

IV-12 高瀬ダム設計施工管理に対する電算機の利用(その2) 基礎グラウチングについて

東京電力(株)高瀬川水力統建設所 正会員 森 吉昭

1. まえがき

東京電力は、電力需要の著しい伸びに対応するため、電源開発を鋭意すすめているが、その一環として、信濃川水系高瀬川に、ニセフィルタイアダムを含む、大規模揚水式発電所を建設中である。すなわち、ダム高176m、堤頂長362m、堤体積1,140万 m^3 の高瀬ダムを上部調整池用とし、ダム高125m、堤頂長340m、堤体積724万 m^3 のた倉ダムを下部調整池用として、この間2.7mを2条の圧力トンネルで結び、約230mの落差を得て、新高瀬川発電所(地下式)により、1,280MWの揚水式発電を行う計画である。このうち高瀬ダムは、46年11月に本着工し、49年11月現在、堤体積550万 m^3 の盛立を完了した。また基礎グラウチングについては、アランケットグラウチングを全工事量の約1/2、カーテングラウチングを、同じく1/4、施工完了した。高瀬ダムの設計施工管理にあたっては、極力、電算機を導入し、合理化、省力化に努めているが、このうち、基礎グラウチングに対する電算機の利用状況について、以下、報告する。

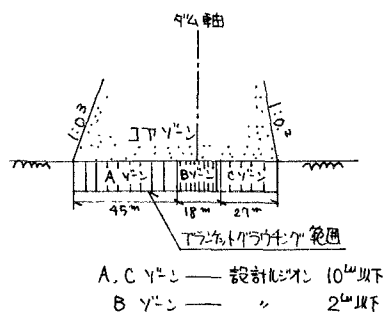
2. グ라우チングシステムと電算機の利用対象

高瀬ダムグラウチングシステムは、アランケットグラウチング、断片処理グラウチング、カーテングラウチングからなっているが、これらに対する電算機の利用対象項目をあげると、次のとおりである。

① アランケットグラウチング関係

アランケットグラウチングは、コアト管を基礎岩盤全体について、深度10mの範囲をグラウト対象としている。すなわち、図-1に示すように、ダム軸を中心として幅18mの範囲を2 m 以下に、その他の範囲を10 m 以下に改良するもので、ボーリングマシンにより削孔している。この場合、グラウチングのための削孔位置、孔方向は、一様パターン、一様方向とするよりも、なるべく多くクランクを切断するように、一孔一孔の孔位置、孔方向を決めた方が、グラウチング効果が高い。特に高瀬ダムサイトのように、基礎岩盤はC m 級以上の堅硬な花崗岩であるけれども、これが方塊状ブロックに介離している場合、介離面と交差するように削孔すればグラウチング効果があがることや期待される。そこでダムサイトで実測したクランクの情報(位置、走向、傾斜、幅)をあらかじめ電算機にインプットしておき、ボーリング孔位置、孔方向を任意に変えて、最も効果的にクランクを切断するものを求めることとした。

図-1 アランケットグラウチング対象領域



② カーテングラウチング関係

カーテングラウチングは、基礎岩盤内 1/2 CH: 貯水水深の深度までを対象とし、2 m 以下の止水カーテンを作るべく、1次孔間隔12mで、中央内挿法により、施工している。この場合、アランケットグラウチングと異なり、ボーリング孔一孔ごとに、孔方向を変えることはできないので、グラウチング効果をあげるためには、地質状況に応じて、各ボーリングごとに注入の仕方、傾斜を変えて、可能と限りセメントをこみ入れた方がよい。そこでまず、岩盤中の地質性状、特にクランク性状をなるべくくまなく推定して、次にそれに対応した注入仕様を定めることとなる。クランク性状の推定と、その結果に対応した注入仕様決定に、電算機を利用することとし

た。

④ グラウチングデータ集計と電算機

プランケット、断面処理、カーチンググラウチングに関して日々発生する注入データは、多項目、大量なものであり、その整理、集計には大変な労力が費される。まして日々のデータから、注入性状の全体的な傾向を把握したり、種々の分析をしたり、追加孔の必要性の有無を速やかに判断するためには、もはや電算機を利用する以外に方法がないといわねばならない。またこのように、単に大量な業務処理こそ、電算機の威力を発揮する分野であろう。そこで、データ集計、分析と、さらに図化まで含めて、電算機を利用することとした。

以上、基礎グラウチング関係について、電算機の利用対象を概観した。これらは現在、高根ダムでは、最適ボーリングプログラム、クラックヒストグラム推定プログラム、注入方程式プログラム、および日報管理プログラムとして、一部、実施上物され、一部はなお開発中である。そこで以下に、これらのプログラムの内容について紹介する。

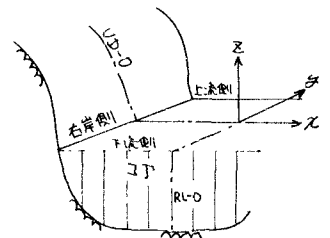
3. 最適ボーリングプログラム

これは、プランケットグラウチング孔を、基礎岩盤のクラックに集中させグラウチング効果の向上をはかること、および設計ルジオン値を満足するために必要な孔数を決めるプログラムである。その内容は次のとおり。

① 基礎岩盤の地形全体を、立体座標系の中におく。(図-2の通り)

図-2. 立体座標系

② 花崗岩岩盤は、一般に方塊状ブロックに分割されているので、クラックは有限な平面と仮定することができる。そこでクラック面を平面方程式で表現する。まずクラックの始点座標(x_1, y_1, z_1), 終点座標(x_2, y_2, z_2)、走向 α , 傾斜 β , クラック幅 w を現場で測定し、これからクラック面方程式 $ax+by+cz=d$ ($x_1 \leq x \leq x_2$) を求める。(図-3参照)



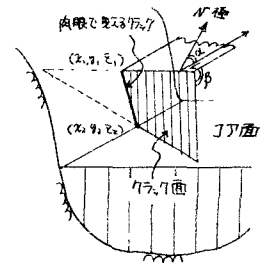
③ ボーリング候補点の設定

ボーリング候補点は、x軸に平行な格子線を設定し、格子線の両端、および4等分点の計5点を対象とする。現場地形は複雑な形にゆがんでいるので、格子線間隔は、任意に与えることができるものとする。(図-4)

図-3. 岩盤面とクラック面の関係

④ 最適孔位置、孔方向の決定

ボーリング孔位置を、候補点上に逐々と移動させる。孔方向も、各孔位置に対して、水平角 $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ (or $240^\circ, 270^\circ, 300^\circ$), 鉛直角 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 60^\circ$ の15通りに変えてみる。これら各ケースについて、ボーリング線方程式 $(x-x_1)/L_x = (y-y_1)/L_y = (z-z_1)/L_z$ を求め、クラック面方程式と連立させて交点を求める。パーカッションボーリングの削孔能力は、12mが限界であるので、孔口から12m内の交点のみ、有効とする。この計算結果から、最もよくクラックを切断する孔位置、孔方向を求める。ただし、切断クラックの幅 w は、3乗して評価する。また、各孔に対して $L_u = a \log_e(z/z_1) + b$ から、注入前ルジオン値 L_u を求める。この式はこれまでの注入実績から、切断したクラック幅 w と、ルジオン値 L_u との関係を実験式として求めたものである。(図-5)



⑤ ミルクの注入半径の考慮

ボーリングによって切断されたクラックは、切断面から $R=3m$ の範囲だけ、セメントミルクが浸透、充填されると仮定する。なお、クラック幅 w が5mm以上のクラックについては、 $R=5m$ とする。(図-6)

⑥ 必要孔数の決定

計算対象領域を、プランケットグラウチングのA, B, Cゾーンに対応してあらかじめの設定する。パーカッションボーリングマシンは、コア面にいるので、削孔可能領域は、コアから、高さ8m程度の範囲に限定される。

(図-7) この天の1計算領域は、高さ8m 水平方向6m程度のまさにコアが盛られようとする岩盤とする。これに対し上述方法をより次々にボーリング孔位置を求めて行く。一つのクランクに対して交差した点が生ずるボーリング切断点より注入半径の範囲内に入、この場合はこのクランクは充填済みとされる。こうしてボーリング孔のルジオン値が自然ルジオンに達するまで、孔位置・孔方向を求めていく。

図-4. 格子線とボーリング候補点

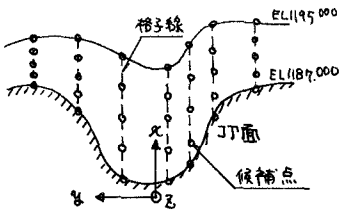


図-5. クランクとボーリング候補

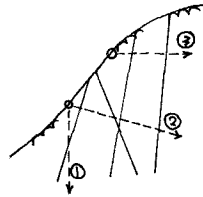


図-6. 注入孔の注入半径

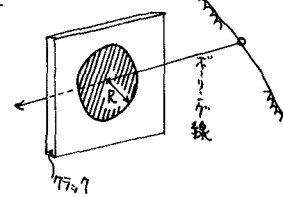
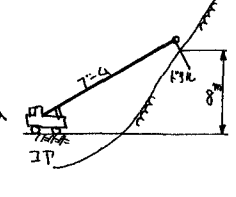


図-7. 10.7mのボーリングの限界



4. クランクヒストグラム推定プログラム

カーテングラウチングにあたり、最も効果的な注入をするためには、対象ステージのクランク性状を知る必要であるが、グラウチング前には、下記情報が得られている。

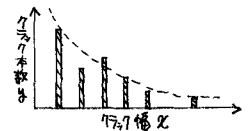
(i)ボーリングコアから得えたクランク本数 m_k/m^2 (ii)透水試験によって得たルジオン値 (iii)周辺基礎岩盤の、クランク幅とクランク本数との大まかな関係特性(代表的な位置に対するボアホールカメラによる観測) 本プログラムは、これらの情報から、電算機によって、まさに注入しようとするステージのクランクヒストグラム(クランクの幅と本数との関係)を推定し、注入に役立たせようとするものである。その内容は次の通り。

①モデルヒストグラムの設定

ボアホールカメラによる、岩盤深部の観測結果を、横軸クランク幅、縦軸幅に対応するクランク本数としてヒストグラム化すると、ほぼ図-8のようになります。これを一つの関数形に近似させる。すなわち関数形

$y = \frac{A}{B + x^2}$ と、 $k = 1, 2, 3 \dots$ のそれぞれについて、最小二乗法により観測結果に最も近い関数として、 A および B 、分散 S^2 を求める。(x: クランク幅, y: クランク本数) 次に k と S^2 の関係から S^2 の最小となる k_0 を持ち、この k_0 に対応した A_0, B_0 を最適解として求める。従って当該ボアホール孔の周辺岩盤は、クランク性状が $y = \frac{A_0}{B_0 + x^2}$ で表現できると仮定する。これがモデルヒストグラムである。

図-8. クランクヒストグラム

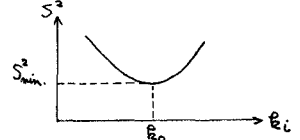


②注入ステージのヒストグラム推定

今まさに注入せんとするステージについては、ルジオン値 L 、クランク本数 N がわがっている。この条件を満足し、かつそのヒストグラムの形状が上述モデルヒストグラムの形に相似となるように推定する。すなわちクランク幅は次の11種類のみとまず仮定する。 $t = 0.001, 0.003, 0.006, 0.016, 0.04, 0.1, 0.25, 0.63, 1.585, 3.98, 10 \text{ mm}$ 。はじめに、注入ステージのクランク幅は上記11種のうちの2種だけとし、本数 N を満足しつつモデルヒストグラムに相似となるように幅と本数を求める。その組合せケースは $11C_2 = 55$ とおりある。これら各々に対してルジオン値 L を次式により求める。

$L_k = \frac{10^4}{36} \cdot \frac{1}{\alpha} (2t^2)$ (ボアホール孔における幅 t の観測結果とルジオン値との内挿関係式) この L_k が、先に与えられている L に最も近いものを、幅2種の場合の解とする。同様にして幅を $3, 4, \dots, 11$ 種とした場合の各々について計算し、最も L に近い解を、このステージのヒストグラムとみなすのである。すなわちボーリングコアにおいてクランクと判定されるもののうちにはコアチェックからみよしの際に生じたものも含まれており、コアから数えたクランク本数と、ボアホールカメラによる観測結果と比較すると、実際のクランク本数は、コアで観測したものの $1/2 \sim 1/4$ 程度とみなされる。そこで、対象ステージのクランク本数 N のインプットにあ

図-9. k 値と分散 S^2



た。これは、この補正をしておかなくてはならない。

5. 注入方程式プログラム

岩盤内に注入されたグラウトミルクの挙動を知るために、ミルクを粘性流体として、クラック内でのミルクの運動方程式を立てた。すなわち、まず単一クラック(クラック幅は任意)に於いて、その傾斜、地下水の有無を考慮しつつ、種々の濃度のグラウトミルクの (i) 定圧 (ii) 定流量 (iii) 定流速 で注入する場合に於いて、孔口からの注入圧、ミルクの物体力、クラック壁面との摩擦力のつりあい式を求めた。これは非線型の微分方程式となるので Runge-Kutta 法により、電算機を用いて、数値解を求めることとする。この計算結果から、クラック幅に対して、最も効率的にセメントを充填するための注入諸基準(濃度、圧力、流量条件 etc.) を得る。次に今度は複数のクラック(幅は九種あるものとする)をもフラスターに於いて、同様に、(i) 定圧 (ii) 定流量 (iii) 定流速 で注入する場合のミルクの挙動を、つりあい式から電算機によって求める。以上の解をもとにして、実際注入する場合、まず薄いクラックから注入を開始し、最終的に九種のクラックをセメントで充填するための最も効率的な、注入諸基準を求めようとするものである。

6. グラウト日報管理プログラム

基礎グラウトニングデータは、日々、日報の形で大量に発生するので、これの集計、分析、図化を、電算機を用いて行うこととした。データ内容は、ほぼ次のようなものである。

(i) カーテンボーリング関係

日進長、最長コア長、コア採取率、掘進速度、岩質、クラック本数、破碎帯の有無、漏水の有無、etc.

(ii) カーテン透水試験関係

透水試験圧力、流量、ルジオン値

(iii) カーテン、プランケットグラウトニング関係

時間 — 注入濃度 — 注入量 — 注入圧 — 廃棄量、ルジオン値

これらデータのインプットから、次のようなアウトプットが得られる。

① 集計関係 — 一定期間における施工総孔数、総注入量、平均ルジオン、各孔別地質、等、

② 分析関係 — $C = a \cdot L^{m_1} \cdot P_{max}^{m_2} \cdot (\Sigma t_i^3)^{m_3} \cdot t_e^{m_4} \cdot V_e^{m_5}$ (t_e : 注入時間, V_e : 最終濃度) 式による重相関係解析 ($a, m_1, \dots, m_5$ の算出、相関係数、各因子の寄与率を求める。)

③ 図化関係 — ルジオン値、単位セメント注入量の超過確率図、ルジオン分布図、クラック密度分布図等
7. 電算機の運用方法と今後の課題

以上紹介してきたプログラムに於いては、一部実施に入り、一部は手前発中である。すなわち、最適ボーリングプログラムは、49年8月から、現地端末機と、本館大型電算機リ1110と、On-line で直結し、現地インプット — 計算 — 現地アウトプット — 現場適用のシステムで、実施に入った。初めての試みであるものの、慎重を期し、現場適用にあたっては、十介をチェック孔を実施した。これらの結果は、今冬に発表する予定であるが、ほぼ次のことがいえる。まず、従来のように1次孔の注入実績を有って2次孔以下の設計と養生するのでなく、あらかじめ必要孔数が判明しているので、工事工程を短縮することができた。また、クラックを重点的にぬらいうちるので、むだボーリング孔がなくなり、一孔当りの注入量が高くなっている。クラックヒストグラムは一応、稼働できるまでに完成しているが、これを注入方程式プログラムと結びつけて、よりいっそう効果を発揮するよう検討中である。注入方程式プログラムは、数値解計算中である。またグラウト日報管理プログラムは、現在テストラン中であり、50年春からの、工事再開時には実用に供し、その威力を発揮させたい。

以上