

隧道工程學

童大塤 編 著

中國科學圖書儀器公司

出 版

隧道工程學

童大塤 編著

中國科學圖書儀器公司

出版

工

一九五二年七月初版

《定價》 每冊十元》

編

項

出版

儀器公司

中路 537 號

總發行

中國科學出版社

聯合發行所

上海中環路 24 號 304 室

電話 1956 電報掛號 21968

分銷處

中國科學圖書儀器公司

南京：太平路 32 號

廣州：永漢北路 204 號

序 言

開鑿隧道，是鐵道選線工作中縮短距離，削減坡度，和改進線路質地的主要方法。在地勢平坦區域，隧道通常僅作為明壟的比較建築物，或作為路線上的工程點綴品（例如滬寧線上的寶蓋山隧道），但在山嶺重疊，地形複雜的地段，則往往成為無可避免的大型建築物。自公元 1826 年第一條鐵路隧道完成以來，世界上陸續開鑿的隧道，多至不可勝計，而開鑿的技術，也從初期比較原始的方法，逐漸演進到目前相當完善的境地。

鐵路工程司對於開鑿隧道的看法，通常有如下兩種不同的意見。一部份人過份強調了隧道的優點，忽視了牠的缺點，因而在客觀條件不需要的時候，武斷地把隧道代替了其他的比較建築物，增加了鐵路的財力負擔。另一部份人由於實際經驗的缺乏，把開鑿隧道，視為畏途，喜歡用高填，深挖，架谷橋，和禦土牆等比較建築物來減少路線上隧道的數量，因而在地形複雜的地段，增加了施工和養護方面的困難。這些都是鐵道選線工作中的偏向，應當設法加以糾正。我們的正確看法，是要根據客觀條件的需要來決定隧道的開鑿與否。我們既不應該標新立異，把隧道作為路線上的工程點綴品，也不應該故步自封，把牠視作畏途，使路線問題，不能得到合理的解決。

我國以往修築鐵路，多偏重於沿海一帶，因為地形比較平坦，不

需要開鑿大量的隧道，抗戰期間，雖然也曾在西南西北計劃興築了一些路線，但是隧道的數量，依然是非常渺小的。這樣，就使得一般鐵路工程司缺乏開鑿隧道的經驗，因而在無意之中，對開鑿隧道，產生了或多或少的戒懼之心。事實上，通過整體如一的堅硬石層，長度在一公里以下的隧道，開鑿方法，極為單純，即在土壤性質比較惡劣的地段，如其能夠在計劃和施工方面，予以充份的注意，也不會發生任何嚴重的困難。但在另一方面，施工以前必須要有精密的地形測量和詳盡的地質勘查，方能保證隧道工程的順利完成。今後我國新路建設的方針，無疑地要偏重西南和西北，在這種山嶺崎嶇的地方修築鐵路，我們既無法逃避現實，就必須要糾正以往視隧道為畏途的不正確看法，方能減少選線工作中所遭遇的困難，同時通車以後的路線質地，也可以因此而大為提高。

隧道所經過的地層，構造不一，性質亦各不相同，因此開鑿方法，僅能提供若干指導原則，而沒有一套可以完全因襲的統一成法。本書所取材料，除介紹世界各國開鑿隧道的先例外，並儘量吸取國內若干典型隧道的施工記錄，和蘇聯等先進國家的工作經驗，作為我們的參考，但是由於資料蒐集的困難，和文字條件的限制，相信還是不夠完備的，希望國內專家和先進工作者，隨時加以補充，並指正錯誤和缺點，以便陸續加以改正。

本書內容，以鐵路隧道為主。舉凡鐵路上可能遇到的隧道計劃和施工諸問題，本書業已詳加敘述，並儘量連繫鐵道部頒佈的規程，章則，和標準圖件，使理論與實際，能夠密切配合。至於使用特殊方法開鑿的隧道，例如以鑿架法開鑿的水底隧道，或以壓縮空氣法開鑿的流沙隧道等等，由於鐵路上使用的機會不多，同時施工方法

亦與一般開鑿方法完全不同，爲節省篇幅起見，概從簡略，希望國內對於此項工作富有經驗的專家，將來另出專書，以資補充。

本書編寫過程中，承各方面朋友的幫助和鼓勵，特別是北京大學教授金句卿先生寄贈絕版多年的詹天佑先生遺著“京張鐵路工程記略”全卷，同濟大學潘昌乾先生提供很多寶貴的意見，王漢銓及洪建華兩位同志分任本書的繪圖工作，中國科學公司負責同志，特別是顧濟之先生的合作，使本書能夠早日和讀者見面，均在這裏向他們表達衷心的謝意。

編 者

一九五二年五月上海同濟大學

目 錄

序言	i-iii
第一章 緒論	1—8
1-1 定義	1
1-2 隧道史實	1
1-3 隧道開鑿方法	3
1-4 隧道之優點	4
1-5 隧道與明塹或禦土牆之比較	5
1-6 明築隧道之應用	6
1-7 隧道施工程序	7
第二章 地質勘查	9—27
2-1 地質勘查之重要	9
2-2 地質探鑽	10
2-3 探鑽工作述要	15
2-4 土石分類	17
2-5 地下水	18
2-6 岩石溫度	19
2-7 土石性質對於隧道工程之影響	22
2-8 地層構造對於隧道工程之影響	24
第三章 隧道測量	28—44
3-1 精確程度	28
3-2 地面中線之設置	29
3-3 坑井測量	31
3-4 洞內中線之設置	35
3-5 洞內曲線之設置	37
3-6 斷面測量	42
第四章 隧道計劃	45—60
4-1 路線及坡度	45
4-2 建築限界	46
4-3 隧道截面	49
4-4 一般開鑿方法	51
4-5 支撐及襯砌	54
4-6 通風照明及排水	55
4-7 安全措施	56
4-8 實天鐵路隧道計劃	57

第五章 挖鑿工61—95

5-1 土質隧道之挖鑿	61	5-9 炮眼花式	79
5-2 石質隧道之挖鑿	61	5-10 炸藥	82
5-3 鑽眼	62	5-11 雷管	85
5-4 風鑽	63	5-12 炸藥之輸送及保存	88
5-5 鑽桿	68	5-13 裝填炸藥	89
5-6 風鑽支架	70	5-14 爆炸	91
5-7 爆炸原理	74	5-15 電工計算	92
5-8 炮眼深度	78	5-16 檢查及未炸炮眼之處理	94

第六章 裝運工96—138

6-1 人工裝載	96	6-6 機車牽引力及牽引 噸數	108
6-2 機械裝載	98	7-7 軌道	109
6-3 運輸車輛	101	6-8 空車及重車之調動	114
6-4 運輸方法	103	6-9 軌道佈置	118
6-5 運輸機車	106		

第七章 地層壓力119—133

7-1 總論	119	7-4 康曼萊耳公式	127
7-2 倫金氏公式	121	7-5 普洛托提亞郭諾夫 公式	130
7-3 皮亞鮑曼公式	122		

第八章 支撐工134—150

8-1 總論	134	8-5 石質隧道中之大氣隔 離層	144
8-2 木結構支撐	135	8-6 導坑支撐工	144
8-3 石質隧道之木結構 支撐	138	8-7 流動地層導坑支撐工	146
8-4 石質隧道之鋼結構 支撐	141	8-8 截面擴大支撐工	149
		8-9 支撐工各部份之尺寸	149

✓ 第九章 襯砌工.....151—172

- | | |
|-----------------------|------------------------------|
| 9-1 襯砌種類.....151 | 9-9 混凝土之輸送.....165 |
| 9-2 隧道截面.....152 | 9-10 混凝土之灌注.....166 |
| 9-3 襯砌設計.....154 | 9-11 混凝土之機械灌注
方法.....166 |
| 9-4 石料襯砌.....156 | 9-12 混凝土之調養.....168 |
| 9-5 石料襯砌拱圈模型架.....158 | 9-13 灌注灰漿.....169 |
| 9-6 混凝土襯砌.....160 | 9-14 工人避車洞及小車
避車洞.....170 |
| 9-7 混凝土襯砌模型架.....161 | |
| 9-8 混凝土之拌合.....164 | |

第十章 坑井.....173—182

- | | |
|----------------------|---------------------|
| 10-1 坑井佈置.....173 | 10-4 坑井提升.....177 |
| 10-2 石質坑井之開鑿.....174 | 10-5 井底軌道佈置.....181 |
| 10-3 土質坑井之開鑿.....176 | |

✓ 第十一章 石質隧道.....183—206

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 11-1 開鑿方法.....183 | 11-7 辛普倫隧道施工記
錄.....191 |
| 11-2 全面開鑿法.....133 | 11-8 八達嶺隧道施工記
錄.....195 |
| 11-3 分部開鑿法.....185 | 11-9 陝西驛四號隧道施工
記錄.....202 |
| 11-4 中心導坑法.....188 | |
| 11-5 試導山洞開鑿法.....189 | |
| 11-6 鐵道部堅石隧道施
工規則.....190 | |

第十二章 土質隧道.....207—232

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 12-1 開鑿方法.....207 | 12-5 美國法.....281 |
| 12-2 比國法.....208 | 12-6 奧國法.....221 |
| 12-3 德國法.....212 | 12-7 意國法.....224 |
| 1-24 英國法.....215 | 1-28 其他方法.....226 |

12-9 鐵道部鬆石及土質 隧道施工規則.....228	12-10 粵漢鐵路株韶段土 質隧道施工方法.....231
---------------------------------	-----------------------------------

第十三章 通風,排水,照明及工場設備233—253

13-1 通風設備之需要.....233	13-7 坑井積水之處理.....246
13-2 空氣需要量.....235	13-8 抽水機具.....247
13-3 通風方法.....237	13-9 照明.....248
13-4 通風設備.....238	13-10 電力.....250
13-5 地下水之處理.....242	13-11 壓縮空氣機.....250
13-6 導坑排水.....244	13-12 其他設備.....253

第十四章 隧道事故254—264

14-1 隧道事故.....254	14-5 洞身坍塌之實例.....260
14-2 洞身坍塌之原因.....254	14-6 土質隧道施工中 事故.....262
14-3 洞身坍塌之防止.....256	14-7 隧道通車後之事故.....264
14-4 隧道坍塌之修理.....257	

第十五章 工程預算,記錄及計價265—275

15-1 工程預算.....265	15-4 施工計劃及施工記 錄.....271
15-2 定型設計工程數量 及材料數量表.....267	15-5 隧道計價.....273
15-3 完工期限.....270	

參考書籍276

第一章

緒論

1-1 定義 凡用地下方法開鑿，通過地面，河道，山嶺，或其他障礙物，用以輸送客貨，淨水，污水，煤氣，礦產品，或其他用途之人為通道，稱為隧道或山洞。隧道依其使用目的之不同而分別其稱謂；為行駛鐵路列車而設之隧道，稱為鐵路隧道或山洞。根據此項正確而嚴格之定義，凡用露天方法挖掘砌築後，再行覆蓋之人為通道，應不列入隧道工程範圍之內，但為適合目前一般習慣，使名稱通俗起見，得稱之為明築隧道或山洞。

1-2 隧道史實 隧道開鑿，在上古史中，已有相當輝煌之記錄。由於古代帝王及貴族私人意願而興築之大規模陵墓隧道，中外各國歷史上均有發現。史載希臘底勃斯(Thebes)皇帝登基之時，即開始挖鑿一狹長之隧道，自寢宮直達其指定之陵墓。吾國古時，鄭伯亦有隧而相見之說。為採取礦產品而挖掘之隧道，在石器時代末期即已開始，最近非洲及美洲若干新式礦區中，即曾不斷發現此種原始而陳舊之遺跡。遠在耶穌降生之前，隧道已作為給水及灌溉之用，若干古羅馬時代遺留之隧道，迄今尚成為少數新式城市給水系統之一部份。中古時期，由於軍事方面之需要，曾有少數公路隧道之建築，以及地下甬道，自軍事要塞通達戰略上隱蔽地點，以供輸送給養及軍隊進退之用。比較新式之隧道建築，則自十七世紀

末葉方始開始，主要作為運河工程之一部份。公元 1679-1681 年，法國完成長 515 英尺之瑪爾帕斯 (Malpas) 運河隧道，1803 年開始修築聖昆丁 (St. Quentin) 運河上之德隆奎 (Troquoy) 隧道，是為世界上第一座用木料支撐及石料襯砌之隧道。英國在十七世紀末葉，亦曾建築若干運河隧道，其中以海卡塞爾 (Harecastle) 隧道長 $1\frac{1}{2}$ 英里，馬爾斯屯 (Marsden) 隧道長 3 英里為最著名。自蒸氣機車出現，鐵路成為陸上主要運輸工具後，由於事實上之需要，隧道建築已一躍而為近代重要工程之一。公元 1820 至 1826 年間，英國曼鳩斯特至利物浦 (Manchester-Liverpool) 間兩大鐵路隧道相繼完成，奠定隧道工程發展之基礎。嗣後各國均開始大規模建築隧道，使鐵路路線得在崇山峻嶺之間，以合乎標準之坡度及曲度通行無阻，其中最著名者為意大利之辛普倫隧道 (Simplon, 19.8 公里, 1895—1906) 瑞士之聖哥薩隧道 (St. Gothard, 15.0 公里, 1872—1882)，法國之聖尼山隧道 (Mont Cenis, 12.2 公里, 1857—1872)，以及美國之胡薩克隧道 (Hoosac, 7.6 公里, 1854—1875) 等。我國鐵路隧道，因路線所經，地勢比較平坦，為數並不甚多，且大部份長度均在 1 公里以下，比較著名者有廣九線上之畢科山隧道 (2211.63 公尺)，隴海線上觀音堂硤石驛間之四號隧道 (1779.58 公尺)，以及京綏線上之八達嶺隧道 (1091.18 公尺) 等，其中八達嶺隧道為我國鐵道工程專家詹天佑先生所規劃督造，雖在當時物質條件極度困難之下，絲毫未曾假手歐美各國之人力與物力，尤為世人所稱道。第一次世界大戰以後，由於防空方面之要求，各國對於路線跨越河流之衝要地點，着重於水底隧道之興築，以代替目標易於暴露之橋梁，其中以美國之荷蘭隧道 (Holland, 2.8 公里 1921

—1927),及日本之關門隧道(下關一門司,3.67 公里(1936—1942)爲最著名。

1-3 隧道開鑿方法 古代開鑿隧道,均藉人工爲之。通過土質之隧道,大都均用鋤、鎬、鍬、杓及籬筐,獨輪車等簡單工具,以爲挖掘及裝運土壤之需。由於土質之不能自持,挖掘後必須立即加以臨時性之支撐以及永久性之襯砌,施工比較困難,因此在十八世紀以前,土質隧道之使用範圍,遠不若石質隧道之廣泛。開鑿堅石隧道時,使用之工具主要爲鐵錘,鑿子,楔塊及撬棍等。古羅馬人曾利用火力將岩石面燒成赤熱後,用清水或醋水混合之溶液使其猝然冷卻,以加速岩石之崩裂。裝運碎石,以人力使用籬筐,獨輪車等簡單工具爲主,亦有利用水車吊運者。又古羅馬人爲加速隧道工程之進展起見,曾發明在沿線修築直井,斜井及橫井,以增加挖鑿之地點,使隧道完工期限,能縮短至二三倍乃至五六倍不等。古代開鑿隧道,由於工具及其他設備之限制,往往需要大量人工及較長之完工期限,例如羅馬之福撒諾(Lake Fucino)給水隧道,截面寬約6呎,高約10呎,長三哩半,雖在執政官暴力督造之下,亦需動員三萬餘人。歷時十一年之久,始克完成。

中古時代,隧道建築之技術,並無顯著之進步,迄十七世紀火藥發明之後,始將古代傳統之隧道開鑿方法,作一劃時代之改革。火藥之用於隧道開鑿者,首推1679年法國開鑿之瑪爾帕斯運河隧道。自鐵路隧道大量興築以來,隧道開鑿之技術,日見進步,目前除儘量提高挖掘及裝運之效率,以縮短完工期限外,更致力於施工期間安全及衛生條件之改進,以減少可能發生之任何意外事件。開挖

土質隧道，由於隧道內部大量支撐工必須佔用之工作地位及其所發生之障礙，往往使機械化挖土工具之使用為不可能，不得不仍以人力利用簡單工具挖掘為主，但在裝運，支撐，襯砌，通風，照明，排水，溫度控制及安全設備各方面，則已有極為顯著之進步。通過土質十分鬆軟之隧道，或開鑿水底隧道，則可利用鋼板作成之圓筒或鎧架，以壓縮空氣或水力推進挖掘，並即在鎧架保護之下修築襯砌，使整個隧道不受四週土壤壓力或水壓力之影響而勝利完成。開鑿堅石隧道，以利用壓縮空氣推動之風鑽或開山機鑽孔及猛炸藥爆破為最大之進步，最近一百餘年來，其突飛猛晉之成績，已為近世隧道工程建立一相當穩固之基礎，使開鑿隧道，不僅可能，且在若干情形之下，較開挖明塹或修築禦土牆，更為迅速而經濟。

1-4 隧道之優點 總結隧道在建築工程中所居之地位，計有如下諸優點。

1. 在普通情形下，常較其他類型之比較建築物（如明塹，橋梁等）為經濟。

2. 在一般情形下，較其他類型之比較建築物（如深塹、高禦土牆及山坡路線等）易於養護。

3. 在城市中開挖隧道，不需要翻動路面，亦不致因改挖明塹而影響鄰近建築物之安全。

4. 就國防觀點言，對空襲之危險，較目標暴露之橋梁大為減少。

如為鐵路隧道，則尚可補充如下諸優點。

1. 路線長度縮短，坡度及曲度減少，因而使機車牽引力增加，行車時間減少，車輛週轉加速，運輸能力提高。

2. 減少路線上深塹，高架橋，禦土牆等大型建築物之數量，使養護工作簡單而省費。

3. 減少軌道受天然因素侵害之程度，壽命得以比例增加。

4. 避免一切天然災害之影響，如風、雪、雨、沙、邊坡坍塌，及軌道凍害等，因而減少阻礙行車之責任事故。

但在另一方面，鐵路隧道亦有若干無可諱言之缺點，例如：

1. 建築費用，常較增加距離，坡度，及曲線之比較線為大。

2. 需要較長之完工期限。利用人工開鑿之隧道，長度在 500 公尺以上者，通常均需要二年至三年之工作時間，方能工竣通車。

3. 通車後照明，通風及排水等不若明塹之便利。

1-5 隧道與明塹或禦土牆之比較 路線通過山嶺或繞越山坡時，如挖土數量甚大，自以開鑿隧道為唯一解決之途徑，但如路線挖土數量不大，或中線有上下左右移動之可能者，則可將隧道改為明塹，或改為半填半挖與禦土牆之路基組合，如圖 1-1 a 及 b。隧

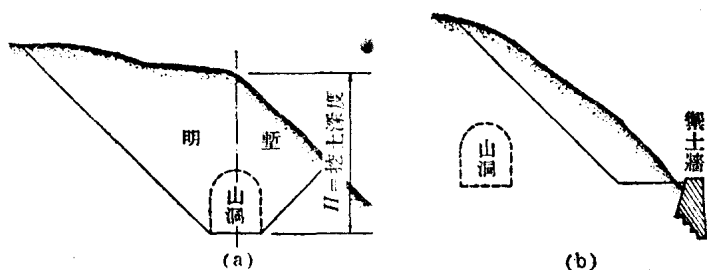


圖 1-1

道及明塹間之選擇，應就經濟觀點及養護觀點兩方面決定之。影響此二者之因素，主要為路線所經過之土壤性質及其地層之構造，

應先予以澈底而詳盡之考查。假定 H 為開挖明塹時之中線挖土深度，如此時每公尺路線之土石方費用與每公尺路線之隧道費用(包括挖掘，裝運，支撐，襯砌等一切工料費用在內)相等時，則就純經濟觀點而論， H 應即為隧道與明塹兩者間選擇時之分界點，挖土深度超過 H 時應開鑿隧道，否則應以改用明塹為宜。路線通過鬆軟土質時，應放棄純經濟觀點，改就養護觀點決定應否開挖明塹，以免雨水沖刷，使兩旁邊坡易於坍塌，必要時可先開挖一段明塹，俟隧道四周襯砌築成後，再用適當之土壤回填覆蓋，作為加建之明築隧道。

H 之數值，就經濟觀點言，土質隧道應較石質為大，但就養護觀點而言，情形適得其反，適如何妥慎選擇，關係極為重大。我國規定，堅石隧道洞口開挖之中心高度 H ，以15—18公尺為宜，如石層傾斜過大，則應以不超過15公尺為度；鬆石及土質隧道洞口開挖之中心高度 H ，以12—15公尺為度，不得過高，以免洞口易於坍塌，清理困難，一經雨季，即有長期阻塞洞口之虞。隧道按照上述原則決定開鑿後，凡挖土深度不及 H 之一部分路線，仍應修築明塹，亦即路線上挖土深度等於 H 時，應並為明塹終止隧道開始之處。

路線於山坡繞行時，如將其酌量提高，降低，或左右移動，往往發生隧道與禦土牆之比較問題。根據實際施工經驗，除非地形及地基特別適合於禦土牆之建築，短隧道實較禦土牆為相宜，以其施工簡便，養護省費，通車後之意外事故，亦可因此而大為減少也。

1-6 明築隧道之應用 路線上有下列情形之一者，應加建或改建明築隧道，以減少通車後養護工作之困難。

1. 隧道工程進行中或完成後，洞口有大量土石方坍塌，難以清理者。

2 兩鄰近隧道之間，有大量沙土沖積，難以清理者。

3. 已成路塹挖方過深，邊坡過高，因積水或地勢關係，有大量土石方坍塌，難以清理者。

明築隧道之施工方法與一般隧道完全不同，除應嚴格遵守土石方施工規則及圬工施工規則辦理外，尤應注意如下諸要點。

1. 施工過程中，應以不妨礙列車之正常運轉為原則。

2. 頂部及兩側回填之土石厚度，應能抵禦石塊自坡頂下墜時衝擊洞身之能力。

3. 隧道附近之淤泥積水，應設法引導旁流，勿使侵及或滲入隧道之內。

4. 如在陡坡上建築，應注意其基礎之穩固性。

1-7 隧道施工程序 隧道施工範圍，包括洞身之挖鑿，裝運，支撐，襯砌，洞門工程，洞外土石方，以及其他一切附屬工程。工程進行之程序，通常可分為如下諸項目。

1. 測量 包括隧道定線，測繪地形圖，設置地面中線及水平標點，自洞門及坑井分向隧道內部引伸中線等工作。

2. 地質勘查 包括延請地質專家視察判斷，或施行精密鑽探，以決定施工之方法及步驟。

3. 工程計劃 包括路線及坡度之決定，並根據地質勘查所得之結果，決定隧道截面形式，開鑿程序，支撐方法，襯砌厚度，以及通風，照明，排水等必要設備之能力。