

講 演

土木學會誌 第十三卷第六號 昭和二年十二月

清水隧道に於ける液體酸素爆藥の試用に就て

(昭和二年十一月五日工學會大會土木部會講演會に於て)

會員 工學士 橋 本 敬 之

On the Experimental Use of Liquid Oxygen Explosive
in the Shimizu Tunnel.

By Yoshiyuki Hashimoto, C. E., Member.

内 容 梗 概

本文は清水隧道工事に於ける液體酸素爆藥應用の成績を報告し且つ一般隧道工事に於ける同爆藥利用の價値を論じたるものなり。

Synopsis

This paper presents the results of experimental use of liquid oxygen explosive for the excavation work in the Shimizu Tunnel and discusses the comparative merits of different explosives for tunnel work in general.

目 次

緒 言	2
液體酸素爆薬の簡單なる解説	2
液酸爆薬の爆岩試験	3
清水隧道排水坑道掘鑿作業の實績	4
一般隧道作業に於ける液酸爆薬利用の價值	6
液酸爆薬の經濟的考察	8
結 論	10

緒 言

1895年獨人リンデ氏は液體酸素の製造法を完成し次で1897年之を爆薬として使用し得るの方法を發表した、之を工業用に供せしは1899年世界最長の隧道たるシンプロンの瑞西口に於て試験爆破を行ひしに始まる、我國に於ては大正12年7月陸軍科學研究所に於て之が試験を開始し超えて同13年春本邦第一の長大隧道たる上越南線清水隧道坑内に於て久村陸軍大佐指導の下に爆破試験を施行せしを以て實地試験の嚆矢とす。液體酸素爆薬が内外共に其の最大隧道に於て應用の端緒を得たるは一奇と云ふべきである。著者は當時東京建設事務所長の職に在て實驗に干與し次でリンデ式1時間10立の能力ある液酸製造機を同隧道口に据付け同15年以來試験的作業を開始するに至りし關係を以て些か該隧道に於ける成績に就て叙述し併せて一般隧道工事に對する利用價值に關し卑見を開陳せんと欲するのである。

液體酸素爆薬の簡單なる解説

先づ順序として液酸爆薬の何物なるやを簡単に説明せんに液酸爆薬とは炭素劑を特殊の紙又は布の類を以て懷爐灰の如き形狀に被包せる劑包と、容器に充せる液體酸素とを別々に用意し使用の直前に於て劑包に液酸を浸漬せしめ、之をダイナマイトと同様に雷管及導火線を附して發破孔に裝填し、填塞をなし導火線に點火して爆破せしむるのである。

液酸の製造は冷却法により空氣を液化せしめ混合物たる液體窒素を揮散除去せしむるのである、空氣を壓縮して急激に膨脹せしむる時は斷熱の下に於て壓力の低下1氣壓毎に空氣の溫度攝氏の0.25度を降下するが之を一度にやると液化の目的を達し難い、然し壓縮膨脹の各階段を長時間反復繼續する時は累次非常に冷却されて遂に大氣中に於ける空氣の液化溫度零下191度に達し空氣は液化し始むるのである。而して混合物の一たる液體酸素の沸騰點零下183度に對し液體窒素の方は沸騰點零下195度なるが故に大部分の液體窒素は蒸發して實際液化槽中に殘る液體は酸素を90%以上含有するものとなり爆薬として適當なるものとなるのである。

液酸は上述の如く沸騰點低きが故に常溫内に放置する時は除々に揮散蒸騰する。故に之が

減耗をなるべく少なからしむる爲めに液酸の貯藏運搬劑包の浸漬には何れも魔法燧と同一構造の二重壁の金屬容器を用ふる。

液酸爆薬の重大なる要素をなすものは劑包である、劑包の内容物たる炭素劑には燐燧、コルク粉、乾燥木粉、風乾せる泥炭等が用ひられ更に爆發の際生ずる發生熱を高むる爲めアルミニウム、マグネシウム、カーバイト等が混加さるゝことがある、爆薬の威力は發生瓦斯量、發生熱量、爆速の大小によりて異なる。而して夫等は炭素劑の成分、配合により適當に加減し得るからそれにより劑包は黑色火薬、鹽素酸鹽爆薬、ゼラチンダイナマイト、プラスチック・ゼラチン等の相當級に製造せらるゝのである。

劑包の威力を完全に發生せしめんには完全燃焼を必要條件とする、従て劑包にはそれに必要な酸素を吸収せしめて置かなければならない、劑包にかゝる必要な酸素量を長時間保液し得れば最も取扱に便利で且つ經濟的であるが不幸にして液酸は絶えず揮散するから之を一定率に保持して置く譯に行かぬ、即ち劑包を液酸中に浸漬すると所要以上に吸収して幾分の後飽和状態に達し更に之を大氣中に引出すと漸次消散して一旦必要量を通過し更に幾分後には全部揮散して元の炭素劑のみとなるのである、其の飽和量、必要量、吸収速度、揮散速度は劑包の種類により異なり、又同一劑包にても炭素劑填實の比重や劑包の徑の大小によつて變て來るのである。一例を擧ぐれば 80% のダイナマイト相當級と言はるゝオキシリキツト會社製 D₀ 劑包は浸漬後 10~12 分で飽和度に達し其の吸収率は炭素劑の 2.8 倍必要率は約 2 倍、鑿孔中に於ける飽和状態より必要状態迄揮散する時間は約 10 分更に飽和より 20 分を經過すれば倍率 0.9 迄揮散する（日立鑛山に於ける試験の結果）。

液酸爆薬の爆岩試験

我國土木工事に對する液酸爆薬の實用價值如何は爆岩效力と費額の二方面より觀察し其の成績を從來の固體爆薬に比較して決定せねばならぬ。一般的に言へば爆岩效力は同一岩質に在ては爆薬自體の威力と作業の性質によつて變化し、費額は液酸製造に要する電力費と劑包の價格に支配せらるゝことが多いのである。

爆薬自體の威力は種々の基本的試験の結果に依れば同等級の固體爆薬に比し寧ろ勝れるを見る。陸軍科學研究所に於ける No. 85 劑包と櫻印ダイナマイトの比較試験の結果を下に掲げんに

試験科目	櫻印ダイナマイト	No. 85 劑包
鉛錘試験（立方體）	365	785
鐵板試験（同上）	94.6	123
銅柱壓縮試験（杓）	4.2	6.0
密閉器内に於ける爆發壓力（疋/平方體）	21.4	31
〃 〃 1 疋の爆薬より生ずるカロリー	1 750	2 979
爆速（米/秒）	4 800	5 400

(液酸の爆速は試験毎に不同あり、比較的信頼し得るものを採りしが如し)。

爆岩効力は爆薬自體の威力よりは寧ろ作業の性質、狀況等により支配せらるゝ場合が多い、従て固體爆薬に對する之が優劣も試験の都度不同ありて一定の目標を立つること困難なるものがある。比較的好例と認むべき日立鑛山の坑外並に坑内に於ける爆岩力の比較を擧げんに

1. 坑外試験 鑛山の流鏝を掘開する効果(櫻印ダイナマイトを100とする爆破容積の%)。

	爆薬を一定容積に換算せ る時爆破容積による%	爆薬を一定重量に換算せ る時爆破容積による%
<i>D_b</i>	70.4	122.7
櫻印	100	100
プラスチック・ゼラチン	107	103

2. 坑内試験 日立鑛山にては坑内奥深き箇所切羽の内最硬度、中硬度、軟質の岩質を選び、*D_b* 及陸軍にてダイナマイト同等品として調製せる No. 47 及 No. 38 の液酸爆薬を櫻印及プラスチック・ゼラチンと比較せしに

種類	最 硬 度	中 硬 度	軟 岩
	爆薬の相當り起岩容積	同 前	同 前
No. 47	100.4	99.0	80.9
No. 38	71.4	—	—
<i>D_b</i>	—	96.1	95.9
櫻印	100	100	100
<i>D_g</i>	133.5	—	—

以上の試験を通覽するに液酸爆薬は同等級ダイナマイトに比し爆薬自體の威力は約 50% 坑外試験に於ては約 20% 大なるを示して居るけれども坑内に於ては大差なき成績を表してをる。特に硬岩に對してはプラスチック・ゼラチンに比し非常に遜色を示してをるのは注目し値する。

液酸爆薬の爆岩効果が開放せられたる場所より局限せられたる場所に至て低下するのは要するに取扱の複雑なると爆發有効時間の短きに原因するのであらう。而して上記の試験は言はゞ單獨試験で他の作業に支障せられざる場合であるが更に實際作業になれば種々の事情に束縛される故一層能率の低下を招來せざるやの疑がある。次に示す清水隧道に於ける作業実績は何分本邦最初の試みであると且つは液酸の爲め最も都合悪しき條件の下に施行せられたる爲め甚だ不成績であつた、勿論之を以て他を律する譯には行かぬが一般的にも隧道の如き作業には餘り好ましからざる事實を物語るものと思はる。

清水隧道排水坑道掘鑿作業の実績

液酸爆薬を清水隧道掘鑿工事に應用せし一例として本年5月排水坑道掘鑿工事の実績を述べんに、該坑道は本隧道の湧水を坑外に排除する目的を以て着工されたもので隧道南坑門口

より 7304 呎地點の左側より分歧し高 7'-6", 幅 7'-0" の加脊を有するものである。岩質は堅硬稀に見る閃綠岩で鑿の徑 1 1/2" の大型鑿岩機を以て漸く毎分 5" の穿鑿速度を得るに過ぎない。爆薬は櫻印にては威力不足なりし故従來英國ノーベル會社製プラスチック・ゼラチンを使用して居つた箇所である

作業箇所	排水坑道第四號口
實働日數	23日
進行累計	29呎
1日平均進行(1交替)	1呎.26
掘鑿坪數	6坪.85

作業成績一覽

	實働1日に付(平均)	掘鑿1立坪に付(平均)
掘鑿面孔數	18坪.7	79坪.527
孔深延呎	62坪.926	267坪.53
1孔平均呎	3呎.3	—
鑿數大	70坪.11	298坪.111
" 小	1坪.04	4坪.41
鑿岩機臺數	2	—

但し1日1回爆破とす。

液體爆薬使用量及其費額

	數 量		金 額		
	實働1日に付(平均)	掘鑿1立坪に付(平均)	單 價	實働1日に付(平均)	掘鑿1立坪に付(平均)
液酸全使用量	35坪.456	128坪.425	0.372	13.190	47.774
" 實際使用量	15坪.441	55坪.928	"	5.744	20.805
" 揮散量	20坪.016	72坪.498	"	7.446	26.969
割包 D _h 徑 35mm	18坪.478	66坪.929	0.232	4.287	15.528
" " 40mm	45坪.609	165坪.197	0.347	15.826	57.323
雷管八號	28坪.391	102坪.834	0.038	1.093	3.959
導火線(國華)	127坪.519	461坪.888	0.012	1.632	5.912
" 液爆特用	31坪.826	115坪.276	0.018	0.572	2.075
			計	1立坪當り	132坪.571

液酸使用の掘鑿工費

	人 員		金 額		
	實働1日に付(平均)	掘鑿1立坪に付(平均)	單 價	實働1日に付(平均)	掘鑿1立坪に付(平均)
建築工手	1.17	4.25	1.59	1.86	6.758
鑿岩夫	3.44	12.44	3.32	11.421	41.301
坑夫	1.27	4.56	2.70	3.518	12.586
礦出人夫	6.09	22.05	2.02	12.302	44.541

掘替夫及水替夫	人	人	円	円	円
	2.35	8.50	2.07	4.845	17.595
雑 夫	0.13	0.47	1.80	0.234	0.846
			計	1 立坪當り	123.627

以上合計し坪當り費額 256円.198 となる、之に對し同様の状態にある第三號排水坑道口をプラスチック・ゼラチンにて作業せる成績は

實働日數	27日	
進行累計	143米	
1 日平均進行	5米.3	
1 交替進行	2.65	
掘替坪數	31坪.276	
坪當り爆薬 1 切	61円.943	
〃 工費	62円.297	
1 立坪費額合計	124円.24	但し爆破回數は平均 1 日 2 回に當る

兩者を比較するに 1 交替に對する進行 2 倍強に對し 1 立坪費額 $\frac{1}{2}$ 弱に當つて居る、而して爆破回數は 1 交替につき 1 回であるから 1 爆破に對する進行さへ等しければ立坪當りの費額は略同一であると云ふ事も言へるのである。

何れにしても液酸による掘替の費額は餘りに高率に失する、斯くては液酸爆薬は隧道工事に對し本質的に缺點あるやの疑なきに非ざるも少くも此の場合に於ける不結果の原因の大部分は清水隧道特異のもの即ち一時的な原因と考ふるを至當とする、其の主なるものは

- 最初の作業なるを以て技術熟達せず、働作規律等間然する處多し
- 劑包及一切の材料は舶來品を使用せる結果單價高し
- 岩質堅緻に過ぎ此の場合液酸爆薬は威力に於て適當せず
- 過去に於て 1, 2 回液酸不時爆發の事故を生ぜし爲め幾分従業員の恐怖心を惹起せしめ、其の能率を低下せしめたる氣味がある。

一般隧道作業に於ける液酸爆薬利用の價值

清水隧道に於ける成績を以て直に一般隧道に對する價值を問ふことは出來ぬが液酸爆薬は下に列記する諸點に於て儘に従來の固體爆薬に一籌を輸するものがある。

1. 作業の複雑 坑内は暗所に於て作業をなすことなれば液酸爆薬作業はダイナマイトの如く簡單に行かない即ち爆破の現場迄諸器具の運搬、浸漬、裝填等遙かに複雑にして従業者の熟練に俟つものが多い、尙火氣を嫌ふことは火薬以上に電燈照明か、然らずんば數尺以上の距離より照明して居らなければ安全と云ひ難い、之れ亦作業を困難ならしむる一原因である。

2. 時間の制限 劑包を浸漬し終つて之を取出して爆發せしむる迄の時間には制限があるが此の制限は比較的短時間にして通常徑 40mm、長 300mm の劑包で 6 分乃至 10 分を適度とする、此の時間内に裝填、填塞、點火、運搬容器を持ちて逃避等の作業を終ることを要する

爲めに相當急ぐことになる、爲めにダイナマイトを使用する場合に比し同一の熟練度ではどうしても粗雑になり、従て誤りを生ずる可能性あることは免れない。

3. 1本の爆發故障の全部に及ぼす影響　導坑掘鑿の場合の如く多數の發破孔を同時に爆發せしむる場合には點火の時期を失せんか或は何かの原因で其の中の1本でも故障を生ぜしとせば其の作業は全然徒勞に歸し再び最初より遣り直すか又は故障の裝藥は其の儘とし他の孔のみ爆發する外途がない、假りに遣り直すとすも一旦裝填したる爆薬を抜き出す迄には液酸全部を揮散し盡す迄即ち30分以上放置することを要し尙其の後と雖も孔内には雷管を有し其の際に於ける裝藥の安全度も疑はしいから、かなりの時間と心配を要する、又故障孔を捨て置いて他の孔のみ爆發することも非常に能率を悪くし切羽面が凹凸を生ずることになるから次回作業の妨害となる、殊に心抜などには數本が共同の作用をなし居る故1本不發あれば殆ど起岩せざることがある、故に進行を急ぐ作業にては不利の場合多く就中導坑作業の如きに至ては裝藥重心の關係と相俟て最も不利益である、清水隧道の場合も之が一原因をなして居つたことと思ふ。

4. 水氣ある鑿孔に於ける裝填の困難　鑿孔中に水氣ある場合には液酸爆薬はそれ自身非常に低温のものなれば孔中にて一寸でも停止せしむれば直に孔壁に凍り付き最早動かすに由ない。故に孔口附近で凍り付を起さしめた場合にはそれより奥に裝填することは出来なくなり従て其の孔は放棄せねばならぬ、乾燥せる岩質でも鑿岩機に水を用ふるから常に此の注意を必要とする、又孔中に湧水がある場合には熟練によりて孔底まで裝填したりとするも水の爲め酸素の揮散が猛烈になり或は揮發酸素の壓力で劑包自身が孔中から飛び出し來る場合がある、之が爲めには水と直接の接觸を防ぐ色々な方法もあるが慥に作業を面倒に且つ不經濟に導くことがある、又劑包は使用前に充分乾燥せしめておくを要する、若し濕氣を帯びる時は吸収性不良となり能率を低下するから一旦坑内に持込みたるものを使用せざる時は直に乾燥するか又は坑外に持出す必要がある。

5. 威力の點　液酸爆薬の威力は其の最強と稱せらるゝ D_0 劑包はダイナマイトのニトログリセリンの量80%のものに相當すると云はるゝも爆速の遅いせいから少し硬き岩質に對する實際使用の効力は甲櫻ダイナマイトの上に出でざるものゝ如く、専らプラスチック・ゼラチンを使つて居る清水隧道の如き岩石の而かも導坑心抜などには先以て不適當と認めてよいのである。

6. 裝藥重心の位置　裝藥比重がダイナマイトに比し遙に少ない(D_0 劑包徑35 ϕ ,長300 ϕ ,重量78 ϕ ,發火時の重量は液酸倍率を2倍とせば234 ϕ に對し櫻印は徑32 ϕ ,長200 ϕ のもの250 ϕ)爲めに多量の裝藥は不可能であつて可能の範圍に於ても裝藥重心は孔口に近き故孔尻の殘る程度がダイナマイトに比して多く閉壁面が少なければ少い程此の傾向は烈し

くなる、一體液酸は劑包の徑が大きい程孔壁との接觸面積の割合が少いから揮散量も從て少く自然效力を増す譯である、故に隧道内にも徑の大なる孔を穿鑽すれば旁々重心點も下り効率を高むるの利益があるが一方大なる孔を穿つことは非常に經費を増すことになる、此の點は坑外の切取にては比較的容易に實行さるゝの利便がある。

以上液酸爆薬は隧道工事にては不利益の原因多々あるが如きも實は此の大部分は或程度迄作業者の熟練によつて救済出来る性質のものであつて、更に又一方に於て液酸はダイナマイトに比し種々優越なる利點を持つて居ることを忘れてはならない、其の重なるものは

1. 液酸は空氣と電力とにより造られ又劑包も煤の如き物質であるから何れにしても材料は得易く又無盡藏のものである、故に國家的見地より見れば有利なる爆薬と云ふことが出来る。
2. 學術的の威力は慥に大である。
3. 他の爆薬の様に貯藏、運搬の危険はない、液酸が發達すれば爆力を失ふから取締が容易且つ安全である。
4. 學理的に言へば完爆をすれば CO は出ない筈である、故に作業熟練の結果は爆發後煙を吹かす時間を切りつめることが出来又衛生上にもよい譯である。
5. 作業中の死傷事故は熟練と注意の程度を同一なりとせばダイナマイトに比し少い、現に獨逸あたりでは安全の點より坑夫は此の方を好むと云ふことである。

液酸爆薬の經濟的考察

液酸爆薬自體の費用は大別して

液酸費（製造費及償却、利子）

劑包費

に分るゝ。

1. 液酸費 之は製造機的能力單位と運轉時間によつて大差がある、之等を同一なりとせば動力費の如何によつて非常に高低を生ずる、清水の場合では僅に 1 時間 10 立の小型であつたから割合に不經濟であり又運轉時間が不同であつたから直接製造費にも月によつて大差があつた、例へば大正 15 年 7 月は 1 立當り 0^円.676 なりしが 10 月は 0^円.387 となつてを、假りに晝夜運轉をなしたる場合の經費を出して見ると

種 別	金 額		總費用に對する %
	1 日當り	1 立當り	
動 力 費	21.713 ^円	0.124 ^円	30.0
人 件 費	14.006	0.080	19.5
奇 性 曹 達 補 充 費	0.814	0.005	1.1

製造費	アンモニア液補充費	0.289	0.002	0.4
	注油費	3.000	0.017	4.1
	修理費	1.500	0.009	2.1
	雜費	0.500	0.003	0.7
割掛費	機械並附屬品及容器償却費, 利子	28.176	0.160	33.9
	建物並工事費	2.205	0.013	3.1
	計	72.293	0.413	

以上の説明

動力は1キロ3錢2厘

作業は1晝夜3交代にて従事員は監督者1名, 職工人夫6名

製造機及附屬品代價が51033^円にして10箇年償却と假定す

容器類一切代價10517^円にして5箇年償却とす

以上代價は現時餘程低下せりと云ふ

利子は年6歩と假定す

目下作業中の外國の實例

墨國パチユカ銀山 (Pachuca) に於ける100立製造機の例

1立當り 0^円.149 電力1キロ當り 0^円.014

佐竹鐵道技師の視察報告によれば

南獨フオールバツハ (Forbach) 水力電氣堰堤根掘工事にては25立機にて

1立當り 0^円.131 電力1キロ當り 0^円.017

伊太利マルモ (Malmo) 隧道にては30立機にて

1立當り 0^円.154 電力1キロ當り 0^円.014

2. 劑包

我國にては獨逸品を使用せる爲め非常に高價に當れり

	寸法	重量	1本の價
	耗 40×300	耗 96	円
D_b 劑包	40×300	96	0.347
〃	35×300	78	0.232
墨國パチユカ銀山 (同所に於て製造せり)	28×305	63.5	0.041
	25×305	40	0.031
南獨フオールバツハ工事 (D_b)	40×300	100	0.085
南獨ハイデルベルヒ石灰切出し山 (A_b)	33×300	不明	0.055
伊太利マルモ隧道 (D_b 類似のもの)	40×300	160	0.23

劑包に液酸を浸漬したる爆藥の費用は清水にては

劑包	正味重量	1本當り液酸消費總量	1本當り爆發有効量	劑包及有效液酸重量	1本當り費額
D_6	94 ㉞	0立.62 (液酸比重 1.1)	188 ㉞	282 ㉞	$0.347+0.256=0.603$
ノ	76 ㉞	0立.5	152 ㉞	228 ㉞	$0.232+0.207=0.439$

D_6 35 ㉞ の爆薬 1 本の費額は上の如く 0.439 であるが之に對する有効重量は 228 ㉞ である、一方甲櫻ダイナマイトは陸軍より直接購入の結果市價より低廉にして 1 箱 22.5 ㉞ 代價 31.50 ㉞ に當り、従て 228 ㉞ の費額は 0.319 である、即ち同じ重量にては甲櫻に比し約 4 割の高價に當り、兩者を同等の費額となす爲めには假りに液酸費を同一とすれば劑包の價 0.112 でなければならぬ。

劑包を内地製造とする時は外國の實例より見るも 1 本 10 錢以下に引き下ぐること敢て難事に非ず、又液酸の製造費も場所によりては更に低下し得る望がある、故に爆岩の效力上有利なる坑外岩石切取などには將來利用の餘地最も多きを想像し得るのである。

結 論

液酸爆薬を作業上の見地より觀察するに起岩效率は坑外に於ける岩石掘鑿の場合最も勝れ、坑内にては鑛石採掘の如き場合には相當の成績を擧げ得るが如し、思ふに鑛山にては二開壁以上を有する發破箇所多く又其の中に故障を生じたる箇所ありとするも全體を通じて之を回復し得る可能性多き爲めならん、然るに隧道作業に至ては作業箇所制限あり、且つ種々の作業相關聯せる爲め 1 箇所處の支障は忽ち全體の能率を低下し液酸固有の威力を發揮し難き憾がある、然し外國に於ては伊國マルモ隧道の如くダイナマイトに比し遙に低廉なる費額にて掘進せる實例もあること故熟練と研究の結果は作業の性質による不利益も漸次減殺され遂に如何なる場合に於ても液酸爆薬を有利とする域に達するやも知れず、ダイナマイト原料の大部分を外國に仰ぎつゝある我國に於て特に此の發達を庶幾する所以である。

(終)