

## 材料非線形解析を用いた 耐震性能照査

小委員会幹事

宮川 義範（電力中央研究所）

1

## 関連箇所

<マニュアル>

3章 材料非線形解析を用いた耐震性能照査

<技術資料>

IV 三次元鉄筋コンクリート製地中構造物の地震時挙動に関する実験的検討およびその解析

VI 三次元形状を有する地中構造物の静的載荷実験とその解析

VII コンクリート中の鉄筋の引張限界

VIII 材料非線形解析を用いた照査に係る諸検討

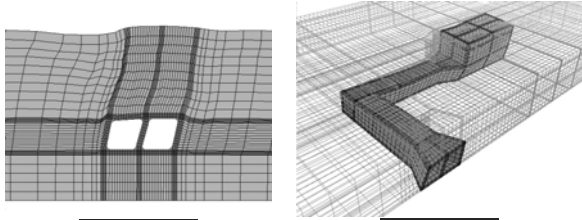
<照査例>

II 三次元材料非線形の地震応答解析を用いた照査例

2

## マニュアル3章 材料非線形解析を用いた耐震性能照査

材料非線形(ソリッド)モデルで地震応答解析を行った場合の照査指標、限界値、安全係数等



二次元

三次元

どちらも適用できるように

3

## 幾つかの照査ルート

マ3.1

	2005年版 マニュアル	コン示方書	3章	4章 (ブッシュオーバー)
	A	B	C	D
主な照査項目	(1) 面外曲げ / 層間変形角 or 曲率 or 圧縮ひずみ (2) 面外せん断 / せん断耐力	(1) 引張損傷 / 偏差ひずみ第二不変量 (2) 引張損傷 / 正稜化率加ひずみ / エネルギー	(1) 面外曲げ・面内せん断 / 層間変形角 / または 主圧縮ひずみ (2) 面外せん断 / 部材厚増分	構造物全体の耐力または変形角(終局ひずみの確認)
応答解析のモデル・方法	構造物を主に平面要素でモデル化する。一般には、横断面方向の地震応答を対象として二次元解析が行われる。荷重の動的/静的の区別にはよらない。	構造物を平面要素・ソリッド要素でモデル化する。二次元/三次元の区別、荷重の動的/静的の区別にはよらない。	構造物を平面要素・ソリッド要素でモデル化する。二次元/三次元の区別、荷重の動的/静的の区別にはよらない。	構造物を平面応力・ソリッド要素でモデル化する。静的耐力による応答の算出を行う場合は、土圧等を安全側に設定する必要がある。二次元/三次元の区別にはよらない。
特徴	面外せん断破壊の限界値をせん断耐力評価式で求める従来法(2005年版マニュアル)。面外せん断破壊の発生を許容しない。	構造形式を問わない汎用性の高いひずみ指標に基づいて照査する。縦筋の最大拘束点に至らない範囲の限界値であり、基本的に右のcより安全側である。	本マニュアルで新規に導入する。面外せん断破壊を变形指標で照査する方法。不特定・低軸力の構造物であることを前提として、面外せん断破壊の発生は許容するが、その著しい進展は許容しない。	本マニュアルで新規に導入する。構造物全体の観点から照査する方法。数値解析の特長性として、部材・部位としての損傷が従局状態とはならない範囲内で、構造物全体の挙動が安定している時点を検査に設定する。
参照	2章, 3.3.2(1) または 3.3.3(1) / 3.3.2(3)ab	3.3.3(3)。詳細はコンクリート標準示方書	/ 3.3.2(2) または 3.3.3(1)(2) / 3.3.2(3)c	4章

4

## Cルート(限界値)

### 1. 面外曲げ・面内せん断

→ 層間変形角  
または主圧縮ひずみ

### 2. 面外せん断

→ 部材厚増分

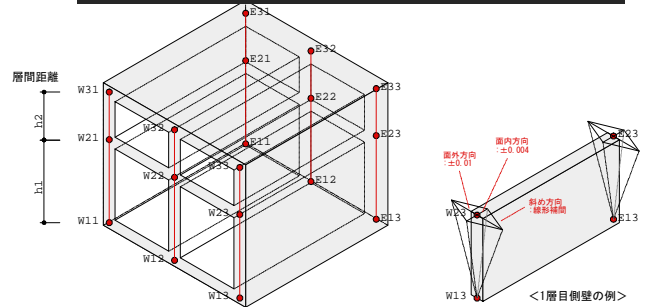
5

## Cルート(限界値)

マ3.3.2(2)

### 1. 面外曲げ・面内せん断

→ 層間変形角(面外: 1/100、面内: 4/1000、斜め: 線形補間)



6

### Cルート(限界値)

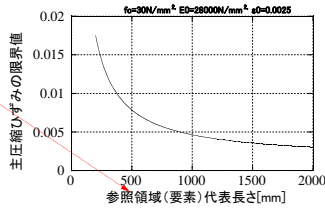
マ3.3.3(2)

#### 1. 面外曲げ・面内せん断

→ または主圧縮ひずみ(限界値は参照領域の大きさに依存)

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{c0} + \frac{2G_{fc}}{l_f J_{ck}'} - \frac{f'_{ck}}{E_{c0}}$$

$$G_{fc} = 8.8\sqrt{f'_{ck}} \text{ [N/mm]}$$



[補足] 主ひずみベクトル図などを通じてモードを面外曲げに特定できる場合は、従来からの二次元基準(参照長さ1D以下の圧縮ひずみ0.01)も適用可。

7

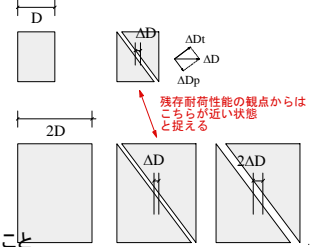
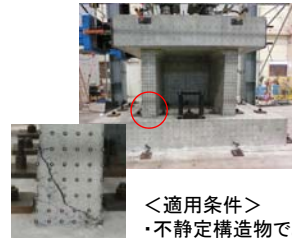
### Cルート(限界値)

マ3.3.2(3)c

#### 2. 面外せん断

→ 部材厚増分

せん断補強筋のない場合: 5mm



<適用条件>

- ・不静定構造物であること
- ・軸力比: 部材平均0.1以下

8

### Cルート(限界値)

マ3.3.2(3)c

#### 2. 面外せん断

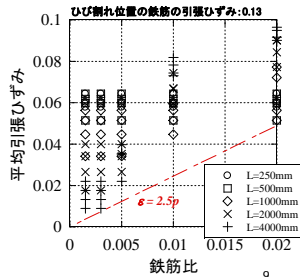
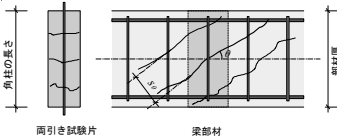
→ 部材厚増分

せん断補強筋のある場合: 次式で設定

$$\Delta D_{lim} = 2.5 p_w D$$

せん断補強筋比

(初期)部材厚



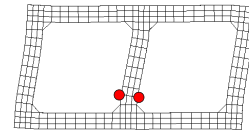
9

### Cルート(限界値)

マ3.3.2(3)c

#### 2. 面外せん断

→ 部材厚増分

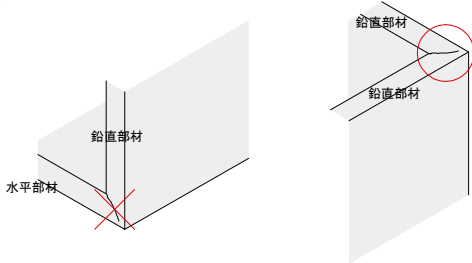


部材厚増分の抽出箇所は、解析者が変形図を参照するなどして決定する。

10

### Cルート(照査部位補足)

マ3.3.4



(a) 鉛直部材と水平部材の接合部

(b) 鉛直部材同士の接合部

- / 鉛直部材と水平部材の接合部は、部材厚増分の照査を行う。
- / 鉛直部材同士の接合部は照査部位から除く。
- / ハンチ(三角形の部分)は照査部位から除く。

11

### Cルート(安全係数)

マ3.3.1

安全係数	応答解析入力値	応答値(変形指標)算定	限界値(変形指標)算定
材料係数	コンクリートの強度	±1.3 <sup>※1</sup>	-
	鉄筋の強度	±1.0	-
	地震の強度	±1.0	-
応答値係数	キャリブレーション(3.3.2(3)か)によってモデルを調整	(層間変形角, 主圧縮ひずみ, 部材厚増分) × 1.2~	-
限界値係数	-	-	±1.0
作用係数	×1.0	-	-
構造物係数	-	×1.0	±1.0

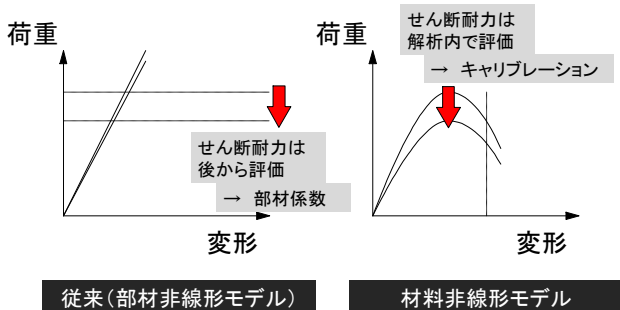
※1 既設構造物の場合は本文の記述による

不確実性を考慮する対象因子は大きく変わっていないが、(コンクリート強度の不確実性、せん断耐力の評価精度) 応答解析の入力データ設定段階で考慮するのが主体となっている。

12

### ルート(安全係数)

マ3.3.1



従来(部材非線形モデル)

材料非線形モデル

### キャリブレーションモデルの見直し

・17モデル → 12モデルへ  
 / 着目点の重複回避  
 / 2005年版マニュアル発刊後の経験等によると  
 集中荷重部材が部材係数を決定する傾向が強い。→分布荷重ケースの削減

case	集中/分布	着目点	削除理由	リナンバリング
1		No.1-9の基本ケース		1
2		a/dの効果(短)		2
3		b/dの効果(長)		3
4		せん断耐力(片持)	No.3で代表	3
5	集中荷重部材	コンクリート圧縮強度の効果		4
6		引張鉄筋比の効果		5
7		寸法効果		6
8		軸力の効果		7
9		せん断補強の効果		8
10		No.1-14の基本ケース		9
11		分布荷重を受けるスパンの効果	No.2で代表	9
12		分布荷重を受けるスパンの効果	No.3で代表	9
13	分布荷重部材	曲げモーメント分布の効果(片持ち梁)		10
14		曲げモーメント分布の効果(片持ち梁)	No.10において特殊せん断耐力の増減がない	10
15		No.15-17の基本ケース		11
16		分布荷重下でのせん断補強の効果		12
17		軸力の効果	No.2で代表	12

マ3.3.2(3)d

### キャリブレーションモデルの見直し

表3.3-2 キャリブレーションモデル一覧

Case No.	スパン[mm]	鉄筋比[mm]	せん断耐力[mm]	コンクリート圧縮強度[mm]	引張鉄筋比	軸力比	せん断補強	せん断耐力[mm]	せん断耐力[mm]	せん断耐力[mm]	着目点
1	0.25	1.00	0.25	24.8	350	0.025	0	0	0	0	No.1-9の基本ケース
2	0.25	1.00	0.25	24.8	350	0.025	0	0	0	0	寸法効果
3	0.25	1.00	0.25	24.8	350	0.025	0	0	0	0	コンクリート圧縮強度の効果
4	0.25	1.00	0.25	24.8	350	0.025	0	0	0	0	引張鉄筋比の効果
5	0.25	1.00	0.25	24.8	350	0.025	0	0	0	0	寸法効果
6	0.25	1.00	0.25	24.8	350	0.025	0	0	0	0	軸力の効果
7	0.25	1.00	0.25	24.8	350	0.025	0	0	0	0	せん断補強の効果
8	0.25	1.00	0.25	24.8	350	0.025	0	0.025	0	0	せん断補強の効果

マ3.3.2(3)d

### キャリブレーション結果の適用について

マ3.3.2(3)d

#### 2005年版マニュアル

・・・「材料非線形解析による部材のせん断耐力評価」のみ  
 (解析によるせん断耐力)/(モデルせん断耐力)比を部材係数とする。

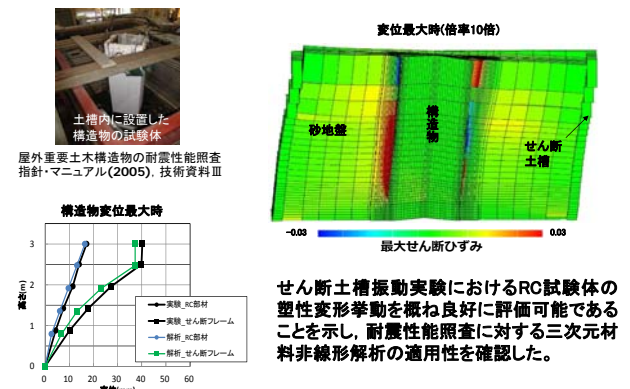
#### 改訂マニュアル

・・・「材料非線形解析による応答解析」も対象に  
 <Cal1> (解析によるせん断耐力)/(モデルせん断耐力)比ができるだけ小さくなるようモデルを調整  
 <Cal2> <Cal1>で調整しきれない分は安全係数として考慮  
 (応答係数または限界係数として荷重を割り増す)

### 関連技術資料

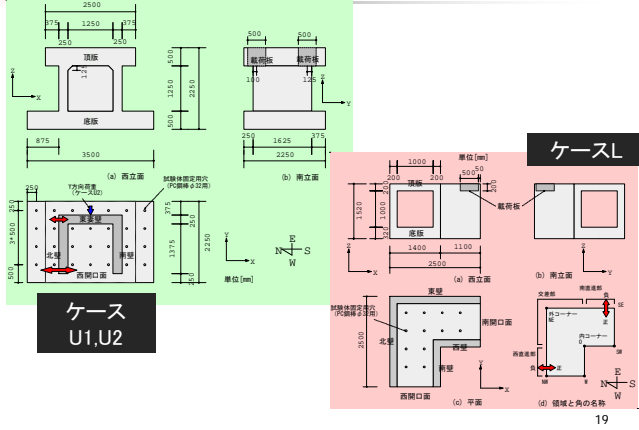
- IV 三次元鉄筋コンクリート製地中構造物の地震時挙動に関する実験的検討およびその解析
- VI 三次元形状を有する地中構造物の静的載荷実験とその解析
- VII コンクリート中の鉄筋の引張限界
- VIII 材料非線形解析を用いた照査に係る諸検討

### IV 砂地盤に埋設した立坑の振動実験(2000)の解析



せん断土槽振動実験におけるRC試験体の塑性変形挙動を概ね良好に評価可能であることを示し、耐震性能照査に対する三次元材料非線形解析の適用性を確認した。

## VI 三次元実験とその解析

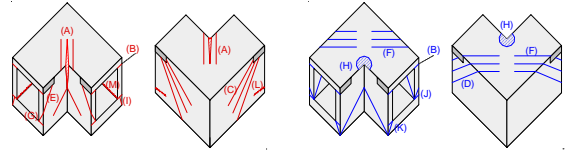


19

## VI 三次元実験とその解析

<最終状況>

ケースL



<損傷モード(開く)>

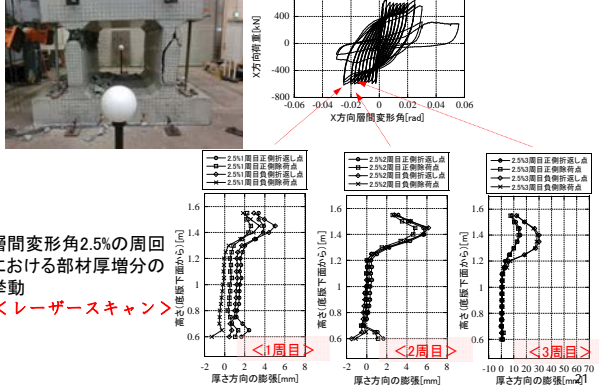
<損傷モード(閉じる)>

20

## VI 三次元実験とその解析

<最終状況>

ケースA



層間変形角2.5%の周囲  
における部材厚増分の  
挙動  
<レーザーสキャン>

## VI 三次元実験とその解析

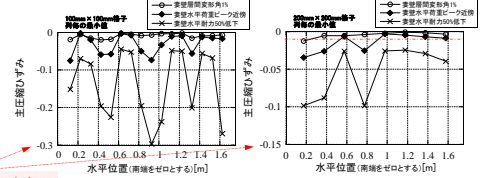


U1

100mm格子で評価

200mm格子で評価

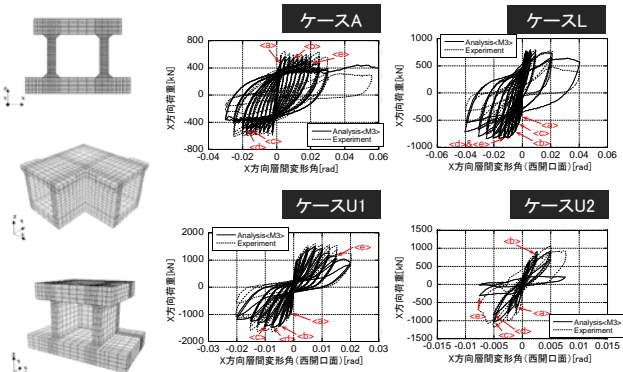
<画像計測>



レンジが違う点に注意

22

## VI 三次元実験とその解析



23

## VII 鉄筋の引張限界

コンクリート中の鉄筋の引張限界を評価するには、①ひび割れ間隔 と、②鉄筋単体の引張限界 とが必要。

・平均ひび割れ間隔 → 文献調査

・鉄筋単体の引張試験

・鉄筋コンクリート棒の引張試験

・面外せん断補強筋を有する壁の  
部材厚増分限界値の導出



24

## VII 鉄筋の引張限界

鉄筋単体の引張試験  
(引張強度発現直後で試験終了)

画像計測等から、フシ間変位を測定。  
引張強度時の伸び量を求める。

引張強度発現直後のひずみの  
実験値を取得した。

### 実験結果

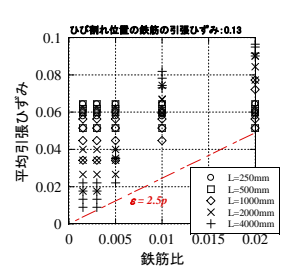
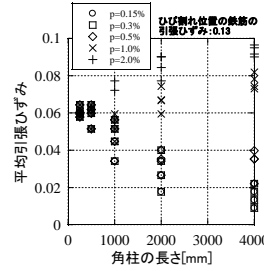
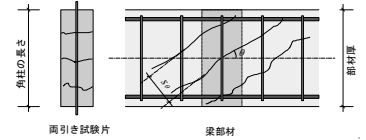
呼び名	鋼種	平均限界ひずみ [%]
D10	SD295	18.9
D13	SD295	17.1
D16	SD345	13.5
D19	SD345	16.9
D22	SD345	17.0
D25	SD345	17.4

鉄筋の引張限界ひずみの下限は13%程度

25

## VII 鉄筋の引張限界

Salem and Maekawa<sup>1)</sup>  
の付着解析法によるスタディ



26

## VIII 照査に係る諸検討

限界値作成に関連して実施した比較的小規模の検討を  
オムニバス形式でまとめた資料

VIII-2 軸力比やせん断補強筋比が大きい場合の部材厚増分の  
挙動

VIII-3 要素寸法の影響に架するケーススタディ

VIII-4 ソリッド要素の要素代表長さ算定法

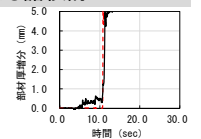
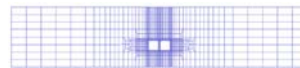
VIII-5 変位やひずみを指標とすることによる照査結果への影響

27

## 照査例

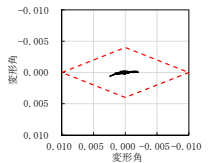
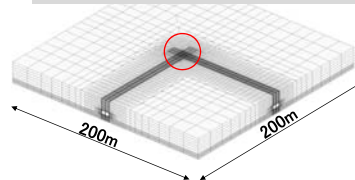
<技術資料>

VIII 材料非線形解析を用いた照査に係る諸検討



<照査例>

II 三次元材料非線形の地震応答解析を用いた照査例



## まとめ(限界値・安全係数[再掲])

### 1. 面外曲げ・面内せん断

- 層間変形角(面外:1/100、面内:4/1000、斜め:線形補間)
- または主圧縮ひずみ(限界値は参照領域の大きさに依存)

### 2. 面外せん断

- 部材厚増分  
せん断補強筋のない場合:5mm、ある場合:2.5p<sub>v</sub>D

### <安全係数一覧>

安全係数	応答解析入力値	応答値(変形指標)算定	限界値(変形指標)算定
材料係数	コンクリートの強度	$\pm 1.3^{0.1}$	-
	鉄筋の強度	$\pm 1.0$	-
	地震の強度	$\pm 1.0$	-
応答値係数	キャリブレーション(3.3.2(3)4)によってモデルを調整	(層間変形角、主圧縮ひずみ、部材厚増分) $\times 1.2 \sim$	-
限界値係数	-	-	$\pm 1.0$
作用係数	$\times 1.0$	-	-
構造物係数	-	$\times 1.0$	$\pm 1.0$

※1 既設構造物の場合は本文の記述による

29



30