

ダム基礎深部の高透水ゾーンに対するカーテングラウチング の施工範囲と改良目標値

CONSTRUCTION DEPTH AND IMPROVEMENT TARGET VALUE OF CURTAIN GROUTING FOR HIGH-PERMEABILITY ZONE IN DEEP ROCK FOUNDATION

山口嘉一*・市原裕之**・小堀俊秀***

Yoshikazu YAMAGUCHI, Nobuyuki ICHIHARA and Toshihide KOBORI

When a high-permeability zone exists in the dam foundations, a setup of the improvement target and the depth of curtain grouting is one of the most important problems in the design and construction stages. A detailed geological investigation should be made to clarify the distribution of a high-permeability zone. When a high-permeability is distributed in a shallow foundation, it should certainly be treated by grouting. However, when it is distributed in the deeper foundation, the reduction of improvement target value should be discussed for safe and cost-saving dam construction.

In this paper, by using 3-dimensional seepage analysis, design of curtain grouting for dam foundation, in which a high-permeability zone is composed of low- and high- dips faults, is studied.

Key Words: dam foundation, high-permeability zone, curtain grouting, improvement target value

1. はじめに

ダム基礎の深部に高透水ゾーンが存在する場合、カーテングラウチングの施工深度や深部での改良目標値の設定について議論になることがある。密な地質調査の結果により、深部の高透水ゾーンが局所的で上下流方向への連続性が認められないことが明らかになった場合には改良対象から除外することも考えられる。また、上下流方向への連続性が確認されたか、否定できない場合でも、貯水池からダム下流域への十分な長さの浸透路長が確保される場合には、確認された高透水ゾーンの相対的深部を施工範囲から除外したり、高透水ゾーンの改良目標値を浅部より緩和したりするなどの対応の可能性がある。

花崗岩地帯に建設された重力式コンクリートダムにおいて、右岸深部に低角度の断層等に伴う高透水ゾーンが存在し、これと交わる高角度の断層が上下流方向への漏水経路となることが懸念された。しかし、低角度の断層が最大ダム高(114m)相当、対象断面での高さの2倍程度の深度に存在していることから、3次元の浸透流解析により施工範囲や改良目標値の緩和の可能性について検討した。本論文では、これらの検討結果について詳細に報告する。

2. 対象ダムの地質概要と高透水ゾーン

対象とするダムは堤高114m、堤頂長331.3m、堤体積75万 m^3 、総貯水容量1,510万 m^3 の重力式コンクリートダムである。また、ダム軸沿いの地質断面を図-1に示す。

ダムサイトの基盤岩は中生代白亜紀に貫入した花崗岩であり、中～粗粒花崗岩(Gr)を主体としている。被

* 正会員 工博 (独)土木研究所 水工研究グループ 上席研究員 (ダム構造物)
** 正会員 工修 (独)土木研究所 水工研究グループ 主任研究員
*** 正会員 工修 (独)土木研究所 水工研究グループ

覆層としては、第四紀の崖錐堆積物(dt)や現河床堆積物(rd)がある。

本ダムサイト右岸深部については、調査時は低透水と推定されていたが、実施工時において低角度断層である F-8 断層近傍で図-2 に示すような高透水ゾーンの存在が確認された。ただし、F-8 断層は下落ちの分布であるため下流地表面には出現しない。

この高透水箇所では、パイロット孔でのコア観察と、1 次孔と 4 次孔でのボアホールスキナによる観察を行い、その成因と分布について地質的解釈を行った。その結果、右岸深部における高透水箇所の要因は、その分布や連続性から F-8 断層、高角度断層、低角度の熱水変質部等に細分されるが、いずれも主因は熱水変質であり、変質の程度がグラウチングの改良性に関連しているものと考えられた。また、高透水箇所は成因別に、(a-1)高角度断層、(a-2)低角度割れ目、(b-1)F-8 断層のうち強度の弱い部分、(b-2)F-8 断層に係わる熱水変質部で低角度傾斜の粘土混じりの砂状部分、(c)細粒花崗岩の一部、(d)要因が特定できない局所的なもの、に細分することができる。

表-1 は規定孔の最終次数孔である 3 次孔完了段階においても高透水を示す、熱水変質の程度が大きい箇所について、ルジオン値とセメント注入量の通減状況やボアホールスキナによる観測結果からそれぞれの特徴を整理したものである。これらの成因のうち、高透水路が連続して分布するのは(a-1)高角度断層で、当該箇所においては F-22、F-14、F-14'断層等が該当するが、それぞれの断層は図-3 に示す位置関係にあり、以下に示す理由から貯水池からの漏水につながるような、堤敷の上流端から下流端へ及ぶ規模での連続性は乏しいと考えられている。まず、F-14 断層と、F-14'断層は常時満水位から上方に分布し、堤敷外での分布はわずかである。また、F-22 断層の上流端はわずかに貯水池内地表部に分布するが下流端は堤敷内にとどまり下流側に露出しない。さらに、F-8 断層と F-22、F-14、F-14'断層の交差部は地下深部に分布し地表に現れないことなどが挙げられる。

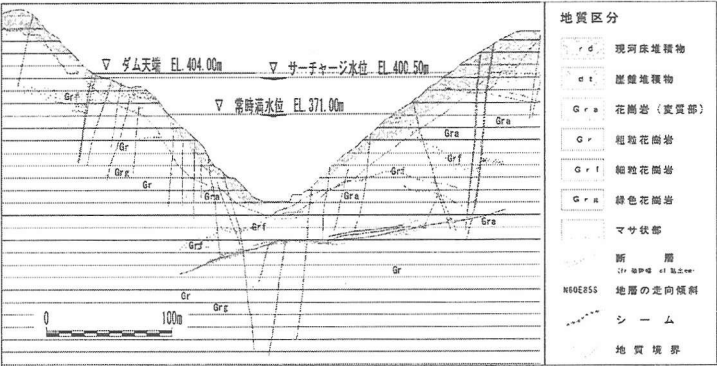


図-1 ダム軸沿いの地質断面図

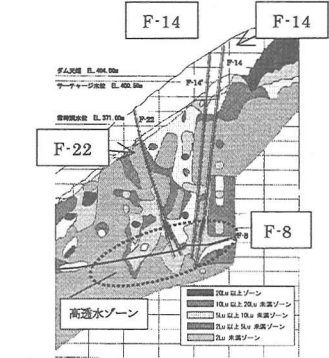


図-2 右岸深部の高透水ゾーン

表-1 成因別右岸深部高透水部の改良状況

高透水箇所の原因	Lu 値の通減の有無	セメントミル크量の通減の有無	ボアホールスキナ観測結果によるセメントミル크の有無	改良が困難な理由
a-1	×	△	×	断層破砕帯が粘土混じり砂～角礫状からなる難改良性材料であるため
a-2	○	○	△	—
b-1	○	○	○	—
b-2	×	△	△	粘土混じり砂状からなる難改良性材料であるため
c	○	○	○	—
d	—	—	—	—

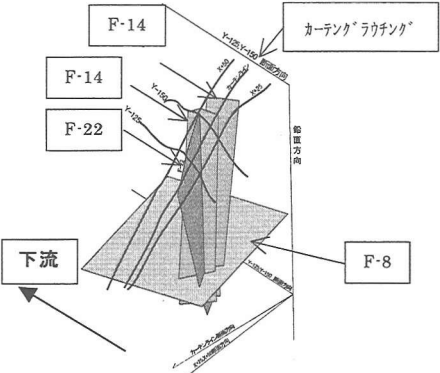


図-3 低角度の F-8 と高角度断層の関係

3. 解析モデル

これまでのとおり、深部の F-8 低角度断層による高透水ゾーンは上下流方向へ連続している可能性は高いものの下流落ちの分布であるため下流地表には出現せず、高角度断層により形成される高透水ゾーンは上下流への連続性の可能性が低いものと考えられる。しかし今回、低角度断層と高角度断層が交差することにより形成される高透水ゾーンに対する止水処理効果特性を理解するため、高角度断層も上下流に連続しているものとして単純化した 3 次元の解析モデルを作成した。

作成したモデルの断層部を除いた基礎岩盤と堤体とグラウチング及び上下流水位の構成を図-4 に示す。モデル基礎岩盤の各深度範囲部の透水係数は、近傍のパイロット孔による透水試験のデータに基づき、バラツキを考慮しかつ安全側の対応として $\mu + 0.5\sigma$ (μ : 透水係数の平均値、 σ : その標準偏差) とし上下流方向に一樣に分布するものとした。なお、それらの岩盤の中で、F-8 断層由来の高透水ゾーンに相当する岩盤は R3 として設定した。カーテングラウチングは最大ダム高 H の 1/2 である 57m 相当までは 2Lu で改良するものとした。また、解析対象領域の幅は堤体 1 ブロック幅の 15m に一致させ、その中央部に岩盤モデルの上下流端まで、垂直方向に 1 本断層が貫くこととした。

前述した当ダムサイトの水理地質構造と比較すると、単純なモデルとなっているが、解析対象となる位置におけるダム高及び水深を考慮すると今回の上下流方向に直線状に貫く今回のモデルがもっとも漏水量が多くなり、対象となるダムサイト地点での断層の影響を最も顕著に表現できるものと判断した。

さらに、断層幅を 20cm、50cm 及び 1m として断層を設定したモデルと断層を設定しないモデルを作成し、深部の岩盤の条件やカーテングラウチングの改良度を变化させ浸透流の挙動を分析した。

なお、計算に用いた有限要素モデルを図-5 示す。なお、左右岩盤方向中央部で左右対象となるため 7.5m 幅のみモデル化している。また、モデルの上下流側面と底面は不透水境界とした。

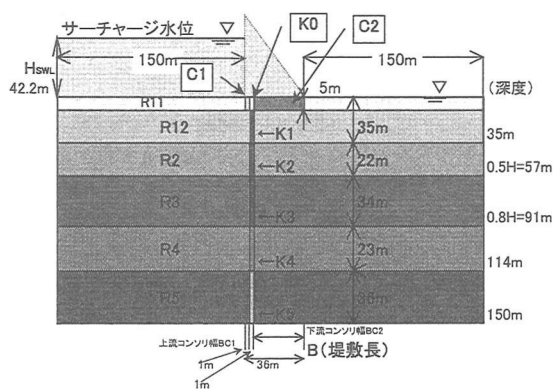


図-4 解析モデル（上下流断面）

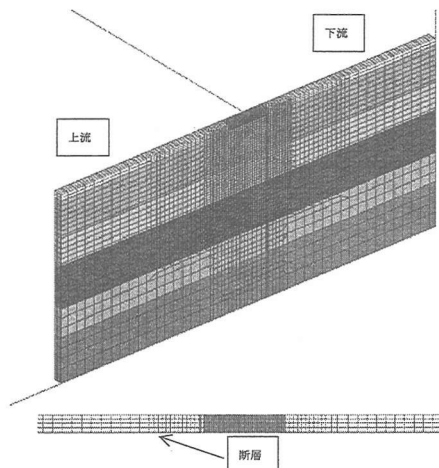


図-5 有限要素モデル

4. 解析条件

解析条件を表-2 に示す。断層の条件設定以外については、CASE1 と 2、CASE3 と 4、CASE5 と 6 はそれぞれ、高透水ゾーン以深(0.5H 以深)最大ダム高 H までのカーテングラウチング(K3,K4)の改良目標値を、2Lu、5Lu 及び未改良に設定したもので、CASE1 と 3 及び 5、CASE2 と 4 及び 6 は F-8 断層による高透水ゾーンに相当する R3 層より深い岩盤(R4,R5)を難透水性(2Lu)とした場合と、高透水がモデル底部まで連続している場

合を設定したものである。なお、解析にあたって $1\text{Lu}=1\times10^{-7}\text{m/s}$ として変換している。

断層部の透水係数の設定は、断層部を貫くパイロット孔の結果より F-22 断層を横断している箇所のルジオン値は 30Lu と評価された。この場合、このステージにかかる透水係数を全て断層由来であるものと仮定すると、前述における断層幅 1m では 150Lu、50cm では 300Lu、20cm では 750Lu と評価できる。また、断層部におけるコンソリデーション及びカーテングラウチングの改良目標値は同深度の通常岩盤部と同じとした。

表-2 解析条件（透水係数）

解析ケース	(m/sec)					
	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6
C1	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}
C2	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}
K0	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}
K1	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}
K2	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}
K3	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}
K4	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}
K5	2.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}	2.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}	2.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}
R11	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}
R12	3.5×10^{-7}	3.5×10^{-7}	3.5×10^{-7}	3.5×10^{-7}	3.5×10^{-7}	3.5×10^{-7}
R2	1.2×10^{-6}	1.2×10^{-6}	1.2×10^{-6}	1.2×10^{-6}	1.2×10^{-6}	1.2×10^{-6}
R3	1.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}
R4	2.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}	2.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}	2.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}
R5	2.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}	2.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}	2.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}
断層部	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-5}
	3.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}
	7.5×10^{-5}	7.5×10^{-5}	7.5×10^{-5}	7.5×10^{-5}	7.5×10^{-5}	7.5×10^{-5}

5. 解析結果

5. 1 浸透流量

ダム堤体下流域での流出量を、単位幅当たりの流出量 ($\ell/\text{min}/\text{m}$) として整理し、図・6 と図・7 にまとめた。

各断層設定における CASE1~6 を比較すると、CASE 毎にジグザグに上下するが、CASE1 と 3 及び 5、CASE2 と 4 及び 6 それぞれほぼ同一の値を示す。これは、流出量は深部のカーテングラウチングの改良条件にほとんど依存せず、深部の岩盤 R4、R5 の透水性状に支配されていることを意味する。ただし、CASE1,3,5 と CASE2,4,6 の浸透流量の差も、極端に大きいものでなく高々9%程度である。また、どの CASE でも断層がない場合に浸透流量が少なく、断層がある場合のケースと比較して、3分の1程度の値となっている。

断層が存在する場合、断層幅の違いにおける流出量の差はそれほど顕著に表れていない。これは、前述したとおり断層の透水係数を設定する際に1ステージ当たりの浸透流量が同量となるように透水係数を与えているためである。

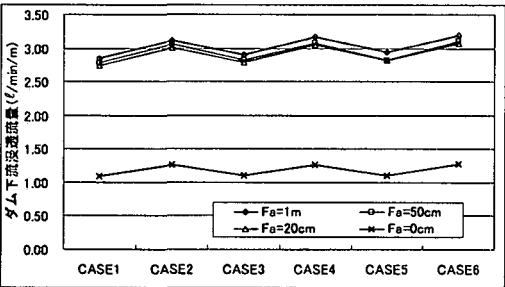


図-6 ダム下流浸透流量 ($\ell/\text{min}/\text{m}$) (F_a =断層幅)

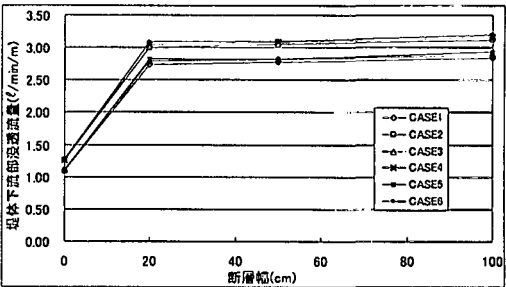


図-7 断層幅と浸透流量の関係

5. 2 堤体つま先部の最大流速および最大動水勾配

岩盤の浸透流に対する安定性という観点から止水処理効果を検討するため、最大流速を持つダムつま先部の浸透流の最大流速（ダルシー則による見かけ流速）と最大動水勾配を図-8～11に整理した。

最大流速は断層幅（断層幅が狭いほど透水係数が大きい。）に依存し、今回のケースでは20cmで最大値をとったが深部のカーテングラウチングの改良目標値や、岩盤の透水性の変化によっては変動が見られなかった。

最大動水勾配については、断層なしの条件で最大動水勾配を持ち、断層幅がある条件はほぼ同程度の解析結果となっている。

いずれにしても、堤体つま先部の最大流速および最大動水勾配に対して深部の岩盤の透水性とカーテングラウチング改良条件は、ほとんど影響を与えないことがわかる。

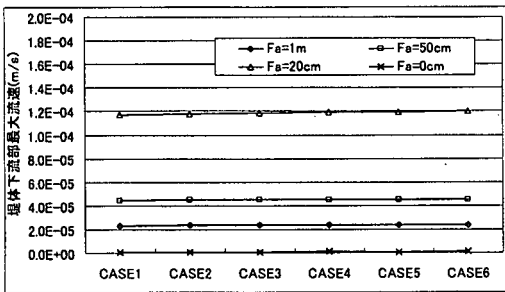


図-8 堤体下流部最大流速(m/s)(Fa=断層幅)

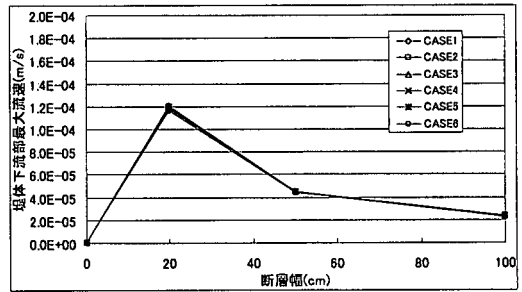


図-9 断層幅と最大流速(m/s)の関係

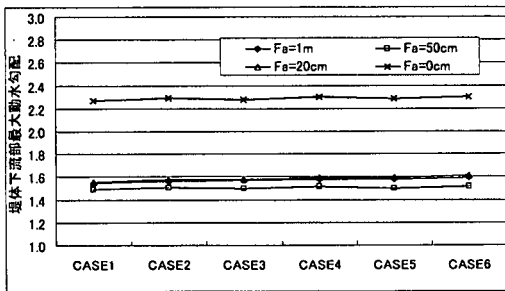


図-10 堤体下流部最大動水勾配(Fa=断層幅)

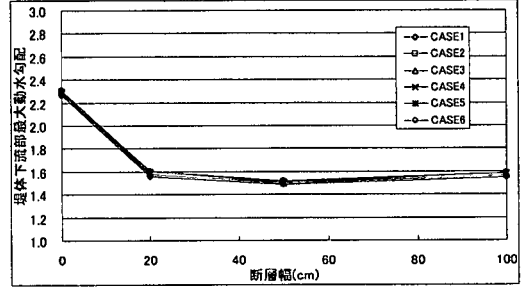


図-11 断層幅と最大動水勾配の関係

6. まとめ

カーテングラウチングの施工深度と浸透流量の関係については、これまで研究^{1),2)}で、透水性が均一か深度方向に減少する構成が単純なモデル岩盤においては通常のカーテングラウチング範囲の0.7H（この場合H=ダム高=上流側水位）深度までの施工により、未改良の場合と比較し下流部の浸透流量の通減は3割程度である。この結果からも、深部のカーテングラウチングの改良効果は、通常の深度での改良ほどの効果は得にくいと予想される。今回、実際のダムサイトの条件をモデル化したため、基礎岩盤条件は複雑になったが、深部でのカーテングラウチングの改良効果は同様にあまり大きくない結果となった。ただし、実施工時は地質条件の不均一性を考慮し、比較的深部でも安定性が懸念される高透水部を残置する危険性を排除するため、カーテングラウチングを実施することは妥当と思われるが、計画に際しては、対象岩盤のグラウタビリティを勘案し、改良目標値の緩和の検討が必要になると考える。

なお、今回のモデルでは断層幅により透水係数を変えたために、深部の岩盤の透水性にのみの浸透流量が左右された。参考までに、各断層幅でその透水係数を 30Lu に一致させた場合の結果を整理すると、図-12、13 に示すように深部の岩盤の透水性に影響を受けると同時に、断層幅に比例し浸透流量が増加することがわかる。しかし、断層幅を無視し透水係数が一定であるとは考えにくく、今回の解析条件についてもそれなり妥当性が見いだせる。実際には、対象となる具体のダムごとに設計上の安全性を見込んだモデル作成及び物性の設定が必要である。

また、ダム堤体つま先部の安定性については、断層幅により最大動水勾配はあまり変わらないものの、流速は断層幅が狭くなる（仮に断層幅が一定とすると“透水係数が大きくなる”）につれ急激に増加し不安定化する恐れがある。このことから、ダム設計時に、水理地質構造解釈による断層の特性および連続性の把握が重要であり、実施工時の着実な断層処理の実施が要求されることが理解される。

今後とも、種々の水理地質構造条件下における効果的なグラウチング方法について、現場条件を参考に数値解析等により検討を進めていきたい。

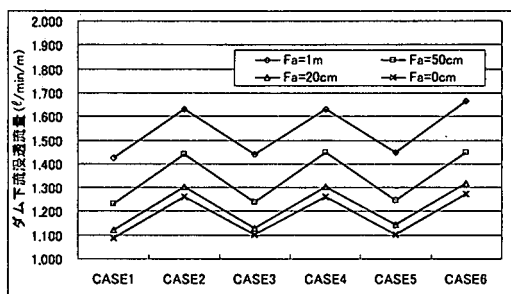


図-12 堤体下流部浸透流量 (l/min/m)

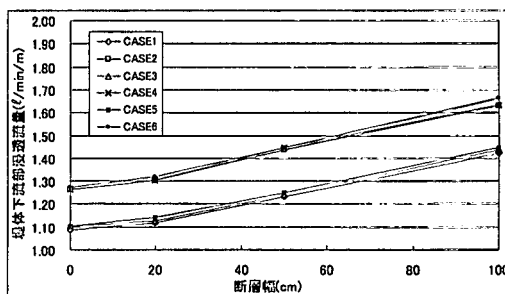


図-13 断層幅と浸透流量の関係

参考文献

- 1) 市原裕之, 山口嘉一, 佐々木隆, 宮内茂行: グ라우チング及び基礎排水孔によるコンクリートダムの揚圧力・浸透量低減効果, ダム講演会第 12 回研究発表会講演集, pp.4-6, 2001.
- 2) 市原裕之, 山口嘉一, 佐々木隆: 重力式コンクリートダムの横継目の揚圧力低減効果に関する解析的検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, pp.517-518, 2002.