

141357

C. H. 納烏莫夫

用盾构法及特殊 方法修造的隧道



唐山铁道学院

1958

Тоннели, сооружаемые щитовым и специальными способами

(Подводные тоннели)

Доцент С. Н. Наумов

**Кафедра «Тоннели и Метрополитены»
Таншаньского железнодорожного института
Таншань — 1958**

原 序

隧道工程在中華人民共和國各个建筑工程部門当中是由于國民經濟的需要而迅速發展的一个。

目前就山嶺鐵路隧道的施工規模來說，中國已是世界上居首位的国家之一。

由于铁路網的發展，就必要跨越很多大的水道。解决这些問題的方法，是修建桥梁或修建隧道，这便需要知道水底隧道工程的最近技术。

这份讲义是作者于1956至1957年为唐山铁道学院的教师及研究生講授“水底隧道”課程时所用的一份簡要的講稿。

目前仍然沒有相当充分的闡述有关水底隧道工程的整套問題的文献，这使得学习这门課程时有極大的困难。

在講課中，作者主要想說明設計水底隧道的最近趨向和水底隧道机械化开挖的施工方法的最近趨向。

讲义中反映出了苏联隧道工程的經驗及國外隧道技术的成就。所列述的各种建議，主要適应于苏联的技术規程。

这份讲义並沒有把問題說明得完整无缺，而毫無疑問是有很多缺点的，如蒙指出，作者將感激地接受。

作者認為必須指出，“隧道及地下铁道”教研組和唐山铁道学院印刷厂的成員在籌划与出版这份讲义上所做的大量工作，尤其是翻譯該書並以其建議而改善了該書質量的潘昌实講師同志所付出的細致而誠懇的劳动。

C. H. 納烏莫夫

Предисловие

Тоннелестроение в Китайской Народной Республике является одной из отраслей строительства, развивающихся бурными темпами в соответствии с потребностями народного хозяйства страны.

В настоящее время по размаху работ по сооружению горных ж-д тоннелей КНР занимает одно из первых мест в мире.

В связи с развитием сети ж-д возникает необходимость в пересечении ряда крупных водотоков. Решение этих задач возможно путем устройства мостовых или тоннельных переходов и требует знания современной техники подводного тоннелестроения.

Настоящий конспект представляет собой краткое изложение лекций по курсу „Подводные тоннели“, прочитанных автором в 1956/57 г. для преподавателей и аспирантов Таншаньского ж-д института.

Изучение этого курса представляет значительные трудности, ввиду отсутствия литературы, достаточно полно освещающей комплекс вопросов, связанных с сооружением подводных тоннелей.

В прочитанных лекциях автор попытался изложить современные направления в проектировании подводных тоннелей и технологии их механизированной проходки.

В лекциях отражены опыт советского тоннелестроения и достижения иностранной тоннельной техники. Приведенные рекомендации соответствуют преимущественно Техническим Условиям и Нормам Советского Союза.

Конспект не претендует на исчерпывающую полноту освещения вопроса и безусловно имеет ряд недостатков, указания на которые автор примет с благодарностью.

Автор считает своим приятным долгом отметить большую работу, сделанную по подготовке настоящего издания коллективами кафедры „Тоннели и метрополитены“ и типографии Таншаньского ж-д института и в особенности внимательный и добросовестный труд лектора т. Пань Чан-ши, выполнившего перевод и своими замечаниями способствовавшего повышению качества книги.

С.Н. Наумов

7АТЗ5/15

出版者的話

这份讲义是根据苏联 С. Н. Паумов 專家在我院講課的講稿翻譯出來的。根据教學大綱規定，“用盾構法及特殊方法修建的隧道”（主要是水底隧道）与“山嶺隧道”分开講授，而且在这一課程之后还有“地下鐵道”課程。因此通常所称的“隧道學”將分为三个部分出版。

这是其第二部分。苏联專家 С. Н. Паумов 在这份讲义里搜集了大量資料，包括苏联的先进經驗以及英美各資本主义國家的資料。因此这份讲义对我國教學人員及現場設計与施工人員均会有極大的帮助。

由于出版時間較為匆促，讲义的譯文未加修飾和仔細校对，因此缺点与錯誤在所难免。讲义中插图的大小，因限于制版条件，亦有不一致的感觉，且有些注明的文字亦未加翻譯。希望讀者还多多提出修正意見，以便將來正式出版时有助于該書質量的改善。对提出意見的任何个人及集体均將表示感謝。

讲义的譯者为潘昌笑講師。楊茂林，麥阔曾，关宝樹三位講師負責校对工作。高渠清教授及孙經曙講師在本讲义付印前亦曾閱讀过部分章節，並提出了有关的修改意見。楊茂林講師在插图的編排方面做了極多工作。

讲义的出版联系和籌划者是罗无量同志和劉英智助教，她們为讲义出版出了很多力。

教研組的全体研究生負責了出版校稿的工作。

唐山鐵道學院隧道与地下鐵道教研組

1958年1月1日

唐山鐵道學院印刷厂承印

1958年1月1日出版

1—600册

目 錄

前 言

出版者的話

第一篇 設計部分

第一章 設計水底隧道的一般原則	1
第二章 裝配式隧道襯砌的構造	9
§ 2—1 概論	9
§ 2—2 裝配式鑄鐵襯砌, 鋼襯砌	9
§ 2—3 裝配式鋼筋混凝土襯砌	20
2—3—1 曾經用过的与新建議的構造型式	20
2—3—2 予应力鋼筋混凝土襯砌	30
2—3—3 制备工艺及防水方法	33
第三章 圓形隧道襯砌的計算	41
§ 3—1 圓形隧道襯砌的受力状态、計算圖式的選擇	41
§ 3—2 襯砌按自由变形圓环的計算方法	44
§ 3—3 計入地層側向抗力時襯砌的計算方法	48
§ 3—4 襯砌按彈性介質內的圓环的計算方法	51
3—4—1 襯砌按局部变形介質內的圓环的計算方法	51
3—4—2 襯砌按直綫变形介質內的圓环的計算方法	56
§ 3—5 裝配式隧道襯砌按極限状态的計算方法	62
3—5—1 鑄鐵管片襯砌的計算	62
3—5—2 鋼筋混凝土襯砌的計算	65
§ 3—6 予应力隧道襯砌的計算	76

第二篇 施工部分

第四章 用盾構法修建隧道的要點	86
§ 4—1 概說	86
§ 4—2 盾構法施工的發展簡史	87

第五章 隧道盾構及裝配襯砌的機具設備 91

§ 5—1	盾構幾何尺寸的選定	91
§ 5—2	盾構基本構件的構造	93
§ 5—3	盾構承載結構的計算	98
§ 5—4	盾構的液壓（水力）機具	99
§ 5—5	裝配式襯砌的敷設器	107
§ 5—6	輔助車架及機具	119
5—7	機械化盾構	122
5—7—1	在不穩地層中及在塑性地層中用的機械化盾構	122
5—7—2	在堅固的或岩石地層中用的機械化盾構。列寧格勒機械化盾構。莫斯科機械化盾構（諾賓斯—Robbins—盾構。古明尼克—Гуминик—開挖聯動機）	127
§ 5—8	半盾構	138

第六章 盾構開挖 142

§ 6—1	准备工作	142
§ 6—2	用盾構法施工時開挖面上的工作	152
§ 6—3	在堅硬地層中的開挖方法	153
§ 6—4	在岩石地層中用輕便盾構的開挖方法	161
§ 6—5	在松軟地層中的開挖方法	165
§ 6—6	在不穩地層中的開挖方法	171
§ 6—7	用壓縮空氣的盾構開挖方法	183
§ 6—8	襯砌的裝配工作	197
§ 6—9	襯砌的壓注工作	214
§ 6—10	襯砌的防水工作	220
§ 6—11	盾構的攪縱	224
§ 6—12	非盾構開挖	228
§ 6—13	施工的綜合組織與機械化	236

第七章 水底隧道的特殊施工方法 245

§ 7—1	預制節段沉放法	245
§ 7—2	豎直沉箱法	266
§ 7—3	在人工蓋板掩護下的水平開挖法	272
§ 7—4	在圍堰內用深位置降低水位法的明挖法	275

附錄 I 計算彈性介質中的圓形隧道襯砌的圖解 277

附錄 II 計算混凝土及鋼筋混凝土隧道襯砌時的幾種標征值 281

第一篇 設 計

第一章 設計水底隧道的一般原則

隧道是克服在交通綫路選綫中所遇到的障礙的最有效方法之一。

遇有高程障礙（分水嶺、山脊、丘陵）便需要修筑隧道；而遇地物障礙時（主要是河流、海峽及其他積水空間）則需要在水上跨越與水底跨越之間，亦即在橋梁與隧道之間進行比較。

橋梁與隧道之間的比較是在全面研究了與分析了各種自然上的及技術上的因素以後，在慎密地對各種方案進行技術經濟比較的基礎上來進行的。

對方案選擇影響最大的是：

1. 跨越地點的地形、地質及水文氣象條件；
2. 水道在通航方面的利用程度；
3. 交通綫至跨越地點的引道布置是否方便；
4. 所採用的牽引類型。

當已知隧道在河床之下的容許埋置深度時，當地地形條件便決定隧道引道及隧道本身的長度。對於橋梁則可以說，其高度決定於所要求的橋下淨空。

當河岸不高且河灘極寬時會使橋渡總長度大大增加，尤其是在通航甚密的河流上，要求橋下淨空高達 13.5 公尺以上（I 級水道）。

將綫路設在高路堤或棧橋上，尤其當河的流量變動極大且需要修建複雜的導流結構物（導流堤、突壩等）時，會使橋梁造價大為增加，而在城市條件下則一般還不可能這樣做。

建造位置較低的帶開啓穹變的橋梁能使建築物造價降低，但這不僅在通航上而且在交通綫本身的使用上都會引起不便。

但是上述各條件對隧道跨越反而有利，因為在離河床底面的規定深度上敷設交通綫更為便利，並能使隧道長度縮短。同時，往往能將隧道跨越設在直綫段上，而這一點是最適宜的。

遇有陡而曲折的河岸時，可能需要將隧道引道設於曲綫上，這會引起很多缺點，容以後再講。

水邊極深時對於兩種跨越方案都屬不利，因為一方面必需加長隧道，另一方面在修建橋梁墩台時也會發生困難。水道深度這一因素應該按照當地具體條件加以研究。

地質條件對隧道施工過程影響較大，因為隧道完全位於地層之中，而且大量地層需要挖除。然而橋梁建築物與地基間的接觸只是在墩台處而已，此等墩台的總面積比較起來並不甚大。

当水道河床下面地下水流穩定时，修建桥梁墩台一般不致产生困难。仅在水深甚大时才发生巨大困难，因为难于接近堅固的，可用作地基的岩層，且需要做一些專門的工程措施（例如，長江大桥之桥墩）。

用近代化技术工具实际上在任何地質条件下建造水底隧道均屬可能，且包括水飽和的流沙及淤泥地層在內。这些地質条件对修筑工程建筑物來說是最为不利的。

在这类地層中开挖隧道时，使用特殊的閉胸式盾構压入地層並將部分土石放入隧道。

用这种方法就能提高掘進速度（例如，修建哈德遜河河底之林肯隧道时曾达每晝夜13.5公尺之進度），減低造价和縮短工期。

在同一的地質条件下修建桥梁墩台則在上述各种指标方面都要差些。

水文气象因素对隧道跨越的建造和使用条件不發生重大的影响。然而在这一方面桥梁却处于不利得多的情形之下。

桥梁建筑物应按風力作用，冰及浪的作用檢算，相应地可能要將桥梁重量加大。在修建大跨度桥梁时，桥的寬度是按側向穩定条件來拟定的，因此类此的桥梁上的行車道數目，照例並不是实际所需要的數目。桥梁上所發生过的很多重大事故是由于水文气象因素，尤其是風的作用所引起的。

水道河床的是否改变对桥梁运用的正常条件來說也很重要。經過一段時間之后河道中可通航水路發生位置变化时，桥之墩台会成为通航上的干擾。一般地說由于有桥梁便会減低輪船航行的速度，而且会限制發展通航的可能性，这是因为將船隻淨空尺寸給限定了的緣故。要使用較大的船隻时便可能要求改建桥梁跨越，这便需要大量費用。

在建筑物密集的条件下（这一点是近代城市所特有的現象）修建桥下淨空極高的桥梁往往由于难以修建引道而成为不可能的事，由于修建引道要占用極大的面積且会破坏都市的建築藝術的总体設計。

隧道跨越的引道則是緊湊的且便于与城市建筑情况相適應。这便說明水底公路隧道在大城市中广泛采用的原因（例如，在紐約哈德遜河及伊斯特河之水底公路隧道）。

隧道方案之嚴重缺点在于必需安設強力的通風設備，其通風量則主要取决于所采用的牽引类型。

对于运行頻繁的公路隧道需要特別大的通風量。在这种公路隧道中根据通風条件应嚴格規定各汽車間的最小距离。铁路隧道的条件較有利些，尤其是若改用电力牽引的話。

隧道跨越的另一个缺点要算是必需經常排除滲入隧道的水以及晝夜不停地進行人工照明，这种照明应当滿足逐漸改变光度的条件。

从竣工期限方面來看則应指出，修筑隧道需用的時間較修建桥梁長些，这是因为工作面不多，通常只有兩個开挖面。要增加开挖面便要开挖輔助豎井，且增加投資。

除了研究以上所列举的各种因素外还应该就兩種跨越方案進行造价估算。

此时，隧道方案是隨隧道長度之增加而愈加經濟的，由于初始費用大約保持不变，因而每延長公尺隧道造价得以減低。当用桥梁方案时則一般情形是一延長公尺的桥梁造

价隨跨度之加大而增加。

應該指出，在社会主义經濟的条件下，按造价指标所作的比較並不是決定一切的。

各方案的技術經濟比較是按上述所有因素綜合起來進行的，其中首先要考慮到國家的利益。

从这一方面來看隧道方案則更有利，其重要因素是因隧道在战略上保护良好，即便在極端的情況下仍能保證交通綫的不間斷使用。

隧道中交通綫平面与縱断面所應滿足的要求与明綫地段的要求相同。

最好將隧道設在直綫上，因为曲綫上的隧道有很多重大的缺点，例如：

1. 淨空加寬和相应增加工程數量；
2. 設置隧道中綫时有困难；
3. 若用装配式襯砌則需要特殊的楔形环；
4. 曲綫半徑小时鋼軌磨耗加劇。

然而通至河床引道的地形及地質条件均可能要求綫路偏离直綫方向。

在这种情况下，应尽可能將隧道之一部分設在直綫上，在該段上可用盾構法施工，並用装配式襯砌。此时既不需要使用楔形襯砌構件，也不需要在水底的最重要部分將隧道淨空加寬。淨空加寬僅在于兩岸地段，这些地段設在曲綫上，並可用其他方法施工而与水底段不發生关系。

根据铁路及公路設計規程規定，在 I 級綫路上不应采用半徑小于 600 公尺的曲綫。

水底隧道的縱断面是双坡的，在河床底下有一段或數段坡度小的坡段，視河床縱断面情形为定。

隧道中最小坡度是根据排水条件決定的，不应小于 3%（在極例外的情形下不应小于 2%）。

降雨雪时由洞門流入的水，經由襯砌滲入的水以及冲洗隧道时的水均流至抽水設備（設在縱断面最低处）而抽到地表面。

在明綫中所采用的最大坡度僅用于引綫段以縮短隧道跨越長度，僅在铁路隧道中才需要減緩坡度，且減緩部分並不包括引道的明綫地段。

公路隧道中粘着条件較明綫地段反为有利，因此沒有減緩坡度的必要。

設計水底隧道縱剖面时需要解决的重要問題是：关于水底隧道在河床之下的設置深度問題；关于从明綫引道進入隧道的地点的問題。

为要解决这些問題便需要進行河道的水文調查，並慎密地研究河床底部的地層。

水文調查应提供出有关水道状态的全部概念，在設計隧道时可能需要下列資料。

1. 高水位之歷史最高观测水位（歷史高水位——*BHP*）；
2. 尋常中水位及尋常低水位；
3. 流冰水位及冰移水位；
4. 河床断面深度；
5. 流速及水流方向；
6. 河道的水力坡度；

7. 河道中主要水力参数与水位间的关系;

8. 有关涨潮与退潮的资料。

若修建隧道时须要从河床中的天然岛嶼或人工筑岛来开辟工作面, 或者若用任何一种特殊施工方法施工时, 则可能要用上述数据中的某几种。

300年一次的歷史高水位(BHT)及其可能的超出量在所有情形下均应知道, 因为它的位置便决定着隧道入口处排水溝的最小可能标高, 也就决定着由明引道进入隧道的地点, 也就决定着隧道的最小可能长度。

隧道入口处排水溝应高出歷史高水位至少1公尺, 並考虑到可能有的积水及波浪的高度(Δ) (圖1-1)。

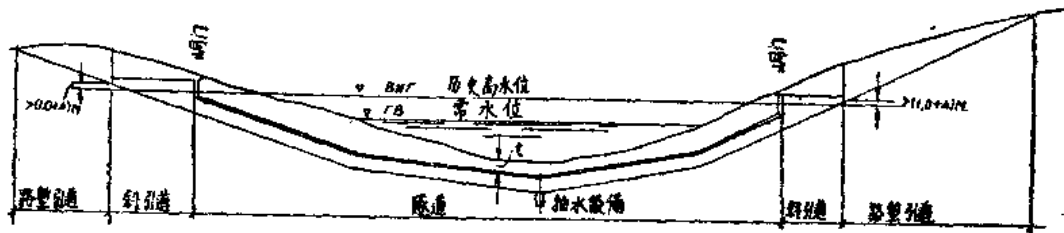


圖 1-1

确定歷史高水位(BHT)时应根据文献及档案资料, 水文站资料, 根据当地漲水的遺跡(在淺灘範圍內考察冲積層的情况), 並詢問老居民。

工程地質調查結果, 便能确定跨越地址的地質条件, 並得知河床受冲刷的情况。根据工程地質調查, 並配合有关河道状态的水文地質資料, 即可作出冲積層有無移动可能及河床底面标高会發生变化与否的結論。这样便得以定出河底最小的标高。隧道位置离此最小河底标高应留以一定距离, 以期可能有的冲刷, 並保証隧道开挖安全的要求, 以及預期由于河道内通航船隻吃水深度之增加而進行的濬河工作。

在水底隧道水底部分之上的保护層厚度方面目前仍沒有已批准的技術規程。

保护層厚度主要是决定于所采用的施工方法。

当用閉胸式盾構开挖时保护層厚度可以小些, 而用普通盾構並用压缩空气开挖时則应大些。在后一种情形中保护層应使压缩空气不能透入隧道开挖面之中。

在这种情况下保护層厚度可如此推求:

通常开挖面中的压缩空气压力是如此拟定的, 使开挖面頂部 $\frac{2}{3}$ 高度內被疏乾。此时在开挖面頂部所形成的, 未为静水压力所平衡的压缩空气压力为:

$$p = -\frac{2}{3} \gamma_w D$$

此处: D —盾構的直徑。

保护層 γ_s 应以其自重來平衡这一过剩压力, 並使安全系数为 K (圖1-2)。

$$\gamma_s = K \frac{2}{3} \gamma_w D$$

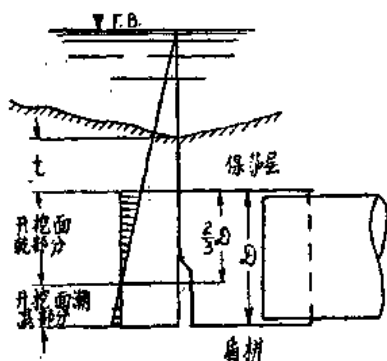


圖 1—2

此处： γ — 在水中懸浮的土壤的單位重量。

安全系數可與穩定系數相似地取為 1.5，則 $t = \frac{D}{\gamma}$ 。

為了減小隧道長度，得儘量提高隧道跨越的標高，亦即儘量減小保護層厚度。

可用下列方法減小保護層：

1. 採用閉胸式盾構。這種盾構可用於沙質及淤泥土壤中；
2. 在河道底面上於开挖範圍內敷設粘土復蓋層以免空氣之可能洩出；

3. 人工沖設沙土島，使之復蓋於开挖施工地區上方，並隨著开挖面之推進而移動該沙土島。

4. 採用特殊修建水底隧道的方法。

水底隧道的橫斷面應符合於現行淨空限界，並根據結構靜力作用情況與條件以及所採用的施工方法來擬定。

隧道之明澗引道地段上設路塹或所謂斜引道，它是一種塹壕，其兩邊牆壁用鋼筋混凝土結構加固，其高度隨路基之漸漸加深而增加（圖 1—3）。

當深度不大時，路塹側壁用鋼筋混凝土擋土牆支承；當深度較大些時鋼筋混凝土邊牆用一鋼筋混凝土共同基腳板聯成一個整體結構物。當路塹深度極大時，在進入隧道之地點以前，上述鋼筋混凝土結構物中可能要再加上鋼筋混凝土撐杆，此等撐杆位於建築物接近淨空限界以上。

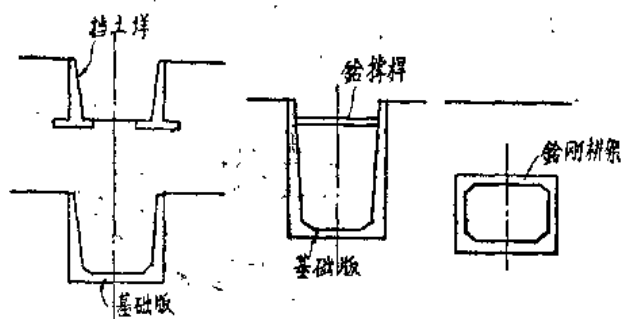


圖 1—3

也可能在明澗壕內修建部分隧道，其後在頂板上用土壤回填。

這種方法當隧道在 15 公尺以內時均可應用，此時隧道襯砌為一密封的矩形剛構架。

河岸地段位置頗深的隧道的斷面的設計方法，與建造山嶺隧道時所採用的方法沒有差別。僅僅要更加注意有關襯砌的防水問題，因該處的防水層在水位抬高時可能與水底隧道所處的条件一樣。

當隧道頂板以上的回填厚度不大時應考慮到隧道之可能浮起，因其排水量極大。在某些場合里需要特地將結構物加重。

隧道水底部分之襯砌通常受到周圍之壓力，這一點便使得圓形結構物最為合適。

圓形輪廓同時又是懸建拼裝式隧道襯砌時最方便的外形，而且在用盾構开挖時必須用圓形襯砌。

圓形輪廓与建築物接近淨空限界形式相差甚大，但由於下述理由它還是更合適的，因為用任何其他形式的襯砌時，由於开挖及拼裝不可免使襯砌漸漸對隧道縱向軸綫發生轉角，會使截面中最危險的各點突破淨空限界。然而圓形斷面對縱向軸綫之轉動則不會影响到隧道內部空間的淨空。

淨空外剩餘的部分則通常用來安設通風渠（公路隧道）或用來安設工作人員的入行便道（鐵路隧道）。

淨空範圍外還安設運用隧道時所必需的設備，包括信集閉及信號，照明設備，安置於混凝土空心磚內的各种電纜，水管等等。

為了減少圓形隧道坑道多余的體積，減低襯砌中產生的內力並簡化施工，在雙綫綫路上宜修建兩個單綫隧道，其間距離以不致在施工中彼此干擾為定。

通常將公路隧道設計為雙車道的，其兩側並帶入行道（圖 1—4）。此時襯砌的尺寸與單綫鐵路隧道襯砌的尺寸相近似。

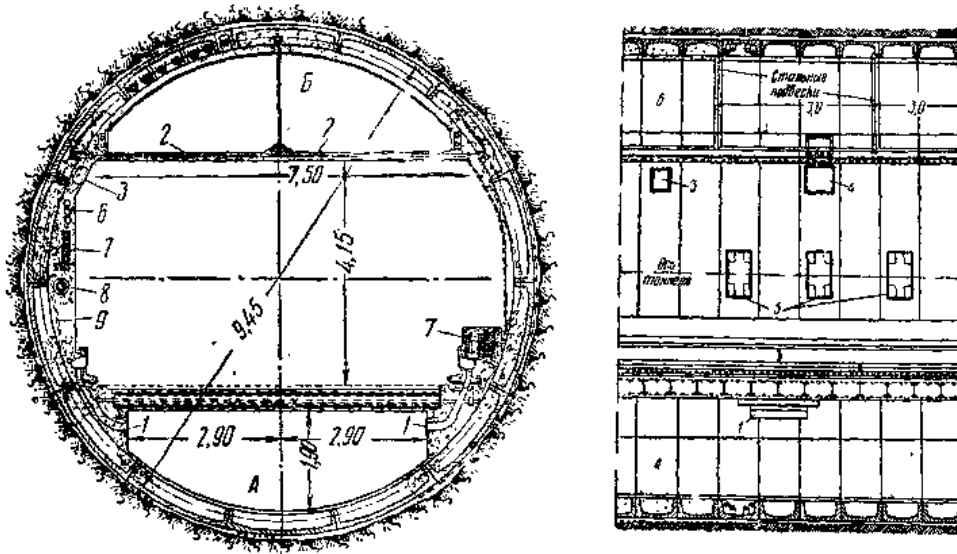


圖 1—4

A—吹入風渠 B—吸出風渠

1—進氣孔；2—出氣孔；3—照明設備；4—信號設備；5—繼電設備；6—低壓電纜；7—高壓電纜；8—水管；9—風渠B之排水管。

將鐵路與公路隧道設在同一截面內，照例是不合宜的，因為會使截面大為增加，且不能充分利用公路上所容許的較大些的坡度，因而也就不能縮短隧道跨越的長度。

對水底隧道不透水方面的要求是極高的，只有極少的例外（如隧道位於不透水地層頗深的地方情形）。

因此修建水底隧道的主要材料是金屬（灰口鑄鐵及型鋼），因能保證使隧道內部空間防水良好。

金屬襯砌通常在內邊灌注混凝土，這便使結構物的剛度及強度增加，並使其重量加大，以避免浮起。

当隧道的受力作用像不穩固地基（流砂、淤泥）上的薄管那样时，应特別注意襯砌的强度。

在普通的情况下，列車重量荷載傳到穩固地基上去，因此对隧道襯砌之应力状态沒有大的影响。

在松軟地層中，隧道在这种荷載作用下于縱方向發生撓曲，其各环節之間發生拉应力，此等拉应力由螺栓承受。因此在很多场合下宜在隧道断面下方部分設一縱向鋼筋混凝土梁，該梁將綫路上部構造包括于其中並參加承受縱向撓曲的作用（圖 1—5）。

由于有这种縱向梁便能均匀分布列車压力並保證結構物在很長地段內共同受力作用。

在淤泥土壤中，因其通常为十分松軟的地基，可能需要修建混凝土樁支承，此种樁的直徑达 1 公尺，能將隧道的压力傳到較穩固的地層上去（圖 1—6）

修建布魯克寧与紐約間橫貫伊斯特河的水底隧道时，便是用的这种結構形式而建成的。

在美國还建成过桥梁式隧道，这种桥梁式隧道能保證隧道結構物在淤泥地層中的足够剛度与强度。在漲潮与退潮时会观察到隧道位置的改变。在漲潮时淤泥受到压缩而隧道發生下沉，在退潮时則有相反的情况。同时，隧道結構物豎向位移的幅度可能是極大的。例如，有一隧道中曾观测

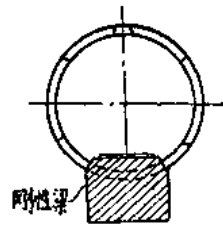


圖 1—5

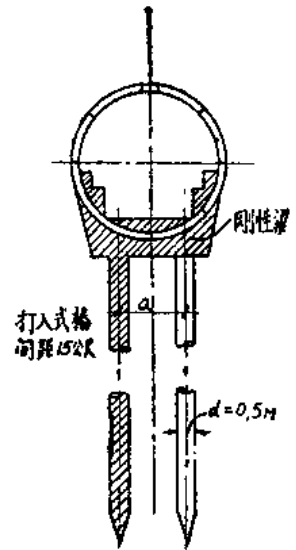


圖 1—6

到的幅度值达 5 公分，当时河中水位变化为 3 公尺。为了防止类似的現象，采用了以下措施：

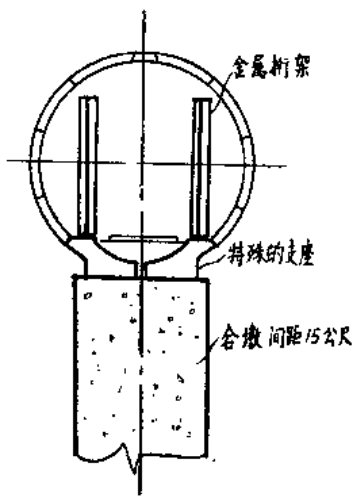


圖 1—7

从隧道內开挖井筒至穩固地基为止，並用混凝土將井筒填滿（圖 1—7）。这些井筒即充作桥梁式隧道的墩台。其次在隧道內，于隧道淨空范围以外，安設支承于这些墩台上的金屬桥跨結構及路面系結構。

修建隧道水底段的方法，是根据隧道埋置深度及跨越地址地質与水文地質条件，並在做了几个方案的技術經濟比較之后來拟定的。

盾構法开挖最为通用，該法在使用上灵活性很大且能保證在各种各样極其不同的地層中安全地修建隧道。

盾構法的另外一些优点是：該法不受气象及季節条件的影响，施工不干扰通航，以及較經濟。

盾構法之所以有經濟上的优点，是因为用該法时僅开挖有效土方。用盾構开挖的長度愈大則該法亦愈經濟。

然而盾構法也有一些缺点方面，使得有时不得不改用特殊的施工方法。

使用盾構法时要求隧道断面保持不变，若隧道一段位于曲綫上即需要將淨空加寬，因而使全隧道長度上断面都有多余部分。

用盾構开挖时有使压缩空气洩出的危險，因此往往不得不增加隧道埋置深度，因而亦即將隧道長度增加，或則采用前述的特殊附加的措施。

盾構的制造，运送，拼裝及拆卸費用很高。因此只有修建相当長的隧道时才宜采用盾構。

能免除上述盾構法开挖的缺点的修建水底隧道的特殊方法是：

1. 垂直沉箱法；
2. 予制節段沉放法；
3. 人工降低水位法；
4. 用人工頂板掩盖的压缩空气开挖法。

用所有这些方法时都必須在河道底上开挖地層，且开挖量大大超出为安設襯砌所需要者，必須在壕塹中建造隧道結構物並在其頂板上回填。同时河床有效面積会減小，河道正常状态会被破坏，且会干擾通航。用特殊方法修建隧道的成敗取决于季節与气象条件。采用特殊施工方法时一定要技术經濟上的根据。

第二章 裝配式隧道襯砌

§ 2-1 概 論

整體式隧道襯砌是在地下坑道內就地修筑的，因而地下坑道通常為臨時支撐所阻礙。在這種情況下隧道施工機械化的可能性受到了很大的限制。

因此整體式隧道襯砌與隧道建築技術發展的基本方向是不相適應的。這基本方向就是：施工過程的工業化與全盤機械化，以保證提高隧道建造速度降低成本和提高施工質量。

最先進而又能滿足上述要求的隧道襯砌結構，是在工廠條件下製備的，而在地下坑道中進行拼裝的裝配式襯砌。

裝配式襯砌的採用與盾構施工方法的廣泛應用是分不開的，用盾構法施工便不需臨時支撐，並保證在隧道的內部自由空間（支撐除外），能將主要工種全盤機械化。

蘇聯的隧道建築在採用盾構法施工與裝配式隧道襯砌方面占居世界各國的首位。只要說明這一點就夠了：莫斯科第Ⅱ期地下鐵道建築工地曾在同一時間內使用 43 台蘇聯設計的盾構。

在以後各期地下鐵道建築工程中，用裝配式襯砌並用礦山法（非盾構法）修建隧道會得到大大推廣，此時裝配式襯砌的各個構件是用起重器裝配的。

所採用的裝配式隧道襯砌結構的特點是多種多樣，結構形式合理，而且十分經濟，這是以蘇聯工程師們所研究出的靜力計算方法為根據而達到的結果。

裝配式隧道襯砌應符合於下列基本要求：

1. 在已知地質與水文地質條件下強度足夠且耐久。
2. 不透水或能夠用特殊措施加以封密。
3. 能立即承受地層壓力及机具壓力（包括盾構推進時的盾構千斤頂壓力）。
4. 裝配簡便且構件能互相替換。

構件互易性的要求會使得圓形襯砌廣泛採用，因圓形襯砌在整個周邊上曲率均相同。同時圓形輪廓能保證襯砌承受靜水壓力及周圍地層壓力的合理的靜力受力作用。而在採用盾構法施工的地層中是會產生地層壓力的。

§ 2-2 裝配式鑄鐵襯砌，鋼襯砌。

由鑄鐵或鋼製成的圓形金屬襯砌最能滿足上面所提出的要求。

用來鑄製裝配式隧道襯砌構件的灰口鑄鐵，對地下條件而言具有極有價值的特性——即極高的耐腐蝕性，1942 年就 1869 年建造的隧道鑄鐵襯砌進行的研究指出，鑄鐵雖在地下條件下使用了 73 年，但仍未受到銹蝕的損害。

灰口鑄鐵的強度主要決定於它所受到的變形的種類。

C 9—21—40 灰口鑄鐵的受拉強度——2100 公斤/平方公分；受撓——4000 公斤/平方公分，受壓——7500 公斤/平方公分。

由此類鑄鐵構件裝配的實體環形襯砌或拱圈在承受主要荷載時可以採用下列容許應力。

受壓——1800 公斤/公分²

撓曲受拉——750 公斤/公分²

受剪——600 公斤/公分²

端面受擠壓——2700 公斤/公分²

鑄鐵的主要特征是其受拉強度極差。因此鑄鐵構件的斷面照例是按受拉應力設計的，而鑄鐵的受壓強度則得不到充分地利用。

向生鐵水中攪入所謂石墨化加入物（0.1%—0.6% 矽鐵）便能將灰口鑄鐵的機械性能改善，因這種加入物會促使形成一種均勻的細晶組織。由此得到的變質灰口鑄鐵（MC 9）的强度高且耐磨性亦較高。

變質鑄鐵的尤其可貴的特質是，其受拉強度極限高（2800—3800 公斤/公分²），構成均勻，因而能由之鑄成薄壁鑄件。

鑄鐵襯砌由盒形截面的構件——管片組成，管片之間用鋼螺栓聯結（圖 2—1）。管片（圖 2—2）的組成部分是：徑向（端）突緣及環形突緣，縱向隔板及承受作用於襯砌上的外部壓力的外殼。

鑄鐵襯砌是由下向上裝配的。因此拱頂管片，因系最後安裝者，故位於一環的頂部。

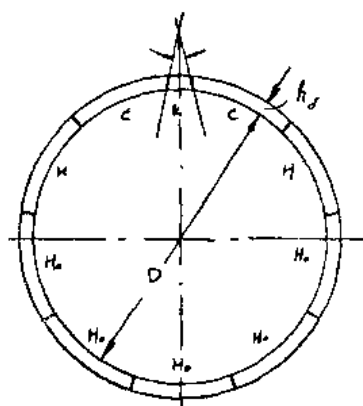


圖 2—1

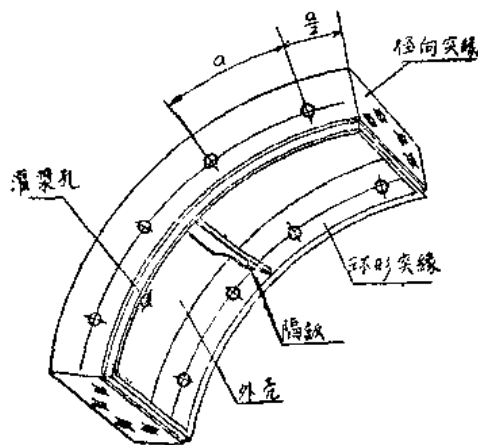


圖 2—2

為了能將拱頂管片就位，拱頂管片（K）做成較其他管片為短些的（為標準長度的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{6}$ ）的管片，且做成楔形，該楔形之楔角為 $4^\circ \sim 8^\circ$ 。由於這樣鄰接拱頂管片（C）便與標準管片（H）有所不同，因後者的端突緣是與半徑方向重合的。

襯砌下半環僅受有徑向荷載（靜水壓力，地層抗力）的作用，故較上半環處於更有