

トンネル工事における岩盤調査

国鉄 鉄道技術研究所地質研究室 高橋 彦治

1. 地質調査成果の利用について

ダムやトンネルなど岩盤を対象とする工事のために、岩盤の工学的分類ないし岩区分が行なわれている。これは地質調査の成果が集約された形をとっているため、地質調査とはイコール岩盤分類ないし岩区分であると誤解する土木技術者のグループがあるように思えてならない。

岩盤分類ないし岩区分には、個人的に提起されたものと各種・各級機関が統一的にあるいは試行的に使われているものの別があり、表現の上では相似ている要素を用いながらそれぞれ極めて不統一的・羅列的であり、それら相互の間にどの程度の脈絡があるかということである。個人的に提起されている岩区分についても、それなりに経験や実績について広義の統計的考慮が加えられていると思われるが、機関が統一的に用いている岩区分は広範にして膨大な量のデータを用いてさらに高次の統計的考慮が加えられていると思われるのである。前者においては個人の主観が支配する要素が強いために、どちらかといえば劣悪な地質条件に執着があり、後者においては平均的・巨視的・単純化・規格化などの趣旨に沿うために、どちらかといえば大まかである、という特徴が指摘されると思う。

統一的岩区分は実績との照合によってトライアルに作られてきたものであり、必ずしも個人の提起する岩区分を必要としない面がある。個人の提起する岩区分は、地質的諸現象についての深い関心と洞察が加えられた結果作られたものであるだけに、技術的レベルの向上と個々の現場で実際に遭遇する地質現象的なトラブルの解決に資する面がある。岩区分が問題となる段階では、工事計画側では地質専門家が意識するほど細部にわたることを要請していないということがある。岩区分にこだわり過ぎた嫌いがあるが、地質調査成果の利用が多数の技術者を動員するということで、工事書類の作製・立案の段階に筆者の注意がひきつけられるのもやむを得ないことである。

地質調査の成果に期待し、これを利用するには大凡そ次の3段階があり、それぞれその内容・項目・程度というものがあって、その何れに比重を置くかは技術者の立場によって異なる。

- (1) ルート選定：工事の規模・予算・工期の大まかな比較を行うこと。
- (2) 決定ルートについての工事計画の立案：工事の規模・予算・工期の決定，工法の想定
- (3) 着工後の設計・施工の適応

企業側にあつてプロジェクトを推進する技術者は(1)に、工事を推進する企業側の技術者集団では(2)に、施行業者側では(3)に、それぞれ関心があつて、そこに重点をおいて物を見る傾向がある。

2. 岩盤分類・岩区分の現状

従来、行なわれている岩盤分類ないし岩区分の立場は次のように分けられると思う。

- (1) 工法の想定と積算のため
- (2) 地質的ないし地圧現象など工事に際して現われる現象の予測，規模の想定などのため
- (3) 岩盤力学的解明など工学的研究のため

岩盤分類ないし岩区分は利用目的に対応して、たとえば積算上の資料とするために岩の等級区分がなされていなければならないし、現象面の予測・想定のためには地層・岩盤の状態と現象との対応ができていなければならない。また、その事前評価の物差し(指標)がなければならない。表1は各級機関や個人的に提起された岩盤分類または岩区分を、何を対象(目的)とし、い

表-1 各種岩盤分類における主要素の比較

№	提 案 者	名 称	対 象	区 分	スケール(主要素)	注
1	国 鉄 (1942)	切取り岩石分類表	切取・掘削	岩Ⅰ～岩Ⅵ	岩盤の状態・爆薬量	広田孝一
2	テルツァー (1946)	支保工に作用する岩石荷重	支保工	1～9	分離面の状態・風化	岩石荷重の高さ
3	シュティニイ (1950)	地山強度と支保工のタイプ	支保工のタイプ	A～G	地山の強さ	
4	ラブセビッツ (1957)	ルーフボルトのための地山分類	ロックボルト	1～10	岩盤状態・自立時間	
5	ラウハー (1958)	自立時間と自立市の関係	支保工	A～G	地山の強さ	
6	工藤傑一(建設省,1960)	きれつ係数と岩盤状態	ダム基礎岩盤	A～E	きれつ係数・岩盤状態	きれつ係数の概念
7	愛知用水公団 (1960)	岩盤の分類と工学的評価	トンネル	A～E	岩盤状態・コアの状態	
8	プロトジャコノフ(1960,5)	プロトジャコノフの強度指数	掘削	I～X	岩石の内部摩角・各種強度	掘削に対する総合的性質
9	" (1960,5)	強度指数と岩盤の安定性評価	トンネル土圧	5段階	強度指数・岩盤状態	
10	田中治雄(電研,1964)	ダム基礎岩盤の岩質分類基礎	ダム基礎岩盤	A～D	岩盤状態	電力関係で使用
11	増田秀夫(電研,)	岩質と弾性波速度の対比	"	A～D	弾性波速度	田中の分類に対応
12	渡辺 貫 (1964)	トンネル工事適用のための岩盤分類	トンネル	A 7・B 6・C 5	岩種・弾性波速度・岩盤状態	コア採取率・ハンマー
13	栗子トンネル (1965?)	岩盤分類と掘削工種・支保工・覆工	トンネル	第1種～第4種	岩盤状態・弾性波速度・きれつ係数	建設省
14	矢作ダム (1966?)	総合判定による岩盤区分	ダム	A～D	岩盤状態・コア観察	建設省
15	建設省 (1966)	岩質区分表	ダム	4段階・27区分	岩盤状態・充填物質	土 研
16	デーア及びミラー(1966)	岩石の工学的特性による分類	岩盤力学	A～FとH・M・L	ヤング率・一軸圧縮強度	
17	道路公団 (1966?)	岩質分類表	トンネル	A～E	岩盤状態・弾性波速度・コア	
18	高橋 (1966)	トンネル土圧の分類	トンネル土圧	4区分・6種類	地質的素因・誘因	土圧の議論
19	国鉄-1 (1967)	トンネル岩盤分類表(案)	トンネル	3岩石群・5区分	岩盤状態・弾性波速度	積算用
20	国鉄-2 (1969)	岩盤強度分類表	トンネル土圧	6岩石群・7区分	岩盤状態・弾性波速度	
21	国鉄-3 (1969)	岩盤強度分類と地質状況	トンネル土圧	1～7	岩種・岩盤状態・きれつ度	
22	土質工学会 (1970)	岩の統一分類法(案)	岩盤力学	基本分類48区分 副分類25区分	岩盤状態・弾性波速度	岩の力学委員会
23	水資源開発公団(1971)	岩盤の分類法	水路トンネル	A～E	岩盤状態・弾性波速度・きれつ係数	

かなる物差しを用いてこれを表現しているかということを整理してリストアップしたものである。これらの中には指標とする要素を岩盤のいかなる物性と関連させ、これをいかにして事前に計測・評価しうるかといったことに対して十分答えていないものが少なくないと思われるのである。

3. 岩盤分類のあり方について

3.1 一つの考え方(前提)

地質調査成果の利用や岩盤の工学的分類が有効・適切であるためには、対象(目的)とする構造・機構などについて岩盤との関連の仕方についての問題構成(図)が理解されていなければならないと思う。従来、提起された岩盤分類は数多くあるが、前項で触れたように、そのどれをとっても、単独で掘削・土圧・湧水関係をカバーするような方法はない。その大部分は土圧とか掘削のように単独の事項を対象として扱っているに過ぎない。トンネル工事に関係のある全項目を同時にカバーすることは必ずしも必要では無いし、間違いを犯しやすいと思われる。掘削とか土圧の一つをとってみても複数の要素が複雑に関連しているので単純化を急ぐのは危険である。単純化は積算や立案の段階での要請によるものであって、本質的には複数要素の関連する問題構成を理解した上で単純化が行われる必要がある。

3.2 トンネル工事の工学的問題の構成について

掘削関係：切端の自立性(掘削方式・全断面掘削)、RTMの破砕性・切削性、穿孔・爆破

土圧関係：周壁の破壊、切端の自立性、土圧・変位・地層沈下、近接工事(分割掘削の相互干渉)

湧水関係：水量・水圧・水質・減衰、滞水層の流出・遮水層の破壊(遮水壁効果)、浸透水の影響

3.3 地層・岩盤の現象的性質の構成について(二三の項目について事例紹介的に)

(1)岩盤のボルト的性質

岩盤のボルトの性質は、ロックボルトの定着機構からたとえば図1のような要素構成とすることができる。

ロックボルトのための岩盤分類は、このような要素構成について地質的条件をあてはめた上で予測的に行なわれるものでなければならぬと思う。ラヴセビッツが示したように、単に自立時間をスケールにせよといっただけのものでは、どのように判断したらよいかという点で不十分な感じがする。

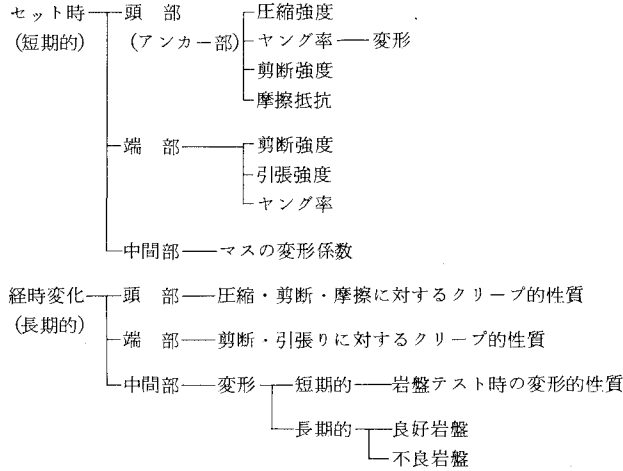


図-1 岩盤のボルト的性質に関する物性の構成要素

(2) 岩盤の吹付けの性質

H鋼を用いた支保工区間と吹付けコンクリート区間について、周壁のゆるみの経時的变化の相違を弾性波速度の分帯によって比較したところ、前者では周壁岩盤が全体的にゆるみながらその領域を拡大していったのに対し、後者では表層部に与えられた吹付けコンクリートの強制力のために経時的なゆるみは中間層に吸収されるように作用している、という傾向が認められた。吹付けコンクリートのための岩盤分類は、たとえば、このような現象から分解される要素構成に即して行なわなければならないのではないかとと思われる。

(3) RTM のための岩石・岩盤の性質

これについては、圧縮や引張りのような単純な強さの指標だけでは不十分であるから、貫入の性質・摩耗の性質・切削の性質・ボーリングの性質・きれつ性質などの項目について総合的または代表的性質によってRTMの適応性が表現されるべきであると考えている。

(4) とくに弾性波探査ときれつ係数について

日本ではトンネルの地質調査に弾性波探査の利用が普及しており、いささかこれに依存し過ぎる面があるが、この方法の何よりの魅力は解析の功稚は別にして、地層・岩盤中を伝わる弾性波の速さという物理量を提供するところにある。岩石は健全・無欠な状態である個有な弾性波速度（ V_{po} ）をもっている。地層・岩盤には各種の地質的分離面があり、さらに風化や変質をうけているので、マスとしての地層・岩盤の弾性波速度（ V_p ）は岩石塊のそれより低い値を示すのが普通である。そこで、両者の関係から「きれつ係数」という概念が提起されて、土木地質的にはこれがかなり用いられているようであるので、これについて概念の固定化を促進するために少し触れておきたいと思う。

きれつ係数のアイデアは、最初、工藤慎一氏（土研，1960）によって提起された。きれつ係数（ f_{ci} ）は次式で表わされる。

$$f_{ci} = \frac{E_{do} - E_d}{E_{do}} = 1 - \frac{V_p^2}{V_{po}^2}$$

で示される。その後、池田和彦（国鉄，1963）は次式で示されるような「きれつ度」（ f_{c2} ）を用いている。

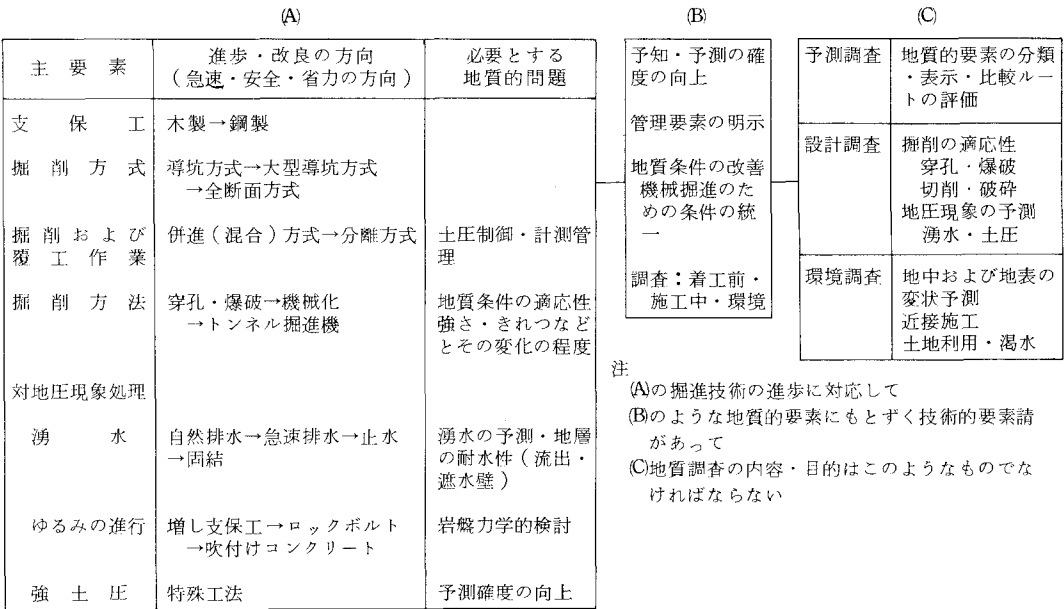
$$f_{c2} = (V_p / V_{po})^2$$

比較では、前者は速度の差に対する比であり、後者は直接的な比であるという違いがあるが、その関係は（ $f_{c1} = 1 - f_{c2}$ ）または（ $f_{c2} = 1 - f_{c1}$ ）のように補完し合い、発想においては同根と見なすことができる。きれつ係数には、きれつによる間隙量の他に、風化・変質の度合い、含水状態などの全部に関連したもので、どちらかといえば風化係数とか劣化係数の意味をもっている。きれつ・風化・水に関する要素を分離したものが確立されることが望ましいが、これはこのままで相当意義のある総合的な物性の表現であると考えてよい。概念の固定化がなされないと用語の混乱と変質を招くおそれがある。

5. 調査調査のあり方について（チェックシステム）

5.1 工事の質的变化と地質調査の再認識

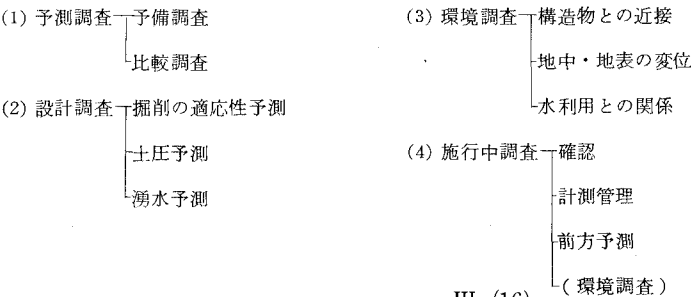
地質調査は、その目的や内容については昔も今も変わることがないはずであるが、変ぼうしつつあるトンネル工事の質と量とに対応してどのようにすすめられるべきであろうか。あらためて今日における地質調査について考えてみる必要がある（図2）。



図ー2 トンネル掘進技術の進歩と地質調査に対する要請

5.2 計画の段階と地質調査との対応

土木学会が制定した「トンネル標準示方書」には「概略調査」と「精密調査」に分けて地質調査の要領が示されているが、これとかかわりなく、基本的には調査の進め方には次の図式が考えられる。



5.3 地質調査のチェックシステム

計画の段階または調査の進展の小区分ごとに地質調査の成果がまとめられ、地質的情報が増していく。その成果の総仕上げとして設計・施行・積算・工期などの工事計画が決定される。調査の段階または小区分ごとに適切なチェックシステムが働いているのが理想である。

トンネル工事における岩盤調査と設計、施工への適用

— 高瀬川水力開発工事地下発電所の場合 —

東京電力(株) 高瀬川水力建設所 御 牧 陽 一

1. まえがき

東京電力 K.K は、現在、信濃川上流の犀川の主要支川高瀬川筋（長野県大町市）において、大容量揚水式発電所（最大出力 128 万 KW）を建設中である。この計画は、高瀬川本川に高瀬ダム（上部池、高さ 176 m、ロックフィルダム、堤体積 11.4 百万 m^3 ）および七倉ダム（下部池、高さ 125 m、ロックフィルダム、堤体積 7.1 百万 m^3 ）を築造し、その間を長さ 2.7 Km の圧力トンネル（2 条、内径 8.0 m、最大通水量 $2 \times 322 \frac{m^3}{s} = 644 \frac{m^3}{s}$ ）、サージタンク（2 基、内径 15 m、立坑式、高さ 100 m）、ならびに水圧管路（4 条、内径 5.85 m ～ 4.20 m、立坑式、高さ 230 m）で結び、上池、下池間に有効落差 230 m をもつ地下式新高瀬川発電所により 128 万 KW の揚水発電を行なうものである。（表－1）

開発地点は中部山岳国立公園地域に含まれ、自然環境の保存に対する配慮もあって、ダムおよびダム付属設備をのぞき、水路ならびに発電所、主変室はすべて地下式を採用しており、各構造物の規模は世界第一級のものである。工事は昭和 46 年度に着手され、昭和 52 年度に第一期発電開始（64 万 KW）を予定している。

ここに、当社が実施している大規模地下構造物のための岩盤調査の内容と、設計ならびに施工への適用方法について概要をのべることとする。

2. 地下発電所複合体の空洞掘削に対する岩盤調査

地下発電所複合体の基本設計の概要は図－1 のとおりであり、地下発電所は 高さ 59.5 m、巾 32.5 m、長さ 139.5 m の規模をもち、主変室は発電所下流 55 m（建屋

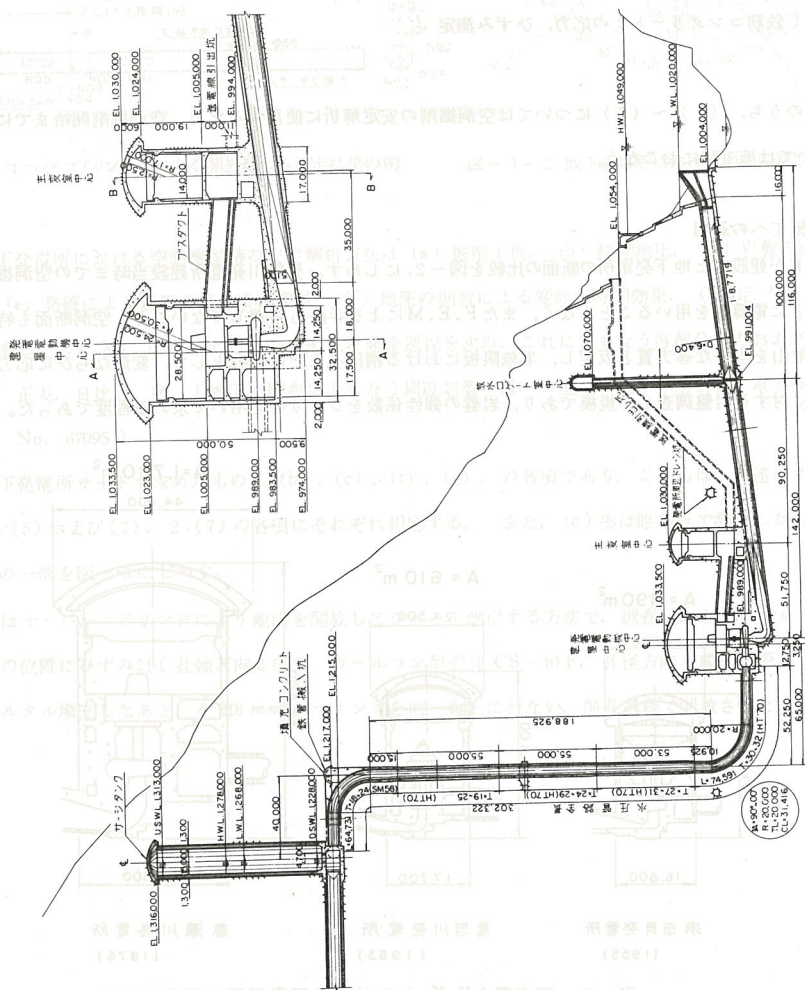
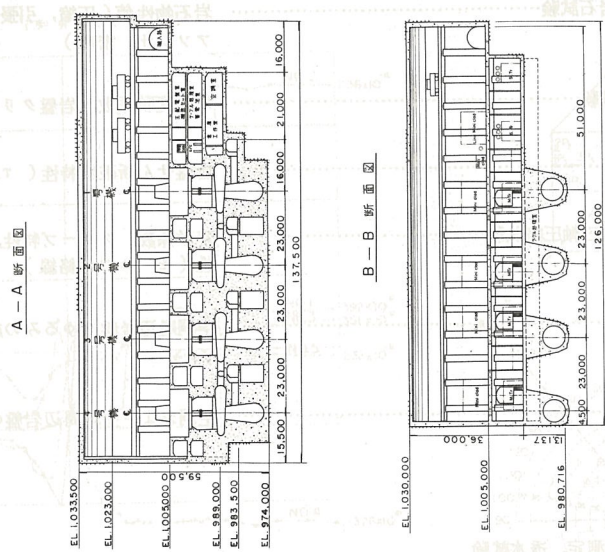
中心間隔）に併設されて高さ 37 m、巾 17 m、長さ 136 m の規模をもつ。地下発電所複合体にとって掘削時および掘削完了後の空洞の安定を確保することが最大のポイントであり、このために実施または実施を予定している調査項目は次のとおりである。

- (1) 調査坑およびボーリングによる地質調査…………… 地質構造（岩質分類、ジョイントシステム、断層等）
- (2) ボーリング孔による透水試験…………… ルジオン値、間隙水圧、湧水量測定
- (3) オーバーコアリング他による地山初期応力…………… 初期応力の分布、主応力（ σ_{x0} 、 σ_{y0} 、 σ_{z0} ）の決定

の測定

表－1 計画諸元一覧表

発 電 所		新 高 瀬 川	中 の 沢	計
工 作 物 諸 元	最大出力 (KW)	1,280,000	38,000	1,318,000
	最大使用水量 (m^3/s)	644	25	
	基準有効落差 (m)	229	177	
	調整池			
	名 称	高 瀬 ダム	七 倉 ダム	
	流域面積 (Km^2)	131.0	150.0	
	型 式	フィルダム	フィルダム	
	高 さ (m)	176	125	
	堤 体 積 (m^3)	11,400,000	7,170,000	
	堤 頂 長 (m)	362	365	
発 電 所	満 水 位 (m)	EL 1,278	EL 1,049	
	低 水 位 (m)	EL 1,268	EL 1,020	
	総貯水容量 (m^3)	76,200,000	32,500,000	
	有効容量 (m^3)	16,200,000	16,200,000	
	利用水深 (m)	10	29	
	湛水面積 (ha)	178	72	
	名 称	新高瀬川発電所	中沢沢発電所	
	型 式	地下式	地上式	
	水 車	4 x 336,000 (タービンポンプ)	1 x 39,000	
	発 電 機	4 x 367,000 (モーターゼネレーター)	1 x 40,000	



- (4) ボーリングコアによる岩石試験..... 岩石物性値(圧縮, 引張強度, 弾性係数, ポアソン比, 密度)
- (5) ジャッキによる岩盤変形試験..... 岩盤変形係数, 岩盤クリープ特性(α , β)
- (6) ブロックせん断試験..... 岩盤せん断破壊特性(τ_0 , ϕ)
- (7) 岩盤ならびに断層材料現地三軸圧縮試験..... 変形係数, クリープ特性, 岩盤せん断破壊特性(モールの包絡線)
- (8) 岩盤の弾性波速度測定..... 空洞周辺岩盤のゆるみの経時的変化(V_p , V_s)
- (9) 空洞の変位測定..... 空洞および空洞周辺岩盤の変位の経時の変化
- (10) 空洞周辺岩盤の応力測定
- (11) 空洞周辺岩盤の間隙水圧の測定, 透水試験
- (12) 構造物(鉄筋コンクリート)の応力, ひずみ測定

これら調査項目のうち, (1) ~ (7) については空洞掘削の安定解析に使用するため, 空洞掘削開始までに行なわれ, (8) ~ (12) については施工時におこなう。

3. 設計ならびに施工への適用

東京電力K.K.が建設した地下発電所の断面の比較を図-2. にしめす。鬼怒川発電所建設当時までの空洞掘削に対する安定解析は, 今日ほどに電算機を用いることもなく, またF.E.M.による手法も発達していないこと, 空洞断面も特に大規模でないこともあって, 地山を均一な等方質と仮定し, 半無限板における楕円孔または円孔として, 変形ならびに応力を求めた。したがって空洞掘削に対する岩盤調査も小規模であり, 岩盤の弾性係数をジャッキを用いて求める程度であった。

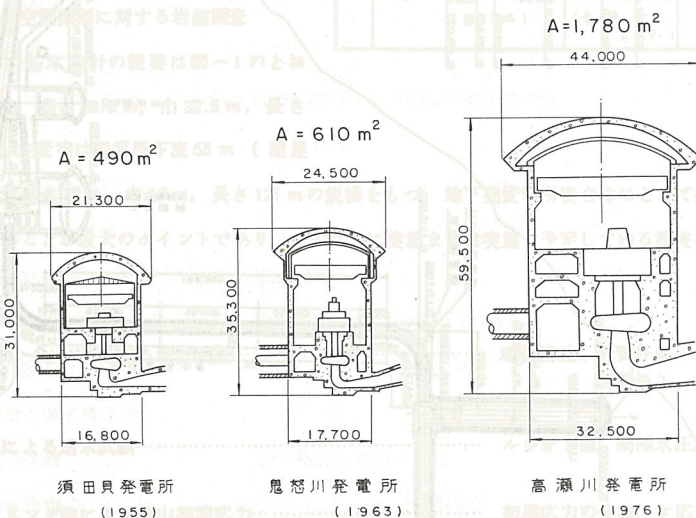


図-2 東京電力K.K.における地下発電所の規模の比較

(測 典 NO. 3-V-1)

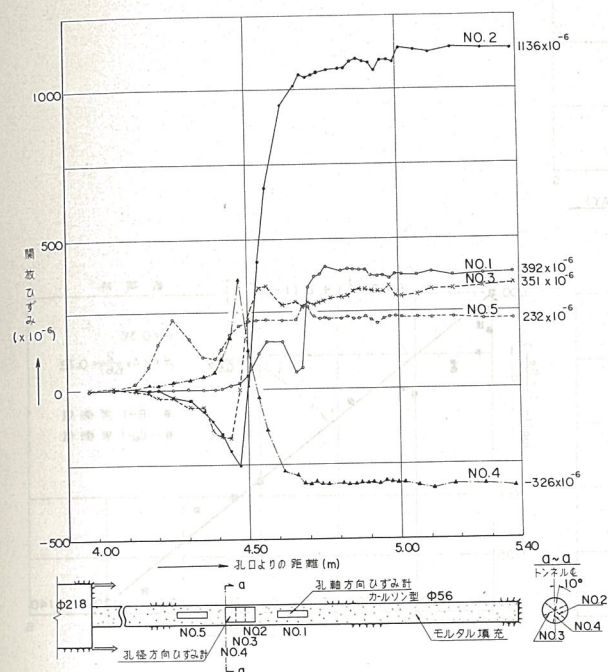


図-3-1 オーバーコアリング法による開放ひずみ測定結果の例

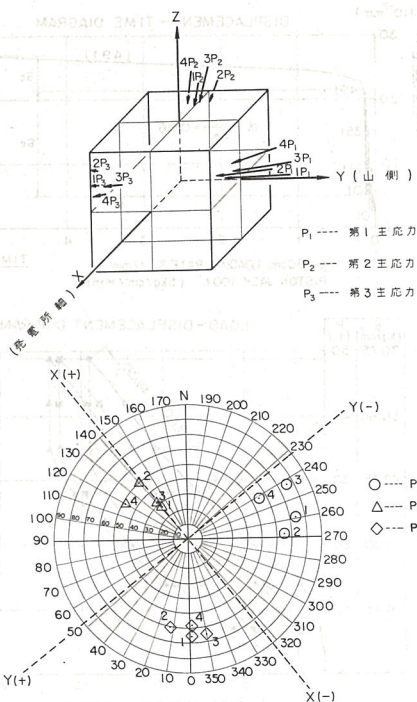


図-3-2 地下発電所における地山の初期地圧(主応力)

新高瀬川地下発電所における空洞掘削時の安定解析方法は (a) 掘削工程, (b) 初期地圧, (c) 岩盤の降伏条件, (d) 非均質な変形性, (e) 発破による岩盤の直接損傷領域, (f) 地圧の開放による変形の時間効果, (g) 応力状態による物性の変化などを考慮し, F.E.Mにより逐次的に緩み領域の発達過程を求め, これにともなう再配分応力および変形を求めるものである。(林 正夫, 日比野 敏, 「地下の開削にともなう周辺岩盤の緩みの進展に関する解析」 電力技術研究所 技術研究報告 土木 No. 67095)

新高瀬川地下発電所サイトで求めたものは (b), (c), (f), (g), の各項であり, これらは, 前述の 2.(3), 2.(6) および (7), 2.(5) および (7), 2.(7) の各項にそれぞれ相応する。また, (e) 項は他地点で測定したものを利用した。これらのデータの一部を図-3に示す。

図-3-1はオーバーコアリングにより地山を開放してひずみを測定する方法で, 調査孔から $\phi 56 \text{ mm}$ のボーリングをおこない, 所定の位置にひずみ計(孔軸方向2成分 カールソン型歪計 CS-10 F, 孔径方向3成分 歪ゲージ式歪計 BS-5A)を設置し, モルタル填充したあと, $\phi 218 \text{ mm}$ ボーリングを同一軸上に行ない, 削孔過程で開放されたひずみを逐次読みとるものである。

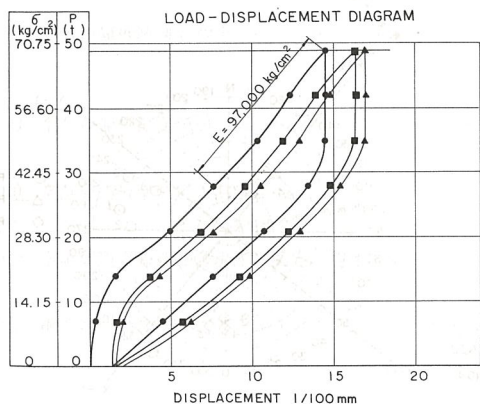
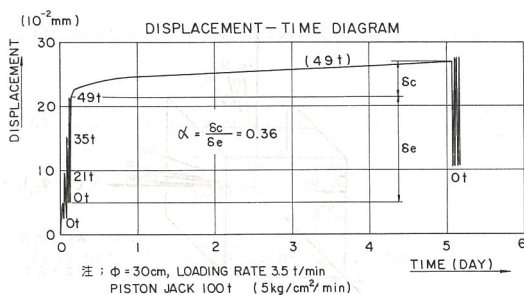


図-3-3 ジャッキによる変形試験結果の例

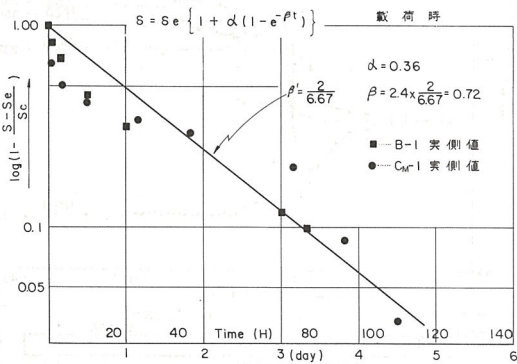


図-3-4 クリープ試験結果の例

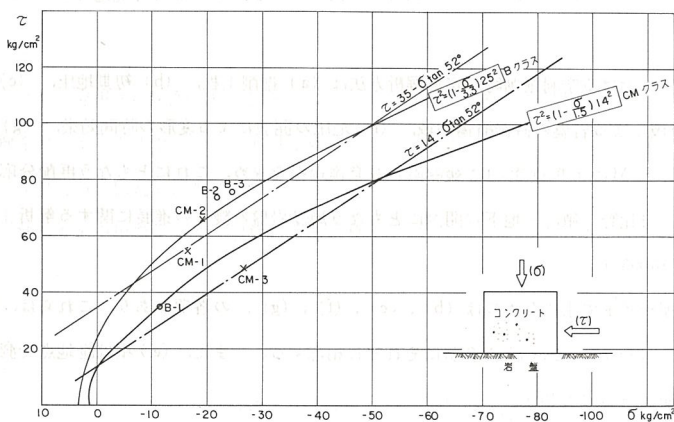


図-3-5 ブロックせん断試験結果の例

地下発電所複合体の位置は、揚水式の場合、ポンプ水車のドラフトヘッドを確保する必要から下部池標高を基準として水車中心標高が定まり、さらに付属構造物を含めたスペースワーク、地形条件により制約されるが、地下大空洞の掘削時における安定が主体であり、前記初期応力測定による初期地圧の主応力方向に対し安定が十分確保できるよう空洞の配置についても再検討中である。

施工に対する適用は2.(8), (9), (10)項にあげた空洞周辺岩盤の弾性波速度測定、応力ならびに変位測定などによって、掘削にともなって助長される天井アーチ部、側壁部の岩盤の挙動を監視し、使用を予定している壁面のロックボルトならびにP.S工のパターンを適正化し、さらに必要と認められる場合にはストラットの挿入などにより施工の安全をはかるほか、解析で求めた挙動と比較し、計算を修正して次の掘削段階での空洞の挙動を予見することになっている。