

大深度岩盤内空洞建設における広域立地選定のための岩盤評価

桑原 徹 鈴木 健一郎
並木 和人 平間 邦興

Proposed New Estimation Methods and Test Flows of Rock Mass Properties for Regional Site Selection in Very Deep and Large Underground Construction Projects

Tohru Kuwahara Kenichirou Suzuki
Kazuto Namiki Kunioki Hirama

Abstract

This paper proposes new estimation methods and test flows of rock mass properties for regional site selection in very deep and large underground construction projects based on recent studies. It is divided into three parts. The first summarizes the subdivisions of engineering geological units and their characteristics. The second clarifies the relationship between deformation or permeability characteristics for hard and soft rocks and overburden stress (depth) based on results of in-situ tests. The third explains the flow concept of surveys or tests on hard and soft rock masses for deformation or permeability.

概 要

本研究は、大深度岩盤内空洞建設における広域立地選定の岩盤評価・調査手法について、最近の研究結果を基にして新しい試案を検討したものである。すなわち、① 日本の最新の地質構造区分に基づく、地山の地盤工学的区分とその地盤工学的特徴をまとめ、② 原位置岩盤試験データに基づき硬質岩盤と軟岩に関して、岩種／岩盤等級区分～変形特性／透水特性～深度依存性（応力依存性）を評価し、③ 各種調査試験技術に関して、力学・透水特性の評価レベルを検討し、岩盤調査のフローを力学モデル／水理モデル～硬質岩盤／軟岩の組合せで作成した。

1. はじめに

大規模岩盤内空洞施設や重要構造物の支持岩盤の選定に際しては、従来からもさまざまな立場から広域立地選定が実施されてきた。この際に地震・活断層の評価の重要性は言うまでもないが、他の地質的要因の評価に関しても、最新の知見が取り込まれるべきである。

この研究では、特に大深度岩盤内空洞建設における広域立地選定の課題として、① 地質構造特性と地盤工学的特性、② 大深度を対象とした地盤物性の深度（圧力）依存性、③ 地盤調査手法の効果的利用を対象に、最新の知見に基づき再検討し、精確かつ効率的な立地選定のための、新たな地質評価手法を提案するものである。

2. 地質構造区分と地盤工学的特性

2.1 日本の岩盤に関する地質構造区分

日本の地質構造区分は、プレートテクトニクスに基づいた最近の研究により、図-1のように大別できる¹⁾。

(A) 付加コンプレックス；主に砂岩頁岩互層、粘板岩、チャート・石灰岩などの堆積岩。他に、結晶片岩・緑色

岩（変質玄武岩類等）・はんれい岩・蛇紋岩など。

(B) 被覆堆積岩層；泥岩・砂岩・礫岩、互層、など。

(C) 貫入岩類；火山活動に伴う火山噴出物・熔岩、地下深部でのマグマ冷却による花崗岩・はんれい岩など。

(D) 極めて古い地質体；主に変成岩類（大陸性基盤）。

これらの関係は、(D)周辺のプレート沈み込み帯の海底下で、(A)の多種多様な岩体が海洋プレートにより順次付加され、一方では(B)の河川・湖沼などでの陸上堆積層や海底の大陸棚での堆積物が形成される。また地下深部からのマグマ活動により、(C)のような陸上・海底火山活動に伴う熔岩流・火山噴出物、深部でそのまま固化した花崗岩類などが形成されている。

2.2 既設重要構造物と立地条件・地質構造区分

既設重要構造物の立地条件に関して、地質構造区分（図-2）²⁾に基づく、以下のようにまとめられる。

① 大型地上ダムでは、新第三紀火山岩類（グリーンタフ層）、白亜紀～古第三紀の花崗岩類、ジュラ紀を主体とする付加コンプレックス、古第三紀～白亜紀を主体とする付加コンプレックス、白亜紀～古第三紀の流紋岩類の順が多い。

② 長大橋梁基礎では、大部分が白亜紀～古第三紀の花崗岩類に該当する。堆積岩層の例は少ない。

③ LNG・石油地下タンクなどの大深度土留工事では、新第三紀の堆積岩層が多い。

④ 原子力発電所では、白亜紀～古第三紀の花崗岩類、新第三紀堆積岩層および新第三紀火山岩類の順で多い。

⑤ 揚水式地下発電所では、白亜紀～古第三紀の花崗岩類、ジュラ紀を主体とする付加コンプレックス、白亜紀～古第三紀の流紋岩類、の順に多い。

⑥ 石油地下備蓄・CAESでは、白亜紀～古第三紀花崗岩類、新第三紀火山岩類、古第三紀～白亜紀堆積層にある。

⑦ 高レベル放射性廃棄物処分施設では、白亜紀～古第三紀の花崗岩類、新第三紀の堆積岩層が想定されている。

以上から、大規模地下構造物は、結晶質岩(白亜紀～古第三紀の花崗岩類・流紋岩類) および古期堆積性中硬岩(ジュラ紀を主体とする付加コンプレックス、など)に多い。一方、地上構造物はより広い岩体を対象にしている。また施工事例は少ないが、特殊な岩体としては、付加コンプレックスや花崗岩岩体中に存在するはんれい岩など(苦鉄質岩体)がある。また地滑り地帯となりやすい結晶片岩では、施工事例は少ない。

2.3 地質構造区分と地盤工学的特性評価

日本の地質構造区分に基づき、各地質单元(同一の地質構造および岩質特性を有する)を工学的に評価し、地盤工学的区分として再編成し、その特徴をまとめて表-1に記述した。地盤工学的区分は、“地質学的(理学的)

な岩石分類”手法に、地盤工学的の評価も加えた「結晶質岩」「堆積性軟岩」などの“地盤工学的な岩盤名称”によっている。ここでは地盤工学的の特徴として、岩石の種類、地質構造、亀裂、強度変形特性、水理水文特性、風化変質、その他について示した。

これらの地盤工学的の区分に対して、代表的な岩盤物性

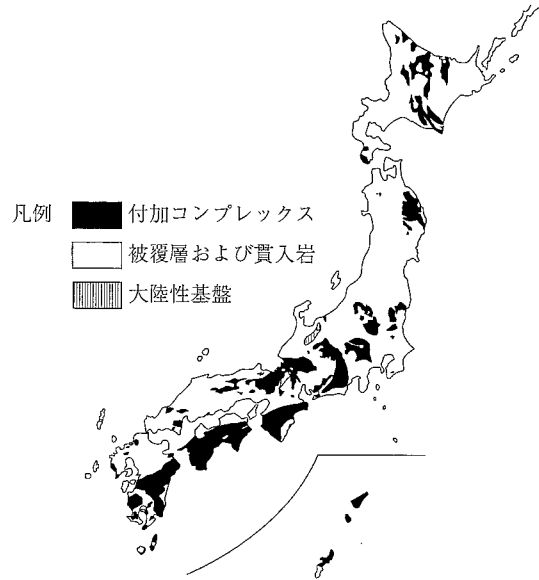
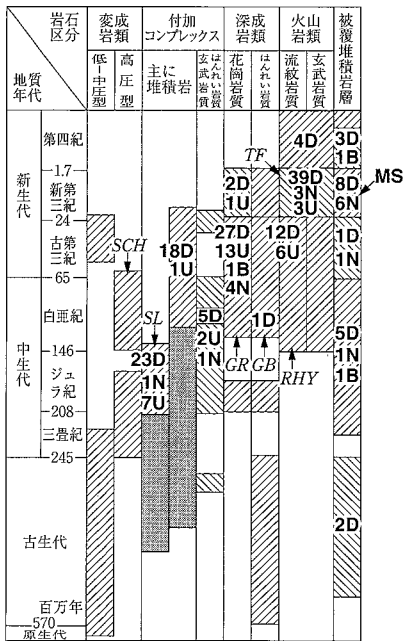


図-1 地質構造区分(参考文献1)を簡略化

表-2 代表的な岩盤の物性値

岩種	α (g/cm ³)	W(%)	Vp/Vs(km/s)	q_u (kgf/cm ²)	E_{so} (kgf/cm ²)	ν	k(cm/sec)
MS(泥岩)	1.958	27.5	1.77/0.85	50	5,000	0.24	1.9×10^{-4}
TF(凝灰岩)	1.937	27.2	1.80/0.93	50	6,000	0.38	3.1×10^{-4}
RHY(流紋岩)	2.556	1.93	4.44/2.35	1,270	200,500	0.26	4.5×10^{-3}
GR(花崗岩)	2.464	2.70	4.07/1.87	790	151,000	0.27	3.6×10^{-3} 1.3×10^{-3}
GB(はんれい岩)	2.8	2.36	3.85/2.13	825	386,300	0.24	1.7×10^{-4}
SCH(結晶片岩)	2.723		4.21/1.6	1,020	394,100	0.18	
SL(頁岩砂岩、粘板岩)	2.725	1.2	4.7/2.7	600	500,000	0.2	
F(断層)							
硬岩中粘土	2.23	12.3	1.60(*0.75)/	0.55			$2.5 - 25 \times 10^{-6}$
軟岩中粘土	1.85	37.1	1.54/				
硬岩破砕帯	2.65		1.58(*1.50)/	300	60,000	0.25	

k: *印 室内試験データ(他は原位試験データ), Vp: *印 原位測定データ



D: ダム, U: 地下発電所, N: 原子力発電所, B: 橋梁
アルファベットの前の数字は件数
MS等は表-2に示す岩種の属する地質单元を示す。

図-2 地質構造区分・地質発達史・地質单元と構造物(参考文献1)に加筆修正)

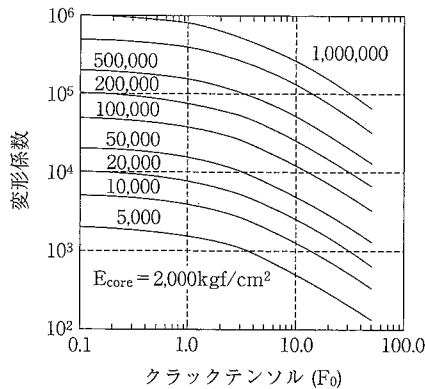


図-3 クラックテンソルと巨視的変形係数

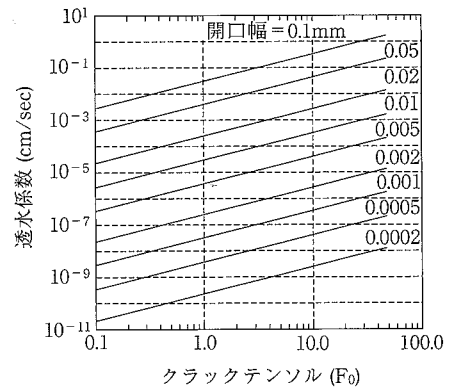


図-4 クラックテンソルと巨視的透水係数

表-1 地盤工学的特徴

地盤工学的区分	地質学的区分	地盤工学的特徴
結晶質岩	花崗岩	(R)主に白亜紀花崗岩。(S)均質。(F)節理系が卓越。(D)新鮮岩盤～強風化の風化軟岩、マサ土まで変化が大。(H)強度変形特性と同様に変化が著しいが、新鮮な岩盤では極めて低い透水性。(W)深層風化と共に、地下水の変動部分での化学的風化が顕著。長期間の熱水条件下で、マイクロクラックの増加や粘土鉱物の生成と変質が認められる場合がある。
	片麻岩	(R)主に飛騨片麻岩。狭い分布。(S)地質学的には不均質であるが、工学的にはほぼ均質。(F)連続性の少ない亀裂群。(D)高い弾性波速度。(H)極めて低い透水性。
	流紋岩	(R)白亜紀～古第三紀の流紋岩・安山岩質溶岩および溶結凝灰岩。(S)流紋岩質凝灰岩が多く、堆積時・流動時に生ずる流理構造が顕著であるが、工学的にはほぼ均質均質。(W)風化は花崗岩と比較して目立たず、マサ化のような現象はない。
変質岩	付加コンプレックスの輝緑凝灰岩	(R)輝緑凝灰岩・変質玄武岩・凝灰岩等からなる海底火山の噴出物(熔岩・火山灰)。(S)塊状あるいは一部層状化、岩体の広がり小。(F)不規則な亀裂群。(W)変質が顕著で、膨潤性粘土鉱物を含む場合がある。
	異地性玄武岩	(R)輝緑凝灰岩・変質玄武岩・凝灰岩等からなる海底火山の噴出物(熔岩・火山灰)。(S)岩体の広がり上記よりも小。(F)不規則な亀裂群。(W)変質が顕著で、膨潤性粘土鉱物を含む場合がある。
	付加コンプレックスの蛇紋岩	(R)蛇紋岩・はんれい岩・変はんれい岩等。(S)全体として塊状であるが、亀裂面沿いに層面滑りが発達。特殊な例として蛇紋岩れき層。(F)周辺には堆積性付加コンプレックスが分布し、全体的として断層破砕帯。(H)不透水層。(W)地下水との反応により2次的な変質を受けやすく、膨潤性粘土鉱物のスメクタイトを生じて変形・膨張・地滑り等の要因になり易い。浸水崩壊度。(O)劣化・浸水性が高いので通常の土木材料としては不適。しかし高速増殖炉の中性子防護用のボロンコンクリート用骨材として利用。
	大規模貫入岩のはんれい岩・蛇紋岩	(R)蛇紋岩・はんれい岩・変はんれい岩等。(S)全体として塊状であるが、亀裂面沿いに層面滑りが発達。周辺には花崗岩が分布。(F)節理系が発達。(D)はんれい岩は風化変質がなければ極めて強固な岩盤。(H)不透水層。(W)はんれい岩は地下水との加水反応により蛇紋岩へと変化し、膨潤性粘土鉱物のスメクタイトを生じて変形・膨張・地滑り等の要因になり易い。浸水崩壊度が高く風化を受け易い。(O)劣化・浸水性が高いので通常の土木材料としては不適であるが、高速増殖炉の中性子防護用のボロンコンクリート用骨材として利用。
開口亀裂性火山岩	付加コンプレックスの火山岩類	(R)安山岩・流紋岩・玄武岩の溶岩・凝灰角レキ岩・火山角レキ岩など。新鮮岩盤では比較的健碩、一方変質した場合は粘土化が進行。(S)塊状・層状。流紋岩質溶結凝灰岩では生成時の流理構造が顕著であるが、工学的にはほぼ均質。(F)顕著な節理系により異方性。(W)流紋岩は変質により酸性地山化を、玄武岩は膨潤性粘土鉱物を生じ易い。鉱山の變質帯付近で顕著。
	第四紀火山岩	(R)安山岩・流紋岩・玄武岩の溶岩・凝灰岩。(S)溶岩層の場合、火山灰層・凝灰角レキ・表土・河川の砂レキ層などの軟弱層を挟在。したがって支持地盤の判断が困難な場合がある。(F)溶岩層は冷却時の収縮により規則的な柱状・板状の節理群が発達。異方性が顕著。トップリング現象。(H)節理が開口する場合は高い透水性を示し、地下水にとっては良好な帯水層ともなるが、施工上は突発湧水などで問題になる場合が多い。(W)高熱水帯・硫黄などによる温泉変質帯(温泉余土)。(O)非結晶質火山岩(サヌカイトなどの輝石安山岩)でのアルカリ骨材反応。
古期堆積性中硬岩	浅海性の頁岩・粘板岩・砂岩	(R)主に中生代・古生代の頁岩・粘板岩・砂岩。(S)傾斜した層構造(単斜構造)あるいは緩い褶曲構造のために、受け盤・流れ盤の判定が必要。(F)亀裂は相対的に少ない。(D)亀裂と異方性の評価、室内試験と原位置試験の対応性評価が重要。
	付加コンプレックスの砂泥互層・砂頁岩互層	(R)主に中生代・古生代の砂泥互層・砂頁岩互層。(S)傾斜した層構造(単斜構造)、緩い褶曲構造、小規模な微褶曲構造、互層による顕著な異方性。受け盤・流れ盤の判定が必要。(F)地層境界に直交する亀裂群。破砕状況は比較的少ない。(D)インタクトロックは硬質であるが、亀裂と異方性のために岩盤特性の評価が困難。載荷軸方向と堆積面の関係、室内試験と原位置試験との対応性評価が重要。応力解放により亀裂群が開口する前は、弾性波速度では良好な岩盤状況を示す。(W)泥岩部分は風化・剝離性が顕著。
	付加コンプレックスの頁岩・粘板岩	(R)主に中生代・古生代の頁岩・粘板岩をマトリックスとし、砂岩・頁岩・チャート・玄武岩・石灰岩をレキ状・岩塊状に含む。(S)地質構造は極めて複雑。多数の断層により傾斜した層構造・褶曲構造が複雑に繰返す。大小のレキ状・岩塊状の岩盤が極めて不均質・雑多に含まれる。チャートは微褶曲等のさまざまな規模の褶曲を示す。受け盤・流れ盤の判定が重要。(F)顕著な亀裂集中帯、堆積面に沿う断層破砕帯、層面滑り、その他の不均質な亀裂群、チャートにおけるマイクロクラック群など。全体として破砕帯性状。(D)個々のインタクトロックは硬質であるが、極めて不均質で亀裂や異方性が顕著なため、岩盤全体の評価が困難。特に室内試験と原位置試験との対応が困難。応力解放により亀裂群が開口する前は、弾性波速度では良好な岩盤状況を示す。(W)マトリックスの剝離性が顕著。
	異地性チャート	(R)中生代・古生代の珪質チャート・泥質チャート。(S)塊状、層状の顕著な褶曲構造。(F)マイクロクラックが多数発達。(D)チャート自体は極めて硬質であるが、亀裂と微褶曲のため岩盤全体の特性は不明確。(W)地表付近では地下水の影響を受けて、顕著な風化帯を形成する場合もある。
石灰岩	異地性石灰岩	(R)中生代・古生代の石灰岩・泥質石灰岩で、硬岩。(S)塊状で、岩体の規模は大～小までさまざま。鍾乳洞など大小の空洞が存在。(F)顕著な断層破砕帯は少ないが、開口幅の大きい亀裂が卓越。(D)均質。再結晶した(変成作用を受けた)大理石(結晶質石灰岩)はよりいっそう均質。(H)良好な帯水層。(W)地下水による化学的風化(溶解)。
	珊瑚礁性石灰岩	(R)琉球石灰岩。第四紀の半固結・多孔質・珊瑚礁性の石灰岩。(S)硬質部分と軟質部分の互層状水平構造。鍾乳洞など大小の空洞が存在。(F)不明確。(H)良好な帯水層であるが、粘性土のために部分的に透水性が低下する。
結晶片岩	結晶片岩	(R)泥質片岩・砂質片岩・緑色片岩など。(S)片理構造と呼ぶ造岩鉱物の規則的な配列組織により、工学的には顕著な異方性と剝離性構造を示す。地滑り地帯が発達。(F)片理面に直交する節理群が密に発達。(D)片理面の異方性の評価、室内試験と原位置試験との対応性が重要。(W)風化に対して脆く、細片状化。緑色片岩では風化により膨潤性の緑泥石を生ずることがある。
	土丹	(R)新第三紀層の泥岩、部分的に薄い砂質泥岩層・砂岩・凝灰岩層を挟在。横浜周辺の泥岩を標準的な土丹と呼ぶが、太平洋沿岸の新第三紀泥岩層は土丹と類似。(S)塊状で、明確な堆積面(層理面)は不明確。(F)他の岩盤と比べると、亀裂は極めて少。(D)堆積面による異方性の可能性もあるが、通常は均質等方として扱う。硬岩(不連続性岩盤)とは対照的に、室内試験により原位置岩盤を評価可能とされている。(H)通常は不透水層。しかし泥岩層中の薄い砂層の挟みや節理を対象にして、ハイドロフラクチュアリング、パイピング、ボイリングなどが議論される。(W)亀裂からの地下水浸透による岩盤の化学的風化の進行が議論されるが、長期熱水試験でも劣化変質は少ない。土丹は泥岩の中ではスレーキング等の浸水性に対しても強い。(O)泥岩は還元環境下で形成されたため硫化鉄を含んでおり、地下水との反応により硫酸酸性を生ずる。
堆積性軟岩	グリーンタフの泥岩・砂泥互層・凝灰岩	(R)深海性の泥岩・砂岩・砂泥互層・凝灰岩。グリーンタフと呼ばれる顕著な変質作用を受ける。日本海側に広く分布。(S)緩い成層構造・単斜構造・大規模な褶曲構造・局所的な小規模褶曲構造。(F)断層の規模によらず断層と母岩との岩質の差は少ない。亀裂は比較的少、堆積面に直交する連続性の乏しい亀裂が多い。しかし海底地滑りの乱堆積現象に伴う広域的な破砕帯(小規模断層群・連続性の良い節理群・粘土化・劣化帯などを伴う)が顕著。(D)砂泥互層では異方性の評価と、室内試験と原位置試験との対応性評価が重要。(H)ハイドロフラクチュアリング・パイピング・ボイリングがしばしば問題となる。神戸層群などのように、スレーキング現象を生じやすく、浸水性に対して弱い場合がある。(W)乱堆積型の破砕帯を通じた地下水流により、劣化や粘土化が顕著な場合がある。泥岩は膨潤性粘土鉱物のスメクタイトを含み、変形・膨潤・崩壊・地滑り等の問題を生じる。変質した凝灰岩にもスメクタイトが含まれる。(O)日本海側の褶曲地帯でも、地塊により健岩部と劣化帯、超膨潤性粘土など性状が顕著に異なる。泥岩は還元環境下で形成されたため硫化鉄を含んでおり、地下水との反応により硫酸酸性を生ずる。
	付加コンプレックスの砂岩・泥岩・凝灰岩	(R)主に新第三紀層の深海性泥岩・砂岩・砂泥互層・凝灰岩。グリーンタフ層の一部で南関東の三浦・房総半島に限定される。(S)単斜構造・大規模な褶曲構造、局所的な小規模褶曲構造、逆断層系。(F)大規模な逆断層系を伴うほか、各種の断層系。明確な節理群と小規模断層系。海底地滑り時の乱堆積現象も認められるが、これに伴う広域的な破砕帯(小規模断層群・連続性の良い節理群・粘土化および劣化帯)は少ない。(D)砂泥互層では異方性の評価と、室内試験と原位置試験との対応性評価が重要。(H)ハイドロフラクチュアリング・パイピング・ボイリングも問題になることがある。(W)泥岩は膨潤性粘土鉱物のスメクタイトを含み、変形・膨潤・崩壊・地滑り等の問題を生じる。葉山層群は地滑り層として有名。超膨潤性地山もある。硫酸酸性の可能性。
結晶片岩	浅海性の砂岩泥岩・石灰層・凝灰岩	(R)泥岩・砂岩・砂泥互層・石灰層・凝灰岩で、部分的に互層状。非グリーンタフ層で、変質作用は受けていない。炭田地帯が該当。(S)単斜構造・局所的な小規模褶曲構造。石灰層に沿った地滑りが顕著。(F)堆積面に直交する節理群が顕著。小規模断層が主で、広域的な破砕帯は少ない。(D)砂泥互層では異方性が顕著。(O)炭鉱坑道跡の空洞が、設計施工上しばしば問題となる。

(R)岩石の種類, (S)地質構造, (F)亀裂, (D)強度変形特性, (H)水理水文特性, (W)風化変質, (O)その他

を当社岩盤データベースから検索するなどし、その平均値（正規分布を仮定）を表-2に示した。これから堆積軟岩では泥岩と凝灰岩は同様な物性を示すが、ポアソン比の違いが特徴的である。結晶質岩の中では、流紋岩と花崗岩は物理・透水特性では類似性を示すが、花崗岩の風化度の関連から力学特性がやや異なる。花崗岩・流紋岩と輝緑岩では、輝緑岩が鉄などの金属鉱物を多く含むために、物理特性での違いが見られる。輝緑岩および頁岩・砂岩・粘板岩・互層（古期堆積性中硬岩）は、花崗岩・流紋岩に比べてマイクロクラックが多いために、強度特性が小さく現れる。透水性に関しては、堆積軟岩

の方が結晶質岩よりも小さい値が得られている。

また不連続性岩盤の評価のために、クラックテンソル F_0 とインタクトロックの物性から、「等価に置き換えた亀裂性岩盤の巨視的変形係数および透水係数」を図-3, 4に示す。透水係数について、図では亀裂の半径が $r=1$ mの場合であるが、 $r=4$ mでは透水係数は約 $2/3 \times 10^{-1}$ 程低下する。以上から、表-1の各地盤工学的区分に対して、地質特性と岩盤物性の概要を把握できる。

3. 岩盤物性の深度依存性

当社岩盤データベースおよび既往文献資料²⁾に基づき、

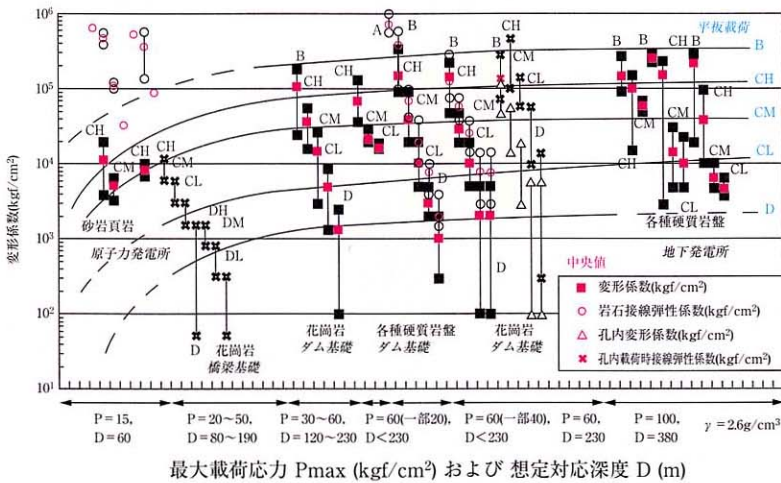


図-5 硬質岩盤の変形特性の応力（深度）依存性

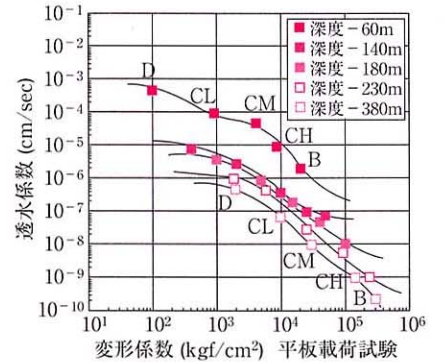


図-8 硬質岩盤物性の深度依存性

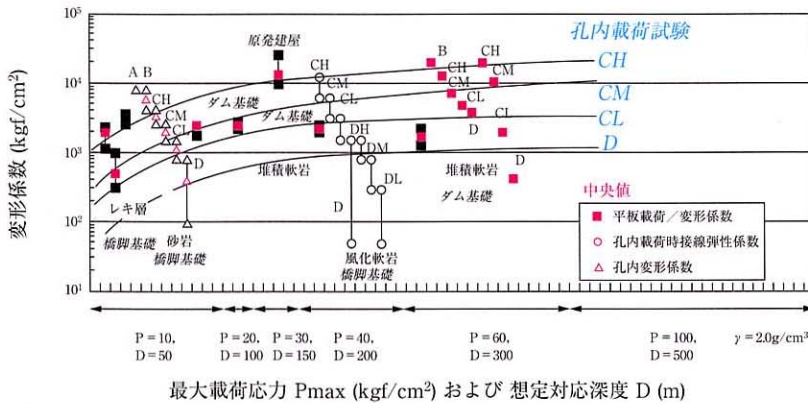


図-6 軟岩の変形特性の応力（深度）依存性

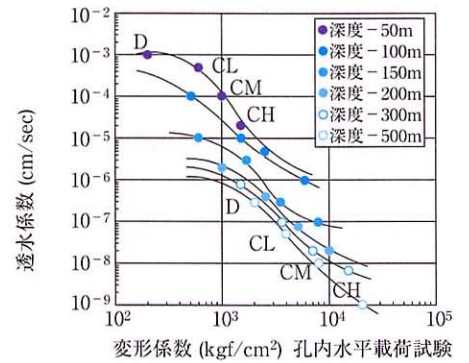


図-9 軟岩物性の深度依存性

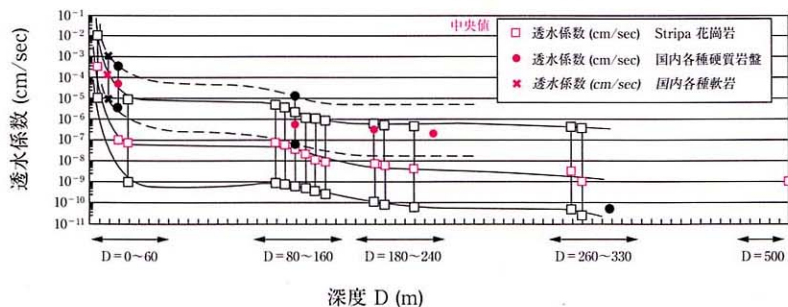


図-7 岩盤の透水特性の深度依存性

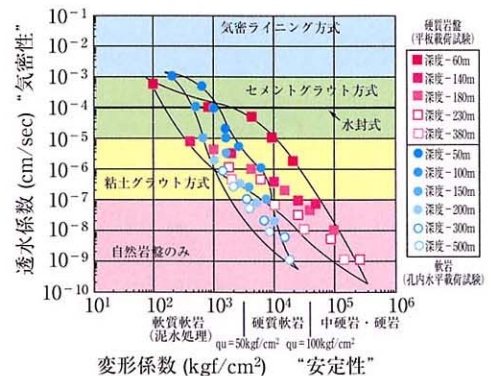


図-10 岩盤物性の深度依存性

岩盤物性の深度依存性に関して検討した。

3.1 変形特性の応力（深度）依存性

ここでは原位置載荷試験の載荷応力(P)を地山の土被り圧(σ_z)と考えて、対応する地山深度($D = \sigma_z / \gamma_t = P / \gamma_t$)を想定した。したがって原位置載荷試験の応力を深度に換算するにあたっては、各深度における拘束圧 σ_3 の影響は考慮していない。岩盤は、“硬質岩盤”と“軟岩”に分け、かつ岩盤等級区分ごとに「深度依存性(載荷応力・応力レベル)～変形係数・弾性係数」の関係を求めた。なお“硬質岩盤”では結晶質岩および古期堆積性中硬岩を、“軟岩”では堆積性軟岩および風化軟岩を対象にした。

原位置岩盤載荷試験(平板載荷試験, ブロックおよびロックせん断試験, 孔内平板載荷試験)から得られる変形係数・弾性係数は、載荷方式、載荷板の大きさ、載荷速度、計算方式(等変位・等分布)、係数の計算区間などの試験・解析条件により異なる。岩盤等級区分によっても得られる係数は異なる。また係数としては、変形係数(D/載荷時)、載荷時・除荷時接線弾性係数(E_{tu}, E_{tl})、載荷時・除荷時割線弾性係数(E_{sl}, E_{su})、等圧型孔内載荷変形係数(E_{sb})、室内弾性係数(E_{s0})がある。構造物の設計方式により載荷時・除荷時の選択など、採用すべき係数が異なるが、次の特徴が認められる。

- (a) 応力レベルが高くなると、変形・弾性係数も大きくなるが、E_{tl}よりもE_{tu}の方が約2倍増加率が大きい。
- (b) DとE_{tu}では相関性が良い。
- (c) E_{tu}=1.5×E_{tl}となり、E_{tl}よりもE_{tu}の方が大きい。
- (d) D/E_t(E_{tu}およびE_{tl})は、岩盤の亀裂面の密度・緩みと締め固まり度の程度を表すが、岩盤区分ごとに異なる。
- (e) D=0.1～0.6×E_tとなり、DはE_tよりもかなり小さい。
- (f) 全体としてD=1～3×E_{sb}となり、試験横坑を利用したDよりも、ボーリング孔のE_{sb}の方が大きい。

したがって、応力レベルの上昇によって全体的に係数は増加傾向にあるが、全体としては、 $D \ll E_{tl} < E_{tu} < E_{sb} < E_{s0}$ となり、Dが最も安全側である。

図-5は硬質岩盤について示す。載荷応力の大小関係は、おおむね地下発電所>ダム>長大橋梁基礎>原子力発電所建屋の順になる。これらにおける係数値の分布範囲はばらつくが、主に平板載荷試験の変形係数Dを基準として、岩盤等級区分ごとの平均値を判断した。この平均値は応力レベルの上昇に伴い大きくなるが、特に低応力レベルでの依存性が大きい。

図-6は同様に軟岩について示す。載荷応力の大小関係は、おおむねダム>原子力発電所建屋>(長大)橋梁基礎の順である。軟岩基礎のダムでは岩盤等級区分があまり行われていないので、橋梁基礎のE_{sb}による岩盤区分を参考にした。応力依存性の傾向は硬質岩盤と同様であるが、軟岩の場合は変形特性がひずみの大小にも大きく依存する。これらの原位置試験データではひずみレベルはほぼ同様の 10^{-2} 程度と考えられるので、設計用変形係数の設定の際には、図-6に加えてひずみレベルによる補正が必要な場合もある。変形係数Dは軟岩では硬質

岩盤に対して約1/2～1/5小さいが、D級硬質岩盤の低レベル側では軟岩以上に小さい場合もある。

3.2 透水特性の深度依存性

透水係数Kの深度依存性は原位置透水試験から求めた。そのためデータ数が変形特性に比べて著しく少ない。室内試験から補う方法もあるが、亀裂性岩盤の透水性評価が困難であるので、今回は原位置試験データに限定した。

図-7は主に硬質岩盤と一部の軟岩に関して示す。硬質岩盤ではGL-60mまでは変化が顕著であるが、それ以後では変化が緩やかである。国内と海外のデータを比べると、国内の方が海外に比べて1～2桁ほど透水係数が大きい。また“軟岩”に関しては、表層部分のデータに限定されている。

3.3 変形および透水特性の深度依存性

以上の変形特性および透水特性のデータを、「岩種/岩盤等級区分～変形係数/透水係数～深度」として表したのが、図-8, 9である。これから深度150mないしは200m以深では岩盤物性の変化が少ないと言える。また図-10は図-8, 9をまとめた上で、一例として圧縮空気貯蔵・天然ガス貯蔵施設建設に際して提案されている気密性保持のための方式³⁾を重ね合せたものである。これから大深度での気密性状は、岩盤等級区分によらず「粘土グラウト」～「自然岩盤」のかなり安定した範疇に入る。安定性では、軟岩と中硬岩の間に該当する地山も多い。したがって、実際の設計上で問題となるのは、岩盤掘削過程での断層・破碎帯の緩みの程度とその拡大、地山のひずみ依存性、熱水による長期的な劣化現象、などと考えられる。

4. 調査試験手法の評価と調査の流れ

4.1 岩盤の調査試験手法の精度

岩盤の調査試験手法は、地下空洞の安定性評価と岩盤の支持力評価に大別できる。すなわち主要な項目として、

① 地下空洞：地山強度比(q_u, γ_t)、 V_p 、亀裂分布(断層破碎帯)、k、変形量、 $D \cdot E_{tl}$ (平板載荷試験)、

② 支持基礎岩盤： $D \cdot E_{tu}$ (平板載荷、孔内水平載荷試験)、 V_p/V_s 、 $C \& \phi$ 、亀裂分布(断層破碎帯)、k。

調査試験手法の精度向上は重要な課題であるが、設計施工上必要とされる精度と調査試験手法の精度をバランスさせることも重要である。ここでは各調査試験手法の調査領域の広さ(2次元断面積を想定)と評価のレベル(精度・信頼性)を定性的に図-11に示した。評価の対象は、地質構造・断層破碎帯などの力学的評価と水理・水文地質構造などの透水性評価に分けた。これから、

① 力学的評価に関しては、リモートセンシング・航空写真解析による断層破碎帯の抽出、各種弾性波探査による地層区分と V_p/V_s 構造の把握、原位置岩盤試験へと進むが、地下構造探査と原位置岩盤試験との接点はボーリング孔を利用したボアホールジオフィジクスにあると考えられる。

② 透水性評価に関しては、環境・水質トレーサーお

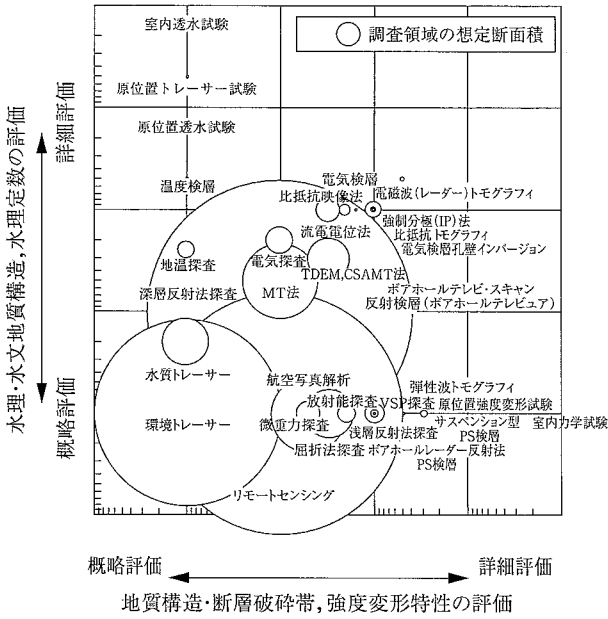


図-11 調査試験手法の対象領域と精度

よび地下水温などによる地下水の大循環モデルの作成と、それに基づく原位置透水試験・トレーサー試験と進む。

③ 環境・水質トレーサーから電気探査（狭義の電気探査・電磁探査・比抵抗トモグラフィ）へと進む流れは、地質・力学特性と水理水文特性の両者への対応性がある。比抵抗値を利用した岩盤区分は強度変形特性への展開を、また、比抵抗値と透水特性との関連は、比抵抗分布による水理水文モデルの構築を可能とすると考えられる。

4.2 岩盤の調査試験の流れ

以上の3種類の地山評価の流れを念頭に入れて、各種調査試験技術を、硬質岩盤と軟岩について広域調査手法～詳細評価手法に分けて、図-12, 13に示した。

フローの形式は、図中左から右へ向かって概略から詳細調査へと向かう。上側は力学モデルを、下側は水理モデルを対象にしている。調査試験名称を表す四角枠で、白抜きは地下構造評価を、微細ハッチは物性評価を、斜線ハッチは両者併用を表す。また枠の位置により、力学・水理モデルの両者に対応可能な手法と、対象をいずれかに限定した手法に区別した。硬質岩盤と軟岩を比較すると、同じ手法でも利用対象モデルが異なる場合もあり、岩種により手法自体が異なる場合もある。必要に応じて実施する手法には、名称に括弧書きを添付した。

これらは、計画・調査・設計の段階を対象にしている。一方、施工・維持管理においては従来地下探査技術はあまり利用されてこなかった。しかし電気探査の自動・連続測定システムにより、比抵抗値を利用した地盤、特に地下水関連のモニタリング技術が大きく発展する可能性が出てきた。

5. おわりに

本研究は、広域立地選定に係わる岩盤評価・調査手法について、最近の研究結果を基に新しい試案を検討した

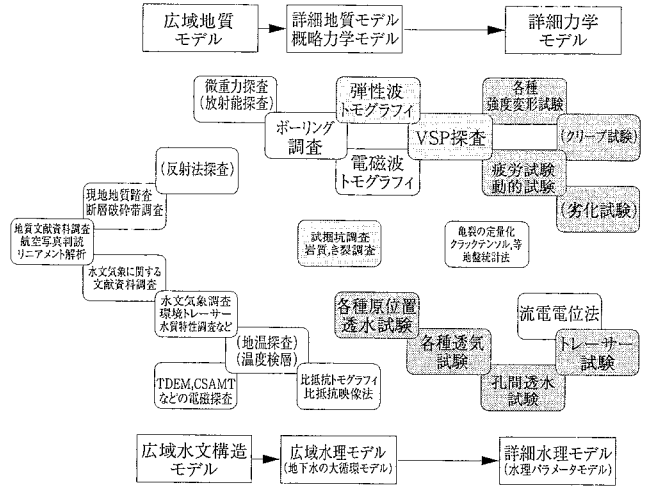


図-12 硬質岩盤の調査フロー

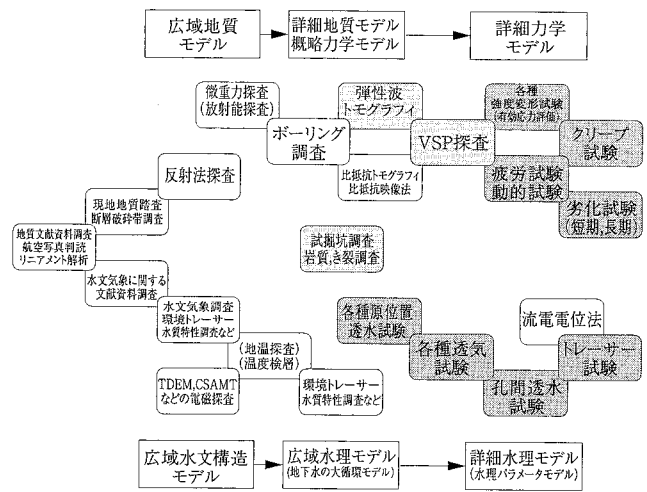


図-13 軟岩の調査フロー

ものである。すなわち、① 日本の最新の地質構造区分に基づき、地山の地盤工学的区分とその特徴をまとめ、② 原位置試験データに基づき、硬質岩盤と軟岩に関して、岩種/岩盤等級区分～変形特性/透水特性～深度依存性（応力依存性）の関係を整理し、③ 各種調査試験技術に関して、力学・透水特性の評価レベルを検討し、岩盤調査試験の流れを力学モデル/水理モデル～硬質岩盤/軟岩の組合せで作成した。今後、地山の応力・ひずみ依存性や調査試験手法の精度・評価範囲を明確にしなが、最適な調査試験体系を構築することが重要である。

参考文献

- 1) 地質調査所：1/1,000,000日本地質図，第3版，(1992)
- 2) 土木学会：原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針，(1983)，吉中ほか：岩盤分類とその適用（土木工学社），(1988)，日本応用地質学会：日本の岩盤分類，(1992)，等
- 3) Electric Power Research Institute: Rock Cavern Linings for compressed air energy storage. EPRI EM-4584, Project 1791-12, Final Report, (1986)