

論 說 報 告

第十九卷第二號 昭和八年二月

水 壓 隧 道 の 漏 水 に 就 て

會 員 工 學 士 石 井 穎 一 郎

Leakage of Pressure Tunnel

By Eiichiro Ishii, C. E., Member.

内 容 梗 概

本文は水壓隧道の漏水に関する研究にして、小牧導水隧道（本誌第18卷第4號小牧發電工事報告参照）に就き漏水量を調査したる結果と、瑞西 Amsteg の水壓隧道調査委員會の報告書との兩者の比較研究の一部を發表し、水壓隧道築造に就て考察を行ひたるものなり。

目 次

第一章 緒 論.....	1
第二章 小牧導水隧道.....	2
第三章 小牧導水隧道と歐米各國水壓隧道との漏水比較	8
第四章 結 論	11

第 一 章 緒 論

本邦に於ける水壓隧道は専ら水力發電事業に屬し、高堰堤と相俟つて所謂貯水式發電の機能を全うするものであるから、堰堤と共に將來益々研鑽せらる可きものと思ふ。而して水壓隧道の最大關心事は漏水の問題であつて、其性質上重力流下式水路の漏水と同一視すべからざる事は贅言を要しない。

瑞西の Engelberg-Luzern 電氣會社の Obermatt 發電所の水壓隧道の如きは、漏水の爲、終に重力流下式に變更して使用するの止む無きに至つたと云ふ様な例もあるから、水壓隧道の築造に當つては漏水に就て充分研究の必要があると信ずる。

漏水に至大の關係を有するものは地質、巻立施工法及内水壓等である。地質が非常に優良であれば無巻立でよい譯であるが實際理想的的地質は極めて稀である。而して地質其ものは改善する事の出来ないものであるし、又隧道路線の變更も自ら限度があり、水壓は必要であるとすれば、隧道の漏水防止は巻立を完全に施工するより外に途がない。即ち水壓隧道の巻立は漏水防止を第一とすべきで、流水に對する抵抗の減少は第二次的のものと考ふ可きと思ふ。

凡そ巻立から漏水する経路を考ふるに之を二つに分つ事が出来る。即ち巻立の裂罅からの漏水と巻立自體からの滲透である。又水路が古くなると洗掘による巻立の剝脱も考へられる。之等の内漏水の程度著しく大で其防止に最も困難なるは裂罅よりの漏水であらう。茲に於てか水壓隧道巻立の裂罅の防止は充分研究さるべきものである。

巻立に裂罅を生ずる原因は、掘鑿當初發破及風化に依つて地山の損はれて居る事、巻立施工の時巻立と岩盤との間に空隙の存して居る事、巻立コンクリートが凝固硬化に伴つて收縮する事及岩石等に壓縮性がある事等に依つて、巻立に土水壓及温度の變化等が作用する時は複雑なる應力及歪を生じ、それに依つて裂罅を惹起するものであらう。

之等裂罅發生の問題に就ては Schweiz. Bundesbahnen が其 Ritom 水力工事の調査（1920年）以來多大の關

心を持ち、翌年 Amsteg の水力工事に於て地質學者を交へたる所謂 Amsteg 水壓隧道委員會 (Druckstollen-Kommission über den Druckstollen des Kraftwerks Amsteg) を作り、實際の隧道に於て或る區間に高水壓の試験を行ひ、漏水量、岩盤の變形及水温の影響等に就て報告書を出して居る。勿論上述の裂縫の原因の個々の影響に關して決定的に述べて居る譯ではないが、其報告書及其他の文獻に依れば、我々が普通考へて居る様に實際に於ても大體次の様な傾向があるものと云ひ得ると思ふ。

即ち土壓は隧道の内周邊に於て拱及仰拱に張應力を側壁部に壓應力を生じ、内水壓は内周邊に於て張應力を半徑の方向に壓應力を生ずる。熱應力は温度の變化に就て考へられる譯であるが、一般に通水に依つて冷却されるものとすれば岩盤は收縮し従て掘鑿徑は増大するから、卷立の裏面に間隙を生ぜんとする傾向がある。又卷立だけに就て考ふればコンクリートの養生條件に依り全然反對の現象を生ずる事もあらうが、一般に凝固の際及通水に依る冷却に基き收縮するから、内周邊に壓應力を生ずると共に岩盤面から離れやうとする。

次に卷立材料換言すればコンクリートの水密性に就て考ふるに、普通卷立に用ひられる配合は 1:6~1:10 で粗骨材の最大粒徑は 6cm 位である。此様なコンクリートを用ひ卷立厚さ 20cm~50cm 位では、相當水壓の下に水密性は保證出來ない事は明かであつて、嘗つて Catskill 工事の際隧道用のコンクリートを使用し厚さ 15cm、配合 1:7~1:10、徑 20cm の試験片を丁寧に製作し透水試験を行つた處、10 分間の透水量は水壓 2.8kg/cm² 及 5.7kg/cm² に對して夫々 76g. 及 215g. に達したと云ふ (Ludin—Die Wasserkraft)。尤も此試験體はモルタル表皮を削り取つたものであるが、之を 1000 m² 當りの漏水量に換算すると水壓約 30m で 4 l/sec、約 60m で 12 l/sec. の漏水を生ずる事になる。

上述の如く裂縫の防止の如何に困難なるか及卷立材料其のものも相當透水量あるものとすれば、水壓隧道の絶對水密性は内側を鐵板卷立等にせざる限り絶無を期待する事は出來ない譯である。果して然らば水壓隧道の漏水は如何なる程度迄許さる可きか、即ち漏水の程度は一般に何の位であるか、又漏水は如何に處理すればよいか、之等の問題に關して以下小牧及諸外國の實例を述べて見る事とする。

第二章 小牧導水隧道

本隧道は庄川水力電氣株式會社小牧發電所の導水路である。其延長 3 914.86 ft. (1 193.2 m)、勾配 $1/160$ 及 $1/125$ 、内徑 21ft. 6in. (6.55m) の圓形の鐵筋コンクリート造であつて、流量最大 4 900 個、其流速 13.5ft./sec. (4.1m/sec.) に相當し、隧道始點に於て 65ft. (19.8m)、終點に於て最大 128.05ft. (39m) の水壓を支持するものである。大正 14 年 4 月着工し、昭和 5 年 10 月通水して、爾來良好の成績を以て使用されてゐる。附圖第一に隧道貫通地點の地形地質及隧道の縱横斷等を示してある。

1. 地質及卷立施工法

隧道貫通地域の地質は主として角礫質凝灰岩、凝灰岩、泥板岩及之に類似のものより成り、概して上流即ち取入口方向に至るに従ひて良く、下流即ち水槽方向に至るに従ひて悪く、水槽の如きも地質の關係から當初の計畫位置より一層奥へ追込んだ次第である。

掘鑿に當つて、隧道の中央部に横坑を設け、取入口、横坑及水槽の三方面より掘進した。掘鑿には都合の良い岩質であつたが、可成り岩目が多く諸所天井の肌落があつた。最も堅硬な角礫質凝灰岩でさへ一旦坑外に出すと風化し易い質であつた。殊に水槽近い處では岩質が錯交し、粘土を挟むだ斷層が水平に近い傾斜で可成り長く續いた。湧水は少量乍ら諸所から出たが、掘鑿に困る程ではなかつた。

巻立は岩質に應じて其厚さを 1ft.(30.5cm)~2ft. 6in. (76.2cm)としたが、水槽附近の地質の悪い處では特に 3ft. (91.4cm)とした。巻立コンクリートの配合は強度並に漏水を考慮し始端、終端及横坑附近の主要部は 1:2:4、其他一般に 1:3:5とした。セメントは淺野を、骨材は庄川産の砂利と砂とを使用した。

鐵筋は丸鋼を用ひ、主鐵筋は徑 1in.、緊鐵筋は徑 $\frac{3}{4}$ in. である。而して鐵筋のみで水壓を支持するものと考ふる時は、鐵筋量は最大水壓の 30%を標準とし、地質に應じて其量を決定したのであるが、水槽附近は特に地質が悪い上に掘鑿の爲に傷められたので 100%とした。鐵筋の繼ぎ目はコンクリートの施工接手に準じ、側壁と拱及仰拱との接合部に於て一周を 4本使ひとし、種々の長さの鐵筋を用ひ勉めて break joint とし弱點を作らない様にした。

巻立施工に當つては、豫め湧水箇所岩盤の罅隙等を調査して之等に注膠管を挿入し、孤立した湧水は細管にて底部の排水管と連絡せしめ、又前記斷層等の粘土を挿むて居る處から粘土を掻き取つて代りにコンクリートを帶狀に充填した。此處に留意すべきは粘土の詰代へ作業で、之等粘土層には自然水が廻つて粘土が膨れ出し岩盤を傷めるから、掘鑿後成可く早く此詰代へ作業をする事とした。尙岩質が悪くて支保工を必要とする箇所には豫め外巻立をなして内部に完全な巻立を施工する準備をした。

灌水後貯水池の水が取入口から巻立と岩との間を滲透して來るのを防ぐ目的で、取入口近く岩盤の堅硬な處を選んで、厚さ幅共約 3 ft. の環狀遮水溝を掘鑿して其溝底に深さ約 5 ft. の注膠孔を輻矢狀に多數穿ちて、溝に優良コンクリートを充填して次で注膠工を施したのである。

之等の手續きが済んでから坑内に水管を布設し、掘鑿した岩盤面を壓力水にて充分丁寧に洗滌した。

巻立は兩側壁から始めて次に拱を、最後に仰拱を施工した。コンクリートは直接岩盤に打附ける事とし、石塊等を裏込めする事は一切やらなかつた。此爲に規定巻立から算出した數量以上約 6割増のコンクリートを要した。コンクリートの接手は總て古い面を削り取つて新鮮なる面に打續ぎをしたのである。巻立施工の時注膠管を挿入した事は云ふ迄もない。

注膠孔は拱の中心に沿ふて 17ft.~18ft. 毎に配置し、又岩目湧水箇所等に豫め挿入して置いた管に對して注膠を施工する事にした。コンクリートの凝固に伴ふ收縮に依つて生ずる巻立と岩盤との間隙及岩面の凹凸多い箇所のコンクリート充填の行き届かぬ爲の空隙等を見越して全部 300孔、一孔當りセメント 2樽、計 600樽と見込んで置いたのだが、實施して見ると不足な事が判り、更に必要と思ふ箇所及湧水を止める爲に補助孔を設けたので、全長 3 914.86 ft. に對して總計 1 045孔を注膠した。之に要したセメント 1 782樽、砂 61立坪、即ち 1孔當り平均セメント 1.7樽、砂 6勺を注入した事になつて居る。之等の内には 1孔でセメント 10樽以上注入したものも少くない。其甚しい例は始點より 578.92ft. の拱頂部の孔で注膠作業全時間 16時間 20分、最大壓力 85 封度餘、セメント約 21樽、砂約 1.3立坪を注入して居る。米國の Cobble Mountain の水壓隧道の注膠工 (E. N. R. Dec. 31, 1931) に於ても 1孔當りセメント平均 3.6樽(13.7袋から換算)最大 59.3樽(237袋から換算)を使用したと云つてゐる。

附圖第二は隧道始點から約 1 100 ft. 迄の各注膠孔に要したセメント、砂、注膠全時間、注膠一同に要した最大及最小時間、注膠中の最大及最小壓力を示した記録である。

注膠工の施工に就ては本誌第 18 卷第 4 號に詳記したから茲では略するが、施工した結果から見ると巻立と岩盤との間隙は拱が最も多く、兩側に下るに従ひ少くなり、起拱線以下では殆ど無かつた。又拱頂を巻立する際には、隧道の長さの方向に後に退き乍ら或る區間宛コンクリートを打つので、其區間の奥程施工が不完全の譯であるから、斯う云ふ點を選んで注膠せねばならぬ事を知つた。

巻立から滲出する湧水は隨分丁寧に注膠しても減量こそすれ仲々止まない。夫れで粘土を水に溶かして注入し

たり、又粘土とセメントを交せて、或は薬品を入れて注入したり種々試みたが、結局純セメント乳のみが一番成績が良かった。然し之でも止まらぬ時は、巻立を掘つて其中に鉛管を埋設し、仰拱底部の掘鑿當時の排水溝を利用して設けた排水管に導くより外に途がなかつた。此排水管は6in.土管であつて、通水後巻立と岩盤との間に滲出する漏水を集め、横坑及隧道終端から排水する事にした。

注膠工は特に直營で施工した。工費は第一表の如くであつて、總額27760.47圓、1孔當り平均26.57圓を要した。

巻立成功後横坑を閉塞するに當り、取入口附近に試みたものと全く同様の工法で横坑の周壁に環状遮水壁を作り、漏水を防ぐ事とした。

第一表 小牧導水隧道内注膠直營工事費

名 稱		單 位	數 量	金 額	摘 要
セメント		樽	1782.32	8248.16	淺野セメント
砂		立坪	61.10	729.37	
鐵管		呎	2502.70	1195.60	内徑2吋ソケット共
勞力費		人	7629.80	14424.09	
足場費				230.38	杉丸太、板、角材、其他一切
坑内照明設備				1451.40	
雜費				1481.47	粘土、防水劑、セメント空袋、其他
合 計				27760.47	
1 孔 當 り				26.57	

2. 裂 罅 の 調 査

巻立を終つてから注膠工を施工する前、即ち昭和3年春から夏にかけて隧道全線に亘つて裂罅其他の調査をした。

次に示すのは其調査表である。龜裂は $\frac{1}{1000}$ のシクネス・ゲージで計つてmmに換算したものである。

裂罅は認め得たものは僅か19箇所でも何れも細い龜裂に過ぎなかつた。夫等は總て隧道の横断面に而も其施工接手のみに惹起したもので隧道の長さの方向に、即ち縦斷的には一つも現れなかつた。依つて裂罅の原因はコンクリートの凝固硬化に伴ふ收縮並に溫度變化に基くものと推定せられるが、此他大部分の施工接手には罅裂を認めなかつたのである。裂罅の最大は遞加距離2046.43ft.の側壁に於ける0.63mmで大部分は0.1~0.2mm位のものであつた。

第二表 小牧導水隧道注膠工施工前裂罅調査表

遞加距離 (ft.)	裂罅の間隔 (ft.)	裂 罅 寸 法 (mm)			摘 要
		拱	側 壁	仰 拱	
0	—	—	—	—	隧道始點
1250.43	—	—	0.05~0.10	—	
1270.43	20	—	0.05~0.15	—	
1347.43	77	—	0.05~0.10	—	
1523.43	176	—	0.05~0.10	—	

1 532.43	9	0.05	—	—	
1 570.43	38	0.05~0.76	—	—	
1 594.43	24	—	0.05~0.10	—	
1 797.43	203	—	0.10~0.13	—	
1 834.43	37	—	0.05	—	
1 970.43	136	—	0.05	—	
1 982.43	—	—	—	—	横坑位置
1 994.43	24	—	0.10~0.58	—	
2 002.43	8	0.05~0.10	—	—	
2 046.43	44	0.13~0.23	0.51~0.63	—	山 手
同 所	—	—	0.08~0.13	—	川 手
2 070.43	24	—	0.23~0.28	—	
2 138.43	68	—	0.43~0.58	—	
2 208.43	70	—	0.38	—	
2 346.43	138	—	0.58	—	
2 420.43	74	—	0.18~0.25	0.25	
2 446.43	26	—	0.25~0.28	—	
3 914.86	—	—	—	—	隧道終點

裂隙の分布は横断的には側壁に最も多く左右の側壁に對稱に生じ、仰拱に最も少ない。縦断的の分布は地質巻立寸法には關係無いらしく、其間隔は調査表の如くであつた。以上の裂隙には其後注膠工を施したから、裂隙からの漏水は云ふに足りないと思ふ。

3. 排水状況

此隧道は昭和3年夏季既に巻立が竣功したが、洗木問題等のために發電が遅れたので、却て注膠に充分の時間が得られ丁寧に施工する事が出来た。而して注膠工も翌4年夏季完成したのであるが、尙通水迄に1箇年餘りあつたので其間排水管からの湧水量を測定する事を得て、通水後の排水量と比較する事が出来た次第である。

排水管は内徑6 in. の土管なる事は前述の如く、本管は隧道始端から終端迄一貫して連絡して居るが、成可く排水の便を良くする爲、途中横坑の處でT管で分岐した支管を持つてゐる。此支管は本管と同じく内徑6 in. の土管であつて、其長さは本管に比して非常に短かく、勾配は略ぼ本管のそれと同じである。此様に横坑位置で排水本管は遮断せられたのでは無いから、隧道前半部（隧道の横坑から上流を前半部と云ひ、同じく横坑から下流を後半部と云ふ事とする）の排水は其一部が横坑から流出し残部は隧道終端へ向ふ譯であるが、其割合は隧道通水前後で非常に異つてゐる。即ち附圖第三は昭和4年5月から昭和7年9月初め迄の約3年4箇月に亘る排水記録の圖表であつて第三表は通水後の記録であるが、昭和5年10月2日に隧道に通水を開始したので此日を界として排水状況が全く異なるから、以下通水前後に分ちて論ずる事とする。

A. 通水前の排水状況

通水前に於ける排水量は横坑口のもの最大0.05個、最小0.004個、17箇月の平均は0.022個である。隧道終端のもの最大1.47個、最小0.01個で同じく17箇月の平均は0.39個である。而して之等2箇所に於ける全排水量は最大1.495個、最小0.014個、平均0.206個で、横坑口と隧道終端との測水日が同一でなかつたから必ずしも上記兩者の最大の計とは一致しない。

附圖第三を見ると合計排水量は降水量と能く符合して居る。若し排水設備がなかつたなら上記の計量せられた排水も全部地中に滲透したであらう。又隧道終端からの最大排水量1.47個が6 in. 管を通る流速は7.5尺/秒に相當するから、隧道の勾配と等しい排水管の勾配即ち自然流下では之丈の流速を生ずる事は出来ない。従て降水時に

第三表 小牧導水隧道排水記録

年月日	天候	貯水位	横坑排水量	終端排水量	合計排水量	午前時気温	最高気温	最低気温	排水温	貯水池表水温
5. 11. 28	雨	+589.54	個.625	個.616	個.1.241		50	2.0		
12. 4	雲后晴	+589.74	.763				30	0.0		
27	晴	+581.37	.694	.500	1.194		80	1.0		
6. 1. 10	雲	+583.55	.673	.714	1.387		-20	-6.0		
20	雲	+585.88	.625	.760	1.445		15	-3.5		
2. 1	曇	+585.94	.500	.606	1.106		40	0.0		
10	雲后曇	+585.02	.512	.620	1.132		10	-2.0		
20	雲后晴	+583.93	.474	.560	1.014		20	-0.5		
7. 7	曇后雨	+589.67	.454			18.5	19.5	17.0		
8. 23	曇	+581.74	.743			27.0	28.0	21.5	20.3	23.0
9. 16	曇后雨	+549.20	.039			20.0	21.0	18.5	19.0	20.0
10. 6	曇	+576.06	.333			19.5	21.5	17.5	16.0	18.0
14	曇后雨	+588.62	.400			16.5	17.0	10.5	15.0	15.5
11. 2	晴	+587.69	.333			11.5	13.0	7.5	10.0	11.5
16	晴時々雨	+588.27	.400			13.0	14.0	8.0	11.0	10.5
22	晴	+584.60	.416			9.5	12.0	7.0	10.5	9.5
12. 3	雨	+587.90	.454			2.5	4.0	2.0	10.5	8.0
8	晴	+590.00	.300			10.0	10.5	7.0	9.8	8.5
12	曇后雨風	+590.00	.500			15.0	15.5	1.0	8.0	7.0
26	曇	+586.00	.714			5.0	5.5	+0.5	7.0	3.0
7. 1. 4	晴	+587.74	.714			5.0	6.0	3.0	5.0	6.0
7	晴	+586.88	.714			8.5	13.5	3.5	5.0	4.5
15	晴	+586.23	.714			5.5	7.5	1.5	6.0	5.5
22	小雨時々曇	+585.13	.714			5.0	6.0	3.5	5.0	4.5
2. 1	曇后雨	+584.72	.714			2.0	4.0	-0.5	6.0	4.5
7	晴	+580.02	.833			2.0	2.0	+0.5	4.5	4.5
14	曇	+586.06	.714			5.0	6.5	2.0	5.5	5.0
23	曇	+589.37	.714			0.0	+0.5	-2.0	5.0	4.0
3. 1	晴	+585.50	.833			2.0	3.0	-3.0	5.5	3.0
4. 6	雨 after 晴	+589.46		.714		5.0	11.5	5.0		
7. 5	晴	+590.00	.263	.250	.513	23.0	30.5	20.2	14.0	15.7
19	曇 after 晴	+589.20	.333	.500	.833	25.5	27.0	23.0	15.5	19.7
8. 2	晴	+580.50	.250	.200	.450	27.0	30.0	23.0	18.1	23.2
18	晴 after 曇	+553.50	.060	.100	.160	23.0	25.0	21.0	18.7	22.0
9. 2	晴	+582.70	.250	.263	.513	27.5		21.0	18.0	22.7
最大			.833	.700	1.445					
最小			.039	.100	.160					
平均			.513	.493	.916					

は排水管の周圍に可成の水壓を有し、計量された排水は此場合其一部で其他の地下水は矢張り地中の何處かへ滲透するものと考へられる。

附圖第三に於て横坑口の排水量を示す線の變動は高低の差が少く降雨に關係ないが、終端からの排水量は最大と最小との差が甚しいばかりでなく、晴雨に依り非常に變化して居る。依つて兩者を加へた全排水量が降水量に相應して居る事實は、全く終端からの排水量に據る事が一見して明かである。之等兩者の排水量を示す線の變動の範圍からして、隧道前半部では晴雨に關せず排水管の勾配に基く自然流下であつて、一部は本管に殘部は支管に流下して居ると認められるが、隧道後半部では晴天が續くと自然流下となり、降雨があれば忽ち水壓流下となると考へられる。即ち隧道前半部の排水の一部は後半部のものに向つて終端から流出するではあらうが、前半部は殆ど降水狀況には關係なく後半部は非常に關係を有して居るのである。之は專ら後半部の地質の悪いためであつて、此事實は工事中から判つて居た事である。

B. 通水後の排水状況

附圖第三及第三表に見られる通り、通水後の記録は測水の中斷して居る期間がある。横坑口と隧道終端の排水量記録の揃つて居るのは昭和5年10月に於ける通水後4箇月と、7年の7月及8月の兩期間だけで、6年7月から7年3月迄は横坑口のものはあるが終端のそれを失つて居る。斯う云ふ有様で完全なる記録を得られないのは甚だ遺憾であるが、圖表中信頼し得るもののみを採つて論ずる事とする。

通水後の排水状況と通水前のものと比較して氣付かれる點は、

- 1) 横坑口の排水量が終端排水量より却つて大なるか若しくは等しき位迄に急増せる事、
- 2) 兩所の排水量従て其合計量も大體貯水位に應じて増減して居る事、
- 3) 兩排水量共通水前に比して増減の割合の少い事、
- 4) 貯水位が満水位より40ft.も低下してゐる際は兩排水量は通水前と殆ど變らない事

等である。而して茲に留意

すべきは隧道入口から堰堤

位置に至る迄約750ft.の區

間は貯水池の湖畔と水平距

離230ft.前後で貯水池に

隧道が沿つて居る事である

(附圖第一参照)。即ち隧道

始點から例へば遞加距離

400ft.及500ft.に於ける

隧道天端と貯水池との關係

は、満水時には夫々約56

ft./230ft. $\approx 1/4.1$ 及約56.3

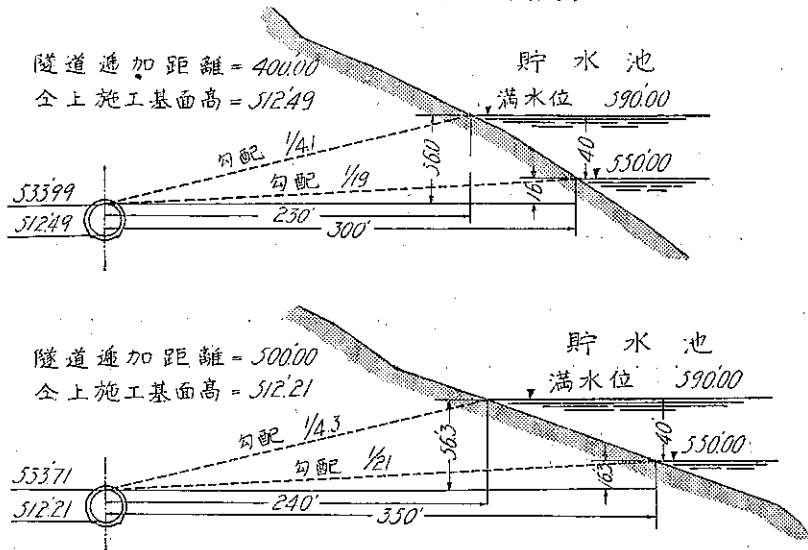
ft./240ft. $\approx 1/4.3$ の水面勾配

となり、40ft.低下した貯

水池とは又夫々約16ft./300

ft. $\approx 1/19$ 及約16.3ft./350ft. $\approx 1/21$ となるのである。

隧道と貯水池との關係圖



上記の諸事實より推定すべし、1) 通水直後約4箇月間貯水位が満水面に近い際の兩所の排水量は約0.6~0.7個であつて排水管内の流速は3ft./sec.以上となり、前半部、後半部共排水管内は水壓流下と考へられる事、2) 次ぎに天候の記録は缺けて居るか排水量を示す線の變動からして、貯水位が高い時には主として貯水の水壓に支配されて降水の影響を蒙る事が小さい様である事、3) 貯水位が40ft.も低下した時は兩排水量は0.1又は0.08個となり、此際は通水前降雨無き場合と同じ状態で排水管内は水壓なく、水壓隧道の底部に埋設されてあり乍ら隧道の敷勾配に依る自然流下と認められる事、従て若し此際降雨があるならば通水前の降雨の場合と同じ状態を呈し前半部は殆ど降雨の影響を受けないで横坑からは漏水の一部が自然流下し、終端からは前半部の漏水の一部と後半部の漏水並に降雨に依る地下水等が集まつて壓力流下する事であらうと思はれる事、4) 更に通水後約4箇月の記録の示す如く兩排水量共0.6~0.7個と且つ壓力流下して居る事から見れば、隧道の前半部と後半部との長さも大體同じであるから前半部のものは横坑から、後半部のものは終端から排水される様に見られるが、必ずしもさうで無く、前半部

と後半部との漏水量が著しく異つても兩所に於ける排水管内には水壓を有して居るから略同量の場合も起り得ると思はるゝ事、5) 而して最後に隧道入口から堰堤位置附近に至る區間、貯水池から滲透する水が排水管に集水せられると云ふ事は、前記の如く満水時には地中に於ける水面勾配が略 $1/4$ であるのに此區間に特に遮水壁等の施設も無いので、通水後約4箇月間貯水池が満水位又は夫れ迄に近い時(取入口に於て水壓 65 ft.乃至 55 ft.)兩所の排水量は各々約 0.65 個位であるのに、満水位から約 40 ft. 低下した時(取入口に於て水壓約 25 ft.)即ち地中に於ける水面勾配が約 $1/20$ になつた時排水量が約 0.06 個の如く $1/10$ 以下に急減する事實から見て、満水時に於ける排水は水頭増加に因て巻立を直接滲透する漏水の増加もあらうが、寧ろ其大部分は湖岸から直接隧道巻立裏面に滲透したものであると云ふ事が云へやう。

之を要するに通水後排水量の大部分は、取入口と堰堤箇所との區間から湖水が直接地盤を滲透したもので、隧道内部から巻立或は其龜裂を滲透した漏水は極めて少量であると思はれるのである。

第三章 小牧導水隧道と歐米各國水壓隧道との漏水比較

水壓隧道に就て漏水の調査を行つた記録を Walch 氏の「水壓隧道の巻立」(Die Auskleidung von Druckstollen und Druckschächten von Dr. Ing. O. Walch, Berlin, 1926) 及「Amsteg 水力工事水壓隧道調査委員會報告書」から摘記する。

小牧の通水後に於ける排水量は第三表末尾記載の通り最大 1.445 個である。之は前述の如く貯水池から直接地中を通して來た水量が大部分で眞に内水壓に基く巻立滲透水は遙かに僅少と認められるが、兎に角此處では 1.445 個即ち 40 l/sec. を全漏水量と見做して比較する事とした。

第四表 水壓隧道漏水調査表

No.	工事名又は會社名	隧道名又は所在	長 (m)	純断面 (m ²)	巻立	最高水壓 (氣壓)	最大使用水量 (m ³ /sec.)	漏水量 (l/sec.)
1	{ officina elettrica { comunale Lugano	Vercasca	3 912	5.0	無巻	0.63		115
2	{ Schweizerische { Bundesbahnen	Barberine	2 200	2.70	"	7.20	7.5	15
3		Tyin (Kris- tiania)	200	4.57	"	6.70		{ 初 230 { max. 400
4	{ Soc. Forze Idroelett- { riche Meridionale	Tanagro	250		上塗巻立	3.70	10	{ 初 500 { 現在 10
5	{ Spinnerei an der { Lorze	Baar	300	2.56	コンクリ- ト巻立	0.63		50
6	{ Elektrizitätswerk { Engelberg-Luzern	Obermatt (Nidwalden)	2 559	4.15	"	0.33		40
7	{ Elektrizitätswerk { am Löntsch (Nok)	Netstal (Glars)	4 150	4.77	"	3.54	11	300
8		Broc an der Jogne	1 670	6.50	"	3.00		80
9	{ Soc. Idroelettrica { Piemontese-Lom- { barda-Ernesto Brede	Gressoney	800	1.76	"	8.20	2	80
10	{ Wasserversorgung { der Stadt N.Y.	New Croton	11 000	7.70	"	13.30		11
11	{ Schweizerische { Bundesbahnen	Amsteg	7 536	6.50	複式巻立	3.40	21	17
12	庄川水力	小牧	1 193.2	33.72	鐵筋コンク リート巻立	3.80	196.5	40

・Walch の著書及 Amsteg の報告には此處に摘記した以外尙多數の水壓隧道があるが漏水の記録のあるのは之丈であつて、他は計量し得ざる程の漏水若しくは漏水なしと記入され又は漏水に對して何等の記録がない。併乍ら夫等のものが全然漏水なしと考ふる譯には行かない。漏水があつても排水管の設備がなくて全部地中に滲透して視ひ知る事が出来ないものもあるであらう。故に水壓隧道で漏水のあるものは此表に掲げたものだけで他のものは漏水なしと云ふ譯ではない。通水後何も調査されず、成るが儘に放置されて居る隧道中には一層甚しく漏水するものが多數あり得可きではなからうか。

此表に掲げたものと雖も小牧と同様に排水管からの流出量を調べたものと限らない。或者は隧道を數區間に分つて通水試験を行ひ、それから全隧道の漏水を算出したものもあらうし、或者は其他の方法に依つたであらう。之を要するに上記諸外國に於ける水壓隧道の漏水量は如何なる環境に於て如何なる方法に依つて測定せられたものか不明である。從て之等のものと小牧の夫れとを直ちに比較する事は穩當でないと思ふが他に此種の記録が見當らないから前表を目安として比較を試みる。

1. 單位表面積當り漏水量

漏水量を考ふるに當り隧道の表面積に就ては 卷立内面積を採る可きか 又卷立外面積即ち掘鑿された岩盤の表面積を採る可きか 夫々得失があらうが、Amsteg の委員會では無卷立隧道の漏水量との比較のため卷立外面積を採用して居る。

而して第四表記載の隧道に就ては内面積を算定す可き寸法の不明のものが多いで Amsteg の委員會と同じく卷立外面積 1 000 m² 當り 1/sec. で示す事とした。

第四表から卷立外面積 1 000 m² 當りの漏水量の判明せるものを示せば第五表の如くである。

第五表 卷立外面積 1 000 m² 當り漏水量 (l/sec.)

No.	隧道名又は所在	漏水量	No.	隧道名又は所在	漏水量
1	Vercasca	3.7	8	Brocan der Jogne	5.0
3	Tyin	{始 92.0 max. 263.0	9	Gressoney	21.0
5	Baar	6.8	10	New Croton	0.1
6	Obermatt	22.0	11	Amsteg	0.48
7	Netstal	9.0	12	Komaki	1.6

上表に於ては New Croton 最も少く Amsteg 之に次ぎ小牧は第三位となつてゐる。最も漏水の多量のものとは Tyin の隧道である。之は延長約 200 m で、地質は花崗岩であるが岩の割目も充填せず全くの無卷立である。漏水防止の方法としては、鋸屑泥炭苔及粘土等を投入したのであるが無卷立であるから流入するものもあり流出するものもあり其効果の程は疑問であるとの事である。

Tyin に次で漏水の多いのは Engelberg-Luzern 電氣會社の Obermatt 發電所の導水隧道で、全長 2 558.6 m、内法断面 4.15 m²、地質に應じて厚さ 25cm~45cm の配合 1:3:5 のコンクリート卷立をなし、表面 4cm のセメント上塗を施工したものであるが、1905 年 9 月 1 日に通水して見ると水壓僅か 3.4 m で漏水非常に多く、卷立には夥多の裂罅を生じたので、其大なるものには楔を打込みセメントを充填したが依然として漏水止まず遂に水壓隧道として使用不可能になつて現在は重力流下式水路として用ひて居る。此隧道の地質は全部侏羅系リアス統石灰岩 (Lias kalk) であつて、非常に分解して居り、大地に碎かれ粘土を含んで居り、諸所に泥灰岩質で透水性の部分もあり、又石膏の結晶もあつたとの事であるから地質は非常に悪いと云はねばならぬ。卷立は仰拱及側壁は丁寧に施工せられたが、拱の裏込には岩屑が詰められ而して注膠工は施工せられなかつたのである。

2. 最高水壓と單位面積當りの漏水量

第四表から單位面積當りの漏水量と最高水壓との比を求めると第六表の如くである。

第六表 最高水壓と單位面積當りの漏水量

No.	隧道名	最高水壓 (氣壓)	漏水量割合 l/sec./1 000m ²	漏水量/最高水壓
1	Vercasca	0.68	3.7	5.44
3	Tyin	6.70	始 92.0 max 263.0	13.73 39.25
5	Baar	0.68	6.8	10.00
6	Obermatt	0.33	22.0	66.67
7	Netstal	3.54	9.0	2.54
8	Broc an der Jogne	3.00	5.0	1.67
9	Gressoney	8.20	21.0	2.56
10	New Croton	13.30	0.1	0.01
11	Amsteg	3.40	0.46	0.14
12	Komaki	3.80	1.6	0.42

漏水量は隧道掘鑿面 1 000 m² 當り l/sec. で示し水壓は氣壓で示した。但し漏水量は必ずしも最大水壓時に於けるものを示したものでなく、最大水壓と漏水量との記録を摘記したものである事を諒とせられたい。

上表に於て第一位は New Croton で小收は第三位となつて居る。New Croton に次ぐ第二位の Amsteg 水壓隧道は 1918 年の着工で Schweizerische Bundesbahnen に屬し水壓隧道工事のため特別の委員會を作つた事は前述の如く、工事中水壓試験を行つて岩盤の漏水、變形及卷立並に岩盤中に於ける溫度關係を測定する等種々の研究をなし、有名なる Amsteg の調査報告書を作つたのである。此隧道は主として片麻岩並に絹雲母岩中を貫通し、搗固めコンクリートの卷立を施し更に一部は厚さ 2cm の上塗をなし 6~12 氣壓を以て注膠を施したものである。即ち地質が良好なる上に而も入念に施工したので、之丈の成績が得られたものと思はれる。

3. 使用水量と漏水量との關係

水力發電に於ては漏水量が同一であつても落差小で水量大なる場合と其反對の場合とでは水の經濟的重要性に非常に距りのある事は云ふ迄もない。故に漏水量と使用水量との比率を以て其漏水量の發電に對する價值を論ずる譯には行かない。之から見れば漏水量を使用水量と比較するに當つて、平水量とか最大水量とか區別するさへ無意味になるが、此處では單に漏水量が使用水量に比して如何なる程度であるかを見る一つの目安とし、又比較するに最大使用水量が便宜であつたからそれに依る事とした。従て % の大小を以て直に隧道の成績を云々すべきでない。第四表から漏水量と最大使用水量との比を求めると第七表の如くである。

第七表 最大使用水量と漏水量

No.	隧道名	最大使用水量 (m ³ /sec.)	漏水量 (l/sec.)	漏水量/最大使用水量
2	Barberine	7.5	15	0.0020
4	Tanagro	10.0	{初 500 現在 10	{初 0.0500 現在 0.0010
7	Netstal	11.0	300	0.0273
9	Gressoney	2.0	80	0.0400

11	Amsteg	21.0	17	0.0008
12	Komaki	13.0	40	0.0003

此表中では小牧が首位を占めてゐる譯である。漏水量と最大使用水量との比の最大である處の Gressoney の水壓隧道は地質は不明であるが、巻立は搗固めコンクリートを以てし注膠工も施工した。然し巻立に裂罅を生じ最大使用水量の4%も漏水した。No. 4 の Tanagro 水壓隧道は石灰岩中を貫通し Torkret 式巻立(セメントガン吹付)をなし、坑口は鐵筋コンクリート巻立をしたのであるが最初最大使用水量の5%の漏水があり修繕に依つて0.1%迄に減少する事を得たのである。

第四章 結 論

1. 巻立に就て

水壓隧道巻立の目的は、水が地山に滲透するを防ぐ事、岩石の崩壊を防ぐ事及隧道の内面を平滑にする事等であると云へやう。而して無巻立とす可きか、如何なる種類の巻立とすべきかは、専ら地質に依つて決定すべきである。岩質良好で單に岩盤の目潰にて漏水を防ぎ得る様な場合は、實際問題として、隧道断面の大ならざる限り無巻立でよいと思ふ。然し一般に此様な場合に遭遇する事は少ない。

Amsteg の水壓隧道委員會の報告書に依れば 隧道の岩盤の壓縮性に關する實驗の結果として次の如く述べてある。

1. 水壓を受けた隧道は硬い岩でも脆い岩でも壓縮量を測定する事が出来る。
2. 壓縮量は脆い岩では大きく硬い岩では小さい。例へば Sericitschiefer の壓縮量は、Biotitgneiss の10~20倍である。内徑 3.4m の隧道に於て水壓 40m の壓縮量を示すと Sericitschiefer では 80/100mm、Biotitgneiss では 5/100mm である。但し Sericitschiefer は第一回目の水壓を作用した際の記録である。
3. 岩石の壓縮量は水壓の昇降に應じて敏感に増減するが、一部は elastic のものであり、一部は plastic のものである。即ち水壓を除いても舊に復歸しない變形がある。而して此 plastic の變形は一回の水壓で全部現はれ盡すものでない。
4. 次に此壓縮性は硬い岩では大部分が elastic であり、脆い岩では大部分が plastic のものである。plastic の變形量は一般に總變形量の 30~50% である。

之に據れば隧道を斷水して検査した際の裂罅は、水壓ある際に比して小さいものである事が知れる。即ち水壓時には裂罅が著く開いて居る事と水壓との二重の作用に依つて、漏水の増加する事が想像される。又圓形の断面は水壓隧道では水理的に條件が良いばかりでなく、水壓に依る張力の比較的均等なる事を期待し得るから、特に壓縮性の傾向ある岩質に於ては適當なる型である。

扱て最も普遍的な巻立材料はコンクリートであるが、其水密性は巻立の厚さより質が主である。即ち漏水だけ考へれば巻立を厚くするよりも薄くとも良質のコンクリートを施工す可きであるが、實際に於ては洗掘の問題もあり又薄い巻立を施工する事は非常に困難であるから、補強の鐵筋、注膠工等をも考へて相當の厚さとする必要がある。巻立の背後に石塊等を裏込する事は禁ず可きである。コンクリートは必ず岩盤に直接打付け、尙注膠工を施工し、巻立と岩盤との間の空隙を充填する事が絶対に必要である。注膠工は巻立及岩盤を均質ならしめ、plastic の變形量を減ずる事に於て現在之に優る工法はない。

次にコンクリートの龜裂に關して注意すべきは施工接手である。大抵の場合水の滲透は接手からするものが多いと思はれる。小牧に於ては施工接手は舊コンクリートを削り取りセメント乳を塗つて打足したのであるが、

尙龜裂が接手に認められた事は前述の如くである。鐵筋はコンクリート面の龜裂防止に最も有効であつて、之が爲には細い鐵筋を數多く内面に挿入す可き事は云ふ迄もない。併し鐵筋に依つて漏水の絶無を期待する事は出来ない。岩盤が堅固で巻立が岩盤に密着して居る場合に水壓に對して鐵筋を考慮する事は無意味であるが、岩盤が良好でなく掘鑿當時爆破の爲に損はれて居る際は如何に充分なる注膠工を施しても相當量の鐵筋を挿入す可きものと思はれる。著者は宇治川大峯發電所の水壓隧道に於て、地山の被りの薄い爲、其終端を鐵板巻としたが、鐵板巻立に依つてのみ漏水の問題は懸念なく解決する事が出来る。岩質及施工法にも依るが之を外國の實例に徴するに鐵板の厚さを決定するに當つて、内水壓に對して 3000 kg/cm^2 位採つて宜い様である。此鐵板巻立の水壓及溫度變化に對して M. Marinoni 氏は、波狀鐵板を提案して居る。其實例として Soc. Generale Italiana Edison di Elettricità の Pallanzeno の水壓隧道が約 560 m の水壓に成功して居る事は注意に値すると思ふ。

2. 排水管に就て

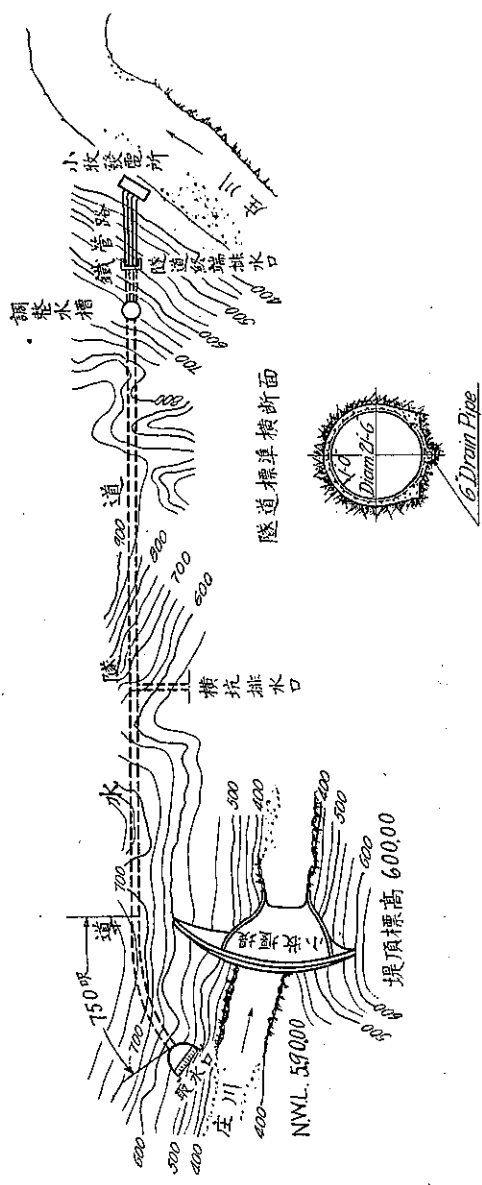
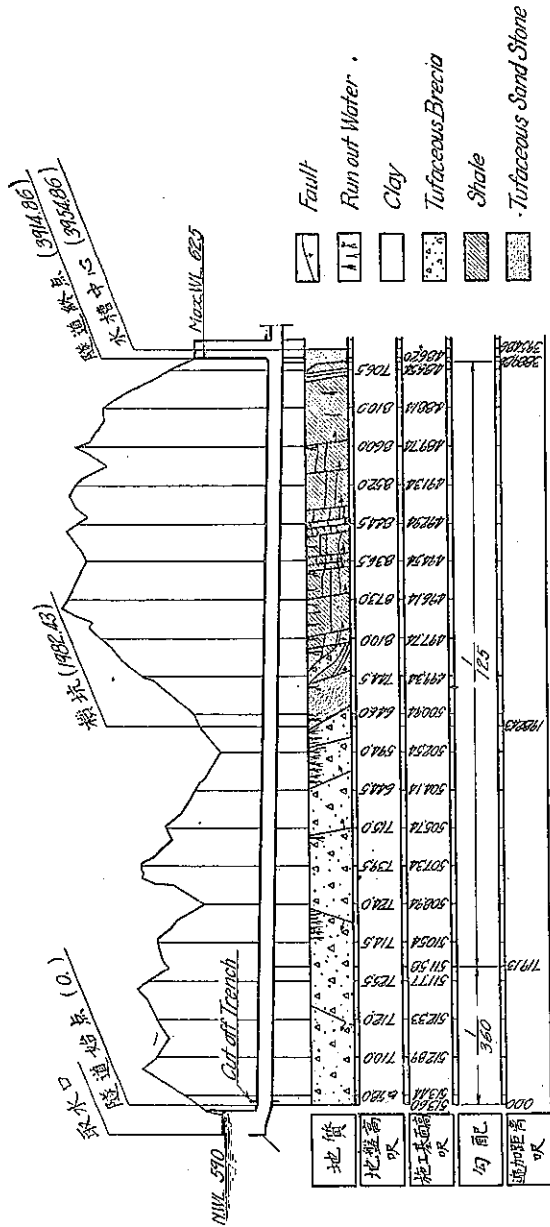
排水管は普通隧道の底部又は側壁中に埋設されるものであるが、湧水を伴ふ隧道に於ては絶対に必要であると云ひたい。即ち巻立施工中多量の湧水は管を以て、又岩盤から一面に點滴する場合には巻立の裏面を通して一應排水管へ導く事が出来る。之が爲に若いコンクリートは凝固を待つ事が出来る。湧水が岩盤面から汗の様に出る際には巻立の凝固を待つて岩盤との間隙に注膠を施せば止水する事も出来るのであるが、多量の湧水は排水管に集めて勢を防ぐのが安全である。

通水後は、巻立を滲透した水は之に集めて排水し、地山の安定に効果を與へるものと考えられる。若し排水管が無いならば、巻立から漏水した水は全部岩脈に滲込み、年月の経過と共に岩脈中の粘土層は洗ひ出されて益々間隙は擴大される傾向を生ずる。壓力ある水が岩脈中に充満して居る事は、岩石を侵蝕するばかりでなく岩盤中に water pocket を作る虞があり、強ひて地山の崩壊を來たす原因となる。排水管は其排水量及水溫其他を常時觀測する事に依つて、通水に依る影響を知り、斷水せずして隧道の異状を察知する事が出来る。以上の諸點からして、非常に優秀な岩盤で水壓も左程高くない場合は排水管を必要としないが、然らざる場合は巻立施工に際しての湧水の處理及隧道の維持監査に必要なものと考へる。

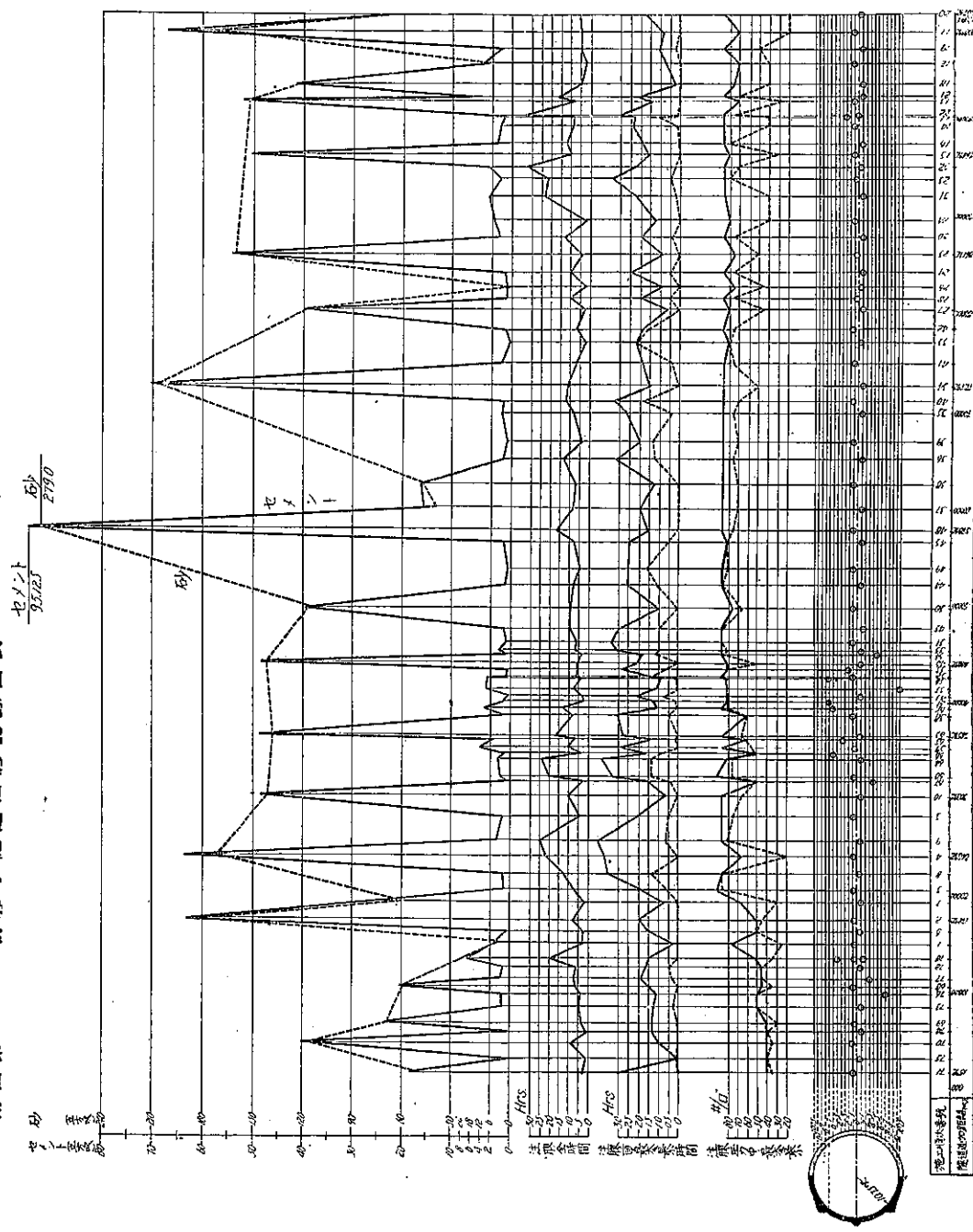
最後に一言したいのは隧道の力學的研究である。近時岩石隧道の力學的研究論文の發表せられるものが多いが其殆ど總ては實地技術家から見れば理想的と云はんより寧ろ架空的假定から出發して居る様に思はれる。即ち岩石を完全に均質なる彈性體として取扱つて居る事である。之は理論を進める上に致し方のない事であらうが、岩石の不均質は複雑な副應力を生ずる事は明らかであつて、例へば Amsteg の水壓隧道調査委員の一人である J. Büchi 氏が Amsteg の水力工事で、其計算方法 (Schweizerische Bauzeitung 1921 年 2 月號) に依つてコンクリート巻立隧道に就て岩盤の彈性係數を評價して實驗した結果、假定の計算と著しい差を來した事は寧ろ當然の歸結と云はねばならぬ。隧道に關する理論が實地に於ては誠に頼りないと云ふ事は、結局隧道と云ふものが經驗の奥深くに秘められて居ると云ふ感じを深からしめるばかりである。殊に水壓隧道に於て、漏水換言すれば如何にして裂罅の發生を防止すべきかに當つて、理論家には岩石の elasticity, plasticity 及溫度其他の影響等を事實に即して理論の架空的に陥らざる様、又一方實地技術家には理論の假定に出来るだけ近づく様計畫施工する事は、隧道の完璧を期する所以なるを想はん事を希望して止まない。

(了)

附圖第一 小牧導水隧道縱斷並其地質圖



附圖第二 小牧導水隧道法膠記錄圖表



附圖第三 小牧導水隧道排水記錄

