

プラグの剛性に着目したダム基礎岩盤の 置換プラグ工法に関する検討

THE EFFECTS OF STIFFNESS RATIO BETWEEN CONCRETE PLUG AND ROCK ON STRESS DISTRIBUTION IN GRAVITY DAM FOUNDATION

中島伸一郎*・岸田 潔**・足立紀尚***・伊豆好弘****

Shinichiro NAKASHIMA, Kiyoshi KISHIDA, Toshihisa ADACHI, Yoshihiro IZU

In order to investigate the effects of stiffness ratio between concrete plug and rock, $E_p/E_r (= \alpha)$, on stress distribution in gravity dam foundation, gravity dam modeling tests have been performed as applying four types of plugs, namely, iron-plug ($\alpha=94$), duralumin-plug ($\alpha=33$), plaster-plug ($\alpha=5$) and plaster+diatomite-plug ($\alpha=1.2$) are used. From test results, it is confirmed that with the α being higher, 1) both the normal and the shear stresses on the downstream of the fault get lower, 2) the vertical load on the plug becomes higher, 3) on the other hand, the shear load on the plug does not change.

Key Words: gravity dam, concrete plug treatment, fault, modeling test

1. はじめに

置換プラグ処理は、弱層の一部をコンクリートによって置換する弱層処理方法で、重力ダム基礎の弱層処理としては代表的な工法である。プラグ処理での設計項目はプラグ形状（深さ・勾配）であるが、現在のところ統一的な検討方法が存在しない。これは、弱層による基礎岩盤の耐荷力の低下度が、ダムの高さ、弱層の位置・規模・傾斜、弱層-堅岩-堤体間の相対剛性によって大きく異なること、また、プラグの効果が完全には把握されていないことなどの理由により画一的にプラグ形状を決定することができないためである。

本研究は、上記の弱層因子がダム基礎の応力分布におよぼす影響およびプラグの効果を明らかにし、合理的なプラグ形状の検討方法を提案することを目的として、模型実験を中心とした研究を進めてきている¹⁾。これまでに、弱層・プラグを考慮した実験を行い、弱層による堤敷応力分布の乱れは岩盤の弱層方向への変形によるもので、プラグの挿入により岩盤の変形が抑制されれば、弱層のない場合の堤敷応力分布に近づくことを明らかにしている^{2), 3)}。プラグによる岩盤の変形抑制効果は、プラグの剛性が高いほど効果が大きいと考えられるが、一方で、プラグと基礎岩盤との剛性比が大きければ、プラグと岩盤との接触面付近には大きな応力集中が発生し、健全な岩盤を傷める可能性が懸念される。そこで、プラグと堅岩部の弾性係数の比 $E_p/E_r (= \alpha)$ を変化した重力ダム模型実験を行い、プラグの剛性が堤敷応力分布特性に及ぼす影響、プラグの剛性がプラグ周辺の応力集中に与える影響について検討した。

* 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 工博 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

2. 実験概要

(1) 実験装置, ダム模型, 載荷方法¹⁾

重力ダム模型実験装置は図1に示すように、ダム堤体および基礎岩盤の上下流断面のモデルである。石荇と珪藻土の混合物（石荇：珪藻土：水=2.0:1.0:3.0（重量比））で作製した岩盤供試体上にジュラルミン製の堤体部をエポキシ系接着剤で接着し、鉛直・水平方向各3本ずつのエアシリンダによって載荷する。堅岩部材料の物性値を表1に示す。弱層部は、幅30mmの隙間（空白）によって模擬する。

鉛直・水平方向各3本ずつのエアシリンダで分割載荷することにより、三角形分布する堤体自重および静水圧荷重を模擬する。載荷ステップは図2に示す通りで、鉛直荷重を載荷した後、水平荷重を水位の上昇を模擬する形で段階的に載荷する。水平荷重載荷終了時（図2中ステップ15）を満水状態と定義する。

計測項目は、堤敷垂直・せん断応力分布と、岩盤供試体のひずみ分布である。堤敷応力分布は、図3のように堤体部底面に設置された10個の2方向ロードセル⁴⁾によって計測する。岩盤供試体のひずみ分布は、図3の位置に3軸ひずみゲージを貼付して計測する。各位置の3方向のひずみから、最大・最小主応力とその方向を算出した。主応力の算出では表1の値を用いた。

(2) 実験パターン

弱層、プラグの配置を図3に示す。本研究は、プラグと堅岩との剛性比が基礎岩盤に与える影響を把握することが主眼であり、弱層位置とプラグの深さを固定し、プラグの剛性を変化させた。弱層位置およびプラグ深さによる差異については既に実験を行っており^{2) 3)}、堤敷内の弱層については、弱層が堤敷下流端に近いほど下流岩盤に発生する応力集中が大きく、またプラグ設置による応力集中の緩和効果大きいことを確認している。このことから、弱層位置を図3の位置に設定した。プラグ深さについては、図3の位置の弱層に鉄製のプラグを設置した実験から30mm以上の深さであれば岩盤の耐荷力は弱層がない場合と同程度であることを確認している。従って本研究で用いる深さ60mmのプラグは十分深いことになるが、今回はプラグ周辺の応力分布が重要な計測項目であり、ひずみゲージの計測スペースの都合からプラグ深さは60mmと設定した。

プラグの剛性は、プラグと堅岩部との弾性係数の比 E_p/E_r をプラグの相対剛性 α と定義し、 α を変化させた。プラグ部には、表2に示すように鉄（プラグA、 $\alpha=94$ ）、ジュラルミン（プラグB、 $\alpha=33$ ）、石荇（プラグC、 $\alpha=5$ ）、石荇と珪藻土の混合物（プラグD、 $\alpha=1.2$ ）の4種類の材料を用いた。プラグ部－堅岩部、プラグ部－堤体部の境界はエポキシ系接着剤によって接着した。

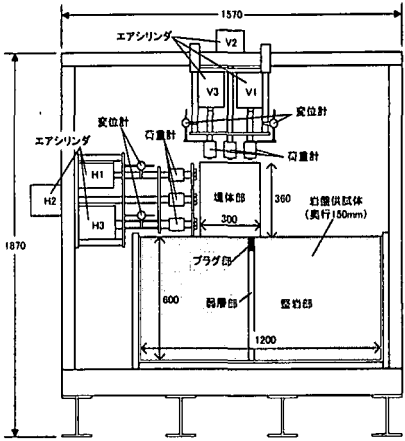


図1 重力ダム模型実験装置

表1 岩盤供試体堅岩部の物性値

σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	E_r [MPa]	ν	τ_0 [MPa]	ϕ [°]
3.79	0.84	2,130	0.25	0.90	40.9

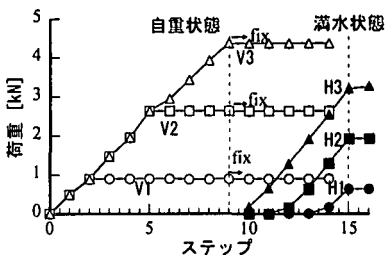


図2 載荷ステップ

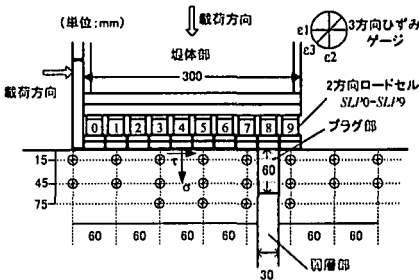


図3 弱層部、プラグ部、2方向ロードセル、3軸方向ひずみゲージの配置

表2 プラグの弾性係数 E_p 、ポアソン比 ν および相対剛性 $\alpha (=E_p/E_r)$

材料	E_p [MPa]	ν	α
A 鉄	200,000*	0.29*	94
B ジュラルミン	71,000*	0.33*	33
C 石荇：水 = 1.0:0.42	10,470**	0.25**	5
D 石荇：珪藻土：水 = 1.0:0.5:1.42	2,656**	0.21**	1.2

*は理科年表の値、**は材料試験の結果の値

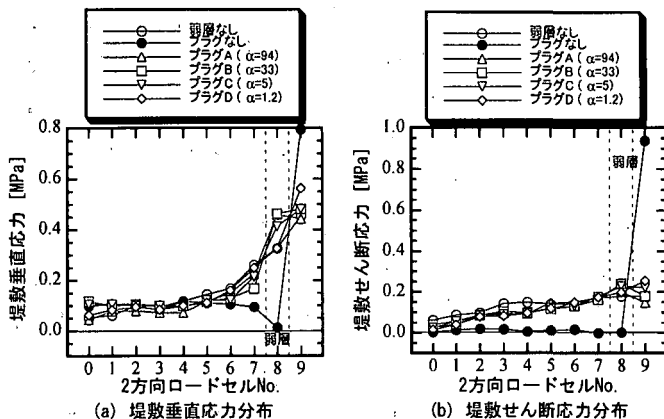


図4 満水状態での堤敷応力分布

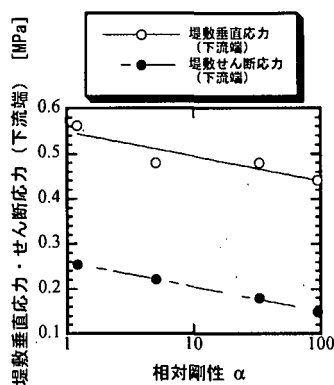


図5 プラグの相対剛性と下流端応力の関係（満水状態）

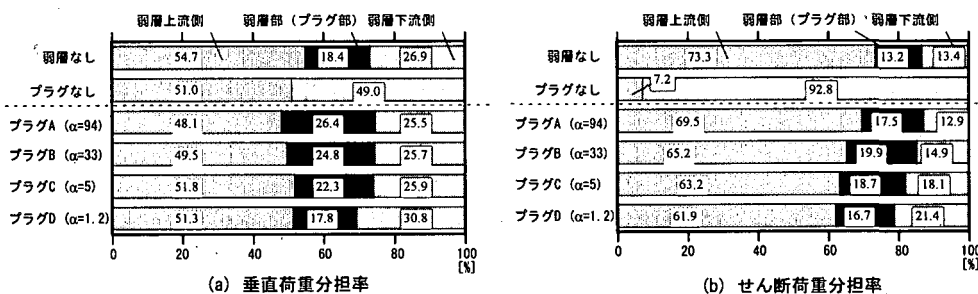


図6 弱層上流岩盤、プラグ部、弱層下流岩盤間の荷重分担率

3. 実験結果および考察

(1) 満水状態での堤敷応力分布

図4(a), (b)は、堤体部底面の2方向ロードセルによって計測された堤敷垂直応力および堤敷せん断応力の分布であり、荷重条件が満水状態での分布を示している。ただし、弱層にプラグを設置しないケースでは、自重状態から満水状態までの間に弱層下流岩盤に破壊が生じたため、図4では破壊発生直前（満水状態以前）の応力分布を表示している。これらの図から、弱層にプラグを設置しない場合、垂直応力・せん断応力ともに下流端に大きく集中するのに対し、プラグを設置することで下流端の応力集中が解消し、弱層がない場合の分布に近づく。プラグの剛性が堅岩部の剛性とほぼ等しい（ $\alpha=1.2$ ）の場合でも、プラグを設置しない場合と比較すれば相当に応力集中が解消されており、プラグを設置することの重要性が確認される。図5は、図4の下流端における垂直応力、せん断応力とプラグの相対剛性 α の関係を示したものである。この図から、プラグの相対剛性が高いほど下流端の応力は小さくなる傾向が確認できる。

着岩面に作用する垂直荷重・せん断荷重が弱層上流岩盤－弱層部（プラグ部）－弱層下流岩盤間でどのように分担されるかを見るため荷重分担率を算出した。各実験ケースの垂直・せん断荷重分担率の関係を図6(a), (b)に示す。図6において、弱層なしの場合の弱層部荷重分担率は、弱層部に相当する部分の荷重分担率を示している。垂直荷重分担率については、プラグの相対剛性が上昇するに従って、プラグ部の荷重分担率が上昇する一方、弱層両側岩盤の荷重分担率はともに減少する傾向が確認できる。これは、不均一な岩盤表面に鉛直荷重が作用した場合には変形は剛性の高い層によって決定されるため、剛性の高い部分に荷重が集中するという現象を示している。一方、せん断荷重分担率については、プラグ剛性比が上昇してもプラグ部の荷重分担率はほとんど変化せず、弱層下流側岩盤の荷重分担率の減少は弱層上流側岩盤に分担されるという結

果を示している。これは、硬軟2層の岩盤にせん断荷重が作用した場合、載荷側（上流側）に相対的に柔らかい層があれば、せん断荷重は柔らかい部分に集中するということを示していると考ええる。図6より、プラグ部分に着目すれば、プラグが硬いほど、プラグ部に作用する垂直荷重は増加するが、せん断荷重は変わらないと言える。

各ケースの満水状態での安定性を評価するため、図4の堤敷応力分布から各位置の点安全率 n' を算出した。点安全率の算出には次式を用いた。

$$n' = \frac{\tau_0 + \sigma \tan \phi}{\tau} \quad (1)$$

ここで、 τ_0 , $\tan \phi$ は堅岩部の純せん断強度および内部摩擦係数、 σ , τ は図4の堤敷垂直応力およびせん断応力である。プラグ部の強度については、石碁で作製したプラグC, Dの場合は石碁の強度で破壊し、鉄、ジュラルミンで作製したプラグA, Bについては、プラグと堤体部との接着面が破壊すると考えられる。現在のところ接着面の強度が明らかでないことから、ここではプラグ部の点安全率は堅岩部の強度定数を用いて計算した。堤敷での点安全率分布を図7に示す。また、堤敷下流端での点安全率とプラグの相対剛性 α の関係を図8に示す。図8より、相対剛性の上昇に伴い下流端の点安全率は上昇し、 $\alpha > 33$ 以上では、弱層がない場合以上の点安全率を示す。また、図7よりプラグ部の点安全率については、プラグ強度を堅岩部の強度と仮定しても弱層がない場合とほとんど差がない。このことは、いずれのプラグにおいても満水状態ではプラグがせん断する可能性が低いことを示している。

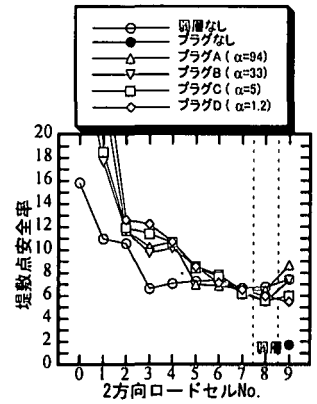


図7 満水状態で堤敷点安全率分布

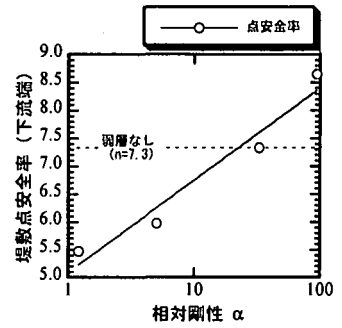


図8 プラグの相対剛性と下流端の堤敷点安全率

(2) 満水状態での岩盤供試体の主応力分布

図9はひずみゲージで計測した岩盤供試体の主ひずみの分布であり、荷重状態が満水状態での結果である。ただし、満水状態以前に破壊したプラグなしのケース図9(b)では破壊直前の分布を示している。図より、プラグの有無による差を見ると、プラグを設置しない場合には弱層下流側岩盤に大きな応力が発生しているのに対し、プラグを設置することによって弱層下流岩盤への応力集中が解消されるとともに、弱層上流岩盤への水平応力の発生している。

一方、プラグの相対剛性による差に着目すると、プラグA ($\alpha=94$) とプラグD ($\alpha=1.2$) の間には約100倍の剛性比があるにも関わらず、図9(c)と(f)の間では主応力の大きさにそれほど大きな差は見られず、プラグ部と堅岩部との相対剛性の差による応力集中の度合いについては一定の傾向を見出すことはできない。これは、プラグの深さが十分に深いため、プラグ周辺の応力集中が緩和されている、または、応力集中がプラグのごく近傍のみで生じていて本実験のひずみ計測位置ではこれを感じることができない、などの理由が考えられる。

4. まとめ

本研究では、プラグの剛性を変化させた重力ダム模型実験を行い、プラグと堅岩部との弾性係数の比が堤敷応力分布、岩盤内応力分布に及ぼす影響について検討した。得られた結果を以下に列挙する

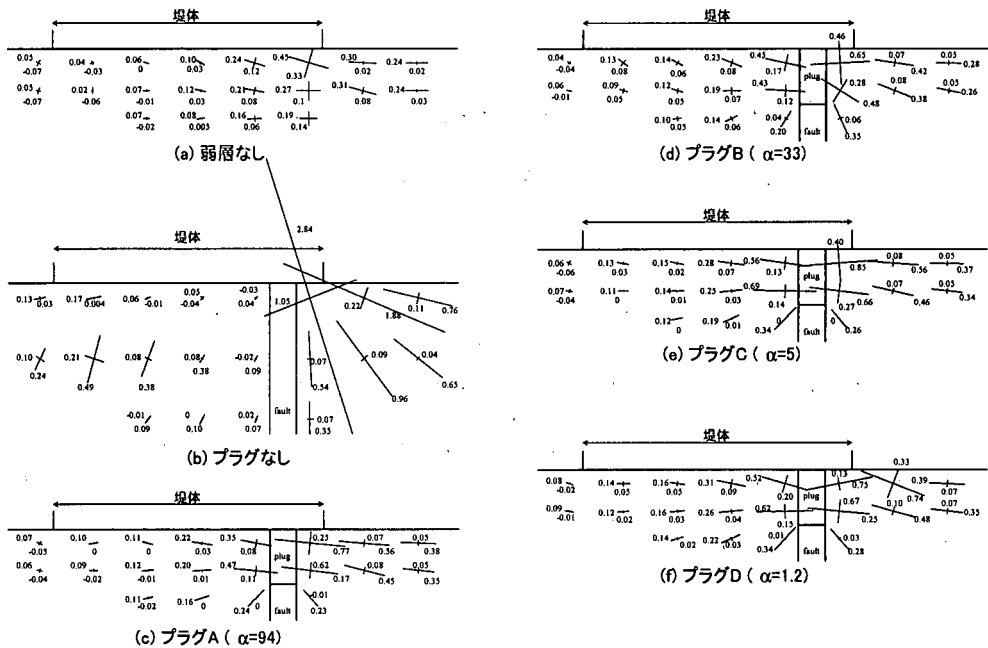


図 9 満水状態での岩盤内応力分布

- (1) プラグの有無による堤敷応力分布の差は大きく、堅岩部と同程度の弾性係数のプラグであっても弱層に挿入することで堤敷応力分布は弱層のない場合に大きく近づく。
- (2) プラグの相対剛性が高いほど（プラグが硬いほど）弱層下流岩盤に作用する垂直応力、せん断応力は減少し、点安全率は上昇する。弱層上流岩盤－プラグ部－弱層下流岩盤間の荷重分担は、垂直荷重の荷重分担率については、プラグが硬いほどプラグの分担する垂直荷重が増大し、両側の堅岩部の分担率は減少する。一方、せん断荷重の荷重分担率については、プラグが硬いほど弱層上流岩盤の分担するせん断荷重は増加し、プラグの分担するせん断荷重の割合の変化は小さい。
- (3) 岩盤供試体内の応力分布については、プラグ周辺の堅岩には水平方向に大きな応力が発生することは確認されたが、プラグの剛性の差による応力集中については確認できなかった。このことは、十分に深いプラグを用いれば、応力集中は緩和され、健全な岩盤に害を与えることはないということを示しているといえる。一方、浅いプラグを用いた場合には、応力集中による堅岩の損傷、プラグの切断等の害が生じる可能性がある。今後はさらに浅いプラグの場合についても実験を行なう必要がある。

参考文献

- 1) 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，2000。
- 2) 中島伸一郎・岸田潔・足立紀尚・伊豆好弘：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，第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.387-382，1999。
- 3) S. NAKASHIMA, K. KISHIDA, T. ADACHI, & Y. IZU : Experimental study on the stability of dam foundation in consideration of the effect of the concrete plug treatments, the 4th North American Rock Mechanics Symposium, pp.1225-1232, 2000。
- 4) 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