マサ土の中の水路トンネル

森 谷 虎 彦^{*}

Aqueduct Tunnel in Masa-do

by Torahiko Moritani

Abstract

The Gamagori Tunnel, which is one of tunnels under construction by the Aichi Irrigation Public Corporation, is a tunnel passing so-called "masa-do" an efflorescence consisting of granite, located at the end of the west main waterway of the Toyokawa Irrigation Project.

There is a layer containing under-ground water at the top part of the tunnel. In making the location, a number of discussions were carried out on that tunnel should be passed in this masa-do or tunneled into the hard rocks located in the north to avoid this or an open canal should be provided in the direction of the south.

As the results of various investigation, the construction was commenced after having judged to be quite safe to adopt normal construction method for excavating a tunnel into masa-do. But impossibility of progressing excavation has occurred due to water flowing out with masa-do on the way of construction.

Finally, alternation of the construction method was obliged to adopt pressure construction method, its preparation now being progressed.

In this report, a consideration will be paid on in what cause was excavating a tunnel into masa-do determined and on the cause to have incurred its failure.

1. 緒 言

豊川用水は天竜川水系の水の一部を渥美湾に注ぐ豊川に流路変更をして、これを水路によって渥美半島及び渥美湾北岸のカンキツ類産地に導いて農業開発を計り、併せて一部都市上水道その他に利用しようとするもので、すでにその工事の大半は完成しつつあり、43年3月完工を目指して目下最後の追込み

^{*} 愛知用水公団材料試験室

中である。

渥美湾の両岸にのびる東西両幹線（正確には南北両幹線と呼ぶべきかも知れないが）の内、湾北岸の水路の大部分は地質上の所謂中央構造線沿いに分布する花崗岩類の分布帯を通っている。この西部（北部）幹線の末端に近い蒲郡市内では花崗岩の風化した通称マサ土と呼ばれる地層中を通る蒲郡トンネルがある。このトンネルの掘削に先立ち地質調査を実施した。その結果3本の比較路線の内の1本が決定された。工事は1966年10月着工された。工事の中途において困難な地質状況に遭うし、大巾な設計変更を余儀なくされた。本文ではその原因について考えてみる。

2. 地質調査と路線決定

第1次調査として予定路線上で弾性波探査を実施した。その結果は当初地形上から予定した路線付近は弾性波速度値からみて風化片麻岩と考えられたので第2次調査を行なった。なお、このトンネル付近には約200戸の部落があるのでトンネル掘削のためこれらの部落が依存している浅井戸の水位に異変が起る気念があったので路線決定のための調査とは別に週辺の地下水調査を行なった。その方法は地表地質調査と電気探査、ボーリング孔による地下水位の観測である。この内の地下水位の観測はすでに1年前より直営で1部は実施中で、外注分も含めて工事完了時まで続けてトンネル掘削による地下水位変動を調べる予定である。

弾性波探査実施後路線上に8本の垂直ボーリングをトンネルインバート面以下まで実施した。その結果中間立坑（ボーリングNo.3付近）予定点より上流側は硬岩であるが立坑下流部は風化片麻岩所謂マサ土であることが明らかとなった。この際トンネル路線を北方山側に移動すれば硬岩トンネルとなることは明らかであるが路線延長が長くなる欠点がある。もしマサ土に水を含んでいなければトンネル工事としてはさほど困難な地質ではないと考えられたので路線決定の決め手として揚水試験を実施した。その位置はトンネルのマサ土部分のほぼ中央ボーリングNo.6付近とした。

第1次、第2次弾性波探査、電気探査（一部）、ボーリング位置は図-1に示す通りである。第1次弾性波探査ではトンネルを山側に寄せるか、或いは段丘（及び扇状層下）まで下げるかを定めるために予定路線方向にほぼ直角方向に測線を取ったので測線数は8本となり、延べ1,480mとなった。第2次弾性波探査は決定路線沿いに4

表-1 調査項目

本、これに交る補助測線1本、更に第1次の測線の内の2本につぎ足して延長した。これらの合計は2,730mとなった。測点間隔は5mとした。実施した調査項目は表-1の通りである。

調査項目	数	量	摘 要
弾性波探査	17 本	4,210 m	観測孔2本（内1本はボーリング孔利用）
ボーリング	9 〃	198 m	
揚水試験	1 〃	20 m	
電気検層	8 〃		ボーリングコアー 地表試料
岩石試験	3ヶ所	7ヶ	
〃	10ヶ所	10ヶ	
電気探査	60 点	3,600 m	測定深度60m
水位観測	10 本	60 m	各深度6m
そ の 他			坑内試料による超音波速度測定及び透水係数測定

地表電気探査の結果によると地層は3層構造であって、第1層は150—500 Ω -mの段丘層または沖積層と一部に1,000 Ω -m以上の崖錐層を含み、第2層は50—150 Ω -mで主として基盤の風化帯、第3層は250—700 Ω -mの準風化帯と、1,000 Ω -m以上の新鮮基盤岩層となっている。各層の層厚は不定であるが、3層の内の第1層のみが透水層（帯水層）であって深度は10m以内である。第2層は25—30mで、以下は基盤の片麻岩となる。トンネル路線沿い及びこれに直角方向の電探による地質断面を図-2に示す。また弾性波探査による地質断面は図-3に示す。

図中の数字は比抵抗値 Ω -mを示す

図-2 地質電探断面図

図-3に示す如くトンネル上流側半分は4.8-5.2km/secの速度で新鮮な片麻岩と推定される地層中をトンネルが通ることになるが、下流側半分は1.8km/secの風化岩の中を通ることになる。こゝで1.8km/sec層が水を含むか否かが路線決定に重要な意味を持って来るのでボーリングNo.6付近に深度20mの揚水井を設けてボーリングNo.6及び別に観測孔1本を掘って揚水試験を行なった。試験方法は口径420mmで10m掘り、これに2-6m間にストレーナを切った口径300mmのパイプを挿入、底部をセメンティングした。始め汲上げ法でk値を計算した。次に回復法によるk値を求めた。汲上げ法で $k = 1.0 \times 10^{-4}$ cm/sec、回復法で $k = 3.45 \times 10^{-4}$ cm/secを得た。

9本のボーリングの内上流側を除いた立坑（ボーリングNo.3）より下流の内の6本の柱状図を図-4に示してある。揚水井はNo.6と殆んど同じなので除いてある。岩層のA B C D Eの区分

は岩の風化度を目安として分類したものでAは最も硬い未風化岩、Eは完全に風化して岩片を残さぬものでその間を5等級に分けて記号で示したものである。コアの採取率も殆んどが90%以上で、且つ肉眼で見てもE層は殆んど水を含まず、連続したコアが採取されている。

以上の電気探査、弾性波探査、揚水試験、ボーリングの結果からトンネル上流側半分は概ね新鮮な片麻岩、下流側半分でトンネルが地形標高60m付近を通る場合は不透水性のマサ土の中を通ると言う結論が導かれた。この時点でトンネル後半分の路線についてマサ土の中を通すか、延長を長くすることによって山寄りの新鮮な硬岩中にトンネルを入れるかの比較についての検討を行なった。その結果、もしシールド、圧気または両者併用等の特殊工法を用いなくすれば直線コースに近いマサ土中のトンネルの方が経済的と判定された。各種地質調査の結論はこの地域のマサ土は不透水性地層と出たので圧気シールド又は圧気工法等の特殊工法の必要はないものと判断されたのでマサ土中を最短距離で通る路線が決定された。

3. 施工状況

1966年10月22日トンネルは先づ立坑口より着工された。この蒲郡トンネルは豊川用水西部幹線水路の末端に位置する幹線最後のトンネルであって、水路はこのトンネルを出た後、計1,345mのサイホン及び暗きょを通して終点となる。

当初設計における本トンネルの諸元は設計延長1,454m、内径1,800mm、馬てい形、水深1,260mm、最大流量 $2.3\text{m}^3/\text{sec}$ 、こう配1:1850、コンクリートライニング、インバートの標高は上口40,495m、下口39,688mとなっている。

工事は2工区に別けて行なわれた。工区境界は上口より515mで、この地点までは上口より掘削、また上口より555mの地点に中間立坑を設けてこれより上流側工区界まで及び下流側を掘進する。下口も開坑して掘進する工法とした。この様にして1966年10月22日立坑開坑、同10月30日上口開坑、同12月16日下口開坑して全面的に工事が進められた。施工状況は立坑付近は上、下流側共に黒色の片麻岩で極めて硬く、無支保で掘進は順調に進んだが、1967年2月上旬に下流側に向って立坑口より120m進んだ付近より岩質が硬岩より一挙にマサ土に急変したので、鋼製リブ100×50mmを1mピッチとして送り矢板で進んだ。この付近では水が1~2ℓ/minクラウン或いはインバート付近より滲出する程度であった。2月中旬立坑口より140m付近より湧水量は増加し、切羽も崩壊の徴候を呈したので鏡矢板を張って慎重に進んだ。かくして2月14日より3月3日の間の13日間に僅かに10mを掘進したのみで、すでに普通工法としては限界の状態と判断されたので掘進を中止した。3月4日には約 3m^3 のヘドロが水と共に鏡板及び天端矢板を押し破って坑内に流入した。3月3日掘進をストップしたときの湧水量は20ℓ/minであったが3月4日には50ℓ/minとなり、これより先進導坑方式で掘進を始めた所3月13日には150ℓ/minの湧水を見た。

湧水の状況を調べて見ると一見マサ土全体より滲出しているように見えるけれどもよく見ると水はマ

サ土の中の小キレツ中を伝ってインバード面まで降下してこゝより坑内に流入していてクラウンよりは滴下する程度であり、側壁をハンマーで欠いてマサ土の岩片を割って見るとキレツ以外の所は混っている程度であって、滲出する程の水は決して含まれていない。また土圧も一部で間隔0.5mで鋼製リブ 100×50mmをダブル熔接し、インバートにストラットを用いたが、大部分は 1.0mの当初設計間隔である。この湧水のあった前後より切羽から水平距離50～80mにある民家の浅井戸（井深 6 m内外）が湧水を始めたのでタンク車で給水をすると共に対策を協議した。これより先下口においても掘進はあまり順調には進まなかった。下坑口付近はマサ土化した崖錐層で、この崖錐層の中には地下水がある。1月13日に下坑口に近い所で小陥没が起った。これは水によるものと考えられた。坑内でもインバート付近より湧水があってこの付近のインバートがヘドロ化してリブ沈下のおそれがあったので1月22日より坑内ウエルポイント排水、2月22日坑外でトンネル路線両側にウエルポイント設置排水を始めた。その結果切羽も自立する程度に水位も下ったので引き続き掘進を続けた。リブ建込み後一部に沈下が起ったのでその部分にインバートストラットを入れインバート及びスプリング線まで捨てコンクリートを打設した。この結果下坑口崖錐層中の坑道は安定した。

工法についての検討と同時に地質と水の関係を再考せねばならない事となった。そこで立坑口の下流 142 m, 147 m, 152 m 及び下坑口より上流へ向って90mの各地点のトンネルスプリング付近より乱されない試料を採取して室内透水試験を行なって見た。その結果を表一 2 に示す。

表一 2 土質試験結果

それによると立坑では $k=1.59 \times 10^{-5} \sim 4.6 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$, 下口では $9.97 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ と何れも不透水性地層としての値が出た。尚、比重は2.69～2.88, 含水比27.2～33.2の範囲であった。

マサ土の掘削には火薬は使用しないので、火薬の影響によるキ裂の発生は

試料名		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
透水係数cm/sec		4.6×10^{-6}	1.59×10^{-5}	6.95×10^{-6}	9.97×10^{-6}
比重		2.87	2.88	2.81	2.69
含水比		28.5	33.2	27.2	29.8
密度	$\gamma t (\text{t/m}^3)$	1.78~1.83	1.80~1.86	1.89	1.82~1.86
	$\gamma d (\text{t/m}^3)$	1.39~1.43	1.35~1.39	1.48	1.40~1.43
一面七断	ϕ (°)	32.0	37.0	—	39.0
	c (kg/cm ²)	0.37	0.33	—	0.25
採取位置		立坑下152m	立坑下147m	立坑下142m	下坑上 90m

考えられない。片麻岩がマサ化する以前の段階ですでにキ裂があって、マサ化した後も此のキ裂が粘土物質で埋まることなく残っていたものと推定された。たゞ此の様なキ裂が残存未掘削部分 700mの全線にわたって存在するものなのか或いは部分的に存在するかについては全く予想が立たなかったが残存700mについては土被りが14～20mとあまり厚くないので、此の様なキ裂は普遍的に存在すると考えた方が安全であろうとの結論に達した。そこで工法を考える上で此の部分の地質を小キ裂が多数あって、各キ裂は流動し得る水を上の帯水層より供給されている即ち網状水脈を持った軟弱層と規定した。しかしボーリングデータも考慮すると地質はなお現在より良い所もある可能性もあるのでシールド或いは圧気工法の他に薬注工法、普通工法の併用と言うことも考えて薬液注入工法を試験的行なってみることとした。

使用薬液は積水化学製エスロック U20%溶液でゲルタイム 9—15分のもので本液は 2 液混合型である。切羽をモルタル充填して 13m のボーリング孔 6 本より最大 10kg/cm² まで圧力を加えて注入した。固結後掘進を始めたが切羽は以前よりは自立するようになったもの、右岸山側よりの湧水はなお止らず、薬注工法で押せる程の自信も持てない上、工期の関係もあって圧気工法を採用することに決定した。

4. マサ土と地下水

以上トンネル路線決定より施工に到るまでの概略を述べたのであるが工事半ばにおいて大巾設計変更をしなければならなくなった原因について土地地質の立場より考察してみよう。

豊川用水においてマサ土中を通るトンネルはこの蒲郡トンネルの他にも竹広、東郷、山村、豊岡第 1、豊岡第 2、砥神の一部と 6 本のトンネルがあるが延長は蒲郡トンネル（マサ土の部分）に比較して何れも短い。そして各トンネル共に多少の滲出水はあったが特殊工法を採用する程の事もなく、何れも貫通している。各トンネルの諸元は表—3 の通りである。

表—3 において(3)以下の数値はトンネル中央部最大厚さ部分における概略値を示す。

表—3 マサ土中のトンネル

	トンネル名	(1)岩 質	(2)風化度	(3)延 長 m	(4)辻被り m	(5)地下水位 m	(6)水位測定期	トンネルクラウンの標高 m	トンネル高 m
a	竹 広	片 麻 岩	マサ土化	1 2 0	17.4	74.3	39・10月	73.3	2.7
b	東 郷	〃	〃	1 4 1	17.6	75.0	39・11月	73.2	2.7
c	山 村	〃	〃	1 4 7	18.0	70.0	40・8月	70.5	2.7
d	砥神(下口)	〃	〃	2 8 0	10.0	52.3	41・1月	43.5	1.8
e	豊岡第 1	〃	〃	1 1 0	14.0	44.5	41・2月	43.1	1.6
f	豊岡第 2	〃	〃	1 3 8	8.0	44.0	41・1月	42.7	1.6
g	蒲 郡	〃	〃	8 2 0	19.0	58.3	41・2月	40.0	1.8

a～e は丘陵性の小尾根の末端部のトンネルで、f、g は段丘堆積物を乗せる台地下のトンネルで上部に 6 m 前後の段丘層があるがトンネル自体はその下層のマサ土中を通っている。地下水は上の段丘層中に含まれていて地下水位も勿論トンネルクラウンより上にあるが帯水層と考えられる程のものではない。なお、この地下水位は無水掘りボーリング孔で得られた値である。透水係数については蒲郡トンネルについてはすでに述べたが豊岡第 2 トンネルについても上位段丘層について揚水井による揚水試験の結果によると $k = 2.0 \times 10^{-5}$ cm/sec と殆んど不透水性とも言える程の値が得られた。しかしこのトンネルでも下位のマサ土は不透水層と判断された。

各トンネルの掘削時における水の滲出状況を見ると表—3a～f では掘進中は水の滲出はないか或いはごく僅かで、掘進休止後もなおしばらくは切羽は自立していて、逐次水が廻って最初インバート付近か

ら水が滲出して来ると言った状態で、マサ土は大体物質状で小キレツが多数あると言うようなことはない。

しかるに蒲郡トンネルでは切羽の両インバート付近から清水が湧出し、切羽が自立しない。湧水点を見ると小キレツを伝った水がインバート付近まで側壁を流下してインバート面に流出する。キレツ以外のマサ土をハンマーで欠いて見ても殆んど水分を持っていない状態である。以上のことから同じマサ土であって、ほぼ同様な土被りの厚さであり乍ら一方にはキレツが殆んどなく、他方にはキレツ網が発達していると言う結果となった。これを地形との関係において見ると a～e は何れも小尾根で、その巾も 150m 以下、尾根すぢには平坦部がない。g は広い段丘下で、地形はゆるい平坦な斜面である。また地下水との関係において見ると a～e は上部に帯水層を持たないが g では 6m 内外の帯水層があって量は少ないが常に帯水していると言う違いがある。f は地形は段丘地形で、帯水層が上にあるのでこの点では g と同じであるが上の平坦面がせまい事とマサ土の中にキレツがない事が g と違う。d は多少事情が異なり、マサ土の被り僅かに 10m で地形は沢の底部で沖積層が 1.4m あり、地下水位は 0.9m (41年 2月測定)であり、地表水が集り易い地形であるがトンネル掘削に当って特に水の湧出もなく全断面送り矢板工法 H 鋼製 100×50mm リブ使用で何等問題はなかった。結局マサ土の中にキレツ網が発達しているか否かとマサ土の上面に帯水層があるか否かが施工法に重大な影響を及ぼすことになる。このキレツ網の有無を何等かの方法で掘削前にキャッチ出来ないかと考えて各種物探データを比較して見た。

先づボーリング孔による電気検層値との関係を見ると表-4 のように電極間隔 40, 64cm の 2 種について見ると蒲郡トンネルと他のトンネルとの間に特に顕著な差が認められない。また地表弾性波探査の数値と比較するとキレツのないマサ土が 2.0～2.2km/sec に対してキレツ網の発達した地層の方が 1.5～1.8km/sec と多少小さい値になるような結果が得られたが比較するデータがあまり少ないのでこれのみで結論付

表-4 各トンネル物探値

トンネル名	ボーリング No.	地 質	比 低 抗 値 Ω - m			地表弾性波速度 km/sec
			40 cm	64 cm	泥 水	
砥 神	4	風化片麻岩	250	280	96	2.0～2.0
豊岡第 1	1	〃	200	250	45	なし
〃	2	〃	140	150	110	〃
豊岡第 2	1	〃	140	450	50	〃
〃	2	〃	600	300	30	〃
蒲 郡	4	〃	250	280	140	1.5
〃	5	〃	250	250	31	1.8
〃	6	〃	60	60	20	1.8
〃	8	〃	280	280	36	1.8

けるのは危険ではないかと考える。

弾性波探査において地表弾性波速度と試料の弾性波速度との関係よりキレツ係数と言う考えが提案されているが蒲郡トンネルの立坑口より下流 155 m における坑内試料の弾性波速度は 1.75, 1.69kg / sec でこの地点における地表弾性波速度 1.5～1.8km/sec, また下坑口より上流 90m の地点の坑内試料は 1.65

km/secで、この地表では 1.8km/sec なる値が得られた。

これからキレツ係数を計算すると0.17とか0.14とか言った値が得られる。マイナス値は別としても0.17と言う様な「極めて良質岩」に相当する値となって実状に甚だそぐわない。

以上見て来た範囲ではキレツ網の存在を決定付ける様なデータを見出し得なかった。

本文中の土質試験及び坑内試料の超音波測定は公団試験室宇梶文雄及び王田晟のデータによる。その他は調査担当の各コンサルタントの会社の報告書によった。