

断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策

(3) 建物・構築物及び土木構造物に対する影響評価

Risk evaluation method for fault displacements by engineering approach
(3) Risk evaluation method for structures

原子力安全推進協会	辻 弘一	Hirokazu TSUJI	非会員
鹿島建設	美原 義徳	Yoshinori MIHARA	非会員
北陸電力	松村 和雄	Kazuo MATSUMURA	非会員
東京海洋大学	谷 和夫	Kazuo TANI	非会員
電力中央研究所	蛭沢 勝三	Katsumi EBISAWA	非会員
東京大学	高田 毅士	Tsuyoshi TAKADA	会員

Risk evaluation for nuclear facilities against fault rupture hazards was investigated by the research committee on "Risk evaluation method and engineering approach against fault displacements" set in Atomic Energy Society of Japan. This paper focuses on the appropriate risk evaluation method for buildings and structures against fault displacements considering risk evaluation concepts, input conditions, analytical methods, acceptance criteria and relevant uncertainties. The flow of evaluation procedure is presented with discussions on the future issues.

Keywords: fault displacement, risk evaluation, nuclear power plant structure, ultimate capacity, best estimate response, margin evaluation

1. はじめに

日本原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会の成果のうち、地盤に生じる断層変位が直接的に作用する建物・構築物及び土木構造物に対する一連の影響評価手法について概要を紹介する。

2. 対象構造物及び評価方針

評価対象は、建物・構築物では発電用原子炉施設のうち安全上重要な機能を有する設備（例えばコンクリート製原子炉格納容器や使用済燃料プール）及び安全上重要な機能を有する機器・配管系等に対する支持構造物（例えば原子炉建屋）であり、土木構造物では、支持構造物に加え、非常時における海水の通水機能を求められる施設（例えば海水管ダクト）である。ここではそれらを総称して構造物という。

以下、建物・構築物を対象とした評価手法を中心に紹介するが、基本的な考え方は土木構造物に対しても適用できる。

安全性の評価は、常時又は運転時に作用する荷重と検討用の断層変位、さらに必要に応じて地震時荷重を考慮し、これら荷重に対して、安全上重要な施設として要求される機能を保持すること、機器・配管系に対する支持構造物として要求される機能を保持すること、及び構造物全体としての限界状態（変形能力、終局耐力）に対して余裕を有していることを確認することをもって行う。

具体的には、対象とする構造物と周辺地盤を適切にモデル化した解析モデルに、断層変位やその他の荷重を与え、構造物に生じる変位、応力・ひずみ等を算出して、構造物が受ける損傷と有すべき性能・機能を考慮することにより断層変位に対する安全性を評価する。

委員会で策定した全体評価手順に従い、リスク評価方法を決定論的な評価①及び②並びに確率論的な評価③の3種類に分類した。

連絡先: 辻 弘一 〒108-0014 東京都港区芝 5-36-7
原子力安全推進協会 技術運営部
E-mail: tsuji.hirokazu@genanshin.jp

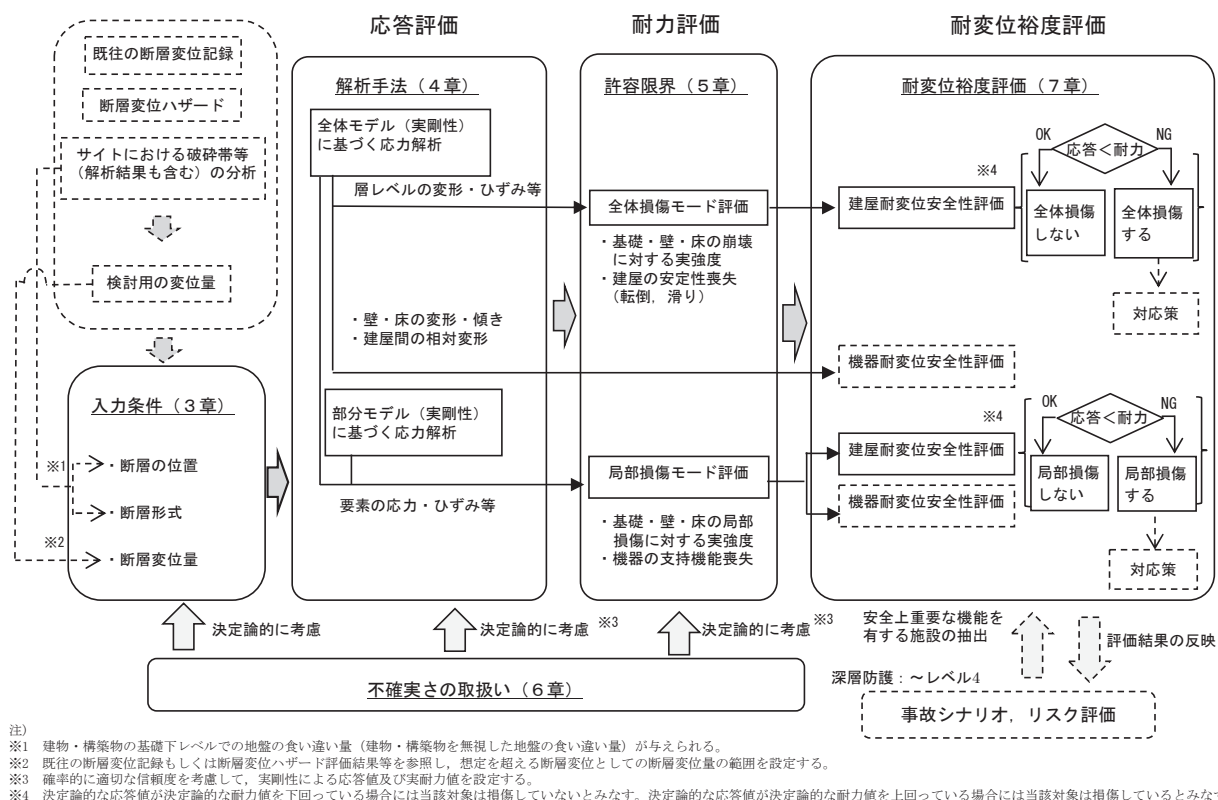


図1 構造物（建物・構築物）に対する影響評価フロー（②終局限界に対する裕度評価）

①設計上の許容限界に対する裕度評価：検討用の断層変位に対して、確立された構造強度の評価体系の中で、評価対象である構造物の応答評価及び耐力評価を行う。したがって、応答が耐力を上回る場合には、当該構造物は要求性能を満足していないため、必要に応じて対応策を講じ、その有効性を確認する。

②終局限界に対する裕度評価：検討用の断層変位もしくは想定を超える断層変位に対して、最新知見を反映した決定論的な評価体系の中で、評価対象である構造物の実剛性に基づく応答評価及び実耐力に基づく耐力評価を行う。したがって、応答が耐力を上回る場合には、当該構造物は要求性能を満足していないため、その評価結果を用いた事故シナリオ及び事故シーケンス評価を行い、必要に応じて対応策を講じ、その有効性を確認する。

③確率論的リスク評価（PRA）：断層変位ハザードに対して、最新知見を反映した確率論的な評価体系の中で、評価対象である構造物の現実的応答評価及び現実的耐力評価を行う。ここでは、現実的応答が

現実的耐力を上回る確率を fragility 曲線として評価し、これを入力として事故シナリオ及び事故シーケンス評価を行う。

このうち、建物・構築物における②終局限界に対する裕度評価の評価フローを図1に示す。

3. 入力条件

構造物に対する断層変位の入力、は、構造物直下に断層変位が生じる場合は、断層の変位量を対象構造物に作用させる。さらに、断層変位が構造物近傍で発生した場合でも、地盤全体の傾斜や撓みにより構造物に影響を与える可能性があるため、構造物近傍で発生する断層変位も対象となる。いずれの場合も、断層変位ハザードの評価において設定された変位量が、構造物がない状態での構造物直下レベルで再現できるようにしたものを用いる。

一般的には、モデル化した地盤の境界に、対象とする断層のずれの向き（変位量の向き）に一樣な強制変位を与えることで、想定された構造物直下での

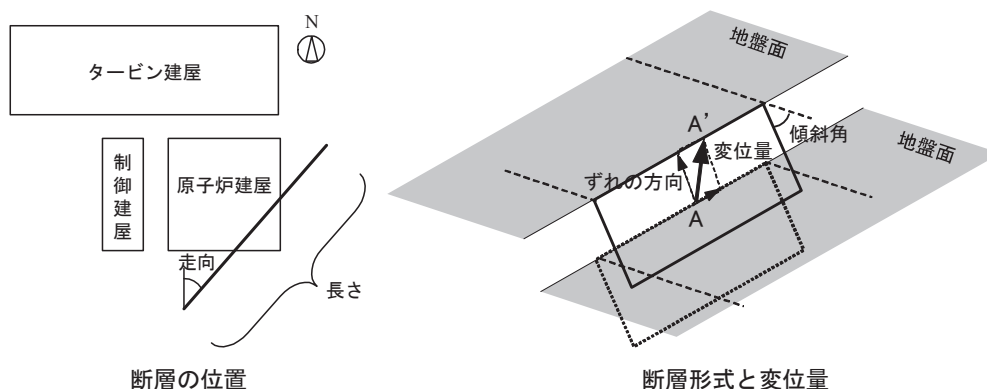


図2 入力として断層変位を考慮する場合に必要なパラメータ

断層変位が再現されるようにする。このとき、評価に必要な断層変位のパラメータは、①断層の位置(長さ、走向)、②断層形式(断層の傾斜角とずれの方向)、③変位量となる(図2参照)。

4. 解析手法

4.1 解析モデルと解析手法

断層変位に対する構造物及び周辺地盤の解析モデルは解析対象物と目的によって異なり、多岐にわたる。

一例として「構造物—地盤全体モデル」を図3に示す。炉心損傷頻度の評価を念頭においた構造物全体の損傷状況及び機器・配管系への検討条件を算定するために用いられ、建屋各部位をシェル要素又はソリッド要素により、地盤をソリッド要素等によりモデル化し、3次元非線形有限要素法による構造物—地盤連成解析を行う。構造物—地盤間は、ジョイント要素等の剥離及び滑りが考慮できる要素でモデル化する。断層面はジョイント要素等によりモデル化する。ここで、ジョイント要素のパラメータ(付着力、摩擦係数等)は、試験結果や既往知見に基づき適切に設定する。地盤の領域は構造物の影響がない範囲で設定する。

4.2 解析手順

常時応力(地盤応力及び建屋自重)を考慮し、自重解析と地震時解析を実施する。地震時解析においては、必要に応じ地震時の断層変位に加えて、地震時の揺れによる影響を考慮する。なお、地震時(本震及び余震)の揺れによる影響は、断層変位発生時

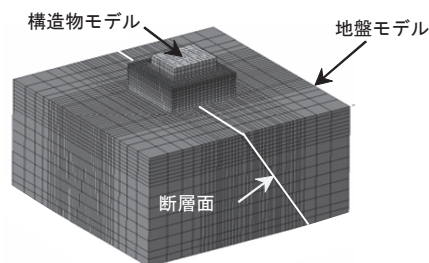


図3 構造物—地盤全体モデルの例

刻を考慮して、静的もしくは動的に組み合わせるものとする。

4.3 解析結果の出力

基礎・壁・床の崩壊及び局部損傷に係る耐変位安全性を評価するために、各節点の変位及び各要素の発生応力もしくは発生ひずみを出力する。

あわせて、動的機器の機能損傷及び渡り配管等の構造損傷に係る機器・配管系の耐変位安全性評価に資するために、当該箇所での変位及び回転角を出力し、建屋の傾斜及び建屋間の相対変位を評価する。さらに、基礎・壁・床の局部損傷に起因する機器・配管系の耐変位安全性評価に資するために、前述の当該箇所での変位及び回転角に加えて、当該箇所での発生応力もしくは発生ひずみを出力し、評価エリアにおける損傷状況を評価する。

解析結果の出力のうち、断層変位を受ける構造物の変位量のイメージを図4に示す。

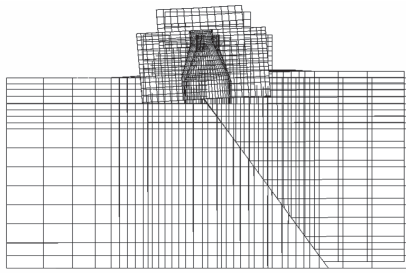


図4 断層変位を受ける構造物の変位量のイメージ

4.4 解析コードの検証

4.1～4.3 に示された解析手法に適用する解析コードに関しては、断層変位時に支配的な損傷モードに対して、実際の被害事例や実験結果と比較を行って解析手法の妥当性の検証が必要である。

しかし、実際に観測された断層変位による構造物の被害事例を対象としたシミュレーション解析を実施した事例は極めて少ない。妥当性が検証された数少ない事例の一つとして、1999年トルコ・コジャエリ地震（モーメントマグニチュード7.4）、1999年台湾・集集地震（同7.6）等の地表地震断層を対象とした調査及び解析を行った Faccioli et al. (2008)^[1]が挙げられる。

また、地表地震断層による建屋全体の実被害事例ではないものの、熊谷ほか(2011)^[2]による断層変位に対する支配的な損傷モードの一つである基礎版の面外せん断破壊実験を対象としたシミュレーション解析による解析コードの妥当性の検証例がある。

以上に示す解析手法を用いて、構造物の損傷が比較的軽微であれば、断層変位に対する構造物の応答評価が可能であると考えられる。

5. 許容限界

5.1 損傷モード

表1に断層の種類と損傷モードの関係を示す。断層変位に伴って考慮すべき構造物の損傷モードは、基礎版及び耐震壁の曲げ破壊あるいはせん断破壊であると考えられる。地震応答に伴う建屋の損傷モードと比較して、構造物下部における損傷が支配的なことが特徴である。

5.2 許容限界の目安値

表1 断層の種類による損傷モードの関係

断層形式	建屋への作用	耐震壁の損傷モード	床・基礎版の損傷モード
正断層	縦ずれ変位	面内せん断破壊	面外曲げ破壊 面外せん断破壊
逆断層	縦ずれ変位	面内せん断破壊	面外曲げ破壊 面外せん断破壊
	断層走向直交方向の圧縮	面外曲げ破壊 面外せん断破壊 (地下部)	—※
横ずれ断層	横ずれ変位	面外曲げ破壊 面外せん断破壊 (地下部)	—※

※：応力は発生するものの、損傷を与えるレベルには至らないと判断

(1) 基礎底面の傾斜に係る許容限界

断層変位に伴う基礎底面の傾斜による影響については、基本的には日本建築学会「建築基礎構造設計指針」に記された傾斜の基準値が参考になる。しかし、同指針の解説に記載されている「建物に生じる沈下量を目安の数値を用いて評価することはあくまでも便宜的な手法であり、原則は沈下によって建物の構造部材に生じる応力を照査することによって評価すべきことを忘れてはならない」に従って、IV.1.に示した解析モデルに基づいて詳細な部材応力解析を行った上で、5.2 (2) の鉄筋コンクリート部材の許容限界の目安値を適用することで評価することが望ましいと考えられる。

(2) 鉄筋コンクリート部材の構造的あるいは機能維持上の許容限界

裕度評価に用いる許容限界として、柱・梁の曲げ終局強度については日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」に、耐震壁のせん断限界・曲げ限界については日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601)」あるいは日本機械学会「発電用原子力設備規格コンクリート製原子炉格納容器規格 (JSME S NE1-2014)」に、梁のせん断性能については日本建築学会「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (RC-N)」にまとめられている。

また、確率論的リスク評価 (PRA) に用いる許容限界等としては、日本原子力学会標準として「原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準：2015」(以下「地震 PRA 標準」という)にまとめられている。

5.3 損傷範囲

断層変位による損傷は、局所的な損傷にとどまる場合と全体損傷に及ぶ場合があり、対象範囲と損傷の拡がりについて十分に留意する必要がある。

局所的な損傷として、機器アンカー及び配管サポート等の支持機能喪失があるが、これは当該局所部位における許容限界の超過によって評価できる。また、特定の部屋の機能損傷は、その床を横断するような許容限界の超過により評価できる。

構造物全体の損傷は、基礎版あるいは耐震壁を横断するような連続した許容限界の超過により評価できる。全体損傷のイメージを図5に示す。

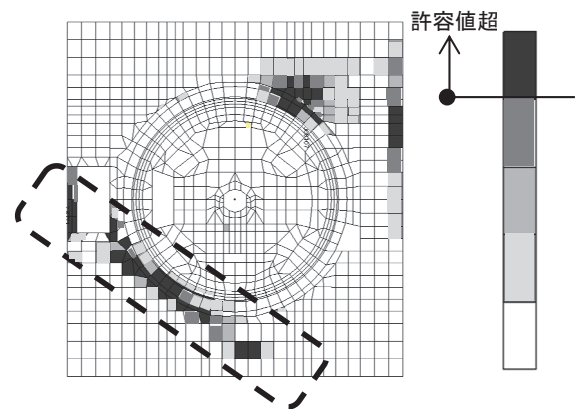


図5 基礎版を横断する連続した損傷のイメージ

6. 不確かさの取扱い

確率論に基づくリスク評価においては、評価対象とする事象や評価プロセスに含まれる様々な不確かさを考慮する必要がある。この不確かさをもたらす要因は、一般に物理現象のランダム性に係る偶然的な不確かさ (aleatory uncertainty) と知識及び認識の不足に係る認識論的不確かさ (epistemic uncertainty) に区別されるが、地震 PRA 標準においては、地震ハザード評価及び fragility 評価に含まれるこれらの不確かさ要因を整理し、リスク評価に考慮する方法が提示されている。

一方、断層変位に対するリスク評価は、地震 PRA と同様に地震が起因事象となるものの、ハザード評価の対象は地震動ではなく断層変位であり、現状は fragility 評価においても動的問題ではなく静的問題として取り扱うこと等が地震 PRA とは異なっている。したがって、断層変位に対する fragility 評価で考慮すべき不確かさ要因は、地震動に対するものとは異なる観点で設定する必要がある。

特に、断層変位に対するリスク評価において、最も大きな不確かさの一つとして断層変位の位置が挙げられる。断層変位が施設に与える影響は、断層変位の位置で大きく異なるため、解析規模を考慮すると図6に示す評価フローのように、断層変位の位置や断層形式を選定し、選定した位置で変位が発生した場合の条件付き損傷確率として評価することが現実的である。

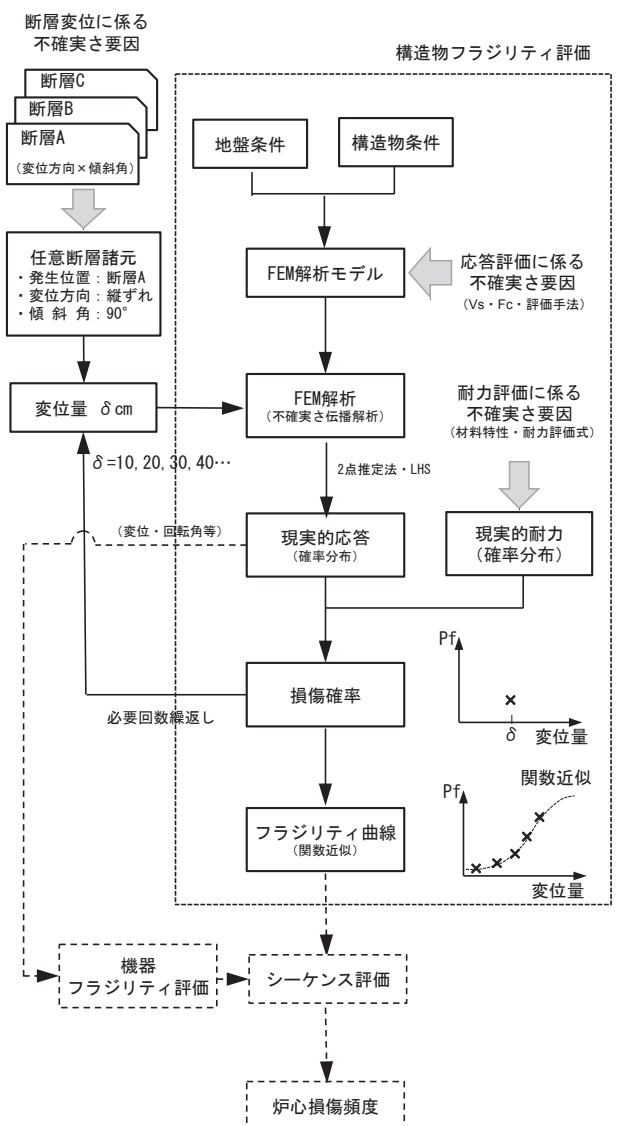


図6 断層変位に対する構造物 fragility 評価フローの例

7. 耐変位裕度評価

7.1 構造物の耐変位安全性評価

2. で述べたリスク評価手法「①設計上の許容限界に対する裕度評価」及び「②終局限界に対する裕度評価」では、崩壊（全体損傷）及び局部損傷の観点から、4. で得られる構造物の応答と5. から得られる構造物の許容限界を比較することで、検討用の断層変位に対する決定論ベースの構造物の安全性評価を行う。なお、地震時の揺れによる構造物の耐震安全性評価は、基本的には JEAC4601 等の規格・基準に従うものとする。

7.2 構造物のフラジリティ評価

③確率論的リスク評価（PRA）」は、基本的には地震 PRA 標準と同様な流れであり、詳細は地震 PRA 標準を参照されたい。断層変位に対する構造物フラジリティ評価フローの例を図 6 に示す。

なお、断層変位単独のフラジリティ評価を当面の目標とし、地震時の揺れとの重畳フラジリティは、今後の課題とする。

8. まとめ

断層変位に対する構造物の影響評価のより一層の高度化に向けては、以下の課題を挙げることができる。

- ・断層変位と地震動の重畳による構造物への影響を合理的に精度よく評価するための手法を構築する必要がある。

- ・断層変位による被害事例のシミュレーション解析は、構造物が剛体回転するような比較的被害が軽微であったものを対象としており、地表地震断層によって全体及び部分的に崩壊したような構造物を対象としていないことから、解析コードの妥当性検証については更なる取組みが望まれる。

- ・断層変位が作用した場合の地盤－構造物間の非線形な相互作用及び地盤の進行性破壊を精度よく評価するための応答解析手法の構築及び検証事例の蓄積が必要である。

- ・断層変位や地殻変動に起因した地盤変状が作用した場合の基礎底面の傾斜に係る損傷限界の不確かさ、鉄筋コンクリート部材（基礎版及び地下外壁）の面外曲げもしくはせん断耐力の不確かさに関しては、実験による検証も含めて、部材全体及び部材局所の

損傷評価のためのデータの更なる蓄積が望まれる。

- ・断層変位が作用した場合の機器アンカーや配管サポート等のコンクリート部の支持機能喪失に係る応答及び耐力を合理的に精度よく評価するための手法を構築して、検証事例を構造物及び機器・配管系で連携して蓄積していく必要がある。

- ・断層変位に対する構造物フラジリティ評価に関しては、偶然的・認識論的不確かさに係る標準データの整理・分析・定量化、更なる試算例の蓄積等が必要である。

- ・断層変位によって土木構造物が局所的に材料の限界値に達していても、目標性能及び要求性能への寄与度が低く、要求性能に対して土木構造物が機能維持していることもあるため、保守的と考えられる現状の限界値よりも目標性能及び要求性能への寄与度が高い破壊モード及びそれに対する限界値を整備することが必要である。

なお、日本原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会の最終報告書「断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策」は、日本原子力学会のホームページで公開されている。
http://www.aesj.net/sp_committee/com_dansou

参考文献

- [1] E. Faccioli, I. Anastasopoulos, G. Gazetas, A. Callerio, R. Paolucci, “Fault rupture–foundation interaction selected case histories”, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 6, Issue 4, 2008 年.
- [2] 熊谷仁志、貫井泰、今村晃、寺山武志、萩原哲也、小島功、“RC 基礎スラブの面外せん断終局強度に関する研究”、日本建築学会構造系論文集、第 76 巻、第 659 号、2011 年.