

施 工 と 水

2. 山 岳 ト ン ネ ル と 水 (1)

ささ お てい
笹 尾 貞*
おお し ひろ
大 島 洋 し志***

こん どう たつ とし
近 藤 達 敏**

2.1 概 要

われわれの技術は観察し、計測することから始まっている。地上の事象の多くは自由に観察できるが、一旦地下のこととなると、わずか1 m下の地盤であっても直接観察することさえできない。この地下で行うトンネル工事の問題点はいつも“まだ遭わざる敵——地質や湧水”に対処することである。従って地質や湧水の性状がトンネルの設計・施工とどのようなかわり合いになっているか、過去の事例などで理解することと、計画や施工に当たっては地質や地下水の性状を良く調査し、なるべく正確に予測することにつぎと考えられる。地盤中の調査はボーリングによることが多いが、時間と経費の割に連続する地盤の点としての情報を得るにとどまる。全般について完全な状況を把握することは永遠に不可能であるといえる。従って、調査は段階を踏み、かつ調査目的と情報価値を判断しながら必要な精度を確保して行く必要がある。調査の情報価値とは当然そのトンネル計画に対する影響度によって自ら決まるものである。

トンネルの施工に当たって多かれ少なかれ湧水があるのは誰でも知っていることである。もし予測に反して大量な湧水が発生した時は、例え地質が堅硬で切羽が自立している場合であっても作業能率が大幅に低下し、排水設備などが十分でない場合はそれだけで大事故の要因となり、工期や工費に重大な影響を及ぼすことになる。特に大量な湧水が土砂崩壊を伴う場合、又、地質が砂などの未固結層で少量の湧水でも切羽から土砂流出が伴う場合は大きな災害となる。これに伴う空洞の充てんや施工法の改変等に長期日と膨大な工費を要することになる。

これらの災害は工事を施工する側の問題点であり、更に目を地表の環境と住民に向ける必要がある。最近のように居住地に近接して施工するトンネルが多くなると、トンネル湧水に伴う環境問題、それに伴う住民問題を十分考慮に入れて計画・施工を行う必要がある。飲料水、かんがい水、温泉などの涸渇、排水による水質・水温の問題、水位低下

に伴う地盤沈下等が発生すると、地域住民の生活・環境に支障を与えることになり、それに対する不安は今日では当然大きな住民運動に連なることになる。これらの対応のため工事関係者が膨大な時間と神経を費やしている例は少なくない。

トンネルにおける「水」の問題はこのように工事計画に大きな影響を与える要因であり、公共事業の成否にもかかわる事項でもある。施工・環境・社会に与える影響の重みをそれぞれの地域と段階において判断し、適正な調査に努力すべきである。

本稿ではトンネルの計画と施工の基本となる調査について「事前調査」と「施工段階の調査」に分けて述べるとともに併せて補助工法としての「湧水対策工法」、「排水対策」について述べることにしたい。

読者諸賢のトンネル計画と施工に際して、参考の一助になれば筆者らの望外の喜びとするところである。

2.2 地質条件とトンネル湧水

トンネル工事における湧水は切羽の地質、岩石の硬軟、固結度、破碎程度との関連で工事に与える支障の程度が異なる。例えば新鮮・堅硬な岩では割目からの湧水がある程度であってもさほど問題とならないが、膨張性泥岩、緑色凝灰岩などでは湧水により直ちに吸水膨潤を起こし坑壁地山が軟泥化し、土砂流出を生じかねないし、第三紀鮮新世～洪積世の未固結砂層では僅少の水であっても切羽は自立しかねる事態となる。以下にトンネル湧水に伴い難航すると思われる地質条件について概説する。

2.2.1 断層破碎帯等の被圧含水層

黒四ダム建設に伴う大町トンネル、山陽新幹線六甲トンネルは高圧の大量湧水のため難航したトンネルとして有名であるが、いずれの湧水も断層破碎帯に起因している。断層破碎帯は断層粘土と断層角礫～破碎帯から成っているが、水の立場からみれば前者は不～難透水層（遮水層）、後者は透水層（帯水層）と全く相反する性質を共有しているものである。突発的大量湧水は、断層粘土の背後の破碎帯中に大量に胚胎された地下水が、トンネル断層粘土を突破する瞬間に発生するものである。

しかし断層はどこでも同じ性状ではなく、厚さ、破碎様

*日本鉄道建設公団 東京新幹線建設局 第六課 課長

**（株）応用地質調査事務所 技術本部 副技師長

***国鉄鉄道技術研究所 地質研究室 主任研究員

講 座

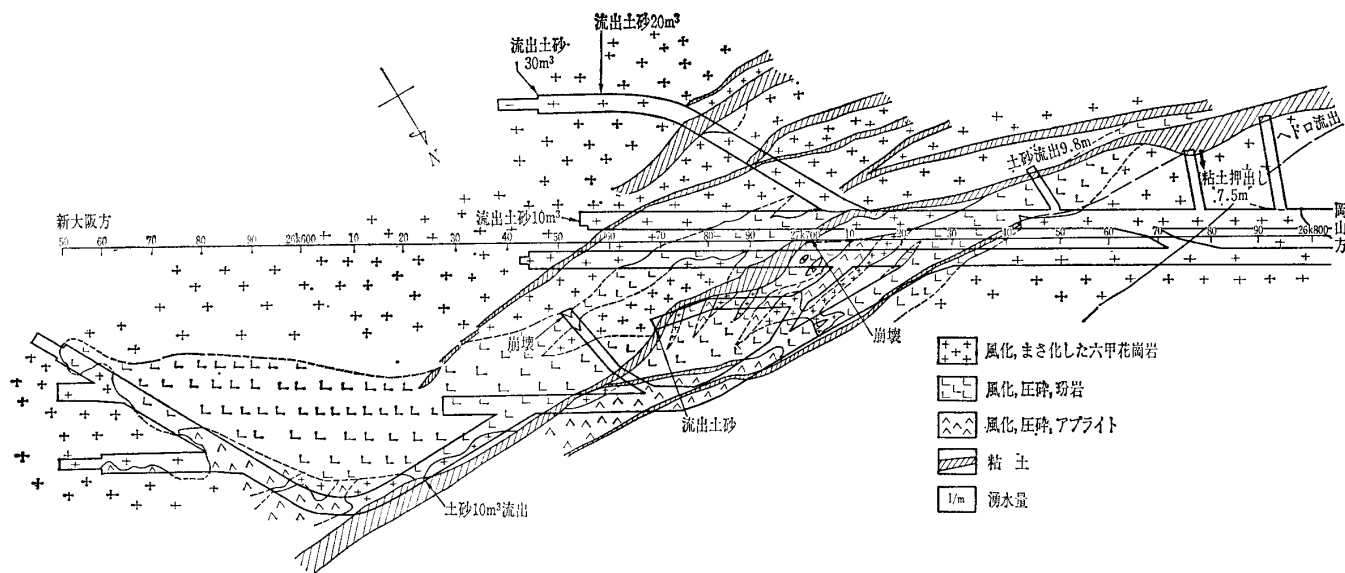


図-2.1 山陽新幹線鶴甲工区，湧水と断層

式などは不規則に変化するものと考えておく必要がある。図-2.1 は山陽新幹線六甲トンネルにおける例である。本坑 26K700 付近の断層が主断層で，これに併走する断層も含め破碎の幅は全体で60m以上に達している。周辺の花崗岩を主とする岩盤は著しく破碎され，砂又は角礫状となり，湧水とともに土砂流出が著しかった。断層などの造構運動の後に熱水変質作用を受けていて，割れ目沿いに白色の粘土シームを挟んでいたり，珩岩岩脈などは灰緑色の粘土に変質していることが多かった。26 K 750～950 左側導坑より調査坑が3本掘られていて，3本とも一連の断層面と思われる部分に到達しているが，おのおのの切羽からでてきたものは，角礫状土砂，粘土塊，ヘドロ状粘土といった具合に異なっていた。一続きの断層とみられる断層粘土で距離もたかだか50m以内の範囲内であるにもかかわらず，破碎状況が異なっていたわけで，必要に応じて詳細な調査を行わないと，地質の予測はかなり困難という一例である。

2.2.2 第三紀泥岩地域

吸水すると膨潤しやすいモンモリロナイトを含む泥岩・

緑色凝灰岩などの場合，たとえ湧水量や水圧がわずかであっても，湧水がない場合と比較して著しい塑性土圧や土砂流出の原因となることがあるので細心の注意が必要である。

2.2.3 第三紀～第四紀の未固結含水砂礫層や含水火山噴出物

北陸本線浦本トンネル，武蔵野線生田トンネル，上越新幹線浦佐トンネル（図-2.2 参照）などの含水砂礫層や，丹那トンネル，中央本線塩嶺トンネル，上越新幹線榛名・中山トンネルなどの含水火山噴出物などからなる地山に施工されたトンネルは，水を伴う土砂流出のため切羽が自立せず難航することが多い。流砂による切羽の安定性に関しては粒度特性（均等係数，バインダー分）が大いに寄与しているが，この外堆積環境，水圧も考慮すべき因子と考えられる。

2.2.4 崖錐堆積層

崖錐とか風化層などの不良地質がトンネルに現れる場合，降水や表流水の影響を受けた湧水がみられる。集中豪雨などの際に地下水が異常に増加し，トンネルが崩落するとか，地表が陥没するとか，斜面上方への地すべりを誘発するなどの事故となることがあり，施工に当たっては細心の注意を必要とする。

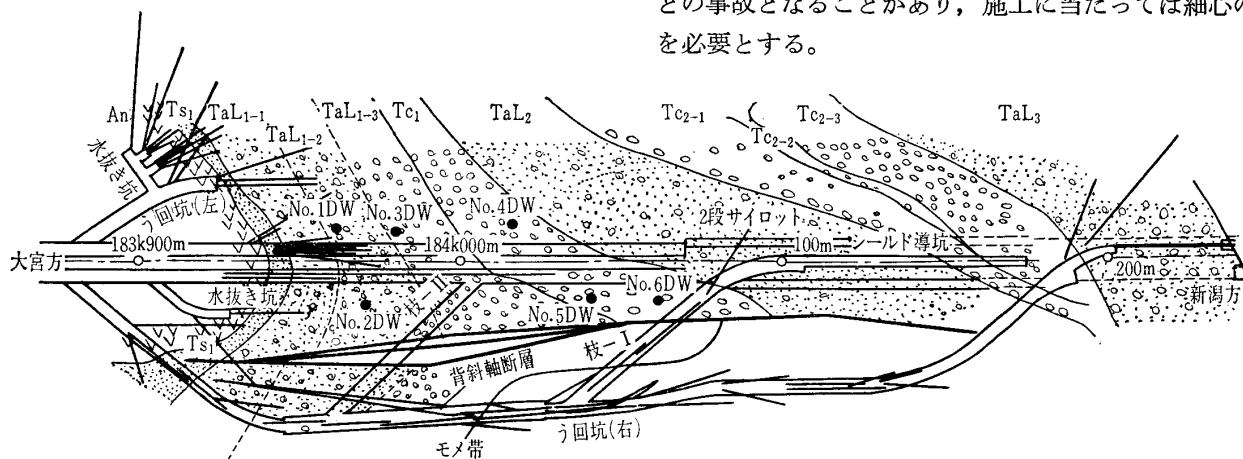


図-2.2 土砂流出区間地質図

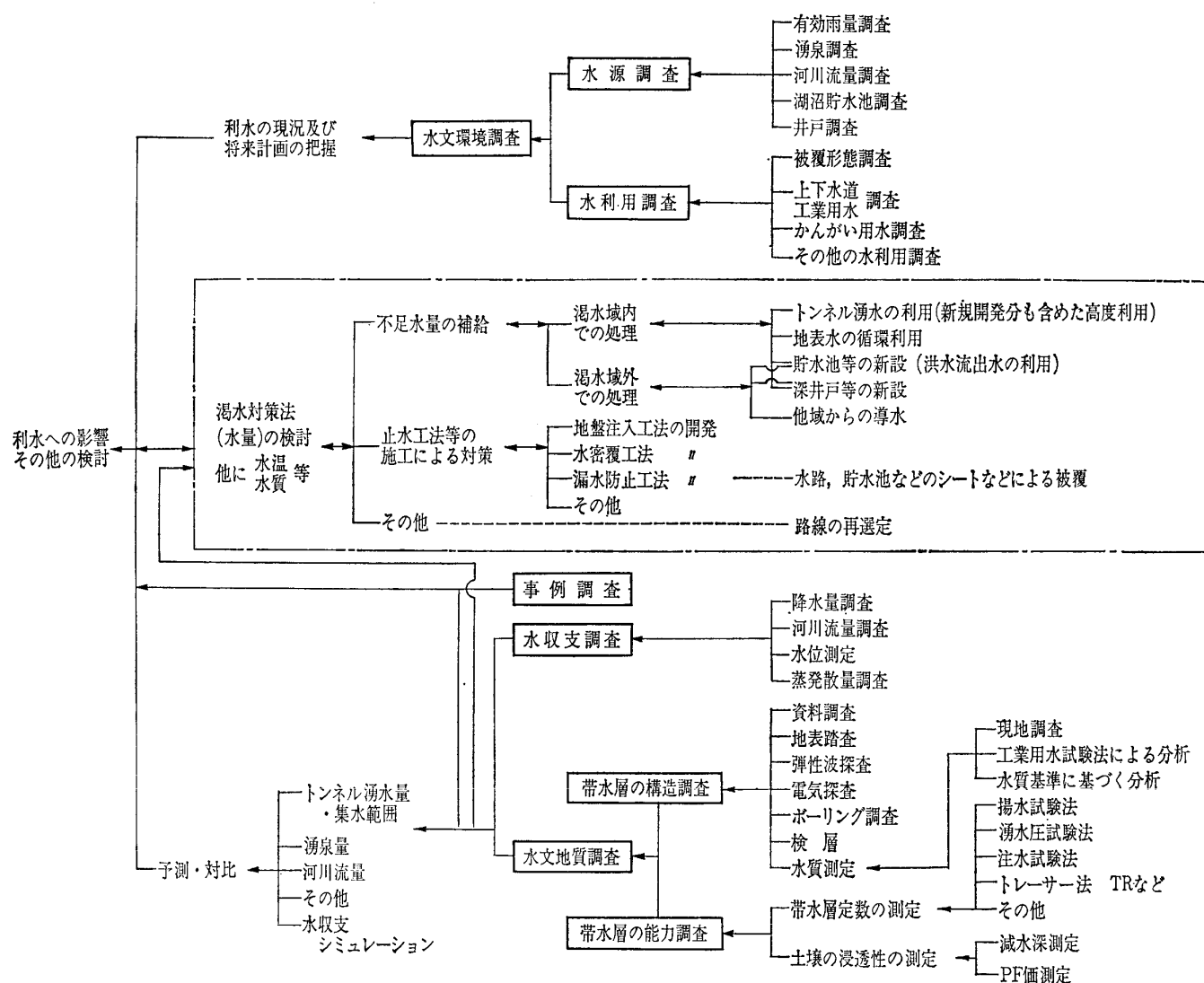


図-2.3 地下水調査の流れ

2.3 事前調査

上に述べた水問題をできるだけ最小のものとするため、トンネル掘削に起因する地下水の挙動に関する情報を得て、湧水や漏水の規模、問題の性質をできるだけ予測したり、因果関係を明らかにすることが望まれている。このためには、以下に述べる水文調査を図-2.3に示したように段階的に実施するとよい。

水文調査は①水収支調査、②水文地質調査、③水文環境調査、④事例調査の四つの調査に細分できる。水収支調査とは、地下水は地表水と密接不可分の関係にあるので、水循環系のなかで地下水をとらえなければ全容を知ることにはできないという立場にたち、降水量、河川流量、地下水位などを測定することによって地表水がどの程度、どの位の速さで地下水と循環しあっているかを知るために行う調査である。水文地質調査は地下水の入れものとしての地盤の構造を知ったうえで、帯水層の中に入っている水の量や動きに関する性質を知ろうとするものである。事例調査で

は対象とするトンネルと類似のトンネルの水に関する情報を集める。以上三つの調査をもとにトンネルの湧水量や集水範囲及び水収支への影響の度合を推定する。水文環境調査においては上記調査から考えられる集水範囲を主体とした範囲内における水利用の状況を水源別、用水別の両面から調査し、先に述べた三つの調査の結果と対照することによって水利用への影響を検討する。以上の水文調査をトンネル施工前から実施し、それらを総合的に照合してゆけば、最適なルートや最適な設計・施工法が選べるし、漏水現象やトンネル工事との因果関係も明らかになる。

2.3.1 水収支調査

水は大気圏→地表→地中→大気圏と循環している。地下水は降雨・降雪、河川、水田などからの浸透によって多くのかん養を受け、その貯留能力を越えた時に湧泉や河谷への地下水流出となる。これらの流出水は水面、地表面、植物などから蒸発散により大気圏へ還元される。このような水の循環はある範囲、ある期間に限定して数量的に取り扱うのが水収支調査である。

講 座

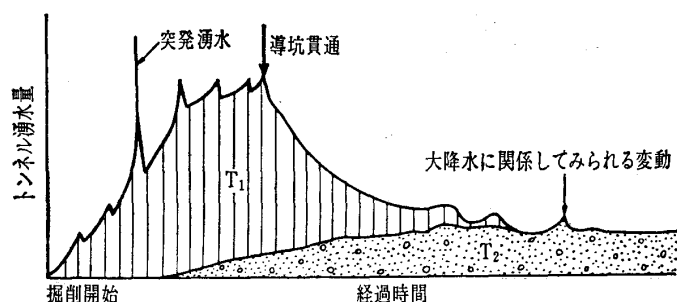


図-2.4 トンネル湧水量の変化

水収支式はある領域に降った雨水 (R) はその領域からの地表流 (D)、地下水流 (G) 及び蒸発散 (E) として除去されるものと、その領域に貯溜されるもの (ΔS) の総和に等しいという考えから成り立つ。トンネル湧水を考える場合は地下水貯溜 (S) を考慮する必要がある。

トンネル施工前は水収支は次式で保たれている。

$$S = S_0, R = E_0 + D_0 + G_0 + \Delta S_0$$

トンネル掘削によりトンネル湧水が始まると、上のバランスは崩れる。トンネル湧水は図-2.4 に示したように施工中の集中湧水 (T_1) としゅん工後の恒常湧水 (T_2) に分けられる。 T_1 は地下水貯溜を消費するものであり、 T_2 は降水を消費するものとみなされる。従って恒常湧水量になった段階の水収支は次式で保たれる。

$$S = S_0 - \sum T_1 \quad R = E_n + D_n + G_n + \Delta S_n + T_2$$

以上より、トンネル湧水は地下水貯溜の減少と河川流量、地下水流出あるいは蒸発散量の減少という形で水収支に影響を与えるだろうことが考えられる。

水収支調査は短期水収支と長期水収支とに区分できる。短期的に水収支を考える場合、一降雨ごとのハイドログラフを作成することによって降雨量に占める河川流出の比率 (流出率)、減衰の傾向を調べる。流出率が小さい場合、対象地域が地下水浸透の多い地域で、トンネル湧水が多いことを予想させる。又、減衰傾向が緩やかであれば、保水性がよく、トンネル恒常湧水量が多いことを予想させる。更に地下水位変動が大きい地域は降水の地下水へのかん養が速いことを意味し、トンネルでの湧水が地表への湧水現象となりやすいことを想像させる。

長期的に水収支を考える場合一年をとるのが理想で、乾季を区切りとする年がよく用いられる。これは前述の短期水収支が継続的に計測された結果として判明するもので、トンネル恒常湧水量が地表水流出+地下水流出に占める割合の大小で水利用への影響の度合を判断する。長期観測の成果は各種予測の際の基礎データとなるので、事前より十分に現況を把握しておくべきである。

降水量調査; できるだけ対象地域に近い、既存の長期観測点のデータをもとに対象地域内の降水量を推定し、日・月・年降水量の形で整理するとともに、降雨の段階別度数

分布の傾向についてもまとめる。

河川流量調査; 降水量との関係でハイドログラフを得るようにする。従来の基底流出だけの観測でなく、短期でもよいから連続的記録のある方が望ましい。調査の結果は流量変動図、湧水比流量図として整理する外、降水と流量の相関、流量減衰特性、流出率について調べる。

地下水位調査; 降水量との関係で時間経時における変動を求め、地下水変動図、地下水等高線のような形にまとめるのがよい。

蒸発散量調査; 蒸発散量が降水量に占める割合は非常に大きいので、これを無視することはできない。蒸発散量は水収支法、ソーンズウェイト法、蒸発計などのいずれかにより推定すればよいが、他の水文要素の残りを蒸発散量とする水収支法によるのがよい。

2.3.2 水文地質調査

(1) 帯水層の構造調査

地下水の入れものである帯水層の構造を把握するには、地形・地質的な單元の中の地域的な調査の中から把握すべきであって、局所的な調査だけで把握することはまず困難である。地域的な調査に当たっては、①資料調査、②地表踏査、③弾性波探査、④電気探査、⑤ボーリング調査、⑥検層、⑦現地水質調査、⑧水質分析、等のあらゆる調査技術を駆使してまとめる。

個々の調査手法の注意点については紙面の都合で省略するが、調査の最終的な目標は対象とする地層が透水層か不透水層かを判断することにある。かつ透水層の場合、その透水性と含水性を判断することにある。地層水、割れ目水を問わず、空隙の多少は含水性に関係し、空隙の大小は透水性に関係する。従って地層水のタイプの地質では土粒子の粒度分布、均等係数、空隙率がその目安となるし、割れ目水の場合は割れ目の多少とその大小を目安とすればよい。

(2) 帯水層の能力調査

帯水層の中に入っている地下水の量や流動性の評価は一般に透水量係数と貯溜係数でなされる。これらの数値を求めることが帯水層の能力調査であり、①井戸の水位変化から推定する方法、②揚水試験法、③湧水圧試験法、④微流速測定法、⑤注水試験法、⑥トレーサ法、⑦室内試験法、のいずれかにより測定する。これらの係数は鉛直、水平方向に不連続なことが多いので、連続性の評価は1地点だけの試験でなく、多くの試験をもとに行う。

降水の地下水への寄与度、水田などへの必要水量を判断する場合は、表層地盤の透水性が問題となる。このような時は、⑧浸透度試験、⑨減水深測定、⑩pF 値測定の方が便利である。ここでは⑨、⑩の建設関係者になじみの薄い調査の注意点について述べる。

減水深測定; 減水深は水田における消費水量を1日当たりの水深で示すものである。これは蒸発散量と浸透量の和であって、水田の土壌や地形・地下水位の状態、水稻の生

育状態によって左右されるが、用水ブロックごとのしろかき期用水量 (cm) と平常用水期の減水深 (cm/日) が分かればよい。

pF 値測定; pF 値とは土壌水分状態を表す方法であり、土粒子を結合している水を除去するのに必要なエネルギーを単位水柱高さ (cm) の対数で表したものである。降水後の土壌は飽和状態で重力水から吸湿水にいたるあらゆる種類の水で満たされているので pF 値は低い。晴天が続くと、通常の大気圧 ($pF \approx 3$) のもとで重力水の排除がなされるので、pF 値は 3 ぐらいまで上昇する。従って pF 値の変動を降水量との関係で事前におさえておけば、掘削による地下水低下の影響が植生に及ぼす影響の有無を判断することが可能となる (図-2.5)。

2.3.3 事例調査

トンネル掘削に伴う湧水や湧水の問題を事前に量や規模として予測することは極めて困難であるが、対象とするトンネルと地形・地質・土かぶりなどの条件が類似したトンネル事例を事前に調査することにより、トンネル湧水や湧水の規模をある程度予想することができる。

2.3.4 水文環境調査

対象区域内の地表流や地下水と水利用との関係を、水源と水利用の相互構造としての面から明らかにするために水文環境調査を行う。地下水や地表流のうち人為的に直接利水されているものは全体のごくわずかであるが、水収支を行っている比較的小さな領域では、利水量に対して供給能

力がそれ程十分でない場合が多い。こういう場合は溜池などを設け、高度な水利用を行ったり、他の水系から導水するなどしている。このように水利用と水源は需要と供給の関係として深い係わり合いをもっているため、両者の相互関係として把握する必要がある。

(1) 水源調査

地表水や地下水の水利用への水源形態としては、①有効雨量、②湧泉、③河川水、④湖沼・貯水池、⑤井戸に区分できる。

有効雨量; 耕地内に降った降水のうち用水として有効に利用できる雨量をいう。水田においては 5~80 mm の日雨量をまず有効とし、半旬 (5 日) 合計量の 80% を最終的な有効雨量とみなしている。畑地、山林においては pF 値が 3.8~1.8 が有効とされており、この範囲内で pF 値を低下させるに寄与した降水を有効雨量とみなす。

湧泉; 湧泉については分布と用途及び湧出量の変動を調査するとともに水文地質調査に基づき湧泉の構造を明らかにする。又、水温や水質についても調べる。

河川; 河川に設けられた堰などの取水点の位置やそこから分岐した用排水路の系統と取水目的、取水量、取水期間などについて把握する。

湖沼・貯水池; 分布と用途、貯水能力と流入・流出量、使用期間及びかんがいブロックの位置と面積について把握する。

井戸; 分布と用途、構造、揚水量、水位変動、水質などについて調べる。

(2) 水利用調査

被覆形態; 調査区域内の地表の被覆形態からその区域の水文環境の一端を知ることができる。水源的な面からは地山の保水性や降雨流出などの特質をつかむことができるし、利水的な面からは水田や畑地、林などの利水分布を知ることができる。分類は宅地、裸地、水田、畑地、果樹園、草地、森林 (広葉樹、針葉樹とし、樹令、密度も示す。針葉樹は杉、松などが細分されるとよい) について行うとよい。

上下水道・工業用水; 上下水道用水については利用戸数、人数、利用水量などを調査する。工業用水については利用工場、利用目的、利用水量などを調査する。

かんがい用水; ①用排水路、水収支ブロック、②減水深、水田面積、かんがい期、かんがい方式、必要用水量、かんがい用水量及び③水利権などを調査する。かんがいでも最も水量を必要とするのは水田であり、なかでもしろかき期が用水のピーク期である。調査地の各ブロックが何日間ですしろかきを終えているか、あるいは何日に短縮できる能力をもっているかを重点に調査する。

その他の水利用; 水利用には水の特殊性を利用したものや、地域の自然環境などの特性を利用したものがあつたので、これらの実態についても調査する。

2.3.5 調査のまとめ

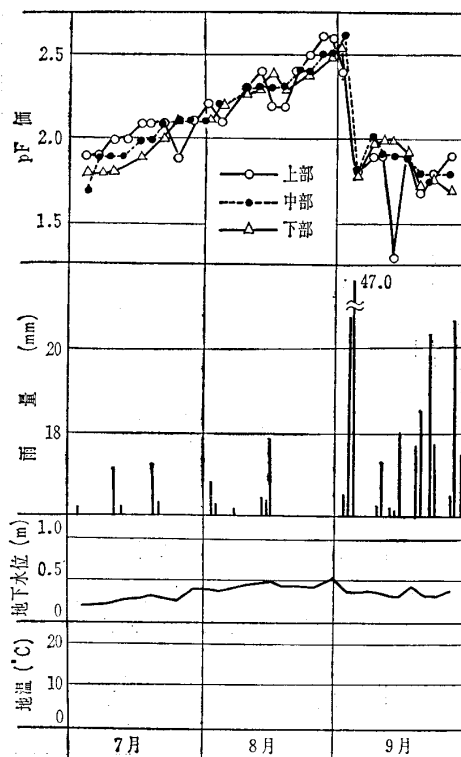


図-2.5 pF 値変動図表示例

講 座

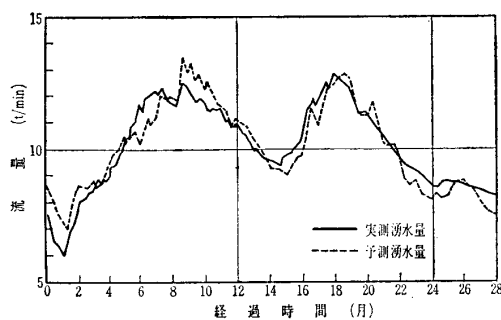


図-2.6 降雨によるトンネル湧水量の予測

調査が終わったら、①トンネル湧水量と集水範囲、②降水量と河川流量・湧水量との関係、③トンネル掘削の利水への影響などについて検討したうえで、各調査段階に応じたまとめをするのがよい。

(1) トンネル湧水量及び集水範囲

施工中の集中湧水；集中湧水量を予測する算式がいくつか提案されているが、むしろ問題は量でなく、集中湧水箇所を予測することの方が現実的な問題である。水文地質調査により帯水層の構造を明らかにする努力が湧水箇所の予測につながる。

しゅん工後の恒常湧水；恒常湧水を予測する方法は二大

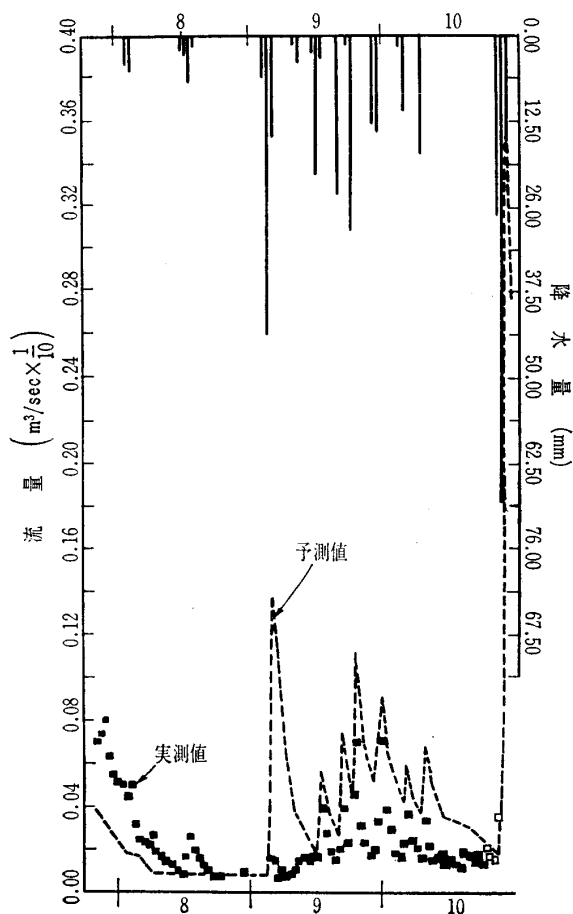


図-2.7 タンクモデルによる流出解析例

別できる。一つは湧水比流量あるいは地表水の地下への浸透量から求める方法であり、一つは地盤の透水係数、影響圏、初期水位などから求める方法で多くの提案がなされている。おのおのの提案はそのよってきた前提条件があり、対象とする地盤がどの条件に該当するかを考えて、妥当と思われるものを採用する。

(2) 降水量と河川流量・湧泉量との関係

降水量と流出という結果だけに着目し、途中の流出機構をブラックボックスと考えれば、降水と流出の関係を入力と出力の応答関係として予測式をたてることができる。予測の方法はいろいろ考えられるが、ここでは重回帰分析法とタンクモデル法について述べる。

重回帰分析法；一つの降水は降雨時間の数十～数百倍に引きのばされた形で河川流出、湧泉として流出している。この傾向は同一の流域ではどの降水でも一定であると仮定して、降水量と流量の関係から一降水の最適の時間・流出パターンを求めれば、降水量と流出の予測式を求めることができる。図-2.6 はこの方法で求めたトンネル湧水量の

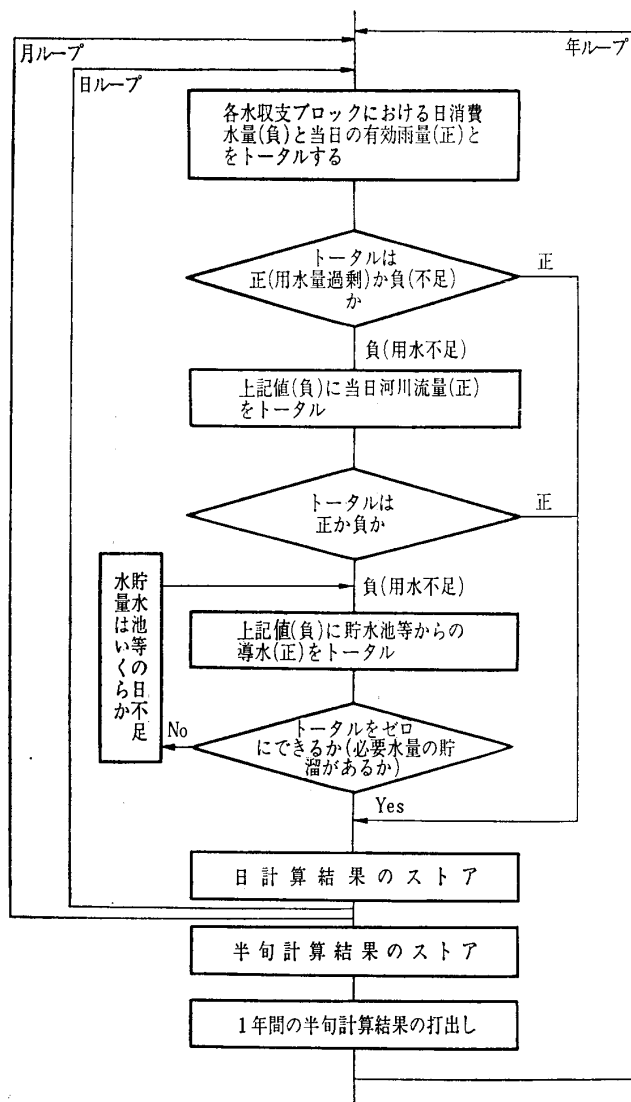


図-2.8 用水量の過不足を求めるフロー

実際と予測値の一例を示したものである。

タンクモデル法；この方法は建設省が低水流出の予測法として採用しているもので、流域を側面に幾つかの流出孔、底面に一つの浸透孔をもつ容器に置き換え、降水量と流出量の関係を最もよく表現できる流出孔と浸透孔の大きさ、高さのパラメータを試行錯誤的に求める方法である。図—2.7 は解析の一例である。

(3) 利水への影響

トンネル掘削に伴うトンネル湧水が地下水や地表水形態に与える変化が利水にどのような影響を与えるかを予測することは重要なことである。精度的にはまだ検討の余地があるが、今までに述べた調査の基礎データを 図—2.8 のフローによって処理してゆけば、各水収支ブロックにおけるトンネル施工前の用水の過不足量を求めることができる。トンネルの恒常湧水量が予測されれば、各河川の減水量を与えることができるので、同じフローで処理すれば、トンネルしゅん工後の用水量の過不足量を求めることができる。両者の差がトンネル施工によって生じる利水への影響として算定できるし、不足を補う手段としての揚水設備、貯水池などの能力のあるべき姿を予測することも可能である。

(4) その他

トンネル周辺の水文地質をモデル化し、モデルをもとに地下水の運動を工事計画に基づき机上で模擬実験するシメ

ュレーション手法は地下水変動を研究する者の間では常識化された手法であるが、評価については多様である。一般に沖積層、洪積層の中の地層水を対象とした地下水問題では実施例もかなりあるが、割れ目水を対象とする山岳トンネルのような分野においては、困難な問題が多く、まだ実用に供されるまでには至っていない。しかし適用を誤らなければ、事前調査の一つの強力な手段として評価できるので、レベルを徐々に高めてゆくべき技術といえる。

参 考 文 献

- 1) 村山 功：大町トンネル破砕帯工事について，土木学会，トンネルと掘さく工法，1959
- 2) 山口・坂元・中島：土砂流失と膨圧地帯を貫く，トンネルと地下，Vol.10，No.3，1979.3
- 3) 齊藤迪孝：アーストンネルの地質調査，トンネルと地下，Vol.6，No.6～9，1975.6～9
- 4) 高橋彦治：トンネル湧水に関する応用地質学的研究，鉄道技研報告，No.279，1962
- 5) 石井政次：全国主要鉄道トンネルの恒常湧水実態調査，鉄道技研報告，No.843，1973
- 6) 大島・西森：トンネル工事を対象とした水文調査法の研究，鉄道技術研究報告，No.1108，1979.3
- 7) 河野外：建設工事と地下水，土と基礎，1977.8～1978.6
- 8) 金子 良：農業水文学，共立出版
- 9) 川畑幸夫：水文気象学，地人書館
- 10) 柴崎達雄：地下水盆の管理，東海大学出版会
- 11) 山本莊毅：地下水探査法，地球出版
- 12) 改訂建設省河川砂防技術基準(案)調査編：建設省河川局監修，山海堂

(原稿受理 1979. 5.14)

技術手帳

粘 弾 性

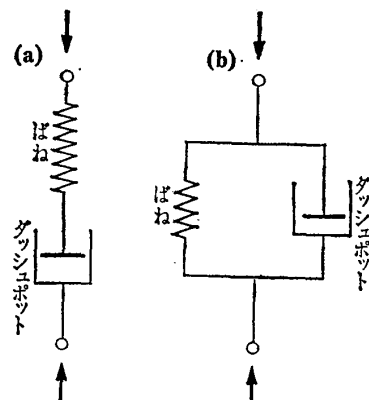
ばね
ばね
ばね

とおる
徹*

弾性と粘性の両方の性質が、顕著に現れるような物体を粘弾性体という。ここで弾性と粘性は、それぞれフック (Hooke) の弾性則と、ニュートン (Newton) の粘性則に従う性質であり、あるいはもっと端的に、固体と液体の性質といってもよい。

このような粘弾性の考えは、19世紀の後半にはすでに気付かれていたようで、その代表として、イギリスのマクスウェル (Maxwell) とケルビン (Kelvin)、ドイツのフォークト (Voigt) らの名前をあげることができる。弾性を表すばねと、粘性を表すダッシュポットを組み合わせた粘弾性体の基本モデル (図—1) は、レオロジー (物体の変形や流動を対象にする学問) の分野で馴染み深いものであり、そこにも彼らの名前をみることができる。

図—1 に示したのは、最も簡単な基本モデルであるが、例えばチューインガムやビニールひもの力学的な挙動は、



図—1 基本モデル (a)マクスウェル (b)フォークト

*工博 京都大学教授 防災研究所