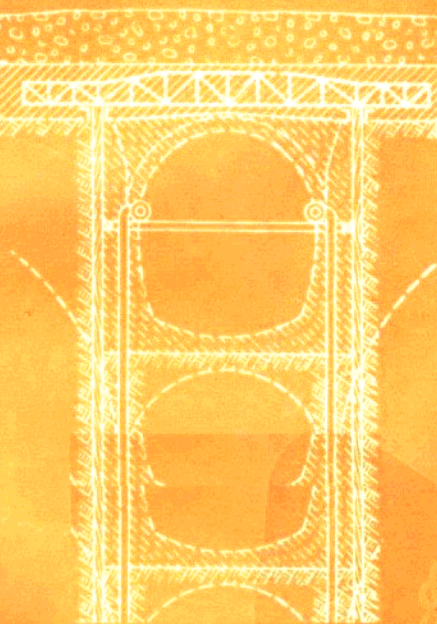


水下隧道的設計和施工



[德國] H. 勃勞泰爾 著
科學技術出版社

PDG

序

在上一世紀中，曾經建成較前一時期為多的水下隧道，大都用來代替活動橋梁和輪渡，這種橋渡是在陸上交通跨越河流不能得到所需高度時的一種權宜方法；但是這些權宜方法往往不足以應付近代交通的要求。建造水下隧道的條件各地大不相同，因此已經發明出從未用過的、最適合當地情況的若干建築方法，並且這些建築方法也左右着隧道的設計方法。

本書即系敘述這些曾經應用於近代隧道設計和施工的各种不同方法，並將它們用在德國和國外的實施例子加以說明。

此外并討論了跨越海峽隧道的特殊問題。這些很艱巨的建築，實際上尚未經興建，但目前已有的幾種經過嚴密和謹慎地作出的計劃，已在本書內簡略地予以介紹。至於其他近乎幻想的一些建議則未予考慮。

我們希望本書將有助於引起工程界先進人士的興趣，當二次世界大戰很長的年代中，他們的興趣主要在於參加毀滅工作，現在重到增進文化和福利的大問題上，屬於這個問題的，有包括水下隧道在內的國內和國際交通的進一步發展，這些正是有助於提倡和發展世界各國的物質和文化的利益。

亞琛市(Aachen), 1948年7月 H. 勃勞泰爾

目 录

序

第一章	水下隧道的用途和经济上的重要性	1
第二章	隧道的平面布置以及高程和横断面的设计	2
第三章	隧管的设计和建筑	8
	(1)开凿法	8
	(2)开口式基坑建筑法	12
	(3)掩盖式水下基坑建筑法	14
	(4)盾构法	17
	(5)沉箱法	20
	(6)沉降预制管段法	23
第四章	防水和排水	30
第五章	通风	31
第六章	照明	34
第七章	其他作业和安全设备	35
第八章	海峡中水下隧道的特殊资料	35
	(1)一般情况	35
	(2)英吉利海峡水下隧道的設計	37
	(3)直布罗陀海峡水下隧道的計劃	45
参考文献		50

第一章 水下隧道的用途和經濟上的重要性

水下隧道是一种工程艰巨和費用昂貴的構築物，故只建造于特別重要和車輛負荷甚高的道路內。在大城市中，若由于某些理由桥梁不能跨越河道时，常須采用水下隧道。例如河流倘用来航行海輪，由于它們的桅杆需要很大高度的航行淨空；但是位置够高的桥面必需既長又高的引道，这种引道是不能在建築物密集的地区內建造的。在这种情形下，若輪渡或活动桥梁再不足以应付交通情况时，我們就不得不应用隧道。德国的漢堡市(Hamburg)，荷蘭的鹿特丹市(Rotterdam)，比国的安德威伯(Antwerpen)，英国的倫敦(London)和利物浦(Liverpool)，美国的紐約(Newyork)，以及其他若干靠海的城市，都是因此而建造了水下隧道。

在城市地下鐵道系統的範圍內，河流即使沒有海輪航行，也常常建造水下隧道。因为地下鐵道的标高很低而桥梁的标高很高，地道若用桥梁連接必然时起时伏，这样对于建筑和运营都將无法办理。

最后，假使海峡的寬度是大得使桥梁建筑变为很困难或不可能时，則在这些海峡下面也要考虑水下隧道。

若不考虑經濟原則，水下隧道往往是用来解决交通問題的重要方案；但是不管它們的建筑費用怎样大，在某些情況下，它們还是有利的。例如紐約的荷蘭(Holland)隧道在1928年秋天开放，曾經花費美金48.4百萬元。从隧道营运上所征收的过車費为机器脚踏車每輛二角五分，汽車每輛五角至一元(視車輛的大小和重

量而定)。由于运输十分发达,因而在1929年中,它的收入就有6.12百万美元之多,除去維持費和运营費1.53百万美元外,尚余純利4.59百万美元,故可允許用利息9.3%(包括一般利息4%及減值基金5.3%)来分期还本。在以后的几年中,它的营业收入仍然是大大地增長。

第二章 隧道的平面布置以及高程 和橫断面的設計

一般說来,隧道的位置必須選擇得使它的水下部分長度尽量变短。但对由于避讓障碍物,如江底下不适宜的地层,或者海峡隧道的过大深度,因而需要迂回繞道的应另作处理。隧道高程的取決,首先要使航道的深度不受隧道的限制。其次,我們显然地必須把將來船只尺寸的扩展算进在內。若隧道系用盾構法并加用压缩空气来施工的話(見第三章第(4)节),則更須在隧管頂上保留相当高度的复盖土层以防压缩空气的走漏。适宜于建筑水下隧道的地层,往往是隧道深度的決定因素。一般說来,为了使隧洞建筑工作簡易,并且使两头引道的長度縮短起見,我們應該尽量限制隧道的深度。隧道的出入口必須放在对交通最便利的地点。倘在隧道出入口前面,能有一块足够广大的面积,最为相宜,以便当交通可能发生阻碍时,可以在这个广场上停集車輛。在运输密度甚大的隧道中,每个行車方向必須备置單独的隧管,不可將行車方向相反的双車道置于同一隧管內,否則隧管的直徑將要变得太大,因而隧管橫断面的頂部和底部均不能利用,这是很不經濟的。

作为較大水下隧道的定位和高程的举例,特將作成双隧管的美国紐約市哈德孙(Hudson)河下荷蘭(Holland)隧道在图1及图2上表示出来,其中图1为平面,图2为縱剖面。(取自 Ole

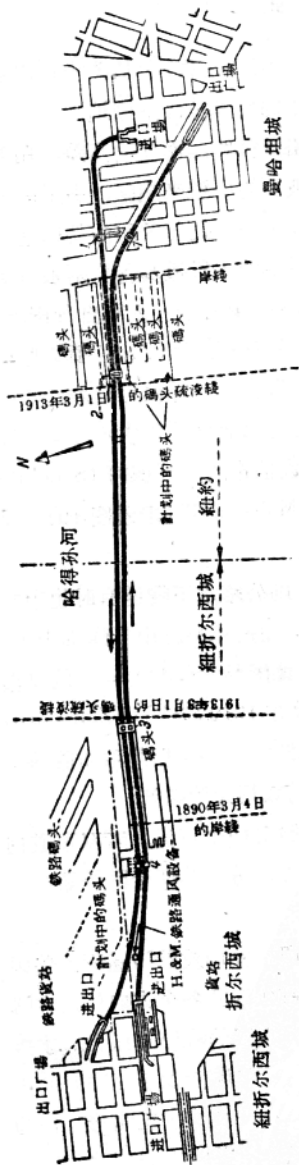


圖 1 哈德孫河下荷蘭隧道的總平面

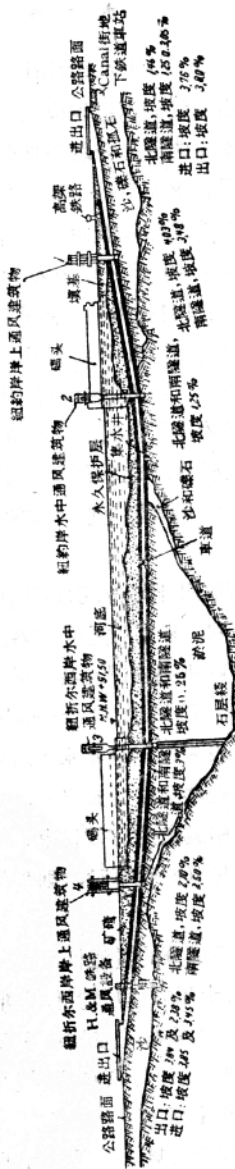


圖 2 哈德孫河下荷蘭隧道的縱剖面

Singstad: VDI-Zeitschrift, 1933 年, 第 265 頁)。从图上可以看出隧道两端的引道均应按照交通规划的要求分向不同地点。

水下的隧道管段与地面上的铁路及公路路面間的高差, 用部分布置在水面下另一部分布置在岸坡下的引道来调整, 引道的最大容許坡度可采取如下: 通行汽車的, 1:30; 通行铁路的特殊情况下可至 1:40, 但一般須为 1:100。引道中的人行道其斜度須限制到 1:15; 通过自行車引道則限制到 1:25。但对于行人和自行車, 建議最好乘电动升降机上下, 以免經行隧道至路面間往往須克服极大的高差, 使人們极为費力。就中尤以自动升降梯可容許連續的客流最为适用。因而凡准許行人和自行車通过的現代水下隧道, 大都安設自动升降梯, 例如比国安德威伯市的些耳德河 (Scheldt) 人行隧道和荷蘭鹿特丹市的麦士河 (Maas) 隧道(參看圖 19) 就是这样。

若因限于地位, 引道无法伸展时, 則公路水下隧道有时也須設置升降机, 来克服隧道至路面的高差, 而將車輛經由升降机上下, 这种升降机系安置在特制的豎井中。德国易北 (Elbe) 河上的汉堡 (Hamburg) 隧道 (O. Stockhausen 曾在 1912 年 VDI-Zeitschrift 杂志上发表汉堡易北水下隧道一文) 即为一例。但此項布置將使車輛的連續运转受到阻碍, 并使隧道的效用大为降低。

公路隧道的有效行車寬度一般只設計两个車道。若双車道尙不足应付双向行車时, 則最好照前述办法分建为两个隧管單向行車。

水下部分的隧道橫断面一般除淺埋者外均設計为圓形, 盖因水压力、土压力、以及其他各項外力均系从四圍各个方向作用在隧道上的。在实际上我們应当考慮到只有极深的隧管其压力綫才接近于圓形, 由于管頂和管底之間的高差关系, 因而加于管底处的山岳压力和水压力要比管頂处为大, 致使压力綫不成正圓形。但为使制造簡化起見, 我們大都采用圓形隧管。荷蘭麦士河上的鹿特

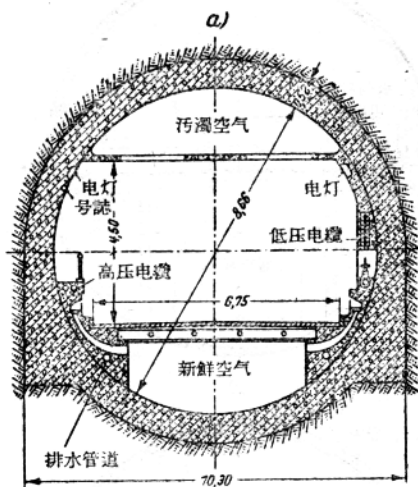


图 3 a 安德威伯市些耳德河下公路隧道的横断面
用开口式基坑法建造的管段

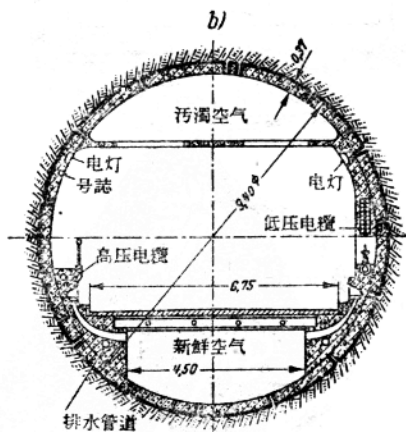


图 3 b 安德威伯市些耳德河下公路隧道的横断面
用盾构法建造的管段

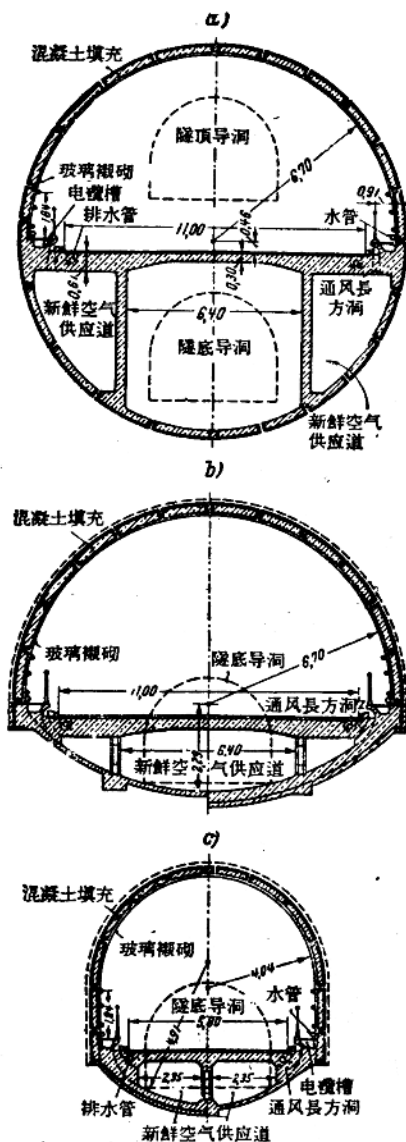


图 4a、b、c 利物浦市爱尔兰河下公路隧道的横断面

丹隧道江底部分采用长方形横断面是一个例外，这个隧道将在第三章第(6)节中详为说明。

近代水下隧道的公路设计可参看图 3, 4 和 5, 这三个图分别表示在比国安特威伯市的些耳德河隧道，在英国利物浦市的麦尔西(Mersey)河隧道，和在荷兰鹿特丹市的麦士河隧道。些耳德河隧道和麦士河隧道的两个大隧管每管均各有两个车道，至于麦尔西河隧道的主管则有四个车道，支管则有两个车道；所有车道的设计宽度和高度均已在上述各图中注出〔按照德国标准 (Hütt 第三册)一个车道的宽度是 3 公尺，两个车道的宽度是 6 公尺，两个车道以上每增加一个车道只增加 2.5 公尺宽度；因而双车道隧道的路面宽度应照 6 公尺设计，四车道隧道的路面宽度应照 11 公尺设计〕。美国荷兰隧道的断面与比国些耳德河隧道的断面相似，但前者的路面宽度为 6.10 公尺，净高为 4.11 公尺。

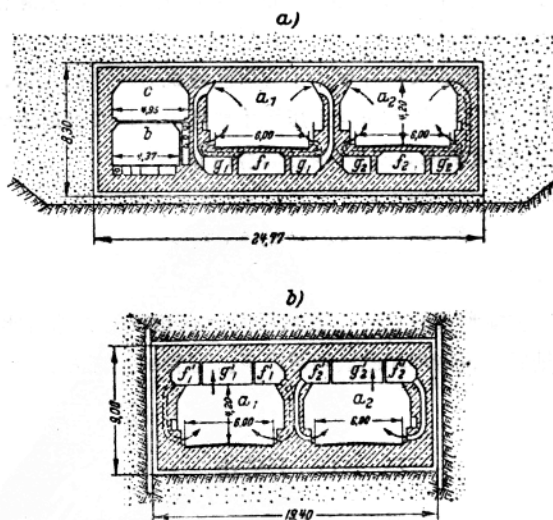


图 5a, b 鹿特丹市麦士河下水隧道的横断面

隧道的公路路面照一般公路的建築規程辦理。在鹿特丹的麥士河隧道，公路路面是用黃色煉磚鋪砌，安設在輾壓過的礫石層上。麥爾西河隧道的公路路面系用邊長 30.5 公分和厚 5.1 公分的槽形鑄鐵板來鋪面；這種鋪面雖然特別耐久，但應當顧慮到使用不久路面會發生滑溜現象。公路路面之下因須安設通風道故一般不直接在隧管底部上建造路面，因此路面是由只有兩側支承於隧管管壁上的鋼筋混凝土版來支承的。而在直徑較大的隧管內，有時還加建縱牆或支柱，作為中間支承（見圖 3 至 5）。

行駛汽車的路面原則上不准有行人及自行車通過；只在車道旁邊設置狹窄的小路，以備業務和救險之用，在比國的安德威伯隧道建有行人及自行車專用的小隧道，而在荷蘭鹿特丹隧道，則將各種不同的交通類型分置於隧道的不同地位（見圖 5）。至於美國荷蘭隧道和英國利物浦隧道，則只能行駛汽車及腳踏車。行車空間下面的全部以及上面的一部分則布置為通風道之用，其詳細情況將在第五章中說明。

隧管斷面形式又往往取決於隧道的建築方法；此點可參看下面第三章。為了抵抗水壓和土壓等主要外力，以及做好極完備的防水措施，隧道結構必須予以特別設計和建造。

第三章 隧管的設計和建築

隧管結構形式的設計和建築方法，主要取決於當地條件，就中特別是地層土質情形和隧道埋置深度。隧管的建築方法計有下列幾種：

(1) 開礦法

這種建築方法主要用於山岳隧道，水下隧道如位於穩定和滲透性很小的土層中亦可應用。在各種開礦法中最簡單的為比國法，

其法首先建築頂拱，然後開挖側壁和管底的空間；頂拱係先用托換基礎的方法來支承的。本法的優點為施工簡單，以及較其他山岳隧道的建築方法可以節省大量支撐材料。但在水下隧道建築方面，比圖法應只用於安全和穩定的石層中，因為當頂拱是被支承於隨後砌築的側壁時，沉陷就難免，並且易於發生裂縫，倘若防水層也被破壞時就會使隧道漏水。所以一般都推薦奧國法或英國法來建造隧道，其法是將隧道斷面內的岩石全部挖除并撐妥，這樣，隧道圻工便可從底下砌至頂上。

茲略述連接利物浦(Liverpool)與別根海特(Birkenhead)兩城市的新麥爾西河公路隧道，作為用“木頂撐開礦法”建造隧道的實例。(見1934年英國The Engineer雜誌第26頁及以後的各篇；1935年Travaux雜誌，第355頁；1940年VDI-Zeitschrift雜誌，第932頁；1936年Bauingenieur，第167頁)。圖6和圖7為這個隧道的平面和縱剖面。隧道的全長均位於新紅砂岩上，這種新紅砂岩雖然有些變位，但尚穩定並有相當防水性。地層的地質參看圖7，隧道的橫斷面示於圖4。挖土工作系從在兩岸沉下的直井開始。位於水下部分的隧道斷面為圓形，首先挖一底坑作為導洞，並同樣挖一個頂坑，上下兩坑道均在河中央之下相遇。隧管的全面開挖和建築，即從這些導洞在若干處同時開始。上下導洞均順沿隧道的坡度開挖，不能將隧洞中的積水排出，因此，為了在建築時期內的排水起見，從底導洞最深一點開始，另挖一具有斜坡的小洞，通向利物浦岸的直井，將洞內的水引至該井(見圖7)。紅砂岩具有很好的穩定性，故可照比國法先行開挖和完成隧道上部的工程，然後完成下部。洞中湧水甚劇，有時每秒钟須排出325公升之多。

隧道是用鑄鐵圈襯砌的。此項襯圈一般在盾構法中，沿着隧道縱向密接放置，以便同時承重和防水。襯圈與完整的石壁間的空隙先用石塊填塞，然後經過襯圈上的孔眼從里面以5.5個大氣

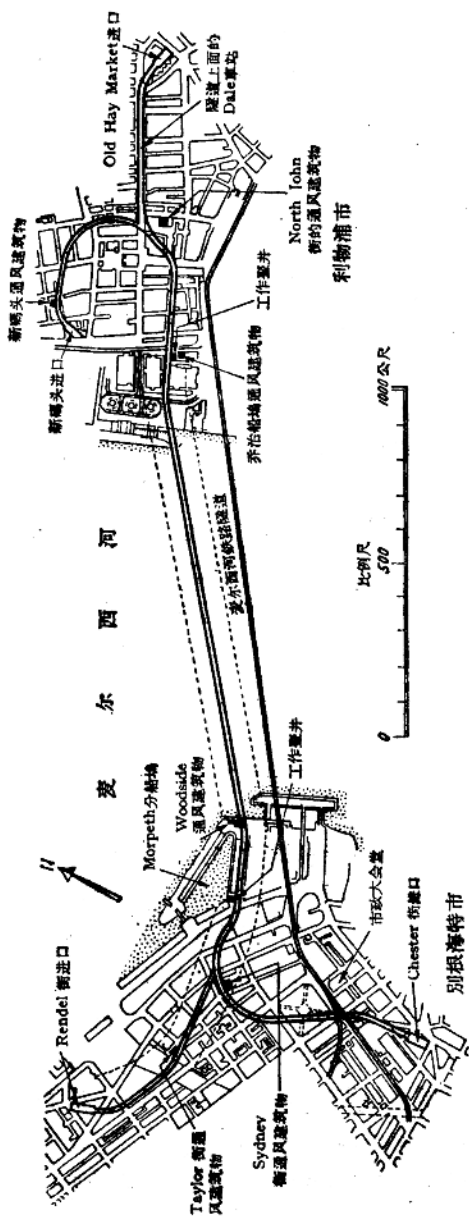


图 6 麦尔西河下公路隧道的总平面

压的压力將水泥漿压入空隙內。在襯圈的里面，襯圈加勁肋間的空隙，亦填以混凝土。隧管的上半部完工以后，再用同样的方法进行下半部工作。在鑄鉄襯圈的內表面上澆做鋼筋混凝土，先系結鋼絲网一道，再噴注 19 公厘厚水泥灰漿一层，最后粉上黃色石灰漿，使隧道里面呈現輕淡的面貌。隧管兩側壁面下部 1.84 公尺高的一段用黑色玻璃版盖护。

引道及岔道的建造，主要也与水下的正洞建筑方法相似，从底导洞进行挖掘的。隧道水下部分的断面为圓形(图 4a)，而引道的断面則为半圓形(图 4b)，岔道的断面則为钟形(图 4c)。岸边隧洞的一小部分用盾構法建造(見第三章第(4)节)，其余在陆地上的岸边隧道不須用开矿法建造者，均用开口式或掩盖式的开挖法修建。这些段落的襯砌，仅在特別受力的地方才用密接的半圓鑄鉄襯圈砌筑，同时若用中距 73 公分的型钢襯圈，襯圈之間的空隙用混凝土填注，亦可应付。

(2) 开口式基坑建筑法

这种建筑方法适用于隧道在水下的深度不大，地层土質容許表面抽水或降低地下水位，以及河床可以暫時局部封鎖禁止航运或限制水流的情况下，这样建造的隧道必須至少分为两段进行。

假使板樁能插打至足够深度的不透水地层中，則可用板樁牆或圍堰將基坑包圍，然后用表面抽水方法来排水。假使地层在很大深度內是滲透性的，則排水方法必須采用降低地下水位法，同时我們必須特別注意慎防坑底裂开。

图 8 表示柏林地下鉄道在 Kloster 街及华尔(Wall)街間 Spittelmarkt-spree 隧道的基坑，它是分两个阶段来建造的。Jannowitz 桥下的隧道也是用与此类似的方法在后来建成的。Spittelmarkt 隧道系在斯普利(Spree)河底將建筑区段用圍堰包圍，圍堰距基坑 5 公尺。在圍堰的挡水情况下，当河底积水被抽干后，隧道

的开挖，是在圍堰內所打的两行板樁內进行的。降低地下水位的井管共布置了4行，两行在圍堰內；另外两行在基坑中，距离板樁各1.5公尺。当地下水位被降低后，土壤的开挖和隧道的建筑，本可在干土中將其完工；但当第二节隧管段与在先建成的第一节隧管段即將連接以前，圍堰忽被河水侵入，嗣后乃改建一座特种島式圍堰，將基坑包圍，隧道始获完工。

上述的須匹特爾市場 (Spittelmarkt) 隧道以及斯普利河下其他隧道的基坑排水中有着一種有利情况，即斯普利河底是被污泥层所复盖，这层污泥有效地阻止河水向下滲入地层內，因而这种污泥层以下的地下水很难与河水相通連。假使河底沒有污泥层的話，为了防止水流的侵入地层起見，建議將圍堰放在距基坑較远之处，有时甚至再布置較多排的井管，俾地下水的沉降曲線不致傾斜得太陡，將地下水的流速保持在緩和状态。井管的下口，必須放在有足够深度的位置上，使地下水流进井管的地点不太靠近基坑的

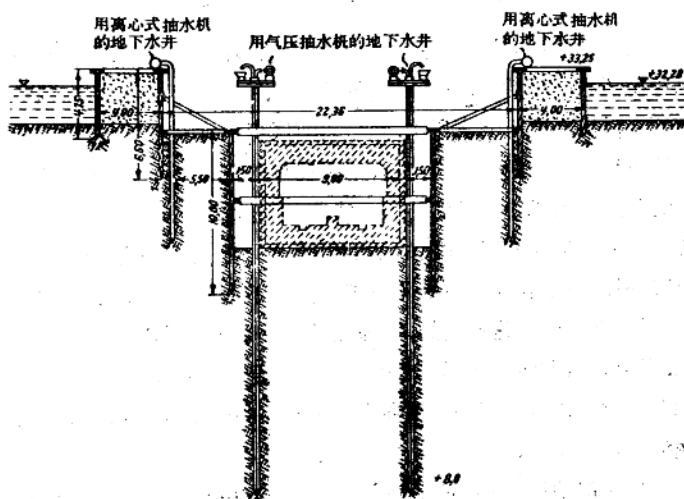


图 8 柏林市 Spittelmarkt 城斯普利(Spre)河下隧道的基坑

底面，因为井管吸水处将要帶走泥沙，因此，降低基坑地下水位的井管，最好放在板樁外面不妨碍建筑的地方。較优于空气泵的机具，是現用的裝在豎軸上的离心泵，这种泵的尺寸甚小，可放入井管套管里面的底部，这样就和空吸的水头无关，它們最好用深井电动泵的形式。

在开口式基坑中，隧道結構多用鋼筋混凝土制造。假使建筑高度受到限制，則隧道的頂盖做成鋼筋混凝土版，这样隧道的断面就成为一个剛架，如图 8 所示。如有充足的建筑高度則頂盖也可以建成拱形，这样我們就得到了普通馬蹄形隧道断面。防水层用若干层适当的避水材料从外面放上，这些避水材料可由鉛、鋼或瀝青的板片組成，瀝青片可以厂制，主要是用浸透了地瀝青的織物組成的，一般放置四层并將接头錯开。在防水层外面再加上一道混凝土保护层。

(3) 掩盖式水下基坑建筑法

在这种建筑方法中隧道基坑是用板樁包圍的。当板樁頂端被鋸平至适当高度后，用頂版封盖在板樁上面，使其不致透水，这种盖版不应露出在原有河底以上，然后將河底积水排除至盖版以下，以便隧道可以在干的基坑內建造，不需应用压缩空气。上述的盖版，或者同时充当隧管最后的盖版，或者仅作隧道施工期間的初次盖版。在后一种情况下，隧道的最后盖版，正与整个隧管結構和防水建筑一样，是在初次盖版的防护下降低地下水后，在干燥的空位上施工的，这样做法是可取的，因为在前一种情况下若必須在水下施工，隧道盖版与边牆的不透水連結是不容易办到和不安全的。降低地下水位至盖版以下的方法將在下面斯多拉森海峡 (Strelasund) 隧道中詳为說明。

当建造柏林南—北地下鉄道在 Weidendammer 桥下游的斯普利隧道和 Landwehr 运河下面的隧道时，先將河床用圍堰分