

九州電力(株) 総合研究所 正員 赤司 介哉 高田 真
西日本技術開発(株) 土木部 正員 山下 伸二

1. まえがき

近年盛んに築造されているフェルタイアダムの安定解析に不可欠なロック材の強度係数は、大型直接圧断試験や大型三軸圧縮試験などにより求められているのが普通である。

しかし、従来の大型直接圧断試験は、その機構上もつ欠点である。1) 圧断箱の側面摩擦がはたうてくると、上下の圧力や圧断応力が一様に分布せず、そのための圧断面の両端付近から局部的な破壊が起り、いわゆる進行性破壊の現象を生ずる。2) 圧断面が1平面に限られるので、強制圧断を行なうことになり、供試体のもともと弱い部分で破壊するという自由が与えられない、などの条件で測定されているから、理論的な面で理想の試験が実施されていないことが指摘されてきた。また、三軸圧縮試験にしても、供試体の応力やヒズミの分布がかなり複雑であることや試験方法にも問題があることなどが指摘されている。そこで、従来の直接圧断試験機の欠点を改良するとともに間接水圧の測定もできるような大型単純圧断試験機を製作したので、ロック材およびアルミナボールによる単純圧断を実施し、その結果の解明あるいは三軸圧縮試験結果との比較考察を行なった。

2. 大型単純圧断試験装置について

供試体の形状は、直径600mm、高さ400mmの内筒形で、圧断装置は、上盤、ガイドリング、圧断リングおよび底盤からなっており、厚さ20mmのリング18枚で圧断を行なうものである。なお各々18枚のリング間には、スベリを良くする為にニードルベアリングを併用している。垂直荷重は電気油圧サーボ方式により、油圧を1次圧力源として水圧に変換し、ダイヤフラム(ゴム膜)をととして最高30MPaの等分布荷重(足圧力制御)を負荷させる。なお、ダイヤフラムの体積変化を測定することにより間接に供試体の垂直変位を測定する。圧断荷重は、最高200tonの電気油圧サーボ載荷方式で、供試体の上下部より反対方向に満力と作用させて圧断するものである。さらに圧断載荷の制御方法としては、荷重速度制御(定荷重制御

表-1 試験機仕様表

名 称	仕 様	最大容量	計測器
静的締固め	10ton/φ175mm ボアユニット方式	40kN	アルドン
動的締固め	足圧力4~7ton ハイロコンボイ方式	5800 VPM	レバー
垂直荷重	電気油圧サーボ水圧載荷方式	30MPa	ゲージ
圧断荷重	200ton 電気油圧サーボ載荷方式	170ton	アルドン 自己記録
圧断変位	電気油圧サーボ載荷方式	100mm	ゲージ 自己記録
間接水圧	ストレーンゲージ方式	30MPa	ゲージ 自己記録
間接水圧	ストレーンゲージ方式	10MPa 29MPa	ゲージ 自己記録
体積変化	電気油圧サーボ水圧載荷方式	10L	ダイヤフラム 自己記録
排水量	メスシリンダー5L2本	10L	目 測
バットリック	自製10L圧力シリンダー2本	10MPa	アルドン

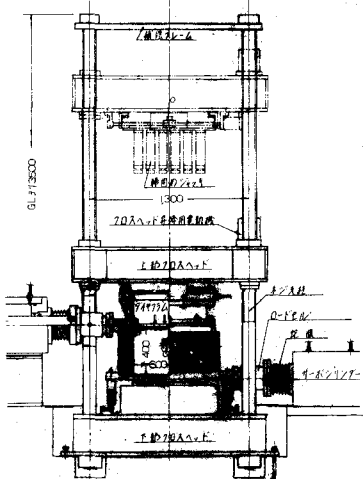


図-1 大型単純圧断試験装置

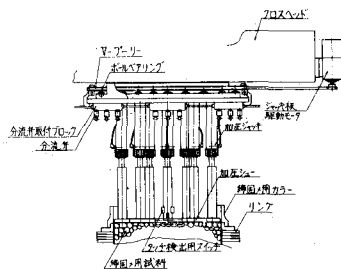


図-2 リングの装置

も可能、 $500\%/min \sim 5000\%/min$ と変位速度制御 ($0.5\%/min \sim 15\%/min$)の2つの方法が可能である。また、当試験機は、セン断容器にゴムスリーブを取付けることができるので、色々な条件を考慮したセン断も自由に行なうことができる。なお、間ゲキ水圧、負圧および空圧なども適宜測定できる。

3. 掃固め試験装置について

現在、室内試験における供試体の掃固めは、JIS A 1210で規格化されている動的突固め方法 (Standard Proctor) が採用されている。しかし、この動的な掃固めの方法は、タンピングローラーや振動ローラーなどによる実際の密土を考えると、ほとんど現地条件を表現できないことや、とくに、ロック材料に顕著な現象として、試料に衝撃を与えたランマーが跳ね返されることにより、エネルギーが十分伝達できないことなどの不利な点がいくつか認められる。そこで、現実に近い供試体の作成ができるように、図-2に示す全面加圧式静的掃固めの装置 (10^{ton} ジャッキ17台、ストロー7 $150mm$ 、シュエ圧力 $4\%/cm^2 \sim 40\%/cm^2$) を製作した。これは加圧面が17個の加圧シュエに区切られており、各加圧シュエは、同圧力でお互いに関係なく独立して作動することができる。また、振動掃固めの装置 (駆圧力 $4^{ton} \sim 7^{ton}$ 、振動数 5800 VPM のコンバクター式) も同時に製作した。

4. 試験方法と結果

前述した試験装置と供用し、一貫した材料試験が実施されてきた(試験方法の違いによる比較が可能)九州電力大平発電所油谷ダムの中岩(チャート質砂岩)を対象ロック材として試験と実施した。

〔供試体の掃固め方法とセン断方法〕

間ゲキ比をパラメーターにした動的掃固めと静的掃固めの比較試験を実施し、所定の間ゲキ比を得る為の掃固め方法をつぎのように決定した。すなわち、供試体は5層に分けて掃固めることにし、各層ごとのシュエ圧および掃固めの回数を各々 $12.5\%/cm^2$ 、1回とする静的な掃固めの方法によった。また、セン断試験は表-2に示すような間ゲキ比をもった気乾状態にある試料とし、圧密排気(供試体は不飽和であるから圧密排気となる)試験により、垂直圧を $0.5\%/cm^2 \sim 30.0\%/cm^2$ ($0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 6.0, 10.0, 20.0, 30.0\%/cm^2$)まで変化させ、セン断速度 $0.006\%/min$ ($2\%/min$)によりセン断を行なった。なお、上記の掃固めの比較試験時と下記のセン断試験時と利用してロック材の破砕率を測定したので図-3に示す。図中のB(薄層で塗り潰した部分)は掃固めによる破砕量と、Aはセン断による破砕量を示す。この図は、掃固めの方法の違いによる破砕率の差が、歴然と認められ、静的掃固めの方法の欠点性と良く表われている。

〔セン断方法を委えた試験結果〕

図-4に示すように、セン断力の載荷方法を3種類設定し(A, B, C試験と仮称)セン断機構の性能のチェック試験を実施した。(垂直圧力の $2\%/cm^2$ と $6\%/cm^2$ の2ケースについて) この結果によ

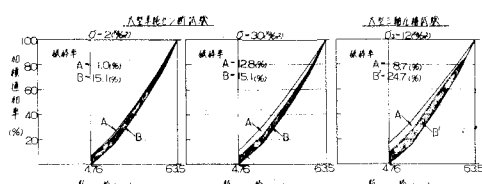


図-3 粒度曲線の比較

表-2 試験例の供試体の性状

試験方法	供試体寸法 (mm)	最大圧力 (MPa)	供試体寸法 (mm)	掃固め方法	間ゲキ比
大径半地	100	63.5	φ500×400	動的掃固め	0.53
セン断試験	100	45.0 (100% 破砕)	φ600×400	—	0.85
大径三層	100	63.5	φ300×700	動的掃固め	0.53
圧密試験	100	10.0 (100% 破砕)	φ300×700	—	0.78

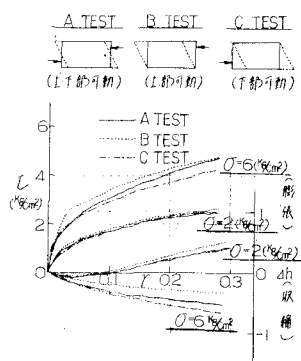


図-4 セン断方法の比較

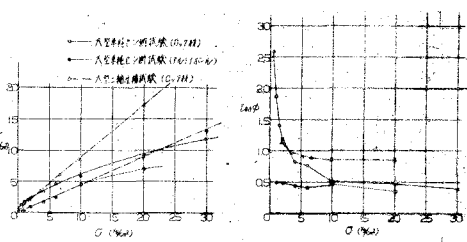
れば、 $\sigma = 2\%$ の場合、 $r \sim \varepsilon$ 曲線、 $r \sim \tan \phi$ にもせん断方法の差による異動は殆んど認められず、また、 $\sigma = 6\%$ の試験においてもその結果の信頼度に重要な影響を与えるような大きな差異は見出されな

い。すなわち、今回製作した単純せん断試験機は、信頼度の高いせん断が実施できることを証明したことになる。

〔ロツ材の単純せん断試験結果と試験方法の違いによる比較〕
図-5は、ロツ材の大型単純せん断試験と大型三軸圧縮試験および市販のアルミナボール（日本化学工業製でほぼ球形とみなされる）を使用した大型単純せん断試験から求めたモール・クーロンの破壊規準線を描いたものである。この図から当然問題になる現象として、ロツ材のモール・クーロンの破壊規準線ではほとんど直線を示すのに、単純せん断試験の場合は二次曲線を描き、 σ が増大するにつれて ε の伸び

率が小さくなる、という事実が指摘できる。まず、単純せん断試験のモール・クーロンの破壊規準線の考察から始めると、 ε の伸び率低下現象の原因として、ロツ材粒子の破壊・各粒子間の接触状態の変化および供試体の拘束条件などが考えられるが、今回は、アルミナボールによる試験と相当量実施したので、ロツ材粒子の破壊という面だけを取りあげてみた。径40mmのアルミナボール（圧潰強度が大きくほとんど無圧縮性である）を使用して単純せん断を実施したところ、比較的垂直荷重の小さい範囲、すなわち、 $\sigma = 10\%$ まででは破壊線は直線上にあり、ロツ材にみられるような ε の伸び率の低下はなかった。ところが、 $\sigma = 20\%$ では図-5にみられるように ε の異動が低下が認められた。これは、せん断時の高い拘束力でアルミナボールが多数破壊したことによるものであるが、この現象は図-7の $r \sim \varepsilon$ 曲線からも考察できるものである。すなわち、 $\sigma = 20\%$ の $r \sim \varepsilon$ 曲線は、0.12r付近から急に ε の増加が止り、それ以降は粒子間のスベリ現象と繰返しながら低下の傾向を示している

が、これはアルミナボールの破壊現象と良く表現していると考えられる。そこで、径40mmのアルミナボールによる垂直圧縮の試験と断念し、径10mmのものを採用して $\sigma = 20\%$



および $\phi = 30^\circ$ の

場合を施行してみた。

その結果は、図-5、

図-6に示すとお

り、径40mmの?

ルミナボールの圧縮

線の延長上に径10mm

のものをプロットす

ることができた。こ

の試験結果は、前述

のこの伸び率低下現象

の原因の1つである粒子

の破砕効果と有力に

証明するものであると

考える。ここに、上

記の圧断試験で径10mm

のアルミナボールを採

用した理由として、図

-6に示すようなアルミ

ナボールの単純圧断と

三軸圧縮との比較試験

と実施した結果があ

るので、これに対する

簡単な考察を試みて

みる。図-6によれば

、中型三軸(径5mm)

、大型三軸(径10mm)

および単純

圧断(径40mmと10mm

と混用)の三者の試験

結果として、同じ強

度帯数、すなわち $C=0$ 、 $\phi=24^\circ$

が求められた。このこ

とは、アルミナ

ボールのような球形で

しかも無圧縮・無破壊

の粒状体では、粒径

の大きさや初期間隙

比(粒径によ

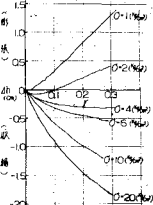
って当然変化する)

がほとんど圧断帯数

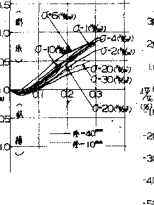
に影響を与えない

ばかりか、圧断時の

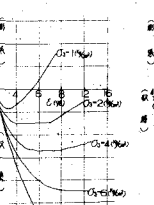
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



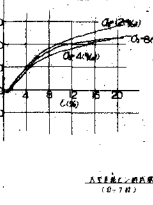
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



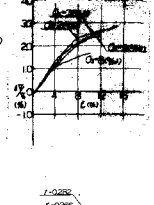
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



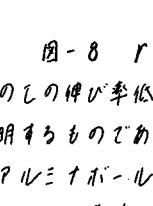
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



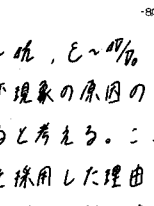
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



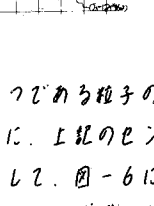
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



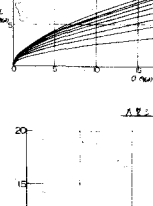
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



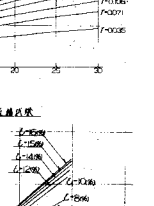
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



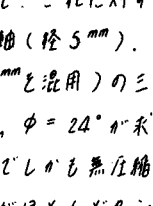
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



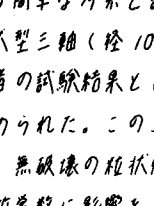
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



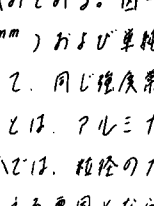
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



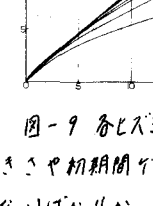
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



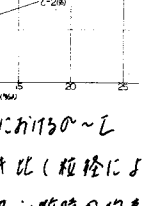
大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)



大型三軸(径10mm)の試験結果 (C=0, $\phi=24^\circ$)

