

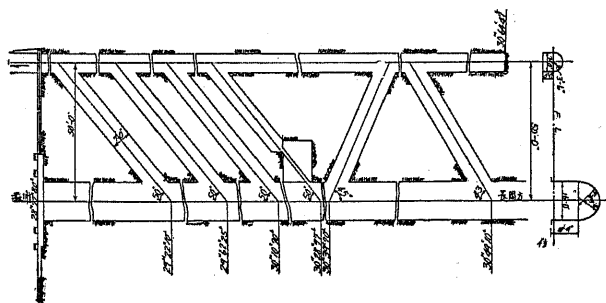
第 14 章 湧水隧道

第 1 節 湧水と其の處置

長い隧道を掘鑿する時は途中で多少の湧水に遭遇するのは普通の事で、最初から其の覺悟で湧水に對する準備をして置く必要がある。隧道の湧水は其の水源の如何によつて種々の型がある即ち湧水し始めてから時間の経過するに従ひ次第に水量を減少するもの、時間が経過しても湧水量は一定なるもの、隧道の或る個所からまとまつて湧水するもの、導坑の進行に従つて湧水箇所移動し常に切端からのみ湧水してその手前の湧水は無くなるもの等である。水源が隧道上部の川、湖水等である場合には湧水量は時間によつて變化しないが、それが地下の溜り水の如きものであれば、數日又は數ヶ月で水源が涸れて湧水は減少する。湧水が岩石の割目を通つて坑道内に滲出する時には多くの場合導坑の進行に連れて湧水も奥へ移動するので、導坑の作業者は常に大雨の中で働く様な状態となる。依つて従事員は防水外套とゴム靴で身を固め、導坑天端にトタン板等で屋根を作り水に濡れる事を防いで作業する。湧水に伴つて土砂が流出する個所では矢板の裏に杉葉を埋め込み、之によつて土砂を防止する等の注意を必要とする。

湧出した水は假下水として導坑盤を少しく掘り下げた溝を通して處分し、施工基面に水が停滞しない様に努める可きであるが、導坑に於て断面の大きい假下水を運搬線路の眞下に掘鑿する事は奥の作業を支障するので實際上困難である。勾配の急な隧道では断面の比較的小さな假下水で簡単に排水する事が出来るが緩勾配な隧道では困難である。施工基面には運搬線もあり種々の材料又は礫のこぼれ落ちたもの等水流の障害になるものが多い上に導坑盤の高さにも多少高低が出来るので水は停滞し勝ちである。湧水量が多くなると假下水は殆んど用をなさず水

第 326 圖 清水隧道に於ける水抜坑



は導坑盤一面に流れる。その深さが軌條面上 30 厘にも及ぶ様になると切擴、礫運搬等の作業を甚しく支障し工費も意外に嵩むのである。この導坑盤を流れる水を處分するには (1) ポンプと鐵管に依つて坑奥の水を下水完成區間に導き途中の作業箇所の水を切るか、(2) 本隧

道と平行してこれより 30~60 種低く排水隧道を掘鑿し適當の個所に聯絡坑を造つて本隧道の水をこれに導くかの二法である。清水隧道南口では坑口より 2668 米の個所で約 6.5 個の湧水に遭遇して導坑面は水浸しとなり作業不可能となつたので、第 326 圖の様に徑間 2.1 米の排水隧道を掘鑿し、本隧道の水をこれに導いてから作業を繼續した事は第 12 章に述べた通りである。

次に湧水の爲め崩壊する恐ある隧道を掘り進めるには次の如き方法が用ひられる。

1. 迂回導坑へ水を湧出せしめて本導坑の水を切る方法、

導坑を迂回せしめて地下水脈に達し、この迂回坑より水をしばつて本導坑の湧水を少なくしてから作業を進める。清水隧道の場合は迂回坑が含水層に達し、これに多量の水が湧出すると同時に本導坑の水は著しく減少して作業も楽になつた。

2. 水抜隧道によつて地下水をしぼり地下水面を低下せしめる方法、

1 本又は數本の坑道を含水層帯に掘鑿して地下水を流出せしめ、地下水面の低下を待つて本導坑を進める。この場合地質の比較的よき個所を見出してその部分の坑道を更らに掘進め含水地帯を通過し得れば、その坑道によつて奥の作業を進める事が出来るので本導坑は充分時間をかけて水をしばつてから作業を始めても全體の工期には影響ない。

3. 壓搾空氣を用ふる掘鑿法、

水源が限定された地下水である場合には(2)の如く時間をかける事によつて水量も水壓も減少するが、湧水が河などからもれて來る場合には何等かの方法で湧水の中を掘り進める方法を考へなければならぬ。又(2)の目的で水抜隧道を掘鑿する時も矢張り含水地帯の中を強行して掘鑿する必要がある。壓搾空氣掘鑿法は適當なる隔壁で坑奥をしめ切り、それより奥の部分を壓搾空氣室とし、水壓に相當する氣壓を保ちて水の湧出を阻止せんとする方法であつて、多くの場合第 18 章に述べた盾構を併用する。

4. セメント注入法

導坑切端より先途の地質をボーリングによつて確めつつ掘り進め、不良な個所ある事を豫知したら一時進行をやめて、その不良地盤に高壓を以てセメント乳を注入し、これが硬化するのを待つて掘鑿する方法である。

第 2 節 盾構と壓搾空氣工法

Shield and Compressed air system

1. 沿革

隧道工事に壓搾空氣工法を用ひたのは 1879 年を最初とする。この年に Antwerp と New York とに殆んど時を同じうして工事に着手したのであつて、前者は 5'×4' の小型のもので後

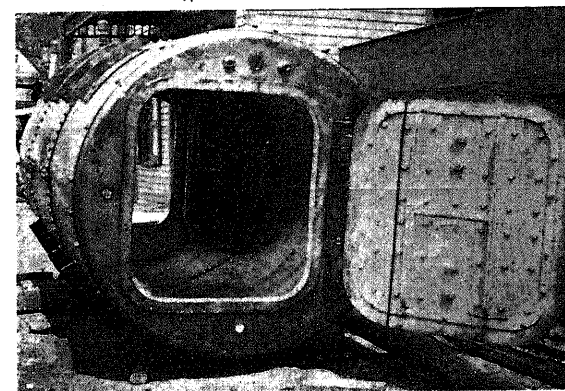
者は Hudson 河の河底を通つて Jersey 市と New York 市とを結ぶ 16'×18' のもの 2 本の計畫であつた。この Hudson 河底の隧道は屢々工事を中止したが 1889 年から盾構を併用し 1904 年遂に貫通するに至つたものである。又最初に壓搾空氣と盾構とを併用したのは London の City and South London 鐵道の一部で、この方法によつて 6 哩餘の隧道を建設したものである。其の後此の方法は盛んに用ひられて歐米には多くの施工例があるが、我が國では丹那隧道の水抜坑に用ひた例があるのみである。

2. 隔壁及び氣閘 Bulkhead and Air Lock

湧水隧道に壓搾空氣を使用するのは其の壓力と湧水の壓力とを略近くして湧水を止め、水の無い隧道を掘鑿すると同様な方法で作業を行ふのが目的である。その爲めには隧道の入口又は中途に混凝土其の他を以て隔壁を設け、其の奥へ壓搾空氣を送つて坑奥の氣壓を湧水の壓力位に高くし、其中へ従業者が入つて作業をするのである。

従つてこの隔壁の奥と外とは氣壓の高低を生ずるので、隔壁はこれに耐えるに充分の強度を有し、且つ空氣の漏出を完全に阻止すると共に礫の搬出、材料の搬入、作業者の出入に差支ない

第 327 圖 氣 閘



様設計されなければならない。この出入に要する設備を氣閘 (air lock) と稱し、第 327 圖に示す様に坑奥側と坑口側との兩端に各 1 個の扉を備へて居て、其の中の一つは常に兩側の氣壓の差によつて閉ぢられて居る。氣閘はその用途によつて次の三種に分ける。

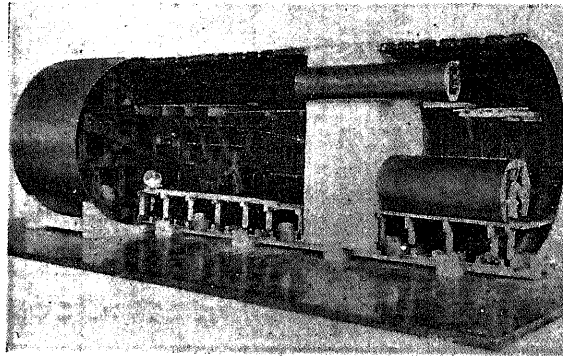
- a. 材料氣閘 (material lock)
- b. 人氣閘 (man lock)
- c. 非常氣閘 (emergency lock)

材料氣閘は礫及諸材料の搬入搬出に用ひられるので其の大きさは使用運搬車の大きさによつて定められる。運搬車を坑内に入れる時は先づ坑口に近い方の扉を開いて氣閘中に車を入れ坑口側の扉を閉ぢて坑奥と氣閘とを結ぶ空氣管を開いて氣閘と坑奥との氣壓を等しくした後、坑奥側の扉を開いて車を引き入れる。又車を坑外に引き出す時は反對に氣閘中に運搬車を入れて坑奥側の扉を閉ぢたら直ちに氣閘内の空氣を坑口側に噴き出させて外氣壓と一致せしめ、坑口側の扉を開いて車を引き出すのである。

人氣閘の大きさは一時に出入する従事員の数によつて定められる。従事員が坑内へ入る時は先づ氣閘内へ入つて入口の扉をしめた後氣閘の氣壓を徐々に上げ、氣閘内の壓力が奥の壓力と一致した時奥側の扉を開けて内へ入る。坑外へ出る時はこれと反對に氣閘内の壓力を徐々に降させて外氣の壓力と一致した時に初めて坑口側の扉を開いて坑外へ出るのである。

非常氣閘は其の名の如く不時の災害、又は事故發生の際直に避難する事が出来る爲めに特に設けた氣閘で、材料氣閘及人氣閘の使用中に事故が発生しても非常氣閘があればこれを用ひて

第 323 圖 盾構背面より見たる空氣掘鑿作業 (Pennsylvania Railroad North Rive)



上は非常氣閘 下は材料氣閘

坑外にのがれる事が出来る。湧水隧道又は水底隧道の事故は主として空氣の噴出其の他による地下水又は河水の浸入であるから一般に非常氣閘は隧道の最上位に設けるのが普通である。

然し小型の隧道では以上に述べた三つの氣閘を完備して居るものは少なく非常氣閘はないのが普通である。外國で用ひられた氣閘の大きさと隔壁の厚さの數例を示せば第92表及第93表の如くである。

第 92 表

隧道	隧道内徑 D (呎)	最大氣壓 呎/吋 (一氣壓以上)	壁の厚 T (呎)	比 T/D	材 料	年 代
Mersey	9.00	27	6.25	0.69	煉瓦	1888
Sarnia	19.83	28	8.00	0.40	煉瓦	1888
Glasgow District	11.00	23	6.00	0.54	煉瓦	1891
Blackwall	25.00	35	12.50	0.50	煉瓦及混攪土	1892
Ravens Wood	10.16	48	8.00	0.79	煉瓦	1893
Waterloo & City	12.42	...	6.00	0.48	煉瓦	1893
Baker St. & Waterloo	12.00	32	8.00	0.67	煉瓦	1898
Greenwich	11.75	26	8.25	0.70	煉瓦	1899
Lea	11.50	15	8.25	0.72	煉瓦	1901
Battery	15.45	...	6.00	0.30	煉瓦及混攪土	1901
P. R. R. East River	21.16	37	10.50	0.50	混攪土	1905
P. R. R. Hudson River	21.16	37	10.00	0.47	混攪土	1905
P. R. R. Hudson River	21.16	26	8.00	0.38	混攪土	1905
Elbe	18.50	...	11.50	0.62	混攪土	1907
Concord Metropolitan	23.94	...	90.85	0.41	混攪土	1909
Hudson & Manhattan	15.25	40	8.00	0.52	混攪土	1905
Old Slip East River	16.00	38	9.50	0.59	混攪土	1914
Whitehall East River	16.50	35	9.50	0.57	混攪土	1914
14th Street East River	16.50	40	8.00	0.48	混攪土	1916
60th Street East River	16.50	48	8.0	0.48	混攪土	1916

第 93 表 各隧道の各氣閘の大き

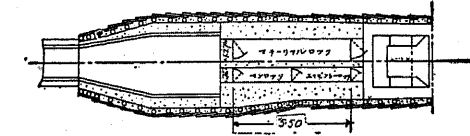
隧道	隧道の内徑 ft	Material Lock			Man Lock			Emergency L.			年代
		長ft	直徑ft	容積ft³	長	直徑	容積	長	直徑	容積	
Sarnia	19.83	17.0	6.00	480	17.0	6.00	480				1888
Blakwa II	25.00	16.0	7.00	615	16.0	7.00	615	10.5	5.00	205	1892
Greenwich	11.75	17.0	7.00	655				17.0	4.5×3.3	200	1899
Boston Harbor	{ 20.54 23.33	27.0	6.00	765	27.0	6.00	765	27.0	6.00	765	1899
Rotherhithe	27.67	36.0	5.75	935	18.0	7.00	695	12.0	5.75	310	1904
P. R. R. East R.	21.16	24.0	7.00	925	20.0	7.00	770	24.0		825	1905
P. R. R. Hudson R.	21.16	25.0	7.00	965	10.0	6.0×5.0	260	20.0	7.00	180	1905
Elbe	17.71	22.0	5.4	504	29.0	6.1	847		4.0×3.0		1907
Concord Metropolitan	23.79	24.5	7.0	945	11.5	6.0	310	20.0	4.00	250	1903
Old Slip	16.00	26.5	6.5	880	26.5	6.5	880	20.0	3.5×4.66	251	1914
Whitehall	16.50	26.5	6.5	880	26.5	6.5	880	20.0	3.5×4.66	251	1914
14th Street	16.50	26.0	8.5	1,474	19.25	6.5	639	20.0	3.5×4.66	251	1916
60th Street	16.50	40.0	7.5	1,768	20.0	6.0	566	20.0	6.0	566	1916

我が國で壓搾空氣工法を用ひた隧道は僅かに丹那隧道の水抜坑あるのみであるから、次に其の大要を述べよう。

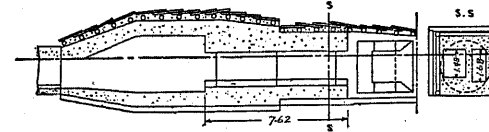
空氣隔壁 (Bulk head) は第 329 圖に示す様に長さ 7.62 米、平均斷面の幅 4 米、高さ 3.8 米

第 329 圖 丹那隧道水抜坑に用ひたる空氣隔壁

平面圖
断面圖



縱断面



の混凝土で造り其の中央に材料氣閘、人氣閘、非常氣閘を包んで居る。

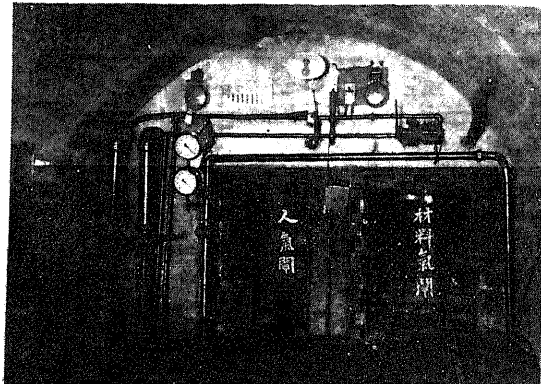
混凝土は自然地盤まで充分に填め込んでなほその硬化に伴ふ收縮によつて空氣の逃れる空隙を生ずるのを防ぐ爲め、硬化後其の裏面にセメント乳を注入して完全に防氣の目的を達した。

材料氣閘の大きさは運搬車の大きさによつて定め、長さは使用材料の長さによつて定められるのであるが、この隧道で用ひ

た土運車は幅 0.76 米高さ 0.84 米長さ 1.52 米であつて、長尺の材料は軌條と鐵管類の 5.18 米を最長とする。それで扉の開閉に要する長さを加へて、高さ 1.45 米幅 1.27 米長さ 5.5 米と定めた。

人氣閘及び非常氣閘は全く同一の構造で、鐵製の隔壁で二分し前方を非常氣閘、後方を人氣閘として使用した。其の大きさは高さ 1.68 米幅 0.76 米長さ 2.75 米で甚だ狭いものであつたが、

第330圖 氣 隔 正 面



第331圖 氣 隔 背 面



隧道の断面が小さいので充分の設備が出来ない事は止むを得ないのである。この氣隔の扉には徑10 呎の硝子窓を作つて氣隔番が常に坑内の状況を見る事が出来る様にし、又これによつて通信の受授をさせたのである。

空氣隔壁の内外を連絡する壓搾空氣管、水管、電線等は總て隔壁混凝土の中に埋め込んで設備された。

3. 氣 壓

隔壁の奥部即ち空氣作業場の空氣の壓力は湧水の壓力によつて異なるが通常40 #/sq よりも高壓になると人が入つて作業する事が困難になる。諸外國の實例を見ると空氣作業場の最大壓力は第92表の如くであつて、又上記の壓力を造る爲めに用ひた空氣壓搾機の能力は第94表の如くである。

第94表 各隧道の低壓空氣壓搾機の能力

隧 道	外徑D (呎)	隧道數 (N)	壓搾機の能力C (立方呎/分)	$\frac{C}{ND^2}$	備 考
Blackwall Baker Str. & Waterloo	27.00 12.81	1 1	10,000 3,200	13.8 19.4	地質粗鬆の箇所を進むときには全能力をあげたり 隧道數は二本なるも一本づゝ工事をなせり空氣不足のため可なり浸水せり
Retherhithe	30.00	1	16,667	18.5	
Hudson and Manhattan	19.50 16.58	2	8,954	13.7	地質緻密なりしために能力の半分にて充分なりき 大部分は緻密なる地質
" " "	16.58	2	5,040	9.2	
" " "	16.58	2	5,550	10.0	Silt
" " "	16.58	2	10,840	19.7	Silt
P. R. R. Hudson River	23.00	2	13,167	12.4	砂及礫及び一部岩盤一部 Silt 岩盤、砂、Silt 最初の粗鬆なる地質にて全能力を要したるも Silt 中には少量にて済みたり
" " "	23.00	1	13,167	24.8	粗鬆なる砂及礫層空氣の漏洩多し
P. R. R. East River	23.00	4	35,000	16.6	細砂、砂と漂石、粗砂、岩盤、砂及粘土
P. R. R. East River	23.00	4	45,000	21.3	細砂、砂と漂石、粗砂、岩盤、砂及粘土
" " "	23.00	1	19,000	35.9	此の量は blow のときのみ使用せられたり
Concord Metropolitan	25.54	1	9,500	14.6	石灰岩、粗なる黒砂
Greenwich	12.75	1	1,640	10.0	Thames 河底に建設せらる、粗鬆礫層及緻密なる砂、砂を含む粘土及粘土

丹那隧道では200馬力の電動機で運轉される最高壓力50 封度/□" の低壓空氣壓搾機2臺を設備し其の容量は合計毎分2,700立方呎であつた。この空氣量を決定する爲めに行つた計算を其の工事報告から摘記すると次の様である。

(i) 空氣壓搾機容量の決定

盾溝掘鑿作業に使用さるゝ壓搾空氣消費量を如何に計上すべきか。又其消費量に對して幾何程準備すべきかは空氣作業施工上極めて重大なるのみならず、又其設備費に關係する所尠からざれば其設計に當りては十分に調査し設備後に於て齟齬を來さざらん事を期せり。

消費空氣量中損失の主なるものを擧ぐれば

- (a) 送氣管内損失
- (b) 氣隔閉扉による損失
- (c) 空氣作業場内の換氣による損失
- (d) 空氣作業場内漏氣による損失

の如くにして各々に就きて調査し其容量を決定せんとす。

(A) 送氣管内の損失

送氣管内の損失とは壓力損失を意味するに非ずして送氣管の各継手の不完全なる結果より生ずる漏氣の量を云ふ。之は鐵管の引延作業施工法によるものにして數字により幾何と指示する事は不可能なるも空氣壓搾機容量を決定する上に於て共に考慮すべき必要あり、されど普通は無視するが常なり。

(B) 氣隔閉扉による損失

掘鑿岩石の搬出使用材料の運搬又は作業従事員の通行により空氣隔閉扉せられ、其都度壓搾空氣の損失あり。

(a) 材料氣隔 (Material lock) による損失

1日の盾溝進行豫定4呎6吋とする時は掘鑿立坪1日1坪半、故に16才土運車によりて1車づつ運ぶとするも40車となり、他に材料運搬を加へ60回材料氣隔を開閉するものと假定する時材料氣隔の體積375立方呎にして最高40封度の壓力なる時は1日の使用空氣量は

$$Q_1 = n_1 V_1 \left(1 + \frac{P}{p}\right)$$

$$\approx 83,705 \text{ 立方呎/日}$$

但し n_1 = 扉開閉回数 = 60回

V_1 = 材料氣隔體積 = 375立方呎

又は $q_1 \approx 58 \text{ 立方呎/分}$

P = 使用最高氣壓 = 45 #/□"

p = 大氣壓 = 14.7 #/□"

となる次に

(b) 人氣隔 (Man lock) による損失

人氣隔の通行も各交代時に於て又は中盤時に於て行はるゝも其以外に監督者及び觀察者の隨時に於ける入開並に作業の折々必要に應じ出開する事あるが故に開閉する事多し。但し晝間に比し夜間著しく小

数なるは勿論なり。今1日閉閉数 50 回と假定するに氣閘の體積 124 立方呎なれば1日消費量は

$$Q_2 = n_2 V_2 \left(1 + \frac{P}{p}\right) = 41,000 \text{ 立方呎/日}$$

但し $n_2 = \text{人氣開閉回数} = 50 \text{ 回}$

又は

$$q_2 = 28 \text{ 立方呎/分}$$

$V_2 = \text{人氣開體積} = 124 \text{ 立方呎}$

故に兩氣閘を合する時は

$$q_1 + q_2 = 86 \text{ 立方呎/分}$$

なり。

(C) 空氣作業場内換氣に因る損失

作業場に於ける空氣は呼吸、爆破又は掘鑿土砂の塵埃により汚さるゝが故に常に新鮮なる空氣を送入して清潔を保ち且つ作業従事員の體温、電燈による氣温の上昇を防がざるべからず。

(a) 1人の呼吸は其活動状態により生ずる炭酸瓦斯の量を異にするも隧道にありて平均1人毎時1立方呎と見るも大過なし。又普通新鮮なる空氣と雖も $\frac{3}{10,000}$ の炭酸瓦斯を混入し人畜に有害ならざる炭酸瓦斯の混合比は $\frac{2}{1,000}$ なれば1交代 12 名の従事員同時に作業する時必要な空氣量を毎時 Q_2 とする時は次式により求め得。

$$K = \frac{(m_1 v_1 + C Q_3)}{Q_2} \quad \text{但し } K = \text{有害ならざる炭酸瓦斯比率} \frac{2}{1,000}$$

$$Q_2 = 7,060 \text{ 立方呎/時} \quad m_1 = 1 \text{ 交代人員數} = 12$$

$$q_3 = 118 \text{ 立方呎/分} \quad v_1 = 1 \text{ 人1時間に呼出する炭酸瓦斯量} = 1 \text{ 立方呎/時}$$

$$C = \text{新鮮なる空氣中に含まるゝ炭酸瓦斯の比率} \frac{3}{10,000}$$

(b) 1封度の「ダイナマイト」爆破による炭酸瓦斯の發生は 3.5 立方呎にして1日盾構掘鑿に於て使用する「ダイナマイト」は最高 100 封度と假定するが故に之を有害ならざる程度に換氣すべき1日の空氣の量を Q_4 とすれば次式により

$$K = \frac{(m_2 v_2 + C Q_4)}{Q_4} \quad \text{但し } m_2 = 1 \text{ 日使用「ダイナマイト」數量} = 100^*$$

$$Q_4 = 205,880 \text{ 立方呎/日} \quad v_2 = 1 \text{ 封度の「ダイナマイト」}$$

$$\text{又は } q_4 = 143 \text{ 立方呎/分} \quad \text{爆破により生ずる炭酸瓦斯} = 3.5 \text{ 立方呎}$$

(D) 空氣作業場内漏氣による損失

盾構掘鑿中空氣は常に周囲の地山を通じて漏れ其の量は上述何れのものよりも遙かに大にして空氣壓搾機の容量は殆ど此の量により決定さるゝものなり。されど掘鑿地質により土壤の間隙岩石の裂隙又は湧出水量等各状態に応じて異なるものなれば理論上より決定する事不可能なり。故に實驗によりて測定するを安全とするも其方法簡單に非ずして而も假令實驗によりて一定區間の調査を得ると雖も變化極りなき本隧道に在りてはそれを以て他を律するに足らず故に實際に經驗せる諸國の例を引きそれより決定せり。

掘工の周囲は「グラウチング」を以て固むる爲めに漏氣は大體盾構斷面積に比例するものゝ如し。

今二三の例を擧ぐれば

隧道名	外徑(呎)	機械能力 q_5 立方呎/分	q_5/D^2
Bother hithe	30,000	16,700	18.5
Black wall	27,000	10,000	13.8
P. R. R. Hudson River	23,000	13,200	24.8
P. R. R. East River	23,000	19,000	35.9
Hudson & Manhattan	19,500	4,500	13.7
Baker St. & Water loo	12,810	3,200	19.4
Green wich	12,750	1,600	10.0

の如くにして大體

$$q_5 = 12 D^2 \text{ (多量に損失ある時は } 24 D^2 \text{ /分)}$$

となる。今此實驗式を信頼して我隧道に於ける空氣量を算出せば

$$q_5 = 1,000 \text{ 立方呎/分 (多量の損失ある時は } 2,000 \text{ 立方呎)}$$

大體上記の如くなるが故に消費空氣總量を q_0 とせば

$$q_0 = q_1 + q_2 + q_5 \text{ (} q_1 + q_2 + q_5 \text{ が } q_3 + q_4 \text{ より遙に大なれば } q_3 \text{ } q_4 \text{ は加算の要なし)}$$

$$= 1,086 \text{ 立方呎 (多量に損失ある時は } 2,086 \text{ 立方呎)}$$

故に大體 1,200 立方呎毎分とし (多量に損失ある中は 2,200 立方呎) て 2,700 立方呎毎分を準備す。

4. 壓搾空氣内の作業と潜函病

一般に壓搾空氣の中で作業する工事では其の従事員は往々所謂壓搾空氣病 (Compressed air sickness or caisson disease) に冒される。其の原因は人が壓力ある空氣の中に居る時は空氣は其の壓力に応じて人體に入り、血液又は淋巴液の中に溶解して循環系統内を流動するのであるが、壓搾空氣から大氣の中へ出ると氣壓の降下に從つて餘分に溶解した空氣は體外に放散され、人體内部の空氣量は大氣壓に相當するだけの量となる必要がある。處が出閉に際して急に氣閘内の空氣を抜くか又は徐々に減壓してもその間に何等かの故障があると餘分に溶解した空氣を完全に放散する事が出來ないで、空氣中の窒素が氣泡となつて循環系統を阻害して諸腫の機能障害を起すのである。

この病氣を豫防する爲めには次の様な事項に注意しなければならない。

(1) 専門醫によつて従事員の身體検査を行つて壓搾空氣内の作業に適しないものは絶対に壓搾空氣の内へ入らない様にする必要がある。

(2) 壓搾空氣内の作業時間は普通の作業時間と全く異つた制限を定める必要がある。

米國紐育州で 1922 年に定められた法律によると、24 時間内に 壓搾空氣中 にあつて作業する時間の限度は次の限度を超える事は出来ない。

第 95 表 24 時間内に 壓搾空氣中 にありて作業する時間の限度
(紐育州の法律)

作業室に於ける 壓搾空氣の強度	第一回目の作業時間 (壓搾空氣内にて)	1 氣壓中の休息時間	壓搾空氣中にて第二 回目に作業する時間	24時間中に壓搾空氣 内にて作業する時間
封度/平方吋 0 乃至 20	時 分 4 00	時 分 0 30	時 分 4 00	時 分 8 0
21 乃至 29	3 00	1 0	3 00	6 0
30 乃至 34	2 00	2 0	2 00	4 0
35 乃至 39	1 30	3 0	1 00	3 0
40 乃至 44	1 00	4 0	1 00	2 0
45 乃至 49	0 45	5 0	0 45	1 30

丹那隧道では

氣 壓 lb/□ ²	0 ~ 20	20 ~ 26	26 ~ 30	30 ~ 33	33 ~ 36	36 ~ 39
勞 働 時 間	時 分 7 0	時 分 6 0	時 分 5 0	時 分 4 0	時 分 3 0	時 分 2 0
中 間 休 憩 時 間	1 0	1 0	1 30	2 0	2 30	3 0

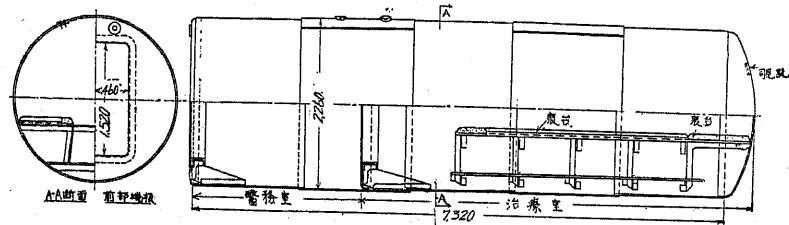
(3) 壓搾空氣内の作業場から大氣中に出る時は徐々に空氣の壓力を減する必要がある。普通使用壓力の $\frac{1}{2}$ に達するまでの減壓は比較的速くしても差支ないが、それから以下に下げる時には極く徐々に減壓する必要がある。

1 封度/平方吋だけ壓力を下げるのに 1 分を要するのが普通である。

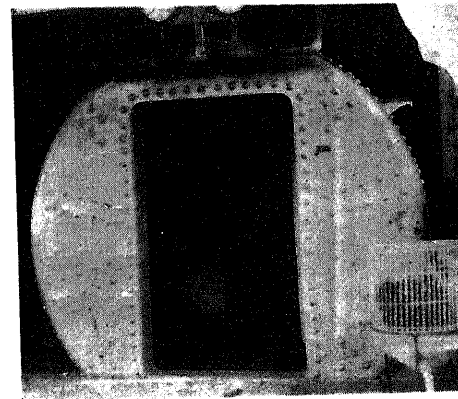
(4) 減壓せんとする氣閘内の溫度が下るのを防ぐ爲めに適當に暖房裝置をなすか作業者に温い飲料等を與へて身體の冷えるのを防ぐ必要がある。

もし潜函病にかゝつたら之を治療するには、患者を作業場と同じ壓力の空氣内へ入れて極く

第 332 圖 丹 那 隧 道 病 院 氣 閘



第 333 圖



徐々に減壓をするのである。この目的で作業場附近に必ず所謂病院氣閘 (Hospital lock) を設備する。この氣閘は普通の氣閘と全く同様な構造になつて居て、氣閘の内部には寢臺、電熱器、其の他の設備が完備して居る。第 332 圖及第 333 圖は丹那隧道で用ひた病院氣閘である。

第 3 節 セメント注入法

1. 目 的

掘鑿中の隧道の湧水を阻止する爲め、覆工完成後の防水をなす爲め、又は覆工の補強をなす爲め、此の方法が用ひられる。

湧水隧道掘鑿を目的として用ふる場合は、豫め鑿岩機又はボーリング機械で穿孔した孔より高壓を以てセメント乳を注入し、これが岩石の間に浸入硬化して水路をふさぐのを待つて掘鑿に着手するのである。

セメント注入に適する地質は火成岩の節理、水成岩の層、其の他岩石の龜裂で其の間に粘土、砂等の介在せざる處である。粘土の中へセメントを注入して其の内部に浸入させる事は不可能であるが、龜裂、層理等のある場合にはそれに沿ふて注入され、附近の粘土を壓縮して全體として緻密な地質に變ずる事が出来る。

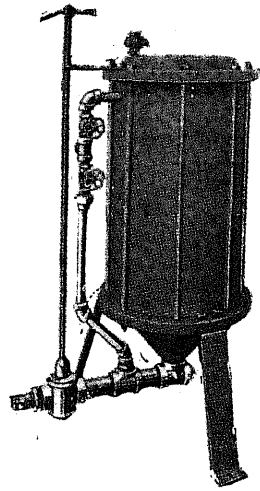
曾つて松島炭坑、常盤炭田等の礦山で湧水防止の目的に利用した事があるが、隧道掘鑿の一工法として大規模に利用されたのは熱海線丹那隧道である。

2. 注 入 用 機 械

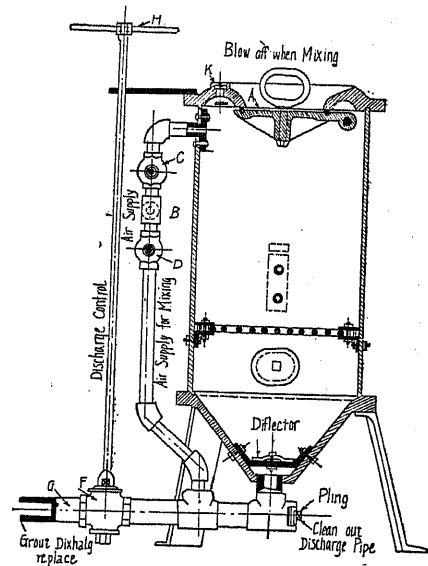
注入機械は二種類に大別する事が出来る。一つは第 334 圖第 335 圖に示す caniff mixer と稱せられる機械の如く、壓搾空氣の壓力によつて注入するもので、他は壓力ポンプを用ふるものである。

caniff mixer は耐壓 100 lb/□²、300 lb/□²、600 lb/□² の三種類のもので市場にある。圖に於て A の蓋を開きセメント、水、砂等の注入せんとする材料を入れ、C、F の弁を閉ぢて D を開くと、空氣は下部の deflector を通じて圓筒内に入り材料を攪拌する。材料が十分に混合されたる時 D を閉ぢ C を開き同時にハンドル H によつて F を開く時は、同筒内の材料は空氣の壓

第334圖 Caniff mixer



第335圖 Caniff mixer 断面圖



- A Door
- B Tee for Air Supply
- C Valve
- D Valve
- E Blow off Cock
- F Discharge Cock
- G Grouting Pipe

高さ 4'~2'
 直徑 1'~10"
 容量 47 ft³

力によつてその下部から吹き出されて注入の目的を達する。この機械は構造が簡単である爲め故障少なく、セメント乳の注入は勿論、砂の如き粗粒の材料をも注入する事が出来る。然し圓筒内の材料を注入し終つた時次の材料を供給する爲めに一應注入を止める必要があるので、作業が間歇的になる爲め一度注入された材料が自己の壓力によつて逆流する憂があり、且つ多量の材料を注入せんとする時には作業能力が不足である。又坑内で使用する壓搾空氣は普通 100 lb/口"であるから 300 lb/口" 又は 600 lb/口" のものを使用せんとする時は特に高壓の空氣壓搾機を設備するか、又は booster を用ひて 100 lb/口" の空氣を更に高壓のものに變ずるかしなければならぬ。これ等の條件を考へるとこの式は小規模の注入作業、即ち隧道に於ては覆工の修繕、補強、又は防水等の目的に用ふる場合に適當であつて、湧水隧道の掘鑿には適しない場合が多い。

次の壓力ポンプによるものは材料を別の攪拌機で混合して、それを連続的に注入し、壓力は注入の進行に従つて上昇させる事自由であつて 1,500 封度乃至 2,000 封度の高壓力を用ひても空氣の場合の如く危険を伴ふ事はない。然し caniff mixer に比して構造が複雑であるから、砂の如き粗粒を注入材料とする事が出来ない。

熱海線丹那隧道に於ける注入作業は専ら壓力ポンプ式によつたもので、最初その西口 4950 呎附近で用ひたものは 100 lb/口" の壓搾空氣によつて運轉され、注入壓力 500 lb/口"、容量 1 分

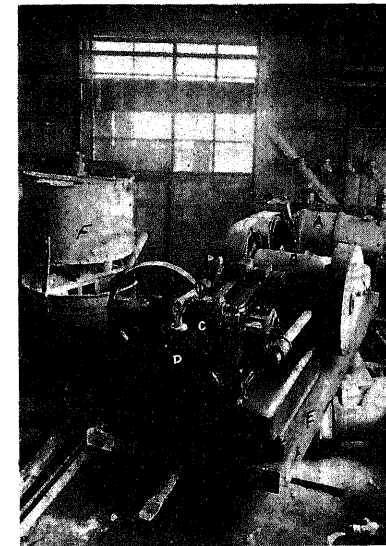
間 5 立方呎であつたが、東口 9000 呎の個所では湧水の壓力 300 封度を越えたので更に高壓の注入機を必要とし、瑞典ダイヤモンドボーリング會社製注入ポンプを取り寄せて使用した。これは先づ電動機によつて壓力水を作り、それに依り更に注入ポンプを動かす様に作られて居る。注入壓力 100 氣壓 (1,500 lb/口")、容量一分間 0.6 立方呎、10 馬力の電動機で運轉された。この機械は機體が大きく、構造が複雑で故障が多く、而も容量が小さいので其の後は全く用ひられなかつた。

次に用ひられたのは第 13 章第 7 節の第 324 圖に示した折渡隧道に使用したシールド用水壓ポンプで、そのブランチャーとヴァルブとをセメント乳による磨耗に耐え得る様改造したものである。

出來上つた注入機械は三聯式水壓ポンプで、最高壓力 2,000 lb/口"、容量毎分 3.2 立方呎、20 馬力電動機に直結運轉された。使用の結果は前に述べた諸機械に比し遙かに好成績であつたが使用回数が多くなつて、各部が磨耗するにつれ故障多くなり、その修理に多くの時間を費すようになった。

以上の種々の機械を用ひた經驗から最後に作り出されたのが第 336 圖に示す横型往復運動注入ポンプで、鐵道技師神津康人氏の考案設計になり横型である爲めに場所を取らず坑内

第 336 圖 横型往復運動注入ポンプ



- A 20馬力三相誘導電動機
- B 傳動裝置部
- C Valve box (吐出)
- D 同上 (吸込)
- E 運搬臺車
- F セメント攪拌器

用として適當であり其の他總ての點で最も都合よき注入機械とされて居る。

この機械の主要機能は次の通りで常壓、高壓の二段に切り換へ得る設計になつて居る。

型	式	水平型三聯ブランチャー式
唧筒直徑	76 耗	唧筒行程 150 耗
壓力(每平方)	常壓 40 耗	高壓 105 耗
容量 (毎分)	常壓 0.16 立方	高壓 0.06 立方
回轉數 (毎分)	常壓 80 回	高壓 30 回
吐出口徑	50 耗	吸入口徑 50 耗
電動機	20馬力	

これに所屬するセメントミキサーは第 336 圖 F に示す様に上下二個のタンクよりなり、上の

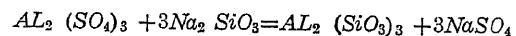
タンクへ材料を投入すると攪拌されてセメント乳となり、底部の濾過用金鋼を通じて下のタンクに入る。タンクの中心には羽根を付した堅軸が通り、これが2馬力の電動機で廻轉されて材料を攪拌混合する様に出て居る。

3. 注入材料

注入材料は主としてセメントを用ふるのであるが、微粒で製造後餘り日數を經過しないものを選び、使用前一度篩にかけて固まりを除く事が大切である。セメント乳が岩石の龜裂の中へ壓し込まれる時急硬セメントの如きものであると充分壓力の加はらぬ中に龜裂の入口で既に硬化し始める事になるので、この種のものには注入には不適當である。ペロセメントは普通のセメントよりも微粒であつて、凝結時間が遅いので注入用として優秀な性質を備へたものであるが丹那隧道で使用した結果を見ると特に相異した點を見出す程でもなかつたので普通のセメントを使用して差支ないものと考えられて居る。

混合する水の量はセメント1に對して3乃至12を普通とする。1:12以上に水の量を増して稀薄な液としても或る程度より狭い空隙には滲入しない。極く狭い裂罅に注入せんとする場合はセメント乳のみによらず他の藥液を併用すべきである。

丹那隧道東口 9,000 呎附近の破碎状安山岩の場合を見ると、3 耗程度以下の間隙は普通のセメントでは充填せられず、瀧の様な太い湧水は止つたが尙細い雨の如き湧水は防止する事が出来なかつた。それで 10,000 呎附近の注入作業の時は、セメント注入に先立つて藥液の注入を行つた。用ひた藥品は硫酸礬土及び硅酸曹達であつて、この二つは化合して膠狀の硅酸礬土となる。



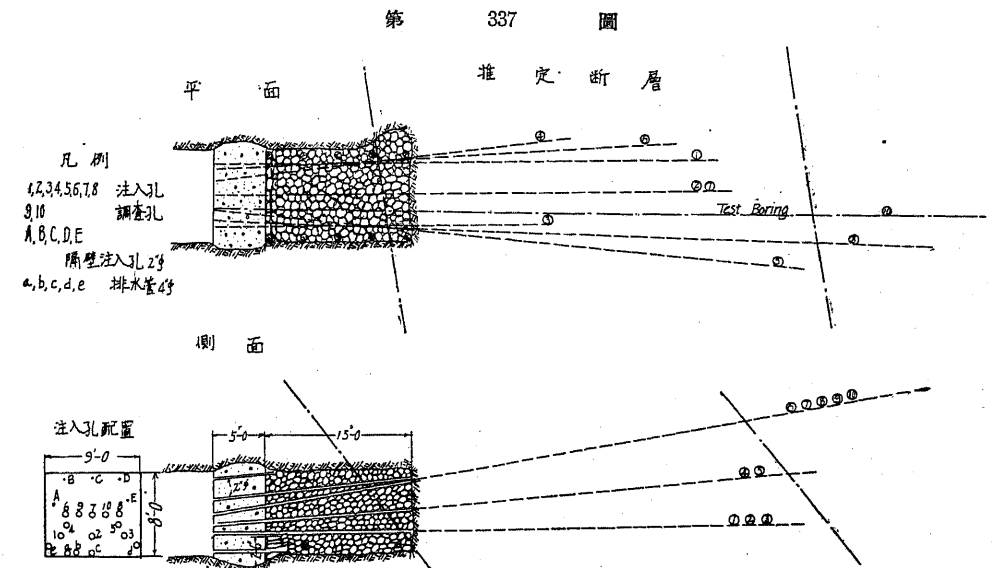
硅酸礬土は膠狀である爲めセメント粒よりは遙かに磨擦少なく、従つて如何なる微少な空隙にも滲入する事が出来る。又これが龜裂の壁面に付着すると後から注入されたセメント乳に對して滑潤剤の作用をなしその滲入を容易ならしめる。

藥液混合の割合は丹那隧道の例では水 100 立に對し硅酸曹達 4 瓦、硫酸礬土 3 瓦位が適當であつて、これ等を混合して化合させた後注入する方法を採つた。

4. 隔壁

導坑の切端からセメント注入をする時に、其の逆流を防止する目的で切端正面に混凝土壁を造る必要がある。この隔壁は注入壓力に充分耐えるだけの強度に造らなければならない。

丹那隧道で隔壁を築造するに用ひた方法は第 337 圖の如く地質の良好な個所を選び設計の隔



壁厚だけ支保工を取り去つて、天井と兩側に當る部分を約 30 糎地山に切り込みを造る。次に切端よりの湧水は土俵で締め切り數本の鐵管で隔壁の下部を通して後方に流出させ、隔壁の部分の水を切るのである。この準備が出来たら隔壁混凝土打ちを施工する。その際豫め注入孔の配置を定めて隔壁正面から切端に達する鐵管を埋設して置く方が便利である。

隔壁が天井に接する處は混凝土を密着させる事は困難であるから混凝土を打ち終つた後 Caniff mixer を用ひてセメント乳を注入して完全に水密にする必要がある。この局部的な注入作業の爲めにその部分の適當な位置に豫め鐵管を埋設して置く。隔壁混凝土及びセメント乳が硬化するのを待つて下部の排水鐵管のバルブを閉ぢると切端の湧水は完全に防止される。

注入せんとする區間が長い場合には 1 個の隔壁より最初の 7~10 米間の注入を行ひ、その硬化するのを待つて、同一隔壁から次の 7~10 米間の穿孔をする。この時は前の注入成績を調査する事が出来て第 2 回目以下の参考となる。穿孔を終つたら第 2 の區間の注入を行ふ。かくして數區間にわけて注入を施し注入済み區間が 30 米位に達したら、その部分を掘鑿して其の終端に近く再び隔壁を築造するのが普通である。

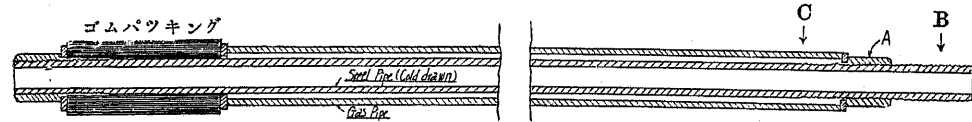
5. 基礎鐵管

基礎鐵管は注入孔中に固定され、注入管と注入孔とを連絡するものであつて、注入壓力によ

つて抜けさぬ様堅固に埋設しなければならない。隔壁の内へ豫め埋設された鐵管はそのまゝ基礎鐵管として利用するが、隔壁築造後更らに注入孔の必要を生じた時、又は切端の岩石が堅固であつて特に混凝土隔壁を作る必要のない時等には基礎鐵管取り付けの必要を生ずる。基礎鐵管を埋設する爲めには大型の鑿岩機又は簡単な試錐機を用ひて穿孔するのであるが、此の際鐵管取り付けに必要な深さまで穿孔して直ちに基礎鐵管を取り付ける方法と、更らに深く注入孔となるまで穿孔し、その入口に基礎鐵管を取りつける方法とある。前の方法は鐵管取り付け個所に湧水なき爲め完全な作業が出来るが、後の方法は穿孔内よりの湧水に支障されて充分な作業が出来ない場合がある。

鐵管を穿孔内に固定するには種々の方法が用ひられて居る。最も簡単な場合は鐵管の先端をラツパ形に擴げて孔内に入れ、周圍にモルタルを押し込んでその硬化を待つのであるが、この方法は主として Caniff mixer を用ふる低壓注入の際に用ひられるので、1,000 封度以上の高壓に對しては不充分である。

第 338 圖 注入鐵管固定裝置



丹那隧道で用ひた方法は第 338 圖の如き裝置を用ひた。これは内管 B と外管 C とよりなり、A を廻轉すると C 管は奥に進まんとしてゴムパッキングを壓迫するからゴムは孔壁に密着し管は穿孔内に固定される。この方法は取り付け取りはずし簡単であるが單にパッキングと孔壁との磨擦にのみ依頼するものであるから多少不完全であつて穿孔が圓形に近いものでないと密着しない缺點がある。

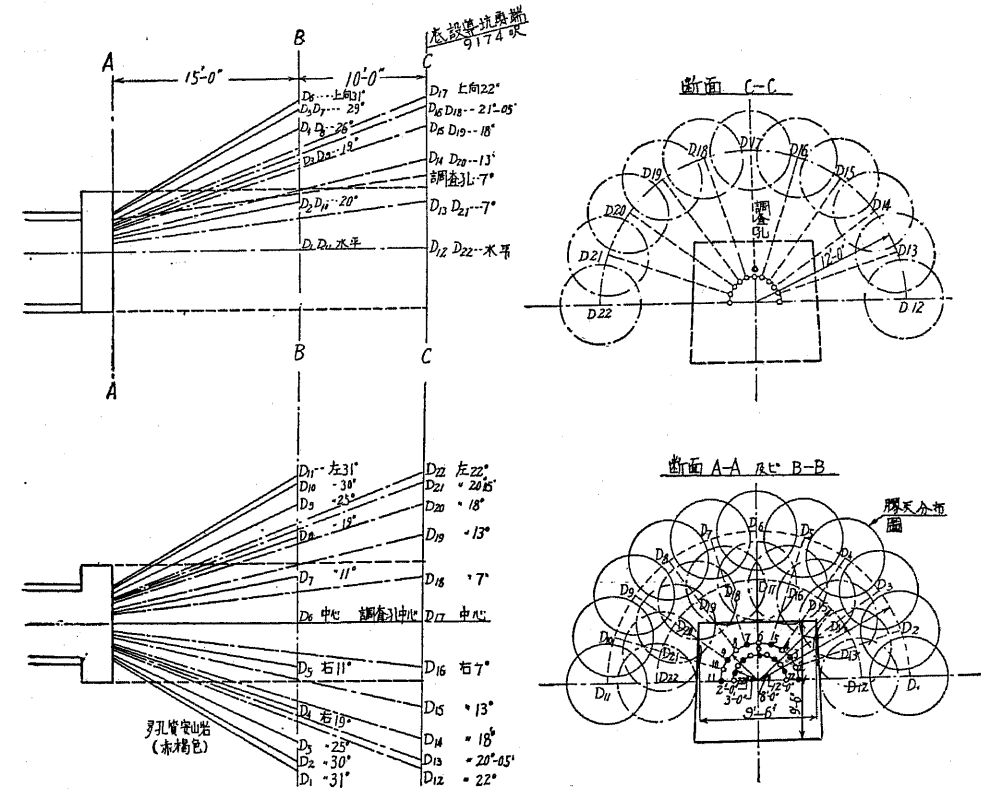
6. 注 入 孔

注入孔から注入された材料の到達する範圍は岩石の龜裂、間隙の大小等狀況によつて著しく異なり大なる龜裂にあつては數十米の遠方にまで侵入する。丹那隧道では其東口 10,000 呎附近の斷層では 20 米を隔てた底設導坑に、又西口 12,000 呎附近の斷層では 50 米を隔てたる南側水抜坑にセメント乳が流出した例もあつた。地山の内部に如何なる龜裂が存在するかを知る事は不可能であるから注入された材料は注入孔を中心として 1~3 米位の半径の圓内に浸入硬化させるものと假定して計畫する。

丹那隧道東口 9,000 呎附近は破碎狀安山岩で、龜裂は無數に發達し、300 封度の壓力ある湧

水をともなつた。この區間約 45 米を前後 6 回に注入したのであるが、初めは浸入範圍を半径 1.2 米と假定し施工したが、その部分を掘鑿した結果不充分なるを發見し後には半径 0.9 米に短縮し第 339 圖の如く配列した。外圓の孔の深さを 4.5 米とし導坑切端から 4.5 米奥で、外圓

第 339 圖 丹那隧道セメント注入孔配置の 1 例



の半径 3.7 米、内圓の孔の深さを 7.6 米とし奥で半径 3.7 米となる様にし導坑の頂部及び側壁の外方 3 米間を硬化せしめる事を目的とした。この例で見る如く注入孔の數、方向、深さは 1 孔の注入範圍の假定と、目的とする硬化範圍によつて定まるのである。

注入孔を穿孔する方法は基礎鐵管の穿孔と同じく大型鑿岩機又は試錐機械によるのであつて豫定の孔數を一時に全數を掘鑿せず約半數を穿孔してそれに注入を施し次に残りの半數を穿孔して前の注入の成績を試験したる上これに注入するのが普通である。一時に全部穿孔したる上注入すれば作業は簡単であるが近くの注入孔にセメント乳が流出してそれが充填される憂があり且つ注入の成績を知る便がない。

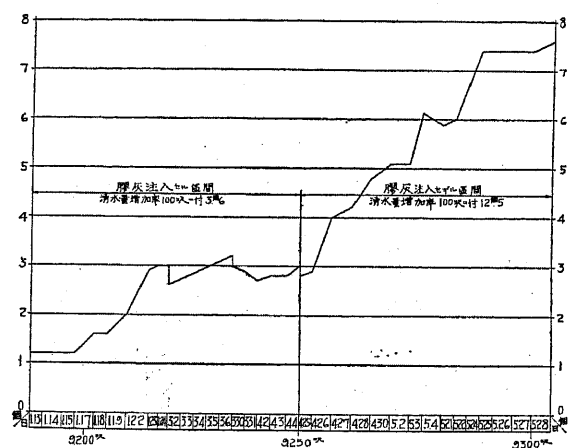
7. 注入作業

準備が完成すると注入機、セメント混合機、注入材料、等を搬入し注入作業に着手する。注入されたセメント乳は水圧と磨擦とに打ち勝つて岩石の龜裂の間に浸入し、遂に注入壓力がこれ等の抵抗に等しくなると壁面に接する部分から沈澱を始め、次第に全部の龜裂が填充される。尙作業を繼續すると注入ポンプの壓力は急に上昇を始め、注入されたセメント乳中の餘分な水分を押し出す作用をして完全に硬化させる。

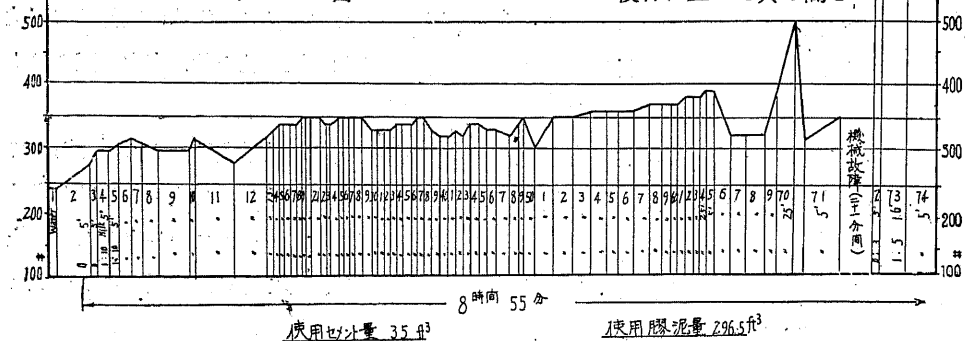
丹那隧道東口 9,000 呎附近でセメント乳のみを用ひて注入した時の成績を見るに第 340 圖に示す如く最初 300~400 封度の壓力で大部分のセメント乳が注入され、それよりは壓力は漸次上昇し 700 封度を越ゆる頃より急騰して 1,000 封度以上に達する。これを以て見ると一個の電動機を用ふるものとすれば初めの間は壓力は低くとも注入量多く急速に龜裂を充填する方がよく最後の仕上げには容量の大なる必要なく壓力の高い事が望ましい。前に述べた丹那隧道の新型注入ポンプは此の條件を満足する様に作られたものである。

かくして注入を行ひ後日に至つて其の間を

第 341 圖



第 340 圖



掘鑿した結果は第 341 圖に示す様に注入區間なる 9,200 呎~9,250 呎間は 9,250 呎~9,300 呎間に比し湧水増加の割合少なる事が證せられた。前區間は裂罅多き安山岩で後區間の集塊岩に比し湧水甚しく増加する筈なるにこの結果となつたのは明らかに注入の効果によるものであつて、この區間を注入する事なしに掘鑿したら同隧道の他の個所の例から推して水壓の爲め崩壊を起した事と想はれる。

又東口 10,000 呎附近で行つた薬液及びセメント乳注入の結果は極く細小な裂罅まで完全に充填され一滴の湧水もなく、掘鑿に際し殆んど支保工を要せざる程度であつた。

此の區間の地質不良個所は約 12 米であつて、これを 2 回に分けて注入したので其の第 1 回の結果を見ると 8 本の注入孔に注入されたセメントは 238.3 樽で其の中第 8 孔にのみに 207 樽注入された。