

(1) ダム基礎軟岩のパイピング抵抗性 (第2報)

建設省土木研究所 正会員 山口嘉一
同 同 〇田原則雄

Piping Potential of Soft Rocks for Dam Foundations (part 2)

Yoshikazu YAMAGUCHI and Norio TAHARA

Public Works Research Institute, Ministry of Construction

Abstract

Recently, in Japan, not a few dam sites are composed of soft rock foundations, such as sedimentary rock of the Neogene, volcanic fall deposit of the Quaternary, weathered granite and so on. Soft rocks are weak in strength compared to hard rocks. Large seepage force will take place in dam foundation during filling of reservoir. If dam foundation consists of soft rock, it is necessary to investigate seepage failure, such as piping, internal erosion and hydraulic fracturing. Therefore we summarized and reported the results of laboratory piping tests for soft rocks at the 23rd symposium. After that symposium, we performed many laboratory piping tests. In this paper we reported the results of tests, particularly about anisotropy of the index of piping potential(i_{cr}), influence of maximum grain size of materials on i_{cr} and the difference between i_{cr} of undisturbed specimens and that of disturbed ones.

1. はじめに

近年、洪水・利水上の要請から、軟岩上でのダムの建設事例が増加している。軟岩は硬岩に比べその強度が小さく、設計時にダムの湛水に伴う浸透流の動水勾配が議論になることも少なくない。このような状況に鑑み、筆者らは、前回のシンポジウムにおいて、7ダムサイトで採取した11種類の軟岩、土砂に対する室内パイピング試験結果(限界動水勾配 i_{cr})を報告するとともに、 i_{cr} と透水係数、間隙比、一軸圧縮強度との関係についても考察した¹⁾。今回は、その後に実施した室内パイピング試験結果について報告する。特に、 i_{cr} の異方性、 i_{cr} に与える試料の最大粒径の影響、不攪乱試料と攪乱試料の i_{cr} の差異等を中心に考察する。さらに、より簡易な方法による i_{cr} の推定を目指して、同一試料に対して室内パイピング試験とシラスのガリ侵食特性把握を目的として開発された洗掘抵抗試験²⁾を実施し、 i_{cr} と洗掘抵抗値の関係を求めたので併せて報告する。

2. パイピング試験の概要

今回は、前回も試験を実施しているKダムの試料の他に新たにTダムの試料と茨城県産まき土に対しパイピング試験を実施した。今回用いた試料は、いずれも前回と同様に軟岩あるいは土である。今回の試験では、不攪乱試料に対する試験の他に限界動水勾配に関する細部検討をするため、攪乱試料を用いて層理面に平行な方向と垂直な方向の流れに対するパイピング特性の異方性、試料の最大粒径の試験結果への影響、同一密度でも不攪乱試料と攪乱試料を用いた場合の違いなどを主として検討した。使用した各試料の材質と試験方法を表-1に示す。なお、室内パイピング試験方法等の詳細については、参考文献1), 4)を参照されたい。

表-1 使用した各試料の材質と試験方法

	K ダ ム ²⁾	T ダ ム	(茨城県産)
岩・土の種類	凝灰岩	砂礫および旧河床堆積物	まき土
地質年代	新第三紀漸新世	第四紀更新世	—
止水材	エポキシ樹脂	パラフィン+松脂+ (石膏)	エポキシ樹脂
供試体寸法	径 100mm 高さ 127mm (円柱形)	径100~150mm 高さ127~200mm (円柱形)	径 100mm 高さ 127mm (円柱形)
昇圧段階	段階的に動水勾配を載荷 第一段階の動水勾配は1で、その後2ずつ増加	①0~0.1kgf/cm ² →0.01kgf/cm ² ずつ ②0.1~0.3 →0.02 — — ③0.3~1.0 →0.05 — — ④1.0~2.0 →0.1 — — ⑤2.0以上 →0.2 — —	段階的に動水勾配を載荷 第一段階の動水勾配は1で、その後2ずつ増加
1段圧の締結時間と流量測定方法	①締結時間の長い場合 1日24時間継続し、その最終の1時間で透水量を測定する。 ②締結時間の短い場合 30分の安定待ち時間の後、30分の透水量を測定する。	加圧後10分後から15分までの間で何回か測定し、その平均をとる。	1動水勾配段階は、10分間の安定待ち時間の後、30分の透水量を測定する。
破壊の判定基準	供試体表面が盛り上がりたり、ひび割れが発生した時点の動水勾配を限界動水勾配とする。	動水勾配と透水量の直線関係から、透水量の急増する点を限界動水勾配とする。急増する点が不明な場合は、透水係数の変化点、変位の変化点などを加味して求める。	供試体表面が盛り上がりたり、ひび割れが発生した時点の動水勾配を限界動水勾配とする。
観察項目	流量、測定水の濁り、供試体の変状等を目視により観察	流量、透水係数の測定、供試体の変状等を目視により観察	流量、測定水の濁り、供試体の変状等を目視により観察 浸透破壊が発生した供試体には色素を流し、破壊発生箇所を観察

3. 限界動水勾配に関する細部検討

3.1 限界動水勾配 i_{cr} の異方性

Kダムの締固め試料に対する試験から求めた限界動水勾配 i_{cr} (供試体表面にひび割れが発生した時点の動水勾配) およびその透水係数と締固め時含水比の関係を図-1に示す。結果は、締固め方向と同方向に通水する場合(ケースV)と直交して通水する場合(ケースH)に分けて整理している。図中の実線と破線は、それぞれケースVとHの3種類の設定含水比での動水勾配の平均値を結んだものである。また、限界動水勾配と透水係数の関係を図-2に示す。 i_{cr} は、ケースV、Hを併せて w_{opt} (最適含水比) - 3%、 w_{opt} 、 $w_{opt} + 3\%$ と含水比が大きくなるにつれて、大略やや上昇する傾向がある。この現象は、含水比と透水係数の図からもわかるように、一般に締固められた土の透水性が粒子配列等の原因により w_{opt} よりやや湿潤側で最小値をとることに起因していると考えられる。つまり、透水性が小さいほど浸透破壊に対する抵抗性が高いということである。このことは、図-2からも明らかである。

平均値で議論すると、締固めて作製した供試体の透水性には、水平方向の透水係数 k_H は鉛直方向の透水係数 k_V よりも大きく、また k_H と k_V には w_{opt} 付近の含水比をピークに異方性が存在するものと考えられる。 i_{cr} については、 w_{opt} 付近ではケースVがケースHの2.5倍程度の値を有し、 $w_{opt} \pm 3\%$ では両ケースの i_{cr} に大きな差がない。よって、限界動水勾配についても、 w_{opt} 付近の含水比をピークとした締固めによる異方性が存在するものと推察される。

3.2 i_{cr} に与える試料の最大粒径の影響

図-3に、Kダムの締固め試料に対して実施した-19.1mm材と-4.76mm材の i_{cr} と含水比の関係を示す。-19.1mm材については、4.76mm~-19.1mmの間に入る土粒子の重量含有量は約19%である。なお、-19.1mm材の含水比としては、礫率補正^{5), 6)}により算出した4.76mm以下の粒径の粒子のそれをあてている。この図から

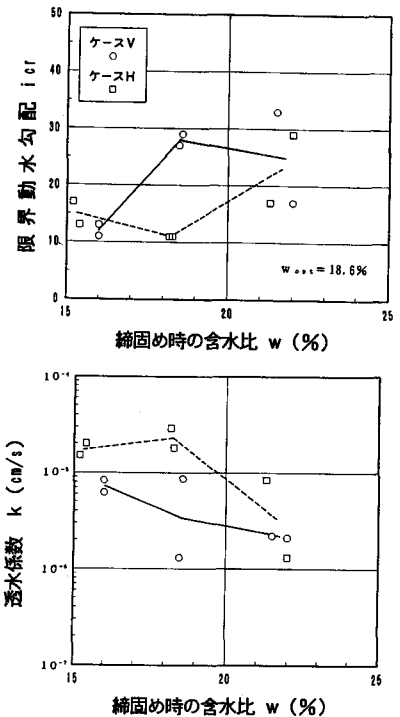


図-1 含水比と限界動水勾配および透水係数との関係

以下のことがわかる。

i_{cr} は、-4.76mm材の w_{opt} である23.5%付近の21~26% ($w_{opt} \pm 2.5\%$)の含水比の範囲では、両材料とも30程度の値を示している。20%以下の含水比部分については-19.1mm材の結果しかないが、 i_{cr}

は $w_{opt} \pm 2.5\%$ の30程度

度よりも小さく10程度である。 $w_{opt} + 2.5\%$ 以上の含水比部分については、 i_{cr} は-19.1mm材、-4.76mm材とも $w_{opt} \pm 2.5\%$ の30程度よりも小さい。以上より、 i_{cr} については-19.1mm材と-4.76mm材で大差がないことが判明した。このことは、浸透破壊抵抗性が大きな粒径の礫部分よりも-4.76mmの砂分以下の粒径の密度に大きく依存しているためと考える。この事実は、筆者らの一人が、比較的粒度範囲の広い砂を使用して行ったパイピング試験においても確認している⁷⁾。

3.3 不攪乱試料と攪乱試料の i_{cr} の差異

図-4はTダムの砂礫②、砂礫④と旧期崖錐(砂質部)から採取、作製した供試体の透水係数と i_{cr} の関係を不攪乱試料と攪乱試料に分けて図示したものである。各試料の特徴は、砂礫②と旧期崖錐(砂質部)が礫(前者は粒径1~4cm程度、後者は3~10cm程度)を多く含み基質に細粒分が少ないのに対し、砂礫④は細砂や細かい礫で構成されている。図中の2本の直線は、Sichartの式⁸⁾、中部電力の式⁹⁾を示したものである。これらの図から以下のことがわかる。攪乱試料、不攪乱試料いずれも既往の実験式に見られるように透水係数の大きいものほど i_{cr} が小さくなる傾向がある。それぞれの試料についてみると、砂礫②では、不攪乱試料と同程度の密度に締固めた攪乱試料の透水係数は不攪乱試料の透水係数に比べ約1オーダー小さくなっているが、 i_{cr} については大差はない。旧期崖錐(砂質部)については、不攪乱試料のデータが1つしかなく明言はできないが、砂礫②と同様に攪乱試料の透水係数は不攪乱試料の透水係数より1オーダー小さく、 i_{cr} についても大差はないものと推察される。砂礫②、旧期崖錐(砂質部)で攪乱試料と不攪乱試料に差が見られない理由として、i)骨格構造が十分発達していなかった。ii)層理が発達していてその弱部を取り込んだ。等が考えられる。一方、砂礫④では、攪乱試料と不攪乱試料で透水係数に差異はないが、 i_{cr} については攪乱試料の方が不攪乱試料よりやや小さい傾向を示している。図-5は砂礫④よりさらに細かい砂に対してパイピング試験を実施した長柄ダム¹⁰⁾の透水係数と i_{cr} の関係を図示したものである。長柄ダム砂層では、不攪乱試料と同程度に締固めた攪乱試料の i_{cr} は1程度であるのに対し、不攪乱試料では3~20と全体的に大きな値を示している。これは前報¹⁾でも述べたように土粒子間の

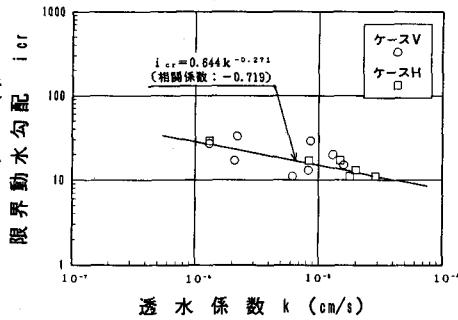


図-2 透水係数と限界動水勾配

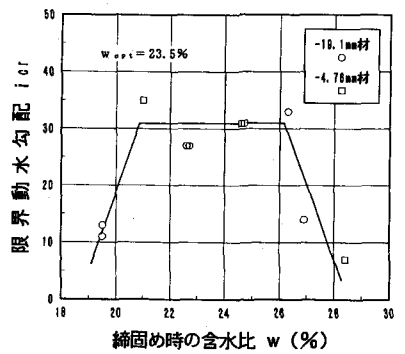


図-3 i_{cr} に与える試料最大粒径の影響

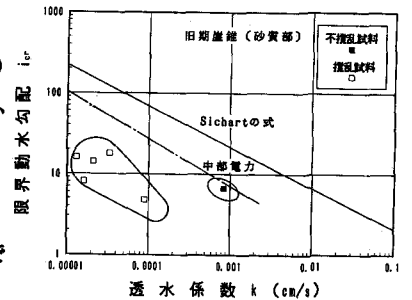
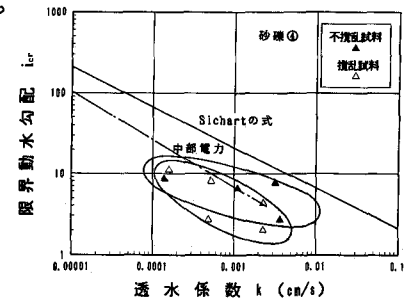
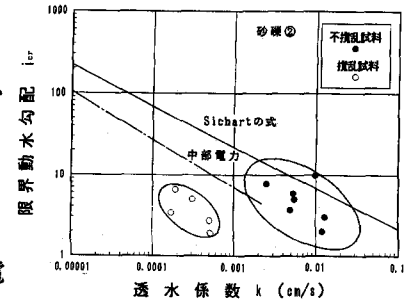


図-4 透水係数と限界動水勾配の関係(Tダム)

骨格構造の発達が大きく影響しているものと考えられる。礫を含むものについては、今後更に検討していきたいと考える。

4. 洗掘抵抗試験²⁾、¹¹⁾結果と i_{cr} との関係

4.1 洗掘抵抗試験の概要

室内パイピング試験は、その原理が単純であるにもかかわらず、供試体の作製、破壊過程およびその観察には比較的長時間を要す。そのため、供試体の浸透破壊特性を把握する簡易な試験方法として、シラスなどのガリ侵食特性を把握するのに一時よく用いられていた洗掘抵抗試験を採用し、この試験から得られる洗掘抵抗値と限界動水勾配の関係を求めた。室内用の洗掘抵抗試験機の概観は図-6に示すように、主にポンプ装置、噴射ノズル装置、ピトー管式圧力計等で構成される。供試体は、茨城県産のまさ土を標準モールド（内径φ100mm、高さH127mm）内に3層に分けて投入し、JIS 1Ecのエネルギーで締固めて作製した。試験は、作製した供試体をノズル先端と15cmの間隔をおいて架台にのせ、ノズル先端水圧0.5kgf/cm²の水流を供試体に当て、水流が供試体を洗掘してノズルの反対側に貫通するまでの時間を測定するもので、このときの供試体の洗掘抵抗値は、その貫通時間（sec/12.7cm）で表す。なお、供試体は締固めたものをそのまま試験に供す不飽和供試体と、事前にパイピング試験と同様の方法で飽和させた飽和供試体の2種類作製した。

4.2 試験結果と考察

図-7に洗掘抵抗試験の結果を示す。図-7に示すように供試体の乾燥密度と締固め時の含水比の関係は、別途実施した試験より求めた締固め曲線上に分布しており、供試体はほぼ目標どおりに仕上がっていることがわかる。次に、洗掘抵抗値についてみると、不飽和供試体では、締固め時の含水比が大きいほど洗掘抵抗値が小さくなっている。これから、洗掘抵抗値が供試体密度はさることながら、締固め含水比に影響されることがわかる。一方、飽和供試体では、最適含水比 w_{opt} および乾燥側においては洗掘抵抗値に大差がないが、 w_{opt} より湿潤側においては洗掘抵抗値はかなり小さくなり、その含水比に対する大小関係は乾燥密度のそれにほぼ一致している。よって、供試体を飽和させた場合は、その洗掘抵抗値は乾燥密度に大きく依存するものといえる。飽和供試体の洗掘抵抗値は、不飽和供試体のそれよりも小さく、飽和により洗掘抵抗が小さくなるがよくわかる。ただし、 $w_{opt} + (3 \sim 4)\%$ の供試体では、両者にほとんど差がない。これは、締固め時の含水状態で既にかなり高い飽和度になっているためと推察する。限界動水勾配 i_{cr} とパイピング試験との供試体条件が同じである飽和供試体の洗掘抵抗値の関係を図-8に示す。この図より、供試体作製時の含水比に若干の差異があるものの i_{cr} と洗掘抵抗値には、 w_{opt} を境として含水比ごとに比較的よい対応関係が見られる。そこで、 w_{opt} 近傍、 w_{opt} より乾燥および湿潤側ごとに i_{cr} と洗掘

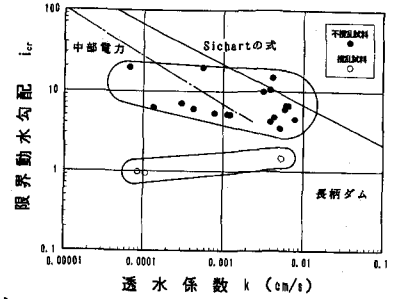


図-5 透水係数と限界動水勾配の関係（長柄ダム）¹⁰⁾

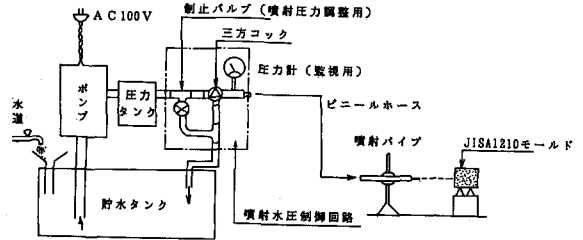


図-6 室内試験用洗掘抵抗試験機の概観²⁾

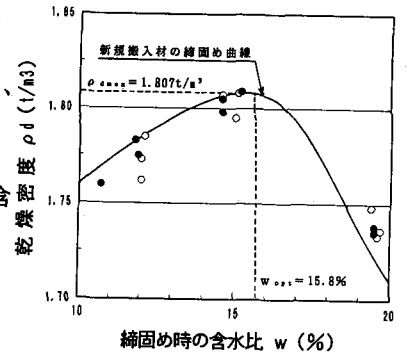
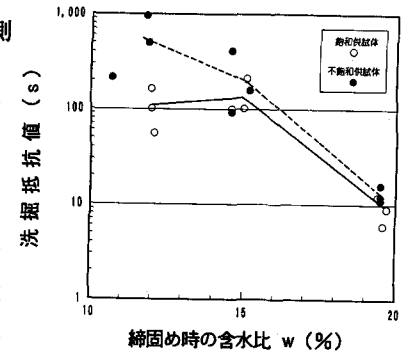


図-7 洗掘抵抗試験結果

抵抗値の平均をとり求めた両者の関係を図-9に示す。この図より限界動水勾配が大きくなると洗掘抵抗値も大きくなる傾向にあり、簡易な洗掘抵抗試験により浸透破壊抵抗性が推定できる可能性があることが判明した。しかし、何分にもデータ数が少ないうえ、材料ごとの差異（特に、礫分の含有率等）も予想され、今後実験数を増やしていく必要がある。

5. おわりに

前報に続いて、ダム基礎軟岩のパイピング抵抗性について、 i_{cr} の異方性、 i_{cr} に与える試料の最大粒径の影響、不攪乱試料と攪乱試料の i_{cr} の差異等を中心に報告した。これにより、 i_{cr} の特徴についてその認識を深めることができたと考える。また、限界動水勾配 i_{cr} の概略値をよりいっそう簡易な方法で推定することを目指して洗掘抵抗試験を実施した。この試験により得られた洗掘抵抗値と i_{cr} との関係から、簡易な洗掘抵抗試験により浸透破壊抵抗性が推定できる可能性があることが判明した。しかし、何分にもデータ数が少ないうえ、材料ごとの差異（礫分の含有率等）も予想されるため、今後実験数を増やして検証していく予定である。

最後に、本研究を実施するにあたって御協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表します。特に、洗掘抵抗試験機をお貸し頂くとともに試験手順を御教授頂いた（社）日本建設機械化協会建設機械化研究所の安達徑治研究第二部長には深く感謝致します。

参考文献

- 1) 松本徳久・山口嘉一・田原則雄：ダム基礎軟岩のパイピング抵抗性，第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.247～251，1991年2月。
- 2) 三谷 健・安達徑治：シラスの特性と洗掘抵抗試験，コンストラクション，Vol. 7，No. 1，pp.26～31，1969年。
- 3) 松本徳久・山口嘉一：低塑性築堤材料のパイピング抵抗性，建設省土木研究所資料，第2917号，1990年12月。
- 4) 藤澤侃彦・山口嘉一・田原則雄：ダム基礎軟岩のパイピング抵抗性に関する調査，ダム技術，No. 63，pp.41～48，1991年12月。
- 5) Walker, F.C. and Holtz, W.G.: Control of Embankment Material by Laboratory Testing, Proc. ASCE, No. 180, Dec., 1951.
- 6) 山口嘉一・安仁屋 勉・松本徳久：フィルダム土質材料の締固め、透水試験に関する考察，建設省土木研究所資料，第2820号，1990年1月。
- 7) 山口嘉一・松本徳久・横井一秀：粒度範囲の広い砂のパイピング特性，第25回土質工学研究発表会論文集，pp.1677～1678，1990年6月。
- 8) J. タロブル（進藤一夫訳）：岩盤力学，森北出版，p. 279，1970年。
- 9) 朝倉喜美男・長谷川英明：土質材料のパイピングに対する抵抗性とフィルタの有効性について，中部電力（株）総合技術研究所研究報告書，1970年7月。
- 10) 水資源開発公団房総導水路建設所：長柄ダム工事誌，pp. 80～85，1990年3月。
- 11) 土質工学会：土質試験法—第2回改訂版—，1979年12月。

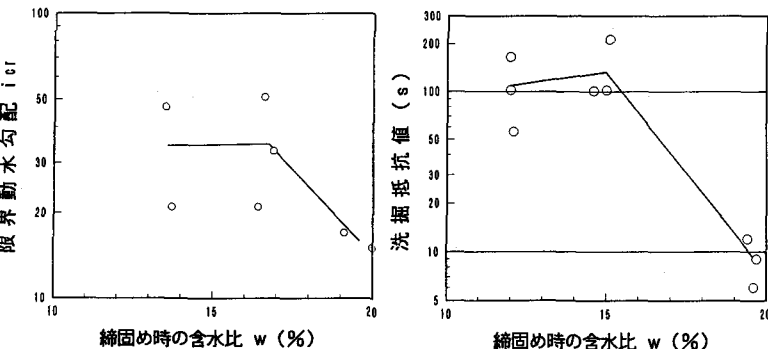


図-8 限界動水勾配と飽和供試体の洗掘抵抗値の関係

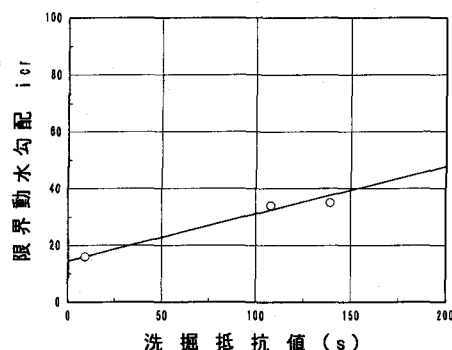


図-9 洗掘抵抗値と限界動水勾配の関係