

• 土木工程学术前沿丛书 •

SUIDAO JI DIXIATIEDAO YUZHIHUA JISHU

隧道及地下铁道 预制化技术

王明年 李志业 魏龙海 著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

国家高技术研究发展（863 计划）专项经费资助
(课题编号 2006AA11Z116)

土木工程学术前沿丛书

隧道及地下铁道预制化技术

王明年 李志业 魏龙海 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

隧道及地下铁道预制化技术 / 王明年, 李志业, 魏龙海著. —成都: 西南交通大学出版社, 2009.12 (2010.2 重印)

(土木工程学术前沿丛书)

ISBN 978-7-5643-0531-4

I. ①隧… II. ①王… ②李… ③魏… III. ①隧道工程—工程技术②地下铁道—工程技术 IV. ①U45②U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 242344 号

土木工程学术前沿丛书

隧道及地下铁道预制化技术

王明年 李志业 魏龙海 著

*

责任编辑 高 平

特邀编辑 杨 勇

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 170 mm×230 mm 印张: 18

字数: 321 千字

2009 年 12 月第 1 版 2010 年 2 月第 2 次印刷

ISBN 978-7-5643-0531-4

定价: 39.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

作者简介

王明年，男，1965年3月出生，安徽舒城人，工学博士，教授，博士生导师，四川省作出突出贡献的博士学位获得者，成都市有突出贡献的优秀专家，现担任中国土木工程学会隧道及地下工程分会风险管理专业委员会委员，中国岩石力学与工程学会青年委员会委员，《地下空间与工程学报》、《隧道建设》编委会委员。



近年来主持了多项国家级、省部级科研项目，获国家级科技进步二等奖2项，省部级科技进步特等奖1项、一等奖4项、三等奖3项，詹天佑铁道科学技术奖1项。代表性的科研项目有：地下铁道预制化设计方法研究，新建铁路隧道装配式衬砌技术的应用研究，地下铁道区间明挖结构预制技术中结构设计及相关技术的研究，复杂地质条件下长大隧道仰拱快速施工技术研究，明洞预制化技术研究，涵洞预制化技术研究等。

主要研究方向有：① 隧道及地下工程设计理论，② 隧道及地下工程施工力学，③ 隧道及地下工程预制化技术，④ 隧道及地下工程抗（减）震技术。

近年来，已在国内外各种学术期刊上发表论文130余篇，主编和参编专著6部。

前 言

隧道及地下铁道预制化技术主要有两大类，即全部构件预制方法、预制构件和现浇混凝土相结合方法。

全部构件预制方法包括结构整体预制和结构分块预制：结构整体预制就是将隧道及地下铁道结构在纵向上进行分段，每一段一次预制成型；结构分块预制就是将结构按部位、受力等特点进行分块并预制，形成预制块，然后将预制块拼装，形成一段结构，再把每一段结构拼装起来，形成隧道及地下铁道完整结构。

预制构件和现浇混凝土相结合方法也有两种：一种是结构的一部分为现浇混凝土，其余部分是预制构件，将两者结合到一起，形成完整的隧道及地下铁道结构；另一种是将预制构件作为模板，架设好后在其内部灌注混凝土，预制构件和灌注混凝土一起形成完整的隧道及地下铁道结构。

目前，这两类预制化技术都有应用。

本书是在总结了近年来我国铁路隧道和地下铁道预制化技术多项科研成果的基础上完成的。书中还引用了国内外已有的专著、文章、规范、研究报告等成果，在此一并表示感谢。虽然我们尽了很大努力，但由于学识水平有限，疏漏及不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

著 者

2009 年 10 月

于西南交通大学

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 国外关于预制化技术的应用实例	1
1.2 我国关于预制化技术的应用实例	23
1.3 隧道及地下铁道预制化技术应用条件	26
第 2 章 预制化结构接头力学特性试验及计算模型参数确定	29
2.1 预制化结构接头设计计算模型	29
2.2 预制化结构接头力学特性试验	49
2.3 预制构件力学分析模型	69
第 3 章 明挖地下铁道区间结构预制化设计方法	79
3.1 明挖地下铁道采用部分预制结构的设计方法	79
3.2 明挖地下铁道矩形结构全部预制设计方法	101
3.3 明挖地下铁道预制结构接缝设计	107
第 4 章 明挖地铁车站预制化结构设计及施工方法	115
4.1 明挖地铁车站预制化结构形式的选择	115
4.2 双层拱形车站预制化结构设计方法	134
4.3 明挖地铁车站预制化结构施工力学特性分析	141
第 5 章 暗挖隧道结构预制化设计方法	162
5.1 暗挖隧道整体式结构内力分析	162
5.2 暗挖隧道预制结构分块	166
5.3 暗挖隧道预制结构在曲线隧道中的应用	175
第 6 章 隧道仰拱快速施工技术	181
6.1 仰拱结构设计	181
6.2 隧道仰拱快速施工的现场试验	185

6.3	不同工况下隧道仰拱结构受力有限元分析	207
6.4	隧道仰拱（铺底）预制板快速施工技术	220
第 7 章	预制构件制造和运输	227
7.1	预制构件的制造	227
7.2	预制构件的运输	234
第 8 章	预制构件的安装	237
8.1	明挖地下铁道预制构件拼装	237
8.2	地下车站预制构件的拼装	240
8.3	暗挖隧道预制构件的拼装	249
8.4	预制化构件拼装精度及背后空洞的处理	252
第 9 章	预制构件的接头构造及防水	262
9.1	构件接缝设计技术	262
9.2	预制结构防水技术	265
9.3	变形缝防水	274
参考文献		277

第 1 章 概 述

隧道及地下铁道预制化技术目前主要向两个方面发展：

第一方面，全部构件预制方法，该方法包括结构整体预制和结构分块预制。结构整体预制就是将隧道及地下铁道结构在纵向上进行分段，每一段一次预制成型。结构分块预制就是将结构按部位、受力等特点进行分块并预制，形成预制块，然后将预制块拼装，形成一段结构，再把每一段结构拼装起来，形成隧道及地下铁道完整结构。

第二方面，预制构件和现浇混凝土相结合方法，该方法包括两种：第一种方法是结构的一部分为现浇混凝土，另一部分是预制构件，将两者结合到一起，形成完整的隧道及地下铁道结构。第二种方法是预制构件作为模板，在架设好预制构件后，在预制构件内灌注混凝土，预制构件和灌注混凝土一起形成完整的隧道及地下铁道结构。

目前，这些预制化技术都有应用。

1.1 国外关于预制化技术的应用实例

1.1.1 明挖地下铁道结构预制化技术应用实例

1. 鹿特丹地铁区间隧道

鹿特丹地铁东西线是采用“壳式隧道”（图 1.1）进行修建的，在现场，做完混凝土桩并在基坑里浇注隧道底板以后，把壳式构件安置在隧道底板上，于是隧道的侧壁和顶板一步建成。构件也可以在别的地方预制，然后运送到工地，把壳式构件彼此相连并与底板连起来，就形成了一个整体隧道结构。从纵向看，与传统的现浇隧道相似，壳式隧道是分段的，按一定的间隔在全断面周边上（即在壳式构件端面上，也在底板端面上）设一道伸缩缝。因此，一段隧道包括

2 | 隧道及地下铁道预制化技术

一个底板和若干连接在一起的壳式构件。侧墙和底板的厚度，可以作为设计选择加以限定。

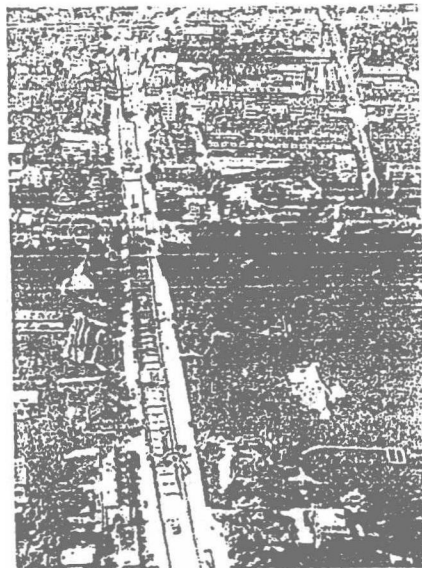


图 1.1 s-Gravenweg 街上的壳式隧道工程

东西线地铁隧道覆土浅，一般为 $1.5 \sim 2.7$ m，隧道长 6 km。除了 500 m 跨 Coolhaven 湾用沉埋隧道外，其余大部分隧道是在基坑里现浇的。受环境条件所限，隧道东端 1 000 m (s-Gravenweg 街) 和隧道西端 600 m (Schiedamsweg 街) 采取壳式隧道形式。修建壳式隧道的主要作业是从地面打钢板桩、混凝土桩，开挖基坑，布设横撑，浇灌隧道底板，安放壳式构件到隧道底板之上，各构件彼此间相互连接并与底板相连接。

修建壳式隧道具有如下特点：环境较好，隧道施工造成的干扰被限制到尽可能小的程度；在 s-Gravenweg 这条历史名街和繁华的 Schiedamsweg 商业街上施工场地非常局促，由于采取了壳式隧道，施工场地事实上局限到工程建筑物占地的上方。隧道的施工只能在最小宽度的基坑中作业，工程作业流程占地长度也受到限制（图 1.2），快速的隧道工程建设本身就减少了对环境的影响。对这两条街的工程，选择了每周建 30 m 隧道的高速率。对隧道设计提出的技术要求是要有足够的强度和防水性 (watertightness)。隧道的截面应在纵向、横向均能承受自重、地铁车辆荷载、水土压力荷载，以及地面附加荷载（如路面交通）。对隧道的水密性要求决定了对壳式构件之间的竖直缝和对构件与底板之间

的水平缝要求。选择壳式构件的形体和接缝的形式则应适于每周建 30 m 隧道的进度需要。

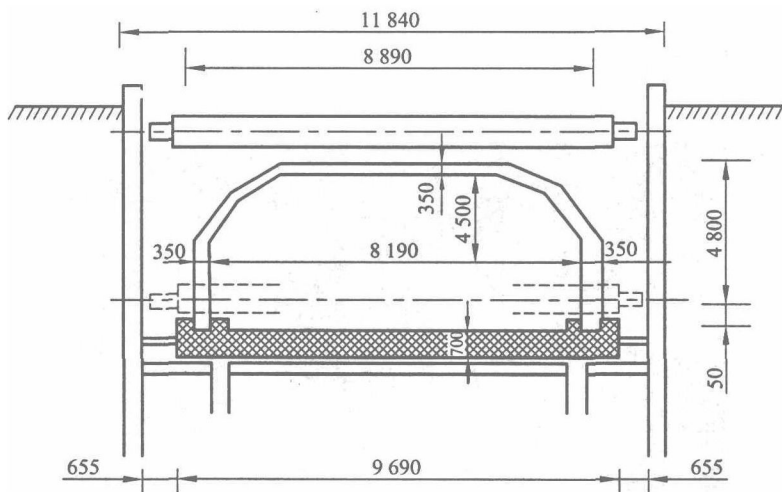


图 1.2 壳式隧道横截面与基础

1) 横、纵断面

预制的壳式构件纵向长 3 m, 构件厚度 350 mm, 重 362.6 kN。在预制期间, 构件在“横卧”状态下浇注混凝土, 待混凝土凝结后, 将其“扶正”。理想的断面形状是抛物线形, 此时在常态对称荷载的作用下, 弯矩可以降至最小。考虑了地铁车辆净空轮廓要求和隧道横断面的临界条件, 即上方正常覆土至少要 1.7 m, 以容纳横过线路的电缆和管道, 同时还考虑了基坑最小宽度和深度的要求, 为壳式隧道选择了直墙、平顶形状, 其厚 350 mm, 底板厚 700 mm。Schiedamsweg 街上有一段顶板厚了许多。一个地方是因为覆土放大到 4 m; 还有另外一个地方, 覆土厚度虽正常, 但顶板跨度因在隧道里设置道岔而加宽了近半米。

壳式隧道的基础包括 380 mm×450 mm 预制预应力混凝土桩, 打到更新世砂层。桩的承载力为 2 100 kN。在正常荷载条件下, 考虑到地下水位在地表以下 1.1 m, 桩承载约为 1 000 kN。如果地下水位由于排水所致降到隧道底板以下, 当隧道周边有意外工程作业或其他极端情况发生, 不管在施工期间还是完工以后, 桩承受的荷载将增加约 1 500 kN。为了限制对环境的影响, 用低噪声设备打桩。需要的净空是混凝土桩心到钢板桩内侧 1.5 m。由于这个限定条件和基坑最小宽度要求, 混凝土桩不能放在边墙中心线下。其结果是底板 (图 1.3) 的

弯矩有所增大。在为壳式断面作设计计算时，是基于假设壳式构件两端墙脚铰接固定。最大弯矩和剪力图都是按这个图式确定的。横向配筋的 0.8% 针对最大正弯矩，0.63% 针对最大负弯矩。由于超出了允许剪应力，在平顶和第一斜面转角过渡地段要求横向布筋。为此，部分配筋弯离顶板。对底板结构配筋，0.4% 针对最大负弯矩，0.3% 针对最大正弯矩。



图 1.3 隧道底板的配筋

为了防止在打混凝土时因收缩和温度变化而引发墙体开裂，在鹿特丹的现浇隧道（先底板，再边墙和顶板）中，一般隔 15 m 做一道伸缩缝。在壳式隧道里沿着壳式构件和底板周边的伸缩缝间距加了 1 倍（30 m）。这么确切的长度还取决于每星期要建成隧道的长度是 30 m。因为，这时底板是现浇的，墙和顶板是预制的，不易开裂，对伸缩缝间距本没有严格的限制，一段隧道的壳与壳之间的缝作为施工缝看待。因此，底板和壳式构件的组合应当看成一个置于弹性支撑上的纵梁。深层钻探和圆锥贯入实验的统计数据表明，桩的承载能力和承载-变形特性变化在负向 10%、正向 30% 之间。桩的承载-变形特性的差异，主要靠基础和结构之间相互作用而得到补偿。对于壳式隧道需特别注意的是，为了避免顶板上的任何纵向张力，将每段隧道两端的桩布置得更密一些。这就使梁端头的支点刚度相对更大。当纵向发生荷载变化和隧道构件的结构特性发生变化时，在隧道的顶板上总是有正弯矩。这就使壳的顶板上有持续的压应力，而隧道底板上只有拉应力（图 1.4）。隧道上方路面活动荷载，最重的交通荷载等级按照德国条例，相当于两台重为 600 kN 的货车的作用荷载。

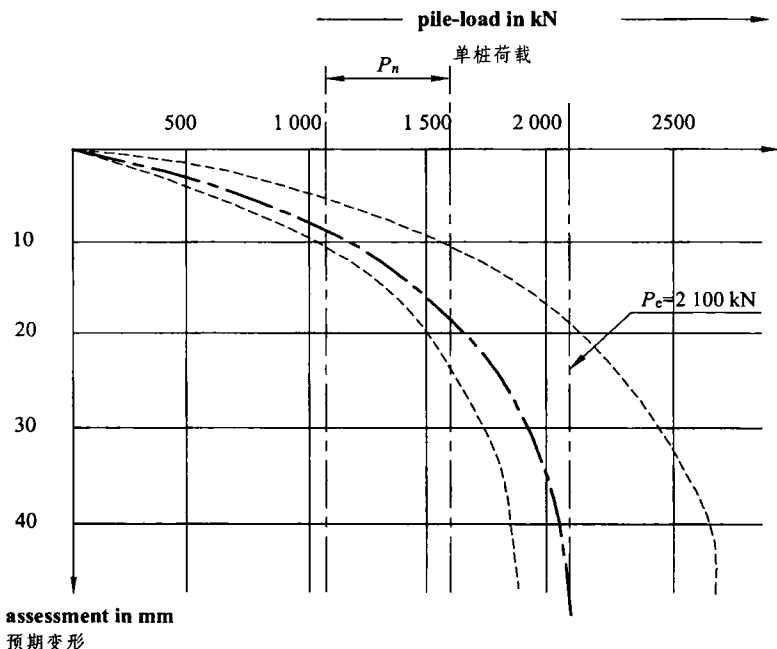


图 1.4 壳式隧道桩基的承载-变形特性

2) 接缝

隧道应当是水密的，接缝应能在 12 m 水压下保持不漏水，有 1.5 倍安全余量。接缝的设计应满足隧道的工程进度。此外，接缝必须有足够的耐久性和抵御火灾及机械伤害的能力。接缝可以分为 3 种：在底板和壳式构件间的水平接缝、壳式构件之间的竖直接缝和在每 30 m 分段隧道之间的伸缩接缝。接缝的形式和使用的材料说明如下：

(1) 水平接缝。

壳和底板间的水平接缝做成刚性接缝，就是说可以承受弯矩和纵、横向力。在底板上一侧有两个立着的凸楞，其间放置壳式构件。当槽形底板上的壳体全都一个挨一个地排列好以后，就必须灌注水平接缝（图 1.5），可以压注或灌注。曾经有人做过试验来测定材料的透水性、和易性和接缝的水密性。有些试块是将试模全部灌满待测试的砂浆；另一些试块则装半模混凝土，当混凝土凝结后，用压注或灌注的砂浆填满。这样做本身就产生有一个不同材料的接触面，可用来测试透水性。对两种材料的试验都取得了满意的结果。经试验测试，这两种材料就用在实际接缝模型上，并试验其和易性和形成结构后的水密性。

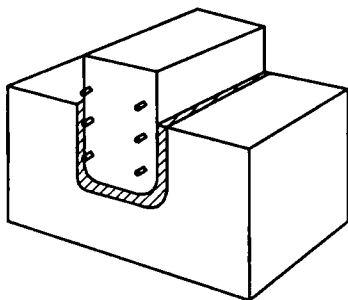


图 1.5 壳式隧道结构的水平接缝

压浆试验的材料配比是 50 kg A 级彼特兰大水泥、87.5 kg 砂和 1% (参考水泥重) 的增塑 (减水) 剂, 用的是 Tricosal 牌的。用水量在于和易性的需要。要求从隧道内侧单次浇注就可以把接缝全部灌满。不能产生任何气泡。一共做了 5 次试验。试样的水灰比变化在 0.6 到 0.65 之间。从 5 次试块和压注试验里发现 2 个可以承受住 20 m 水头压力, 其他的在 5 m 水头时即出现连贯性的漏水。在做砂浆灌注接缝试验时, 原材料直接由砂浆的拌和商提供。砂浆都是水泥基的, 添加减水剂的目的是, 以最少的拌和用水取得更好的流动性。

此外, 添加了膨胀剂, 以平衡收缩。在膨胀剂的作用下, 膨胀量约为 0.3%。所有的实际接缝试验均承受得住 20 m 水头压力。

在试验成果的基础上, 选定了砂浆配比。为了提高水平接缝的质量, 清除了壳脚上和底板槽形构造内壁的水泥皮, 这要靠浇注混凝土前在模板上涂敷一层缓凝剂来实现, 撤模后水泥皮尚未凝固, 可以用高压射水加以清除。壳式构件用钢制的撑脚就位, 撑脚用螺栓固定在壳体墙的内侧, 搭放在槽形构造的立楞上。这样安装使接缝的整个填充空间全是悬空的, 可以很容易灌注砂浆。

(2) 竖直接缝。

对于壳体之间的竖缝, 试验过多种办法, 设计和评价的准则仍然是承受 12 m 水头压力的水密性、耐久性和抵御火灾及机械伤害的能力, 还有实施要简单。整体上要每周 30 m 隧道的工程进度要求相匹配。在设计竖缝的时候, 曾经调研过柔性的、刚性的各种解决办法。首先, 提出过一个很简单的接缝形式, 这种形式允许在荷载的作用下构件之间发生位移。而刚性接缝那里, 是一个整体的隧道结构, 弯矩、竖向力和横向力都可以得到传递。

关键的是竖直接缝的连接应当是水密的, 而水平接缝的连接也是水密的。应当使壳式构件留有尺度上的误差, 备用于安装壳体的安装误差。此外, 还会由于收缩、温度变化或者基础不均匀沉降造成尺度误差, 对于柔性接缝考

虑通过各种用橡胶管和弹塑性树脂组合的方法填充壳构件之间的间隙。试验了实际的柔性接缝模型并评价了它的耐久性、抗火灾和机械伤害的保护,以及工程实施方面的问题,没有一种柔性接缝被选中。壳构件间的固定接缝就是在现场灌填混凝土(图 1.6),在接缝里有连续的分布筋,是由两侧壳式构件伸出来的重叠筋。分布筋是电镀的,直径 10 mm,间距 100 mm,材质 FeB400,像水平接缝一样,也清除掉浇灌壳构件混凝土形成的水泥皮。壳构件的一端备有一个凸出的“牙”,作为接缝内侧模板,外侧模板是紧贴在壳构件外侧的一般木模板。最后将刚性竖直接缝与水平接缝一起做了实际综合试验,效果良好(图 1.7)。

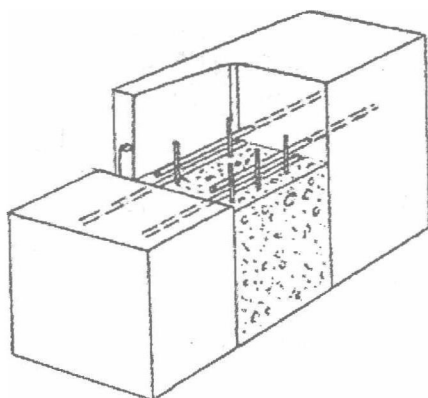


图 1.6 壳式隧道结构的竖直接缝

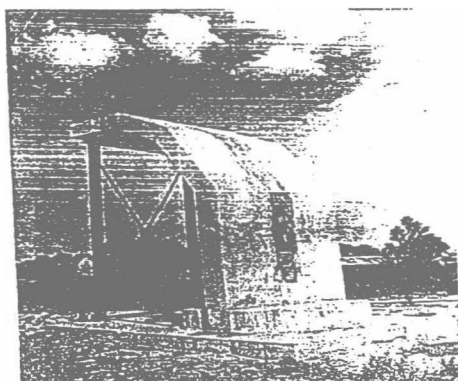


图 1.7 壳式隧道的足尺试验

(3) 伸缩缝。

竖直和水平接缝用现浇方式连接还取决于两隧道段间伸缩缝的设计原

则。和一般隧道一样，伸缩缝（图 1.8）是用带钢翼板的橡胶型材（止水带）作为接缝密封材料的。钢翼止水带先浇筑在底板里。在往底板上安置壳构件前，在基坑里，将底板接缝上方的钢翼止水带全截面用焊接的方法连接起来，使它囫圇地嵌入到端头接缝里，这种处理办法的长处是，壳式构件的形状能够大体统一。

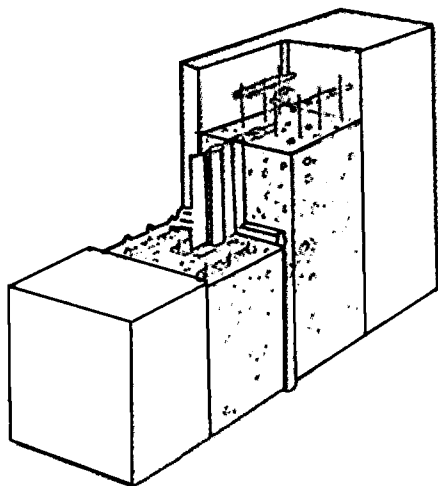


图 1.8 壳式隧道的伸缩缝

3) 基坑

在鹿特丹的软土地层中，加上高地下水位，在用钢板桩围堰围护的基坑里做隧道施工是合适的办法。重要的是把地质条件搞清楚。鹿特丹的地面高程在海平面到比海平面低 6 m 处之间变化。陆地靠堤坝来保护，地层从地表往下 15~17 m 深是泥炭和黏土。深部的砂层，作为桩基的持力层，仅在这个高程上能碰到。地下岩土条件直接影响到隧道的设计方案。本地区的地质条件不允许像其他城市那样在地下随便地开挖隧道，那些城市的地层较硬（如岩石或硬黏土）。

地铁线路的走向影响到隧道和车站的布置。在深埋的南北线上，车站摆得比区间高，比路面低；而在浅埋的东西线上，车站多数摆在区间隧道的侧面，部分地高出路面。在 Schiedamsweg 路上区间隧道与 Delfshaven 站接口的地方，壳式隧道的覆土约 4 m。这个车站也是全埋在地下，其东端与沉埋的 Coolhaven 隧道相连。为了防止损伤周围建筑物，必须特别关注工程地质条件。此外，沿线的基土差异很大（图 1.9），不同地方各不相同的检测结果对确认基坑开挖后的竖向稳定性是起着关键作用的。水文地质方面，地下水以两种独立来源为特

征, 上层的潜水被不透水的黏土和泥炭层与流动的承压水分开。不允许对基土无限降水以及不加节制的工程作业。

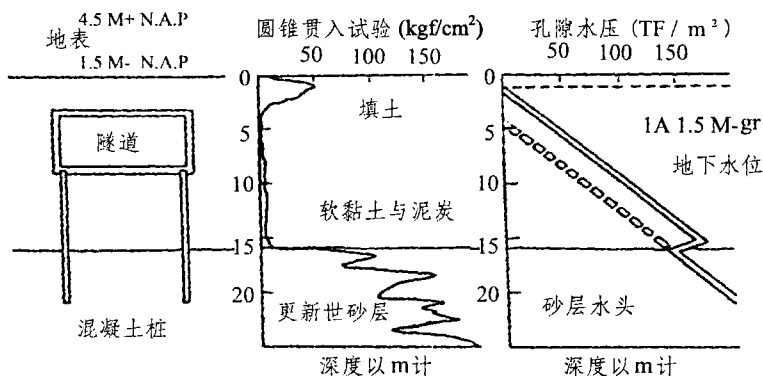


图 1.9 鹿特丹的底层土、隧道工程原理、圆锥贯入试验和地下水压力

偶尔降低底层地下承压水位还是可以的, 在东西线上也是能办到的。为了降低东西线的基坑处的水位, 使用过各种各样的工艺, 以确保基底的竖向稳定。其中一种是环境影响较小的化学注浆处理 (图 1.10)。这包括把钢板桩围堰内壁之间的砂层用化学药剂注浆使其不透水。液态药剂充填砂粒之间的空隙, 压浆层的标高和厚度取决于上面加固的地层重量应与其下流动承压水的压力相平衡。通过管道将化学药剂压注到要求的深度。

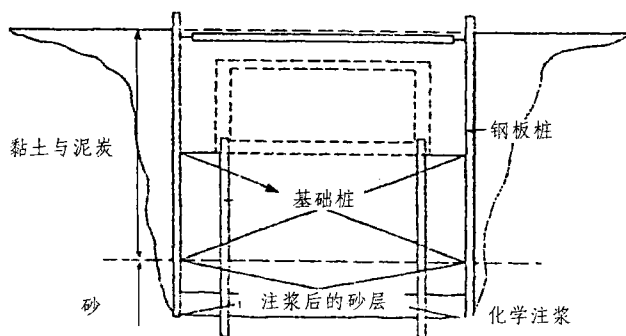


图 1.10 陆地隧道工程原理和化学注浆

另一种确保基坑底竖向稳定度的替代办法是采用水下混凝土 (图 1.11), 承压水的压力被混凝土的重量和打桩后构筑的混凝土底板的相对重量所抵消。如果有需要, 水下混凝土里也可以加筋, 当水下混凝土凝固到一定程度时, 可将

基坑中的积水抽干。这个办法在 Delfshaven 站得到应用。承压水水位还可以用不危害周边建筑物,把抽出来的地下水立即回灌到基坑外侧深部砂层的办法加以降低。一般说,当需要降低承压水头时,要选择一种单一的或综合几种不同的降水方法,以防止对周围环境的危害。壳式隧道工程里对基土注浆和回灌井点体系(图 1.12)两种办法都被采用。在有些地方有可能只做一点疏排水就可以了,并不需要采取任何其他附加措施。

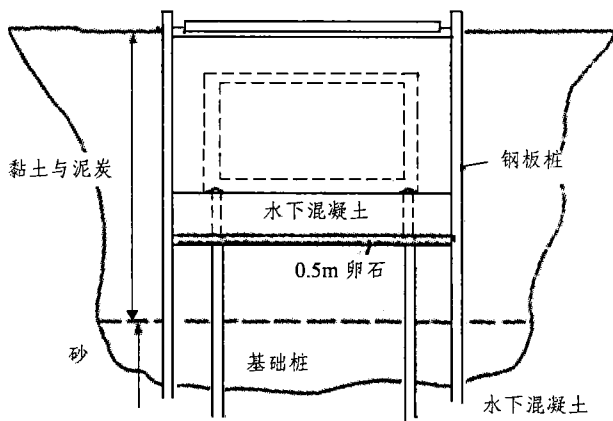


图 1.11 陆地隧道工程原理和水下混凝土

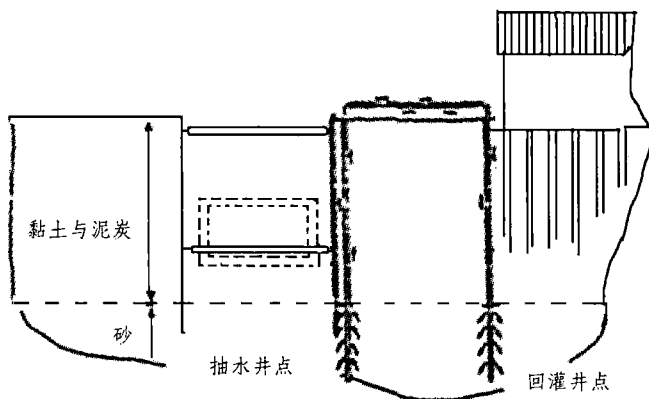


图 1.12 陆地隧道原理和回灌井点体系

对于壳式隧道,需假设在工程实施期间的某时段里靠近基坑会有 110 kN/m 的地面荷载,这是因为需紧靠基坑一侧将壳式构件运到工地。由于荷载向深处扩散,载重拖车和壳式构件的重量造成对钢板桩围堰的额外水平荷载不容忽视