

◆ 報 文 ◆

針貫入試験を用いたフィルダム軟岩基礎の強度管理

中村洋祐* 山口嘉一** 箱石憲昭***

1. はじめに

近年では強度の小さい軟岩や砂礫層上にもダムを建設する事例が多いが、ダム基礎となる地盤には安全上必要な遮水性と強度を有することが求められる。軟岩地盤を掘削して時間が経過すると表面の風化が進むため、築堤までの間、仕上げ面を吹付けコンクリート等で養生する事例も多い。このようなダムサイトにおける仕上げ掘削面の管理には、従来の目視やハンマー打撃に加えて、迅速で精度の高い管理方法が求められている。比較的軟質な岩盤の状況を迅速に評価しようとする既往の研究として、中村ら^{1),2)}は、ダムの軟岩基礎の岩盤評価手法として、シュミットハンマー試験、弾性波速度測定、点載荷試験、針貫入試験、ピック貫入試験等の適用性と利用上の留意点を検討している。その結果、割れ目が少なく、かつ構成粒子が細粒な堆積性軟岩に対しては針貫入試験が最も高精度であり、礫質岩、火山性軟岩等の軟岩にはシュミットハンマー試験が適しているが、基本的には岩片の硬さと相関の高い試験を選定することが重要であるとしている。また、高橋ら³⁾は、岩盤のせん断強度と一軸圧縮強度との相関が良いことに着目して、針貫入試験から得られた一軸圧縮強度と原位置せん断試験結果との相関を検討し、針貫入試験による岩級評価を実施している。

針貫入試験は手軽に実施できるため、斜面部への対応や数多い試験数の確保が容易で、基礎掘削時の細かい地質の変化にも迅速に対応できるという利点を有している。そのため、構成粒子が細粒な堆積性軟岩で構成されるダム基礎の掘削管理に導入することで掘削管理の迅速化を図ることが期待される。

本報文では、新第三紀鮮新世の細粒砂岩を対象に、針貫入試験から推定される軟岩基礎の一軸圧縮強度とその乱さない試料に対する三軸圧縮試験から得られるせん断強度との相関について検討し、針貫入試験結果をダム軟岩基礎の掘削面における

設計強度検証手法として、品質管理に組み込む可能性について考察した。

2. 調査サイトの概要

調査対象としたのは、北海道留萌市に建設中の留萌ダムサイトである。留萌ダムは、堤高41.2m、堤頂長440.0m、堤体積1,225千m³の中央コア型ロックフィルダムである。図-1にダムサイトの掘削面における地質平面図を示す。

ダムの基礎地盤は、新第三紀鮮新世の深川層群に属する細粒砂岩、海緑石砂岩、凝灰岩からなる。なお、地質平面図の着色部分は基礎掘削面を示す。そのうち本研究で評価対象とするのはダムサイトの主体を成すC_{Lh}級の細粒砂岩である。当サイトの岩盤は、割れ目が少ないため、割れ目の頻度や性状の影響が比較的小さく、C_{Lh}級とC_{LI}級の差は主に岩の堅さに起因している。この岩盤の設計強度は粘着力 $c = 255\text{kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ である。この設計強度値は、図-2に示す原位置せん断試験結果に基づき、類似地質条件の(C_{Lh}級の細粒砂岩)他ダムの設計値や留萌ダムの他岩級の設計強度とのバランスなどを考慮したうえで決定されたものである。本研究で評価対象としたC_{Lh}級の細粒砂岩の既往のボーリングコアを用いた室内土質試験結果の平均値として、乾燥密度 1.7g/cm^3 、一軸圧縮強度 $2,500\text{kN/m}^2$ が得られている。

3. 針貫入試験方法の概要

針貫入試験⁴⁾は、図-3に示すような針貫入試験装置を用いて、太さ0.84mmの木綿針を地面に圧入し、貫入量10mmのときの貫入荷重、または貫入荷重100Nに達したときの貫入量を読み取り、針貫入勾配(=貫入荷重/貫入量)を計算する。得られた針貫入勾配と一軸圧縮強度の相関式は種々提案されているが、本研究では、データの分布範囲が広く回帰式の相関が最も高い、以下に示す岡田ら⁵⁾の回帰式を用いた。

$$\log q_u = 0.978 \times \log NP + 2.599 \quad (1)$$

(相関係数0.914)

Excavation Management of Soft Rock Foundations for Embankment Dams by Needle Penetration Test

ここで、 q_u は一軸圧縮強度 (kN/m^2)、 NP は針貫入勾配 (N/mm) を示す。

なお、現場での管理作業では針貫入勾配 NP を用いる方が簡単ではあるが、基礎地盤の強度を工学的に判断するには一軸圧縮強度 q_u に変換しておいた方が理解しやすいと考え、本報文では針貫入試験の直接的な結果である針貫入勾配 NP を一軸圧縮強度 q_u に変換したうえで議論する。

4. 試料採取位置における針貫入試験

三軸試験供試体用の乱さない試料は、図-1の平面図に示す、河床部の半径5m程度の領域内15箇所で、それぞれ直径116mmのコアチューブサンプリング法により長さ約20cmのコアを、深度60cmまでの範囲内で10本前後採取した。針貫入試験は、各試料採取地点の地表面（以下、試料採取位置と称す）で10回実施した。各試料採取位置の10点での針貫入勾配から式(1)により算出した一軸圧縮強度 q_{uF} の最小値、最大値および平均値を図-4に示す。

また、各試料採取位置の平均値 q_{uF0} の頻度分布を図-5に示す。なお、 q_u の添字の F は試料採取位置で実施した針貫入試験より推定したことを、また 0 は平均値を示す。図より、試料採取位置での試験結果全体の平均値は約 $3,800kN/m^2$ であり、強度が他より若干高い2地点 (No.8, 13) があるが、強度的に比較的均質な岩盤であるといえる。

5. 試料に対する針貫入試験

現場で採取した乱さない試料は、乾燥やゆみを防ぐためにパラフィンとラップで梱包して試験室に搬入した。試験室ではまず、ごく薄い試料表面のゆみ部を除去し、試料の両端面および側面において合計十数点の針貫入試験を実施した後、直径50mm、高さ100mmの円柱供試体に整形した。各試料採取位置において、現地で実施した針貫入試験による一軸圧縮強度の平均値 q_{uF0} と試験室で乱さない試料に対して実施した針貫入試験による一軸圧縮強度の平均値 q_{uL0} の関係を図-6に示す。なお、 q_u の添字の L は室内で実施した針貫入試験より推定したことを示す。また、併せて実施した物理試験の結果、供試体の乾燥密度 ρ_d は $1.46 \sim 1.62g/cm^3$ の範囲に分布したが、後述する乾燥密度と針貫入試験より求めた一軸圧縮強度の関係から、 $1.5g/cm^3$ 程度を境に、強度に関して2つのグループに分けられることがわかったため、図ではこの2グループに分けたシンボル表示をし

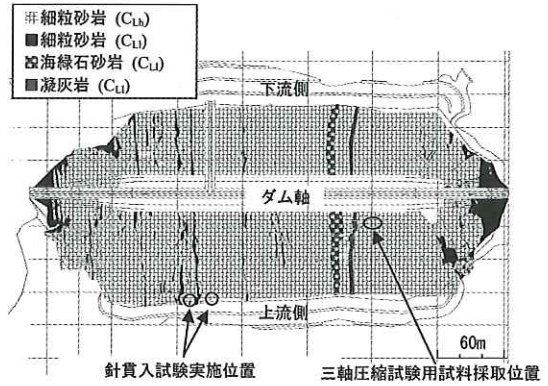


図-1 ダムサイトの掘削面における地質平面図

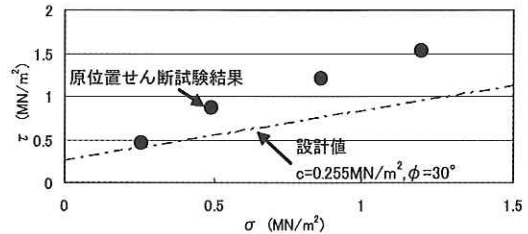


図-2 原位置せん断試験結果

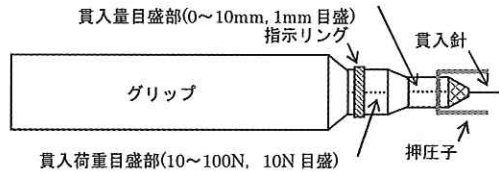


図-3 針貫入試験装置の概要

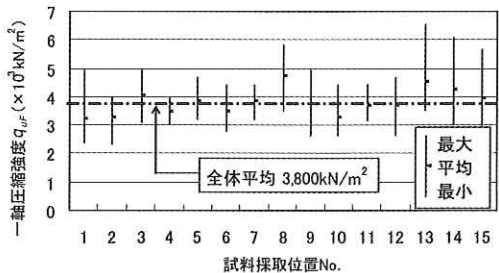


図-4 乱さない試料採取位置での針貫入試験結果から算定した q_{uF} の分布

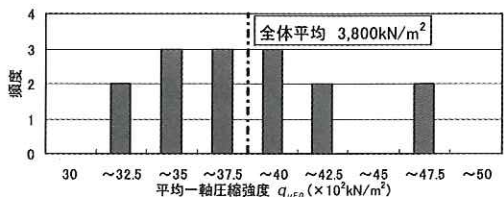


図-5 乱さない試料採取位置での針貫入試験結果から算定した q_{uF0} の頻度分布

ている。図中には各グループで最小二乗近似した原点を通る相関直線を示す。同図より、ばらつきはあるが、室内で算定した一軸圧縮強度の方が、現地で算定した強度より概して小さく、乾燥密度が小さいグループの方がその減少率は大きいことがわかる。この原因としては、乾燥密度が小さいグループの方が表面付近の緩みが生じやすいことや、原位置では水平面に対して垂直に針貫入試験を実施するのに対して、室内では円柱形状の採取試料側面に垂直に実施するため若干周面拘束が小さく、またその影響は乾燥密度が小さいほど相対的に大きいと考えられること、等が考えられる。なお、乾燥密度が大きいグループの方がデータのばらつきが大きい傾向にあるが、その原因については不明である。

6. 一軸圧縮試験

三軸圧縮試験に先立ち、採取した乱さない試料から、5本の供試体を作製して一軸圧縮試験を実施した。なお、供試体は三軸圧縮試験と同じく、乱さない試料を直径50mm、高さ100mmの円柱形に整形したものとした。得られた一軸圧縮強度は2,100~4,300kN/m²の範囲にあり、その平均値は3,100kN/m²であった。この値は、先に示した既往の試験結果の平均値2,500kN/m²に比べると若干大きい。両者の差の原因として、試験数量が既往試験において圧倒的に多いという試験数量の差のほか、既往試験の中には潜在的な割れ目や層理沿いに破壊しやすい供試体が一部含まれていた可能性も考えられる。

さらに、図-7には一軸圧縮試験で得られた一軸圧縮強度 q_u と、同供試体作製用試料ならびに採取位置における針貫入試験により得られた一軸圧縮強度の平均値 q_{uL0} 、 q_{uF0} の関係を示す。データ数が5と少ないため断定的なことは言えないが、同図より一軸圧縮試験で得られた一軸圧縮強度 q_u に対して、採取位置における針貫入試験により得られた一軸圧縮強度の平均値 q_{uF0} は平均で数割程度高めで、同供試体作製用試料における針貫入試験により得られた一軸圧縮強度の平均値 q_{uL0} は若干低めである。

7. 三軸圧縮試験によるせん断強度評価

乱さない試料に対する圧密透水試験から得られた透水係数 $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-7}$ cm/secと、三軸圧縮試験を模擬した有限要素法による変形・浸透流連成解析を実施した結果⁶⁾を踏まえて、本研究

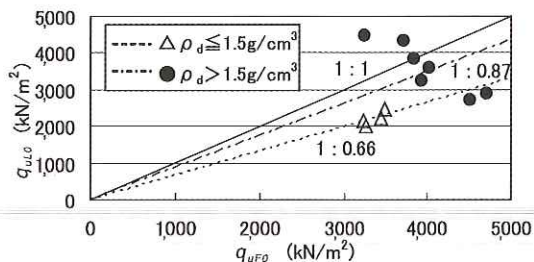


図-6 原位置と室内の針貫入試験により算定した一軸圧縮強度の平均値

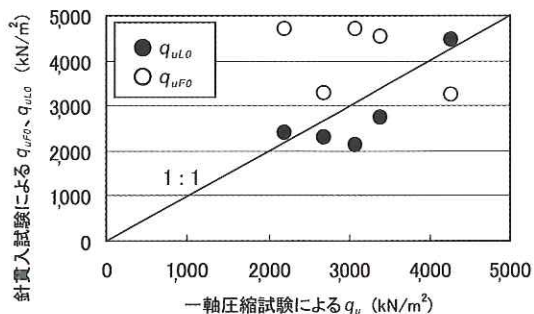


図-7 針貫入試験により算定した一軸圧縮強度の平均値と一軸圧縮試験による一軸圧縮強度の比較

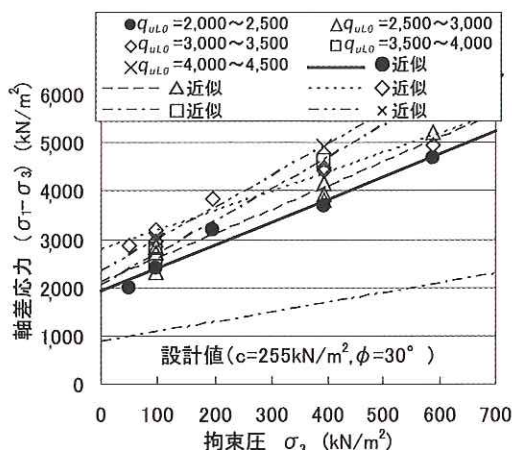


図-8 三軸圧縮試験から求めたせん断強度 (q_{uL0} による区分)

における三軸圧縮試験は圧密排水 (CD) 条件で実施することとした。ただし、今回の対象岩の透水係数が比較的小さいことを考慮して、三軸圧縮試験の载荷速度は土質試験基準⁷⁾の上限值である0.5%/minの1/100の0.005%/minとした。

また、拘束圧 σ_3 は98および394kN/m²の供試体を主体に、49、196、588kN/m²での試験も実施した。三軸圧縮試験から得られた、軸差応力

($\sigma_1 - \sigma_3$) と拘束圧 σ_3 の関係を q_{uLO} の値に基づいて区分表示した結果を図-8に示す。また、同関係を q_{uFO} の値に基づいて区分表示した結果を図-9に示す。図中の一点鎖線は、設計強度 ($c = 255\text{kN/m}^2, \phi = 30^\circ$) の関係を示したものである。また、図中には q_{uLO} および q_{uFO} の区分ごとの近似直線も併記した。同図より、 q_{uLO} 、 q_{uFO} の区分ごとのデータのばらつきはあるが、針貫入試験から求めた一軸圧縮強度が小さいほど三軸圧縮試験の破壊時の軸差応力が小さく、両者の対応が比較的良好い事がわかる。

今回実施した三軸圧縮試験結果のうち、針貫入試験から求めた一軸圧縮強度が最も小さい区分、つまり $q_{uLO} = 2,000 \sim 2,500\text{kN/m}^2$ 、 $q_{uFO} = 3,000 \sim 3,500\text{kN/m}^2$ の区分 (図中●印) のデータの近似直線は、図-10に示すように既往の原位置せん断試験結果と同程度の強度を示している。このことは、対象とした基礎岩盤には割れ目が少なく、その強度特性にあまり影響を与えないことを示唆しており、2章で述べた対象岩盤の地質性状に合致している。なお、 $q_{uLO} = 2,000 \sim 2,500\text{kN/m}^2$ に入る三軸圧縮試験データと $q_{uFO} = 3,000 \sim 3,500\text{kN/m}^2$ のそれは全く同じである。

ダム基礎岩盤のせん断強度評価の方法としては、 ϕ の値を仮定して c を決定するのが一般的である。いま、全データを用いてせん断強度の2変数 (c, ϕ) を近似して、 $\phi = 45^\circ$ を得た。そこで、 $\phi = 45^\circ$ と仮定したうえで q_{uLO} もしくは q_{uFO} の各区分範囲で近似して粘着力 c を求めた結果を図-11に示す。同図より、針貫入試験から求めた一軸圧縮強度が高くなるにつれ、粘着力も大きくなる事がわかる。

次に図-12に、三軸圧縮試験に用いた供試体の乾燥密度 ρ_d と同供試体用の試料に対する、あるいは採取位置における針貫入試験により得られた一軸圧縮強度の平均値 q_{uLO} 、 q_{uFO} の関係を示す。 q_{uLO} 、 q_{uFO} とともに、 ρ_d との若干の正の相関が見受けられる。また、乾燥密度 1.5g/cm^3 を境に概ね2つのグループに分けられることがわかるが、現場管理の観点からは、乾燥密度が 1.45g/cm^3 以上あれば原位置での針貫入試験から求めた一軸圧縮強度の平均値 q_{uFO} は $3,000\text{kN/m}^2$ を確保できていることがわかる。

以上の結果より、現場におけるダムの軟岩基礎の設計せん断強度の検証という視点から整理する。現場における管理のための試験であることを考慮すると、原位置で実施する針貫入試験結果を基本

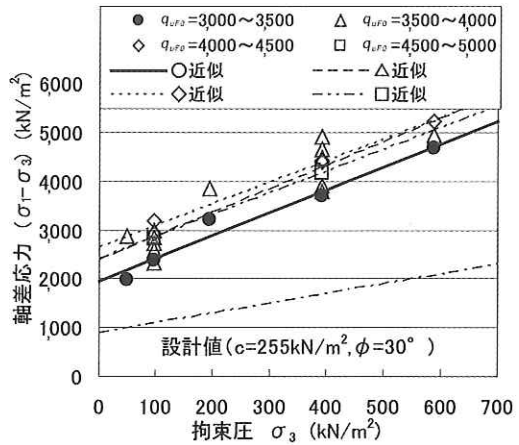
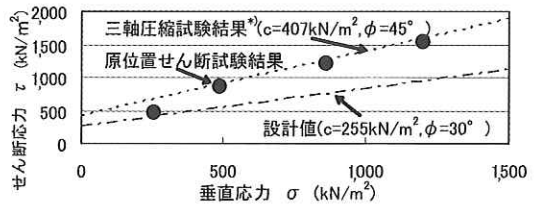
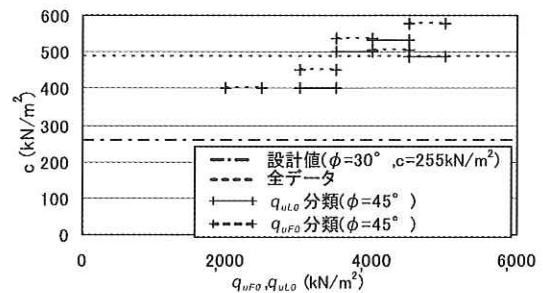


図-9 三軸圧縮試験から求めたせん断強度 (q_{uFO} による区分)



※) $2,000 \leq q_{uLO} < 2,500\text{kN/m}^2$ 、 $3,000 \leq q_{uFO} < 3,500\text{kN/m}^2$

図-10 原位置せん断試験結果と三軸圧縮試験結果の比較



注) q_{uLO} の分布範囲 $2,007 \sim 4,521$ 、平均値 $3,418$
 q_{uFO} の分布範囲 $3,226 \sim 4,712$ 、平均値 $3,842$

図-11 針貫入試験から求めた一軸圧縮強度の平均値区分ごとに算出した粘着力

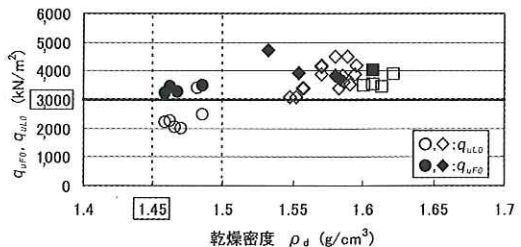


図-12 乾燥密度と針貫入試験により求めた一軸圧縮強度の平均値の関係

とすべきである。

今回の試験対象ダムの設計せん断強度は $c = 255\text{kN/m}^2$ 、 $\phi = 30^\circ$ であるが、原位置での針貫入試験で得られた一軸圧縮強度の平均値 q_{uF0} が $3,000\text{kN/m}^2$ 以上であれば、この設計せん断強度を十分な余裕をもって確保できる。さらに、今回の検討結果から、 q_{uF0} の値からせん断強度定数 (c , ϕ) を評価することも可能であると考えられる。

以上より、原位置での針貫入試験で得られた一軸圧縮強度の平均値 q_{uF0} と乱さない試料に対する三軸圧縮試験から得られたせん断強度の (c , ϕ) の関係を求めておくことにより、ダム軟岩基礎の設計強度の検証が有効に行えると考える。

8. 掘削仕上面での適用性検証

先に示した針貫入試験による設計強度検証の適用性を確認するために、ダムサイトにおいて針貫入試験を実施した。試験の実施位置は、図-1に示したとおりである。

基礎掘削面の代表的な CLh 級の細粒砂岩において、写真-1および、2に示すような $1\text{m} \times 1\text{m}$ の正方形の定規により縦横とも10分割した針貫入試験用グリッドを用いて2箇所を実施した。図-13および14に各針貫入試験による q_{uF} の分布を示す。なお、同図において、グリッド交差点が針貫入試験位置に相当する。

写真-1に示す針貫入試験位置①は、全領域で比較的均質な岩盤であるが、写真-2に示す針貫入試験位置②では、右から2～3番目の上下方向のグリッド線に沿って割れ目が存在しており、仕上掘削時に掘り込まれて他の個所に比べると凹凸が激しくなっている。また、図-14からもこの部分の針貫入試験から求めた一軸圧縮強度が他の部分より小さいことがわかる。ただし、ダムという構造物の規模を考慮した場合、この程度の規模で、かつ針貫入試験により評価される表層部の領域の強度が周辺よりも若干低い部分が存在しても、構造上問題が生じることはなく、岩級区分上はこの周辺全体として CLh 級として評価されたと考えられる。しかし、ここでは、もう少し微視的な観点から $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ を評価の単位規模とみなしたうえで、本研究では、 CLh 級の代表的な箇所での検証を行なうために、概ね CLh 級と判断される箇所に限ってデータを分析することにした。そのため、試験位置②についてはこの亀裂の近傍の $\text{H} \sim \text{J}$ 側線の30点での測定結果は CLh 級の代表的な岩盤としての評価から除外することとした。

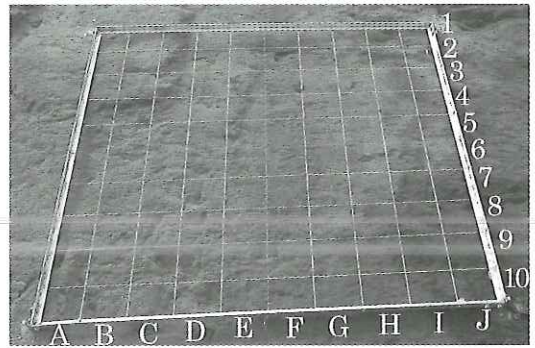


写真-1 ダムサイトにおける針貫入試験（試験位置①）

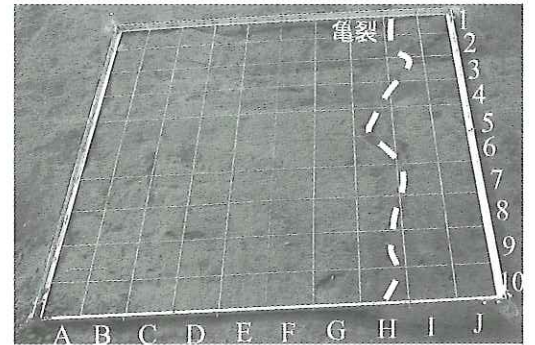


写真-2 ダムサイトにおける針貫入試験（試験位置②）

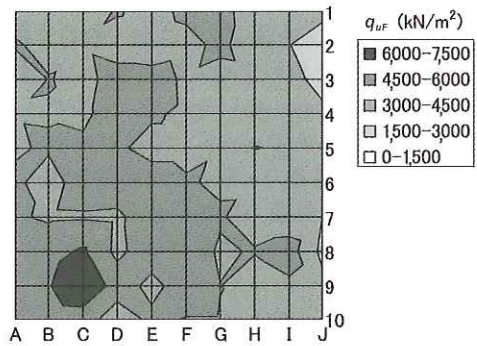


図-13 針貫入試験による q_{uF} の分布（試験位置①）

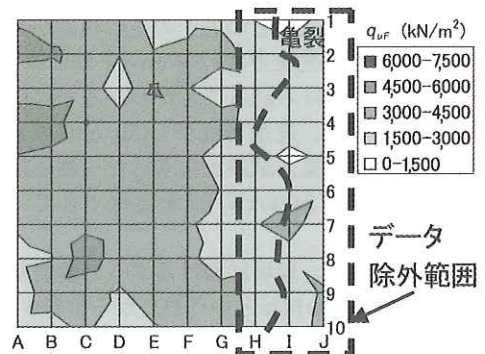


図-14 針貫入試験による q_{uF} の分布（試験位置②）

図-15に試験位置①、②の170点における針貫入試験より得られた q_{uF} の頻度分布を示す。先に示した設計強度検証基準に照らすと、原位置での針貫入試験で得られた一軸圧縮強度の平均値 q_{uF0} が $3,000\text{kN/m}^2$ 以上あれば、設計で用いたせん断強度が十分な余裕を持って確保できている。同図より、測定結果は170点中約20点において $3,000\text{kN/m}^2$ を下回っているが、平均値 $3,940\text{kN/m}^2$ は基準値を十分な余裕を持って上回り、(平均値-標準偏差)は、ほぼ基準値の $3,000\text{kN/m}^2$ に一致する。

これらの結果から、針貫入試験により設計強度の検証を行う場合には、1点1点のデータよりも代表的な岩級部の比較的広い領域、例えば $1\text{m} \times 1\text{m}$ ぐらいを目安に多点での針貫入試験を実施し、その平均値や(平均値-標準偏差)を基準に評価することが考えられる。今後、ダム軟岩基礎において実施する針貫入試験について、その試験数量やその実施時期、試験領域やデータの評価方法、評価基準値などを検討したうえで、ダム軟岩基礎の掘削管理の一手法として組み込むことで、迅速

かつきめ細やかな掘削管理に役立てられる可能性がある。

9. おわりに

本研究では、原位置で簡易に実施できる針貫入試験から得られる一軸圧縮強度と、その乱さない試料に対する三軸圧縮試験から得られるせん断強度との相関について検討した。その結果、亀裂の少ない軟岩基礎では、針貫入試験による掘削面の設計強度検証の可能性があることがわかった。

ただし、針貫入試験による掘削面の設計強度検証の導入にあたっては、評価領域の規模や多点数の結果の評価基準値の設定などについて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 中村康夫、佐々木靖人：軟岩ダム基礎の岩盤分類のための簡易試験法(その1)―軟岩の特性と簡易試験法の概要―，ダム技術，No.52，pp.27-35，1991年
- 2) 中村康夫、佐々木靖人：軟岩ダム基礎の岩盤分類のための簡易試験法(その2)―軟岩ダムサイトにおける簡易試験法の適用性―，ダム技術，No.53，pp.25-37，1991年
- 3) 高橋重夫、三浦良信、清水国夫、奥原茂弘：針貫入試験による軟岩基礎の強度評価，ダム工学，Vol.1，No.4，pp.30-40，1991年
- 4) 小島圭二、斎藤保祐、稲生道裕：千葉県下における泥質軟岩の軟弱化の要因，第9回土質工学研究発表会講演論文集，pp.737-740，1974年
- 5) 岡田 滋、泉谷泰志、飯塚友之助、堀内澄夫：針貫入試験による軟岩地山強度の推定，土と基礎，Vol.33，No.2，pp.35-38，1985年
- 6) 山口嘉一、川崎将生、岡部 登：フィルダム軟岩基礎の変形性評価法の高精度化，建設省土木研究所資料，No.3750，2000年
- 7) 土質工学会：土質試験の方法と解説―第一回改訂版―，pp.475-476，2000年

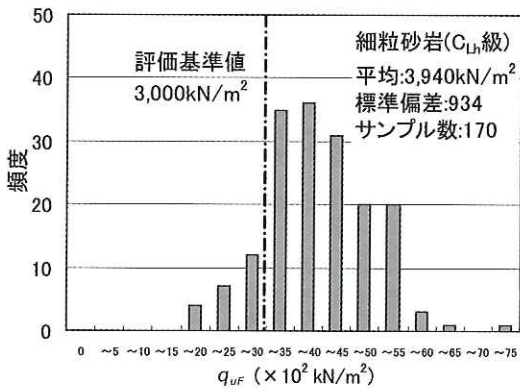


図-15 ダムサイトでの針貫入試験による q_{uF} の分布

中村洋祐*



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム研究員
Yousuke NAKAMURA

山口嘉一**



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム上席研究員，工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

箱石憲昭***



独立行政法人土木研究所技術推進本部特命事項担当上席研究員(前 北海道開発局留萌開発建設部留萌ダム建設事業所長)
Noriaki HAKOISHI