

基礎工 [I]

1. 基礎岩盤

広 田 孝 一*

岩盤という言葉はいろいろの意味に使われるが、基礎として良好なるもの、不良なるものとの区別は非常にむづかしい。新鮮なる火成岩や堅い古成層のごときは良好岩盤とみなされるが、新しい第三紀の水成岩や風化の進んだ岩石、あるいはきれつの発達がいちじるしいもの等は良好なる岩盤とはいえない。しかしその上に造られる建造物の種類、形状、大きさ等によつてはそれぞれ必要な支持力が異なるので、耐圧強度の限界は、いろいろあることとなり、従つて岩盤の良否を一概に規定することはできない。従つて建造物の設計に際しては岩盤位置を調査すること、これを物理的に測定すること、従来の多くの実例経験等から判断することによつて決定されるべきものである。

A. ダムの基礎岩盤

(1) ダムの基礎

岩盤を基礎とする建造物のうちでダムのように大きなものは他にない。しかも築造後において万一故障を生じ、ついに崩壊事故を起すようなことがあれば致命的大災害をおよぼすのであるから、基礎岩盤を決定するには、なみなみならぬ慎重さを必要とするのである。

ダムは単位面積当りの荷重が大きければかりでなく、水をたたえるためのものであるから、満水後の水圧は漏水の原因となり、このような漏水が続くことによつて基礎岩盤にゆるみを生じ、その結果は不等沈下を起してダムコンクリートにきれつを生じ、ついに崩壊に至るといふこともありうるのである。このようなわけで基礎岩盤は非常に重要なものであつて、ダム建設に際しコンクリートの性状およびその施工にいかにか細心の注意を払つても、基礎岩盤について十分の注意を払わなかつたならば完全なものではできない。換言すればダムはコンクリート堤体のみがわれわれの技術的対照ではなく、その下部の岩盤自体も人間が造る建造物の一部であると考えなければならない。すくなくともダム高さの半分くらいの深さまでは建造物の一部と考えて、その岩盤の地質構造を十分に知り、不良部分は改善をほどこして、ダム完成後に

なんら不安のないようにしなければならない。

(2) ダムの崩壊

古いことであるが米国 Colorado Dam は 1892 年に完成されたが、基礎岩盤が石灰岩の水平層でこれに接して粘土層と頁岩層が互層となつていた。石灰岩は古い時代からの溶食の結果生じた空洞が、不規則に存在していた。このような基礎岩盤のため洪水時の越流と岩盤内の漏水によつて基礎岩盤の沈下を起し、ついにダム中央部が崩壊した。1900 年のことであつて築造後 8 年である。さらに有名なものとしては St. Francis Dam がある。高さ 205 ft で 1926 年完成した。このダムの基礎は 2/3 が結晶片岩で 1/3 が礫岩となつており、この礫岩には砂質および粘土質の層を挟んでいた。結晶片岩と礫岩の間には断層があつた。結晶片岩は十分の強度を有し、礫岩も 500 lb/in の強度を示した。しかしここに注意すべきは礫岩の標本を水に入れると 15 分間でボロボロに砕けてしまう。このような試験は崩壊後にやつたので、ダム築造以前には、地質調査も岩石の強度試験や immersion test をやらなかつたのである。ダム完後礫岩層から漏水のあることは認められていたが、1928 年満水したときにダムは欠壊して大災害を起した。その後の調査により耐水性がとぼしい礫岩層が崩壊の原因となつたことが明らかとなつた。いかに設計施工がうまくいつても基礎岩盤の構造と性質を知ることなしに、完全なダムはできないのである。

わが国においてはダムの大事故はほとんどないが信州小諸のダムが崩壊したことがある。低いダムであるが基礎岩盤は砂質または小角礫を含んだ凝灰岩であつて、固結の程度が十分でないものである。そのためコンクリート下底以下の凝灰岩内にきれつまたは破碎帯のようなものがあつて漏水の原因となり、流速は次第に早くなつて固結していない火山灰、微粒砂等を次第に洗い流したため、地盤にゆるみを生じてついにコンクリートの破壊となつたと考えられている。また北海道オホーツク海沿岸において 10 数 m の低いダムであつたが、施工不十分のため基礎岩盤に十分密着していなかつた部分があり、崩壊したと考えられるものがある。

(3) 漏水による基礎の変化

ダム築造によつてダムの上流側と下流側の地下水圧が在来と変るので、地下水の流動は築造以前の状態と異つてくるのが当然である。ゆえに透水性の地層あるいは間隙あるきれつによつて透水が起ると、その岩盤の性質いかんによつては、地下水の流速が早くなるために、断層粘土あるいは軟弱微粒な物質（例えばきれつ間を満水粘土、破碎された粘板岩層等）が水によつて流動するため、長い間にはついに空隙を生じ、その結果として岩盤自体の支持力を失つて、沈下または滑動を起すに至るのである。これを防ぐために止水壁とグラウティングによ

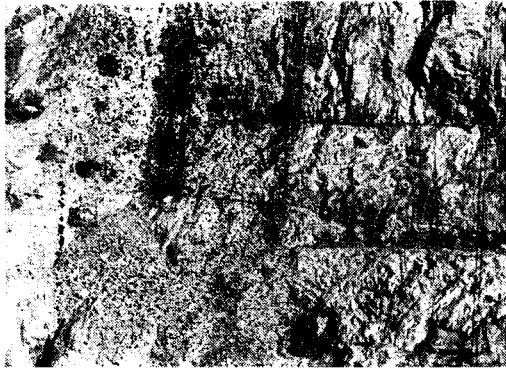
* 正員 電源開発調査会

つて水を止めるか、または止水壁に頼らず深いカーテングラウティングによつて、ダム中心線に沿い深くセメント注入を行い、すべてのきれつ間隙を充填し漏水を防止するのであつて、現在ではダム工事の非常に重要な仕事となつている。

(4) 河床岩盤の状態

河床の基礎岩盤はその上に堆積する砂礫層の厚さが浅いこともあり深いこともある。堆積砂礫層の深さはその河川の性質によつて異なるものである。河川が現在侵食時代にあれば堆積砂礫層は浅く、堆積時代にあれば深い。すなわち陸地が上昇を続ける際は侵食時代であり、沈降を続けるときは堆積時代である。紀州熊野川の下流、天龍川下流等は、長い間の沈降時代後、現在海岸がわづかに隆起時代に入つているものであつて、河床としては沈降時代の影響がはるかに大きいので、熊野川下流部、天龍川秋葉付近においてはおのおの河床下岩盤までの堆積層の深さは約 50 m もある。これに反し侵食時代における河川では、洪水ごとに岩盤表面まで洗われるほど堆積層の浅いものもある。

写真-1 天龍川佐久間ダム左岸の岩盤
(カコウ岩)



(5) 石灰岩の特性

石灰岩は水に溶けやすい性質を持つているので、長い地質時代的年月の間に、きれつ、間隙を通る地下水のために溶食を受けて空洞を生じ、不規則形に発達して、大きいものは鐘乳洞といわれる。また河床堆積層直下においては砂礫層と岩盤との間を流れる水の作用により非常に不規則な浸食および溶食を受け、その結果岩盤表面は硬軟凹凸不規則な表面となり、しかも内部まで溶食を受けている。このような状態が基礎岩盤掘削着手前に発見されなかつたために、工事の結果はなほだしい掘削の増加となり、また莫大なグラウティングを必要とした実例がある。米国の Ontelaunee Dam においては掘削予定 450 yd³ が実際は 4 719 yd³ となり、予定注入セメント量 4 200 袋が実際は 61 368 袋使用した。このようなことは珍しいことであるが、石灰岩層においては十分な注意が必要である。原則としてはダム地点としては石灰岩

層はさけるべきである。

(6) カコー岩の風化

カコー岩の風化は一般に深い。エジプトの旧アスワンダム建造の際、これは 50 数年前であるが流速が早かつたためにボーリングができなかつたので、堆積層下のカコー岩の掘削線を推定によつてきめた。しかるに実際掘削したところ風化が深くまで進んでいて、設計数量の 5 倍の掘削をしたという。

わが国においてカコー岩は中国地方に広く発達しているが、その他の地方にも相当分布は広い。一般にカコー岩の風化は非常に深いことが多い。特に山頂に近づくほど風化が深いのが普通である。このような地帯に最近完成した高さ約 60 m のダムは、右岸に長さ 66 m、高さ 21 m のコンクリート心壁を入れた。この末端部は地表下約 70 m まで風化しているのである（という意味は心壁は下の岩盤についているのであるが、心壁上端から地表まで 50 m も風化しているという意味である）。

カコー岩の風化の深さは岩質、地形等によつて異なるが、設計に際し基礎岩盤の深さを決定するには十分な調査が必要である。

(7) 岩盤の強度

基礎岩盤の耐圧強度ということは非常にむづかしい問題である。岩石の強度必ずしも岩盤の強度ではない。厳密に言えば岩石は鉱物の集合であつて、石英、長石、雲母等その他のいろいろの鉱物が集り、あるいはその間隙をガラス質物質によつてつめたものが岩石である。ゆえに各鉱物の硬度を測定しても全体として岩石の硬度は決定できない。またその風化分解の程度によつて異なる。しかし岩石そのもの、すなわちいろいろの鉱物の集りの全体としての圧縮強度を測ることはできる。通常岩石を 5 cm 角に切つて破壊強度を測定する。ボーリング コアをそのまま測定することもある。しかしこの場合も長く水中に放置して十分含水したものの測定値と、乾いたものとの値は異なる。ある種の砂岩は乾燥状態で 2 300 lb/in² のものが wet で 550 lb/in² となる。はなほだしい例は泥岩のある種はテストピースを造りうる硬さであつても、水につけると溶けるように砕けてしまうものがある。

このように岩石としての強度は測ることができが、基礎岩盤となると必ずしも岩石の圧縮強度とは一致しない。岩石にはきれつがある。そのきれつは火成岩にあつては岩石生成当時の冷却によるきれつがあり、水成岩では沈澱当時の成層によるきれつがある。またいづれの岩石であつても地殻に働く力によつて生ずるしゅう曲、断層等が起る場合ひびわれができる。これもきれつの原因である。このようにしてできたきれつは地下水の通路となり、よつて生ずる風化は岩石を弱める。従つて基礎岩盤のある面積をもつて対圧強度の対照として考えるとき

にこれらすべての要素をひつくるめたものがその基礎における対圧強度となる。

岩盤全体の強度を測るためにオイル ジャッキによる対圧強度測定器を用いて測る方法がある。しかしこれも一定面積の円盤を岩盤の上のせてジャッキで押す力、およびその沈下量を測定するのであつて、その載荷板の面積と建造物全体の面積との間にはある相似率を考慮しなければならない。さらに厳密に言えば、測定器の持つ最大荷重と実際の建造物の荷重とは非常な相違があるので、小さい荷重は岩盤の浅い部分のみに関係し、ダムの大きな荷重は深部までおよぶから、きれつの状態等が表層と深部と異なる場合は測定器の示した値は相当に違いを生ずるはずである。このような理由で建造物に対する真の岩盤対圧強度を実測することはまづ不可能である。ただこのような方法により、比較的正確に対圧強度の傾向を知ることができ、この測定値によつて岩盤の弾性係数を計算して、他の岩盤との比較をすることができるのである。

(8) 物探測定値と岩盤の弾性係数

物探という言葉は物理的方法によつて岩盤内の性質を探索するということである。弾性波による方法はダイナマイトによつて起した震動が岩盤を伝わる速度を地震計によつて測定する方法である。このほか電気抵抗によるもの、磁力によるもの、重力によるもの等いろいろの方法があるが、土木的建造物においては弾性波法が最も多く使用されている。

弾性波法によればダイナマイトの爆破によつて生じた波が岩盤内を伝わる時に、岩質が堅硬なほど弾性係数は大きいから速度は早く伝わる。これに反し元来軟かい岩石あるいは風化した岩石等は速度が遅い。また硬い岩盤であつても、きれつが多いものは速度が遅くなる。ここに注意すべきは岩盤内のきれつにはいろいろの原因があるが、山地斜面が急峻な場合は斜面が堅い岩石であつても、重力の作用によつて Creeping を起すことがある。匍行性移動と称するものできわめて徐々であるが、いくらか斜面の方向に動くのである。その結果硬い岩盤内のきれつが引離されて数 mm～数 cm の間隙を生ずるのである。このような空隙部においては弾性波が吸収されるから全体としての弾性波速度は非常に遅くなる。

このような理由で弾性波速度必ずしも岩盤全体の質の弾性係数とはいえないが、大体において地表下相当深さまでの岩盤の状態を知ることができる。これによつて表土層、上部風化帯、下部風化帯、堅硬岩盤等に分けるのである。各種地質に対する弾性波速度は岩盤の弾性係数に比例するはずである。ゆえに対圧強度測定値より計算した弾性係数とは同一種類のものであつて、両者の数値は正比例的の関係があるはずである。この問題は目下研究中である。

(9) 断層処理の問題

断層がある場合は特にその近くは破砕作用を受けて岩盤がもめているから、断層粘土の部分以外でも相当はげしい沈下を予想しなければならない。このような場合は当然基礎に対する特別処理方法を用いて、単位面積に対する荷重を軽減しなければならない。

木曾川最上流の三浦ダムにおいてはダム中心部付近に断層があつた。走向は流心の方向に平行であり、傾斜はほとんど垂直であつた。厚さは断層粘土層が約 8 m であつて、これに接して片側に約 12 m の破砕帯があつた。この場合粘土および破砕帯合計約 20 m の部分是对圧強度が非常に弱いと認められるので、その両側の堅硬な部分にくらべて不等沈下を起す懸念があつたので、この部分は 2 ブロックを一つにして 36 m のものとしてハリと考え、両側の堅硬部分を橋台とする橋梁のように考えて断層不良岩盤の不等沈下を避けた。またメキシコの Rodriguez Dam では三浦ダムと同様に流心に平行に厚さ 20 ft の断層があつたので、この部分に対しスパン 86 ft のアーチによつて荷重を両側の良好岩盤に分布した。

このようにダムのごとき大建造物においては大きな断層が存在した場合は、その部分の支持力はおとてい大きなマス コンクリートの荷重を支えることができないから、特殊工法を必要とするのである。アメリカの Shasta Dam においては数本の断層があつたが、断層の厚味に応じてある深さまで掘り込み、両側に傾斜をつけてコンクリートを打ち込み、クサビ形の填充をして支持力を両側に持たせる方法をとつた。北海道樺平ダムにおいても厚さ約 2 m の断層があつたのでこの方法を採用した。

(10) 基礎のグラウティング

グラウティングによつて基礎岩盤を強化する方法がある。グラウティングとは、ボーリング孔より圧力を持つたセメントまたはモルタル水を注入することであつて、これによつて岩盤内のきれつその他の間隙を充填する方法である。従来グラウティングのおもな目的は止水壁下部の漏水防止にあつたが、近来基礎岩盤の強化にも用いられるようになった。これをコンソリデーション グラウティングという。

高ダムにおいては基礎岩盤に対する荷重が大きいので

写真—2 大井川井川ダムの基礎岩盤



岩質は堅硬であつてもきれつがある場合は大荷重によつて密着状態にまで押しつけられるので、たとえきわめて薄い間隙も数多くある場合は、合計して相当量の沈下となる可能性がある。ゆえにコンクリート打設以前に、岩盤にきれつが多い場合は、コンソリデーション グラウティングを施工するのである。一般にグラウト孔は間隔 5 m、深さ 7~10 m 程度を用意し、小さきれつが多数ある場合はステージ グラウティングとし、大きなきれつが数少くある場合は、パッカー グラウティングまたは孔深全体を一度に注入する方法をとつている。

B. 諸建造物の基礎岩盤

建造物にはいろいろあつて、ダムのほかには水槽、鉄管路、発電所、鉄塔、等があり、それぞれ岩盤に対して考察すべき要点が多少異なる。また一般橋梁の基礎は重要である。その他一般建築物は、岩盤を基礎とする場合は少い。

(1) 地質調査

地質の調査が不完全であつたために、工事施工に際して最初に予想しなかつたほどの大きな掘削を余儀なくされ、大きな予算超過を生ずるようなことが起りがちである。また完成後において基礎の沈下等を生ずることがある。いづれも技術者としては手際の悪いことである。理想的にいえば着工前に十分な調査によつて設計予算どおり完成されるべきであらう。

地質調査は位置撰定前、撰定後の設計資料に必要なものみならず、工事着工後においても継続して行われなければならない。そして予定の掘削が完了して基礎コンクリートを打つときに、その基礎岩盤が適当であるかどうかを決定することは、基礎岩盤調査の最も重要な仕事であつて、大きな重要建造物においては経験ある技術家の判断によるべき問題である。

地質調査は地表調査のほかには、物探、ボーリング、坪掘、トレンチ、水平道路切り、横坑、堅坑等があるが、さらにダムの場合においては河底トンネルを掘ることがある。これらの方法は建造物の種類、大きさおよび重要性等によつて適当に撰ぶべきであり、また地質構造の複雑性等によつても異なるのであるが、予算の許すかぎりなるべく十分にやるべきである。米国では総工費の 1~3% を調査費に使用し、多いときは 5% となつている。わが国においても戦後地質の調査の重要性が次第に認められ、最近では 1% 以上に達しているものもある。ただし地質学的知識を活用して、無駄をはぶくべきであることは論をまたない。河底トンネルのごときは調査のためとしては費用がかかるが、将来グラウティングにも使用で

きるので利益がある。

(2) 橋梁

橋梁を造る場合上部構造は計算どおりであるが、下部構造は基礎岩盤の性状によつて設計施工に非常な相異が生ずる。一般に上部構造と下部構造との比は 1:1~3:1 といわれており下部構造に目に見えない費用が多くかかるのである。それゆえ橋脚の位置、スパン割等を上手に撰定して、良好にして浅い基礎岩盤をうるように地質の調査を上手に行うことによる工費の節約は大きい。

橋梁は河川を横断する場合が最も多い。砂利、砂礫層あるいは粘土層が非常に深い場合があつて、井筒またはケーソンによることがあるが、山地においては岩盤を基礎とすることが多い。岩盤を基礎とする場合は橋脚のスパン割が上部構造の関係によつてきめられることが多いので、全スパンのうちいづれかの橋脚は不良岩盤に乗るのやむを得ない場合がある。ということは基礎岩盤全体の状態を設計の当初から念頭に置いて、スパン割をきめるべきであるということである。つまり位置およびスパン割決定前に、どの橋脚も橋台も良好岩盤に乗るよう考慮すべきであつて、ある幅を持つて物探、ボーリング等による調査を行うべきである。

河床砂礫層下部の岩盤内に、断層または他の軟弱地層があれば、橋脚の荷重は間接にこの軟弱層に伝達されて沈下を起すことがあるから、ボーリングに際しては岩盤に到達した後も岩盤内 10 数 m は下層まで確かめることが必要である。昔第三紀の頁岩のサンプルが粘土状として採取されたために粘土質と見誤り、橋脚をウエルの設計として施工したところ数 m の砂利層の下がただちに岩盤となつてウエルが沈まず、重大なる設計変更を余儀なくされたことがあつた。

橋脚の荷重は必ずしも垂直でない、アーチ、吊橋、河流の水圧、等によつて荷重が傾斜または水平に作用することがあるから、これらを考慮して根入れの深さを決定すべきである。橋台は擁壁の作用もしなければならない。特に山側が地スベリ地形である場合は、浮いた岩盤が河に向つては行性移動をすることがある。四国吉野川上流で穴内川との合流点にある国道は、昔からこのような状態で常に押出されているので、最近橋梁の位置変更を計画している。またインド北西部カシミヤの Kohala 橋梁では同様のことで困つた結果、橋台部分を鉄骨の軽い構造とし、第一橋脚からトラスをカンティレバーに延ばし、その末端と鉄骨の橋台との間に軽いプレート ガーダーを乗せて、橋台の移動が起つても第一橋脚およびその上部構造には圧力がおよばないような構造にして成功した。

× × × ×