

# 土木研究所資料

側方拘束応力を与えるコンクリートのせん断  
試験用治具の開発とその予備的試験結果

平成3年1月

建設省土木研究所  
ダム部ダム構造研究室

**「Copyright © (1991) by P. W. R. I.**

**All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.**

**この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」**

# 側方拘束応力を与えるコンクリートのせん断 試験用治具の開発とその予備的試験結果

ダム構造研究室 永 山 功  
渡 辺 和 夫  
小 林 政 登  
尾 畑 伸 之

## 要 旨

既存のコンクリートの一面せん断試験用治具を改造し、側方拘束応力を載荷した組合せ応力状態で一面せん断試験を行う試験用治具を開発した。本報告は、側方拘束を与えるコンクリートのせん断試験用治具の開発の経緯と、15cm×15cm×15cmのモルタル供試体を用いたせん断試験の結果についてとりまとめたものである。

キーワード：コンクリート、せん断強度、せん断試験、拘束応力、組合せ応力

## は じ め に

コンクリートダム構造設計において考慮するコンクリートの破壊形態には、圧縮破壊、せん断破壊、引張破壊の3つがある。このうち、震度法を用いて設計する現行設計基準<sup>1)</sup>においては、コンクリートダムの堤体内には、鉄筋等で補強される局所的な部位を除いて、基本的に大きな引張応力が発生することを認めていない。したがって、ダム堤体のコンクリートを設計する上で通常問題となるのは、圧縮強度とせん断強度の2つであり、それぞれ、許容応力に基づいた設計法、Hennyのせん断摩擦安全率による設計法によって、その構造の安全性を確認している（なお、コンクリートダムの変形性を考慮した地震時の動的解析によれば、コンクリートの引張強度もコンクリートダム構造設計上の大きな一要素となるが、ここでは、この問題には触れないものとする）。

さて、コンクリートダム構造設計においては、コンクリートの「せん断強度」という概念をごく常識的に使用しているが、コンクリートの破壊が「せん断強度」という概念で表わせるかどうかというと、必ずしも明確ではない。むしろ、「コンクリートの破壊はコンクリート内の主応力状態で定まり、せん断応力とせん断強度の関係で表わすことができない」というのが、コンクリート工学の常識となっているようである。これは、一面せん断試験において、破壊時のせん断応力がせん断面に直交する面に作用する応力状態で変化することを意味している。そこで、ここでは、ダム構造研究室が所有するコンクリートの一面せん断試験機に改造を加え、側方拘束応力を与えた状態で一面せん断試験を実施することを試みた。

本報告は、このような「側方拘束応力を与えるコンクリートのせん断試験用治具」の開発の内容と、これを用いて予備的に実施したモルタル供試体のせん断試験結果について述べたものである。

# 目 次

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 1. コンクリートの破壊説         | 1  |
| 1. 1 コンクリートの破壊説       | 1  |
| 1. 2 ダム工学において検討された破壊説 | 1  |
| 2. せん断治具の改造           | 3  |
| 2. 1 改造の契機と目的         | 3  |
| 2. 2 既存のせん断試験用治具      | 3  |
| 2. 3 せん断試験用治具の改造      | 6  |
| 3. 側方拘束圧力を与えないせん断試験   | 11 |
| 3. 1 試験方法             | 11 |
| 3. 2 試験結果             | 12 |
| 4. 側方拘束圧力を与えたせん断試験    | 15 |
| 4. 1 試験方法             | 15 |
| 4. 2 試験結果             | 17 |
| 5. まとめ                | 21 |
| 参考文献                  | 22 |

# 1. コンクリートの破壊説

## 1. 1 コンクリートの破壊説

コンクリートの破壊現象を取り扱うには、コンクリートの微視的な構造に着目した検討方法（破壊力学）と、コンクリートを均一な材料と見なし、これに作用する応力状態と破壊の関係を扱う巨視的な検討方法（破壊規準）とがある。ここで問題とするのは、後者の方法である。以下、コンクリートの破壊規準として提案されている諸説を述べる<sup>2)</sup>。

### a) 最大主応力説

コンクリートの破壊は、コンクリートに作用する最大主応力または最小主応力によって規定されるという説。圧縮領域でのコンクリートの破壊に対してはこの説は適切でないと考えられているが、引張領域でのコンクリートの破壊に対しては有力な説の一つと考えられている。

### b) 最大ひずみ説

基本的には最大主応力説と同様であるが、破壊を規定するのは応力ではなくひずみであるとする説。一軸応力状態では最大主応力説と最大ひずみ説における破壊時の応力（ひずみ）状態は同一となるが、多軸応力状態では、両者の破壊時の応力（ひずみ）状態は互いに異なり、両者は異なる破壊説となる。

### c) Mohrの説（せん断破壊説）

破壊面に作用するせん断応力 $\tau$ と垂直応力 $\sigma$ の関係からコンクリートの破壊が規定されるという説。両者の関係が直線関係にあるとするのが、Mohr-Coulombの説である。コンクリートダム設計に用いられているのはこの説である。

### d) 最大最小主応力説

コンクリート内の最大主応力と最小主応力の関係がコンクリートの破壊を規定するという説。数学的には、Mohrの説と同じ状態方程式で破壊を規定することができるが、破壊面の方向がそれぞれ異なることが2つの説の大きな違いである。すなわち、Mohrの説では $\tau = f(\sigma)$ となるような面に沿って破壊が生じるが、最大最小主応力説における破壊面の方向はこれとは一致しない。

### e) 正八面体応力説（エネルギー説）

3つの主応力に対して等しい方向余弦を持つ正八面体に作用する直応力とせん断応力の関係がコンクリートの破壊を規定するという説。正八面体に作用する応力が特別な意味を持っているわけではなく、それぞれの応力によって体積ひずみエネルギー、せん断ひずみエネルギーが一義的に表わされることが重要な意味を持つ。このため、エネルギー説と呼ぶ方がより適切である。

## 1. 2 ダム工学において検討された破壊説

これらの破壊説に対してダム工学の分野においても先輩諸氏がコンクリートの破壊説について研究を行っている。その代表的な2つの研究結果を以下に示す。

### a) 伊東の実験結果<sup>3)4)</sup>

伊東はコンクリートの二軸圧縮強度試験を行い、その結果から、コンクリートの破壊は中間主応力の影響

を受けると結論している。また、その実験結果から、コンクリートの破壊は正八面体応力説に従うとしている。しかし、ダムの構造設計に用いる応力状態においては、近似的にMohr-Coulombの説を適用することができるとしている。伊東の実験結果の一例を図-1に示す。なお、 $\sigma_c$ は一軸圧縮強度、 $\tau_{oct}$ および $\sigma_{oct}$ は正八面体のせん断応力および垂直応力である。

#### b) 畑野の実験結果<sup>5)6)</sup>

畑野はコンクリートの二面せん断試験を行い、その結果から、コンクリートの破壊面に作用するせん断応力 $\tau$ と垂直応力 $\sigma$ の関係は線形な関係で表わすことができること、また、 $\tau$ - $\sigma$ 平面において、この直線は一軸圧縮強度を表わすMohrの応力円に接することを示している。したがってコンクリートの破壊はMohr-Coulombの破壊規準に従うとしている。ただし、中間主応力の影響については何ら述べられていない。畑野の実験結果の一例を図-2に示す。

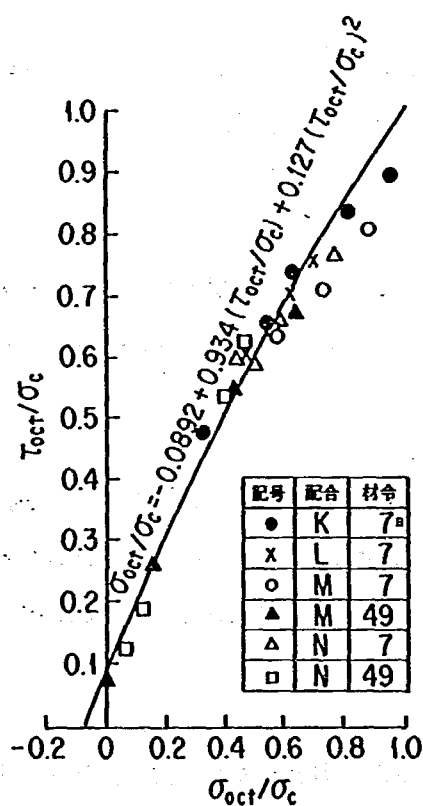


図-1  $\sigma_{oct}/\sigma_c$ と $\tau_{oct}/\sigma_c$ の関係  
(伊東の実験結果)

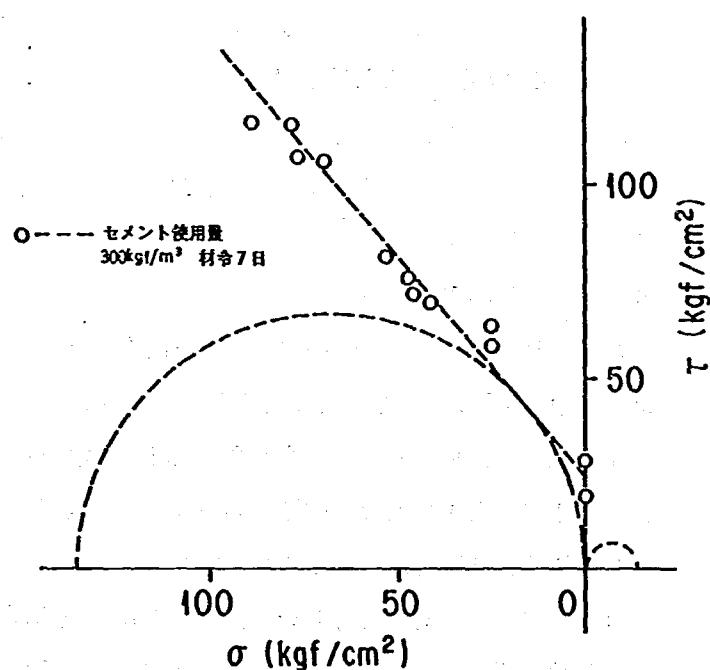


図-2 終局軸圧力 $\sigma$ とせん断強度 $\tau$ の関係  
(畑野の実験結果)

## 2. せん断治具の改造

### 2. 1 改造の契機と目的

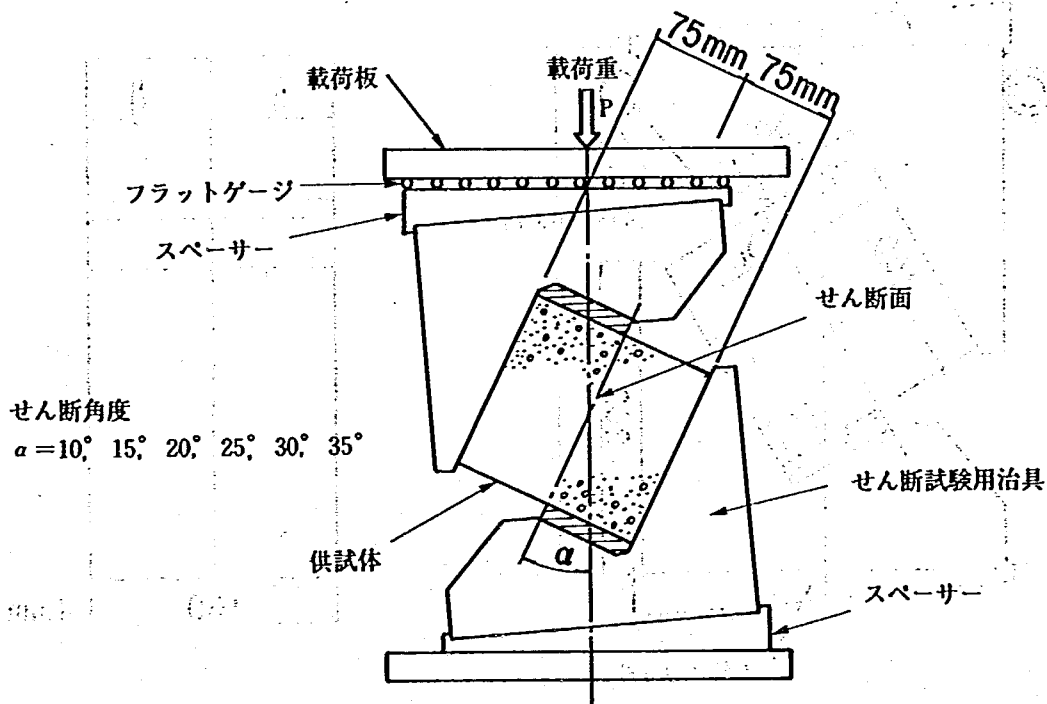
以上述べたように、コンクリートの破壊規準については必ずしも統一された見解がなく、色々な破壊説が考えられている。ここでは、コンクリートの破壊規準を明らかにするため、せん断破壊における中間主応力の影響を実験的に検討するものとした。

せん断破壊における中間主応力の影響を検討する方法としては、色々な方法が考えられるが、ここでは、ダム構造研究室で開発した立方体供試体の一面せん断試験用治具において、せん断荷重を与える立方体供試体の側面に荷重を載荷することにより中間主応力を与えるものとした。このような方法の最大の特長は、中間主応力の影響を直接的に捉えることができることであるが、反面、側方から拘束圧力を載荷する載荷板が供試体の自由な変形を拘束して、これが供試体の破壊強度に影響を与える可能性が考えられる（たとえば、端面摩擦の影響など）。

ここでは、既存のコンクリートのせん断試験用治具の概要と新しく改造したせん断試験用治具の概要および改造時の留意点について述べる。

### 2. 2 既存のせん断試験用治具<sup>7)</sup>

コンクリートのせん断強度を求める試験装置として、当研究室が使用しているせん断試験用治具を図一3に示す。このせん断用治具を用いると、15cm×15cm×15cmの立方体供試体と直径19cm×高さ19cmの円柱供試体について試験を行うことが可能である。このうち、今回改造を行った治具は立方体供試体試験用の治具である。



図一3 (a) せん断試験用治具の概要

せん断試験用治具は鋼製の治具で、図-3に示すように、上下2個の治具に分かれている。この治具を用いたせん断試験は次のように行う。まず、下方の治具をアムスラーの載荷板にセットし、治具の2つの載荷面に供試体の面が正しく一致するように供試体をセットする。続いて、同様の要領で、上方の治具を供試体の上に正確にセットする。このように、せん断試験用治具に供試体をセットし終わったら、アムスラーの載荷板と上方の治具との間に、水平方向の変位に対する摩擦抵抗を低減するためのフラットゲージを挟む。このようにして試験準備が終了した後、アムスラーの載荷用油圧制御バルブを操作して、強制せん断面におけるせん断応力に換算して毎分  $5 \text{ kgf/cm}^2$  の速度でせん断試験用治具に荷重を載荷して供試体をせん断する。

供試体のせん断面に作用する破壊時のせん断応力  $\tau$  と垂直応力  $\sigma$  は次式によって算出することができる。

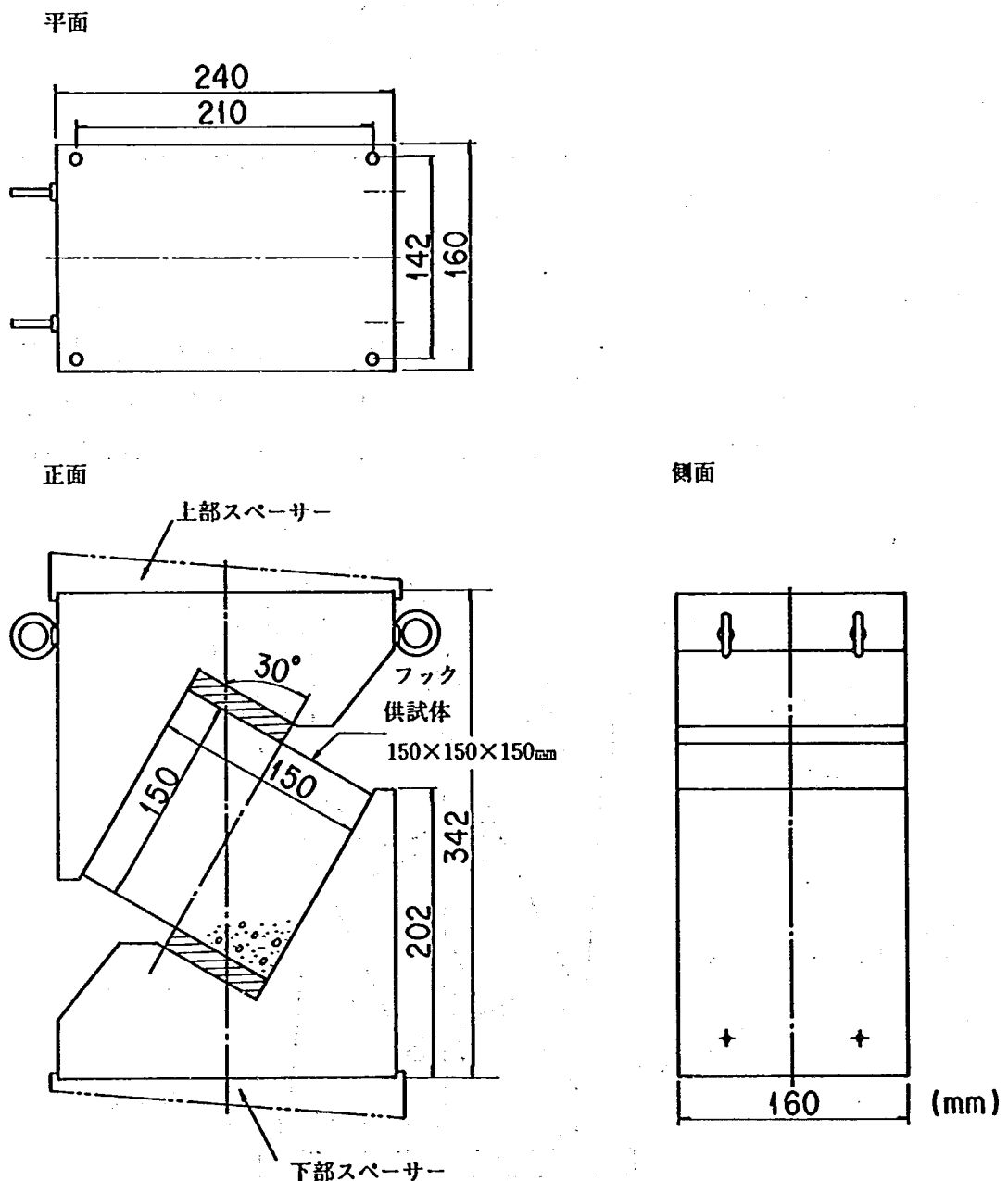


図-3 (b) せん断試験用治具の詳細 ( $\alpha = 30^\circ$ )

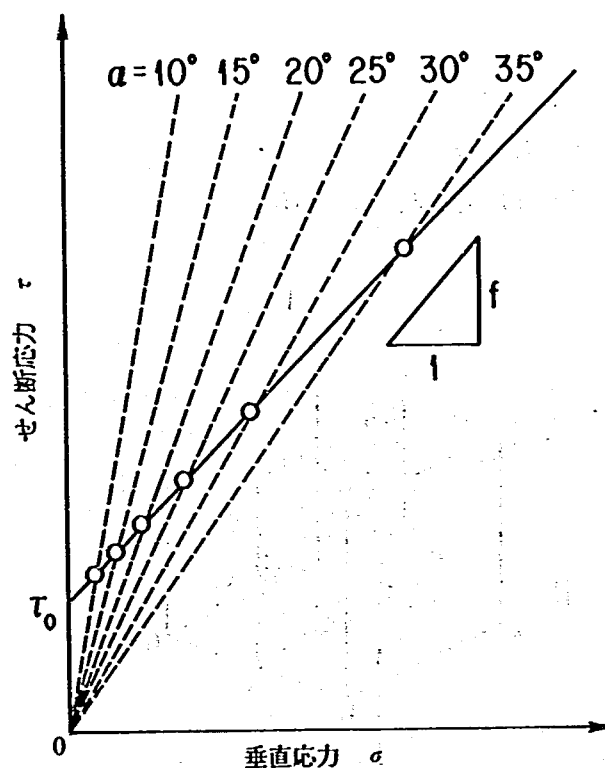
$$\tau = \frac{P}{A} \cos \alpha \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \sin \alpha \quad (2)$$

ここに、  
 $P$ ：破壊時の載荷重  
 $A$ ：想定せん断面の面積  
 $\alpha$ ：せん断角度（図－３参照）

したがって、複数の異なるせん断角度で供試体をせん断することによって、図－４に示すように異なる破壊時の垂直応力  $\sigma$  とせん断応力  $\tau$  の関係が求められ、両者の関係を直線近似（ $\tau = \tau_0 + f \sigma$ ）することによってせん断強度定数である  $\tau_0$  と  $f$  を求めることができる。

せん断角度  $\alpha$  は、せん断強度を表す破壊規準線  $\tau = \tau_0 + f \sigma$  を精度良く求めるため、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $35^\circ$  の６種類の角度を設定している。このせん断角度  $\alpha$  の設定は、図－３に示すように、せん断試験用治具の上下に所要の角度のスペーサーを取り付けることによって行う。この際、一種類のせん断試験用治具に対して、スペーサーの角度を変えて６種類のせん断角度  $\alpha$  を設定すると、供試体に大きな偏心荷重が作用し、その結果、供試体に曲げ引張破壊が生じることになる。したがって、このような曲げ引張破壊を避ける



図－４ せん断角度の設定

ため、スペーサーを取り付けない状態で、せん断角度 $\alpha$ が $15^\circ$ と $30^\circ$ の試験ができるように2種類のせん断試験用治具を用意して、これと角度が $5^\circ$ のスペーサーを組み合わせることにより、6種類のせん断角度での試験が行えるようにしてある。

### 2. 3 せん断試験用治具の改造

次に、このようなせん断試験用治具に対し、供試体の側方から拘束圧力を作用させた状態でせん断試験が行えるように、せん断試験用治具の改造を行った。今回、行おうとする試験の概念図を図-5に示す。

図は、供試体に与える組み合わせ応力状態を示したものであり、I J K L面は、強制せん断面である。ここに、

T：せん断試験用治具によってI J K L面にせん断応力を与えるために、B C J I（およびL K H E）面に載荷する荷重。

N：せん断試験用治具によってI J K L面に垂直応力を与えるために、B C G F（およびA D H E）面に載荷する荷重。

S：側圧載荷装置によってせん断面に直交する面に直応力を与えるためにD C G H（およびA B F E）面に載荷する荷重。

である。

せん断試験用治具の改造の目標は次の3項目とした。

- 1) 側圧載荷装置は、構造が簡単で、取扱いが容易かつ安全な方式であること
- 2) 側圧載荷の大きさを容易に設定することができ、安定性がよいこと
- 3) 改造費が安価なこと

側方圧縮応力の載荷方法としては、

- ① 載荷板を用いて剛体的に載荷する方法
- ② 空気圧または水圧を用いて等分布圧力を載荷する方法

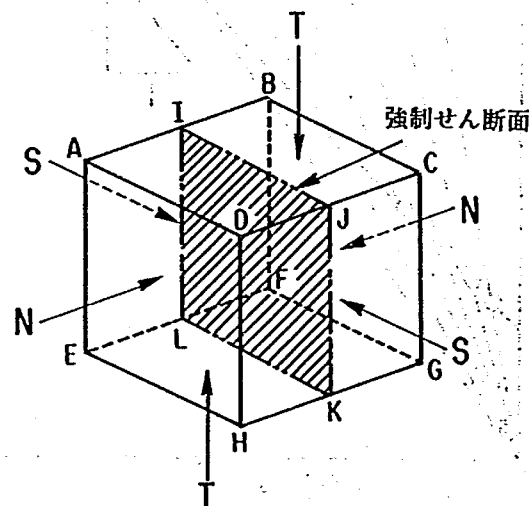


図-5 供試体に与える組合せ応力状態

が考えられる。しかし、載荷板による方法は、載荷装置および制御方法が複雑となり、解決しなければならない問題が多い。一方、等分布圧力を載荷する方法では、空気圧と水圧を組み合わせることで、容易にかつ精度良く圧力を制御することが可能で、また装置の製作費も安価である。さらに、空気圧と水圧を組み合わせることから、加圧容器がバーストした場合の安全性も極めて高いといえる。したがって、今回の載荷方法としては、空気圧を水圧に変換して載荷する等分布圧力載荷方法を選択した。

今回、製作した側圧載荷装置は、図-6に示すとおり、

- 1) 圧力源
- 2) 調圧タンク
- 3) 加圧容器

の部分から構成されている。このうち、圧力源は市販のエアークンプレッサー（最大発生圧力が $10\text{kgf/cm}^2$ ）を使用している。また、供試体側面に圧力を載荷する方法は、圧力源より供給された空気圧を調圧タンク内で水圧に変換する方法である。

調圧タンクは写真-1に示すアクリル製のタンクで、容量が約 $10\text{l}$ 、耐圧（内圧）が $10\text{kgf/cm}^2$ のものである。タンクには、供給圧力を調節するための調圧弁と、空気圧指示用と供給水圧指示用に容量が $10\text{kgf/cm}^2$ で最小目盛りが $1\text{kgf/cm}^2$ のブルドン管式圧力指示計が合計2個取り付けられている。

加圧容器は耐圧 $10\text{kgf/cm}^2$ の鋼製の容器で、せん断試験用治具にセットして供試体の両側面に側圧を載荷するためのものであり、図-7および写真-2に示すように、上部の治具と下部の治具に分けて、それぞれ5本のネジで固定する構造となっている。容器は、セットした時に上部と下部容器の境界面（強制せん断面）に沿って $2\sim 3\text{mm}$ の隙間が生じるように製作してある。これは、上部と下部の容器が載荷時に接触して、試験結果にその影響が及ばないように配慮したためである。

本装置の製作で最も検討を加えたのが、供試体側面に等分布圧力を載荷する具体的な方法である。基本的

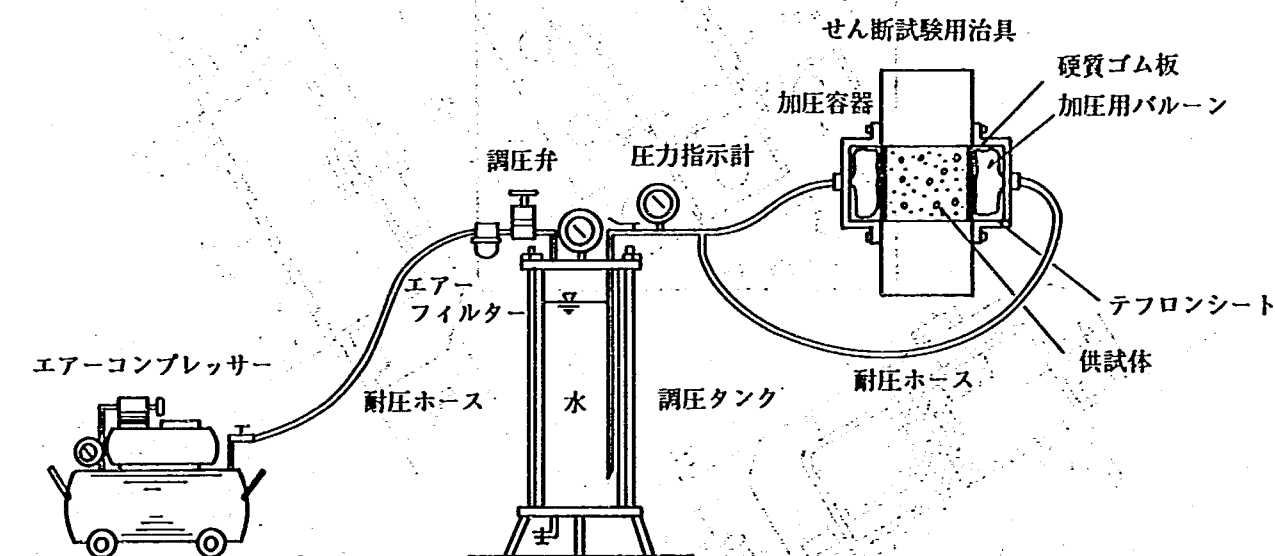


図-6 側圧載荷装置の構成

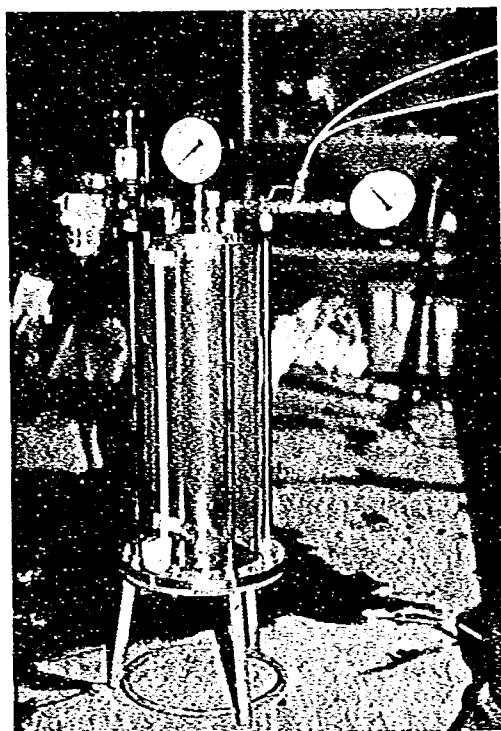


写真-1 調圧タンク

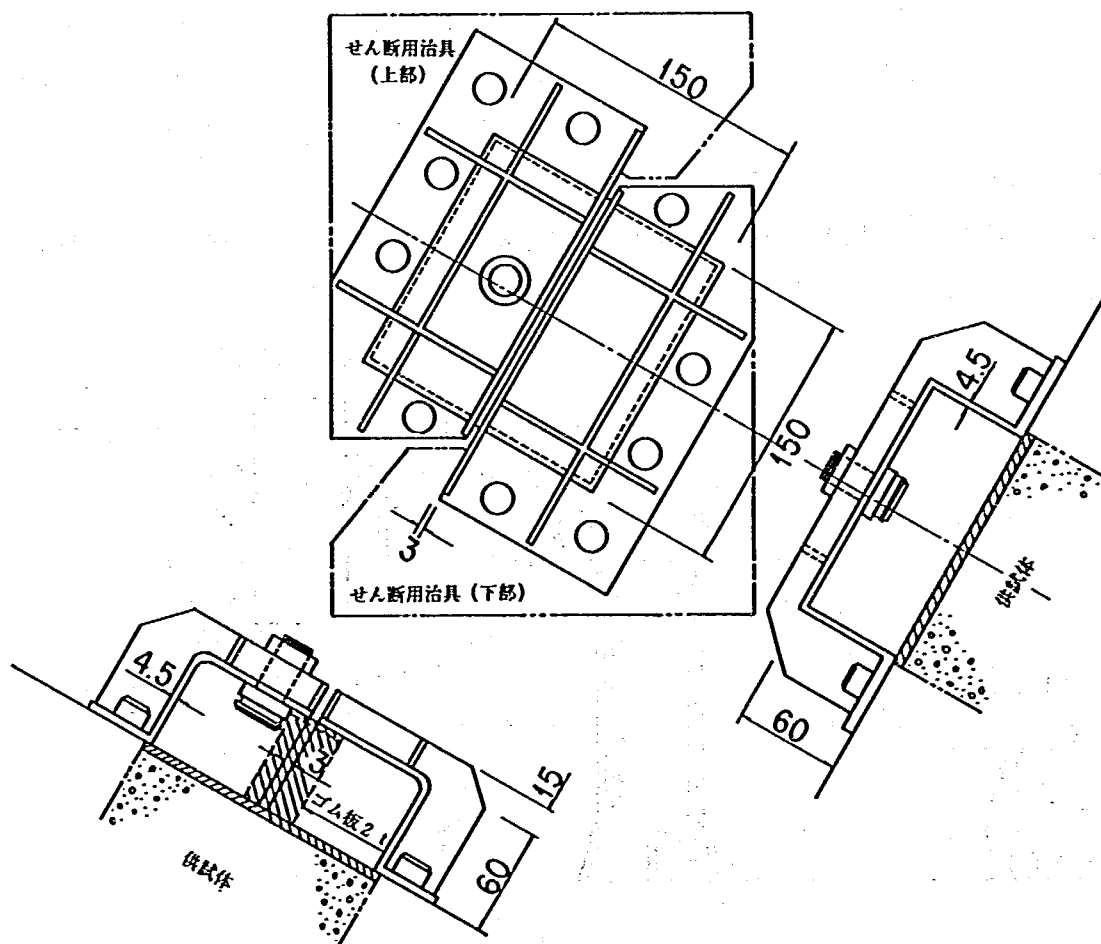


図-7 調圧加圧容器

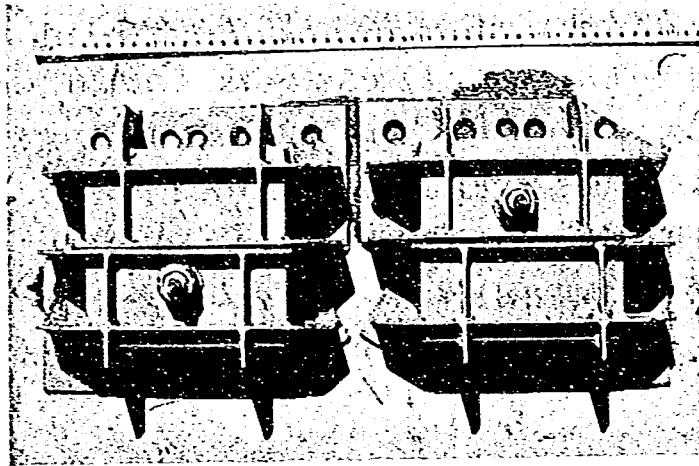


写真-2 (a) 加圧容器の外観

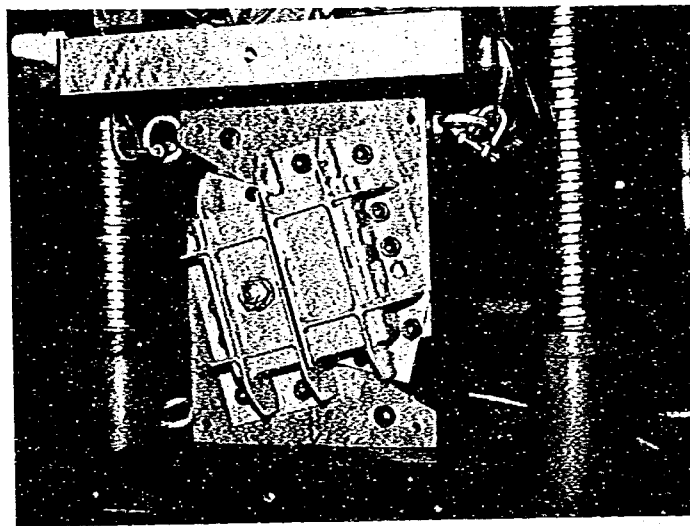


写真-2 (b) 加圧容器をせん断試験用治具にネジで固定した状態

な方法は、供給された水圧を、加圧容器内にある加圧用バルーンによって供試体面に載荷するというものであるが、ここでバルーンに要求される性質として、

- ①10kgf/cm<sup>2</sup>の圧力に耐えられること
- ②均等に圧力を載荷できるようになるべく薄手のものであること
- ③加圧容器の内容積とほぼ同程度の初期サイズであること
- ④安価であること

が考えられる。以上の条件を満足するバルーンとして市販されているゴム風船（厚さ0.5mm、直径17cm）を採用することとした。また、供試体の破壊時にバルーンが破損しないように、供試体面とバルーンの接触部には、載荷板として硬質ゴム板（15cm×7.5cm×0.5cm）を介するものとし、強制せん断線を挟んで上部と下部の加圧容器にそれぞれ1枚ずつセットするものとした。また、加圧容器の隙間から加圧されてバルーンが外へはみ出さないように、上部と下部の加圧容器の隙間の内側にもゴム板を配置するものとした。

しかし、このような加圧容器を用いて予備载荷試験を実施したところ、 $1\text{ kgf/cm}^2$ 程度の低い圧力でバルーンが破裂してしまい、目標の圧力を与えることができなかった。この原因は、破裂状態から判断して、加圧容器内のバルーンが少し大きめであったため、バルーンが折り重なり合い、給水加圧する際に平均して自由に膨張できず、局所的な膨張が生じたことによるものと考えられた。このため、自由な膨張を助長するように、バルーンの口もとを切断して、その大きさを少し小さくするとともに、バルーンにシリコングリースを塗り、さらに写真-3のように加圧容器とバルーンの間にテフロンシート（厚さ0.5mm）をセットして周辺摩擦を低減することとした。この結果、バルーンの破裂の問題は解決することができた。

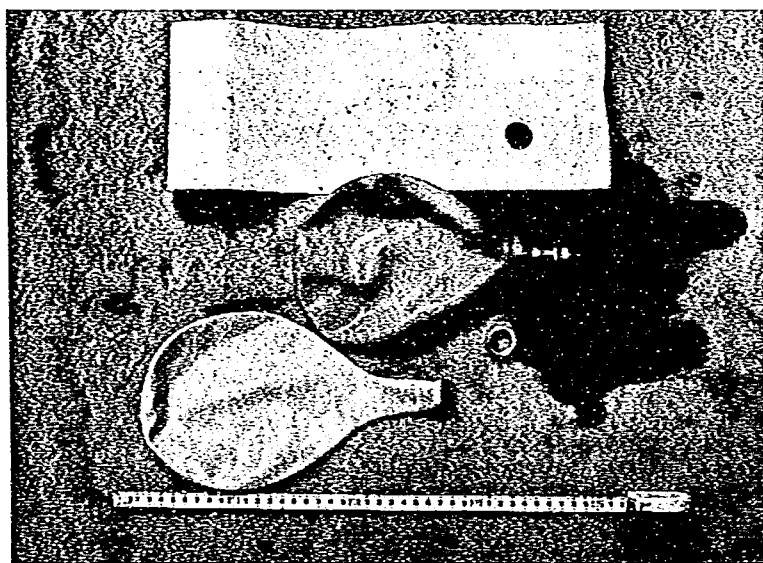


写真-3 (a) 加圧用バルーンとテフロンシート

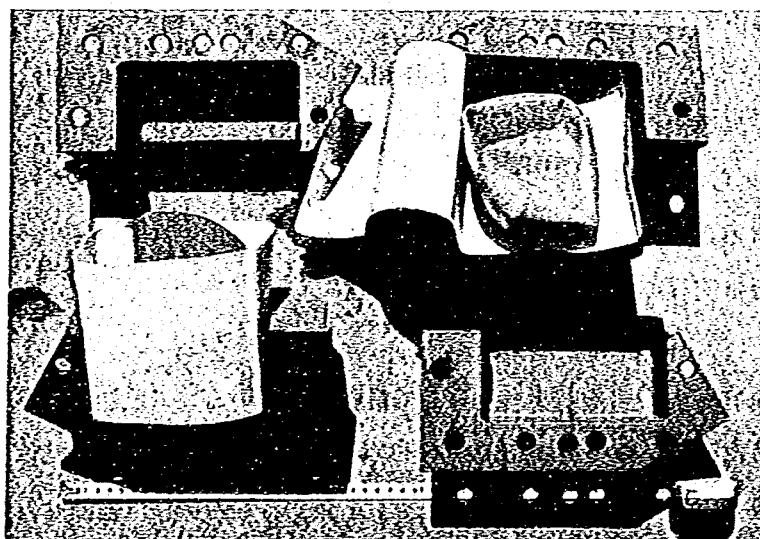


写真-3 (b) 加圧容器にテフロンシートとバルーンをセットした状態

### 3. 側方拘束圧力を与えないせん断試験

#### 3. 1 試験方法

まず、はじめに、コンクリートの破壊規準をMohr-Coulombのせん断破壊規準によって近似することの妥当性を検討する目的で、側方拘束応力を与えない状態での一面せん断試験と一軸圧縮試験を行った結果<sup>7)</sup>について述べる。

せん断試験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。この配合は、7つの重力式コンクリートダムの内部コンクリートの配合を参考に決定したもので、40mmオーバーの骨材をウエットスクリーニングにより除去した配合を想定したものである。使用したセメントの種類は普通ポルトランドセメントであり、骨材は砂岩の碎石・砕砂で、粗骨材の表乾比重 $G_a$ が2.668、吸水率 $Q$ が0.68%、砂の表乾比重 $G_a$ が2.578、吸水率 $Q$ が1.87%である。試験用の供試体は、1辺が15cmの立方体型枠にコンクリートを2層に分けて投入し、各層を棒状バイブレーターで締固めて作製した。なお、作製した供試体は水中養生を行って保管した。また、せん断試験時の材令は28日と91日に設定し、試験日の7日前に供試体を水中から引き上げて、室内自然乾燥状態を与えた。

せん断試験は、図-3のせん断試験用治具を用いて行った。試験時のせん断角度 $\alpha$ は、せん断強度を表す破壊規準線 $\tau = \tau_0 + f\sigma$ を精度良く求めるため、試験可能な範囲である $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $35^\circ$ の6種類を設定した。また、試験結果のばらつきを考慮して同一せん断角度に対して5本の供試体を試験した。なお、2材令、6角度、1角度あたり5本の計60本の供試体は、4バッチに分けて打設、作製したが、試験に際しては、各バッチの供試体がせん断角度の条件に対してかたよらないように配慮した。

試験は以下の手順で行った。

- ①供試体をせん断試験用治具にセットする
- ②供試体の面がせん断試験用治具の載荷面に正しく一致していることを確認してから、アムスラーの載荷油圧バルブを操作して、強制せん断面に作用するせん断応力換算で毎分 $5 \text{ kgf/cm}^2$ の速度で載荷する
- ③載荷荷重が最大値を示した後、降下したら、供試体が破壊したものと考え、試験を終了する
- ④供試体の破壊状況をスケッチして、試験を終了する

表-1 コンクリートの配合

| 粗骨材の<br>最大寸法<br>G <sub>max</sub><br>(mm) | スランブ<br>(cm) | 空気量<br>(%) | 水セメン<br>ト比<br>W/C<br>(%) | 細骨材<br>率<br>s/a<br>(%) | 単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> ) |               |              |                    |                     |                     | Cに対する<br>A E 剤の<br>百分率<br>(%) |
|------------------------------------------|--------------|------------|--------------------------|------------------------|----------------------------|---------------|--------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
|                                          |              |            |                          |                        | 水<br><br>W                 | セメント<br><br>C | 細骨材<br><br>S | 粗 骨 材 G            |                     |                     |                               |
|                                          |              |            |                          |                        |                            |               |              | 5 mm<br> <br>10 mm | 10 mm<br> <br>20 mm | 20 mm<br> <br>40 mm |                               |
| 40                                       | 4 ± 1        | 4 ± 1      | 60                       | 35                     | 148                        | 247           | 660          | 318                | 484                 | 471                 | 0.025                         |

### 3. 2 試験結果

供試体が破壊した時の荷重はアムスラーの指示荷重（容量100tf、最小目盛り200kgf）から読みとり、せん断面における最大せん断応力 $\tau$ と最大直応力 $\sigma$ は（1）式および（2）式から算出した。

図－8に、材令28日と91日におけるせん断強度の測定値と最小自乗法を用いて求めたMohr-Coulombの破壊規準線（図中の破線）、ならびに3本の標準供試体（直径15cm×高さ30cm）より得られた一軸圧縮強度の平均値から求めたMohrの応力円を示す。また、参考までに、3本の標準供試体の割裂試験によって得られた引張強度の平均値から求めたMohrの応力円も併せて示している。

最小自乗法を用いて求めた材令28日と91日におけるコンクリートのせん断強度は下記のとおりである。

・材令が28日の時

$$\tau = 50.9\text{kgf/cm}^2 + \sigma \tan 46.1^\circ$$

・材令が91日の時

$$\tau = 68.3\text{kgf/cm}^2 + \sigma \tan 45.2^\circ$$

また、せん断強度 $\tau_0$ と一軸圧縮強度 $\sigma_c$ との関係は、

・材令が28日の時

$$\tau_0 = \sigma_c / 5.6$$

・材令が91日の時

$$\tau_0 = \sigma_c / 5.2$$

であった。

図－8より、最小自乗法で求めたせん断破壊の規準線は、一軸圧縮強度に対するMohrの応力円とわずかに交差する結果となっているが、両者の間には非常により対応関係があり、コンクリートのせん断強度はMohr-Coulombの破壊規準に従うと見なすことができる。なお、せん断強度を表すMohr-Coulombの破壊規準線と一軸圧縮強度を表すMohrの応力円とがわずかに交差している理由としては、せん断試験中の供試体の応力分布が均一でないため、逐次破壊が生じ、測定されたせん断強度が真のせん断強度に比べて小さくなったことが考えられる。また、せん断角度 $\alpha$ が10°と35°の結果は、最小自乗法で求めた破壊規準線に対して、小さな強度となっていることがわかる。

また、せん断角度 $\alpha$ が小さい場合には供試体の側面にはほとんど亀裂が入らなかったが、せん断角度 $\alpha$ が25°と30°および35°の場合には供試体の側面に図－9および写真－4に示したような亀裂が多数現れる傾向がみられた。このため、せん断角度としてあまり大きな値をとると、強制せん断面以外のところでも破壊が生じ、厳密なせん断強度を求めることができないといえる。

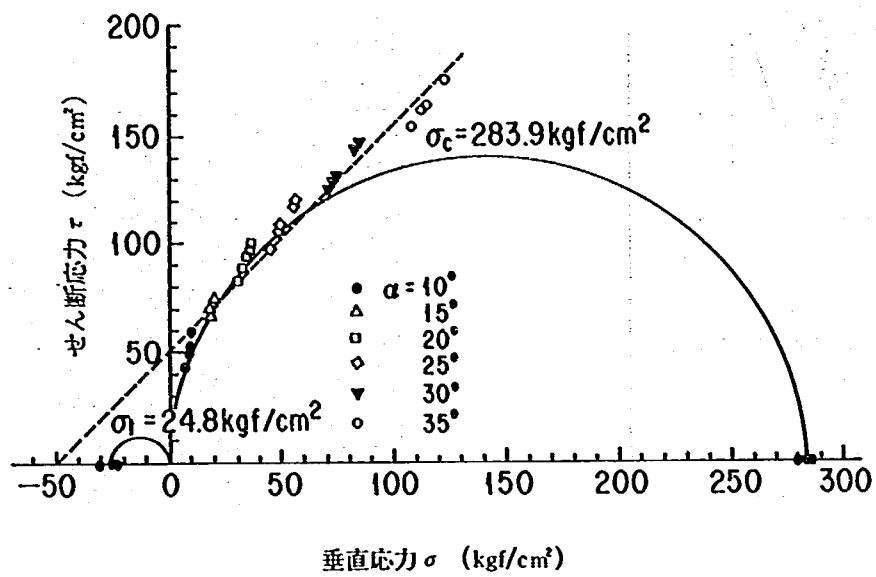


図-8 (a) コンクリートのせん断強度と一軸圧縮強度 (材令28日)

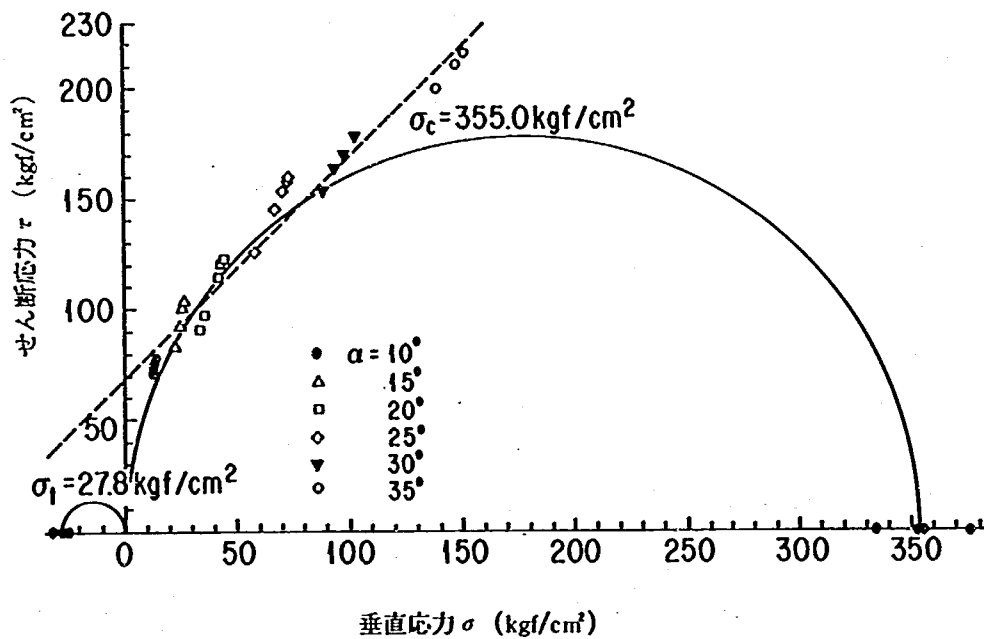


図-8 (b) コンクリートのせん断強度と一軸圧縮強度 (材令91日)

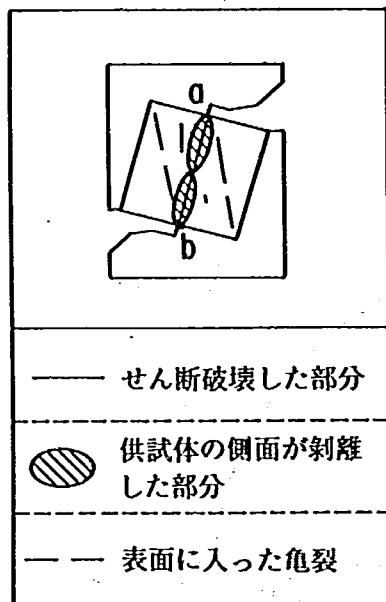


図-9 せん断後の供試体側面の状況

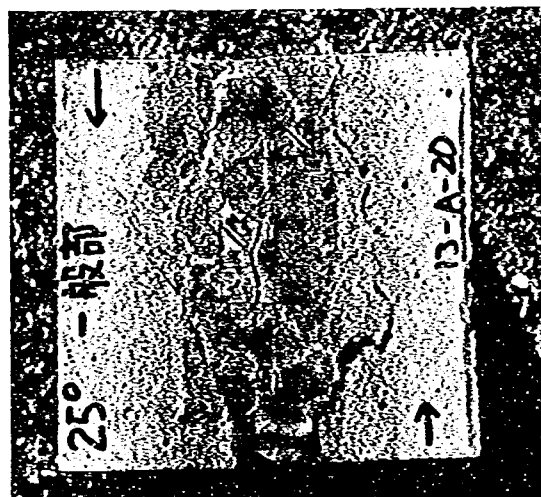


写真-4 せん断後の供試体側面の状況

## 4. 側方拘束圧力を与えたせん断試験

### 4. 1 試験方法

次に、改造したせん断試験用治具を使用して、側方拘束圧力を与えた組み合わせ応力状態でせん断試験を行った。この試験は、側圧を与えない場合と側方拘束圧力を与えた場合のせん断強度の比較を行い、側方拘束圧力の有無がコンクリートのせん断強度に与える影響を求めることを目的として行ったものである。なお、今回の試験においては、試験値のばらつきをできるだけ小さく押さえることを考慮して、供試体としてモルタルの供試体を使用するものとした。供試体は、一辺が15cmの立方体型枠に、表-2に示す配合のモルタルを2層に分けて投入し、各層を棒状バイブレーターで締固めて作製した。使用した砂は、硬質な砂岩の砕砂で表乾比重  $G_a$  が2.632、吸水率  $Q$  が0.98%のものである。また、セメントには中庸熟ポルトランドセメントを使用した。

今回の試験に用いるせん断角度  $\alpha$  としては、本せん断試験用治具を用いて実施できる最小のせん断角度である  $\alpha = 10^\circ$  と最大のせん断角度である  $\alpha = 35^\circ$  を選定した。これは、側方拘束圧力として与えられる中間主応力の影響が最も大きくなる場合と最も小さくなる場合を想定して設定したものである。

モルタル供試体は1バッチあたり12個、合計2バッチで24個を作製した。また、これとあわせて圧縮試験用の標準供試体（直径15cm×高さ30cm）を各バッチ毎に3本、合計6本を作製した。

供試体は、打設の後、水中養生を行い、試験の約30日前に水中から引き上げた後、室内において自然乾燥状態で保管し、試験を行った。24個作製した供試体のうちの2個を試験装置の機能確認試験で利用したため、本試験は残り22個の供試体を用いて材令91日において行った。試験時のせん断角度  $\alpha$  は前述したように  $10^\circ$  と  $35^\circ$  の場合の2条件を設定し、 $6 \text{ kgf/cm}^2$  の側方拘束圧力を載荷した状態と載荷しない状態で、せん断試験を実施した。なお、バッチの影響が試験結果に現れないように、各バッチの供試体が試験条件に対してかたよらないように配慮した。

本試験の手順を以下に示す。

- ①供試体をせん断試験用治具にセットする
- ②調圧タンクから加圧容器へ加圧水を給水するホースおよびバルーン内部に水を送り、ホースおよびバルーン内部にある空気を抜く
- ③拘束圧力を与える供試体の両側面に、各々2枚の載荷用硬質ゴム板を強制せん断線を挟んでその両側にセ

表-2 モルタルの配合

| 水<br>W<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | セメント<br>C<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 水セメント<br>比 W/C<br>(%) | 砂<br>S<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 混和剤<br>No. 8<br>( $\text{kg/m}^3$ ) |
|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 266                           | 532                              | 50                    | 1468                          | 1.3                                 |

ットする

- ④バルーンおよびテフロンシートにシリコングリースを十分に塗って、バルーンおよびテフロンシートを加圧容器内にセットする
- ⑤バルーンがせん断試験用治具と加圧容器の締め付け部に挟まれないように注意して、写真-5に示すように加圧容器をせん断試験用治具にボルトで固定する
- ⑥アムスラーを操作して、初期荷重として5tf程度の荷重を供試体に与えてこれを保持する
- ⑦調圧タンクの調圧弁を操作して所定の側方拘束圧力を与える
- ⑧供給水圧用の圧力指示計に示された側方拘束圧力が所定の圧力を示し、かつ安定した状態になってから、

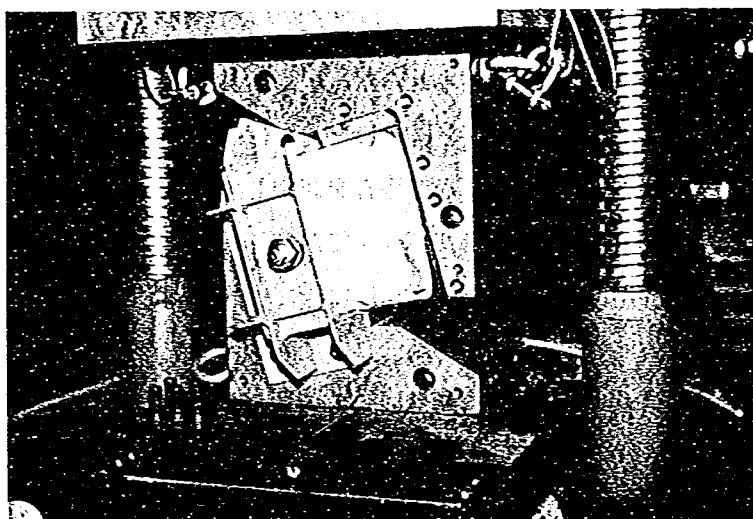


写真-5 (a) 加圧容器の半分とバルーンを治具に取り付けた状態

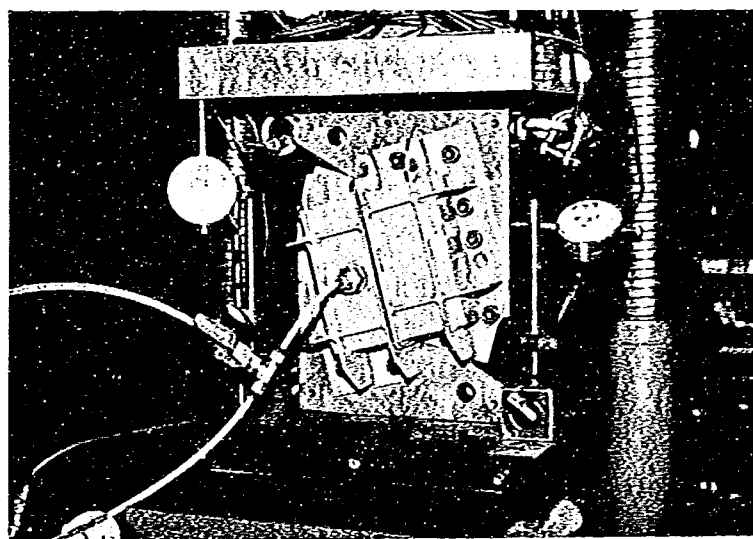


写真-5 (b) 加圧容器の取り付けが終了した状態

写真-6のようにアムスラーの載荷油圧バルブを操作して、強制せん断面に作用するせん断応力に換算して毎分  $5 \text{ kgf/cm}^2$  の速度で載荷して供試体を破壊する

- ⑨アムスラーの載荷荷重が最大値を示した後、降下したら、供試体が破壊したものと考え、試験を終了する
- ⑩側方拘束圧力を零の状態に戻す
- ⑪供試体を取り出してせん断破壊状況をスケッチし、試験を終了する

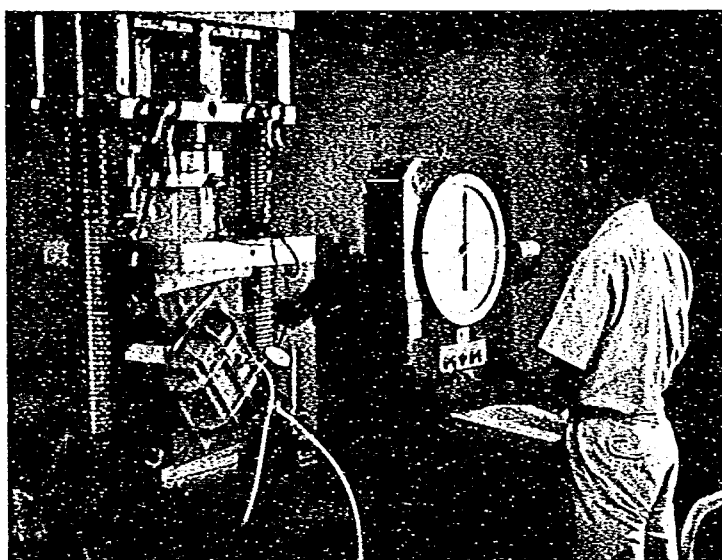


写真-6 せん断試験の開始

#### 4. 2 試験結果

表-3にせん断試験の結果を示す。破壊時の荷重はアムスラーの指示荷重（容量100t、最小目盛り200kgf）から読み取った。なお、側方拘束圧力を与えると、側圧加圧容器の内壁面にバルーンを介して拘束圧力が伝達されるため、図-10のようにアムスラーによる載荷方向とは逆方向の力 $\Delta P$ がせん断試験用の治具に伝達される。したがって、側方拘束圧力を与えた試験では、供試体に作用する荷重は、アムスラーの指示荷重から側圧加圧容器によって載荷板に伝達される荷重を差し引いた値になる。このため、結果のとりまとめにあたっては、アムスラーの指示荷重から拘束圧力によって発生する荷重を指示荷重から差し引いた。

せん断角度 $\alpha$ が $10^\circ$ の場合の破壊時の応力は、側方拘束圧力がない状態では、垂直応力の平均値 $\bar{\sigma}$ が $14.67 \text{ kgf/cm}^2$ 、せん断応力の平均値 $\bar{\tau}$ が $83.20 \text{ kgf/cm}^2$ であった。それに比べて側方拘束圧力を与えた場合には、垂直応力の平均値 $\bar{\sigma}$ が $13.17 \text{ kgf/cm}^2$ で、せん断応力の平均値 $\bar{\tau}$ が $74.75 \text{ kgf/cm}^2$ であった。両者の値を比べると、側方拘束応力を与えた方が垂直応力の平均値 $\bar{\sigma}$ で $1.50 \text{ kgf/cm}^2$ 、せん断応力の平均値 $\bar{\tau}$ で $8.45 \text{ kgf/cm}^2$ 小さいが、試験値のばらつきを考慮すると有意な差は現れていないといえる。

次に、せん断角度 $\alpha$ が $35^\circ$ の場合の破壊時の応力は、側方拘束圧力がない状態では、垂直応力の平均値 $\bar{\sigma}$ が $205.81 \text{ kgf/cm}^2$ 、せん断応力の平均値 $\bar{\tau}$ が $293.92 \text{ kgf/cm}^2$ であった。それに比べて側方拘束圧力を与えた場合には、垂直応力の平均値 $\bar{\sigma}$ が $200.32 \text{ kgf/cm}^2$ で、せん断応力の平均値 $\bar{\tau}$ が $286.08 \text{ kgf/cm}^2$ であった。両者の

表-3 モルタル供試体のせん断試験結果

| No | せん断角度 $\alpha = 10^\circ$                      |                                              |     |                                                |                                              |     | せん断角度 $\alpha = 35^\circ$                      |                                              |     |                                                |                                              |     |
|----|------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----|------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----|------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----|------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----|
|    | 側方拘束圧力 $0.0 \text{ kgf/cm}^2$                  |                                              |     | 側方拘束圧力 $6 \text{ kgf/cm}^2$                    |                                              |     | 側方拘束圧力 $0.0 \text{ kgf/cm}^2$                  |                                              |     | 側方拘束圧力 $6 \text{ kgf/cm}^2$                    |                                              |     |
|    | $\sigma_{\text{max}}$<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | $\tau_{\text{max}}$<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | バッチ | $\sigma_{\text{max}}$<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | $\tau_{\text{max}}$<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | バッチ | $\sigma_{\text{max}}$<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | $\tau_{\text{max}}$<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | バッチ | $\sigma_{\text{max}}$<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | $\tau_{\text{max}}$<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | バッチ |
| 1  | 15.28                                          | 86.66                                        | A   | 11.14                                          | 63.19                                        | A   | 202.66                                         | 289.43                                       | A   | 195.43                                         | 279.10                                       | A   |
| 2  | 13.51                                          | 76.60                                        | A   | 15.00                                          | 85.08                                        | A   | 204.70                                         | 292.35                                       | A   | 197.21                                         | 281.65                                       | A   |
| 3  | 15.90                                          | 90.16                                        | A   | 13.14                                          | 74.57                                        | A   | 212.86                                         | 303.99                                       | A   | 198.49                                         | 283.47                                       | A   |
| 4  | 14.16                                          | 80.31                                        | B   | 12.91                                          | 73.26                                        | B   | 208.02                                         | 297.08                                       | B   | 199.52                                         | 284.93                                       | B   |
| 5  | 14.51                                          | 82.29                                        | B   | 13.63                                          | 77.64                                        | B   | 205.21                                         | 293.07                                       | B   | 207.67                                         | 296.58                                       | B   |
| 6  |                                                |                                              |     |                                                |                                              |     | 201.39                                         | 287.61                                       | B   | 203.59                                         | 290.75                                       | B   |
| 平均 | 14.67                                          | 83.20                                        |     | 13.17                                          | 74.75                                        |     | 205.81                                         | 293.92                                       |     | 200.32                                         | 286.08                                       |     |

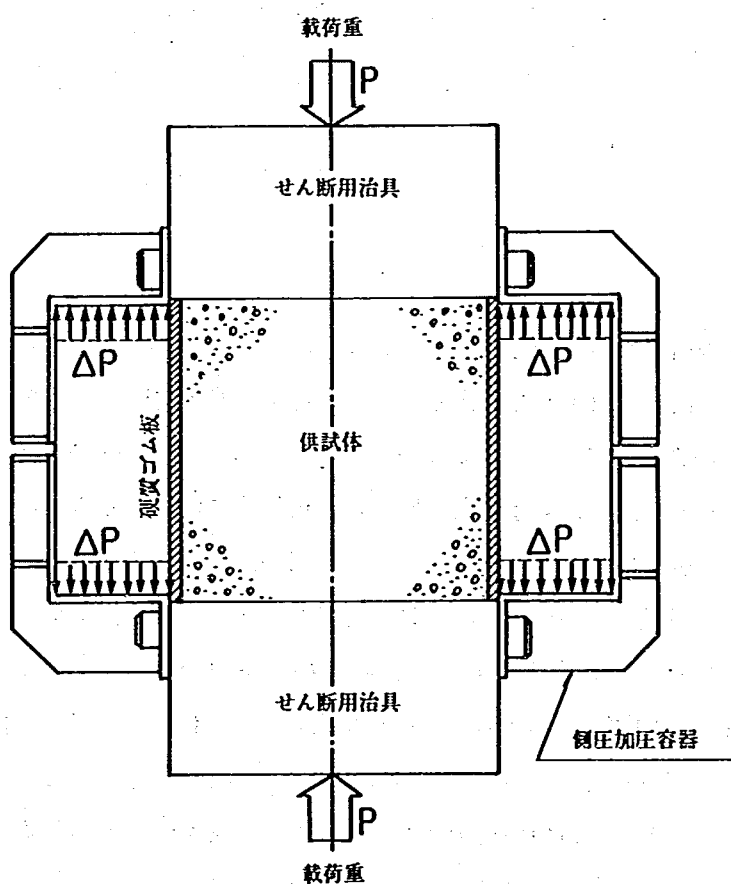


図-10 側方拘束圧力を与えた時、載荷方向と逆方向に作用する力 $\Delta P$

値を比べると、側方拘束圧力を与えた方が垂直応力の平均値 $\bar{\sigma}$ で5.49kgf/cm<sup>2</sup>、せん断応力の平均値 $\bar{\tau}$ で7.84kgf/cm<sup>2</sup>小さい結果となっているが、試験値のばらつきを考慮すると有意な差は現れていないといえる。

次に、試験によって求めたモルタルのせん断試験強度を、Mohr-Coulombの破壊規準式、

$$\tau = \tau_0 + f \sigma \quad (3)$$

が成り立つものと仮定して、これに従って整理した結果を図-11に示す。なお、図中には6本の標準供試体の平均圧縮強度を表わすMohrの応力円もあわせて示してある。せん断角度 $\alpha$ が10°と35°の各々の角度における破壊時の平均応力から求めたモルタルのせん断強度は次のとおりである。

・側方拘束圧力が0 kgf/cm<sup>2</sup>の時

$$\tau = 67.0 \text{ kgf/cm}^2 + \sigma \tan 47.8^\circ$$

・側方拘束圧力が6 kgf/cm<sup>2</sup>の時

$$\tau = 59.9 \text{ kgf/cm}^2 + \sigma \tan 48.5^\circ$$

せん断強度定数のうち、 $\tau_0$ の値は、側方拘束圧力を与えた方が7.1kgf/cm<sup>2</sup>小さく、 $\phi$  ( $=\tan^{-1} f$ ) の値は、逆に、側方拘束圧力を与えた方が0.7°大きく現れているが、図でも明らかなように両者に有意な強度差があ

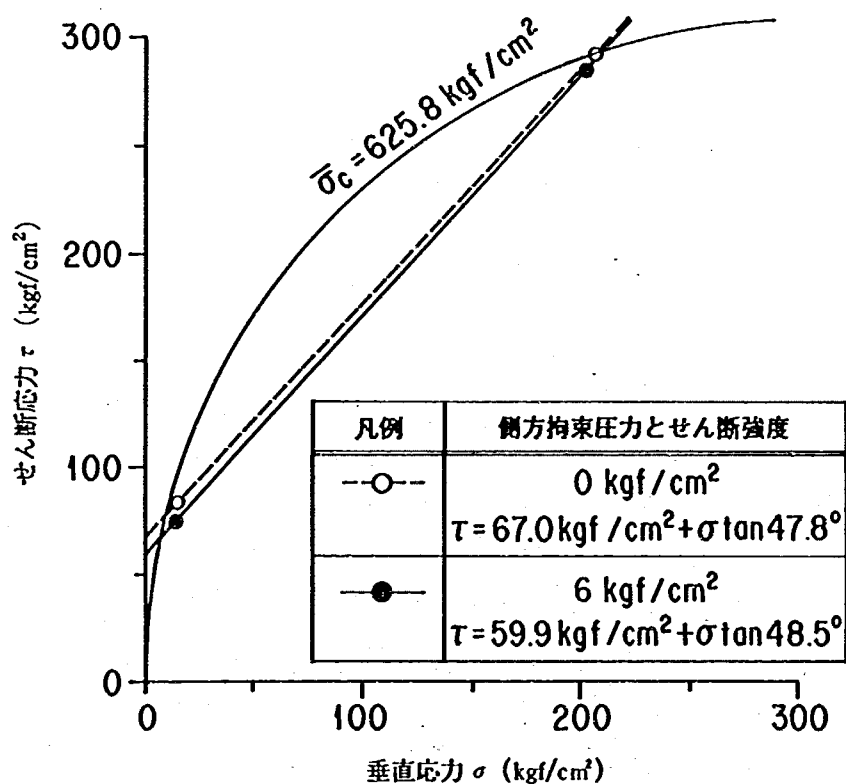


図-11 モルタル供試体を用いたせん断試験結果

るとは考えられない。したがって、本検討結果によれば、側方拘束圧力はコンクリートのせん断強度に影響を与えないといえることができる。これは、コンクリートの破壊が中間主応力によって影響を受けるという八面体応力説の仮説とは矛盾する結果となっている。また今回の試験では、せん断破壊規準を示すMohr-Coulombの破壊規準線と一軸圧縮強度を表すMohrの応力円は大きく交差する結果となった。この結果は、コンクリートの破壊がMohr-Coulombのせん断破壊規準に従うという仮説とも矛盾した結果となっている。また、この結果は第3章で示した側方拘束圧力を与えないせん断試験の結果とも矛盾している。

今回の試験では、側方拘束圧力の影響を最大にすることおよび最小にすることを重要視して、せん断角度として $10^{\circ}$ と $35^{\circ}$ を設定した。しかし、第3章でも述べたように、これらの角度は本方法によるせん断試験の適用範囲を超えている可能性もある。すなわち、 $10^{\circ}$ の場合には供試体に曲げモーメントが作用して供試体に引張破壊が生じる可能性があること、 $35^{\circ}$ の場合には角度が大きすぎて、想定せん断面以外の面で最初に破壊が生じることなど、破壊の形態が想定している状態と大きく異なることがあげられ、これが、上に述べたような結果を生じさせたとも考えられる。この点については、今後、他のせん断角度についての試験も実施し、さらにデータ数を増して詳細な検討を行う必要があると考えられる。

## 5. ま と め

ダム堤体のコンクリートの破壊特性を適正に評価するためには、種々の応力状態を模擬した強度試験を行って破壊時の応力状態を詳しく検討する必要があるといえる。今回は、その第一段階として既存のコンクリートの一面せん断試験用治具を改造し、側方圧縮応力とせん断応力および垂直応力を与えた組み合わせ応力状態でせん断試験を行った。

まず、せん断試験用治具の改造に関してとりまとめると次のようになる。

- 1) 従来使用している15cm×15cm×15cmの立方体供試体を用いた一面せん断試験用治具に側方拘束圧力が載荷できる加圧装置を製作して取り付けけた結果、側方拘束圧力を載荷した組み合わせ応力状態でのせん断試験が可能となった。
- 2) 加圧方式としては、空気圧を水圧に変換する方式を選択した結果、装置が単純で、また、操作・制御が簡単で、かつ安全性も高い装置を製作することができた。
- 3) 供試体側面への加圧は、バルーンを介して行うことにより、設定した圧力を容易にかつ精度良く均等に与えることができた。

次に、比較試験の結果をとりまとめると次のとおりである。

- 4) 15cm×15cm×15cmのモルタル供試体に対して、側方拘束圧力を0 kgf/cm<sup>2</sup>と6 kgf/cm<sup>2</sup>の2条件に設定し、それぞれ、せん断試験が行える最小の角度である10°と最大の角度である35°のせん断角度でせん断試験を行った。
- 5) その結果、せん断破壊時の作用荷重を比べると、側方拘束圧力を与えた場合と与えない場合で試験値に有意な差が現れなかった。これは、第二主応力の大きさがコンクリートの破壊時の応力に影響を与えるとする正八面体応力説（エネルギー説）とは矛盾した結果となった。
- 6) せん断試験の破壊強度を表す破壊規準線とコンクリートの一軸圧縮強度を表すMohrの応力円は互いに交差する結果となり、コンクリートがMohr-Coulombの破壊規準に従うという結果も得られなかった。ただし、この点については、せん断角度を10°と35°に設定した点に多少無理があったとも考えられる。

なお、今後は今回行った予備的な検討成果を基に、種々の側方拘束圧力とせん断角度を与えた組み合わせ応力下でのコンクリートの強度試験データを蓄積し、コンクリートの破壊規準を明らかにしていきたい。また、従来工法で用いられているダム用コンクリートに比べて貧配合のRCD用コンクリートに対する試験もあわせて実施していきたいと考えている。

## 参 考 文 献

- 1) 建設省：河川砂防技術基準（案）、設計編、ダムの設計、1985.10
- 2) たとえば、コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、PP426～473、1984.2
- 3) 伊東茂富、坂口治朗：組み合わせ応力状態におけるコンクリートの強度について、土木研究所報告、第100号、1958.8
- 4) 伊東茂富：コンクリートのせん断強さ——コンクリート・ダムの滑動安定と関連して——、土木技術資料、vol.1-3、PP18～21、1959.1
- 5) 畑野 正：堰堤コンクリートの強度規準並びに剪断強度について（其の2）、土木学会論文集、第6号、PP1～6、1941.8
- 6) 畑野 正：コンクリート・ダムの滑動安定度について、土木学会論文集、第6号、PP6～13、1941.8
- 7) 永山 功、渡辺和夫、小林政登：せん断用治具を用いたコンクリートのせん断試験、土木技術資料、vol.32-6、PP58～63、1990.6

側方拘束応力を与えるコンクリート  
のせん断試験用治具の開発とその  
予備的試験結果

ISSN 0386-5878  
土木研究所資料第2926号  
平成3年1月(1991)  
ダム部ダム構造研究室  
永山 功・渡辺和夫・小林政登  
尾畑伸之

要 旨

既存のコンクリートの一面せん断試験用治具を改造し、側方拘束応力を載荷した組合せ応力状態で一面せん断試験を行う試験用治具を開発した。本報告は、側方拘束を与えるコンクリートのせん断試験用治具の開発の経緯と、15cm×15cm×15cmのモルタル供試体を用いたせん断試験の結果についてとりまとめたものである。

キーワード：コンクリート，せん断強度，せん断試験，拘束応力，組合せ応力

○

郵便はがき

切手を  
はって  
下さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

ダム構造研究室 御中

No. \_\_\_\_\_

No. \_\_\_\_\_

配布先氏名

配布先住所

○

○

土木研究所資料第 2926 号(側方拘束  
応力を与えるコンクリートのせん断  
試験用治具の開発とその予備的試験  
結果) 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

土木研究所資料第 2926 号

○

側方拘束応力を与えるコンクリートのせん断  
試験用治具の開発とその予備的試験結果