

原子力発電所の斜面安定性評価を踏まえた斜面の実裕度に関する考察

四国電力(株) 土木建築部 鈴木 俊輔

キーワード: 斜面安定性
安全率
安全裕度

Key Words: slope instability
safety factor
safety margin

Safety margins considered in slope instability assessment of nuclear installations

Shikoku Electric Power Co.,Inc., Civil & Architectural Engineering Department
Shunsuke Suzuki

Abstract

The stability of slopes located in nuclear installations needs to be assessed since landslides could seriously affect structures, systems and components important to safety. In general, conservative safety margins are used in the assessment of critical facilities in nuclear installations, as well as in the assessment of slope instability. However, the actual safety margins are not always quantified. In particular, there are few reports on the actual margins of slope instability assessment. In this paper, we discuss the actual safety margin that slope instability assessment takes into account, using as an example the seismic instability assessment of the slope around Unit 3 of the Ikata Power Plant, which has been approved by the Nuclear Regulation Authority of Japan.

1. はじめに

原子力発電所における重要施設の周辺斜面は、地震発生時に崩壊し、施設の安全機能が重大な影響を受けないことを確認するため、対象斜面の耐震安定性評価を実施し、安全性を確認している。

一般的に、原子力発電所の重要施設に対する評価においては、保守的に安全裕度をもった設計・評価がなされているが、周辺斜面の耐震安定性評価においても、種々の安全裕度を考慮した評価がなされている。しかしながら、こういった安全裕度をもった評価結果が、実際にどの程度の裕度を有しているか（実裕度）については、必ずしも定量化されておらず、特に周辺斜面について実裕度を検討した報告は多くない。そこで、本報告では、原子力発電所のうち、原子力規制委員会による審査を経て設置許可を受けた実績を持つ伊方発電所 3 号機の周辺斜面の耐震安定性評価を例にとって、原子力発電所の周辺斜面が有する実裕度に関する考察を報告する。

2. 周辺斜面の耐震安定性評価について

原子力発電所の周辺斜面に対する耐震安定性評価においては、基準地震動 S_s に対して、動的解析によるすべり安全率が 1.2 以上であることを確認することとなっている。これは、発電用軽水型原子炉施設の設置許可段階に関わる審査において周辺斜面の安定性評価の妥当性を厳格に確認するうえで、原子力規制委員会が定めた「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」（以下、「審査ガイド」という）の評価方針に基づくものである。

伊方発電所 3 号機は、原子力規制委員会の審査を経て設置変更許可を受けており、当該審査における周辺斜面の安定性評価のうち、安全率が最も小さい斜面の評価結果の概要を図 1 に示す。

安全率が最も小さい斜面は、原子炉建屋の南北断面における斜面であり、図 1 に示すとおり、伊方発電所の基準地震動 S_s に対する当該断面の最小安全率は 1.3 となっている。評価対象となる他の斜面を含む多くのすべり面では、安全率が 2~4 程度の大きな安全率を有しており、安全率が最も小さい斜面であっても、安全率は 1.2 を上回っていることから、審査ガイドに基づき周辺斜面の安全性が確認されており、設置変更許可を受けてい

る。

一方、当該評価では種々の安全裕度が考慮されており、安全率はそれらの安全裕度を考慮したうえで算出されていることから、実際の安全率はもっと大きくなると考えられる。周辺斜面の耐震安定性評価において考慮されている保守的な安全裕度を、以降に整理する。

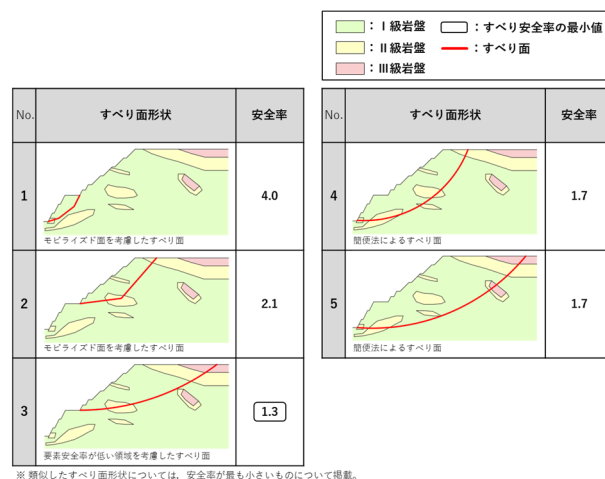


図 1 伊方発電所 3 号機の周辺斜面の安定性評価

3. 保守的に安全裕度を考慮して設計されている内容について

伊方発電所 3 号機の周辺斜面の耐震安定性評価において考慮されている保守性について、項目ごとに整理する。なお、入力地震動として評価に用いる基準地震動 S_s についても、その設定にあたっては、アスペリティの位置や応力降下量、断層長さなど、種々の保守性が考慮されて設定された地震動であるが、ここでは、基準地震動 S_s が有する保守性については除外し、周辺斜面の耐震安定性評価において考慮されている保守性のみを論じることとする。

3.1 岩盤のせん断強度について

伊方発電所の地盤は、主に三波川変成岩類の塩基性片岩からなる。原子炉建屋の基礎地盤や周辺斜面は CH 級の堅硬な岩盤が主に分布しており、片理面の走向は $N30^{\circ} \sim 40^{\circ} W$ で南西方向に $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ で緩やかに傾斜している。三波川変成岩類は、一般的に強度異方性を有しており、片理面に沿う方向はせん断強度が小さい弱面となることが知られている。

伊方発電所では、岩盤の強度特性を把握するた

めに、3号炉建設時において原位置せん断試験を実施しており、岩盤を幅60cm、長さ60cm、高さ30cmのブロック状に切り出し、上述した三波川変成岩類の片理面による異方性を考慮して、片理面に沿う方向の試験(4ブロック)と片理面を一部切る方向の試験(1ブロック)を実施している。原位置せん断試験のイメージ図を図2に、試験結果を図3にそれぞれ示す。

図3の原位置せん断試験結果のとおり、片理面に沿う方向と片理面を一部切る方向の試験結果を比較すると、片理面に沿う方向のせん断強度は有意に小さく、弱面となることがわかる。片理面に沿う方向のせん断強度は $10\text{kg}/\text{cm}^2$ であるのに対し、片理面を一部切る方向のせん断強度は、内部摩擦角が同一と仮定すると約5倍の $52\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度となる。さらに、片理面を一部切る方向の試験では、最終的にジャッキ能力限界まで荷重をかけても明瞭な破壊点を確認されなかったことから、実際のせん断強度はさらに大きな値となる。

伊方発電所3号機の設置変更許可における評価においては、弱面である片理面に沿う方向の試験結果に基づき、せん断強度を $10\text{kg}/\text{cm}^2$ と設定して安全率を算出している。

ところが、片理面の走向・傾斜を踏まえると、図1に示した安全率が最も小さい1.3となる原子炉建屋の南北断面は、すべり面が片理面に沿う方向ではないため、実際の安全率としては片理面を一部切る方向のせん断強度を適用する方が合理的である。

以上より、伊方発電所3号機の設置変更許可で示されている安全率には、弱面のせん断強度を使用しているという点で、保守性が考慮されていることとなる。

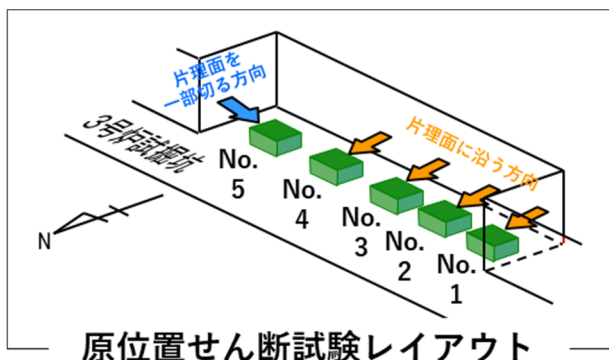


図2 原位置せん断試験のイメージ図

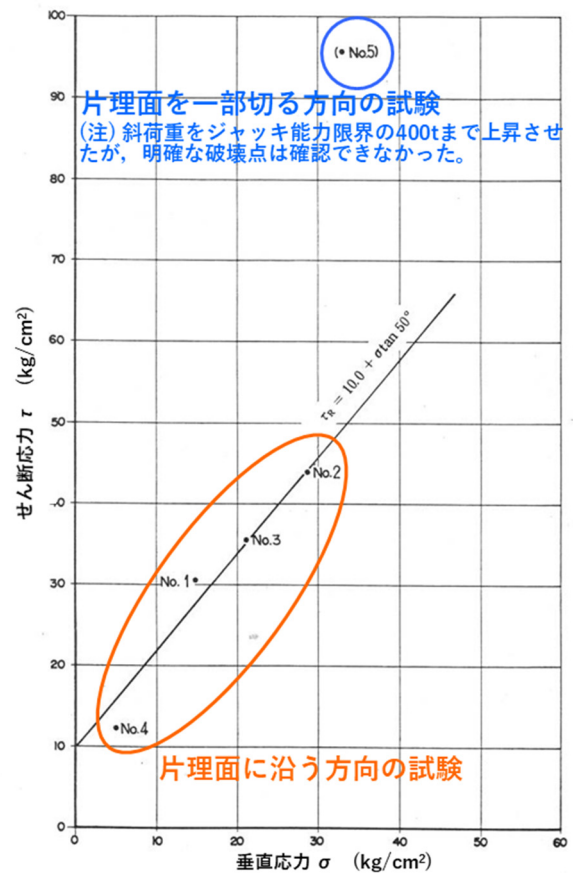


図3 原位置せん断試験結果

3.2 すべり面の側方の抵抗について

伊方発電所3号機の設置変更許可における評価では、2次元断面による周辺斜面の耐震安定性評価を実施している。これは、2次元断面の奥行き方向にすべり面が無限に続く平面ひずみ状態を仮定した解析となり、得られる安全率もすべり面が奥行き方向に無限に続くとした場合の安全率となる。しかし、現実の斜面のすべり形状は3次元形状となり、側面の抵抗を有することから、2次元断面による評価は側面の抵抗を考慮していないという点で保守性を持った評価となっている。現実の3次元形状のすべりを2次元断面の評価で実施することにより考慮される安全裕度のイメージを図4に示す。図4で示したとおり、2次元断面による評価では、すべりに対する抵抗力としてすべり底面の抵抗力しか考慮されないが、現実のすべり形状では底面に加えて側面の抵抗力が考慮されることから、実際の安全率は2次元断面による評価より大きくなる。

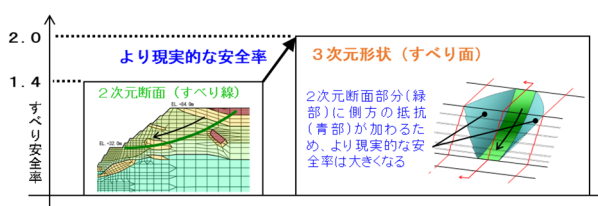


図4 2次元断面評価における安全裕度の概念図

3.3 斜面の保護工について

原子力発電所の周辺斜面は、鉄筋コンクリート製擁壁や格子柵、ロックボルト、ロックアンカー等で保護されている。伊方発電所3号機の原子炉建屋の周辺斜面についても、これら保護工が設置されており、緊張力のあるロックアンカーについては代表箇所にて常時計測管理がなされている。

周辺斜面の耐震安定性評価においては、こういった斜面の保護工は考慮されずに解析がなされており、安全率は保護工がない状態での安全率となっていることから、保守性を有していると考えることができる。

以上、代表的な保守性を3つ挙げたが、その他にも、すべり面上の直応力が少しでも引張応力となると直ちにせん断強度をゼロとするなど、周辺斜面の耐震安定性評価においては種々の保守性が考慮されている。

また、斜面の耐震安定性評価は、線形解析により実施しているが、基準地震動のような大きな地震力が作用する場合には、線形解析では過大な応力が発生することで実現象以上の滑動力が発生してしまう。すなわち、本来地盤が持つ非線形特性により、大きな地震力が作用した場合には地盤が非線形化し、応力が分散されるが、線形解析では応力の分散がなされず、過度な滑動力が発生する。

さらに、すべり安全率は、地震の全継続時間においてすべり安全率が最小となる瞬間的な時刻の安全率を示していることにも留意が必要である。例えば0.01秒間だけ安全率が1.0を下回ったとしても、すべり土塊が不安定となる時間はごく短時間であることから、斜面の塑性変形量は非常に小さく、問題となるような大きなすべりとはならない。斜面の変形が実際に施設に影響を与えるかの検証は、非線形解析を用いた変形量による評価を実施して検証する必要がある¹⁾、線形解析を用

いた安全率による評価は、過大な滑動力を許容し、なおかつ地震の全継続時間で安全率の基準値を満足することを求める評価手法であると言える。

土木学会の「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<技術資料>」¹⁾では、模型実験とこれをモデル化した等価線形解析（伊方発電所3号機の耐震安定性評価と同じ解析手法）による比較を報告した事例を紹介しており、「等価線形解析による安全率評価は変位・移動の可能性の有無の判定としては保守的（妥当）」、「すべり安全率が1を下回っても基礎地盤が急激に不安定な状態にはならない」こと等を踏まえ、すべり安全率が評価基準値を下回るほどの大規模な地震動に対して基礎地盤および周辺斜面の地震時安定性を合理的に評価する上では、地震による基礎地盤および周辺斜面の破壊進展性を考慮しつつ、変位量・移動量を定量的に評価する必要があるとしている。

4. 安全裕度の定量化に関する検討について

前章では、安全裕度として設計に考慮されている保守性について整理したが、それらが実際にどの程度の安全裕度をもっているかについては、定量化が難しい。ここでは、岩盤のせん断強度および側面抵抗に関して、安全裕度の定量化を試みる。加えて、確率論的な観点からも、既往の文献をもとに年破壊確率を参照してみる。

4.1 保守的なせん断強度の設定による安全裕度

伊方発電所3号機の設置変更許可における評価では、せん断強度として弱面である片理面に沿う方向の強度を用いていることは既に述べた。ここでは、現実的なせん断強度の考察と、解析において現実的なせん断強度を設定した場合の安全率について検討を行う。

(1) 現実的なせん断強度の考察

せん断強度として採用している片理面に沿う方向の強度は、原位置せん断試験の結果を踏まえて設定されている。原位置せん断試験は大規模なジャッキ設置やジャッキ反力確保の観点から、大規模に掘削された調査坑やトレンチの中で実施する必要があるため、多数の試験を実施することが困難であり、地盤工学会基準²⁾においても原位置せん断試験の試験個数は4個が標準とされている。一方で、ボーリング調査により採取されたコアを

用いた岩石試験については、多数試験を実施することが可能であり、伊方発電所においても、片理面に沿う方向、片理面を切る方向の岩石試験の試験結果が充実している。

より現実的なせん断強度としては、片理に沿う方向だけから設定するのではなく、片理面を切る方向を含めた平均値や中央値を踏まえて設定する必要がある。

以上を踏まえ、岩石試験から得られるせん断強度の平均値、下限値および上限値を用いて、原位置せん断試験によるせん断強度の平均値を内挿により算定することとした。

原位置せん断試験におけるせん断強度の平均値の算定方法を図5に示す。図5に示すとおり、平均値の算定方法として、算定方法①と算定方法②の2つの方法が考えられ、それぞれの方法で平均値を算定した。

算定方法①は、岩石試験から得られた下限値に対する平均値の比を、原位置せん断試験から得られた下限値に乗ずることで、原位置せん断試験の平均値を求める方法である。

算出方法②は、岩石試験から得られた下限値と上限値の単純平均に対する平均値の比を、原位置せん断試験から得られた下限値と上限値の単純平均に乗ずることで、原位置せん断試験の平均値を求める方法である。この方法では、下限値と上限値が反映されるため、算定方法①より合理的な算出方法と考えられるが、原位置せん断試験の上限値については、前述のとおり、ジャッキ能力限界まで荷重をかけても明確な破壊点が確認されなかったことから、実際の上限值はさらに大きいと考えられ、この算定方法②で求まる平均強度は実際より小さな値が算出されると考えられる。

上に示した2つの算出方法で原位置せん断試験の平均値を算出した結果、算出方法①では 17.6 kgf/cm^2 、算出方法②では 28.5 kgf/cm^2 が得られた。

なお、伊方発電所3号炉原子炉建屋の南北断面の斜面においては、すべり面が片理面に沿う方向ではないため、せん断強度としては片理面を一部切る方向のせん断強度を適用する方が合理的であるが、本項に示した2つの算出方法では、片理面に沿う方向の強度も平均値に反映されている。片理面に沿う方向はせん断強度が小さいため、片理

面に沿う方向の値に平均値が引っ張られて過少評価されている可能性が高いことから、原子炉建屋の南北断面の斜面に適用すべきより現実的なせん断強度としては、更なる検証が必要であろう。

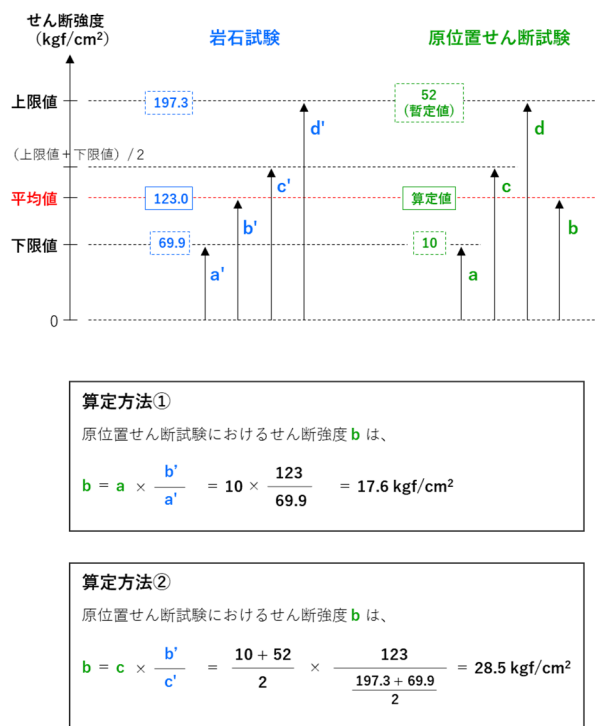


図5 原位置せん断試験におけるせん断強度の平均値の算定方法

(2) 現実的なせん断強度を設定した場合の安全率

前項では、2つの算定方法を用いて原位置せん断試験のせん断強度の平均値を算出した。ここでは、求まったせん断強度のうち、小さな値となった算出方法①による算定値を現実的なせん断強度とみなして、伊方発電所3号炉原子炉建屋の南北断面の斜面に対する耐震安定性評価を実施した。

評価にあたっては、せん断強度の設定以外は「2. 周辺斜面の耐震安定性評価について」の章で示した条件と同一とし、安全率1.3を示していた最小安全率のすべり面について、安全率がどの程度異なる結果となるかについて比較した。比較結果を図6に示す。

現実的なせん断強度を用いた場合の安全率は1.7となり、設置変更許可申請における評価で示した安全率1.3から大幅に向上することを確認した。したがって、当該斜面の評価におけるせん断

強度の設定には、安全率で $1.7/1.3=30\%$ 程度の安全裕度が考慮されていると評価できる。

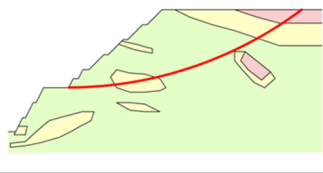
すべり面形状	安全率	
	設置変更許可 における評価	本検討 (現実的なせん断 強度設定)
	1.3	1.7

図 6 安全率の比較結果

4.2 2次元断面の評価による安全裕度

2次元断面による評価では、すべりに対する抵抗力としてすべり底面の抵抗力しか考慮されず、側方の抵抗力が考慮されないことは既に述べた。これについて、伊方発電所3号機のスプレスト時点(2012年)の基準地震動 S_s (570gal) を用いたものではあるが、側方の抵抗を考慮しないことによる安全余裕を検討した結果がある。これによると、2次元断面による評価で安全率 1.4 を示す斜面のすべり面について、3次元形状を考慮した評価、すなわち側方の抵抗を考慮した評価を実施したところ、図4に示したとおり安全率は 2.0 となり、2次元断面による評価の安全率には $2.0/1.4=40\%$ 程度の安全裕度が含まれていることが確認された。この安全裕度はすべり面の深さや長さ、幅によって変動するため、一律に述べることはできないが、側方の抵抗を考慮しないことによる安全裕度は、安全率に大きく寄与している可能性が高い。

4.3 年破壊確率の参照

これまで、決定論による評価を対象に、評価結果に内在する安全裕度を述べたが、ここでは確率論の側面から勘考したい。

確率論的な評価を実施する場合には、保守性を排除した平均値・中央値を把握したうえで、不確かさを適切に評価する必要がある。決定論による評価では、解析条件を設定する際に、それぞれの設定を保守的にしておけば概して安全側の評価結果となるが、確率論による評価では、解析条件を保守的に設定してしまうと、確率論の本質からすると誤った評価結果を与えてしまう。本報告では

確率論に関する詳細な議論は控えるが、決定論の評価結果を確率論の側面から解釈した事例として、「原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の耐震安定性評価基準値の確率論的考察」(電力中央研究所, 2005)³⁾を紹介する。

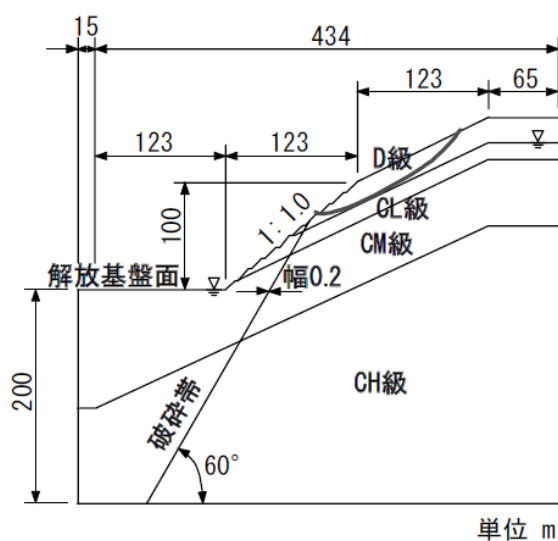
同文献では、すべり安全率が 1.2 となる周辺斜面の年破壊確率は 10^{-5} /年以下と小さく、耐震安定性評価基準値の 1.2 を満足する斜面は、地震による年破壊確率が非常に小さいことを示している。具体的には、仮想的な周辺斜面の地盤モデルに対して、すべり安全率が 1.2 となるよう地震動レベルを調整し、表1に基づき地盤物性を実際にばらつかせた検討を実施している。伊方発電所と同じ硬岩斜面を対象としたモデルでは、斜面部に弱層が有るモデル(K-1)および無いモデル(K-2)の2つのモデルを検討している。硬岩斜面のモデルを図7に、年破壊確率を図8に示す。

これまでの報告で検討対象としてきた伊方発電所3号機原子炉建屋の南北断面については、斜面中に弱層が無い場合、弱層が無いモデル(K-2)を参照すると、年破壊確率は $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 程度となっており、安全率 1.2 であっても年破壊確率が非常に小さいことが示されている。詳細な解析条件は異なるので、参考としての位置づけにはなるが、伊方発電所3号機の周辺斜面の耐震安定性評価と同じ等価線形解析を用いた解析結果であり、大いに参考となる検討結果である。

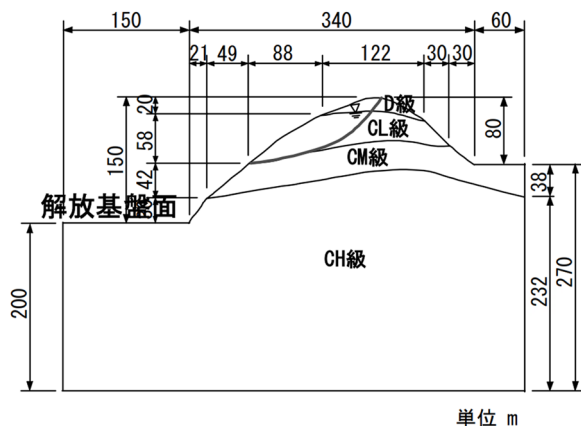
なお、図8に示すH-1およびH-2は基礎地盤を対象とした同様の検討であるが、基礎地盤の年破壊確率は周辺斜面よりさらに小さい傾向となっている。

表 1 解析に用いた地盤物性値のばらつき(変動係数)(同文献³⁾より抜粋)

地盤物性	硬岩	軟岩
密度 ρ	10%	5%
せん断強度 τ	45%	30%
せん断弾性係数 G	45%	30%
ポアソン比 ν	10%	5%



硬岩斜面モデル K-1 (片斜面, 弱層あり)



硬岩斜面モデル K-2 (山地形, 弱層なし)

図7 硬岩斜面のモデル (同文献³⁾より抜粋)

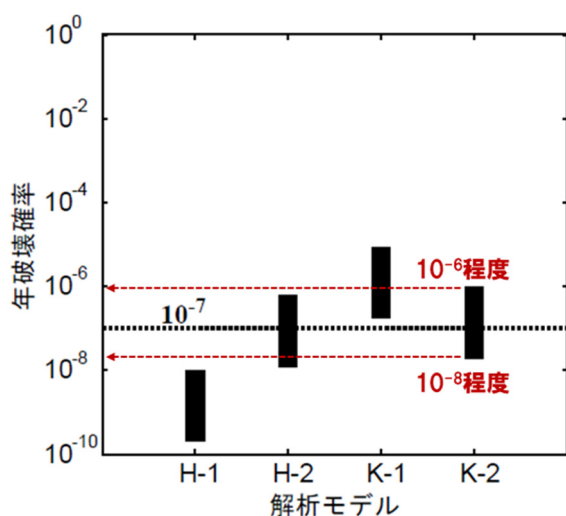


図8 年破壊確率 (同文献³⁾に朱記加筆)

5. まとめ

原子力発電所における周辺斜面の耐震安定性評価について、伊方発電所3号機の周辺斜面を対象に保守的に安全裕度が考慮されている代表的な事例を整理し、このうち、せん断強度と側面抵抗に関する安全裕度の定量化を試みた。せん断強度については30%程度、側面抵抗については40%程度の安全裕度が考慮されており、実耐力としてはこれらを踏まえたうえで算定することができる。

ここで留意しておきたいのは、我が国における原子力発電所の重要施設に対する評価では、主に決定論による評価がなされていることから、安全性評価においては実耐力による設計ではなく、不確かさを適切に考慮して安全裕度を持った設計とすることが重要であることは言うまでもない。一方、安全裕度を考慮した決定論での評価が、どの程度の安全裕度を有しているかを把握することも、算出された安全率が持つ意味を解釈するうえでは重要であろう。繰り返しになるが、原子力発電所における決定論を用いた評価では、種々の不確かさを考慮し、安全裕度を持たせた評価体系となっていることから、そこから得られた安全率よりも、実耐力としては高い安全性が確保されている。単純に安全率の数値だけを見て、安全率が低い＝安全性が低いと判断することは、安全率が持つ本質的な意味を理解しているとは言えない。

また、確率論的な評価を実施するうえでも、決定論で設定されている解析条件やパラメータ設定を、保守性を排除した現実的な設定にしたうえで、その不確かさを適切に考慮する必要がある、今回報告したような決定論の評価における安全裕度に関する検証が一助となるであろう。

【参考文献】

- 1) 土木学会：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＜技術資料＞，p73-106，2021.
- 2) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p737-743，2014.
- 3) 原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の耐震安定性評価基準値の確率論的考察，電力中央研究所報告 N04010，財団法人電力中央研究所，2015.