

(28) 亀裂を有する岩盤模型のせん断試験について

建設省 土木研究所 正会員 永山 功

建設省 土木研究所 正会員 ○佐々木 隆

建設省 土木研究所 正会員 尾畑 伸之

Model shear tests of jointed rock mass

Isao NAGAYAMA, Takashi SASAKI and Nobuyuki OBATA

(Public Works Research Institute, Ministry of Construction)

ABSTRACT

Shear strength of rock mass is one of the important elements in designing concrete dams. Rock mass has usually much smaller shear strength than rock itself because of the existence of joints. So, we have attempted to examine the effect of joints on shear strength of rock mass. Rock masses with a joint were modeled with plaster and their shear strength was tested in the same manner of in-situ shear tests of rock mass. The horizontal joints of various lengths and locations were modeled on the supposed plane of shearing. Discussed here is the relationship between the result of the test (shear strength of the model) and the length or the location of the joint, and the strain history of the models during the test. The results of tests reveal that even small length of a joint has great influence on strength.

1. はじめに

コンクリートダムの基礎岩盤は、せん断力による滑動に対して必要なせん断摩擦抵抗力を有していなければならない。基礎岩盤のせん断強度がダムの設計上、重要な要素となる。そこで、ダムの設計の際には、各ダムサイトにおいて岩盤分類を行い、岩盤の区分毎の代表点において原位置岩盤せん断試験を実施してせん断強度を求めている。しかし、岩盤の区分とせん断強度が必ずしも十分な対応を示さないことがある。ダムの基礎岩盤に対する岩盤分類の方法としては、電研式、土研式などいくつかの方法が提案されており、一般的には岩盤を構成する岩片の硬さ、岩盤内の亀裂の間隔、岩盤内の亀裂の状態という岩盤そのものの状態を示す指標をその分類要素としている。しかし、せん断試験によって求められるせん断強度に影響を持つ要素として、さらにせん断を考慮する面に対する亀裂の方向性、試験規模に対する亀裂の寸法効果などの力学的な要素が挙げられる。それらの要素の影響を評価するために、筆者らは先に、板状節理面の方向のせん断強度に対する影響を石膏模型を用いた室内試験より検討した結果¹⁾を報告している。

本報文では、不連続面のせん断強度に対する影響を評価するために、石膏模型を用いた室内試験を行った結果について報告をする。考慮した不連続面は、模型の想定せん断面上の水平亀裂であり、ここでは、亀裂の長さによる影響およびせん断ブロックに対する亀裂の位置による影響を検討した。

2. 模型作製方法およびせん断試験方法

今回の試験で用いた模型は、奥行き方向にも形状が同じである図-1に示すような2次元模型である。2

次元模型を用いるのは、亀裂の導入および試験時のひずみ計測を容易にし、基本的な現象を把握しやすくするためである。せん断ブロックの想定せん断面は長さ15cm×奥行き15cmであり、実際の原位置岩盤せん断試験の試験ブロックの1/4の大きさとなっている。せん断角度（せん断荷重の方向と水平面のなす角度）は 16.7° （ $\approx \tan^{-1}0.3$ ）とし、模型の材質は、石膏と水を重量比1.00 : 0.63で混合したものとした。今回の模型では、上側のせん断ブロック部と下側の岩盤部が全く同じ物性であることから、せん断ブロックの内部で破壊が生じてしまうことがないように、せん断ブロックには補強鉄筋を配置している。模型は、打設後、室温40℃、湿度50%の恒温恒湿状態で約1ヶ月間乾燥した。この模型の石膏・水配合比と同一

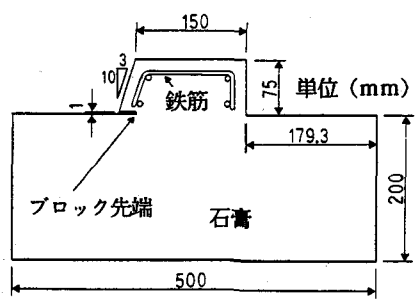


図-1 模型形状

の配合で作製した円柱供試体の一軸圧縮試験から求められた一軸圧縮強度は 186kgf/cm^2 、ヤング係数は $70,000\text{kgf/cm}^2$ であった。また同じ配合で作製された一辺20cmの立方供試体に対する強制一面せん断試験の結果は図-2に示すようになり、純せん断強度 c は 25.4kgf/cm^2 、内部摩擦係数 f は0.793であった。

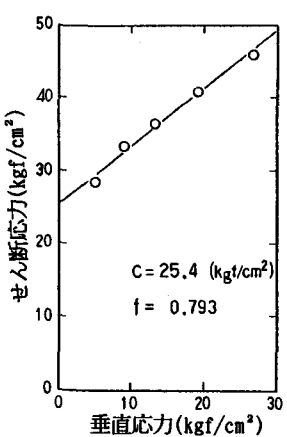


図-2 一面せん断試験結果

今回の模型に導入した亀裂は、せん断試験ブロックの想定せん断面上にある水平亀裂であり、その水平亀裂の位置、長さを種々変えた、表-1に示すような6モデルで試験を行った。モデル2～4は、水平亀裂の中心が想定せん断面の中心に位置する模型で、その水平亀裂の長さ L が各モデルで異なり、それらの試験結果を比較することで水平亀裂の長さがせん断強度に及ぼす影響を評価することができる。また、モデル3、5、6は、水平亀裂の長さ L が同じであるがその位置が異なる模型となっており、それらの試験結果を比較することで水平亀裂の位置がせん断強度に及ぼす影響を評価できることになる。水平亀裂は、0.1mmのポリエステルシートを挿入したまま石膏を打設し、十分乾燥したところでそのシートを引き抜くことによって作製した。

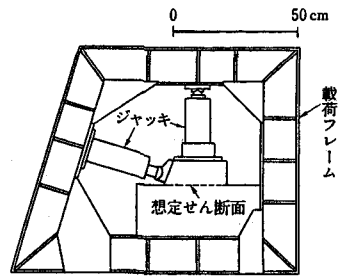


図-3 模型せん断試験装置

載荷方法は原位置岩盤せん断試験²⁾に準じ、一定の初期垂直荷重下でせん断荷重を増加させて破壊させる方法を用い、垂直荷重、せん断荷重とも油圧ジャッキで載荷した。載荷は、模型を図-3に示すような鋼製の載荷枠内に設置して行った。想定せん断面の断面平均の初期垂直応力は、各モデルとも2, 6, 10kgf/cm^2 の3種類とし、各初期垂直応力に対して3基、1モデルあたり計9基の試験を行った。

表-1 模型の種類

	水平亀裂の位置	長さ L^* (cm)	距離 S^{**} (cm)
モデル1		—	—
モデル2		2	7.5
モデル3		4	7.5
モデル4		8	7.5
モデル5		4	3.5
モデル6		4	11.5

* : 水平亀裂の長さ

** : 水平亀裂の中心からブロック先端 (図-1 参照) までの距離

3. 試験結果

3.1 模型のせん断強度

モデル1～6に対するせん断試験結果を、図-4に示す。試験結果は各初期垂直応力に対する試験毎に平均をしており、図中に示した直線は試験結果から推定される破壊規準線である。推定された純せん断強度 c および内部摩擦係数 f を図-5にまとめた。図-4(a)、図-5(a)より、水平亀裂がある場合には、水平亀裂がない場合に比較して強度が大きく低下しており、水平亀裂の長さ $L=2\text{cm}$ (モデル2)、 4cm (モデル3)ではほぼ同程度のせん断強度であることがわかる。しかし、モデル4のように水平亀裂の長さ L が大きい場合にはさらにせん断強度が低下しているのがわかる。次に、図-4(b)、図-5(b)から、水平亀裂の位置によるせん断強度の差は今回の試験ではほとんどないことがわかる。全体では、1)モデル1と2)モデル2、3、5、6と3)モデル4の3つに大きくせん断強度が分かれている。

3.2 破壊に至るまでの亀裂の発生状態と破断面の形状

今回の試験では、図-6に示すような3つの型に分類される亀裂が破壊に至るまでに観察された。I型は、ブロック先端(図-1参

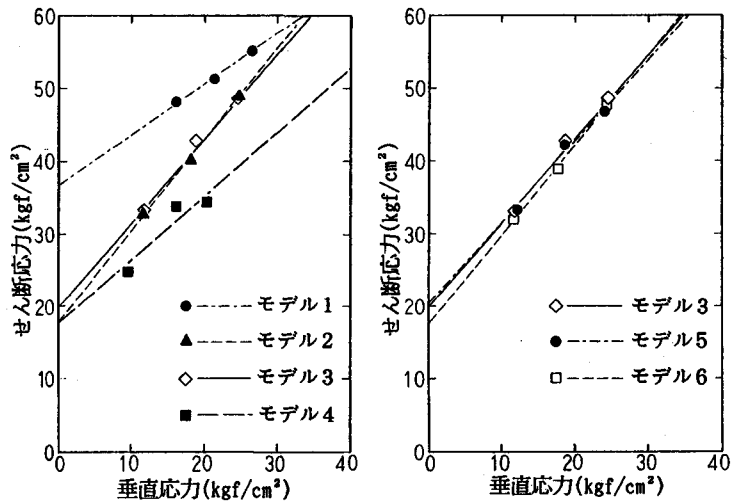


図-4 模型せん断試験結果

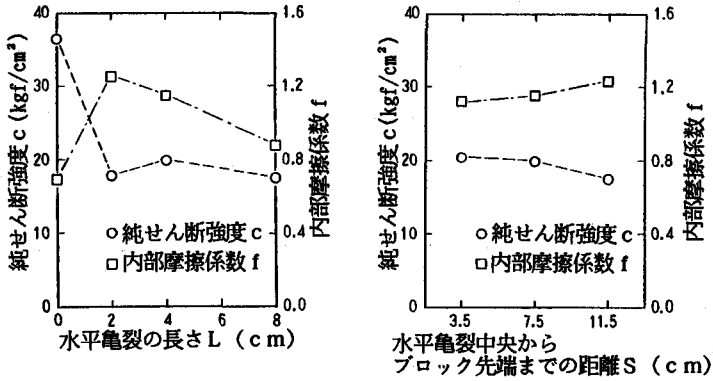


図-5 純せん断強度 c と内部摩擦係数 f

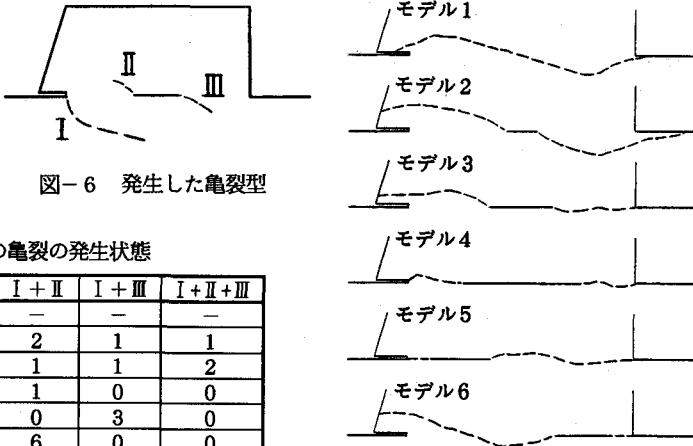


図-7 破断面形状

表-2 破壊に至るまでの亀裂の発生状態

	None	I	II	III	I+II	I+III	I+II+III
モデル1	0	9	-	-	-	-	-
モデル2	0	5	0	0	2	1	1
モデル3	0	3	2	0	1	1	2
モデル4	7	0	0	1	1	0	0
モデル5	0	2	0	4	0	3	0
モデル6	0	1	2	0	6	0	0

照) から最初下方に進展し図中右方向に曲がっていく亀裂であり、Ⅱ型は導入した水平亀裂の前端に生じる亀裂、Ⅲ型は後端に生じる亀裂である。Ⅰ型の亀裂は、载荷の初期(破壊荷重の20%程度)の段階から発生しているが、Ⅱ、Ⅲ型はそれよりも载荷が進んでから発生している。亀裂の発生数を表-2にまとめる。また、破壊後の破断面形状を図-7に示す。これらより、Ⅰ型の亀裂は最終的な破壊面とは一致しないが、Ⅱ、Ⅲ型の亀裂は最終的な破壊面と密接な関係があることがわかる。

3. 3 模型内部のひずみ履歴

ひずみゲージの位置(A, B, C)および測定方向(水平H, 鉛直V, 斜めD)は図-8に示すとおりである。図-9にモデル1, 3, 4において試験時に測定されたひずみおよび有限要素解析によるひずみの履歴を示す。モデル1では、载荷の初期には全ての測点でほぼ弾性的なひずみの伸びを示し、せん断応力が10 kgf/cm²となる付近からD, H成分は減少しV成分は増加するが、これはほぼⅠ型の亀裂が生じた時期に一致する。破壊荷重に近くなるとA点のひずみの絶対値の伸びが止まり、C点では逆に大きくなっている。モデル3では、せん断応力が小さい時はモデル1と同様な傾向を示すが、せん断応力が30 kgf/cm²を超えた時点からC点のV成分が増大するようになる。これは、Ⅲ型の亀裂と密接な関連があると思われる。モデル4では载荷途中での急激なひずみの変化はなく、また破壊に至るまでに亀裂の発生がほとんどなかったことから、逐次的な破壊を生じずに一挙に全体的な破壊に至ったものと考えられる。

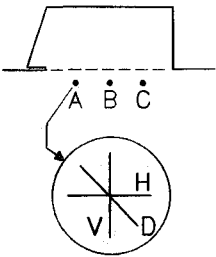


図-8 ひずみ計測位置および方向

4. 有限要素解析による応力検討

解析は、図-2より求めた初期垂直応力10 kgf/cm²における破壊荷重を载荷した状態に対して行った。図-10に、想定せん断面での垂直応力およびせ

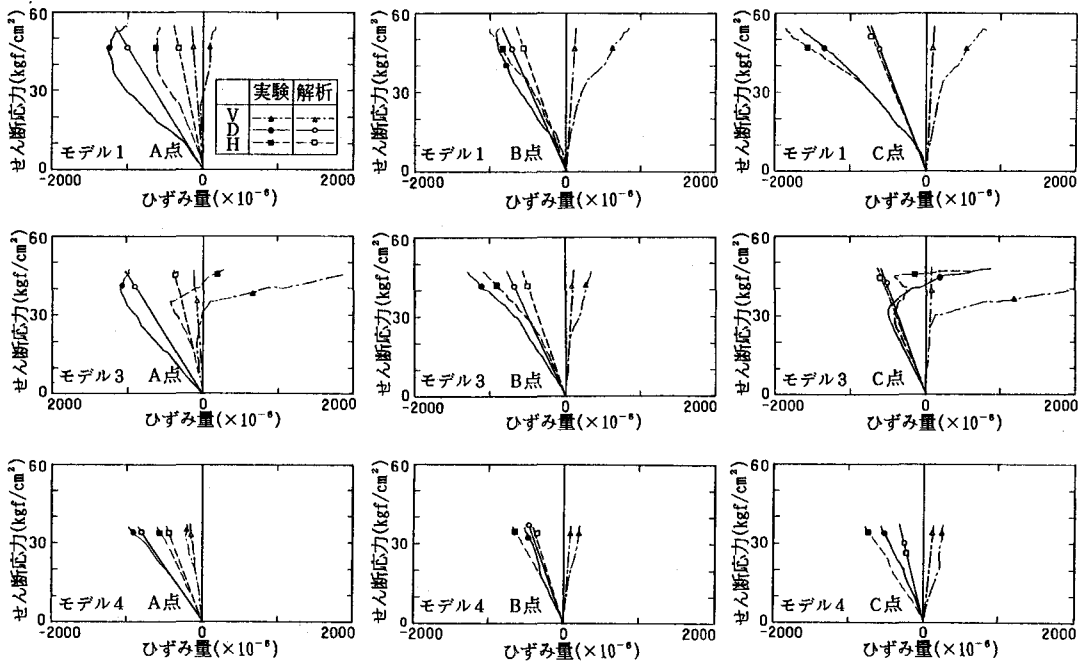


図-9 模型内部のひずみ履歴

ん断応力の分布を示す。せん断ブロックの両端に近い部分で応力が集中し、また水平亀裂がある場合には水平亀裂の前後でも応力が大きくなるという傾向は、どの場合もほとんど同じである。また、図-11は、それぞれの点における破壊に対する安全率（点安全率） n を次式によって求めたものを示している。

$$n = \frac{c + f \cdot \sigma}{\tau}$$

ここで、 σ 、 τ はそれぞれ想定せん断面に作用する垂直応力およびせん断応力であり、 c 、 f は図-2に示した一面せん断試験から得られた値を用いた。水平亀裂が存在する場合には想定せん断面上での応力分布は場所により大きく異なっているが、ブロック前端から水平亀裂の先端の間の点安全率はほぼ等しい値になっており、その付近での破壊が全体的な破壊の先駆けとなり逐次破壊を生じたことが推定される。なお、モデル4では、全体にわたって安全率が低く、このことから一挙に破壊が生じたものと推定される。

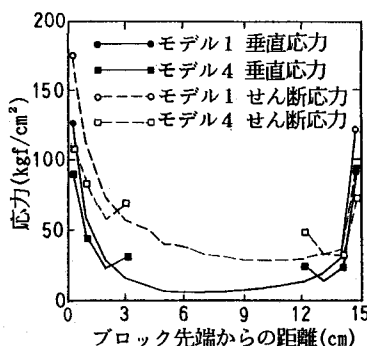
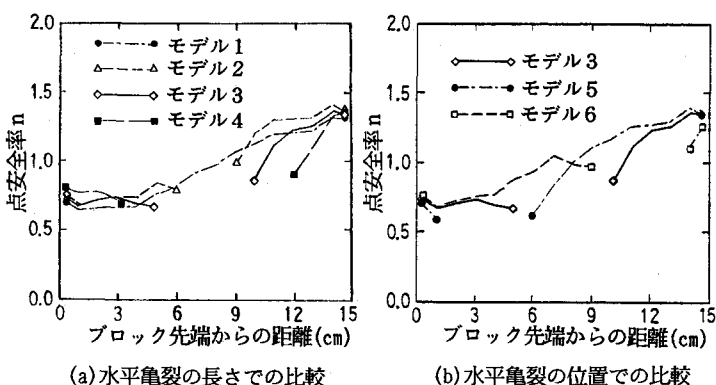


図-10 想定せん断面での応力



(a) 水平亀裂の長さでの比較

(b) 水平亀裂の位置での比較

図-11 想定せん断面での点安全率

5. まとめ

想定せん断面に水平亀裂を有する岩盤のせん断強度について、模型せん断試験による今回の試験結果をまとめると以下になる。

①水平亀裂はその長さが短いものであってもせん断強度に及ぼす影響が大きく、特に長い亀裂ではせん断強度が急激に減少した。

②同じ長さの亀裂であれば、その位置によらずせん断強度に影響が生じなかった。

しかし、水平亀裂の存在は応力集中に関係し、破壊前の亀裂進展にも影響を及ぼすので、②の亀裂位置のせん断強度に対する影響は、導入する亀裂長さ、位置を変えてさらに検討を加える必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 永山 功, 片平 博: 層理面を含んだ岩盤模型のせん断試験, 第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 1988
- 2) 原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針 -解説と設計への適用-, 土木学会, 1983
- 3) 永山 功, 佐々木 隆, 尾畑 伸之: 亀裂を有する岩盤模型のせん断試験, 土木研究所資料, No. 2923