

堰堤の基礎岩盤に就て

高 田 昭*

(第二松花江水力電気発電所に関する用務の爲め來滿された高田技師に特にお願ひして御講演を願つた際の速記録である。康徳5年7月26日、於新京日滿軍人會館)

私は大正11年から内務省に職を奉じて以來今日迄土木工事に關係して居りまして、殊に堰堤工事に専念して居ると云つてもよい位でありまして、其の緣故を持ちまして再び當地へ御邪魔する事が出来、建國以來滿洲國の爲に御奮闘になつてゐる皆様の前で御話をする機会を與へられました事は、私の最も光榮とする處で御座いまして司會者に厚く御禮申上げる次第であります。

扱只今から堰堤の基礎岩盤に就いて、夫れも私が數年來経験しました事の中から極く簡単に岩盤の状態とか、其の調査方法或は施工方法等に就いて申し上げようと思ひます。

堰堤には種々の型式があります。即ち重力堰堤、扶壁堰堤、土堰堤等が之でありまして、其の他にアーチダムもあります。日本の様な地震國では耐震構造が必須なる條件であるにも拘らず、是れを耐震的にする確信が力學的に得られるに至つて居ない爲に、未だ之だけは造つたことがないのであります。只今から此の中の重力堰堤を主題として其の基礎に就いて申し上げます。

堰堤の基礎

堰堤の安定を考慮するに當つては先づ堰體其のものが重大な要件となります。併しながらコ

ンクリートに関する研究が進歩した今日には、堰體の設計も施工も共に充分期待し得る態に達してゐるのであります。

次に重要なものは基礎岩盤の支持力でありまして之は次の二項目に分けて考へられるのであります。

即ち (1) 岩盤の支持力

(2) 岩盤内の漏水 とであります。

堰堤の計畫に際しまして、先づ其の型式を決定するには岩盤の支持力に重點を置くものでありまして、支持力の充分なる場合には重力堰とし、支持力が充分でない場合には土堰堤と云ふ事は一般的法則であります。處が確に當りますと事情は複雑となりまして、殊に途半端な支持力を持つ岩盤の上に相當に高い堤を築造しようと思ふ場合等は其の判断が困難なのであります。

岩盤の支持力を判断する一方法としては岩盤の一部を切り採つた供試體に就いて壓縮試験します。而て壓縮強さが堰堤の最大主應力の $10 \sim 12$ 倍以上あればよいと考へて居ます。何れも 10 倍から 12 倍の大なる安全率を見込むかと申しますと岩盤には供試體を採取し得る部分もあり又採取し得られない部分もありまして、斯く採取し得られない所が一番悪い所だと考へなければならぬと云ふのが一つの理由であります。

従つて場合に依つては此の試験は單なる参考に過ぎない事もありますが、各國共此の位の安全率を探つて居るようであります。

古い時代の火成岩とか水成岩は孰れも硬質な部分もあれば軟質なる部分も混つて居て、其の質は一定して居ない場合もありますが、時代の新しい岩石は其の質が大體均一なのが多いのでありますから、斯様な場合に壓縮試験を行つて判断すれば大した間違はない事になります。又岩盤とコンクリートとの耐久力を比較すると、例へば花崗岩の如き硬質なものと同コンクリートとの耐久力を各の破片に就いて比較するとコンクリートは遙かに劣つて居ります。然しながら岩盤は良質なものでも2~3m間隔、一般には數種間隔に龜裂とか節理とかが無數に生じて居り水が浸入して風化され易い缺點を持つて居りますが、堰堤のコンクリートでは收縮縫手を15~18m位の間隔に設置して適當な施工方法に據りさへすれば堰堤内部には殆ど龜裂を生ずることがないと云ふ事は硬さと耐久力とは並行しないと云ふことでありまして、又一方に於て岩盤の支持力に多大の安全率を考慮する理由ともなつて居るのであります。

次に支持力が中途半端であると考へられる場合に就いて申し上げますと、例へば高さ30mの堰堤を築造しやうとする基礎が洪積層か或は第3紀層であつて、其の壓縮強さが10~15kg/cm²しかなかつたと云ふやうな場合にはどうなるかと云ひますに、高さ30mの堰堤になると下流端に作用する最大主應力は10~8kg/cm²になります。従つて壓縮強さは1~1.5倍しかないこととなり、之れで果して安全であるか否かと云ふ問題になりますと其の判断は非常に困難でありま

す。古い時代のものには斯様な所に冒險的に作つたものもありまして多少の漏水はありますが未だ大した危険を感じないのもあり、又決潰したのものもあります。

一般に軟質な地盤は透水性にも富んで居りますから、水を貯めると池の水が浸入して岩盤を局部的に弛緩又は軟化せしめる結果、堰堤に不規則な沈下を起す事が免れないことになります。

堰堤には15~18m間隔に收縮目地を作りますから、之れで區切られた各ブロック自身は安全なものであつても、地盤の支持力に局部的差違が生じると各ブロックに喰ひ違ひが起るようになるのであります。之れでは重力堰堤は危険であると云ふことになります。

其他堰堤は一度築造すれば後日之れを修繕する事は殆ど出来ないものであり、又決潰すれば莫大なる慘害を及ぼすものでありますから、堰堤の安定に就いては普通の橋梁とか道路の様に悪ければ作り直すことの容易なものとは異なり普通以上の安全性を必要とするのであります。

池水が基礎地盤の中を浸透する場合は重力堰堤では其の底部に揚壓力が作用し、又地盤の中を相當の速さで水が流れてゐると地盤は次第に分解作用を起し、粘土質の地盤ならば粘土は漸次に流れ去つて其處に隙間を生じ、岩盤は次第に弛み、其の甚しい場合にはモクラの開けた様な穴になり、周りの地盤は次第に弛んで其の支持力を減少します。長野縣の千曲川の支流の小さい川に造られた小諸堰堤と云ふのがありました。之れは高さ約50尺の扶壁堰堤でありまして川底は砂礫で兩岸は火山灰質の沖積層から成つて居りましたが、貯水後堰堤の下部に當る砂礫層内に水が浸透して粘土其他の微粒物を流し去

つて間隙を作り、孔は次第に大きくなつて竣工後11箇月目に決潰したのであります。

岩盤の中を通る水が岩盤を軟化さす虞れのある所は如何にすればよいかと申しますと、例へば粘板岩の様な地層ですと水が浸透すると多少ながら岩盤を軟くする、甚しい處は糊の様なつて溶けるのであります。滲透水が相當の速さで流れて居ると常に新鮮な水が岩盤に作用して其の一部を溶解したり、分解したりします。でありますから岩盤を弛め又分解さすことを出来るだけ軽減さすには水を動かさない様にする必要があります。夫れは停滯してゐる水ならばたとひ化學作用を起しても或る限度に於て平衡状態に達するからであります。

従つて實際に當つては堰堤基礎の上下流にシートパイルを打ち込むとか、止水壁(Cut off wall)を上下流に深く設けるとかすれば水の流動は割合に緩慢になつて此の目的に副ふ事が出来るのであります。

岩盤の調査

岩盤の調査には種々の方法がありますが、現今最も廣く行はれて居る方法はボーリングであります。併しながら現在使用されて居る機械では比較的径の小さいコアしか採ることが出来ないものでありまして、普通直径60耗乃至80耗以下のコアを採取する様な程度では、充分に岩盤の状態の分るようなコアを得る事が、出来ません。コアの採れる部分は岩盤の丈夫な處で、採れない所が大いに考慮を要する所であります。従つて岩盤の状態を詳細に調査する必要がある場合には成る可く大きく孔を開けて見たくなります。

近頃東京市が水道の水源地として多摩川の流に高さ150mの堰堤の工事に着手して居ますが、其處では直径1米のボーリングをしてゐます。未だ試験的でありますのでうまく孔が通れますと、直径1米ありますから人が中に這つて調査する事が出来ます。

アメリカではテネシー河に2,3箇所使はれ例があります。

ボーリングの外に尙地質に應じて調査隧道は堅坑を掘る必要があります。

一般に堰堤を築造しようとする場所では川底の部分は水に浸蝕された所ですから割合に地質は良好ですが、水面より上の兩岸取付部分の地質は永年の間自然の風化を受けて居りますから、一般に川底部に比し地質の悪い所が多いのであります。斯様な所の地質を調査するに水平方に隧道を掘るとか、又必要に應じて堅坑を掘つて調査した方が確實でもあり又有利であります。

併し川底には容易に坑を掘る事が出来ませんから其處だけはボーリングをやると云ふプリンスブルで調査するのがよいと考へて居ります。そして調査に着手する前に地質の弱點が如何なる癖を持つて居るかを豫め調べて、最も悪い所を推定してボーリングをやると云ふ事にしたいものであります。

粘板岩とか結晶片岩のように細かい層の處へボーリングをしてもコアの採取が思ふ様にならない事が多い。殊に層が急傾斜してゐる場合に之れに鉛直方向に穿孔すればコアの採取率が非常に悪い。即ち層面に傾斜した方向に穿孔するとコアの上下の隅の部分が缺けてしまひ甚しいときは極く一部分だけしか残らない事があります。之れではボーリングしても其の効果

が殆どありませんから、斯様な場合には層面に對して成る可く直角に近い方向に掘るのが望ましいのであります。

併しボーリングの結果、猶不安な箇所或は不明な點があれば、之れを闡明させる爲には先づ河岸から豎坑を掘り下げ更に其の底から川底に隧道を掘つて調査すると云ふ方法があります。その實例としては天龍川の中流の平岡と云ふ所に矢作水力電氣會社が堰堤を計畫しましたが地質に不明の點があつた爲に右岸から左岸に向つて長さ120mの隧道を川底に掘つて調査しました。又雨龍電力會社では北海道の雨龍川に造らうとする堰堤の地質が集塊岩であつて、ボーリングを多數にやつて見たが、コアの採取が思はずにないので、河底へ隧道を掘つて地質を調査致しました。尙此の様な隧道の中に適當な装置をして、例へばハイドロリックチャツキのよなものを使へば岩盤の支持力をも或る程度まで知る事が出来て便利であります。雨龍では目下其の準備をして居る筈であります。

ボーリングの外に岩盤を調査する方法としては電氣抵抗と弾性波とに據る方法があり、最近次第に實用化されつゝあります。弾性波に依る方法で期待し得られる調査は川底に土砂が相當推積してゐて、其の底と兩岸には硬質の岩盤がある様な所で、川底の土砂の厚さを知り度いと云ふ様な場合でありまして、之れによると誤差1~2mの程度で其の厚さが分ります。此の調査には大體1週間位を要しますがボーリングに比較すると問題にならぬ程速く解るのであります。併し岩盤の上表面が風化して軟質化して居る様な所でありまして岩盤の弾性係数とか密度とかが遷移的に變つて居りますから、之等の性

質の著しく異つたものが一面を界として相重つてゐる場合ほど正確な結果が望めない事になります。

電氣抵抗による方法は地層の電氣に對する抵抗の相異及び變化によつて調査するのですが地層の中に含まれて居る水により非常に影響されるのでありまして、つまり地下水のある所と無い所とか、又其の水の鑛物質を溶解して居る程度種類等に依つて影響されまして地質の状態を知るのが難しい場合が多いのであります。併し此の方法は極めて經濟的であり又地下水の分布状態を調べるに効果がありますから、滿洲の様な廣大な平地で地下水調査に應用すれば相當効果があるのではないかと思ひますが、日本の様な川筋には適當ではありません。將來の進歩を期待してゐる程度であります。

岩盤の種類と施工

日本にある百尺以上の高さを有する堰堤の中で最も最初に造られたのが宇治川の堰堤であります。私が關係し始めたのが昭和元年でありまして富山縣の庄川筋に造つた小牧堰堤(日本電力)と其の上流の積山堰堤(昭和電氣)とでありまして、孰れも略々同時に着手され同じ頃に竣功致しました。其の後今日迄關係した堰堤の數は相當の數に上りますが夫等の堰堤の基礎岩盤を種類別に分けると大體次の様になります。即ち(1)花崗岩、(2)石英斑岩、(3)古生層、(結晶片岩、粘板岩、砂岩) (4)其他であります。

(1)花崗岩

火成岩より成る堰堤の基礎では龜裂と風化の程度とが最も重要な問題となります。更に其れが古い地層ですと、斷層があつて相當に惱ま

れる事があります。和山堰堤は花崗岩の上に造られたものでありますが、之れが本堰堤と城堰堤と云ふ二堰堤に分れて居まして、城堰堤の基礎に幅17~18米の粘土質を含む斷層がありました。其の爲此の斷層粘土の部分を約30mの深さ迄掘り下げて、之れをコンクリートで詰め替へ、尙要心の爲めに斷層の移動の場合を考へて其の兩側にアバットを設け、その間にスラヴを立てたのであります。一般に斷層があればその部分を特に掘り下げる他に上流部の止水壁の所も更に深くし、又下流端にも止水壁を設けて、此の兩者の間に挟まれた部分の粘土中に浸入した水の移動を極小にすると共に粘土の押し出されるを防ぎ、又水叩部に於ては更に洗堀に對し充分なる防備を施す必要があります。

花崗岩より成る基礎の中で岩質の最も良かったのは泰阜堰堤でありまして、斷層もなく又龜裂の様なものも僅かに5~6m毎にあつたに過ぎません。之れは私の見たものの中では一番良好と認めた岩盤でありました。

(2) 石英斑岩

石英斑岩は大體に於て花崗岩と同様であります。比較的古い岩盤である爲め龜裂が非常に細かく且多數に發達して居るものがあります。

(3) 古生層

私の經驗から見ますと最も困難なのは古生層であります。此の地層は本州の大平洋岸に沿ひ四國、九州に連つて居るものであります。地層の種類には結晶片岩、千枚岩、粘板岩、砂岩等がありまして、一般に風化してゐたり或は弛んで居たりするものが多い。

其の一例を申しますと吉野川の支流祖谷川の小支流に高さ30mの堰堤があります。

基礎は結晶片岩の中の雲母片岩、綠泥片岩であつて、其れがボール紙の厚さ位に割られ易いものであります。之が直立して居て、然も甚だしく風化されて軟質なものとなつて居りますから表面は變形し易い、従つて兩岸に露はれて居る部分は皆谷に向つて彎曲して居て、恰も地層の傾斜が兩岸共に谷に向つて居る様に見えます。

工事着手前は斯様な状態でありまして、谷底に相當に大きい斷層があるのではないかと云ふ疑問すら起されましたが、之れを掘つて見ると前に申し上げた様な事情であることが判つたのであります。又此様な地層にグラウトを施行するにも注意を要するものでありまして、一般に鉛直方向にはグラウト孔も掘り得るから鉛直孔で施工してゐますが、此の様な直立した地層に鉛直孔を掘りましても、恰も本の頁の間へ針金を差し込んだ様なものでありまして、之れにセメントを注入しても單に層の間にセメントが入るだけで其の直ぐ隣の層面には殆ど入らないのであります。従つて斯様な地層では層面に多數に横斷する様な方向に穴けて出来るだけ多數の間隙にセメントの注入される様に施工することが必要であります。

次に粘板岩はどうかと云ひますに、一般に其の岩片其のものは硬質ですが地層としては其れに非常に多數の龜裂が這入つてゐるのが缺點でありまして、施工に當つては結晶片岩の場合と同様の注意を要します。一般的には30m以上高い堰堤の造れる所は極めて少ない様であります併し之れにも例外がありまして高知縣の吉野川上流に高さ70mの大橋堰堤と云ふのが目下工事中であります。其の基礎は粘板岩類似のものでありまして小さい斷層が數條ありますが層面

は密着してゐて龜裂の數も此の種の岩石としては比較的少ないやうであります。併し掘つて見ると良くない所が現はれて掘鑿量も着手前の豫想の倍に近くなつたようでありまして、どちらかと云へば比較的良好的な岩盤であつても火成岩の良好なものとは到底比較にならぬ程の困難を伴ふことが多いのであります。

もう一の實例を申しますと岐阜縣の大垣附近を流れてゐる揖斐川で西平と云ふ所に高さ 30m の堰堤を築造してゐます。其の基礎岩盤は比較的硬質な粘板岩でありますが龜裂が多數なる外に龜裂によつて岩盤が相當弛んで居る所があります。基礎堰堤は河の半分を締め切つて始めましたが段々掘り下げるに従つて岩盤の龜裂から水が湧出し始め又山の方からも相當に湧水が湧いて全面的に方々から水が湧き出したのであります。其れで此の水が果して何處から來るかを調べ様と云ふので毎日數回宛各所の湧水の溫度を測る事にしました。其の結果河水の溫度と大差なく且相關的に變化するものと、河水の溫度とは無關係のものとが判り、之れによつて湧水の経路も大體判明したのであります。次に斯様な湧水の多い所の工事はどうすればよいかと云ふ問題を解決せねばならない。之れに就いては私は次の様に考へたのであります。即ち設計としては滲透水による揚壓力係數を 100% とした場合に顛倒の虞れのないように堤體の斷面を定めて次に施工に當つては堤體底面の滑動抵抗が出来るだけ大きくなるやうに注意し、更に上流側の止水壁の下の岩盤には充分にグラウト工を施せば心配がないと思ふのであります。處が此のグラウト工もどの程度に施行すればよいかと云ふ問題が残ります。其處で試験的に種々なこと

をやつて見ました結果、グラウト孔の間隔は約 2m が必要であることが判りましたので 2m 間隔に 2 列に施行することになりました。次に深さを如何程にとればよいかと云ふ問題が未だ残つて居りますが、之れは比較的簡単に決定出来ません。其は前に申し上げました様に 2m 間隔に 2 列にグラウティングをやりました後で其の 4 孔の中央に調査孔を掘り下げてみれば判るのであります。グラウトを深さ 6m 迄やつた所に調査孔を掘り下げて見ました結果 5~5.5m 迄は充分にグラウト工の効果があり、夫れ以下は無効であることが判明しました。此のグラウト工も堤體コンクリートが相當の高さ迄打ち上げられた後に行つたものであり、又 6m の深さを 2 回に分けて 3m 宛にグラウトをしたのであります。之れによつてグラウトの効果も此處では孔の深さ迄にも及ばないと云ふことが解りましたから、必要より多少深く孔を掘り下げさへすれば目的は達せられると云ふことになり、只今では是等の結果に基づいて施行してゐるのであります。グラウトをやります場合に孔の施工深さが如何程が適當であるかと云ふ問題は仲々難かしいものであります。此の孔が地層の間隙を數箇所横斷して居ますから之れにセメント汁を壓入しますと孔の内部に於ける壓力の分布は決して一樣ではなく注入管の口に於て最大であり、之れより遠ざかるに従つて低下します。殊に大きな間隙があつてセメント汁が多量に流入するやうな處があれば其處では壓力が急激に低下します。従つて孔内の壓力分布即ち動水勾配をよく調べて實際に効果のあると考へられる深さを決定し、其の深さを單位として數回に分けて所要の深さの一孔の施行とすることが望ましいのであ

ります。以上申し述べました方法は少々理屈ばいやうであります、實際問題としてはグラウト孔をボーリングしてゐるときに龜裂に遭遇すれば、之れを貫通した所で穿孔を中止してセメント注入をやると云ふ方法を追次的に繰返してやればよいのであります。揖斐川では深さ15mのものを3~4回に分けてやつて居ります。

次にグラウチングをやつた後にセメントが如何様の状態で岩盤の間隙を填充してゐるかと思ひますに、相當に硬化して居て岩片とも好く密着して居る處もあります。中には石墨位の硬さしか保つてゐないものがあり、岩片とのボンディングの如きは全く無いものがあります。即ち單に間隙を塞いでゐるに過ぎない程度のもが相當にあるやうであります。併て静岡縣の大井川の支流寸又川に築造された千頭堰堤で池水と漏水とに就いて調査したことがあります、岩盤内に相當澤山のグラウチングを施したにも拘らず多少の滲透水があつて、然かも其の水の中にはセメントの溶解した石灰分が飽和に近い程度に含まれて居ることを認めたのであります。即ち注入されたセメントは其の一部分は勿論硬化するでせうが、残りの部分は丁度水の中へセメントを少量入れて攪拌すると泥水状になりまして時間が経過しても決して硬まらなく、所謂レイタンスとなつて沈澱するのと同様のものが出来て間隙を填めてゐるに過ぎない、従つて壓力のある水が滲透すれば之れを溶解したり押し分けたりして通路を作るのであらうと推定されるのであります。又河床に在る龜裂の中は全部地下水で充滿して居りますから其處へセメント

を注入するには先づ其の地下水を押し出して其の跡をセメントで置き換へるよにせねばならない。ところが注入するセメント汁もセメント1に對して3~10の水と混合したものでありますから、それ自身が硬化する爲にも壓力によつて自身の中にある餘分の水を排除せなければならぬと云ふことになりまして、施行方法は々々難かしいのであります。それから前に申しした揖斐川で認めたことであります、2mの間に200封度の壓力で注入した後で岩盤を掘り上げて見ました處がグラウト孔の附近でも唯一の注入だけでは不充てであつて隣の孔から注入したセメントが後から滲入つて來てゐることが判りました。これは白色セメントと之れに色染料を混ぜたものとを各孔から注入して區別したから其の結果がよく判つたのであります、斯様にグラウチングと云ふものは至つて難いものでありまして、之れに依つて岩盤を硬め良いものにしようと思はむことは些か無理であつて、單に漏水防止を目的とすると云ふ程度に於て夫れ以上の期待を掛けないようにして、少し不安の箇所があれば充分に掘鑿して其處は頼の出来るコンクリートで詰めると云ふやうにしたいものと私は考へて居ります。

種々御話したいことも御座いますが大分喋り止めもない事を申し上げてしまひましたので私のお話を終らうと思ひます。今日はお暑いにも拘らず水の間御静聽下さいませことを厚く御禮申し上げます。