

弱層・プラグ効果を考慮した重力ダム基礎岩盤模型実験による基礎岩盤内応力分布特性
STUDY ON STRESS DISTRIBUTION IN DAM FOUNDATION THROUGH GRAVITY DAM MODELING TESTS

中島伸一郎*・岸田 潔**・足立紀尚***・伊豆好弘****

Shinichiro NAKASHIMA, Kiyoshi KISHIDA, Toshihisa ADACHI, Yoshihiro IZU

Since the stability of dam is strongly affected by faults, appropriate treatments are needed for them. The concrete plug replacement is one of the most typical methods to improve a weak part of dam foundation. In this paper, the development and results of the modeling tests are performed, and the effects of the concrete plug treatment are described. It can be confirmed that the concrete plug is effectively applied the loads of dam to the rock foundation and is sufficiently controlled the deformation of dam foundation.

1. はじめに

弱層を一定範囲除去してコンクリートで置換える置換コンクリートプラグ処理(以下、置換プラグ処理)は、重力ダム基礎岩盤中の弱層に対する処置として代表的な工法である。弱層によるダムの構造安定性の低下には、ダム高さ(外力の大きさ)、弱層の規模・強度・変形性だけでなく、弱層と堤体との相対位置、弱層の傾斜といった因子も影響するが、これらの因子が組み合わさって影響するために画一的に基礎の耐荷力を評価することは難しい。そのため、プラグの効果や必要プラグ深さについても不明確な部分が多い。本研究では、各々の因子が基礎岩盤内応力分布に及ぼす影響およびプラグ設置による応力分布の変化を把握し、合理的なプラグ設計について検討することを目的としている。

この目的に対し、重力ダムをモデル化した模型実験装置を開発し、弱層・プラグを想定した実験を実施している。本稿では、弱層位置およびプラグ深さを変化させた場合の堤敷応力分布の測定結果を示し、弱層の影響およびプラグの効果について考察を示す。

2. 実験概要

2.1 実験装置

重力ダム模型実験装置を図1に示す。模型実験装置は、重力ダムの上下流断面をモデル化したものである。石膏、珪藻土および水の混合物によって作製した岩盤供試体の上面にジュラルミン製ブロック(以下、堤体部)をエポキシ樹脂系接着剤(K120: コニシボンD)で接着し、鉛直・水平方向からそれぞれ3つのエアシリンダによって載荷する。一方向の載荷を3分割することにより、実物ダムにおいて三角形分布する自重および水圧荷重を擬似的に表現する。

堤体部は、岩盤供試体との接地断面が300 mm×150 mm、高さ360 mmの直方体である。堤体部底面には2方向ロードセル¹⁾(東京測器研究所)を10個設置しており、堤敷上の垂直・せん断応力分布を計測する。

岩盤供試体のサイズは上下流方向1200 mm、深さ方向600 mm、奥行き150 mmである。岩盤供試体の材料には、石膏、珪藻土および水を2.0:1.0:3.0(重

* 学生員 工修 京都大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

** 正会員 工修 京都大学助手 工学研究科 土木工学専攻

*** フェロー Ph.D, 工博 京都大学教授 工学研究科 土木工学専攻

**** 正会員 関西電力株式会社

量比)で配合したものを用いた。供試体は、打設後約72時間で脱型し、乾燥炉で7日間乾燥した後、室温で自然冷却して実験に用いた。材料試験として、岩盤供試体と同配合で作製した試料を用いて一軸圧縮試験、圧裂試験および直接せん断試験を行なった。直接せん断試験は、直径76mmの円柱供試体に対し、6種類の垂直拘束圧(0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 MPa)で一面せん断試験を行った。一軸圧縮試験、圧裂試験の結果より、一軸圧縮強度 $\sigma_c = 1.95 \text{ MPa}$ 、引張強度 $\sigma_t = 0.45 \text{ MPa}$ 、弾性係数 $E_r = 1.23 \times 10^3 \text{ MPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.22$ を得た。また、せん断強度 τ_0 および内部摩擦角 ϕ は、図2のように、直接せん断試験から得られた各垂直拘束圧のピーク強度と一軸圧縮試験および圧裂試験の破壊応力円(円C, T)から、直線 l のように決定した($\tau_0 = 0.452 \text{ MPa}$, $\phi = 40.2^\circ$)。

岩盤内の応力分布を測定するため、岩盤供試体側面の堤体部直下20mmに3軸方向のひずみゲージを貼りつけた。図3に、2方向ロードセルおよびひずみゲージ(FRA-6-11-3L:東京測器研究所)の計測位置を示す。計測項目は、堤敷応力分布、岩盤側面ひずみ分布のほか、载荷重、堤体部変位(鉛直・水平方向、各2点)である。計測は10秒毎に行い、データはデータロガー(TDS-301:東京測器研究所)に集められた後、GPIBボードを介してパソコンに表示・記録した。

载荷ステップを図4に示す。まず、自重に相当する鉛直荷重($V1, V2, V3$) = (0.89, 2.63, 4.36) [kN]を5回に分けて载荷する。この荷重状態を自重状態と定義する。つぎに、鉛直荷重は固定したまま静水圧荷重に相当する水平荷重($H1, H2, H3$) = (0.64, 1.92, 3.20) [kN]を5回に分けて载荷する。この荷重状態を満水状態とする。つづいて、水平荷重のうち、 $H3$ のみを岩盤供試体が破壊するまで0.20 kNずつ増加させる。満水状態以降で $H3$ のみを増加させたのは、 $H1, H2$ を増加させた場合、鉛直荷重と水平荷重の合力の作用点が著しく下流側に移動し、明らかに転倒によって破壊すると考えられるためである。

自重に相当する鉛直荷重および静水圧荷重に相当する水平荷重の大きさは、重力ダムの構造安定設計の条件である①せん断摩擦安全率 n が4.0以上(滑動に対する条件)②上流端に引張応力を生じない(転倒に対する条件)という条件③のもとで、③下流端の垂直応力 σ_d が一軸圧縮強度 σ_c の20%以下という条件

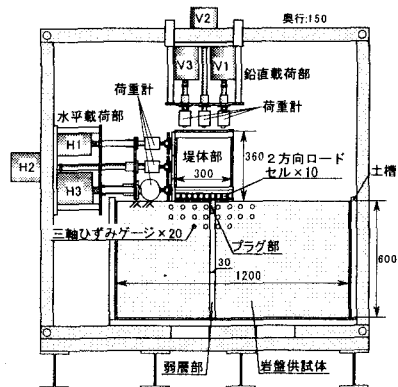


図1 実験装置全体図(単位:mm)

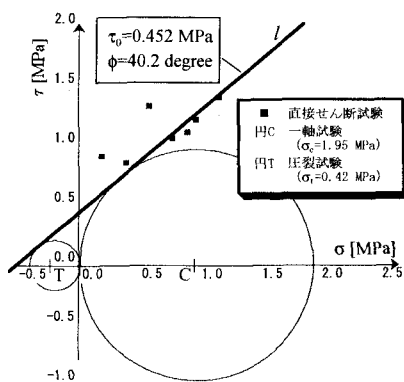


図2 岩盤供試体のせん断強度(石膏:珪藻土:水=2.0:1.0:3.0)

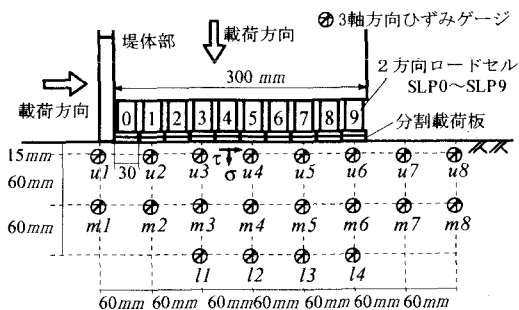


図3 2方向ロードセルおよびひずみゲージの設置位置

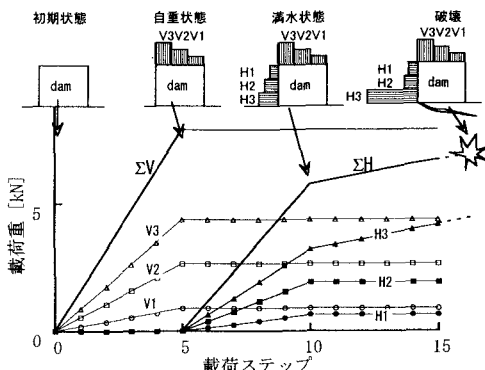


図4 载荷手順

を満たすように決定した。ここで、①～③の条件は、以下のように表せる。

$$n = \frac{\tau_0 B + V \tan \phi}{H} \geq 4.0 \quad (1)$$

$$\sigma_u \geq 0 \quad (2)$$

$$\sigma_d \leq 0.2\sigma_c \quad (3)$$

ただし、 n ：せん断摩擦安全率、 τ_0, ϕ ：岩盤のせん断強度および内部摩擦角、 H, V ：堤体に作用する鉛直力および水平力、 σ_u, σ_d ：着岩面の上流端および下流端における垂直応力、 σ_c ：岩盤の一軸圧縮強度、である。

重力ダムの着岩面における応力は図5のように直線分布をなす³⁾。本実験の堤体部を高さ $h=360 \text{ mm}$ 、堤敷幅 $B=300 \text{ mm}$ の三角形断面のダムであるとみなして、図5と同様に応力分布を求め、式(1)～(3)を満たすように鉛直荷重、水平荷重の大きさを決定した。算出にあたり、岩盤の物性については岩盤供試体の材料試験の結果を用いた。

今回行った実験のパターンを図6示す。まず均一な岩盤供試体（均一岩盤モデル）で行い、岩盤内応力分布および破壊性状について基礎的なデータを取得した。つぎに、ダム軸に平行で傾斜が垂直方向の単一弱層が堤体内に存在するモデルについて、弱層位置を堤体下流端（下流弱層モデル）、堤体中央（中央弱層モデル）、堤体上流端（上流弱層モデル）の3位置で変化させた。弱層は、岩盤供試体内に幅 30 mm の隙間を設けこれを弱層と想定した。つづいて、下流弱層モデルと中央弱層モデルに対し、深さ 10 mm 、 30 mm 、 60 mm のプラグを設置した実験を行なった。置換プラグは堤体と一体で挙動すると考えられることから、幅 30 mm の鉄片を、堤体部底面に固定することによってプラグを表現した。

3. 実験結果および考察

3.1 均一岩盤モデルにおける堤敷応力の変化および満水状態での堤敷応力分布形状

図7(a)、(b)は、均一岩盤モデルの実験において、自重状態から水平荷重を増加させていったときの堤敷敷垂直・せん断応力の変化である。応力の値は、荷重前からの累積量である。また、横軸は水平荷

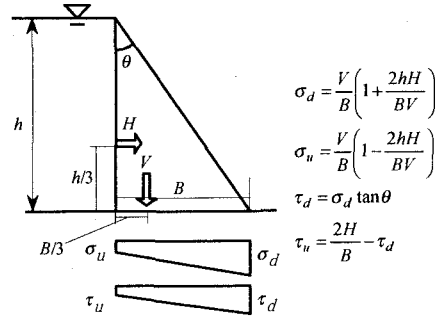


図5 着岩面の応力分布

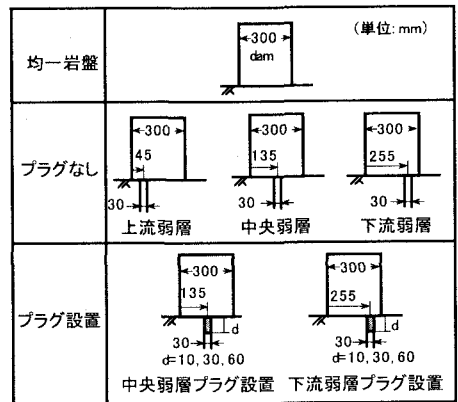


図6 実験パターン

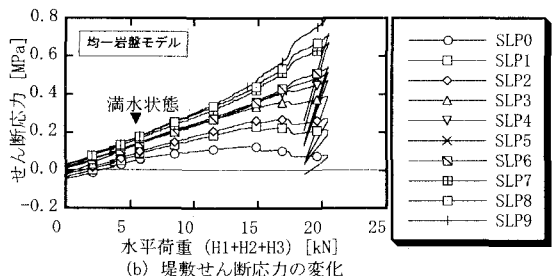
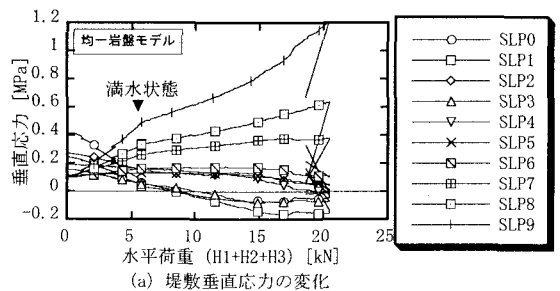


図7 水平荷重の増加に伴う堤敷応力の変化

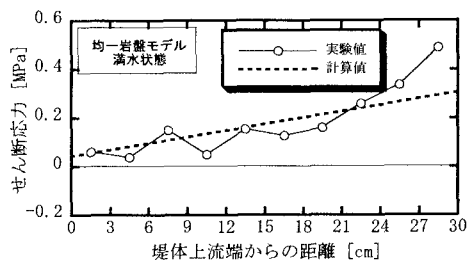
重の総和 (H1+H2+H3) である。プロットの番号 (SLP0 ~ SLP9) は、図 3 に示した 2 方向ロードセルの番号に対応している。図 7(a) より、自重状態では堤体の上流側に偏心した鉛直荷重が载荷されるため、垂直応力は上流端で最も高く、下流に行くにしたがって低くなる分布を示すが、水平荷重の増加に伴って堤体に作用するモーメントが増大するため、堤体下流側の垂直応力は上昇し、堤体上流側の垂直応力は減少していくことが確認できる。図 7(b) より、自重状態における堤敷せん断応力はほぼゼロであるが、堤体中央より上流側でわずかに負の値を示し、中央より下流側でわずかに正の値を示す。これは、鉛直荷重の载荷によって、堤体直下の岩盤が楔形に押し込まれようとするためであると考えられる。自重状態から水平荷重の増加に伴い、せん断応力はすべての位置で上昇している。

図 8 は均一岩盤モデルの満水状態における堤敷応力分布の実験結果と、図 5 と同様に直線分布として計算した応力分布とを比較したものである。図 8 より実験結果は梁理論による計算結果と同様に直線分布をなし、値もほぼ一致している。このことから、本実験の载荷方法によって、想定した満水状態の堤敷応力分布が表現できていることが確認される。

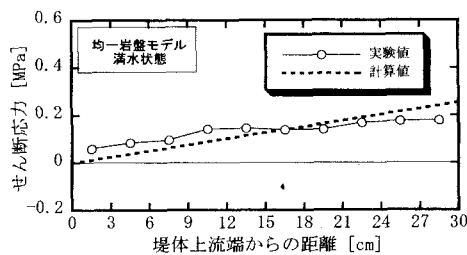
3・2 弱層が存在する場合の堤敷応力分布

図 9(a), (b) は、それぞれ下流弱層モデル、中央弱層モデルの満水状態での堤敷応力分布を示している。ここで、下流弱層モデルは、満水状態になる以前に堤体下流端で局所破壊を生じたので、図 9(a) では局所破壊直前の応力分布を示している。図 8 および 9(a), (b) より、満水状態での堤敷応力分布は弱層の存在によって変化し、また弱層位置によっても分布形状が異なることがわかる。図 9(a) より、下流弱層モデルでは、垂直応力、せん断応力ともに下流端において著しい応力集中が生じていることが確認できる。下流端に応力が集中するのは、弱層が存在することで下流端部分の岩盤の変形も大きくなり、堤体が前傾するためであると考えられる。

図 9(b) より、中央弱層モデルでは、下流弱層モデルのような応力集中は見られないが、弱層上流側で負のせん断応力が生じていることが確認できる。弱層上流側において負のせん断応力が生じるのは、図 10 に示すように、鉛直荷重に対して堤体直下の岩盤が弱層方向へと変形するためである。

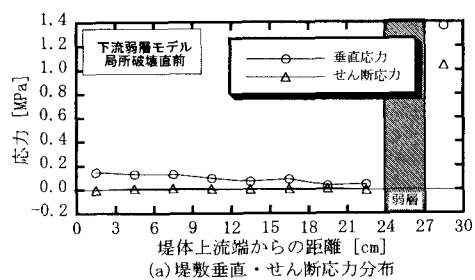


(a) 堤敷せん断応力分布

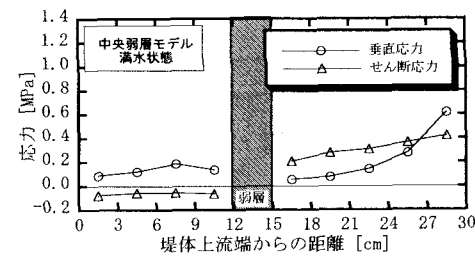


(b) 堤敷せん断応力分布

図8 均一岩盤モデルの満水状態における堤敷応力分布



(a) 堤敷垂直・せん断応力分布



(b) 堤敷垂直・せん断応力分布

図9 弱層が存在する場合の堤敷応力分布

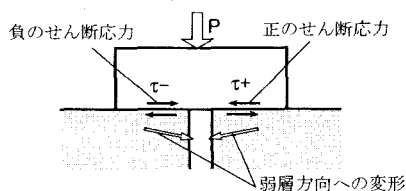
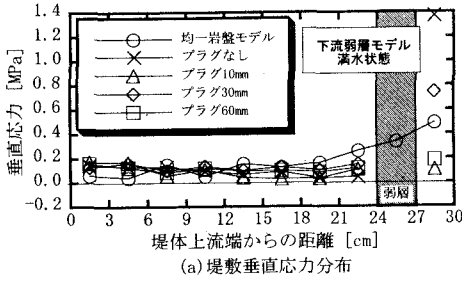
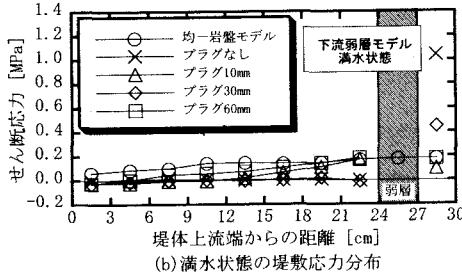


図10 弱層上流側における負のせん断応力

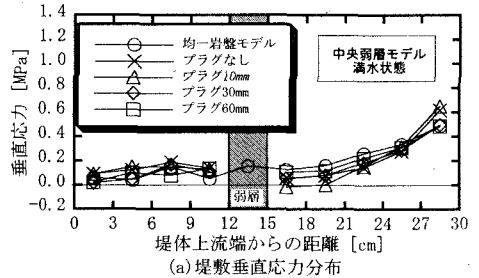


(a) 堤敷垂直応力分布

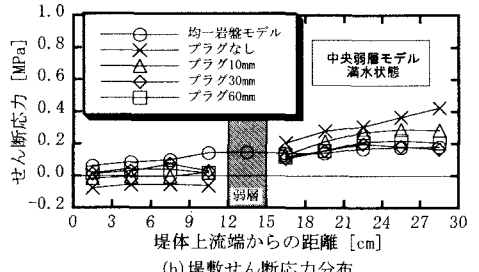


(b) 満水状態の堤敷応力分布

図11 プラグを設置した場合の堤敷応力分布 (下流弱層モデル)



(a) 堤敷垂直応力分布



(b) 堤敷せん断応力分布

図12 プラグを設置した場合の堤敷応力分布 (中央弱層モデル)

3・3 プラグを設置した場合の堤敷応力分布

図11, 12は, それぞれ下流弱層モデル, 中央弱層モデルにプラグを設置した場合の満水状態での堤敷応力分布である. 図11より, 下流弱層モデルでは, プラグなしの場合に下流端で生じていた応力集中が, プラグの設置によって解消されている. これは, プラグなしの場合に弱層下流側(下流端)に作用していた集中荷重の一部をプラグ側面が分担し, 下流岩盤へと伝達しているためであると考えられる. 図12より, 中央弱層モデルでは, プラグによる堤敷応力分布の変化は小さいが, 図12(b)において, プラグなしの場合に弱層上流側で生じていた負のせん断応力がプラグの設置によって正の方向に移動しており, プラグの設置によって, 堤敷応力の分布形状が均一岩盤モデルの場合に近づいていることが確認できる. これは, 弱層部にプラグが挿入されることによって, 堤体直下の岩盤の弱層方向への変形が抑えられるためであると考えられる.

4. まとめ

弱層・プラグを想定した模型実験の結果, 弱層の存在および弱層位置が堤敷応力分布に大きな影響を

与えることが確認された. 特に, 堤体下流端付近に弱層が存在しプラグを設置しない場合には, 下流端に大きな応力集中が生じる一方, プラグを設置することによって, 下流端の応力集中が解消されることが確認された.

置換プラグの効果としては, 下流弱層モデルの実験結果では, プラグを設置することによって荷重を伝達する面積が拡大し, 応力が分散される効果(接地面積の増大効果)が現れたものと考えられる. また中央弱層モデルの実験結果では, 弱層部に剛性の高いプラグが挿入されることによって弱層周辺岩盤の弱層方向への変形が抑えられる効果が現れたものと考えられる.

参考文献

- 1) 谷 和夫・龍岡 文夫: 砂地盤上の帯基礎の底面の摩擦角測定に用いるロードセルの試作とその特性について, 第40回土木学会年次学術講演会講演集, pp. 775-776, 1985
- 2) 日本大ダム会議: 改訂ダム設計基準, 日本大ダム会議, 1971.
- 3) 飯田隆一: コンクリートダムの設計法, 技報堂出版, pp. 147 - 152, 1992.