

平成２８年度原子力施設等防災対策等委託費
(斜面崩壊に伴う原子力施設への影響評価手法の整備)
事業
報告書

平成２９年３月

日本大学工学部工学研究所

本報告書は、日本大学工学部工学研究所が原子力規制庁からの委託により実施した平成29年度原子力施設等防災対策等委託費（斜面崩壊に伴う原子炉施設への影響評価手法の整備）事業の成果をとりまとめたものです。

本報告書の複製、転載、引用等には、原子力規制庁の承認が必要です。

目次

頁

第1章 序論

- 1. 1 はじめに 1-1
- 1. 2 用語の定義 1-3

第2章 斜面崩壊に伴う原子力施設への影響評価の考え方の整理

- 2. 1 斜面崩壊の要因分析 2-1
 - 2. 1. 1 斜面崩壊のパターン 2-1
 - 2. 1. 2 斜面崩壊の素因と誘因 2-9
 - 2. 1. 3 斜面安定評価の概要 2-12
 - 2. 1. 4 斜面安定性評価における留意点 2-24
- 2. 2 斜面崩壊が原子力施設に及ぼす影響評価 2-33
 - 2. 2. 1 地震動の作用に対する影響評価 2-33
 - 2. 2. 1. 1 限界状態に応じたフラジリティ曲線評価の基本 2-33
 - 2. 2. 1. 2 検討手順の検討フローとその概要 2-38
 - 2. 2. 2 降雨作用に対する影響評価 2-48
 - 2. 2. 2. 1 限界状態に応じたフラジリティ曲線評価の基本 2-48
 - 2. 2. 2. 2 検討手順の検討フローとその概要 2-51

第3章 各限界状態に対するフラジリティ曲線評価の考え方と評価事例

- 3. 1 検討条件の設定 3-1
 - 3. 1. 1 斜面モデルおよび地盤材料モデルの設定 3-1
 - 3. 1. 1. 1 斜面モデルの設定 3-1
 - 3. 1. 1. 2 地盤材料モデルの設定 3-3
 - 3. 1. 2 検討用地震動の設定 3-6
 - 3. 1. 2. 1 想定施設の位置 3-6
 - 3. 1. 2. 2 ロジックツリー 3-7
 - 3. 1. 2. 3 地震動ハザード評価 3-7
 - 3. 1. 2. 4 ハザード再分解 3-11
 - 3. 1. 2. 5 模擬地震波の作成方法 3-18
 - 3. 1. 2. 6 模擬地震波の作成 3-19
 - 3. 1. 3 検討用施設の設定 3-34

	頁
3. 2 斜面の不安定限界の評価	3-35
3. 2. 1 サンプルング法を用いた崩壊確率評価	3-35
3. 2. 1. 1 評価指標と限界状態	3-35
3. 2. 1. 2 力の釣合いに基づくすべり安全率評価	3-35
3. 2. 1. 3 斜面の崩壊領域モデル	3-38
3. 2. 1. 4 簡易法による崩壊確率の評価事例	3-45
3. 2. 1. 5 詳細法による崩壊確率の評価事例	3-69
3. 2. 1. 6 簡易法及び詳細法による崩壊確率の比較	3-75
3. 2. 1. 7 今後の課題	3-80
3. 2. 2 裕度解析に基づく崩壊確率評価	3-82
3. 2. 2. 1 非線形有限要素解析を用いた応力基準に基づく破壊モードの確認	3-82
3. 2. 2. 2 粒子法(MPM)を用いたせん断ひずみ指標に基づく崩壊確率の評価事例	3-95
3. 2. 2. 3 今後の課題	3-105
3. 3 崩壊土塊及び崩壊岩塊の移動評価	3-106
3. 3. 1 崩壊土塊の堆積土量の評価	3-106
3. 3. 1. 1 簡易 DEM モデル, 粒子法(MPM)による既往の土砂滑落実験の再現解析	3-106
3. 3. 1. 2 簡易 DEM モデルによる崩壊土塊の堆積土量と地震ハザードとの関係	3-127
3. 3. 1. 3 今後の課題	3-130
3. 3. 2 崩壊岩塊の到達確率の評価	3-131
3. 3. 2. 1 岩塊サイズの検討	3-131
3. 3. 2. 2 質点解析による到達確率の評価事例	3-139
3. 3. 2. 3 簡易 DEM モデルによる到達確率の評価事例	3-158
3. 3. 2. 4 今後の課題	3-172
3. 4 崩壊岩塊の衝突評価	3-174
3. 4. 1 試験結果による衝撃荷重と衝突速度の分析	3-174
3. 4. 1. 1 既往の岩塊の転動および落下実験に基づく衝撃荷重, 衝突速度の分析	3-175
3. 4. 1. 2 既往の岩塊転動実験データに基づく評価手法の検証	3-200
3. 4. 2 衝撃作用に対する条件付き損傷確率の評価	3-218
3. 4. 2. 1 衝撃作用に対する条件付き損傷確率の評価手法	3-218
3. 4. 2. 2 対象施設の衝撃作用に対する条件付き損傷確率の評価事例	3-221
3. 5 各限界状態に対するフラジリティ曲線と確率の比較	3-226
3. 5. 1 到達限界, 損傷限界に対するフラジリティ評価の方法	3-226
3. 5. 1. 1 一定の崩壊体積の場合	3-226
3. 5. 1. 2 崩壊体積が地震動強度に依存する場合	3-231

	頁
3. 5. 2 各限界状態に対するフラジリティおよび限界状態確率	3-234
3. 5. 2. 1 地震動の大きさと崩壊体積、条件付き確率	3-234
3. 5. 2. 2 各種フラジリティと限界状態確率	3-240
第4章 結論	4-1
4. 1 主要な成果	4-1
4. 2 検討条件や適用範囲の整理	4-2
4. 3 今後の課題	4-4
付属資料 地震動の作用に対する斜面崩壊が原子力施設に及ぼす影響評価の実施手順	
1. 斜面の影響評価の基本的な考え方	付1
2. 関連情報の収集・分析・事故シナリオの同定	付2
2. 1 対象斜面，対象施設などの情報収集	付2
2. 2 対象斜面が及ぼすリスクシナリオの分析と設定	付2
3. 地震動ハザード評価	付4
4. フラジリティ評価	付5
4. 1 限界状態に応じたフラジリティ評価の基本	付5
4. 1. 1 限界状態の定義	付5
4. 1. 2 限界状態に応じた崩壊領域の考え方	付6
4. 1. 3 各限界状態に対するフラジリティ評価法	付6
4. 2 安定限界のフラジリティ評価	付8
4. 2. 1 対象斜面の崩壊形態の分析	付8
4. 2. 2 フラジリティ評価手法と限界状態の評価指標の選択	付9
4. 2. 3 対象斜面の地震応答解析による崩壊領域と崩壊確率の評価	付9
4. 2. 4 安定限界のフラジリティ評価	付10
4. 2. 5 安定限界を超える確率の確認と対応	付11
4. 2. 6 崩壊領域に応じたフラジリティ曲線の評価	付11
4. 3 到達限界のフラジリティ評価	付12
4. 3. 1 到達限界の評価対象状態	付12
4. 3. 2 崩壊条件付き到達確率の評価手法と限界状態の評価指標の選択	付12
4. 3. 3 崩壊土塊の崩壊挙動解析による崩壊条件付き到達確率の評価	付13
4. 3. 4 到達限界のフラジリティ評価	付14
4. 3. 5 到達限界を超える確率と対策	付15

4. 3. 6	到達した崩壊土塊による埋設，堆積土量の評価	付 15
4. 4	衝突による損傷限界のフラジリティ評価	付 16
4. 4. 1	対象施設の損傷部位・モードの設定	付 16
4. 4. 2	衝撃作用の評価	付 16
4. 4. 3	衝撃作用に対する条件付き損傷確率の評価	付 17
4. 4. 4	衝突限界のフラジリティ評価	付 18
4. 4. 5	損傷限界を超える確率と対策	付 19

第 1 章 序論

1. 1 はじめに

既往の斜面安定性に関する安定性評価の考え方として、平成3年に発行されたJEAG4601-1991「原子力発電所耐震設計技術指針(追補版)」では、地盤安定性検討について、すべり面法等の慣用法による検討、静的解析による検討、動的解析による検討の3段階の検討を、原則として全て実施する手順を示している。また、(公社)土木学会の原子力土木委員会では、平成21年2月に前述の指針に示された地盤安定性検討の手順における3段階の検討のうち、最も信頼性が高く、また動的上下動を直接取り扱うことのできる「動的解析による検討」を主体とした、新しい地盤安定性検討の手順を「原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術」として提案した。しかし、平成25年11月に制定された「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」では設計を上まわる事象に対する安全性の評価も行うことが示されている。

原子力発電所の安全性に発電所敷地内における斜面の崩壊に及ぼす影響を評価するためには、斜面崩壊後の影響に関するシナリオを適切に評価することが必要となる。例えば、図1.1に示す様に、原子炉建屋周辺斜面が地震に伴い不安定化し、斜面崩壊により岩塊が滑落し、建屋などの施設に衝突し、建屋・機器に損傷を与えるというものである。原子力発電所の安全性を確保するためには、斜面の崩壊によって施設の安全機能に重大な影響を及ぼさないことを確認する必要がある。そのためには、斜面崩壊の発生可能性と崩壊領域を合理的に評価することが重要となる。(独)原子力安全基盤機構(JNES)が平成26年2月に発行したREレポート「JNES-RE-2013-2037:基礎地盤及び斜面の安定性に係る設計・リスク評価の手引き」は、地盤の安定から崩壊後の施設や構造物への影響をシームレスに評価するため、安定に関わる限界状態、崩壊に関わる限界状態を設定し、安定とリスクの評価体系を示した。また、平成27年12月には、日本原子力学会より「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2015」が発行され、JNESのREレポートで示された斜面崩壊後の影響評価に関するシナリオを具体的に評価するために周辺斜面に要求される性能として以下の事項を示し、

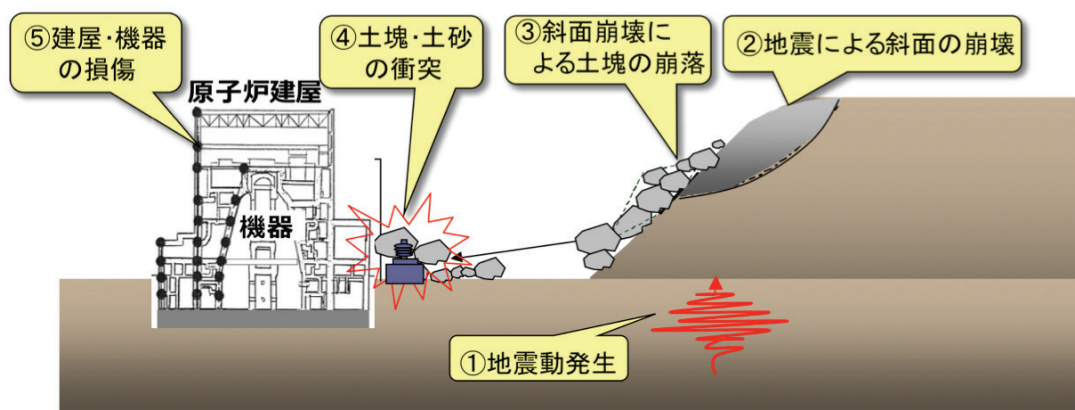


図 1.1 原子炉建屋周辺斜面の想定シナリオ

それらに対する評価が必要であることを示している。

- ① 周辺斜面が不安定化し、崩壊した土塊や岩塊などが安全上重要な施設および機器に影響を及ぼさない
- ② 取水ピットなどの屋外重要土木構造物を閉塞して取水機能を阻害しないこと
- ③ 貯水池堤体のような土構造物ではそれ自体の不安定化により機能喪失が生じない
- ④ シビアアクシデント対策設備に影響を及ぼす地盤は安定性を保ち、それらの安全機能を確保する
- ⑤ 搬入路は走行性を確保する

平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費(斜面の安定性に係る設計・リスク評価手法の整備)事業では、JNES の RE レポートで示された斜面崩壊後の影響評価に関するシナリオについて具体的に評価する手法を確立するため、滑落型崩壊による斜面崩壊が施設へ及ぼす影響として、斜面崩壊に係わる解析手法の整備、崩壊土塊の到達位置の特性評価、崩壊土塊の衝突速度の評価および崩壊土塊の堆積土量の評価の 4 項目に関する評価、さらに滑動型崩壊に対して、変形指標の評価に基づいた斜面の不安定限界の評価手法の検討が実施された。

ここでは、地震に起因した斜面崩壊に伴う原子力発電施設への影響評価手法の一つである確率論的なリスク評価に資するため、これまでに構築した手法をもとに、斜面崩壊の影響に応じた限界状態とそれに対するフラジリティ曲線評価の考え方を体系的にまとめ、評価事例を示す。2 章には、斜面崩壊に伴う原子力施設への影響評価を実施する上で必要な要因分析の考え方を整理するとともに、地震動や降雨の作用に対する斜面崩壊が原子力施設に及ぼす影響の検討手順をまとめて示す。3 章には、2 章で示した検討の手順に従い、3 つの限界状態に対するフラジリティ曲線の評価事例を示す。さらに、付属資料に、地震に起因した斜面崩壊に伴う原子力発電施設への影響評価に関する検討手順の適用性を踏まえた上で、実施手順としてまとめて示す。

1. 2 用語の定義

本報告書で用いる専門用語のうち、特に定義をしないで用い、本報告書の内容に係わる重要な専門用語の定義を以下に示す。

- ・ 周辺斜面：原子力発電所内外の重要な安全機能を有する施設や設備に影響を及ぼすおそれのある、それらの施設や設備の近傍の斜面を指す。裕度向上のための対策が施された斜面を含む自然斜面、及び切土を含む人工斜面や盛土などの造成された土構造物を示す。
- ・ 破壊：地盤や斜面を構成する材料の強度を上まわる何らかの力の作用に起因して、せん断破壊や引張り破壊が生じ、周辺から分離した土塊、また岩塊などが形成されること。
- ・ 崩壊：地盤や斜面の破壊により生じた土塊、また岩塊などにその形状変化を伴い移動が生じ、滑り落ちる状態のこと。
 - 滑動型破壊：斜面の破壊形態の一つであり、破壊により生じた土塊、また岩塊などが破壊面上を地震動の継続中に移動する状態のこと。
 - 滑落型崩壊：斜面の破壊形態の一つであり、破壊により生じた土塊、また岩塊などが破壊面上を急激にすべり落ちる状態のこと。
- ・ 崩壊領域：崩壊が生じる地盤の最下部でせん断破壊が生じるすべり面のこと。
- ・ 崩壊土塊：崩壊により生じる地盤を構成する塊状の土塊や岩塊、岩石の総称のこと。
- ・ 崩壊体積：崩壊領域上の土塊、また岩塊の体積のこと。
- ・ 転動：斜面の破壊により周辺から分離した岩塊の塊、例えば落石が、転がるようにのり尻またはその先まで移動する状態のこと。
- ・ 衝突：運動している物体が他の物体に接触し、極短時間に撃力を相互に及ぼしあう物理現象のこと。
- ・ 衝撃作用：物体の衝突、打撃あるいは爆発などにより、急激に力が作用し、短時間で被衝突体へのエネルギー伝達が行われる現象のこと。
- ・ フラジリティ/フラジリティ曲線：フラジリティとは、地震ハザードに対する周辺斜面の不安定化による土砂や岩塊の作用に対する当該施設・設備・機器の機能喪失する確率のこと。
 - フラジリティ曲線とは、地震動強さの大きさとフラジリティとの関数関係のこと。
- ・ 到達ハザード：斜面崩壊により生じた崩壊土塊が斜面下の施設や設備の到達した際の速度とその超過確率との関係のこと。
- ・ 衝突ハザード：斜面崩壊により生じた崩壊土塊のうち岩塊が構造物に到達する際の運動量とその超過確率の関係のこと。
- ・ 安定限界のフラジリティ曲線：地震動強さの大きさと斜面の崩壊確率との関数関係のこと。
- ・ 到達限界のフラジリティ曲線：斜面崩壊による崩壊土塊が対象施設や設備に到達した確率と地震動強さの大きさととの関数関係のこと。

- ・ 損傷限界のフラジリティ曲線：斜面崩壊による崩壊土塊が衝突し，対象施設や設備が損傷する確率と地震動強さの大きさとの関数関係のこと．

第2章 斜面崩壊に伴う原子力施設への影響評価の考え方の整理

2. 1 斜面崩壊の要因分析

2. 1. 1 斜面崩壊のパターン

既存の原子力発電所周辺斜面に限定せず、広く一般に斜面崩壊を考えた場合、表 2. 1. 1-1¹⁾に示す用語を組み合わせた、様々な斜面崩壊が発生する。具体的には、表 2. 1. 1-2¹⁾、表 2. 1. 1-3¹⁾に示すような名称が使われることがあるが、これらは必ずしも統一された名称ではなく、例えば、山崎ら²⁾は、2004 年新潟県中越地震の被害を表 2. 1. 1-4 のように整理している。表 2. 1. 1-1 の”運動様式”に着目すると、地質学的なマスマーブメントの分類では図 2. 1. 1-1³⁾のような形態が示されており、岩盤工学的に重要な形態のいくつかを詳細に分類すると、図 2. 1. 1-2⁴⁾のような例が示されている。

表 2. 1. 1-1 現在我が国で使用されている主な地すべり用語の組み合わせ構造¹⁾

運動様式を修飾する主な用語 区分は大八木(2004)による地すべりの分類基準を参考に作成														運動様式 (タイプ) 英字は Varnes (1978)
発生 位置	地質帯・地 質区分など	規模・ 厚さ	移動速度	移動距離	物質構成	基岩構造	移動体 構造	移動体の 一体性 英字は Keefer (1984)	すべり面 形態	変化階程 (時系列)	劣化	誘因	運動様式 の中間的 表現	
山体	火山帯 (温泉)	巨大	超高速		土				層					崩落・落下 Fall
山地	構造線 (破砕帯)	超 大規模			土砂			ブロック	層面	初生(型)	風化岩	降雨	地すべり 性	トップル Toppie
斜面 のり面	三紀層	大規模			土石	流れ盤	板状		並進性		強 風化岩	降水		すべり Slide
崖	変成岩	小規模	高速	長距離	泥		キャップ ロック	離散型 Disrupted	直線(性)	再発(型)	破砕岩	融雪	崩壊性	伸展・前展 Spread
山	グリーン タフ	深層			岩層	受け盤			回転(性)					流動(ながれ) Flow
谷(埋め)	具体的な 地質名 (泥岩など)	浅層			崩壊土 (崩土)				円弧	後退性	熱水 変質	地震	流動性	崩壊 崩れ 抜け
盛土地		表層	緩速		粘性(質) 土			一体型 Coherent	円形					なだれ クリープ
水中					岩(盤)									
湖底														
海底					岩石									

表 2. 1. 1-2 運動様式(スライド)に関する地すべりの名称と分類の一例¹⁾

名 称	空間構成	規 模	物質構成	速 度	運動様式
表層崩壊	移動体全体が移送堆積 域まで移動	小規模	表土	5m/d以上	回転・並進スライド、 フロー
深層崩壊	移動体の全体又は大半 が移送堆積域まで移動	大規模	土、岩	5m/d以上	回転スライド、フ ロー
山体崩壊(崩れ)	移動体の全体又は大半 が移送堆積域まで移動	大規模	土、岩、岩盤	5m/d以上	回転・並進スライド、 フォール、フロー
地すべり(狭義)	移動体の一部が移送堆 積域に移動	大規模	土、岩、岩盤	5m/d未満	回転・並進スライド
高速地すべり	移動体全体が移送堆積 域まで移動	大規模	土、岩	5m/d以上	回転・並進スライド、 フロー

表 2. 1. 1-3 運動様式(フロー)に関する地すべりの名称と分類の一例¹⁾

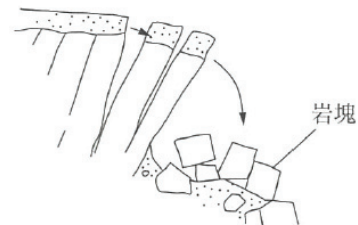
名 称	空間構成	規 模	物質構成	速 度	運動様式
岩屑なだれ	移動体全体が移送堆積 域まで移動	小規模～大規模	土、岩	5m/d以上	回転・並進スライド、 フロー
アースフロー	移動体全体が移送堆積 域まで移動	小規模～大規模	土	5m/d以上	回転・並進スライド、 フロー
土石流	移動体全体が移送堆積 域まで移動	小規模～大規模	土、岩、大量の水	5m/d以上	フロー
火砕流	移動体全体が移送堆積 域まで移動	大規模	溶岩(溶岩ドーム)、 火山灰等の火山堆積物	5m/d以上	回転・並進スライド、 トップル、フロー

表 2.1.1-4 山崎（2008）による 2004 年新潟県中越地震時の地震地すべりの分類

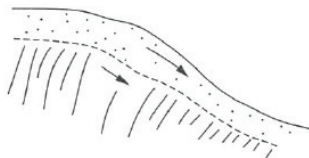
広義の地すべり タイプ区分	区分定義	代表的事例 (2004中越地震)	事例の特徴
表層崩壊	層厚が1～3m前後の表層土または樹木が崩落し、基盤が露出する。発生域には土砂がほとんど残っておらず、そのほとんどが抜け落ちる。元的地表傾斜角は30°を超える場合が多い。	小栗山急斜面 東山背斜軸東側のケスタ 小千谷市浦柄	層厚1m前後の表層が遼急線から崩落 表土が崩落したため樹木も崩落し基盤が露出 小尾根を含んだ両側斜面が共に崩落
崩壊性地すべり	規模のやや大きな崩壊。見通し角が30°以上で主滑落崖とそれより緩傾斜の移動地域が認められるが、移動土塊がほぼ滑落しているもの。	横渡 風口峠 三峯西	層厚さ2～10mの土塊または岩塊が崩落 やや規模の大きな崩壊 流れ盤斜面の層理面や節理面から浅層の岩盤が崩落
地すべり（狭義）	再活動型の地すべり。岩盤崩壊。見通し角が19°～30°で滑落崖とそれより傾斜の緩い移動域が接し、凹地が発達しており、移動土塊が発生域にはほぼ残っているもの。	滝ノ上 寺野、東竹沢 一ツ峰沢（南側）、妙見	地すべりの再活動 一般的な再活動地すべりより傾斜が急な地すべり 初生の岩盤地すべり（深層）
流動	谷を埋積していた土砂が、地震時に液状化または上部からの急激な載荷により流動したもの。崩落土砂の土石流化したもの。	小栗山の谷 三峯西・三石川 長岡の住宅団地など	崩落土砂が土石流化 谷の堆積物が液状化し流動 谷埋め盛土が液状化し流動



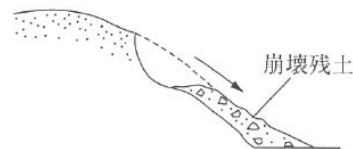
(1) 落下(崩落)



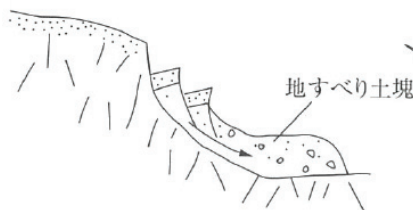
(2) 前方転倒(トップリング)



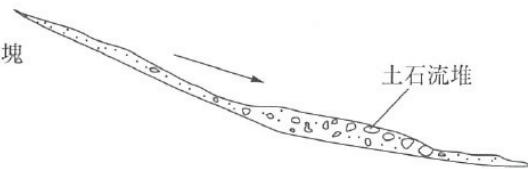
(3) クリープ



(4) 山崩れ・崖崩れ



(5) 地すべり



(6) 土石流

図 2.1.1-1 マスムーブメントの分類³⁾

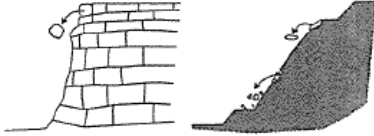
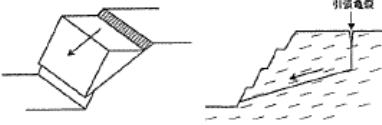
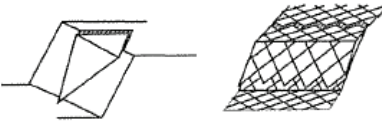
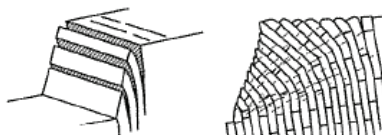
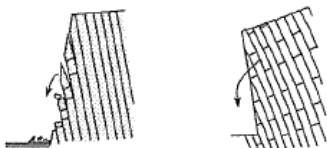
崩壊形態		破 壊 モ デ ル	対象地質	特 徴
崩壊現象	落 石			風化や浸食作用を受けて緩んだ斜面上の岩石が岩盤から分離して、落下する現象。斜面崩壊の前兆現象を示す場合が多い。
	ブロック崩壊		亀裂や節理の発達した硬岩	最も弱いブロックが最初に破壊し、それに続いて他のブロックが破壊し、最後に岩盤全体が破壊する現象。
すべり等による崩壊	平面すべり崩壊		流れ盤の場合 (軟岩、硬岩)	節理、層理、片理等の連続的な構造的弱面、断層のような大きな地質的不連続面に沿って破壊する現象。
	くさび崩壊		不連続面の発達した岩盤斜面	交差した2つの不連続面で囲まれた岩盤がせん断すべり崩壊を起こす現象。複数のくさび崩壊が連続する場合が多い。
	円弧すべり崩壊		土砂、軟弱な岩盤、亀裂が無数に発達した岩盤	斜面が円弧に沿って回転崩壊を行う現象。
	複合すべり崩壊		土砂、軟岩・硬岩、風化岩すべり、岩盤地すべり	円弧すべり崩壊と平面すべり崩壊などいくつかの崩壊形態が複合して発生する現象。一般に崩壊規模が大きく、いわゆる地すべり崩壊形態が多い。
トッピング崩壊	たわみ性トッピング崩壊		節理の傾斜が受け盤で比較的穏やかで、しかも軟質な板状岩盤	節理によって分離した岩盤が重力によって全体的に斜面側にたわんで、ゆっくりと崩壊していく現象。
	ブロックトッピング崩壊		節理の傾向が、受け盤で急斜面でしかも硬質の板状または柱状の岩盤	節理によって分離した岩盤が重力によって斜面側にたわみ、引張破壊を起こして、上部の岩石がブロック状（岩塊）となって崩壊する現象。
バックリング崩壊			節理や層理がほぼ垂直に発達している岩盤	板状または粒状に分離した岩体が、自重によって、亀裂や劣化の箇所で座屈し、折れ曲がるように全体的に崩壊する現象。

図 2.1.1-2 岩盤斜面の崩壊形態の分類⁴⁾

このように、岩盤斜面には、様々な崩壊パターンが懸念され、崩壊のリスクを評価するために、例えば図 2.1.1-3 のフロー⁵⁾にしたがって調査がなされる。ここで、図 2.1.1-2 に示す崩壊パターンの概略の分類は、主に”崩壊メカニズム推定”の段階でなされ、具体的な崩壊位置等は、岩盤の不連続面(図 2.1.1-4)の位置による寄与が支配的な場合は同時に”崩壊メカニズム推定”の段階で判断される。一方、比較的均質な場合は、次の”斜面評価、安全率検討”ならびに”詳細検討”の段階で抽出される。前者では、表 2.1.1-5 に示すような地質条件や、表 2.1.1-6～8 に示すような調査結果から、表 2.1.1-9 に示すパラメータに着目して判断することとなる。その際、図 2.1.1-4 に示すような地質構造のステレオ表示などの手法や、図 2.1.1-5 のように整理例が参考となる。

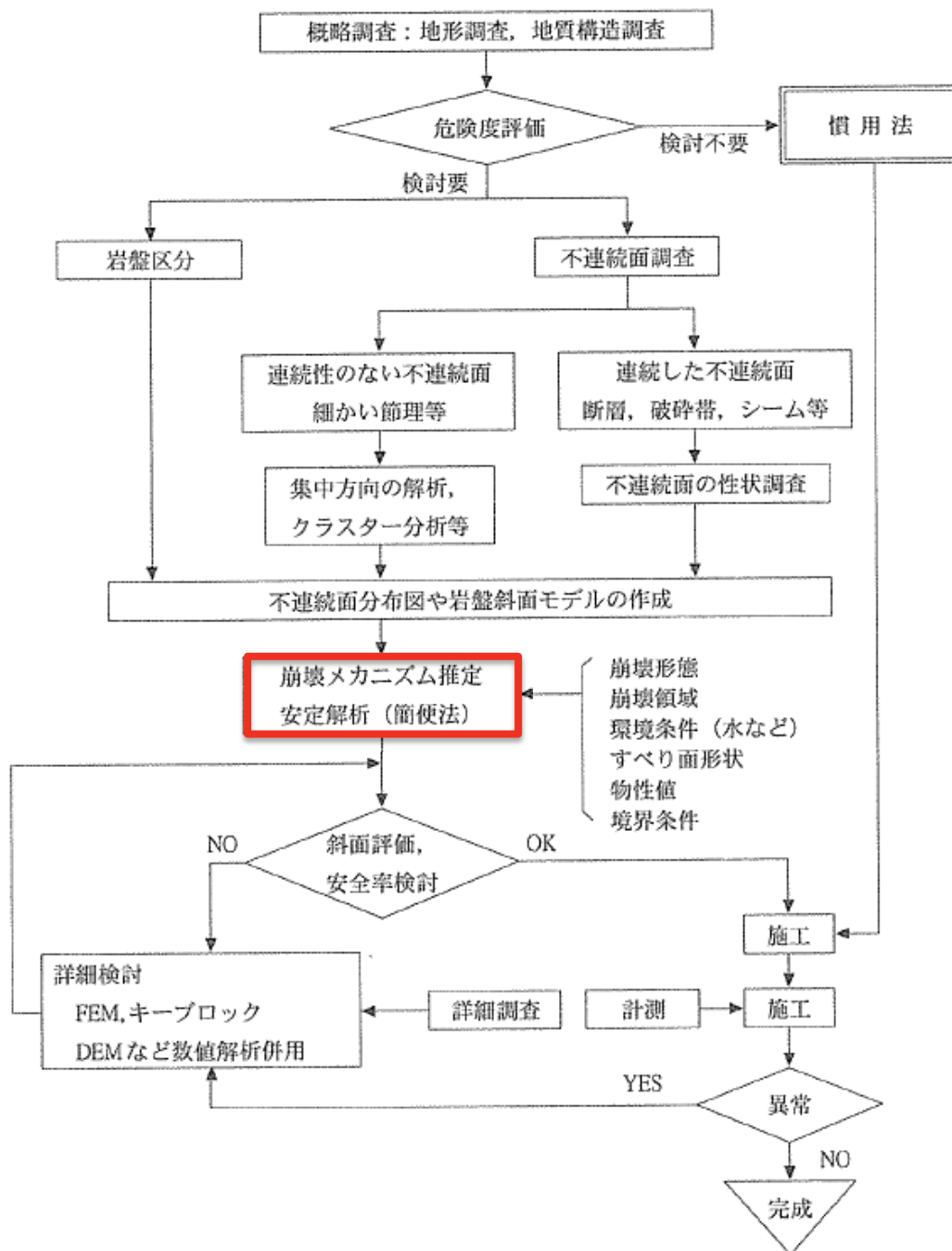


図 2.1.1-3 岩盤斜面安定性評価のフロー⁵⁾

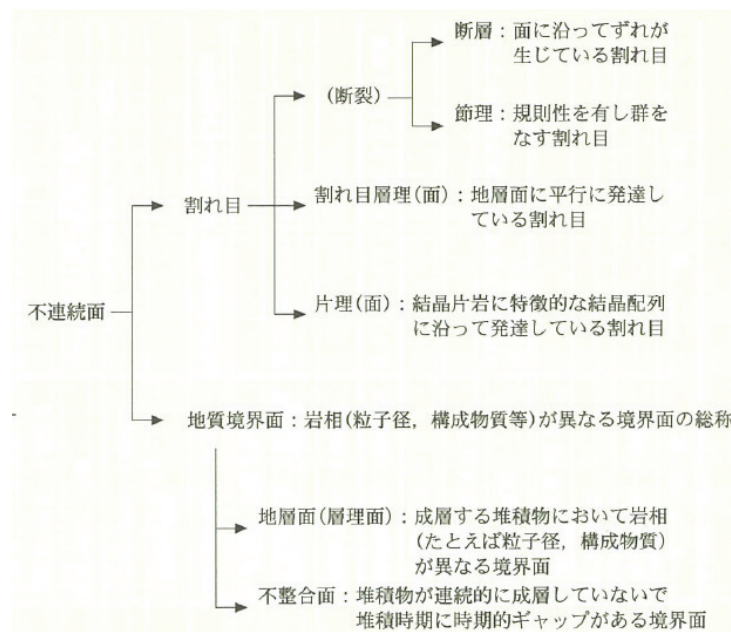


図 2.1.1-4 岩の割れ目説明⁴⁾

表 2.1.1-5 崩壊性要因を持つ地質⁶⁾

崩壊性要因を持つ地質	代 表 地 質 等
風化が速い岩	泥岩, 凝灰岩, 頁岩, 粘板岩, 蛇紋岩, 片岩類等
割れ目の多い岩	片岩類, 頁岩, 蛇紋岩, 花崗岩, 安山岩, チャート等
割れ目が流れ盤となる岩	層理, 節理が斜面の傾斜方向と一致している片岩類, 粘板岩等
構造的弱線をもつ地質	断層破砕帯, 旧地すべり地, 崩壊跡地等

表 2.1.1-6 地形地質踏査で得られる情報⁷⁾

地形情報	斜面形状	高さ, 勾配, 縦横断面形等
	一般地形	崖錐, 段丘, 丘陵, 一般斜面等
	異常地形	オーバーハング, 露岩, 遷急線等
	斜面変動地形	地すべり, 土石流, 崩壊等
地質情報	地質, 岩質	地層, 岩相
	割れ目	断層, 破砕帯, 節理, 層理
	地質構造	走向, 傾斜, 褶曲
	風化, 変質	風化状況, 変質状況, 強度
	未固結堆積物	種類, 構成物, 層厚等
表層の情報	浮石・転石の分布	規模, 分布密度, 不安定度
	植生	種類 (森林, 草地, 裸地等), 密度, 生育状況
	湧水	有・無, 量
既設構造物	種類	治山・砂防施設, 地すべり防止施設, 道路, 構造物, 河川構造物
	規模	高さ, 延長, ポケット, 堆砂状況等
	変状	亀裂, はらみ出し等

表 2.1.1-7 予備調査の項目と適用性⁶⁾

調査項目		調査方法	既往資料収集	空中写真判定	現場調査	備 考
現象・前兆	過去の災害履歴		◎	○	△	岩盤崩壊の運動形態・発生頻度
	開口亀裂の有無・程度			△	◎	亀裂内の充てん物の有無も含む
	新規の小崩壊・落石			△	◎	新鮮な崩壊跡地，落石の存在
	浮石の分布状況			△	◎	岩盤の剥離の程度
	ゆるみが著しい地層・岩盤の有無				△	岩盤のゆるみが極度に進んだ範囲
地	斜面傾斜		○	△	◎	直立，急勾配・緩勾配の区分
	斜面の高さ，道路の位置		○	○	◎	河床・尾根の間での道路の位置
	斜面型		○	◎	○	
形	斜面の形成過程		△	○	△	攻撃斜面，滑走斜面の区分，浸食，堆積域区分，崖錐斜面の有無
	オーバーハングの有無		△	○	◎	
	遷急線の有無			◎	○	
	斜面の微地形			△	◎	小沢，斜面のヒダ，ガリ等
地質・地質構造	岩種・岩質		○	△	◎	構成岩種・硬さ等
	風化の程度・岩盤のゆるみ			△	○	岩盤の固結の状態
	断層・破砕帯の分布等		△	○	◎	分布，形状，走向，傾斜，充てん物
	不連続面の状況		△	△	○	走向傾斜，充てん物，開口の程度，剥離性
	斜面内部での脆弱層の存在				△	破砕帯やすべり面となりそうな脆弱層
	透水層・難透水層の有無				○	
	変質箇所の有無，状況				○	
	地下水・湧水の状況				○	
	植生・立木の分布状況			△	◎	
	気象・地震（地震記録）		○			
	既設対策工の状況					別途，構造物調査を行う

◎：特に有効な調査，○：有効な調査，△：場合によっては有効な調査

表 2.1.1-8 詳細調査の項目と適用性⁶⁾

調査項目 \ 調査手法		空中写真の判読	地形測量	地形調査	地表地質調査	ボーリング調査	弾性波探査	岩石試験	地下水の調査	植生の調査	備考
地形	斜面の形状	○	◎	○							基本的に概査により対応するが、より詳細に調査を行う。
	斜面傾斜		◎	○							
	斜面の高さ・道路の位置		◎	○							
	斜面型	○	◎	○							
	斜面の形成過程	○		△							
	オーバーハングの有無	△	◎	◎							
	遷急線の有無	◎	○	○							
	斜面の微地形	△		◎							
地質・地質構造	岩種・岩質	△			◎	◎	○	△	△		構成岩種・硬さ等
	風化の程度・岩盤のゆるみ				△	○	◎		△		
	構成岩の密度					△		◎			
	断層・破砕帯の分布	○			◎	◎	○				
	不連続面の分布・位置	△			○	◎	○				規模・連続性
	不連続面の走向・傾斜	△			○	◎					
	不連続面の状況（開口・シーム）				○	◎			○		充てん物
	不連続面の力学係数							◎			
	斜面内部のぜい弱岩の存在			△	△	○	△	△			破砕部等
	地下水・湧水の状況				△	○			○		
現象・前兆	間隙水圧の推定					△			△		
	植生・立木の分布状況	△								◎	
	発生後の落下経路の推定	△		○							
	既設対策工の状況	(別途構造物調査を行う)									
	過去の災害履歴	(以下の項目は、基本的に概査により対応するが、詳細調査ではより細部にわたって調査を行うものとする)									
	開口亀裂の有無・程度										
	新規の小崩壊・落石										
	浮石の分布状況										
	ゆるみが著しい地層・岩盤の有無										

◎：特に有効な調査，○：有効な調査，△：場合によっては有効な調査

表 2.1.1-9 岩盤崩落箇所の特定を目標にした主要なパラメーター一覧⁴⁾

第1階層	第2階層	第3階層	第4階層
	基本 パラメータ	岩盤斜面についての一般的 パラメータ	岩盤崩壊特定の目標に適した パラメータ
岩 盤 の 特 性	地質	堅岩の特性 岩体としての特性	岩種、堅岩の強度、風化度 岩体としての強度
	地質年代 地質構造	岩相の組合せ 不連続面の配列、特性 初期応力	岩相の組合せ、表土の厚さ 不連続面の走向・傾斜、トレース の長さ、開口幅、傾度 不連続面の強度 初期応力
現 場 周 辺 の 環 境	地形	現場の位置 崖の方向と高さ	地域特性 斜面の高さ、長さ、傾斜、オーバ ーハング、タイプ、逕急線 集水地形、後背地の地形・利用状 況
	水 気候 地震 植生	水文状況	凍結、融解 常時湧水 降雨・融雪量 活断層分布・地震の予測 植生 交通量
建 設 工 事	建設工事	対策工とメンテナンス状況 工事の手法（機械施工、発 破の方法、逆巻きなど）	対策工・地下水処理 メンテナンス 掘削方法

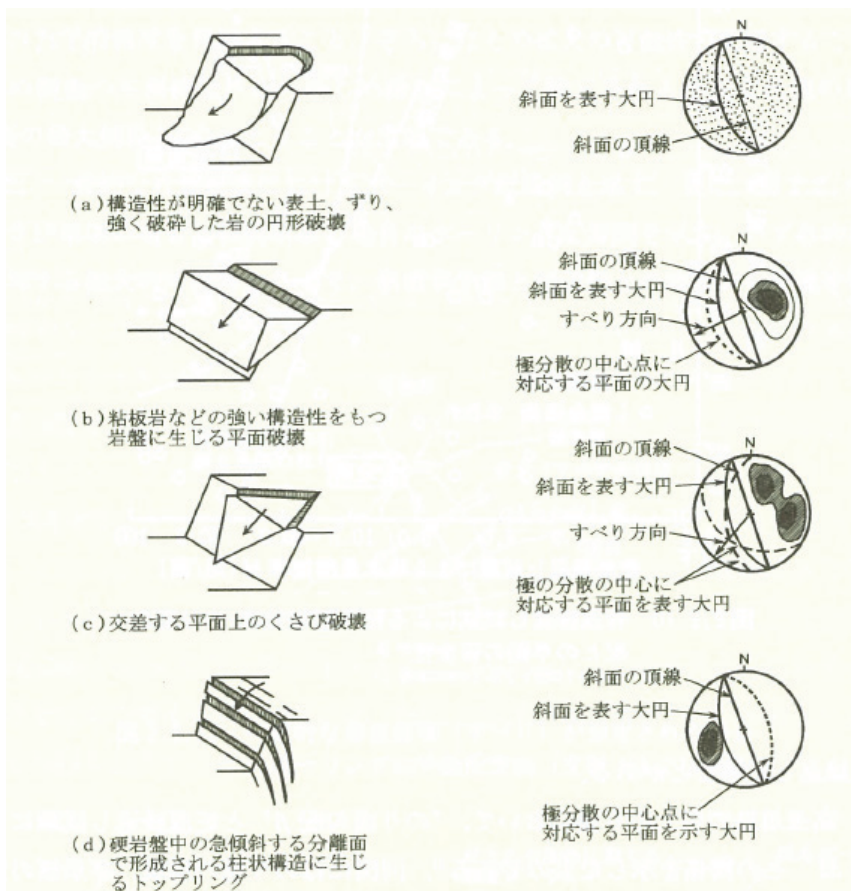


図 2.1.1-4 主な岩盤崩壊の形態とそれを生ずる地質構造のステレオ表示⁸⁾

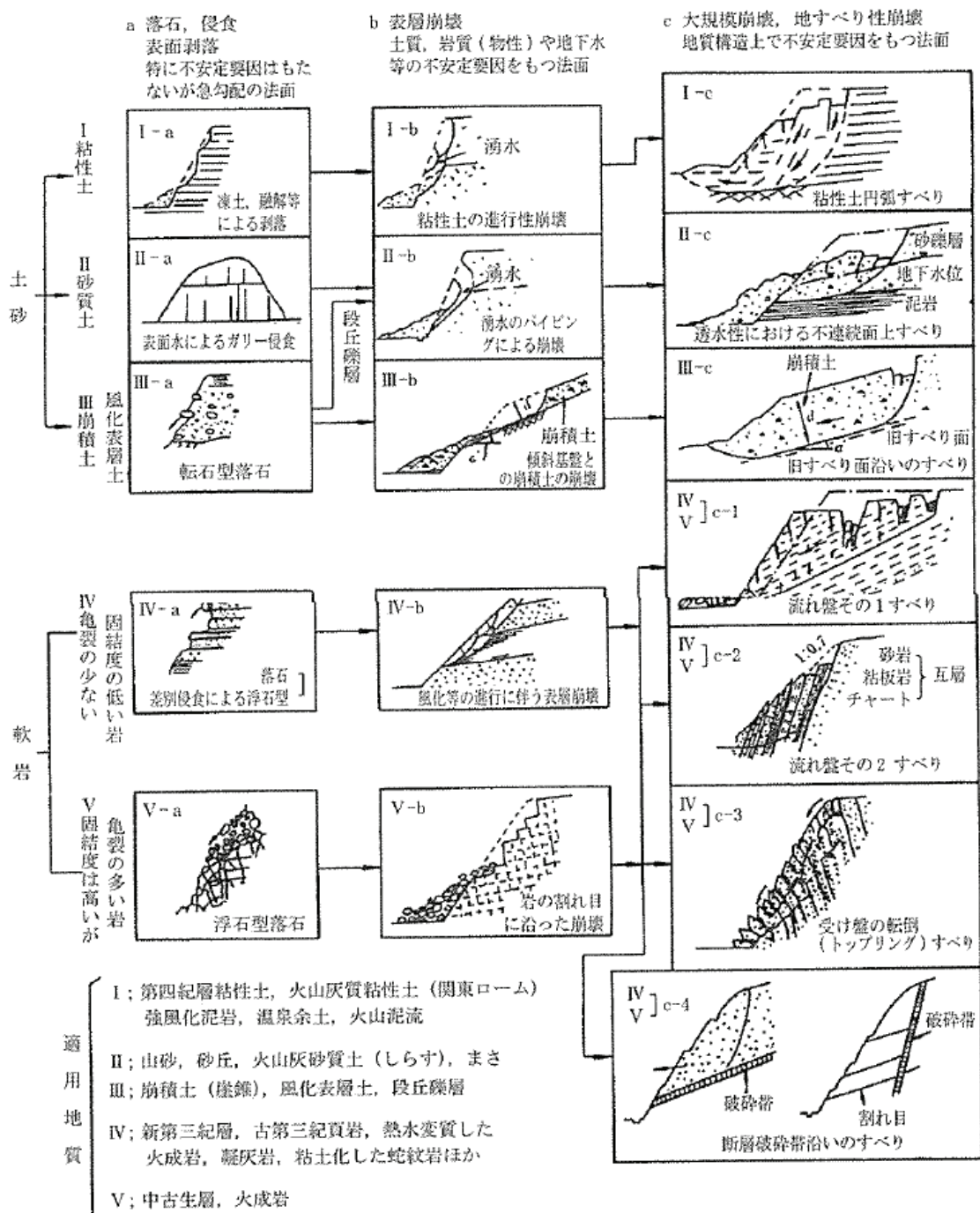


図 2.1.1-5 地山条件に応じた切土の破壊形態⁹⁾

2. 1. 2 斜面崩壊の素因と誘因

岩盤斜面の崩壊の原因は、岩石、岩盤や地層の生成過程および地殻変動による変成等によって決まる。これらの岩石、岩盤や地層が本来的に持っている地質条件によるもの（素因）と、斜面の切取りによって生じる岩石、岩盤の変状、地下水の変動、地表水（主として降雨）の浸透および地震等の外的な要因によるもの（誘因）とに分けられる⁶⁾。

斜面崩壊の素因である地質条件としては、固結度（強度）や風化等の地山（岩石や岩盤）の物性および層理、節理、片理や断層等の地質構造上の不連続性が挙げられる。特に、後者の地質構造上の不連

続性と斜面の切り取りとの関係は斜面の安定性や崩壊に大きな影響を与える素因と言える⁶⁾。

斜面崩壊の誘因としては、掘削に伴う発破振動や応力解放、風化、降雨による地表水や地下水の作用（集水・流れ、有効応力変化等）、降雪・融雪、地震などが挙げられる。ここで、表 2.1.1-1 に挙げた地すべり現象を表す運動様式（トップル・フォール、スプレッド、スライド、フロー）といくつかの誘因（豪雨、融雪、地震）との関係は、例えば表 2.1.2-1¹⁾のようにまとめられている。さらに、スライドとフローについては、事例の分析を踏まえ、表 2.1.2-2、3 のように、誘因による地すべりの相違点についてもまとめられている¹⁾。

表 2.1.2-1 地すべり現象と誘因の関連性（トップル・フォール、スプレッド、スライド、フロー）¹⁾

(トップル・フォール)				
運動様式	現象の名称	関連性(***:大,**:中,*:小,-:無,?:不明)		
		豪雨	融雪	地震
トップル	岩の転倒	?	?	***
	岩盤の座屈	?	?	***
	岩盤剥離	?	?	***
	山体崩壊(転倒型)	?	?	***
フォール	落石	*	?	***
	岩盤崩落	*	*	***

(スプレッド)				
運動様式	現象の名称	関連性(***:大,**:中,*:小,-:無,?:不明)		
		豪雨	融雪	地震
スプレッド	遅いスプレッド	***	***	**
	速いスプレッド	**	**	***

(スライド)				
運動様式	現象の名称	関連性(***:大,**:中,*:小,-:無,?:不明)		
		豪雨	融雪	地震
スライド	表層崩壊	***	*	***
	深層崩壊	***	*	***
	大規模崩壊(崩れ)	**	*	***
	岩盤崩壊	**	?	***
	山体崩壊	**	?	***
	地すべり(狭義)	***	***	***

(フロー)				
運動様式	現象の名称	関連性(***:大,**:中,*:小,-:無,?:不明)		
		豪雨	融雪	地震
フロー	土石流	***	*	***
	岩屑なだれ	**	*	***
	アースフロー	***	***	***
	火砕流	-	-	-
	火山性土石流(ラハール)	-	-	-
	永久凍土のフロー	-	***	-

表 2.1.2-2 誘因による地すべりの相違点 (スライド)¹⁾

項 目	豪雨・融雪に起因するスライド	地震に起因するスライド
規 模	・回転性のものは長さ、幅共に100m以内の比較的小規模なものが多い。 ・並進性又は直進性のものは、長さまたは幅が1kmを越えるような巨大なものも存在する。 ・移送堆積域の長さは発生域での移動体の長さの2倍程度が最大。	・回転性のものも長さ、幅ともに小ささまざまなものがあり、幅が100mを越える大規模なものも多い。 ・並進性又は直進性のものは、大規模なものが多く、歴史的には長さや幅が数kmに及ぶものもある。 ・移送堆積域の長さは豪雨・融雪に起因する地すべりより大幅に長くなることもある。
速 度	・大規模なものは低速から中速(5cm/s未満)のものが多い。 ・小規模で非常に速い速度のものがある(5cm/s以上)。	大規模な地すべりでも非常に早い速度(5cm/s以上)で移動することがある。
物質構成	岩盤、岩屑、粘性土などいろいろな物性からなるが、地すべり発生前には移動体の重力作用のみですべることでできる強度の弱い地層や境界面が存在する。	岩盤、岩屑、粘性土などいろいろな物性からなるが、移動体の重力作用のみではすべることの出来ない高強度の移動体であっても地震動が大きければすべることがある。
変化階程(初生)	・回転性のものは初生すべりも多いが、並進性又は直進性のものには初生すべりが少ない。 ・豪雨や融雪の度に再活動する地すべりも多く、大きな移動体内に発生する二次的なすべりや三次すべりにより地すべり地形が徐々に変化して行く。	・初生すべりが多く発生する。 ・再活動型の地すべりが活動した場合でも、次の地震までのサイクルが豪雨や融雪より極端に長いことから、地震による二次すべりや三次すべりが発生することは少ないが余震によって変位が拡大することはある。
地形的位置(地形、地下水状態を含む)	地下水が存在する場所にのみ発生することから、集水地形などに多く発生する。	・地下水がない場所でも地すべりが発生するが、地下水が豊富な場所では、過剰間隙水圧等の発生により地すべりの発生が更に促進されることがある。 ・浅いすべりは、尾根沿いに多発する。
発生状況(群発性・同時性)	・豪雨による大規模な地すべりは単発で発生することが多い。異常豪雨によって広範囲に多発することもあるが、雨の降り方が地域内で様でないことから、数時間から数日の間に雨雲の発生域内で多発する。 ・融雪によるものは単発で発生することが多い。	広範囲に同時多発的に発生する。同時性は地震動の継続時間と同程度と考えられることから、数分～数十分の短い時間内に多発する。

表 2.1.2-3 誘因による地すべりの相違点 (フロー)¹⁾

項 目	豪雨・融雪に起因するフロー	地震に起因するフロー
規 模	・小規模なものも大規模なものも存在するが、発生域での大規模な深層崩壊や地すべりに伴う土石流は大規模な土石流となることもある。	・小規模なものも大規模なものも存在するが、発生域での大規模崩壊や山体崩壊に伴って大規模な岩屑なだれになることがある。
物質構成	・岩屑や土砂。 ・発生域の地質は表土や崩積土、風化した地層などであることが多い。	・岩屑や土砂。 ・発生域の地質は豪雨・融雪に起因するものより硬質な岩が含まれる。
発生状況(群発性・同時性)	・豪雨に伴って複数箇所でも同時に発生することもあるが、単発で発生することが多い。	・地質によっては同時多発的に発生することがある。

2. 1. 3 斜面安定評価の概要

既存の原子力発電所周辺斜面に限定せず、広く一般に斜面崩壊を考えた場合、図 2.1.3-1 のような評価フロー⁴⁾が考えられる。原子力に関連した斜面の安定性を評価する場合、①現状の確定論的評価では崩落を許容していないこと、②詳細に調査・管理された斜面であり条件が限定されていることなどから、主にすべりに対する安定性ならびにすべり土塊の挙動の評価を対象としているが、図 2.1.3-1 のフローは、より広く一般的な斜面崩壊を対象としたフローとなっている。

評価手法については、地質学的・地形学的知見に基づく方法、統計解析による方法、力学モデルに基づく数値解析手法に大別できる。後二者の具体的手法としては、例えば図 2.1.3-2¹⁰⁾に示すような方法がある。また、ここに挙げられた手法の内のいくつかについては、運動様式ごとの適用事例の有無（表 2.1.3-1）や解析に必要なパラメータ（表 2.1.3-2）について整理されている。

同様な整理は、他の文献でも実施されている。例えば、参考文献 1 においては、表 2.1.3-3 のように解析手法選定の目安を示すとともに、「保全対象」「解析の目的」「評価方法と必要な出力」を考える段階で、要求される詳細度の点から解析手法の選択が容易になるように、図 2.1.3-3 に示すように分類し、それぞれの解析手法の特徴を表 2.1.3-4、表 2.1.3-5 のように整理している。

運動様式ごとの解析手法の適用性、それぞれの解析手法の概要については、参考文献 4 でもまとめられ、それぞれ表 2.1.3-6、表 2.1.3-7 のように整理されている。さらに、参考文献 4 においては、「土や岩盤を連続体とみなすにはあまりにも不均一・不均質であるため本質的には不連続体として取り扱うべきであろう」と記述した上で、不連続面についての工学的判断に基づく岩盤モデルの作成について、下記の 3 つの方針を示している。

- ①岩盤内に地質構造・物性上の特定できる顕著な不連続面が存在する場合——個々の不連続面のモデル化
- ②岩盤内に特定できないほどの多数の不連続面が存在する場合——等価連続体としてのモデル化
- ③岩盤内に小規模な不連続面が一様・均一に存在するあるいはほとんどない場合——物性値の評価による連続体としてのモデル化

これらの現状を踏まえると、原子力施設周辺斜面の安定性評価においては、これまでの地震時安定性評価手法との整合性も踏まえ、破壊が生じない場合も含めた崩壊領域が形成されるまでの解析を連続体または不連続体による解析手法、崩壊領域が形成され崩壊から転動に至るまでの挙動を不連続体解析によって実施することを基本とし、質点系の解析手法は岩塊の最大到達距離や衝突荷重などを特定の条件下で評価する場合に留めることが妥当であろう。

なお、原子力施設周辺斜面については、最終的に数値解析手法による安定性評価が行われるが、敷地外の斜面の影響を評価する必要が生じた場合や基本検討段階の概略検討においては、数値解析手法以外の方法を使用する可能性も考えられるため、数値解析手法以外の方法も含めた評価手法の適用性を表 2.1.3-8、表 2.1.3-9 に示す。

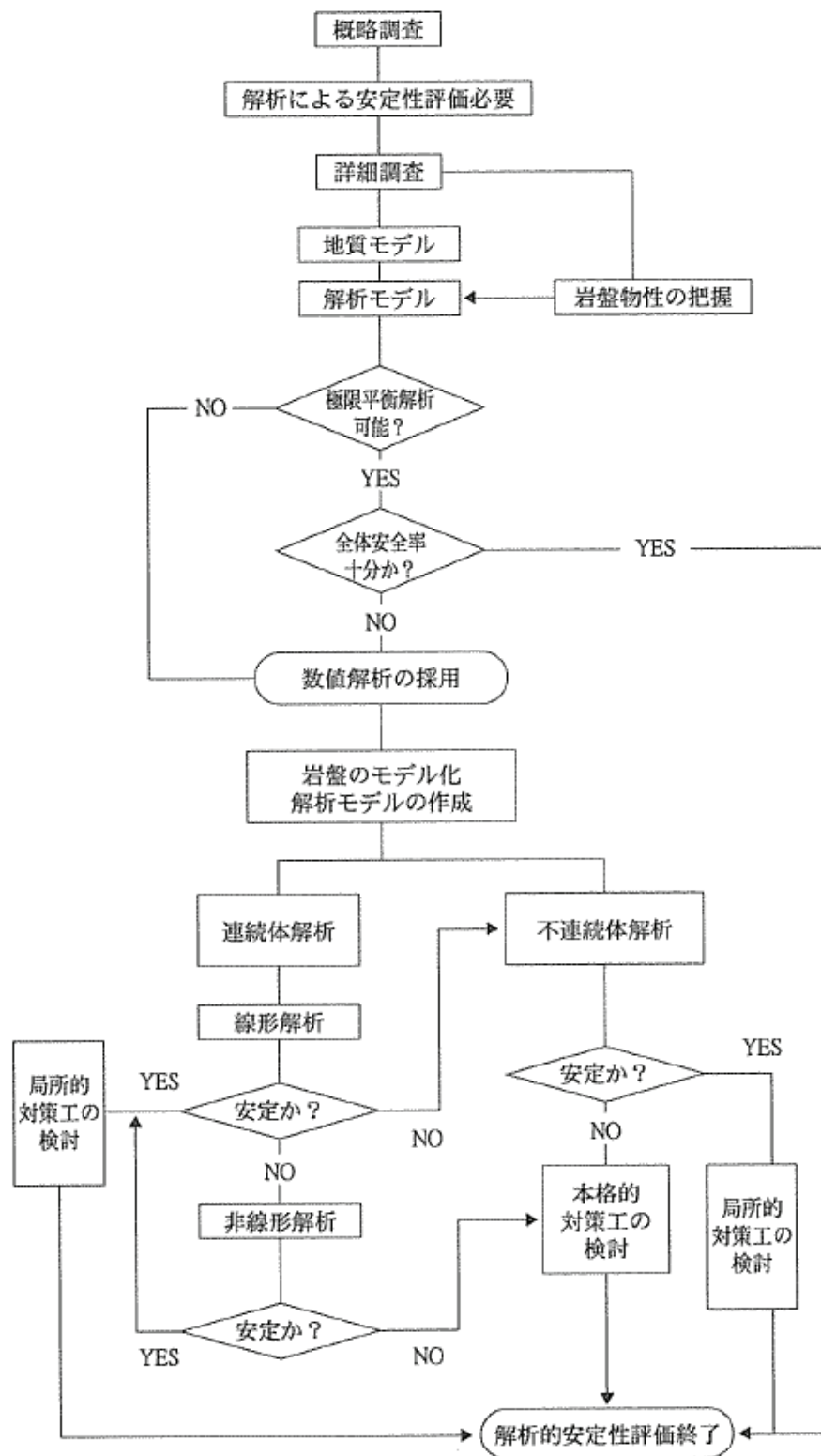


図 2.1.3-1 岩盤斜面の解析による安定性評価作業の流れ⁴⁾

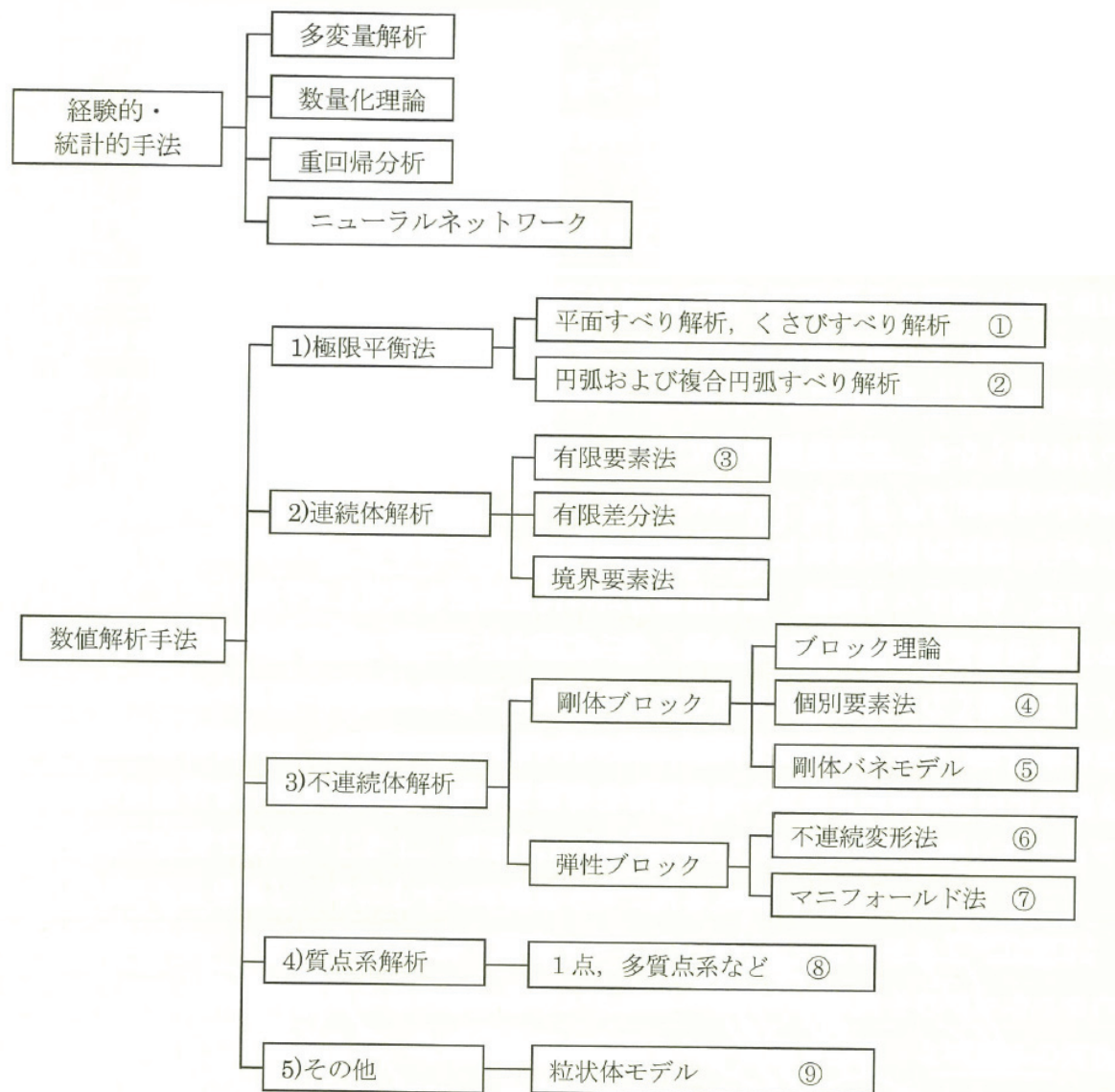


図 2.1.3-2 岩盤斜面の解析による安定性評価作業の流れ¹⁰⁾

表 2.1.3-1 崩壊形態と解析手法の一覧表¹⁰⁾

形 態	評価内容	解析手法						
		極限 平衡法	有限 要素法	有限 差分法	個別 要素法	不連続 変形法	マニフォ ールド法	質点系 解析
岩盤 崩壊	崩落	安 定	△	○	△	○	△	△
		ハザード	—	—	—	◎	△	△
	滑動	安 定	◎	◎	△	○	△	△
		ハザード	—	△	△	○	△	△
	転倒	安 定	△	○	△	○	△	△
		ハザード	—	△	△	◎	△	△
	座屈	安 定	△	○	△	○	△	△
		ハザード	—	△	△	○	△	△
落石	安 定	△	—	—	○	◎	△	△
	ハザード	—	—	—	○	◎	△	◎

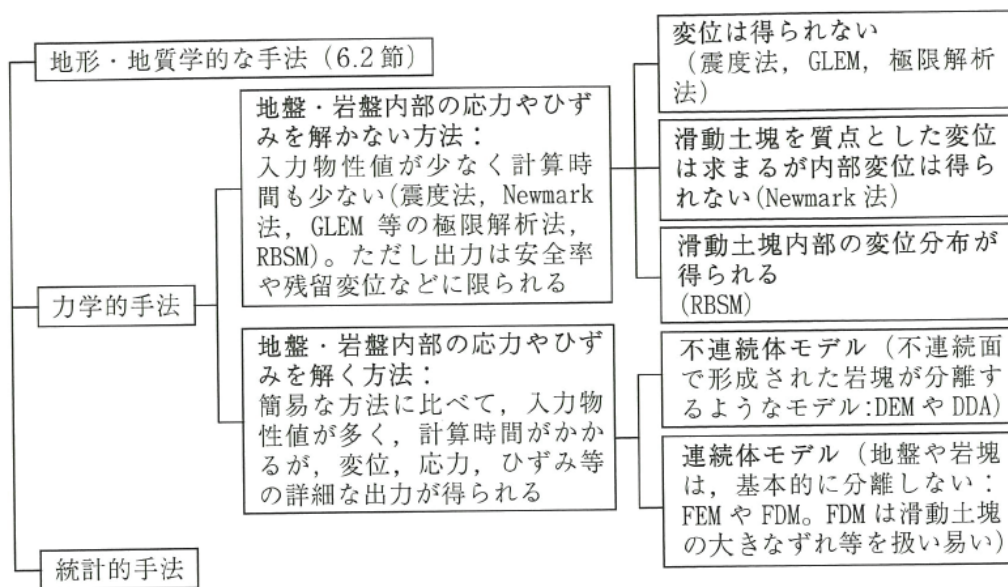
凡例 ◎：適用例多数，○：適用例有り，△：適用例少数，—：資料なし

表 2.1.3-2 代表的なハザード評価のための解析手法¹⁰⁾

対象	区 分		解析手法	入力パラメータ	評価項目
岩盤崩壊	経験的・統計的手法		桑野らの方法など	斜面高さ、幅、見通し角度など	到達位置、広がり幅
	数値解析手法	不連続体解析	個 別要素法	斜面形状、亀裂分布、接触バネ剛性、減衰定数など	速度、跳躍高さ、軌跡、到達範囲、崩土厚
			不連続変形法	斜面形状、亀裂分布、接触バネ剛性、速度エネルギー比、変形係数、ポアソン比、粘性係数など	
落石	経験的・統計的手法		落石対策便覧式	斜面高さ、斜面傾斜角、斜面区分	速度、跳躍高さ(=2m)
	数値解析手法	質点系解析	ROCKFALLなど	斜面形状、法線方向速度比、接線方向速度比など	速度、跳躍高さ、軌跡(3次元解析では平面軌跡)
		不連続体解析	個 別要素法	斜面形状、落石形状、接触バネ剛性、減衰定数など	速度、跳躍高さ、停止位置、軌跡(3次元解析では平面軌跡)
			不連続変形法	斜面形状、落石形状、接触バネ剛性、速度エネルギー比、変形係数、ポアソン比、粘性係数など	

表 2.1.3-4 解析手法の選定にあたり考慮する事項¹⁾

解析手法の選定にあたり考慮する事項	備考
・対象範囲	流域のような広範な範囲か、または特定の斜面を扱うか
・保全対象	道路、橋梁、建築物、貯水池、河道等
・解析の目的	概査段階の概略の安定性評価、対策の必要性検討、精査段階の安定性評価、対策工設計の照査、崩壊のメカニズム検討
・評価方法と必要な出力	安全率、変位、水圧変化、破壊域、崩壊土砂の到達域、対策構造物に作用する応力等
・盛土、切土斜面、自然斜面	斜面のタイプによって物性値の信頼性や情報量が異なる
・材料特性	粘性土、砂質土、軟岩、不連続性岩盤等
・入力データの有無、信頼性、調査による入手の可否、調査の費用と時間	入力データとは、物性値、物性値の区分、地下水位データ等
・過剰間隙水圧の取り扱い	土-水連成解析を行うのか、非連成とするのか
・解析の費用と時間	目的(緊急を要する場合、研究開発、設計の照査など)に応じて考慮する必要がある



図中の略記

GLEM (Generalized Limit Equilibrium Method：一般化極限平衡法)

DEM (Distinct Element Method：個別要素法)

DDA (Discontinuous Deformation Analysis：不連続変形法)

FEM (Finite Element Method：有限要素法)

FDM (Finite Difference Method：有限差分法)

RBSM (Rigid Body Spring Method：剛体ばねモデル)

図 2.1.3-3 解析の分類例 (解析の詳細度から表した例) ¹⁾

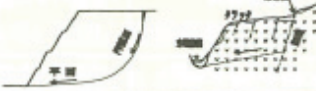
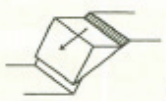
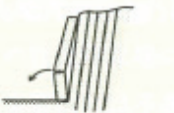
表 2.1.3-5 地盤・岩盤内部の応力やひずみを解かない方法¹⁾

手法	震度法に基づく極限平衡法GLEM, 極限解析法	Newmark法	RBSM
主な特徴	- 変位は求めない - 地震力は一定として与え、安全率のみを求める	- 地震加速度の時刻歴を反映し、時々刻々発生する残留変位を求める - 滑動土塊は質点として表される剛体とする	- 地震力は一定として与える - 滑動土塊は剛体要素で離散化するが、滑動土塊内部の変位分布も求める
主な出力	安全率	- 滑動土塊の残留変位 - すべり面の安全率の時刻歴	- 安全率 - 残留変位
主な使い方	- 安全率に基づいて必要な対策工の数量を求める - 必要な入力データは比較的少なく、詳細な物性値が得られない場合でも短時間で概略検討する際に有効	- 残留変位に基づいて安定性を評価する場合に適用 - 時々刻々発生する変位の傾向を求めることができるので、地震波形の特徴を考慮できる - 入力物性値は、極限平衡法と同じであり、詳細な物性値が得られない場合でも短時間で概略計算ができる	- 安全率だけでなく残留変位に基づいて安定性評価したり、滑動機構を分析したりすることに有効 - アンカーや杭と地盤の相互作用を検討する際に有効
留意点や限界等	- 地震力を静的に与えるため、計画安全率の考え方によっては、対策工の設計が過大になる可能性がある - 地震動の特性に応じた増幅等の詳細な現象は検討できない	- すべり面は基本的に円弧または平面に限られる - アンカーや抑止杭等を直接モデル化できないので、効果を反映させる方法を検討する必要がある	地震力を静的に与えるため、動的な現象を詳細に検討することはできない
原理の概略	- 震度法は、極限平衡法における滑動土塊に水平及び鉛直方向の慣性力を加える方法。 - 極限解析法は、静力学条件から崩壊荷重を評価する下界法と運動学条件から崩壊荷重を評価する上界法があり、崩壊荷重は下界法の解$\leq$正解値$\leq$上界法の解となる。 - GLEMは、対象領域をブロック群に離散化し、静的つりあい式と破壊条件式を適用し安全率等を最小化するという極限解析法(上界解析法)の一つ。	極限平衡法を用いて限界水平震度を求め、想定する地震加速度を重力加速度で除した震度と比較する。滑り方向の震度が限界水平震度を超えた時間帯について、加速度を積分して変位を求める。	対象領域を剛体要素に離散化し、要素間をバネとモールクーロンなどの破壊則でモデル化し、静的つりあい状態における仮想仕事の原理に基づいて剛体要素の変位を解く方法。
地震動	震度係数は、河川砂防技術基準案などで定められている	特定の地震波形を入力することが可能	震度法と同様に地震力は一定として与える
入力データ	- 地層区分、地下水位 - 単位体積重量 - すべり面のせん断強度	- 地層区分、地下水位 - 単位体積重量 - すべり面のせん断強度	- 地層区分、地下水位 - 単位体積重量 - すべり面のせん断強度 - 地盤のせん断剛性、ポアソン比、せん断強度から要素間のモデル定数を設定する
対策工のモデル化	- 土工による対策工(盛土、切土工)のモデル化が可能 - アンカーや杭などの抑止工を直接モデル化することはできない	土工による対策工(盛土、切土工)のモデル化が可能	土工及びアンカーや杭などの抑止工を直接モデル化することが可能

表 2.1.3-6 地盤・岩盤内部の応力やひずみを解く方法¹⁾

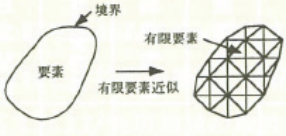
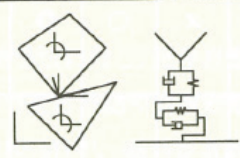
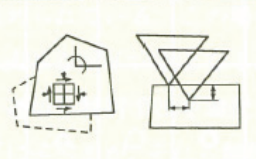
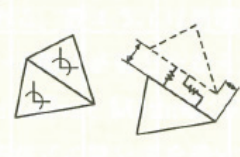
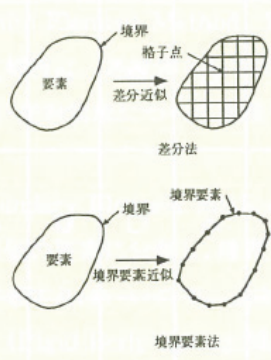
手法	FEMやFDM等の連続体モデル	DEMやDDA等の不連続体モデル
主な特徴	・地盤や岩塊は、基本的に分離しない ・地盤や岩盤の非線形性を反映することができる。 ・有効応力解析を行う場合、土-水連成解析と非連成解析がある ・FDMは、滑動土塊の大きなずれ等を扱い易い（不連続体としての解析も可能な解析コードもある）	・不連続面で形成された岩塊等が分離するような挙動を扱える ・地盤や岩盤の非線形性を反映することができる。 （DEMの場合、解析コードによっては内部の応力とひずみは求まらない）
主な出力	・滑動土塊の残留変位 ・すべり面の安全率の時刻歴 ・滑動土塊内部の変位、応力、ひずみ分布 ・有効応力解析を行う場合、間隙水圧の挙動が得られる	・滑動土塊の残留変位 ・すべり面の安全率の時刻歴 ・滑動土塊内部の変位、応力、ひずみ分布
主な使い方	・斜面の増幅等の振動機構、斜面内部の破壊機構、滑動機構を詳細に検討する際に有効 ・抑止工と地盤の相互作用を解析可能 ・土-水連成解析を用いれば、過剰間隙水圧の発生と消散過程を詳細に調べる場合に有効	・斜面の増幅等の振動機構、斜面内部の破壊機構、滑動機構を詳細に検討する際に有効 ・抑止工と地盤の相互作用を調べる場合に有効 ・複合する不連続面、不連続面における分離、大変形などを扱う際に有効
留意点や限界等	・極限平衡法等に比べて必要となる入力物性値等のデータは多く、解析結果はその信頼性に依存する ・モデルによっては長時間の計算を要する。	
原理の概略	・運動方程式を支配方程式とし、空間（斜面）及び時間について離散化する ・間隙水のモデル化方法については、土-水連成解析と非連成解析でモデルの二通りがある。	運動方程式を支配方程式とし、空間（斜面）及び時間について離散化する。DEMの要素は、解析コードによって、剛体の場合と変形する要素の二通りがある。DDAは、定ひずみ要素の場合とさらに離散化するタイプがある。
地震動	特定の地震動を入力することが可能	
入力データ	・地層区分、地下水位 ・せん断剛性、ポアソン比 ・単位体積重量 ・せん断強度 ・減衰定数及び剛性のひずみ依存特性 ・間隙水圧をモデル化する場合は、液状化特性	・地層区分、地下水位 ・せん断剛性、ポアソン比 ・単位体積重量 ・せん断強度 ・減衰定数及び剛性のひずみ依存特性
対策工のモデル化と評価	・対策工の効果を評価可能 ・抑止工の応力照査が可能	

表 2.1.3-7 崩壊形態と数値解析手法の適用性⁴⁾

崩壊形態		模 式 図	解 析 手 法				備 考
			有 限 要 素 法	個 別 要 素 法	不 連 続 変 形 法	R B S M 法	
崩 落	小規模		×	○	◎	△	不連続変形法では粘性項を入れることで、崩壊に至るまでの状況と落下開始以降の状況の両方を考慮することが出来る。
	大規模		×	○	◎	△	
滑 動	円弧・複合すべり		◎	○	△	○	滑動については、主にジョイント要素を入れた有限要素法が多く用いられる。 すべり破壊に至る過程を追うには剛体バネモデル(RBSM法)で対応ができる。最近、マニホールド法(MM)でこのような破壊過程を検討している例がある。 くさび破壊のような3次元空間で考慮すべき破壊では、3次元個別要素法(DEM)が有効である。
	平面すべり		○	○	○	○	
	くさび破壊		○	◎	△	△	
ト ッ ブ リ ン グ	たわみトップリング		△	○	◎	△	割れ目系をブロック状にモデル化し、ブロック間の摩擦力の関係で安定性を見る。 これは、不連続変形法(DDA)や個別要素法(DEM)が多く用いられる。 ただし、3次元問題には不連続変形法は適さない。このため、最近マニホールド法(MM)が提案されているが、我が国ではほとんど実績がない。
	ブロックトップリング		△	◎	◎	△	
バックリング			△	◎	◎	△	

- ・表中の記号は、それぞれの崩壊形態に対して、その解析手法が、◎：よく適する、○：適する、△：やや適する、×：あまり適さない場合を示す。
- ・上記の解析手法のほかに、連続体型解析として、“差分法 (FDM)”や“境界要素法 (BEM)”，離散型解析としては、“マニホールド法 (MM)”などがある。これらの解析は、いずれも岩盤崩壊に関しては未発達な状態の解析手法であり、岩盤崩壊についての適用事例は我が国においてはほとんどない。

表 2.1.3-8 解析手法と入力パラメータの一覧表⁴⁾

解 析 手 法	モ デ ル 図	解析の入力パラメータ		備 考
		計測物性値	解析上仮定値*	
有限要素法		- 弾性係数 - ポアソン比 - 単位体積重量 - 内部摩擦角 - 粘着力	- 割れ目の垂直バネ定数 - 割れ目のせん断バネ定数	割れ目系の取り入れ方として結合バネ要素、ジョイント要素等を設ける方法、等価連続体モデルに近似する方法、離散可能な解析手法の導入等がある。
個別要素法		- 割れ目系の位置 (表面部) - 割れ目系の走向・傾斜 - 岩塊の密度	- 割れ目の規模 (内部) - 割れ目のせん断強度 - 割れ目の法線応力強度 - 割れ目の摩擦角 (摩擦係数)	統計的・経験的に岩盤内部の割れ目系の広がり进行评估する場合もある。
不連続変形法		- 割れ目系の位置 (表面部) - 割れ目系の走向・傾斜 - 単位体積重量 - 内部摩擦角 - 弾性係数 - ポアソン比	- 割れ目の規模 (内部) - 粘性係数 (崩落の場合) - 想定最大変位比 - 接触バネの剛性	統計的・経験的に岩盤内部の割れ目系の広がり进行评估する場合もある。
RBSM法		- 割れ目系の位置 (表面部) - 割れ目系の走向・傾斜 - 単位体積重量	- せん断バネ定数 - 垂直バネ定数	
その他の解析手法	 などがある。	- 弾性係数 - ポアソン比 - 単位体積重量 - 内部摩擦角 - 粘着力 - など		FDMやBEMは、割れ目系を取り入れたものはFEMほど十分に確立されていない。 MMは、最近出てきた手法であり、我が国ではほとんど実績がない。

*) 割れ目面のせん断試験など特殊な調査・試験によって設定することができるが、通常の調査・試験では設定できないパラメータ、解析上必要となった仮定値で、調査・試験などから間接的に推定しなければならないパラメータ、等を解析上仮定値とした。

表 2.1.3-9 斜面のハザード評価概要¹⁾

手 法	適用評価項目	概 要	必要なデータ	特徴、利点、欠点
法、基準、指針等に基づく方法	①, ②, ④, ⑤, ⑥, ⑦	各種事業（砂防事業、地すべり対策事業など）に関連する法、基準、指針、マニュアル、便覧等に示された方法に従って評価するもの	指針等によりさまざま	・最も一般的である。 ・多くのデータを背景とする。 ・安全側である。 ・上記のため個々の斜面状況に合わない過度な対策を必要とする場合もある。
地質学的・地形学的知見に基づく方法	①～⑥	斜面の特徴を地形・地質学的知見により分類・評価するもの（空中写真判読による評価など）	地形図, 空中写真, 地質図, 踏査等	・一般的に行われている。 ・災害履歴がなくても評価可能 ・経験的、定性的 ・技術者によるばらつきがある。
評点法	①, ②, ③, ④, ⑥	斜面の特徴を分類し、点数等で評価するもの（道路防災点検など）	踏査等による点検データ	・経験的手法と統計的手法の複合的な方法 ・半定量的（点数評価はされるが、危険度については相対評価である） ・さまざまな機関でさまざまな評価点を作成しており、それらの相互評価が行われていない。 ・道路防災総点検などで広く用いられているが、面的な評価が行い難い。
統計解析による方法	①, ②, ④	斜面の特徴と過去の災害履歴などとの関連性から統計的な解析により評価するもの（多変量解析など）	DEM, 災害履歴データ等の活用	・いくつかの手法がある（多変量解析、ファジィ、ニューラルネットワーク、その他エキスパートシステムなど） ・定量的、統計的取扱いが可能（ただし、安全率的なものは不明） ・さまざまな斜面変動形態に対して妥当性が問題となる。 ・多くは危険度の評価に限定され、崩土の到達距離や崩壊規模の予測方法はほとんどない（本研究では崩壊規模予測手法や到達距離予測法を提示）

表 2.1.3-9 (続き) 斜面のハザード評価概要¹⁾

手 法	適用評価項目	概 要	必要なデータ	特徴、利点、欠点
統計解析と安定解析やシミュレーションの組合せ	③、⑤	過去の災害履歴統計に合致するように安定解析やシミュレーションを行うもの	DEM, 災害履歴データ (場合により, ある程度の地質等のデータ)	・ 定量的, 統計的取扱いが可能 (ただし安全率的なものは不明) ・ 多くは開発中
物理モデルによる安定解析やシミュレーション	②～⑦	斜面の形状や地質構造, 物性などのデータから物理的なモデルを作成して安定計算や安定解析, シミュレーションなどを行って評価するもの (各種安定解析)	構造データ, 物性データ	・ 多くの方法がある (二次元～三次元各種安定計算, FEM, DEM, DDA などの数値解析, 落石シミュレーション, 土石流シミュレーションなど) ・ 定量的 (安全率まで分かる) ・ モデルの構築に手間がかかる。
モニタリングによる方法	⑦	斜面の変動や不安定性を, 直接または間接的な観測データから評価するもの (伸縮計, 傾斜計など)	モニタリングデータ各種	・ 危険箇所と変状が生じやすい場所を, あらかじめ抽出しておく必要がある。 ・ 変状から判断するため, 管理基準が問題となる。
モニタリングと物理モデルの組合せ	②～⑦	斜面変動や土壌水分のモニタリングデータを用いて物理モデルによる解析を行い, 評価するもの	構造データ, 物性データ, モニタリングデータ各種	・ 危険箇所と変状が生じやすい場所を, あらかじめ抽出しておく必要がある。 ・ モニタリングのみによる手法と比べ, 管理基準を設定しやすい。 ・ ロジックの形成

表 2.1.3-10 危険度評価に用いられる主な多変量解析の適用性¹⁾

手法	主な長所	主な短所
判別分析	説明変数が量的変数のみであるためDEM等の数値データを用いた自動解析に適している。	質的変数 (カテゴリ変数) が利用できない。要因の交互作用を考慮できない。
数量化Ⅱ類	質的変数 (カテゴリ変数) を用いた判別分析が可能で, 変動の有無の推定の他, 危険度ランクによる評価も可能である。	相関が認められる要因を選定できないことから, 要因間の疑似相関に悪影響を受ける。要因の交互作用を考慮できない。
数量化Ⅲ類	質的変数 (カテゴリ変数) を用いた分析が可能で, 要因間の相関が認められる場合も解析が可能である。	評価対象地域の違いや要因の種類などによって, 危険度を表す主成分が表れないことがあり, その場合は危険度評価そのものができなくなる。

最後に、最近注目されている粒子法と個別要素法(DEM)について、計算時間、モデルの作成や斜面崩壊解析への適用性についての比較について述べる。粒子法としてMPM, SPH法, MPS法の3つを対象とした。

・計算時間、モデルの作成

計算時間はDEM, MPM, SPH法, MPS法がいずれも陽解法で解くのにに対して、陰解法によっているFEMが時間刻みを大きくできることから一番効率がよい。ただし、モデルが大きい場合には陰解法では大きなメモリを必要とするのに対して陽解法は比較的少なくて済むので有利になる場合がある。

モデル作成に関してはメッシュが必要になるFEM, パッキングやばね値の調整が必要となるDEMは大きな労力が必要であるのに対し、MPM, SPH法はモデル作成が非常に簡易というメリットがある。MPS法はヤング率やポアソン比などの変形に関するパラメータはそのまま入力でき、またモデル作成も容易であるが、強度パラメータに関してはDEMと同様に予備検討が必要である。ただし、DEM解析には多くの実績がありある程度半経験的に入力パラメータ決めることができるように改善が進んでいる。DEM, MPS法ともに近い将来パラメータを決めるための労力という欠点は解消あるいは軽減されるであろう。

・斜面の崩壊解析への適用性

各粒子法の性質、特徴を考えると相対的にMPMやSPH法はFEMに近く、MPS法はDEMに近い。前者はひずみ分布を用いた定式化であり、その破壊挙動は応力-ひずみ関係の構成式に基づいて表現される。そのため、長年研究されてきた構成式を引き継ぐことができ有限要素法による解析の自然な延長となっている。一方、DEMにはひずみという概念は陽に用いられておらず、相対変位によってバネを切る、滑らせるといった操作によって破壊挙動を表現している。MPS法はどちらのアプローチも可能である手法である。

こうした大きな変形、残留変位を伴う挙動を数値解析により再現できることは画期的であり、今後の変形性能照査に対して大きな可能性を示している。

・各種法の比較

一概に各手法の優劣を比較することはできないが、解析対象の現象が連続体としての性質が強いのであればMPM, SPH法、不連続の性質が強いのであればDEMやMPS法が有利かもしれない。いずれにせよ、今回比較検討の対象とした各手法は大変形、不連続解析に対して大きな可能性は示しており、解析ツールとしての期待は大きい。最後に以上の考察を表2.1.3-11、図2.1.3-4にまとめて示す。ただし、まだ不明な点が多く主観的判断が多分に含まれていることに留意が必要である。

表2.1.3-11 有限要素法、個別要素法、各種粒子法の比較

	FEM (陰解法)	DEM	MPS法	MPM	SPH法
計算時間	○	×	×	×	×
大規模計算 (メモリ)	×	○	○	○	○
モデル作成の容易さ	× (○)	×	○	○	○
線形弾性解析	○	△	○	○	○
大変形	△	△	△	○	○
不連続挙動	×	○	○	△	△
剛体回転	×	○	○	△?	△?
実績、蓄積された知見	◎	○	×	△	△

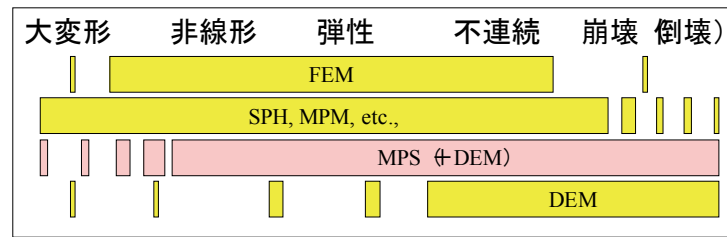


図 2.1.3-4 各種手法の得意な現象

2. 1. 4 斜面安定性評価における留意点

崩落までを対象とした斜面安定性評価を実施する場合、崩落領域の評価は重要である。例えば、2008 年岩手・宮城内陸地震において発生した荒砥沢ダム上流の地すべり（図 2.1.4-1¹²⁾）は、非常に大規模かつ低角度の地すべりが発生しており、このような地滑りの発生する可能性が無いこと、または可能性がある場合はそのすべり面位置が地質調査等で適切に捉えられていることが必要である。また、すべり破壊を生じる地震動が非常に大きくなった場合には、模型実験¹³⁾において、等価線形化法とすべり安全率計算で得られる最小のすべり安全率を示すすべり面と実際にすべり破壊を生じるすべり面とが一致しない可能性も指摘されており注意が必要である。一般に、すべり土塊の崩落は主に重力作用によって生じ、地震動は局所破壊による岩盤の強度低下に主に寄与することになる。そのため、数値解析を実施する際は、岩盤要素の挙動が図 2.1.4-2¹⁴⁾のどのパターンになるのか見極め、必要に応じて適切にモデル化する必要がある。初期の不連続面の強度の影響が支配的で、すべり面の発生がその不連続面を通して形成される場合にはそれほど重要ではないが、均質な盛土等でピーク強度と残留強度の差が顕著である場合などは特に注意が必要である¹⁵⁾。

なお、通常解析パラメータ設定の際は、ある程度の厚さを持つ同一岩盤分類の岩盤層に対して、それが厚い場合は拘束圧の依存性を考慮した物性設定がなされる。その際、拘束圧とともに図 2.1.4-2 に示す応力-ひずみ関係のパターンがどのように変化するか、それを踏まえた解析パラメータを設定する必要がある。拘束圧依存性に関する十分なデータが無い場合には、参考文献 16 などが参考となろう。例えば、参考文献 16 には、表 2.1.4-1 に示す地点の岩石試料を用いて実施した室内試験の結果について、図 2.1.4-3 に示すような応力-ひずみ関係が多数掲載されている。この例では、OTPБ 試料では拘束圧が大きくなるとピーク-残留応力の差がほぼなくなるのに対して、EEH 試料では、500kgf/cm²で一旦差が無くなった後、それよりも大きな拘束圧では破断したとみられる大きな強度低下を生じている。

等価線形化法による地震応答解析では、岩盤の物性は線形であり、変形が大きくなるほど大きな荷重が発生する。一方、非線形な要素モデルを用いた場合は、応力の応答値は頭打ちの傾向になり、拘束圧依存性の考慮が不適切（考慮しない、区分が粗い、etc.）な場合、変形が著しく大きくなっても、応力の応答値が破壊強度に達しない状況が発生する。いわゆる全応力モデルに分類される H-D モデルや R-O モデルでは、モデル自体で破壊は考慮されていないため、何らかの破壊規準（通常は応力基準）に基づいて要素の破壊を計算中に別途判定する必要があるが、そのような解析において、前述の状況が発生する。その場合には、ひずみの大きさによる破壊判定を併用することが望ましく、その際、前述の参考文献 16 のデータや図 2.1.4-4 のような関係が参考となる。

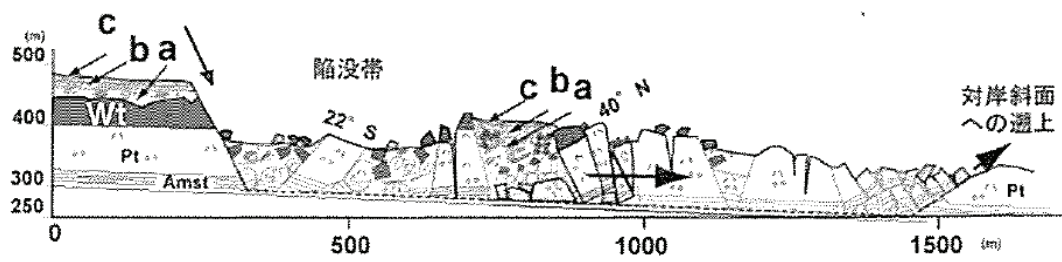


図 2.1.4-1 荒砥沢地すべりの主断面模式図¹²⁾

Amst : 砂岩・シルト岩・泥岩互層, Pt : 軽石質凝灰岩, Wt : 溶結凝灰岩, a, b, c : 土石流堆積物

表 2.1.4-1 試料の構成および内訳¹⁶⁾

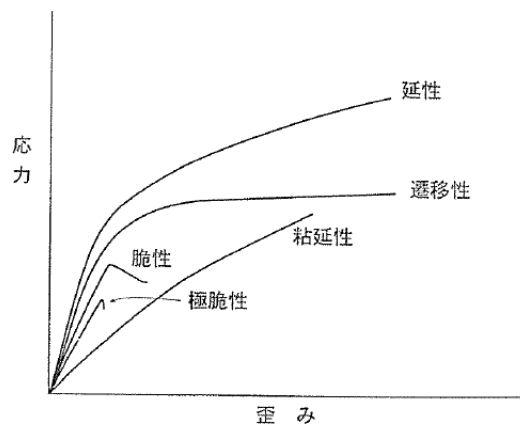


図 2.1.4-2 変形様式の分類¹⁴⁾

	地 域	地表試料	坑井試料	合 計
堆 積 岩	(1) 北海道中央	2 0	3 1	5 1
	(2) 北海道東部	4	1 8	2 2
	(3) 渡島・津軽	0	1 3	1 3
	(4) 東北	1 2	3 2	4 4
	(5) 新潟	9	7 3	8 2
	(6) 北陸	9	9	1 8
	(7) 中国・宍岐・対馬	2 2	3	2 5
火 山 岩	(8) 常磐	1 1	1 7	2 8
	(9) 関東	3 6	0	3 6
	(10) 東海	1 6	7	2 3
	(11) 中部	6	0	6
	(12) 紀伊半島	2 0	0	2 0
	(13) 四国	9	0	9
	(14) 北九州	2 2	2 3	4 5
深 成 岩	(15) 沖縄	2	5	7
	合 計	1 9 8	2 3 1 (*) (49)	4 2 9
火 山 岩		1 4	5 2 (*) (31)	6 6
深 成 岩		1 8	5 (*) (4)	2 3
総 計		2 3 0	2 8 8 (*) (61)	5 1 8

(*) 坑井数

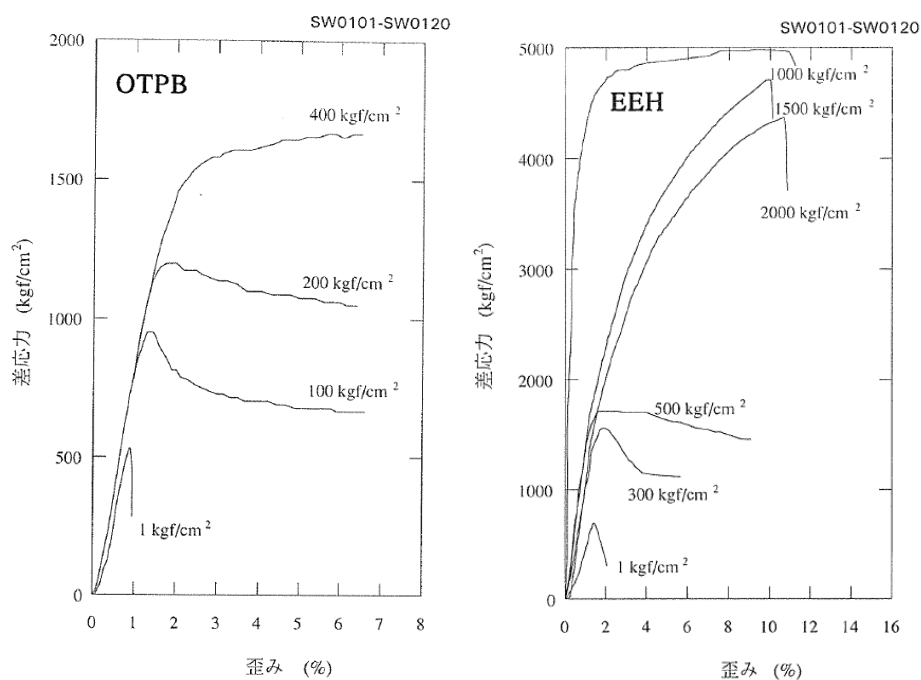


図 2. 1. 4-3 参考文献 16 に示された応力-ひずみ関係の例

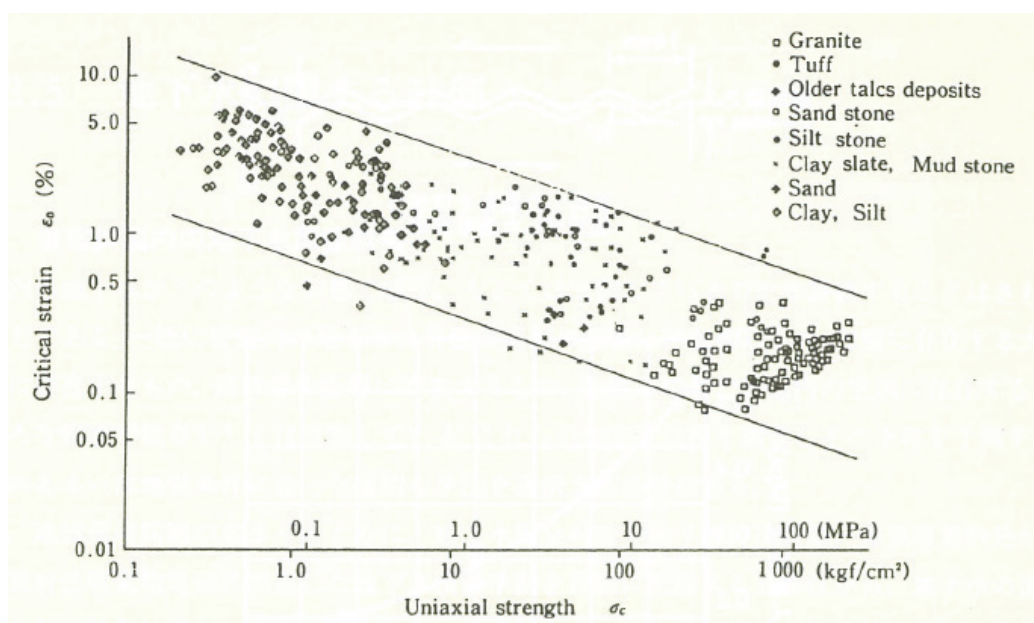


図 2. 1. 4-4 室内実験による限界ひずみと一軸圧縮強度の関係¹⁷⁾

崩落岩塊や土砂の落下経路については、図 2. 1. 4-5 や表 2. 1. 4-2 に示す内容の評価が必要であり、これらは調査費用や時間を別にすれば、いずれも調べる程度可能な量である。一方、不連続体解析において、個別の落石ではなく崩落岩塊群を評価する場合には、崩落岩塊の大きさや粒度分布などを事前に入手することは事実上不可能である。極端な場合では、図 2. 1. 4-6¹⁸⁾に示されているように、非常に大きな岩塊のまま崩壊する可能性がある。これは原子力では想定し難い低角度のすべり面で、特殊

なケースである可能性は高いが、いずれにせよ、表 2.1.4-3 のように分類された原位置の亀裂に関する調査結果や図 2.1.4-7¹⁹⁾に示す地質と崩壊機構の関係に関する既往の調査例などを参考に、崩落高さや形態を踏まえた細粒化の程度について考察するとともに、その一方で、採用する解析手法を用いて感度解析を行い、粒径の影響を安全側に設定するなどの工夫が必要となる。

崩落岩塊の挙動を再現する代表的な解析手法として、近年 DEM 解析が用いられることも多いが、参考文献 20 では、DEM 解析の特徴について表 2.1.4-4 のように整理されている。また、小早川ら²¹⁾は、崩壊土塊の到達距離に影響する落石の素因と DEM による数値解析への反映について検討し、落石の素因を DEM 解析へ反映する場合、①斜面のモデル化、②崩壊土塊のモデル化、③ブロック間、およびブロックと斜面間の物性値の 3 つのグループに関係づけることとした。文献 22 では、数値標高データ等をもとに落下する岩塊モデルと同じサイズの球を所定の間隔で空間に固定することで①の斜面のモデル化を行い、②斜面安定解析等で設定したすべり面より上部を崩壊土塊と仮定し、この領域をすべて球形岩塊モデルで置き換え、③土塊あるいはブロック間およびそれらと斜面間の相互作用を主として球形岩塊モデルの反発の仕方（反発係数）でコントロールする簡易 DEM モデルが提案されている。

上述の通り、斜面の崩落現象をモデル化する場合、事実上入手が困難なデータが多く存在し、数値解析の感度も踏まえたパラメータ設定とならざるを得ない。そのため、材料（崩落岩塊や斜面）の物性値（材料特性）を用いるよりも、DEM 解析における反発係数などのように、落石実験におけるバウンド前後の速度（もしくは初期高さとバウンド高さ）などをフィッティングしてパラメータを設定することが多い。その場合、そのパラメータは、粒子 1 個の材料特性（例えば、形状、局所破壊強度、剛性、減衰、etc.）を直接モデル化しているのではなく、それらを総合した結果（現象）として観測される量をフィッティングしているため、フィッティング対象とした実験結果と実現象の対応関係に十分注意を払う必要がある。

本検討では、第 3 章において簡易 DEM モデルや粒子法の一つである **Material Point Method** を用いて崩壊土塊の移動および衝突評価を行う方法について述べる。また、簡易 DEM モデルとは別に、落石挙動評価で用いられる質点解析を崩壊土塊の衝突評価に適用する方法について詳述する。

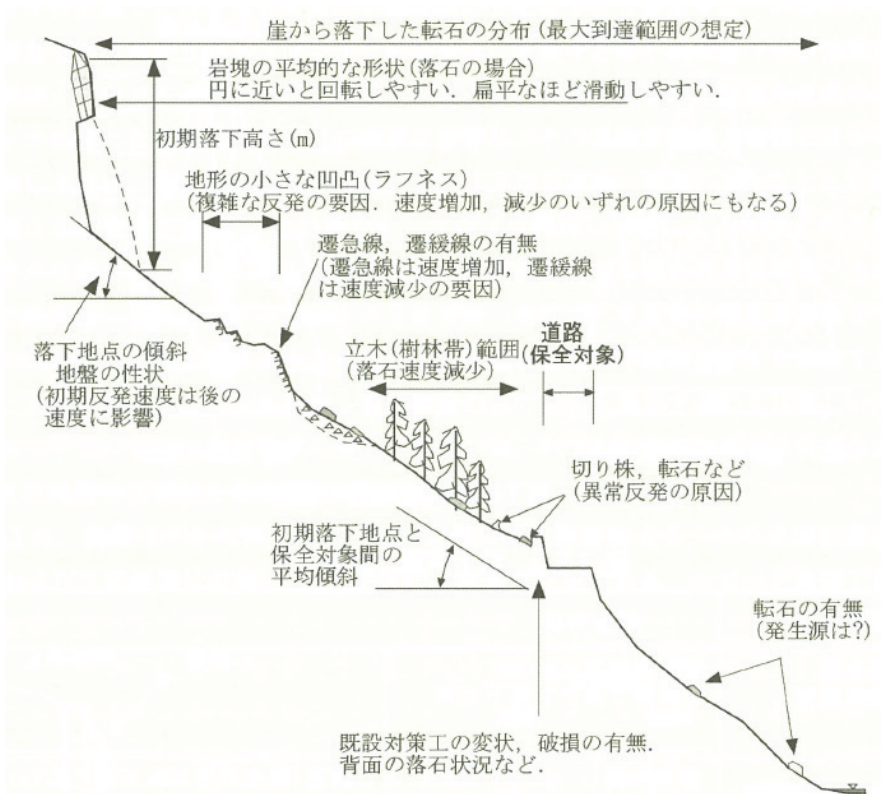


図 2.1.4-5 ハザード評価に必要な落下経路の情報¹⁰⁾

表 2.1.4-2 ハザード評価時に必要とされる入力情報の例¹⁰⁾

入力情報	項目	備考
斜面ハザード情報	- 発生源場所 - 発生源高さ - 規模、形状、重心位置 - 崩壊形態	- 地質・性状、不連続面の走向・傾斜・性状および深度方向での変化、水理情報、崩壊履歴などに基づく - 地質踏査、クライミング調査などによる
地形情報	- 微地形を含む地形情報：出尾根、凹状頭部、沢、オーバーハング - 保全対象との位置関係 - 斜面傾斜（平均）	細密な数値標高モデル DEM (Digital Elevation Model) の作成
斜面性状情報	斜面性状区分(露岩部、崖錐部、植生、など)	地質踏査、近接斜め空中写真等による
斜面定数	- 法線および接線方向速度比 - 接触バネ剛性、減衰定数 - エネルギー比、変形係数、ポアソン比、粘性係数 - ラメの定数など	- 解析手法によって必要とされる定数は異なる。 - 周辺に既往事例ある場合には事前（再現）解析が有用

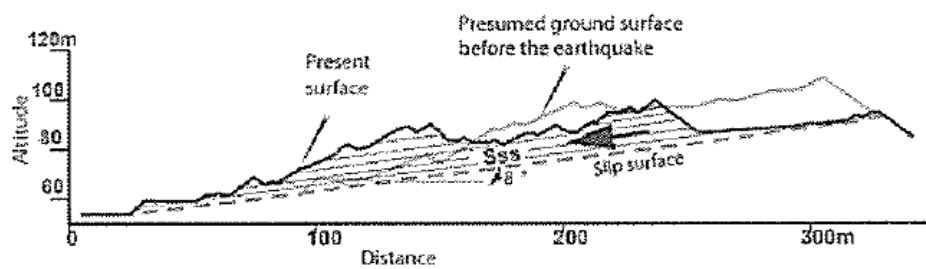


図 2.1.4-6 1914 年秋田仙北地震時の布又地区の地すべりーケスタ地形上に発生—¹⁸⁾

表 2.1.4-3 岩盤不連続面の間隔の区分

(単位：mm)

ISRM:1978 岩盤不連続面の 定量的記載方法 の指針	<20	20-60	60-200	200-600	600-2000	2000-6000	>6000
	extremely close	very close	close	moderate	wide	very wide	extremely wide

ISO 14689-1: 2003 (E) 岩の判別と分類	<20	20-60	60-200	200-600	600-2000	>2000
	extremely close	very close	close	medium	wide	very wide

JGS 3811:2004 岩盤の工学的 分類 (表示記号)	<20	20-60	60-200	200-600	600-2000	>2000
	VI	V	IV	III	II	I

		時 間			
		崩壊前			崩壊後
岩 石 地 域	タイプ1（花崗岩巨礫） タイプ2（露頭崖） 花崗岩巨礫や露頭崖の 転倒・移動に端を発した 崩落・崩壊				
	タイプ3 岩壁表面の風化殻の 剝離				
	タイプ4 マサ中の巨大な未風化 核岩の転倒破壊				
マ サ 地 域	タイプ5 多数の未風化核岩の跳 び出しに端を発したマ サの崩壊				
	タイプ6 残存節理に沿った引張 り破壊、それに続く岩 塊の傾動に端を発した マサの崩壊				

図 2.1.4-7 1995 年兵庫県南部地震時における六甲花崗岩の斜面崩壊の分類¹⁹⁾

表 2.1.4-4 DEM 解析のパラメータ²⁰⁾

対象物体あるいは機構	パラメータ	設定方法	影響を与える運動
斜面構造	節点座標 固定されるので物理定数は必要ない	測量に基づく	凹凸が跳躍に大きな影響を与える
衝突時のエネルギーロス、摩擦抵抗、変位に関するパラメータ	粘性減衰係数 (C) あるいは剛性比例型減衰係数 (β) (法線方向と接線方向で独立した設定が可能)	・ 法線方向と接線方向について入力 ・ 反発係数より求める ・ 観測された現象の再現により求める。	衝突後の速度、すなわち跳躍量
	質量比例型減衰係数 α	質点系の抵抗係数や観測された現象の再現過程で求める。	飛行中の速度 衝突中は働かない
	摩擦係数 Φ	等価摩擦係数や観測された現象の再現により求める。	斜面接線方向のすべり
衝突時の落石の貫入量、鉛直方向の圧縮力、せん断力に関するパラメータ	バネ係数 ・ 法線方向 K_n ・ 接線方向 K_s	Hertz の接触理論に基づく圧縮力と貫入量の関係から参考値の範囲を求め貫入が径の 10%や 20%のように大きくならないように設定する。	衝突時の落石の貫入量と接触時間が変化するが、エネルギー損失はバネ係数によらず式 (2.3.169) で反映させるので、左記の方法で求めた範囲であれば運動に対する影響は、ダッシュポットの係数と摩擦係数に比べて小さい。
落石形状と質量	・ 任意の多角形 ・ 複数の線分からなる円及び楕円	現場調査結果を参考とする	一辺の長さが他辺に比べ顕著に長くなると回転しにくくなる
	質量	一般的な値あるいは、測定結果を用いる	
初期条件	初期位置、速度、回転速度	現場踏査に基づく	
計算精度	時間刻み Δt	$\xi\sqrt{m/k}$ (ξ は 0.1~0.3 程度の値) m は一番小さい落石、 k はそのバネ係数	この値を超えると解が発散する。

参考文献

- 1) 社団法人日本地すべり学会：地震地すべり－地震地すべりプロジェクト特別委員会の総括編－，2012.
- 2) 山崎孝成：地形・地質からみた地震地すべり：中山間地における地震斜面災害－2004 年新潟県中越地震報告（Ⅱ）－地盤工学編－，日本地すべり学会，pp. 177-192, 2008.
- 3) 地盤工学会：事例で学ぶ地質の話（入門シリーズ 30），pp. 49-51, 2005.
- 4) 土木学会：岩盤斜面の調査と対策，2001.
- 5) 地盤工学会：盛土の挙動予測と実際（実務シリーズ 2），p. 245, 1996.
- 6) 土木学会：岩盤斜面の安定解析と計測，1994.
- 7) 日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針，p. 51, 1999.
- 8) Hoek, E., Bray, J. : Rock Slope Engineering 2nd Edition, IMM, 1977.
- 9) 奥園誠之：斜面防災 100 のポイント，鹿島出版会，pp. 8-9, 1986.
- 10) 土木学会：岩盤斜面崩壊のハザード抽出と影響評価，岩盤力学委員会，2014.
- 11) 地盤工学会：斜面の安定・変形解析入門－基礎から実例まで－（入門シリーズ 32），pp. 292-293, 2006.
- 12) 森屋洋，阿部真郎，荻田茂，檜垣大助：2008 年岩手・宮城内陸地震に伴って発生した荒砥沢ダム上流の大規模地滑り構造，日本地すべり学会誌，Vol. 47, No. 2, pp. 77-83, 2010.
- 13) 石丸真，河井正：遠心力模型実験による岩盤斜面の地震時崩壊挙動に関する検討－流れ盤斜面の平面すべり崩壊－，電力中央研究所報告 N07022, 2008.
- 14) Hoshino, K., Koide, H., Inami, K., Iwamura, S., and Mitsui, S. : Mechanical properties of Japanese Tertiary sedimentary rocks under high confining pressures, Geological Survey Japan Report 244, p. 200, 1972.
- 15) 河井正，石丸真：地震時のすべり安全率と斜面の滑落の関係に着目した岩盤斜面の耐震安定性評価フローの提案，電力中央研究所研究報告 N09030, 2010.
- 16) 星野一男，加藤碩一：本邦産岩石の深部物性データ集，産業技術総合研究所地質調査総合センター 地質調査総合センター速報 No. 23, 2001.
- 17) 桜井春輔，竹内邦文：トンネル工事における変位計測結果の評価法，土木学会論文報告集，第 337 号，pp. 137-145, 1983.
- 18) 阿部真郎，高橋明久：東北地方・グリーンタフ地域における地震発生時の地すべり挙動－主として秋田県，陸羽地震・仙北地震での検証－，応用地質，Vol. 38, No. 5, pp. 265-279, 1997.
- 19) 横山俊治，菊山浩基：1995 年兵庫県南部地震時に発生した六甲花崗岩地域の斜面崩壊の運動様式と機構，地すべり，Vol. 34, No. 3, pp. 17-24, 1997.
- 20) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料－落石シミュレーション手法の調査研究資料－，2002.
- 21) 小早川博亮，中島正人，大鳥靖樹，伊藤洋，中村英孝：地震時の斜面崩壊に係わる不確定要因の分析，第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，No. 59, pp. 323-327, 2010.
- 22) 中瀬 仁・曹 国強・田部井 和人・栃木 均・松島 亘志：個別要素法による原子力発電所周辺の地震起因性斜面崩落挙動のモデル化と適用性；土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 71, No. 4(地震工学論文集第 34 巻), I_476-I_492, 2015.

2. 2 斜面崩壊が原子力施設に及ぼす影響評価

2. 2. 1 地震動の作用に対する影響評価

2. 2. 1. 1 限界状態に応じたフラジリティ曲線の評価の基本方針

1) 限界状態の定義

原子力発電所の重要な安全機能を有する施設や設備は、地震動の作用による影響を受ける可能性も有していると考えられる。地震動の作用による影響との重畳を考慮することは重要であるが、ここでは地震動の作用による斜面崩壊、つまり2次的な地盤ハザードに対するそれら施設や設備の機能限界に関する評価を行う手法の構築を目的としていることから、重畳の影響は考慮しない。よって、それら施設や設備に周辺斜面が重大な影響を及ぼさないためには、周辺斜面が不安定化せず、崩壊した土塊や岩塊が安全上重要な施設や機器に影響を及ぼさないことや、取水ピットなどの屋外重要土木構造物を閉塞して取水機能を阻害しないことが必要である。さらに、貯水池のような土構造物では、それ自体の不安定化が生じないことが必要である。

周辺斜面の不安定化に起因した原子力発電所の重要な安全機能を有する施設や設備への影響評価するための限界状態として、次の2つの状態が考えられる。

①周辺斜面の不安定化、つまり崩壊が生じる状態を施設や設備の安全性に係わる損傷の限界と見なす状態

②周辺斜面が崩壊し、施設や設備に原子炉の安全性に係わる損傷が生じる状態

ここで、①に示した限界状態は周辺斜面自体の崩壊の可能性を間接的に施設や機器の安全性に係わる損傷の限界と見なしている。これまで、すべり安全率(すべり面の抵抗力/作用せん断力)を評価指標として評価されてきた¹⁾。近年、振動試験に基づく斜面の崩壊機構の分析結果に基づき、周辺斜面の崩壊の可能性をせん断ひずみ指標により評価することが可能となっている。

②の限界状態は、例えば、建屋、開閉所や復水タンクに到達した崩壊土塊の衝撃作用により、それらの施設が炉心などに影響を及ぼす損傷が生じる状態、また取水ピットに到達した崩壊土がピットを閉塞し、必要な冷却水量を確保できなくなる状態のことを示している。その状態は、崩壊土塊の到達限界の評価と到達した崩壊土塊が構造物に及ぼす影響の評価のいずれかで判断することが可能である。後者の評価を行う場合、さらに取水ピットや搬入路のようにある程度以上の崩壊土塊量の到達による埋設や堆積を評価する場合と、崩壊土塊の衝撃力による施設の損傷として施設側の機能限界を直接的に評価する場合がある。

以上のことを踏まえ、周辺斜面の不安定化に起因した原子力発電所の重要な安全機能を有する施設や設備への影響評価を行うための限界状態として以下の3つの状態を対象として、対象施設の事故シナリオに応じて適切に限界状態を設定する。また、iiの限界状態はそれが直接的な影響を及ぼす取水ピットやアクセス道路を主対象とする。また、その評価の過程で得られる崩壊土塊の到達に関する超過確率と到達時の速度との関係(到達ハザード)により、他施設の機能限界として評価する場合もある。

- i. 斜面の不安定化が生じる安定限界
- ii. 土塊・岩塊の施設への到達限界
- iii. 土塊・岩塊の衝突による施設の損傷限界

ここで、安定限界は斜面が崩壊しない場合には施設や設備の機能喪失も生じないとして、斜面崩壊が生じる状態を間接的に対象施設や設備の機能喪失限界とみなすための限界状態である。その状態は、斜面内に生じた引張り亀裂やせん断亀裂が連続してすべり面を形成し、その面上の土塊・岩塊が移動を開始する状態と定義する。その状態は、前述の JEAG の指針に示されているように設定した滑り面上の作用せん断力で抵抗力を除いたすべり安全率が所要の限界値を下回る状態として、従来評価されてきた。その手法は、一瞬でもすべり安全率が所要の限界値を下回ると、その状態を崩壊と見なすことになり、すべり面上の土砂、土塊・岩塊が移動を開始する状態を直接評価していないため、安定限界に達していることの十分条件ではない。さらに、最近、実験などより、その手法により同定されたすべり面と実際に崩壊の生じた面が一致しないことなども指摘されている。すべり面上の土塊・岩塊が移動するという観点で、せん断ひずみ指標を用いた評価手法が平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費事業にて検討された。

次に、到達限界は崩壊土塊が対象施設、また設備に到達し、影響を及ぼす状態と定義する。その限界状態は崩壊土塊が対象施設、また設備に到達し、通過する状態、つまり機能喪失に至る間接的な影響として評価することができる。また、施設や設備のうち取水ピットや搬入路などについては、施設への直接的な影響評価と同等な位置づけとして、その位置を超えて到達する崩壊土塊の状態、すなわち到達土量などが所要の限界値を超える状態を評価することができる。取水ピットについてはそれを閉塞する土量、搬入路については走行不能となる状態、また閉塞状態からの機能回復に至る所要排土時間等、構造物や施設に必要とされる機能によって決まる土量が評価の対象となる。

最後に、損傷限界は崩壊土塊が対象施設、また設備に衝突し、影響を及ぼす状態と定義する。その限界状態は崩壊土塊の衝撃作用に対する対象施設や設備の応答と耐力等の限界値との関係により評価することができる。その際、崩壊土塊の挙動として重要な評価項目は、対象物への衝突速度や運動量などが考えられる。

参考文献

1) 社団法人日本電気協会電気技術基準調査委員会：電気技術指針 原子力編 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987

2) 不確実さに対する配慮

斜面崩壊の影響に関する評価は、地盤は空間的に不均質な材料特性を有するとともに、地盤の地震時挙動を解析する手法の精度、複雑な 3 次元構造のモデル化に関する精度、さらに地震作用など様々な不確実さのもとで行うことになる。まず、限界状態に応じた評価指標に影響を及ぼす不確実さの要因を抽出する。ここで、不確実さには、データまた現象が持つ固有のランダム性による不確実さ（偶然的な不確実さ）と解析手法またはモデル化における知識及び認識不足に係わる不確実さ（認識論的な不確実さ）があり、抽出された不確実さは可能な

範囲で分離して整理することが望ましい。抽出された不確実さ要因より、フラジリティ曲線などの評価に用いる特性値を適切に設定しなければならない。

なお、地盤関係の研究は、今後も進展していくことが予想されるため、学問の進展に応じて、新しい調査法や試験法、及び解析手法等の適用を妨げないこととする。

3) 地震作用

地震に起因した原子力発電所の安全上重要な施設や設備のフラジリティ曲線の評価に際して、現実的な応答評価に用いる地震動の作用に係る評価にはフラジリティ評価用の地震動を用いる。

フラジリティ評価用地震動の詳細については、「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2015」などを参照する。フラジリティ評価用地震動は基準地震動と同様に解放基盤表面にて規定される。斜面を含む地盤の地震応答解析では、地盤伝播の3次元特性や非線形性等を考慮した適切な解析手法を用いる。解析に当たっては、地震応答解析に影響を与える不確実さ要因を考慮する。

4) 各限界状態におけるフラジリティ曲線の評価

前項で示した地震時における原子力発電施設の周辺斜面の崩壊が及ぼす影響に関する3つの限界状態に対するフラジリティ曲線は、対象施設や設備の要求性能に応じた損傷モードを踏まえ、施設や設備毎に適切に設定することが必要である。その際、安定限界を超える限界状態に対して評価を行うことが必要な施設や設備については、斜面の崩壊形態として滑落型崩壊、また滑動型崩壊のいずれかを適切に評価することが必要である。ここで、滑落型崩壊が生じる斜面に対する影響評価は対象斜面の動的な応答から崩壊、滑落挙動まで一貫した解析に基づいて実施することが好ましい。しかし、個別要素法や粒子法（MPM、MPS法、SPH法、など）などそれら挙動をシームレスに評価できる手法はあるものの、まだ課題も多いことから現状の評価体系を拡張し、斜面崩壊後の挙動についてはそれら手法を活用し、限界状態ごとに評価することとする。

まず、安定限界を超える斜面の状態である崩壊が生じる状態に対するフラジリティ曲線の評価方法の基本的な考え方について示す(図2.2.1.1-1参照)。その方法として、前述の「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2015」に示された斜面モデルの地震応答解析による斜面の応答解析結果に基づき、力の釣り合いによる斜面の安定解析より得られる想定すべり面に対するすべり安全率を指標とした考え方に基づいて評価してもよい。ここで、斜面モデルの地震応答解析には、前述のJEAGに示された動的2次元有限要素法を用いる。その際、斜面の崩壊が生じる確率は、2点推定法の様な簡易法、またモンテカルロシミュレーションにより評価してもよい。また、平成27年度原子力施設等防災対策等委託費（斜面の安定性に係る設計・リスク評価手法の整備）事業で示されたせん断ひずみ指標による方法により評価してもよい。

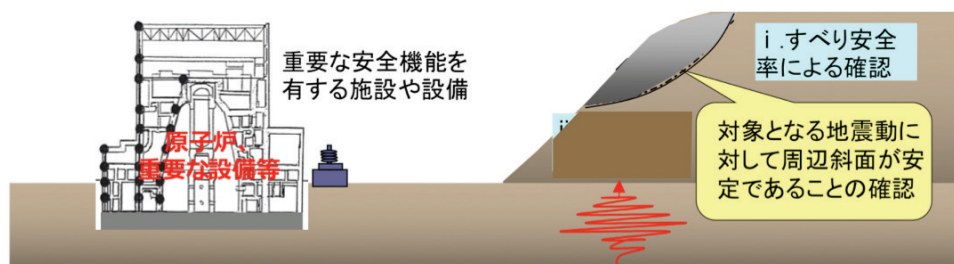


図 2.2.1.1-1 安定限界の評価イメージ

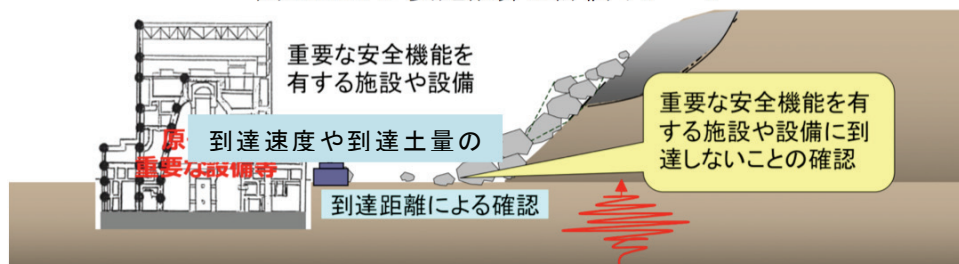


図 2.2.1.1-2 到達限界の評価イメージ

次に、斜面崩壊後の崩壊土塊の到達限界に対する fragility 曲線の評価手法の基本的な考え方について示す(図2.2.1.1-2参照)。ここで、安定限界の評価に際して、すべり安全率を評価指標とした場合には崩壊形態が困難であることから、地層構成や既往の実験などにより経験的に評価が可能な場合を除き、崩壊形態として滑落型崩壊と仮定する。また、崩壊形態として、滑動型崩壊であっても、崩壊後の再安定化が明確に評価できない場合には、滑動型崩壊後に滑落型崩壊の崩壊形態が変化する可能性もあることから、滑落型崩壊として評価を行うことにする。崩壊領域の評価として、せん断ひずみ指標による安定限界の評価を行う場合には、粒子法などの崩壊挙動の評価が可能な手法を用いることから、解析結果を踏まえて崩壊領域の評価を行ってもよい。さらに、非線形地震応答解析を補足的に実施し、得られる応力状態やひずみの空間分布などを踏まえて崩壊領域の評価を行ってもよい。

滑落型崩壊の崩壊挙動の評価に際して、崩壊領域内の地盤材料の特性を踏まえ、土塊が卓越する場合にはそれらの滑落挙動およびそれとともに運ばれる岩塊の影響を評価する。また、岩塊が卓越する場合には、岩塊の滑落や個別岩塊の転動の影響を評価する。いずれも、崩壊領域内の土塊および岩塊群、岩塊が自重によりすべて滑落するという条件のもとで、条件に応じた解析手法も用いた評価を行う。土塊や岩塊群の滑落挙動については個別要素法や粒子法(MPM)、岩塊の転動挙動については個別要素法や質点解析を用いて評価してもよい。

ここで、崩壊土塊が到達限界を超える確率は、崩壊条件付きの特性として求める。例えば、土塊や岩塊群の到達確率、到達速度、堆積土量や到達土量、岩塊の到達速度と到達速度の超過確率の関係などである。そこで、崩壊領域に応じた崩壊確率と地震動強さとの関係を考慮し、到達確率に関する fragility 曲線、また堆積土量や到達土と地震動強さの評価を行う。ここで得られた崩壊条件付きの特性のうち到達速度と到達速度の超過確率の関係は対象施設への衝撃作用を評価する上で重要な衝突ハザードとして考慮する。

最後に、対象施設や設備の損傷限界に関する fragility 曲線の評価手法の基本的な考え方について示す(図2.2.1.1-3参照)。到達限界の評価と同様に崩壊形態として滑落型崩壊を仮定する場合には、崩壊領域上の土塊や岩塊が自重によりすべて滑落するという条件のもとと同

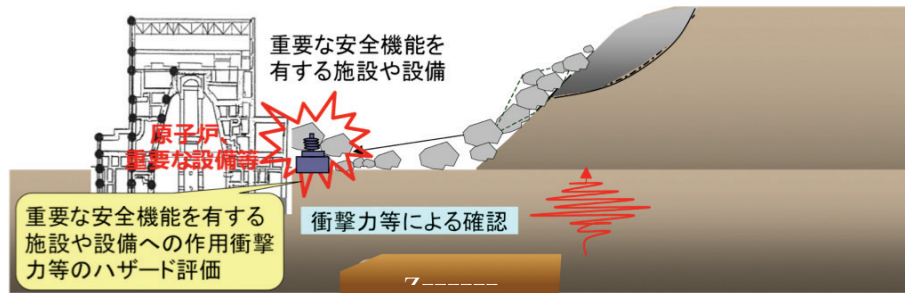


図 2.2.1.1-3 損傷限界の評価イメージ

様に想定した領域が崩壊するとの条件のもとで個別要素法や質点解析により得られた衝突ハザードを用いて、崩壊土塊の衝撃作用に対する対象施設や設備の条件付き損傷確率の評価を行う。ここで衝突ハザードは、崩壊条件付きの特性であるため、崩壊領域に応じた崩壊確率と地震動強さとの関係を考慮し、損傷確率に関する fragility 曲線の評価する。

5) 限界状態に応じた崩壊領域の考え方

ここでは、3 つの限界状態である安定限界、崩壊土塊の到達限界、構造物の損傷限界の 3 種類を対象として考慮すべき崩壊領域の考え方を示す。

まず、安定限界の崩壊領域は、崩壊が始まると考えられる最小の地震動強さで不安定になる領域を対象とする。例えば、前述の「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2015」に示された斜面モデルの地震応答解析である動的等価線形化有限要素解析を用いる場合は、まず、地震動強さ（地震動の振幅）を変えた解析を多数行い、それぞれの解析に対して力の釣り合いによる安定解析を実施する。地震動強さごとに得られたすべり安全率が 1.0 を下回るすべり面のうち、最小の地震動強さに対するすべり面上の領域を崩壊領域とする。この時の地震動の大きさを限界地震動強度と呼ぶ。安定限界を超える状態に対する崩壊確率の fragility 曲線は、この崩壊領域を固定し、異なる地震動強さに対する崩壊確率として評価する。

次に、斜面崩壊後の到達限界を評価するための崩壊領域は、地震動の作用に起因して崩壊する全領域とする。限界地震動強度に対しては安定限界と同じ崩壊領域を用いる。ここで、地震作用に対するすべり面の形状は、地震動強さの増大とともにすべり安全率が最小となるすべり面はより広い領域となるという傾向を有している。このことから、限界地震動強度を超える地震動強さに対しては、地震動強さに応じて得られたすべり安全率が 1.0 を下回るすべり面の形状を踏まえ、限界地震動強度に対するすべり面の広がり適切に考慮して、崩壊領域を設定する。

最後に、損傷限界に対する fragility 曲線の評価は、到達限界の fragility 曲線の評価過程で得られる衝突ハザードを用いることから、その評価に用いる斜面の崩壊領域の考え方は到達限界と同様である。

2. 2. 1. 2 検討手順の検討フローとその概要

ここでは、前章で示した基本方針に基づき地震に起因した斜面崩壊が原子力発電施設に及ぼす影響を評価するための検討手順の概要を検討フローとともに示す。その手順は、以下の4項目の流れに従って示す。

- ①影響評価に必要な基本条件の設定
- ②安定限界に対するフラジリティ曲線の評価と崩壊確率の評価
- ③到達限界に対するフラジリティ曲線の評価と到達確率の評価
- ④損傷限界に対するフラジリティ曲線の評価と損傷確率の評価

1) 影響評価に必要な基本条件の設定

地震に起因した斜面崩壊が原子力発電施設に及ぼす影響の評価を行うためには、その評価の前提となる基本条件を図 2. 2. 1. 2-1 のフローに示した流れに従って適切に設定することが必要となる。

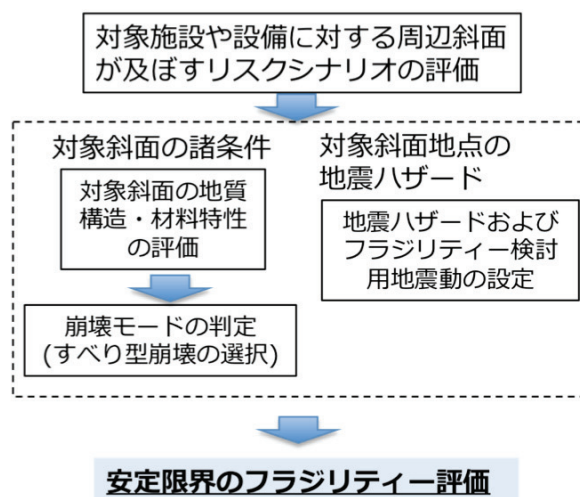


図 2. 2. 1. 2-1 基本条件の設定フロー

以下にフローに従った検討手順の概要を示す。

・ 対象となる重要施設・設備のリスクシナリオの評価

図-5 に示したように安全性の評価が必要な重要施設・設備の周辺斜面に地震動に起因した崩壊が及ぼす影響という2次的な地盤ハザードに対して、その施設・設備に必要とされる性能に応じた損傷モードを同定し、損傷による機能喪失に至るシナリオの評価を行う。

・ 対象の斜面の地質構造・材料特性の評価

地震時に原子力発電所の安全上重要な施設や設備に及ぼす周辺斜面の影響の評価に当たっては、地震応答解析に用いる地盤モデルの作成が必要である。その際、地盤構造や物性値の情報として、斜面を形成する地形・地質、及び施設の基礎下の地質構造の広がりを考慮した3次元構造とその材料特性などが必要である。

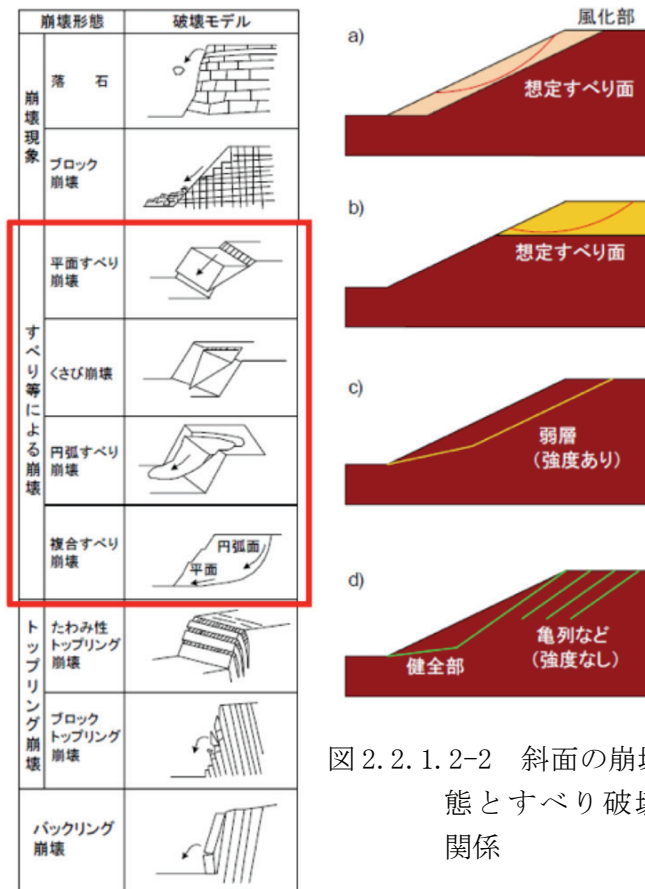


図 2. 2. 1. 2-2 斜面の崩壊形態とすべり破壊の関係

さらに、地殻変動に起因した敷地内の地盤変状や敷地内に存在する不連続面に沿った地盤変状を評価するために実施する解析には、敷地を中心としてその周辺地盤の 3 次元構造や材料特性が必要となる。

これらのことから、敷地内に限らず評価に必要な範囲で広域地盤の 3 次元構造や材料物性の調査を行い、情報を収集する必要がある。

・ 崩壊モードの判定

自然斜面の崩壊形態は、図 2. 2. 1. 2-2 に示すように、落石等による崩壊、すべり破壊等による崩壊、トップリングによる崩壊、バックリングによる崩壊に分類できる。すべり破壊以外の崩壊モードは岩石の剥離による転動が生じることになる。一般に、そのような崩壊モードの可能性を有する原子力施設に近接する自然斜面は、切土などの安定化対策が実施される。

このような既設の原子力発電所の斜面の状況から、ここでは、主としてすべり破壊を対象とした設計の考え方についてまとめている。ここで、周辺斜面のうち図 2. 2. 1. 2-2a) ～ d) に示すような地盤構造の斜面では、すべり破壊の崩壊モードが卓越すると考えられる。

図 2. 2. 1. 2-2a) に示したのは、元来は硬質岩盤であったが、表層が風化し強度が低下した岩盤で崩壊が生じるパターンである。図 2. 2. 1. 2-2b) は、水平に近い弱層内ですべり崩壊が生じるパターンで、すべり安全率が低い場合でも変形量は小さいことが想定される。図

2.2.1.2-2c)は、斜面内に存在するある程度の強度を有するシーム等の弱層で崩壊が生じるパターンで、強振動下では大きな崩壊が誘引される可能性もある斜面である。図2.2.1.2-2d)は、強度が期待できない破碎帯や亀裂を有する斜面で崩壊が生じるパターンである。

対象の周辺斜面の崩壊モードとして、すべり破壊の判定が、詳細な調査により得られた地盤構造に基づいて行われていることを確認する。

- ・ **対象斜面地点の地震ハザード**

fragility評価用地震動は、 fragility評価における必要性に応じて水平地震動及び上下地震動を作成する。その評価手法として、①一様ハザードスペクトル (UHS) を用いる手法、②地震動ハザードの再分解によるマグニチュード・距離を用いる手法、③断層モデルを用いる手法を用いることができる。

2) 安定限界に対するフラジリティ曲線の評価と崩壊確率の評価

安定限界に対するフラジリティ曲線の評価と崩壊確率の検討手順の概要を図2. 2. 1. 2-3に示す検討フローに基づいて示す。

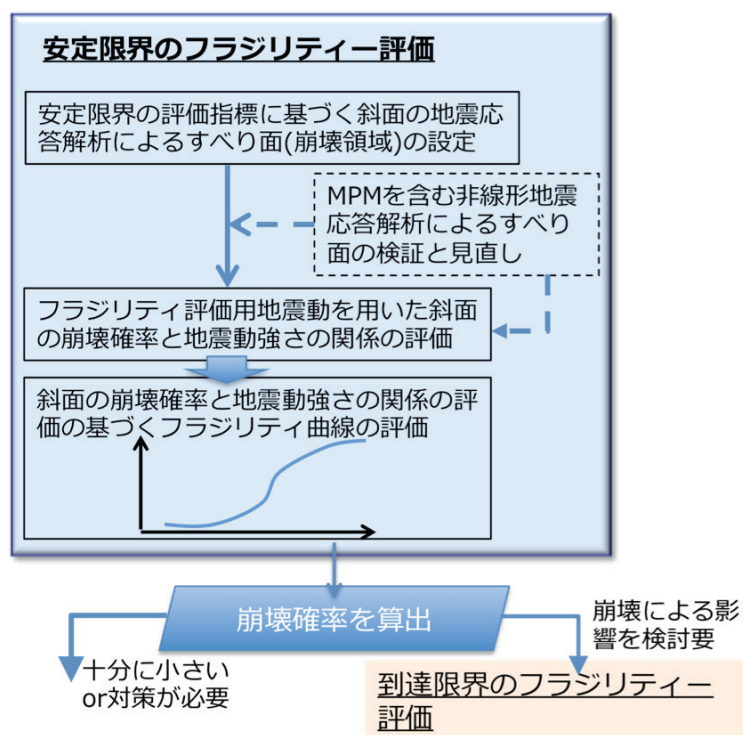


図 2. 2. 1. 2-3 安定限界のフラジリティ曲線の評価フロー

以下にフローに従った検討手順の概要を示す。

・ 安定限界の評価指標に基づく斜面の地震応答解析によるすべり面(崩壊領域)の評価

前述の「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2015」に示された斜面モデルの地震応答解析による斜面の応答解析結果に基づき、力の釣り合いによる斜面の安定解析より得られる想定すべり面に対するすべり安全率を指標とした考え方に基づいて評価してもよい。ここで、斜面モデルの地震応答解析には、前述の JEAG に示された動的 2 次元有限要素法を用いる。安定限界の評価に用いるすべり面（崩壊領域）を評価するため、まず地震動強さを変えた解析を多数行い、それぞれの解析に対して力の釣り合いによる安定解析を実施する。次に、地震動強さごとに得られたすべり安全率が 1.0 を下回るすべり面のうち、最小の地震動強さに対するすべり面を安定限界のフラジリティ評価に用いる。

・ MPM を含む非線形地震応答解析によるすべり面の検証と見直し

前述の JEAG に示された動的 2 次元有限要素法は地盤材料の非線形性として等価線形解析を用いているため、すべり面位置、さらに崩壊形態に関する検証を実施する。平成 27 年度原

子力施設等防災対策等委託費（斜面の安定性に係る設計・リスク評価手法の整備）事業で示された動的な非線形地震応答解析により応力規準によるすべり面や崩壊形態の検証を実施する。または、崩壊に至る挙動を評価可能な粒子法(MPM)により、得られるせん断ひずみ発達領域との比較に基づくすべり面の検証、さらに崩壊の発生の有無による崩壊形態の検証を行ってもよい。さらに、粒子法により、せん断ひずみ指標による方法により地震動強さと崩壊確率の関係を評価してもよい。

- ・ **フラジリティ評価用地震動を用いた斜面の崩壊確率と地震動強さの関係の評価**

検証されたすべり面に対して、JEAGに示された動的2次元有限要素法を用いて、フラジリティ評価用地震動に対する地震応答解析を実施する。崩壊確率は、その評価法に応じ、地盤材料の不確実さを考慮した解析数を実施して、求める。崩壊確率の評価手法として、2点推定法の様な簡易法、またモンテカルロシミュレーションにより評価してもよい。

- ・ **斜面に崩壊確率と地震動強さの関係の評価に基づくフラジリティ曲線の評価**

限界状態の性能関数が対数正規分布などの確率分布で表されることを仮定し、先に得られた離散的な崩壊確率と地震動強さの関係を満たす近似曲線を求め、その不確実さに配慮したフラジリティ曲線を求める。

- ・ **崩壊確率の算出**

先に求めた斜面の安定限界に対するフラジリティ曲線と、対象地点の地震ハザード曲線より、崩壊確率を求める。その値が十分に小さい場合には、崩壊条件付きの到達確率や施設・設備の損傷確率はそれ以下となることから、到達限界、損傷限界の評価を実施しなくてもよい。また、その値が著しく大きい場合には、安定化のための対策を講じることが必要である。その値が崩壊による影響を考慮した方がよいような値であるか、対象施設や設備の重要度が高い場合には到達限界の影響の評価を行う。

3) 到達限界に対するフラジリティ曲線と到達確率の評価

到達限界に対するフラジリティ曲線と到達確率などの検討手順を図2.2.1.2-4に示した検討フローに従い、以下に示す。

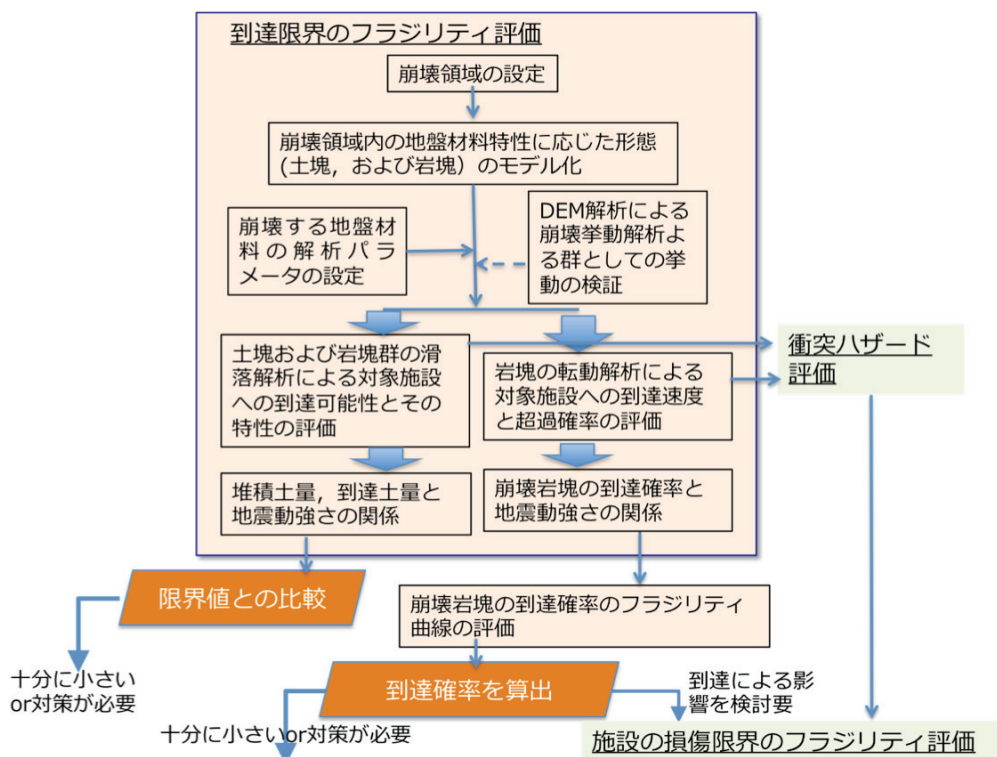


図 2.2.1.2-4 到達限界のフラジリティ曲線の評価フロー

以下にフローに従った検討手順の概要を示す。

・ 崩壊領域の設定

2章5項で示したように斜面崩壊後の到達限界を評価するための崩壊領域は、地震動の作用に起因して崩壊する全領域とする。限界地震動強度に対しては安定限界と同じに崩壊領域を用いる。限界地震動強度を超える地震動強度に対しては、地震動強度に応じて得られたすべり安全率が1.0を下回るすべり面の形状を踏まえ、限界地震動強度に対するすべり面の広がり適切に考慮して、崩壊領域を設定する。

・ 崩壊領域内の地盤材料特性に応じた形態（土塊、岩塊）のモデル化

崩壊領域内の地盤材料の特性に応じて、その特性を土塊、岩塊のいずれかに区分する。岩塊については、個別また群としての転動解析に必要な岩塊径と径に応じた岩塊総数などを適切に設定する。また、材質が岩塊であっても、群として滑落する場合には土砂として取り扱う。

- ・ **崩壊する地盤材料の解析パラメータの設定**

土塊については滑落挙動，岩塊については転動挙動の解析を実施する．滑落挙動の解析には簡易DEM解析，粒子法(MPM)を用いる．転動解析には，質点解析，簡易DEM解析を用いる．それら解析に用いるパラメータは，斜面との摩擦や材料の特性など解析手法に応じた特性を原位置の実験データや関連資料に基づいて適切に設定する．

- ・ **DEM解析による崩壊挙動解析による群としての挙動の検証**

崩壊領域内の材料特性が岩塊の場合には，領域内の全ての岩塊が斜面を転がり落ちてきた後，一部の岩塊は法尻に堆積すると考えられる．崩壊領域内の岩塊のうち，敷地内に転動が生じる岩塊の割合を把握するため，対象施設や設備周辺の斜面の形状など地点固有の条件に基づき崩壊領域内の岩塊群に対する転動解析を実施する．

- ・ **土塊の滑落解析による対象施設への到達可能性とその特性の評価**

崩壊領域内の材料特性が土塊の場合には，その領域内の土塊全体が崩壊するとした滑落解析を解析パラメータの不確実さを考慮して実施し，対象施設や設備に到達する可能性，到達時の速度と土塊群の高さなどの影響評価に必要な特性の評価を行う．

- ・ **到達土量，堆積土量と地震動強さの関係**

取水ピットなどの施設へその周辺斜面の崩壊土が到達し，その位置を超えて滑動が生じた土量が取水ピット内の閉塞に関連する指標とし，その土量を到達土量として崩壊領域に応じた地震動強さと関係づける．搬入路についても，その周辺斜面の崩壊土が搬入路に到達し，搬入路上に堆積する土量を堆積土量として崩壊領域に応じた地震動強さと関係づける．

- ・ **限界値との比較**

得られた到達土量，堆積土量とその限界値，例えば取水ピットや搬入路の機能喪失が生じる土量と比較し，対策の要否について検討を実施する．

- ・ **岩塊の転動解析による対象施設への到達速度と超過確率の評価**

崩壊領域内の材料特性が岩塊の場合には，その領域内の岩塊が個々に崩壊するとした転動解析を解析パラメータの不確実さを考慮して実施し，対象施設や設備に到達する速度とその超過確率を評価する．

- ・ **衝突ハザード評価**

対象施設や設備に到達する土塊の速度とその高さなどと崩壊領域に応じた地震動強さとの関係をそれら施設や設備の衝撃解析に用いる衝突ハザードとする．また，対象施設や設備に到達する岩塊の速度に対する超過確率と崩壊領域に応じた地震動強さとの関係もそれら施設や設備の衝撃解析に用いる衝突ハザードとする．

- ・ **崩壊岩塊の到達確率のフラジリティの評価**

対象施設や設備に到達する速度に応じた超過確率は，所定の速度に対する崩壊条件付き到

達確率と見なすことができる。先に得られた斜面の崩壊確率と地震動強さの関係を下に、地震動強さに応じた崩壊確率と崩壊条件付きの到達確率より、崩壊生起も含む到達確率を求め、それと地震動強さの関係より、不確実さを考慮したフラジリティ曲線を求める。

- ・ **到達確率の算出**

先に求めた斜面崩壊が影響を及ぼす施設や設備の到達限界に対するフラジリティ曲線と、対象地点の地震ハザード曲線より、到達確率を求める。その値が十分に小さい場合には、崩壊条件付きの施設・設備の損傷確率はそれ以下となることから、損傷限界の評価を実施しなくてもよい。また、その値が著しく大きい場合には、安定化のための対策を講じることが必要である。その値が崩壊による影響を考慮した方がよいような値であるか、対象施設や設備の重要度が高い場合には損傷限界の影響の評価を行う。

4) 衝突による損傷限界に対するフラジリティ曲線と損傷確率の評価

土塊、岩塊の衝突に対する施設や設備の損傷限界に対するフラジリティ曲線の検討手順を図 2.2.1.2-5 に示した検討フローに従い、以下に示す。

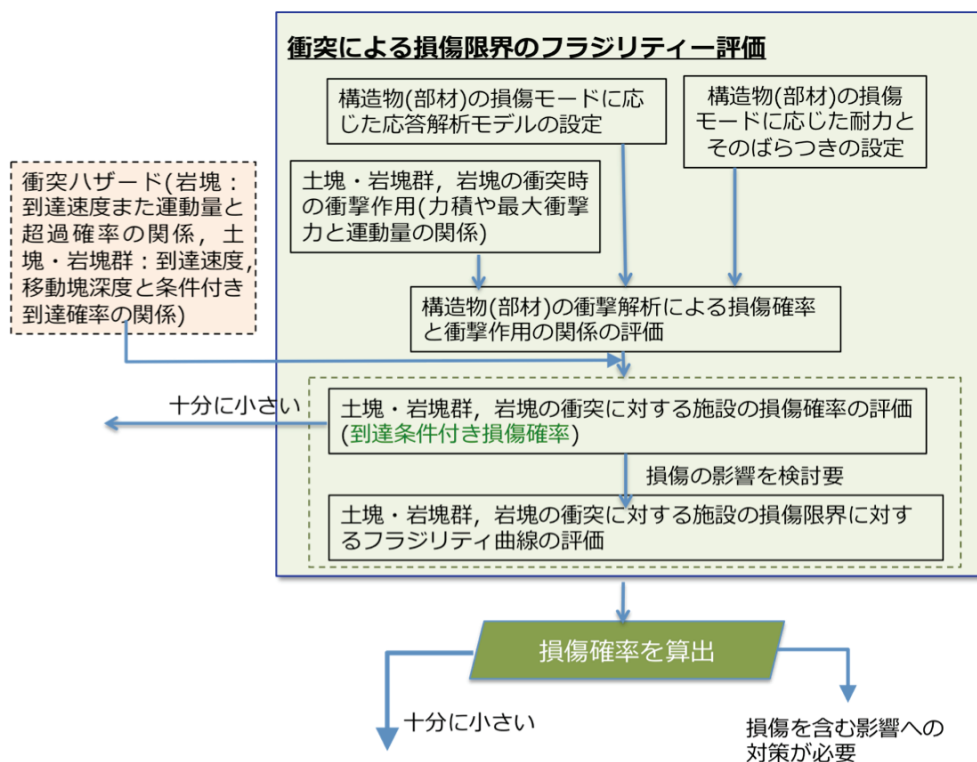


図 2.2.1.2-5 損傷限界のフラジリティ曲線の評価フロー

以下にフローに従った検討手順の概要を示す。

- ・ 構造物(部材)の損傷モードに応じた応答解析モデルの設定

まず、崩壊土塊の衝突により影響を受ける対象施設や設備の構造物、またその部材の構造性能の応じた損傷モードを判定する。その際、構造物の形状や材料特性、およびその不確実さは、設計図書など既往の資料に基づき設定する。判定に必要なデータは、必要に応じて別途調査をおこなってもよい。それらに基づき、衝撃解析に必要な応答解析モデルの設定を行う。

- ・ 構造物(部材)の損傷モードに応じた耐力とそのばらつきの設定

衝突の影響を受ける構造物、またその部材の損傷モードに応じた耐力とその不確実さは、既往の資料、また必要に応じて実施した調査データに基づき設定を行う。

- ・ 崩壊土塊の衝突時の衝撃作用(力積や最大衝撃力と運動量の関係)

崩壊土塊の滑動による衝撃作用は既往の評価式を用いてもよい。また、実験などにより導

出され評価式を用いる場合には、その評価式の妥当性を検証した上で用いてもよい。

また、岩塊の転動による衝撃作用は既往の評価式を用いてもよい。また、実験などにより導出され評価式を用いる場合には、その評価式の妥当性を検証した上で用いてもよい。

- ・ **構造物(部材)の衝撃解析による損傷確率と衝撃作用の関係の評価**

崩壊土塊の衝撃作用に対する対象施設や設備の衝撃解析を損傷モードに応じた応答解析モデルと耐力を用いて実施し、衝撃作用の大きさと損傷確率の関係を求める。

- ・ **崩壊土塊の衝突に対する施設の損傷確率の評価**

到達確率のフラジリティ曲線の算出過程で求めた崩壊土塊の衝突ハザードと衝撃作用の大きさと損傷確率の関係より崩壊条件付き損傷確率を衝突ハザードが評価された地震動強さ毎に求める。得られた損傷確率がいずれも十分に小さい場合には、斜面崩壊に対する対象施設や設備の安全機能に及ぼす影響の評価を実施しなくてもよい。また、得られた損傷確率に大きな値が含まれている場合には、対象施設や設備の損傷確率を求めるため損傷限界に対するフラジリティ曲線の評価を実施する。

- ・ **崩壊土塊の衝突に対する施設の損傷限界に対するフラジリティ曲線の評価**

安定限界のフラジリティ曲線の評価に用いた斜面の崩壊確率と地震動強さの関係をもとに、地震動強さに応じた崩壊確率と崩壊条件付きの損傷確率より、崩壊生起も含む損傷確率を求め、それと地震動強さの関係より、不確実さを考慮したフラジリティ曲線を求める。

- ・ **損傷確率の算出**

先に求めた斜面崩壊が影響を及ぼす施設や設備の損傷限界に対するフラジリティ曲線と、対象地点の地震ハザード曲線より、損傷確率を求める。その値が十分に小さい場合には、斜面崩壊に対する対象施設や設備の安全機能に及ぼす影響の評価を実施しなくてもよい。また、その値が大きい場合には、安定化のための対策を講じることが必要である。

2. 2. 2 降雨の作用に対する影響評価

2. 2. 2. 1 限界状態に応じたフラジリティ曲線の評価の基本方針

1) 限界状態の定義

2.2.1 にて地震動の作用に対する原子力発電所の重要な安全機能を有する施設や設備へ周辺斜面の及ぼす影響として、確率論的リスク評価に必要なフラジリティ曲線の評価の基本方針や検討手順の概要を示した。ここでは、地震と同じ外的事象である降雨の作用による斜面崩壊、つまり2次的な地盤ハザードに対するそれら施設や設備の機能限界に関する評価を行う手法について、降雨作用に対する検討手順を踏まえて示す。地震作用による影響との重畳の影響は考慮しない。

周辺斜面の不安定化に起因した原子力発電所の重要な安全機能を有する施設や設備への影響評価を行うための限界状態は、誘因が地震作用と異なる点を除くと崩壊後の挙動が同じであるため、2.2.1 と同じ以下の3つの状態を対象として、対象施設の事故シナリオに応じて適切に限界状態を設定する。

- i. 斜面の不安定化が生じる安定限界
- ii. 崩壊土塊の施設への到達限界
- iii. 崩壊土塊の衝突による施設の損傷限界

ここで、安定限界は斜面が崩壊しない場合には施設や設備の機能喪失も生じないとして、斜面崩壊が生じる状態を間接的に対象施設や設備の機能喪失限界とみなすための限界状態である。その状態は、斜面内に生じた引張り亀裂やせん断亀裂が連続してすべり面を形成し、その面上の土塊や岩塊が移動を開始する状態と定義する。その状態は、設定したすべり面上の作用せん断力で抵抗力を除いたすべり安全率が所要の限界値を下回る状態として、評価されている。

次に、到達限界は崩壊土塊が対象施設、また設備に到達し、影響を及ぼす状態と定義する。その限界状態は崩壊土塊が対象施設、また設備に到達し、通過する状態、つまり機能喪失に至る間接的な影響として評価することができる。また、施設や設備のうち取水ピットや搬入路などについては、施設への直接的な影響評価と同等な位置づけとして、その位置を超えて到達する崩壊土塊の状態、すなわち到達土量などが所要の限界値を超える状態を評価することができる。取水ピットについてはそれを閉塞する土量、搬入路については走行不能となる状態、また閉塞状態からの機能回復に至る所要排土時間等、構造物や施設に必要とされる機能によって決まる土量が評価の対象となる。

最後に、損傷限界は崩壊土塊が対象施設、また設備に衝突し、影響を及ぼす状態と定義する。その限界状態は崩壊土塊の衝撃作用に対する対象施設や設備の応答と耐力等の限界値との関係により評価することができる。その際、崩壊土塊の挙動として重要な評価項目は、対象物への衝突速度や運動量などが考えられる。

2) 不確実さに対する配慮

斜面崩壊の影響に関する評価は、地盤は空間的に不均質な材料特性を有するとともに、地

盤の地震時挙動を解析する手法の精度、複雑な 3 次元構造のモデル化に関する精度、さらに地震作用など様々な不確実さのもとで行うことになる。まず、限界状態に応じた評価指標に影響を及ぼす不確実さの要因を抽出する。ここで、不確実さには、データまた現象が持つ固有のランダム性による不確実さ（偶然的な不確実さ）と解析手法またはモデル化における知識及び認識不足に係わる不確実さ（認識論的な不確実さ）があり、抽出された不確実さは可能な範囲で分離して整理することが望ましい。抽出された不確実さ要因より、フラジリティ曲線などの評価に用いる特性値を適切に設定しなければならない。

なお、地盤関係の研究は、今後も進展していくことが予想されるため、学問の進展に応じて、新しい調査法や試験法、及び解析手法等の適用を妨げないこととする。

3) 降雨作用

降雨作用は、土木学会から公開されている「性能設計における土木構造物に対する作用の指針」¹⁾の中に明記されている。降雨作用モデルとして、特性値に関する確率降雨量または生起確率付き時刻歴で表現することを基本としており、極値統計解析によることとしている。性能設計における土木構造物に対する作用の指針の付属資料には、篠田²⁾による極値統計解析による具体的な確率降雨量マップの作成方法について説明がなされている。なお、鉄道標準では土構造物の設計に用いる降雨作用は確率降雨を用いることとし、盛土の安定検討に用いる確率雨量は時雨量や日雨量、年雨量を用いることとしている。

確率降雨量の算定にあたっては、古典的な極値統計解析によるが、適切な確率分布の設定や母数推定法、確率量の推定誤差の評価には最新の知見が必要となる。水文・水資源ハンドブック³⁾によれば、水文頻度解析で用いる確率分布には、正規分布、対数正規分布、ピアソンⅢ型分布、対数ピアソンⅢ型分布、ガンベル分布、一般化極値分布などが用いられている。母数推定法には、最尤法、積率法、PWM 法、L 積率法などがある。また、浸透流解析を実施するにあたっては、降雨パターンを適切に設定する必要がある。降雨パターンの設定については、既往最大降雨量を記録した観測データなどの代表的なデータを用いる方法が現実的であるが、北川⁴⁾のパーティクルフィルタによる降雨履歴の推定は有望であり、今後の発展が望まれる。

参考文献

- 1) 土木学会：性能設計における土木構造物に対する作用の指針，2008。
- 2) 篠田昌弘：AMeDAS データを用いた確率降雨量マップ，土木学会論文集 A，Vol. 63，No. 3，pp. 195-205，2007。
- 3) 水文・水資源学会：水文・水資源ハンドブック、pp. 228-255，1997。
- 4) 北川源四郎：時系列解析入門，岩波書店，2005

4) 各限界状態におけるフラジリティ曲線の評価

前項で示した降雨時における原子力発電施設の周辺斜面の崩壊が及ぼす影響に関する 3 つの限界状態に対するフラジリティ曲線は、対象施設や設備の要求性能に応じた損傷モードを踏まえ、施設や設備毎に適切に設定することが必要である。その際、安定限界を超える限界状態に対して評価を行うことが必要な施設や設備については、斜面の崩壊形態として塊状の崩壊から斜面の材料特性や水分状態に応じた土石流に至る状態を適切に評価することが必要

である。ここで、崩壊が生じる斜面に対する影響評価は降雨による崩壊、滑落挙動まで一貫した解析に基づいて実施することが好ましい。しかし、まだ課題も多いことから、地震作用と同様に現状の評価体系を拡張し、斜面崩壊後の挙動についてはそれら手法を活用し、限界状態ごとに評価することとする。

まず、安定限界を超える斜面の状態である崩壊が生じる状態に対する脆弱性曲線の評価方法の基本的な考え方について示す。その方法は、降雨強さに応じたせん断強度の低下、滑動力の増加を考慮した力の釣り合いによる斜面の安定解析より得られる想定すべり面に対するすべり安全率を指標とした考え方に基づいて評価してもよい。ここで、斜面モデルの安定解析には、降雨の影響を適切に考慮できる安定解析法を用いる。その際、斜面の崩壊が生じる確率は、2点推定法の様な簡易法、またモンテカルロシミュレーションにより評価してもよい。

次に、斜面崩壊後の崩壊土塊の到達限界に対する脆弱性曲線の評価手法の基本的な考え方について示す。ここで、崩壊形態として、塊状の崩壊から土石流の形態に応じた崩壊挙動の解析を実施する。その際、崩壊領域内の地盤材料の特性を踏まえ、塊状また流体状の滑動挙動、とともに運ばれる岩塊の影響を評価する。また、岩塊が卓越する場合には、群の滑落挙動や個別岩塊の転動の影響を評価する。いずれも、崩壊領域内の崩壊土塊が自重によりすべて滑落するという条件のもとで、条件に応じた解析手法も用いた評価を行う。塊状の崩壊土塊の滑落挙動については個別要素法や粒子法(MPM)、流体状の崩壊土塊の滑動挙動については粒子法(MPM)などの適切な手法により評価する。また、岩塊の転動挙動については個別要素法や質点解析を用いて評価してもよい。

ここで、崩壊土塊が到達限界を超える確率は、崩壊条件付きの特性として求める。例えば、到達確率、到達速度、堆積土量や到達土量、岩塊の到達速度と到達速度の超過確率の関係などである。そこで、降雨強さに応じた崩壊領域に対する条件付き到達確率と崩壊確率の関係より、到達確率に関する脆弱性曲線、また堆積土量や到達土と降雨強さの関係を評価する。ここで得られた崩壊条件付きの特性のうち到達速度と到達速度の超過確率の関係は対象施設への衝撃作用を評価する上で重要な衝突ハザードとして考慮する。

最後に、対象施設や設備の損傷限界に関する脆弱性曲線の評価手法の基本的な考え方について示す。到達限界の評価で得られた衝突ハザードを用いて、地震作用と同様な考え方で崩壊土塊の衝撃作用に対する対象施設や設備の条件付き損傷確率の評価を行う。損傷確率に関する脆弱性曲線は、降雨強さに応じた崩壊領域に対する条件付き損傷確率と崩壊確率との関係より求める。

5) 限界状態に応じた崩壊領域の考え方

ここでは、3つの限界状態である安定限界、岩塊の到達限界、構造物の損傷限界の3種類を対象として考慮すべき崩壊領域の考え方を示す。

まず、安定限界の崩壊領域は、崩壊が始まると考えられる最小の降雨強さで不安定になる領域を対象とする。まず、降雨強さを変えた安定解析を多数行い、それぞれの解析に対して力の釣り合いによる安定解析を実施する。降雨強さごとに得られたすべり安全率が1.0を下回るすべり面のうち、最小の降雨強さに対するすべり面上の領域を崩壊領域とする。この時の降雨強さを限界降雨強さと呼ぶ。安定限界を超える状態に対する崩壊確率の脆弱性曲

線は、この崩壊領域を固定し、異なる降雨強さに対する崩壊確率として評価する。

次に、斜面崩壊後の到達限界を評価するための崩壊領域は、降雨作用に起因して崩壊する全領域とする。限界降雨強さに対しては安定限界と同じ崩壊領域を用いる。ここで、降雨作用に対するすべり面の形状は、降雨強さの増大とともにすべり安全率が最小となるすべり面はより広い領域となるという、地震動と類似の傾向を有していると考えられる。このことから、限界降雨強さを超える降雨強さに対しては、降雨強さに応じて得られたすべり安全率が1.0を下回るすべり面の形状を踏まえ、降雨強さに対するすべり面の広がりを見当を適切に考慮して、崩壊領域を設定する。

最後に、損傷限界に対する fragility 曲線の評価は、到達限界の fragility 曲線の評価過程で得られる衝突ハザードを用いることから、その評価に用いる斜面の崩壊領域の考え方は到達限界と同様である。

2. 2. 2. 2 検討手順の検討フローとその概要

ここでは、前章で示した基本方針に基づき降雨に起因した斜面崩壊が原子力発電施設に及ぼす影響を評価するための検討手順の概要を検討フローとともに示す。その手順は、以下の4項目の流れに従って示す。

- ①影響評価に必要な基本条件の設定
- ②安定限界に対する fragility 曲線の評価と崩壊確率の評価
- ③到達限界に対する fragility 曲線の評価と到達確率の評価
- ④損傷限界に対する fragility 曲線の評価と損傷確率の評価

1) 影響評価に必要な基本条件の設定

降雨に起因した斜面崩壊が原子力発電施設に及ぼす影響の評価を行うためには、その評価の前提となる基本条件を図 2. 2. 2. 2-1 のフローに示した流れに従って適切に設定することが必要となる。

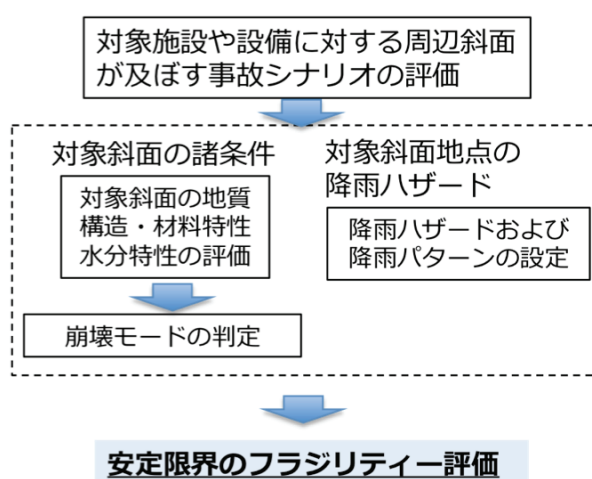


図 2. 2. 2. 2-1 基本条件の設定フロー

以下にフローに従った検討手順の概要を示す。

- ・ 対象となる重要施設・設備の事故シナリオの評価

図に示したように安全性の評価が必要な重要施設・設備の周辺斜面に降雨に起因した崩壊が及ぼす影響という２次的な地盤ハザードに対して、その施設・設備に必要とされる性能に応じた損傷モードを同定し、損傷による機能喪失に至るシナリオの評価を行う。

- ・ 対象の斜面の地質構造・材料特性・水分特性の評価

地震時に原子力発電所の安全上重要な施設や設備に及ぼす周辺斜面の影響の評価に当たっては、地震応答解析に用いる地盤モデルの作成が必要である。その際、地盤構造や物性値の情報として、斜面を形成する地形・地質、及び施設の基礎下の地質構造の広がりを考慮した３次元構造とその材料特性、地下水の状況などが必要である。

さらに、地殻変動に起因した敷地内の地盤変状や敷地内に存在する不連続面に沿った地盤変状を評価するために実施する解析には、敷地を中心としてその周辺地盤の３次元構造や材料特性が必要となる。

これらのことから、敷地内に限らず評価に必要な範囲で広域地盤の３次元構造や材料物性の調査を行い、情報を収集する必要がある。

- ・ 崩壊モードの判定

自然斜面の崩壊形態は、落石等による崩壊、すべり破壊等による崩壊、トップリングによる崩壊、バックリングによる崩壊に分類できる。すべり破壊以外の崩壊モードは岩石の剥離による転動が生じることになる。一般に、そのような崩壊モードの可能性を有する原子力施設に近接する自然斜面は、切土などの安定化対策が実施される。

このような既設の原子力発電所の斜面の状況から、主としてすべり破壊を対象とした考え方についてまとめている。対象の周辺斜面の崩壊モードとして、すべり破壊の判定が、詳細な調査により得られた地盤構造に基づいて行われていることを確認する。

- ・ 対象斜面地点の降雨ハザード

降雨ハザードは、例えば年最大日降水量と非超過確率など関係を降水量に関する情報のある地点の情報より推定して用いることができる。

2) 安定限界に対するフラジリティ曲線の評価と崩壊確率の評価

安定限界に対するフラジリティ曲線の評価と崩壊確率の検討手順の概要を図2.2.2.2-2に示す検討フローに基づいて示す。

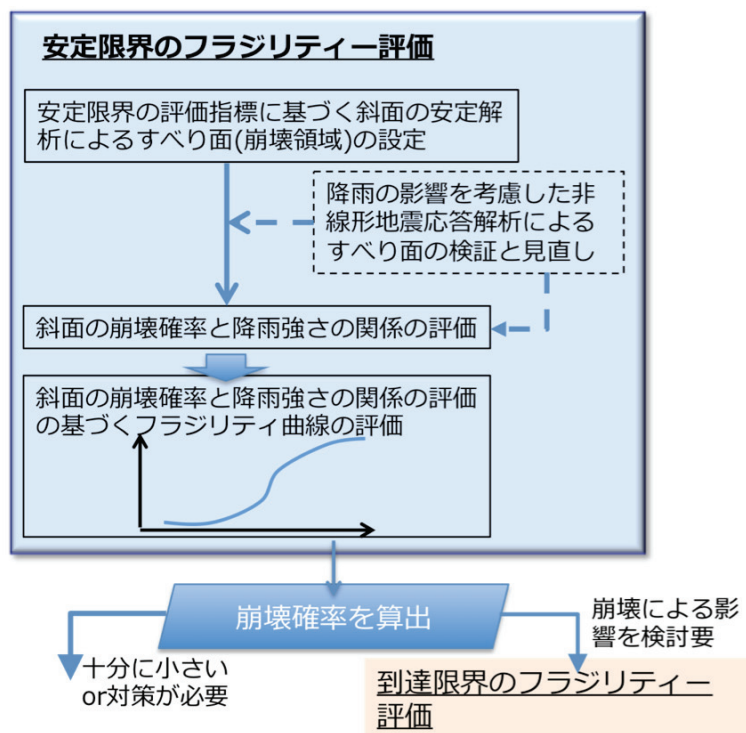


図 2.2.2.2-2 安定限界のフラジリティ曲線の評価フロー

以下にフローに従った検討手順の概要を示す。

・ 安定限界の評価指標に基づく斜面の安定解析によるすべり面(崩壊領域)の評価

降雨の影響を考慮した斜面モデルの力の釣り合いに基づく安定解析により得られる想定すべり面に対するすべり安全率を指標とした考え方に基いて評価する。安定限界の評価に用いるすべり面(崩壊領域)を評価するため、まず降雨強さに応じて強度特性の不確実さを考慮した解析を実施する。次に、降雨強さごとに得られたすべり安全率が1.0を下回るすべり面のうち、最小の降雨強さに対するすべり面を安定限界のフラジリティ評価に用いる。

・ 降雨の影響を考慮した非線形地震応答解析によるすべり面の検証と見直し

前述の安定解析により得られたすべり面位置、さらに崩壊形態に関する検証を降雨による地盤材料の非線形性を考慮した非線形解析により実施する。

・ 斜面の崩壊確率と降雨強さの関係の評価

検証されたすべり面に対して、降雨の影響を考慮できる安定解析を実施する。崩壊確率は、地盤材料の不確実さを考慮した解析数を実施して、求める。崩壊確率の評価手法として、2

点推定法の様な簡易法，またモンテカルロシミュレーションにより評価してもよい．

- ・ **斜面に崩壊確率と降雨強さの関係の評価に基づくフラジリティ曲線の評価**

限界状態の性能関数が対数正規分布などの確率分布で表されることを仮定し，先に得られた離散的な崩壊確率と降雨強さの関係を満たす近似曲線を求め，その不確実さに配慮したフラジリティ曲線を求める．

- ・ **崩壊確率の算出**

先に求めた斜面の安定限界に対するフラジリティ曲線と，対象地点の降雨ハザード曲線より，崩壊確率を求める．その値が十分に小さい場合には，崩壊条件付きの到達確率や施設・設備の損傷確率はそれ以下となることから，到達限界，損傷限界の評価を実施しなくてもよい．また，その値が著しく大きい場合には，安定化のための対策を講じることが必要である．その値が崩壊による影響を考慮した方がよいような値であるか，対象施設や設備の重要度が高い場合には到達限界の影響の評価を行う．

3) 到達限界に対するフラジリティ曲線と到達確率の評価

到達限界に対するフラジリティ曲線と到達確率などの検討手順を図2.2.2.2-3に示した検討フローに従い、以下に示す。

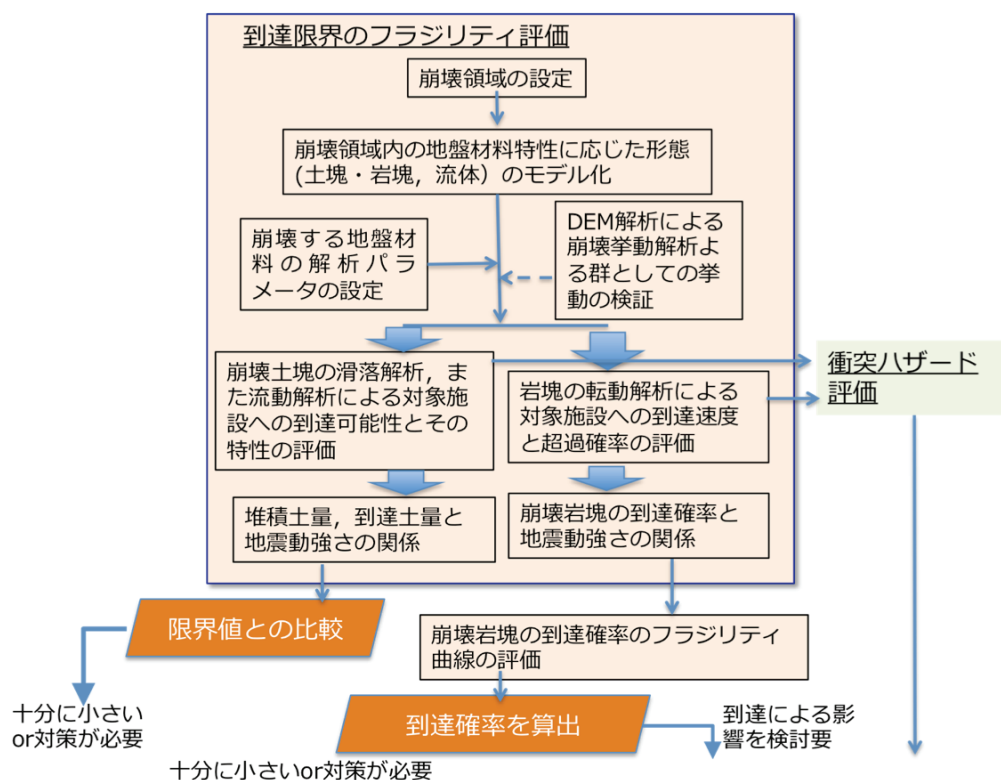


図 2.2.2.2-3 到達限界のフラジリティ曲線の評価フロー

以下にフローに従った検討手順の概要を示す。

・ 崩壊領域の設定

斜面崩壊後の到達限界を評価するための崩壊領域は、降雨の作用に起因して崩壊する全領域とする。限界降雨強度に対しては安定限界と同じは崩壊領域を用いる。限界降雨強度を超える降雨強度に対しては、降雨強度に応じて得られたすべり安全率が1.0を下回るすべり面の形状を踏まえ、限界降雨強度に対するすべり面の広がり適切に考慮して、崩壊領域を設定する。

・ 崩壊領域内の地盤材料特性や水分状態に応じた形態（土塊、岩塊）のモデル化

崩壊領域内の地盤材料の特性に応じて、その特性を土塊、岩塊のいずれかに区分する。土塊、また岩塊を含む土塊は水分量に応じて崩壊領域に沿った滑動のみならず土石流などの流体として挙動するため、水分量に応じた挙動のモデル化、また両挙動の発生の可能性について検討を行うことが必要である。岩塊については、個別また群としての転動解析に必要な岩塊径と径に応じた岩塊総数などを適切に設定する。また、材質が岩塊であっても、群として滑落する場合には土砂として取り扱う。

- ・ **崩壊する地盤材料の解析パラメータの設定**

塊状の土塊，また土石流などの流体については滑落挙動，岩塊については転動挙動の解析を実施する．塊状の土塊の滑落挙動解析には簡易DEM解析，粒子法(MPM)を用いる．土石流などの流体に対しては，その流動化率などに応じた粘性流体としての挙動を考慮できる流動解析や粒子法(MPM)などを用いる．転動解析には，質点解析，簡易DEM解析を用いる．それら解析に用いるパラメータは，斜面との摩擦や材料の特性など解析手法に応じた特性を原位置の実験データや関連資料に基づいて適切に設定する．

- ・ **崩壊挙動解析による群としての挙動の検証**

崩壊領域内の材料特性が岩塊の場合には，領域内の全ての岩塊が斜面を転がり落ちてきた後，一部の岩塊は法尻に堆積すると考えられる．崩壊領域内の岩塊のうち，敷地内に転動が生じる岩塊の割合を把握するため，対象施設や設備周辺の斜面の形状など地点固有の条件に基づき崩壊領域内の岩塊群に対する転動解析を実施する．

- ・ **崩壊土塊の滑落解析による対象施設への到達可能性とその特性の評価**

崩壊領域内の材料特性が塊状の土塊，また土石流などの流体の場合には，その領域内の崩壊土塊全体が崩壊するとした滑落解析を解析パラメータの不確実さを考慮して実施し，対象施設や設備に到達する可能性，到達時の速度と崩壊土塊の高さなどの影響評価に必要な特性の評価を行う．

- ・ **到達土量，堆積土量と地震動強さの関係**

取水ピットなどの施設へその周辺斜面の崩壊土が到達し，その位置を超えて滑動が生じた土量が取水ピット内の閉塞に関連する指標とし，その土量を到達土量として崩壊領域に応じた地震動強さと関係づける．搬入路についても，その周辺斜面の崩壊土が搬入路に到達し，搬入路上に堆積する土量を堆積土量として崩壊領域に応じた地震動強さと関係づける．

- ・ **限界値との比較**

得られた到達土量，堆積土量とその限界値，例えば取水ピットや搬入路の機能喪失が生じる土量と比較し，対策の要否について検討を実施する．

- ・ **岩塊の転動解析による対象施設への到達速度と超過確率の評価**

崩壊領域内の材料特性が岩塊の場合には，その領域内の岩塊が個々に崩壊するとした転動解析を解析パラメータの不確実さを考慮して実施し，対象施設や設備に到達する速度とその超過確率を評価する．

- ・ **衝突ハザード評価**

対象施設や設備に到達する塊状の土塊，また土石流などの流体の速度とその高さなどと崩壊領域に応じた降雨強さとの関係をそれら施設や設備の衝撃解析に用いる衝突ハザードとす

る。また、対象施設や設備に到達する岩塊の速度に対する超過確率と崩壊領域に応じた降雨強さとの関係もそれら施設や設備の衝撃解析に用いる衝突ハザードとする。

- ・ **崩壊岩塊の到達確率のフラジリティの評価**

対象施設や設備に到達する速度に応じた超過確率は、所定の速度に対する崩壊条件付き到達確率と見なすことができる。先に得られた降雨強さに応じた崩壊確率と崩壊条件付きの到達確率より、崩壊生起も含む到達確率を求め、それと降雨強さの関係より、不確実さを考慮したフラジリティ曲線を求める。

- ・ **到達確率の算出**

先に求めた到達限界に対するフラジリティ曲線と、対象地点について推定した降雨ハザード曲線より、到達確率を求める。その値が十分に小さい場合には、崩壊条件付きの施設・設備の損傷確率はそれ以下となることから、損傷限界の評価を実施しなくてもよい。また、その値が著しく大きい場合には、安定化のための対策を講じることが必要である。その値が崩壊による影響を考慮した方がよいような値であるか、対象施設や設備の重要度が高い場合には損傷限界の影響の評価を行う。

4) 衝突による損傷限界に対するフラジリティ曲線と損傷確率の評価

降雨の作用に対する土塊、岩塊の衝突に対する施設や設備の損傷限界に対するフラジリティ曲線の検討手順は、地震作用に対する評価と基本的には同じであるため、ここでは省略する。求めた斜面崩壊が影響を及ぼす施設や設備の損傷限界に対するフラジリティ曲線と、対象地点の降雨ハザード曲線より、損傷確率を求める。その値が十分に小さい場合には、斜面崩壊に対する対象施設や設備の安全機能に及ぼす影響の評価を実施しなくてもよい。また、その値が大きい場合には、安定化のための対策を講じることが必要である。

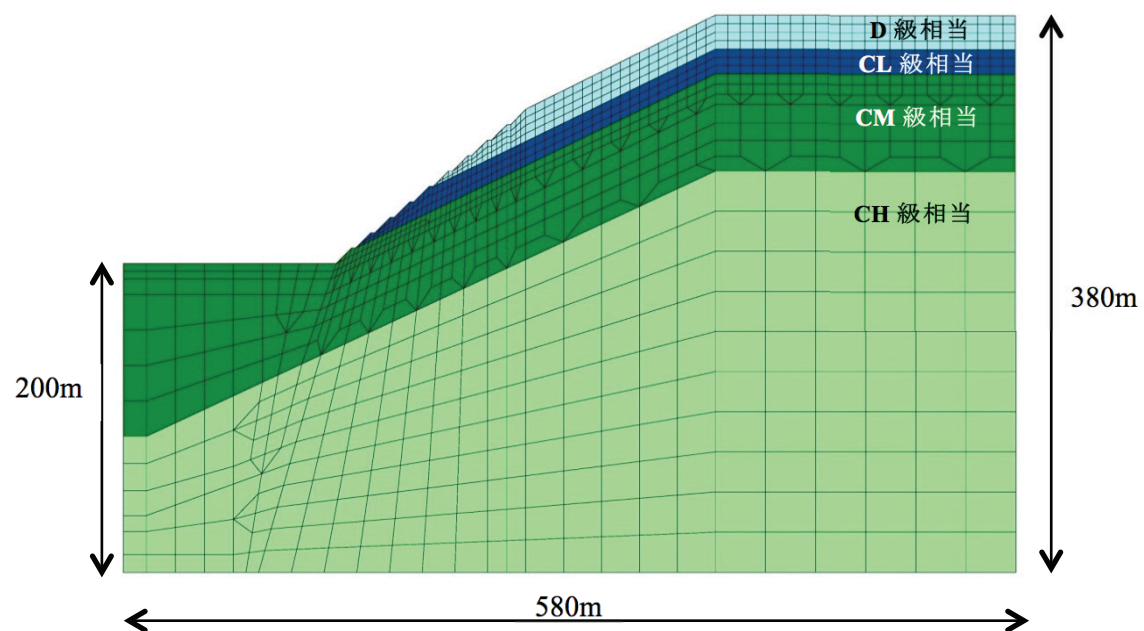
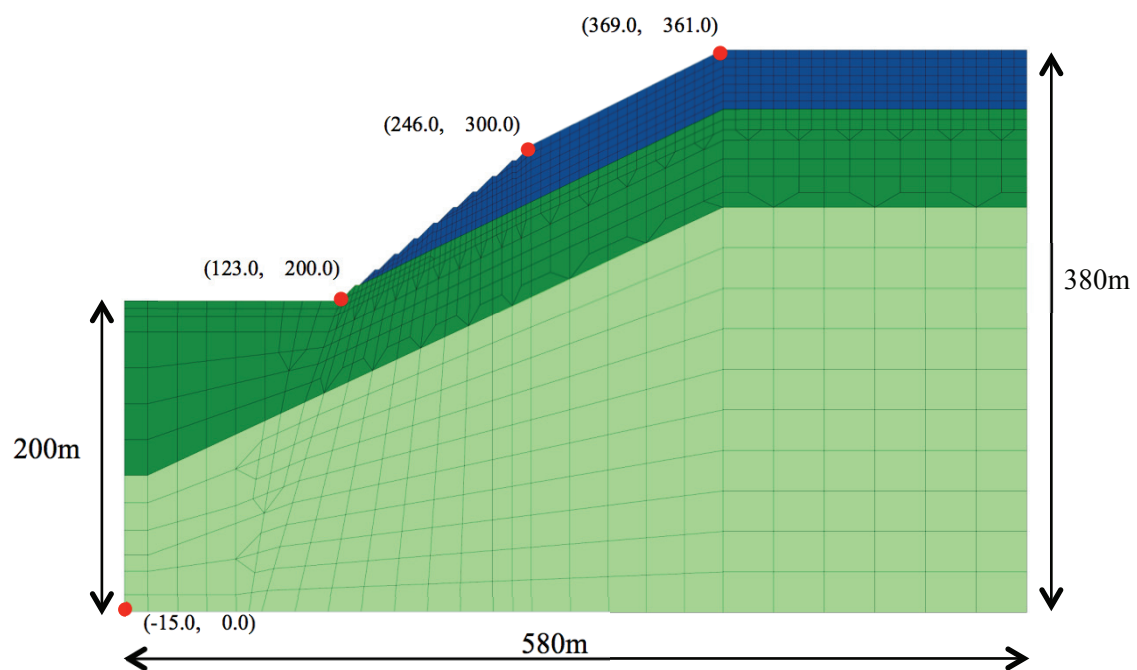


図 3.1.1-2 本検討で用いた斜面モデル

3.1.1.2 地盤材料モデルの設定

地盤材料の物性値は、既設原子力発電所における値を参考に、岩級区分ごとに設定した。表 3.1.1-1 に地盤材料の物性値一覧を、図 3.1.1-3 に岩級ごとの強度特性（破壊包絡線）を示す。

本検討における強度特性（破壊包絡線）として、岩盤要素が健全でピーク強度が発揮される場合は引張強度(σ_t)を考慮することとし、せん断ピーク強度の粘着力(C_p)の2/3 倍として設定した。岩盤要素が破壊し残留強度が適用される場合は引張強度は考慮しない(すべり安全率算定におけるピーク強度及び残留強度の適用方法については、3.2.1で詳述する)。

常時応力解析（自重解析）では、変形特性は岩級によらず一定 ($E=980\text{MPa}$, $\nu=0.49$) とし、単位体積重量は岩級区分ごとの値を適用した。

表 3.1.1-1 地盤材料の物性値一覧

項目		単位	岩 盤				備考
			D級相当	CL級相当	CM 級相当	CH級相当	
単位体積重量(γ)		tf/m ³ (kN/m ³)	2.0 (0.020)	2.0 (0.020)	2.5 (0.025)	2.7 (0.026)	
ピーク 強度	粘着力(C_p)	MPa	0.28	0.46	1.39	1.86	
	内部摩擦角(ϕ_p)	度	27.9	37.1	41.8	46.4	
	引張強度(σ_t)	MPa	0.19	0.31	0.93	1.24	2/3 C_p
残留 強度	粘着力(C_r)	MPa	0.00	0.00	0.00	0.00	
	内部摩擦角(ϕ_r)	度	27.9	37.1	41.8	46.4	
初期せん断弾性係数(G_0)		MPa	464	669	3900	10213	
動ポアソン比(ν_d)		—	0.43	0.40	0.37	0.35	
$G/G_0 \sim \gamma : \gamma (\%)$		—	$1/(1+4.5\gamma^{0.6})$	線形 (←定)	線形 (←定)	線形 (←定)	
$h \sim \gamma : \gamma (\%)$		%	$11.4\gamma^{0.2}+2.0$	3.0 (←定)	3.0 (←定)	2.0 (←定)	
減衰定数hの下限值		%	3.0	—	—	—	

※) 常時応力解析（自重解析）では、変形特性は岩級によらず一定値 ($E=980\text{MPa}$, $\nu=0.49$) としている

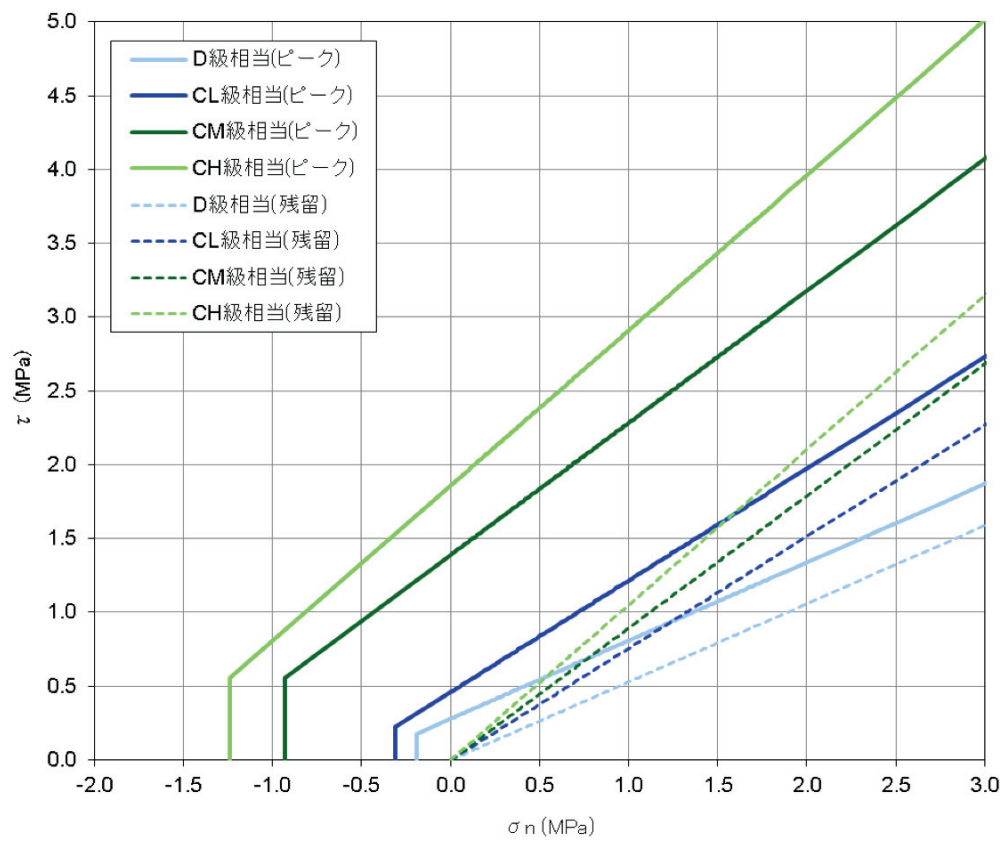


図 3.1.1-3 岩級ごとの強度特性（破壊包絡線）

【参考文献】

- 1) 土木学会原子力土木委員会：「原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価方法」報告書 第5編 周辺斜面の耐震安定性評価 例示編, 昭和60年8月.
- 2) (財)日本電気協会電気技術基準調査委員会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987, 1987.

3. 1. 2 検討用地震動の設定

3. 1. 2. 1 想定施設の位置

想定施設位置を（45° 27.0' N, 141° 52.5' E）に設定した。図 3.1.2-1 に施設位置を示す。

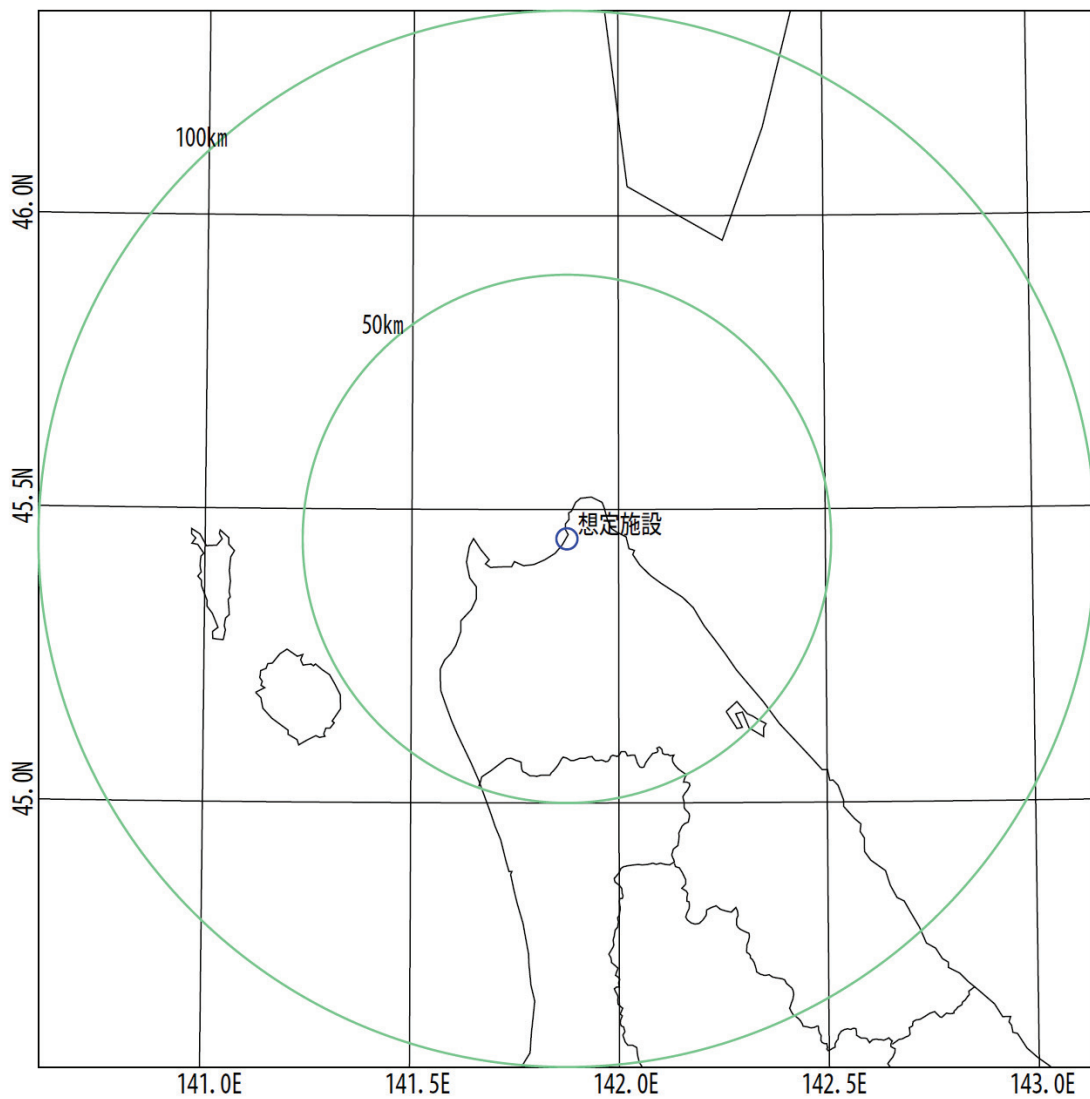


図 3.1.2.1-1 想定施設の位置

3. 1. 2. 2 ロジックツリー

想定施設の地震動ハザードに影響が大きいのは、サロベツ断層帯と同施設が位置する領域の領域震源（震源断層をあらかじめ特定しにくい浅い地震）である。ロジックツリーは主にこの2つの活動域を対象として設定した。

距離減衰式に関するロジックツリーは、内陸地震補正の有無とばらつきに関する分岐を設けた。距離減衰式は Noda *et al.*(2002)の耐専式を使用する。また、距離減衰式の適用においては、解放基盤面の S 波速度を 900m/s とした。耐専式では地震動を評価する岩盤サイトを $V_s \geq 700\text{m/s}$ の硬質地盤を想定している。

3. 1. 2. 3 地震動ハザード評価

3. 1. 2. 2 項のロジックツリーの組み合わせにより 2916 本のハザード曲線が得られる。周期 0.02 秒と 1.0 秒に対する地震動ハザード曲線の分布を図 3.1.2.3-1 に示す。

図 3.1.2.3-1 のハザード曲線のそれぞれには重みが付いており、その和は 1.0 である。重みを考慮してフラクタイルハザード曲線で表示した結果を図 3.1.2.3-2 に示す。

各周期の算術平均ハザードから一様ハザードスペクトルを決定した。代表的な周期の算術平均ハザード曲線の分布を図 3.1.2.3-3 に、年超過頻度 10^{-3} から 10^{-7} の範囲の一様ハザードスペクトルを図 3.1.2.3-4 に示す。

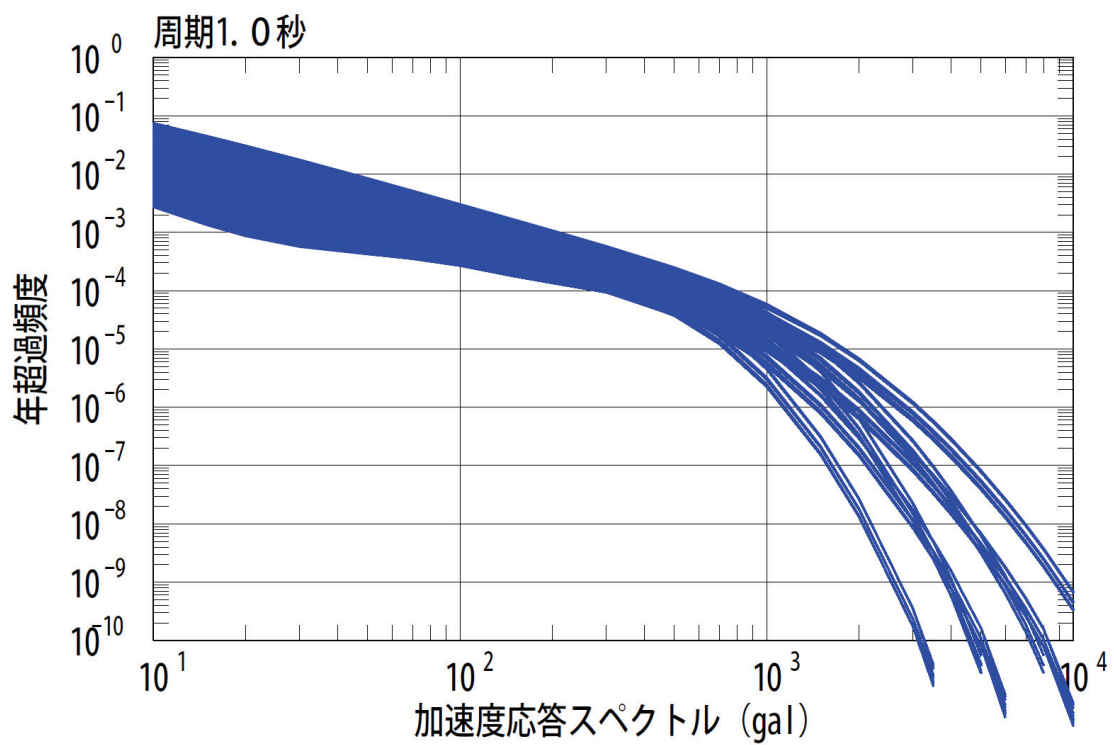
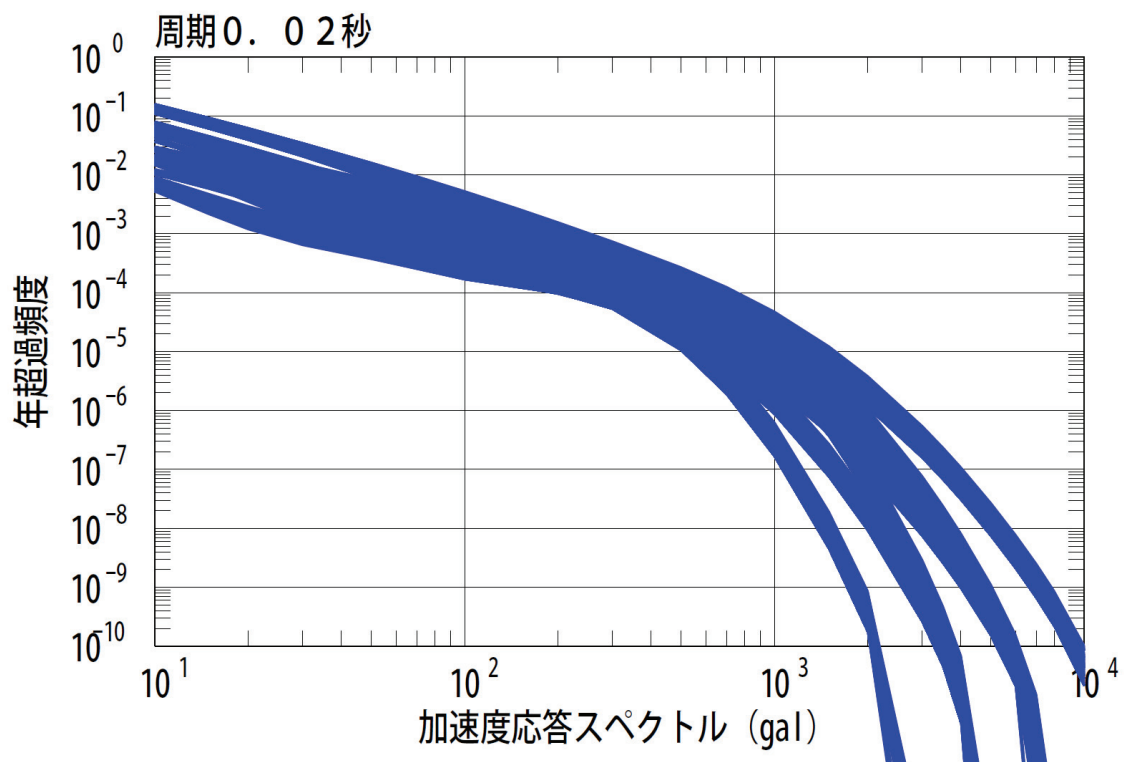


図 3.1.2.3-1 地震動ハザード曲線の分布（周期 0.02 秒と周期 1.0 秒）

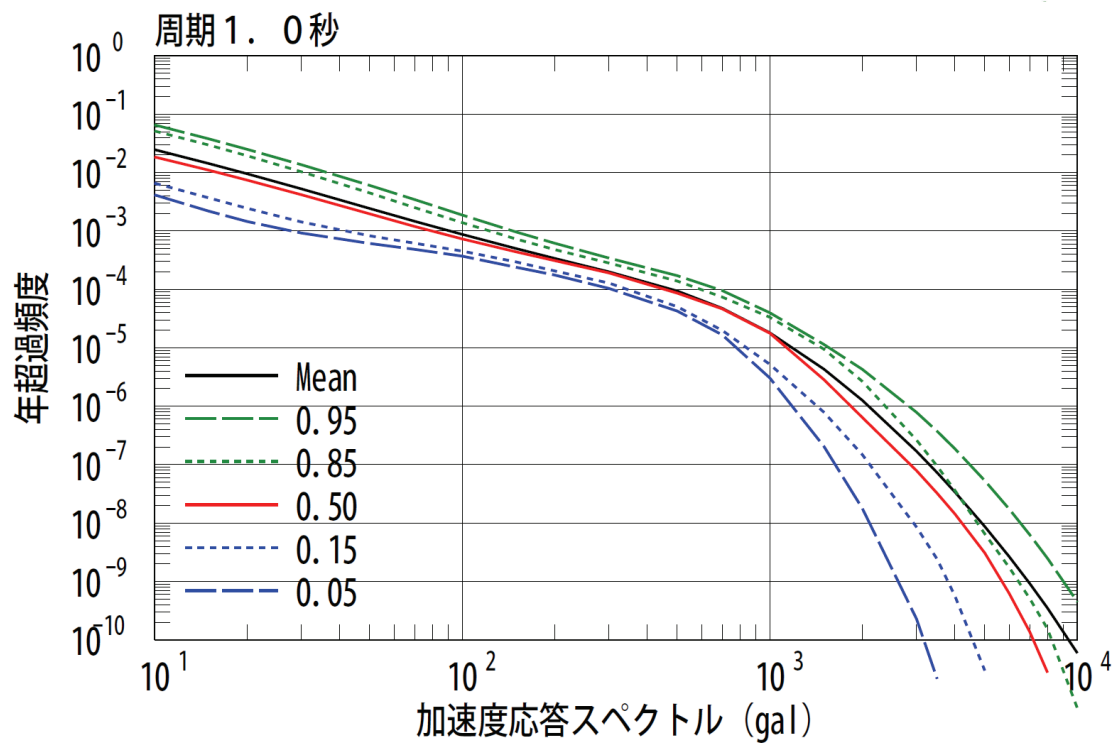
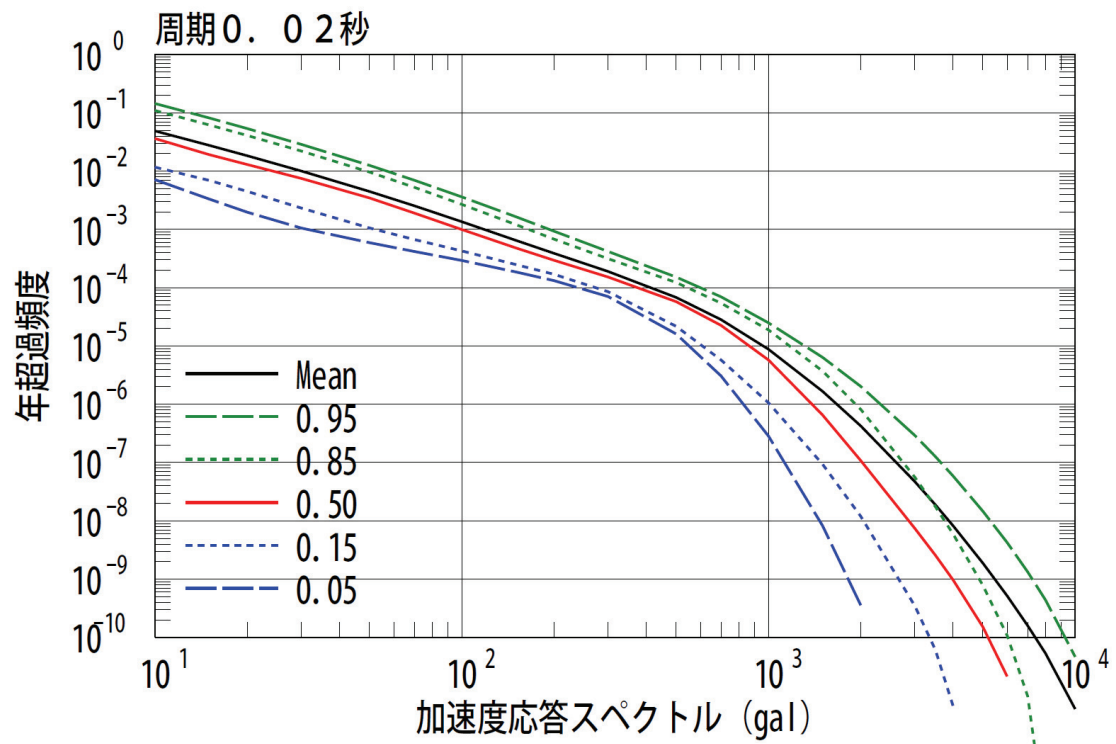


図 3.1.2.3-2 フラクタイルハザード曲線 (周期 0.02 秒と周期 1.0 秒)

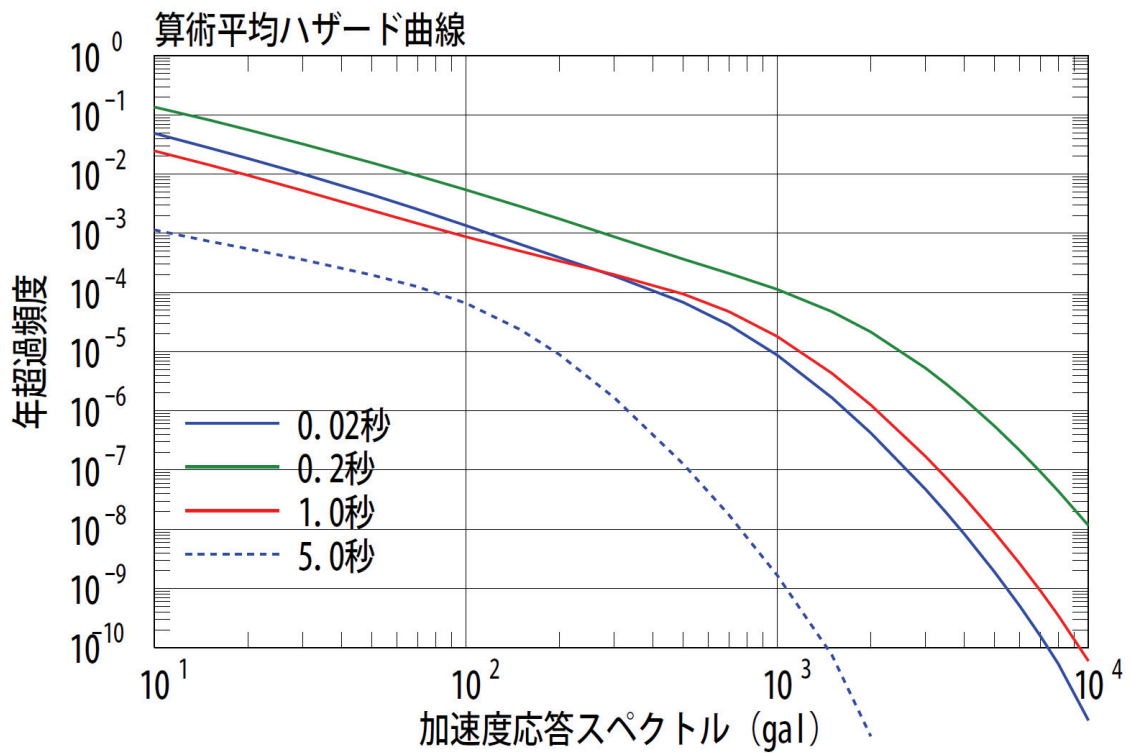


図 3.1.2.3-3 代表的周期における算術平均ハザード曲線

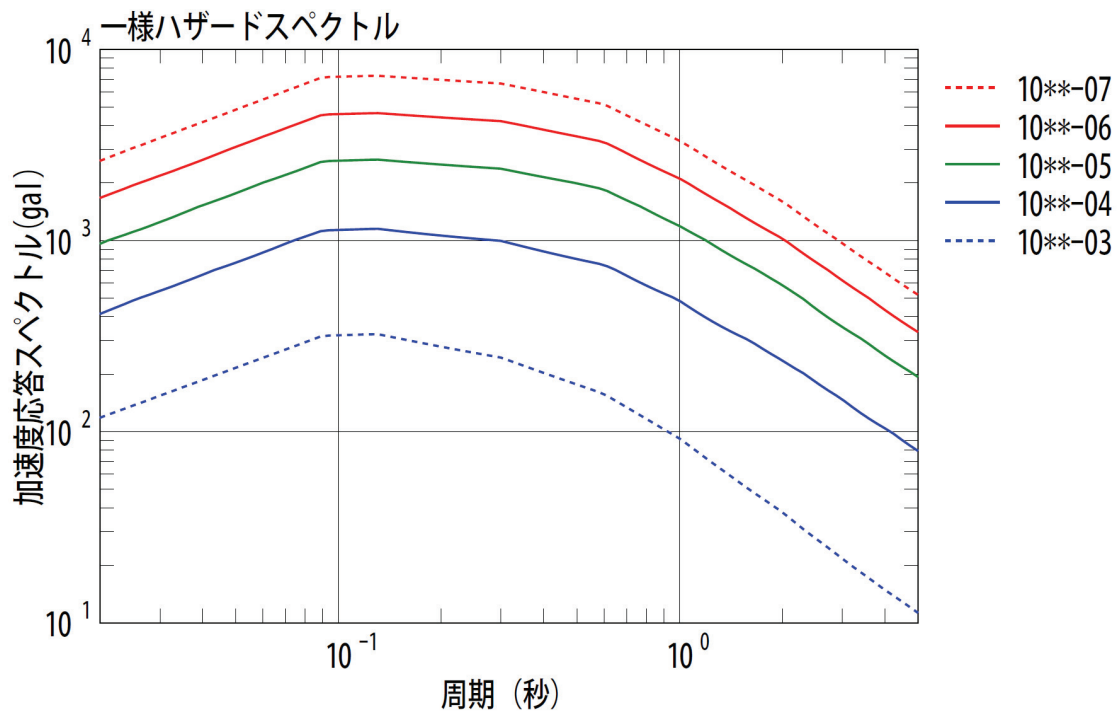


図 3.1.2.3-4 一様ハザードスペクトル

3. 1. 2. 4 ハザード再分解

ハザードの再分解によって、年超過頻度ごとの着目周期における寄与度の大きいマグニチュードと等価震源距離を求めた。この結果は、次項で模擬地震波を作成する際の経時特性を決めるために使用する。着目周期は 0.02 秒と 1.0 秒とした。年超過頻度別の周期 0.02 秒と 1.0 秒の加速度値を表 3.1.2.4-1 に示す。

ハザードの再分解は算術ハザード曲線を対象とし、2916 本のハザード曲線の重みを確率として評価した。

年超過頻度が $10^{-4} \sim 10^{-6}$ のレベルでの地震のマグニチュード別および距離別分布を図 3.1.2.4-1～図 3.1.2.4-3 に示す。いずれの場合も、マグニチュード $M=7.9$ 、等価震源距離 $X_{eq}=25(\text{km})$ の相対頻度が最大となる。従って、年超過頻度 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ の全てのレベルで模擬地震波の経時特性にこの値を使用することとした。

表 3.1.2.4-1 年超過頻度別の周期 0.02 秒と 1.0 秒の加速度値

年超過頻度	加速度応答スペクトルの値 (gal)	
	周期 0.02 秒	周期 1.0 秒
10^{-3}	118	91
10^{-4}	413	479
10^{-5}	961	1183
10^{-6}	1670	2096
10^{-7}	2611	3303

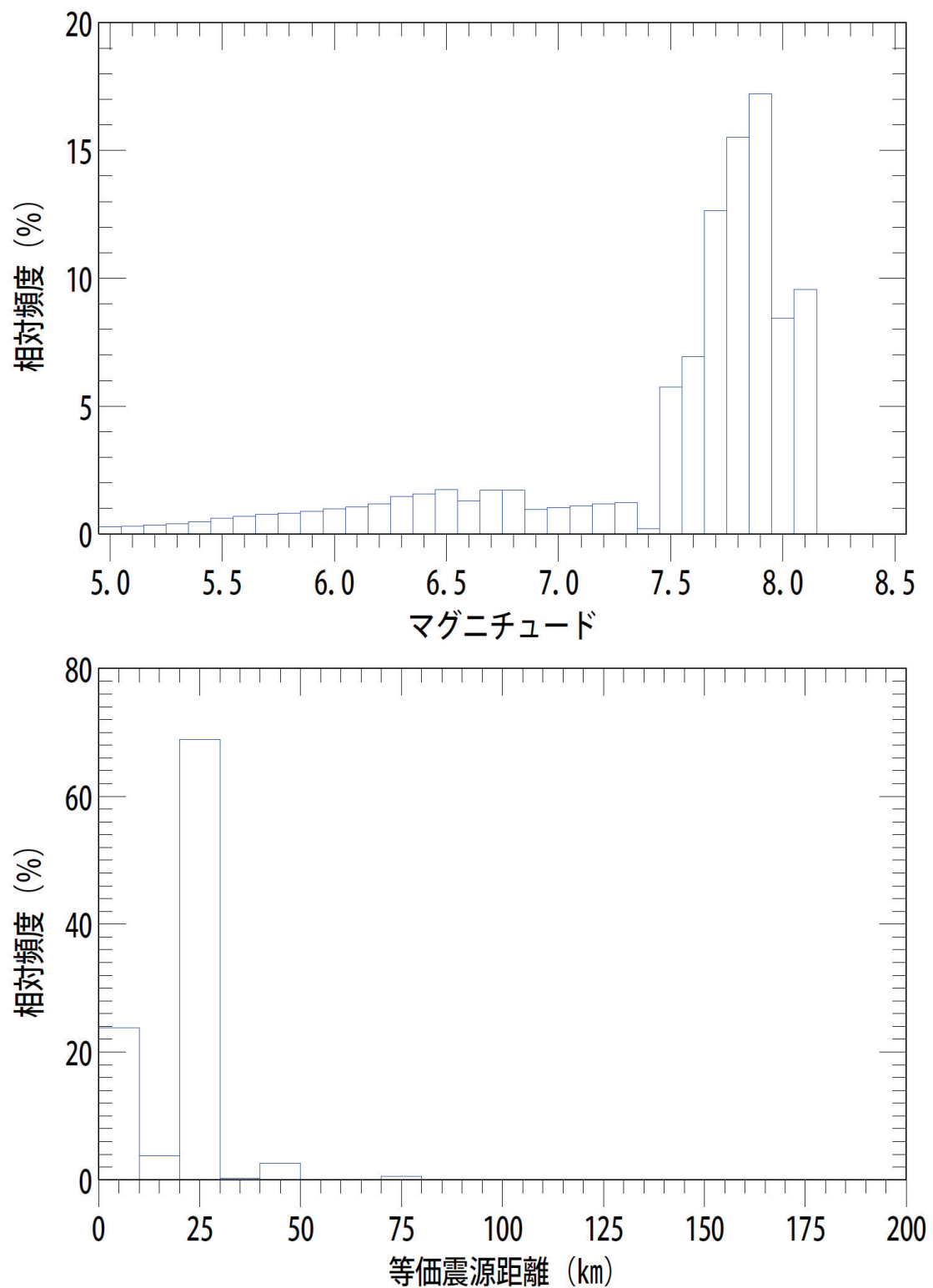


図 3.1.2.4-1(1) 年超過頻度 10^{-4} レベル：周期 0.02 秒で 413gal 以上となる地震の分布
(算術平均ハザード)

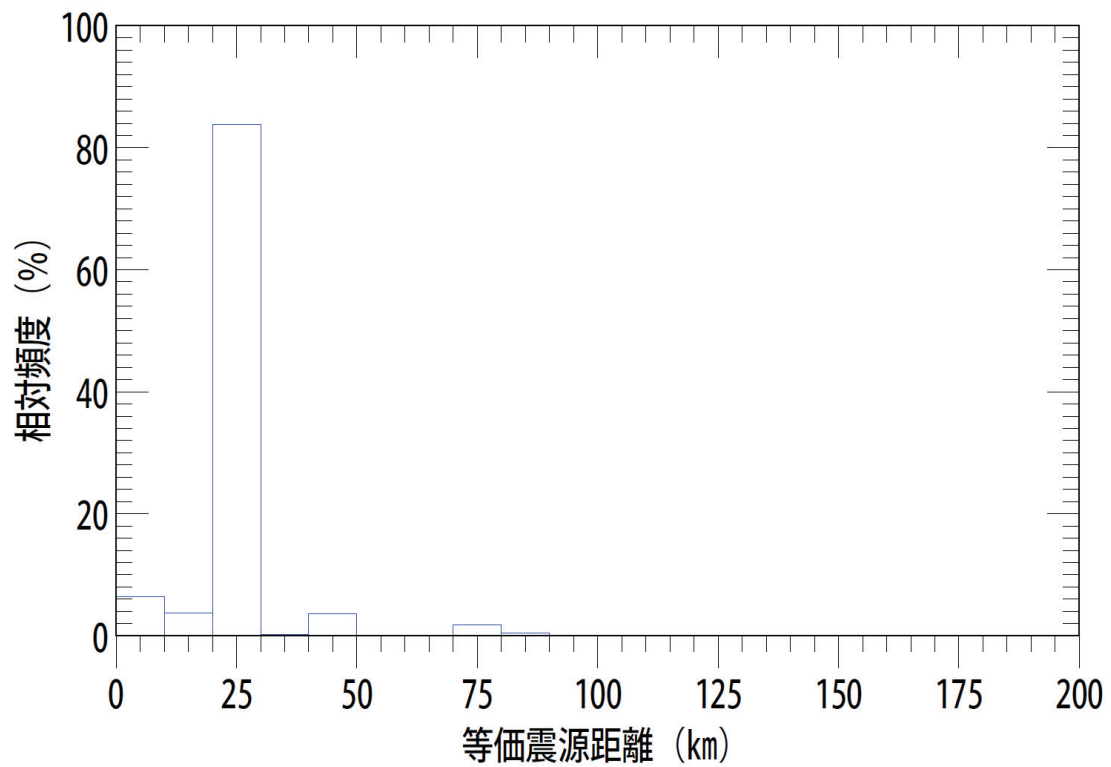
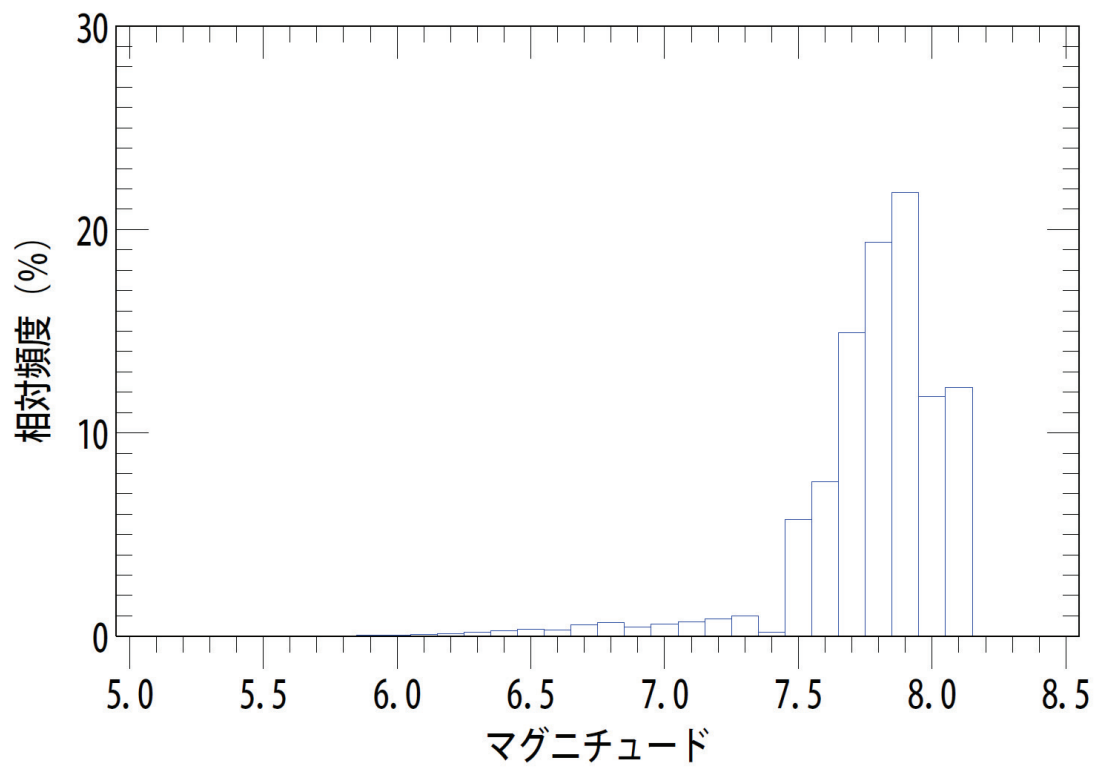


図 3.1.2.4-1(2) 年超過頻度 10^{-4} レベル：周期 1.0 秒で 479gal 以上となる地震の分布
(算術平均ハザード)

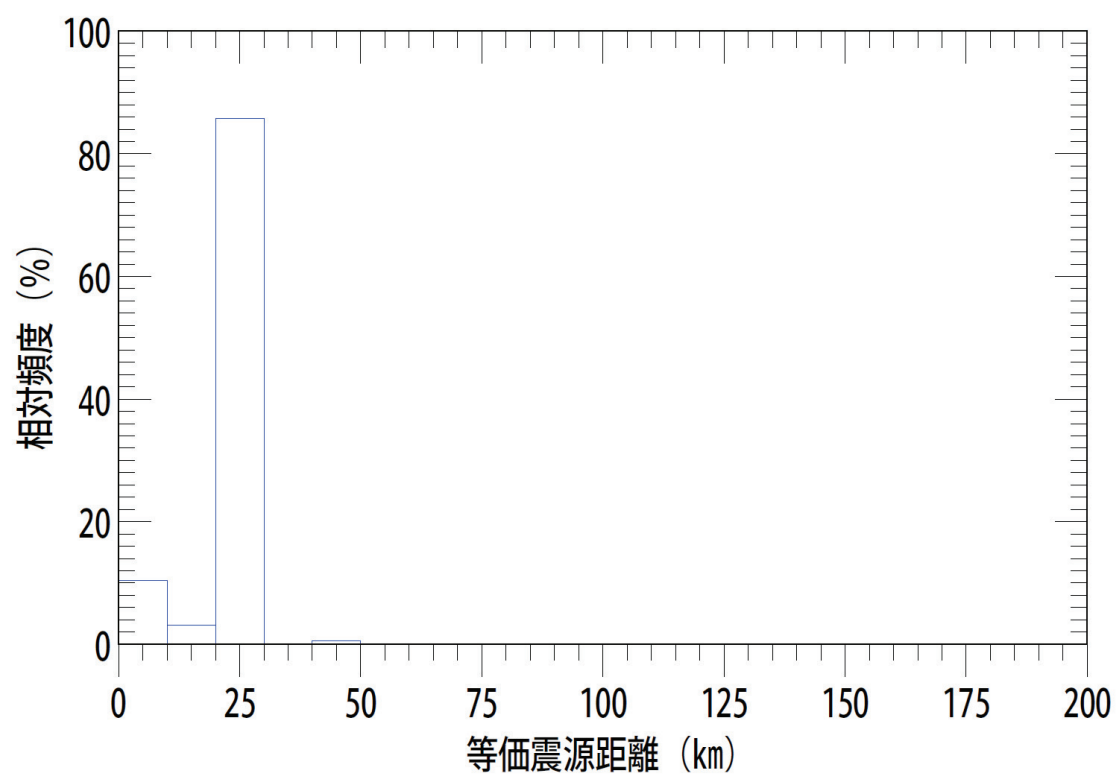
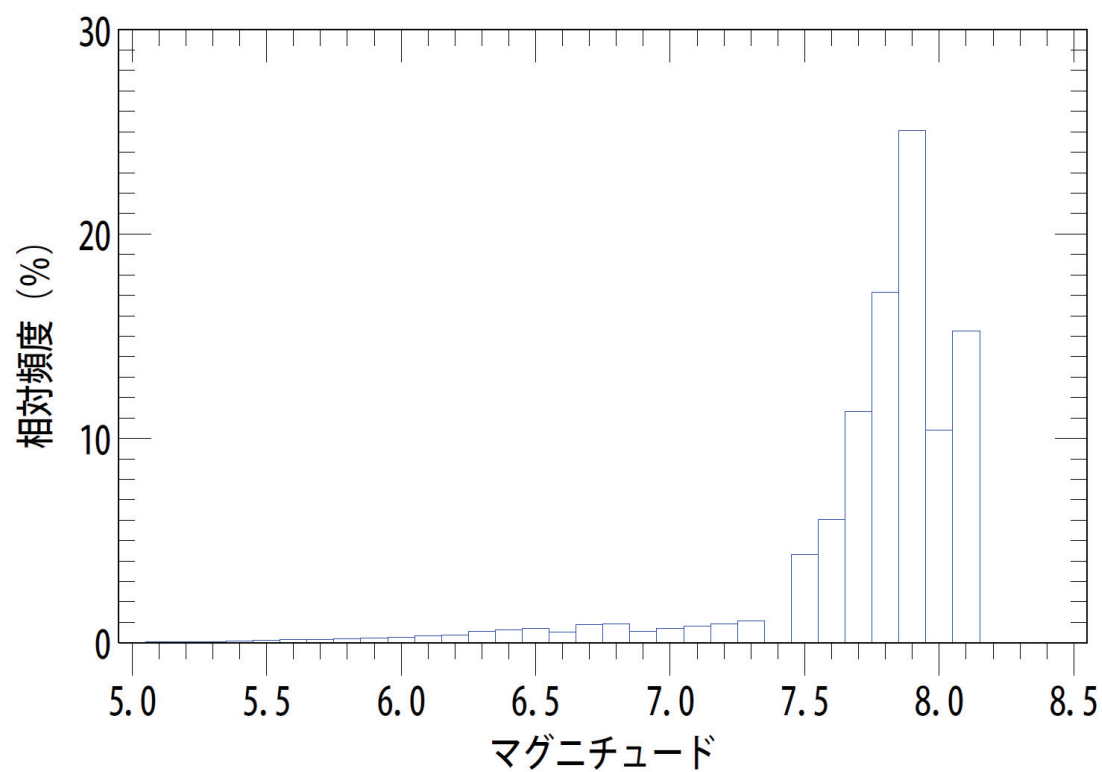


図 3.1.2.4-2(1) 年超過頻度 10^{-5} レベル：周期 0.02 秒で 961gal 以上となる地震の分布
(算術平均ハザード)

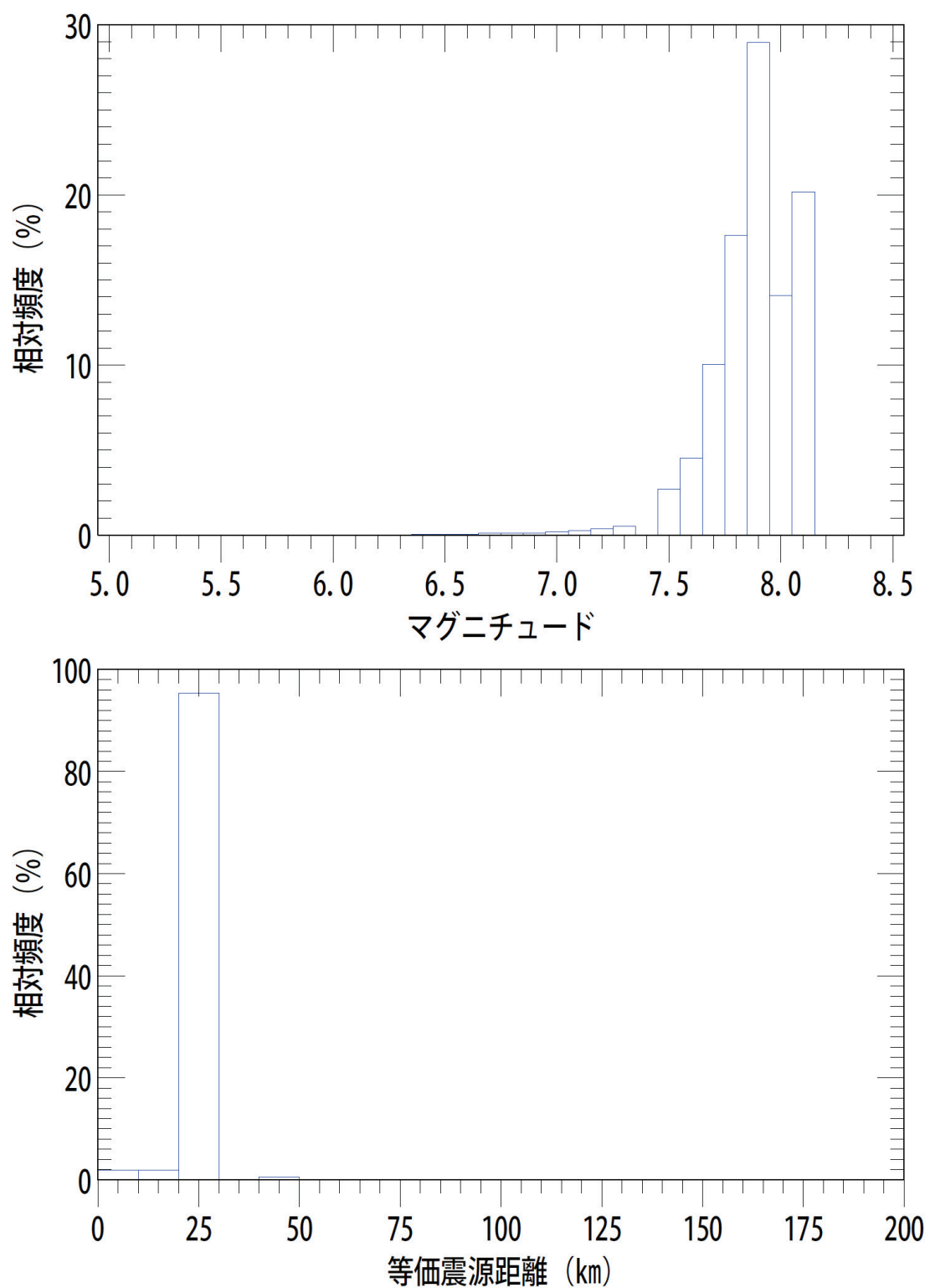


図 3.1.2.4-2(2) 年超過頻度 10^{-5} レベル：周期 1.0 秒で 1183gal 以上となる地震の分布
(算術平均ハザード)

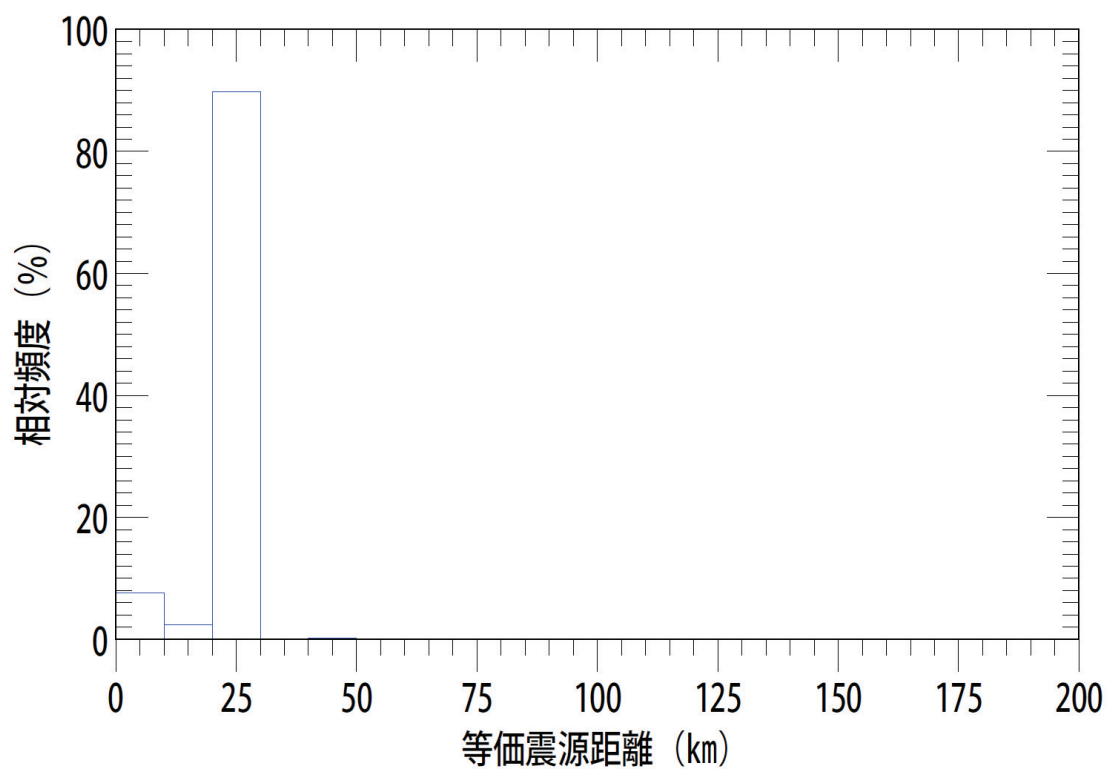
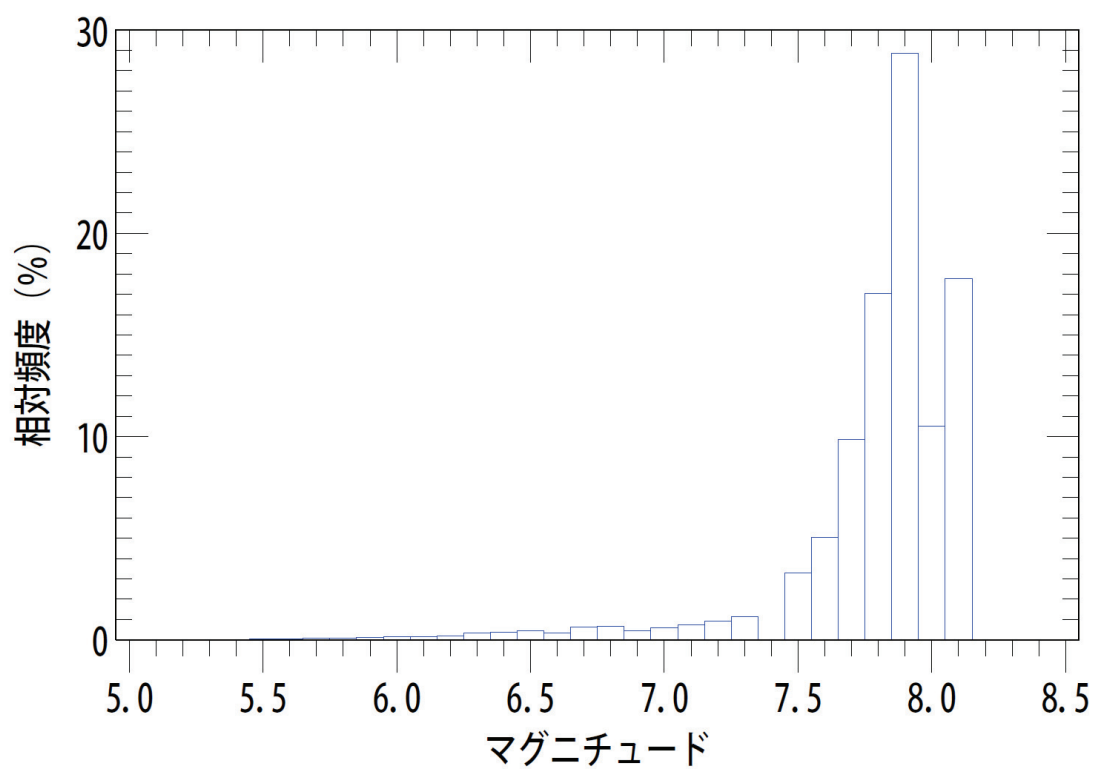


図 3.1.2.4-3(1) 年超過頻度 10^{-6} レベル: 周期 0.02 秒で 1670gal 以上となる地震の分布
(算術平均ハザード)

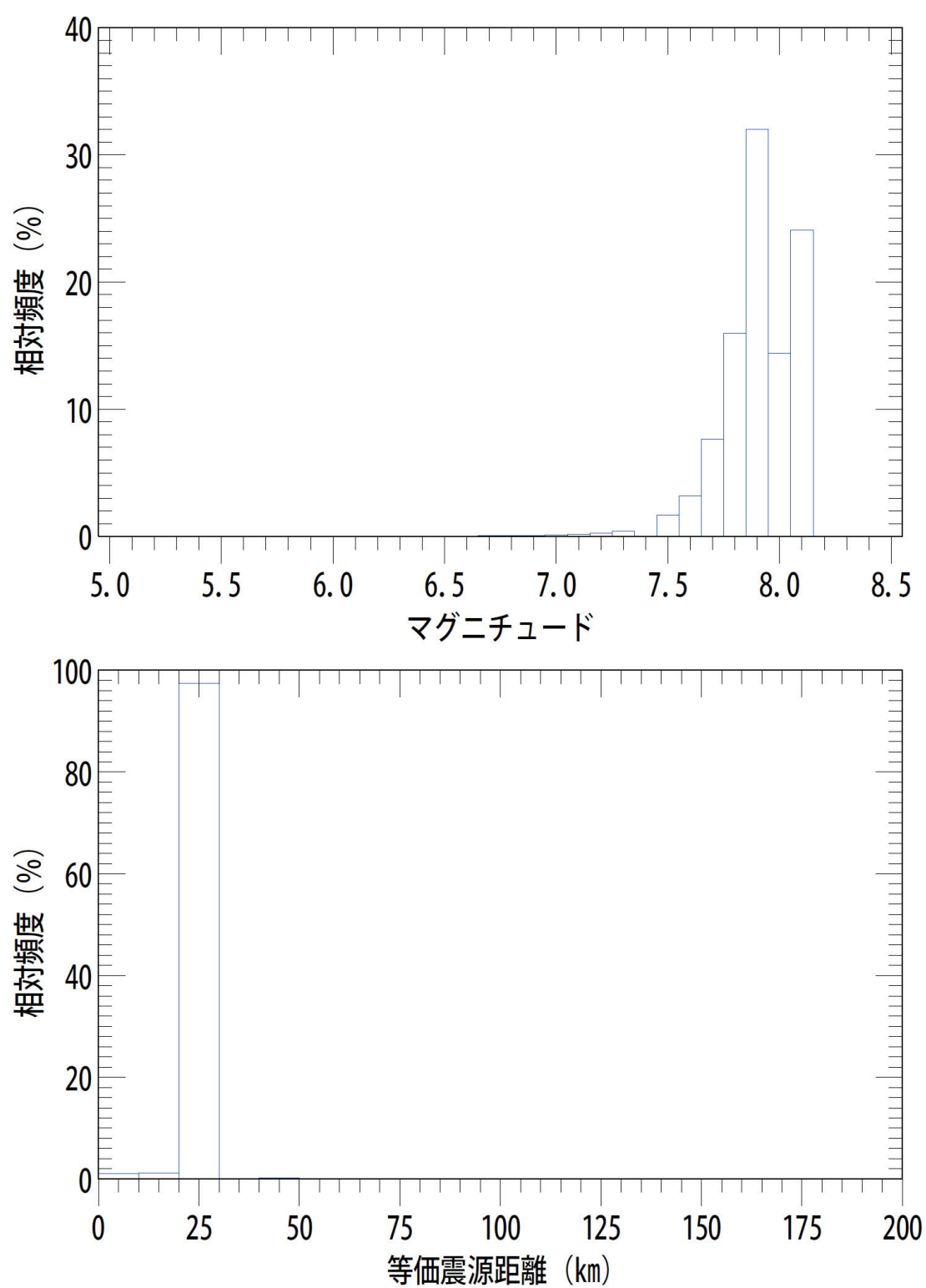


図 3.1.2.4-3(2) 年超過頻度 10^{-6} レベル：周期 1.0 秒で 2096gal 以上となる地震の分布
(算術平均ハザード)

3.1.2.5 模擬地震波の作成方法

模擬地震波は、一様乱数を発生して作成したランダムな位相特性と、一様ハザードスペクトルに適合する振幅を有する時刻歴データとして作成した。この時に振幅の経時特性を与える必要が有る。振幅の経時特性は図 3.1.2.5-1 および式(3.1.2.5-1)～式(3.1.2.5-2)に示す包絡関数を与えることによって表現した。包絡関数としては、Nishimura *et al.*(2001)で提案されているものを用いた。

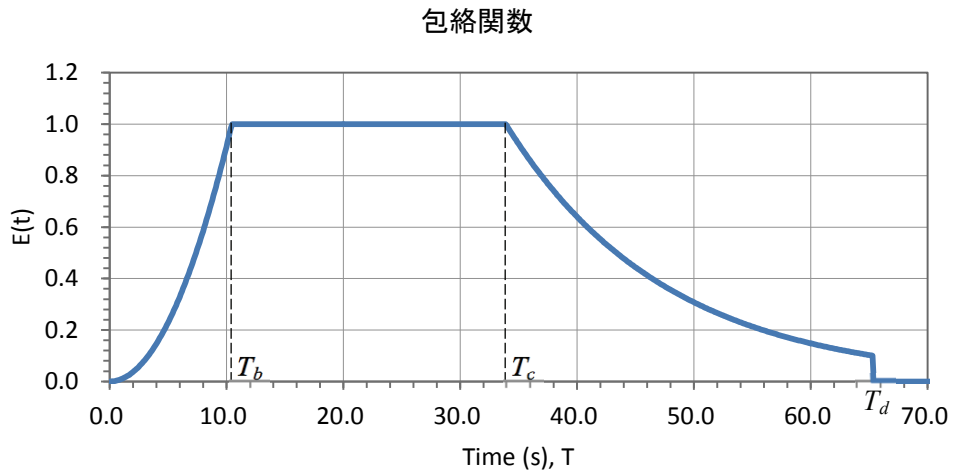


図 3.1.2.5-1 振幅包絡線の経時変化

- ・ 包絡関数のコントロールポイント

$$T_b = 10^{0.5M-2.93} \quad (3.1.2.5-1 \text{ a})$$

$$T_c - T_b = 10^{0.3M-1.0} \quad (3.1.2.5-1 \text{ b})$$

$$T_d - T_c = 10^{0.17M+0.54\log X_{eq}-0.6} \quad (3.1.2.5-1 \text{ c})$$

- ・ 包絡関数

$$E(t) = \begin{cases} (T/T_b)^2 & , \quad 0 \leq T \leq T_b \\ 1.0 & , \quad T_b \leq T \leq T_c \\ \exp\left(\frac{\ln(0.1)}{T_d - T_c}(T - T_c)\right) & , \quad T_c \leq T \leq T_d \end{cases} \quad (3.1.2.5-2)$$

3. 1. 2. 6 模擬地震波の作成

模擬地震波の振幅包絡線の経時変化は、ハザード再分解結果の値である $M=7.9$ 、 $X_{eq}=25(km)$ を式(3.1.2.5-1)に代入して、表 3.1.2.6-1 の通りとした。

耐専式では、解放基盤面における水平動および鉛直動の速度応答スペクトルが、地震基盤における擬似速度応答スペクトル（水平動を共通に使用）に地盤増幅率を乗じて求められている。そこで、鉛直動については図 3.1.2.6-1 に示す両増幅率の比（ α_v / α_s ）を水平動の一樣ハザードスペクトルに乗じることによって得られる鉛直動用の一樣ハザードスペクトルに適合する模擬地震波を作成した。

水平動および鉛直動の一樣ハザードスペクトルのトリパタイト表示を図 3.1.2.6-2 ～図 3.1.2.6-3 に示す。また、一樣ハザードスペクトルの年超過頻度 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ のレベルごとに作成した模擬地震波の適合状況と得られた時刻歴波形を図 3.1.2.6-4～図 3.1.2.6-15 に示す。作成した模擬地震波は、目標応答スペクトルに良く適合していることが確認できる。

次に、 S_s 相当波の模擬地震波を作成した。 S_s は年超過頻度 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ の中間値となる応答スペクトルに適合する地震動として設定した。水平動および鉛直動の S_s 相当波用に作成した一樣ハザードスペクトルのトリパタイト表示を図 3.1.2.6-16～図 3.1.2.6-17 に示す。 S_s 相当波の模擬地震波の応答スペクトル適合状況と得られた時刻歴波形を図 3.1.2.6-18～図 3.1.2.6-21 に示す。 S_s 相当波についても、作成した模擬地震波は目標応答スペクトルに良く適合していることが確認できる。

表 3.1.2.6-1 各年超過頻度レベルの模擬地震波の振幅包絡線の経時変化

年超過頻度	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時的变化 (s)		
		T_b	T_c	T_d
10^{-4}	65.4	10.5	33.9	65.4
10^{-5}	65.4	10.5	33.9	65.4
10^{-6}	65.4	10.5	33.9	65.4

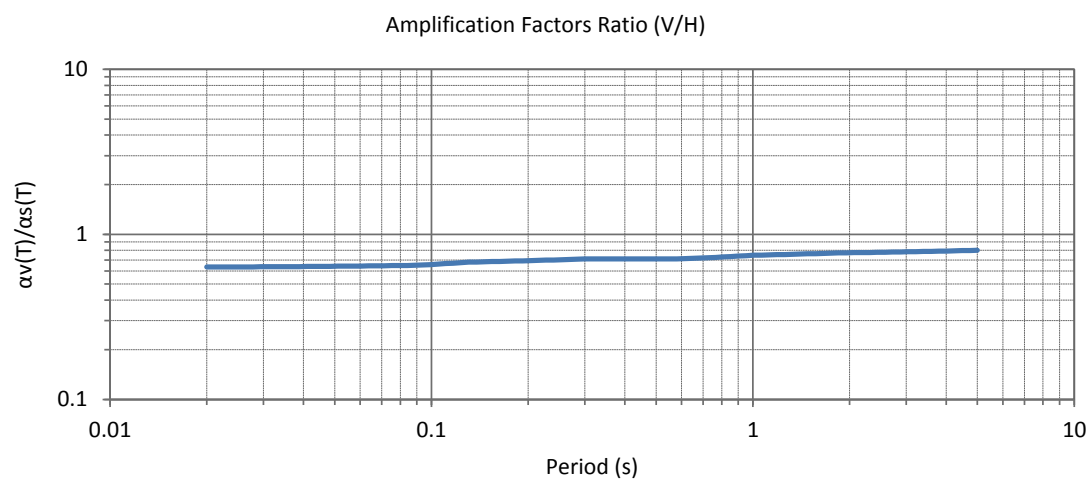


図 3.1.2.6-1 耐専式の水平動増幅率に対する鉛直動増幅率の比率

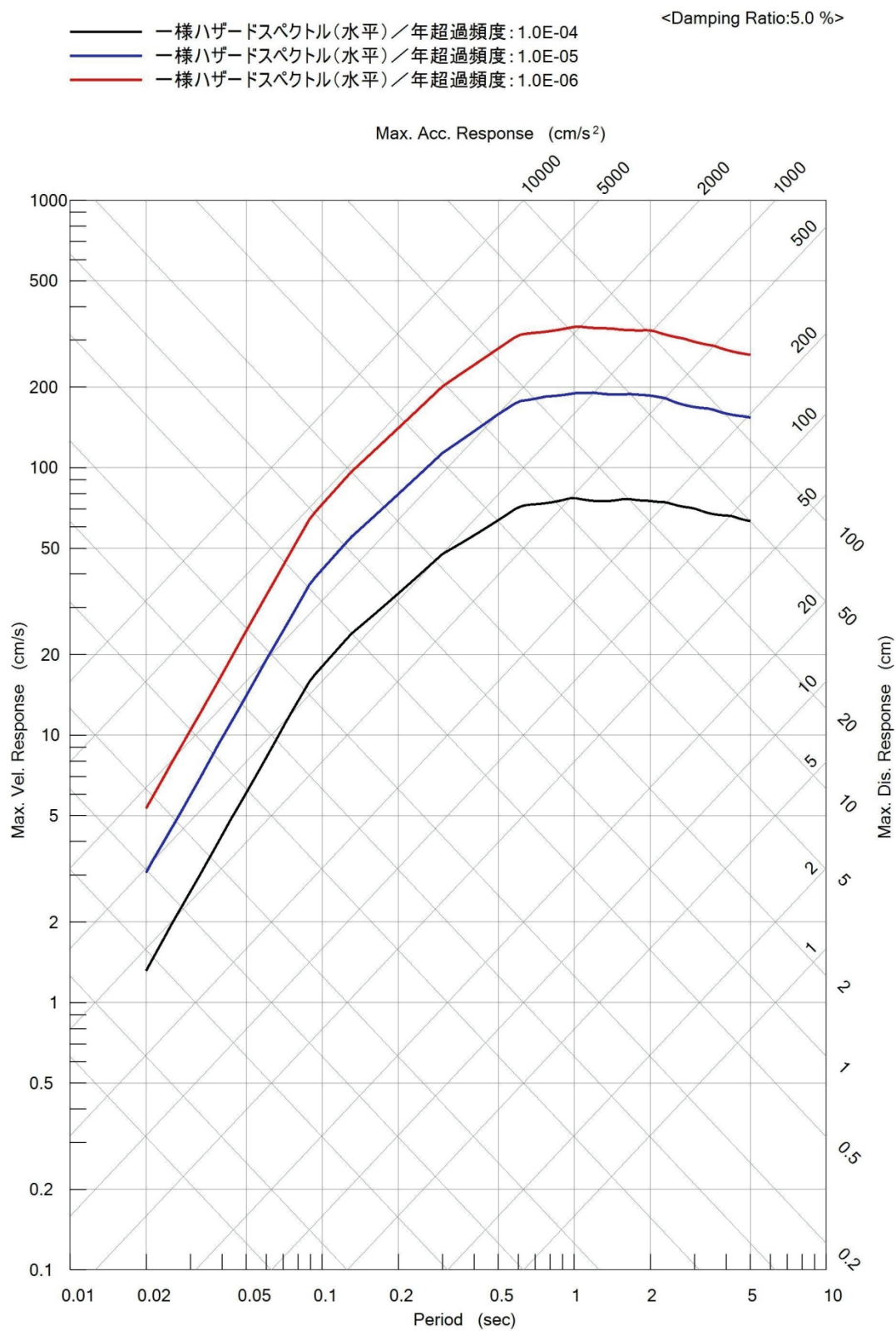


図 3.1.2.6-2 水平動の一樣ハザードスペクトルのトリパタイト表示

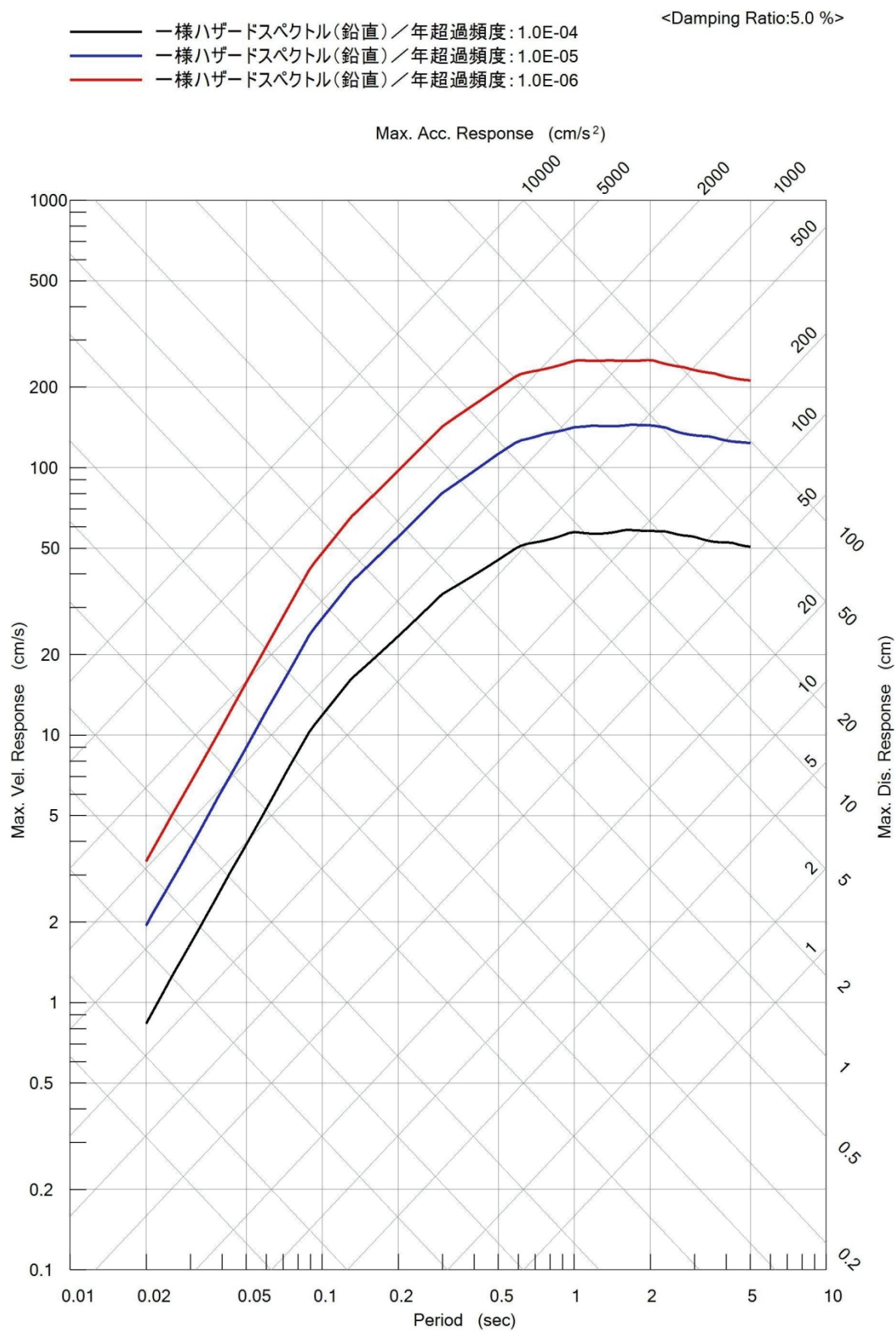


図 3.1.2.6-3 鉛直動の一樣ハザードスペクトルのトリパタイト表示

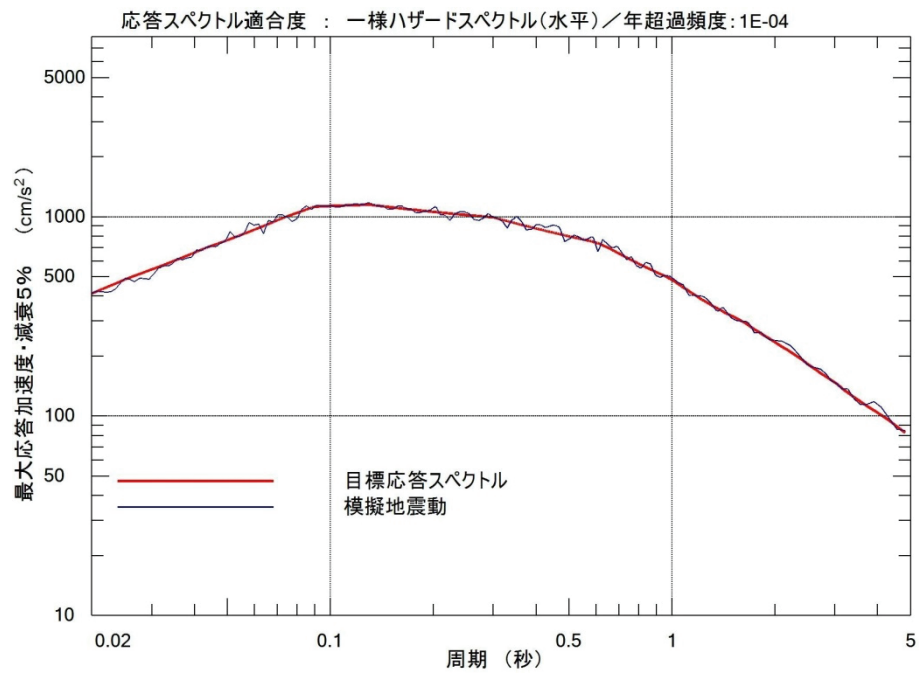


図 3.1.2.6-4 年超過頻度 10^{-4} の水平動応答スペクトル適合状況

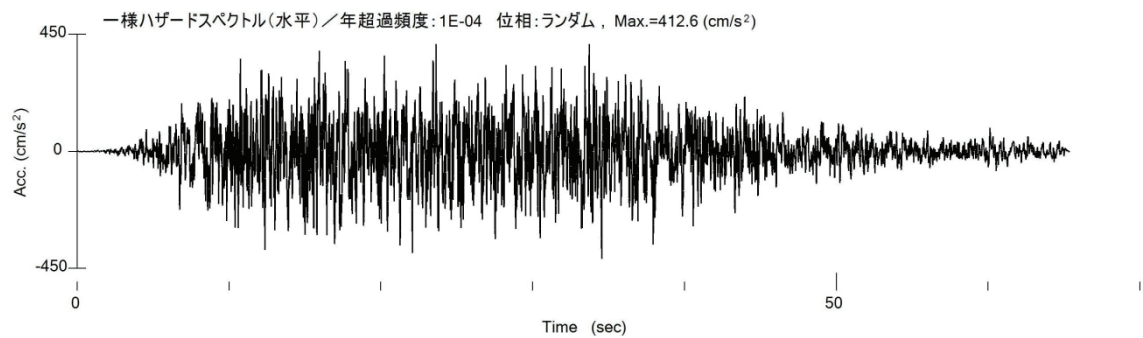


図 3.1.2.6-5 年超過頻度 10^{-4} の水平動模擬地震波時刻歴

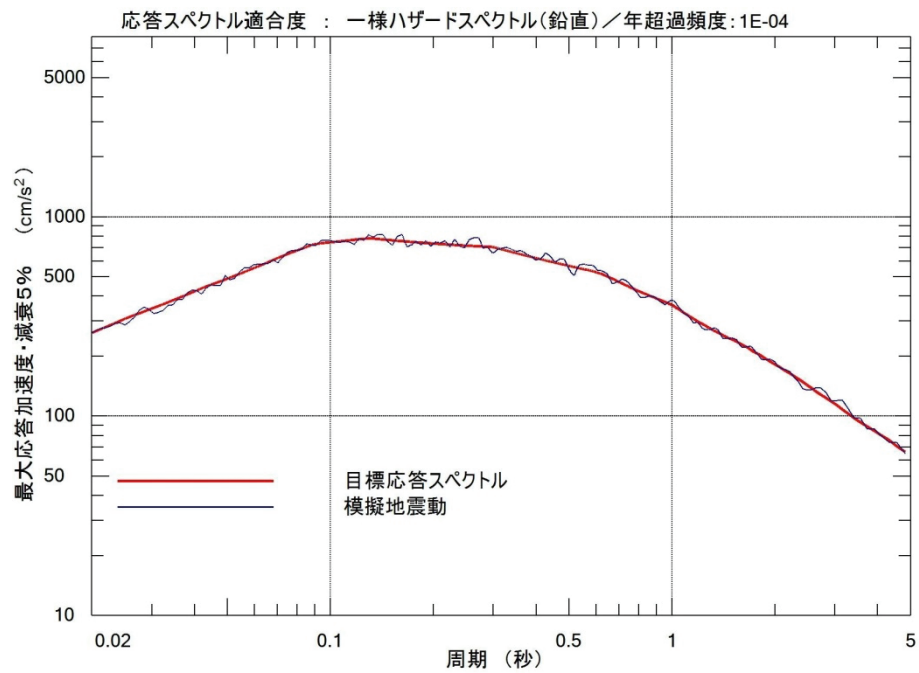


図 3.1.2.6-6 年超過頻度 10^{-4} の鉛直動応答スペクトル適合状況

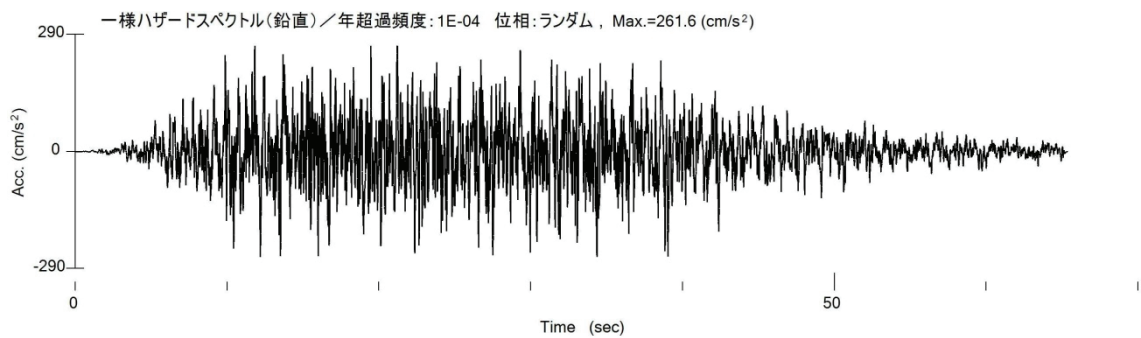


図 3.1.2.6-7 年超過頻度 10^{-4} の鉛直動模擬地震波時刻歴

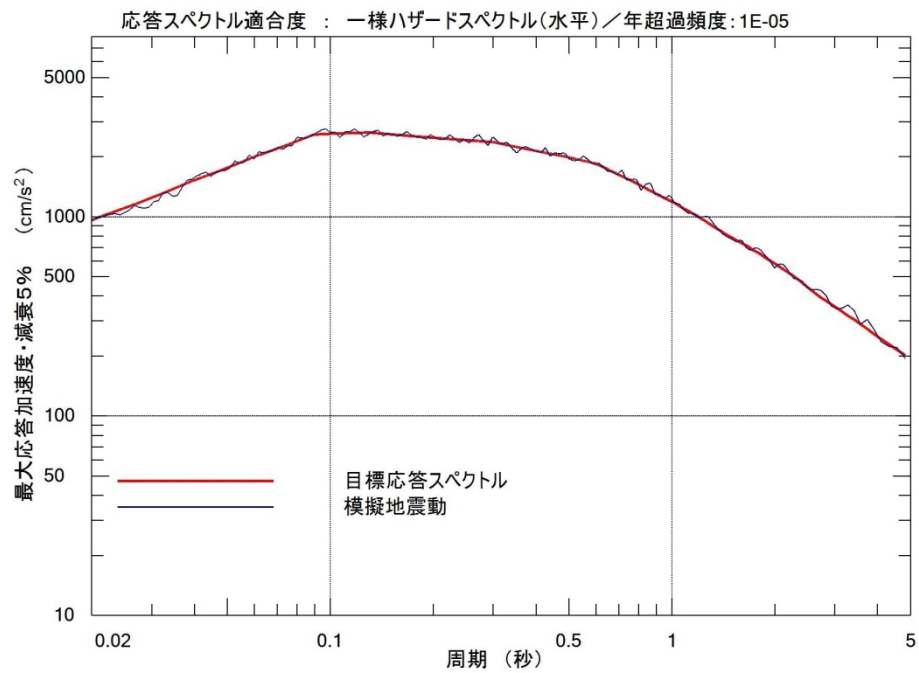


図 3.1.2.6-8 年超過頻度 10^{-5} の水平動応答スペクトル適合状況

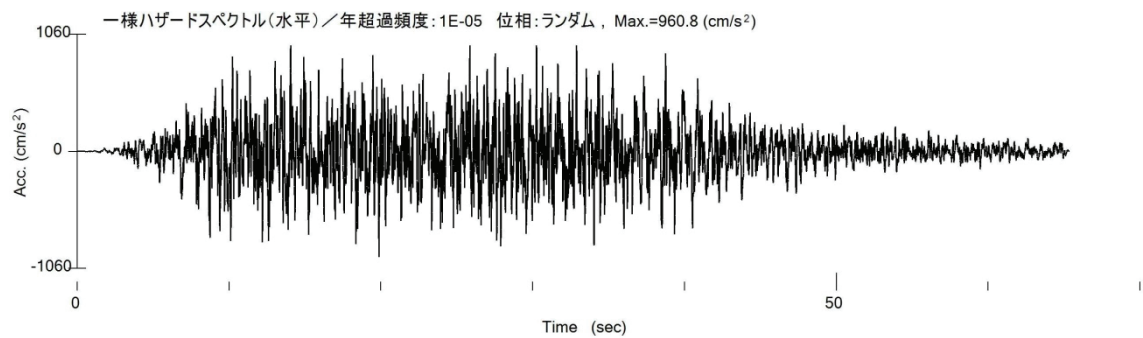


図 3.1.2.6-9 年超過頻度 10^{-5} の水平動模擬地震波時刻歴

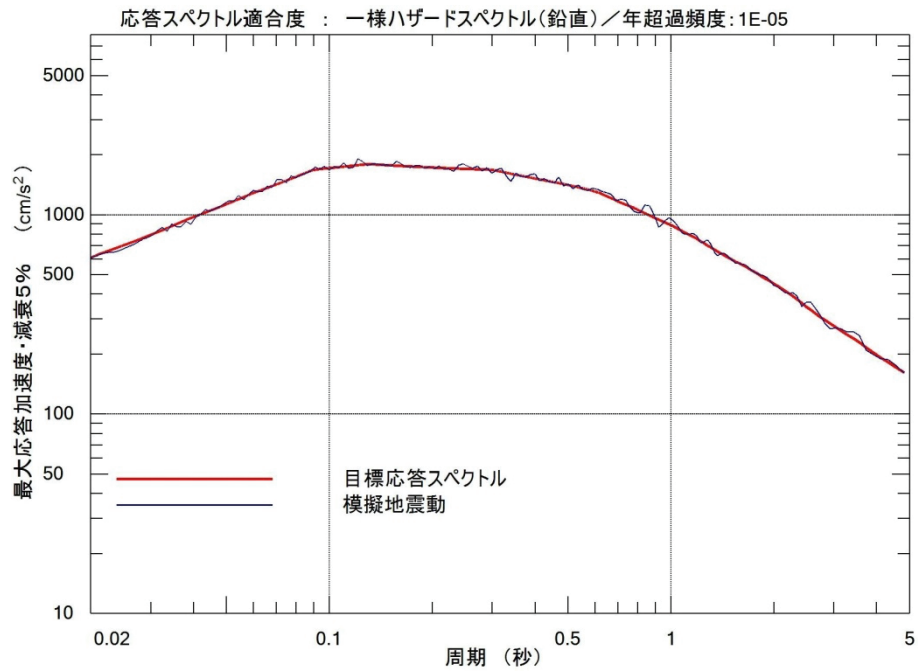


図 3.1.2.6-10 年超過頻度 10^{-5} の鉛直動応答スペクトル適合状況

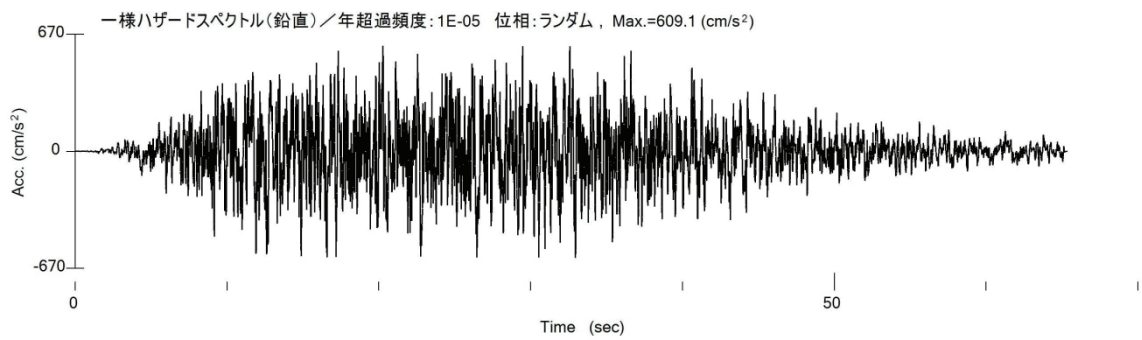


図 3.1.2.6-11 年超過頻度 10^{-5} の鉛直動模擬地震波時刻歴

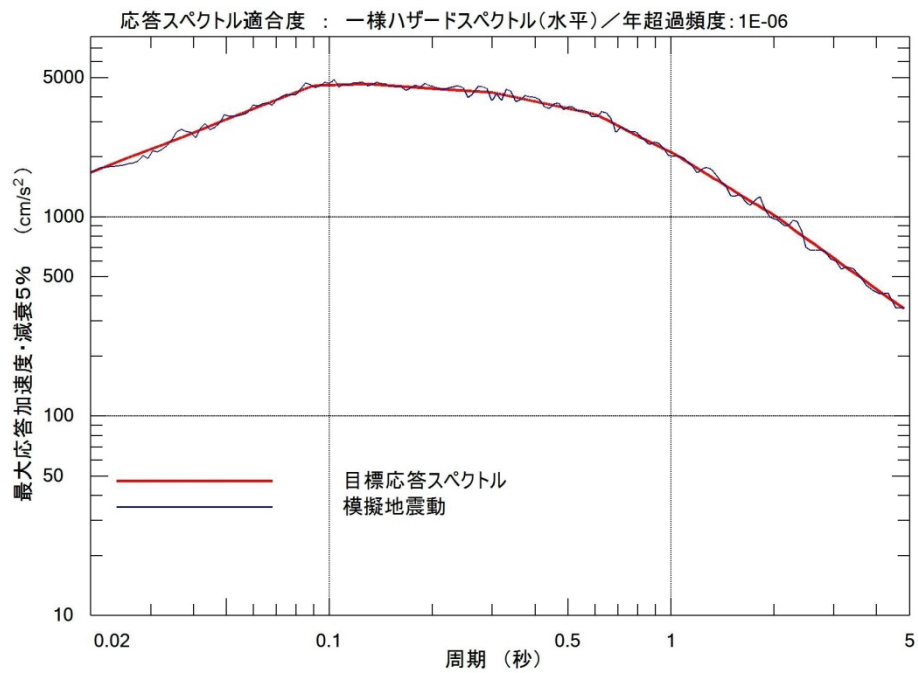


図 3.1.2.6-12 年超過頻度 10^{-6} の水平動応答スペクトル適合状況

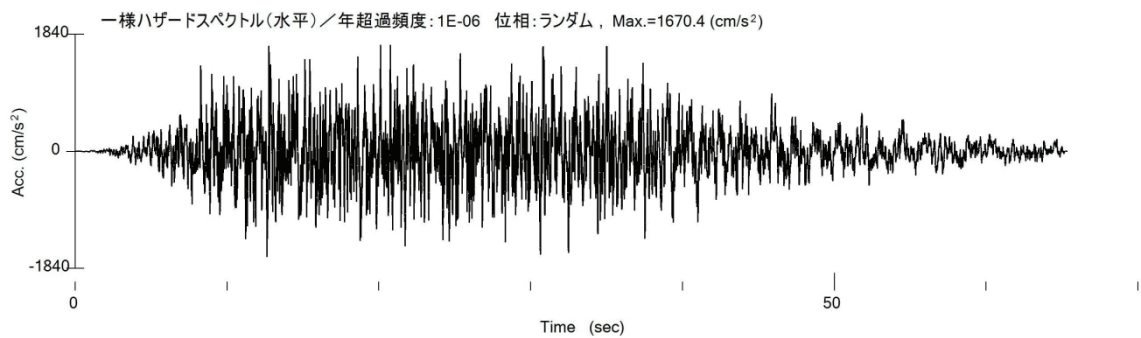


図 3.1.2.6-13 年超過頻度 10^{-6} の水平動模擬地震波時刻歴

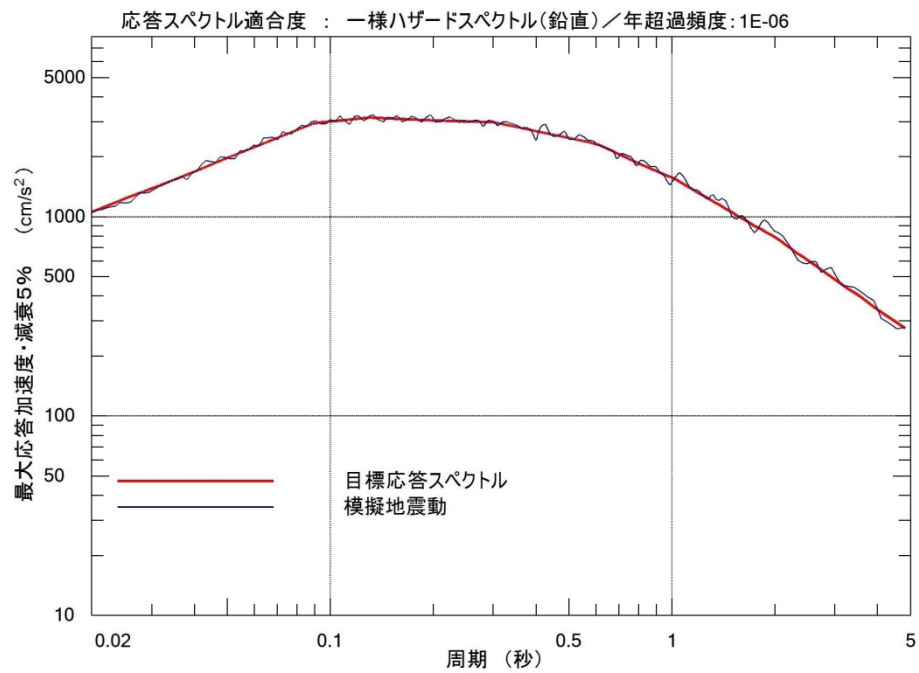


図 3.1.2.6-14 年超過頻度 10^{-6} の鉛直動応答スペクトル適合状況

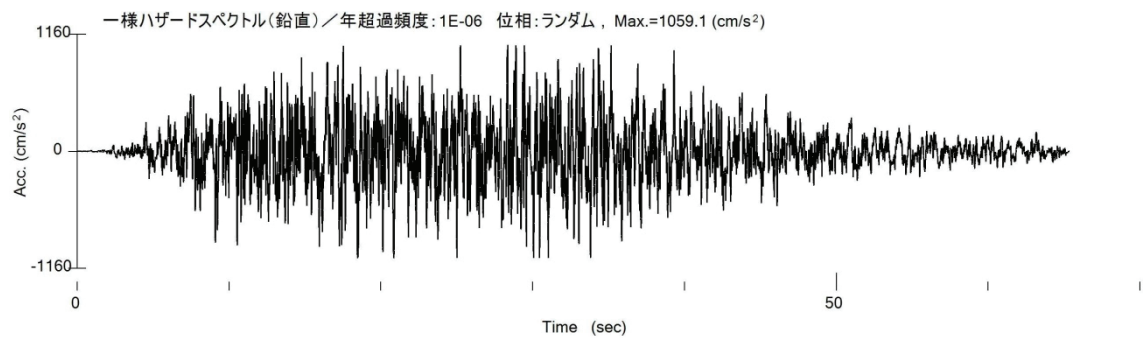


図 3.1.2.6-15 年超過頻度 10^{-6} の鉛直動模擬地震波時刻歴

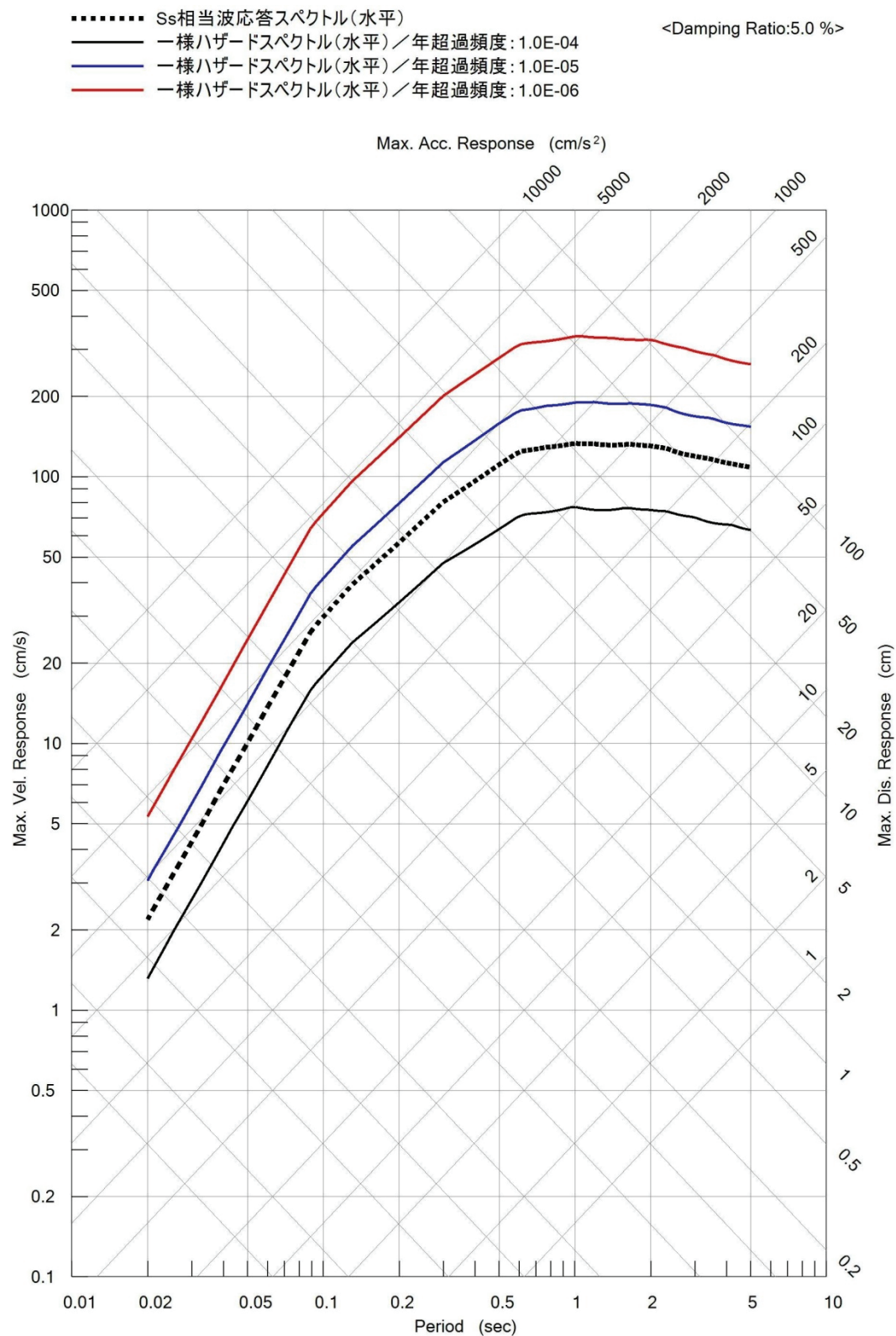


図 3.1.2.6-16 水平動の Ss 相当波応答スペクトルのトリパタイト表示

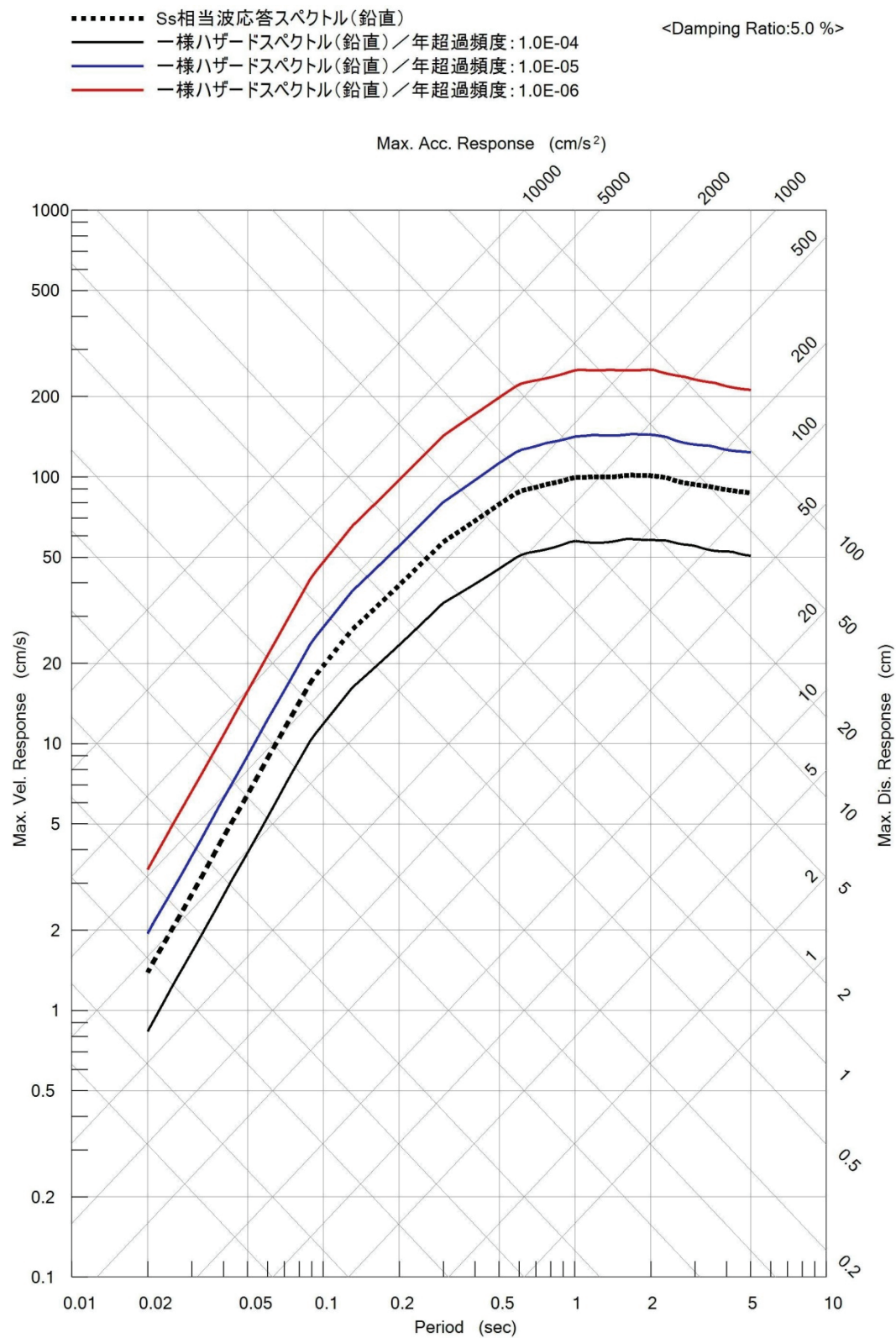


図 3.1.2.6-17 鉛直動の Ss 相当波応答スペクトルのトリパタイト表示

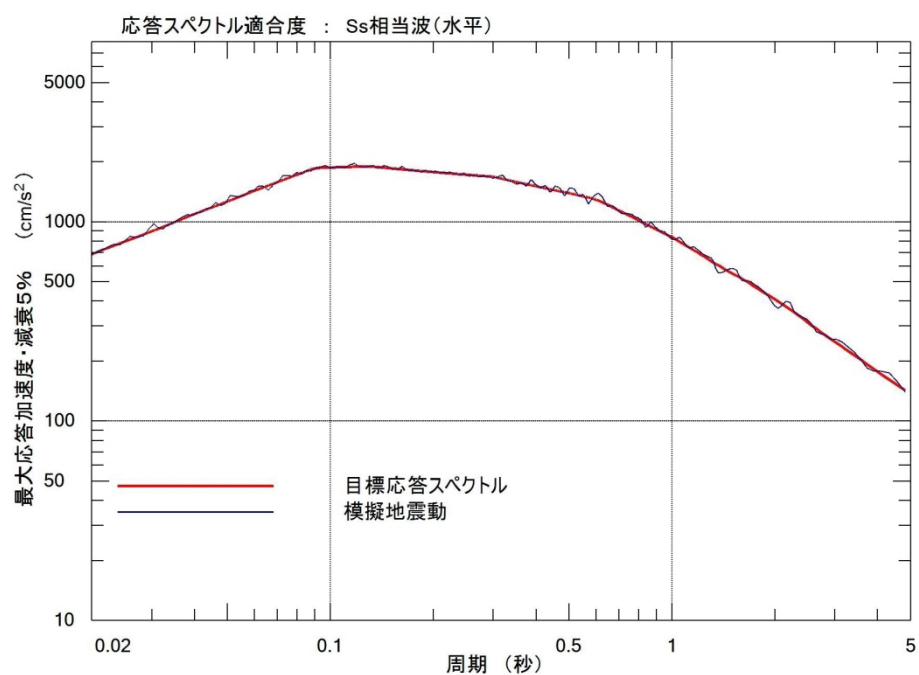


図 3.1.2.6-18 Ss 相当波の水平動応答スペクトル適合状況

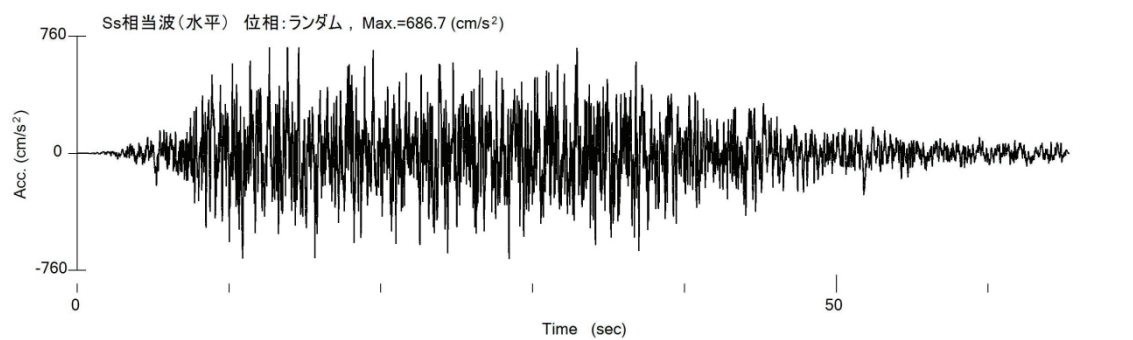


図 3.1.2.6-19 Ss 相当波の水平動模擬地震波時刻歴

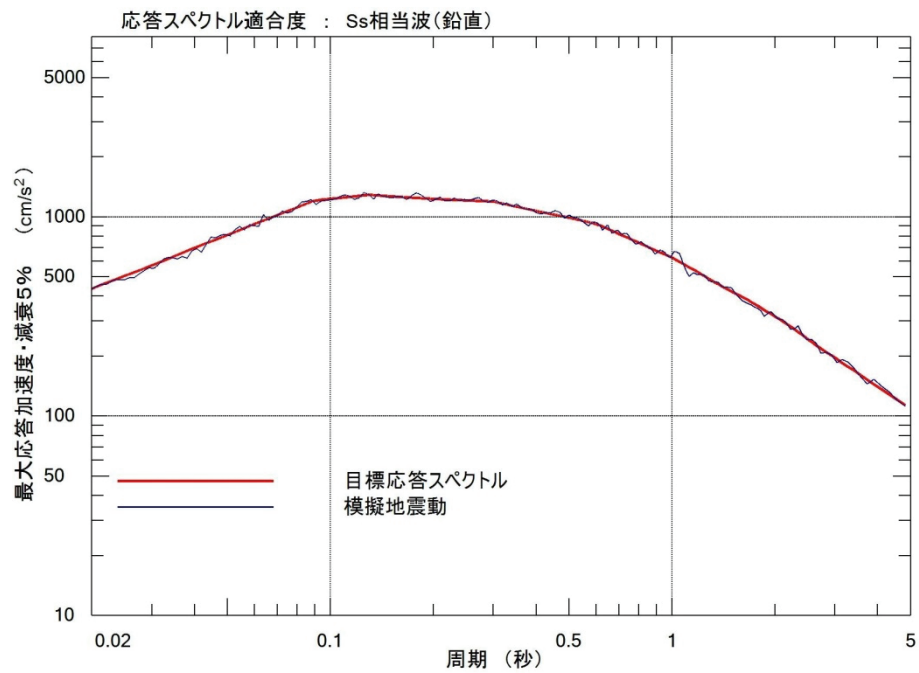


図 3.1.2.6-20 Ss 相当波の鉛直動応答スペクトル適合状況

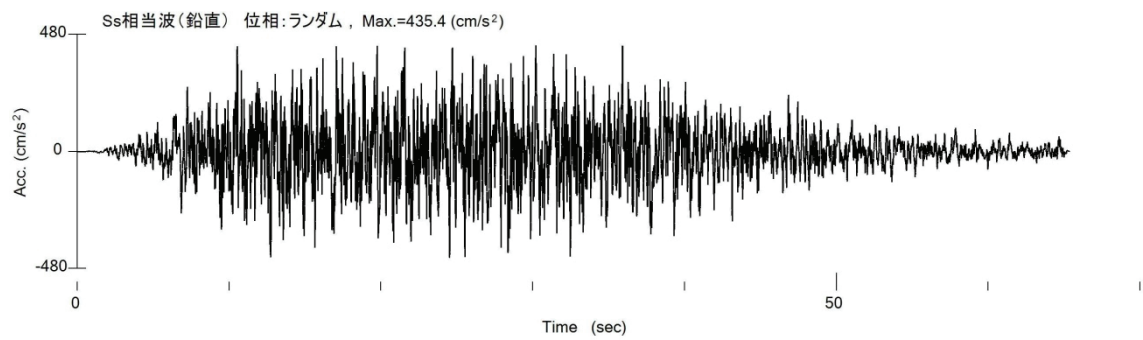


図 3.1.2.6-21 Ss 相当波の鉛直動模擬地震波時刻歴

【参考文献】

- 1) Noda, S., Yashiro, K., Takahashi, K., Takemura, M., Ohno, S. Tohdo, M. and Watanabe, T. : Response Spectra For Design Purpose of Stiff Structures on Rock Sites, OECD Workshop on the Relations Between Seismological Data and Seismic Engineering, pp.399-408, 2002.
- 2) Nishimura, Isao; Noda, Shizuo; Takahashi, Katsuya; Takemura, Masayuki; Ohno, Susumu; Tohdo, Masanobu; Watanabe, Takahide : Response Spectra for Design Purpose of Stiff Structures On Rock Sites, Transactions of SMiRT 16, Paper No. 1133, 2001.

3. 1. 3 検討用施設の設定

衝撃作用に対する鉄筋コンクリート版の損傷確率を算定するため、図 3.1.3-1 および表 3.1.3-2 に示す 2 種類の鉄筋コンクリート版を設定した。構造物 A、B いずれも高さ 6m であり、それぞれの幅は 6m および 10m である。構造物 A の版厚は 1m、鉄筋比は 1.2% である。構造物 B の版厚は 0.2m、鉄筋比は 0.4% とした。コンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度はそれぞれ 24N/mm² および 345N/mm² である。

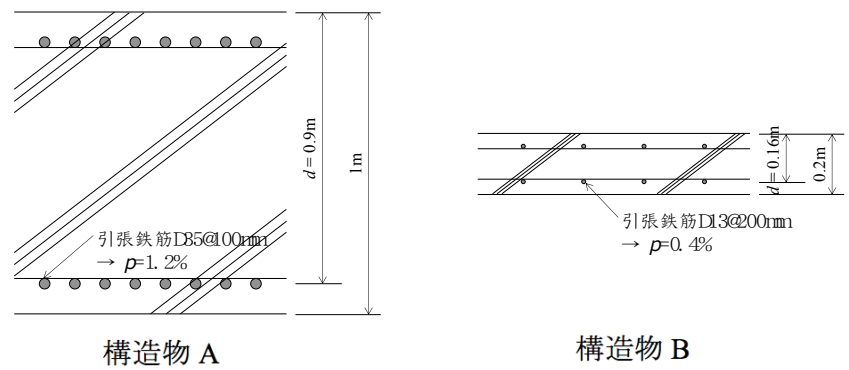


図 3.1.3-1 対象施設の断面図

表 3.1.3-1 構造物の諸元

構造物	断面寸法	コンクリートの 圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋比 (%)
A	高さ 6m, 幅 6m, 厚さ 1m	24	1.2
B	高さ 6m, 幅 10m, 厚さ 0.2m	24	0.4

表 3.1.3-1 構造物の力学特性

構造物	バネ係数 (kN/m)	曲げ耐力 (kN)	押し抜きせん断 耐力 (kN)	固有周期 (ms)
A	20,400,000	41,600	6501	6.9
B	99,900	640	507	48.0

表 3.1.3-1 に、バネ係数、曲げ耐力および押し抜きせん断耐力を示す。なお、押し抜きせん断耐力の算定に際しては、載荷面の直径を 30cm と仮定した。また、集中荷重を版中央に受ける場合の荷重質量係数 K_{LM} は 1.0 となり、1 質点系モデルの固有周期は表に示す値となる。表に示した曲げ耐力および押し抜きせん断耐力の評価式などは 3.4.2.2 に示している。