

◆ 報 文 ◆

フィルダム建設時の亀裂性岩盤の変形と透水性の変化

山口嘉一* 佐藤弘行**

1. はじめに

我が国では、地質条件があまり良好でないサイトにもダムを建設する事例が増加してきている。基礎岩盤の強度が小さくコンクリートダムを建設することが困難、あるいは経済的でないと判断されたサイトにフィルダムが建設される。現在建設中あるいは計画中の多くのフィルダムのサイトでは、その基礎岩盤は軟岩や風化岩あるいは亀裂性岩盤で構成されることが多い。またこれらの基礎岩盤では、グラウチングの際に注入圧力を高くしすぎると基礎岩盤の破壊や浮き上がりが発生するため、最大注入圧力を低く抑える必要がある。さらに、岩盤にはセメントの粒子を注入することが困難な細かい亀裂が多数存在する場合もある。そのため、このような岩盤ではセメントグラウトによる遮水性の改良がしばしば困難となる。特に基礎浅部ではこのような問題が発生しやすく、超微粒子セメントを用いたグラウチングによっても良好な改良効果が得られない場合もある。

一方、このような基礎岩盤は比較的大きな変形性を有するので、特に基礎浅部においては、堤体の盛立による上載荷重によりかなり変形ことがある。この時、基礎岩盤の変形が亀裂を圧縮する方向に作用し亀裂幅を小さくすれば、基礎岩盤の透水性は小さくなるものと考えられる。

これまでに、3つのダムサイトにおいて、フィルダムの堤体の盛立による基礎岩盤の変形性と透水性の変化について調査してきた^{1),2)}。そのうち軟岩基礎からなる2つのダムサイトの変形係数は200から300MPaであり、もう1つの亀裂性岩盤のダムサイトの変形係数は660MPaであった。これら3つのダムサイトの観測結果から、フィルダムの堤体の盛立によりダム基礎岩盤は圧縮され、透水性が減少することが分かった。これらの観測結果に基づき、軟岩や亀裂性岩盤に対する効果的

なグラウチング手法を提案した。

本研究では、さらに別の2つのダムサイトにおいて、岩盤変位計と透水試験孔を設置して同様の観測を行った。これら2つのダムサイトは亀裂性岩盤であり、その変形係数は1,000MPa以上であった。本報文ではこれら2つのダムサイトにおける観測結果を報告するとともに、フィルダムの堤体盛立時における基礎岩盤の変形が透水性の低減に及ぼす影響について考察した。

2. 調査ダムの概要

フィルダムの盛立に伴う亀裂性岩盤の変形と透水性の変化を奥野ダムと末武川ダムにおいて実測した。両ダムの諸元と実測地点周辺の地質概要を表-1に、両ダムの所在位置を図-1に示す。

3. 奥野ダムにおける事例

3.1 地質と計測の概要

奥野ダムの基礎岩盤は、主に新生代・新第三紀の安山岩により構成され、凝灰角礫岩や凝灰岩などの火山碎屑岩が介在している。また、ダムサイトには、大小かなりの数の断層が存在している。ダム軸沿いの地質断面を図-2に示す。

本ダムの河床部において、フィルダム堤体の盛立中の土圧、基礎岩盤の変位および透水性の変化を測定した。土圧計、岩盤変位計および透水試験孔の配置を図-3に示す。3つの岩盤変位計R-1、2、3の初期測定長はそれぞれ60、30、10mである。また、透水試験孔WT-1、2の長さはともに25mで、透水試験は1試験区間長5mとして5ステージで実施した。透水試験方法はルジオン試験技術指針³⁾に準拠した。透水性はルジオン値で評価する。測定対象の岩盤は、比較的堅固な安山岩により構成されており、その岩級はCM級に分類される。

3.2 計測結果

盛土高、全土圧および岩盤変位の経時変化を図-4に示す。図-5は、盛土高と全土圧の関係を

表-1 調査ダムの諸元と地質概要

ダム名	堤高(m)	堤頂長(m)	堤体積($\times 10^3 m^3$)	竣工年	地質年代	測定地点	岩種	岩級区分
奥野	63.0	323.0	1,804	1989	新生代 新第三紀	河床部	安山岩	C_M
末武川	89.5	275.0	2,560	1991	古生代	河床部 左岸アバットメント部	ホルンフェルス	C_M



図-1 調査ダムの位置

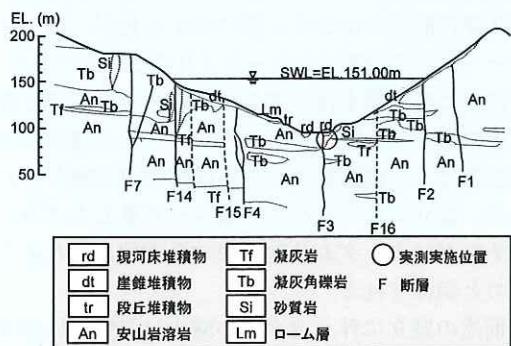


図-2 奥野ダムのダム軸沿いの地質断面

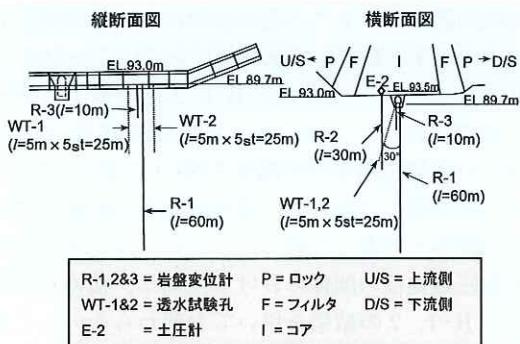


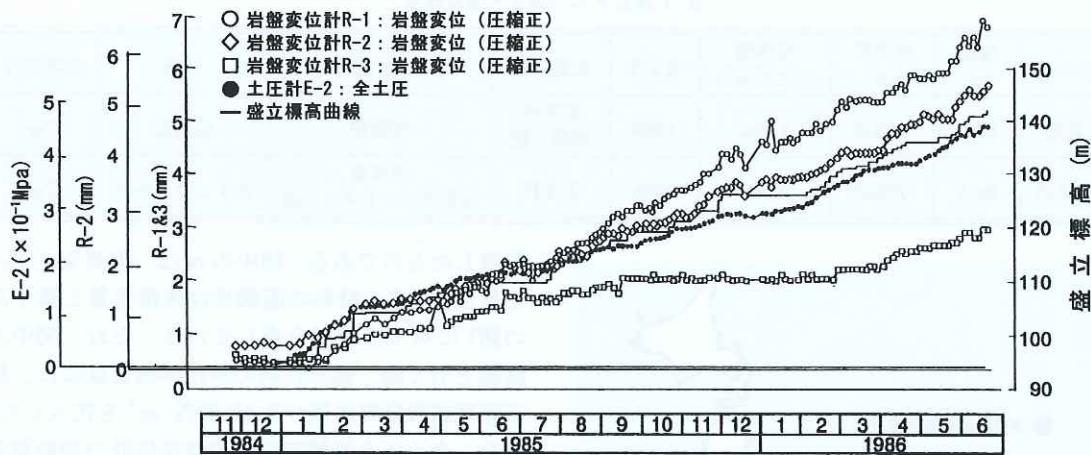
図-3 土圧計、岩盤変位計および透水試験孔の配置

整理したものである。図中の α は、実測全土圧の土柱重量(遮水材料の湿潤単位体積重量と盛土高の積)に対する比率を表している。なお、図中の直線を引く際、遮水材料の単位体積重量には、施工管理試験結果に基づき $19.6 kN/m^3$ を代入した。また、全土圧と岩盤変位を岩盤変位計の初期測定長で除して求めた岩盤の圧縮ひずみの関係を図-6に示す。図中には、全土圧と岩盤ひずみの関係における直線勾配から算出した変形係数を示している。これらの図面から以下のことがわかる。

- 1) 盛土高と岩盤変位および全土圧には比較的良い対応関係がある。
- 2) 盛土高と全土圧の関係において、 α は盛立初期に $0.6 \sim 0.7$ であったものが、盛立の進行に伴い減少し、盛土高 $30m$ 以上で 0.45 程度に収束している。この遮水ゾーンにおけるアーチ作用は、遮水ゾーンの剛性よりそれに隣接するフィルタゾーンの剛性が大きいことによるフィルタゾーンへの応力集中による⁴⁾。
- 3) 岩盤変位計で測定される岩盤変位はその測定長が長いほど大きいが、得られる変形性は測定長が長いほど小さい。これは、堤体荷重により岩盤内に発生する応力が深度方向に分散することに加えて、深度方向に岩盤の剛性が上昇していることが原因と考える。いずれにしても、実測対象岩盤は $1,000 MPa$ 程度以上の変形係数を有している。

盛土高と基礎岩盤のルジオン値の関係を図-7に示す。また、最終の測定結果である盛土高 $48m$ 時におけるルジオン値の透水試験孔穿孔直後のルジオン値に対する比を図-8に示す。これらの図面から以下のことがわかる。

- 1) 変形係数が $660 MPa$ 以下のフィルダム基礎岩盤における既往の実測結果^{1),2)} に見られるほど顕著ではないが、盛立に伴う透水性の減少傾向が見て取れる。透水性の減少傾向があまり顕著でなかった原因としては、初期の透水性が $10 Lu$



注)R-1、R-2、R-3、E-2の横軸は、各計器(岩盤変位計の場合は検出部)の設置標高に一致させている。

図-4 盛土高、全土圧および岩盤変位の経時変化

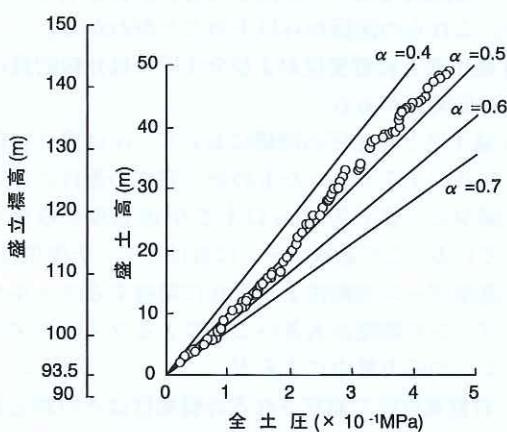


図-5 盛土高と全土圧の関係

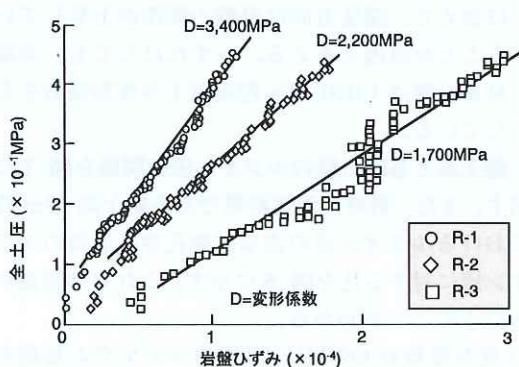


図-6 全土圧と圧縮ひずみの関係

以上と比較的高いステージが 10 ステージ中 4 ステージとあまり多くなく、また最大の初期透

水性でも 15Lu 程度であること、さらに岩盤の変形係数が 1,000MPa 以上と大きいため堤体の盛立の伴う圧縮変位量が小さかったことなどが考えられる。しかし、これについては、亀裂の開口幅、方向分布、連続性などの亀裂に関する情報が不足しているため、推論の域を出ない。

2) 盛土高 48m 時におけるルジオン値の透水試験孔穿孔直後のルジオン値に対する比は、深いステージの方が深いステージより小さい。つまり、盛立に伴う透水性の減少は深いステージほど顕著である。一般にグラウチングによる遮水性の改善は、上載荷重の小さい浅部の方が難しいため、盛立に伴う透水性の減少を考慮したグラウチングによりダム基礎処理の合理化が図れるものと期待される。

前述の盛立に伴う透水性の減少は岩盤の圧縮変位に起因しているものと考えられる。この関係を明らかにするために、盛立に伴う透水性の減少が比較的顕著で、全ての透水試験において限界圧力以上の水圧を載荷して試験を行っていない WT-1 孔の第 2 ステージおよび WT-2 孔の第 1 ステージで得られたルジオン値と岩盤変位計 R-1 で測定した岩盤圧縮変位の関係を図-9 に示す。なお、この図を描くに際して、透水試験孔の鉛直方向からの傾きは考慮しなかった。また、ルジオン値と岩盤圧縮変位の関係における傾向は、他の岩盤変位計 R-1、2 の結果を用いても変わらない。これらの図から、盛立に伴う透水性の減少は明らかに岩盤の圧縮変位に起因していることがわかる。

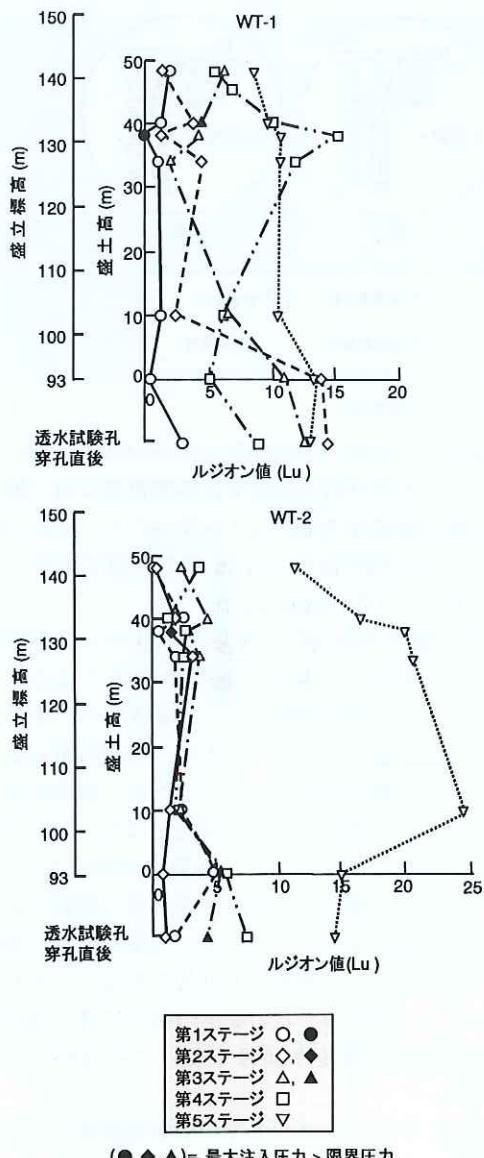


図-7 盛土高とルジョン値の関係

4. 末武川ダムにおける事例

4.1 地質と計測の概要

末武川ダムの基礎岩盤は、古生代の泥質ホルンフェルスを主に、その他珪質ホルンフェルス、砂質ホルンフェルス、緑質岩およびひん岩により構成されている。ダムサイトにはかなりの数の断層とシアーゾーンが存在する。ダム軸沿いの地質断面を図-10に示す。

未風化部分の泥質ホルンフェルスの岩片は、比重約 2.7、吸水率約 0.5%、一軸圧縮強さ 100MPa

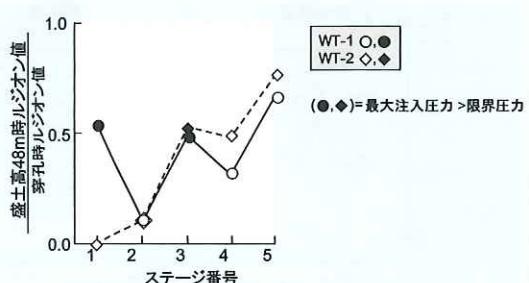


図-8 盛土前のルジョン値に対する盛土後のルジョン値の割合

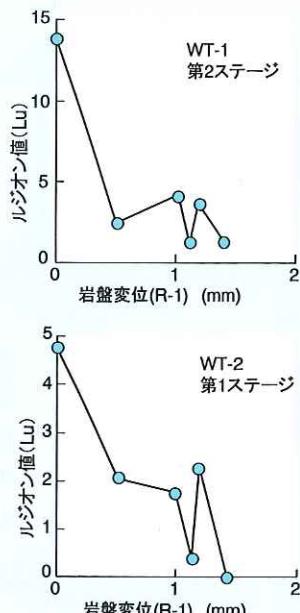


図-9 ルジョン値と圧縮変位の関係

以上とかなり堅固であるが、実測地点のボーリングコアは角礫状のものが多く、岩盤としては CM 級に分類される。

図-10に示すように、河床部と左岸アバットメントの中位標高部に岩盤変位計と透水試験孔を設置して、フィルダム堤体の盛立に伴う基礎岩盤の変形と透水性の変化を測定した。岩盤変位計と透水試験孔は、鉛直方向のほか、上下流(水平)方向にも設置した。透水試験は、試験区間長 5m で、各孔とも 1 ステージのみ実施した。試験方法は、ルジョン試験技術指針³⁾に準拠した。

4.2 計測結果

盛土高とルジョン値および岩盤変位の関係を図-11に示す。なお、全ての透水試験は、限界圧力以下の注入圧力で実施された。

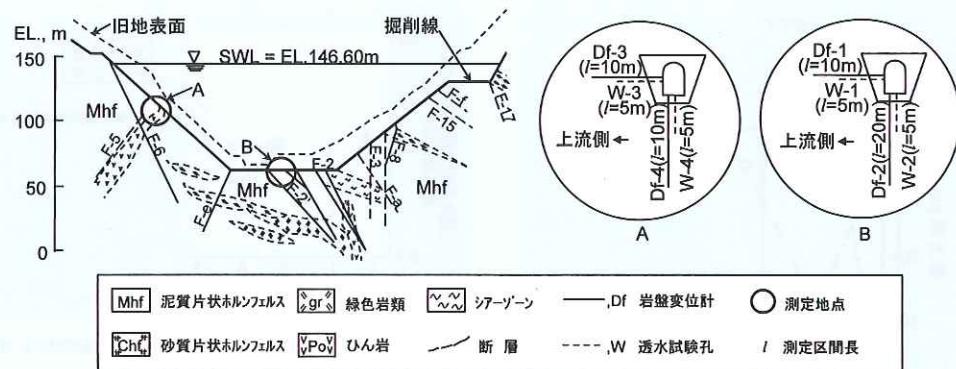
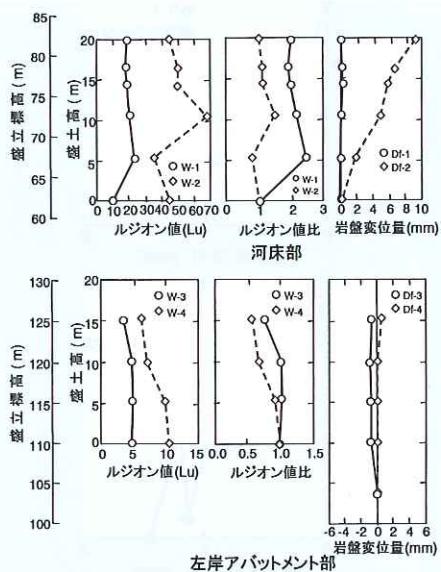


図-10 末武川ダムのダム軸沿いの地質断面

図-11 盛土高とルジオン値および岩盤変位の関係
まず、河床部での実測結果について分析する。

- 透水試験孔 WT-1, 2 で得られたルジオン値の初期値はそれぞれ約 10Lu、約 45Lu である。また、両孔で得られたルジオン値はある盛土高の時点で一旦大きくなるものの、その後の盛土により少し小さくなる傾向を示している。しかし、最終測定である盛土高 20m 時点のルジオン値でも初期ルジオン値よりも大きい。
- 岩盤変位計 Df-2 で測定した鉛直方向の圧縮変位は、盛土高にはほぼ比例して増加しているが、Df-1 で測定された水平方向の岩盤変位は盛土開始時からほとんど変化していない。Df-2 による圧縮変位をその初期測定長 20m で除して求めた圧縮ひずみと遮水材料の湿潤単位体積重量と盛土高の積として求まる全土圧の関係から

算定した岩盤の変形係数は約 800MPa である。なお、遮水材料の湿潤単位体積重量には、施工管理試験結果を基に 2.13 kN/m^3 を、 α には盛土高が比較的低い 20mまでの計測であることもあり 1.0 を代入した。

- ある盛土高時点における透水性の上昇を岩盤の引張変位との対応で説明することはできない。全ての透水試験において限界圧力以上の注入圧力を用いていない。また、実測対象岩盤にはかなり亀裂が発達しているため、試験孔周辺のゆるみが透水性上昇の原因ではないかと考える。奥野ダムと同様に、亀裂性岩盤において、フィルダム盛土中の変位と透水性の関係を定量的に評価するためには、多くの亀裂情報に基づく岩盤モデルの構築が不可欠である。いずれにしても、末武川ダムの堤体の盛土に伴う河床部の透水性の減少が顕著でないことは明らかである。

次に、アバットメント部での実測結果について分析する。

- 初期のルジオン値は、鉛直孔である WT-4 で約 5Lu、水平孔である WT-3 で約 10Lu である。最高盛土高 15mまでの測定ではあるが、両孔で得られるルジオン値は盛土に伴い減少する傾向にある。
- Df-3 により測定された水平方向変位は、測定開始当初は引張側に発生するが、透水試験開始後はほとんど変化していない。Df-4 で測定された鉛直方向変位は、盛土に伴い徐々に圧縮側へ増加する傾向にあるが、その絶対値は河床部に設置された Df-2 による実測値より約 1 オーダ小さい。これより、実測地点の岩盤は、数千 MPa

程度の変形係数を有しているものと考える。

- 3) 特に、鉛直方向の測定結果については、岩盤の圧縮変位と透水性の減少が比較的よく対応している。しかし、透水性の減少は、変形係数が 660MPa 以下のフィルダム基礎岩盤における既往の実測結果^{1),2)}で見られたほど顕著ではない。

5. まとめと今後の課題

亀裂性岩盤を基礎に持つ 2 フィルダムにおいて、盛立に伴う岩盤の変形と透水性の変化の実測を行い、以下の知見を得た。

- 1) 堤体の盛立に伴い岩盤が圧縮変形し、結果として透水性が減少するという実測結果を亀裂性岩盤においても得ることができた。しかし、その減少傾向は、既往の研究 1)、2) で見られたほど顕著ではなかった。その理由としては、対象岩盤の変形係数が 1,000MPa 程度以上と大きいため、堤体盛立に伴う圧縮変形量が小さかったことが一因として挙げられる。
- 2) 盛立に伴う透水性の減少は基礎岩盤の浅部ほど顕著である。一般にグラウチングによる遮水性の改善は、上載荷重の小さい浅部の方が難しいため、盛立に伴う透水性の減少を考慮したグラウチングによりダム基礎処理の合理化が図れるものと期待される。
- 3) 今後、フィルダム堤体盛立時の亀裂性岩盤の圧縮変形と透水性の減少の定量的な関係を厳密に議論し、この関係を考慮した効果的なグラウチングを実施するためには、亀裂の開口幅、方向分布、連続性などの亀裂に関する詳細な情報を得る必要がある。

なお、本論文の内容は、The 3rd International Conference of Mechanics of Jointed and Fractured Rock において英文で発表している⁵⁾。

参考文献

- 1) 松本徳久、山口嘉一：フィル堤体の盛土に伴う基礎岩盤の変形と透水性の変化、土木学会論文集、No.370/III-5, pp.281-290, 1986 年 6 月
- 2) Matsumoto, N. & Y. Yamaguchi : Deformation of Foundation and Change of Permeability Due to Fil-1 Placement in Embankment Dams, Proc. 6th Int. Congr. Rock Mechanics, pp.177-180, 1987.
- 3) 建設省河川局開発課監修：ルジオンテスト技術指針・同解説、(財)国土開発技術研究センター, 56p., 1984 年 6 月。
- 4) Sakamoto, T., S. Takebayashi, A. Nakamura & N. Yasuda : Safety Assessment Based on The Observed Behavior of Zoned Rockfill Dams, Proc. 18th Int. Congr. Large Dams, Q.68, pp.925-953, 1994.
- 5) Yamaguchi, Y., M. Kawasaki, H. Ishikawa, H. Yoshida & N. Matsumoto : Behavior of Jointed Rock Masses during Construction of Embankment Dams, Proc. 3rd Int. Conf. Mechanics of Jointed and Fractured Rock (MJFR-3), pp.633-638, 1998.

山口嘉一*



佐藤弘行**



建設省土木研究所ダム部 同 フィルダム研究室
フィルダム研究室長、工博 研究員
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI Hiroyuki SATOH