

置換プラグ処理を考慮した重力ダム模型実験と剛体安定解析によるプラグ効果の検討

中島 伸一郎¹・足立 紀尚²・岸田 潔³・櫻井 陽平⁴・伊豆 好弘⁵

¹学生会員 工修 京都大学博士課程3年 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー会員 Ph. D., 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工博 京都大学助手 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴学生会員 京都大学修士課程2年 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵正会員 近畿コンクリート工業株式会社 (元 関西電力株式会社) (〒564-0011 吹田市岸部南1丁目2-1)

重力ダム基礎岩盤の弱層処理工法である置換プラグ処理が基礎岩盤の安定性に及ぼす効果を把握するため、弱層・プラグを考慮した重力ダム模型実験を行なった。実験では弱層位置およびプラグ深さを変化させた。実験の結果、プラグの設置により弱層周辺岩盤の変形が抑制され、応力分布が弱層の無い場合に近づく効果が確認された。弱層が堤敷下流端付近に存在する場合には、基礎岩盤の破壊強度の低下は著しいが、プラグの設置によって強度は上昇し弱層が無い場合とほぼ同等になることが確認された。模型実験の条件に対して剛体安定解析を行ない、応力分布、荷重分担および想定すべり面に関して実験結果との比較を行ない、剛体安定解析における仮定の妥当性について検討を行なった。

Key Words : dam foundation, fault, concrete plug, modeling test, force distribution ratio, shear friction factor

1. はじめに

近年、良好なダムサイトが減少しており、断層破砕帯や変質帯などの比較的大規模な弱層を含む基礎岩盤上への重力ダム建設の機会が増加している。置換コンクリートプラグ処理(以下、置換プラグ)は、弱層の一部をコンクリートで置換することによって基礎岩盤のせん断抵抗力を増強するとともに、堤体から堅岩への荷重伝達を円滑化させる弱層処理工法である。

置換プラグの設計では、プラグの深さや形状が問題となる。プラグ深さの検討方法としては Shasta 公式^{1)~3)}が有名であるが、この公式は弱層の変形性によって堤体内に発生する応力に着目したものであるため、この公式によって算定されたプラグ深さで基礎岩盤の安定性が確保されている保証はない⁴⁾。石井ら⁵⁾は、光弾性模型実験および石膏模型実験を行ない、堤敷下流端付近に弱層が存在する場合には基礎岩盤内の応力状態が悪化し、Shasta 公式のように堤体応力に着目したプラグ設計では危険な場合があること、そのため堤敷下流端付近の弱層に対しては

ダム高さの 20~30%に達する深さのプラグを要することもあることを明らかにした。また、荒川・小川⁶⁾は堤体下流端付近に上流落ちの弱層が存在する場合について FEM による数値解析を行い、下流端付近の弱層は堤体上流端付近の水平引張応力を増大させること、またプラグの設置によってこの水平引張応力の増大が抑えられることを確認している。

プラグの設計は、ダム高さ、弱層の位置・幅・傾斜、弱層と堅岩と堤体間の相対剛性といった種々の要素を考慮したものでなければならない。しかしながら、これらの要素に関して統一的に検討された例は少なく、置換プラグが基礎岩盤の荷重伝達機構に及ぼす影響や最適プラグ形状は、現在においても必ずしも明確でない。そのため設計では、代表的な断面に対して有限要素解析等の数値解析を行い、各点のせん断安全率が所定の値以上になるようにプラグの設計が行われるのが一般的である⁵⁾。しかし、全てのダムに対して有限要素解析を行うのは煩雑であるし、また、設計が妥当なものであるのかを検討するためには、比較対象となる基準あるいは統一的な検討方法が必要であると考えられる。

本研究は、弱層の影響およびプラグの効果を明らかにし、合理的なプラグ設計のための規範を確立することを目的とし、模型実験を中心とした検討を進めている。この模型実験では、満水時におけるダム基礎岩盤の安定性だけでなく、基礎岩盤の破壊に至るまでの挙動を検討する。また、想定すべり面上のせん断摩擦安全率を検討する剛体安定解析手法のプラグ設計への適用を考慮に入れて、着岩面での応力分布(堤敷応力分布)に重点を置いて計測を行なう。

これまでに、筆者らは重力ダム模型実験手法の開発および弱層位置を考慮した実験を行なった^{7), 8)}。重力ダムの満水状態を想定した荷重条件下での堤敷応力分布に関する実験結果より、堤敷下流端付近に弱層が存在する場合には、堤敷下流端に応力集中(弱層が無い場合と比べて垂直応力が3倍程度、せん断応力が5倍程度)が生じるのに対し、堤敷中央より上流側に弱層が存在する場合には、応力集中は生じない(弱層が無い場合と比べて垂直応力が1~1.5倍、せん断応力が1~2倍)ことが明らかにされた^{7), 8)}。また、基礎岩盤の破壊強度に関する実験結果より、堤敷下流端付近に弱層が存在する場合には、荷重が満水状態に至る以前に破壊が生じる(弱層が無い場合と比べて破壊強度が1/3程度)のに対し、堤敷中央より上流側に弱層が存在する場合には、弱層が無い場合とほぼ同等の耐荷力を示すことを報告している^{7), 8)}。これらの結果より、特に堤敷下流端付近に弱層が存在する場合に置換プラグの必要性があるといえる。

本論文では、これらの結果を踏まえ、弱層へのプラグ設置を考慮した実験を行ない、その実験結果から、プラグの効果、すなわち、プラグが基礎岩盤の荷重伝達機構や破壊性状に及ぼす影響について報告する。また、基礎岩盤のせん断安定性の検討手法である剛体安定解析を模型実験の条件に適用し、実験結果と比較することでその妥当性の検討を行なう。

2. 実験概要

本模型実験は、基礎岩盤が相対的に剛な物体(堤体、プラグ)から荷重を受けた場合の応力分布、破壊性状を検討するものである。実際に、重力ダムの着岩面における荷重分布はそれ自体が未知である。そのため、実験では、岩盤供試体上に堤体模型を設置し、これに堤体自重および静水圧荷重に相当する荷重を与えることで荷重作用状況を模擬する。実際の重力ダムでは、①middle thirdの条件、②せん断摩擦安全率 ≥ 4.0 の条件、③許容圧縮応力の条件、を満

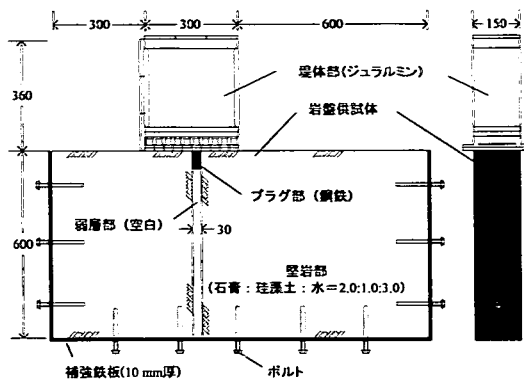


図-1 ダム模型⁷⁾(単位:mm)

表-1 岩盤供試体堅岩部の物性値

	平均値	標準偏差
一軸圧縮強度 σ_c [MPa]	3.79	0.594
圧裂強度 σ_t [MPa]	0.84	0.218
純せん断強度 τ_0 [MPa]	0.90	
内部摩擦角 ϕ [°]	40.9	
弾性係数 E [MPa]	2.13×10^3	3.77×10^2
ポアソン比 ν	0.25	0.058

たすように設計がなされ、岩盤の強度($\tau_0, \tan \phi$)からサイズ(堤高、堤敷幅)の上限が必然的に決定する。これを参考に、本模型実験では、堤敷幅を決めておき、岩盤供試体の強度($\tau_0, \tan \phi$)から、上記三条件を満たすように載荷条件を決定した。したがって、岩盤の強度に対する載荷条件という観点において、実物と模型が相似であるといえる。岩盤供試体の強度・変形性は、原位置の岩盤等級ではおおよそ C_M 級に相当する。ただし、本模型実験では、堤体・堅岩・弱層・プラグ間の相対剛性が実物よりも強調した形で表現されている。そのため、弱層なしモデルの実験で、満水状態での堤敷応力分布を弾性解と比較し、剛性比の強調が必要以上の応力集中をもたらさないかを調べた。その結果、想定した載荷状況が表現できていることを確認した。

(1) ダム模型

図-1に示すダム模型は、重力ダムの上下流鉛直断面(2次元)を模擬している。岩盤供試体には、石膏、珪藻土および水を2.0:1.0:3.0(重量比)で混合したものを用いた。打設後約72時間で脱型し、乾燥炉で7日間乾燥した後、自然冷却して実験に用いた。堅岩部の強度・変形特性については、実験終了毎に岩盤供試体からコアを採取し、一軸圧縮試験(5本、直径50 mm×高さ100 mm)、圧裂試験(6本、直径50 mm×高さ30 mm)を行い、一軸圧縮強度 σ_c 、弾性係数 E 、ポアソン比 ν 、圧裂強度 σ_t を求めた。また、一軸圧縮試験および圧裂試験の破壊応力円の共通接線(直

線)を破壊規準線とし、純せん断強度 τ_0 、内部摩擦角 ϕ を求めた。材料試験の結果得られた堅岩部材料の平均的な物性値とばらつきを表-1に示す。この物性値は、原位置の岩盤等級としてはおおよそC_M級岩盤に相当する⁹⁾。

弱層部は、岩盤供試体内に幅30 mm (堤敷幅の10%)の隙間を設け、これを弱層と想定した。ダム軸に平行な弱層を想定しており、図-1の奥行方向、すなわちダムの左右岸方向には貫通する形で設けている。実際のダム基礎岩盤内の弱層が空白であることはありえないが、弱層部の強度の低さおよび変形性の大きさを極端に表現することで、弱層が基礎岩盤全体の変形特性および強度特性に及ぼす影響を明確に把握することが可能である。

堤体部はジュラルミンボックス (高さ360mm×堤敷幅300 mm×奥行150mm)で、その底部には10個の2方向ロードセル (後述)が設置されている。堤体部の高さとの比1:0.83は、実ダムの基本三角形断面 (転倒に対する安定性から定まる断面、堤高:堤敷幅=1:0.8)を参考に決定している¹⁰⁾。堤体部と岩盤供試体はエポキシ系接着剤によって接着する。この接着強度は岩盤供試体のせん断強度よりも強く、破壊は岩盤側に発生することを確認している^{7),8)}。ジュラルミンの弾性係数 (7.1×10^4 MPa)は、実物のダムコンクリートの弾性係数 (2.5×10^4 MPa程度)よりも若干高いが、剛性差による過度の応力集中等は見られず、想定された載荷状況が表現されることを確認している^{7),8)}。

プラグ部は鋼鉄 (弾性係数 2.0×10^5 MPa)によって表現する。実物ダムのプラグは堤体部と同じコンクリート (弾性係数 2.5×10^4 MPa程度)であるが、本実験では、プラグの剛性を強調し、プラグと堅岩部との境界面における応力集中等も含めて検討することにした。また、実際のダムでは堤体とプラグとが一体として挙動すると考えられることから、プラグ部は堤体部底面にネジで固定する。

(2) 実験パターン

表-2に実験パターンを示す。弱層の影響は、弱層の幅・傾斜・変形性によっても異なるが、本実験の主眼はプラグの効果を把握することにあることから弱層幅・傾斜・変形性は固定し、弱層位置とプラグ深さを变化させた。弱層位置は、堤敷上流端付近 (U:上流弱層モデル)、堤敷中央 (C:中央弱層モデル)、堤敷下流端付近 (D:下流弱層モデル)に設定した。プラグ深さは、0 mm (プラグなし)、10 mm、30 mm、60 mmとした。

表-2 実験パターン

上流	300 mm	下流	モデル名	弱層位置 l [mm]	プラグ深さ d [mm]
弱層なし			B	—	—
上流弱層モデル			U-0	45	0
			U-60	45	60
中央弱層モデル			C-0	135	0
			C-10	135	10
			C-30	135	30
			C-60	135	60
			D-0	255	0
下流弱層モデル			D-10	255	10
			D-30	255	30
			D-60	255	60

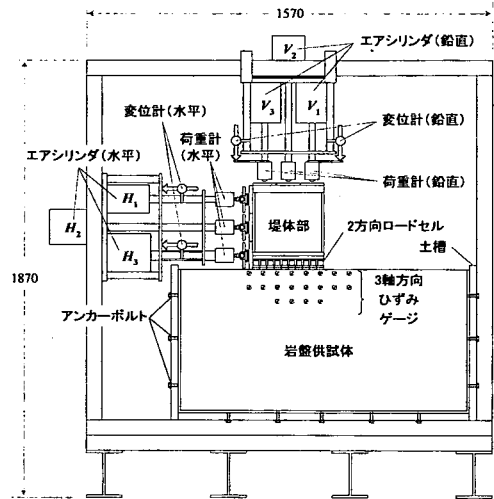


図-2 重力ダム模型実験装置⁷⁾ (単位: mm)

(3) 実験方法

図-2に重力ダム模型実験装置を示す^{7),8)}。土槽にダム模型をセットし、鉛直方向、水平方向から3本ずつのエアシリンダで載荷を行う。岩盤供試体の上流・下流端面と底面はアンカーボルトによって土槽に固定される。岩盤供試体の側面については、完全フリーで実験を行なった。これは、岩盤供試体側面にひずみゲージを貼付するため、亀裂の発生・進展を観測するためである。実際のダム基礎の側方拘束状況は、岩盤の変形係数に依存しており、平面ひずみ状態、平面応力状態のどちらに近いかは不確定的である。模型実験の条件に対して3次元の弾性有限要素解析を行ない、ダム軸方向の応力の分布を調べた。その結果、ダム模型側面の変位を拘束しなくとも、ダム軸方向の応力分布はほぼ等分布を示すことを確認している。

一方向の荷重を3分割して載荷するのは、実物ダムにおいて三角形分布する堤体自重および静水圧荷重を模擬するためであり、これらの荷重を堤体部に載

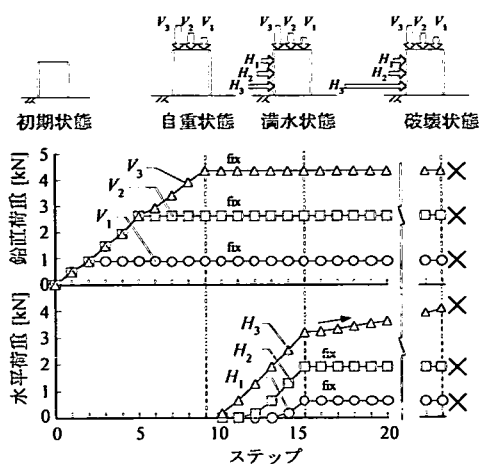


図-3 荷重ステップ

荷することで、着岩面に実際のダムと同様の荷重が作用するようにした。実際のダムには、堤体自重、静水圧荷重のほか、地震力、揚圧力、堆砂圧等の外力が想定されるが、これらの荷重は不確定な荷重であることから、本実験では考慮しない。

荷重ステップを図-3に示す。まず、ステップ0～9では、堤体自重に相当する鉛直荷重 (V_1, V_2, V_3) = (0.89, 2.63, 4.36) [kN]を段階的に載荷する。ステップ10～15では、鉛直荷重は固定し、満水位の静水圧荷重に相当する水平荷重 (H_1, H_2, H_3) = (0.64, 1.92, 3.20) [kN]を、水位の上昇を模擬する形で段階的に載荷する。以下では、鉛直荷重の載荷終了時(ステップ9)を自重状態、水平荷重載荷終了時(ステップ15)を満水状態と呼ぶことにする。満水状態での鉛直・水平荷重の大きさは、弱層の無い岩盤モデルを想定し、実ダムの形状設計と同様に、①岩盤供試体の強度 σ_0 、 $\tan\phi$ に対して堤敷沿いのせん断摩擦安全率が4.0以上、②上流端に鉛直引張応力を発生しない、という条件を満たすように決定した⁷⁾。弱層の無い岩盤供試体に対する実験から、満水状態の堤敷応力分布は、梁理論によって算出した台形分布の応力分布にほぼ等しく、実ダムと同様の荷重状況が表現できていることを確認している。満水状態以降(ステップ15～)は、鉛直荷重および水平荷重のうち上段と中段(H_1, H_2)は固定し、下段(H_3)のみを0.10 kNずつ増加させ、岩盤供試体を破壊する。ここで、 H_3 のみを増加させたのは、 H_1, H_2 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。 H_3 のみの増加は実際のダムに作用する荷重を想定したものではないため、実験で得られる破壊現象は実際の重力ダムの破壊に直結するも

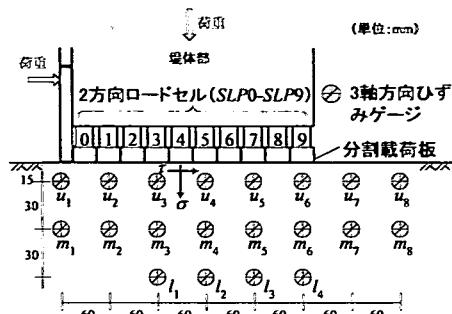


図-4 2方向ロードセル, 3軸方向ひずみゲージの計測位置

のではないが、基礎岩盤を耐荷力を調べるための一つの荷重方法ととらえ、この方法を採用した。

(4) 計測項目

載荷荷重、堤体変位(鉛直・水平方向各2点)、堤敷応力分布、岩盤供試体側面のひずみ分布、の計測を行なった。計測値はデータロガーに集めた後、GPIBボードを介してパソコンに表示・記録した。

図-4は、ダム模型の堤敷付近の拡大図である。堤敷応力分布は、堤体部底面に堤敷幅(300mm)を10分割する形で設置された2方向ロードセルによって計測する。各2方向ロードセル(SLP0～SLP9)によって計測される垂直荷重($N_{SLP0} \sim N_{SLP9}$)、せん断荷重($T_{SLP0} \sim T_{SLP9}$)を受圧面積($A = 4350 \text{ mm}^2$)で除することにより、受圧面に作用する平均的な垂直応力、せん断応力が得られる。このように求めた応力を堤敷垂直応力、堤敷せん断応力とする。

岩盤供試体側面のひずみ分布計測では、図-4に示すように、堤体直下の岩盤供試体側面20点に3軸方向ひずみゲージを貼付した(図-4中 $u_1 \sim u_8, m_1 \sim m_8, l_1 \sim l_4$)。各位置のひずみの計測値($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$)から最大主応力 σ_{max} 、最小主応力 σ_{min} および主応力方向 ϕ の算出を行った。主応力の算出では、表-1に示した弾性係数 E とポアソン比 ν を用いた。

3. 模型実験の剛体安定解析による検討

実験に先だち、模型実験の条件に対して剛体安定解析を行なってせん断摩擦安全率を算出し、弱層位置およびプラグ深さと基礎岩盤のせん断安定性との関係について検討を行った。

(1) 剛体安定解析の概要

a) せん断摩擦安全率 n_A の算出方法

図-5のように、弱層より上流の岩盤(以下、上流

岩盤)に鉛直荷重 V_u 、水平荷重 H_u が、弱層より下流の岩盤(以下、下流岩盤)に鉛直荷重 V_l 、水平荷重 H_l が、堤体から作用する場合を考える。弱層部は荷重を分担しないものとする。堤体上流端 a から角度 α で弱層に到達する面ak とプラグ底端 j から角度 θ で地表面に到達する面je をすべり面と想定すると、各すべり面に作用する垂直荷重とせん断荷重の組み合わせ (P_u, Q_u) 、 (P_l, Q_l) は力の釣合いから

$$\left. \begin{aligned} P_u &= V_u \cos \alpha - H_u \sin \alpha \\ Q_u &= V_u \sin \alpha + H_u \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} P_l &= V_l \cos \theta + H_l \sin \theta \\ Q_l &= -V_l \sin \theta + H_l \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。また、それぞれのすべり面の長さ $L_u = ak$ 、 $L_l = je$ は

$$\overline{ak} = \frac{\overline{am}}{\cos \alpha} \quad (3)$$

$$\overline{je} = \frac{\overline{ne}}{\cos \theta} \quad (4)$$

である。すべり面ak, je 上の純せん断強度を τ_0 、内部摩擦係数を f とすると、akije で構成される想定すべり面全体のせん断摩擦安全率 n は (P_u, Q_u, L_u) 、 (P_l, Q_l, L_l) を用いて、以下の式によって算出される。

$$n = \frac{(L_u + L_l)\tau_0 + (P_u + P_l)f}{Q_u + Q_l} \quad (5)$$

この n を種々の α 、 θ について求め、その最小値 $n_A = \min(n)$ を、改めてこのモデルのせん断摩擦安全率 n_A とする。

b) 想定外力

堤体部に作用する外力は、模型実験における満水状態での荷重状態 $(V_1, V_2, V_3) = (0.89, 2.63, 4.36)$ [kN]、 $(H_1, H_2, H_3) = (0.64, 1.92, 3.20)$ [kN]を想定する。堅岩部の自重は考慮しない。

c) 上流・下流岩盤の荷重分担

上流・下流岩盤に作用する鉛直荷重、水平荷重 (V_u, H_u) 、 (V_l, H_l) は次のようにして求めた。図-6(a), (b)のように、弱層が無い場合の堤敷垂直・せん断応力分布は、梁理論に基づけば台形分布を示し、力の釣合いとモーメントの釣合いから求めることができる。弱層が存在する場合、弱層部は荷重を分担しないため、図-6(c), (d)のように弱層部に相当する鉛直荷重、水平荷重を弱層中心線で2分割し、上流岩盤、下流岩盤に分担させる。その結果、上流岩盤には鉛直荷重 $V_u = V_a + V_b$ 、水平荷重 $H_u = H_a + H_b$ 、下流岩盤には鉛直荷重 $V_l = V_c + V_d$ 、水平荷重 $H_l = H_c + H_d$ が作用することになる。

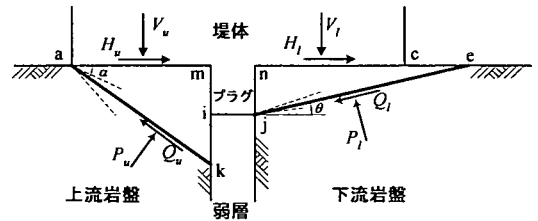


図-5 剛体安定解析の概要

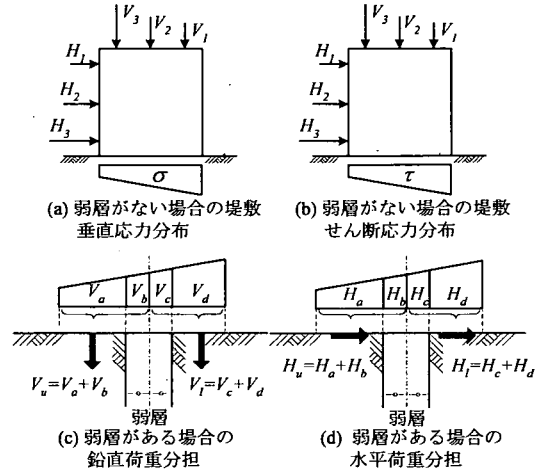


図-6 上流・下流岩盤の荷重分担

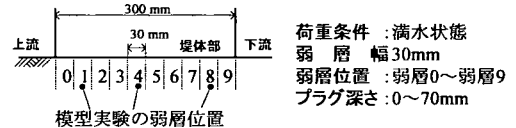


図-7 剛体安定解析の検討条件

d) 想定すべり面

想定すべり面は、図-5のように、上流岩盤では、堤敷上流端 a より、水平面からの角度 α 傾いた面を考え、角度 α を $0 \sim 90^\circ$ の範囲で変化させた。下流岩盤では、プラグ底端 j より、水平面からの角度 θ 傾いた面を考え、角度 θ を変化させた。下流岩盤において、破壊面が堤敷内に現れることは考えにくいことから、 θ は 0° を最小とし、堤敷下流端 c を通る場合を最大とした。プラグを設置しない場合すなわちプラグ深さ0 mmの場合には、下流岩盤のすべり面は堤敷沿い ne に想定した。また、弱層なしの場合には堤敷沿い ac にすべり面を想定する。

e) 検討条件

図-7に示す条件について検討を行った。すべり面のせん断強度 τ_0 および内部摩擦係数 f は表-1に示した岩盤供試体堅岩部の材料試験結果の値を用いた。

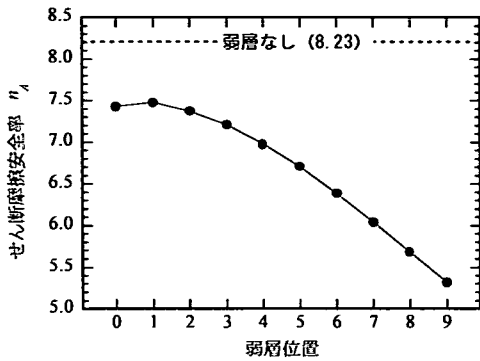


図-8 弱層位置-せん断摩擦安全率関係

弱層は、模型実験と同様に、幅30 mmでダム軸に平行かつ鉛直方向の弱層を対象とし、弱層位置は、堤敷上流端から下流端まで10ケースの検討を行った。模型実験での弱層位置である上流弱層モデル、中央弱層モデル、下流弱層モデルはそれぞれ図-7における弱層1、弱層4、弱層8に相当する。プラグ深さは0 mmから10 mm毎、70 mmまで検討した。基礎岩盤の広がり、上流、下流、深さ方向に無限に広がるものとした。

(2) 弱層位置とせん断摩擦安全率の関係

図-8は、プラグを設置しない場合の、弱層位置とせん断摩擦安全率 n_A の関係を示している。 $n_A = 8.23$ における破線は、弱層なしの場合のせん断摩擦安全率である。図-8より、堤敷内の弱層では弱層が堤敷下流端に近づくほど安全率が低下することが確認できる。過去の弱層位置を変化させた実験結果⁷⁾から、堤敷下流端に弱層が存在する場合には耐荷力が低いことが確認されており、剛体安定解析の結果はこの実験結果を表現し得ている。

(3) プラグ深さとせん断摩擦安全率の関係

図-9は、模型実験での弱層位置、すなわち、上流弱層、中央弱層、下流弱層に対して、プラグを設置した場合の、プラグ深さ d とせん断摩擦安全率 n_A の関係を示している。図-9より、プラグが深くなるに従いせん断摩擦安全率は上昇し、いずれは弱層なしの場合のせん断摩擦安全率を上回る。プラグの設置によってせん断摩擦安全率が弱層なしの場合と同等になれば、せん断安定性に対するプラグの効果は十分であるといえる。そこで、せん断摩擦安全率が弱層の無い場合と同等になるプラグ深さを必要プラグ深さと定義する。

図-10は、模型実験の各弱層位置での必要プラグ深さを示す。図-10より、弱層が堤敷下流端に近づくほ

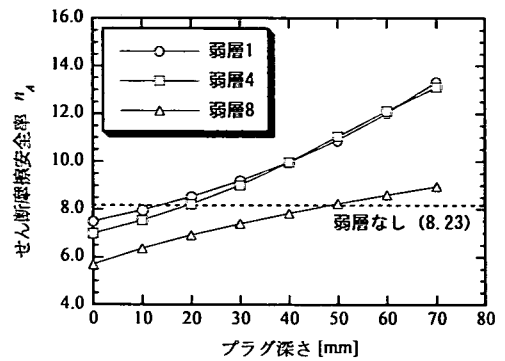


図-9 プラグ深さ-せん断摩擦安全率関係

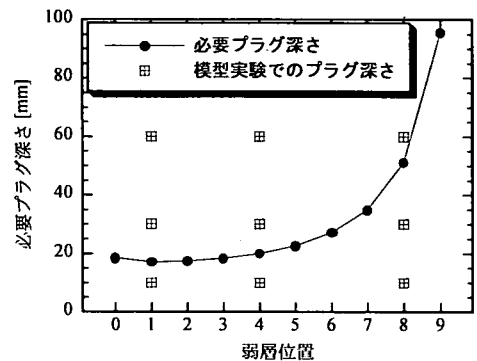


図-10 各弱層位置での必要プラグ深さ

ど必要プラグ深さは深くなることを確認できる。本研究で実施した模型実験のプラグ深さ (10, 30, 60 mm) と照らし合わせると、上流、中央弱層ではプラグ深さ30, 60 mmの場合にせん断安定性が確保されていること、下流弱層ではプラグ深さ60 mmでせん断安定性が確保されることが想定される。

剛体安定解析によって得られた模型実験各ケースのせん断摩擦安全率 n_A とその時の想定すべり面を表-3にまとめて示す。

4. 実験結果

(1) 満水状態での堤敷応力分布

堤体部底面に設置した2方向ロードセルの計測値から、満水状態における堤敷応力分布を示し、弱層やプラグの影響について検討する。応力の値自体は、岩盤供試体の変形性により変化するので、以下では、弱層なしモデルの応力分布と比較する形で、弱層やプラグの影響を議論する。

a) 弱層の有無および弱層位置による影響

図-11⁷⁾は、プラグを設置しない実験ケース

表-3 模型実験各ケースのせん断摩擦安全率と想定すべり面

	プラグなし	プラグ 10mm	プラグ 30mm	プラグ 60mm
上流弱層	$n_A=7.5, \alpha=20.5^\circ$	$n_A=8.0, \alpha=21.6^\circ, \theta=2.4^\circ$	$n_A=9.2, \alpha=24.1^\circ, \theta=7.1^\circ$	$n_A=12.0, \alpha=28.8^\circ, \theta=14.0^\circ$
中央弱層	$n_A=7.0, \alpha=26.6^\circ$	$n_A=7.5, \alpha=27.5^\circ, \theta=3.8^\circ$	$n_A=9.0, \alpha=29.7^\circ, \theta=11.3^\circ$	$n_A=12.1, \alpha=33.3^\circ, \theta=16.8^\circ$
下流弱層	$n_A=5.7, \alpha=30.4^\circ$	$n_A=6.3, \alpha=31.5^\circ, \theta=15.9^\circ$	$n_A=7.4, \alpha=33.0^\circ, \theta=25.2^\circ$	$n_A=8.6, \alpha=34.4^\circ, \theta=32.4^\circ$

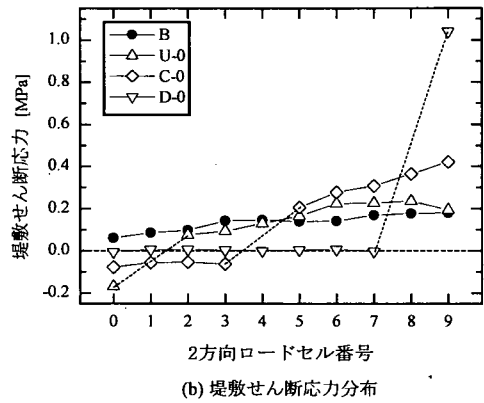
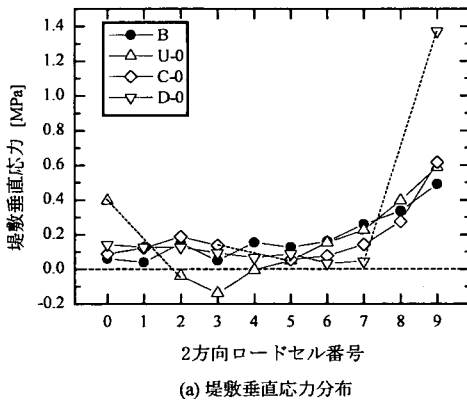


図-11 プラグを設置しないモデルの満水状態 ($\Sigma H=5.74$ kN) での堤敷応力分布 (ただし、Model D-0は $\Sigma H=4.57$ kN) 7)

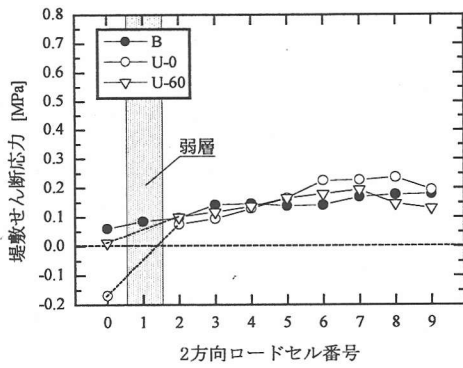
(Model B, U-0, C-0, D-0) の満水状態での堤敷垂直応力、せん断応力分布を示している。横軸は図-4で示した2方向ロードセルの番号に相当し、番号が小さい方が上流側、大きいほうが下流側である。弱層部には荷重が作用しないため、その部分(例えば上流弱層モデルならば2方向ロードセル番号1)の応力は表示されない。堤敷垂直応力は圧縮を正に、堤敷せん断応力は着岩面に作用する下流向きのせん断応力を正としている。なお、下流弱層モデル(Model D-0)では、自重状態から満水状態までの過程で堤敷下流端に破壊が発生したため、図-11では破壊発生直前($\Sigma H=4.57$ kN)の値を示している。

図-11より、堤敷応力の分布形状は弱層の有無および弱層位置によって大きく異なる。下流弱層モデル(Model D-0)では垂直応力・せん断応力とも下流端に著しく集中する一方、上流岩盤にはほとんど応力が発生していない。中央弱層モデルおよび上流弱層

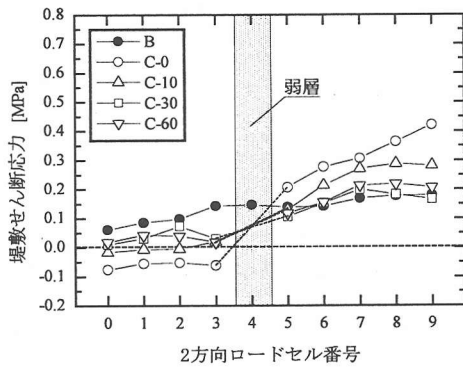
層モデル(Model C-0, U-0)では、下流弱層モデルのような応力集中は見られないものの、図-11(b)より、上流岩盤において、負のせん断応力すなわち岩盤表面上流向きのせん断応力が発生している。この負のせん断応力は、自重状態、すなわち鉛直荷重の載荷終了時点で最も大きい値を示しており、堤体部下下の岩盤が、鉛直荷重によって弱層方向へと変形するために生じているものと考えられる。

b) プラグによる効果

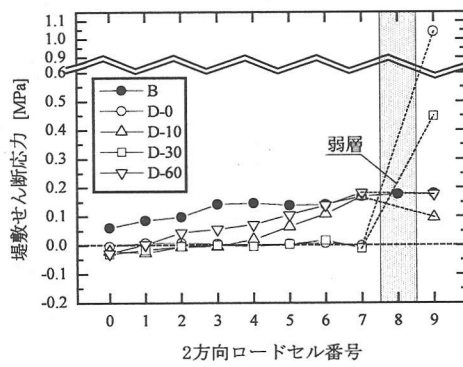
各弱層モデルに対しプラグを設置した場合の満水状態での堤敷垂直応力分布を図-12に、堤敷せん断応力分布を図-13に示す。図-12(c)、図-13(c)より、下流弱層モデルでは、プラグ設置によって下流端における垂直応力、せん断応力の集中が解消されることが確認できる。下流弱層モデルでは、プラグなしの場合に堤敷下流端に集中する荷重の一部がプラグ側面で分担されるため、下流端の応力集中が解消され



(a) 上流弱層モデル

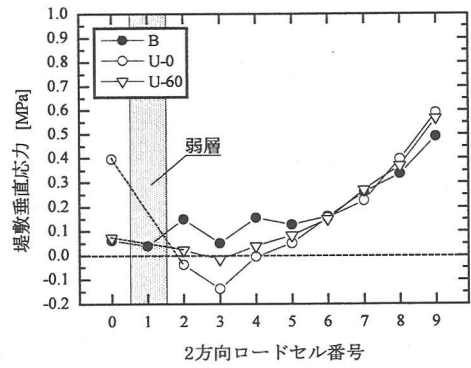


(b) 中央弱層モデル

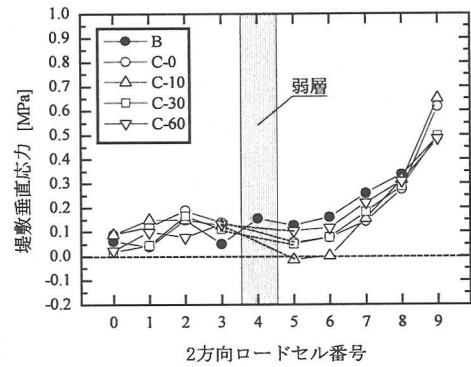


(c) 下流弱層モデル

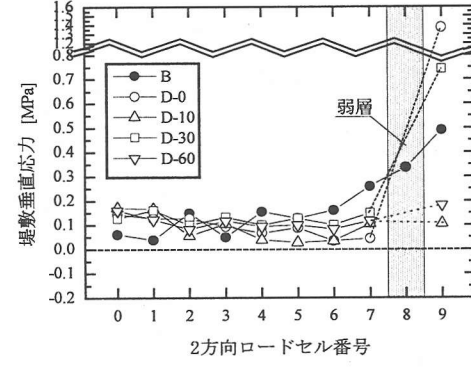
図-13 満水状態での堤敷せん断応力分布



(a) 上流弱層モデル



(b) 中央弱層モデル



(c) 下流弱層モデル

図-12 満水状態での堤敷垂直応力分布

るものと考えられる。このようなプラグによる荷重分担効果はプラグが深くなるほど顕著に現れると考えられるが、図-12(c)、図-13(c)では、プラグが深くなっても、必ずしも下流端の応力は小さくならず、プラグ深さによる効果は明確ではない。

図-13(a)、(b)より、中央弱層・上流弱層モデルではプラグの影響はせん断応力分布に顕著に現れている。プラグを設置しない場合 (Model C-0, U-0) に上流岩盤に発生する負のせん断応力が、プラグの設置によって正の方向へと移動するとともに、下流岩盤の正

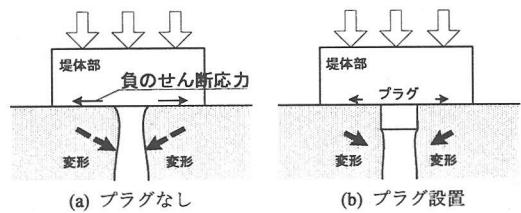


図-14 周辺岩盤の変形により上流岩盤に生じる負のせん断応力とプラグによる変形抑制効果

のせん断応力は小さくなり、弱層なし (Model B) の堤敷応力分布に近づいている。これらの傾向はプラグが深くなるに従って顕著に現れている。

中央弱層モデルおよび上流弱層モデルでプラグを設置しない場合に、上流岩盤で負のせん断応力が現われるのは、図-14 (a)に示すように、鉛直載荷時に弱層周辺岩盤が弱層方向へと変形するためであると考えられる。これに対し、プラグを設置した場合には、図-14(b)に示すように、弱層周辺岩盤の変形が抑えられる。その結果、上流岩盤に発生する負のせん断応力が小さくなるとともに、下流岩盤のプラスのせん断応力が小さくなるものと考えられる。

(2) 満水状態での岩盤内応力分布

図-4に示した岩盤供試体側面20点に貼付した3軸方向ひずみゲージの計測値から、各位置での最大主応力 σ_{max} 、最小主応力 σ_{min} とその方向 ϕ_p を算出した。

図-15は、弱層なしモデル (Model B) と、中央弱層モデル、下流弱層モデルにプラグを設置しない場合 (Model C-0, D-0) と60mmのプラグを設置した場合 (Model C-60, D-60) の満水状態での主応力分布を示す。ただし、下流弱層モデルプラグなしの実験 (Model D-0) では、満水状態以前に堤敷下流端に破壊が発生したため、図-15(b)では破壊発生直前の分布を示している。

図-15(b)より、下流弱層モデルプラグなしの場合、堤敷下流端に著しい応力集中が発生していることが確認できる。石井ら⁵⁾、荒川・小川⁶⁾によれば、堤体下流端付近に弱層が存在する場合には、堤体上流端付近の水平引張応力が増大する。一方、図-15(b)より、本実験の下流弱層モデルの堤体上流端付近には大きな引張応力の発生は確認できない。石井ら⁵⁾、荒川・小川⁶⁾が対象としたのは、弱層が堤体下流端を含むような場合であり、本実験のように、堤体下流端より堤敷幅の10%程度内側に弱層が存在する場合には、上流端の引張応力は問題とならないと考えられる。

図-15(d)より、中央弱層プラグなしの場合には、下流岩盤に鉛直方向の引張応力が発生しているが、これは、堤体部の水平変位によって弱層面が面に沿って引張られているためである。

図-15(c)より、下流弱層へのプラグの設置の影響を見ると、堤敷下流端への応力集中が解消されるとともに、プラグ周辺部で水平方向の圧縮応力が発生していることが確認できる。図-15(e)より、この傾向は中央弱層モデルの場合も同様で、プラグの設置によって、岩盤の弱層方向への変形が抑制されるため、岩盤内に水平方向の圧縮応力が発生していることが

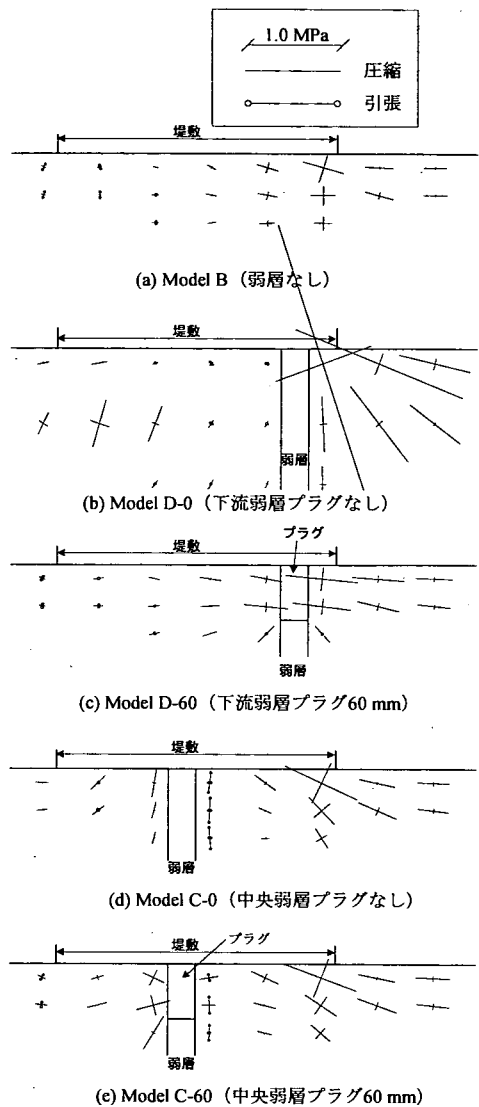


図-15 満水状態での岩盤内応力分布

確認できる。

(3) 破壊性状

図-3の荷重ステップで示したように、本実験では、満水状態から岩盤供試体を破壊させる方法として、3本の水平荷重 (H_1, H_2, H_3) のうち下段 (H_3) のみを徐々に増加させていく方法を採用した。図-16は、満水状態から水平荷重を増加させていったときの、鉛直荷重と水平荷重の合力の作用位置の変化を示している。合力の作用位置は満水状態においてほぼミドルサードの位置にあり、その後の水平荷重の増加に伴って下流側へと移動していく。

いずれの実験ケースにおいても、基礎岩盤の破壊

は進行的に発生した。図-17は、弱層なしモデル (Model B) の岩盤供試体側面に貼付した3軸方向ひずみゲージのうち、堤敷上流端 (u_1) 堤敷中央 (u_3) 堤敷下流端 (u_6) のものから算出した主応力3成分 (最大主応力 σ_{max} , 最小主応力 σ_{min} , 最大主応力方向 ϕ_{pmax}) の変化であり満水状態以降の結果である。応力は圧縮を正とする。満水状態以降、各成分は連続的に変化するが、水平荷重 $\Sigma H = 14.9$ kN の時点で、上流端 (u_1) の主応力方向 ϕ_{pmax} が 30° から 60° へと急激に変化するとともに、最小主応力 σ_{min} が不連続的に引張からゼロへと変化していることが確認できる。この直後に岩盤供試体の堤敷上流端付近に下流落ち方向の亀裂の発生が確認された。その後の水平荷重の増加に伴って亀裂が進行し、水平荷重 $\Sigma H = 20.5$ kN で岩盤供試体は完全な破壊に至った。

本研究では、上述のように基礎岩盤内に最初に破壊が発生する時点 (局所破壊発生時点) に着目し、基礎岩盤の耐荷力、破壊形態について結果の整理を行った。

図-18は、実験各ケースの局所破壊発生時の水平荷重 (以下、局所破壊発生荷重) についてまとめたものである。図中の破線は満水状態の水平荷重を示す。また、弱層なしモデルの局所破壊発生荷重を帯で示している。

下流弱層モデルについては、プラグを設置しない場合には満水状態以前に堤敷下流端に破壊が発生しており、耐荷力は著しく低い。しかしながら、プラグを設置することで明らかに耐荷力が上昇しており、プラグ深さ10 mmであっても弱層なしの場合とほぼ同等の局所破壊発生荷重となることが確認できる。中央弱層モデルおよび上流弱層モデルについては、プラグを設置しない場合でも弱層なしの場合と同等かそれ以上の局所破壊発生荷重を示している。これらのモデルに対しては、プラグを設置しても耐荷力は上昇せず、逆に低下する結果も見られ、プラグが基礎岩盤の耐荷力に及ぼす効果は明らかでない。

局所破壊によって発生する亀裂は、図-19に示すように、上流端から鉛直方向あるいは下流落ち方向に発生するタイプIIの亀裂と、下流岩盤で下流上がりに発生するタイプIの亀裂の2種類に分類された。上流端で破壊 (タイプII) が発生する場合には上流端で発生した引張応力が急激に解放されるのが観測されており引張破壊が生じているものと考えられる。

表-4は、実験各ケースで局所破壊発生時に生じた破壊のタイプをまとめたものである。破壊形態が複数記載されているものは、実験を複数回行ったケースである。表より、下流弱層モデルプラグなしおよびプラグ10mm (Model D-0, D-10) と中央弱層プラ

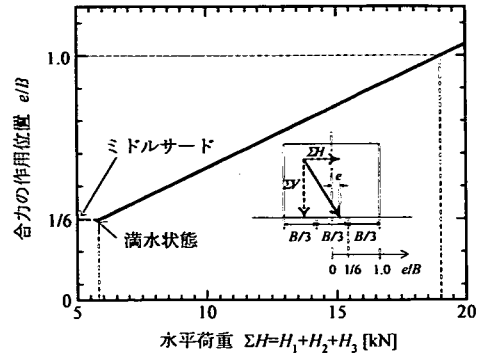


図-16 満水状態以降の水平荷重の増加に伴う合力の作用位置の変化

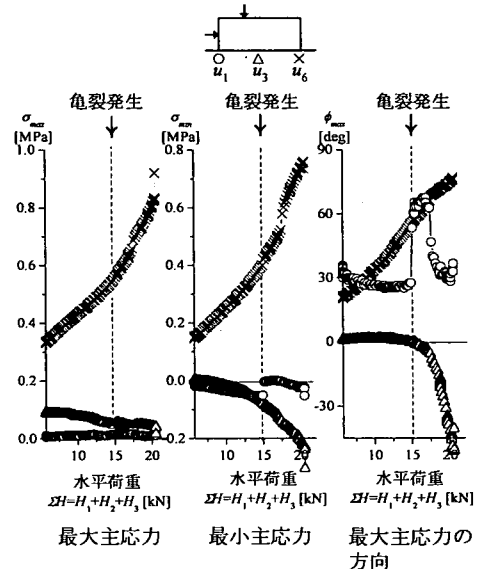


図-17 満水状態以降の岩盤内応力の変化 (Model B)

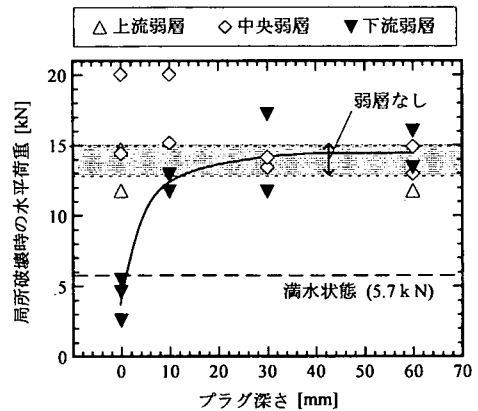


図-18 局所破壊発生荷重

グなし (C-0) の1ケースにおいて、弱層の下流域でのせん断破壊が生じたのに対し、それ以外のケースでは弱層なしの場合 (Model B) と同様に上流端から

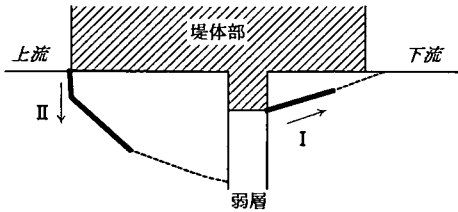


図-19 局所破壊発生時に生じる亀裂のタイプ

表-4 実験各ケースの局所破壊発生時に生じた亀裂

		弱層なし	上流弱層	中央弱層	下流弱層
プラグ 深さ [mm]	0	II II	II II	I II	I I I
	10		—	II II	I I
	30		—	II II	II II
	60		II	II II	II II

複数のインデックスは複数の実験結果

の引張破壊であるタイプIIの破壊が生じた。局所破壊発生荷重も考慮すると、下流岩盤の堤敷面積が不足し、下流岩盤へ荷重がスムーズに伝達されない場合には、下流岩盤でのせん断破壊が生じるのに対し、下流岩盤の堤敷面積が十分に広いが、プラグによって荷重のが分担される場合には、下流岩盤への荷重がスムーズに伝達されるために、弱層なしモデルと同様に堤敷上流端からの引張破壊が生じるものと考えられる。

5. 剛体安定解析と模型実験結果との比較

第2章で行なった剛体安定解析による検討では、①堤敷応力分布は弱層やプラグの有無に拘わらず台形分布とし、②弱層に作用すべき荷重を弱層中心位置で2分して上下流岩盤に振り分け、③すべり面を上流岩盤では上流端から下流落ち方向に、下流岩盤ではプラグ底端から下流上流りに想定して、満水状態におけるすべり面全体のせん断摩擦安全率の算出を行った。

(i) 応力分布の仮定の妥当性

図-11～図-13に示したように、弱層が存在しプラグを設置しない場合の満水状態での堤敷応力分布は、弱層なしの場合とは大きく異なり、また、弱層位置によっても異なる。しかしながら、プラグを設置した場合には、いずれの弱層位置でも堤敷応力分布は弱層なしの場合に近づくことが確認された。したがって、満水状態の堤敷応力分布に関し、プラグなしのモデルに対しては、台形分布を仮定することはできないが、プラグを設置したモデルについて検討す

る際には台形分布と仮定することが可能であると言える。

(2) 荷重分担の仮定の妥当性

満水状態での堤敷応力分布に関する実験結果から、上流岩盤と下流岩盤の荷重分担を算出し、台形分布と仮定した応力分布を弱層位置で2分した場合の荷重分担との比較を行なった。図-20は、下流岩盤の鉛直荷重分担率 α_V および水平荷重分担率 α_H を、弱層位置を横軸にとって表示したものである。

実験結果からの荷重分担の算出にあたっては、図-21に示すように、プラグ部の鉛直荷重は上流岩盤と下流岩盤に等しく作用するものとし、水平荷重については下流岩盤のみに作用するものとした。すなわち、弱層が2方向ロードセル番号 i の直下に存在する場合には、下流岩盤の鉛直荷重分担率 α_V および水平荷重分担率 α_H は次式によって算出した。

$$\alpha_V = \frac{\sum_{k=i+1}^9 N_{SLPk} + \frac{N_{SLPi}}{2}}{\sum V} \quad (6)$$

$$\alpha_H = \frac{\sum_{k=i+1}^9 T_{SLPk} + T_{SLPi}}{\sum H} \quad (7)$$

ここで、 N_{SLPk} 、 T_{SLPk} は、それぞれ番号 k の2方向ロードセルで計測された堤敷垂直荷重および堤敷せん断荷重である。 i は弱層部に相当する2方向ロードセルの番号である。 $\sum V$ は、鉛直載荷荷重の総和、 $\sum H$ は、水平載荷荷重の総和である。

台形分布と仮定した応力分布からの荷重分担の算出では、弱層部に作用すべき荷重が、上流岩盤・下流岩盤にどのような比率で分担されるかが不明なため、1) 弱層中心で分割した場合 ($V_i = V_c + V_d$, $H_i = H_c + H_d$)、2) 弱層の上流端で分割した場合 ($V_i = V_b + V_c + V_d$, $H_i = H_b + H_c + H_d$)、3) 弱層の下流端で分割した場合 ($V_i = V_d$, $H_i = H_d$) の荷重分担率を算出し、図-20には帯として表示した。

図-20(a)より、プラグなしの場合の鉛直荷重分担率は、中央弱層モデルでは台形分布からの計算値とほぼ一致するが、上流弱層モデルでは計算値よりも低く、下流弱層モデルでは計算値よりも高い。これは、荷重を支持すべき堤敷端部に弱層が存在するためであり、面積が狭い方、すなわち上流弱層モデルでは上流岩盤に、下流弱層モデルでは下流岩盤に過大な荷重が作用する。下流弱層モデルでは特にこの影響が大きい。プラグを設置した場合には、プラグによる変形抑制効果により下流弱層モデルの鉛直荷重分担率は減少し、台形分布からの計算値に近づくことが確認できる。

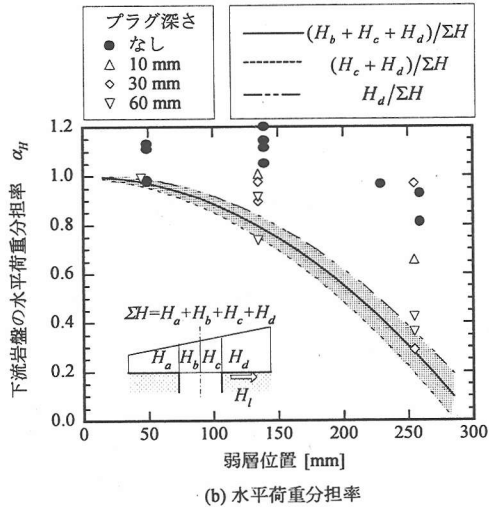
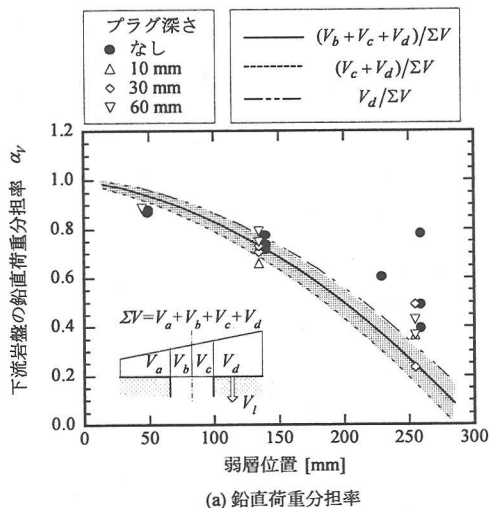


図-20 下流岩盤の荷重分担率

図-20(b)において、プラグなしの場合の水平荷重分担率は、100%以上となっているが、これは、図-14で示したように、弱層周辺岩盤が鉛直荷重によって弱層方向へと変形し、上流の堤敷に負のせん断応力が発生するためである。プラグの設置により、水平荷重分担率は減少し、台形分布からの計算値に近づくが、プラグ深さによってバラツキが見られる。以上より、弱層が存在しプラグを設置しない場合の荷重分担率が、台形分布からの計算値と大きく異なるのは、弱層の有無および弱層位置によって、外力に対する基礎岩盤全体の变形特性に差が生じるためである。一方、プラグの設置により台形分布からの計算値に近づくのは、プラグによる变形抑制効果によって、基礎岩盤の变形性状が弱層が無い場合に近づくためである。したがって、弱層がある場合の荷重分担を算出するためには、第2章で行なったように台形分布と仮定した応力分布を弱層位置で2分するという方法では不十分であり、弱層による基礎岩盤全体の变形特性の差異およびプラグの深さに応じた变形抑制効果を考慮する必要があると言える。

図-22は、実験結果から満水状態での下流岩盤の鉛直荷重分担率 α_v 水平荷重分担率 α_h を、プラグ深さとの関係で示したものである。図より、今回の実験結果にはバラツキが大きく、弱層位置による变形特性の差異およびプラグ深さによる变形抑制効果を評価することは困難である。

(3) 想定すべり面の妥当性

第2章の剛体安定解析では、上流岩盤、下流岩盤にそれぞれすべり面を想定し、すべり面全体としての

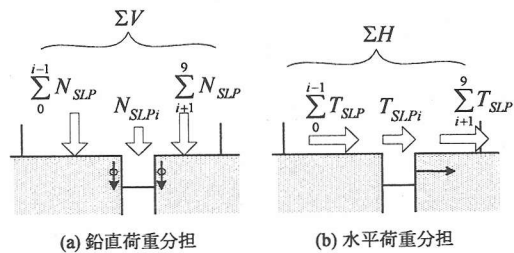
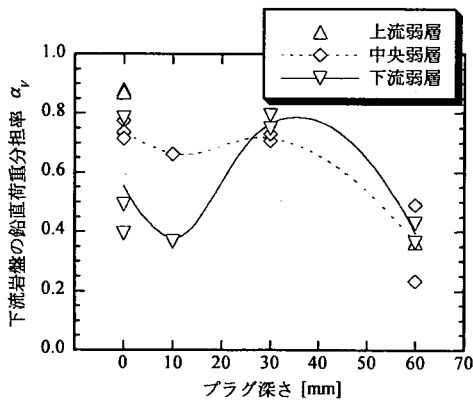
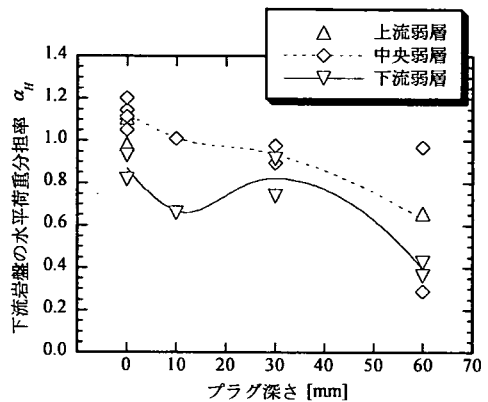


図-21 実験結果からの荷重分担率の算出方法

せん断摩擦安全率を算出した。これに対し、実験では上流端からの引張破壊が生じたものが多く、想定している破壊形態が異なるため、剛体安定解析結果と実験結果を一概に比較することは出来ない。しかしながら、図-10と図-18を比較すれば、たとえば、上流弱層モデルでは、剛体安定解析では30 mm以下のプラグが必要であると算出されたのに対し、実験ではプラグなしであっても弱層が無い場合とほぼ同等の耐荷力を示している。また、下流弱層モデルプラグ無しの場合、剛体安定解析では満水状態でせん断摩擦安全率6.0と算定されたが、実験では満水状態以前に破壊が生じるなど、実験結果と剛体安定解析との間には差が見られる。これは、1) 前項で述べたように、剛体安定解析で想定した上流・下流岩盤の荷重分担が、実験で生じた荷重分担と異なること、2) 必要プラグ深さを「弱層無しモデルと同等のせん断摩擦安全率 ($n_A = 8.23$) を有するプラグ深さ」としたが、堤敷上流端での引張破壊を考慮すれば弱層無しモデルの破壊に対する安全率(せん断、引張を含む)自体がさらに低い値となり得ること、3) 剛体



(a) 鉛直荷重分担率



(b) 水平荷重分担率

図-22 プラグ深さによる下流岩盤荷重分担率の変化

安定解析によるせん断摩擦安全率が想定すべり面全体の平均的な安全率であるため、これによって所定の安全率を確保していても、下流弱層モデルの実験における堤敷下流端のように応力集中によって局所的に安全率が1.0を下回る可能性があることによる。

(4) 本実験における必要プラグ深さの検討

実験における局所破壊発生に関する結果によれば、堤敷上流端での引張によって破壊する場合には、弱層位置やプラグ深さに拘わらず、弱層が無い場合とほぼ同等の耐荷力を示すこと、一方、下流岩盤の堤敷面積が狭く、下流岩盤への荷重伝達がスムーズに行かない場合には下流岩盤におけるせん断破壊が発生し、弱層無しの場合よりも耐荷力が低下する。この結果を踏まえれば、弱層無しモデルと同等の耐荷力を有するためには、下流岩盤でのせん断安定性を確保すれば良いといえる。

表-5は、実験各ケースの局所破壊時点での下流岩盤におけるせん断摩擦安全率 n_{M} を示している。せん断摩擦安全率が複数記載されているものは、実験を複数回行ったケースである。なお、せん断摩擦安全率の算出では、2方向ロードセルの計測値から下流岩盤に作用する荷重を求め、プラグ底端より角度 θ のすべり面を想定した。表-5において太字で示すのは下流岩盤でせん断破壊が実際に生じたケースである。表-5より、局所破壊発生時に下流岩盤のせん断摩擦安全率が1.0に近いのは、下流岩盤でのせん断破壊を生じた下流弱層モデルのプラグなし (Model D-0) とプラグ10 mm (Model D-10)、中央弱層モデルのプラグなし (Model C-0) とプラグ10 mm (Model C-10) である。一方、上流端から引張破壊を生じたモデルでは下流岩盤でのせん断安定性は確保されていたことが確認できる。そこで、以下では、弱層な

表-5 局所破壊発生時の下流岩盤せん断摩擦安全率

		上流弱層	中央弱層	下流弱層
プラグ深さ [mm]	0	2.6, 2.9	1.8, 1.5	1.4
	10	—	1.5	1.8
	30	—	2.8, 2.4	3.0, 4.4
	60	4.4	3.6, 4.2	6.0, 5.8

複数の安全率は複数の実験結果

しモデルの局所破壊発生時の荷重 ($\Sigma H = 14.9$ kN) に対して、下流岩盤のせん断摩擦安全率 n_{M} が一定以上であるようなプラグ深さが本実験における必要プラグ深さであると考えてプラグ深さについての検討を行なう。

前々項で述べたように、下流岩盤の荷重分担率はプラグ深さによって異なる。しかしながら、今回の実験結果から変形抑制効果を定量的に評価することが困難であるため、プラグを設置しない場合の荷重分担を用いて必要プラグ深さについて検討する。この検討は、プラグによる変形抑制効果を考慮しない場合の検討であるため、下流岩盤にとっては最も過酷な条件下での検討に相当する。

図-23、図-24は、実験各ケースの水平荷重の増加に伴う下流岩盤の鉛直荷重分担率、水平荷重分担率の変化を示している。図-23には、応力分布を台形分布仮定し、弱層に作用するべき荷重を弱層中心で2分して計算した鉛直荷重分担率を破線によって示す。図-23より、満水状態以降の鉛直荷重分担率の増加勾配は、プラグ深さに拘わらず台形分布を弱層中心で分割した場合の勾配にほぼ等しい。また、図-24より、いずれのモデルにおいても、水平荷重分担率は、満水状態以降ほとんど変化しないことが確認できる。これらを踏まえて、上流弱層、中央弱層および下流弱層モデルの満水状態以降の荷重分担率を図-23、図

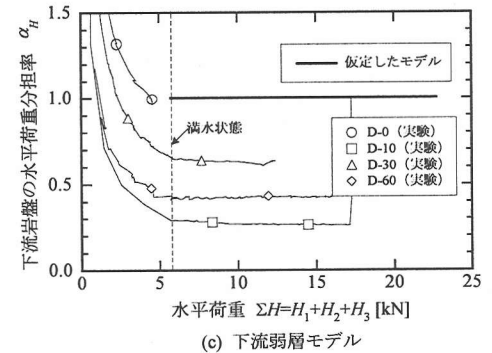
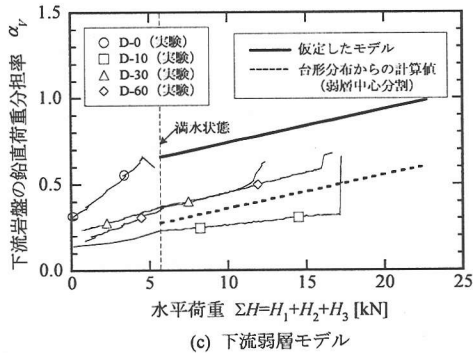
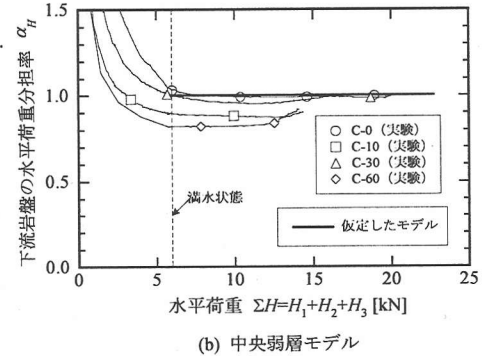
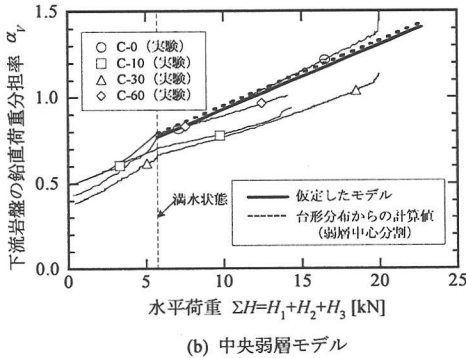
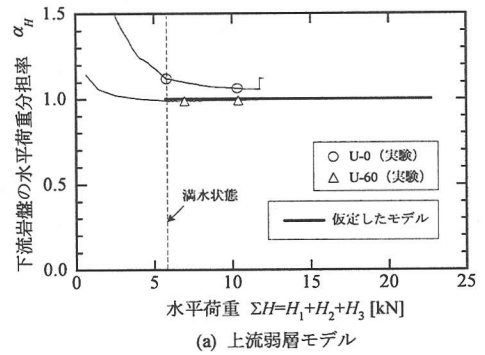
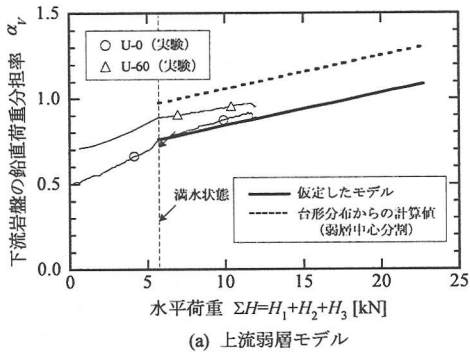


図-23 仮定した鉛直荷重分担率モデル

図-24 仮定した水平荷重分担率モデル

-24における実線のように仮定して、下流岩盤のせん断摩擦安全率 n_{AI} を算出した。

図-25は、弱層なしモデル (Model B) の局所破壊荷重時 ($\Sigma H = 14.9 \text{ kN}$) における、各弱層モデルの下流岩盤のせん断摩擦安全率である。図より、下流弱層モデルの場合、8 mm以上のプラグ深さであれば $n_{AI} > 1.0$ が確保されること、一方、中央弱層モデル、上流弱層モデルではプラグを設置しなくとも $n_{AI} > 1.0$ が確保されることが確認できる。表-5より、実験で下流岩盤のせん断破壊は $n_{AI} > 1.8$ でも生じていることから、 $n_{AI} > 2.0$ でせん断安定性が確保されるとするならば、下流弱層モデルでは32 mm以上、中央弱層モデルでは8 mm以上のプラグが必要であり、上流弱層モデルではプラグ設置の必要がないことになる。

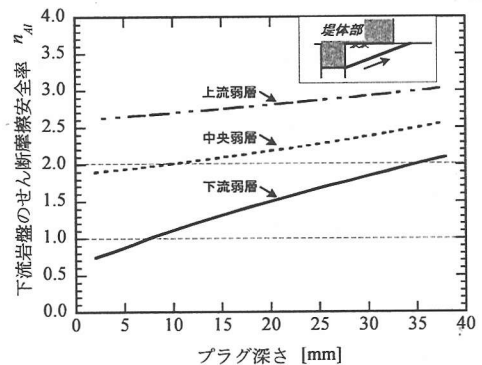


図-25 弱層なしモデル局所破壊荷重時 ($\Sigma H = 14.9 \text{ kN}$) における下流岩盤のせん断摩擦安全率の算出結果

表-6 必要プラグ深さに関する石井らの実験結果との比較

弱層位置・幅、プラグ深さは堤敷幅Bを基準に表示

	石井ら ³⁾ の光弾性実験	本実験
実験条件 (弱層位置・幅, 相対剛性) E_r : 堅岩部の弾性係数 E_c : 堤体部の弾性係数 E_f : 弱層部の弾性係数 E_p : プラグの弾性係数	<p>$E_r/E_c = 1.0, E_p/E_c = 1.0, E_f/E_c = 0.1$</p>	<p>$E_r/E_c = 33.6, E_p/E_c = 93.9, E_f/E_c = 0$</p>
必要プラグ深さの条件	満水状態での応力分布が弱層なしモデルと同等になるプラグ深さ	破壊荷重が弱層なしモデルと同等になるプラグ深さ
必要プラグ深さ d	弱層 A : $d \leq 0.19B$ 弱層 B : $d = 0.25B \sim 0.38B$	Model D : $d = 0.03B \sim 0.11B$ Model C : $d \leq 0.03B$ Model U : $d = 0B$

以上の必要プラグ深さの検討では、満水状態での荷重分担率として実験結果を用いており、また、実験における満水状態以降の水平荷重の増加方法は、実物ダム現象とは直接は結びつかない。したがって、本検討は、あくまでも必要プラグ深さを規定するための方法論を示したものと位置付けられ、得られた必要プラグ深さ(32 mm, 8 mm)は本模型実験に限定される。

石井ら³⁾の光弾性実験から示された必要プラグ深さと、本研究で実験結果に基づいて剛体安定解析から得られた必要プラグ深さを表-6に示す。実験の条件が異なるので単純な比較はできないが、石井ら³⁾の研究では、満水状態での着岩面の応力分布が弱層なしの場合と同じになるようにプラグ深さを求めているのに対し、本研究は破壊荷重が弱層なしの場合と同じになるようにプラグ深さを求めている。石井ら³⁾の研究の方が条件が厳しいこと、また本研究の方が弱層幅が狭いことを考えれば、お互い比較的整合性のある結果であると言える。表-6から分かるように、石井ら³⁾の研究によれば、弱層が堤体下流端よりも下流に存在する場合には、より深いプラグが必要という結果が得られており、本研究でも今後、このような弱層に対する実験を行なう必要がある。

6. おわりに

本研究では、重力ダム基礎岩盤の置換プラグ処理が基礎岩盤の荷重伝達機構や破壊性状に及ぼす影響を把握することを目的として、弱層およびプラグを考慮したダム模型実験を行なった。実験の結果得られた知見を以下に列挙する。

1) 満水状態での堤敷応力分布に関する結果より、い

ずれの弱層位置においても、プラグを設置することで堤敷応力分布が弱層が無い場合に近づくことが確認された。特に、堤敷下流端に弱層が存在する場合、プラグを設置することで堤敷下流端への応力集中を1/2以下に抑えられることが確認された。

- 置換プラグの効果としては、プラグを設置することで堤体部からの荷重を伝達する面積が拡大する効果(接地面積の拡大効果)と、弱層部に剛性の高いプラグが挿入されることにより、弱層周辺岩盤の弱層方向への変形が抑えられる効果(変形抑制効果)の二つがあると考えられる。
- 破壊性状に関する結果より、下流岩盤の堤敷面積が狭く、下流岩盤へ荷重がスムーズに伝達されない場合には、下流岩盤でのせん断破壊が生じるのに対し、下流岩盤の堤敷面積が十分に広い場合、プラグによって荷重の一部が分担される場合には、下流岩盤への荷重がスムーズに伝達されるために、弱層なしモデルと同様に堤敷上流端からの引張破壊が生じる。堤敷上流端から引張破壊を生じたケースの破壊発生時の水平荷重は、弱層位置およびプラグ深さに拘わらず弱層が無い場合とほぼ同等であった。すなわち、プラグは下流岩盤のせん断破壊に対しては有効であるが、堤敷上流端からの引張破壊に対しては効果が薄いといえる。なお、本実験の満水状態～破壊までの荷重方法が特殊であるため、これらの現象は本実験での荷重条件に限定される。

また、実験結果に基づき、剛体安定解析を行なう際の仮定の妥当性の検討を行なうとともに、実験結果に基づいて下流岩盤のせん断安定性について検討し、本実験における必要プラグ深さについて検討した。得られた知見を以下に列挙する。

- 4) 上流岩盤と下流岩盤の荷重分担は、弱層の位置およびプラグ深さによって異なるため、堤敷応力分布を台形分布と仮定して弱層上で2分する方法では不十分である。弱層位置による基礎岩盤の変形特性の差異、プラグ深さによる変形抑制効果を考慮した荷重分担の検討方法が必要である。
- 5) 弱層が無い場合の破壊荷重時に下流岩盤のせん断安定性が確保されるようなプラグ深さを必要プラグ深さととらえ、本実験における必要プラグ深さを検討した。実験条件が異なるので一概に比較することはできないが、得られた必要プラグ深さは、石井ら⁹⁾の実験結果と比較的整合性のとれた結果であると考えられる。

今回の実験から、定性的ながらも弱層・プラグの影響を把握することができた。今後は、有限要素解析により、これらの実験結果をシミュレートし、弱層やプラグ存在時の荷重分担等について検討していく必要がある。また、弱層が堤体下流端を含む場合や弱層が堤体下流端よりも下流側に存在する場合の実験を行ない、必要プラグ深さと弱層位置の影響範囲等について検討していく必要がある。

謝辞：本研究を実施するにあたり、関西電力株式会社居原水力発電所建設準備所坂内事務所の関係諸氏には貴重な御助言を賜りました。また、本研究の一部は、平成13年度文部科学省科学研究費補助金、特別研究員奨励費(No.00003177)によって行なわれた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Waldorf, W. A. : Strengthening of Weak Rock Seams in Foundation of Shasta Dam, *Technical Memorandum of USBR*, No.598, Jun12, 1940.
- 2) Rose, E. : Strengthening of Weak Rock Seams outside base of Shasta Dam, *Technical Memorandum of USBR*, No.602, April 15, 1940.
- 3) 藤田圭一：Shastaダムの基礎軟弱岩盤の補強理論，発電水力，No.19, pp.31-40, 1955.
- 4) 飯田隆一：コンクリートダムの設計法，技報堂，pp.243-261, 1992.
- 5) 石井文雄，飯田隆一，柴田 功：重力ダムの基礎岩盤に存在する断層の処理に関する力学的考察，大ダム，No.36, pp.13-19, 1966.
- 6) 荒川昭治，小川和延：断層処理設計に関する基礎的検討，ダム工学，No.20, pp.28-36, 1995.
- 7) 足立紀尚，中島伸一郎，岸田 潔，伊豆好弘：重力ダム模型実験装置の開発と基礎岩盤内荷重伝達機構に関する研究，土木学会論文集，No.666/Ⅲ-53, pp.245-259, 2000.
- 8) Nakashima, S., Kishida, K., Adachi, T., and Izu, Y.: Experimental study on the stability of dam foundation in consideration of the effect of the concrete plug treatments, *Proceedings of the 4th North American Rock Mechanics Symposium NARMS 2000*, Seattle, 2000.
- 9) 菊地宏吉：地質工学概論，土木工学社，115p., 1990.
- 10) 飯田隆一：コンクリートダムの設計法，技報堂，pp.175-181, 1992.

(2001.5.1 受付)

GRAVITY DAM MODELING TESTS IN CONSIDERATION OF CONCRETE PLUG TREATMENT AND THE DISCUSSION OF PLUG EFFECTS THROUGH SHEAR FRICTION FACTORS

Shinichiro NAKASHIMA, Toshihisa ADACHI, Kiyoshi KISHIDA, Youhei SAKURAI and Yoshihiro IZU

In order to investigate the effects of concrete plug treatment on the stress distribution in rock foundation of gravity dam, the authors carry out the gravity dam modeling tests in consideration of the location of a fault and the depth of plug. Based on the experimental results, it is confirmed that the stress distribution is largely affected by the location of a fault and the depth of plug. The effects of plug installation are 1) to enlarge the area of dam base and to distribute the concentrated force from dam body, and 2) to restrict the deformation of the foundation around the fault and to normalize the stress distribution. The stability of foundation models is examined by shear friction factor and the calculated results are compared with the model test results.