

置換処理工がコンクリートダムの滑動安定性に及ぼす効果

Effect of the replacement method on stability of concrete dams against sliding

平山大輔*, 川崎秀明**

* 主任研究官, 国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

** 工博, 室長, 国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

In Japan, there are many concrete gravity dams designed to be constructed on relatively weak rock foundation. In these cases, shear resistance of dam foundation often does not satisfy the safety condition against sliding. The replacement method is suggested to improve soft rock foundation entirely to improve shear resistance and disperse the stress occurred in the foundation. To use this method practically, it is necessary to develop a new design method of the foundation replacement.

In this study, it is clarified that the effects of shape and size of foundation replacements on improvement of shear resistance of soft rock foundation by model tests and numerical analyses.

Key Words: Concrete dam, soft rock foundation, replacement, model test, FEM analysis

キーワード: コンクリートダム, 軟岩基礎, 置換処理工, 模型実験, FEM 解析

1. はじめに

治水, 利水および河川環境の保全を目的として建設されるダムには, ダム自身の自重のほか貯水による水圧, 地震時の慣性力などの大きな荷重が作用する. これに対し, ダムが十分な安定性を保持するためには, ダム堤体が適切な形状を有するとともに, その基礎岩盤も十分な強度を有していなければならない.

重力式コンクリートダムは, 堤体の自重および堤体と基礎岩盤の一体性 (付着) により安定性を確保する構造物である. このため, その堤体形状は, ダムに求められる必要な安定条件を満足するように設計される. また, 堤体と同様, ダムの基礎岩盤についても, 入念な地質調査結果を踏まえ, 所要の強度, 変形性を満足する地点がダムサイトとして選定され, 表層部付近の風化部を取り除いた堅岩上にダムが建設される.

近年, 社会的要請からダム建設が必要と判断されるダムサイトにおいて地質条件が複雑なケースが増えてきている. これらのダムサイトでは, 良好な岩盤を求め基礎岩盤の掘削量の増大や岩盤の強度不足を補うための堤体増厚, 時にはダム形式そのものを変更するなどの対応が必要となり, 結果としてダム建設コスト増大の要因となっている. 特に, 新生代第三紀後期以降の固結度の低い軟岩などにコンクリートダムを建設する場合には, 一般に基礎岩盤のせん断強度が不足することが多い. そこで, 基礎岩盤の一部をコンクリートやCSG¹⁾などの人工材料で置換することにより人工岩盤 (以下, 「置換処理工」という) を創出し,

その上にコンクリートダムを建設する置換処理工法が提案され, すでに金城ダム (沖縄県, 重力式コンクリートダム, 堤高19m) などに採用されている. 本論文は, この置換処理工法の合理的な設計方法を開発するための基礎検討として実施した模型実験, 数値解析の結果を取りまとめたものである.

2. 重力式コンクリートダムにおける滑動安定性評価

2.1 重力式コンクリートダムの設計法

一般に, 重力式コンクリートダムは, 図-1に示すように, 以下の3つの安全条件を満足するように設計される.

- ① 転倒に対する安全性 (ミドルサードの条件)
- ② 滑動に対する安全性
- ③ 許容応力に対する安全性

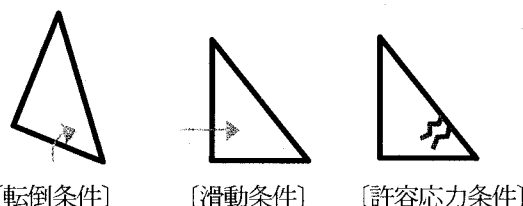


図-1 重力式コンクリートダムの安定条件

①の転倒安全性に対しては, ダム堤体の下流面勾配を適切に設定することで安全性を確保することができる. また, ③の許容応力については, 十分な強度を有する堤体材料を用いることで安全性を確保することができ, よほどダム高

が大きくない限り、一般的なダムコンクリートを用いていれば問題となることはない。

これに対し、②の滑動に対する安全性については、ダム堤体に作用する水平荷重に対して、基礎岩盤のせん断抵抗力が大きいことで安全性を確保することができるが、基礎岩盤のせん断強度や摩擦係数が小さい軟岩の場合には安全性を満足することが困難となり、堤体設計上の支配条件となることが多い。

一般に、コンクリートダムの堤体の滑動に対する安全性は、次式で示される Henny 式により評価される。

$$Fs = \frac{\tau_0 L + fV}{H} \geq 4.0 \quad (1)$$

ここで、

Fs : 滑動に対する安全率

τ_0 : 基礎岩盤のせん断強度

f : 基礎岩盤の摩擦係数

V : 単位幅当たりの垂直荷重

H : 単位幅当たりの水平荷重

L : 滑動に対する抵抗長さ

(1)式において、滑動に対する安全性が確保できない場合には、滑動に対する抵抗長さ(L)や単位幅当たりの垂直荷重(V)を大きくするためにダム堤体の形状を変化させることにより対応することが多い。具体的には、図-2に示すように、ダム堤体の上下流面勾配を大きくする方法、上流面にフィレットを設ける方法、下流面にマットを設ける方法などがとられる。フィレットやマットは、ダム堤体の一部として設計されるものであるから、堤体としての必要な強度、水密性、耐久性及び単位容積質量などの品質を確保するために設計、施工において十分な配慮が必要である。

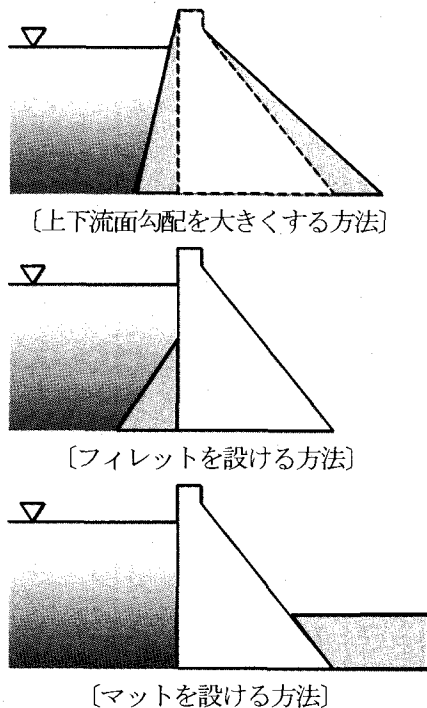


図-2 堤体形状により滑動安定性の向上を図る方法

2.2 置換処理工の概念

図-2に示したように堤体形状を変化させることで滑動安全性の向上を図る以外に、図-3に示すように、強度の低い基礎岩盤を人工岩盤で置き換える置換処理工がある。置換処理工は、基礎岩盤として設計・施工される。ダム堤体に作用する荷重は置換処理工を通じて基礎岩盤に伝達されるため、基礎岩盤への応力分散効果が期待できる。また、置換処理工と堤体の付着強度は、基礎岩盤と置換処理工の付着強度に比べ大きいと考えられることから、せん断破壊面は置換処理工底面から基礎岩盤中に生ずると考えられ、滑動に対するせん断抵抗長が長くなり、応力の分散効果と相まって滑動安定性が向上すると考えられる。

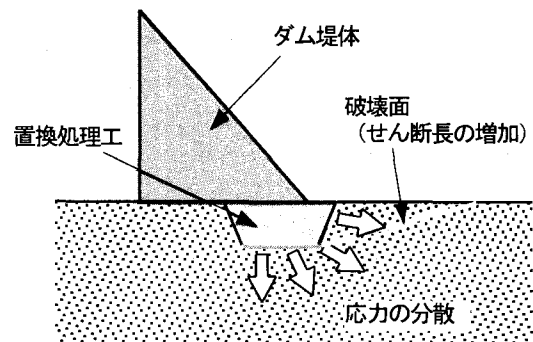


図-3 置換処理工の概念

3. 置換処理工の形状に関する検討

3.1 検討概要

置換処理工の形状が、基礎岩盤のせん断抵抗力の増加に及ぼす効果を調べるため、室内模型実験を行った。基礎岩盤と堤体、置換処理工を模擬した模型を石膏材料を用いて作製し、せん断試験を実施し、置換処理工の形状と破壊荷重の関係をとりまとめた。

3.2 模型と実験ケース

実験に用いた模型の概略形状を図-4に示す。せん断破壊が生ずる場合、置換処理工と基礎岩盤の境界が破壊面になると考え、堤体と置換処理工は一体で作製した。模型は石膏材料を用いて作製し、石膏に珪藻土を混入することにより、実際の軟岩と人工岩盤の弾性係数比となるように弾性係数を調整した。材料の物性値を表-1に示す。

実験ケースを表-2に、各ケースの置換処理工の詳細形状を図-5に示す。置換処理工の形状は、水平形状 (Case 2~6)、下流上がり形状 (Case 7~9)、下流下がり形状 (Case 10~12)、キー形状 (Case 13~15) の4種類、計14ケースを検討した。また、比較として置換処理工なしのケース (Case 1) も検討した。水平形状、下流上がり形状、下流下がり形状については、形状の違いによる影響をみるため、置換処理工の規模 (体積) を同一とした。キー形状については置換深さを同一とし、キー間隔が異なるものを作製した。1ケースあたり3体の供試体を用いてせん断試験を実施し、その平均値により破壊荷重を整理した。

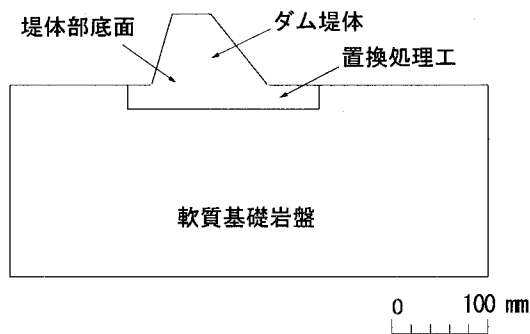


図-4 模型形状

表-1 材料物性値

材 料	珪藻土 混入率 (%)	石膏：水 配合比	弾性 係数 (MPa)	圧縮 強度 (MPa)
堤体・置換 処理工部	0	1.0:0.391	12,435	20.48
軟質基礎 岩盤部	50	1.0:1.400	890	1.58

表-2 実験ケース

Case	置換処理工形状			タイプ
	長さ L (cm)	深さ d (cm)	体積 V (cm ³)	
1	12.2	0	0	置換なし 水平
2	20.0	2.5	50.0	
3	20.0	2.5	50.0	
4	20.0	2.5	50.0	
5	17.05	2.9	50.0	
6	15.0	3.3	50.0	
7	23.8	4.2	50.0	下流上がり
8	16.6	6.0	50.0	
9	13.2	7.6	50.0	
10	23.8	4.2	50.0	下流下がり
11	16.6	6.0	50.0	
12	13.2	7.6	50.0	
13	10.0	2.5	25.0	キー
14	8.0	2.5	20.0	
15	6.0	2.5	15.0	

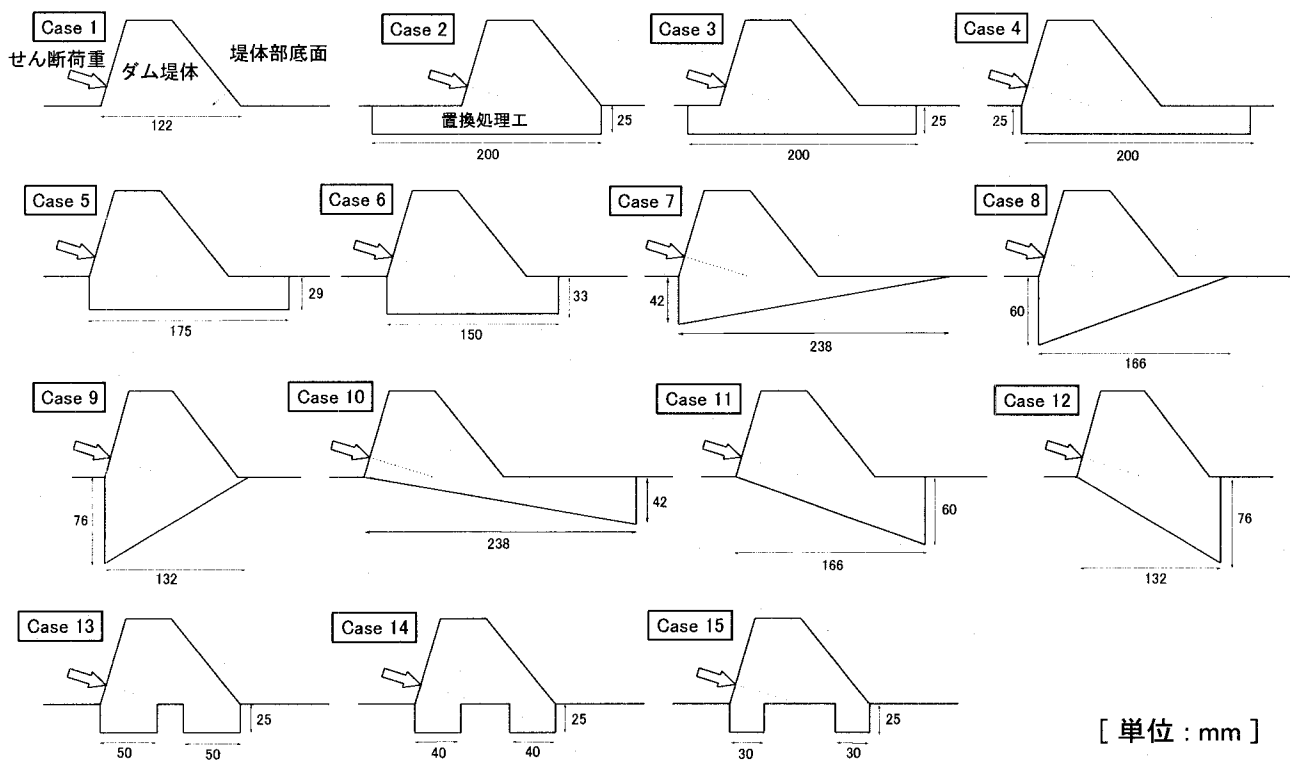


図-5 試験ケースと置換処理工の形状

3.3 実験装置と実験方法

実験装置の概要を図-6に示す。载荷フレーム内に模型を設置し、油圧ジャッキにより堤体部にせん断荷重を载荷する機構である。油圧ジャッキは水平面から 16.7 度の角度で、荷重の作用線が堤体部底面中央を通るように設置さ

れている。せん断荷重の载荷方法は、最初の 30 秒間でせん断荷重を一定割合で 980 N（堤体部底面のせん断応力に換算して約 0.05 MPa）増加させ、その後の 30 秒間は荷重を維持するパターンで、破壊に達するまで荷重を段階的に増加させた。

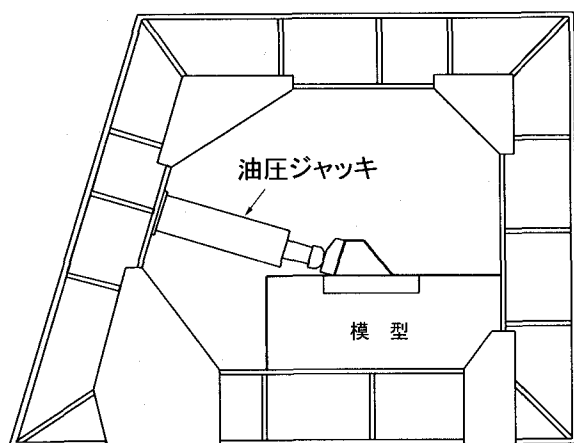


図-6 実験装置

2.4 実験結果

実験結果を図-7に示す。置換処理工を設置した全ケースにおいて、置換処理工を設置しないケース (Case 1) よりも大きな破壊荷重が得られた。また、置換処理工の規模が等しい水平形状、下流上がり形状、下流下がり形状の中で、破壊荷重が最も大きかったのは下流下がり形状であった。さらに、これらの形状においては、置換深さが大きくなるほど破壊荷重も大きくなっている。模型に生じた破壊面は、下流上がり形状では置換処理工の底面がそのまま破壊面となり、基礎岩盤部に破壊は生じていなかったが、このケースを除くと、破壊面は置換処理工底面から置換処理工背後の基礎岩盤部にかけて生じており、置換深さが大きいほど破壊面も大きくなる傾向を示した。

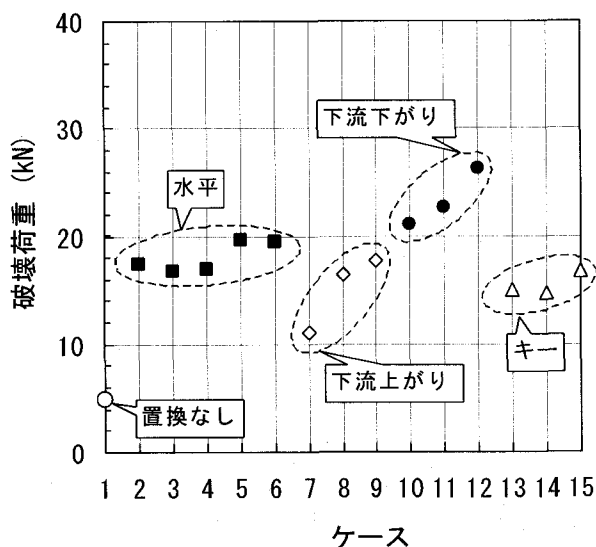


図-7 実験結果

図-8は、各ケースの破壊荷重と置換処理工の最大置換深さとの関係を示したものである。破壊荷重は置換処理工のないケース (Case 1) の破壊荷重を用いて基準化している。置換処理工底面に沿って破壊面が生じた下流上がり形状を除き、破壊荷重は置換処理工の置換深さに比例して大きくなることが確認できる。キー形状においては、キー間

の岩盤も置換処理工と一体となって挙動したために、水平形状と比べて少ない置換量で、ほぼ同等の破壊荷重を得ている。また、キー間隔が破壊荷重に与える影響は少ないものと考えられるが、キー間隔が狭い場合にはキー間の岩盤が掘削により緩む可能性が考えられるため、施工においては十分な注意が必要である。また、水平形状については、置換深さが同一であれば置換処理工の位置によらずせん断抵抗力がほぼ同一であった。

以上のことから、置換処理工の置換深さが基礎岩盤のせん断強度の増加に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

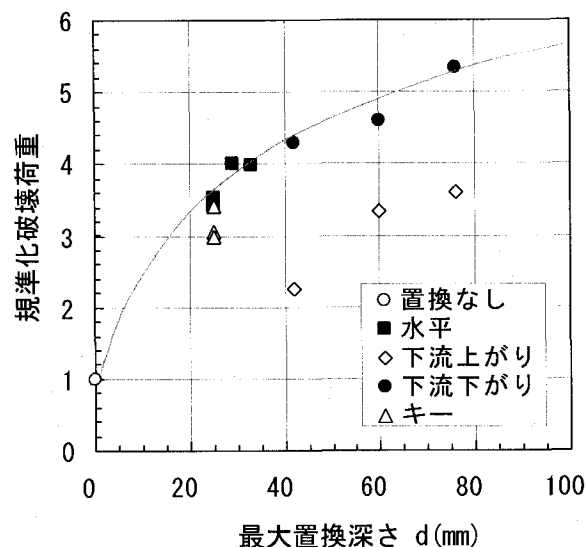


図-8 置換処理工の置換深さと破壊荷重の関係

4. 置換処理工の置換深さに関する検討

4.1 実験の概要

前述の実験結果から、置換処理工は図-9に示すように置換処理工底面のせん断摩擦抵抗力 (R_1) と置換処理工背後の岩盤の抵抗力 (R_2) により、せん断力に抵抗するものと考えられる。置換処理工がない場合には、基礎岩盤のせん断抵抗力は R_1 のみであり、置換深さが大きくなるほど R_2 が大きくなると考えられる。そこで、置換処理工の置換深さとせん断抵抗力 (R_1 , R_2) の関係に着目し、模型実験を行った。

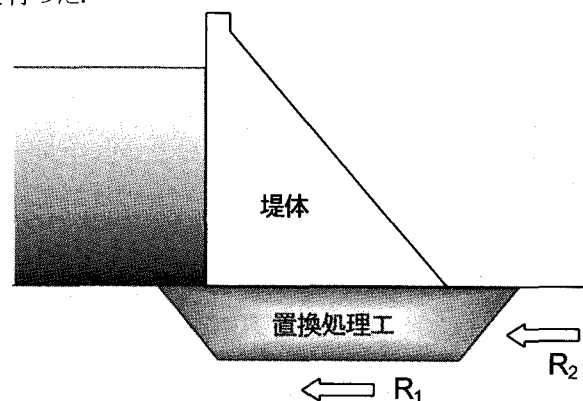


図-9 置換処理工によるせん断抵抗力増加効果

4.2 模型と実験ケース

模型の概略形状を図-10に、模型に用いた石膏材料の物性値を表-3に示す。石膏材料は、実際の軟岩と人工岩盤の弾性係数比となるように弾性係数比を調整した。置換処理工の底面に生ずる摩擦抵抗力 (R_1) の影響を調べるため、底面摩擦抵抗力を有する模型 (Case A) と、テフロンシートを埋設することにより摩擦が生じないようにした模型 (Case B) の2種類を作製した。Case A は R_1 と R_2 の両方が作用するケースであり、Case B は R_2 のみが作用するものである。置換処理工の形状はすべて水平形状とし、置換深さのみを変化させた。表-4に実験ケースを示す。1 ケースあたり4体の供試体で実験を行った。

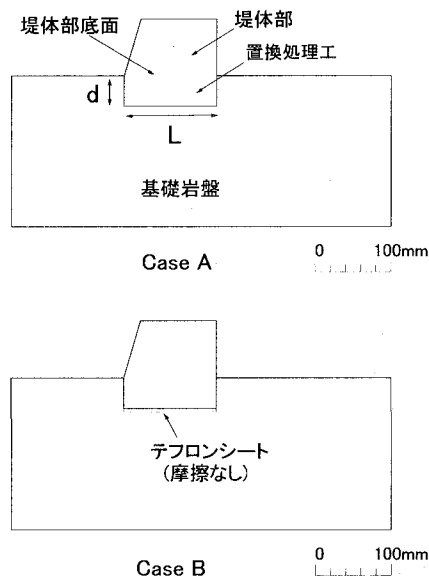


図-10 模型形状

表-3 材料物性値

材 料	珪藻土 混入率 (%)	石膏：水 配合比	弾性 係数 (MPa)	圧縮 強度 (MPa)
堤体・置換 処理工部	0	1.0:0.400	13,354	36.8
軟質基礎 岩盤部	50	1.0:1.868	1,214	1.74

表-4 実験ケース

Case	置換深さ		置換処理工 の底面摩擦
	d(mm)	d/L	
A-1	10	0.082	あり
A-2	20	0.164	
A-3	30	0.245	
A-4	40	0.327	
A-5	0	0.000	
B-1	7	0.057	なし テフロンシート埋設 (厚さ 3mm)
B-2	17	0.139	
B-3	27	0.221	
B-4	37	0.303	

4.3 実験装置と実験方法

載荷フレームは図-6 と同一のものをを用い、せん断荷重載荷用の油圧ジャッキの他に垂直荷重載荷用の定荷重載荷装置を取り付けた。実験においては、初期垂直荷重 Pv_0 (堤体部底面における垂直応力で $\sigma_0 = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ MPa) を載荷した後、垂直荷重を一定に保持しながら、せん断荷重を破壊に至るまで一定割合で増加させた。せん断荷重の載荷速度は 0.5 N/sec (堤体部底面におけるせん断応力増加割合が 2.62 KPa/sec) で一定とした。

4.4 実験結果

図-11, 12 は Case A と Case B について破壊時における堤体部底面の応力をプロットしたものである。実験より得られた各ケースの破壊荷重は、(2)式に示すように堤体部底面の断面積で除した見かけの応力として整理した。図中の直線は Mohr-Coulomb の破壊規準を示している。この破壊規準は、(3)式を用いて Case A, Case B ごとに全データで回帰を行い求めたものである。

$$\begin{aligned}\sigma &= (Pv + Ps \sin 16.7^\circ) / S \\ \tau &= Ps \cos 16.7^\circ / S\end{aligned}\quad (2)$$

ここで、

σ : 堤体部底面における見かけの垂直応力
 τ : 堤体部底面における見かけのせん断応力
 S : 堤体部底面積
 Pv : 垂直荷重
 Ps : せん断荷重

$$\begin{aligned}\tau_0' &= \alpha_1 + \alpha_2(d/L) \\ f' &= \beta_1 + \beta_2(d/L)\end{aligned}\quad (3)$$

ここで、

τ_0' : 基礎岩盤の見かけのせん断強度
 f' : 基礎岩盤の見かけの摩擦係数
 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$: 回帰係数
 d/L : 置換割合 (d : 置換深さ, L : 堤体部底面長さ)

図-13, 14 は、置換処理工がない場合 (Case A-5) の見かけのせん断強度、見かけの摩擦係数を用いて基準化した基礎岩盤のみかけの規準化せん断強度 (τ_0)、規準化摩擦係数 (f) と置換割合との関係を示したものである。置換深さに比例して、規準化せん断強度、規準化摩擦係数とも増加する傾向がみられる。特に規準化せん断強度についてはその増加割合が顕著であり、置換割合が $d/L=0.15$ 程度で置換処理工がない場合のせん断強度の約 2 倍に増加している。

図-15 に示すように堤体部に作用するせん断荷重は、置換処理工底面の摩擦抵抗力 R_1 と背後の基礎岩盤の抵抗力 R_2 により分担される。実験結果から、 R_1 は見かけの内部摩擦係数の増加に、 R_2 はせん断強度の増加に大きく影響を及ぼしているものと考えられる。また、置換割合が $d/L=0.3$ よりも大きい範囲では、せん断強度のほとんどを R_2 が負担する結果となった。

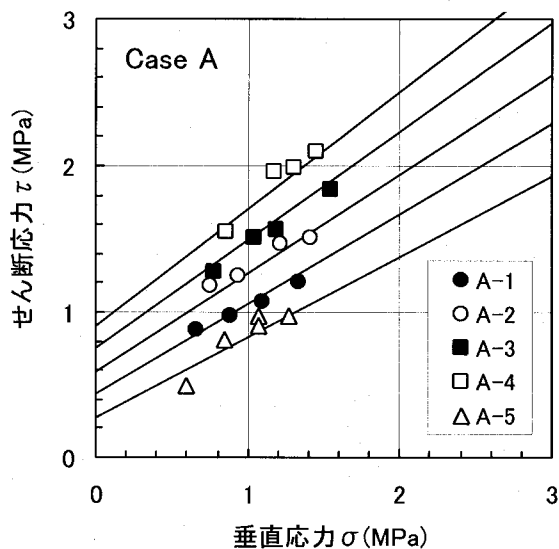


図-1 1 模型実験より得られた破壊規準(Case A)

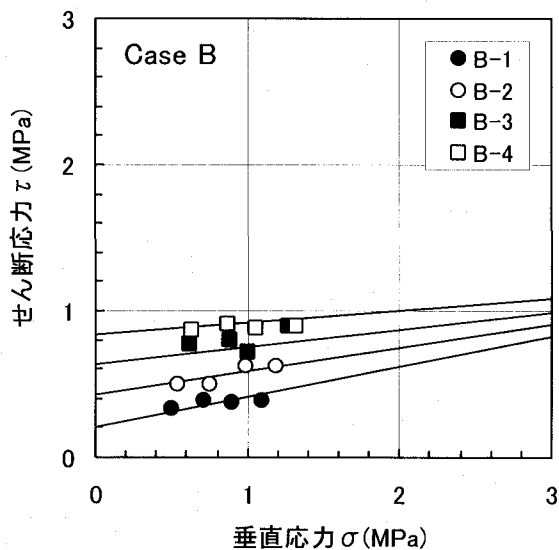


図-1 2 模型実験より得られた破壊規準(Case B)

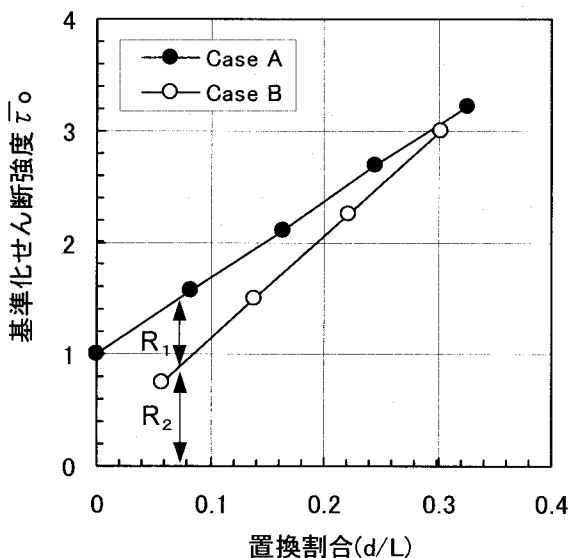


図-1 3 基準化せん断強度と置換割合の関係

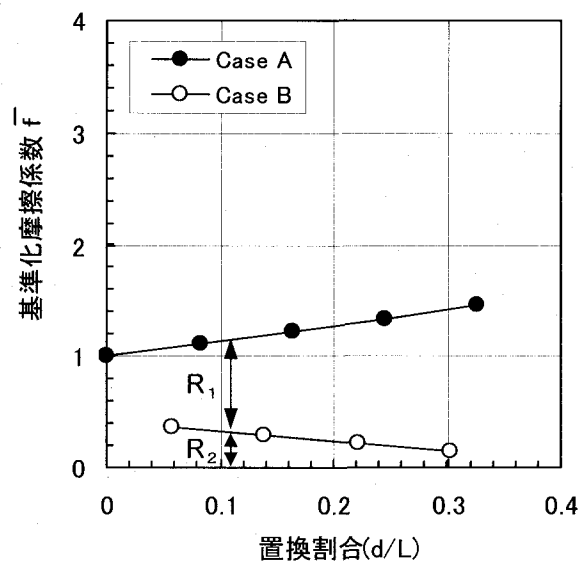


図-1 4 基準化摩擦係数と置換割合の関係

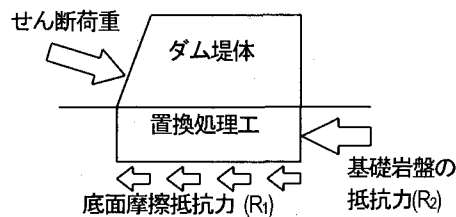


図-1 5 置換処理工に作用するせん断荷重と抵抗力

5. 有限要素法による検討

5.1 解析の概要

実際の重力式コンクリートダムにおいて、置換処理工を適用した場合の効果を明らかにするため、有限要素法による数値解析を行った。解析条件、解析ケース、物性値を表-5、表-6、表-7に、解析モデルを図-1 6に示す。Case 1の基本ケース（置換処理工なし）において、ダムの堤趾部に大きな応力集中が見られたことから、Case2～4では堤趾部に置換処理工を設置することとした。

表-5 解析条件

項 目	解析条件
ダ ム 高	50 m (下流面勾配 1:0.8)
貯 水 位	45 m
堆 砂 位	0 m (考慮しない)
地 震	震度法 K=0.12
揚 圧 力	三角形分布を仮定 (揚圧力係数 1/3)
置 換 深 さ	0, 5, 10, 15 m の 4 ケース

表-6 解析ケース

Case	置換深さ
1	置換処理工なし (基本ケース)
2	置換処理工あり (置換深さ 5 m)
3	置換処理工あり (置換深さ 10 m)
4	置換処理工あり (置換深さ 15 m)

表-7 物性値

材 料	物性値
ダ ム 堤 体	コンクリート 弾性係数 2,000MPa, ポアソン比 0.2 単位体積重量 2.3 g/cm ³
置換処理工	コンクリート 弾性係数 2,000MPa, ポアソン比 0.2 単位体積重量 2.3 g/cm ³
基 礎 岩 盤	軟岩基礎 弾性係数 500MPa, ポアソン比 0.3 単位体積重量 0.0 g/cm ³

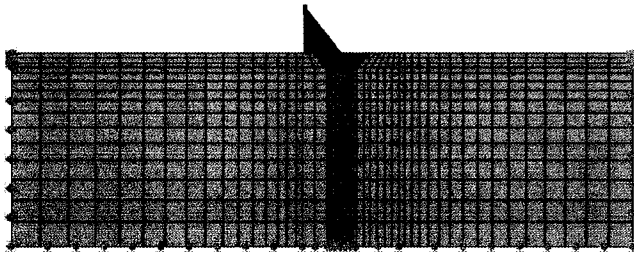


図-16 解析モデル

5.2 解析結果

図-17に各ケースの圧縮側の最大主応力分布を示す。また、図-18は、ダム堤体および置換処理工底面要素における圧縮側の最大主応力を示したものである。これらの図において、置換処理工のない Case 1 では、堤趾部に大きな応力集中が生じている。これに対し、Case 2～4 では、置換処理工の規模を大きくしていくと、基礎岩盤に伝達される応力が分散され、その大きさが低減されていることが確認できる。図-18において、Case 3 と Case 4 の応力分布を比較すると、Case 4 では、Case 3 に比べそれほど大きな応力の低減効果が見られない。これは、置換処理工が大規模化することにより、その自重による応力増加が影響したものと考えられる。

置換処理工を設置した場合の、ダムの滑動安全率を次式を用いて算定した。なお、その際の応力の定義を図-19に示す。

$$F_s = \frac{\tau_0 L + f \sum \sigma_s}{\sum \tau_s} \quad (4)$$

ここに、

F_s : 滑動安全率

τ_0, f : 基礎岩盤のせん断強度, 摩擦係数

L : 堤体および置換処理工底面沿いの長さ

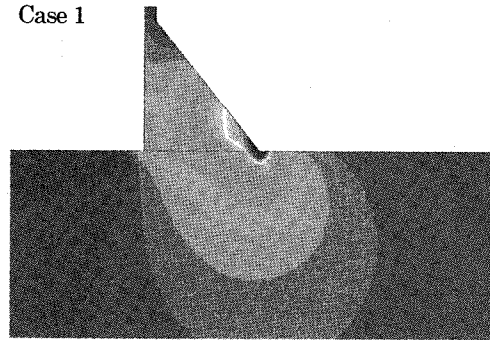
σ_s : 堤体および置換処理工底面に垂直な応力

τ_s : 堤体および置換処理工底面に沿ったせん断応力

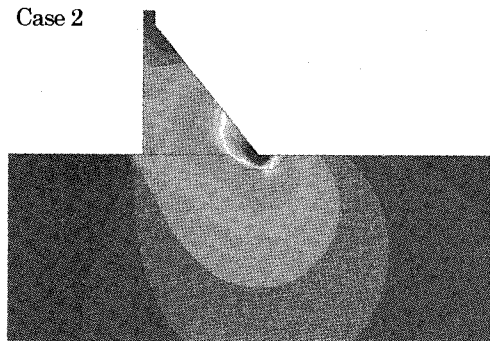
仮に、基礎岩盤のせん断強度が 0.5MPa, 摩擦係数が 0.8 とであった場合、(4)式から求まるダム底面及び置換処理工底面沿いの滑動安全率と置換処理工の関係を示したものが図-20である。この図から、置換処理工のない Case

1では、滑動安全率が 2.7 程度である。これに対し、置換深さが大きくなるにしたがい、滑動安全率も増加し、置換深さが 10m 程度で、一般にダムに必要とされる安全率 4.0³⁾を満足することができる。仮に、置換処理工のない Case 1 で安全率 4.0 を確保するために必要な基礎岩盤のせん断強度を逆算すると約 0.92MPa であり、10m の置換により、見かけ上ダム基礎岩盤のせん断強度を 1.83 倍に改良できたことになる。

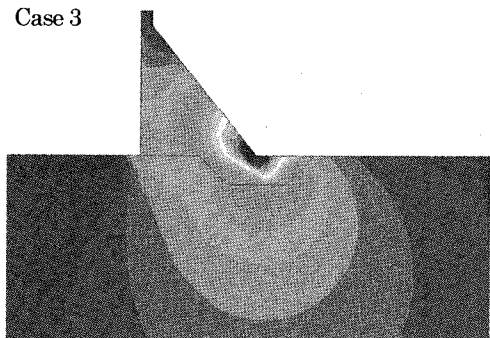
Case 1



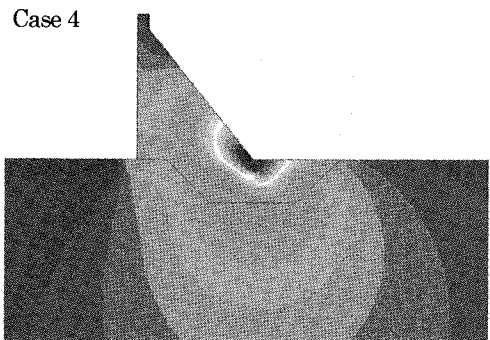
Case 2



Case 3



Case 4



(MPa)

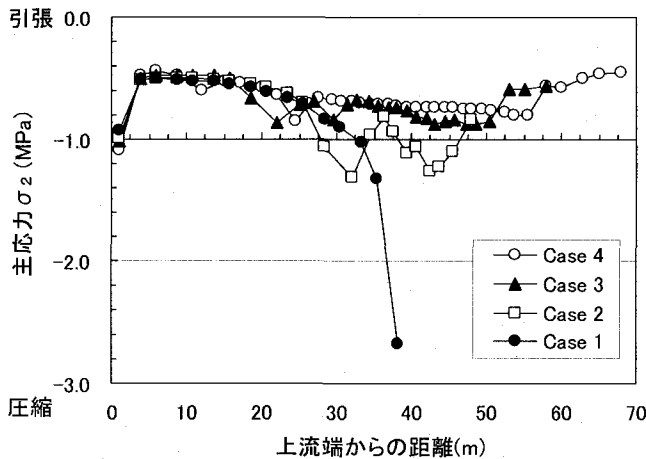
-1.8

-1.0

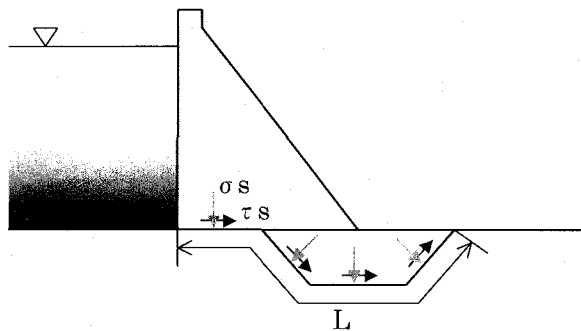
-0.5

0.0

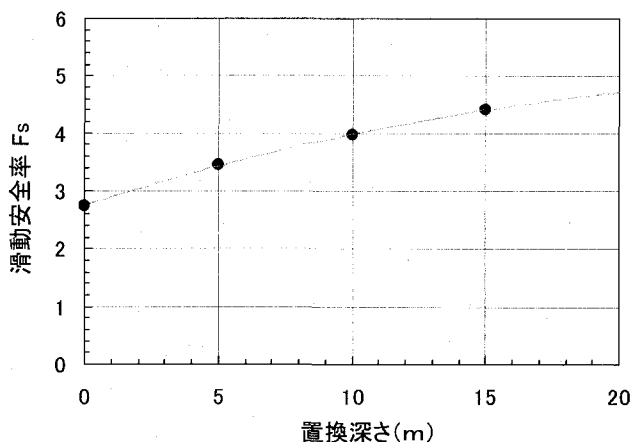
図-17 圧縮側最大主応力分布



図一 18 ダム堤体および置換処理工底面沿いの圧縮側最大主応力分布



図一 19 堤体と置換処理工底面沿いの応力の取り方



図一 20 置換処理工の置換深さと滑動安全率の関係

6. まとめ

置換処理工が基礎岩盤のせん断強度の増加に及ぼす影響を明らかにするため、置換処理工の形状、規模（置換深さ）に着目し、模型実験および数値解析を行った。本研究の成果をとりまとめると、以下のとおりである。

- ① 模型実験結果から、同一規模の置換処理工の場合、下流下がり形状が最もせん断抵抗力が大きい。
- ② 模型実験結果から、基礎岩盤のせん断抵抗力増加には、

置換処理工の置換深さが大きく影響を及ぼす。

- ③ 模型実験結果から、置換処理工は基礎岩盤の見かけのせん断強度増加に及ぼす効果が大きく、置換割合 $d/L=0.15$ 程度で、基礎岩盤のせん断強度を見かけ上、約 2 倍に増加させる効果があった。

- ④ 堤高 50m の重力式コンクリートダム の堤趾部に置換処理工を設置した FEM 解析結果では、基礎岩盤への応力伝達の分散化により、10m の置換で基礎岩盤のせん断強度を見かけ上 8 割程度増加させる効果が得られた。

せん断強度の小さい軟岩などのダム基礎に、置換処理工を適用した場合、基礎岩盤のみかけのせん断強度を増加させる効果があることが、模型実験および有限要素法による数値解析より明らかとなった。なお、今回の検討は、ダムの上下流方向のみを考慮した二次元の検討であったが、実際には置換処理工の側面部においてもせん断抵抗力が期待出来るものと考えられる。

実際のダムにおいては、基礎岩盤の地質条件はより複雑であり、堤体に作用する荷重も様々であることから、個々のダムサイトに応じた適切な検討が必要不可欠である。また、置換処理工の規模が極端に大きくなると、置換処理工部の施工数量の増大や工期の長期化などのマイナス面が大きくなるため、経済性や施工の安全性などの面から他工法との比較を行い、置換処理工の採否を判断する必要がある。

局所的に弱部を有するような基礎岩盤、当初設計で想定した地質が実施工で現れなかったような基礎岩盤、ダムの再開発にともなう既設ダムの嵩上げ等で基礎岩盤を選定する余地の無い場合などにおいて、ダム基礎のせん断強度を見かけ上向上させる効果が得られる置換処理工は、効果的な工法であると考えられる。今後、具体的な事例などを想定した詳細な検討を引き続き進めていく予定である。

参考文献

- 1) 川崎秀明, 平山大輔: CSG を用いたダム技術に関する最新動向, 土木技術資料 Vol.45, No.6, pp.34-39, 2003.
- 2) 平山大輔, 吉田等, 宮内茂之: 置換処理工が基礎岩盤のせん断強度増加に及ぼす影響, 第 55 回年次学術講演会公演概要集, 2000.
- 3) 社団法人 日本河川協会: 解説・河川管理施設等構造令, 山海堂, 2000

(2003 年 9 月 12 日受付)