

水押し試験における限界圧力判定精度

山口 嘉一¹・佐藤 弘行¹・西岡 正浩^{1*}

¹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
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)
*E-mail: nishio44@pwri.go.jp

グラウチング実施前の簡易なルジオンテストと位置づけられる水押し試験の注入圧力段階数はルジオンテストの注入圧力段階数よりも少ないため、各圧力段階の圧力差が大きく、現状の限界圧力の判定方法によると、限界圧力をやや低く判定する可能性がある。このような現状に鑑み、既設ダム及び建設中ダムの水押し試験における限界圧力判定方法の現状について調査、整理を行うとともに、ダムサイトの基礎岩盤が、軟岩と硬岩で構成された各1ダム計2ダムについて、水押し試験の実績データの中から、時々刻々の注入データ（有効注入圧力、単位注入量）を用いて有効注入圧力 - 単位注入量曲線を描き、現状の限界圧力精度について評価を行う。

Key Words : dam foundation grouting, water pressure test, critical pressure, P-Q curve

1. はじめに

ダム基礎グラウチングのうち、カーテングラウチングのパイロット孔とチェック孔以外のグラウチングにおいては、簡易なルジオンテストと位置づけられる水押し試験を実施し、透水性と限界圧力を評価している¹⁾。そして、この結果に基づき、セメントグラウトの注入圧力や注入開始配合を決定している。しかし、水押し試験の注入圧力段階数はルジオンテストの注入圧力段階数よりも少ないため、各圧力段階の圧力差が大きく、現状の限界圧力の判定方法によると、限界圧力をやや低く判定する可能性がある。このような現状に鑑み、まず既設ダムの水押し試験における限界圧力判定方法の現状について調査、整理を行う。続いて、ダムサイトの基礎岩盤が、硬岩と軟岩で構成された各1ダム計2ダムについて、水押し試験の実績データの中から、時々刻々の注入データ（有効注入圧力、単位注入量）を用いて有効注入圧力 - 単位注入量曲線（以下、時々刻々のP-Q曲線）を描き、現状の水押し試験における限界圧力の評価精度について検討する。

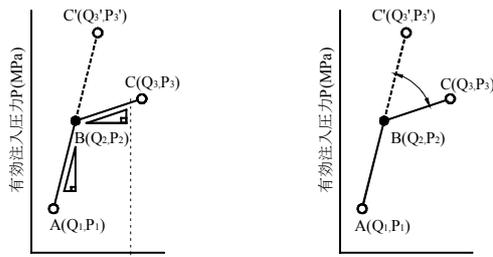
2. 水押し試験における限界圧力の判定方法の現状

水押し試験は簡易透水試験と位置づけ、注入圧力の昇圧段階を3から4段階程度として降圧段階は実施しない

ことが一般的である。試験結果については、各圧力段階における有効注入圧力 P (MPa)及び、単位注入量 Q ($l/min/m$)を基に、図-1 に示す有効注入圧力 - 単位注入量曲線（以下、段階 P-Q 曲線）を描き整理している。この曲線において、有効注入圧力の増加に対して単位注入量が急増する点における注入圧力を限界圧力と定義している²⁾。圧力段階数が3の限界圧力判定模式図を図-1 に示す。基本的には限界圧力が発生すると、段階 P-Q 曲線の勾配が緩くなることに着目して限界圧力の判定を行う。10 ダムについての事例調査結果によると、図-1 において、限界圧力はポイント B での有効注入圧力 P_2 としている。この際、段階 P-Q 曲線の折れ曲がりの程度から限界圧力を判定する方法としては、A-B と B-C での勾配変化（増加率）に基づく方法あるいは A-B の延長線 A-B-C と B-C がなす角度に基づく方法が採用されている。表-1 に調査した10ダムについて、それぞれの基準値を示す。

勾配変化率による基準値は A ダムから F ダムの計 6 ダムで採用されており、図-1(a)に示すように、A-B と B-C の勾配変化率で判定していた。基準値は、 $(P_2 - P_1) / (Q_2 - Q_1) > \alpha (P_3 - P_2) / (Q_3 - Q_2)$ の α とし、 $\alpha = 2, 3, 10/3$ などとしている。また、勾配変化率による判定では、流量あるいは透水性が小さい領域において限界圧力判定精度が低くなることの対策として、 $Q_3 < 3(l/min/m)$ 、 $Q_3 > 0.5(l/min/m)$ 、 $(P_3 - P_2) / (Q_3 - Q_2) < 2$ などと、最大流量 Q_3 や勾配 B-C に基準値を設けていた。

角度による基準値は G ダムから J ダムの計 4 ダムで採



(a) 勾配変化率による基準 (b) 角度による基準

図-1 限界圧力判定模式図

表-1 限界圧力の判定事例

(a) 勾配変化率による基準値

| | | |
|-----|-----|--|
| Aダム | Bダム | $(P_2 - P_1)/(Q_2 - Q_1) \geq \alpha(P_3 - P_2)/(Q_3 - Q_2)$, $\alpha=3$, $Q_3 \geq 2(\text{l/min/m})$ |
| Cダム | Dダム | |
| Eダム | | $(P_2 - P_1)/(Q_2 - Q_1) > \alpha(P_3 - P_2)/(Q_3 - Q_2)$, $\alpha=2$, $Q_3 > 0.5(\text{l/min/m})$ |
| Fダム | | $(P_2 - P_1)/(Q_2 - Q_1) \geq \alpha(P_3 - P_2)/(Q_3 - Q_2)$, $\alpha=10/3$, $(P_3 - P_2)/(Q_3 - Q_2) < 2$ |

(b) 角度による基準値

| | |
|-----|--|
| Gダム | CBC' 10° |
| Hダム | CBC' $> 20^\circ$ |
| Iダム | CBC' $> 10^\circ$ |
| Jダム | 基準値 CBC' 20° , 基準値 Q_3 $1(\text{l/min/m})$ かつ $Q_3/Q_2 < 2$ |

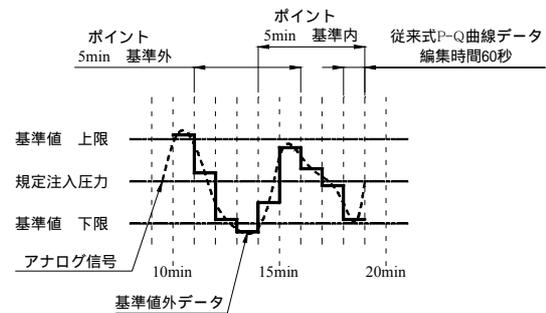
用されており、図-1(b)に示すように、CBC ($> 10^\circ$)あるいはCBC ($> 20^\circ$)などとして限界圧力を判定している。このうち、Jダムについては、角度による基準値の他に、流量増加率による基準値を設定し、いずれかの基準値を満たした場合に、限界圧力と判定していた。

3. 実証試験方法

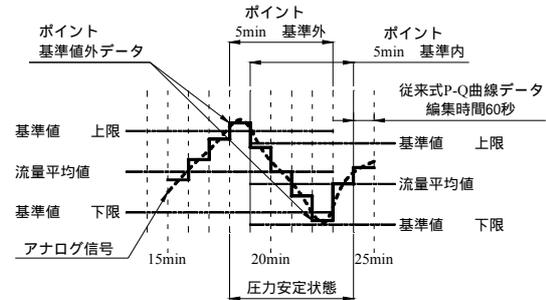
(1) 各圧力段階の安定判定と各圧力段階のデータ

水押し試験のデータは、流量計及び圧力計から得られるアナログ信号を、0.1秒単位でサンプリングし、これらを10秒から60秒のうち任意に設定した編集時間に基づいて平均処理を行ったデジタルデータ(以下、時々刻々のデータ)として記録されている。各圧力段階の安定状態は、所定の測定時間内の流量と圧力の双方のデータが同時に安定している必要があり、測定時間は5分間としている²⁾。

圧力の安定基準は、規定注入圧力を基点として、規定注入圧力到達後に判定を開始し、安定判定基準値の範囲内に5分間全ての時々刻々のデータがあることをもって圧力安定状態と判定している。施工条件により異なるが一般に基準値はポンプの脈動等を考慮して $0.0196 \leq P \leq 0.0196(\text{MPa})$ 程度の範囲に設定されている。図-2(a)に編集時間が60秒の圧力安定判定模式図を示す。ポイントでは、規定注入圧力内に入った11 t 12(min)のデータから判定を開始したが、13 t 14(min)のデータが基準外となったため、この次に安定条件を満たした14 t 15(min)のデータから判定を再開している。



(a) 圧力安定



(b) 流量安定

図-2 段階P-Qデータ安定判定模式図

そしてポイントのデータは全て安定範囲内にあるため、圧力安定状態と判定している。

流量の安定基準は、圧力安定状態において計測した時々刻々の流量データ5分間の平均値を基点として、この時間内の全ての時々刻々のデータが、安定判定基準値の範囲内にあることをもって、安定と判定しており、施工条件により異なるが一般に基準値はポンプの脈動等を考慮して $0.2 \leq Q \leq 0.2(\text{l/min})$ 程度に設定されている。図-2(b)に編集時間が60秒の流量安定判定模式図を示す。ポイントは、圧力安定状態のため、19 t 24(min)のデータについて流量の安定判定を行ったが、19 t 20(min)と23 t 24(min)のデータが基準外となった。このため20 t 25(min)をポイントとして再度判定を行ったところ、全ての流量データが流量安定基準値内にあり、圧力も安定状態のため、流量を安定と判定している。

各圧力段階の流量と圧力のデータ(以下、段階P-Qデータ)は、安定状態における最終1分間の平均値を採用しているが、これは後述する非正常浸透状態や目詰まりによる圧力安定状態における流量減少による影響を抑えるための対策と考えられる。

(2) パターン分類

段階P-Q曲線と、時々刻々のP-Q曲線を比較すると、大きく2種類に分類できる。Aパターンは、限界圧力発生以前の段階P-Q曲線と時々刻々のP-Q曲線の軌跡がほぼ一致するという特徴があり、極めて短時間に定常浸透状態³⁾に達したと考えられる。Bパターンは、各圧力段階の圧力安定時に流量が減少する特徴があり、目詰まり

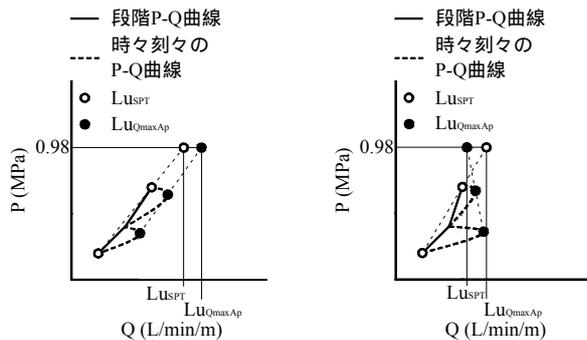


図-3 $Lu_{Q_{maxAp}} > Lu_{SPT}$ の模式図 図-4 $Lu_{Q_{maxAp}} < Lu_{SPT}$ の模式図

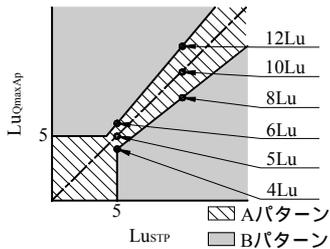


図-5 パターン判定基準 1

あるいは非定常浸透状態³⁾と考えられる。パターンの判定には、後述の2種類の基準を設け、どちらかの結果にBパターンが含まれる場合はBパターンと判定し、それ以外の場合はAパターンとした。

a) パターン判定基準 1

判定方法は、図-3 に示すように、前圧力段階測定終了後の昇圧部分から、その圧力段階の測定終了までのデータのうち、最大流量(以下、 Q_{max})を含むデータを抽出する。これらを直線近似させ、この近似式から換算ルジオン値(以下、 $Lu_{Q_{maxAp}}$)を算出する。更に、施工時に判定したルジオン値(以下、 Lu_{SPT})を基準として、 Lu_{SPT} に対する $Lu_{Q_{maxAp}}$ の変化率を算出し判定する。ただし、水押し試験開始から第一圧力段階安定判定終了までのデータは、注入管内の充水過程や非定常の影響を強く受けると考えられ、他の段階 P-Q データと比較すると明らかに相違があるため、判定要素から除いた。

基準値については、圧力計や流量計の精度を考慮し、ルジオン値の変化率として 20%と定義した。図-4 に示すように、低圧力段階で非定常の影響を大きく受ける場合は、近似直線の傾きが立ってくるため、 Lu_{SPT} よりも $Lu_{Q_{maxAp}}$ の値が小さくなる場合がある。これを考慮して、基準値は $0.8 \cdot Lu_{SPT}$ $Lu_{Q_{maxAp}}$ $1.2 \cdot Lu_{SPT}$ であれば A パターンとし、これを満たさない場合は、B パターンとした。限界圧力が発生した場合は、限界圧力より手前の圧力段階データを用いることとし、限界圧力の発生やポンプ吐出限界等により、抽出される Q_{max} のデータ数が 1 件以下である場合は本基準が適用できなくなる。また、分析対象の改良目標値は $5Lu$ であるため、比較する双方のルジオン値が $5Lu$ 未満の場合は $Lu_{Q_{maxAp}}$ と Lu_{SPT} の比にかか

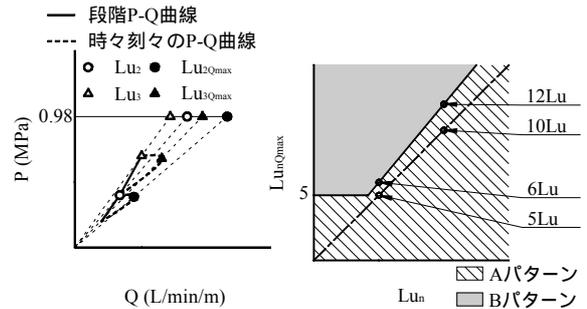


図-6 Lu_n と $Lu_{nQ_{max}}$ の模式図 図-7 パターン判定基準 2

わらず A パターンとした。これらの模式図を図-5 に示す。

b) パターン判定基準 2

パターン判定基準 2 は、図-6 に示すように、第一圧力段階を除く各圧力段階の最大流量(以下、 Q_{nmax})を含む n 段階($n=2,3, \dots$)のデータを抽出し、原点との直線から求まるルジオン値(以下、 $Lu_{nQ_{max}}$)を算出する。そして、段階 P-Q データと原点によるルジオン値(以下、 Lu_n)を算出し、個々の圧力段階において、双方のルジオン値の変化率により判定した。基準値は図-7 に示すとおり、前述したルジオン値の変化率 20%に基づき、 $1.2 \cdot Lu_n$ $Lu_{nQ_{max}}$ あれば、A パターンとし、これを満たさない場合は、B パターンとした。そして第二圧力段階から最終圧力段階のうち限界圧力より手前の圧力段階のデータに B パターンが含まれる場合は B パターンと判定し、これ以外は A パターンとした。また、比較する双方のルジオン値が $5Lu$ 未満の場合は $Lu_{nQ_{max}}$ と Lu_n の比にかかわらず A パターンとした。

4. 硬岩サイトにおける検証

(1) 試験サイトの地質状況

A ダムの基礎岩盤は、中生代白亜紀の領家花崗岩で、主に粗から中粒黒雲母花崗岩で構成されている。これに、細粒花崗岩及びアプライト(半花崗岩)の岩脈が貫入している。また、花崗岩の一部に、有色鉱物が緑色に変質した緑色花崗岩がある。割れ目系は比較的高角度で上下流方向の走向を有している。

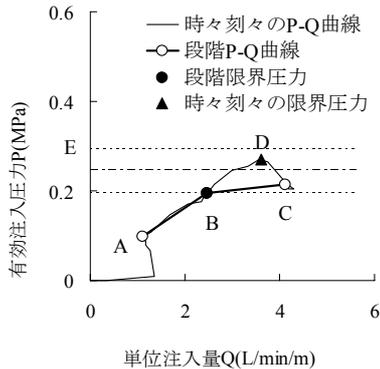
(2) 分析対象データ

A ダムのコンソリデーショングラウチングにおける水押し試験の全データのうち、A ダムの限界圧力判定基準(表-1 参照)を用いて機械的に計算した結果、限界圧力と判定されたデータの中から、時々刻々のデータが存在していた 24 件について分析を行った。これらの水押し試験仕様を表-2 に示す。

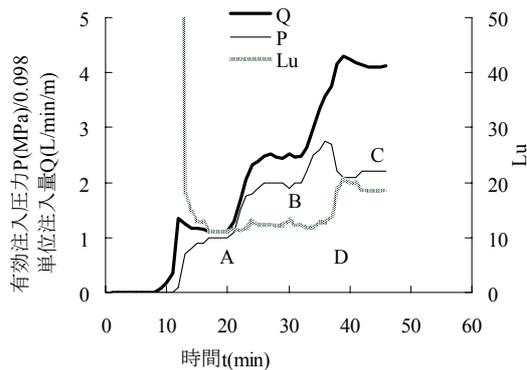
表-2 Aダムのコンソリデーショングラウチングにおける水押し試験仕様

| | |
|-----------------------|--|
| 孔径 | φ46(mm) |
| 区間長 | 5 L (7(m)) |
| 単位注入量 | 4(l/min/m)以下 |
| 昇圧速度 | 0.196(MPa/min)以下 |
| 圧力段階 孔口圧力 (MPa) | 0 0.098 0.196 0.294 安定時間5min 限界圧力発生時は次の段階へ昇圧しない。 |

) 試験孔の傾斜角度が場所により若干異なるため、この範囲の中でばらついている。



(a) P-Q 曲線



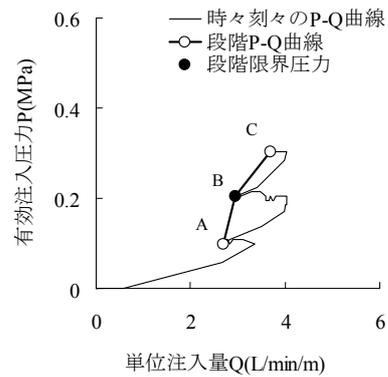
(b) 経時データ

図-8 Aパターン

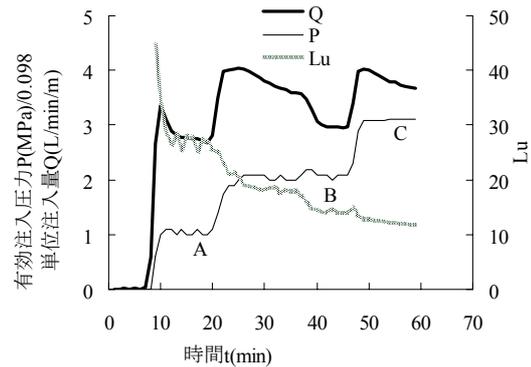
(3) 分析結果

a) Aパターン

Aパターンは、図-8(a)に示すように、段階 P-Q 曲線による限界圧力はポイント B となるが、時々刻々の P-Q 曲線によると、ポイント B よりも高圧の範囲で有効注入圧力が低下し単位注入量が増大しているポイント D が存在していることがわかる。つまり、段階 P-Q 曲線では限界圧力をやや低く評価し、この限界圧力判定誤差は設定注入圧力段階の圧力差の大きさに依存している。また、図-8(b)に同水押し試験の経時データを示す。この図には、原点と、時々刻々の有効注入圧力 P と単位注入量 Q を用いてルジオン値を算出し、ルジオン値曲線



(a) P-Q 曲線



(b) 経時データ

図-9 Bパターン

($Lu=0.98Q/P$)も描いている。ポイント D 付近でルジオン値曲線が急増しており限界圧力を確認することができる。Aパターンは 24 件中 17 件が該当したが、段階 P-Q 曲線の限界圧力ポイント B の次の規定注入圧力を E とした場合、このうちポイント D の圧力が、 $B < D < (E-B)2+B$ の範囲となっていたものが 5 件、 $(E-B)2+B < D < E$ となっていたものが、12 件となっていた。

b) Bパターン

Bパターンは、図-9(a)に示すように、段階 P-Q 曲線に、前述した限界圧力判定基準を機械的に適用するとポイント B を限界圧力と判定してしまうが、図-9(b)に示す経時データの流量曲線によると、ポイント B を含む圧力段階とポイント C を含む圧力段階の最大流量はほぼ等しく、ポイント C を含む圧力段階の流量安定データは流量安定判定基準値の範囲内で減少しているため、流量安定判定時間を長くした場合は更に流量が減少する可能性があり、限界圧力は発生していないと考えられる。このパターンは 7 件が該当し、Aダムサイトではいずれも風化帯や湧水の影響を受けた範囲及びその近傍で発生していた。地質条件との対応については、他ダムにおいても必ず対応するものとは言えないが、このようなパターンの発生については他ダムにおいても注意が必要である。

5. 軟岩サイトにおける検証

(1) 試験サイトの地質状況

Jダムの基礎岩盤は、下位より新第三期中新世の増毛層、新第三期鮮新世の幌加尾白利加層から構成される。増毛層は、主にシルト岩、砂岩、砂岩・礫岩互層、頁岩で構成され、幌加尾白利加層は、微細流砂岩～細粒砂岩を主とし、軽石質凝灰岩、海緑石砂岩、細粒砂岩、軽石凝灰岩、細粒砂岩・微細流砂岩互層に区分される。

(2) 分析対象データ

分析には現在施工中であるJダムのカーテングラウチング1次孔における水押し試験データを用いた。これらの施工範囲は、洪水吐部とフィルダム本体基礎部に分かれ、水押し試験の試験仕様が異なっていたが、ここでは最大規定注入圧力が0.30(MPa)以下のデータを用いることとした。その結果、洪水吐部は、1ステージから2ステージの14件が該当し、フィルダム本体基礎部は全ステージ88件が該当した。本論文の目的からは、段階P-Q曲線において限界圧力が発生したと判定されたデータのみを分析するところであるが、後述するように限界圧力発生データが極めて少ないこと、また軟岩サイトの水

表-3 Jダムのカーテングラウチングにおける水押し試験仕様

(a) 洪水吐部 1次孔

| | | | | | | | |
|-------|---|------|------|------|------|------|------|
| 孔径 | 46(mm) | | | | | | |
| 区間長 | 5(m) | | | | | | |
| 昇圧速度 | 実績値 0.0784(MPa/min) 以下 | | | | | | |
| 圧力段階 | 1st | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | | |
| 孔口圧力 | 2st | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.30 | |
| (MPa) | 3st | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.35 | |
| | 4st | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | |
| | 5st以降 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.35 | 0.45 |
| | リークまたは限界圧力が発生した場合および、岩盤の浮き上がり変位が規定量に達した場合は、試験を中止する。 | | | | | | |

(b) フィルダム本体基礎部 1次孔

| | | | | | | |
|-------|---|------|------|------|------|------|
| 孔径 | 46(mm) | | | | | |
| 区間長 | 5(m) | | | | | |
| 昇圧速度 | 実績値 0.098(MPa/min) 以下 | | | | | |
| 圧力段階 | 1st | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | |
| 孔口圧力 | 2st | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 |
| (MPa) | 3st以降 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.30 |
| | リークまたは限界圧力が発生した場合および、岩盤の浮き上がり変位が規定量に達した場合は、試験を中止する。 | | | | | |

表-4 Jダム分析結果

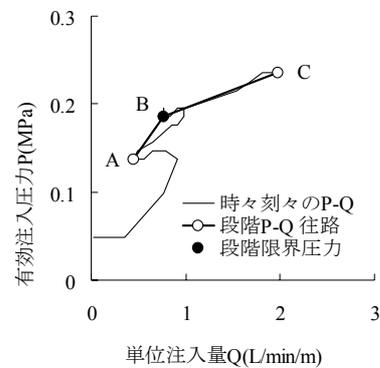
| 施工範囲 | 限界圧力 | パターン | 件数 | 記事 |
|----------------|------|------|-----|--|
| 洪水吐部 | 有り | A | 2 | 地下水位： GL-7.0 GWL GL-0.5(m) GL：試験実施時の洪水吐の コンクリート表面 |
| | | B | 2 | |
| | 無し | A | 10 | |
| | | B | 0 | |
| 小計 | | | 14 | |
| フィルダム 堤体基礎部 | 有り | A | 1 | 地下水位： 全孔孔口 湧水有り：58件 |
| | | B | 0 | |
| | 無し | A | 71 | |
| | | B | 16 | |
| 小計 | | | 88 | |
| 合計 | | | 102 | |

押し試験における注入パターン分類の重要性に鑑み、前述の全データを分析対象とした。これらの水押し試験仕様を表-3に示す。Jダムの圧力段階数nは、4 n 6となっており通常の水押し試験の段階数よりも多く設定してあるが、これは限界圧力の判定精度を向上させ、グラウチングの注入効率低下を防止するための対応と考えられる。

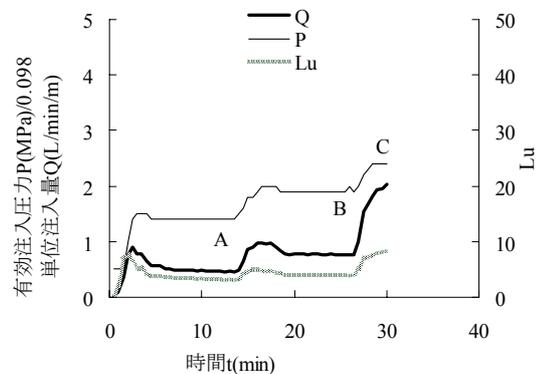
(3) 洪水吐部データの分析結果

洪水吐部では、表-4に示すとおり14件のデータのうち、4件で限界圧力が発生し、Aパターンが2件、Bパターンが2件となっていた。地下水位は、GL-7.0 GWL GL-0.5(m)の範囲にあり、このうち1件が試験区間内、これ以外は全て試験区間よりも浅部にあるため、ほぼ飽和していたと考えられる。

段階P-Q曲線で限界圧力と判定されたデータのうち、注意を要するデータを図-10に示す。これはBパターンに分類されるデータである。図-10(a)では、ポイントBを限界圧力と判定している。さらに、図-10(b)によると、ポイントCでは、圧力に比し流量が急増した後の注入状況にあると判定しているが、ポイントC以降に測定時間を延長した場合、ポイントBと同様に流量が減少し、結果的に限界圧力ではないという判定になる可能性がある。



(a) P-Q曲線



(b) 経時データ

図-10 Bパターン

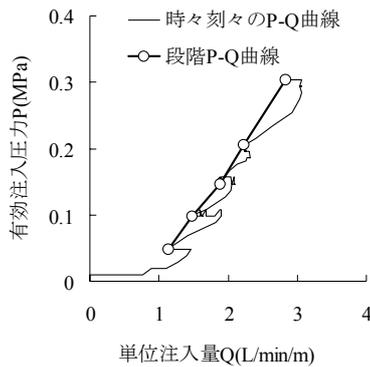


図-11 Bパターン P-Q曲線

(4) フィルダム本体基礎部データの分析結果

フィルダム本体基礎部の1次孔データは88件あるが、これら全てにおいて地下水位は孔口であり(そのうち58件で湧水が確認)、試験区間周辺は飽和していたと考えられる。このうちAパターンは70件、Bパターンは18件で、段階P-Q曲線から限界圧力と判定されたデータは、Aパターンの1件のみであった。Bパターンと判定されたデータは図-11に示すとおり、各圧力段階の流量減少幅に極端な増減が無く、段階P-Q曲線がほぼ直線状となっていた。

6. おわりに

本論文では、既設ダムの水押し試験における限界圧力判定方法を分類、整理するとともに、水押し試験の時々刻々の実績データを分析した。その結果、時々刻々のP-Q曲線を描くことにより、より精度の高い限界圧力判定ができることがわかった。

現状の水押し試験における限界圧力の判定精度は、各圧力段階の圧力差に依存し、その結果は、実際の限界圧

力よりもやや小さく評価される可能性がある。短時間で定常浸透状態が達成されると考えられる場合(本論文におけるAパターン)は、時々刻々のP-Q曲線を描くことにより各圧力段階の圧力差に起因する限界圧力の判定精度が容易に向上すると考えられる。

目詰まりや、非定常浸透の影響を受けていると考えられる状況(本論文におけるBパターン)で、段階P-Q曲線が単位注入量が増加する側に折れた場合は、限界圧力によるものか、流量減少傾向のばらつきによるものかを見極める必要性が生じる。定常浸透状態の流量で判定することが理想であるが、この結果を得るためには膨大な時間を費やす可能性が高いため⁴⁾実務上は困難である。このような場合においては、段階P-Q曲線が折れた時点からの測定時間を若干延長することにより、限界圧力の判定精度が高まる可能性があると考えている。

限界圧力はルジオン値の評価と、グラウチング仕様の決定のうち注入開始配合及び規定注入圧力の決定¹⁾に影響する。今後は、グラウチングの注入効率を向上させるために、水押し試験における限界圧力判定方法について更なる分析を進めて行きたいと考えている。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター編集：グラウチング技術指針・同解説，pp.37-47，大成出版社，2003.7
- 2) (財)国土技術研究センター編集：ルジオンテスト技術指針・同解説，大成出版社，pp.20-24，2006.7
- 3) 山口嘉一，新家拓史：無段階水押し試験による不飽和地盤の透水性評価，ダム工学，Vol.16，No.2，pp.94-108，2006.6
- 4) 山口嘉一，安仁屋勉，池澤市郎，赤松利之：不飽和軟岩地盤における長時間透水試験，第42回地盤工学研究発表会平成19年度発表講演集，論文No.536，2007.7

IDENTIFICATION ACCURACY OF CRITICAL PRESSURE IN WATER PRESSURE TESTS

Yoshikazu YAMAGUCHI, Hiroyuki SATOH and Masahiro NISHIOKA

Water pressure tests, which are simplified permeability tests, are conducted just before dam foundation grouting to set grouting specifications. Because the number of pressure stages in water pressure tests is less than that of Lugeon water tests, which are detailed permeability tests. Therefore, there is a possibility that critical pressure in water pressure tests is judged smaller than that in Lugeon water tests. we analyze the results of water pressure tests conducted at two dam sites. In this analysis, we draw a P-Q curve using continuous data of injection pressure and water take, and compare it with an ordinary P-Q curve.