

高性能計算を利用した大規模鉄筋コンクリート構造物の地震応答解析プログラムの開発

東京大学地震研究所 本山紘希

1

はじめに

原子力発電所の再稼働に際して建屋の詳細モデルによる地震応答解析が求められている

- 建屋の耐震性だけでなく設置機器の耐震性も検討
 - 機器への入力地震動を高解像度で計算
- 原子力発電所の安全性の検討に使える高い信頼性
 - 数値解析の品質保証（解の収束性等の検討が必要）

高速な（汎用）並列有限要素法のソフトウェアで
コンクリート構造物の地震応答解析を実施可能としたい

2

目標

高速な（汎用）並列有限要素法をベースとした大規模鉄筋コンクリート構造物の地震応答解析プログラムの開発

- 対象とする自由度：100万～1000万程度
 - ・大規模計算・高性能計算というには小さめ
- 解析時間：1日程度
 - ・収束性の検討や感度解析、多数シナリオへの対応を可能とする

2段階での開発

- ・商用の汎用並列有限要素法への実装
- ・オープンソースの並列有限要素法への実装とソフトウェアの改良

3

既知の課題

【高速並列有限要素法とコンクリート構成則】

高速並列有限要素法：

CG法をベースとしたソルバを有することが一般的
剛性マトリクスの正定値性が要求される

コンクリート構成則：

ひずみの増加に応じて応力が解放される負の剛性の発生
→正定値性の喪失

コンクリート構成則のその他の問題：

- ・負の剛性が発生することによる不安定な解の計算
 - ・要素サイズを小さくしていくと変形が局所化する
- ・構成則自体の計算コストが大きい

4

コンクリート構成則の再構築・再定式化

前川・岡村らの提案するコンクリート構成則を対象とした
 コンクリート構成則の再構築・再定式化 (山下・堀ら)

計算コストの削減・正定値性の確保

●コンクリート構成則の再構築

- 弾性ひずみ-応力関係と弾性ひずみ増分-塑性ひずみ増分の関係式で表現されている

$$\begin{aligned} \sigma &= \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon}^E \\ d\boldsymbol{\varepsilon}^P &= \mathbf{l} : d\boldsymbol{\varepsilon}^E \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{c}^{EP} = (\mathbf{c} + \nabla \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon}^E) (\mathbf{I} + \mathbf{l})^{-1}$$

弾塑性テンソルの計算で逆行列の計算が必要
 (各積分点での計算が必要)

$$\begin{aligned} \sigma &= \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon}^E \\ d\boldsymbol{\varepsilon}^P &= \mathbf{L} : d\boldsymbol{\varepsilon} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{c}^{EP} = (\mathbf{c} + \nabla \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon}^E) (\mathbf{I} - \mathbf{L})$$

逆行列計算のコストを削減

コンクリート構成則の再構築・再定式化

●コンクリート構成則の再定式化 (山下・堀ら)

- 弾性テンソルを用いた支配方程式

支配方程式	↔	弾塑性構成式
$\nabla(\mathbf{c}^{EP} : (\nabla d\mathbf{u})) = 0$		$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c}^{EP} : d\boldsymbol{\varepsilon}$
負の剛性あり	↓	弾性テンソルを用いた支配方程式

支配方程式	↔	弾塑性構成式
$\nabla(\mathbf{c} : (\nabla d\mathbf{u})) + \nabla d\mathbf{u}^* = 0$		$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c} : d\boldsymbol{\varepsilon} + d\boldsymbol{\sigma}^*$ $d\boldsymbol{\sigma}^* = \mathbf{c}^{EP} : d\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{c} : d\boldsymbol{\varepsilon}$
負の剛性なし		再構築した構成則の関係式より
剛性マトリクスの正定値性が確保できる		$d\boldsymbol{\sigma}^* = -\mathbf{c} : d\boldsymbol{\varepsilon}^P + (\nabla \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon}^E) : d\boldsymbol{\varepsilon}^E$

汎用並列有限要素法への実装

再定式化した構成則の商用ソフトウェアへの実装

→CG法（ソルバ）の計算は可能

→コンクリート構成則のような複雑な構成則を想定していないソフトウェアでは非線形計算が収束しない



再定式化を一旦外して弾塑性テンソルによる実装

→依然、非線形計算の収束に難あり



陽的な計算により収束計算を行わない実装

（1時間ステップ内で線形化）

収束解を得るために時間ステップ（载荷ステップ）を細かく設定する必要がある

7

汎用並列有限要素法への実装

負の剛性が発生する弾塑性テンソルを用いる場合のCG法による求解の課題

→動的解析において時間ステップを細かく設定することで（無理やり）解決

動的解析で対象とする（見かけの）剛性マトリクス

$$[\mathbf{K}] + \frac{1}{dt^2} [\mathbf{M}]$$

時間刻みを細かくすることで、剛性マトリクスの対角に発生する負の値を打ち消すことが可能

陽的非線形解析の収束より厳しい条件

時間刻みは、1/2000～1/20000秒で設定する必要あり

8

スケーラビリティの確認

- 高速な並列有限要素法のソフトウェアを使用することで実用可能な時間で地震応答解析が可能かを確認
- ストロング・スケーリングに着目

スケーラビリティ

○ストロング・スケーリング

解析自由度を固定して計算コア数を増加させた時の実行時間の変化

○ウィーク・スケーリング

1コアあたりの自由度数を固定して自由度数と計算コア数を変化させた時の実行時間の変化

9

スケーラビリティの確認

- 懸念されること
 - 負の剛性が発生することで、一部のプロセスの計算コストが増加し、解析がスケールしなくなり、解析実行時間が増加する
 - そもそも解析時間が長い（条件数（最大固有値と最小固有値の比）が大きいと繰返し計算回数増）
- 使用ソフトウェア
 - ADVENTURECluster（アライドエンジニアリング）
 - CGCG法（コースグリッド前処理）

解くべき方程式 $\mathbf{Kx} = \mathbf{f}$ 前処理 $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{Kx} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{f}$ CG法の適用により求解

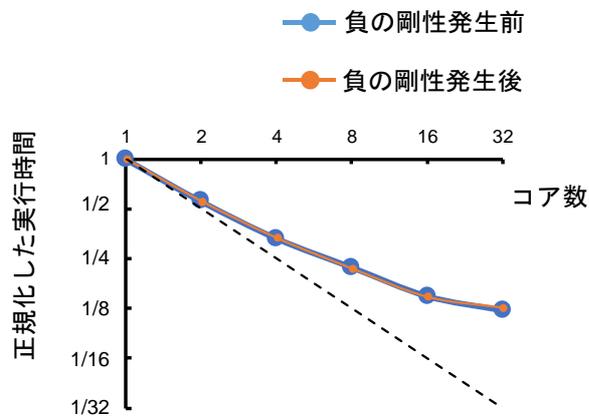
\mathbf{M}^{-1} が \mathbf{K}^{-1} の良い近似であれば繰返し数低減

10

スケーラビリティの確認

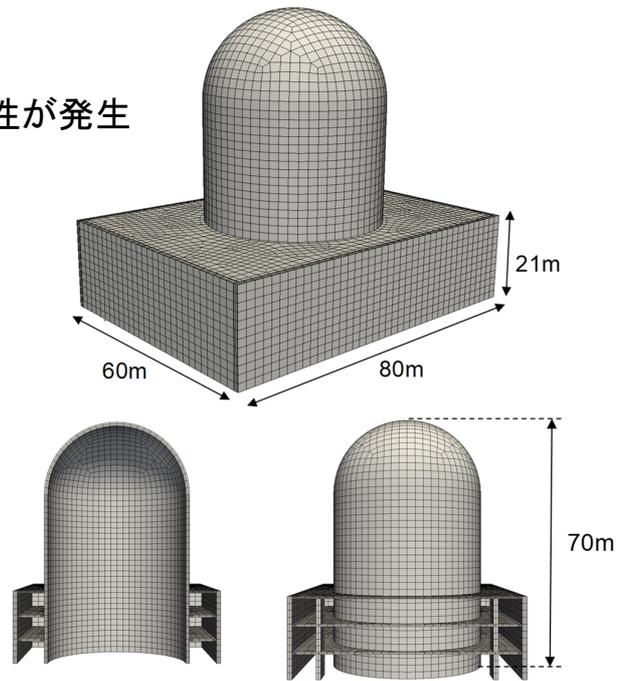
2000 stepの解析を実施

・ 1079 step目でコンクリートに負の剛性が発生



コア数16の時の実行時間2時間23分
本解析では負の剛性の影響は解析時間・スケーラビリティともにナシ

今後、負の剛性発生領域が広い条件での検討が必要

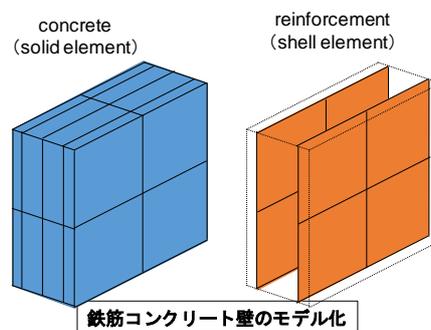
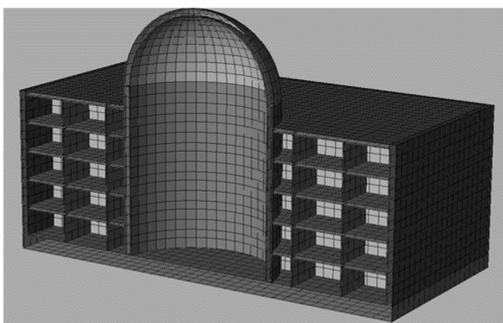
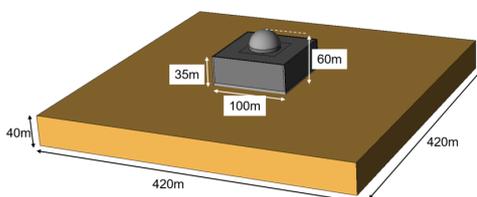


節点数	要素数	自由度数
41,419	36,608	164,535

11

解析モデル

- 鉄筋コンクリート壁は、鉄筋を構造要素、コンクリート材料をソリッド要素でモデル化した

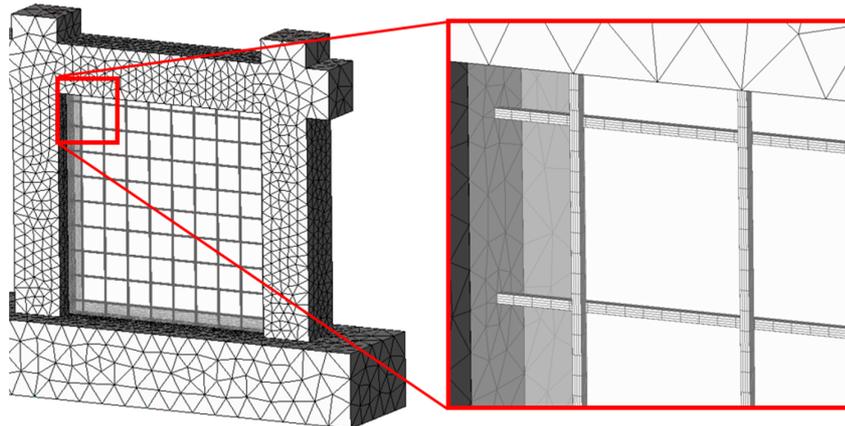
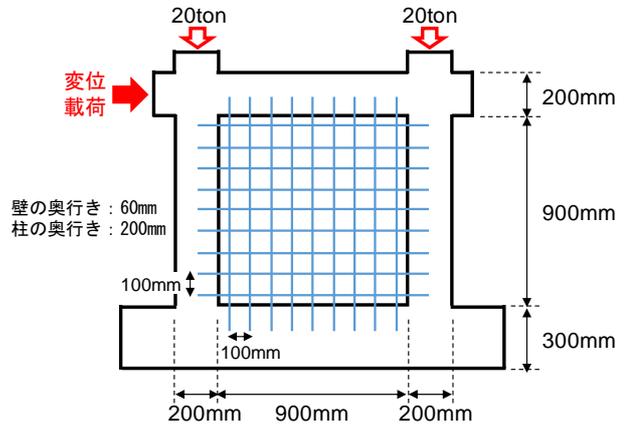


12

モデルの妥当性

2ステップの妥当性確認

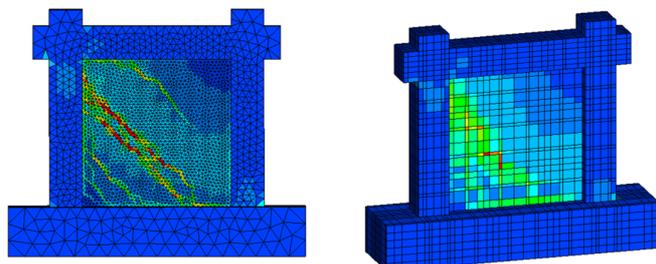
- ①ソリッド要素モデルとの比較
- ②実験と解析との比較



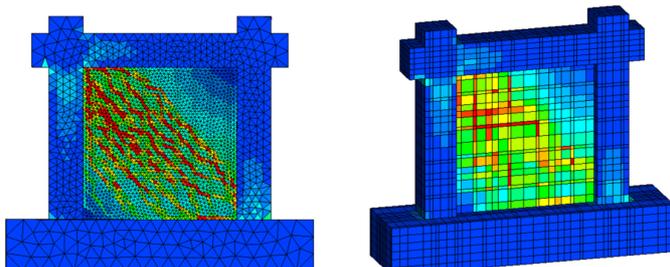
ソリッド要素モデル

モデルの妥当性

片側載荷4 mm（平均せん断ひずみ4/1000）の解析を実施



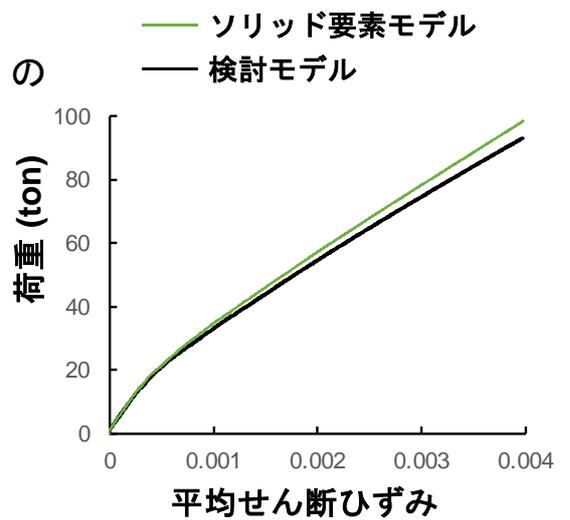
平均せん断ひずみ1/1000



平均せん断ひずみ2/1000

ソリッド要素モデル

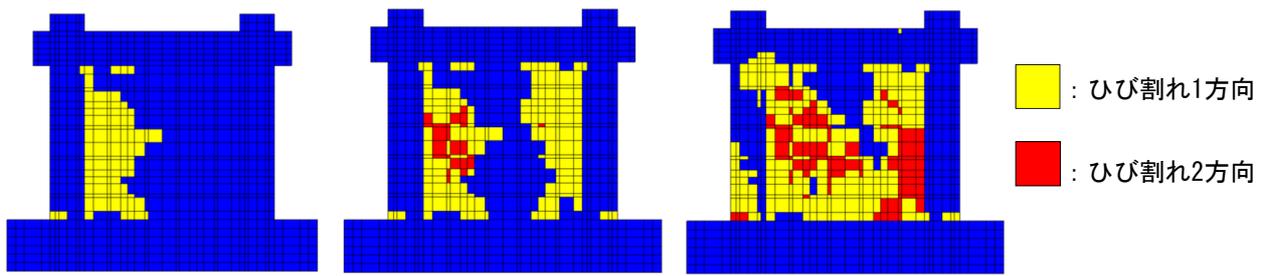
検討モデル



ひずみ4/1000で荷重（断面力）の誤差は5%程度

モデルの妥当性

交番载荷の解析を実施

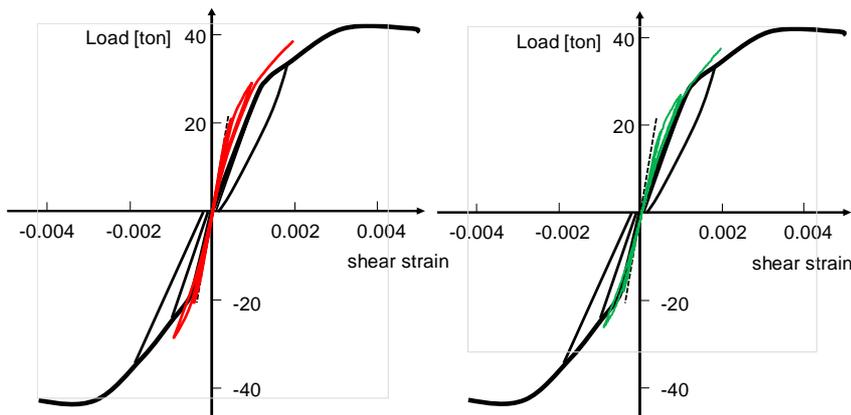


ひずみ +5/10000

ひずみ -5/10000

ひずみ +1/10000

ひび割れが発生する領域：実験と整合していることを確認



左：文献通りの材料特性

右：初期剛性に合わせて
ヤング率減

文献のままの物性ではなく、
材料の剛性を低減したモデル
がより整合

15

計算例

16

地震応答解析の計算実行時間

17

地震応答解析の結果

18

数値解析の品質保証

数値解析手法の検証と解析モデルの妥当性の確認 (V&V)

【計算力学分野でのV&Vの例】

● 数値解析手法の検証 (Verification)

- ・ 理論、解析解との比較
- ・ ベンチマーク試験
- ・ 解の収束性の確認
- ・ 感度解析

● 解析モデルの妥当性の確認 (Validation)

実機に対して、多階層の妥当性確認

- ・ 低位階層
試験片による材料構成則の妥当性確認
- ・ 中位階層
基本構成部位の試験体のモデル化
(要素、要素分割等)の妥当性確認
- ・ 上位階層
複数部材・システム～実機相当の
モデル化の妥当性確認

数値解析の品質保証

計算力学分野と大規模鉄筋コンクリート構造物の数値解析の違い

● 計算力学

- ・ 局所的な応力集中（材料の降伏など）が目的となる場合が多い
- ・ 1つの製品に対する大量の実験
- ・ 製品の品質のばらつきが小さい

● 地震工学

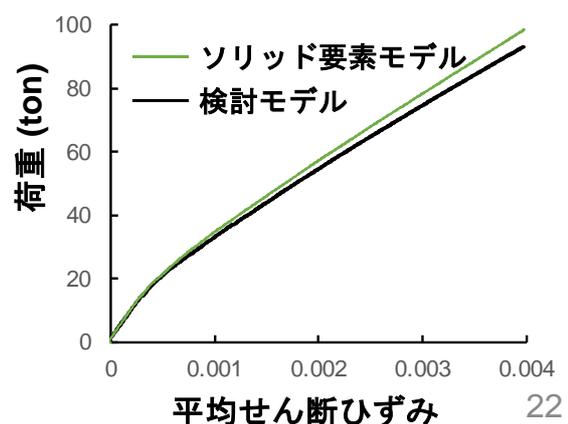
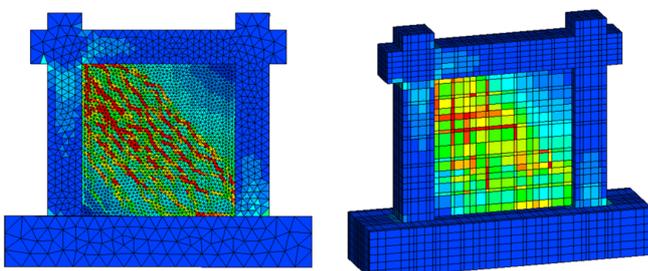
- ・ 局所的な応力より断面力
- ・ 各製品において、応力やひずみの精度が確保できていることを示すだけの実験がない場合も多い
- ・ 製品にばらつきが大きい（地盤、地震、施工、劣化...）

21

数値解析の品質保証

FEM解析においても、数値解析の目的を断面力とすることで品質保証が可能になるのでは？

- ・ 応力の積分値であるため、応力よりも精度が向上する可能性が高い
- ・ 解の収束
応力・ひずみは収束しないが、断面力の収束は速い



22

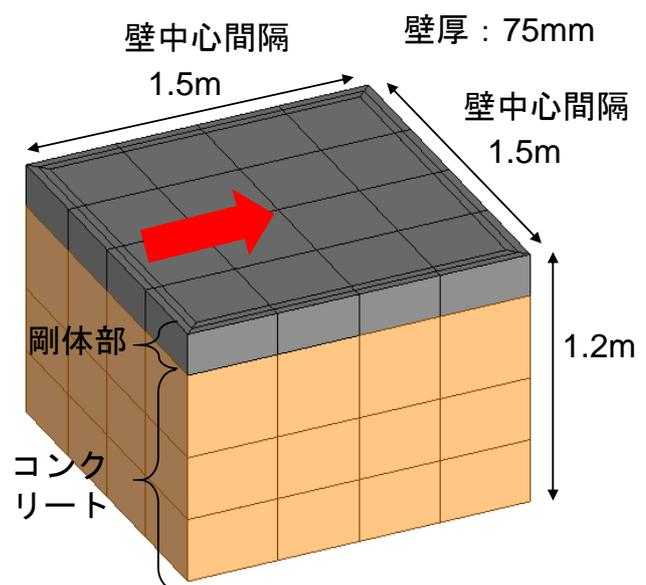
現在の開発状況

- オープンソースソフトウェアのFrontISTR（東京大学奥田研）をベースとした開発（E-FrontISTR）
- 高速ソルバの開発（別チーム）
 - ・ 高度な前処理を有する高速ソルバの開発
- 非線形解析手法＋構成則の開発
 - ・ 弾性テンソルによる支配方程式の使用
 - ・ 収束計算の工夫（残差力の持越し等）

23

計算コスト低減の検討

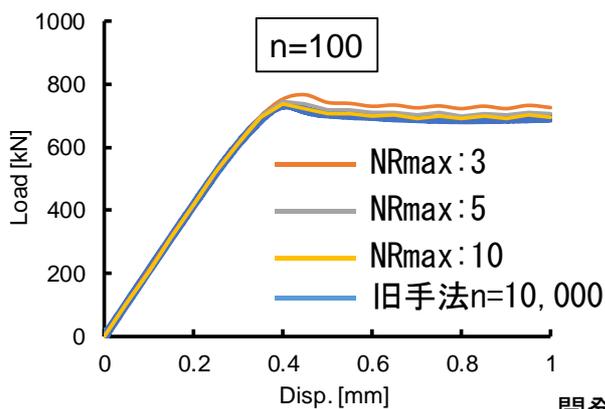
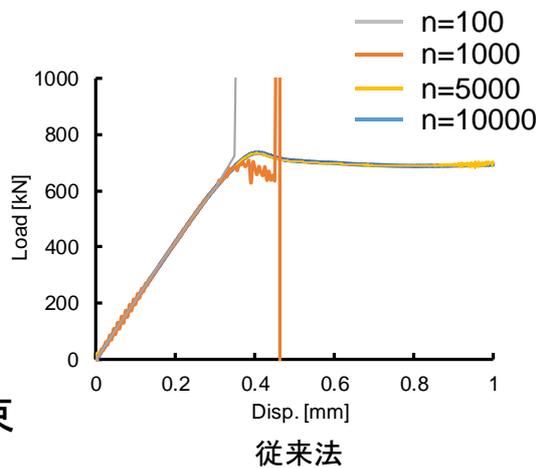
- コンクリート材料の壁と載荷用スラブ（剛体）からなるボックス形式の解析モデルを構築
- 非線形の繰返し計算回数を対象とした検討
- ニュートン法に接線剛性を用いて、陽的に応力増分を算定する手法と開発手法を比較



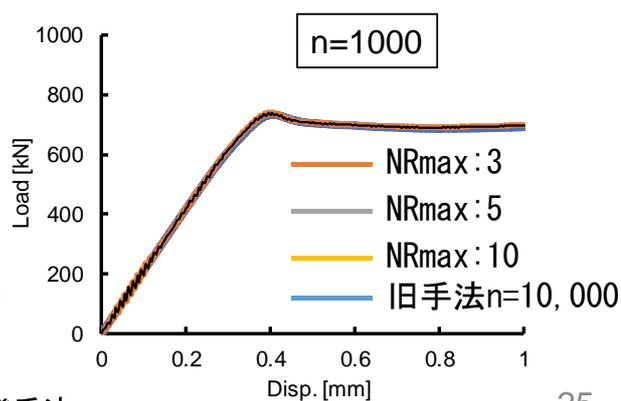
24

計算コスト低減の検討

- 旧手法では荷重ステップnが5,000以上で収束
- 開発手法ではn=1,000で3~5回程度の非線形計算で収束
- n=100でも5回の非線形計算で収束
- 計算コストの低減は期待できる



開発手法



25