

青函トンネルにおける止水注入について

正 員 横 山 章

1. ま え が き

海底にトンネルを掘さくする場合、技術的にもっとも問題となるのは湧水が存在であり、特に地質の軟弱な箇所における海水の浸透である。我々が陸上で山岳トンネルを掘る場合でも、地質の悪い所で多量の湧水に遭遇するとしばしば大きな事故をひき起したり、そこを突破するのに多大の時日を要している。山岳トンネルではこのような場合、多数の水抜坑道を掘さくして、山の湧水を枯渇させ、湧水圧を下げて突破に成功している。しかし海底トンネルにおいては通常、湧水は無限のリザーバー

を持つ海水であるので、水抜きによって枯渇させることはできず、どうしても湧水を止めなければならない。従って青函トンネルの調査工事においては、この止水工法の研究が最重点の一つとされてきた。

調査工事は昭和39年に始められ、現在本州方、北海道方とも種々の調査、研究を行ないながら調査坑を掘進している。ここでは、今までの調査坑掘進中の止水注入の状況とその問題点について報告したい。

2. 青函トンネルにおける止水注入の概況

(イ) 止水注入の方法

表—1 注 入 用 機 械 諸 元

さ く 岩 機	名 称 形 式	ガードナーデンバー DH—99 回 転 打 撃 式 (ライフルバー式)	ガードナーデンバー PR—123 回 転 打 撃 式 (独立回転式)	
	ピ ス ト ン 径 mm	102	114.3	
	ス ト ロ ー ク mm	73	75	
	全 長 mm	756	978	
	重 量 kg	65	131.5	
	ロ ッ ド	25mm 6 角×1500	32mm 6 角×1500	
	フ ィ ー ダ ー	スクリューフィード	スクリューフィード	
	ガイドセル全長 mm	2,959	2,959	
	〃 重量 kg	75.7	94	
空 気 消 費 量	4.75m ³ /分	8.15m ³ /分		
現 有 台 数	8 台	8 台		
注 入 ポ ン プ	名 称 形 式	ヤ マ ト HFV—2 B 定圧力可変流量式 油圧駆動	ヤ マ ト HFV—2 A B 〃	ヤ マ ト HFV—C 〃
	圧 力 kg/cm ²	10~120	5~87 5~118	30~130
	容 量 l/min	45~0	96~0 71~0	200~0
	ピストン径 mm	57	65, 57	100
	回 転 数 rpm	0~20	0~26	0~27
	原 動 機 P S	15	20	30
	口 径 mm	吸込 40A 吐出 32A	吸込 40A 吐出 32A	吸込 65A 吐出 40A
	重 量 kg	1010	1010	2515
	現 有 台 数	4 台	8 台	4 台

表—2 調査坑注入実績表

調 査 坑		注入 回数	所要 方数	さく 孔数	延孔長	平均 孔長	注入 孔数	最 終 注入圧	セメント グラウト量		薬液 グラウト量		全セメント量		空隙充填量	
									全数	1孔当	全数	1孔当	全数	1孔当	全数	1孔当
本 州 方	斜坑 m 1,315	47	1,971	2,668	61,226	23.0	2,460	20~90	7,313	3.0	2,716	1.1	2,848	1.2	3,556	1.4
	水平坑 m 87	4	554	417	11,689	28.0	384	70~100	2,574	6.7	219	0.6	764	2.0	733	1.9
北 海 道 方	斜坑 m 1,210	16	559	334	9,598	28.7	334	18~30	250	0.7	4	0.0	56	0.2	40	0.1
	水平坑 m 1,680	13	207	121	4,386	36.2	121	60~95	1,299	10.7	—	—	450	3.7	300	2.5
	補助坑 m 951	6	88	55	2,130	38.7	88	40~65	523	9.5	—	—	178	3.2	118	2.2

(注) 空際充填量はセメント注入の場合、セメント量 1.5 t で 1 m³ とし、薬液注入の場合はグラウト量の 70% とした。

現在、調査坑の掘さくに当っては、坑道の両側に適宜横坑を設け、そこから長さ 600m~800m の水平先進ボーリングを実施して、事前に地質の概況、特に湧水および破碎帯の状況を把握し、止水注入を要する場合はその手前で、カバーロックとして 5~10m の地山を残して坑道の掘進をとめ、その切羽から数本ないし数十本の注入孔をうがってセメント又は薬液を注入している。これを切羽注入とよんでいる。

さく孔にはガードナーデンバー社製の PR—123, DH—99 などの大型さく岩機を用いており、さく孔長は長くとも 40m 程度までである。

注入用のパッカーには硬質ラバーを利用したエキステンションパッカーを用いており、高圧窒素ガスを用いるエアパッカーも一部使用したが、まだ試験の段階を脱しない。

注入ポンプは油圧駆動の可変流量型を使用している。現在使用中の主要機械の性能は表—1 のとおりである。

注入材料はセメントミルクを主体とし、一部 LW および尿素系樹脂を使用している。セメントはペロセメントより更に粒度の細かいコロイドセメントを使ってよい成績をあげている。LW および尿素系樹脂は破碎帯など浸透性を要求される個所に使用している外、LW はセメン

トミルク注入の終了直前に使用してパッカー撤去を早くしている。

(ロ) 調査坑における注入実績

表—2 に本州方、北海道方の各調査坑における切羽注入実績をしめす。これは各調査坑における地質状況およびそれに対する注入特色をよく表わしている。すなわち本州方斜坑の湧水区間は大部分堅硬な安山岩であって、注入は堅岩の亀裂からの湧水防止と数ヶ所のかかなり顕著な破碎帯における止水注入とから成っている。切羽をとめて注入すること 47 回の多きによび、1 回当りの所要方数も 42 方、注入孔数も 50 数孔と比較的多いが、1 孔当りの空際充填率は 1.4m³ で少なく、みずみちが複雑であることをしめしている。

本州方水平坑はまだ延長も短かいが、地質は凝灰岩でかなり複雑な破碎帯が続いているので、注入 1 回当りの所要方数、注入孔数も多く、入念な止水注入を行っている。

北海道方の地質は新第 3 紀の凝灰岩で、湧水は大部分堅岩の単純な割目からのもので、比較的少い孔数、所要方数で止水の目的を達している。1 孔当りの空際充填率は多い。斜坑の止水作業は注入を始めた初期の試験、練習の時代のもので、作業能率は悪かった。

(ハ) 注入による止水効果

表—3 先進ボーリング注入による坑道の止水効果
(吉岡方水平調査坑 1,570m～1,700m 含水帯)

イ) 先進ボーリング時の地山透水係数

料 程	ボーリング名	孔 長 (m)	孔数	湧水量 (ℓ/分)	地山の平均透水係数 cm/sec
^m 1,573～1,675 (坑道右側)	B11—1	190	1	767	3.7×10^{-5}
^m 1,570～1,624 (" 左)	B12—1	54	1	430	7.2 "
^m 1,624～1,646 (" 左)	"	22	1	700	28.9 "
^m 1,646～1,730 (" 左)	"	84	1	360	3.9 "
^m 1,625～1,663 (" 左側上方)	B12—1'	38	1	498	11.9 "

ロ) 切羽止水注入時の地山透水係数

料 程	注 入 名	孔 数	湧 水 量 (ℓ/分)	
^m 1,570～1,590	第23回注入	5孔	202	4.6×10^{-5}
^m 1,590～1,600	24 "	15"	81	5.8 "
^m 1,600～1,626	25 "	13"	24	1.6 "
^m 1,626～1,641	26 "	17"	80	10.0 "
^m 1,641～1,661	27 "	15"	76	5.0 "
^m 1,661～1,680	28 "	13"	66	3.1 "

表—4 切羽注入による止水効果

イ) 北海道方水平坑1,540m～1,700m (水深40m, 土かぶり232m)

位 置	注 入 名	孔 数	地山の平均透水係数		注入効果 B/A
			注入前 (A)	注入後 (B)	
^m 1,544～1,570	第22回注入 (水平坑第6回)	5 孔	0.9×10^{-5} cm/sec	0.3×10^{-5} cm/sec	0.28
^m 1,570～1,590	23	5	4.6 "	1.7 "	0.37
^m 1,590～1,600	24	15	5.8 "	0.2 "	0.03
^m 1,600～1,626	25	13	1.6 "	0.6 "	0.37
^m 1,626～1,641	26	17	10.0 "	0.2 "	0.02
^m 1,641～1,661	27	15	5.0 "	0.2 "	0.04
^m 1,661～1,680	28	13	3.1 "	未計算	

ロ) 本州方斜坑794m～849m (水深4m, 土かぶり142m)

^m 794～810	第17回注入	108 孔	17.2×10^{-5}	1.5×10^{-5}	0.09
^m 810～825	18 "	38	14.6 "	0.5 "	0.03
^m 825～849	19 "	37	4.5 "	1.0 "	0.21

ハ) 本州方水平坑11m～65m (水深26m, 土かぶり243m)

^m 11～41	第1回注入	39 孔	3.1×10^{-5}	0.01×10^{-5}	0.00
^m 41～48	2 "	39	10.3 "	2.4 "	0.23
^m 48～65	3 "	77	76.8 "	0.02 "	0.00

3. 断層破碎帯の注入—特に本州方斜坑1,223 m破碎帯注入

堅岩の割目からの湧水を止めるのは容易であって、日数も少く、問題も少い。しかし、湧水圧の高い破碎帯における注入作業は確実な止水効果が強く要求されるのに、注入作業は技術的にもむづかしく、多くの困難を有している。海底トンネルでは陸上トンネルのように水をぬくことによって湧水圧を下げることはできないので、注入にはそれによって団結された破碎帯が、掘さく時この高い水圧にたえられるような強度と確実さを有することが要求される。

本州方斜坑1,223 m破碎帯は、調査坑で遭遇した最大の破碎帯で、44年2月大きな出水事故を起し、突破に約半年の時日を要したのである。

この破碎帯は斜坑890 m地点右側に設けられたB—3横坑から行われた先進ボーリングで予めその位置が確められていたので、その手前の1,217 m地点で切羽をとめ、第42回目の切羽注入を行った。41の注入孔をうがち、LWを主体とした約300 m³のグラウトを注入して、チェック孔により止水を確認した。しかしこれより掘さくを開始して約6 m前進したとき、切羽左側より破碎帯が現われ、約1 m³/分の湧水をみた。高い水圧のため鏡が押出され、湧水は次第に増えて最大11 m³/分に達し、斜坑は切羽から150 m手前の大ポンプ室まで水没した。ポンプを増強して排水後、崩壊切羽面にバルクヘッドコンクリートを打設した。そしてまだ残っている5 m³/分程度の水を止めるため、36孔の止水注入を行なった。これはLWを主体として約20日間で完全に止水に成功した。

次に再掘さくに備えて坑道の周辺を固める補強注入であるが、25～26 kg/cm²という高い水圧にたえられる注入ゾーンを形成するには、強度の高いセメント注入を主体とすることとし、注入範囲も坑壁より10～12 m外側まで広げることとした。また坑道外周に沿った注入孔には鉄芯（パイプ又は古ロッド）を挿入して、これにセメント注入しておけば、破碎帯の補強になるとの意見もでて23孔ほど実施した。なおセメント注入の後から、浸透性のよいLWおよび尿素系樹脂を注入した。アルカリ性LWと酸性の尿素系注入剤との併用には疑問もだが、試験

室の実験で影影のないことを確かめ実施した。事実その後の掘さくの状況をみてもLWおよび尿素系注入剤はよく破碎帯内の各所に浸透し固結していた。表—3にこの注入の実績を示す。

注入をどこで打切って掘さくにかかるかは最も頭を痛めた所であったが、数本のチェック孔をうがってこれらが次の条件を満足すればよいこととした。

① チェック孔をPR—123さく岩機でさく孔後、24時間経過しても注入孔が崩壊しないこと。

② さく孔終了後および24時間経過後、1孔の湧水が20 ℓ/分以下であること。

③ さく孔24時間後に注水試験を行ない、注水圧50 kg/cm²で注水量が40 ℓ/分以下であること。10孔のチェック孔のうち、この基準に外れるものはなく、注入を打切って掘さくにかかることとした。

次に掘さくに先立って、注入ゾーンの外側にかかっている強大な水圧を少しでも減らそうと、その外側5～10 mの距離に21本の水抜孔をうがち、ケーシングを挿入し孔の崩壊を防いで毎分9.5 m³の水をぬいた。その結果25 kg/cm²の湧水圧は17～18 kg/cm²に減少した。水抜きは掘さくが終るまで続けられ、総量で約80万 m³におよんだが、時間的経過による水圧の減少はみられず、この湧水は直接海水の浸透であると思われる。

掘さく工法は最も慎重な周壁坑道方式を採用した。これはトンネルの周辺に小さな導坑を掘り、掘さく後直ちにこれをコンクリートで埋めもどしこのコンクリート柱でトンネル周辺を固め、最後にトンネル内空部を掘さくするものである。支保工の設計に当って地圧の想定が問題であった。トンネル外周8 mの範囲の破碎帯が注入によって、内部摩擦角30度に改善されたとしても、2 m×2 mの加背の導坑周辺には20 t/m²の地圧がかかることとなり、200 mmのH鋼を1 mピッチにたてねばならない。矢板も普通のものではだめで、また極力地山をゆるめないうためにも、シートパイルをリブで補強してこれを水平にジャッキで押込む、いわゆるメッセル工法を採用することとした。

このように慎重な工法が計画されたが、実際にこの破碎帯の掘さくにかかってみると、3ヶ月半に及ぶ入念な注入の効果はよく現われていて、破碎帯はピックの爪あ

表—5 本州側竜飛調査斜坑1,223 m附近注入実績

注 入 別	注入孔数	注入量合計	セメントミルク 注 入 量	水ガラス 使 用 量	ユリロックC 指 入 量	セメント 使 用 量	コロイド セメント	普 通 セメント
	孔	ℓ	ℓ	ℓ	ℓ	kg	kg	kg
止 水 指 入	36	850,265	795,745	54,520	—	245,017	98,007	147,010
補 強 指 入	232	1,097,140	1,495,650	119,275	82,155	469,700	331,209	138,491
計	268	2,547,405	2,291,395	173,795	82,155	714,717	429,216	285,501

とが白く残る程度によく固結されており、湧水もなく、従って全部で10本設ける予定の周壁導坑も左右に2本ずつ、計4本で打ち切り、残りは上部半断面、下部半断面に分けて掘さくすることができた。

従来、山岳トンネルで高圧の湧水を伴う悪質の破碎帯に出会った場合は、多くの水抜坑道を掘さくして山の保有している地下水の大半をしぼりとり、枯渇させるか或いは10kg/cm²以下の水圧に下げて初めて破碎帯の突破に成功しており、今回のように17~18kg/cm²もの高圧湧水を残したまま、注入によって破碎帯を補強し、突破に成功した例はなかっただけに、この破碎帯の突破の成功は今後の海底掘さくに大きな自信を与えた。

4. 止水注入の問題点

今、我々の止水注入作業に要求されているのは第1にその確実性であり、第2にその能率化である。

(イ) 注入計画

確実な注入を行なうために大切なことは、注入に先立ってその地域性というか注入箇所の特徴をよく把握し

て、適切な計画をたてることである。もとより実際にさく孔し、注水試験を行ない、或いは注入を実施しなければその特性などはつかめないことが多いが、作業前の計画の適否が能率と効果を大きく左右する。注入技能の、うまさだけではカバーできないものがある。

注入作業は極めて時日を要するもので、竜飛斜坑の例によると切羽注入を開始して以来その注入作業日数は全作業日数の80%に達する。この中には若干他作業との重複日数も含まれているので、そのまま注入作業のウェイトにはならないが、この能率化こそ、青函トンネルの工期を支配するものであるといつて過言ではない。そして注入作業の能率化は何といつても計画を適切にして、無駄な注入孔をほらない、最少の孔数で大きな注入効果をあげるようにするのがもっとも肝要なことである。

現在、調査坑の切羽注入では堅岩、破碎帯それぞれに基本的な注入孔の配置を定めておき、先ず2~3孔おきにさく孔し、湧水の状態、その注入状況を観察し、必要に応じてその中間の孔をさく孔することとしている。

(ロ) 注入各作業の検討

表—6 注 入 作 業 比 較 表

注 入 回 数		第28回	29	30	31	32	33	34	35
切 羽 位 置		918.4m	930.8	938.3	942.8	960.8	985.3	1005.5	1020.5
岩 質		石英粗面岩 (玄武岩貫入)	石英粗面岩 (クラック多し)	石英粗面岩 (クラック多し)	玄武岩 (破碎帯)	安山岩 (良 質)	安山岩 (良 質)	安 山 岩 (クラック多し)	玄武岩 (破碎帯)
1 孔 当 り 最大湧水量		300ℓ/分	700	600	150	300	300	600	240
注 入 孔 数		144本	105	90	84	68	84	60	53
グラ ウ ド 量	セメント	7 m ³	25	2	33	120	83	53	0
	LW	158m ³	80	121	164	15	58	144	218
	薬 液	20m ³	14	6	11	0	0	38	3
1 孔 当 り 平 均 長		14.3m	15.0	16.0	18.7	21.6	25.8	21.4	22.7
の み 下 り		25cm/分	23	25	21	13	24	21	24
一孔 当り 作業 時間	穿 孔	47.0分	85.1	82.5	123.8	208.3	145.1	145.8	153.2
	注 入	51.0分	42.8	47.3	65.7	68.1	59.5	84.7	80.9
	パッカー セ ッ ト	38.5分	87.2	58.9	86.5	27.0	30.3	39.2	28.9

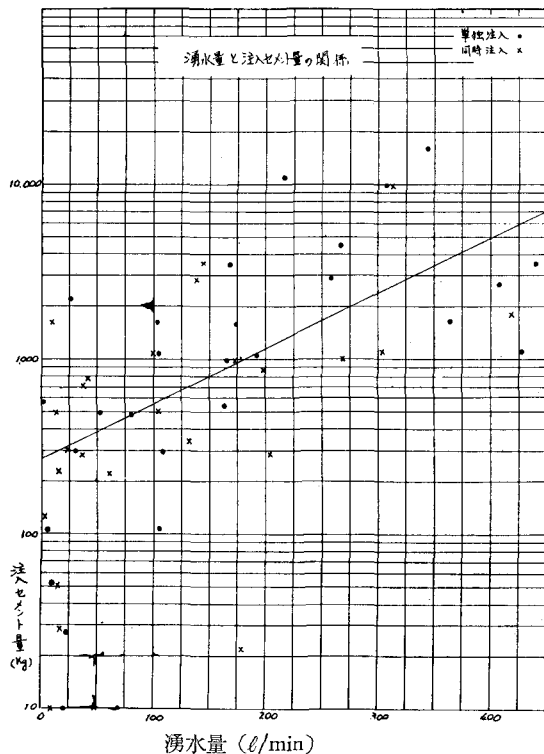
表—4に本州方斜坑の第28～35回の注入作業比較表をしめす。岩質によっては、パッカーセッに著しく時間のかかっている個所もあるが、何といってもさく孔が時間を要している。従って作業能率改善の重点はさく孔にあるので、注入用のさく岩ジャンパーを製作してこの能率化をはかりたいと思っている。

パッカーには硬質ラバーを使用する2重管方式のエキスパンションパッカーを使っているが、岩質の軟弱な個所、亀裂の非常に多い岩質ではセッが完全にできないので、エアパッカーなどを試作研究しているが、60kg/cm²以上の高压注入には実用されるに至っていない。従ってこのような岩質の所ではケーシングを埋込んで注入しているが、これは大変手間のかかる作業である。

注入時間の短縮のためには、先ず小型軽量でしかも注入能力の大きいポンプの開発につとめた。ヤマトHFV—C型、同2AB型はいずれも青函トンネルの要求によって製作された機械である。C型は少し大型なので狭い調査坑では余り用いられていないが、2AB型は手頃な容量、大きさであるので、逐次台数をふやしており、注入の多い本州方調査坑では、4台を同時に切羽に並べて、LWなどの2液注入が2組同時にできるようにしている。

(ハ) 同時注入

注入時間短縮のために、比較的湧水量の似かよった2



図—1

孔以上の孔を同時に一台のポンプで注入するいわゆる同時注入を本州方斜坑の第10～17回注入で実施した。この時の同時注入と単独注との1孔当り注入セメント量の比較を図—1にしめす。湧水量の少い孔では両者は余り差異はみられないが、湧水量の大きい孔では単独注入の方が、同一湧水量の孔で注入されるセメント量が多い。湧水量の大きい孔、すなわちみずみちの大きい孔では、グラウトは先ず大きい割目に入りこれが填充されて小さな割目に入るまでには相当の時間を要するので、セメントは沈降して小さな割目の入口を塞いでしまうものと考えられる。従って現在使用しているHFV—2B又は2AB程度のグラウトポンプでは同時注入は、合計湧水量200ℓ/分以下の孔に一液注入するときには用いてよいと思われる。

同斜坑ではその後2液注入のLW注入を多く用いるようになったので、同時注入は余り用いていない。

第10～17回注入における同時注入では1孔当り注入時間は単独注入の75%程度であった。

(ニ) 注入材料

前にも述べたように、北海道方では比較的にみずみちの単純な凝灰岩への注入が主体であるので、殆んどセメントミルク注入のみである。本州方では斜坑の最初は堅硬な安山岩中の割目注入であったのでセメント注入が多かったが、斜坑900mの破砕帯注入でLW注入を行って好成績を収めて以来、早期凝結による注入時間短縮のメリットもあって、1,223mの断層破砕帯に遭遇するまではLW注入を主体とする止水注入を行なって来た。強大な水圧にたえられる止水ゾーンを形成するには、破砕帯内に強度のあるセメント注入を行なって強固な骨格を作るべきであるという意見もあり、たまたまこの頃、開発していたコロイドセメントが、浸透性、初期強度の点で良好な成績を示したのと相まってこれ以降はコロイドセメントを主体とした注入が主力を占めるようになり、LWは坑道内へのリークの防止とか、パッカーを早く抜くため注入来期に僅か使用されるにすぎなくなった。しかしLWはセメントに比べて浸透性では遙かに秀れているので、小さな隙間にも浸透でき確実な注入が可能であり、もっと使用されてよいと思う。ただセメント分の少いLWは耐久性の点で疑問がある。特に水がガラスを水で薄めたものは海水養生6ヶ月で崩壊しており、重要な注入には用いない方がよい。

表—5にコロイドセメントの規格をしめす。これは日本セメント試作させていた粒径の細かいセメントであるが、実用化の見通しがついたので、規格を定めて各社に製造させている。粒子が細かいので、水ガラスの反応が早過ぎてLWには用いていない。

表-7 コロイドセメント規格(暫定)

項 目		種 類	コロイドセメント A	コロイドセメント B
比 重			3.10以上	3.05 以上
高炉スラグの分量(重量%)			0	30%以下
粉末度	比表面積 (cm ² /g)		5,600以上	5,600以上
	40 μ 残分 (%)		2%以下	2%以下
	15 μ 残分 (%)		30%以下	30%以下
凝 結	始 終	発 結	1時間以後 5時間以内	1時間以後 5時間以内
強 度	曲げ強度 (kg/cm ²)	1 日	30kg/cm ² 以上	30kg/cm ² 以上
		3 日	40 "	35 "
		7 日	50 "	50 "
		28日	60 "	60 "
	圧縮強度 (kg/cm ²)	1 日	110kg/cm ² 以上	110kg/cm ² 以上
		3 日	220 "	200 "
		7 日	300 "	270 "
		28日	420 "	420 "

- (注) 1. 40 μ, 15 μ 残分試験は風ふるい法による。但し、光透過法による試験を参考にする。
2. 試験は製造毎に行なう。但し製作数量が200 tを越えるときは200 tにつき1回の割合で行なう。
3. コロイドセメントAは普通セメント又は早強セメントの原料を使用する。コロイドセメントBは高炉セメントの原料を使用するものとする。

5. あとがき

青函トンネルにおける止水注入の現状と問題点についてのべたが、止水注入は海底掘さくの技術的諸問題の中

で最も重要なものである。確実な注入をより能率的に行なっていくために、我々は更に多くの努力を重ねなければならない。