

# 硬岩と軟岩の物性値の差が硬軟複合岩盤のせん断強度に及ぼす影響

## Effect of Difference in the Physical Properties of Hard Rock and Soft Rock on the Shear Strength of Composite Rock

吉田 等\*・宮内茂行\*\*・平山大輔\*\*\*

Hitoshi YOSHIDA, Shigeyuki MIYAUCHI and Daisuke HIRAYAMA

A concrete gravity dam endures the huge water pressure of the reservoir by its weight and the shear resistance of its foundation. It is therefore important to evaluate the shear resistance of a foundation rock mass. In case that the foundation rock consists of several kinds of rock mass, the total shear resistance is estimated by the area weighted mean. In this study, shear tests of the composite rock model were conducted in the laboratory. The results showed that the total shear resistance was smaller than the strength that estimated by the area weighted mean in proportion to the difference in the physical property.

**Key Words :** dam foundation, shear strength, composite rock, model test

### 1. はじめに

近年、複雑な地質条件を有する基礎岩盤上に重力式コンクリートダムを建設する事例が増えている。一般に、基礎岩盤が強度の異なる複数の岩級から構成される場合、基礎岩盤の代表的なせん断強度を面積加重平均により算出し、ダムの滑動安定性を評価することが多い。しかし、基礎岩盤に生ずる応力の分布は非一様であり、各岩盤が同時に極限荷重に達することがないため、複合岩盤基礎のせん断強度は面積加重平均値よりも小さくなる傾向があると考えらる。

本研究は、硬質岩盤と軟質岩盤の物性値の差が硬軟複合岩盤のせん断強度に及ぼす影響を明らかにするために、模型実験による検討を行ったものである。実験では、強度の異なる4種類の模型材料を用いて硬軟複合岩盤模型を作製し、せん断試験を行った。その結果、硬岩と軟岩の物性値の差が大きいほど、硬軟複合岩盤のせん断強度は面積加重平均値よりも小さくなる傾向があることが明らかになった。

### 2. 模型実験

#### 2.1 岩盤材料と岩盤模型

石膏と珪藻土と水を用いて、それらの配合割合を変化させることにより、圧縮強度、弾性係数の異なる4種類の岩盤材料(A~D)を作製した。各材料の配合および物性値を表-1に示す。

図-1に岩盤模型の概略形状を示す。岩盤模型は1種類の岩盤材料からなる均質岩盤と、2種類の岩盤材料より構成される硬軟複合岩盤の2タイプを作製した。硬軟複合岩盤は、外側に硬質岩盤、内側に軟質岩盤を配置し、

---

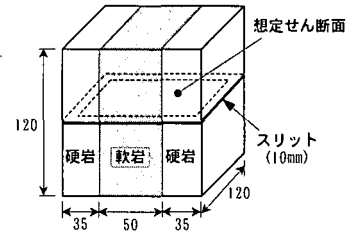
\* 正会員 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室室長

\*\* 正会員 水資源開発公団戸倉ダム建設所調査設計課長 ((前)建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室主任研究員)

\*\*\* 正会員 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室研究員

表一 岩盤材料の配合と物性値

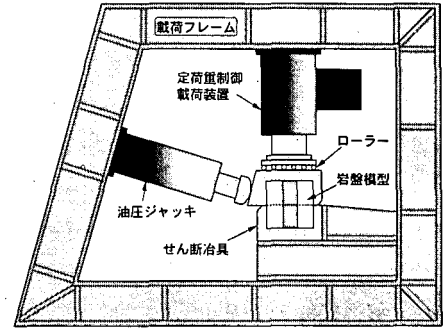
岩盤材料	配合比	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)
	石膏：珪藻土：水			
A	1.00：0.00：0.60	13.21	2.53	7,389
B	1.00：0.25：1.11	6.35	1.40	3,529
C	1.00：0.60：1.83	3.59	0.97	1,997
D	1.00：1.45：3.56	1.32	0.20	833



図一 岩盤模型 (単位 mm)

表二 実験ケース

ケース	岩盤材料	
	硬質 岩盤	軟質 岩盤
Case 1 均質岩盤	1-1	A
	1-2	B
	1-3	C
	1-4	D
Case 2 硬軟複合岩盤	2-1	A B
	2-2	A C
	2-3	A D
	2-4	B C
	2-5	B D
	2-6	C D



図二 載荷装置

想定せん断面における硬質岩盤と軟質岩盤の分布面積比が1：1になるように作製した。また、想定せん断面において破壊面が形成されやすくするため、想定せん断面の周囲に深さ10mmのスリットを設けた。石膏材料の強度は湿度の影響を大きく受けるため、温度、湿度が管理された恒温・恒湿実験室において岩盤模型の養生及び実験を行った。

## 2. 2 載荷装置

実験に用いた載荷装置の概略を図一2に示す。岩盤模型は載荷フレーム内のせん断治具に設置され、定荷重制御載荷装置により垂直荷重、油圧ジャッキによりせん断荷重を載荷した。荷重はすべて岩盤模型の想定せん断面中心を通るように設定し、せん断荷重の載荷角度は水平面より16.7度とした。

## 2. 3 実験ケースと実験方法

表一2に実験ケースを示す。Case 1は均質岩盤の実験ケースであり、これより岩盤材料A～Dのせん断破壊規準を求めた。Case 2は硬軟複合岩盤の実験ケースであり、A～Dの4種類の材料を組み合わせることにより6種類の硬軟複合岩盤を作製した。岩盤模型は、各ケースにつき6体ずつ作製した。

せん断実験では、はじめに定荷重載荷装置により初期垂直荷重を載荷した後、その値を一定に保持しながら、せん断荷重を油圧ジャッキにより一定速度で破壊に至るまで増加した。初期垂直荷重の値は、想定せん断面における平均垂直応力で0.50MPaと1.25MPaの2種類設定し、せん断荷重の載荷速度は、想定せん断面における平均せん断応力で0.0049 MPa/secで一定とした。

## 3. 実験結果

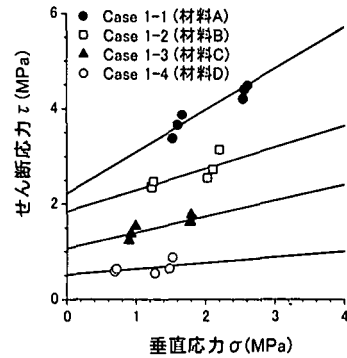
### 3. 1 実験結果の整理

岩盤模型に作用する載荷荷重は、次式を用いて想定せん断面における平均応力に換算した。

$$\sigma = \frac{V + P \cos \theta}{S}, \quad \tau = \frac{P \cos \theta}{S} \quad (1)$$

ここに、

- $\sigma$  : 想定せん断面における平均垂直応力
- $\tau$  : 想定せん断面における平均せん断応力
- V : 垂直荷重
- P : せん断荷重
- S : 想定せん断面面積
- $\theta$  : せん断荷重載荷角度 (16.7°)



図一三 実験結果 (Case1)

### 3. 2 均質岩盤の実験結果

各均質岩盤の Mohr-Coulomb の破壊規準は、(1)式より計算される破壊時の応力をもとに線形回帰により求めた。実験結果と得られた各岩盤材料の破壊規準線を図一三に示す。

### 3. 3 硬軟複合岩盤の実験結果

硬軟複合岩盤についても Mohr-Coulomb の破壊規準が適用できるものと仮定すると、せん断破壊時には(2)式が成り立つものと考えられる。ここで、(2)式中の硬軟複合岩盤の純せん断強度、内部摩擦係数が、(3)式のように硬軟複合岩盤を構成する硬質岩盤と軟質岩盤の純せん断強度、内部摩擦係数により表されるものと仮定し、重回帰分析を行ったところ(4)式が得られた。実験結果と得られた各ケースの破壊規準を図一四に示す。

$$\tau_f = \tau_0^* + f^* \sigma_f \quad (2)$$

ここに、

- $\tau_f, \sigma_f$  : 破壊時の想定せん断面における平均垂直応力、平均せん断応力
- $\tau_0^*, f^*$  : 硬軟複合岩盤の純せん断強度、内部摩擦係数 (実験値)

$$\begin{aligned} \tau_0^* &= C_0 + C_1 \tau_0^H + C_2 \tau_0^S \\ f^* &= C_3 + C_4 f^H + C_5 f^S \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、

- $\tau_0^H, f^H$  : 硬質岩盤の純せん断強度、内部摩擦係数
- $\tau_0^S, f^S$  : 軟質岩盤の純せん断強度、内部摩擦係数
- $C_0 \sim C_5$  : 回帰係数

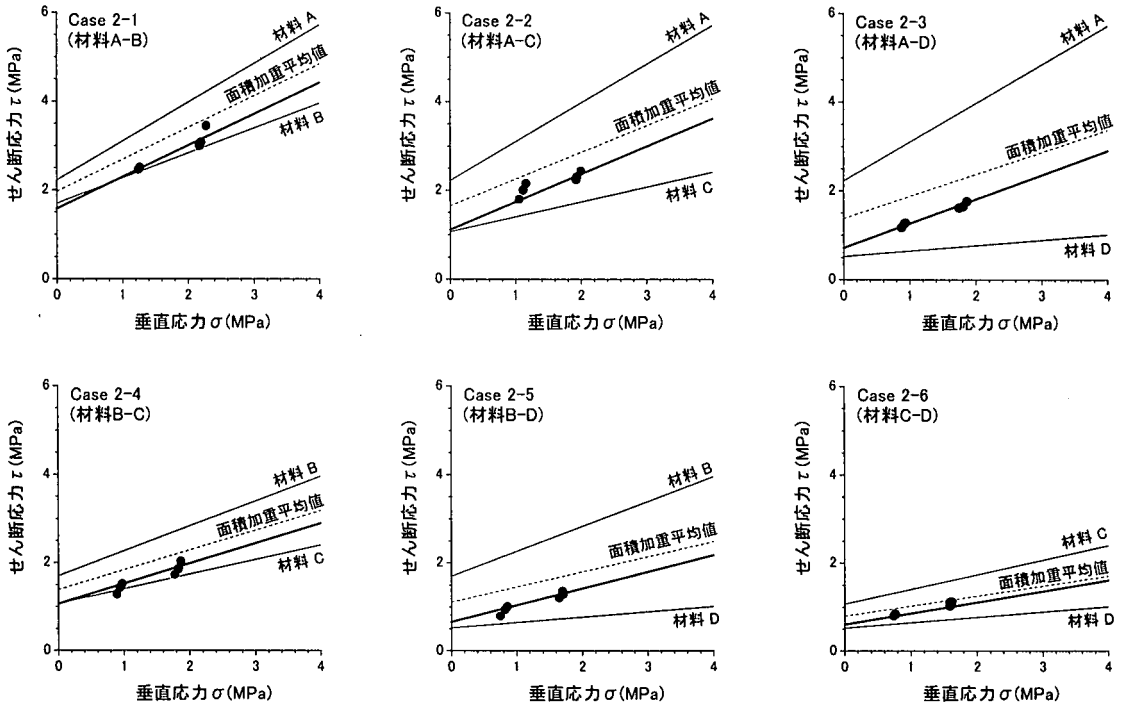
$$\begin{aligned} \tau_0^* &= 0.1151 + 0.0968 \tau_0^H + 0.7395 \tau_0^S \quad (\text{重相関係数 } r=0.9885) \\ f^* &= 0.0262 + 0.5436 f^H + 0.3716 f^S \end{aligned} \quad (4)$$

## 4. 考察

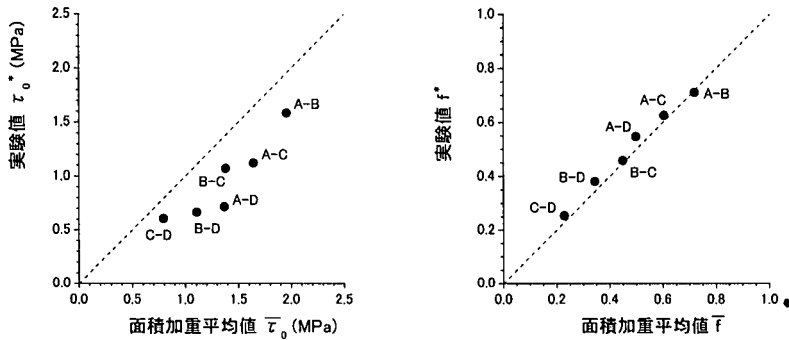
### 4.1 実験値と面積加重平均値の比較

一般に、複数の岩級から構成される複合岩盤の純せん断強度、内部摩擦係数は、面積加重平均により推定されることが多い。本実験の場合、硬岩と軟岩の分布面積割合が 1 : 1 であることから、純せん断強度、内部摩擦係数の面積加重平均値は次式により表される。

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_0 &= 0.5 \tau_0^H + 0.5 \tau_0^S \\ \bar{f} &= 0.5 f^H + 0.5 f^S \end{aligned} \quad (5)$$



図—4 実験結果 (Case 2)



図—5 面積加重平均値と実験値

ここに、

$\bar{\tau}_0$ ,  $\bar{f}$ : 面積加重平均により求めた純せん断強度、内部摩擦係数

図—5は、実験より求められた純せん断強度、内部摩擦係数と(5)式により計算した面積加重平均値の関係を示したものである。図中の破線は実験値と面積加重平均値が等しくなる関係を示している。純せん断強度は、いずれのケースも実験値が面積加重平均値よりも小さくなる傾向を示し、硬質岩盤と軟質岩盤の強度差が大きくなるケースほど面積加重平均値と実験値の差が大きくなっている。一方、内部摩擦係数は、実験値と面積加重平均値はほぼ等しい関係にあるが、実験値の方がわずかに大きくなる傾向がみられた。

#### 4.2 硬質岩盤と軟質岩盤の物性値の差とせん断強度

硬軟複合岩盤における硬質岩盤と軟質岩盤の物性値の差を、(6)式に示すように一軸圧縮強度の比として定義し

た。また、純せん断強度、内部摩擦係数について面積加重平均値に対する実験値の割合を推定割合として、(7)式のように定義した。これをもとに、硬質岩盤と軟質岩盤の一軸圧縮強度比と推定割合の関係を示したものが図-6である。

$$R_{\sigma} = \sigma_c^S / \sigma_c^H \quad (6)$$

ここに、

$R_{\sigma}$  : 硬質岩盤と軟質岩盤の一軸圧縮強度比

$\sigma_c^H$  : 硬質岩盤の圧縮強度、 $\sigma_c^S$  : 軟質岩盤の圧縮強度

$$R_{\tau_0} = \tau_0^* / \bar{\tau}_0, \quad R_f = f^* / \bar{f} \quad (7)$$

ここに、

$R_{\tau_0}$ ,  $R_f$  : 純せん断強度、内部摩擦係数の推定割合

図-6より、純せん断強度の推定割合は一軸圧縮強度比が小さくなるにつれて小さくなる傾向がある。線形回帰によれば一軸圧縮強度比が約0.8以上で推定割合が1.0となり、面積加重平均値と同等となる。また、一軸圧縮強度比が極端に小さい場合では推定割合が0.5程度となることから、面積加重平均値の約半分程度の強度しか得られないと考えられる。一方、内部摩擦係数の推定割合は、一軸圧縮強度比が小さくなるほど大きくなる傾向がある。線形回帰によれば一軸圧縮強度比が約0.7以上で面積加重平均値と同等となる。ただし、純せん断強度の場合と比較すると、一軸圧縮強度比が極端に小さい場合であっても実験値は面積加重平均値の約1割程度増加するだけであり、硬軟複合岩盤の内部摩擦係数を推定する場合には、面積加重平均値をそのまま用いても特に問題はないと考えられる。

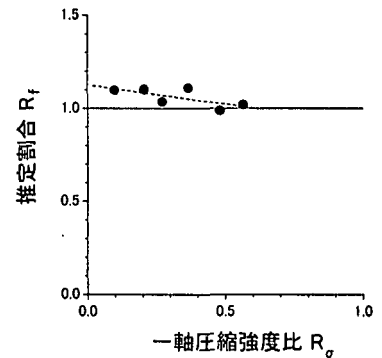
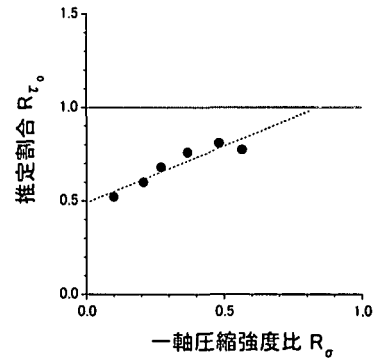


図-6 一軸圧縮強度比と推定割合

## 5. まとめ

本実験により明らかになったことをまとめると、以下のとおりである。

- ① 実験より得られた硬軟複合岩盤の純せん断強度、内部摩擦係数は、面積加重平均値と異なる値であった。
- ② 硬軟複合岩盤の純せん断強度は、面積加重平均値よりも小さくなる傾向がある。
- ③ 硬軟複合岩盤の内部摩擦係数は、面積加重平均値よりもわずかに大きくなる傾向がある。
- ④ ②,③の傾向は、硬質岩盤と軟質岩盤の一軸圧縮強度比が小さくなるほど顕著になる。
- ⑤ 硬質岩盤と軟質岩盤の一軸圧縮強度比が0.8以上であれば、硬軟複合岩盤の純せん断強度、内部摩擦係数は面積加重平均値とほぼ等しくなるものと考えられる。

ダム基礎岩盤においては、せん断面に作用する垂直応力が比較的小さいため、内部摩擦係数と比較して純せん断強度が基礎岩盤のせん断抵抗力に及ぼす影響が大きい。このため、面積加重平均値を用いると基礎岩盤のせん断抵抗力を過大に評価してしまう可能性がある。

今後、本実験結果について数値解析を行い硬軟複合岩盤内部の応力状態や破壊過程について検討を行うとともに、硬質岩盤と軟質岩盤の分布面積割合が異なる場合や、より複数の岩盤が分布する場合などについて検討を進めていく予定である。