

非線形有限要素解析によるRC構造物の損傷指標と損傷評価

埼玉大学 牧 剛史



目次

1. 性能照査の現状
2. 性能照査と有限要素解析
3. 材料の損傷指標の提案
4. 損傷指標の適用例
5. 構造物-地盤連成解析
6. FEM標準と技術評価制度



1. 性能照査の現状

- 現行の性能照査
 - 骨組み解析 (断面力) ベース
 - 構造物の性能を部材で照査 (一部材がNGなら構造物としてNG)
- 自由度の縮退 (線材・シェル)
 - 面積・体積を無視 → せん断照査になじまない
 - ファイバーのせん断, シェルの面外せん断
 - そもそも, 面内/面内などの区別が発生
 - 部材接合部は剛域?



1. 性能照査の現状

部材の種類

- ・形状
- ・荷重条件
- ・支持条件

境界条件 のちがい

形状	二次元/三次元
境界条件	二次元/三次元
作用 (荷重)	二次元/三次元

どれか一つでも三次元なら結局三次元解析が必要

形状が複雑なら, もはや線材やシェルの組み合わせに変換不能



1. 性能照査の現状

いわゆる破壊モードと呼ばれるもの

圧縮破壊、引張破壊
 曲げ引張破壊、曲げ圧縮破壊
 斜め引張破壊、せん断圧縮破壊、
 押し抜きせん断破壊、
 ねじりせん断破壊、……

不具合が生じる原因は結局……

外的・内的な作用によって

- > 材料が持つ力学的性質
- > 材料間の力学的相互作用が損なわれる (損傷)

損傷 (鉄筋コンクリートの場合)

・コンクリート	・鉄筋
ひび割れ	降伏、破断
圧縮破壊	座屈

三次元材料非線形FEM
 → ややこしい破壊モード分類は不要



目次

1. 性能照査の現状
2. 性能照査と有限要素解析
3. 材料の損傷指標の提案
4. 損傷指標の適用例
5. 構造物-地盤連成解析
6. ガイドラインの整備と技術評価制度



2. 性能照査と有限要素解析

7

有限要素解析のこれまでの使われ方

- (材料線形) 有限要素解析
 - 応答値 (応力) を求めるための一構造解析手法
- 材料非線形有限要素解析の発展
 - 限界状態に対応した限界値 (耐力等) を求める手法
- 従来法 (断面力・応力ベース) の代替
 - 境界条件 (支点, 載荷点) を無理やり設定
 - 断面力を無理やり算定
 - 実務の設計照査における適用例は伸びず

従来法との不親和性



2. 性能照査と有限要素解析

8

有限要素解析を性能照査に使うために・・・

- 計算効率と計算環境
 - 高速演算アルゴリズム
 - GUIの進化
 - 計算環境の飛躍的改善
- 応力・ひずみの要素寸法依存性
 - 軟化型材料構成則
 - 破壊エネルギー
- 照査に用いる指標と限界値
 - 材料の損傷状態を定量的に評価できる指標
 - 構造物の限界状態に対応する材料損傷の限界値



目 次

9

1. 性能照査の現状
2. 性能照査と有限要素解析
3. 材料の損傷指標の提案
4. 損傷指標の適用例
5. 構造物—地盤連成解析
6. ガイドラインの整備と技術評価制度



3. 材料の損傷指標の提案

10

コンクリートの損傷

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, Vol.67, No.2, 2011

- 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)

ひび割れ

$$\sqrt{J_2} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad : \text{偏差ひずみ第二不変量}$$

圧縮破壊

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

累加式で書いているが, 本来は積分型 (経路依存)

- ✓ 各積分点における値
- ✓ 方向性を持たない (スカラー量)
- ✓ 無次元量 (ひずみ)



3. 材料の損傷指標の提案

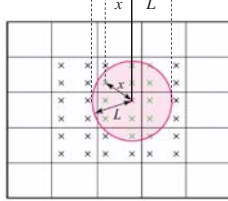
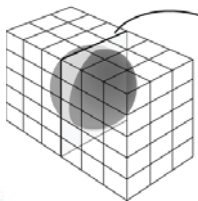
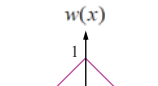
11

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, Vol.67, No.2, 2011

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

要素寸法依存性の排除 (低減)

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



3. 材料の損傷指標の提案

12

提案した損傷評価指標と限界値

表-2 損傷指標の限界値

限界状態	応答値		平均化長さL	限界値
	損傷指標			
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

セット

- > 平均化領域=あくまで物理情報を空間平均化するための数学的概念
- > 最小二乗法やスペクトルの平滑化と同じイメージ



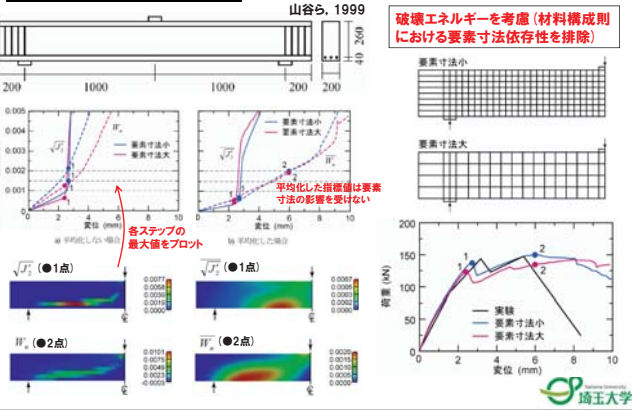
斉藤, 牧, 土屋, 渡邊: 非線形有限要素解析によるRCはり部材の損傷評価, 土木学会論文集E2, Vol.67, No.2, 2011

3. 材料の損傷指標の提案

13

指標値と要素寸法依存性

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, Vol.67, No.2, 2011

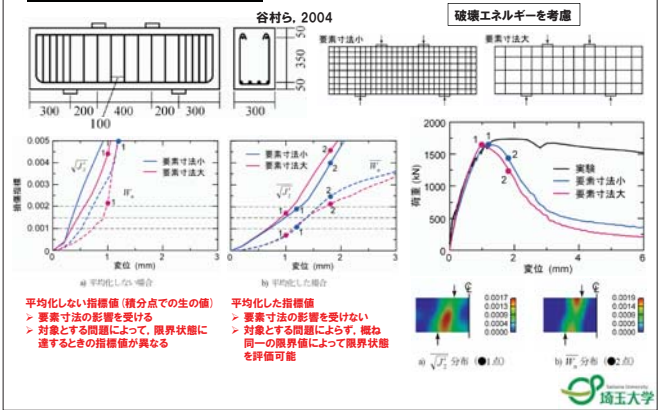


3. 材料の損傷指標の提案

14

指標値と要素寸法依存性

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, Vol.67, No.2, 2011



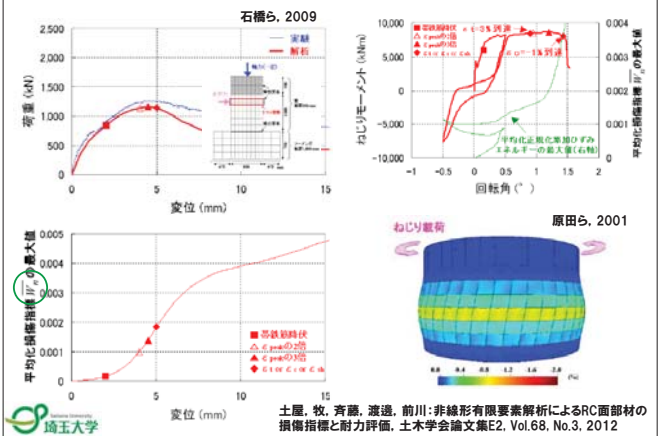
目次

15

1. 性能照査の現状
2. 性能照査と有限要素解析
3. 材料の損傷指標の提案
4. 損傷指標の適用例
5. 構造物-地盤連成解析
6. ガイドラインの整備と技術評価制度

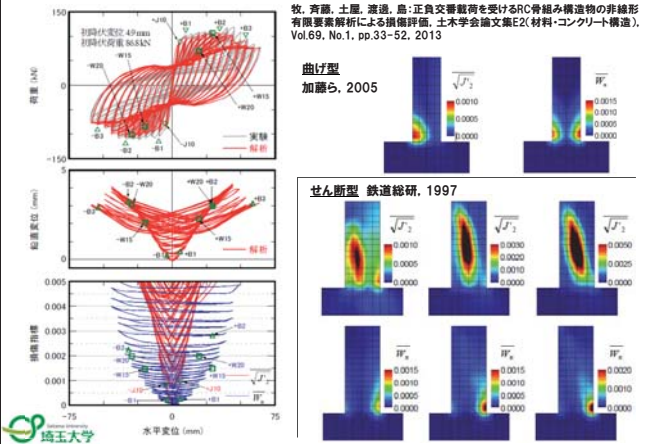
4. 損傷指標の適用例 ~ 面部材

16



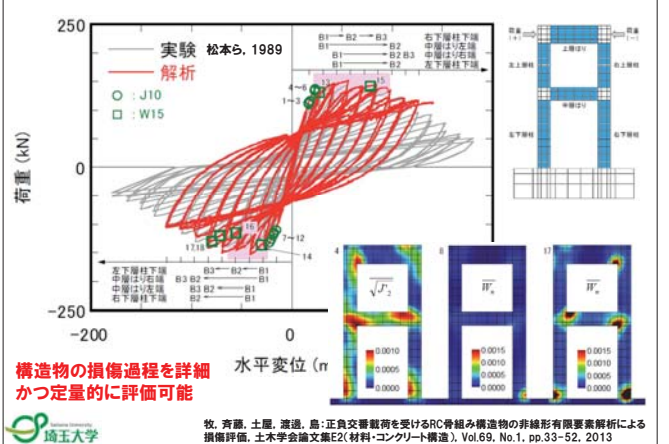
4. 損傷指標の適用例 ~ 柱部材

17



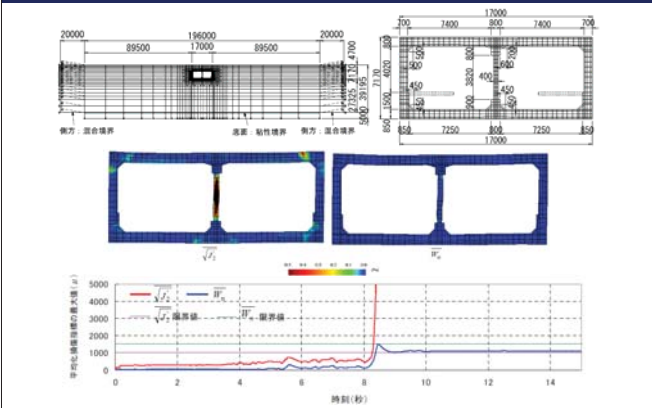
4. 損傷指標の適用例 ~ 骨組み構造

18



4. 損傷指標の適用例 ～ 動的解析

19



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.

4. 損傷指標の適用例

20

まとめと今後の展開

■ 材料の損傷指標の利点

- 短期的な力学的変状 (ひび割れ、破壊)
- あらゆる破壊モードを同一指標で評価可能
- 新設・既設の区分なく使える
- 修復後の性能評価

■ 材料の経時変化 (時間依存性)

- 長期的な力学的変状 (クリープ、疲労)
- 物理化学的変状 (いわゆる材料劣化)



目次

21

1. 性能照査の現状
2. 性能照査と有限要素解析
3. 材料の損傷指標の提案
4. 損傷指標の適用例
5. 構造物-地盤連成解析
6. FEM標準と技術評価制度



5. 構造物-地盤連成解析

22

地中構造物の性能照査

構造物と地盤の連成解析 (動的解析)

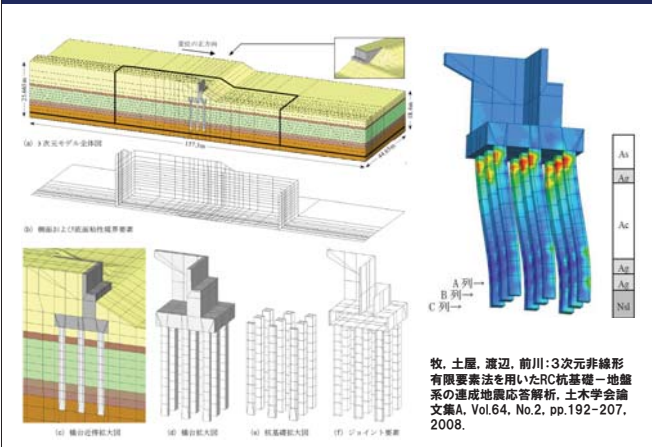
- ・ (地震動以外の) 作用を無理やりモデル化する必要がなくなる
- ・ 適切な境界条件 (半無限地盤), 適切な地盤モデル

三次元ソリッド+地盤連成動解を基本とする照査の枠組み (既設LNGタンク)



5. 構造物-地盤連成解析

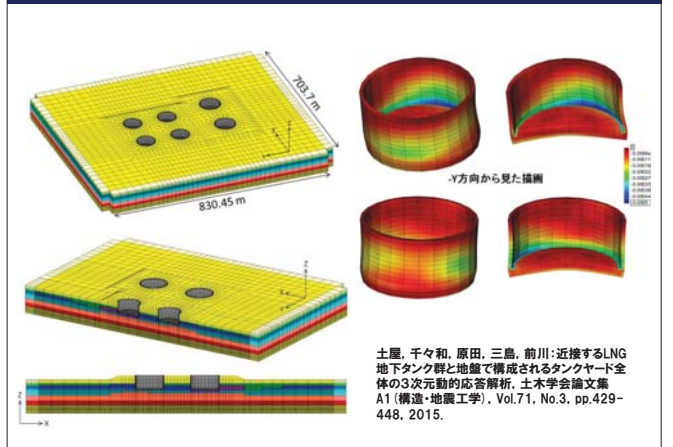
23



牧, 土屋, 渡邊, 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.

5. 構造物-地盤連成解析

24



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.

目次

25

1. 性能照査の現状
2. 性能照査と有限要素解析
3. 材料の損傷指標の提案
4. 損傷指標の適用例
5. 構造物-地盤連成解析
6. FEM標準と技術評価制度



6. FEM標準と技術評価制度

26

よくある意見

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
:

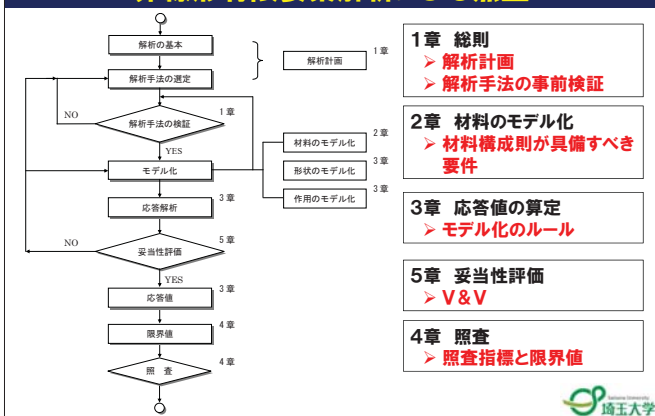
当然, 精度の良し悪しはある
モデル化のガイドライン整備が重要
→ FEM標準, 技術評価制度

原子力耐震マニュアル
(先駆的な例)



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

27



- 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



コン示設計編標準 非線形有限要素解析による照査

28

- 1章 総則
 - 1.1 適用の範囲
 - 1.2 解析計画
 - 1.3 解析手法の検証
 - 1.4 用語の定義
- 2章 材料のモデル化
 - 2.1 一般
 - 2.2 コンクリートのモデル化
 - 2.2.1 ひび割れのモデル化
 - 2.2.2 引張応力下における応力-ひずみ関係
 - 2.2.3 ひび割れ面でのせん断伝達モデル
 - 2.2.4 圧縮応力下における応力-ひずみ関係
 - 2.3 鉄筋およびPC鋼材の応力-ひずみ関係
 - 2.4 部材接合面のモデル化
- 3章 応答値の算定
 - 3.1 一般
 - 3.2 構造物のモデル化
 - 3.2.1 一般
 - 3.2.2 有限要素による部材のモデル化
 - 3.3 作用のモデル化
 - 3.4 応答解析
 - 3.5 設計応答値の算定
- 4章 照査
 - 4.1 一般
 - 4.2 破壊に対する照査
 - 4.2.1 材料の損傷による照査
 - 4.2.2 変位・変形による照査
 - 4.2.3 断面力による照査
 - 4.3 疲労破壊に対する照査
 - 4.3.1 材料の疲労強度による照査
 - 4.3.2 断面力による照査
 - 4.3.3 材料の損傷による照査
 - 4.4 使用性に対する照査
 - 4.4.1 応力度による照査
 - 4.4.2 外観ひび割れによる照査
 - 4.4.3 変位・変形による照査
 - 4.5 修復性に対する照査
- 5章 妥当性評価
 - 5.1 一般
 - 5.2 実施前の妥当性確認
 - 5.3 解析結果の妥当性の確認
 - 5.4 解析結果の適用範囲
 - 5.5 解析結果が妥当でない場合の対応
 - 5.6 第三者評価



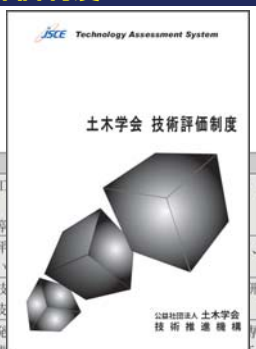
土木学会 技術評価制度

29

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

発注者に第三者評価の仕組みとして
利用して頂きたい

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、工の評価 ・設計・施工指針等
2	コンピュータソフトウェア	ソフト分野の技術評 設計、管理等に用い
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 究成果に基づく新技
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 注者が少ない発注機
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



土木学会 技術評価制度

公益社団法人 土木学会
技術推進機構