

「屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針」 改訂の全体概要

- 1.研究の全体概要
- 2.小委員会の活動概要
- 3.指針の主な改訂内容
- 4.マニュアルの改訂概要

小委員会副幹事長
 松尾豊史 (電力中央研究所)

1

小委員会の委員構成

2018年4月13日時点

2

委員長	前川宏一(横浜国立大学)	幹事	小澤和弘(関西電力) 遠藤大輔(中部電力) 小川健太郎(東京電力) 松井 淳(電力中央研究所) 宮川義範(電力中央研究所) 永田聖二(電力中央研究所) 島端嗣浩(電力中央研究所)
顧問 3名	丸山久一(長岡技術科学大学) 宮川豊章(京都大学) 金津 努(電力中央研究所)	7名	
委員 15名	島 弘(高知工科大学) 中村 光(名古屋大学) 下村 匠(長岡技術科学大学) 牧 剛史(埼玉大学) 山本貢士(京都大学) 河井 正(東北大学) 川村佳則(東京ガス) 三島徹也(前田建設) 福浦尚之(JAエナジー・コリアンク) 永井秀樹(大林組) 大友敬三(電力中央研究所) 辨野 裕(東北電力) 金子岳夫(中部電力) 和仁雅明(中部電力) 大熊信之(九州電力)	18名	常時参加者 (ワザ・ド-) 星 秀樹(北海道電力) 宮岸和信(北陸電力) 吉次真一(中国電力) 高橋利昌(四国電力) 増田崇治(日本原子力発電) 中村洋一(電源開発) 岡本和久(日本原燃) 松本優平(関西電力) 大塚 拓(電力中央研究所) 柴山 淳(電力中央研究所) 渡辺和明(大成建設) 新美勝之(清水建設) 逸藤 史(鹿島建設) 松本敬克(ニューシエック) 山谷 敦(東電設計)
幹事長 副幹事長2名	松村卓郎(電力中央研究所) 両角浩典(関西電力) 松尾豊史(電力中央研究所)	事務局	丸畑明子(土木学会)

※委員長+委員16名(うち電気事業者委員5名)

1-1 研究の背景と目的

3

背景

- ・2011年東北地方太平洋沖地震(Mw=9.0)の発生
→基準地震動の増大
- 構造物では、設計上の保守性が確認
- ・コン示方書[設計編](2012)の刊行, JEAC4601-2008の改訂
- ・耐震性能照査指針(2005)の刊行から10年が経過
- 解析手法や性能照査法の高度化が必要(水平二方向入力および三次元非線形挙動や変形指標を用いた評価など)

目的

鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査手法を高度化するとともに、屋外重要土木構造物に対する標準的な方法を構築する。

⇒より実挙動に近い評価やせん断照査の合理化等が可能

1-2 研究内容(研究項目)

1. 耐震性能照査手法の高度化

- (1) 地盤・構造物連成系の三次元地震応答解析
- (2) 変形指標を用いた性能照査に関する検討
 - a) 三次元地中構造物の耐荷特性検証実験
 - b) 検証実験のシミュレーション解析
- (3) 補修効果に関する検討
- (4) 構造物と機器の境界部に関する検討

2. 耐震性能照査手法の標準化

- (1) 既設発電所の材料物性の収集・整理
- (2) 耐震性能照査および地震被害事例の収集・整理

4

2-1 小委員会の活動概要

5

- 研究期間は2015~2017年度の3ヶ年。
- 小委員会を主たる審議の場として年3回程度開催した。
- 小委員会前に、幹事会などを適宜開催して事前検討を行った。
- 2年目前半に公開講演会し、終了後に講習会を開催する。

	5-8月	9-12月	1-4月
2015 (H27)	✓第1回委員会8/3 (活動方針, 3ヶ年計画案)	✓第2回委員会11/10 (H27 計画&途中経過) ✓11/11現場見学 (女川原子力発電所)	✓第3回委員会3/31 (H27成果,H28計画)
2016 (H28)	✓7/27公開講演会 (小委員会メンバー) ✓第4回委員会 (H28計画&途中経過)	✓第5回委員会(1/13) (載荷実験見学, H28途中経過)	✓第6回委員会(4/20) (H28成果,H29計画)
2017 (H29)	✓第7回委員会(7/26) (H29計画&途中経過, 改定方針審議)	✓第8回委員会(12/7) (H29途中経過, 指針改定案審議) ✓12/8現場見学 (伊方原子力発電所)	✓第9回委員会(4/13) (H29成果, マニュアル改訂案等審議)

◎2018年8月1日 講習会準備会(小委員会) → 10月23日講習会(東京)

2-2 耐震性能照査手法の標準化



- 第1章 総 則
- 第2章 屋外重要土木構造物の耐震性能
- 第3章 材 料←(材料の実測値を用いる場合)
- 第4章 地震の影響および環境作用
- 第5章 解析手法←①三次元解析手法の導入
- 第6章 性能照査
 - (1)耐震性能照査←②変形指標を用いた照査の導入
 - 機器・配管を支持する場合←③定着部に対する検討
 - (2)耐久性能照査←④補修効果を考慮

6

2-3 改訂指針2018の構成

7

◆指針・同解説

指針箱書き：屋外重要土木構造物の耐震性能照査における基本的な考え方

改訂に応じて、微修正や更新などは行うものの、近い将来を見据えて、10年単位では大きく変わらない記載とする

同解説：指針の補足説明、基本的な考え方を具現化するための方法の枠組みなど

◆マニュアル・照査例

マニュアル：耐震性能照査の一般的な手法や手順

過去の手法は踏襲するものの、改訂時の最新の知見を踏まえて、適宜修正する。現時点では難しいものは、技術資料の方に記載する。

照査例：マニュアル・技術資料に基づく具体例

照査手法はマニュアルに基づいた手法、基準値などは既往知見や技術資料に基づく数値を用いる。

◆技術資料(改訂資料)：耐震性能照査における基礎資料や参考情報など

本研究で実施した実験的な検討や解析的検討、参考となる技術資料など

2-4 指針マニュアルの再構成

8

◆2005年版指針

- 第1章 総則
- 第2章 屋外重要土木構造物の耐震性能
- 第3章 材料
- 第4章 地震の影響および環境作用
- 第5章 解析手法
- 第6章 性能照査

◆改訂指針・同解説

- 第1章 総則
- 第2章 屋外重要土木構造物の性能設定
- 第3章 材料
- 第4章 地震の影響および環境作用
- 第5章 解析手法
- 第6章 性能照査

◆2005年版マニュアル

- 第1章 総則
- 第2章 屋外重要土木構造物の耐震性能
- 第3章 材料
- 第4章 地震の影響および環境作用
- 第5章 解析手法
- 第6章 性能照査

◆改訂マニュアル

- 第1章 照査の基本事項^{※1}
 - ・応答値の評価に用いる解析手法
 - ・解析に用いる地盤のモデル化
 - ・機器・配管の機能維持に関わる確認事項
- 第2章 部材非線形解析を用いた耐震性能照査^{※2}
- 第3章 材料非線形解析を用いた耐震性能照査^{※3}
- 第4章 "ジョイント"-解析を用いた耐震性能照査^{※3}
- 第5章 耐久性能照査
- 第6章 通常運用時の性能照査

※1 解析・照査手法の共通部分は第1章に記載
 ※2 部材非線形/材料非線形の照査で共通の部分は第2章に、材料非線形限定の部分は第3章に記載
 ※3 第4章は材料非線形解析に限定したのではなく、新規部分なので特出しした

2-5 指針[照査例]の目次構成

◆指針・マニュアル

◆照査例

[2005年版照査例] (DVDに掲載)

- I 部材非線形の地震応答解析を用いた照査例
- II 材料非線形の地震応答解析を用いた照査例
- III 動的な鉛直地震力を考慮した照査例
- IV 耐久性能照査の照査例

赤字を追加

[2018年版照査例]

- I 二次元材料非線形の地震応答解析を用いた照査例 (2005年版照査例IIに更新)
- II 三次元材料非線形の地震応答解析を用いた照査例 (新規作成)
- III 三次元材料非線形の"ジョイント"-解析を用いた耐震性能照査例 (新規作成)
- IV 耐久性能照査の照査例 (2005年版照査例IVの更新)

9

2-6 指針[技術資料]の目次構成

◆技術資料(2018年版)

- I 鉄筋コンクリート製地中構造物の地震被害事例および再現解析
 - (1)一般的な地中構造物の地震被害事例
 - (2)新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所土木構造物の影響および再現解析
 - (3)東北地方太平洋沖地震による女川原子力発電所土木構造物の影響
- II 構造物の地震時損傷を考慮したアンカーの耐力に関する実験的検討
- III 部材非線形解析を用いた耐震性能照査におけるせん断耐力式についての考察
- 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
- V 地盤-構造物連成系の三次元非線形地震応答解析
- 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
- IX 既設発電所の材料物性の収集・整理
- X 補修または修復されたコンクリートの遮塩性能の評価
- XI 塩害進展期の腐食進行評価

10

3-1 指針の主な改訂点

11

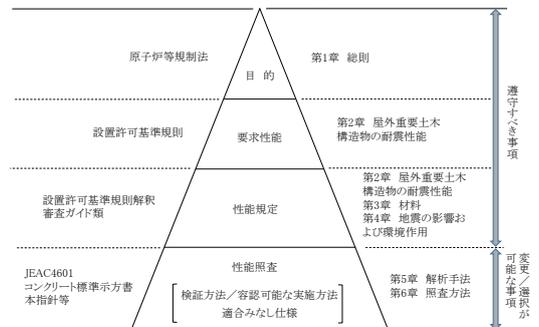
- 指針・同解説とマニュアルを再構成(全体)
- 性能規定化の階層構造に関する解説を追記(2章)
- 危機耐性に関する解説を追記(2章)
- 既設構造物への適用(1,3章, マニュアル2,3章)
- 地震動の水平二方向入力に関する解説を追記(4章)
- 機器境界部に対する説明を補強(2,6章)
- 三次元解析手法に関する記載を補強(5章, マニュアル1章)
- ひび割れ補修に関する説明を解説に追記(主に5章)
- 材料非線形解析による照査の記載を補強(6章, マニュアル3, 4章)

※機器境界部、耐久性能照査、解析手法および耐震性能照査に関しては、以降の講演で詳細を報告する。

3-2 第2章(性能規定型設計の階層構造)

12

一般に、性能規定型設計の概念は、階層化された構造・体系で表現される。ここで、性能規定から上位の階層が遵守すべき事項(必要とされる性能のみを規定)に相当し、「性能照査」の階層が、設計者が手法の検証を前提にして変更・選択が可能な事項、にそれぞれ対応する。



3-3 全般(主に第1～3章)

13

■ 既設構造物への適用

・本指針は、JEAC4601や示方書〔設計編〕などと同様に、基本的に設計時点を対象としたものであるが、既設構造物にも適用されることを踏まえて、コンクリートの材料係数や補修など既設特有の配慮事項については適宜補足することとした。

■ 危機耐性に関して

一般に、構造物の性能照査段階で想定していなかった事象が生じて、構造系全体系の脆性的破壊を回避でき、社会等に及ぼす影響が危機的な状況に至る可能性を十分に小さくできること。屋外重要土木構造物では、終局限界状態を超過したとしても、その影響が直ちに上位の系統に波及することなく、原子炉の冷却機能が喪失される状況に至らないことに対応する。

耐震構造計画で配慮することも可能。プッシュオーバー解析等により構造物の破壊限界を知り脆性破壊を避ける。アクシデントマネジメント時に構造物の被害が復旧活動の支障とならないなど

3-4 第3章 (材料)

14

■ 基本的考え方

- ・最新のコンクリート標準示方書、JEAC等との整合をとるよう修正する。
- ・新設だけでなく既設も対象とする。
- ・(前)指針・マニュアルを統合して、(新)指針・同解説へ移行する。

■ 改訂のポイント

- ・既設構造物を対象とする場合には、実測値を活用してよい旨を記載
- ・既設構造物の照査におけるコンクリートの材料係数の扱いについては、「新マニュアル」第2、3章の安全係数に該当する箇所に記載。
- ・技術資料Ⅶ「既設発電所の材料物性の収集・整理」には、原子力発電所に用いられるコンクリート圧縮強度の実測値に関する分析等を記載。

	圧縮強度	材料係数	条件など
コンクリート標準示方書など	設計基準強度	1.3	設計段階
既設構造物	設計基準強度	1.0～	コア採取等で得られた実測値が全て設計基準強度を上回っており、異常がないことなど

3-5 第4章 (地震の影響および環境作用)

15

■ 基本的考え方

- ・最新のコンクリート標準示方書、JEAC等との整合をとるよう修正した。
- ・地震の影響については、水平二方向入力についても記載

■ 改訂のポイント

- ・水平二方向の入力方法は、指針では「適切に評価する」と記載した上で、解説で標準的な地震動の入力方向について記載した。具体的な入力方法は、文献を引用する。

標準的な地震動の入力方向

構造物弱軸方向の地震応答	耐震性能照査	地震動の入力方向
支配的 (線状構造物など)	二次元(横断面)	水平一方向+鉛直動*1
支配的ではない	二次元 (横断面+長手方向)	水平一方向+鉛直動
	三次元 (構造物全体)	水平二方向*2+鉛直動

- *1 鉛直動は同時入力の基本
- *2 卓越方向が明確な場合は一方向でも可

3-6 第5章 (解析手法)

■ 基本的考え方

- ・コンクリート標準示方書など最新の記載状況に応じて適宜更新する。
- ・指針は、既に三次元解析も見据えた文章となっているため、大きく修正する必要はない。
- ・マニュアルに、三次元地震応答解析を実施するにあたっての留意事項等、本研究を通して得た知見などを踏まえて適宜反映させる。

■ 改訂のポイント

- ・旧マニュアルの「耐震性能照査における応答値の評価に用いる解析手法」の一部を第5章の解析に移動して、記載を充実させる。
- ・主にマニュアルに二次元解析か三次元解析を選択する場合の考え方も記載する。
- ・マニュアルでは、三次元地震応答解析を用いた耐震性能照査例に対応した記載とする。また、三次元構造物に与える静的荷重の設定方法等についても記載する。

3-7 第6章 (性能照査)

17

■ 基本的考え方

- ・コンクリート標準示方書など最新の記載状況に応じて適宜更新する。
- ・二次元解析でも三次元解析でも対応できる記載とする。
- ・指針では、部材非線形/材料非線形に限定しない共通の記載とする(マニュアルでは、手法を分けて記載)。

■ 改訂のポイント

- ・材料非線形解析を適用した場合を想定して、適切な安全係数および照査用限界値を設定出来る解説を追記する。
- ・「非線形有限要素解析法を用いた耐震性能照査における安全係数は、照査項目および照査方法に応じて、上記の安全係数(構造物係数、材料係数、作用係数、構造解析係数、部材係数)の主旨を考慮して適切に設定しなければならぬ。」旨を指針箱書きに追記。
- ・「材料非線形解析を用いる場合には、材料の損傷を示す応力・ひずみや詳細な変位情報などに基づく指標を照査項目としてもよい。」等を箱書きに追記。
- ・三次元解析でソリッドモデルを適用した場合に対して、要素寸法の影響など記述を深める(主にマニュアル)。

4-1 耐震性能照査マニュアルの改訂

<マニュアル目次>

- 第1章 照査の基本事項
- 第2章 部材非線形解析を用いた耐震性能照査
- 第3章 材料非線形解析を用いた耐震性能照査
- 第4章 プッシュオーバー解析を用いた耐震性能照査
- 第5章 耐久性能照査
- 第6章 通常運用時の性能照査

- ・ここでは、第1章と第2章の概要を紹介する。
- ・第3章、第4章、第5章については、以降の講演で詳細を報告する。
- ・第6章については、付録からマニュアルに移行した。内容は変更なし。

16

18

4-2 第1章(解析手法における解析次元の選択)

■指針「第5章 解析手法」解説

耐震性能照査に用いる解析手法は、地盤や構造物などの照査条件に応じて、工学的に合理的な解析次元を選択する必要がある。屋外重要土木構造物の耐震性能照査は、一般に地震時水平力に対するせん断剛性が相対的に小さい横断面方向が対象となるため、二次元解析が基本となる。一方で、構造物横断面方向の地震応答が支配的でない場合や構造物の応答挙動を厳密に評価する場合などには、三次元解析を選択することが有効である。

■マニュアル1章「1.2.2(2) 解析手法における解析次元の選択」

本マニュアルでは、①構造のモデル化、②作用・応答のモデル化、③実務面での照査条件などに基づいて、工学的に合理的な解析次元を選定することを基本とする。

③では、三次元解析の優位性や照査対象となる地震動レベル、解析に要する負荷(計算時間・費用)、事前の照査結果等を総合的に勘案して判断する。

4-3 照査に用いる解析手法(第1章)

耐震性能と解析手法との対応

区分	目標性能	選択される標準的な解析手法	
	限界状態	線形解析	非線形解析
1	構造物の構成部材が降伏に至らない	線形解析	等価線形解析
2	構造物が最大耐力に至らない	等価線形解析	部材非線形解析
3	構造物が崩壊しない	部材非線形解析	材料非線形解析

簡易(計算負荷小) ← 詳細(計算負荷大)

解析可能な範囲は応答解析手法に依存する一方で、解析精度は照査手法(照査項目、耐力or変形等)によっても異なる。一般に、対象構造物の耐震性能照査では、せん断破壊(面外)の照査の影響が大きい場合が多い。

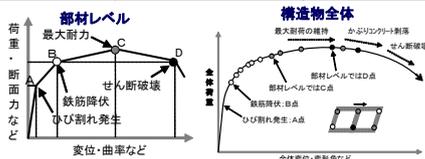
4-4 主なせん断照査指標と想定する限界状態

解析手法(応答解析)	照査指標(限界値)	想定する限界状態	
		部材の最大耐力(左下図C点までに至らない)	部材の降伏荷重(左下図D点)、構造物の最大耐力(右下図)を維持する。
部材非線形	①せん断耐力(示方書式)	→	
	②せん断耐力(a/d考慮)	→	
	③せん断耐力(材料非線形解析)	→	
材料非線形	④幅差ひずみ第2不変量(1000μ)	→	
	⑤部材厚増分(5mm)又はせん断補強筋の破断	→	
	⑥構造物全体系の挙動(概ね最大荷重の範囲)	→	

赤字:新規提案

部材レベルと構造物全体の限界状態(損傷状態)の対応関係

※材料非線形解析で①~③の指標を採用することも可能



4-5 マニュアル第2章(部材非線形解析)

■基本的考え方

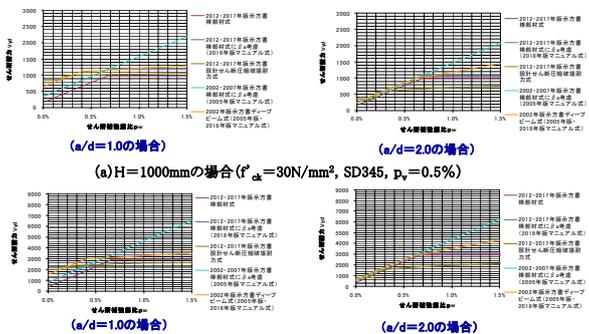
- 前マニュアルにおける部材非線形解析の内容を基本的に踏襲した。
- 前マニュアルは二次元解析を前提とされているので、三次元解析の位置づけを示した。
- 材料非線形解析と区分しがたいファイバー要素や積層シェル要素にも言及した。

■改訂のポイント

- 剛域の設定について、他基準類での事例を参考に実用的な剛域についても適用可。
- 三次元解析を用いる場合は、留意事項を示し、照査項目と限界値の設定例を紹介した。
- 示方書のせん断耐力評価式の更新に伴い、棒部材式やディープビーム式に制約条件を付加した。(従来のマニュアルのせん断耐力式を記載し、新示方書の耐力式との整合性にも配慮した。)
- せん断耐力評価に材料非線形解析を用いる方法は「第3章 材料非線形解析を用いた耐震性能照査」に引き継いだ。

せん断耐力式の見直し(第2章)

技術資料Ⅲに掲載



(a) H=1000mmの場合 ($f_{ck}=30\text{N/mm}^2$, SD345, $p_v=0.5\%$)

(b) H=3000mmの場合 ($f_{ck}=30\text{N/mm}^2$, SD345, $p_v=0.5\%$)

せん断耐力式に関するケーススタディ

(2012年版・2017年版示方書とマニュアル式との比較)

おわりに

「屋外重要土木構造物の耐震性能照査手法の高度化に関する研究」の全体概要、小委員会の活動、及び指針の改訂概要、照査の基本事項について報告した。

以降、主にマニュアルに関して詳細な内容を紹介します。

- 機器・配管の機能維持に関する確認
- 耐久性能照査
- 材料非線形解析を用いた耐震性能照査
- プッシュオーバー解析を用いた耐震性能照査