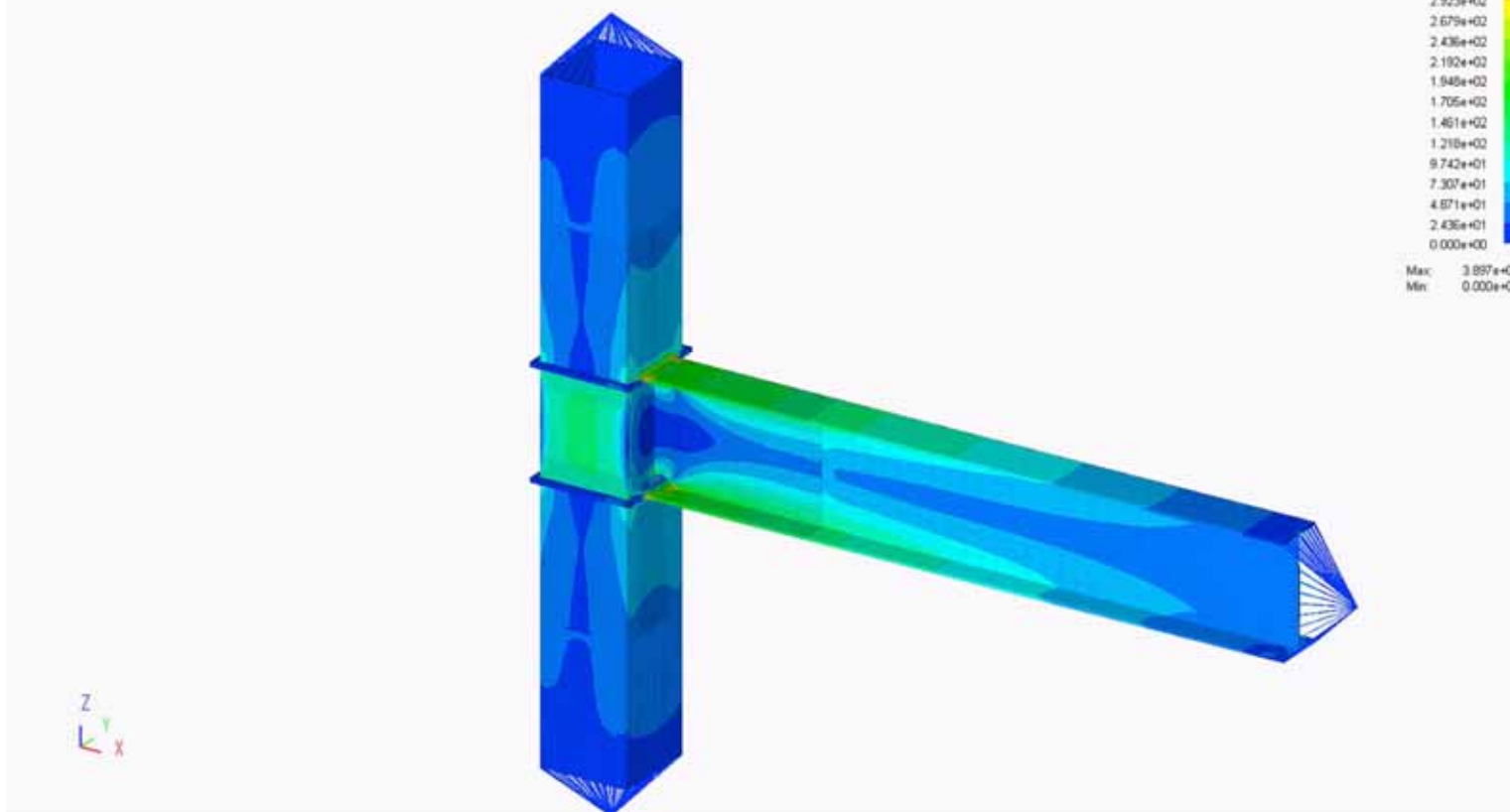
解析



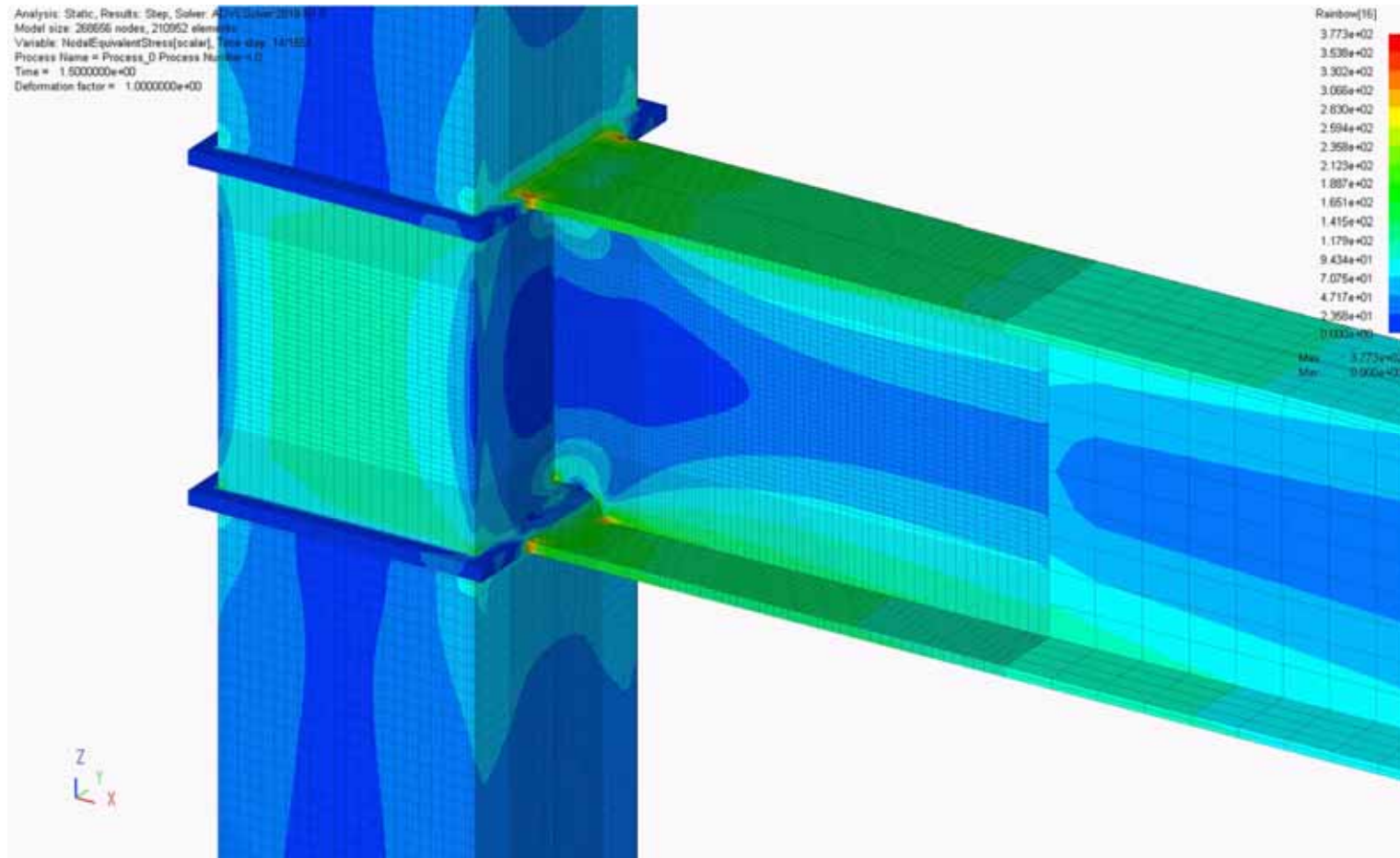
解析では損傷は進展したものの、実験のこの部分の耐力低下は再現できなかった

動画(1)

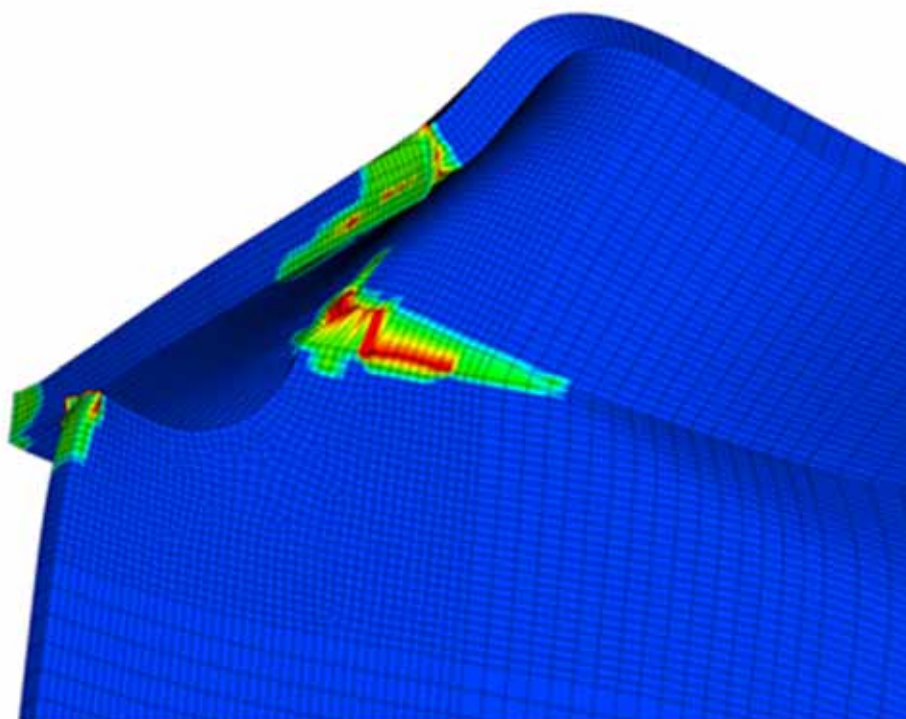
Analysis: Static, Results: Step, Solver: ADVC Solver 2019-R1.0
Model size: 268656 nodes, 210952 elements
Variable: NodeEquivalentStress[scalar], Time step: 17/1951
Process Name = Process_0 Process Number = 0
Time = 1.8000000e+00
Deformation factor = 1.0000000e+00



動画(2)



変形と損傷変数のコンター



フランジが座屈したスカ
ラップ付近

RC構造物の大規模詳細FE解析のためのコンクリート構成則開発

山下拓三, 藤原淳, 宮村倫司, 「ポアソン効果を考慮した引張クラックモデルの開発とRC構造物の大規模有限要素解析への適用」, 日本計算工学会論文集, Vol. 2022(2022年7月28日), Paper No.20220006 (DOI: 10.11421/jsces.2022.20220006)

概要

50

- **コンクリートの材料構成則の開発**
- **解析事例**
 - ▣ **梁部材実験の再現解析によるValidation**
 - ▣ **E-ディフェンスによる10層RC 造建物の実大実験の再現解析**

コンクリート構成則(圧縮側)

弾塑性モデル: 拡張Drucker-Pragerモデル

$$F = G = \sqrt{l^2 + q^2} - p \tan \phi - d'$$

$$l = \epsilon \sigma_0^y \tan \phi$$

$$d' = \sqrt{l^2 + (\sigma^y)^2} - \frac{\sigma^y}{3} \tan \phi$$

p : 静水圧

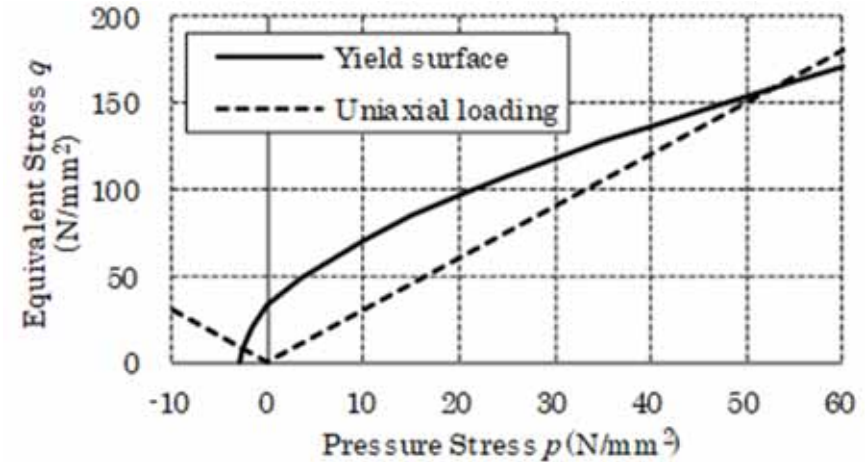
q : 相当応力 (Mises応力)

ϕ : 内部摩擦角

ϵ : 双曲線パラメータ

σ^y : 降伏応力

σ_0^y : 初期降伏応力



圧壊を表す損傷モデル

$$E = (1 - D)E_0$$

$$D = \begin{cases} 0 & \bar{\epsilon}_c^p \leq e_0 \\ D_{max} \frac{\bar{\epsilon}_c^p - e_0}{e_1 - e_0} & e_0 \leq \bar{\epsilon}_c^p \leq e_1 \\ 0 & e_1 \leq \bar{\epsilon}_c^p \end{cases}$$

E_0 : 初期ヤング率

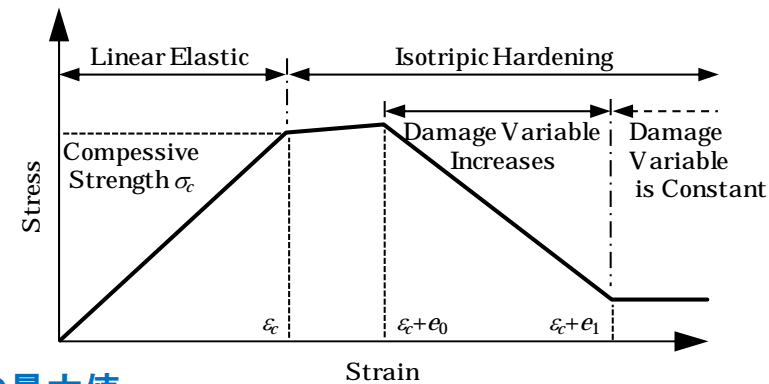
E : 損傷を考慮したヤング率

$\bar{\epsilon}_c^p$: 圧縮側の累積塑性ひずみ

e_0, e_1 : 材料パラメータ

D : 損傷変数

D_{max} : 損傷変数の最大値

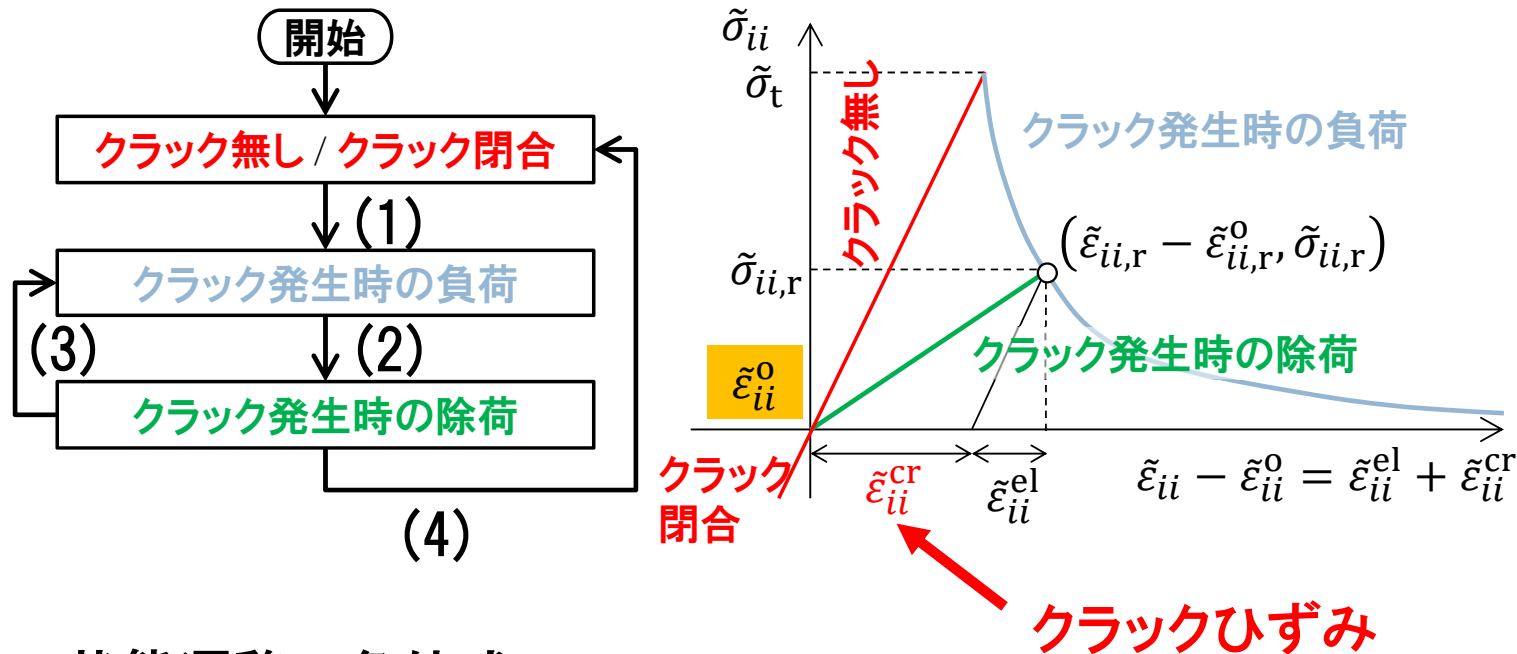


引張クラックモデル

- 試行応力をスペクトル分解し応力の主値 $\tilde{\sigma}_{ii}$ ($i = 1, 2, 3$)を求める
- $\tilde{\sigma}_{ii}$ が引張クラック発生応力 $\tilde{\sigma}_t$ を超えると, 主方向による座標系(クラック座標系)の応力 $\tilde{\sigma}_{ii}$ とひずみ $\tilde{\varepsilon}_{ii}$ の関係で引張クラックをモデル化する
- クラック座標系のひずみ $\tilde{\varepsilon}$ は弾性ひずみ $\tilde{\varepsilon}^{\text{el}}$, 塑性ひずみ $\tilde{\varepsilon}^{\text{pl}}$, クラックひずみ $\tilde{\varepsilon}^{\text{cr}}$ の3成分に加算分解する

$$\tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}^{\text{el}} + \tilde{\varepsilon}^{\text{pl}} + \tilde{\varepsilon}^{\text{cr}}$$

引張クラックの状態遷移図



状態遷移の条件式

$\tilde{\sigma}_{ii} > \tilde{\sigma}_t$	(1)	$\dot{\tilde{\varepsilon}}_{ii} - \dot{\tilde{\varepsilon}}_{ii}^0 < 0$	(2)
$\dot{\tilde{\varepsilon}}_{ii} - \dot{\tilde{\varepsilon}}_{ii}^0 > \dot{\tilde{\varepsilon}}_{ii,r} - \dot{\tilde{\varepsilon}}_{ii,r}^0$	(3)	$\tilde{\varepsilon}_{ii} - \tilde{\varepsilon}_{ii}^0 < 0$	(4)

原点ひずみ ε_{ii}^0 の導入による側圧の影響 (ポアソン効果) の考慮

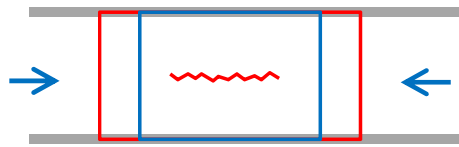
弾性構成則を以下のように解釈する.

$$\tilde{\sigma}_{ii} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \{ (1-\nu)\tilde{\varepsilon}_{ii}^{el} + \nu(\tilde{\varepsilon}_{jj}^{el} + \tilde{\varepsilon}_{kk}^{el}) \} = E_{iii}(\tilde{\varepsilon}_{ii}^{el} - \tilde{\varepsilon}_{ii}^0)$$

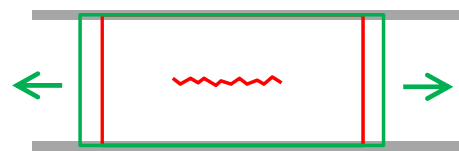
$$E_{iii} := \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\tilde{\varepsilon}_{ii}^0 := -\frac{\nu}{(1-\nu)}(\tilde{\varepsilon}_{jj}^{el} + \tilde{\varepsilon}_{kk}^{el})$$

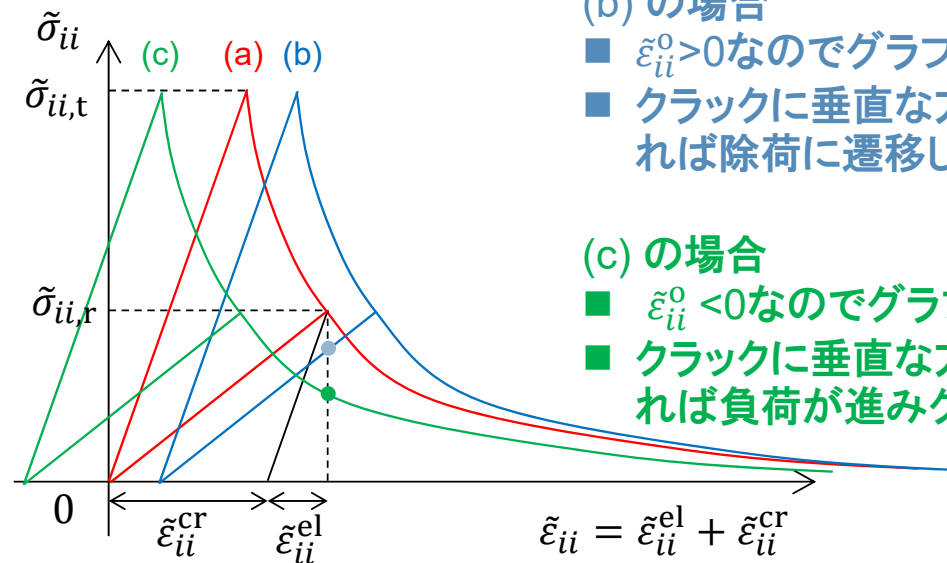
(a) 側方から力が加わらない場合



(b) 側方から圧縮を受ける場合



(c) 側方から引張を受ける場合



(b) の場合

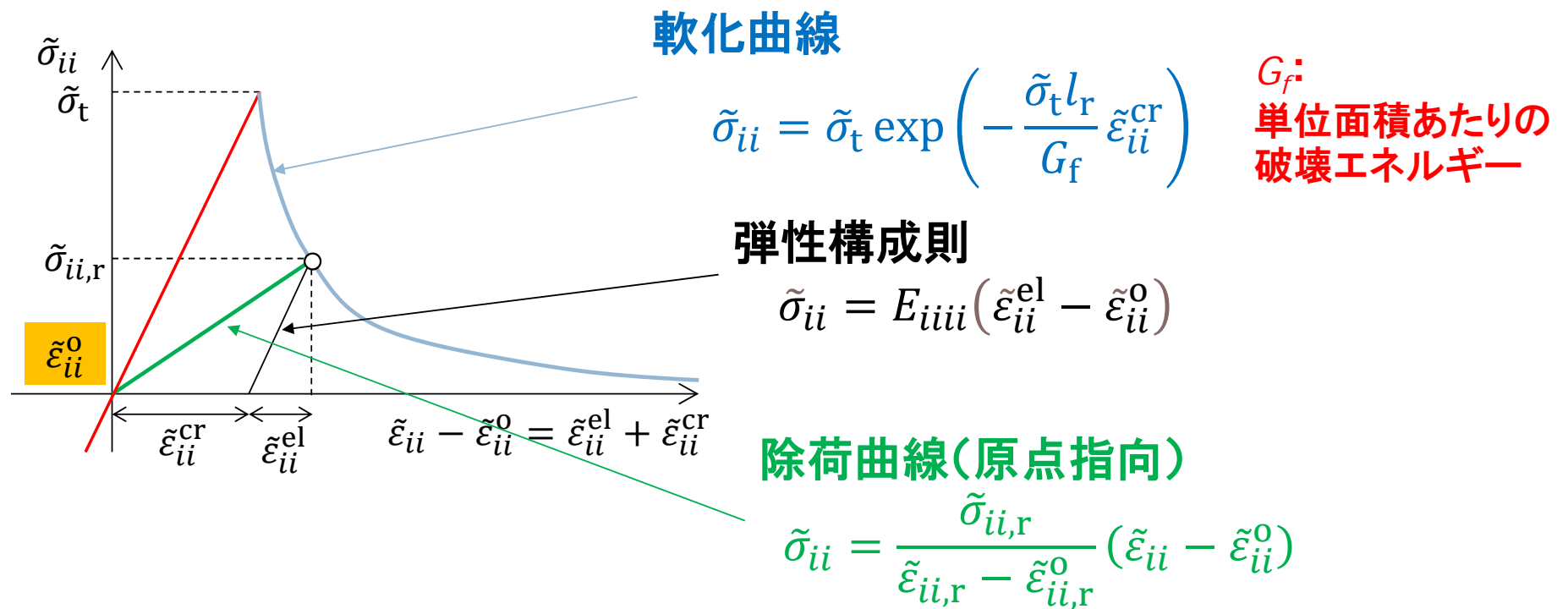
- $\tilde{\varepsilon}_{ii}^0 > 0$ なのでグラフは右に移動
- クラックに垂直な方向のひずみが増加しなければ除荷に遷移してクラックが小さくなる

(c) の場合

- $\tilde{\varepsilon}_{ii}^0 < 0$ なのでグラフは左に移動
- クラックに垂直な方向のひずみが増加しなければ負荷が進みクラックが大きくなる

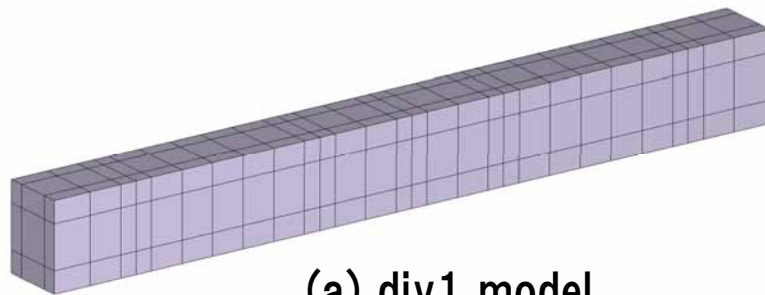
負荷時と除荷時の内部変数の求解

負荷時: 弾性構成則の式と軟化曲線の式を連立して解く
 除荷時: 弾性構成則の式と除荷曲線の式を連立して解く

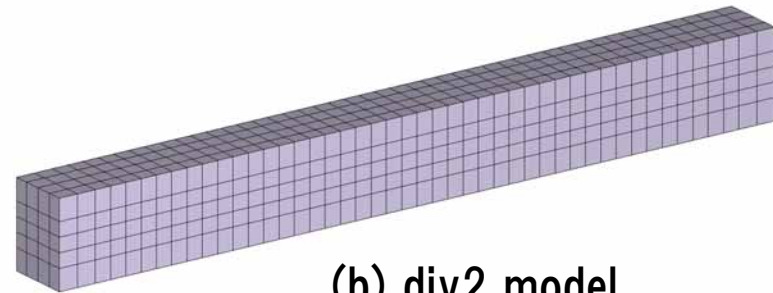


RC 梁の4点曲げの再現解析

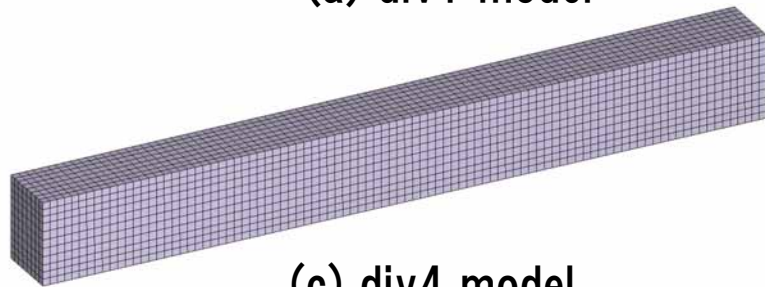
コンクリートと鉄筋のメッシュモデル



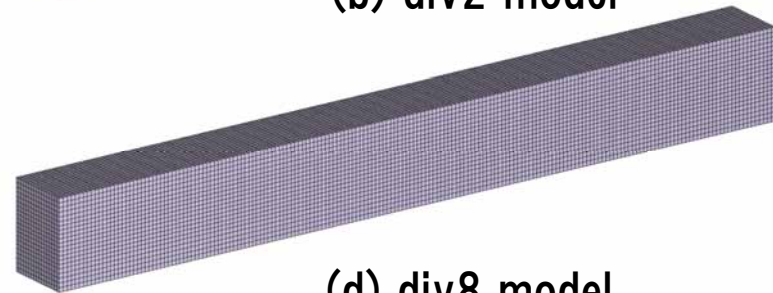
(a) div1 model



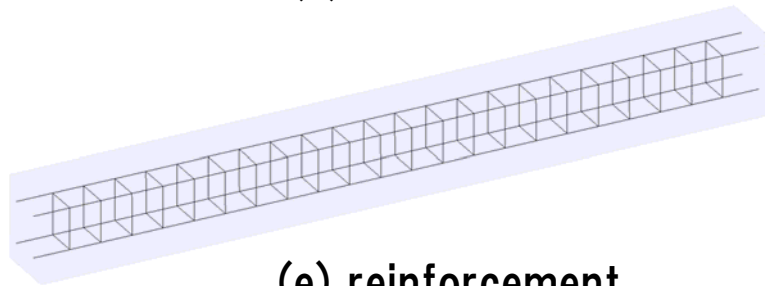
(b) div2 model



(c) div4 model



(d) div8 model



(e) reinforcement

div1: 464 nodes, 452 elements

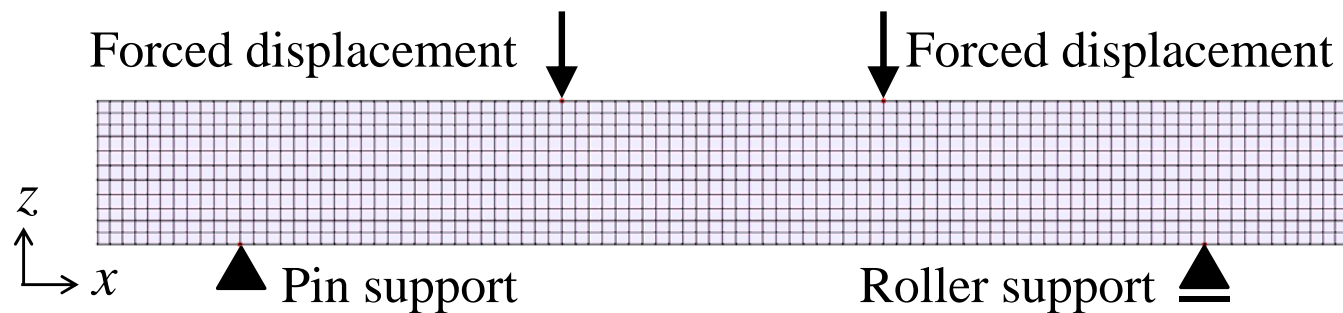
div2: 1,410 nodes, 1,324 elements

div4: 10,260 nodes, 9,044 elements

div8: 74,052 nodes, 68,026 elements

RC梁モデルの境界条件

58



ケース名	dI01	dI001	dI0001	dI00001
強制変位増分 [mm]	0.1	0.01	0.001	0.0001

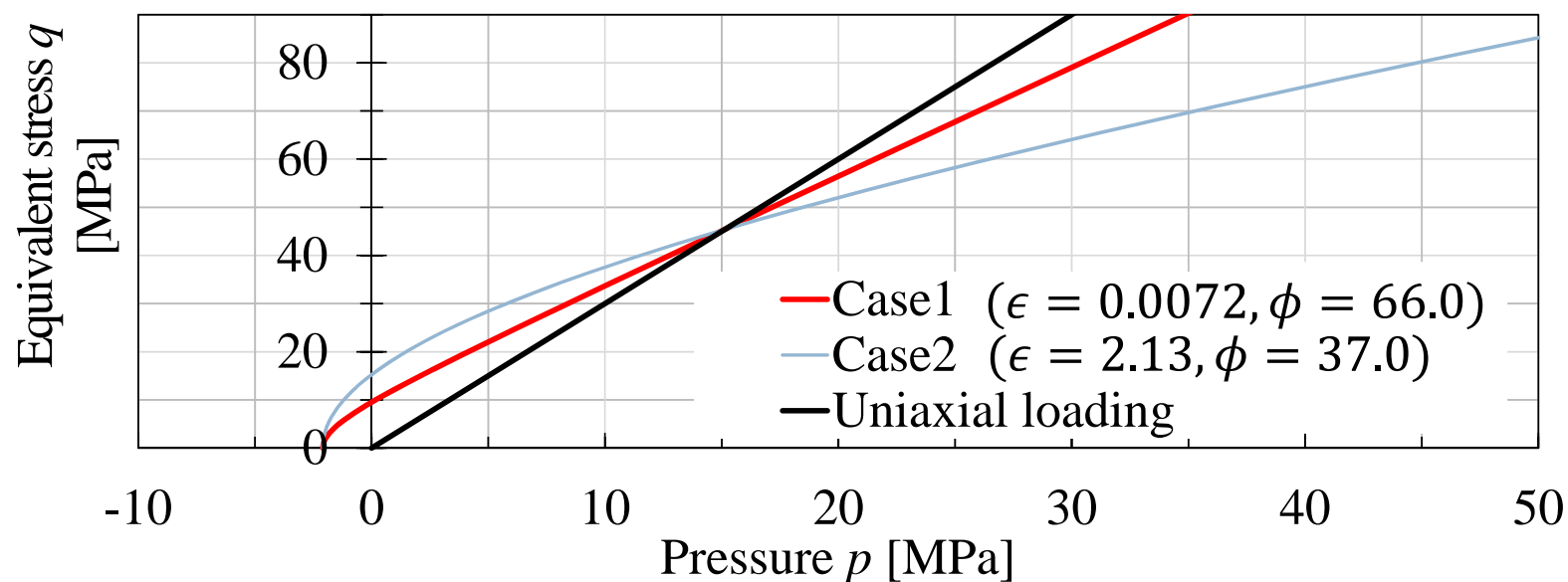
車谷麻緒, 岡崎慎一郎, 山本佳士, 上田尚史, 小倉大季: 不確かさの定量化に向けた RC はりの一斉載荷実験, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol. 75, No. 2, 2019, pp.l_411-l_420

材料パラメータの設定

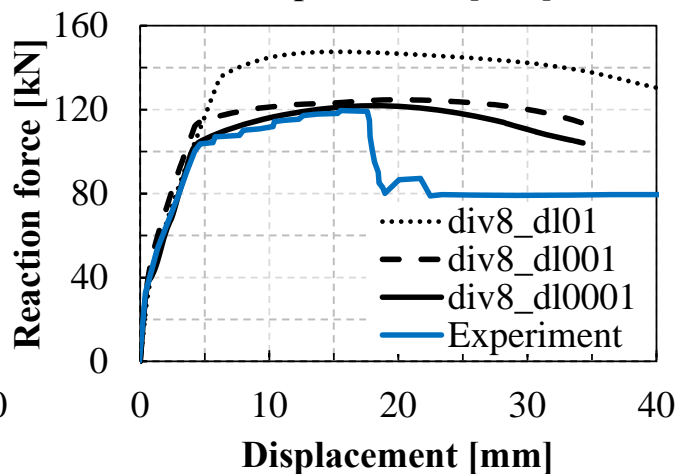
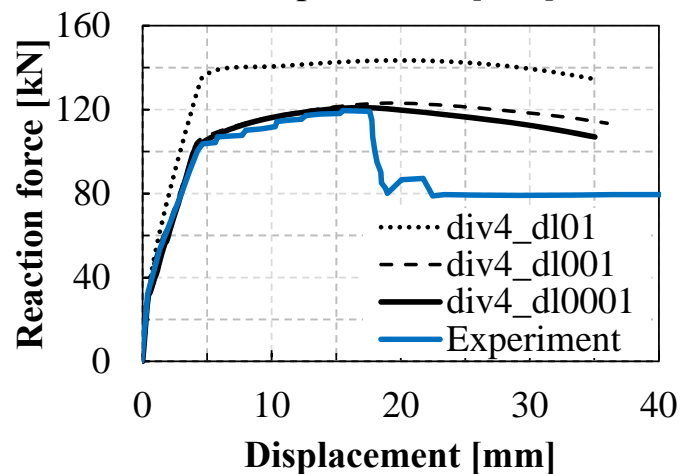
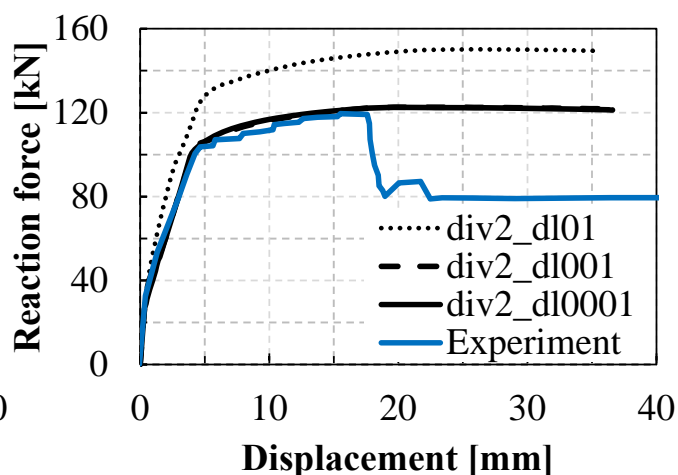
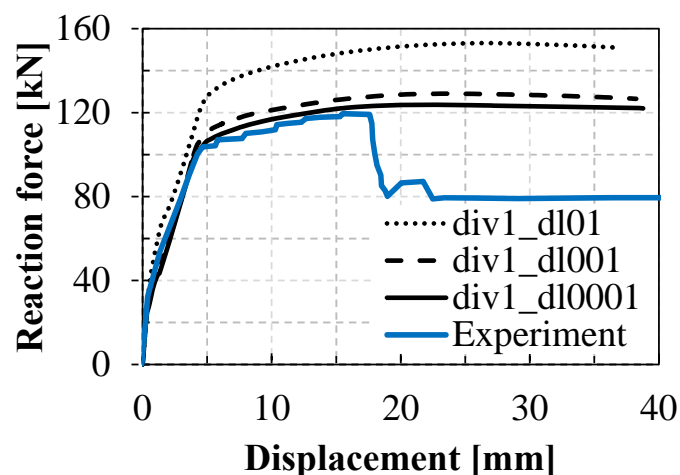
59

E [GPa]	ν	σ_t [MPa]	G_f [N/mm]	σ_0^y [MPa]	硬化係数 [MPa]		ϕ [deg.]	ϵ	e_0	e_1	D_{max}
34.0	0.2	4.54	0.1	45.1	34.0	Case1	66.0	0.0072	0.0001	0.004	0.9
						Case2	37.0	2.13			

拡張Drucker-Prager則の降伏曲面

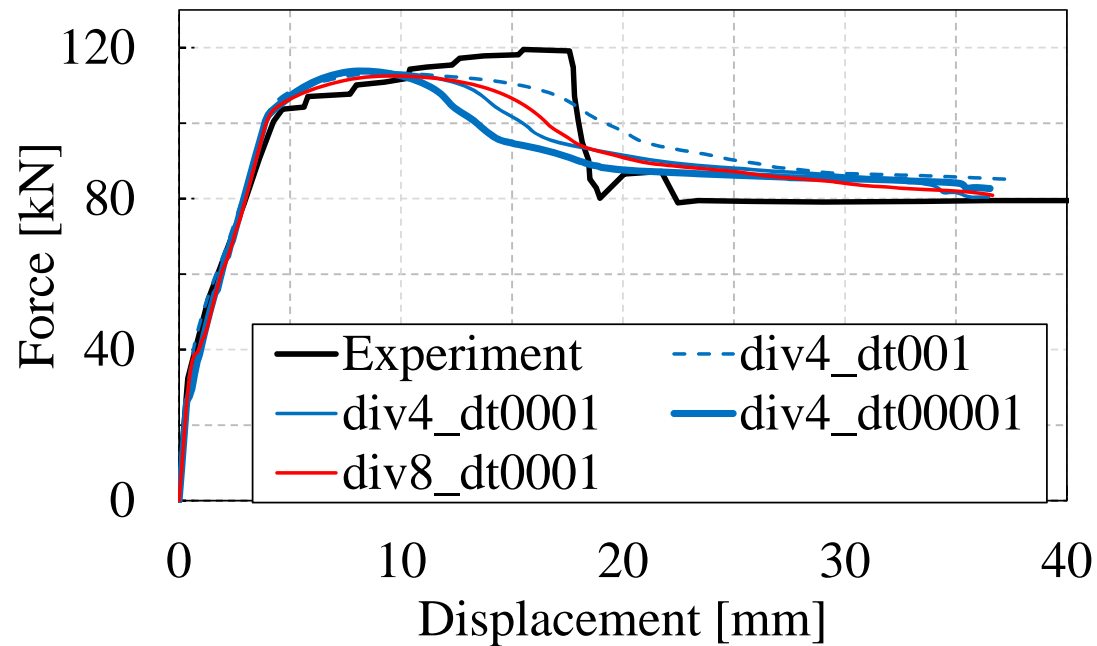


荷重変位関係への荷重増分の影響(Case1)



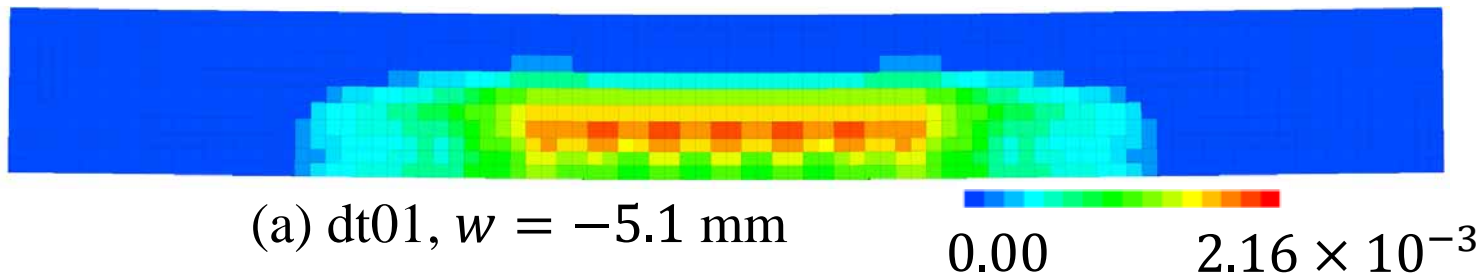
- 増分が大きすぎると固い結果となる
- 粗い分割のdiv1でも良好に実験を再現できている
- 細かい分割のdiv4, div8では軟化挙動をよく再現できている

荷重変位関係(Case2)

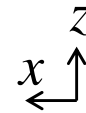
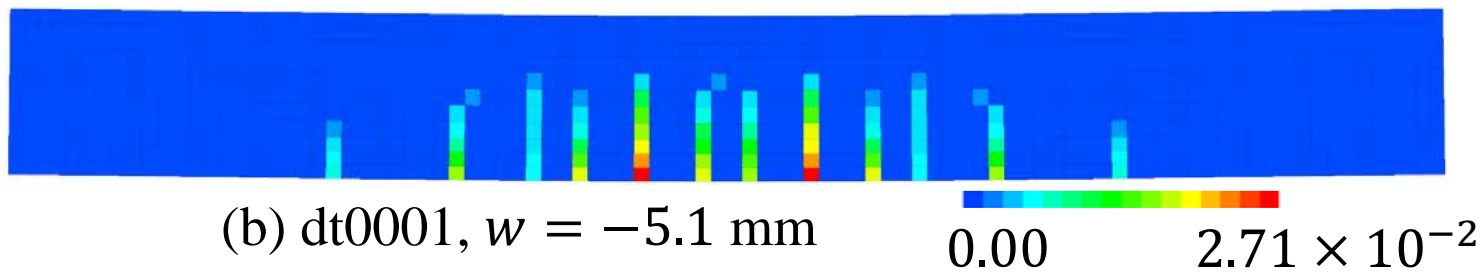


Drucker-Prager則の内部摩擦角,
双曲線パラメータを調整すること
で軟化挙動の再現性が良くな
っている

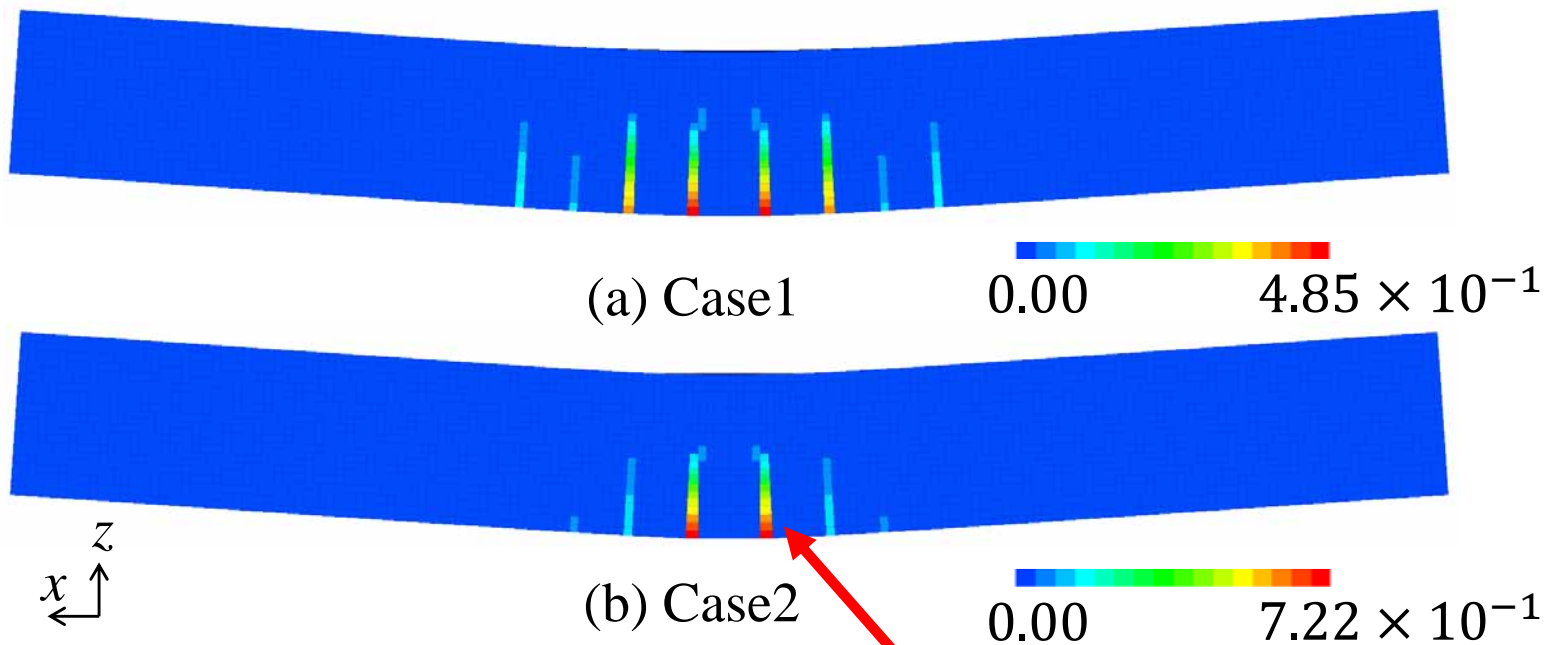
クラックひずみ ε_{xx} の分布 (div4, Case1)



時間増分によってクラックひずみの分布が異なっている



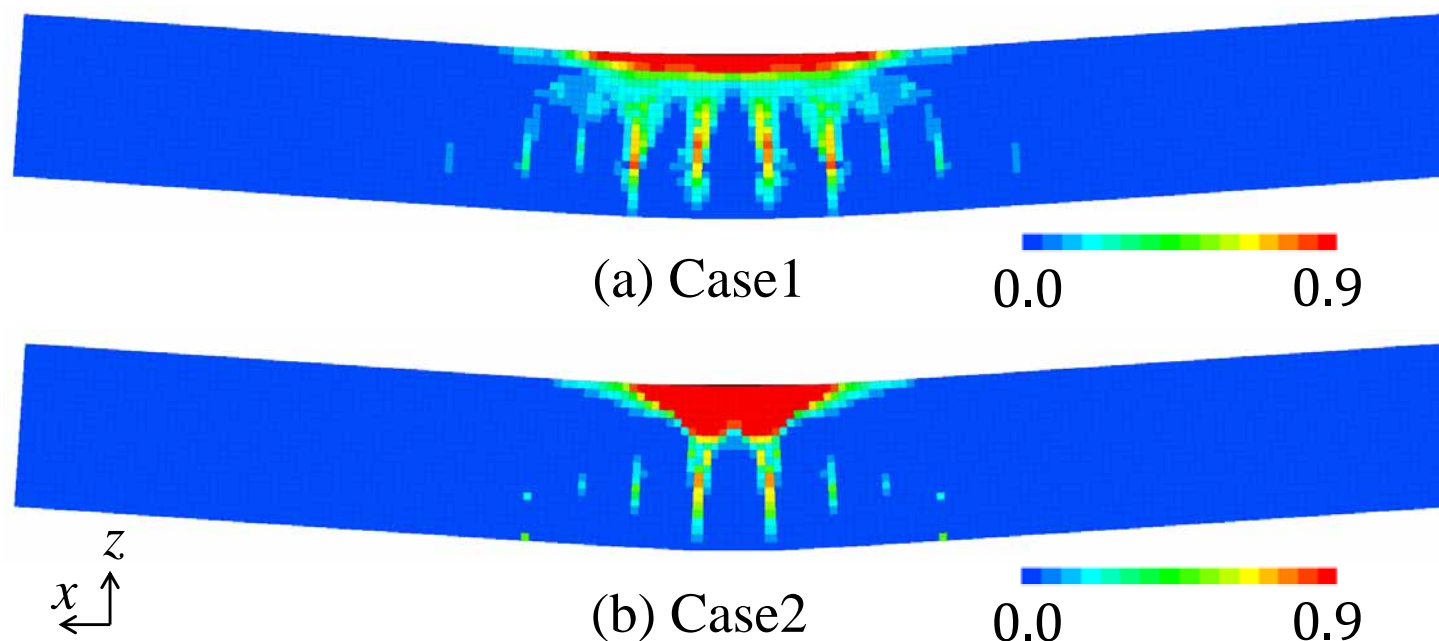
最終ステップ($w=30\text{mm}$)でのクラックひずみ ε_{xx} の分布 (div8_dt0001)



- div4に比べて、クラックひずみの発生場所が中心付近に局所化している
- Case2の方がより局所化しており、ヒンジ状の変形となっている

分散クラックモデルであるが、クラックひずみがいくつかの領域で局所化している

最終ステップ($w=30\text{mm}$)での損傷変数 D の分布 (div8_dt0001)

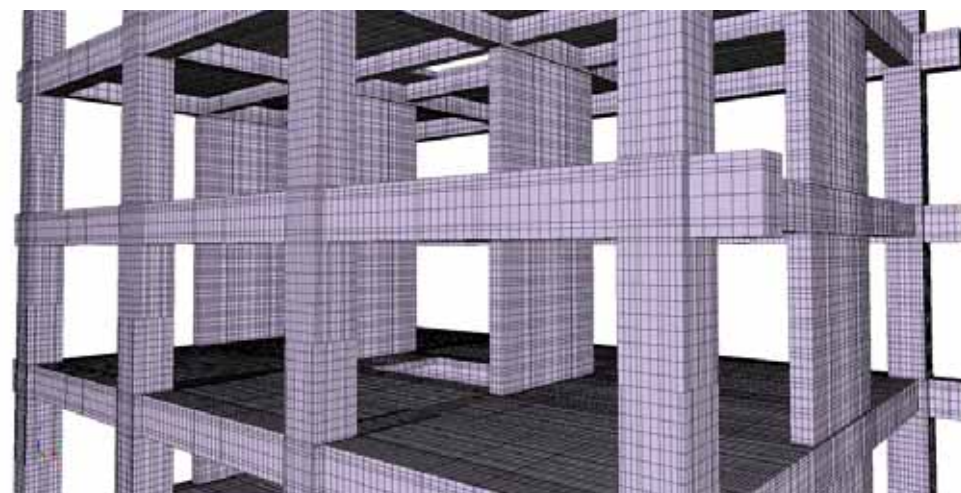
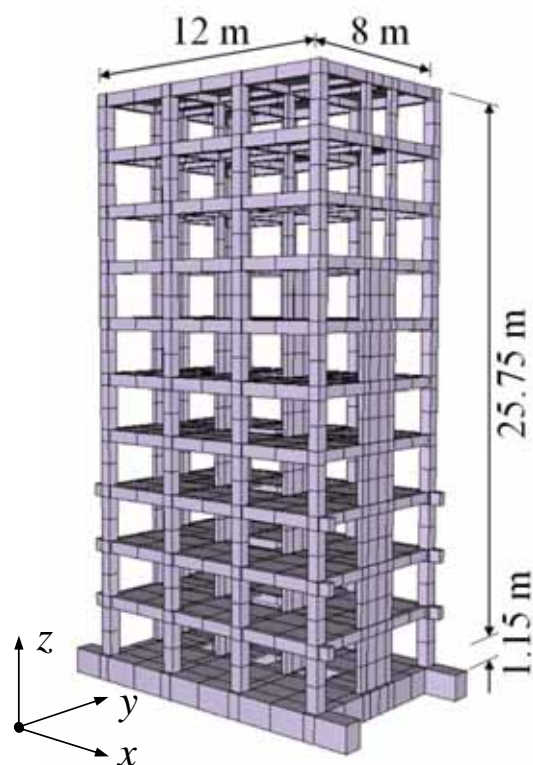


圧壊領域もCase2の方が局所化しており、また縦方向に広がっている(実験にも対応している)

10 層RC 造建物の地震応答解析

10層RC建物の試験体と数値解析モデル

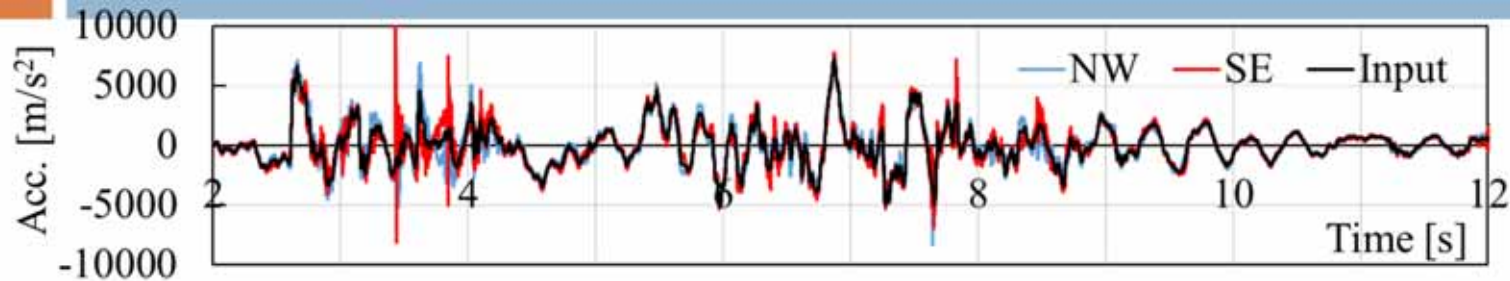
66



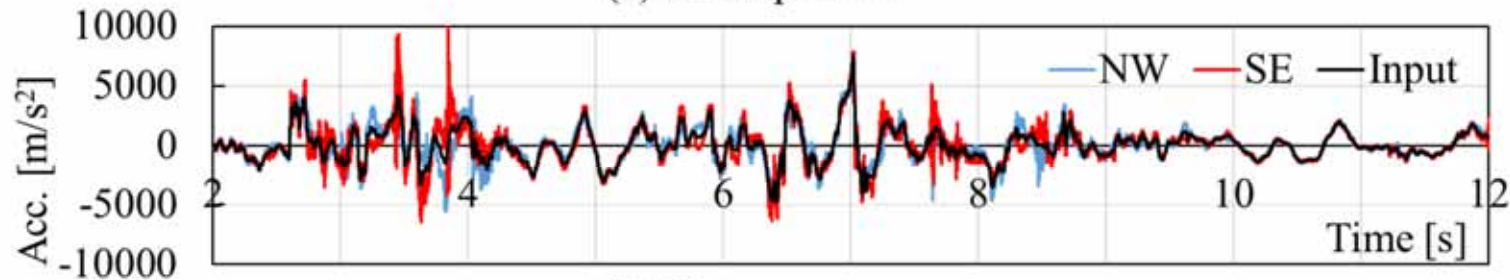
2015年にEーディフェンスで実施された10層RC建物の加振実験

メッシュ(E-Modelerで生成, 山下さんの発表参照)

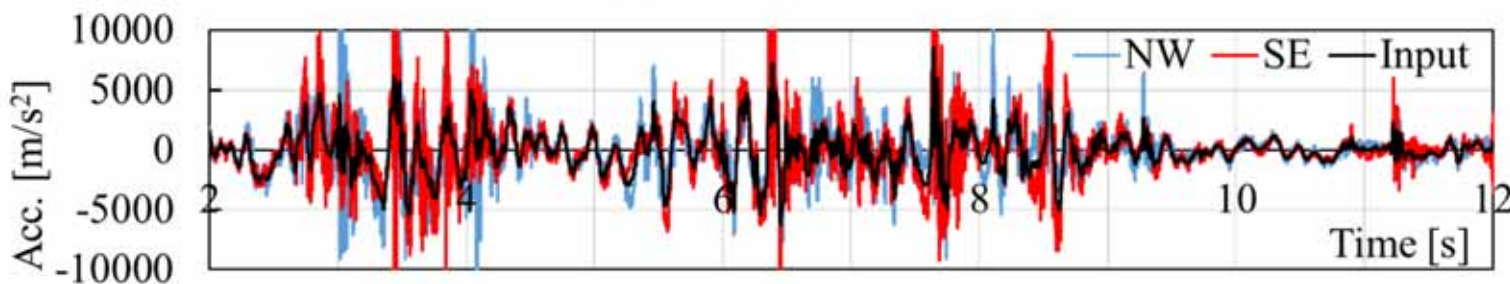
1階の計測データと解析の入力加速度



(a) X component



(b) Y component

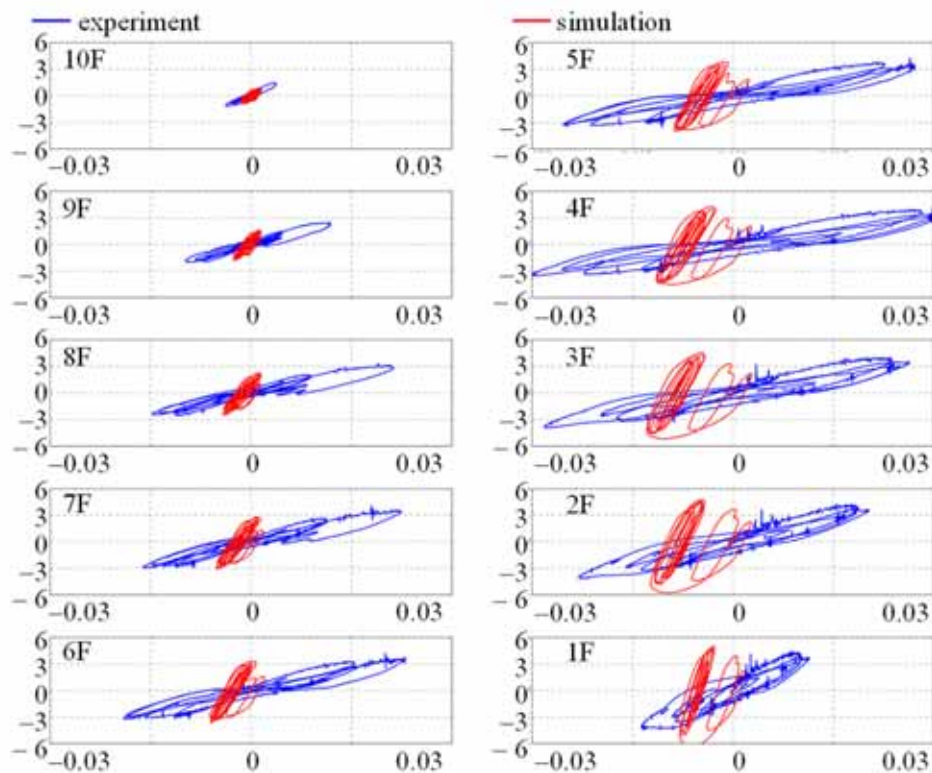


(c) Z component

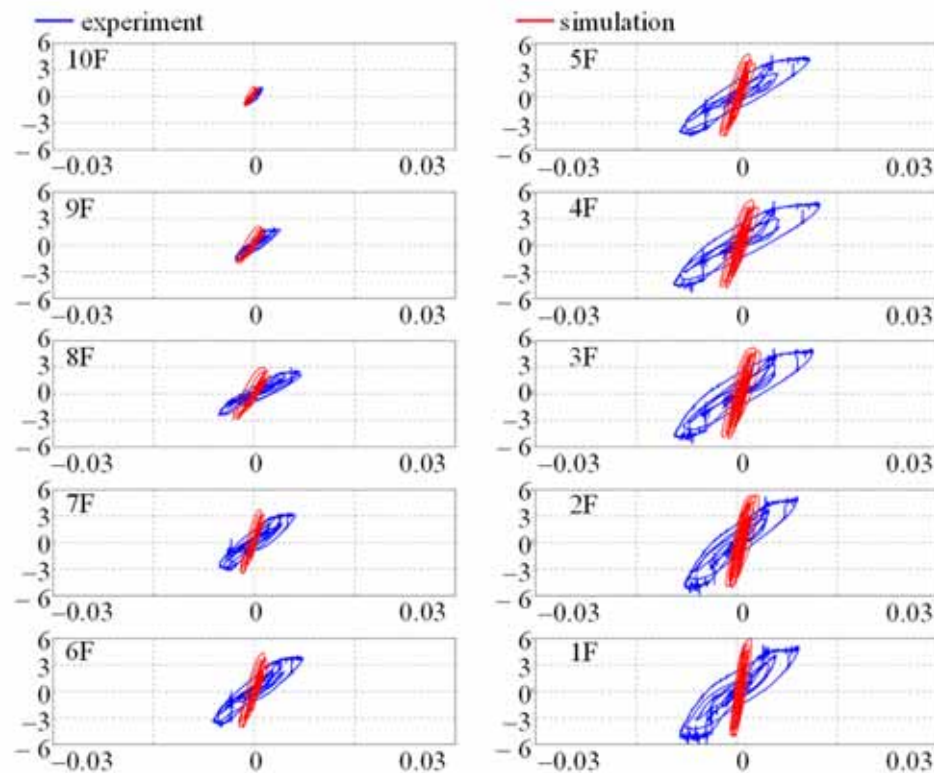
- 基礎滑りモデルに対するJMA神戸波
100%加振実験
- 実質的な入力加速度は比較的小さい

2018年の成果発表会で示した 各階の層間変形角-層せん断力関係

(縦軸:層せん断力[kN],横軸:層間変形角[rad])



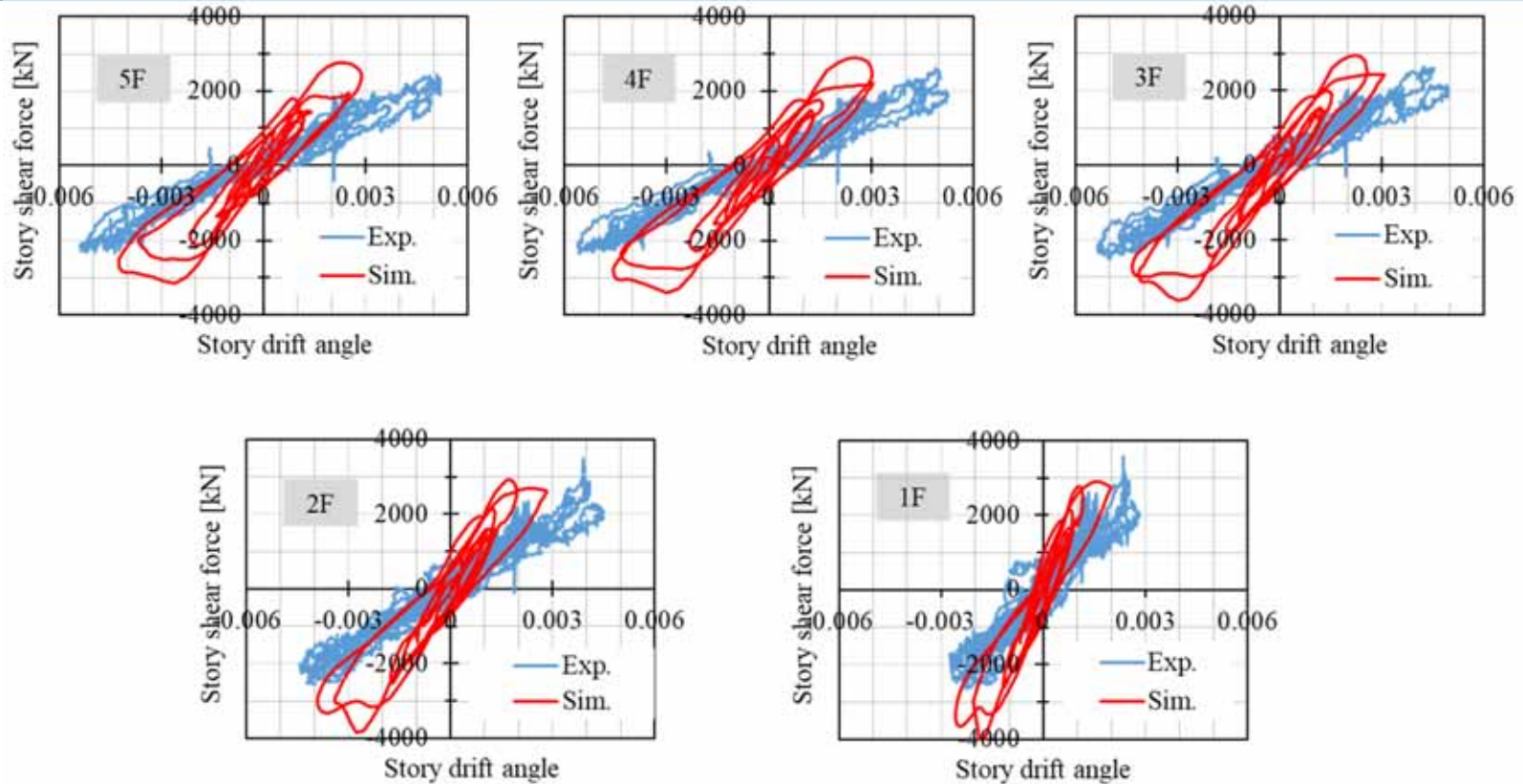
長辺方向



短辺方向

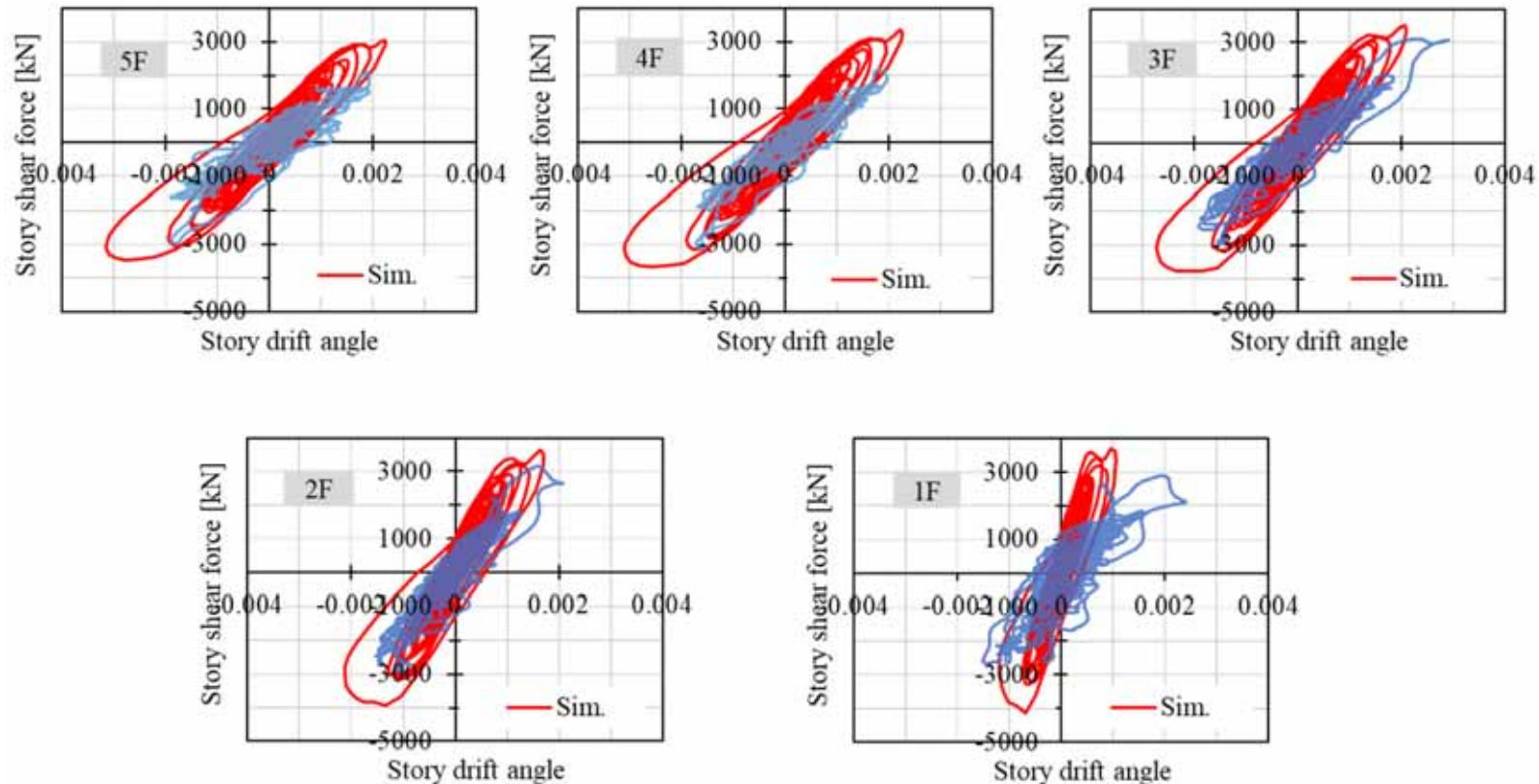
層せん断力層間変形角関係(今回, 長辺方向)

69



層せん断力層間変形角関係(今回, 短辺方向)

短辺方向には連層耐震壁がある

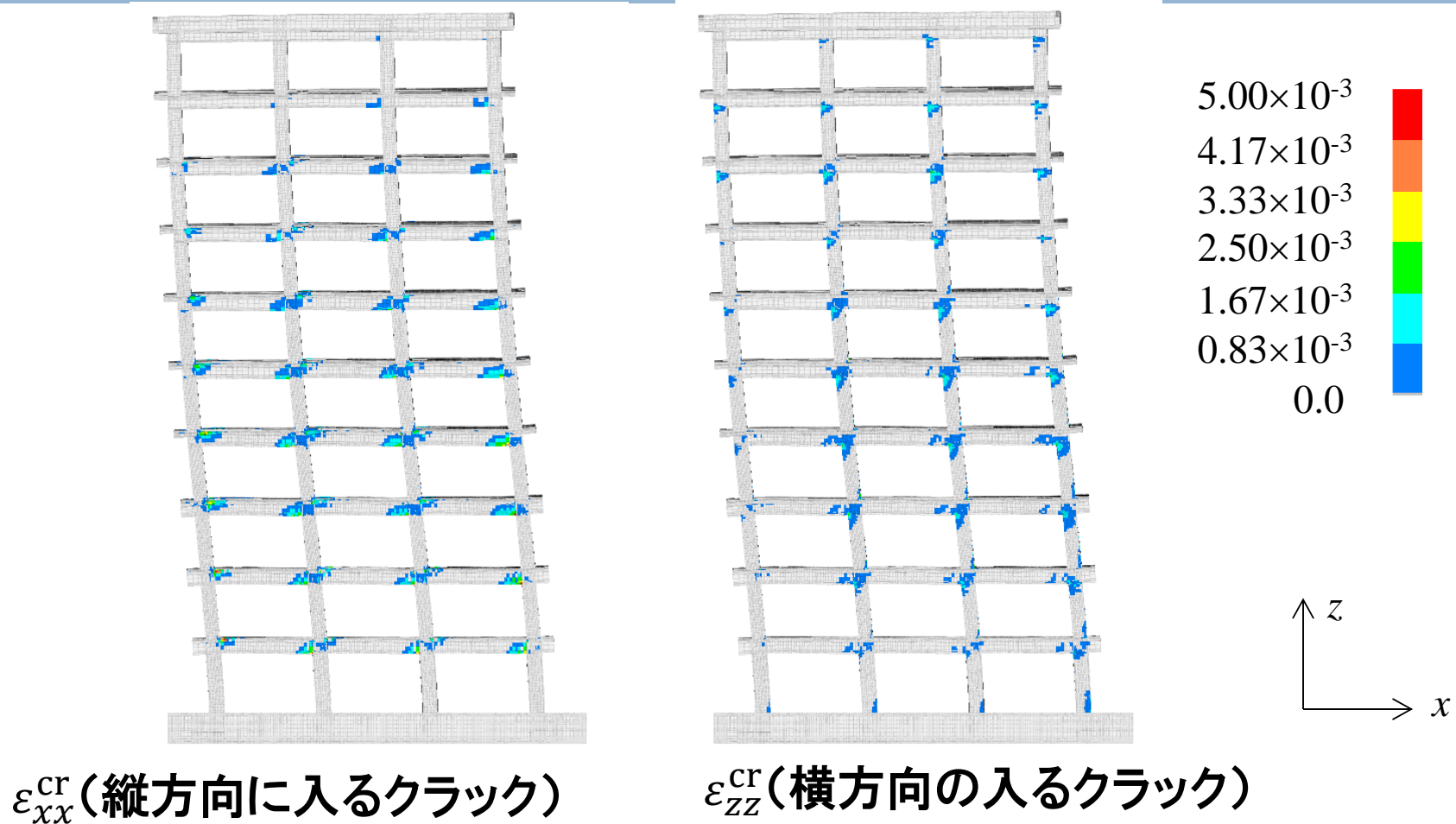


比較的小さい地震動に対する応答解析で、クラックによる初期剛性の低下を直接的にシミュレートできている



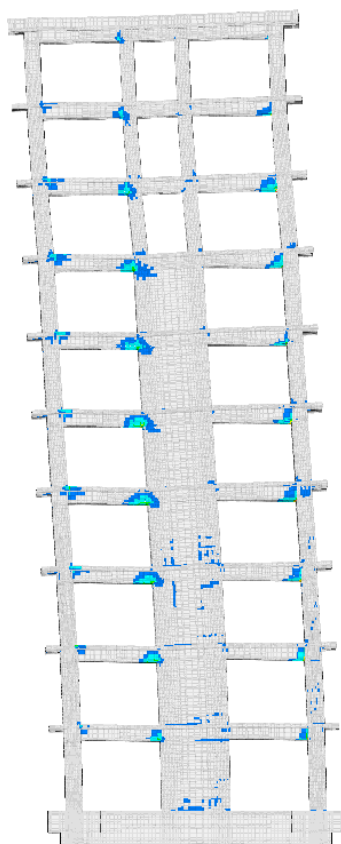
従来、RCの解析結果は固めに出ると言われていたのに対して、画期的な成果であるといえる

x 方向最大変形時のクラックひずみの分布

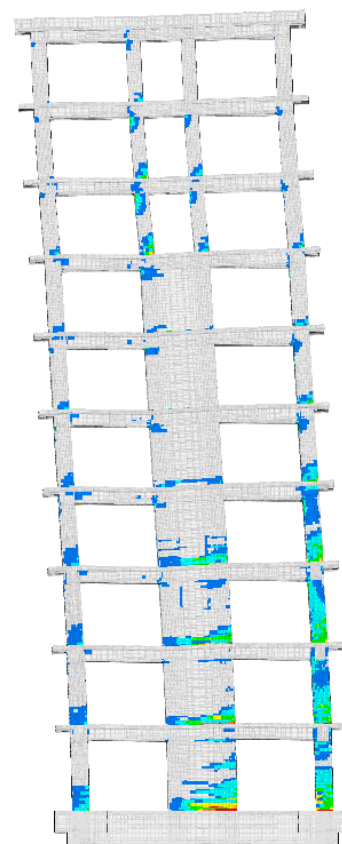


y方向最大変形時のクラックひずみの分布

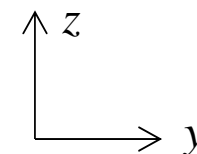
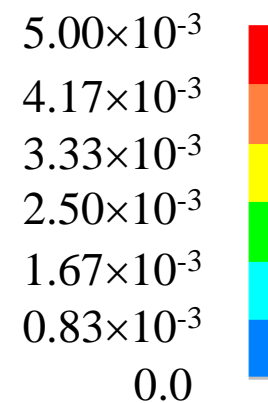
72



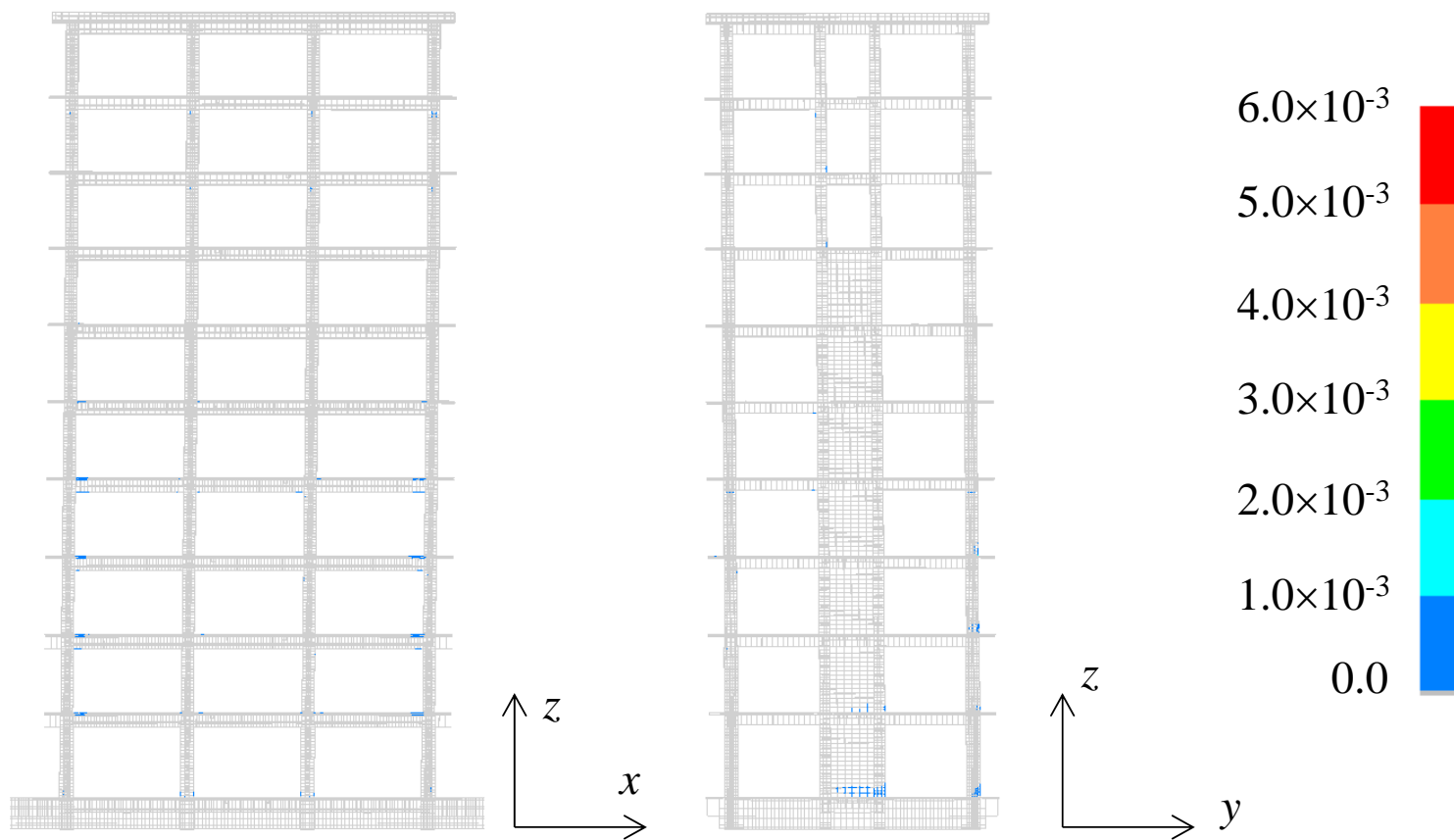
ϵ_{yy}^{cr} (縦方向に入るクラック)



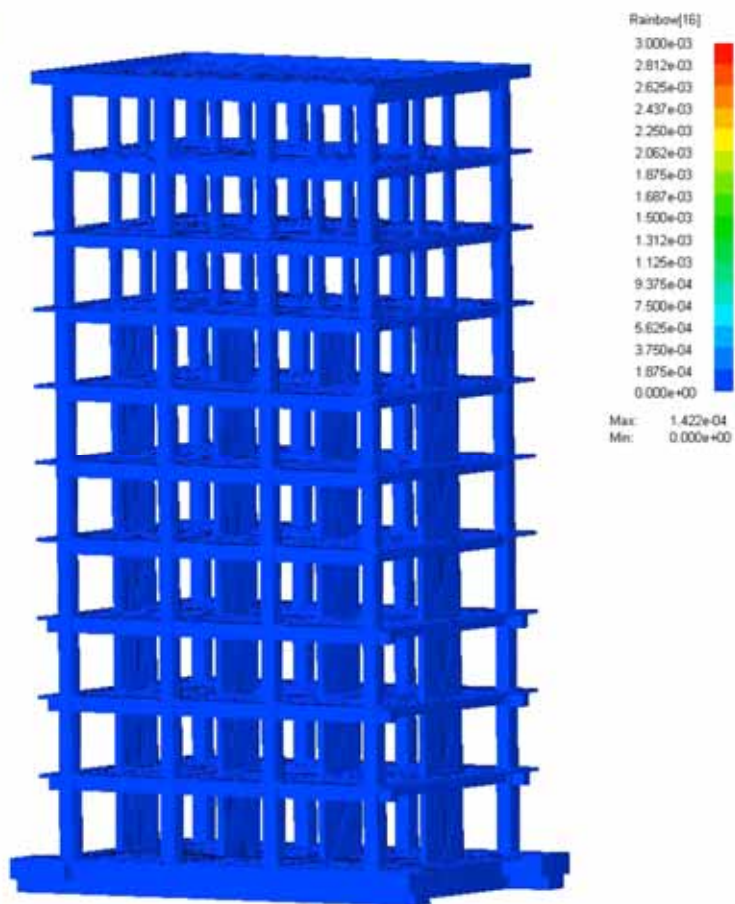
ϵ_{zz}^{cr} (横方向に入るクラック)



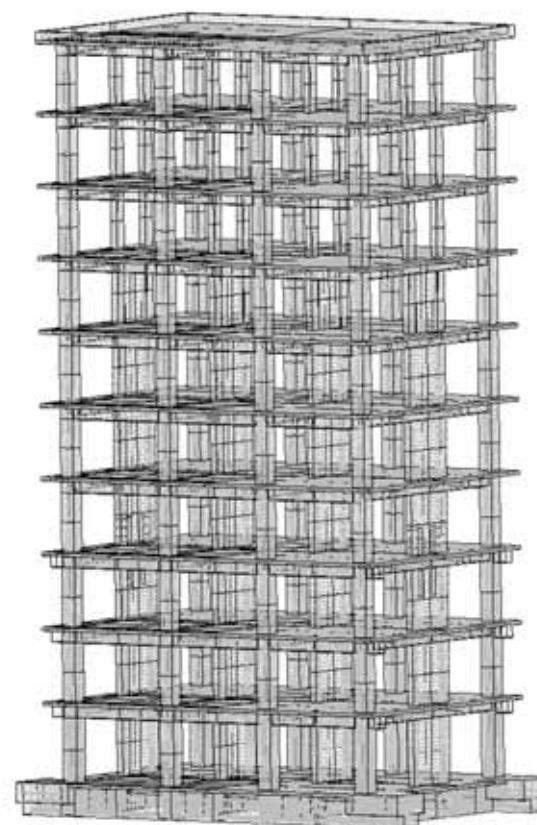
解析終了時の鉄筋の相当塑性ひずみ分布



動画(以前の結果)

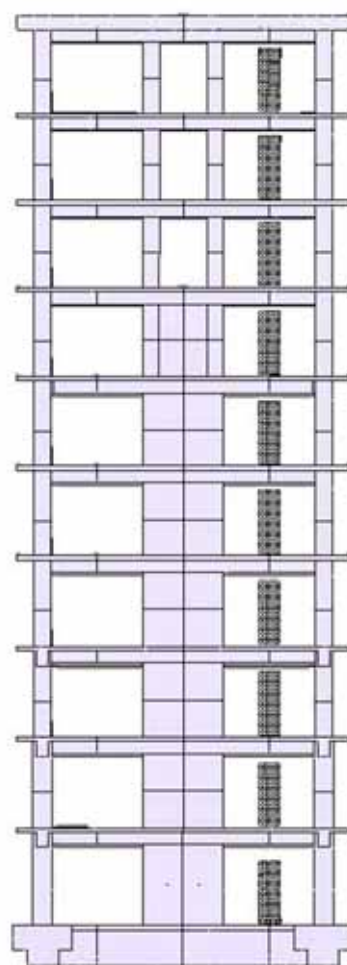
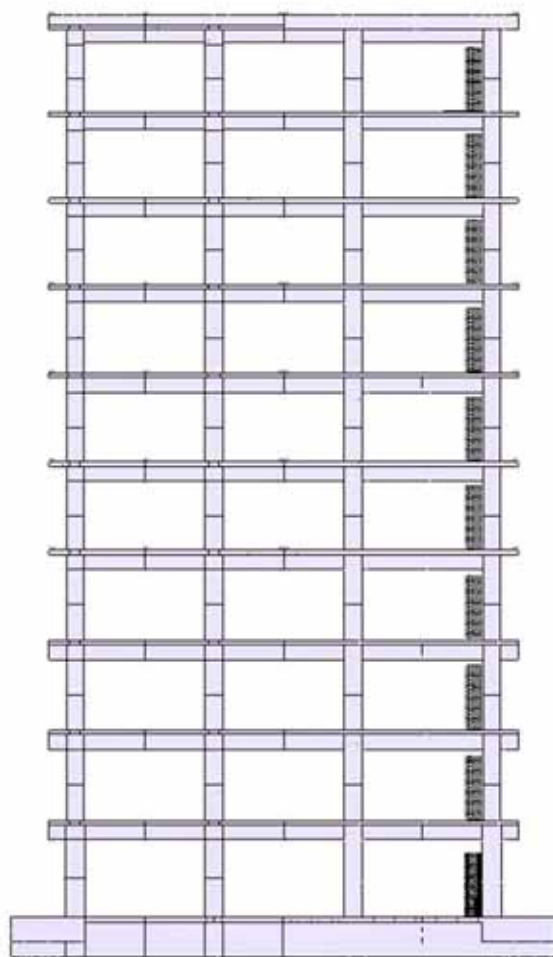


zz-component of crack strain ε_{zz}^{cr}



鉄筋

家具解析(設備WG)との連成



- 各階の応答加速度時刻歴を家具解析の入力波とする
- 家具解析:ASI-Gauss法による
- 基線のずれを除去してCG化
- 各階で家具の挙動が異なっている

まとめ

- この5年間では、新規テーマはあまりなかったものの、多くのテーマを完成させることができた
- どのテーマにおいても、実験のある一面がうまく再現できても、うまく再現できないところもあった
- 当初、数値震動台が掲げた「**実験の代替**」の実現(まさに数値震動台)は**難しいかもしれない**
- 詳細FEM解析はもう十分に研究したので、「**あとは実用化だ!**」、「**データサイエンス的, AI的な研究だ!**」とはなかなか言えないのではないか
- とはいえ、5年毎に着実に進歩しているのも事実で、また、防災科研の中で**人材育成**も進んでいる
- 確率・統計を導入して様々な**ばらつき**を評価することで、**E-ディフェンス実験の補完**ができるのではないか