

着岩部コアの安定性に及ぼすコンタクトクレイの効果

電力中央研究所・土木技術研究所 正員 ○松井家孝 池見元宣 岡本敏郎

1. まえがき

1976年6月に起ったTetonダム決壊事故^{1)~4)}を契機として、わが国においてもフィルダムの設計に際して、のり面の安定検討だけでなく、着岩部コアの浸透流に対する安定性確保に重大な関心が払われるようになった。これは、1979年9月にインドのニューデリーで開催される第3回国際大ダム会議の主要課題の一つにこの問題がとり上げられていることによっても、世界的趨勢と考えることが出来る。

浸透流によるフィルダムの事故例としては、Tetonダムの他に、Baldwin Hillsダム(1963年、アメリカ)⁵⁾、Hyttejuvetダム(1968年、ノルウェー)⁶⁾、Balderheadダム(1970年、イギリス)⁷⁾、Yard's Creekダム(1973年、アメリカ)⁸⁾などを挙げることが出来る。Tetonダムに関しては、着岩部におけるコアのハイドロリックフラクチュアリング現象と、基礎岩盤内の節理を流れる浸透流の流速がコアの細粒分流出に対する抵抗性を上まわったことが、事故原因の大きなものとして取り上げられている。また、Baldwin Hillsダムの場合には、断層活動によって基盤に存在した破砕帯が損傷を受け、浸透流によってコアが洗掘されたことが事故につながったとされている。こゝで、浸透流によるコアの損傷の原因を整理すると、次のようになる。

- a. コアに接する基礎岩盤内の節理が、十分に処理ができなくなり残され、水道となった。
- b. 基礎岩盤に存在する破砕帯の処理が不十分であるか、断層活動により、破砕帯が損傷を受けた。
- c. 着岩部のコアへの応力伝達が何らかの原因で十分でなかったため、ハイドロリックフラクチュアリングを生じ、浸透流が集中した。

本報告は、東京電力株式会社が建設した高瀬ダム(堤高: 176 m, 堤頂長: 362 m, 堤体積: 1160万 m^3)⁹⁾に対して、次の目的で行なった材料実験および数値解析の結果を述べるものである。

- 1) 着岩材料として用いられたローム質土が、大ひずみを受けた場合の強度・変形性・透水性の変化を調べる
- 2) 高瀬ダムの変位・変形に関する実測データをもとに堤体材料の変形性を求め、これを用いた解析結果と実測データとの照合を行なって、材料物性の解析への適用の妥当性を調べる
- 3) 計算された応力分布をもとに、堤体の応力の安定性を調べる
- 4) 着岩部コアの浸透流に対する安定性を、着岩材料の効果の面から調べる

2. 着岩材料の物性に関する実験⁹⁾

2. 1. 実験の目的

フィルダムのコア部の安定性を確保する上で、着岩材が果たす役割が大きいことは、十分予測されることであるが、その反面、着岩材料は大きなせん断ひずみを受けねばならない。このような状況の着岩材料がその機能を全うするためには、大きなせん断ひずみを受けるとし、透水性が大きく変化しないことが最大の条件となる。そこで、着岩材料が大きなせん断ひずみを受けた場合、透水性に大きな変化

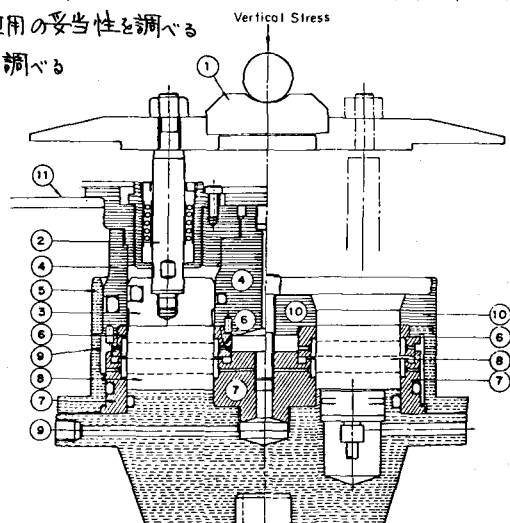


図-1 せん断・透水実験装置

を生ずるかどうかを調べる目的で、せん断透水実験を行った。

2. 2. 実験装置

透水実験時の圧しれと漏水を防ぎ、しかも大きなせん断ひずみを与えることができる装置として、中空円筒状供試体に対するねじりせん断方式を採用した。実験装置(図-1)の主な仕様は、次の通りである。

- a. せん断実験 イ. せん断容器 ⑥&⑦ (内径: 6.3 cm, 外径: 17.0 cm, 高さ: 2.0 cm × 2) ロ. 鉛直応力 ①, ②, ③ : 最大 $2 \text{ ton}/\text{cm}^2$ ハ. ねじりせん断力 ④ : 最大 $2 \text{ ton}/\text{cm}^2$
- b. 透水実験 イ. 定水位方式 ロ. 最大透水圧: 鉛直応力の約 50 % ハ. 透水方向: 供試体外周より内側へ水平方向に透水させる。

2. 3. 実験の試料

実験に用いた試料は、着岩材料に予定されていたローム質土であり、この諸特性は表-1に示す通りであった。なお、参考のため、コア材料の諸特性も併記した。

この材料の供試体としての初期条件は、次の通りとした。

含水比: $w = 35 \%$, 乾燥密度: $\gamma_d = 1.30 \text{ g}/\text{cm}^3$

2. 4. 実験の結果

・着岩部で生ずることが予想されるせん断ひずみの大きさを十分カバーできるように、回転によるねじり角度を 90° (せん断ひずみ値として約 250%) 以上として実験を行った。

実験でえられたせん断応力: τ とせん断ひずみ: γ との関係は、図-2に示す通りとなった。すなわち、

a. 双せん断時には明瞭なピークが現われまいか、現われてもきわめてゆるやかな変化をしている。また、ピーク強度は小さいが、残留強度はかなり高い。

b. 再せん断時には、 τ - γ 曲線の立上りの勾配が大きく、せん断ひずみが 10% 前後で明瞭なピークが現われる。

c. また、この場合にも残留強度レベルは高く、85% 以上となっている。

d. 再せん断時のピーク強度は、双せん断時のそれよりもはるかに上にあり、残留強度も双せん断時を上まわっている。

d. このような状況を現出した原因は、せん断時とその後の圧密による密着変化が収縮に向うような性質をこの材料がもっていることにあると考えられる。

・図-3に示すものは、 τ - γ 曲線の各ひずみに対応する割線変形係数: G とせん断ひずみとの関係である。これによれば、 γ が小さい範囲では G は比較的大きいが、 γ が大きくなるにつれ G の値が急激に低下することがわかる。大ききひずみの範囲での G の値は $20 \sim 30 \text{ ton}/\text{m}^2$ 程度であり、ポアソン比: $\nu = 0.45$ として変形係数: E に換算すると、 $E = 100 \text{ ton}/\text{m}^2$ 程度となる。

表-1 材料の物理的性質

		着岩材料	コア材料
粒 度	~ 0.005	58 ~ 95 %	12 ~ 13 %
	0.005 ~ 0.074		2 ~ 3 %
	0.074 ~	42 %	85 %
液性限界 L.L.		65 %	17 %
塑性限界 P.L.		41 %	N.P.
塑性指数 P.I.		24	—
最適含水比 w_{opt}		33.0 %	8.2 %
最大乾燥密度 γ_{dmax}		1.28 g/cm^3	2.11 g/cm^3
透水係数 k		$2 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$	$2 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$
内部摩擦角 ϕ		17°30'	41°30'

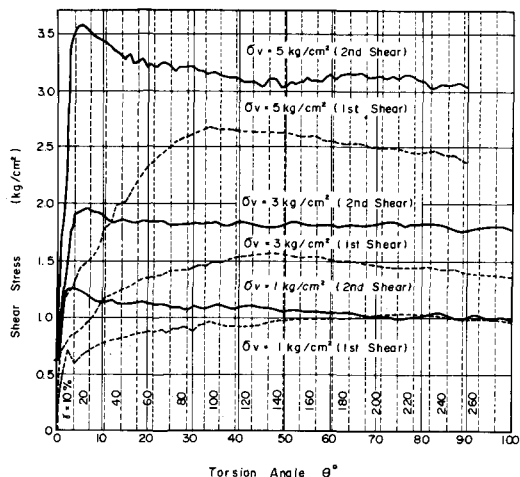


図-2 ねじりせん断時の応力-ひずみ関係

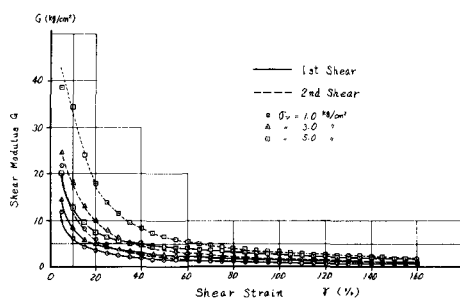


図-3 せん断変形係数-ひずみ関係

・ねじりせん断実験の前・後で測定した透水係数を、表-2に掲げた。このロー・ム頂上の室内透水試験の結果は、表-1に示したように、 $k=10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 程度であるのに対して、この実験時には圧密の効果もあって、 $k=10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ cm/sec}$ となった。また、せん断の前・後で透水係数はほとんど変化していないことも判明した。このことは、鉛直（圧密）応力を受けた状態で大きなせん断ひずみを生じても、この材料は容積収縮の傾向を示し、透水性の劣化につながらないことを示すものと解釈できる。

以上の実験結果を総括すると、この材料は ① 大きな圧密応力下で大きなせん断ひずみを生じても、容積が収縮する傾向をもつ ② このため、せん断後の圧密とあいまって強度が増大する傾向を示す ③ 更に、せん断後の透水係数の変化がほとんど見られないことから、透水性の劣化は生じないものと考えられる ④ せん断中のせん断変形係数は、平均的に 30 Ton/m^2 程度と考えられ、これを変形係数：Eに換算するとほぼ 100 Ton/m^2 に対応する。すなわち、変形に対する追従性がきわめて大きいことがわかった。

3. 着岩部近傍の変位・変形と応力の分布に関する解析

3.1. 数値解析の方法

盛立完了時における堤体内の変形と応力の状況を把握し、堤体の安定性を評価することを目的に、逐次荷重増方式により、二次元平面ひずみ問題として有限要素法による解析を行った。解析の対象とした断面は、図-4に示す高瀬ガムの縦断面であり、鉛直沈下計（3ヶ所）および着岩部変位計（3ヶ所）を含んでいる。

この断面の解析に当り、着岩部の効果が明確に検出できるように、左右岸着岩部近傍（水平距離：10mの範囲）の要素分割を細かくし、着岩部を表現した。その内訳は次の通りである。

0.0～0.2m：着岩部

0.2～2.0m：着岩部コア

2.0～10.0m：標準コア

3.2. 解析に用いた物性値

密度・含水比に関しては、施工実績の平均値を採用し、強度定数に関しては、設計値を用いた。また、変形係数としては

実測変位量、室内実験値を参照して、応力に依存する非線形性をもつものとして与えた。着岩材料の変形係数として、ねじりせん断試験で与えられた 100 Ton/m^2 を用いたが、着岩部の硬さの影響を調べる目的で 1000 Ton/m^2 も用いている。すなわち、

CASE-1：着岩部の $E = 100 \text{ Ton/m}^2$

CASE-2： $E = 1000$

の2ケースと解析したことになる。

表-2 せん断前後の透水係数の変化 (cm/sec)

鉛直応力	1.0 kg/cm^2	3.0 kg/cm^2	5.0 kg/cm^2
刃女せん断前	2.25×10^{-9}	6.26×10^{-10}	2.46×10^{-10}
〃 後	2.25×10^{-9}	4.97×10^{-10}	2.49×10^{-10}
再せん断前	2.03×10^{-9}	—	—
〃 後	2.37×10^{-9}	6.65×10^{-10}	2.16×10^{-10}

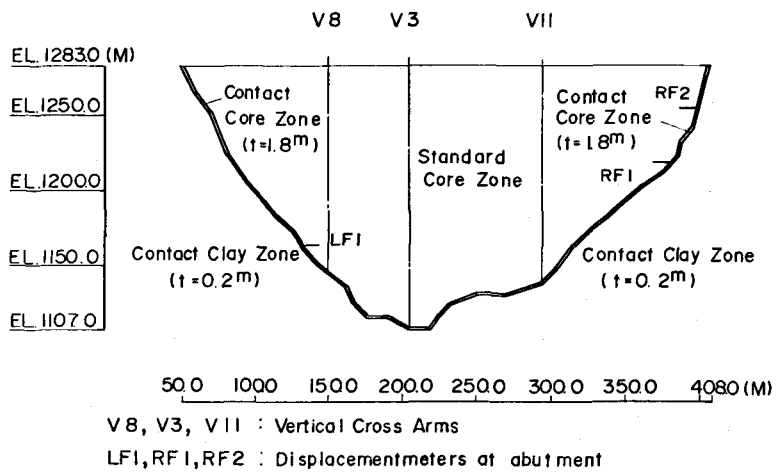


図-4 解析の対象とした高瀬ガムの縦断面

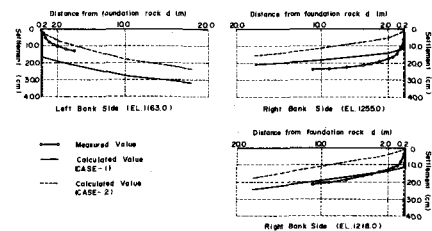


図-5 左右岸着岩部近傍の変位

3. 数値解析の結果

i) 着岸部近傍における沈下量を、図-5に示した。CASE-2の場合に生ずる沈下は2~3 cmのオーダーであるのに対して、CASE-1の場合には15~20 cmと大きくなっており、しかも着岩層内で大きな変化を見せている。着岩部変位の実測挙動¹⁰⁾と対比すると、CASE-1の結果が、実測結果の解釈上殆ど合であると思われる。すなわち、着岩部で生ずるせん断変位のほとんどが、着岩層内で生じていると示えることができる。

ii) 着岩部におけるせん断ひずみの分布を、図-6(着岩層内)、図-7(着岩部コア内)に示した。図-6によれば、着岩層内では、CASE-1の場合に70%を越えるせん断ひずみが生ずる場所があるのに対して、CASE-2では、その値は高々10%程度である。しかし、図-7を見れば明らかに着岩部コア内に生ずるせん断ひずみは逆になっており、着岩層が軟らかい方が、着岩部コアに及ぼす悪影響を軽減できることを示している。実測変位から推定すれば、高瀬川の着岩部は、CASE-1の結果のようになっているものと思われる。

iii) この様子を局所安全係数の分布の面から見たものが、図-8である。着岩層が大きなせん断変位を吸収した結果として、この標高でも着岩部コアより内側では、十分に安全性が保たれていることがわかる。

iv) 上述したところに従えば、着岩部に着岩材料を設置することは、当該部の応力分布を改善し、その安定性を確保する上できわめて有効であり、更には着岩部を浸透流によるパイピングから守る上でも、効果的であるといえる。

〔参考文献〕 1) Report To U.S. Department of Interior and State of Idaho on Failure of Teton Dam; Independent Panel, 1976.12 2) 藤野敏夫; タムダ川について、日本ダム学会第10回ダム技術講演会、1977.3 3) 林正夫; Tetonダムの決壊原因、土木学会誌、Vol. 62, No. 4, 1977.4 4) 林正夫; タムダ川着岩部の安定性向上に関する考察、日本ダム学会第10回ダム技術講演会、1977.3. 4) R.B. Jansen et al; Earth Movement at Baldwin Hills Reservoir, Proc. ASCE, SM4, 1967.7.

6) B. Kjaernli et al; Leakage through Horizontal Cracks in the Core of Hvitjuvet Dam, NGI Publication No. 80, 1968, 7) J.L. Sherard; Embankment Dam Cracking, 1973. 8) 高井亮治; 高瀬川の堤体と材料、大ダム No. 82, 1977.12. 9) 松井孝彦・北見克彦・岡本敏郎; フィルタム着岩部の安定性に関する解析と材料物性に関する研究、電力中央研究所報告 No. 378008, 10) 富田英幸; 高瀬川の着岩部の設計と施工、日本ダム学会第10回ダム技術講演会、1978.3.

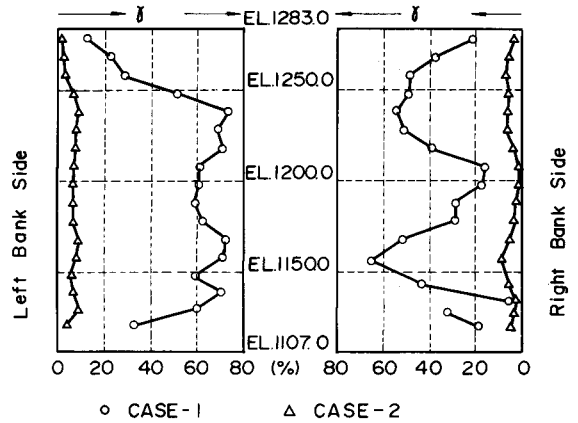


図-5 着岩層内のせん断ひずみの分布

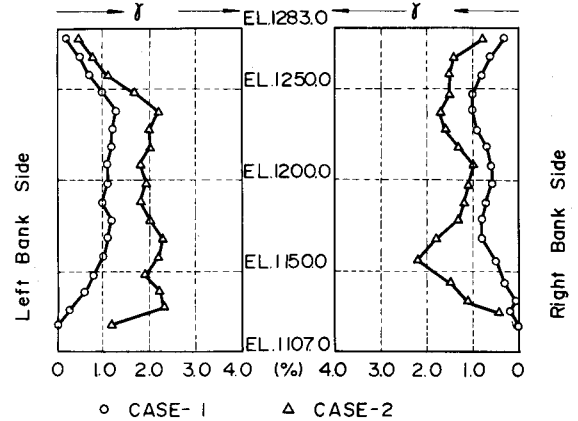


図-6 着岩部コア内のせん断ひずみの分布

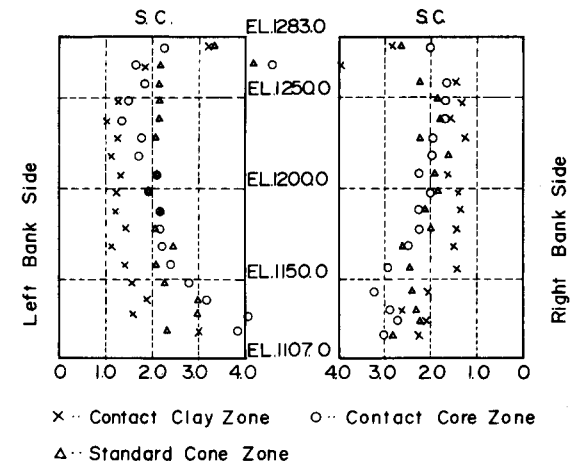


図-7 着岩部近傍の局所安全係数の分布

EFFECT OF CONTACT CLAY ON THE IMPROVEMENT OF STABILITY
ALONG CONTACT ZONE OF FILLDAMS

Central Research Institute of Electric Power
Industry, Civil Engineering Laboratory

Iyetaka MATSUI, Motonobu IKEMI & Toshio OKAMOTO

The authors analysed stability of Takase dam, which was constructed by Tokyo Electric Power Company, by Finite Element Method. In this analysis, the authors applied the deformation characteristics obtained from measured displacement in the dam, and took into account of shearing displacement at the adjoining portion between core and foundation rock.

The purpose of this analysis was to evaluate stability of the dam from the distribution of stresses, and to evaluate the effect to resist some failure by seepage flow by setting contact clay along contact zone between core and foundation rock.

The results of this analysis showed that displacement in the whole part of the dam had fairly good coincidence with measured values of vertical crossarms, and that calculated shearing displacement along the contact zone seemed to follow real displacement.

From the above mentioned results, it became clear that shearing displacement improved the unbalanced stress distribution in the core zone near part of contact zone, and that such zone was kept watertightness by such improved stress distribution. So that it was concluded that contact clay was used effectively to keep stability of core.

Still more, material used for contact clay was conducted laboratory test using torsional shear and permeability test apparatus. And it was confirmed that there existed no bad influence to the permeability and shear resistance even if large shear strain occurred in this material.