

(23) ダム基礎岩盤の置換処理工法に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON FOUNDATION TREATMENTS FOR DAMS BY REPLACEMENT

永山 功*・太田 道男**・小沢 裕二***・安田 利文****
Isao NAGAYAMA, Michio OHTA, Yuji OZAWA and Toshifumi YASUDA

Replacement of foundation rock by artificial materials is one of the solutions of constructing concrete dams on weak rock mass. The most economical and suitable shape of replacement was studied with model tests of dam and foundation systems. The following conclusions were obtained.

- 1) The depth of replacement has a larger effect on the stability of a dam than the length of replacement.
- 2) The key-typed replacement and the wedge-typed replacement declining to the downstream side are considered more economical than others. However, the key-typed replacement might have a disadvantage of loosening foundation rock between keys, which must be studied further.

1. まえがき

近年、良好な地質条件を有するダムサイトが減少しつつあり、これまでの設計手法では経済的なダムの建設が難しいと考えられる岩盤上にもコンクリートダムの建設が必要となってきた。軟質な岩盤上に安全で経済的なコンクリートダムを建設する方法の一つとして、基礎岩盤全体を人工材料で置き換えることによって岩盤のせん断抵抗力を確保し、また岩盤に作用する応力の分散を図る方法が考えられる。

本論文は、ダム基礎岩盤の置換処理工法に関する研究の第一歩として、石膏と珪藻土を用いて作製したダム基礎岩盤の置換処理工の模型破壊実験を実施し、置換処理工の形状の違いによる破壊特性の差について検討したものである。

2. 実験方法

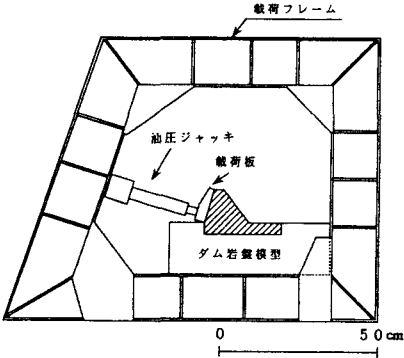
2.1 模型装置の概要

今回の実験では、図-1に示すような実験装置内にダムおよび置換処理工を実施した基礎岩盤の模型を設置し、油圧ジャッキでせん断荷重を載荷して模型を破壊させた。

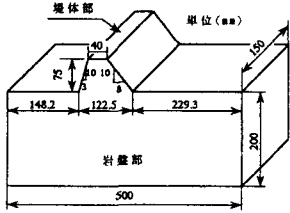
*	正会員	建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室	室長
**	正会員	建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室	主任研究員
***	正会員	建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室	研究員
****	正会員	建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室	部外研究員

ジャッキ荷重の載荷方向は、荷重の水平分力と鉛直分力の比が10:3となるように設定した。これは実際のダムに作用する荷重の方向とは異なるが、現行の設計基準¹⁾では、ダム堤体底面に作用するせん断力が4倍になったとき、滑動に対する安全率が1となるようにダムの安全性を定めていることから、水平荷重が実際の4倍になった場合の合力の作用方向と概ね一致するように荷重の方向を設定したものである。また、ジャッキ荷重の作用位置はその作用線がダム堤体底面の中央を通るように設定した。

ジャッキ荷重は電動ポンプユニットで載荷し、ポンプユニットの圧力検出器で荷重の制御を行った。荷重載荷パターンは1分間サイクルとし、最初の30秒間でせん断荷重を100kgf増加させ、その後、30秒間荷重を維持し、その間にひずみ、変位の計測を実施した。



図－1 せん断模型装置



図－2 模型の形状および寸法

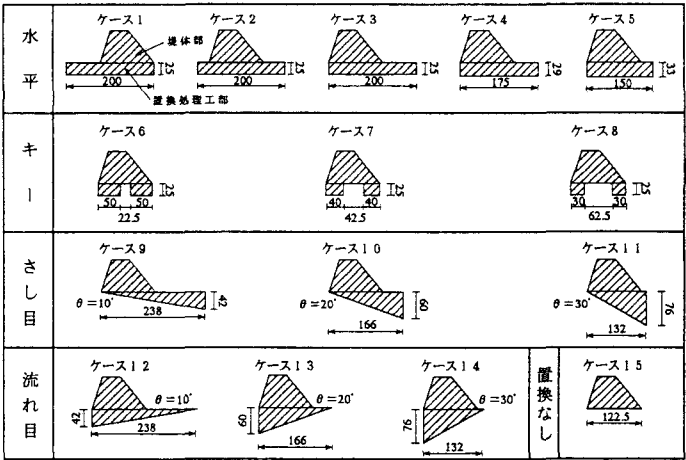
2.2 模型形状

実験に用いた模型の形状および寸法を図－2に、実験ケースを図－3に示す。置換処理工の形状は水平、キー、下流下がり（以下、さし目という）、下流上がり（以下、流れ目という）の4タイプとした。水平タイプについては、置換処理工の位置、深さを変化させ、キータイプについては、キーの深さを一定として、長さを変化させた。また、さし目、流れ目タイプについては、底面の角度 θ を 10° 、 20° 、 30° の3種類に変化させた。この際、キータイプを除いて、置換処理工の断面積が一定となるようにその寸法、形状を定めた。なお、置換処理工の効果を確認する目的で、置換処理工を設けないケースも設定した。

模型の作製にあたっては、まず石膏と珪藻土の質量混合比が1:1のもので軟質岩盤を打設し、24時間後に硬石膏で置換処理工と堤体を一体で打設した。模型はその後24時間で脱型し、室温 40°C の乾燥炉で約1ヶ月間乾燥した。模型は各ケース3個ずつ計45個作製した。また、模型作製時に、模型と同一バッチの材料で供試体を作製し、一軸圧縮試験（直径10cm、

単位(mm)

高さ20cmの円柱供試体）と一面せん断試験（一辺15cmの立方体供試体）を行った。その結果、軟質岩盤の一軸圧縮強度は平均で16kgf/cm²、弾性係数は平均で9,070kgf/cm²、置換処理工および堤体の一軸圧縮強度は平均で209kgf/cm²、弾性係数は平均で127,000kgf/cm²となった。これより、軟質岩盤の物性値は置換処理工および堤体のそれに比較して、一軸圧縮強度で1/13、弾性係数で1/14となった。また、軟質岩盤の純せん断強度 τ_0 は2.0kgf/cm²、内部摩擦係数 f は1.0となった。



図－3 実験ケース

表一 解析に用いた物性値

	弾性係数(kgf/cm ²)	ポアソン比
軟質岩盤	9,000	0.2
置換処理工	130,000	0.2
堤体	130,000	0.2
載荷板	2,100,000	0.3

2.3 2次元有限要素法による解析

破壊試験時の応力状態を検討するために、表一に示す物性値を使用して、2次元有限要素法による弾性解析を実施した。解析領域は模型と同じ範囲とし、底面は鉛直方向変位を、下流側側面は水平方向変位を拘束した。

3. 試験結果

3.1 実験結果

各置換処理工の破壊断面を模式化して図一4に、そのときの破壊荷重を図一5に示す。置換処理工のタイプ別に見た破壊荷重、破壊形態の特徴は以下のとおりである。

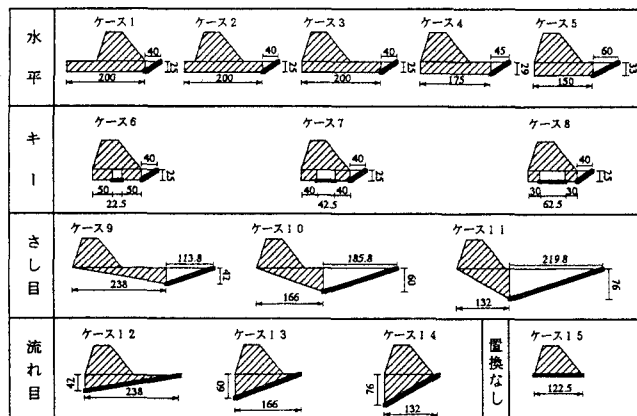
3.2 水平タイプ(ケース1～5)

図一5において、置換処理工の位置の違いが破壊荷重に与える影響をケース1～3によって比較すると、破壊荷重に有意な差は認められない。一方、置換処理工の断面積を同一としたとき、置換処理工の長さ、深さの違いが破壊荷重に与える影響をケース3～5によって比較すると、深さが深くなると破壊荷重が大きくなる結果となっている。破壊荷重Fの大きさに影響を与える要因として置換処理工の長さL、深さDを考え、ケース3～5およびケース15(置換なし)の値を用いて重回帰分析を行うと次式または表一2のようになる。

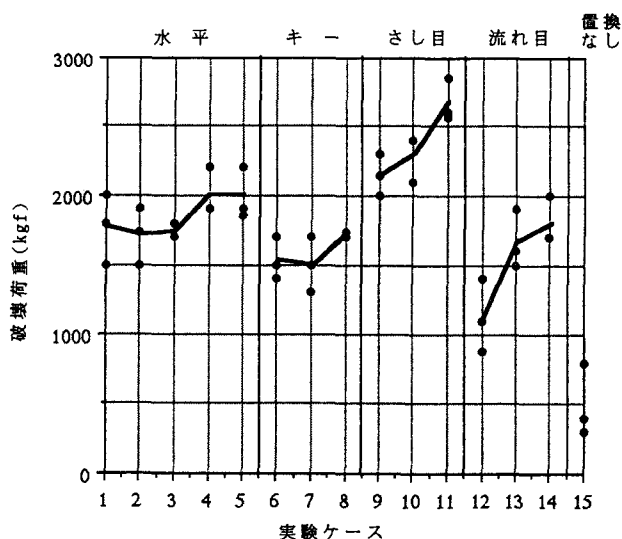
$$F = 3.736L + 43.521D \quad \dots (1)$$

これより、置換処理工の長さよりも深さの方が破壊に対する抵抗力を向上させる上で有効と考えられる。また、ケース1～3において破壊荷重が同程度であったことも(1)式の妥当性のある程度まで説明していると考えられる。また、表一3は、ケース3～5について、同表に示す①、②それぞれの破壊面に対し、(2)式に示すせん断摩擦安全率を同一荷重(ケース3の破壊荷重)において比較したものである。

—— 破壊断面 単位(mm)

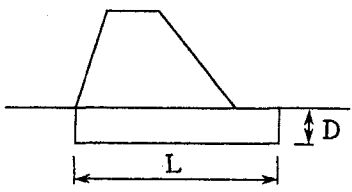


図一4 破壊断面の模式図



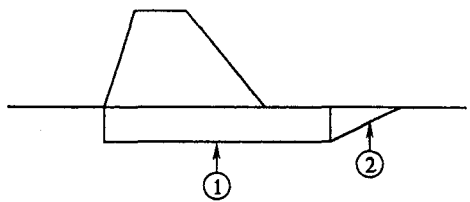
図一5 各ケースの破壊荷重

表一 2 破壊荷重の比較（ケース 3～5，15）



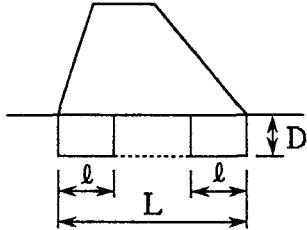
ケース	破壊荷重 (kgf)		置換処理工の 長さ L (mm)	置換処理工の 深さ D (mm)
	実験値	回帰値		
3	1,733	1,835	200	25
4	2,000	1,916	175	29
5	2,000	1,997	150	33
15	500	458	122.5	0

表一 3 セン断摩擦安全率の比較（ケース 3～5）



ケース	①の部分のせん断摩擦 安全率	②の部分のせん断摩擦 安全率
3	0.863	1.103
4	0.848	1.211
5	0.793	1.249

表一 4 破壊荷重の比較（ケース 6～8）



ケース	置換処理工の 長さ 2L (mm)	置換処理工の 深さ D (mm)	破壊荷重 (kgf)	
			実験値	回帰値
6	100	25	1,533	1,546
7	80	25	1,500	"
8	60	25	1,710	"

* 回帰値は L = 122.5mm とした時の値

$$F_s = \frac{\tau_o L + f V}{H} \dots (2)$$

ここに、

τ_o ; セン断面の純せん断強度 (2.0 kgf/cm²)

L ; セン断面の長さ

f ; セン断面の内部摩擦係数 (1.0)

V ; セン断面に作用する単位幅あたりの
垂直力

H ; セン断面に作用する単位幅あたりの
せん断力

図によれば、いずれのケースとも、①の部分の安全率は②の部分の安全率よりも小さく、最終的に②の部分が荷重に対して抵抗していることがわかる。すなわち、置換工の長さよりも深さの方が破壊に対する抵抗性に大きく寄与していることが裏づけられる。また、②の部分の安全率は置換工の深さが深いほど大きくなっている。

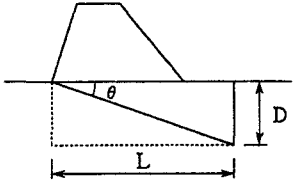
3.3 キータイプ（ケース 6～8）

図一 5 において、キーの大きさの違いが破壊荷重に与える影響をケース 6～8 によって比較すると、キーの大きさによって破壊荷重に有意な差は認められず、ある程度の大きさであれば、キーの大きさは破壊荷重の大きさに影響を及ぼさないものと考えられる。また、2つのキーの間を全て置換したケース（水平タイプ）の破壊荷重を（1）式から推定すると 1,546 kgf となり（表一 4 参照）、キータイプの破壊強度と概ね一致する。したがって、キータイプは水平タイプに比べて経済的な置換形式であるといえる。ただし、2つのキー間の岩盤を緩めやすい置換形式であるため、実際には必ずしも推奨される置換形式ではないと考えられる。

3.4 さし目タイプ（ケース 9～11）

次に、水平タイプと断面積を同一とした置換処理工として、底面に傾斜を与えたさし目タイプについて、角度 θ が破壊荷重に与える影響を検討した。図一 5 において、ケース 9～11 の結

表一 5 破壊荷重の比較（ケース 9～11）



ケース	置換処理工の 長さL (mm)	置換処理工の 深さD (mm)	破壊荷重(kgf)		①/②
			さし目	水平	
			実験値①	回帰値②	
9	238	42	2.146	2.717	0.790
10	166	60	2.300	3.231	0.712
11	132	76	2.673	3.800	0.703

果を比較すると、角度 θ が増すにつれて破壊荷重も大きくなっており、下流端の置換深さが破壊に対する抵抗性に大きく寄与していると考えられる。ここで、下流端の置換深さをさし目タイプと同一とした水平タイプの置換処理工を考え、（1）式より破壊荷重を推定すると表一 5 に示すようになる。これより、さし目タイプと水平タイプとの破壊荷重を比較すると、置換処理工の断面積が半分であっても、さし目タイプの破壊荷重は水平タイプの破壊荷

重の70～80％程度の値を有することがわかる。したがって、さし目タイプは水平タイプに比べて経済的な置換形状であるといえる。なお、さし目タイプが経済的に有利となるのは、水平タイプにおいて置換処理工の底面の長さが（1）式に示すように破壊に対する抵抗性にあまり寄与していないためと考えられる。

3. 5 流れ目タイプ（ケース12～14）

次に、さし目タイプと同様に、流れ目タイプにおいて置換処理工の底面の角度 θ が破壊荷重に与える影響を検討した。図一 5 において、ケース12～14の結果を比較すると、角度 θ が増すほど破壊荷重は大きくなっている。しかし、さし目タイプと同じ角度を有していても、さし目タイプに比べて50～70％の破壊荷重しか有しておらず、この置換形状はあまり得策でないと思われる。これは、他のタイプのように支圧によって抵抗する部分がないためと考えられる。

4. まとめと今後の課題

ダム基礎岩盤の置換処理工法に関して検討した今回の実験結果および解析結果をまとめると、以下のとおりである。

- ①置換処理工の規模（置換部の断面積）が同一でも、その形状の違いにより破壊荷重が大きく異なることが確認できた。
- ②置換処理工の規模（置換部の断面積）を同一とした場合、破壊荷重の大小関係は、流れ目タイプ<水平タイプ<さし目タイプの順となった。
- ③個々の置換タイプについてみると、置換深さが深くなると破壊荷重が大きくなるという結果となり、置換部の長さよりも置換部の深さの方が破壊に対する抵抗性に大きく寄与することがわかった。また、キータイプは、2つのキー間の岩盤が置換工と同等に機能するため、置換部の断面積が小さくても大きな抵抗性を有する結果となった。（ただし、実施工においては、キー間の緩みが懸念される形式である。）

今回の実験では、置換処理工の形状と破壊荷重の関係について一応の結果が得られたが、今後は、ダム基礎として所要の安全率を確保するために必要な置換処理工の規模、形状の決定方法について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 河川管理施設等構造令研究会：解説・河川管理施設等構造令，1978年