

シリア・アラブ共和国 ZEYZOUN DAM 決壊調査報告

Investigation on the Cause of Failure of Syrian Zeyzoun Dam

大根義男

Yoshio OHNE

Abstract: The Zeyzoun Rock Fill Dam which was constructed by Syrian Arab Republic, failed on June 4, 2002. The dam was entirely over the length as approximately 100m. Over 60km² land of downstream of the dam was flooded and 22 residents and several hundreds of animals were killed by the disaster.

After the disaster, Syrian government requested the government of Japan to dispatch experts of the embankment dam in order to support their investigation on the cause of failure of the dam. An investigation team was organized with experts from Japans ministry of construction, Ministry of agriculture, Water resource development corporation and Dam engineers society, and the author participated as a representative of the dam engineers society in between July 18 and 29, 2002.

1. はじめに

シリア共和国灌漑省所轄のゼイズーンダム (Zeyzoun Dam) が2002年6月4日決壊し、世界中のダム技術に大きな衝撃を与えた(図-1)。このダムの貯水量は約7,100万m³であり、シリア政府の発表によると、この決壊により22人の犠牲者の他、数千頭に及ぶ羊などの家畜や家屋の崩壊および8,000ha以上の農地が浸水し被災した、とのことである。

シリア政府は、日本のシリア大使館を通じ、日本政府に対し、崩壊原因の究明とその復旧対策に関する技術援助を要請し、これを受けて日本外務省はJICAを通じ、下記のダム工学に関する専門技術者を調査団として派遣することとした。

記

独立行政法人 土木研究所 山口嘉一 脇坂安彦
独立行政法人 農業工学研究所 谷 茂
水資源開発公団 米崎文雄

一方、日本ダム工学会と(財)ダム技術センターは、ダ

愛知工業大学工学部土木工学科 教授
愛知工業大学総合技術研究所 所長 (豊田市)

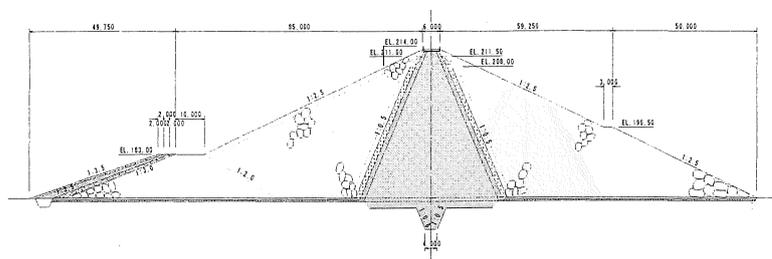


図-1 Zeyzoun Dam 標準断面図

ム崩壊という重大事故に鑑み、学会およびセンター独自の立場から崩壊原因を調査することとし、下記の2名を調査団に加えてもらうこととした。

記

大根義男 (愛知工業大学教授)
伊藤道明 (ダム技術センター部長)

この報告書は、大根が作成したものであり、研究という立場からかなり個人的見解や想像を含めた記述となっている。したがって、政府調査団の報告書とは多少異なる点もあると思われるが、当報告書はあくまでも公式的なものではないという点に留意願いたい。

2. 地質構成

ダムサイトを構成する地質は、図-2の地質縦断面図に示したように、カルシウム質粘性土、バサルトボールドおよび比較的新鮮なバサルトから成っている。また、図-3(a), (b), (c)には図-2の断面A, B, Cの地質図も示されている(脇坂作成)。

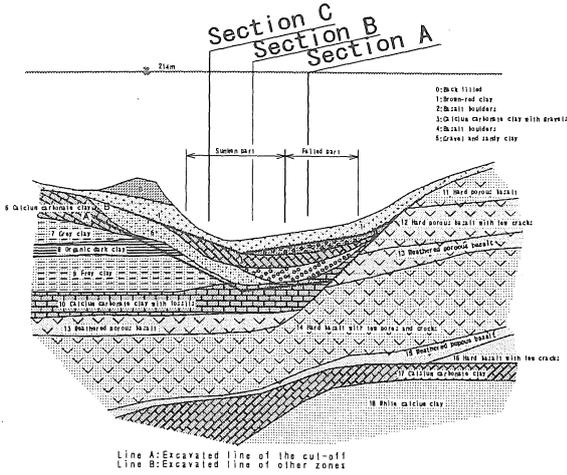


図-2 ダム軸地質縦断面図(脇坂作成)

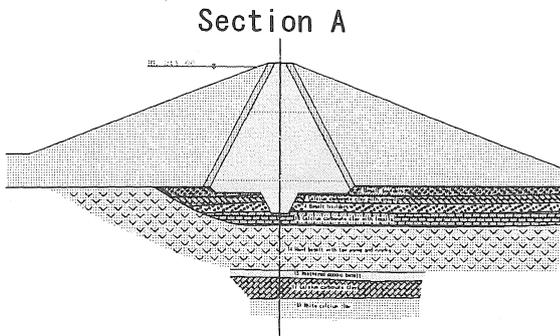


図-3(a) Section A

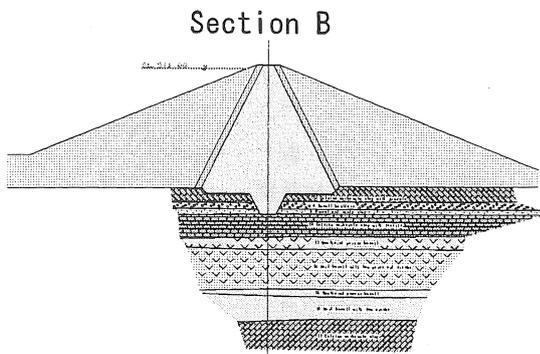


図-3(b) Section B

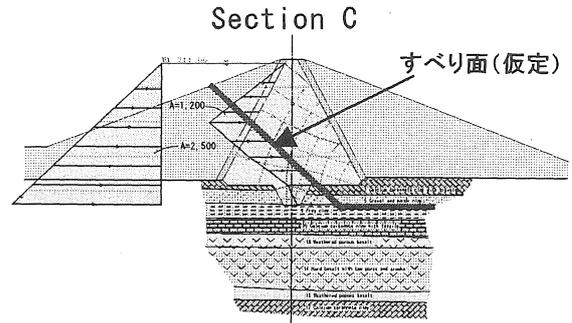


図-3(C) Section C

3. 崩壊形状

図-4に崩壊後のダム縦断および平面を模式的に示した。すなわち、同図(a)では、左岸残存部の最大沈下 1.5~1.6m 観測され、この値から決壊部の沈下は 2m 程度と推定される。また同図(b)で明らかのように、残存部において堤体は最大 13m 下流側に移動している。また、この移動は横断的には図-5, 6, 7のごとく推定される。これらの図は図-4に示したA-A', B-B', およびC-C'断面である。また、図-3は図-4, 5を基に推定したものであるが、堤軸は下流側にほぼ 20m、また天端は約 2m 沈下し、この時点で堤頂越流が発生したものと予想される。また、図-6ではコア部が保護ゾーン(フィルター、ロック部)なしに高さ 15~18m、約 5 分の勾

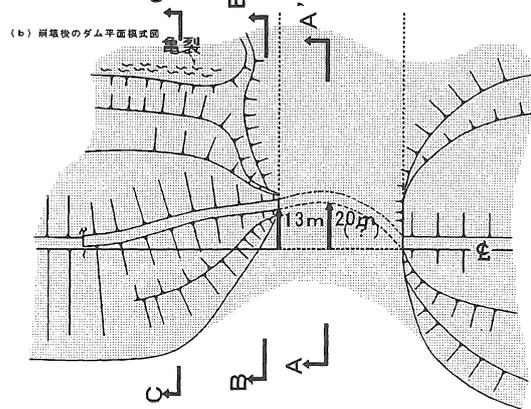
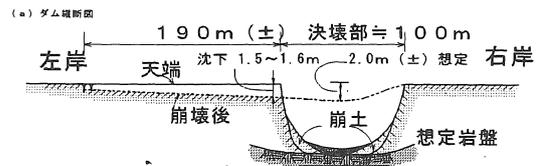


図-4 ダム縦断・平面模式図

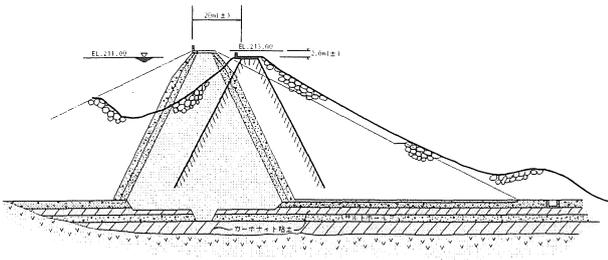


図-5 決壊部の横断（推定）模式図

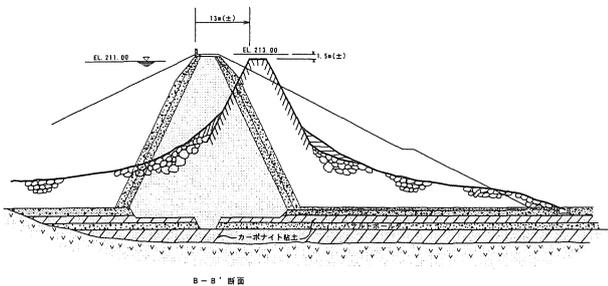


図-6 堤体残存部模式図
(現場においてスケッチしたもの)

配で安定していることが分かる。さらに、図-7は現地においてスケッチされたものであるが、上流ロックゾーンは大きく陥没し、一方下流側法面は小段付近で僅かな盛り上がりが見られ、また法尻は大きく盛り上がり、亀裂も確認された。

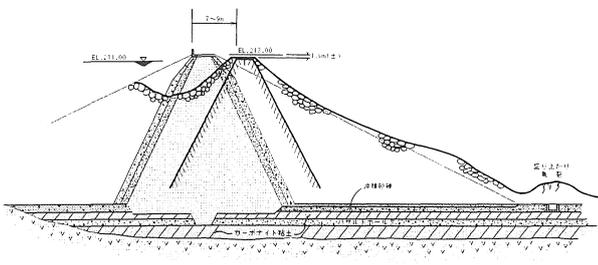


図-7 堤体残存部模式図（スケッチしたもの）

4. 決壊原因

決壊の原因としては、次に示すように幾つかの要因が考えられる。

4.1 コア部の水理的破壊

コアトレンチの上流に存在する透水層（バサルトポールダおよび沖積砂層）は、コアトレンチにより遮断されているため、その水圧は図-8に模式的に示したように貯水位とほぼ同程度に上昇するものと推定される。このため、コア部はコア前面と砂層部から浸透が起り、飽和領域が急速に拡大されることになる。

もし、コア部がかなりの不飽和状態（ $S_t \leq 70 \sim 75\%$ ）で施工されていたとすると、飽和することにより急激に強度が低下し、同時に沈下が起ることとなる（コープス現象）。この種の沈下がコアトレンチ周辺で発生すれば、コア内部では拘束されている部分と、そうでない部分との不連続面が形成され、これが水道となって土粒子を流し出すことになる。この場合、高い水圧のためフィルターもロックゾーンに押し流され、フィルターの機能は失われ、堤体は決壊することになる。この時の決壊に至るモードは図-9のごとく想定される。

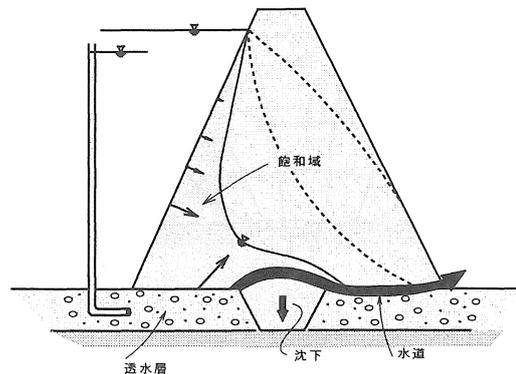


図-8 コアトレンチ部の飽和による水道の形成

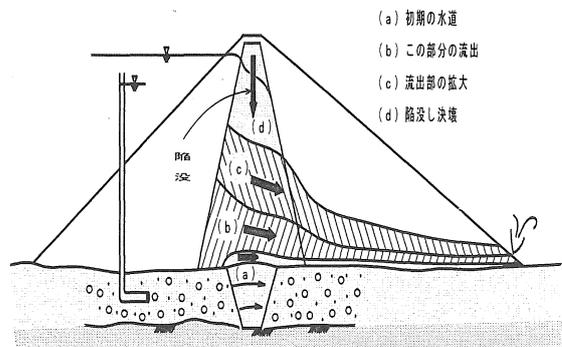


図-9 水理的破壊の決壊に至るモード
(想定)

4.2 コアトレンチ部のパイピング

水理的破壊現象はコア部が飽和, 沈下し, 局所的な拘束圧の低下により不連続面が形成され, これが水道となつてコアを流出することによる決壊である。これに対し, パイピングによる決壊は, 次の 3 ケースが考えられる。

- (1) コアトレンチ底部のパイピング
- (2) コアトレンチ内のパイピング
- (3) 上記(1), (2)が同時に発生

上記(1)は図-10 に示したように, 砂層内の水圧が上昇し, これによりコアトレンチ底部粘土またはコア内においてパイピングが発生し, これが逐次拡大し決壊に至るものである。また, (2)は図-11 に示したように, コアトレンチの埋戻し転圧が不十分な場合に発生することになる。

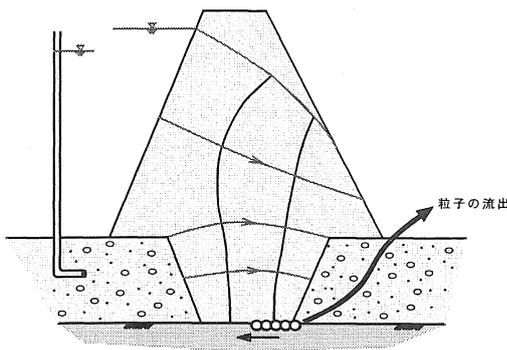


図-10 基礎のパイピング

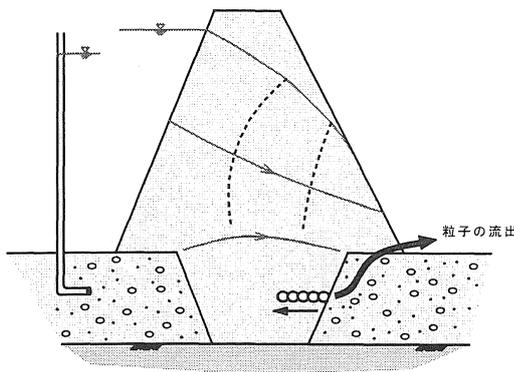


図-11 コアトレンチのパイピン

4.3 堆積粘土の強度低下

堆積粘土内には(カーボナイト粘土), 我が国における第三紀の泥岩で見られるように, 潜在的亀裂が多く存在

している。これについては崩壊現場において, 亀裂内に水分を含み, 鏡肌状となつていたことが確認された。この種の粘性土は高い圧力での拘束下において, または不飽和状態では高い圧縮強度を有することが知られている。しかし, 拘束圧が一旦解放された場合, 亀裂は開口し, 水分を吸収し, 強度が極端に低下する。この関係を模式的に示したのが図-12 である。

粘土層が飽和し, 強度が低下すれば, この層を通るすべり破壊が想定される。粘土層が飽和する条件として, 上述のコア部の水理的破壊やパイピング現象が考えられるが, このような条件では有効拘束圧の減少は考え難い。有効拘束圧減少の条件としては図-13 が想定される。すなわち, 図-13 の上部砂層の堤体下流側における揚圧力はカットオフにより遮断され, それほど上昇することはないと考えられる(ただし, コアトレンチ底部でパイピングが発生した場合は別)。これに対し, 下部のバサルト層の透水性は, 比較的高いので, この層の揚圧力はかなり大きくなるものと予想される。このように考えると, 法尻付近では有効拘束圧は極端に減少し(図-12 における 1.0kg/cm^2 以下), これによって強度は激減することになる。

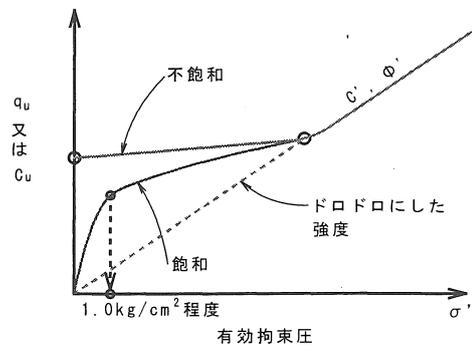


図-12 有効拘束圧と強度の関係

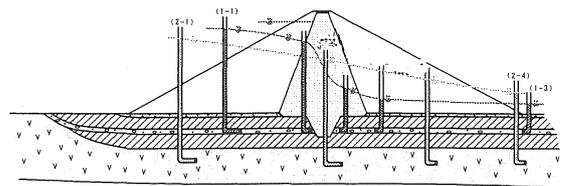


図-13 粘土層に作用する揚圧力

5. 崩壊のメカニズム

崩壊のメカニズムを想定するため、上述の要点を整理すると、

- 1) 測量結果によると、堤軸は最大約 13m 下流側に移動している。
- 2) コア部は施工時の形状をそのままの状態の下流側に移動している（平行移動）。
- 3) 左岸残存部法尻付近が盛り上がり、すべり面が観察される。
- 4) 堤体下流の小段よりやや低い法面において、僅かな陥没が観察される。
- 5) コアトレンチ付近および法尻付近の粘土層内には多くの亀裂が見られ、この亀裂内に水を含み鏡肌状となっており、極端な強度低下が確認された。

以上により、本ダムの崩壊メカニズムは次のように推測される。

- 1) バサルトまたはバサルトボールダ層内の揚圧力が上昇。
- 2) 粘土層の有効拘束圧が低下し、粘土層の強度が減少し、粘土層を通るすべりが発生。
- 3) これにより堤体が沈下し、堤頂部の越流が発生。堤頂部の越流は、ダムの破局的決壊をもたらせたものと思われ。

なお、すべり破壊には次の 2 ケースが想定される。

- ・) 粘土の強度低下が法尻付近から始まり、これが堤体内に進行し、滑動力が抵抗力を上回った時点で一気に滑動した（図-14(a)）。

いま、コアに作用する水圧 P_w 、土圧 P_e とし、滑動に対する安全率を概算してみると、

$$P_w = 40 \times 40 / 2 = 800 \text{ ton/m}$$

$$P_e = K \cdot \sigma_v \cdot 40 / 2 = 320 \text{ ton/m}$$

ただし、 $K=0.5$ 、 $\sigma_v = \gamma_{\text{sub}} \times 40 = 32 \text{ t/m}^2$

すべり面長 = 100m とすると、 $C_u = 11.2 \text{ t/m}^2$ 、

ここで、粘土の強度 (C_u) = $0.3 \sigma_v$ と仮定

すると、

$$\sigma_v = 20 \text{ m} \times 1.8 = 36 \text{ t/m}^2$$

$$\therefore C_u = 10.8 \text{ t/m}^2 \text{ となり、}$$

$$F_s = 10.8 / 11.2 = \underline{0.96}$$

となり、この仮定の基では崩壊することになる。

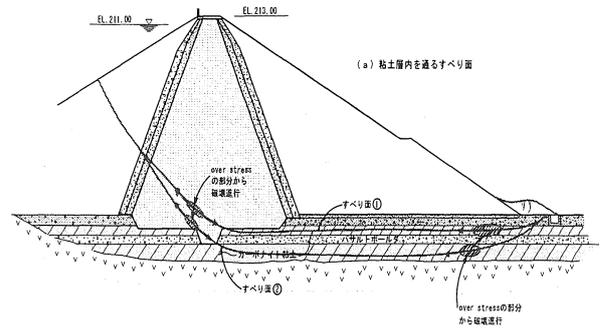


図-14(a) 進行性破

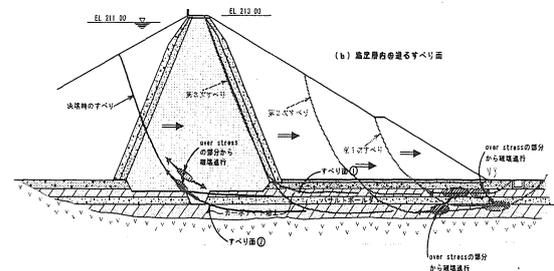


図-14(b) 進行性

・) 進行性破壊

有効拘束圧が法尻付近で極端に低下することから、図-14(b)に示したように下流小段付近において第1次のすべりが発生する。受働域を失った斜面は第2次、第3次のすべりを起こし最終段階に至るものである。本ダムの場合、この形態の破壊の可能性が最も有力であると推測される。

6. あとがき

Zeyzoun Dam 決壊の要因として、カルシウム粘土層の有効拘束圧の減少に伴う堤体のすべり破壊が有力である、との見解を述べたが、この他の要因は全く考えられないということではない。これらは例えば崩壊の要因として示した水理的破壊やパイピングに基因する破壊である。特に、コア材料の物理的性質は、粒度曲線（図-15(a)）によるとコロイド分 ($\phi \leq 0.001 \text{ mm}$) が約 50% (当量比) 含有している、にもかかわらず最適含水比が 20~22% であり、乾燥密度も 1.70 t/m^3 以上を示している。常識的にはコロイド分を 20% 以上含有する場合は、ダムに

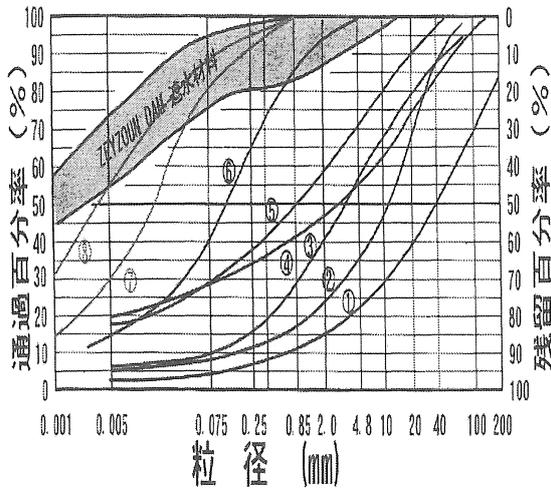


図-15(a) 土質材料の物理的及び力学的特性 (粒度特性)

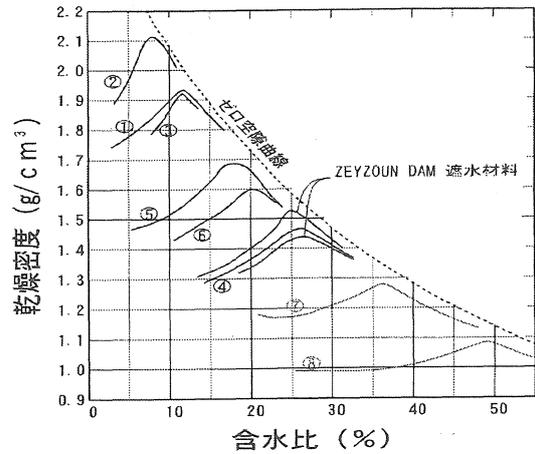


図-15(b) 土質材料の物理的及び力学的特性 (突固め特性)

限らず一般盛土材料としてもあまり使用されない。これは力学的特性、すなわち、乾燥密度が小さく、せん断強度が低く、また高い圧縮性を示すからである。

しかし、本ダムのコア材料として使用されているコロイド材料は、せん断強度大、圧縮性もそれほど大ではなく、先に述べた最大乾燥密度や最適含水比も盛立材料として適当である、かのように見受けられる。

このことは次のように考えられ、コア材料として利用した場合、重大な誤りを招く恐れもある。すなわち、粘土やコロイド粒子は常に固着水（吸着水（Water film）とも云う）で覆われている。この固着水は極めて高い接着力を有し、粒子を乾燥することにより発揮される。すなわち、個々の粒子は相互の固着水により多くの粒子を結合し、新しい1個の粒子を創生する。この創生により新しい粒度特性を有する材料が生まれる。そして、この結合力は土を浸水下におき、長期間放置することにより消滅すると考えられているが、その期間は定かではない。図-15は Zeyzoun ダムのコア材料の粒度分布と突固め特性を一般土のそれと比較して示したものである。図で明らかなように、Zezoun ダムのコア材料の突固め結果

は、一般土の粒度④を突固めた結果と似ている。このことは上記のようにコロイド粒子が乾燥により団粒化したのではないかと想像される。

本ダムにおいて用いられている材料は、統一分類による SC 材の力学的特性を示していることから、(図-15(b)の突固め特性) 粒子の乾燥に基因する結合（創生）粒子ではないかと考えられる。

もし、そうであるとすれば、コア材料として構築し、貯水することにより飽和し、力学的特性、例えばせん断強度の減少や高い圧縮特性が現れるものと予想され、これがすべり破壊や水理的破壊につながるのではないかと想像される。

そこで、シリアのような乾燥地帯において、フィルダムを安全に構築するためには、この種のコア材料に関する精度の良い試験、研究が必要と思われる。

また、カルシウム粘土は、我が国の第三紀泥岩と同様、広範囲に、しかもいたる所に分布している。この種の粘土についても強度低下に関する実験・研究が望まれる。

(受理 平成15年6月2日)