

## II-4 岩盤の力学特性評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 12～平 14

担当チーム：ダム構造物チーム

研究担当者：山口嘉一、佐々木隆、市原裕之、金縄健一、中村洋佑

### 【要旨】

コンクリートダムの基礎岩盤は、均一ではなく変形および、強度特性が異なる複数の岩級の岩塊により構成されている。コンクリートダムの設計を合理化するために、このような岩盤の強度特性を正確に評価する方法の開発が求められている。そこで本研究は、硬軟複合岩盤模型を作製し、軟質岩部の出現面積や出現位置を変化させた室内せん断試験を行うとともに、非線形 FEM 解析により、岩盤模型がせん断破壊に至る過程を再現し、これらの結果を踏まえて、硬軟複合岩盤のせん断強度の特性を分析するものである。

キーワード：コンクリートダム、基礎岩盤、せん断強度、軟質岩、室内せん断試験、非線形解析

### 1. はじめに

コンクリートダムの設計では、その基礎岩盤が、硬質岩と軟質岩が混在した硬軟複合岩盤である場合、岩級毎に設定されたせん断強度を、出現面積で加重平均することで基礎岩盤のせん断強度を求めている。しかし、岩盤の変形および強度特性の異なる岩盤が混在する場合、それらの破壊ひずみが異なり、結果としてそれぞれの均一岩盤のせん断強度の面積加重平均により求まるせん断強度を発揮できないことが懸念される。

このため、本研究は、ダム基礎岩盤に硬軟複合岩盤が出現する場合にそれがせん断強度に及ぼす影響を検討したものである。

本研究においては、まず、硬軟複合岩盤模型を作製し、軟質岩の出現面積や出現位置を変化させた室内せん断試験を行って、硬軟複合岩盤のせん断強度特性を把握した。模型実験においては、せん断破壊強度やせん断ブロック変位の計測、ひずみゲージを用いた岩盤内部の応力状況計測を実施している。しかし、岩盤内部の応力状況計測は、計測数が限られることやひずみゲージの設置が確実でなかったなど問題のある計測値も存在し、せん断破壊に至る詳細な挙動を十分には把握することができないと判断した。

このため、模型実験における挙動との再現性を確認した上で、せん断破壊面にひずみ軟化する特性をもったジョイント要素を配置した非線形 FEM 解析によって、岩盤模型がせん断破壊に至る過程をシミュレーションし、硬軟複合岩盤のせん断強度の特性を分析した。

### 2. 研究方法

#### 2.1 岩盤模型を用いた室内せん断試験

##### 2.1.1 岩盤模型およびせん断ブロック規模

室内せん断試験に用いる供試体は、原位置ブロックせん断試験を模擬した形状とした。岩盤模型およびせん断ブロックの規模を示す例として図-1および図-2に軟質岩が中央に出現し、想定せん断面上の軟質岩の面積比率が 50%となる硬軟複合岩盤模型の平面図とせん断荷重載荷方向の断面図を示す。

##### 2.1.2 供試体の作製方法

人工岩盤は、硬質岩と軟質岩を作製し、それぞれ均一に分布する模型と、それらを組み合わせた複合岩盤（硬軟複合岩盤）模型を作製した。

人工岩盤となる硬質岩、軟質岩は、早強ポルトランドセメント、硅砂、水を混合した後、セメントが固化するまで排水状態、 $1.0\text{N/mm}^2$ の応力下で 20 時間圧密し、その後 28 日の水中養生の後、試験に供した。

また、せん断試験に用いる供試体は、硬軟複合岩盤模型、固定ブロック、せん断ブロックの順で打設して作製した。硬軟複合岩盤境界面は、連続性を確保するためセメントペーストで接着している。

それぞれの材料となる早強ポルトランドセメント、硅砂、水の配合を表-1に、および材料試験により得られた材料物性値を表-2に示す。

表-1 配合表

配合	水:セメント:砂 (質量比)
硬質岩	1.0:1.0:4.7
軟質岩	2.6:1.0:8.4
固定ブロック せん断ブロック	1.0:2.0:3.2

表-2 材料試験結果

試験方法	一軸圧縮試験			三軸圧縮試験		割裂引張試験 (N/mm <sup>2</sup> )
	一軸圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	内部摩擦角 (°)	
硬質岩	9.34	13,364	0.2	2.57	30	0.92
軟質岩	3.12	5,439	0.2	0.84	30	0.37
固定ブロック せん断ブロック	38.38	23,981	0.2	12.11	29	3.01

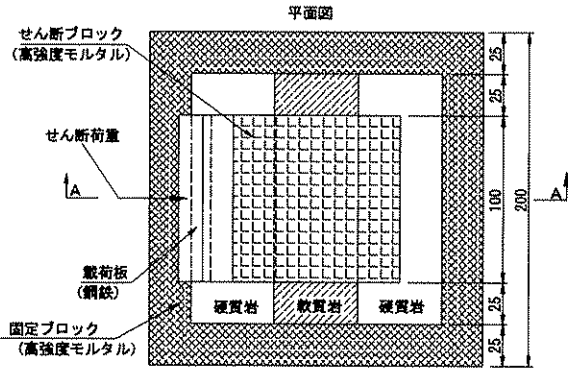


図-1 試験供試体例の平面図 (単位: mm)

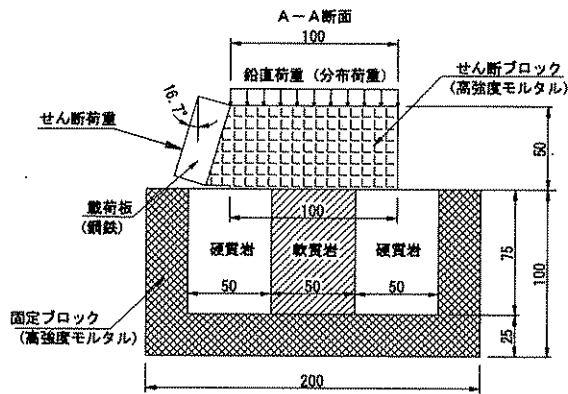


図-2 試験供試体例のA-A断面図 (単位: mm)

### 2.1.3 試験方法

せん断試験は通常の原因位置せん断試験と同様に、まず、定荷重載荷装置により一定の初期鉛直荷重を与えた後、油圧ジャッキによりせん断荷重を与えるものとした(図-3参照)。また、せん断荷重は毎秒98N程度の割合で増加させた。

試験は、初期鉛直荷重を、4,903N(応力で0.49N/mm<sup>2</sup>以下同様)、9,807N(0.98N/mm<sup>2</sup>)、14,710N(1.47N/mm<sup>2</sup>)の3ケースを設定し、それぞれ2供試体を油圧ジャッキにてせん断荷重を与え破壊した。試験時は、せん断ブロックの垂直変位および水平変位の測定、また、写真-1に示すように、人工岩盤の奥行方向の中央を切断し、せん断荷重載荷方向に三軸ひずみゲージを載荷側からNo.1~No.6の順に並べて設置し、内部応力分布

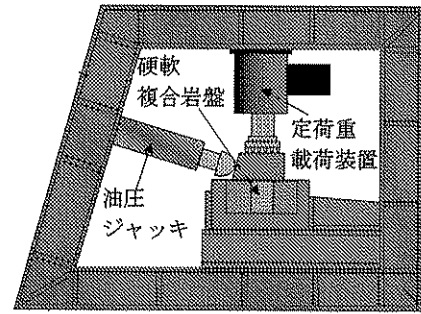


図-3 室内せん断試験の概要

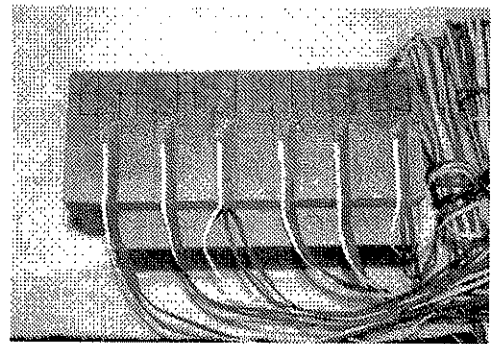


写真-1 三軸ひずみゲージ設置状況

の測定を行った。三軸ひずみゲージは、設置面を防水用ゴムテープで保護した後、人工岩盤の接着を行うことにより人工岩盤内に埋設した。

### 2.1.4 試験ケース

硬軟複合岩盤において面積比率と、軟質岩の出現位置の変化によるせん断強度の変化を検討するため、以下のような条件設定のもと供試体を作製し、せん断試験を実施した。

#### 1) 均一岩盤 (CASE-1)

硬軟複合岩盤を構成する硬質岩および軟質岩のせん断強度を把握するため、硬質岩および軟質岩の均一岩盤のせん断試験を行った (CASE1-1、CASE1-2)。

なお、供試体は、人工岩盤切断時の影響を踏まえ、図-4に示す複合岩盤 CASE2-2と同様の形状に切断・接着し、作製した。

#### 2) 軟質岩の面積比率変化 (CASE-2)

軟質岩が中央部に出現した場合、軟質岩の面積比率

がせん断強度に与える影響について検討した。想定せん断面における軟質岩の面積比率が 30%、50%、70%のパターン (CASE2-1、CASE2-2、CASE2-3) について、図-4に示すように供試体を作製した。

### 3) 軟質岩の出現位置変化 (CASE-3)

軟質岩の出現位置がせん断強度に与える影響について検討した。軟質岩が 50%で載荷側に出現するものと後側に出現する場合 (CASE3-1、CASE3-2) について、図-5に示すように供試体を作製した。

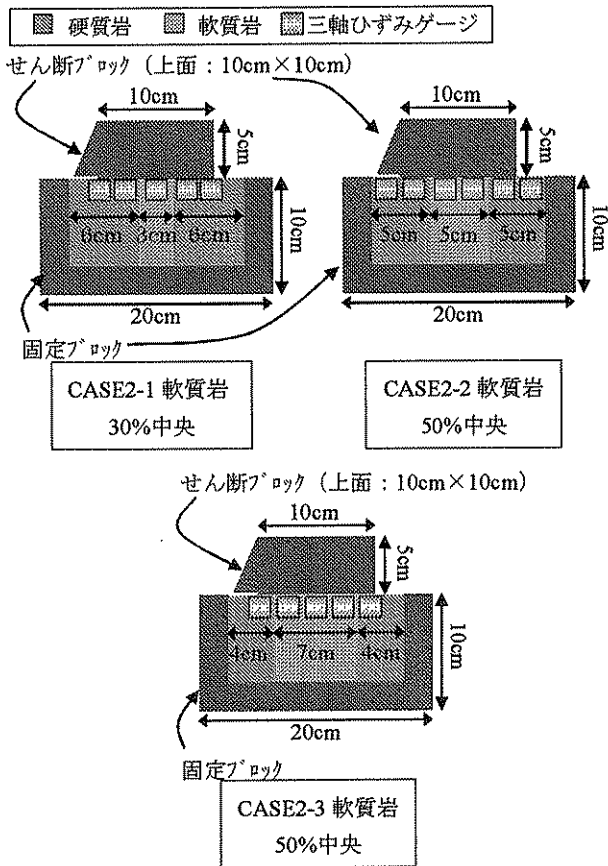


図-4 CASE-2 供試体形状

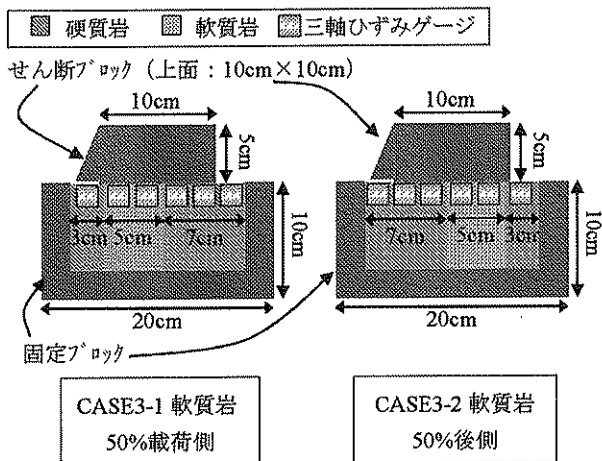


図-5 CASE-3 供試体形状

## 2.2 非線形FEM解析

### 2.2.1 解析モデル

解析モデルは、人工岩盤を用いたせん断試験の載荷方向の二次元断面を対象とした。また、解析は供試体を線形弾性体としたFEMとしたが、せん断ブロックと岩盤部の境界に、せん断破壊後、ひずみ軟化する特性を持ったジョイント要素を配置した。解析モデルを図-6、ジョイント要素の強度・ひずみ特性の概念を図-7に示す。なお、せん断試験後のせん断面の観察結果によると、せん断ブロックと岩盤部の接着は確実になされていたが、せん断面がせん断ブロックと岩盤部の境界直近に形成されていたため、便宜上境界部にジョイント要素を配置した。

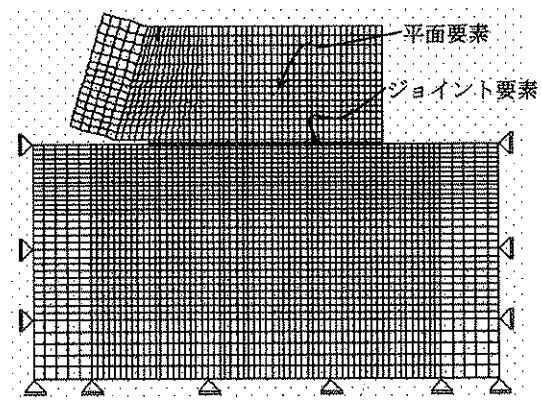
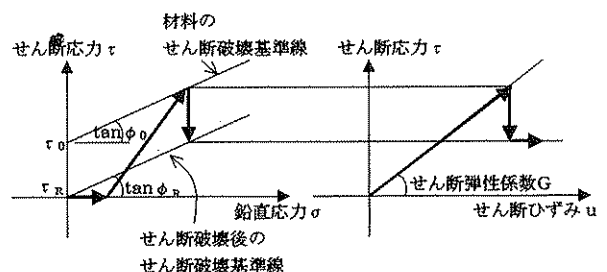


図-6 解析モデルの要素分割



ここに、 $\tau_0$ : せん断破壊前のせん断強度  
 $\phi_0$ : せん断破壊前の内部摩擦角  
 $\tau_R$ : せん断破壊後の残留せん断強度  
 $\phi_R$ : せん断破壊後の残留内部摩擦角

図-7 ジョイント要素の強度・ひずみ特性の概念

### 2.2.2 解析条件

解析ケースは、室内せん断試験で実施したケースと同一のケースを設定した。すなわち、硬質岩および軟質岩の均一岩盤のケース (CASE1-1、1-2)、軟質岩の面積比率を変化させたケース (CASE2-1~2-3)、軟質岩の出現位置を変化させたケース (CASE3-1、3-2 および CASE2-2) とした。

解析モデルでのせん断破壊の定義は、ジョイント要素が全てせん断破壊するまでとし、初期鉛直荷重を

4,903N (0.49N/mm<sup>2</sup>) と 14,709N (1.47N/mm<sup>2</sup>) の 2 ケースとして、せん断荷重 (集中荷重) を 1,024N (せん断応力で、0.098N/mm<sup>2</sup>) 毎に増加させた解析を行い、せん断破壊荷重を算定した。

解析に使用した平面要素の物性値は、岩盤模型の材料試験結果より表-3の通り設定した。

また、ジョイント要素の特性は、せん断破壊後、残留せん断強度  $\tau_R$  を 0、残留内部摩擦角  $\phi_R$  はせん断破壊前の内部摩擦角  $\phi_0$  と同一であると仮定した。そのうえで、せん断強度  $\tau_0$  の初期設定値 (せん断破壊前) を種々に変化させ、硬質岩および軟質岩の均一岩盤の 2 ケース (CASE1-1、CASE1-2) にて、室内せん断試験結果から求めたせん断破壊基準線と解析におけるせん断破壊荷重、つまり最大せん断荷重が等しくなるよう、ジョイント要素のせん断強度  $\tau_0$  を設定した。

表-3 数値解析に用いた平面要素の物性値

要素種類	物性値	記号	設定値
硬質岩	弾性係数	E	13,364N/mm <sup>2</sup>
	ポアソン比	$\nu$	0.2
軟質岩	弾性係数	E	5,439N/mm <sup>2</sup>
	ポアソン比	$\nu$	0.2
せん断および固定ブロック	弾性係数	E	23,981N/mm <sup>2</sup>
	ポアソン比	$\nu$	0.2

### 2.2.3 検討内容

硬質岩の均一岩盤のケース (CASE1-1) と軟質岩がせん断面中央部に 50%出現するケース (CASE2-2) に、同一の鉛直荷重、せん断荷重を載荷した場合の、せん断ブロック直下の鉛直応力  $\sigma_y$  の分布図、およびせん断応力  $\tau_{xy}$  の分布図を作成し、硬質岩と軟質岩の応力分担比について考察した。また、点安全率分布図を作成し、せん断破壊が生じる過程について考察するとともに、せん断破壊荷重を算定し、面積加重平均により求まるせん断強度と比較を行った。

加えて、軟質岩の面積比率を変化させたケース (CASE2-1~2-3)、軟質岩の出現位置を変化させたケース (CASE3-1、3-2 および CASE2-2) の解析結果をもとに、軟質岩の面積比率および出現位置が及ぼすせん断破壊荷重への影響についても考察した。

## 3. 研究結果

### 3.1 人工岩盤を用いた室内せん断試験

CASE1~3 までの室内せん断試験結果は、

Mohr-Coulomb の破壊基準に従って整理するものとし、各岩盤のせん断強度は、室内せん断試験の最大せん断荷重によって評価した。

また、硬質岩および軟質岩に対する三軸圧縮試験結果より硬質岩および軟質岩の内部摩擦角  $\phi$  を 30° とした。それぞれの試験結果から最小二乗法によって求めた各ケースのせん断強度  $\tau_0$  の値を表-4に示す。なお、表中には均一岩盤のせん断強度から面積加重平均にて求めた硬軟複合岩盤のせん断強度との比率も合わせて表示している。

表-4 せん断強度一覧

試験ケース		$\tau_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	試験値/面積 加重平均(%)
CASE1-1	硬質岩	3.72	-
CASE1-2	軟質岩	1.14	-
-	面積加重平均30%	2.95	-
-	面積加重平均50%	2.43	-
-	面積加重平均70%	1.92	-
CASE2-1	軟質岩中央30%	3.12	106
CASE2-2	軟質岩中央50%	2.54	104
CASE2-3	軟質岩中央70%	2.16	113
CASE3-1	軟質岩載荷側50%	2.61	107
CASE3-2	軟質岩後側50%	2.19	90

#### 3.1.1 均一岩盤 (CASE-1)

図-8に均一岩盤に対するせん断試験 (CASE1-1、1-2) の結果を示す。図中には硬質岩と軟質岩の破壊基準により求められる面積加重平均強度 (軟質岩 30%、50%、70% : 中央に出現) を示した。

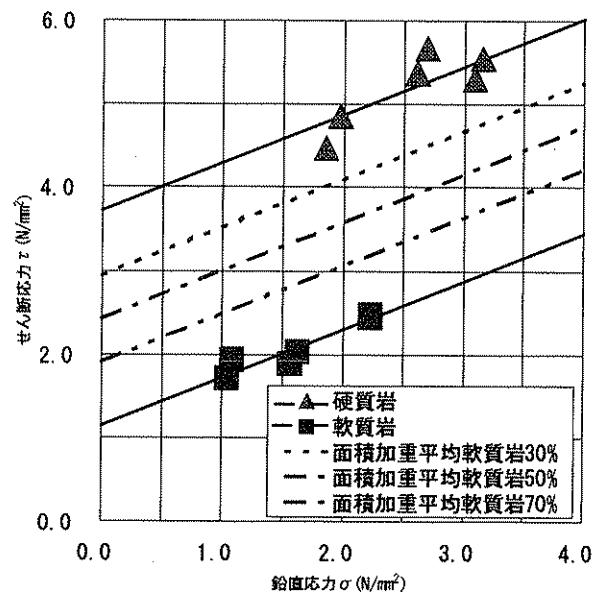


図-8 CASE-1 試験結果

### 3.1.2 軟質岩の面積比を変化させた硬軟複合岩盤 (CASE-2)

図-9に軟質岩の出現位置をせん断面中央としたうえで、軟質岩の面積比率を変化させた硬軟複合岩盤に対するせん断試験 (CASE-2) の結果を示す。試験結果に供試体毎のバラツキはあるものの、せん断試験によるせん断強度 $\tau_0$ は、面積加重平均せん断強度 $\tau_0$ より若干大きいとその差は、表-4に示すとおり10%程度以下と比較的小さい。

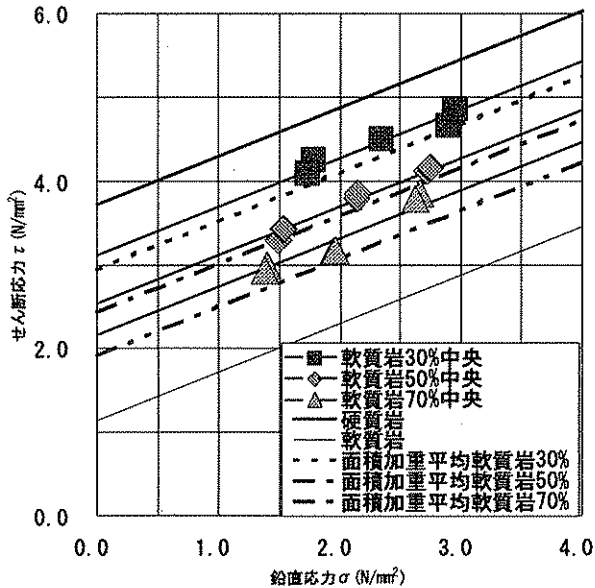


図-9 CASE-2 試験結果

### 3.1.3 軟質岩の出現位置とせん断強度 (CASE-3)

図-10に軟質岩の出現位置を変化させた硬軟複合岩盤に対するせん断試験 (CASE-3-1, 3-2およびCASE2-2) の結果を示す。せん断強度は、軟質岩が後側に出現するケースの鉛直荷重が相対的に大きい場合においてせん断強度があまり伸びないことが影響して、3つの軟質岩の出現位置変化パターンのうち最も低くなった。その場合 $\tau_0$ は表-4に示すとおり面積加重平均強度に対して10%程度低い値となっている。

一方、軟質岩が中央および載荷側に出現する場合には、そのせん断強度 $\tau_0$ は、表-4に示すとおり面積加重平均強度より4~7%大きくなっており、CASE-2シリーズと同様の結果が得られている。

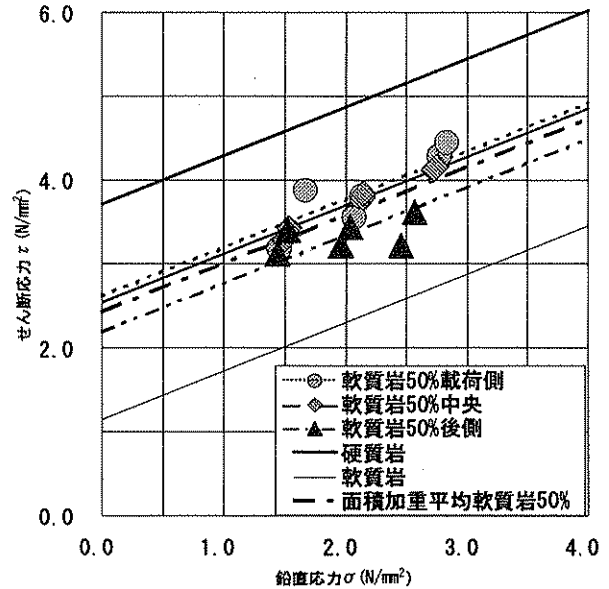


図-10 CASE-3 試験結果

### 3.1.4 試験結果の考察

せん断試験の結果を総括すると、硬軟複合岩盤において軟質岩が中央や載荷側に出現した場合は、そのせん断強度は面積加重平均強度と同等か若干大きい(10%程度以下)程度であるが、軟質岩が後側に出現した場合は面積加重平均強度に対して逆に10%程度低い値となるため設計上の留意が必要である。

### 3.2 解析モデルによる岩盤模型試験結果の再現性

硬質岩および軟質岩の均一岩盤のケース (CASE1-1, 1-2) にて、室内せん断試験結果から求めたせん断破壊基準線と解析におけるせん断破壊荷重が等しくなるよう設定した、ジョイント要素の特性を表-5に示す。

また、設定したジョイント要素特性により求まるせん断破壊荷重の解析結果と、室内せん断試験から得られたせん断破壊基準線を、図-11に示す。この図に示すように、解析モデルによるせん断破壊荷重は、室内せん断試験により得られたせん断破壊基準線と極めてよく一致している。

表-5 ジョイント要素の特性

岩盤種類	強度特性	記号	初期設定値→
			せん断破壊後の設定値
硬質岩	せん断強度	$\tau$	7.246N/mm <sup>2</sup> →0.000N/mm <sup>2</sup>
	内部摩擦角	$\phi$	30° →30°
軟質岩	せん断強度	$\tau$	1.651N/mm <sup>2</sup> →0.000N/mm <sup>2</sup>
	内部摩擦角	$\phi$	30° →30°

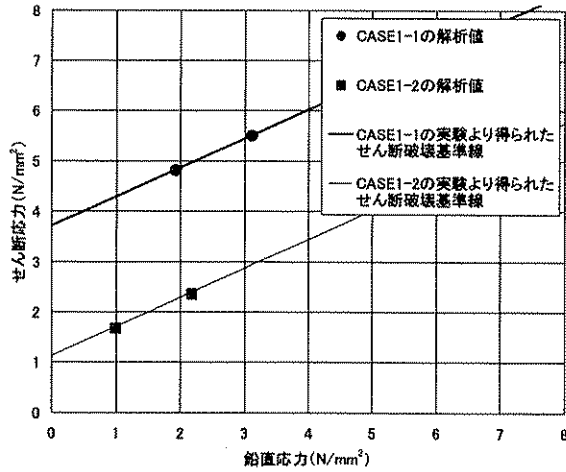


図-11 解析モデルによるせん断破壊荷重と実験によるせん断破壊基準線との比較

また、岩盤模型試験で計測された応力値の中から、弾性的な挙動を示す応力状態の範囲において、岩盤模型実験で計測された鉛直応力 $\sigma_y$ 、せん断応力 $\tau_{xy}$ と解析モデルにより算定される鉛直応力 $\sigma_y$ 、せん断応力 $\tau_{xy}$ を比較した。なお、鉛直応力 $\sigma_y$ は、引張が正值である。

軟質岩の均一岩盤のケース (CASE1-2) と軟質岩がせん断面中央部に50%出現するケース (CASE2-2) における比較結果を図-12~15に示す。なお、図-12~15は、初期鉛直荷重が9,807N (0.98N/mm<sup>2</sup>)、縦軸は初期鉛直荷重載荷後の応力増分、せん断荷重は岩盤模型実験におけるせん断破壊荷重の約1/3の荷重状態における応力値を比較したものである。

これより、両者は応力値および分布形状とも相似しており、解析モデルにて、模型実験での岩盤内応力状況を概ね再現できているものと判断した。

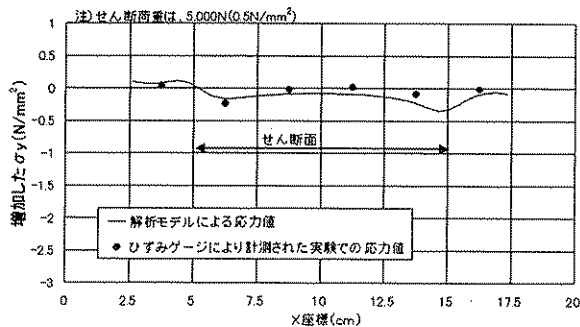


図-12 CASE1-2 における解析モデルと岩盤模型実験による鉛直応力 $\sigma_y$ の比較

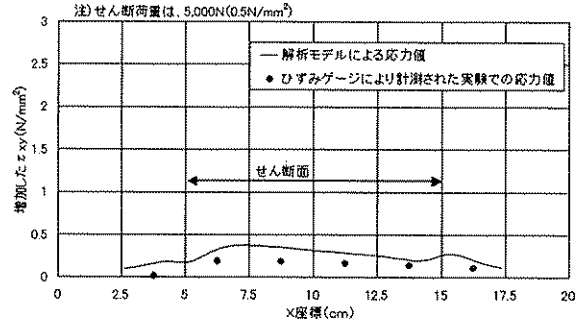


図-13 CASE1-2 における解析モデルと岩盤模型実験によるせん断応力 $\tau_{xy}$ の比較

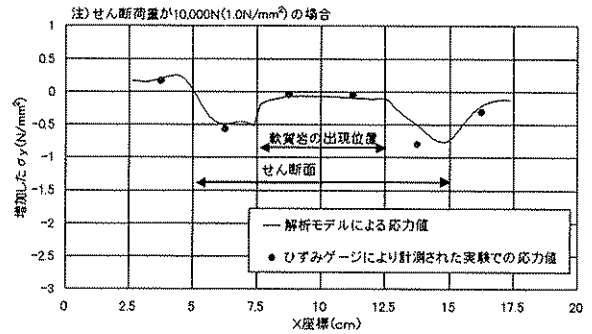


図-14 CASE2-2 における解析モデルと岩盤模型実験による鉛直応力 $\sigma_y$ の比較

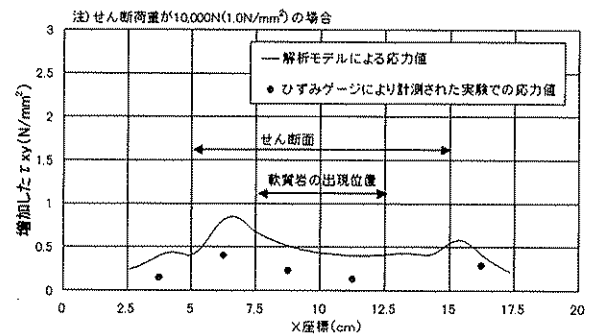


図-15 CASE2-2 における解析モデルと岩盤模型実験によるせん断応力 $\tau_{xy}$ の比較

### 3. 3 非線形 FEM 解析

#### 3.3.1 軟質岩が出現する場合の応力分布

硬質岩の均一岩盤のケース (CASE1-1) と軟質岩がせん断面中央部に50%出現するケース (CASE2-2) に、同一の初期鉛直荷重 4,903N (0.49N/mm<sup>2</sup>)、せん断荷重 15,358N (せん断応力で、1.47N/mm<sup>2</sup>) を載荷した場合の、せん断ブロック直下の鉛直応力 $\sigma_y$ の分布、およびせん断応力 $\tau_{xy}$ の分布を、それぞれ図-16および図-17に示す。なお、このせん断荷重における応力状態では、ジョイント要素は全て弾性領域内である。これより、軟質岩がせん断面中央部に50%出現するケース

(CASE2-2) では、軟質岩に作用する応力が低減し、硬質岩に応力が集中する傾向が見られる。

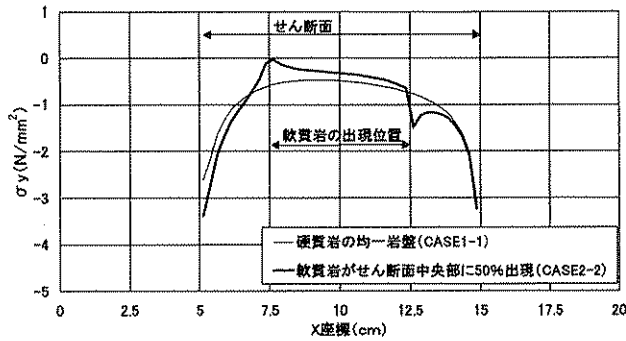


図-16 せん断ブロック直下の鉛直応力分布

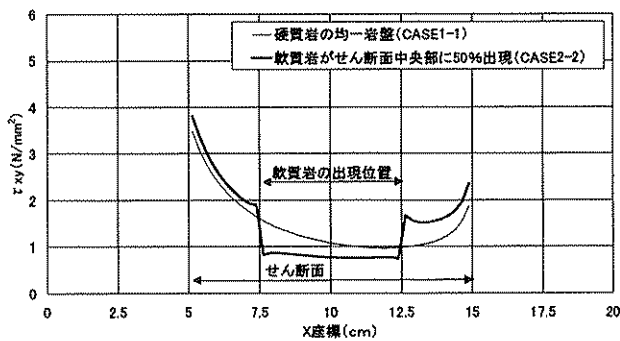


図-17 せん断ブロック直下のせん断応力分布

### 3.3.2 せん断破壊の進行状況

硬質岩の均一岩盤のケース (CASE1-1) で初期鉛直荷重 4,903N (0.49N/mm<sup>2</sup>) の場合について、せん断荷重の増加に伴うせん断ブロック直下の点安全率分布を図-18 に示す。この図より、せん断荷重載荷側の点安全率が小さいことがわかる。このため、せん断破壊は、せん断荷重載荷側から発生し、その後の応力再配分により瞬時に全体破壊へ進んだ。すなわち、ブロック最後方部の点安全率は2.2程度と大きいものの、一部にせん断破壊が発生するとその影響が一挙にせん断面全体に及ぶことになる。

一方、軟質岩がせん断面中央部に50%出現するケース (CASE2-2) におけるせん断ブロック直下の点安全率分布を図-19 に示す。この図によれば、軟質岩の点安全率が小さく、軟質岩において先にせん断破壊が生じることになる。しかし、全体のせん断破壊は瞬時には発生せず、軟質岩が受け持っていたせん断応力が硬質岩へ再配分され、その後せん断荷重の増加によって、硬質岩の載荷側から全体破壊へ進行する結果となった。

また、硬質岩のみの点安全率分布を見ると、軟質岩せん断破壊前には、せん断荷重載荷側端部の点安全率は約1.5、ブロック最後方部での点安全率は約2.6であった。

しかし、軟質岩がせん断破壊した後は、軟質岩が受け持っていたせん断応力が、ブロック後方の硬質岩へより多く再配分された結果、せん断荷重載荷側端部の点安全率は約1.2、ブロック最後方部での点安全率は約2.0とブロック載荷側の硬質岩の点安全率の低下が後方に比べて小さい。この結果、全体破壊時までの強度が増加したものと考えられる。

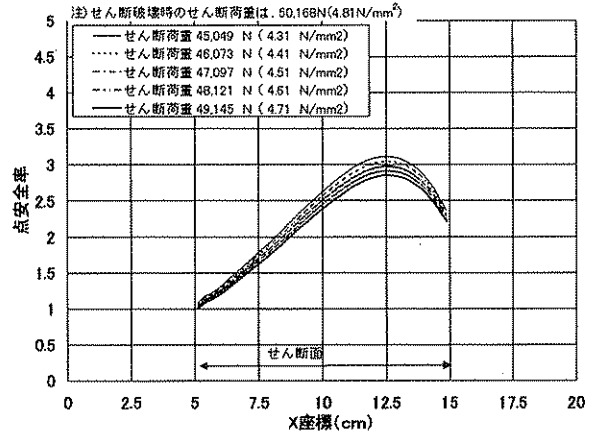


図-18 せん断荷重の増加に伴う点安全率の変化 (硬質岩の均一岩盤 (CASE1-1) の場合)

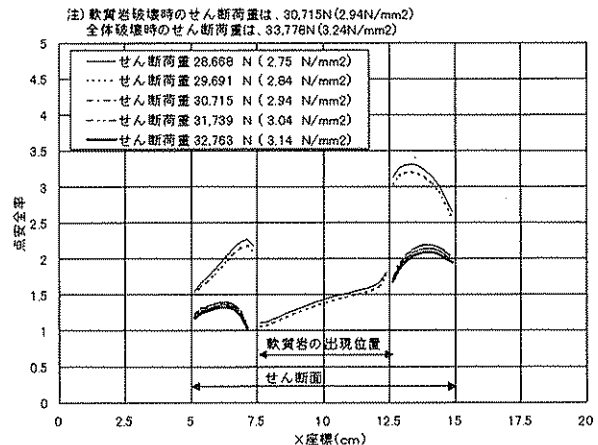


図-19 せん断荷重の増加に伴う点安全率の変化 (軟質岩が中央部に50%出現 (CASE2-2) の場合)

### 3.3.3 せん断破壊基準

軟質岩がせん断面中央部に50%出現するケース (CASE2-2) の解析から求まるせん断破壊荷重と、硬質岩・軟質岩の均一岩盤の試験結果 (CASE1-1, 1-2) の面積加重平均から求まるせん断破壊基準線の比較結果を図-20 に示す。この図より、両者はほぼ一致する結果となった。

また、図中には、軟質岩がせん断面中央部に50%出現するケース (CASE2-2) における軟質岩のせん断破壊点も併せて記している。これによると、軟質岩のせん断

破壊は、面積加重平均によるせん断強度の約 88%のせん断荷重で発生している。

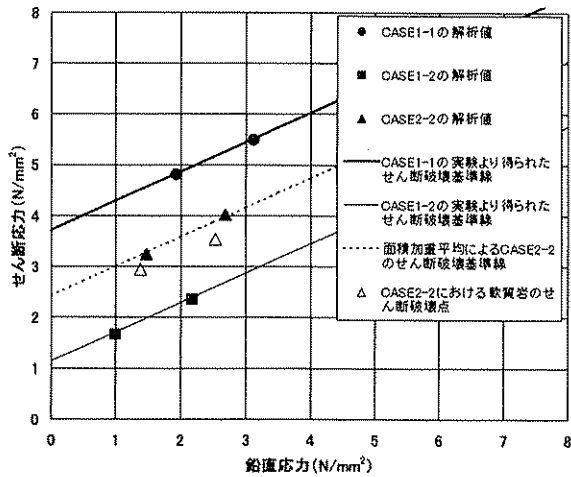


図-20 CASE2-2 の解析結果と面積加重平均によるせん断破壊基準線との比較

### 3.3.4 軟質岩の面積比率による影響

軟質岩の面積比率を変化させたケース (CASE2-1~2-3) のせん断破壊荷重の算定結果を図-21 に示す。この図より、軟質岩の面積比率が 30% の場合 (CASE2-1) には、面積加重平均より算定したせん断破壊荷重よりも、解析より求まるせん断破壊荷重は約 17% 大きくなる結果となる。一方、軟質岩の面積比率が 70% の場合 (CASE2-3) には、面積加重平均より算定したせん断破壊荷重よりも、解析より求まるせん断破壊荷重は約 10% 小さくなる結果となった。

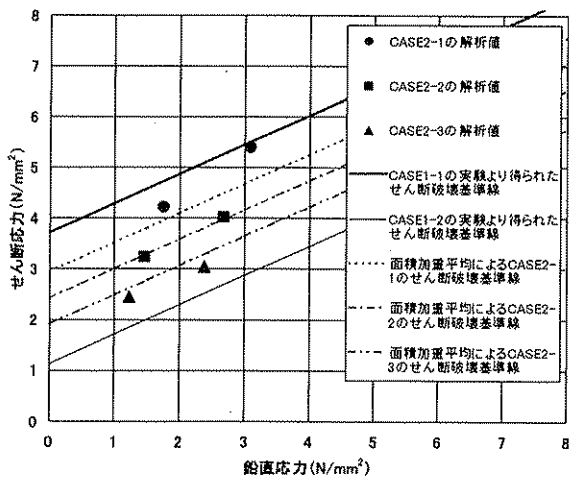


図-21 軟質岩の面積比率の変化によるせん断破壊強度の変化

次いで、解析より求まるせん断破壊荷重を用いて、ブロック全体としてのせん断破壊基準線を推定した。推定は、せん断破壊基準線の内部摩擦角  $\phi$  は  $30^\circ$  で一定と

し、初期鉛直荷重の異なる 2 つの解析値を用いてせん断強度  $\tau_0$  を評価した。同様に、解析において軟質岩のみがせん断破壊した時点のせん断荷重を用いて、軟質岩のみがせん断破壊するせん断破壊基準線を想定し、せん断強度  $\tau_0$  を評価した。そして、これらのせん断強度  $\tau_0$  を用いて、面積加重平均より求まるせん断強度との比を算定した。算定した結果を、図-22 に示す。

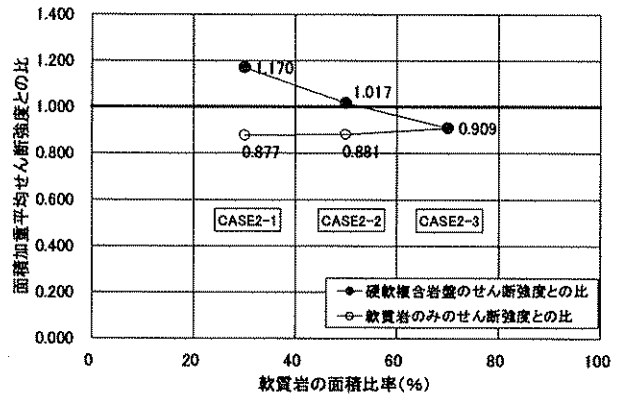


図-22 軟質岩の面積比率と面積加重平均せん断強度との比

この図より、軟質岩の面積比率が 70% の場合 (CASE2-3) に、面積加重平均によるせん断強度より解析によるせん断強度が低下するのは、軟質岩のせん断破壊と同時に硬質岩まで一挙に破壊が進行したため、硬質岩の本来もつ強度が充分発揮されなかったことも 1 つの原因ではないかと推測される。

また、硬軟複合岩盤における軟質岩のせん断破壊はその面積比率によらず、面積加重平均により求まるせん断破壊荷重の 90% 程度せん断荷重で生じるが、軟質岩の面積比率が 50% 以下の場合には、軟質岩のせん断破壊後、硬質岩へ応力が再配分され、その後のせん断荷重の増加に対してある程度抵抗した後、全体破壊に至る。

しかし、軟質岩のせん断破壊後、全体破壊に至るまでのせん断荷重の増分は、軟質岩の面積比率が 50% の場合 (CASE2-2) には面積加重平均により求まるせん断破壊荷重の 12% 程度であるが、軟質岩の面積比率が 30% の場合 (CASE2-1) には面積加重平均により求まるせん断破壊荷重の 30% 程度となる。つまり、軟質岩のせん断破壊後、全体破壊に至るまでのせん断荷重の増分は、軟質岩の面積比率が小さくなるに従い大きくなる。

この原因は、軟質岩せん断破壊後も硬質岩への応力再配分によって強度ののびが見られること、加えて、軟質岩の面積比率が小さいほど、再配分される応力が小さく、全体破壊に至るまでの強度ののびが増加していると考えられる。



### 3.3.5 軟質岩の出現位置による影響

軟質岩の出現位置を変化させたケース (CASE3-1、3-2 および CASE2-2) のせん断破壊荷重の算定結果を図-23 に示す。この図より、軟質岩の出現位置が中央の場合 (CASE2-2) には、面積加重平均より算定したせん断破壊荷重と解析より求まるせん断破壊荷重とはほぼ一致するが、軟質部の出現位置が載荷側および後方の場合 (CASE3-1、3-2) には、解析より求まるせん断破壊荷重は面積加重平均より算定したせん断破壊荷重よりもそれぞれ約 17%、約 27%大きくなる結果となった。

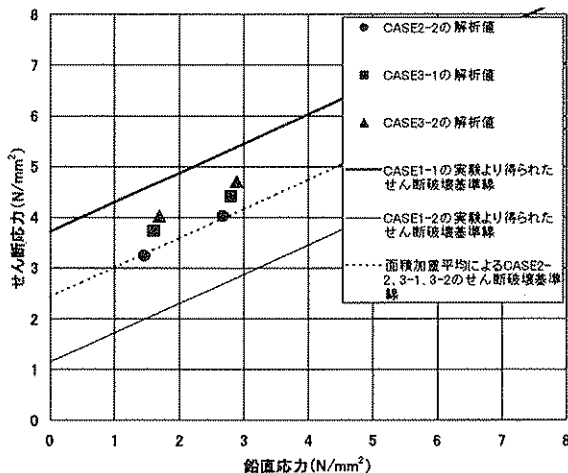


図-23 軟質岩の出現位置の変化によるせん断破壊強度の変化

次いで、前項と同様、解析より求まるせん断破壊荷重を用いて、面積加重平均のせん断強度との比を算定した。算定結果を、図-24 に示す。

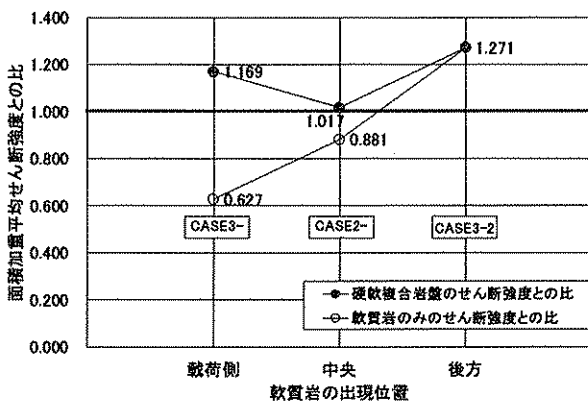


図-24 軟岩部の出現位置と面積加重平均せん断強度との比

この図より、軟質岩がブロック後方で出現する (CASE3-2) 場合、軟質岩のみのせん断破壊時点でのせん断強度は面積加重平均のせん断強度よりも大きくなった。

そこで、軟質岩が後方で出現するケース (CASE3-2) に、初期鉛直荷重を 4,903N (0.49N/mm<sup>2</sup>)、せん断荷重を 33,787N (3.24N/mm<sup>2</sup>) (軟質岩がせん断面中央部に 50%出現するケース (CASE2-2) で全体破壊に至ったときの値) で載荷した場合の点安全率分布を図-25 に示す。

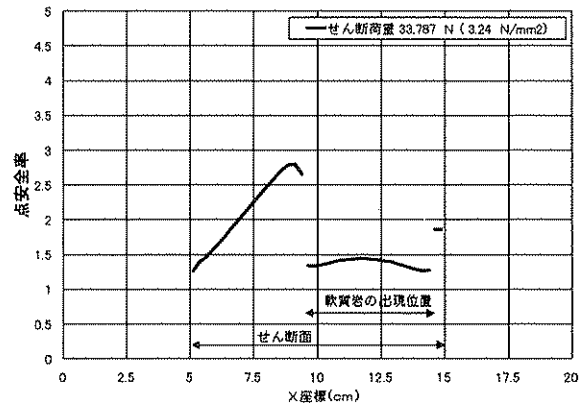


図-25 CASE3-2 の場合の点安全率

この図より、軟質岩がブロック後方に出現する場合には、軟質岩部での点安全率分布は一樣に近づき、その値は平均で約 1.3 程度とせん断破壊は発生していない。また、軟質岩と硬質岩の最小点安全率を比較した場合、軟質岩内の最小点安全率とせん断荷重載荷側の硬質岩の最小点安全率の値は近い値を示している。このため、ブロック全体として見た場合、硬質岩と軟質岩の最小点安全率が近く、他のケースに比べて軟質岩への荷重負担が相対的に小さくなり、結果的に硬軟複合岩盤全体としてのせん断破壊荷重が増加しているものと考えられる。

一方、軟質岩がせん断荷重載荷側で出現する (CASE3-1) 場合、軟質岩のみのせん断破壊時点でのせん断強度は小さくなるが、全体破壊のせん断強度は面積加重平均によるせん断強度よりも大きくなった。

そこで、初期鉛直荷重を 4,903N (0.49N/mm<sup>2</sup>) とし、せん断荷重を軟質岩がせん断破壊する直前のせん断荷重 21,501N (2.06N/mm<sup>2</sup>) とせん断破壊直後のせん断荷重 22,525N (2.16N/mm<sup>2</sup>) とした場合の点安全率分布を図-26 に示す。

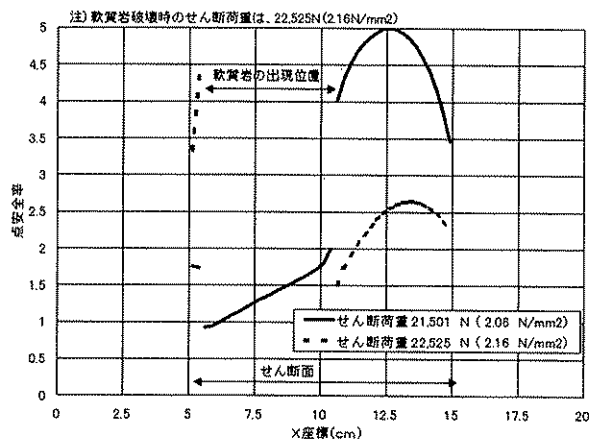


図-26 CASE3-1 の場合の点安全率

この図より、軟質岩がせん断荷重載荷側にある場合、軟質岩せん断破壊後の応力再配分によって、ブロック後方の硬質岩の点安全率は低下しているが、硬質岩載荷側の点安全率は逆に上昇している。このため、軟質岩せん断破壊後のせん断荷重の増加によって、全体破壊へと進行するが、この際、硬質岩の破壊は、載荷側から発生せず、軟質岩の後方より進行する結果となっている。このように、他の硬軟複合岩盤のケースでは、硬質岩のせん断破壊発生箇所であるせん断荷重載荷側の点安全率が上昇し、この位置からの硬質岩の局所的なせん断破壊の発生が抑えられたため、硬軟複合岩盤全体としてのせん断強度は増加していると推測する。

また、岩盤模型を用いたせん断試験では、軟質岩がブロック後方に出現する場合 (CASE3-2) に、せん断強度が低下する傾向が見られたが、解析においては、せん断強度が低下する要因を見出せなかった。いま、軟質岩がブロック後方に出現する場合 (CASE3-2)、全体破壊に至る直前の解析結果では、軟質岩部において  $7\text{N/mm}^2$  以上の圧縮側の主応力が作用していた。これは、軟質岩の一軸圧縮強度  $3.1\text{N/mm}^2$  よりも充分大きいことから、岩盤模型を用いたせん断試験では、軟質岩部において、局所的な圧壊による破壊が生じていた可能性がある。この結果、軟質岩部のせん断強度が低下したため、硬軟複合岩盤全体としてのせん断強度が低下したのではないかと考えられる。

### 3.3.6 解析結果の考察

解析結果を総括すると、まず、硬軟複合岩盤がせん断荷重を受けると、変形性の違いに起因し、硬質岩部に応力集中が生じるものの、強度の違いから局所的なせん断破壊は、軟質岩から発生することが明らかになった。また、軟質岩の面積比率が 50%以下であり、軟質岩が中央あるいは載荷側に出現する場合には、軟質岩せん断破壊後、

せん断応力が硬質岩へ再配分され、その後のせん断荷重の増加によって、全体破壊へ進行することがわかった。

一方、軟質岩の面積比率が 50%以上の場合や軟質岩がブロック後方に出現する場合には、軟質岩のせん断破壊と同時に全体破壊が発生することがわかった。

次いで、軟質岩の面積比率が 50%以下の場合には、硬軟複合岩盤のせん断強度は、硬質岩および軟質岩の均一岩盤より得られるせん断強度の面積加重平均せん断強度と同等か若干 (約 15%) 大きくなる。一方、軟質部の面積比率が 50%以上の場合には、面積加重平均せん断強度を下回る結果となることがわかった。

## 4. まとめ

本研究は、ダム基礎岩盤内に硬軟複合岩盤が出現する場合のせん断強度評価方法について検討を実施したものである。研究においては、硬軟複合岩盤模型を作成し、軟質岩の面積比率や出現位置を変化させた室内せん断試験を行うとともに、非線形 FEM 解析により、岩盤模型がせん断破壊に至る過程を再現し、硬軟複合岩盤のせん断強度の特性を分析した。

この結果、本研究の成果として、室内せん断試験においては、以下のことが明らかとなった。

- ① 中央部に軟質岩が位置する場合、せん断強度は概ね面積加重平均に近い値となる。
- ② しかし、複合岩盤の軟質岩の出現位置が中央より後側に移動すると、面積加重平均強度を下回ることがある。

また、非線形の数値解析から、以下のことが明らかとなった。

- ③ 複合岩盤の局所的なせん断破壊は、軟質岩から生じる。
- ④ 軟質岩が面積比率が 50%以下の場合、せん断強度は概ね面積加重平均に近い値となる。
- ⑤ しかし、軟質岩の面積比率が大きい場合、面積加重平均により求まるせん断強度を発揮できないおそれがある。

これらの成果から、実ダムにおける硬軟複合岩盤のせん断強度を、基本的に面積加重平均として与えることは妥当であるが、軟質岩が下流側に出現した場合、硬質岩と軟質岩の強度・変形性の差が大きい場合には、非線形 FEM 解析を用いた岩盤内の詳細な応力分析が必要である。