

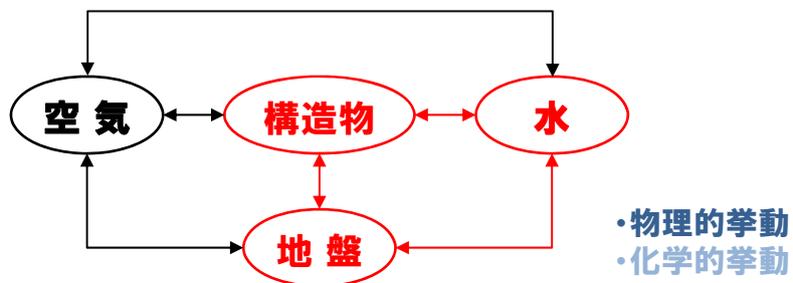
コンクリート構造物と 地盤・水との連成応答

埼玉大学 牧 剛史

はじめに

「連成」とは？

個別事象の組み合わせにより、互いに影響を及ぼし合う挙動
作用と応答 Ex. 土圧 → 構造物の変形 → 地盤変形



本日の講演内容



- 1) RC構造物と地盤の連成地震応答
- 2) 水中におけるRC柱の動的応答
- 3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

連成問題に関する課題

本日の講演内容

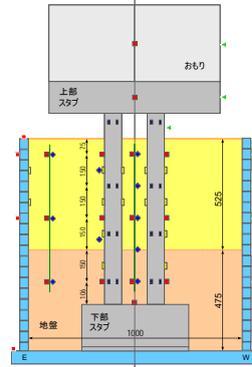
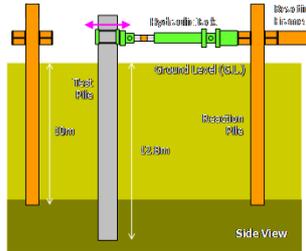
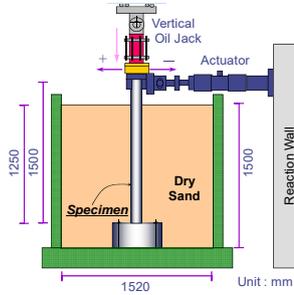


- 1) RC構造物と地盤の連成地震応答
- 2) 水中におけるRC柱の動的応答
- 3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

1) RC構造物と地盤の連成地震応答

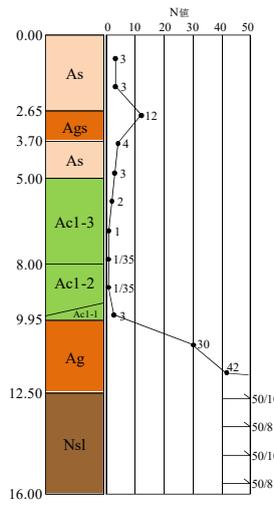
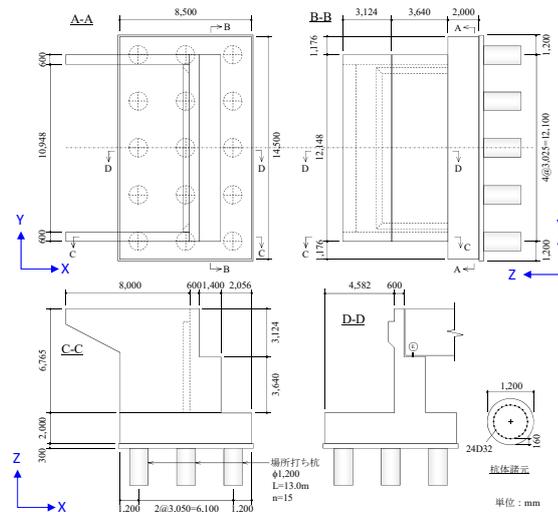
杭基礎-地盤系の実験

- ・寸法
- ・相似則
- ・静的/動的 ...



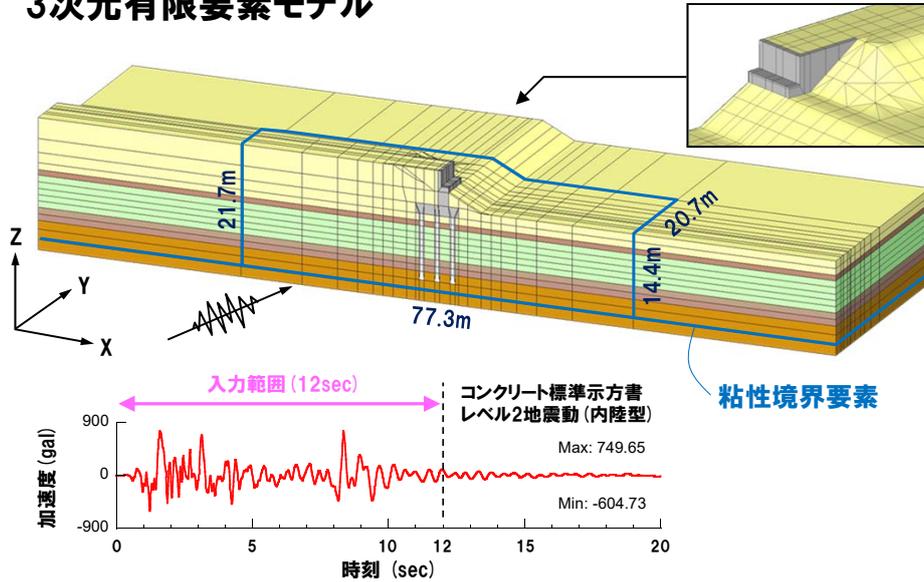
1) RC構造物と地盤の連成地震応答

場所打ちRC杭基礎で支持された橋台



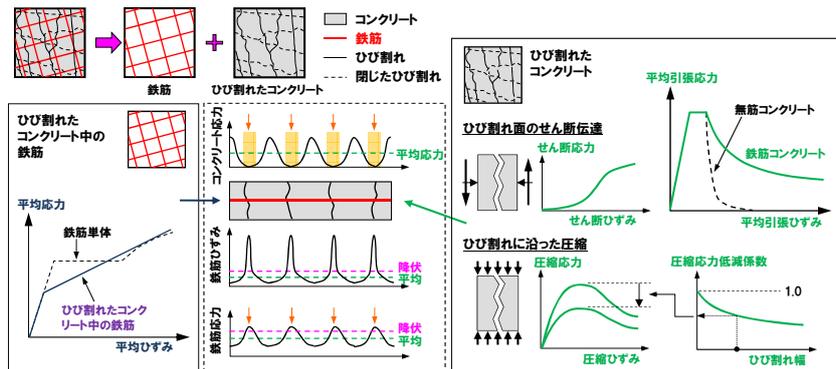
1) RC構造物と地盤の連成地震応答

3次元有限要素モデル



1) RC構造物と地盤の連成地震応答

鉄筋コンクリートの非線形構成則



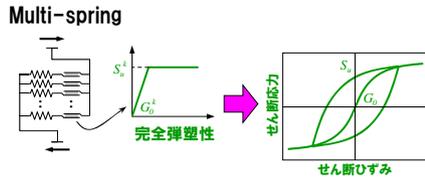
- 分散ひび割れモデル
- 非直交多方向固定ひび割れモデル

By 岡村・前川・他

1) RC構造物と地盤の連成地震応答

地盤および接合要素の非線形構成則

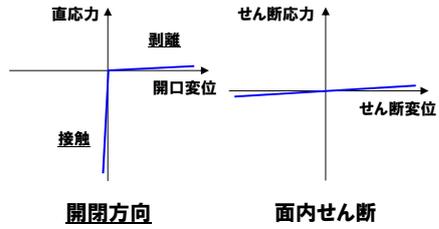
地盤の構成則



せん断成分
 骨格曲線: Ohsakiモデル
 履歴曲線: Masing則

平均成分
 線形弾性

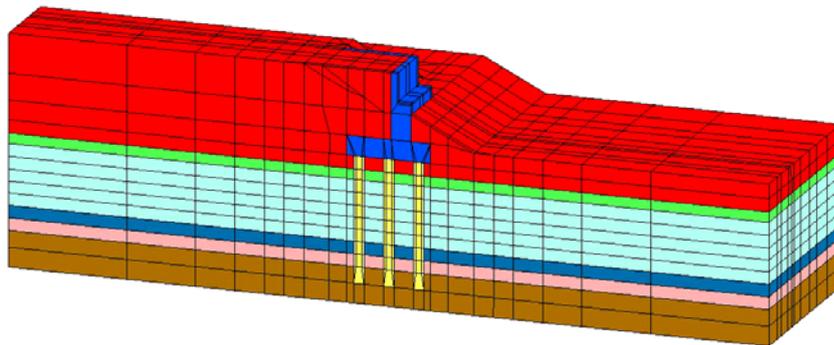
接合要素の構成則



地盤の体積非線形性
 界面摩擦・粘着力 は非考慮

1) RC構造物と地盤の連成地震応答

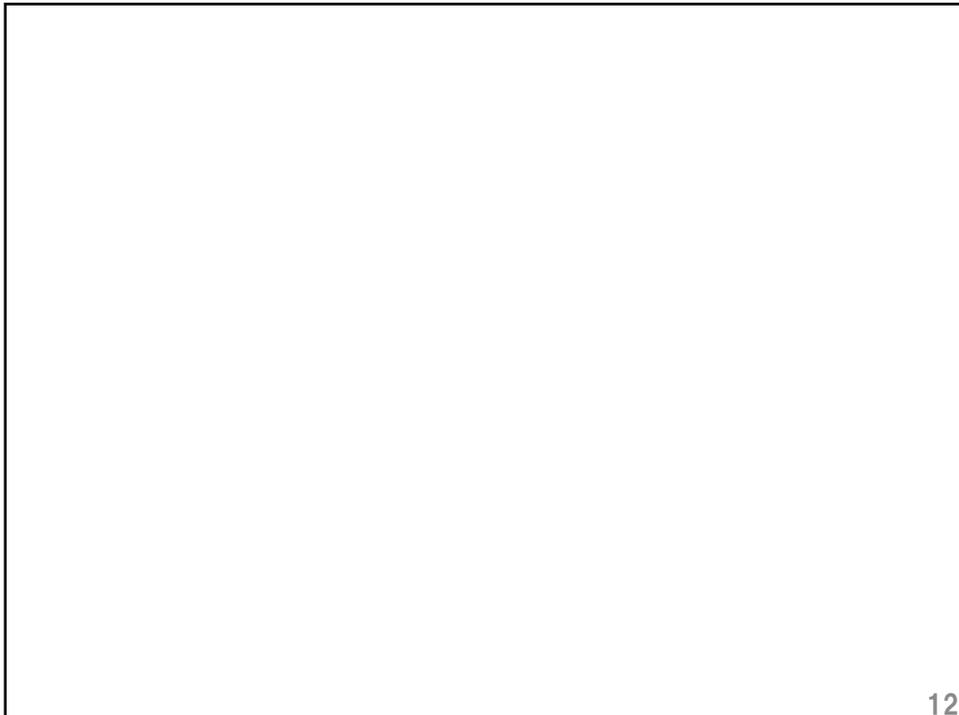
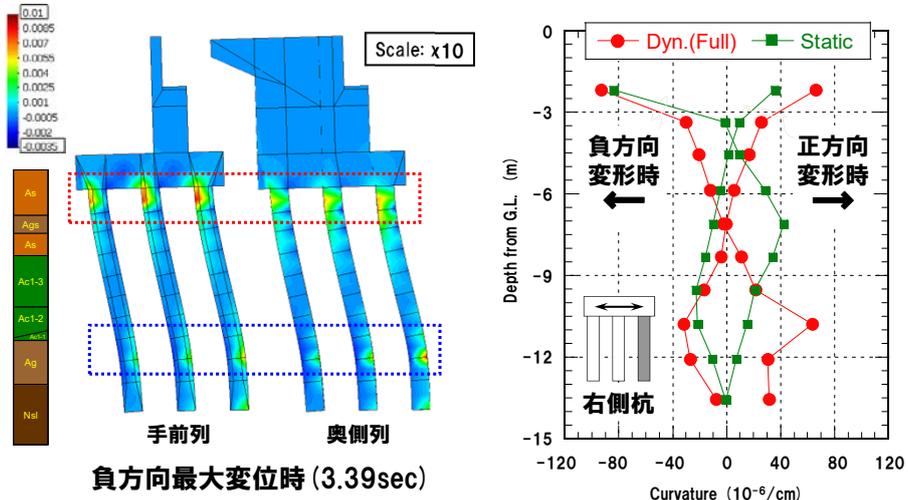
地震応答解析結果

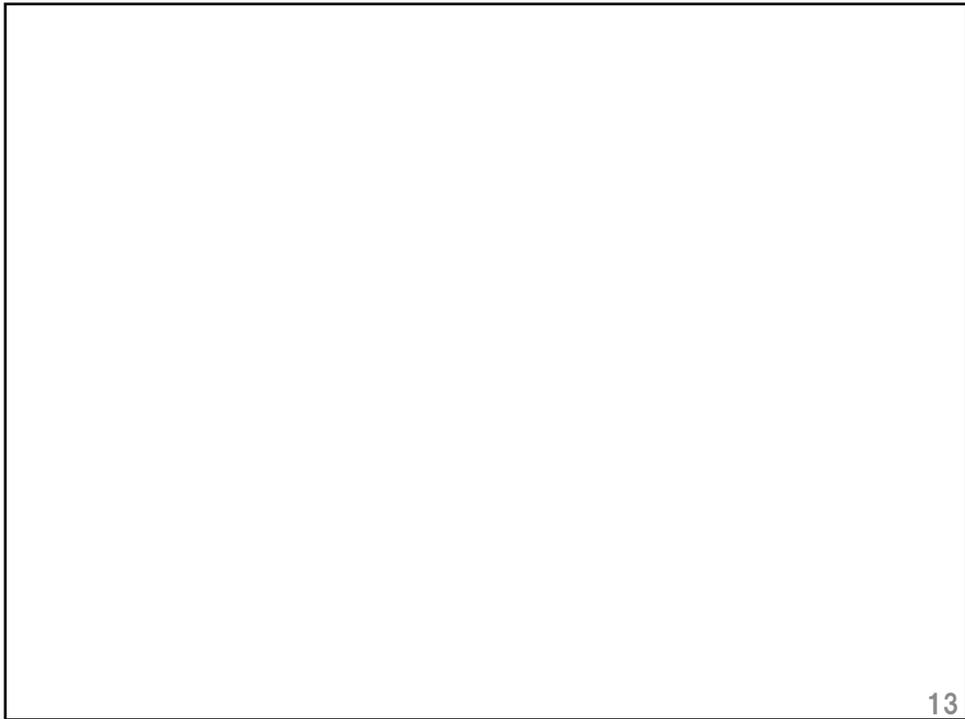


節点数 24,290 / 要素数 5,762
 総自由度数 72,870 / 剛性マトリクスの非零成分数 5,637,153

1) RC構造物と地盤の連成地震応答

杭基礎の変形性状

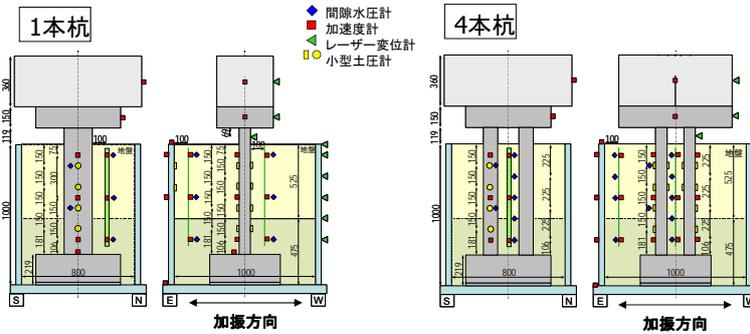
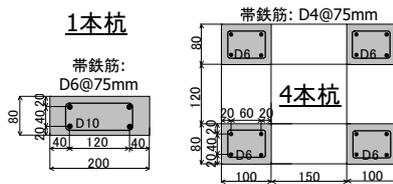




1) RC構造物と地盤の連成地震応答



せん断土槽を用いたRC杭基礎の振動実験



1) RC構造物と地盤の連成地震応答

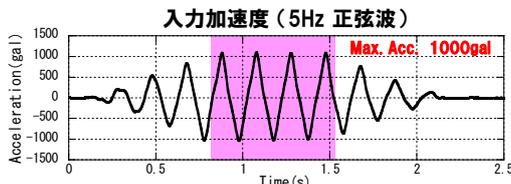
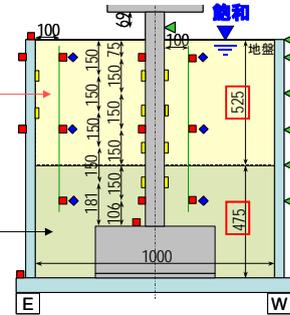
せん断土槽を用いたRC杭基礎の振動実験

	密地盤 (N)	緩地盤 (L)
杭なし	Case-0N	Case-0L
1本杭	Case-1N	Case-1L
4本杭	Case-4N	Case-4L (鍾なし)
		Case-4L

鍾重量: 杭体軸応力換算で 0.8 N/mm²

Dr=80%
密地盤(N)
Dr=40%
緩地盤(L)

Dr = 80%
全ケース



固有振動数

- 地盤のみ(密地盤) : 約10Hz
- 1本杭試験体 : 2.5Hz
- 4本杭試験体 : 7.7Hz
- 4本杭試験体(鍾なし) : 40Hz

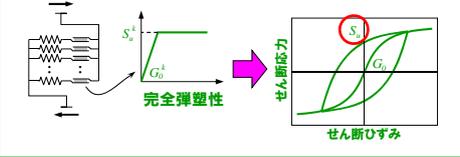
杭体が降伏する程度の塑性変形が生じることを想定

1) RC構造物と地盤の連成地震応答

地盤骨格の非線形構成則

有効応力解析

せん断非線形



$$\sigma'_{ij} = s_{ij} + \frac{\sigma_{kk}}{3} \delta_{ij}$$

↑ 土粒子の乗り上げ
拘束圧依存性

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \sigma_m \delta_{ij}$$

$$\sigma_m = \sigma'_m + p$$

要素内で完全非排水

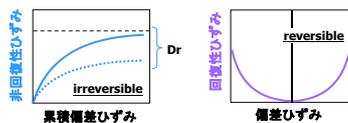
要素ひずみで定まる間隙水圧を骨格応力に単純に足しあわせ

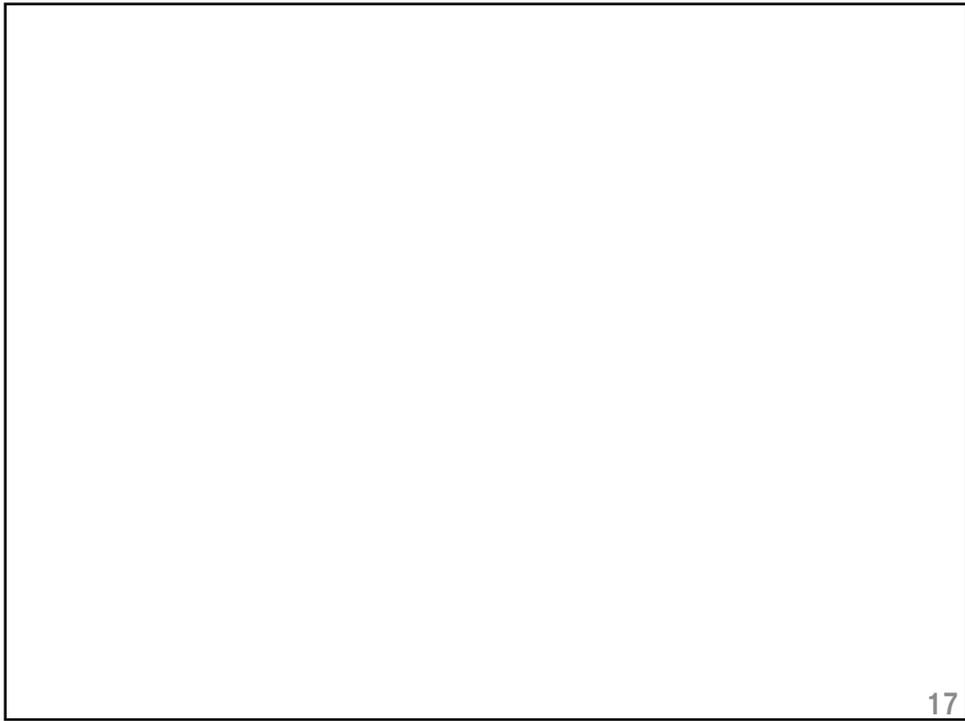
間隙水の移動を考慮

流体力と透水力を考慮した支配方程式 (Biotの理論)

非弾性ひずみ = 非回復性ひずみ (圧密)
+ 回復性ひずみ (ダイレイタンス)

体積非線形





本日の講演内容

- 1) RC構造物と地盤の連成地震応答
- 2) 水中におけるRC柱の動的応答**
- 3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

2) 水中におけるRC柱の動的応答

水中RC柱 ～ コンクリートと水の相互作用



RC柱の動的応答

- ✓ ひずみ速度の影響
- ✓ 静的応答に基づく耐震設計

水中RC柱の耐震設計 → 気中と同じ

水がRC柱の動的応答に及ぼす影響

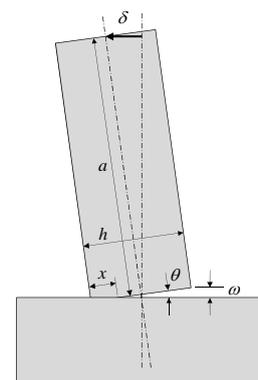
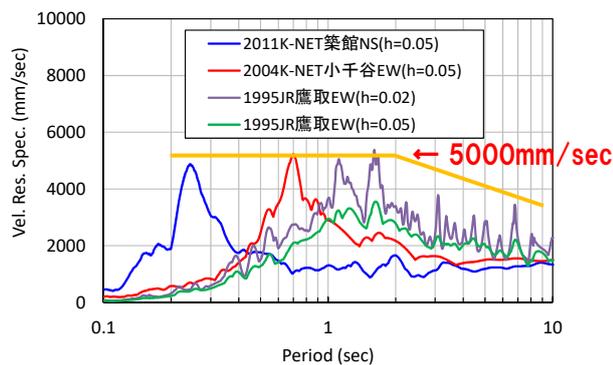
- ✓ 微細空隙を飽和する間隙水による水圧
- ✓ ひび割れ内に侵入する水による水圧
- ✓ 部材表面に働く水の粘性抵抗や動水圧

※ 疲労強度に及ぼす水の影響
(低応力-高サイクル繰り返し)



2) 水中におけるRC柱の動的応答

検討対象とするRC柱の動的応答レベル



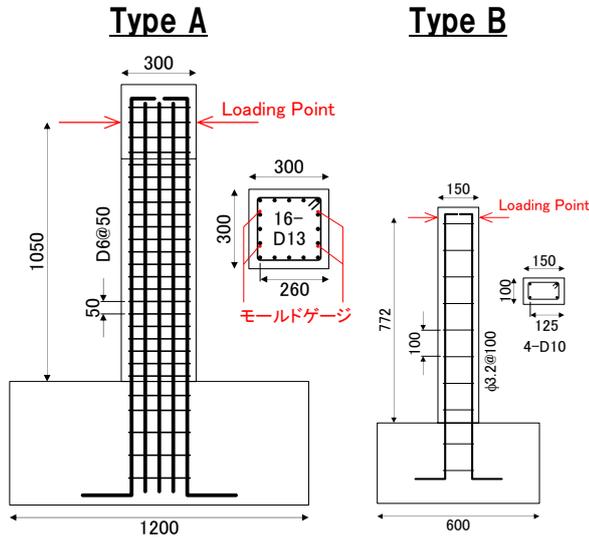
仮定
 応答速度 \propto ひび割れ開閉速度

$a/d=5.0$ の場合

ひび割れ開閉速度
 500~1000mm/sec

2) 水中におけるRC柱の動的応答

RC柱の動的載荷試験



Type	A	B
d (mm)	260	125
a/d	4.0	6.2
破壊形式	曲げ	曲げ
載荷速度の目標値 (mm/sec)	200	500

正弦波加振

$$\delta = A \sin 2\pi ft$$

$$v = \dot{\delta} = 2\pi f A \cos 2\pi ft$$

目標速度に合わせて
振幅毎に周波数調整

2) 水中におけるRC柱の動的応答

RC柱の動的載荷試験

A-1w

B-1w



基部に水槽設置、1.5dの高さまで浸水

2) 水中におけるRC柱の動的応答

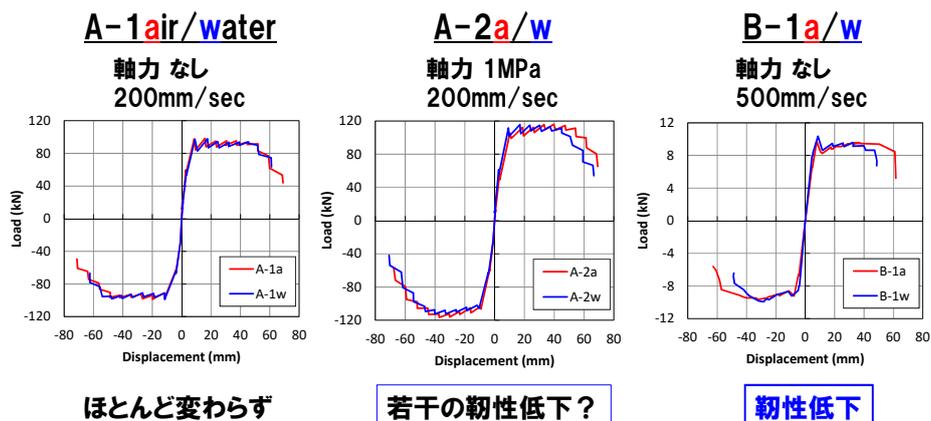
RC柱の動的載荷試験

A-1w
(軸力なし)



2) 水中におけるRC柱の動的応答

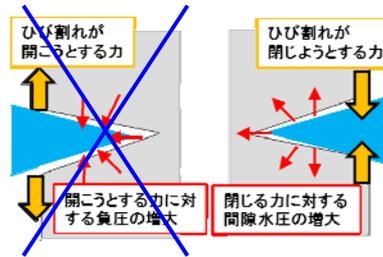
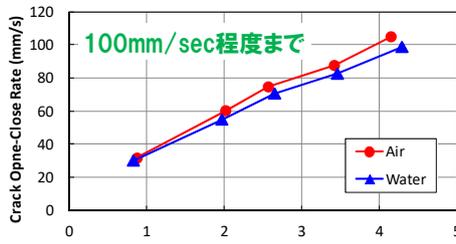
RC柱の動的載荷試験 ~ 荷重-変位関係の包絡線



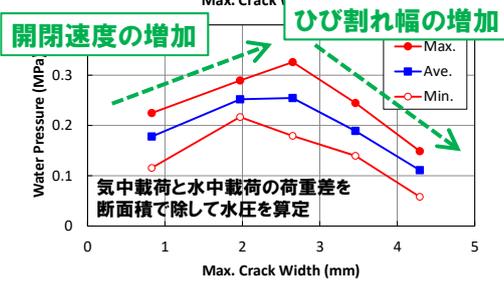
最終破壊形態に気中／水中の差異は見られない

2) 水中におけるRC柱の動的応答

動的ひび割れ開閉試験 ～ 開閉速度および水圧



負圧はほとんど計測されず
→ 圧縮側圧力の検討

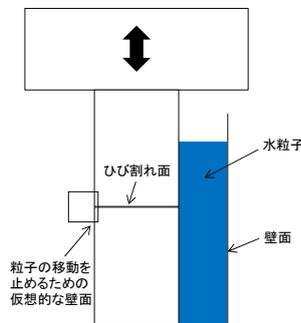


コンクリート強度に比べ、かなり
小さな水圧しか生じていない

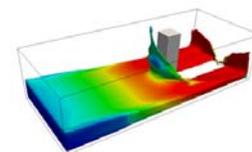
2) 水中におけるRC柱の動的応答

粒子法による解析的検討 ～ 水圧の評価

さらに高いひび割れ開閉速度領域での
水の動きと水圧の確認



仮定
ひび割れ面は平滑
(凹凸なし)
静水圧は実験条件
を模擬

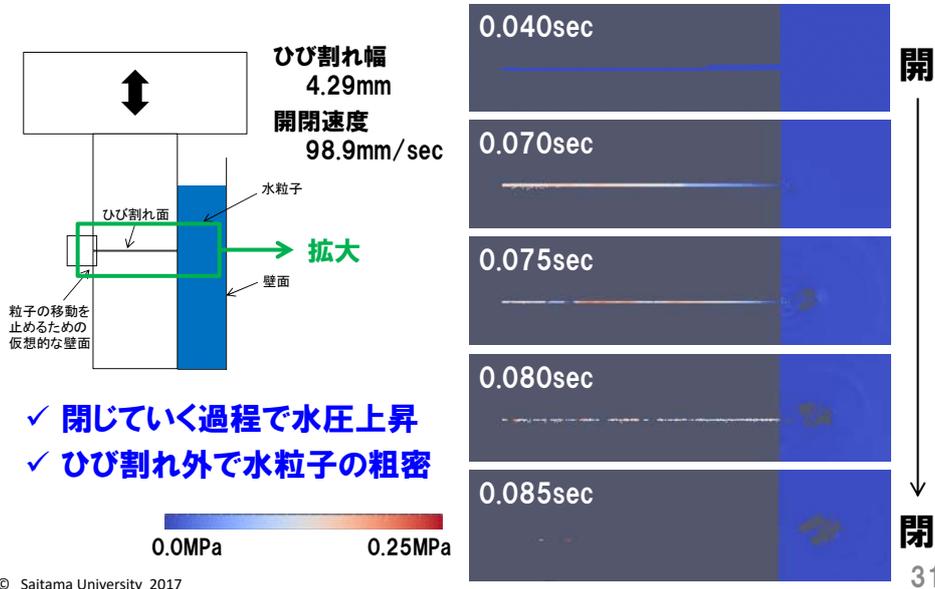


米・西・英の研究者らを中心に
開発された流体解析コード

SPH法 (Smoothed Particle
Hydrodynamics)

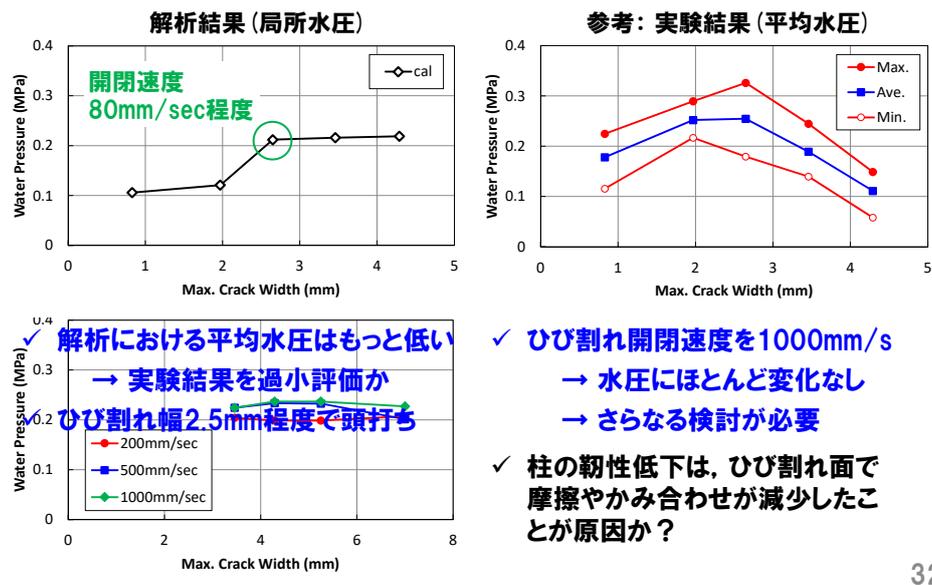
2) 水中におけるRC柱の動的応答

粒子法による解析的検討 ～ 水圧の評価



2) 水中におけるRC柱の動的応答

粒子法による解析的検討 ～ 水圧の評価



本日の講演内容



- 1) RC構造物と地盤の連成地震応答
- 2) 水中におけるRC柱の動的応答
- 3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用



非線形FEM: よくある話

モデル化が複雑すぎて妥当性が判断できない
ブラックボックスで信用できない
精度が判断できない
実験結果に一致しない (実験の良し悪しはさておき)
如何ようにでも調整できる

:

当然, 精度の良し悪しはある

モデル化のガイドライン整備が重要

→ FEM標準, 技術評価制度

原子力耐震マニュアル
(先駆的な例)

有限要素解析の従来の使われ方

- 既存の「骨組み解析」による設計照査の部分的な代替手法
 - そもそも断面力は有限要素解析になじまない
- 断面力に代わる照査指標が必要

3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

コンクリートの損傷指標

Cracking: 引張破壊 (ひび割れ)

Crushing: 圧縮破壊

これらの損傷事象を表現する数値指標として以下を提案 (斉藤ら, 2011年)

$$\sqrt{J'_2} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad : \text{偏差ひずみ第二不変量}$$

$$W_n = \frac{1}{f} \sum_{k=1}^n (\sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij})^{(k)} \quad : \text{正規化累加ひずみエネルギー}$$

累加式で書いているが、本来は積分型 (経路依存)

方向性を持たないスカラー量
無次元量 (ひずみ)

3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

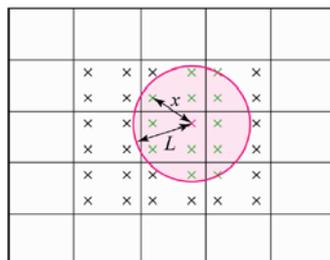
コンクリートの損傷指標

Cracking: 引張破壊 (ひび割れ)

Crushing: 圧縮破壊 ← 圧縮塑性 + ミクロな破壊 ← 材料構成則と連動
弾性エネルギー吸収能の低下

コントロールボリューム: 構成則が定義される (理想化される) 体積または面積
TPの境界条件

重み付き空間平均



$$\text{平均化指標: } \bar{D} = \frac{\int_A D \cdot w(x) dA}{\int_A w(x) dA}$$

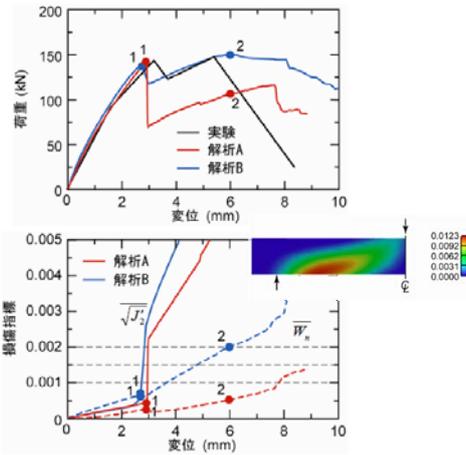
$$\text{重み関数: } w(x) = \begin{cases} 1 - x/L & x \leq L \\ 0 & x > L \end{cases}$$

要素寸法依存性の排除 (低減)

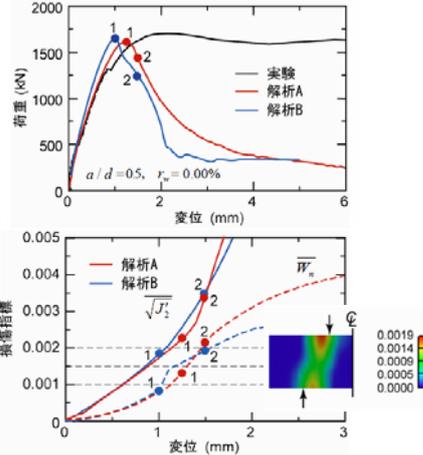
3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

損傷指標の適用例

せん断補強筋のないスレンダー梁 (斜め引張破壊)



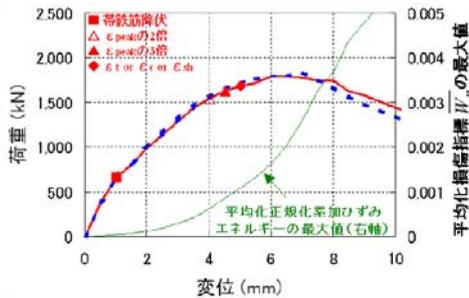
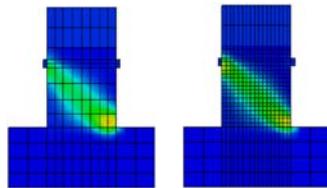
ディープビーム (せん断圧縮破壊)



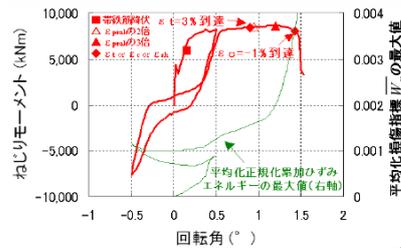
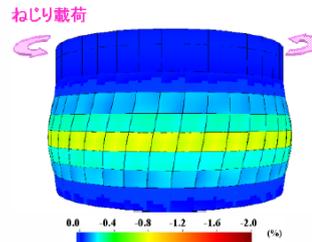
3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

損傷指標の適用例

壁式橋脚

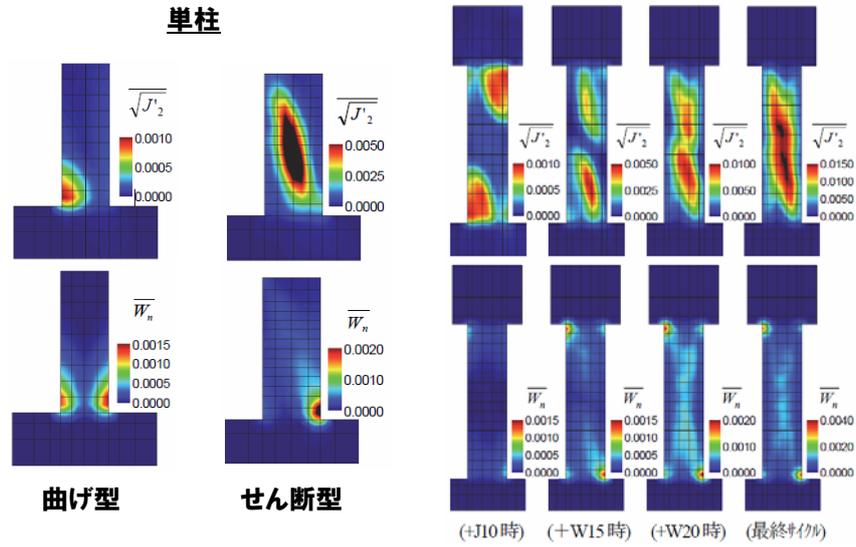


円筒形容器 (ねじり)



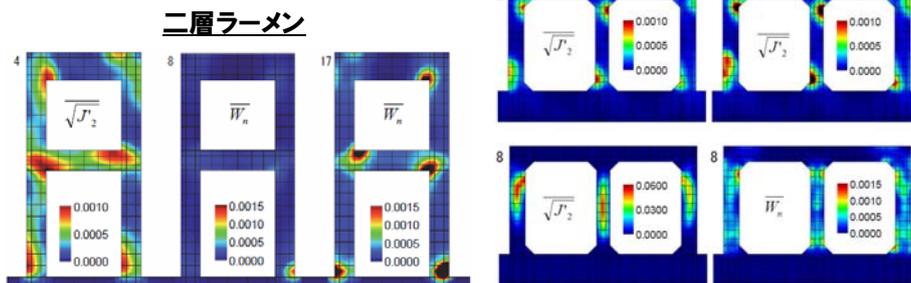
3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

損傷指標の適用例



3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

損傷指標の適用例

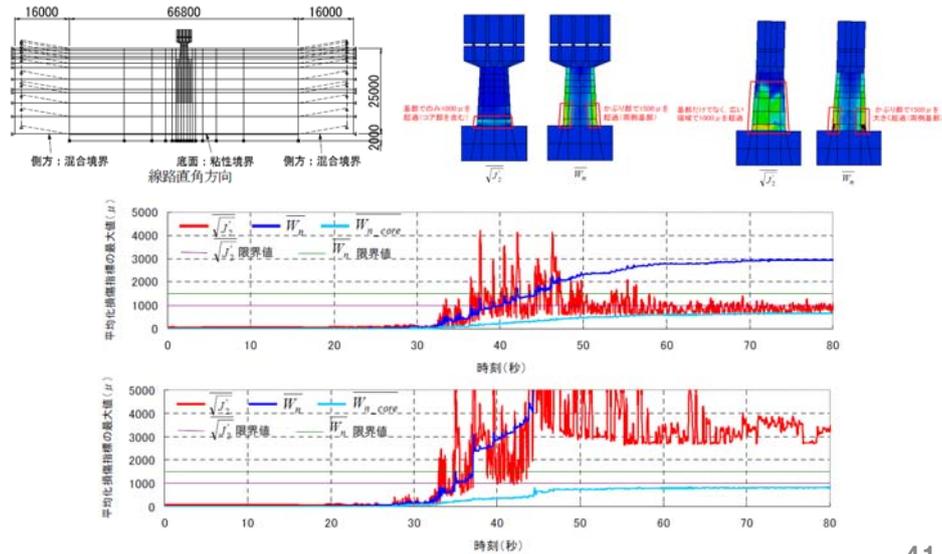


限界状態	応答値		限界値
	損傷指標	平均化長さ L	
斜めひび割れの発生, または引張鉄筋の降伏に伴う曲げひび割れの開口	偏差ひずみの第2不変量 $\sqrt{J_2}$	150mm	0.0010
コンクリートの圧壊	正規化累加ひずみエネルギー \bar{W}_n		0.0015

多様な破壊モードを同じ指標で評価可能・要素分割の影響を受けない

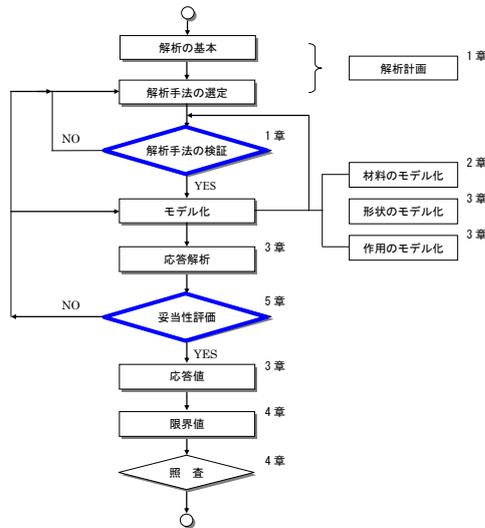
3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

損傷指標と連成解析の組合せ



3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

2012コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 非線形有限要素解析による照査



- 1章 総則**
 - 解析計画
 - 解析手法の事前検証
- 2章 材料のモデル化**
 - 材料構成則が具備すべき要件
- 3章 応答値の算定**
 - モデル化のルール
- 5章 妥当性評価**
 - V&V
- 4章 照査**
 - 照査指標と限界値

3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

2014複合構造標準示方書 [設計編:仕様編] 有限要素解析による性能照査

- ① コン示2012における規定を参考にしつつ、複合構造物の照査に適用可能
- ② 鋼・コンクリート・FRPの各材料、それらを組み合わせた接合部への対応
- ③ 材料モデルやコードを限定せず、事前の検証と結果の妥当性評価の実施を前提
- ④ 性能照査の他に、設計応答値あるいは設計限界値の算定のみにも使用可能

2章 材料のモデル化

2.3 鋼材のモデル化

2.3.3 構造用鋼材のモデル化

2.4 FRPのモデル化

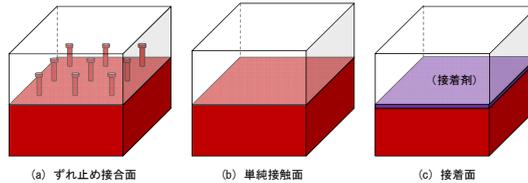
2.4.1 構造用FRPのモデル化

2.4.2 補強用FRPのモデル化

2.5 異種材料間の境界面のモデル化

2.5.2 ずれ止めによる鋼-コンクリート間接合面のモデル化

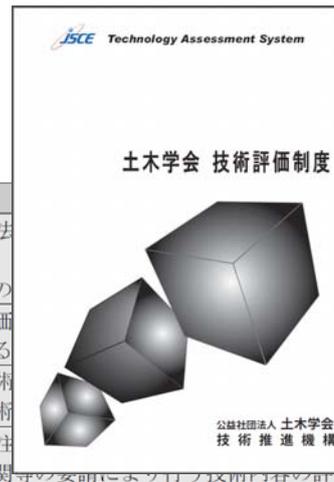
2.5.3 ずれ止めを用いない異種材料間の境界面のモデル化



3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

土木学会 技術評価制度 コンクリート標準示方書 [設計編] の 規定に基づく数値解析

区分	対象分野	
1	材料・工法等の新技術（海外導入技術も含む）	・新技術（材料、工法の評価） ・設計・施工指針等の
2	コンピュータソフトウェア	ソフト分野の技術評価 設計、管理等に用いる
3	研究段階にある技術の実用可能性	研究に近い領域の技術 研究成果に基づく新技術
4	工事の計画・発注段階での提案技術	工事の計画段階や発注 門家が少ない発注機関
5	土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] の規定に基づく数値解析	数値解析事案の客観的・技術的事項（モデル化、入力値の設定、応答値算定結果の解釈、解析係数の設定など）に関する評価



連成問題に関する課題



連成解析に用いる地盤の構成モデル

- ✓ 動的応答, 静的土圧, 盛土, 断層変位...
- ✓ あらゆるシチュエーションで使える統一的なモデル

構造・土・水の三者連成

- ✓ 液状化の大略挙動はOK
- ✓ 側方流動の再現性の実態は...? (次項とも関連)
- ✓ 構造物表面(界面)での水は...? (複合構造物でも同じ)

流体としての水と構造の連成

- ✓ 構造体の変形と流体としての水を同時に解く(マクロ相互作用)
- ✓ ひび割れへの水の侵入(ミクロ相互作用) → 局所水圧による内部損傷
- ✓ ダム・津波... FEMでは難しい?

維持管理(材料-構造の連成)

- ✓ 既設構造物の耐震診断(よく使われる)
- ✓ 材料劣化を生じた構造物の耐震性(点検との連動)
- ✓ 補修・補強履歴を有する構造物の耐震性 耐震だけではない

© Saitama University 2017

ご清聴ありがとうございました

45

参考文献



1) RC構造物と地盤の連成地震応答

牧, 土屋, 渡辺, 前川: 3次元非線形有限要素法を用いたRC杭基礎-地盤系の連成地震応答解析, 土木学会論文集A, Vol.64, No.2, pp.192-207, 2008.

土屋, 千々和, 原田, 三島, 前川: 近接するLNG地下タンク群と地盤で構成されるタンクヤード全体の3次元動的応答解析, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.71, No.3, pp.429-448, 2015.

鍋島, 牧, 半井, 平野: 液状化を生じる地盤におけるRC杭基礎の非線形応答に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.2, pp.1177-1182, 2004.7

牧, 前川, 半井, 平野: 地盤中におけるRC杭基礎の非線形動的応答に関する3次元有限要素解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.2, pp.925-930, 2005.6

Mohammad Reza Okhvat: Damage control of underground RC structures subjected to service and seismic loads, PhD dissertation submitted to the University of Tokyo, 2010

2) 水中におけるRC柱の動的応答

牧, 早坂, 中村: 水中におけるRC柱の動的応答性状に関する研究, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.885-895, 2016

3) 材料の損傷指標と性能照査へのFEMの適用

斉藤, 牧, 土屋, 渡邊: 非線形有限要素解析によるRCはり部材の損傷評価, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.67, No.2, pp.166-180, 2011

土屋, 牧, 斉藤, 渡邊, 前川: 非線形有限要素解析によるRC面部材の損傷指標と耐力評価, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.68, No.3, pp.209-224, 2012

牧, 斉藤, 土屋, 渡邊, 島: 正負交番荷重を受けるRC骨組み構造物の非線形有限要素解析による損傷評価, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.69, No.1, pp.33-52, 2013

土屋, 牧, 斉藤, 坂口, 渡邊: 地震被害を受けたRC構造物の2次元動的有限要素解析への材料損傷指標の適用, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.70, No.2, pp.226-231, 2014

© Saitama University 2017

46