

委員会報告

原子力発電所地質・地盤の調査・試験法

GROUND ASSESSMENT METHODS FOR NUCLEAR POWER PLANT

原子力土木委員会地盤部会、地質・地盤の調査・試験法標準化分科会

*By Ground Assessment Working Group, Ground Integrity Subcommittee,
Committee of Civil Engineering of Nuclear Power Plant*

1. まえがき

地震の多い我が国の原子力発電所の施設の建設にあたっては綿密な地盤調査・試験、信頼できる手法による解析と設計に基づき、信頼性の高い施工を行うことが求められている。すなわち、原子力発電所の地盤については、原子力安全委員会が定めた「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」¹⁾に加えて原子炉安全専門審査会が定めた内規「原子力発電所の地質・地盤に関する安全審査の手引」²⁾に示された基本に従って調査・試験を行なうことが求められている。しかし、地質・地盤は多種多様であるので、地質・地盤の調査・試験と解析・評価、設計・施工の関係を体系化することは原子力発電所の建設技術を一層高度なものにし、国民の理解と信頼を得るためにも意義なことと考えられる。このため、昭和54年9月に土木学会の原子力土木委員会の下に地盤部会を設置し、その下に地質・地盤の調査・試験法標準化分科会と地盤の耐震設計分科会を設置し、鋭意検討を加え、59年3月にその成果をとりまとめることができた。なお、地盤部会の活動概要および地盤の耐震設計分科会の活動内容については、それぞれすでに土木学会誌および同論文集に紹介した^{3), 4)}。

本報告では、地質・地盤の調査・試験法標準化分科会（主査：石原研而）での主な検討結果について紹介する。なお同分科会は下記の5つのワーキンググループからなる。

断層活動性評価法の総合化 WG（主査：緒方正虔）

岩盤分類の基準と工学的性質 WG（主査：本荘静光）

地盤物性評価方法の標準化 WG（主査：松井家孝）

地盤物性表示法と設計への適用 WG（主査：日比野

敏）

地盤調査・試験法の標準化 WG（主査：江刺靖行）

2. 地質調査法

(1) 地質調査の基本的考え方

a) 調査の目的

原子力発電所の立地・建設における地質調査の目的は予定箇所および周辺地域の地質構造を把握することであり、特に地盤中に分布する断層の活動性把握と、構造物基礎付近の地盤の詳細な地質構造、岩石分布および岩質の把握とが主なものである。

断層活動性の調査では、原子力発電所建設を予定する敷地内および敷地周辺の広域地域の地盤中に存在する、あるいは存在が推定されている断層を調査し、その活動性、分布・位置、規模を把握し、設計用基準地震動策定の資料を得ることを目的とする。

構造物基礎地盤の調査では、原子炉建屋をはじめとする重要構造物基礎の詳細な地質構造、岩石分布および岩質を把握し、設計上必要な地盤物性を把握するための各種試験の実施および試験結果の評価のための基礎資料を得ることを目的とする。

周辺広域および敷地内を通じた地質調査の基本的な手順を図-1に示す。

b) 調査の範囲

地質調査の範囲は、原子力発電所の建設設計画および設計のために必要であり、かつ審査指針等^{1), 2)}による基準を満たす範囲とする。具体的な調査は、広域調査および敷地内調査に分けられる。

広域調査の範囲は原則として敷地から半径30km程度の範囲の陸域および海域とする。

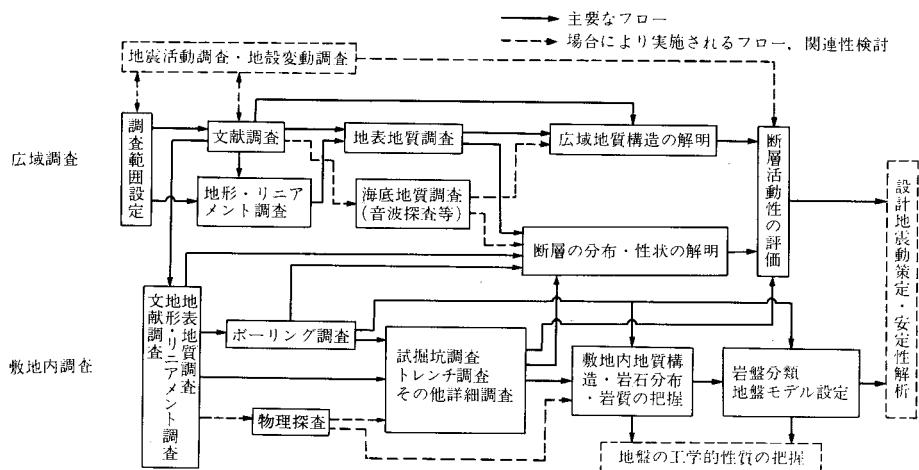


図-1 地質調査法流れ図

敷地内調査については原則として敷地内とし、原子炉建屋予定中心位置から 200 m 程度の範囲ではより詳細な地質調査を実施するものとする。

(2) 広域調査

a) 文献調査

文献調査は、既往の文献により、調査地域内の地質資料を調査し、集約するものである。

地形・地質文献資料は多種多様であるが、公刊されているものはできるだけ網羅することとする。公刊文献としては地質調査所、各都道府県発行の地質図・同説明書および地学関連学会誌等に公表されたものなどがあり、なお、必要に応じて公刊文献以外の資料も利用する。

文献調査による解明事項は、地形、層序、地質構造および地史などの一般的記述と断層の分布およびリニアメント、基準地形面、第四紀地殻運動に関する地質資料などのほか、活火山、大規模地すべりなどである。

このうち、断層、リニアメント等については長さ 10 km 程度以上のものおよび第四紀の活動が記載されているものを抽出し、位置、方向、長さ、破碎幅、変位量、センス、性状、リニアメントの特徴、活動性指摘の有無などについて整理する。

この文献調査結果は、敷地から半径 30 km の範囲で、地質図を作成するための資料とする。

b) 地形・リニアメント調査

地形・リニアメント調査は、既存の地形図（国土地理院発行：1/5万、1/2.5万等）、空中写真（主として林野庁・国土地理院撮影：1/4万～1/1万等）、などによる地形判読を主体とする。リニアメント判読では、適切な判読基準により、長さ 10 km 程度以上のリニアメントおよび明瞭な変位地形を示すリニアメントを抽出し、その地形の特徴により分類し整理する。特にその長さについ

ては適切な要素の組合せによる連続性の検討が必要である。

c) 地表地質調査

敷地から半径 10 km の範囲では全域地表地質調査（ルートマップは 1/2.5 万程度）を実施し、構成岩石、層序、地質構造などを明らかにする。また 10 km 以遠の断層、リニアメント沿いの調査でも、断層露頭の調査と合わせて地質構造、岩石分布などの把握を行う。断層の存否は露頭でその存否を明らかにすることが望ましいが、なお、明確にし得ないものについても、周辺の地質構造からの検討が考えられる。

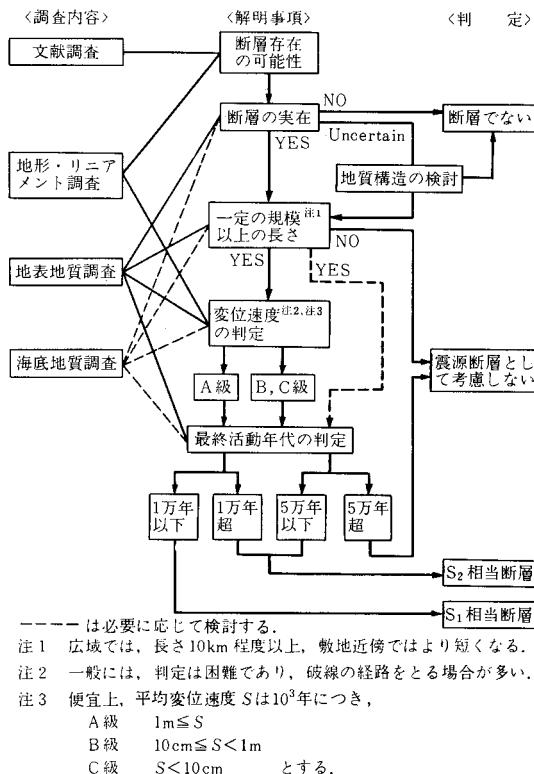
調査対象の断層、リニアメントおよび敷地近傍で実在が明らかとなった断層については、適宜、断層露頭の詳細なスケッチ、記載などを行う。断層の規模、特に断層の長さは設計用地震動を決める重要な要素であるので、連続性については慎重な検討が要求される。

断層の活動性については、断層の上載地層、特に第四紀層（段丘堆積物、火山灰層、赤色土など）の性状を調査し、必要に応じてこれら地層の年代を判定するための調査を行う。なお、断層内物質についても必要に応じて調査を行う。

d) 海底地質調査

必要な場合（下記）には海底地質調査を実施し、地層分布、地質構造、断層の存否、その規模・性状、活動性の調査を行う。

- ① 海域において地質構造、特に断層に関する資料がない場合
- ② 敷地内の断層が海域に延長し、その活動性が明らかでない場合
- ③ 海域において文献資料に指摘されている断層の活動性評価を必要とする場合

図-2 広域調査における断層活動性調査の流れ図³⁾

海底地質調査の主な手法は音波探査であり、海底における地質構造を調査し海域での地層・岩石の分布または断層の分布規模・性状、活動性について把握し、陸域におけるそれとの関連性を明らかにする。特に活動性調査においては、音波探査記録などにより上位地層の変位について詳細に検討する。

e) 広域調査結果の集約と表示

a)~d) の調査結果から地質構造の解明を行い、敷地から半径30km程度の範囲では1/20万の縮尺で、また敷地から半径10km程度の範囲では、1/5万程度の縮尺で、地質図として集約し表示する。対象とする断層について、調査結果をもとにその規模・性状を明らかにし、断層の長さ、活動歴および最終活動年代などの調査・検討結果をまとめる。また、地表で確認されない断層についても、文献等の資料や断層周辺の地質構造、岩石分布などを参考に検討する。この結果、最終活動年代をもとに S_1 相当断層、 S_2 相当断層^[1] および耐震設計上震源断層として考慮しない断層に分け、敷地の選定および設計用地震動策定の資料とする(図-2)。

注1) 基準地震動 S_1 および S_2 を発生すると想定される断層を、それぞれ S_1 相当断層および S_2 相当断層とよぶ。

化変質の状況、割れ目、岩級区分、断層破碎帯の分布・性状、連続性、コアの採取状況、地下水の状況などである。ボーリング削孔時には、これらの状況の判断資料および削孔状況などが記載された適切な縮尺のボーリング柱状図を作成し、またコア写真を撮影する。

c) 試掘坑調査

試掘坑調査の主な目的は、原子炉建屋予定位置付近の地質構造、岩石分布および岩質を詳細に把握し、原子炉建屋の位置を決定することである。このため試掘坑は、原則として、原子炉建屋基礎予定箇所基礎底面付近で互いに交わる横坑とし、基礎幅を含む適切な長さとする。その他、必要に応じて周辺斜面調査、断層追跡調査などの目的で実施される。

試掘坑調査で明らかにすべき地質調査項目は、岩石の種類、風化変質の状況、割れ目、岩級区分、湧水の状況、断層破碎帯の分布・性状、および地質構造などである。特に断層活動性評価に関連して、断層の分布・性状、第四紀層との関係、岩脈の貫入と断層の関係、接触変質の範囲と断層との関係などは詳細に把握する。

試掘坑調査の際には、坑内での岩石種類、風化変質の状況、岩級区分、地質境界、断層、その周辺の破碎状況等を主として、これらの状況の判断資料を記載する原縮尺100分の1程度の横坑展開図（横坑以外の試掘坑ではこれに準ずる適切な図面）を作成する。

d) その他の調査

前述のほか、必要に応じて物理探査、トレント調査、断層内物質調査などを実施する。

物理探査には多くの種類があるが、地質構造の探査として最も一般的なものは屈折法弹性波探査である。測線は基本的には一定間隔のグリッドに従い、測線長、測線間隔は解明すべき地質構造の深度による。なお、基礎地盤の工学的性質把握のための物理探査については、3.に記す。

トレント調査は主として敷地内で認められた断層の連続性または第四紀における活動の有無を明らかにする目的で実施される。トレント掘削位置、その規模、数量はおのおのの目的に応じて定める。

トレント調査により解明すべき事項は、トレント箇所、主としてその側壁における断層の存否および性状、第四紀層の地層区分、断層と第四紀層の関係、断層の変位状況などが主である。これらの状況は、適切な縮尺の展開図、スケッチなどに表示する。

断層により変位した地層、あるいは断層を被覆する地層の年代を判定する必要のある場合は、¹⁴C法、フィッショング・トラック法、広域テフラ（火山灰）対比などによる年代測定を実施する。

断層組織・断層内物質調査は断層の性状を明らかに

し、活動性に関する資料を得るために必要に応じて行う。このため、露頭または横坑内の断層箇所において断層内物質の不攪乱または攪乱試料を採取し、不攪乱試料による断層組織の観察・分析、および採取試料による断層内物質分析を行う。

分析項目としては断層内組織の解析、粒度分析、鉱物分析などであり、断層活動年代測定法としては石英粒子表面構造解析、フィッショング・トラック直接法、ESR年代測定法、イライトK-Ar法などがある。これらの分析結果は、地表地質調査、トレント調査などで得られている断層活動性に関する資料と合わせて総合的に検討し、活動時期判定のための資料とする。

e) 敷地内調査結果の集約と表示

敷地内調査の結果を下記の項目について集約する。

- ① 地盤を構成する岩石および未固結堆積物の名称、分布、地質時代、岩質と風化変質の状況、地質構造
- ② 断層破碎帯等の分布と性状
- ③ 断層の活動履歴、最終活動年代
- ④ 岩盤分類
- ⑤ 必要に応じて、その他の地質現象

上記の集約をもとに、敷地内の地質構造、岩石分布および岩質について、次の形式に基づいて総合的に表示する。

① 原子炉建屋予定位置を中心とする、半径200m程度の範囲においてほぼ原子炉建屋基礎底面のレベルにおける原縮尺1000分の1以上で作成された少なくとも1つの水平断面図。

② 建屋予定位置を通り、互いに直交する同縮尺の2つ以上の鉛直地質断面図。

③ 敷地範囲内について、原縮尺5000分の1以上の地質平面図。

その他、必要に応じて、節理・シーム等の分布、方向性に関する集約表示、周辺斜面の地質構造、岩石分布および岩質に関する集約表示などを行う。

(4) 断層活動性に関する検討

a) 断層の分類と実在の確認

調査対象の断層は、地形調査、地質構造解釈、物理探査などによる推定断層と、地質的に確認された実在断層に分けられる。断層の実在の確認は、陸域においては断層露頭のスケッチおよびルートマップなどによる地表地質調査、敷地内では試掘坑調査、ボーリング調査などにより行う。海域においては適切な海底音波探査の記録などから断層の存在を判断する。

b) 断層の規模・性状

断層の規模・性状とは断層の長さ・変位量、変位の向き、破碎の幅と破碎の性質、分布形態などを指す。

これらの諸現象を明らかにする場合、おのおのの露頭

でこれらの現象が互いに矛盾しないことを確認して、連続性を判断し、断層の長さを決定することが重要である。なお、断層は雁行性分布や断続性分布を呈することもある。この場合、その地域における断層の分布形態、性状および地質構造を検討し、これらが同一の断層であるか否かを適切に判定する。露頭の調査でその存否を明確にし得ないものについては、周辺の地質構造などの検討を行い、その可能性を吟味し、規模・性状を検討する。

c) 断層の活動履歴・最終活動年代

断層の活動履歴とは断層が生成してから現在に至るまでの活動の歴史を意味する。

それぞれの地質時代により、断層の活動の様式は異なっている場合がある。この活動年代を明らかにし、各活動年代における断層の活動様式、および最終活動年代や再来期間を知ることは、今後の断層の活動を予想する手がかりとなる。

断層の最終活動年代とは、その断層の過去の活動履歴に照らし合わせて、最も現在に近い活動年代である。この最終活動年代によって、 S_1 相当断層、 S_2 相当断層および震源断層として考慮しない断層に分類することができる(図-2 参照)。

(5) 地質構造および岩質の検討

a) 地質要素・地質現象

敷地およびその周辺を通じて解明すべき地質構造要素としては、地層・岩石分布、層序のほか、断層、褶曲、

とう曲等がある。

さらに敷地内については、構造物基礎としての岩盤の岩質に関する要素として風化作用、熱水変質の程度などを解明し、必要に応じて、分離面としての層理、片理、節理、シームなどについてその分布・性状を把握する。

以上のほか、留意すべき地質現象として、火山活動、地すべりなどがあり、必要に応じて陥没現象、崖崩れ、土石流、温泉現象などのその他の地質現象について調査する。

b) 岩盤分類と地盤モデル

岩盤分類は岩石種類および岩質等級より成る。岩質等級の区分は、調査地点の岩盤を構成し、その岩質を支配する各地質要素を適切に表現・区分し、かつ工学的性質を把握するための地質区分として適切な区分とする。

原子力発電所箇所の岩盤分類は、岩盤を適切なグループに分級区分し、原位置試験を主体とした地盤の調査・試験計画に資することが主な目的である。したがって、地質要素により分級された各岩級の分布範囲については、共通の工学的性質をもつとみなし得るような分類法を適用することが必要と考えられる。

硬質岩盤では現在表-1に示す電研式 6 階級岩級区分と、適切な岩石種類区分を組み合わせた分類が多用されている。もちろん表-1に記載された要素区分に加えて、各箇所の地質要素の実情に応じて、岩級を区分すべき固有の地質要素の特徴、あるいはボーリングコア性状の特徴による適切な判断基準を設ける必要がある。

一方軟質岩盤では、岩盤の性質を規定する要素が、風化、節理などよりも構成岩石本来の組成、年代などに依存する傾向が大きい。構成岩石自体が本来軟質であるものは一般に堆積性軟岩(火山碎屑岩を含む)とよばれるが、硬質岩盤と同様の基準で岩質等級区分を行うことは困難があるので、必要に応じて適切な地質要素基準による分類を行った必要がある。原子力発電所箇所の基礎岩盤として調査対象となる軟質岩盤(堆積性軟岩)は、その地質要素基準および解明すべき工学的性質の相違により大局的に 3 種類に分類することができる。その分類のための地質要素基準および対応する工学的性質はそれぞれ表-2 のよ

表-1 電研式岩盤分類⁴⁾

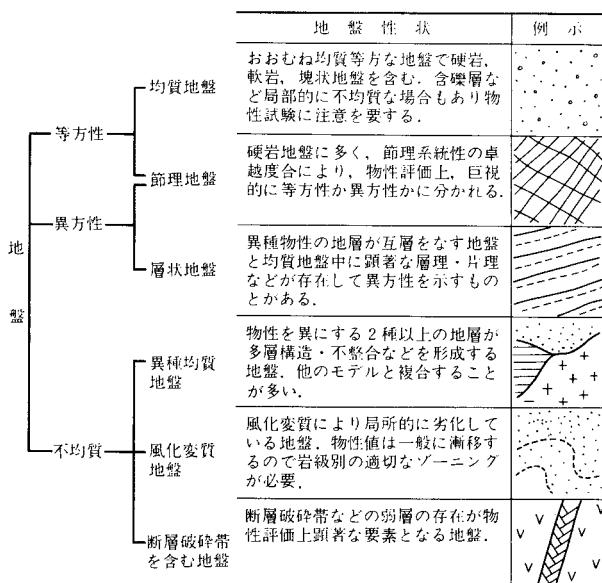
名称	特 徴
A	きわめて新鮮なもので造岩鉱物および粒子は風化、変質を受けていない。亀裂、節理はよく密着し、それらの面に沿って風化の跡はみられないもの。ハンマーによって打診すれば澄んだ音を出す。
B	岩質堅硬で開口した(たとえ 1mm でも)亀裂あるいは節理ではなく、よく密着している。ただし造岩鉱物および粒子は部分的に多少風化、変質がみられる。ハンマーによって打診すれば澄んだ音を出す。
C _H	造岩鉱物および粒子は石英を除けば風化作用を受けてはいるが岩質は比較的堅硬である。一般に褐鉄鉱などに汚染せられ、節理あるいは亀裂の間の粘着力はわずかに減少しており、ハンマーの強打によって割れ目に沿って岩塊が剥脱し、剥脱面には粘土質物質の薄層が残留することがある。ハンマーによって打診すれば少し濁った音を出す。
C _M	造岩鉱物および粒子は石英を除けば風化作用を受けて多少軟質化しており、岩質も多少軟らかくなっている。節理あるいは亀裂の間の粘着力は多少減少しておりハンマーの普通程度の打撃によって、割れ目に沿って岩塊が剥脱し、剥脱面には粘土質物質の層が残留することがある。ハンマーによって打診すれば多少濁った音を出す。
C _L	造岩鉱物および粒子は風化作用を受けて軟質化しており岩質も軟らかくなっている。節理あるいは亀裂の間の粘着力は多少減少しており、ハンマーの軽打によって割れ目に沿って岩塊が剥脱し、剥脱面には粘土質物質が残留する。ハンマーによって打診すれば濁った音を出す。
D	岩石鉱物および粒子は風化作用を受けて著しく軟質化しており岩質も著しく軟らかい。節理あるいは亀裂の間の粘着力はほとんどなく、ハンマーによってわずかな打撃を与えるだけで崩れ落ちる。剥脱面には粘土質物質が残留する。ハンマーによって打診すれば著しく濁った音を出す。

表-2 軟質岩盤分類基準案

区分	地質要素基準	岩質による等級区分	対応物性値範囲例*			把握・解明すべき工学的性質
			q_u (kg/cm ²)	V_p (km/s)	V_s (km/s)	
準硬質軟岩 (軟岩I類)	新第三系中新統を主とし、一部鮮新統および古第三系に属する砂岩・頁岩・均質な凝灰岩質岩石およびそれらの互層等、固結度大で新鮮な部分は緻密な岩質を示すが、ハンマーの打撃により鈍い音を発し、表面の構成粒子が変形、分離しやすいなど硬質岩と異なる特徴を有する。場合により節理発達し、また層理面沿いに岩質の劣化がみられる。	岩塊の風化および節理の発達程度により2~3段階の等級区分が可能で、工学的性質と対応させ得る。	400	3.5	1.9	強度・変形特性、場合によりその異方性など、おむね硬岩の場合に準じる。
			50	2.0	0.9	
新期軟質岩 (軟岩II類)	鮮新統を主とする泥岩ないし頁岩・砂岩およびその互層等、固結度小でハンマーの打撃により容易に崩れる。岩質は均質でおむね単純な地質構造を示し、節理は少數である。場合により節理面・層理面沿いに汚染がみられる。	一般には困難であり、また不要の場合が多い。節理の発達状況の差により区分が可能な場合もある。	100	2.3	1.0	静的強度・変形特性動的強度・変形特性クリープ特性スレーリング特性など。物性評価法は、3.(3), b)参照。
			10	1.6	0.5	
不均質軟岩 (軟岩III類)	中新統および鮮新統に属する火山破屑岩類のうち基質が軟質で硬質としての分類基準に適さないもの。肉眼的に不均質な岩質を示す部分が多く、幾種類は主に火山岩類、時に基質と同質の軟質礫より成る。硬質火山岩類としばしば互層・あるいはその貫入を受ける。節理面は多く不規則に発達し、面沿いに汚染・岩質劣化がみられる。	岩相によるグループングが適切。同一岩相内の等級区分は地質要素では困難である。	300	3.3	1.7	基質の性状により、I類またはII類に準じる。特に不均質性、ばらつきの程度に重点。
			10	2.0	0.8	

* 目安値であって区分け数値ではない。

表-3 地盤モデルの種類



うにまとめられる。

表-2 のように分類された軟質岩盤について、さらに硬質岩盤に準じた岩質等級区分を行う必要がある場合は、各地点の地質要素の特徴に応じた適切な等級区分基

準を定めることが望ましい。一般に表-2 における準硬質軟岩(軟岩I類)は、主に風化・節理の状況により2~3段階の岩質等級区分が可能である。新期軟質岩(軟岩II類)および不均質軟岩(軟岩III類)については、一般的には岩相別または地層別のグループ分けが適切であり、特に必要な場合は節理の発達状況などに応じた2段階程度の岩質等級区分を行うこともある。

調査対象箇所地盤の岩種・岩級分布および地質構造要素が明らかにされた後、必要に応じ該当箇所地盤の地質モデルを設定して物性評価ないし設計に資するものとする。表-3 に6種類の地盤モデルを示す。このモデル分類は、地質構造要素と地盤物性種別との対応性により設定したものである。適切なモデルの設定により、地盤物性把握のための各種試験の対象区分(グループ分け)を容易かつ合理的に行うことができる。

3. 地盤調査・試験法

(1) 地盤調査・試験の基本的考え方

本章では、原子炉建屋基礎地盤、原子炉建屋周辺斜面

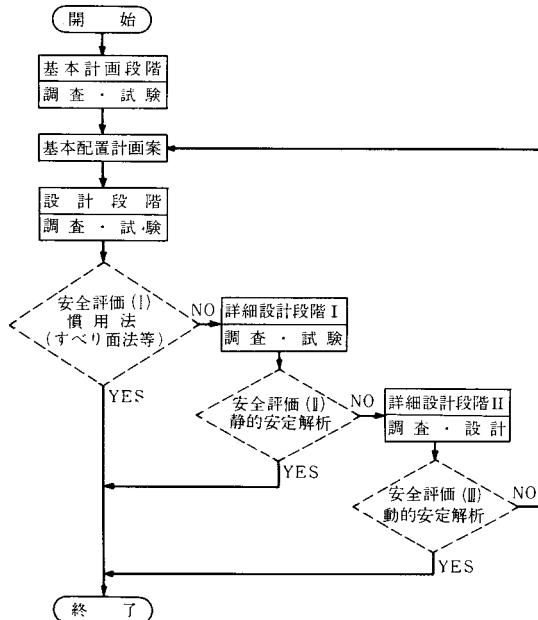


図-3 各調査段階と調査の流れ

および屋外重要土木構造物にかかる下記の事項の検討に必要な地盤の調査・試験計画について述べる。

- ① 原子炉施設の配置計画の決定
- ② 地盤および斜面の安定性評価
- ③ 屋外重要土木構造物の構造設計
- ④ 設計・施工上必要な地盤処理の決定

これらの目的で行われる地盤の調査・試験は原則として基本計画、設計および詳細設計の各段階に応じて計画・実施されることを前提とする（図-3参照）。以下に各段階での調査目的・計画などについて述べる。

a) 調査・試験の目的

(i) 基本計画段階での調査・試験は、敷地内の地盤構造を明らかにし、基本配置計画の策定など基本計画立案のために行う。主に原子炉施設の基本配置計画を策定するうえで必要な地質学的に分類された地質構造に地盤の力学的性質を加味した地盤構造の三次元的分布の大要を把握する目的で行われる。

(ii) 設計段階での地盤の調査・試験は慣用法による地盤の安定性評価および設計用地震入力などの検討に必要な地盤の構造、各地層の力学特性および波動伝播特性の解明のために行う。慣用法によって安全であると評価された場合は、この段階をもって調査・試験は終了となる。

(iii) 詳細設計段階での調査・試験は、慣用法による安定評価の結果が十分安定でない場合に、さらに詳細な静的解析や動的解析による安定性評価が行われるが、これらの解析に必要な地盤物性を求める目的で行われる。

なお、地盤構造の不均質性が著しい場合は慣用法による安定性評価は不適なので、最初から詳細設計段階の検討が行われるので、このような場合は始めからこれら詳細設計に必要な調査試験を行うことになる。

b) 構造物の種類と調査計画

基本計画段階では、地質構造調査のために必要に応じて地表弹性波探査を行う。その場合、敷地に適宜測線を設けて調査を行い、測線上の地点でボーリング調査、ボーリングコアの観察およびボーリングコアに対する一軸圧縮試験を行うことが望ましい。各種構造物の配置は、上述の調査結果に地形調査、断層調査などの結果を加味して定めるのが望ましい。

(i) 原子炉建屋基礎地盤の設計段階の調査・試験は、地盤の安定性検討、設計用地震入力の決定および地震波動の增幅特性の把握などに必要な、より詳細な地盤構造と構成地盤の力学特性などを明確にするために行う。原子炉建屋基礎地盤の調査・試験の流れの例を図-4に示す。

試掘坑を用いて、地盤構造の調査と確認、岩盤せん断試験、岩盤変形試験、弾性波速度試験等を行う。また深さ方向の調査のためにオールコアボーリングにより地盤構造の確認を行うとともに、ボーリングコアおよびボーリング孔を利用した各種試験を実施する。なお、試験はサイトごとに分類された岩種岩級別および弱層（断層破碎帯など）で実施する。調査・試験の範囲、数量等は2.でも述べたが下記により行う。

試掘横坑は建屋底面標高付近で互いに交わるよう掘削し、その長さは原則として基礎幅以上とする。

オールコアボーリング調査は、基礎底面において原則として基礎の直下で5本以上とし、調査深度は原則として基礎幅以上とする。また、基礎周辺のボーリング調査は、基礎を中心とする基礎幅の2倍程度の半径の範囲とし、地盤調査は安定解析用地盤モデルの大きさも考慮して三次元的領域について行われるべきものと考えられる。

(ii) 原子炉建屋周辺斜面の設計段階の調査・試験は、すべり安定性検討、設計用地震入力の決定および地震波動の增幅特性の把握などに必要な地盤構造、初期応力と構成地盤の力学特性などを明確にするために行われる。対象斜面は、切土斜面と盛土斜面の2種類に大別される。前者に関しては、斜面掘削後の応力開放を受けた状態での斜面安定評価に必要な力学特性を、後者に関しては、締め固められた状態での安定性を評価するに必要な力学特性を把握することが重要である。原子炉建屋周辺斜面の調査・試験の流れの例を図-5に示す。

地盤構造の調査はオールコアボーリングおよび弾性波試験によって行う。一方、地盤の力学特性については、

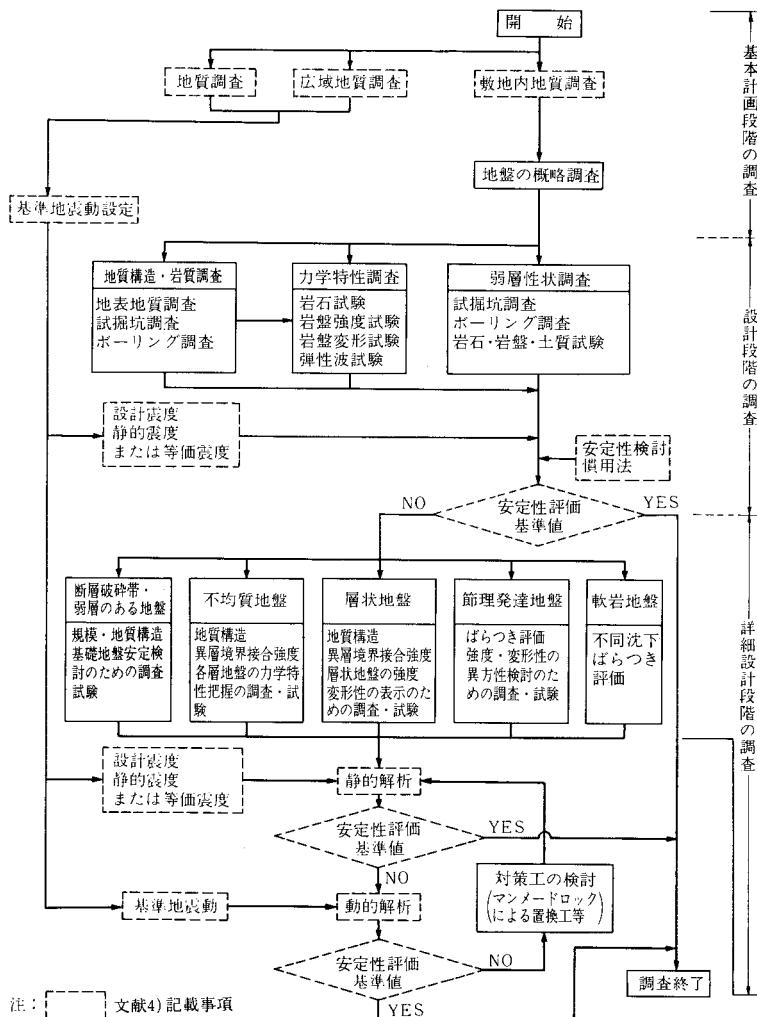


図-4 原子炉建屋基礎地盤の調査・試験および設計の流れ(例)

ボーリングやブロックサンプリングによる不攪乱供試体についての力学試験によって求める。しかし、不攪乱供試体が得られない場合で、地盤が原子炉建屋基礎地盤と異なるときなどは試掘坑を掘って原位置試験を行う場合もある。盛土斜面の場合は、盛土材料について目標の締固め状態での力学特性を調べる。その他、土質斜面や軟岩、風化岩からなる斜面の場合は、降雨時、融雪時の地下水位の変動調査、粘土鉱物分析などのほか、必要に応じて切取除荷、吸水時の強度などを調べる必要がある。

調査範囲は斜面の形状規模、地質構造および斜面の構成材料に応じて、安定解析用地盤モデルの大きさ等を考慮して三次元的領域について決められる。なお、原子炉建屋の周辺に出現する斜面の中で、その崩壊が原子炉建屋に重大な影響を与える可能性をもつものを、ここでは安定性の検討対象とすべき周辺斜面と考え、過去の事例

に基づいて、斜面のり尻から原子炉建屋までの距離が①約50m以内、または②斜面高さの約1.4倍以内の斜面を原子炉建屋周辺斜面とみなした、詳細は文献7), 8) 参照。

(iii) 屋外重要土木構造物地盤の設計段階の調査は、地盤の支持力、すべり、沈下、土圧などの安定性評価や構造物の設計、および必要な場合は設計用地震入力および地震波動の伝播特性の把握などのために行う。屋外重要土木構造物地盤の調査の流れの例を図-6に示す。

地盤構造に関しては主に地表地質調査およびボーリング調査によるほか、必要に応じて、弾性波試験を行う。

地盤物性に関しては、地盤が原子炉建屋基礎地盤と類似と判断される場合には、その確認のための岩石力学試験および物理試験を行い、原子炉建屋基盤地盤について求められた物性値を援用することができる。しかし、異なると判断される場合にはこれらに加え、必要に応じて原位置試験を行う。

屋外重要土木構造物を設置する地盤が解放基盤表面とみなされない場合は、その構造物への

入力地震波を決めるために、動的応答解析が必要となり、その場合は、動弾性係数、動的ポアソン比、減衰定数などの地盤物性が必要となる。

屋外重要土木構造物の周辺を埋め戻す場合には、目標の締固め状態での強度・変形特性・ばねなどの定数を試験により求めなければならない。また、砂地盤については液状化強度を求め必要に応じ対策を検討する。

地盤の調査範囲については、非常用冷却水取水ポンプ室基礎、取水ピットでは一般に2~4本、取水路では適切な間隔でボーリングを行う。ボーリングの深度は解放基盤面までとする。なお、地質構造が単純で原子炉建屋位置と地質構造が類似の場合は、原子炉建屋基礎地盤と同等の地盤の深度までとしてもよい。

詳細設計段階の地盤調査としては、さらに詳細な安定性検討に必要な地盤の異方性や非線形性などを調べる必

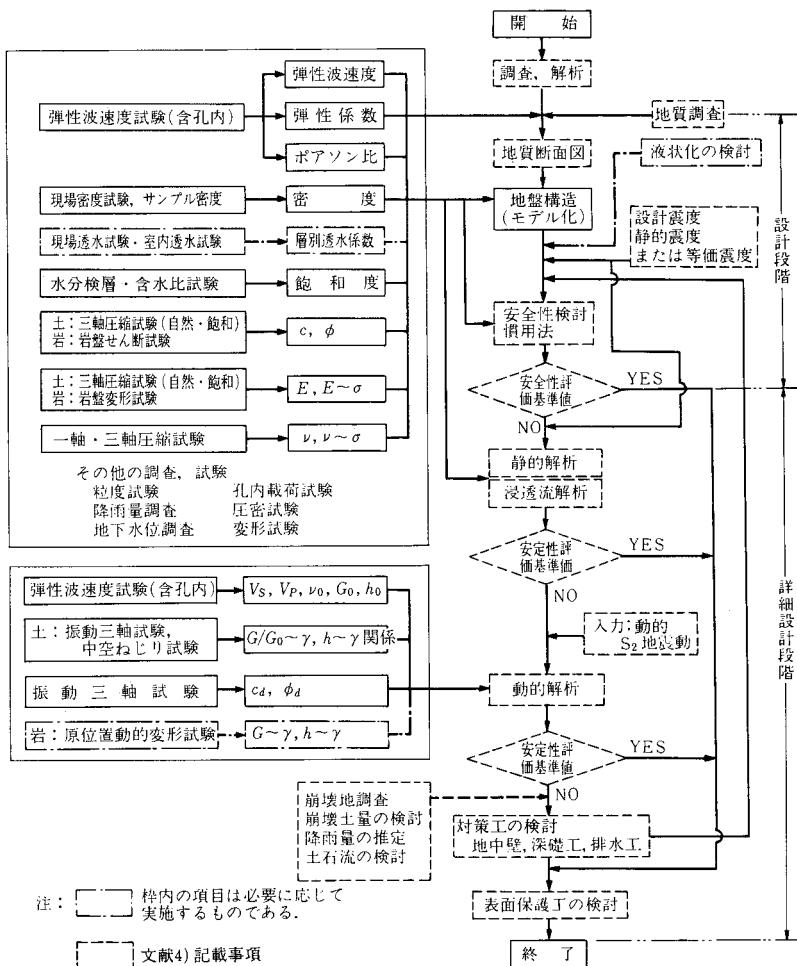


図-5 原子炉建屋周辺斜面の地盤調査・試験および設計の流れ(例)

要がある。

(2) 安定性検討に必要な地盤物性

a) 安定性評価に必要な地盤特性とその表示法

上述してきた地盤および構造物の安定性評価法については、併行して行われた耐震設計分科会で検討され、その内容についてはすでに文献3), 4)で紹介が行われているので本節では安定性検討に必要な地盤物性とその表示法について述べる。

原子力発電所関連構築物地盤の安定性評価の主体を成すものはすべりに対する検討であり、地盤の支持力や沈下に対する検討も、慣用法を除けば、すべりに対する検討に含まれる場合が多い。実際の解析を行う場合に適用される物性に関しては、対象とする地盤の種類や状態、解析法の種類などに応じて最も適切と考えられるものが用いられており、これに対応する調査・試験の組合せも異なっている。特異な例としては、斜面や屋外重要土木構造物の地盤が砂地盤の場合は液状化の検討が必要であ

り、また、海水取水系構造物では一般に長大になるため、地震時の相対変位についての検討が必要である。

表-4に現状で行われている地盤の安定性評価に適用されている解析法、物性値と調査試験の組合せを示した。以下にそれらの中から主な物性値について述べる。

(i) 静的強度特性

静的強度は、一般に簡便な直線式として、モール・クーロンの破壊規準で表示している。岩盤に関しては、岩盤せん断試験から求められたせん断強度 τ_0 、内部摩擦角 ϕ が用いられている。

(ii) 静的変形特性

岩盤を対象とした静的解析では、岩盤は通常弾性体として扱われており、岩盤変形試験（平板載荷試験）による割線弾性係数 E_s が用いられる例が多い。軟岩の場合には、上記のほかに、三軸圧縮試験による接線変形係数 E_t 、あるいは割線変形係数 E_{so} が用いられる場合がある。

断層破碎帯や土質材料につ

いて非線形性を考慮した解析を行う場合には、三軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線をもとに非線形表示を行った変形係数を適用することがある。

なお、静的解析に震度法を適用する場合には、静的変形係数あるいは動的変形係数のいずれを用いててもよいが、静的変形係数を用いた結果で変形量を直接評価することはできない。

(iii) 動的強度特性

動的解析による安定性評価には、原則的には動的強度が適用されるのが望ましい。しかし、動的強度に影響を及ぼす因子がいくつもあるため、一概に動的強度を定義することは困難である。このため、動的解析においては、動的強度は静的強度を下回らないことを確認して動的強度で代替する場合が多い。

(iv) 動的変形特性

岩盤を対象とした動的解析では、一般に岩盤の非線形性は無視してよいと考えられるので、弾性波探査あるい

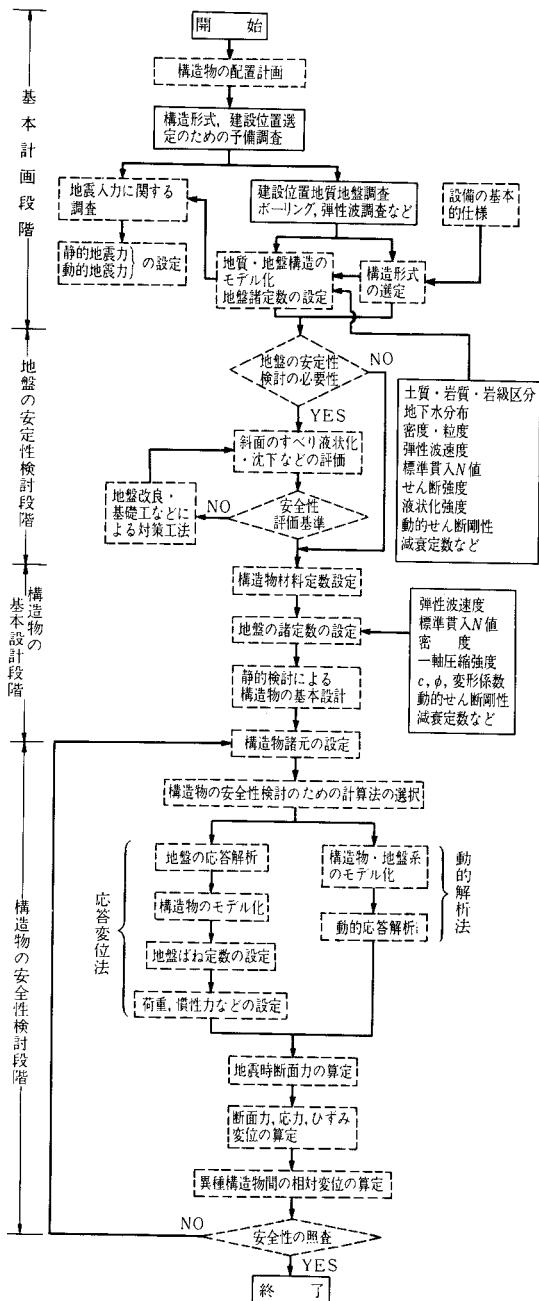


図-6 屋外重要土木構造物の地盤調査・試験および設計の流れ
(例)

は、室内超音波速度試験による弾性波速度 V_p , V_s から動的変形特性を求める方法がとられている。そのほかに、起振実験あるいは動的載荷試験等により、これらの値を用いることも行われている。

軟岩地盤、断層破碎帯や土質材料に関しては、地震時のひずみが大きくなる可能性が予想される場合には非線

形的な物性を求めて解析に適用する場合がある。このような場合には、動的三軸圧縮試験、動的せん断試験などを行ってひずみ依存型の変形性 $G-\gamma$ 関係を適用する。

(v) 減衰特性

地盤を弾性体として解析する場合には、それぞれの材料に応じて慣用的に用いられている値を用いることが多い。しかし、非線形的な扱いを必要とする場合には、上述の $G-\gamma$ 関係と同様に、動的三軸圧縮試験や動的せん断試験を行って、ひずみ依存型の $h-\gamma$ 関係を適用する。

(vi) 初期応力

地盤の安定性は、静的応力（含初期応力）と動的応力との和と地盤の強度との比較で評価される場合が多いが、初期応力の評価いかんによって地盤の安定性評価結果に影響を与える場合がある。初期応力の調査においては、岩盤に関してはオーバーコアリング法あるいは AE 法などが適用されており、土質地盤に関しては、原地盤に対しては孔内載荷試験、不攪乱試料に対しては K_0 压密試験などが行われている。

b) 地盤物性のばらつきの評価

(i) 基本的な考え方

原子炉建屋、屋外重要土木構造物の基礎地盤ならびに周辺斜面を構成する地盤の物性値には、自然および人為的な原因によって一般にばらつきが認められる。したがって地盤物性値のばらつきは設計、評価結果に影響を及ぼすこともあり、ばらつきの成因、その程度、試験法、設計手法ならびに評価手法の精度を考慮して、ばらつきを適切に評価し、設計に反映する必要がある。図-7 は、地盤物性のばらつきを評価するための基本的な流れを例示したものである。以下にその概略を図中の番号に従つて示す。

① 地盤把握のための調査・試験

基礎地盤の地質状況に応じた調査・試験を実施する。

② 調査・試験結果に基づく工学的判断

①の調査・試験結果ならびに過去の事例などをを通して経験的に十分な安定性を期待できる地盤（たとえば硬岩など）の場合には、地盤物性値のばらつきを考慮する必要はない。

③ 概略設計法による安定性評価に必要な物性値の把握

構造物の基礎地盤や周辺斜面の安定性の評価項目は、基本的にはすべり安全率と変形・沈下量である。これらの評価に必要な地盤物性値としては、以下のものが考えられる。

すべり安全率……… τ_0 または c , ϕ , γ_t など

変形・沈下量……… E , v など

これらのうち、すべり安全率に関しては τ_0 , c と ϕ が、変形・沈下量に関しては E が支配的要因となるため、

表-4 安定性評価に用いられている物性値と試験の組合せ—基礎地盤および斜面（岩盤）

物性値 解析法	単位体積 重量	静的 強度	静的 強度	静弾性 係数	静ボア ソン比	極限 支持力	動的 強度	動的 強度	動弾性 係数	動ボア ソン比	せん断 弾性係数	減衰定数	クリープ 定数	備考
	γ (tf/m ³)	c, c' (tf/m ²)	ϕ, ϕ' (°)	E (tf/m ²)	ν	c_d, c'_d (tf/m ²)	ϕ_d, ϕ'_d (°)	E_d (tf/m ²)	ν_d	G, G_0 (tf/m ²)	h (%)	α, β		
慣用法 (震度法) (すべり 面解析)	ボーリング コアサンプル ブロックサン ブル	岩盤せん 断試験	同 左											
静的解析 (常時)	同 上	岩盤せん 断試験 三軸圧縮 試験	同 左	平板載荷試 験（割線） 室内三輪試 験（ E_i, E_{50} ）										
静的解析 (地震時)	同 上	同 上	同 上	同 上					PS検層	PS検層	動弾性係 数の項と 同じ			
動的解析	同 上	同 上	同 上				静的強度 を使うこ とが多い	同 左	弹性波探査 (V_p, V_s)	弹性波探査 (V_p, V_s)	同 上	慣用値 動的三軸試 験、動的せん 断試験		
支持 力 慣用法 (震度法)	同 上	同 上	同 上			支持力 試験								軟岩の場合 常時：上限限伏值 地震時：極限支持 力と使い分けて いる例がある
沈 下	慣用法			平板載荷試 験（割線） 三軸圧縮 試験	一軸圧縮 試験								現場ク リープ 試験	弹性論 (ブーシネスク) 式による

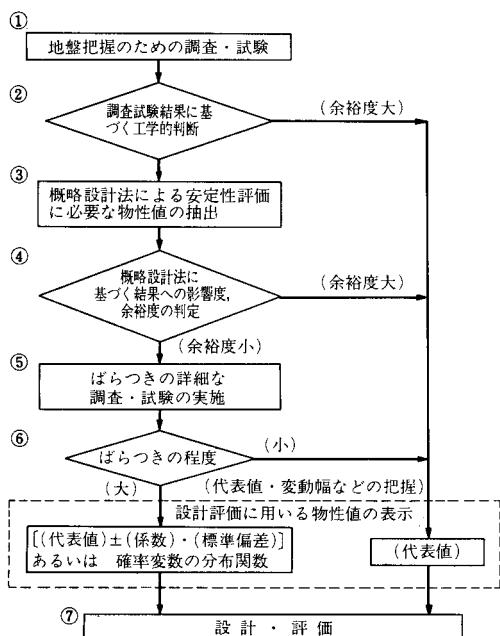


図-7 地盤物性値のばらつきを評価するための基本的流れ

評価結果に与える影響度の大小を調べて行う（感度分析）。この影響が小さく、かつ、設計によって得られた評価値が評価基準値⁴⁾に対して余裕度が大きい場合には、地盤物性値としては、その代表値を用いればよい。逆に影響度が大きいか、または影響度が小さくとも、その余裕度が小さい場合には、地盤物性の詳細な調査・試験が必要となる。

⑤ ばらつきの詳細な調査・試験の実施

詳細な地盤物性の調査・試験を実施し、ばらつきの特性を把握するために必要なデータ数、いわゆる適正な標本数の決定には、推計学的方法に加えて工学的判断が重要である。なお、人為的なばらつきの成因を極力排除して試験を行う。

⑥ ばらつきの程度

調査・試験結果を整理し、地盤物性値のばらつきの程度を把握する。ばらつきの程度が小さい地盤については、工学的判断をもとにして1つの代表値を選択する。一方、ばらつきの程度が大きな地盤物性値については、そのばらつきを考慮した代表値および分布形を選択する必要がある。

⑦ 設計・評価

ばらつきを考慮した設計を行い、安定性の評価を実施する。

(ii) ばらつきを考慮した設計法

地盤物性値のばらつきを考慮した設計・評価手法には、確定論的手法と確率論的手法がある。

確定論的手法については、設計上用いる地盤物性値に

これらの物性値のばらつきを適切に評価することが重要である。

④ 概略設計法に基づくばらつきが結果へ及ぼす影響度の判定

ばらつきに関して詳細な調査・試験を実施するか否かは概略設計法により、③で抽出した地盤物性値が設計・

全体の代表値（平均値または最頻値）を用いたり、個々の地盤物性値の変動幅を考慮し、代表値より適宜、加減した値を用いる方法がある。一方、確率論的手法については、設計に用いる地盤物性を確率変数とみなし、分布関数として設計式に入力し、評価結果も確率量としてとらえる方法である。この方法の代表的なものに信頼性設計法がある。ただし、信頼性設計では確定論的方法に比べ計算はさらに繁雑なうえ、社会・経済的側面の評価が現状では難しいので、将来の設計法として位置付けられよう。

以上の観点から、現状では文献の事例⁹⁾にも示されるように地盤物性値のばらつきを考慮した設計法として、確定論的手法を採用すればよいと考えられる。これは、各種設計に用いられる地盤物性値を平均値 μ に対して、 $K\sigma$ だけ加減して設計を実施する方法である。ここに σ はその物性値の標準偏差であり、 K は工学的な係数である。この K は、地盤物性値のばらつきの程度、結果への影響の程度、評価基準値の信頼性、設計手法の精度などを考慮して結果の評価が安全側となるように適切に決定する必要がある。

(3) 地盤の分類と工学的特性評価

a) 地盤の工学的分類と工学的特性評価法

地盤の工学的分類については 2.(5), b) で地盤のモデル化を主として考慮した分類の考え方を述べたので、ここでは、そのうち主要な地盤について工学的特性の評価法を述べる。

(i) 等方性地盤

工学的特性の評価に際しては、変形特性は平板載荷試験、弾性波速度試験を主に行い、必要に応じ、岩石試験や孔内載荷試験を実施して求める。また強度特性は岩盤せん断試験を行い、必要に応じ岩石試験を実施して求める。

深度方向の特性評価は、ボーリングコアの観察による分類、コアの岩石試験、孔内弾性波試験、孔内載荷試験などにより変形および強度特性を求めて行う。

なお、礫を含む地盤のように局所的に不均質性が認められる地盤および節理地盤については、岩石試験結果の評価、原位置試験の位置および規模の選定に際し十分な注意を要し、たとえば各種試験に際して用いる載荷面の大きさは、載荷板の直径または辺が、礫の最大直径の 5~6 倍程度以上となるようとするのが望ましい。

また、節理性地盤の場合には、節理の方向の統計的な調査を行って、卓越度を調べ、その程度により等方性地盤に属するかまたは異方性地盤に属するかの判定を行う。

(ii) 異方性地盤

試験は節理や片理の卓越方向や層の方向を考慮して実

施する必要がある。

岩盤せん断試験、変形試験においては、層理や片理の流れ目、差し目を考慮し、かつ走向傾斜に対し、2~3種類の角度で試験を行い、走向傾斜と載荷方向との角度による強度・変形の異方的特性を明確にする必要がある。

一方、異種物性の地層が互層をなす地盤で、その層の厚さが比較的厚い場合には、各層の工学的特性を層ごとに等方性として求めて、解析時にその異方性を考慮することができる。この場合の各種試験の項目は等方性地盤の場合に準ずる。

(iii) 不均質地盤

地質構造に基づいて地盤をゾーニングし、各ゾーンごとに原位置試験を実施する必要がある。この場合、各ゾーンごとに等方性地盤の場合の試験方法を適用する。

解析時に各ゾーンごとの物性を用いることにより評価する。

b) 地盤構成材料の分類とその工学的特性の評価法

地盤の構成材料を工学的に分類すると以下のようである。

硬岩、風化岩、変質岩、軟岩、土、断層破碎帯などの弱層

風化、変質岩は軟岩の分類に含まれる場合もあるが、工学的評価としては別分類として検討する。以下に各材料の評価法を述べる。

(i) 硬岩

硬岩の一軸圧縮強度は一般に、約 500 kgf/cm² 以上であり、一軸圧縮強度が約 100~500 kgf/cm² の岩を中硬岩という場合もあるが、本文では硬岩として扱う。

硬岩は節理が発達している場合が多いので、原位置試験を主体とした評価を行い、その補足として岩石試験の結果を用いて評価することがある。節理が発達した岩盤で各種岩盤試験を実施する場合には、平均的な節理の影響が試験時に考慮できるように配慮する。

変形特性の調査のためには通常平板載荷試験や弾性波速度試験を、場合によっては孔内載荷試験を行い、弾性係数を求める。

強度特性の調査のためには岩盤せん断試験を行い、 τ_0 (せん断強度) および ϕ (内部摩擦角) を求める。

(ii) 風化岩・変質岩

風化作用により、原岩よりも脆くなったものを風化岩、熱や熱水作用により変質したものを変質岩という。風化の進み方は岩石の種類により異なる。たとえば、新規の堆積岩は表層から風化が進むので深部になるに従い新鮮なものとなる。また花崗岩のような硬岩の風化は表層から進む以外に節理、亀裂、断層破碎帯に沿って風化が深部にまで進むので、前者のように深部になれば新鮮なものになるとは限らない。

一方、熱変質および熱水変質でできた緑泥石化岩、炭酸塩化岩、沸石化岩および熱水粘土等はいずれも原岩より軟弱なものとなる。しかし、ホルンフェルス、珪化岩、プロビライトなどは原岩より堅硬、緻密なものとなる。これらは、硬岩として取り扱うことができる。

試験法として風化岩・変質岩に特有なものはなく、硬岩で行われる各種試験法や土質試験法を岩の硬軟により使い分ける。

(iii) 軟岩

軟岩とは、主に第三紀以新の堆積岩であり、堆積岩には構成物質や堆積作用により砂岩・泥岩・シルト岩・凝灰岩等がある。2. (5), b) では堆積岩を準硬岩（軟岩Ⅰ類）、新期軟質岩（軟岩Ⅱ類）、不均質軟岩（軟岩Ⅲ類）に分類する考え方が提示されている。軟岩Ⅰ類および比較的固結度が大きいか不飽和の軟岩Ⅱ類、Ⅲ類に関する調査・試験法および設計の考え方、硬岩における取扱いに準じて行う。しかし、比較的軟質で飽和状態の軟岩Ⅱ類、Ⅲ類に関しては、力学特性の経時変化や含水状態の影響が大きく、クリープや有効応力解析を考慮しなければならない場合があるので、その調査・試験法については注意を要する。

軟岩の特徴の主なものは、土に比べて固結していること、硬岩に比して間隙が大きいこと、および岩石自体が物理化学的作用に弱いことが挙げられる。一軸圧縮強度でいえば、 200 kgf/cm^2 以下のものであるが、多くは、 100 kgf/cm^2 以下であり、また下限値は、およそ 10 kgf/cm^2 程度である。

軟岩は生成上硬岩と明確に分類し得るものではないので、硬岩特有の性質である片理、節理などの亀裂もみられる。しかし、力学的性質に及ぼすこれらの影響は、硬岩の場合ほど大きくなく、一般に岩石試験の結果と岩盤試験の結果との相関性が強い。したがって軟岩の調査・試験は、主として室内試験によるが、必要に応じて原位置試験を行う場合もある。これらの試験に関しては、土木学会岩盤力学委員会第4分科会がまとめた「軟岩の調査・試験の指針」¹⁰⁾が参考になる。比較的軟質で飽和状態の軟岩Ⅱ、Ⅲ類は、後述する飽和状態の断層破碎帯などの弱層材料と同様に、間隙水压の発生挙動が過圧密土と類似であることが知られているため^{11), 12)}、解析への適用を考慮して、 $q_u = 10 \sim 20 \text{ kgf/cm}^2$ を目安に表-5、6に示す試験条件を提案した。また、このような軟岩では、クリープ変形の調査が必要な場合があるが、原子炉建屋基礎設置位置において、施工以前の地山の応力が接地圧を上回っている場合にはこの種の調査試験は基本的には必要がない。

(iv) 土

土は粒子間の結合が弱い材料で、その特徴として一般

表-5 岩盤の種類と試験条件（原子炉建屋基礎地盤⁽¹⁾）

荷重条件	常 時	地 震 時 ⁽⁶⁾
軟岩の種類 ⁽²⁾	A ⁽⁴⁾ : 飽和状態で $q_u < 20 \text{ kgf/cm}^2$ の軟岩	強度は有効応力強度を用いCU試験もしくはCD試験から求める。
	B ⁽⁵⁾ : 飽和状態で $q_u > 10 \text{ kgf/cm}^2$ の軟岩および不飽和状態の軟岩	強度は全応力強度を用い、岩盤せん断試験、一軸圧縮試験、三軸UU・CU試験、圧裂引張試験などから求める。
硬 岩	同 上	同 上

注：(1) 屋外重要土木構造物は表-5, 6に準ずる。

(2) 破碎帶材料の強度は軟岩Aに準じて決定される（表-8参照）。

(3) 軟岩の地質学的見地からの分類案が表-2に提示されている。しかし、ここではそれにはとらわれず、試験を行う立場で全応力解析法、有効応力解析法に対応させた試験方法の適用を中心に、軟岩A, Bに便宜的に区分した。

(4) 比較的軟質で、飽和状態の軟岩II類、III類に属する軟岩。

(5) 軟岩I類および比較的の固結度が大きいか、不飽和状態の軟岩II類、III類に属する軟岩。

表-6 地盤の種類と試験条件（切土斜面、盛土斜面）

荷重条件 安定解析に 必要となる 強度	構造物の建設時および 完成直後	構造物の完成後 (常時および地震時安定問題)
地盤の種類		
砂質土・砂礫	○	○ (液状化を含む)
粘性土 過圧密 ⁽¹⁾ 土 (割れ目なし、 乾燥したもの)	○ CU強度を使用 ⁽³⁾ することもある。 ○ CU強度を使用 ⁽³⁾ することもある。	○ ⁽³⁾ ○
盛土材料(不飽和)	○	○
軟岩	A: 飽和状態で $q_u < 20 \text{ kgf/cm}^2$ の軟岩	○
	B: 飽和状態で $q_u > 10 \text{ kgf/cm}^2$ および不飽和状態の軟岩	○
硬 岩	○	○
備 考	盛土斜面では一般にこのケース が最も危険であるので主にこの ケースについて検討を行う。	切土斜面では一般にこのケース が最も危険であるのでこのケー スについて検討を行う。

注：(1) 亀裂が入ったときの影響を考慮する必要がある。

(2) 表-5 の軟岩の分類に関する脚注を参照。

(3) 切土などの削削を行う場合、常時には吸水膨張による強度低下を考慮して強度を決めることがある。

に変形が大きく、かつ、水の影響を非常に受けやすい材料である。また、攪乱によって構造が乱されると、その力学的性質が著しく異なったものになる。したがって、土の工学的特性としては、物理特性、強度変形特性、圧密特性、締固め特性、透水性等があり、その試験法は土質試験法¹³⁾として各種定められているので、それらを参照して行われるが、原子力における各種設計、解析に際して必要な材料物性の試験の条件は前述した表-6に順

じて行なうことが望ましい。すなわち、有効応力を用いることと土の強度は排水条件や間隙水圧の大小にかかわらず一意的に表わされる。しかしながら、間隙水圧が明確でない場合には有効応力表示より全応力で表示した方が設計上ならびに実用上優れることになる。

非排水せん断強度に基づく全応力解析法は、間隙水の排水条件が非排水とみなせる期間の安全性検討に適用されるものである。たとえば、難透水性の地盤において、載荷条件の変化があった直後のごく短い期間のいわゆる建設中ないし建設直後や地震時の安定解析に適用される。

一方、硬岩のように間隙の割合が比較的少なく、岩自体の体積圧縮係数が水のそれに比較して大きくかつせん断中に体積が膨張するような条件下では、対象とする応力レベルあるいは、応力変化の範囲に比較して、間隙水圧の影響が無視できるので、すべての荷重条件に対しても全応力表示の強度で十分とされている。この場合、岩盤内に働く水圧は節理面等の不連続面に働く外荷重として扱うことになる。

これに対し飽和砂地盤では隙間水の影響が大きいので液状化の判定が必要である。密な砂地盤の液状化判定のために行った研究^[4]によって得られた密な砂地盤の液状化判断法の流れを図-8に、また、密な砂地盤を含めた砂地盤の液状化の判定法を 図-9に示した。この判定法を式で表わすと次のとおりである。

$$R = a|N_i^{0.5} + (bN_i)^n + c - 14.8 \cdot f(D_{50})|$$

$$\begin{cases} f(D_{50}) = 0.255 \log_{10}(D_{50}/0.35) : 0.04 \leq D_{50} \leq 0.6 \text{ mm} \\ f(D_{50}) = 0.05 : 0.6 \leq D_{50} \leq 1.5 \text{ mm} \end{cases}$$

ここに、 N_i は基準化 N 値（上載圧 1 kg/cm^2 に基準化した値）、 a 、 b 、 c 、 n は定数で表-7の値をとり、また、 D_{50} は平均粒径（mm）である。また、密な砂では $c=0$ としても誤差は小さい。

(v) 断層破碎帯などの弱層

断層破碎帯などの弱層は造構運動などの作用により、幅数 mm～数 m の帯状に破碎されたものである。これらは母岩の岩片などの粗粒材からなる断層角礫部分と断層面やシーム沿いに粘土化が進んだ断層粘土に大別される。

断層角礫の部分は、断層粘土に比べて風化変質の度合が少なく強度・剛性が大きい。これに対して断層粘土は、断層運動や風化変質作用によって細粒化、粘土化が進んでおり、組成は、母岩の鉱物組成とは異なり、二次的に生成したモンモリロナイト、イライト、カオリナイトなどが含まれる。

断層粘土は、一般に断層が生成した後、さまざまな環境で長い地質時代を通じて地殻運動や風化変質作用を受けており、この結果上述のような種々の鉱物組成、粒度

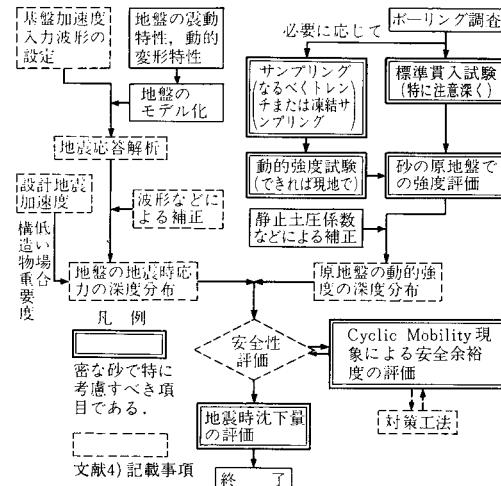


図-8 密な砂地盤の液状化判定法の流れ

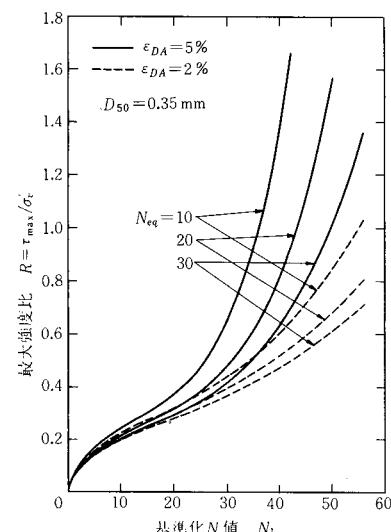


図-9 新しい液状化判定カーブ

表-7 液状化判定式の定数の値

		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>n</i>
$\epsilon_{DA} = 2\%$	$N_{eq} = 10$	0.0639	0.0346	0.312	3.21
	$N_{eq} = 20$	0.0584	0.0336	0.312	2.80
	$N_{eq} = 30$	0.0554	0.0318	0.312	2.78
$\epsilon_{DA} = 5\%$	$N_{eq} = 10$	0.0760	0.0420	0	4.77
	$N_{eq} = 20$	0.0676	0.0368	0	4.52
	$N_{eq} = 30$	0.0631	0.0345	0	4.00

構成、含水比、および鏡肌などの破碎組織・破碎状態を有している。したがって、断層粘土は塑性指数が小さく圧縮性の小さな無機質の粘性土ではあるが、さまざまな力学的特性を示す可能性があるので慎重な検討が必要である。

ある。

断層破碎帯などの弱層は、岩片などを多量に含んでいため、あるいは厚さが非常に薄いこともあるため、試験が困難な場合もあるが、できるだけ不攪乱試料による室内試験を実施することが望ましい。また、場合によっては適切な原位置試験により、力学的な評価を行う。

上述したように、断層破碎帯中の角礫部分の材料と断層粘土では、粒度、構成鉱物が著しく異なるので、力学特性の評価は2種類の材料として調査・試験を実施する必要がある。

調査・試験は乱した試料についての物理試験、不攪乱供試体についての力学試験が中心に行われるが、場合によって原位置での強度試験、変形試験その他各サイトの状況に応じた特別な試験が行われる。表-8にそれぞれ目的に応じて考えられる調査・試験の項目を記述した。

これらを適切に組み合わせて力学特性を評価する必要がある。

ボーリングによる不攪乱サンプリングの採取は非常に困難であるので、試掘坑内で採取した乱さない供試体について室内試験を行うが、その際掘削による応力解放に伴う含水比や飽和度の変化を防ぐようにする必要がある。

表-8 地盤の常時・地震時安定性評価のための断層破碎帯などの弱層材料の不攪乱供試体試験^{注1)}・原位置試験による物性値の評価

項目 対象	物理試験	常時安定性評価		地震時安定性評価		備考
		强度試験	変形試験	强度試験	変形・減衰試験	
断層粘土 「断層、シームなどの粘土化の進んだ材料」	物理試験一式 (自然含水比 ^{注2)} 飽和度 塑性指数 密度、粒度など)	一面せん断 単純せん断 三軸圧縮 ^{注4)} (圧密排水条件)	単純せん断 三軸試験 標準圧密 K_0 圧密	動的単純せん断 動的三軸圧縮 または静的な 一面せん断 単純せん断	動的単純せん断 動的三軸圧縮 (CU条件)	圧密試験等 により適切 に試験の応 力範囲を決 める
	(場合によっては断 層内物質分析 ^{注3)} 組成分析 石英粒子の表面分 析、粒度分析など)	場合によっては コーン貫入、ボー リング孔内せん断 等の原位置試験	場合によっては ボーリング孔内載 荷等の原位置試験	三軸圧縮 (すべてCU条件)	場合によっては 微小区間弾性波速 度測定	
断層破碎帯中の 断層角礫部分 「母岩等の砂、 礫、岩片を含む 材料」	同上	三軸圧縮 ^{注4),5)} (圧密排水条件)	三軸圧縮 ^{注5)} 三軸クリープ	動的三軸圧縮 ^{注5)} または 静的三軸圧縮 ^{注5)} (CU条件)	動的三軸圧縮 ^{注5)} (CU条件)	同上
		場合によっては 原位置せん断	場合によっては 原位置変形 原位置クリープ	場合によっては 原位置せん断	場合によっては 原位置動的変形 微小区間弾性波速 度測定	

注 1) 攪乱供試体による評価は不攪乱供試体に準じて行う。

注 2) 特に求めることが望ましい物性値。

注 3) 断層活動性調査の一環として行われることがある。小断層、シームが多数ある場合、同一性質の弱層であれば代表的な弱層で検討する。

注 4) \overline{CU} 試験等によることが望ましい。ただし一般には CU 強度 $< \overline{CU}$, CD 強度であり、供試体の飽和が困難な場合や \overline{CU} , CD 試験の実施が困難な場合があるため、安全裕度のある場合は CU 条件とすることもできる。ただし斜面のり肩など除荷によって CU 強度 $> \overline{CU}$, CD 強度になる場合は \overline{CU} , CD 条件とする。

注 5) 供試体径は最大粒径の5~6倍程度とする。

室内試験の供試体は、強制的に飽和させることが困難な場合やそのために供試体を乱すおそれのある場合があるので、自然状態の飽和度で試験を行う。試験に際しては、採取時と試験時の初期飽和度およびせん断前の間隙水圧係数 (B 値) などを測定する必要がある。

断層破碎帯などの弱層が薄くて不攪乱供試体の採取が困難な場合は、不攪乱供試体の採取が可能な類似の弱層の供試体についての力学試験結果によって評価してもよい。この場合類似性の判断は表-8に示した物理試験によって行う。しかし、類似の弱層が存在しない場合には、自然の状態をできるだけ変えず、再圧密(たとえば、各深度に対応する上載圧による圧密)した攪乱供試体について試験を行う。

供試体中には母岩の岩片が含まれることが多いので、供試体径は含まれる岩片の最大粒径の5~6倍以上とするのが望ましい。

安定解析を実施する場合は、弱層の分布、広がり、連続性、厚さおよびその成因などを調べ、地盤モデルを作成することが必要である。これらは文献調査、地形調査、試掘坑調査、ボーリング調査などによって行われる。

弱層の耐震安定性の評価は、十分な数量の不攪乱供試体が得られる場合は、動的強度によるか、あるいは動的

参考文献

- 1) 原子力安全委員会：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針，1981.
- 2) 原子炉安全専門審査会：原子力発電所の地質、地盤に関する安全審査の手引き，1978.
- 3) 土木学会原子力土木委員会地盤部会：原子力発電所地盤の耐震性評価手法の標準化，土木学会誌，pp. 59～63，1984-12.
- 4) 土木学会原子力土木委員会地盤部会，地盤の耐震設計分科会：原子力発電所地盤と屋外重要土木構造物の耐震性評価法，土木学会論文集，第356号／I-3，1985-4.
- 5) 緒方正慶・本荘静光：電力施設の耐震設計における断層活動性の評価，応用地質，23-1，1981.
- 6) 土木学会編：ダムの地質調査，1977.
- 7) 建設省河川局砂防部傾斜地保全課，同省土木研究所砂防部急傾斜地崩壊研究室編：がけ崩れ災害実態について，土木研究所資料第1109号，昭和51年2月および第1492号，昭和54年3月.
- 8) 反町雄二：崩壊土砂の流下距離，土木技術資料19-10，1977.
- 9) 伊藤 洋・北原義浩：地盤物性のバラツキの評価法（その2）—物性のバラツキが地盤の安定性に及ぼす影響—，電力中央研究所報告，No. 384026，昭和60年1月.
- 10) 土木学会岩盤力学委員会第4分科会編：軟岩の調査・試験指針
- 11) 赤井浩一ほか：堆積岩（多孔質凝灰岩）の弾塑性挙動，土木学会論文報告集，第271号，1978.
- 12) 西 好一ほか：泥岩の力学的特性に関する研究（その3），電力中央研究所報告，No. 382013，1982.
- 13) 土質工学会編：土質試験法，昭和54年12月.
- 14) 国生剛治ほか：密な砂地盤のN値による液状化判定法，第19回土質工学研究発表会，1984.
- 15) 西 好一・江刺靖行：断層材料の力学特性，電力中央研究所報告書（執筆中）

(1985. 5. 21・受付)

強度が静的強度を下回らないことを確認したうえで静的強度によることが望ましい。なお、これまでの比較試験の結果では、動的な強度が静的な圧密非排水(CU)試験によって求めた強度を上回る場合が多い¹⁵⁾。また、一軸圧縮試験や三軸圧縮非圧密非排水試験による強度は試料採取時の応力解放や採取時の攪乱の影響が大きく、人為的な強度低下を受ける可能性が多いので、これらの試験による強度を用いることは望ましくない。

安全評価のための局所安全係数の考え方については、完成直後、完成後、地震時と分けて考える必要がある。

完成直後や地震時などは、それぞれ建設前や完成後の常時の作用応力（たとえば、平均主応力）に対するCU強度によって行う必要がある（表-5、6参照）。なお、CU強度の破壊包絡線の求め方は土質工学会編の「土質試験法」¹³⁾に準じて行う。この際、完成後の常時の作用応力は圧密終了時（過剰間隙水压0、浮力分を差し引いた状態）の値とする。また、地震時荷重による応力は、この状態の応力に加算された応力として評価される。なお、これらの考え方は土および軟質な軟岩($q_u < 10 \sim 20 \text{ kgf/cm}^2$)に共通なものである。

4. あとがき

以上、最近の学問と技術の知見をもとにとりまとめた原子力発電所地質・地盤の調査・試験法について、その主要な点を報告した。

現在、ここで取り上げた内容を含めて全体の成果について報告書を準備中であるが、会員諸兄が今後ともこの課題について関心を寄せられることを期待するとともに、ご助言をいただければ幸いである。

おわりに、本検討にあたり実施した調査・試験などにご尽力をいただいた関係各位に感謝の意を表する。