

コンクリートダム岩着部のせん断特性に関する一考察

Shearing Property of the boundary between dam concrete and foundation rock

鈴木健一郎*・斉藤裕司**・蓮本清二***・橋本 淳****

Kenichirou SUZUKI, Hiroshi SAITO, Kiyoji HASUMOTO, Kiyoshi HASHIMOTO

Shearing Properties of the boundary between dam concrete and foundation rock were investigated with alteration analysis on the concrete for assessing the durability of the gravity dam which have operated for 90 years. Alteration of dam concrete was analyzed with XRD, DTA, MIT, and EPMA, and then concrete was altered about 10 mm depth from the surface of foundation rock. The boundary between dam concrete and rock foundation was subjected to direct shear tests. Shearing was occurred in the altered concrete of all specimens and the shear strength of them was a little lower than that of concrete specimens which were obtained far from the boundary between rock and dam concrete.

Key Words: rock foundation, concrete dam, shearing stress, alteration

1. はじめに

ダムは膨大な貯水を維持していることから、コンクリート表面の劣化等に対する補修を除けば、貯水機能が維持できない場合以外、半永久構造物として設計される¹⁾。しかし、特にコンクリートダムの安定性に影響を与える岩着部の長期的な劣化については、ダムサイトの近傍に試験体を暴露して、その強度や動弾性係数の変化などを測定した事例はあるが、水和生成物の変質状態に着目した調査・試験はほとんど実施されていない。さらにそれらのせん断強度を調べることで基礎岩盤との岩着の状態を調べた例もない。

この研究は、コンクリートダムの耐久性を明らかにすることを目的として、1912年に竣工した重力式コンクリートダムの堤体より採取したコアを用いて、90年を経過したコンクリートの性能、ダム岩着部コンクリートの水和組織の変質状態およびそれに伴う岩着部のせん断強度特性を検討したものである。

ボーリングによりコンクリートおよび岩着部から採取した試料を用いて、細孔径分布測定、X線回折分析、示差熱分析、EPMA (Electron Probe Microanalyser) を実施し、水和組織の変質範囲を明確にし、試験可能な岩着部供試体についてコンクリートの岩着面を強制せん断面とする一面せん断試験により力学性能を調べた。同時に実施した変質を受けていないと考えられるコンクリートおよびモルタル優勢部の一面せん断試験を通して、変質部岩着面のせん断強度の比較検討を行った。これらの結果について報告する。

2. ダムコンクリートの劣化状態調査

1) 劣化状態を調査した試料は、表-1に示した6体、および採取深度の異なるコンクリート供試体である。

* 正会員 株式会社 大林組 技術研究所 地盤岩盤研究室

** 正会員 株式会社 大林組 技術研究所 プロジェクト部

*** 正会員 東京電力株式会社 建設部 土木・建築技術センター ダム技術グループ

**** 正会員 東電設計株式会社 第一土木本部 地下環境技術部 地下水グループ

クリートと岩盤の接触状態は岩盤とコンクリートが密着した状態、開口亀裂がコンクリートに接触している状態および岩盤側が破碎している状態の 3 種類である。これらの接触状態は、ダムコンクリートの岩着部における地下水との接触状態に対応する。地下水との接触状態がセメント水和物の溶脱に大きな影響を与えることから、コンクリートと岩盤の接触状態は変質状態の調査において重要な要因となる。

まず、コンクリートの変質状態、すなわち炭酸化の範囲や溶脱の範囲の概略を知るために 1% のフェノールフタレインを噴霧する中性化試験を実施した。1% のフェノールフタレインで着色しない pH<8.6 の範囲は、基礎岩盤との接触状態に左右され、密着した場合は中性化しておらず、亀裂と接触していたり、破碎状態にある場合には中性化が進行していることが確認された。

2.1 水和組織の分析結果

(1) Ca/Si モル比の分布

セメントの主要鉱物である珪酸カルシウムの水和反応生成物（以下 CSH と略す）中の Ca/Si モル比は CSH を構成する Ca と Si の量比を示すものであり、普通のコンクリートでは生成当初では 1.8 前後あるいはそれ以上の値を示す。水に接している条件下では、CSH から Ca が徐々に溶解していくのに対し、Si はほとんど溶解しないため、Ca の溶解が進行するのに伴って Ca/Si モル比は減少することになる。このように、Ca/Si モル比の変化を調べることで CSH の溶脱の度合いとその範囲を確認することができる。ここでは、Ca/Si モル比を EPMA 分析法により測定した。

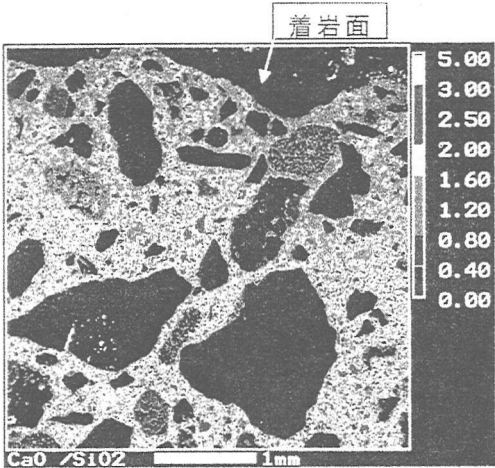
EPMA (Electron Probe Microanalyser) は試料に電子線を照射した時に試料から発生する X 線 (特性 X 線) を測定することにより含有されている元素の種類および量を同定することができる。これを含有量の応じてコンター表示することによって、2次元の元素分布を知ることができる。結果の一例を図一1に示すとともに Ca/Si モル比の減少している範囲 (以下変質深さ) を表一2に示した。変質深さは岩盤との接触状態によって異なり、密着していた場合は 2mm 以下と小さく、破碎した岩盤では 18mm と大きかった。

(2) X 線回折分析

X 線回折分析では水和物の構成を調べた。結果の一例 (B-5-2) を図一2に示す。主要な水和鉱物である CSH とエトリンガイトならびにモノサルフェートが全試料から検出された。一方、水酸化カルシウムは検出されなかった。水酸化カルシウムは溶脱や炭酸化によって消失するが、EPMA

表一1 供試体条件

試料名	原位置での接触状態
C-1	密着
C-2	密着
C-3	ほぼ密着
J-1	開口亀裂接触
J-2	岩盤側破碎部
R-1	岩盤側非破碎部



図一1 EPMA 分析結果の一例(C-1)

表一2 EPMA による変質深さ

コアNo.	岩着状態	Ca/Siモル比減少範囲	Ca/Siモル比の値	溶脱現象の程度*
C-1	密着	岩着面から約1.1~1.6mm	0.4~1.2	○
C-2	密着	岩着面から約0~0.2mm	0.8~1.6	△
C-3	ほぼ密着	岩着面から約0.7~1.3mm	0.4~1.2	○
J-1(ひび割れ部)	開口亀裂交差	岩着面から約5.3mm	0.0~1.2	○
J-1(密着部)	密着	ほとんど変質無し	0.8~2.0	×
J-2	岩盤側破碎	岩着面から約17.0~18.0mm	0.0~1.2	◎

* ◎：多い， ○：やや多い， △：少し， ×：無し

によって変質していないと判定された位置でも検出されなかったことから、もともと水酸化カルシウムが含まれていなかった可能性が非常に高いと判断できる。次に、EPMA では変質していないと判定された位置では炭酸カルシウムは検出されなかったが、岩着面近傍の試料では、炭酸カルシウムのピークが明確に認められた。これは、岩着面に近いほど地下水中の炭酸イオンと接触しやすく、炭酸化しやすい状況にあったためと考えられる。

(3) 示差熱分析

示差熱分析によって炭酸カルシウムの含有割合を調べた。変質深さが 2 mm 以下と小さい試料では岩着面から 10 mm 以深で、変質深さが 18 mm と大きかった試料では岩着面から 20 mm 以深で炭酸カルシウムの含有量は 1% と少なかったが、岩着面のごく近傍ではいずれの試料でも 2~3 % と増加していた。岩着面に近いほど含有量が多くなる傾向は X 線回折分析結果と一致している。このことから、岩着面に近いほど地下水中の炭酸イオンの浸透に伴って炭酸カルシウムが生成されたものと推察される。

(4) 細孔径測定

平均細孔直径は EPMA 分析結果から得られた溶脱傾向とはほぼ一致し、B-5 の深度方向における平均細孔直径に注目すると岩着面~10 mm の範囲で、 $0.0262\mu\text{m}$ 、次いで 10~20 mm の範囲で $0.0179\mu\text{m}$ 、20~30mm が $0.0162\mu\text{m}$ 、50~60mm が $0.0134\mu\text{m}$ と岩着面から離れるにつれて小さくなる傾向を示した。

以上の結果から、岩着部近傍のコンクリートでは、水和物からの Ca の溶脱が生じているとともに、地下水に含まれる炭酸イオンによって炭酸カルシウムが僅かに生成している。その結果として、水和組織がポーラスになっているといえる。その範囲は岩盤との密着状態によって異なり、密着していた場合は 2mm 以下と小さく、破碎した岩盤の場合は 18mm ほどになる。

一方、EPMA の結果から変質していないと判定された部分では、セメント水和物の核となる CSH が全試料から検出されるとともに、エトリンガイトならびにモノサルフェートも検出されたことから、ダムコンクリートは水和物が健全な状態にあると判断される。

上記の変質状態を把握した上で、変質が強度特性に及ぼす影響を調べるために岩着部を強制せん断面とする一面せん断試験を実施した。

3. 一面せん断試験

3.1 供試体および試験方法

試験に用いたせん断試験装置は、ROCTEST 社製のポータブルシアーボックス (モデル PHI-10) とデータロガーとパソコンを組み合わせたも

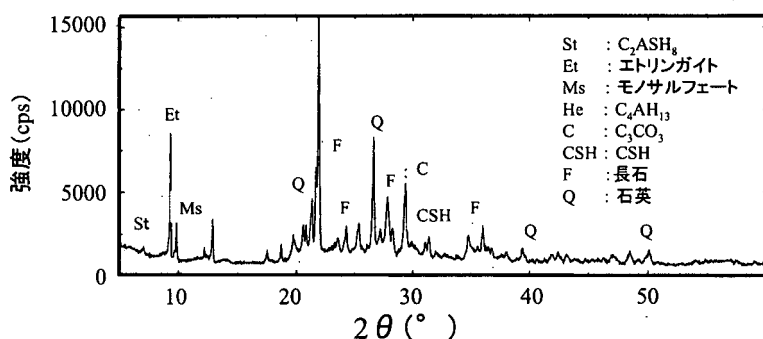


図-2 XRD 分析結果

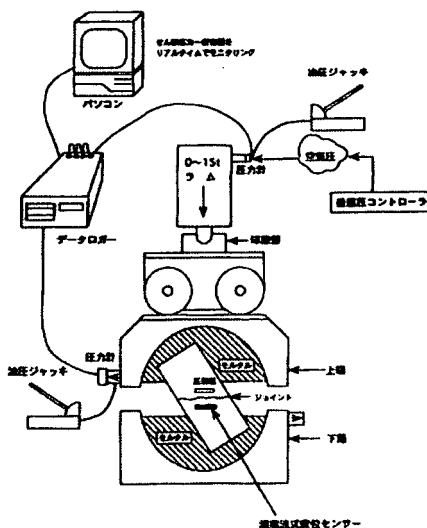


図-3 簡易ジョイント一面せん断試験装置構成

のである。装置構成を図-3に示す。垂直応力用ジャッキ実効荷重、せん断用ジャッキ実効荷重ともに5tである。せん断速度は、せん断変位速度でおよそ0.05mm/minとして、手動油圧ポンプにより調整しながら、せん断を行った。

岩着部の供試体は同一試料を採取し、垂直応力を変えたせん断試験を幾つか実施して強度特性を知ることができないため、ここでは、最小の垂直応力においてせん断応力～せん断変位関係がピークを迎えた後、垂直応力を次の垂直応力まで増加させ、せん断を続けさせる多段階一面せん断試験とし、強度特性を把握した。

せん断方向は、最もせん断強度の小さい方向と思われる、すなわち凹凸の小さい方向とせん断方向を一致させることとした。

供試体は表-3に示すもので、変質深さはEPMAから得られたCa/Siモル比の減少している範囲の再掲である。

3.2 試験結果および考察

(1) 岩着部のせん断強度

岩着部のせん断試験後の分離面の一例を写真-1に示す。写真中で色を抜いた部分が岩石が現れている部分で、せん断はほぼコンクリート内で起こっていることがわかる。

岩着面の垂直応力とピークせん断応力との関係を図-4に示す。図には表-3に示した5つの試料の試験結果について初期の載荷と再載荷の結果を併記した。図中、No.5はEPMA変質深さが17.0～18.0mmとなっており、変質部のコンクリートせん断強度を反映するものと考えられる。このため、

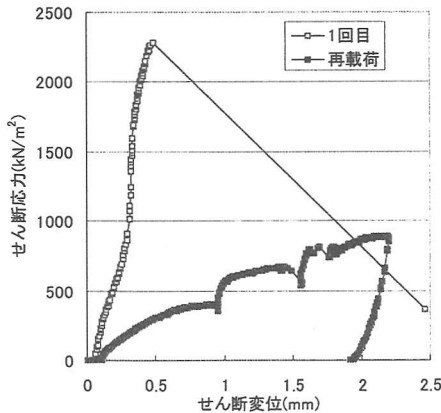


図-5 No.2 供試体の初回および2回目載荷時のせん断応力～せん断変位関係

表-3 EPMA 変質深さとせん断試験供試体

試料No.	試験時の接触状態	変質深さ(mm)	せん断面積(cm ²)	付属せん断試料
1	密着	-	80.5	コンクリート部
2	密着	1.6	72.48	コンクリート部
3	分離	0.2	81.8	コンクリート、モルタル部
4	分離	1.3	97.05	コンクリート、モルタル部
5	コンクリート打継ぎ	18.0	30.3	-

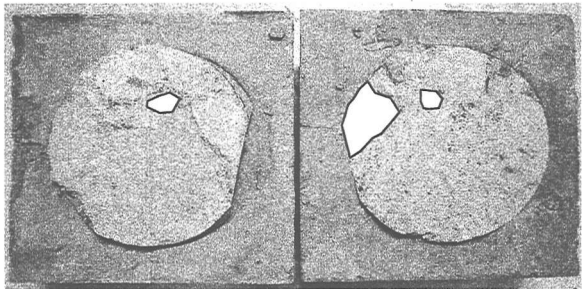


写真-1 せん断試験後の分離面の一例 (No.1 供試体)

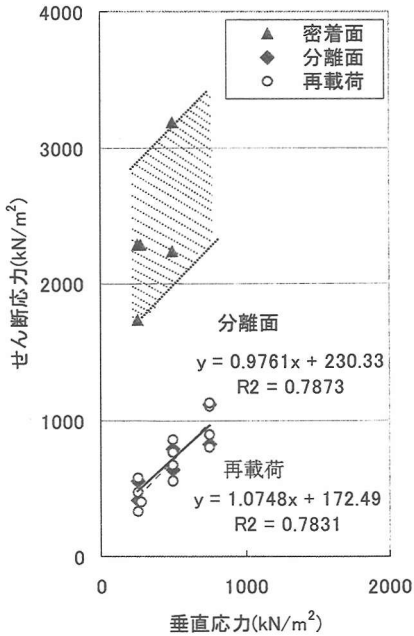


図-4 せん断応力～垂直応力関係

分離したコンクリート表面に新たにモルタルを打継ぎ、供試体としたものをせん断試験に供した。No.5の結果は、初期載荷のみの結果であり、密着グループに含まれる。密着面であるNo.2のせん断応力～せん断変位関係を図-5に示す。No.2は、垂直応力 250 kN/m^2 でせん断応力載荷時に、急激な破壊が起こり、岩着部が完全に分離したため多段階載荷によりせん断強度特性が得られていない。その後、2回目のせん断試験では、緩やかな勾配でピークせん断応力に達する挙動となった。分離された面の形状はNo.1に比べて凹凸が大きい形状で、せん断されているコンクリート部分の厚さは、定着部から 1 mm 以下で、これは変質深さに相当する。

ここで、密着面においてせん断強度を推定するために分離面の試験結果と再載荷試験のそれを考える。両者の強度特性は、図からわかるようにほぼ等しいものである。再載荷試験で得られたせん断強度は、残留状態でのそれにほぼ等しく、ピークせん断強度と残留強度においては摩擦角がほぼ等しいものと考え、再載荷試験および分離面の試験結果を平行移動して粘着力を推定することが可能である。すなわちある程度の範囲をもって

$$\tau = \tan 45^\circ \sigma + 1480 \sim 2680 \quad (1)$$

となる。ただし、不連続面の多段階一面せん断試験では、ピークせん断強度特性の摩擦角を過小評価する可能性があるという報告²⁾もあるため推定粘着力は若干大き目であることが予想される。

No.3およびNo.4供試体は採取時は密着していた岩着部が試験に供する段階で分離していたために小さな強度になっている。それぞれのせん断応力～せん断変位関係を図-6および図-7に示す。

No.3供試体では、処女載荷と再載荷ともほとんどせん断変位が生じずピークせん断強度を発現している。一方で、同程度のせん断強度であるNo.4供試体のピークせん断強度発現時のせん断変位は、No.3供試体のそれと比べて10倍程度ある。せん断面の状況を両者で比較すると、目視では凹凸に大きな差がみられないが、面に岩盤の露出が多いのがNo.4供試体である。No.3供試体もNo.4供試体も岩石の劣化物（ゼオライトおよびスメクタイトが主である。）が表面に沈着しておりピンクがかった灰色をしているが、No.4供試体の方が沈着面積が狭い。これは、岩着部の開口幅が広い部分では表面沈着が少ないと考え、接触面積の違いに帰着できる。No.4供試体では、分裏面上部を下部の接触面積が少ないために同程度の力での移動距離が大きく、逆に接触面積が大きい場合には、ほとんど変位しないものと推測される。No.3供試体では、せん断変位が非常に小さいため条線が認められない。また、No.4供試体では、いくつかの条線が認められ、せん断強度を担っている部分が非常に小さいことがわかる。

(2) コンクリートおよびモルタル優勢部のせん断特性

図-8はコンクリートとモルタル部のせん断試験結果である。別途実施したコンクリートおよびモルタルの一軸圧縮試験からは、施工に依存する大きなバラツキがあったため、ここではそれぞれを区別することなくプロットした。これらから総合的に強度特性を近似すると、およそ

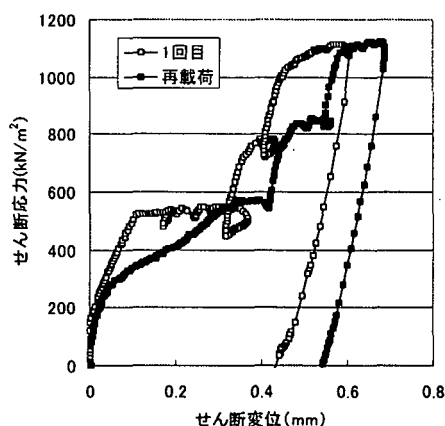


図-6 No.3 供試体の初回および2回目載荷時のせん断応力～せん断変位関係

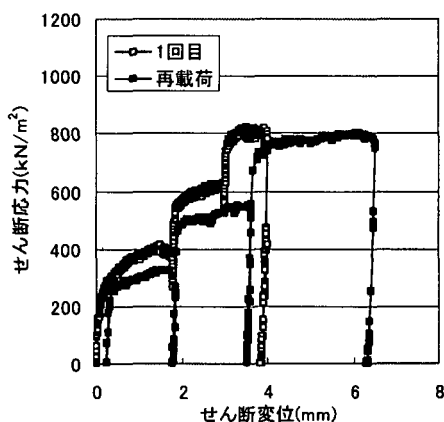


図-7 No.4 供試体の初回および2回目載荷時のせん断応力～せん断変位関係

$$\tau = \tan 45^\circ \sigma + 2700 \quad (2)$$

となる。ただし、白抜き記号の結果は、せん断中に供試体が回転した可能性があったため近似からは除外した。変質を受けていないと考えられる堤体のコンクリートとしては式(2)が推定され、分析結果から変質を受けていると考えられる岩着部付近のコンクリートの強度特性である式(1)と比較すると、粘着力に低下が見られることが明らかとなった。

4. まとめと今後の課題

コンクリートの変質組織の分析結果と合わせてコンクリートダムの耐久性診断を行う目的で、コンクリート岩着部のせん断強度特性を調べた。コンクリートの変質状態の異なる供試体において、せん断強度特性を岩着面を強制せん断面とする一面せん断試験により調べた。あわせて、コンクリートおよびそのモルタル優勢部、さらに岩石の一面せん断試験を実施した。

(1) 水和組織の分析結果

岩着部近傍のコンクリートでは、水和物からの Ca の溶脱が生じているとともに、地下水に含まれる炭酸イオンによって炭酸カルシウムが僅かに生成している。その結果として、水和組織がポーラスになっているといえる。その範囲は岩盤との密着状態によって異なり、密着していた場合は 2mm 以下と小さく、破碎した岩盤の場合は 18mm ほどになる。

(2) 未変質コンクリートと岩のせん断試験結果

長期間経過したが、水和組織は変質していないと判定されたコンクリートのせん断強度はおよそ $\tau = \tan 45^\circ \sigma + 2700$ (kN/m²) と推定された。

(3) 岩着部の一面せん断試験結果

溶脱による変質が確認された試料のせん断強度は幾つかの仮定により $\tau = \tan 45^\circ \sigma + 1500 \sim 2680$ (kN/m²) と推定された。ここで、粘着力の範囲は変質深さに依存するものと考えられる。すなわち変質深さが 2mm 以下と小さな試料の粘着力低下は、18mm の変質深さが認められたものに比べて小さいことが予想される。

溶脱に伴う変質によって岩着部コンクリートのせん断強度は低下する傾向が認められたが、その定量的な検討は、境界面の凹凸形状などに依存するため今後の課題である。

また、境界部に付着するコンクリートおよび岩石の溶脱成分は、せん断の際の摩擦抵抗を減じる役目を果たしていることが示唆された。

参考文献

- 1) 岩盤構造物の設計法に関する研究委員会, 3.6 ダム基礎、地盤工学会 岩盤構造物の設計法に関する研究報告書, pp.135-174, 1997
- 2) 楠見晴重、谷口敬一郎、寺岡克己: 不連続面を有する岩石に対する連続破壊試験法の適用性について, 第 22 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol. 22, pp. 296-300, 1990

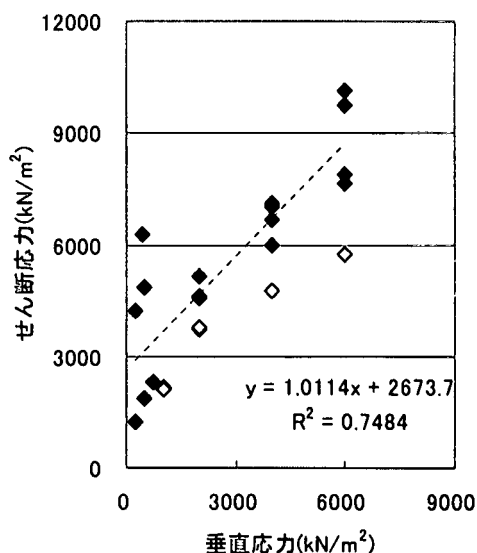


図-8 垂直応力～ピークせん断応力関係