

岩 盤 力 学 ①

テ ス ト ・ そ の 1

君 島 博 次 ・ 若 本 清
増 田 秀 夫 ・ 安 江 朝 光

静 的 変 形 試 験 法

アーチ ダム や 地下 発 電 所 等 の 設 計 に は、 岩 盤 を 弾 性 体 と 仮 定 し て 計 算 す れ ば 実 用 的 に 解 答 が 得 ら れ る と ころ から、 こ の 仮 定 の 是 非 は 別 と し て、 岩 盤 の 弾 性 係 数 を 要 求 さ れ る 場 合 が 非 常 に 多 い。

こ こ で い う 岩 盤 の 弾 性 係 数 と は、 一 片 の 岩 石 供 試 体 の 弾 性 係 数 を い う の で は な く、 種 々 に 変 化 の あ る 岩 質 ・ 構 造 ・ ひ び わ れ や 狭 雑 物 を ふ く ん だ 現 場 に 存 在 す る 状 態 の ま ま の 岩 盤 の そ れ を 意 味 す る。 し た が っ て 変 形 は 必 ず し も 弾 性 的 の も の ば か り と は 限 ら な い か ら、 変 形 係 数 と 呼 ぶ 方 が 適 当 か も し れ な い が、 一 般 に 広 く 用 い ら れ る 慣 習 に し た が い、 こ こ で は 弾 性 係 数 の 語 を 用 い る。

岩 盤 の 弾 性 係 数 の 求 め 方 は 種 々 あ る が、 静 的 な も の と し て は い ず れ も 反 力 を き さ え る た め 横 坑 内 で 岩 盤 に 載 荷 し、 岩 盤 の 変 形 を 測 り こ れ ら か ら 計 算 し て 求 め て い る。

本 文 で は 最 も 広 く 用 い ら れ て い る 実 用 的 な ジャ ッ キ 法 お よ び 水 室 法 に つ い て 説 明 す る。 現 在 の と ころ 岩 盤 の 試 験 方 法 は 他 の 諸 材 料 と 異 な り い ま だ 確 立 さ れ て い な い か ら、 広 く 用 い ら れ て い る 方 法 の 一 例 を あ げ て 示 す こ と に す る。

1. ジャッキ法

1.1 試 験 装 置

試 験 は、 特 殊 な 目 的 の と き 以 外 は 断 層 や 破 碎 帯 の よ う な 特 異 性 を 避 け、 付 近 一 帯 の 岩 盤 を 代 表 す る と 見 な さ れ る よ う な 場 所 を 横 坑 の 両 端 か ら 離 れ て 選 定 す る。

載 荷 装 置 と し て は 図-1¹⁾ ま た は 図-2²⁾ に 示 さ れ る よ う な も の が 用 い ら れ る。 本 質 的 に は 両 者 の 差 が な い が、 前 者 は 非 常 に 剛 性 の 大 き な 載 荷 板 を 介 し て 岩 盤 に 一 様 変 位 を (応 力 分 布 は 非 一 様) と し、 後 者 は 油 圧 の ク ャ ッ シ ョ ン 作 用 で 一 定 応 力 を (変 位 分 布 は 非 一 様) と し、 各 部 品 の 名 称 と 役 割 り は 図 か ら お お 互 ね 明 ら か で あ り、 図-1 で は 載 荷 点 か ら 離 れ た 点 (実 用 上 は 載 荷 板 直 径 の 6 倍 以 上 の 距 離) に す え つ け た 両 脚 に き さ え ら れ る 基 準 ば り

図-1 ジャッキ試験装置 (定変位式)

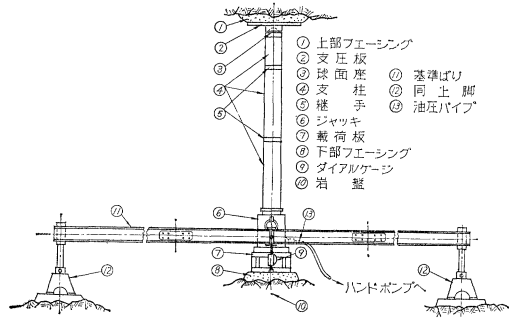
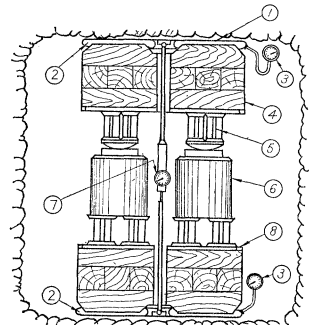


図-2 ジャッキ試験装置 (定圧式)



- ① フエーシング
- ② 油封入ダイヤフラム
- ③ 圧力計
- ④ 木製台座
- ⑤ I型鋼
- ⑥ ジャッキ
- ⑦ ダイヤルゲージ
- ⑧ 鋼板

を 不 動 点 と し て 地 表 面 の 変 位 を (天 井 の 変 位 は 関 係 な く、 岩 盤 の ゆ る み で 過 大 な 変 位 を 生 じ る 傾 向 が あ る) 測 定 す る。 載 荷 板 は 一 般 に 直 径 20~60 cm の 十 分 に 補 剛 し た 鋼 製 円 板 を 用 い、 50~200 t の 荷 重 を 与 え て い る。

図-2 では剛体載荷板の代りに油を封入したフレシネ ジャッキ状のダイヤフラムを

は さん で 木 材 等 で 圧 力 を 伝 え、 一 様 分 布 応 力 を 岩 盤 に 生 ず る よ う に し た も の で、 図 示 の よ う に 装 置 の 中 心 線 上 に は 孔 が 通 っ て い て 天 井 と 地 表 間 の 変 位 を 測 定 す る 測 定 管 が 貫 っ て い る。 一 般 に 80~120 cm の 直 径 の ダ イ ヤ フ ラ ム と 200~800 t 程 度 の 荷 重 が 与 え ら れ、 前 者 に 比 し て 規 模 が 大 き く な る。

測 定 器 は ダ イ ア ル ゲ ー ジ を 望 遠 鏡 で 読 取 る 方 法 が 多 く 用 い ら れ て い る が (近 接 し て 肉 眼 読 取 り を 行 な う こ と は 岩 石 の は た ち 等 の 危 険 性 と 長 時 間 狭 い 場 所 で 観 測 す る た め の 不 正 確 さ を 増 す)、 差 動 電 圧 式 変 位 計 や カ ー ル ソ ン 型 計 器 の 利 用 に よ る 遠 隔 測 定 が 便 利 で 正 確 で あ る。

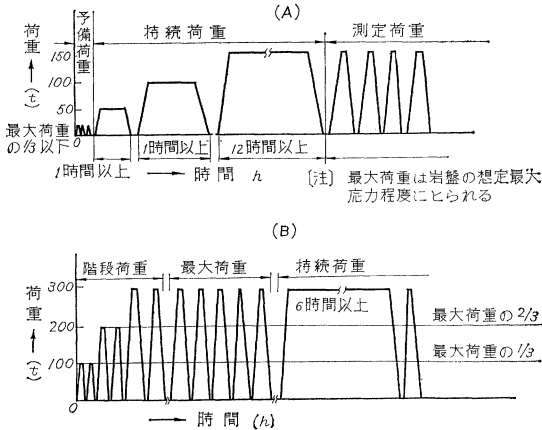
変 位 測 定 は 載 荷 板 の 中 央 の み な ら ず 諸 所 で 測 り、 傾 斜 や 曲 げ の 影 響 を 除 い て 精 度 を 上 げ、 ま た 鉛 直 以 外 の 任 意 の 方 向 の 変 位 も 測 れ る よ う に し て 岩 盤 の 異 方 性 も あ る 程 度 推 定 で き る よ う に す る こ と が で き る。

与 え た 力 の 測 定 は、 ジャ ッ キ の 摩 擦 損 失 等 を 考 慮 に 入 れ て 油 圧 圧 力 計 か ら 算 定 す る の が 一 般 で あ る が、 電 氣 的 な 荷 重 計 や 油 圧 計 も 用 い ら れ る。

1.2 載 荷 方 法

荷 重 の 与 え 方 は 現 在 の と ころ 一 定 の 方 式 が 無 く、 試 験 の 目 的 ・ 規 模 等 に 応 じ て 各 所 で 適 宜 定 め て 実 施 さ れ て い る。 図-3 に は 二 例 が 示 さ れ て い る が、 上 段 の (A) に

図-3 載荷方法



注：最大荷重は岩盤の想定最大応力程度にとられる。

ついて説明を加えることにする。

a) 予備荷重 最大荷重の 1/3 以下程度を与えて、載荷装置フェーシング、測定器具等の相互のなじみをよくして接触不良による変位の誤差の除去、諸機構の異常の有無の検査などを目的とする。

b) 持続荷重 最大荷重とほぼ同等の大きさを与えて 12 時間以上持続させ、多くの場合は図示のようにその最大値を段階的に増やして荷重～沈下曲線の経路の変化を調べる。この試験法は、岩盤変位の実測値に弾性理論式を適用するのであるから、現場の岩盤はなるべく均質等方の弾性体に近づけておく必要がある。そのために実用的な限度内でできるだけ長時間の持続荷重を与え、発破などでゆるんだひびわれの閉そくを行ない、同時に岩盤のクリープ的な性状を知ることが目的とする。

c) 測定荷重 以上のような手順を経てなるべく岩盤を弾性的に近付けた後に、実物構造物に期待されるのとはほぼ同程度の応力度を地表面に生ずるような最大荷重を 3 回以上反覆して与え、同時に地表変位を測定して、荷重～沈下曲線を描く。

d) 載荷速度と載荷板寸法 現在一般に用いられている載荷速度は実物と相似関係を考慮したものではなく、おもに実験工程とか機器の能力などの実用面から定められている。載荷板の寸法にもよるが一般に毎分 2～10kg/cm² の範囲内で与えられている。極端に速度を変えない限り求める結果にはあまり大きな影響がないようである。

載荷板の寸法が異なると同一地点でも結果が異なってくるのが普通で、いずれの寸法の載荷板を用うべきかは明瞭でない。岩質・ひびわれ状態・装置の剛性などと実物の寸法・載荷速度などに関係があるようで、一般には 20～100 cm 程度のものが用いられている。局部的な影響を小さくするために大きな載荷板を用いると、装置の

剛性・ジャッキの能力が増し、したがって技術的な困難性と所要日数も増え測定点数が減る傾向がある。

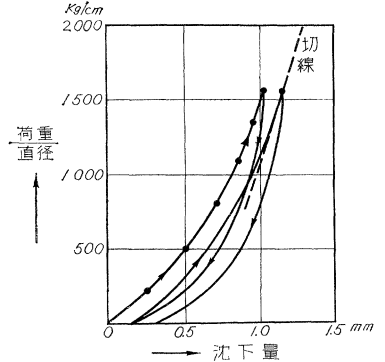
1.3 結果の処理

時間～沈下曲線を描き変位の時間的変化を知る。

つぎに荷重～沈下曲線を描き、直線性・ヒステレシス・永久変位等を調べ、最大荷重時近くの往路の直線部分を探り切線を引いて静弾性係数を算定する。図-4 に例示する。

図-4 ジャッキ試験結果の一例(定変位式)

計算式は弾性理論³⁾から剛体円形載荷板(等分布変位・図-1の方式)を用いる時は式(1)を、油封入ダイヤフラム載荷板(等分布応力・図-2の方式)を用いる時は式(2)を用いる。



$$E = \frac{(1-\nu^2)(\Delta F)}{2a(\Delta \omega)} \dots \dots \dots (1)$$

$$E = \frac{a(1-\nu^2)(\Delta p)}{(\Delta \omega')} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 (ΔF) と $(\Delta \omega)$ は互いに対応する荷重増分 (kg) と変位増分 (cm)、 (Δp) と $(\Delta \omega')$ は互いに対応する圧力増分 (kg/cm²) とダイヤフラムによる載荷面間隔の増分 (cm)、 a は円形載荷板またはダイヤフラムの半径 (cm)、 ν は岩盤のポアソン比で不明瞭だが約 0.2 を与える、 E は岩盤の弾性係数 kg/cm²、である。

なお、図-1 の場合、載荷円板の外側の地表面の沈下 (中心線より x cm の距離の点) の計算式は式(3)で、載荷円板の中心線上で地表面より深さ z cm の点の沈下は式(4)で計算される。

$$(\Delta \omega)_x = \left(\text{Arc sin} \frac{a}{x} \right) \frac{(\Delta F)(1-\nu^2)}{\pi a E} \dots \dots \dots (3)$$

$$(\Delta \omega)_z = \left\{ \frac{az}{2(a^2+z^2)(1-\nu)} + \text{Arc tan} \frac{a}{z} \right\} \frac{(\Delta F)(1-\nu^2)}{\pi a E} \dots \dots \dots (4)$$

1.4 試験についての注意

岩盤力学の研究は世界的にも緒についたばかりで多くの未解決の問題点が残されている。そこでこの種の試験にふくまれる仮定と技術的な問題点の意義をよく認識して判断を行なう必要がある。以下に留意すべきことを簡単に述べる。

a) 仮定条件 均質等方半無弾性体に対する理論的な数式に、そうでない現場試験の実測値を適用してい

る。また実物寸法は試験寸法に比しはなはだしく大きく、時間・力のスケールで実物との相似関係を考えずに実用的な面から装置の寸法と試験方法を定めている。さらに利用面から考えると、弾性係数として係数のみを採り上げて設計計算に用いているが、変形の絶対量が問題になる場合や、変形が時間の関数でもある塑性的な性質の存在にも（塑性的な性質の強い岩盤は多くの場合に小さい弾性係数を与えるが、現行の弾性係数算出法には時間の要素を数量的に表現する方法はない）考慮を払うべき時が多い。試験結果をそのまま機械的に採用するのは一考の余地がある。

b) 技術的問題 この試験で精度に最も大きな影響を与えるものは変位量の測定であり、1/100 mm の測定誤差は容易に 30 000 kg/cm² 程度の弾性係数の誤差を招くものである。したがって岩盤・載荷板・諸装置相互の接触不良（いわゆるなじみの悪さ）、装置の偏心・剛性不足によるそりや曲り、フェーシング（モルタル）の変形等にもとづく誤差は最少におさえねばならないと同時に、すぐれた性能の電気的変位計を用いる等が望ましい。また最近の実験¹⁾で横坑掘削の発破による岩盤のゆるみが結果をかなり過少に導いていることが判明しているから試験箇所の手掘りによる入念な整形仕上げが必要である。そのほか含水量の影響・載荷板の寸法効果など今後の研究に待つところが多い。

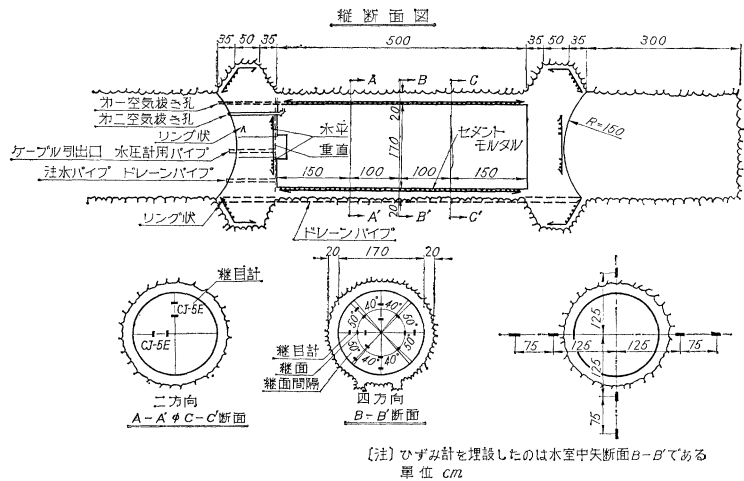
2. 水室試験法

2.1 試験装置と載荷方法

この方法はジャッキ法にくらべ、載荷面積が広く四方に圧力が作用するので岩盤の局部的な影響を少なくできる長所があるが、施工・装置・作業が大規模で複雑となり経費が大きくなる短所がある。わが国では例が少なく関西電力KK黒部川第四発電所導水路と建設省小渋ダムで行なわれた程度である。

まず横坑内に直径 1.7~2.5 m、長さは直径の2倍以上（計算によると2倍の時で中央点の周壁変位は無限長の時の0.92倍⁴⁾）の円形断面の試験部分を入念に掘削し、図-5に示されるような両端プラグと鉄筋コンクリートライニングで囲まれた円筒形の水室を作製する。入口側のプラグには出入用マンホール、パイプケーブル類の引出孔を付し、ライニングは水圧により半径方向の自由な伸縮を生じ得るが、しかもろう水を生じないようにするために、4~5カ所の軸方向継目を持った厚さ

図-5 水室法試験装置



約20~40cmの鉄筋コンクリートのセグメントより成り、特殊な水密加工を施す。その一方法には、コンクリートに厚さ約2cm程度のアイガスジョイントシーラーまたは防水塗料を反覆塗布しその上に厚さ2mm程度のゴムカバーの内張りを施し二重防水を行なう等がある。漏洩した圧力水が周囲の岩盤の割れ目に作用すると計算式が成立しないことになる。またコンクリートの円周方向引張応力は30 kg/cm²以下に抑えるように設計されるのが普通である。岩盤とライニング間のすき間を填充するため、あらかじめ配管しておいて、2~3 kg/cm²程度の圧力でコンタクトグラウトを行なう。

水室に与える水圧は高圧ポンプまたは高落差の静水圧を用いる。ポンプの水圧脈動はレシーバータンクで除き、ろう水量を知るために量水計を取りつける。加圧速度はとくにクリープ特性を対象としないときは毎分約1/3~1 kg/cm²程度とし最大圧力を30 kg/cm²程度に抑えるのが安全である。

ライニングの半径方向変位は、最少水室の中心を通る4個一組のカールソン型継目計で、またこの方向のライニングと岩盤のひずみは埋設されたひずみ計（カールソン型等）で、水室両端のプラグの影響を避けた中央部で測定される。

2.2 測定と結果の処置

試験に際しては、水圧（荷重強度）・時間・半径方向ライニング変位・岩盤ならびにライニングのひずみ・ろう水量および水温を測定する。ろう水量は結果の信頼性の検討に、水温変化は変位・ひずみの補正に（水温の変化が大きいことを期待される場合は、継目計をさきえる棒にインバルロッドを用いた例がある）、ひずみ計はライニングの変形量のチェック、ひびわれ発生の有無の探知、変位測定結果のチェックおよび岩盤の非均等変形の探知などを目的とする。

求める岩盤の弾性係数は、比較的小さいコンクリートライニングの変位を無視して式(5)により、また岩盤内のある点のひずみは式(6)により計算される。

$$E = \frac{d \cdot p(1+\nu)}{\Delta d} \dots \dots \dots (5)$$

$$(\epsilon)_r = - \frac{a \cdot b \cdot p(1+\nu)}{r^2 \cdot E} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 E と $(\epsilon)_r$ は弾性係数 (kg/cm²) と水室中心から岩盤中の r cm の距離の点のひずみ、 $(\epsilon)_r$ の負号は圧縮、 d と (Δd) は水室 (岩盤面間) の直径 (cm) とその変化量 (cm) で、継目計のよみを用いる、 p と ν は作用させる水圧 (kg/cm²) と岩盤ポアソン比 (≈ 0.2) a と b は水室の中心から、それぞれ岩盤内壁とライニング内壁までの距離 (cm)、 r は水室中心から岩盤内のひずみを求める点までの距離 (cm)

図-6,7 に水室試験の水圧～変位曲線と水圧～ひずみ曲線の一例を示す。

水室試験の水圧～変位曲線を見ると⁵⁾、ほとんどすべての場合について直線的あるいは上方に凸形の結果を示

図 6 荷重強度—水室面半径方向変位曲線

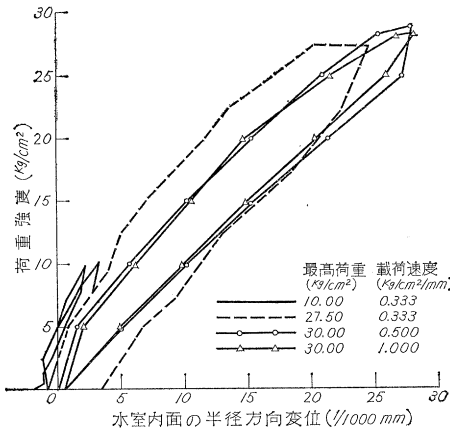
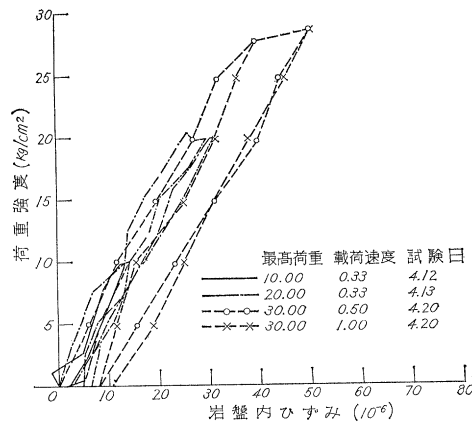


図-7 荷重強度—ひずみ曲線



(注) 埋設位置水室中心軸より 2.0m

し、ジャッキ試験の場合に多く見られる下方に凸形の曲線と対照的な結果を示す。その理由は明らかでないが、恐らく岩盤にふくまれるひびわれのせん断変位、すなわち岩塊素片のずれや回転がこの場合は少ないからではないかと想像している。すなわちジャッキ試験は局部的な載荷を行なうので、試験結果の曲線の立ち上りの緩勾配はひびわれの閉そくによる変位を多くふくみ、最大荷重から除荷する際の急勾配は素片相互の摩擦や回転の抵抗を受けて、地表変位の回復を生ぜず荷が減るものと推定されている⁶⁾(図-4 参照)。ところが水圧による全面等分布載荷では、ひびわれがあっても岩塊素片は相対的な変位を行なうことが少なく、比較的一様に変位するから直線的な結果を得られるのではないかと推定している。(電力中央研究所 君島博次・若本 清担当)

3. 弾性波試験

3.1 速度測定法

地質構造を調べるために発展してきた地震探査(弾性波探査)屈折法から求められる速度は、地下の層の上面にそって伝搬する波の速度を表わしているもので、岩盤内部の任意の部分で伝搬する波の速度を求めるためには、地表において観測するいわゆる地震探査は岩盤内部の速度分布を知るためには適当でない。したがって、岩盤内部の速度測定にはつぎの方法が用いられている。

a) 横坑内における屈折波法 地表において実施される屈折法と原理的には同じであるが、この場合には、横坑内部の岩盤上に測線を設け、この測線上に 2~3m 間隔に地震計を設置し、爆発点間隔を 15~20m 程度として往復測定を行なうものである。この方法による結果は図-8 に示すような走時曲線によって示される。

図-8 横坑内における屈折波法による走時曲線

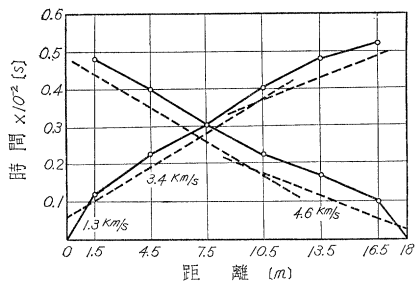


図-9 横坑間平均値速度と平均値

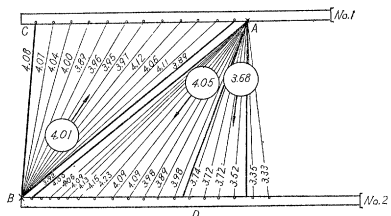


図-10 速度測定結果平面図

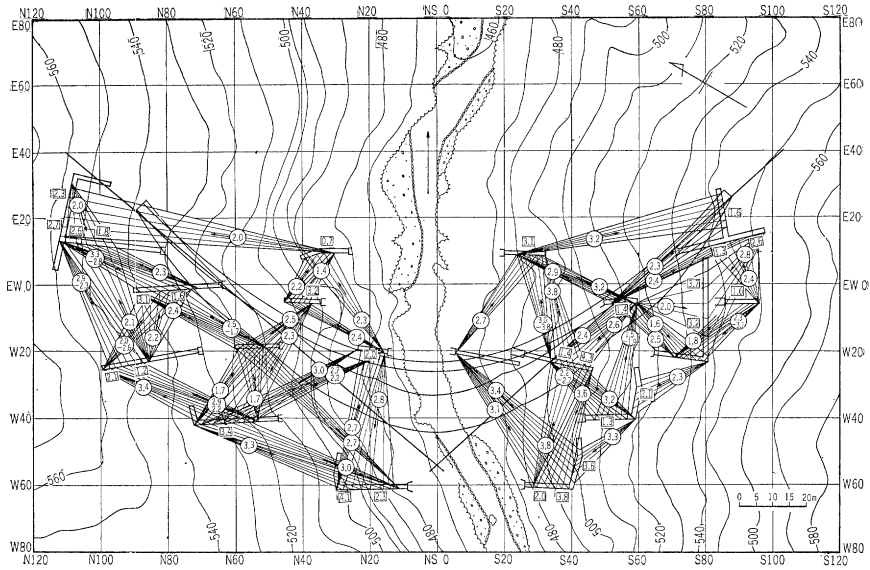


図-11 速度分布水平断面図

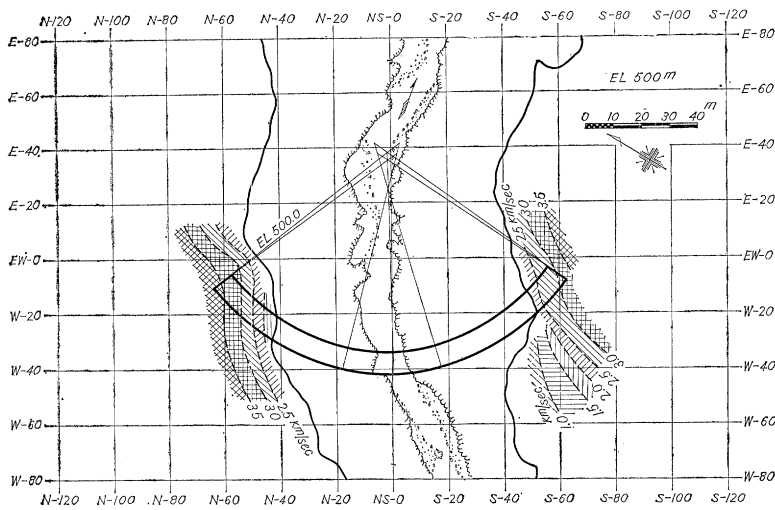
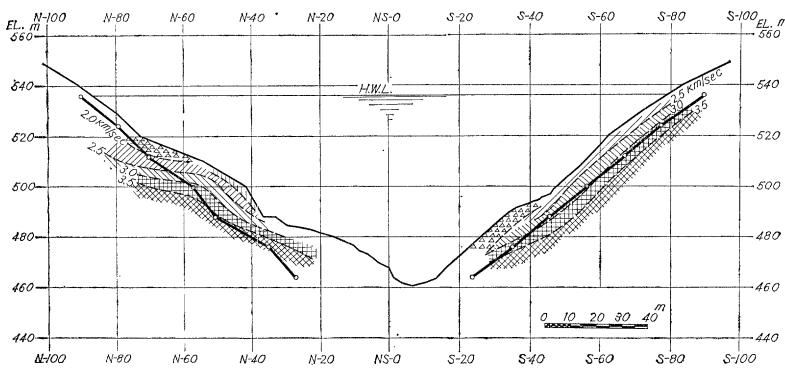


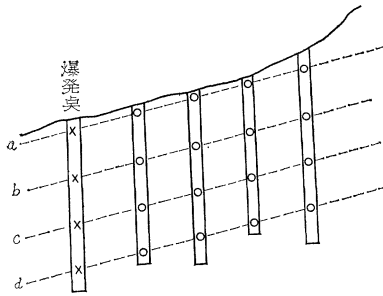
図-12 ダム軸線方向の速度分布鉛直断面図



b) 平均速度法 任意の横坑内に地震計を設置し他の横坑内に爆発点を設けて波の伝播時間 t を測定する。一方、正確に測量された横坑位置図から、爆発点と地震計間の距離 x を求め $v = x/t \dots \dots \dots (7)$

によって求められる v は、爆発点と地震計の間の岩盤の平均速度である。図-9 は測定結果の一例を示す。この例によれば、爆発点 B から No. 1 横坑の各地震計までの速度はだいたい等しい値を示している。この場合円内に示した 4.01 km/sec はそれらの速度値の平均値であり、点 A, B, C に囲まれる範囲の岩盤の平均速度とする。図-10 はあるダム サイトで実施した速度測定結果を示した平面図である。図中の円内の数字は平均速度の平均値であり、長方形内は横坑内で行なった屈折波法によって求められた速度である。このような図によっても岩盤の速度の分布状態の大勢を知ることができるが、この測定結果にもとづいて、速度分布図を

図-13 直接波法



つくりることができる。図-11,12 に例を示す。このような分布図は岩盤内部の速度分布を知るに便利であり、ダム取付部の岩盤の弾性係数を求めるときに役立つものである。

c) 直接波法 この方法は、図-13 に示すように一直線上に2~5m 間隔に岩盤をせん孔し、a,b,c,……のように岩盤内部に測線を設け、各測線についてそれぞれ走時曲線を求め、直接波とみなされる部分から速度を計算するものである。この方法によれば、波の伝播経路が爆発点と地震計を結ぶ直線上にあるため、求められた速度に対する位置を明確にすることができること、また、求められた速度は平均速度法によるものよりも正確であるなどの利点をもっているが、せん孔に費用がかかることは避けがたい。しかしながら、掘削による岩盤のゆるみの範囲とか、コンソリデーション グラウティン グ前後における速度変化などを調べるように、せまい範囲をくわしく調べる場合には適している。

3.2 速度による岩盤の判定

ダム基礎やトンネル経過地の岩盤に対しては、それらの設計・施工に役立てるため、種々な分類がなされている。その一例として、田中によって作成されたダム基礎岩盤に対する分類基準を表-1 に示す。この基準は主として岩盤中に存在する割れ目と造岩物質の風化の状態によって分類されている。岩盤中を伝わる波の速度は割れ目や風化によって影響を受けるため、表-1 の分類は速度によっても表現される。多くのダム サイトで実施された実験によって、表-2 のような関係があることが増田によって示されている⁷⁾。この2つの表によれば、岩盤の速度から岩盤の割れ目や風化の様子を簡単に推定することができるであろう。

3.3 速度から求めた弾性係数の取り扱い

一般に、速度から弾性係数 E_p を求めるにあたっては、岩石試料によって測定した密度 ρ を使い、ポアソン比 σ を 0.25 と仮定し、均質等方の弾性体に関する式

$$E_p = \rho v^2 \frac{1}{g} \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{1-\sigma} \dots\dots\dots(8)$$

が用いられている。このようにして求めた弾性係数は、

表-1 ダム基礎岩盤の岩質分類基準

記号	特徴	備考	
A	きわめて新鮮な岩石で造岩鉱物は風化変質を受けていない。節理はほとんどなく、あっても密着している。色は岩石によって異なるが、岩質はきわめて堅硬である。	基礎岩盤として良好	
B	造岩鉱物中、雲母・長石類およびその他の有色鉱物の一部は風化して多少褐色を呈する。節理はあるが密着している、その間に褐色の泥または粘土をふくまないもの。	基礎岩盤として良好	
C	CH	堅硬度、新鮮度はBとCMとの中間のもの。	中硬で基礎岩盤としてはやや不良
	CM	かなり風化し、節理と節理に囲まれた岩塊の内部は比較的新鮮であっても、表面は褐色または暗緑黒色に風化し、造岩鉱物も石英を除き、長石類その他の有色鉱物は赤褐色を帯びる。節理の間には泥または粘土をふくんでいるか、あるいは多少の空気を有し、水滴が落下する。岩塊自体は硬い場合もある。	やや軟岩で基礎岩盤としては不適
	CL	CMより風化の程度のはなはだしいもの。	やや軟岩で基礎岩盤としては不適
D	いちじるしく風化し、全体として褐色を呈し、ハンマーで叩けば容易に崩れる。さらに風化したものでは、岩石は砂状に破壊せられて、一部土壌化している。節理はむしろ不明瞭であるが、時には、岩塊の性質は堅硬であっても、堅岩と堅岩の間に大きな開口節理の発達するものもふくまれる。	軟岩で基礎岩盤としては不適	

(田中)

表-2 岩盤の速度と岩質との関係

(単位 km/sec)

岩石名	岩質	横坑内速度	横坑間速度
輝緑凝灰岩	D, CL	2.0 以下	2.3 以下
	CM	2.0~3.0	2.3~3.3
	CH	3.0~4.5	3.3~4.5
	B, A	4.5 以上	4.5 以上
粘板岩	D, CL	2.0 以下	2.3 以下
	CM	2.0~3.0	2.3~3.3
	CH	3.0~4.0	3.3~4.0
	B, A	4.0 以上	4.0 以上
チャート	C, CL	2.0 以下	2.3 以下
	CM	2.0~3.0	2.3~3.3
	CH	3.0~4.0	3.3~4.0
	B, A	4.0 以上	4.0 以上
カコウ岩	D, CL	1.5 以下	1.8 以下
	CM	1.5~2.5	1.8~2.8
	CH	2.5~4.0	2.8~4.0
	B, A	4.0 以上	4.0 以上
砂岩	D, CL	1.5 以下	1.8 以下
	CM	1.5~2.5	1.8~2.8
	CH	2.5~3.5	2.8~3.8
	B, A	3.5 以上	3.8 以上

(増田)

同一の岩盤に対してジャッキ法や水圧法によって求めた値よりはるかに大きな値を示すものである。このため、イタリアの S.A.D.E. では、実験式として、速度から求めたもの (S) と、ジャッキ法によるもの (J)、水圧法によるもの (T) の間には、

$$S : J : T = 10 : 2 : 1$$

の関係があるとし、速度から求めた弾性係数の 1/5 をも

って静弾性係数とする方法をとっている。

一方、増田は、いろいろなダムでその設計に使用された岩盤の弾性係数の値を参考にし、速度から求めた弾性係数 E_v をつぎに示す換算式を用いて E_R を求め、この E_R を設計計算に用いることを提唱している。

$$E_R = (1/2)(v/v_m)E_v \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 v_m は割れ目のない岩石試料の速度である。

4. 岩石試験

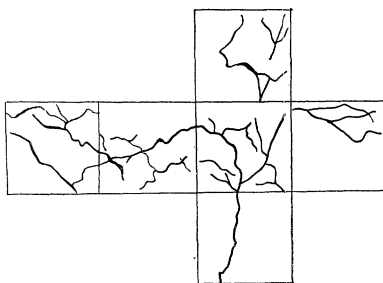
4.1 供試体の作成

供試体の形状については、とくに規定されてはいないが、一般に円柱形あるいは直方形のものが用いられている。円柱形供試体はボーリング コアを利用して作られることが多く、したがって、直径は 30~60 mm 程度のもので普通である。そして、その高さが直径の2倍になるように切断し、上面および下面は円柱軸に直角になるようにする。一方、直方形供試体は岩塊から岩石切断機によって整形される。一般に岩石には割れ目があり、切断中に破損することがあり、大きな寸法のものでは作成しにくい。このため、圧縮変形試験では 5 cm の立方体が一般に使用され、圧縮せん断試験では 5 cm×5 cm×15 cm の直方形が用いられている。これらの圧縮試験においては、供試体の形のひずみは供試体に加わる荷重が偏荷重となり、試験結果に大きな影響を与えるので、正確な円柱形あるいは直方形に整形する必要があり、載荷板との密着をよくするために、供試体の表面はカーボラダムなどを用いて平滑に仕上げしておく必要がある。

4.2 供試体の性状

試験を実施する前に供試体に関するつぎの事項を調べ明らかにしておく必要がある。すなわち、採取場所については単に地点名のみでなく、採取位置や深さを示した図面を備えておくことよい。岩石名とともに風化の程度、割れ目の有無およびその状態を明確にしておく必要がある。このために 図-14 に示すように、供試体の展開図に割れ目の状況をスケッチする方法が多く用いられる。

図-14 供試体展開図



ている。そのほか、層理面・片理面を有するものも、展開図にその状況をスケッチしておくことよい。これらの要素は試験結果に大きな

影響を与えるために、試験結果を比較検討する場合に役立つものである。そのほか供試体の色、粒度(粗粒、中

粒、細粒)、多孔質、緻密の程度、構成鉱物など肉眼によって判別できる程度において識別しておくべきである。

一般に岩石には多少とも空げきが存在しており、その空げきには水などをふくんでいる。この場合、その空げき中にある液体の種類やその量の多少は試験の結果に影響を与えるため、試験時における供試体の状態を明確にしておく必要がある。土木分野の普通の岩石試験においては供試体の状態をつぎのように分類し定義しておけば十分であろう。

a) 自然乾燥状態 供試体を室内にて直射日光をさけ長時間空気中に放置した状態。

b) 強制乾燥状態 供試体を温度 105~110°C にて24時間以上乾燥させた状態。

c) 強制湿潤状態 供試体を水中に1週間以上浸けて十分含水させた状態。

d) 自然含水状態 試料採取時における含水の状態。

3.3 比重、有効間げき率、吸水率

一般に、比重測定には、“液体でひょう量する方法”が用いられている。この場合、強制乾燥状態の空中重量を W_1 、強制湿潤状態の空中重量を W_2 、水中重量を W_3 とすれば

$$\text{強制乾燥状態の比重} = W_1 / (W_2 - W_3)$$

$$\text{強制湿潤状態の比重} = W_2 / (W_2 - W_3)$$

$$\text{有効間げき率} = (W_2 - W_1) / (W_2 - W_3)$$

$$\text{吸水率} = 100 \times (W_2 - W_1) / W_1$$

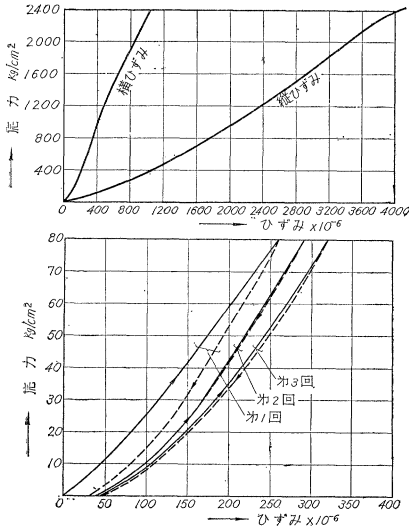
で表わされる。

4.4 一軸圧縮試験

一般には 5 cm の立方形あるいは直径 3~6 cm の円柱形の供試体が使用されている。いろいろの種類の岩石について行なった一軸圧縮破壊強度試験の結果によれば、強度値は最大 4 000 kg/cm² 程度で、大部分は 3 000 kg/cm² 以下の値を示しており、一般には 100~150 t の容量の圧縮試験機が用いられている。圧縮破壊試験においては、破壊強度を求める一方、圧縮応力に応じてひずみの測定が行なわれる。この測定のための計器にはいろいろあるが、最近では電気抵抗線ひずみ計が多く用いられ、圧縮方向とそれに直角な方向について測定されている。岩力は完全弾性体ではないため、加圧速度によって応力-ひずみ曲線が変化する。現在のところ 2 kg/cm²/sec の加圧速度をもって行なわれることが多いのである。 図-15 は応力とひずみの関係を表わした応力-ひずみ曲線図であり、応力をしだいに大きくし、供試体が破壊するまで測定したものと、供試体が破壊しない大きさの応力範囲でくり返し試験を行なったものである。

一般に、岩石についての応力-ひずみ曲線は弯曲している。したがって、変形試験から弾性係数を求める場合

図-15 応力-ひずみ曲線図



は、比較的直線とみなされる部分を用いて

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \dots \dots \dots (10)$$

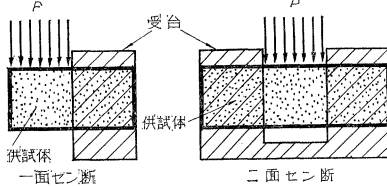
から算出し、その応力範囲を示すようにしている。

4.5 せん断破壊強度試験

この試験には一面せん断と二面せん断の2つの方法があり、いずれの方法によっても得られる結果は変わらない。図-16に

図-16 せん断試験

示すように、一面せん断は供試体の片端固定、二面せん断は両端固定で行なうため、前者では供試体の長さが短くてすむが、試験操作としては後者の方が簡易であるため、二面せん断が多く使用されている。



4.6 超音波速度試験

物質中を伝播する弾性波の速度がその物質の弾性によって異なることは理論的にも実験的にもよく知られている。また、同じ岩石でも風化の程度によって速度が異なり、割れ目や層理面(片理面)を横切る方向の速度がほかの方向のものより小さいことなどは地質工学的計測として有用な事象である。パルス発生装置と記録装置などエレクトロニクスの発展にともない、実用的装置が制作されるようになった。

弾性理論によれば、

$$v_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}, \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad \sigma = \frac{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2}{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 1} \dots \dots \dots (11)$$

であり、縦波速度 v_p 、横波速度 v_s 、密度 ρ を観測すれば、

体積弾性率 k 、剛性率 μ 、ポアソン比 σ が求められる。そのほか、不均質媒質や非等方媒質に関する理論的考察も多くある。

前節に述べた変形試験などに対しては、速度試験はいわゆる無破壊試験であるため、変形試験、せん断試験に用いる同一供試体について測定を行なうことができる利点があるため併用されることが多く、また、変形試験などの結果の解釈に大いに寄与するものである。測定にあたっては、強制乾燥状態、強制潤滑状態、自然乾燥状態の3つの状態について3方向の速度を測定することが原則とされているため、立方体供試体を使用することが望ましい。(電力中央研究所 増田秀夫・担当)

5. 現位置岩盤強度試験

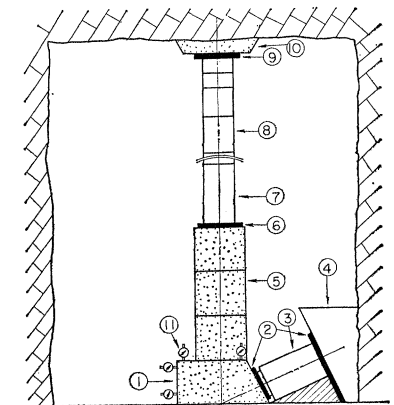
岩盤は節理や断層などによる力学的不連続性と異方性のため、土その他の材料とは、かけ離れた性質があり、ボーリングによって得られた試料(テストピース)をもって岩盤の力学的性質を表わすことはできない。このため、比較的大規模な現位置試験によって、なるべく定量的に確認する必要がある。一般に用いられている3種類の強度試験について概略説明する。試験の対象となる岩盤の範囲は大きいほど良いが、現場試験技術からの制約で決まることが多い。強度試験の荷重の種類、大きさ、速度などについては統一された規程がなく、試験装置、工程などからの制約内で変形試験の方法に準じているのが通例である。

5.1 直接せん断試験

これには周囲より切り残した岩盤について行なうものと、コンクリートと岩盤との付着力が岩盤内のせん断強度より大きいことを予想して、岩盤面にコンクリートブロックを打設して試験するもの2種類があるが、もとの状態を保った岩盤を周囲より切り出すことが困難であるので、後者の方法が一般に用いられている。これについて概略述べる。試験装置を図-17に示す。岩盤との付着面積

図-17 せん断試験装置

0.5~10.0 m² 程度のコンクリートブロックが普通用いられている。試験技術上、傾斜荷重を加え、この水平分力をせん断荷重とすることが多いが、水平荷重



を用いる場合もある。破壊後のコンクリートブロックの裏面の岩盤の面積をせん断面積とする。試験は、同一岩質の数箇所、垂直荷重を変化させて行ない、せん断時の垂直荷重(σ)とせん断抵抗強度(τ)をプロットし、これより岩盤のせん断抵抗強度が $\tau = c + \sigma \tan \phi$ で表わ

図-18 (a) せん断試験結果の一例
荷重-変位曲線 (水平方向)

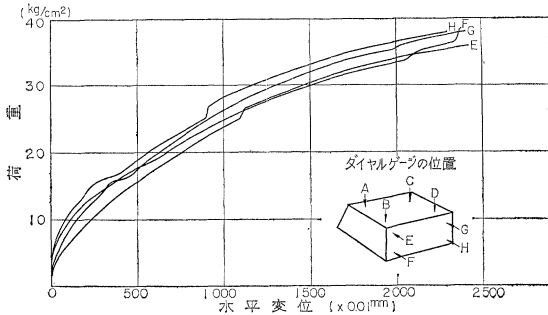
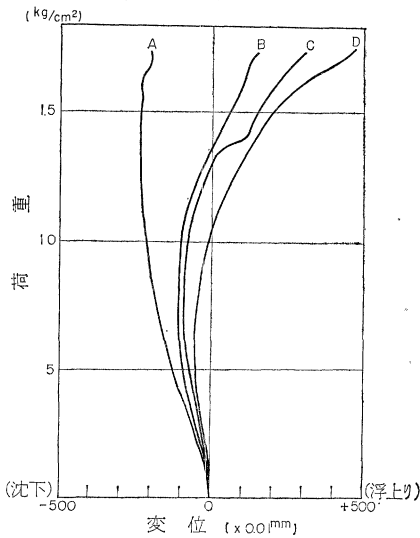


図-18 (b) せん断試験結果の一例
荷重-変位曲線 (垂直)



されると仮定した時の結合力(c)とせん断抵抗角(ϕ)を求め⁸⁾。試験結果の一例を 図-18 に示す。せん断強度および静弾性係数に対する節理、ひびわれなどの影響は一般に前者が後者より大であり、このため両者の間に一定した関係がない場合が多い。

5.2 圧縮試験

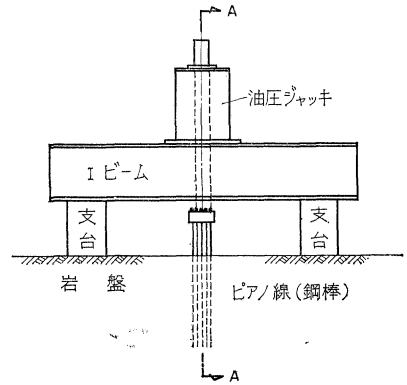
これには、1軸および3軸圧縮試験があるが、主として黒部川第4ダム地点において数多くなされたので、こ

れに関しては後の講座にゆずる。

5.3 引抜き試験

試験装置の概略を 図-19 に示す。引抜き力は、ピアノ線(鋼棒)を通して岩盤に伝えられ、原理的には、最大せん断面に沿って破壊し、破壊時には、岩盤は引抜き軸を中心

図-19 引抜き試験装置



とした円錐形になるが、この場合、破壊荷重から円錐状の岩盤の重量を引いたものをこの円錐の側面で除した値を引抜き強度としている。実際の試験では、破壊は、主として、岩盤内部のせん断破壊と表面に近い部分での引張破壊が組み合わさったものとして表われる。したがって、この試験から岩盤のせん断強度を正確に決定するのは困難である。荷重がある値より大きくなると、埋設されたひずみ計の記録から求めた応力の増加率は減少するが、全体の変位は大になる現象が見られる。これは、ひずみ計が埋設されている岩塊相互間にスリップが生じ始めたことを示すものと考えられる。

(建設省土木研究所 安江朝光・担当)

参考文献

- 1) 若本 清・五味義雄：“岩盤のジャッキ試験における二、三の問題”，電力中央研究所技術研究所報告(土木62008)，1963年1月
- 2) 建設省土木研究所：“岩盤の変形係数測定法”，土木技術資料 3-10
- 3) Timoshenko & Goodier：“Theory of Elasticity”，2nd Ed, 1951, McGraw-Hill, New York
- 4) Talobre, J.：“La Mécanique des Roches”，1957, Dunod, Paris
- 5) Rocha, M. & Serafim, L.：“Deformability of Foundation Rocks”，5th Congress on Large Dams, Paris, 1955, Q. 18, R. 75
- 6) 君島博次・若本 清：“ジャッキ試験と実在ダムの基礎の変形の相異に対する検討”，第1回岩盤力学シンポジウム，岩盤研究会，1962
- 7) 増田秀夫：弾性波速度によるダム基礎岩盤の調査，発電水力，No. 62 (1963)
- 8) Terzaghi, K.：“Stability of Steep Slopes on Hard Unweathered Rock, Géotechnique, Vol. 12, No. 4, December, 1962

今月から岩盤力学講座をつぎの順序で掲載します。なお、最終回は岡本舜三氏を中心に筆者にお集りいただいて座談会を開きその速記録を掲載する予定です。■2月号 テスト・その2/野瀬正儀 ■3月号 ダム基礎/吉越盛次 ■4月号 トンネル/粕谷逸男 ■5月号 浸透水流/嶋 祐之 ■6月号 岩盤の力学/岡本舜三外 (座談会)