

11 沉管结构



本讲内容



11.1 概述

11.2 沉管结构的设计

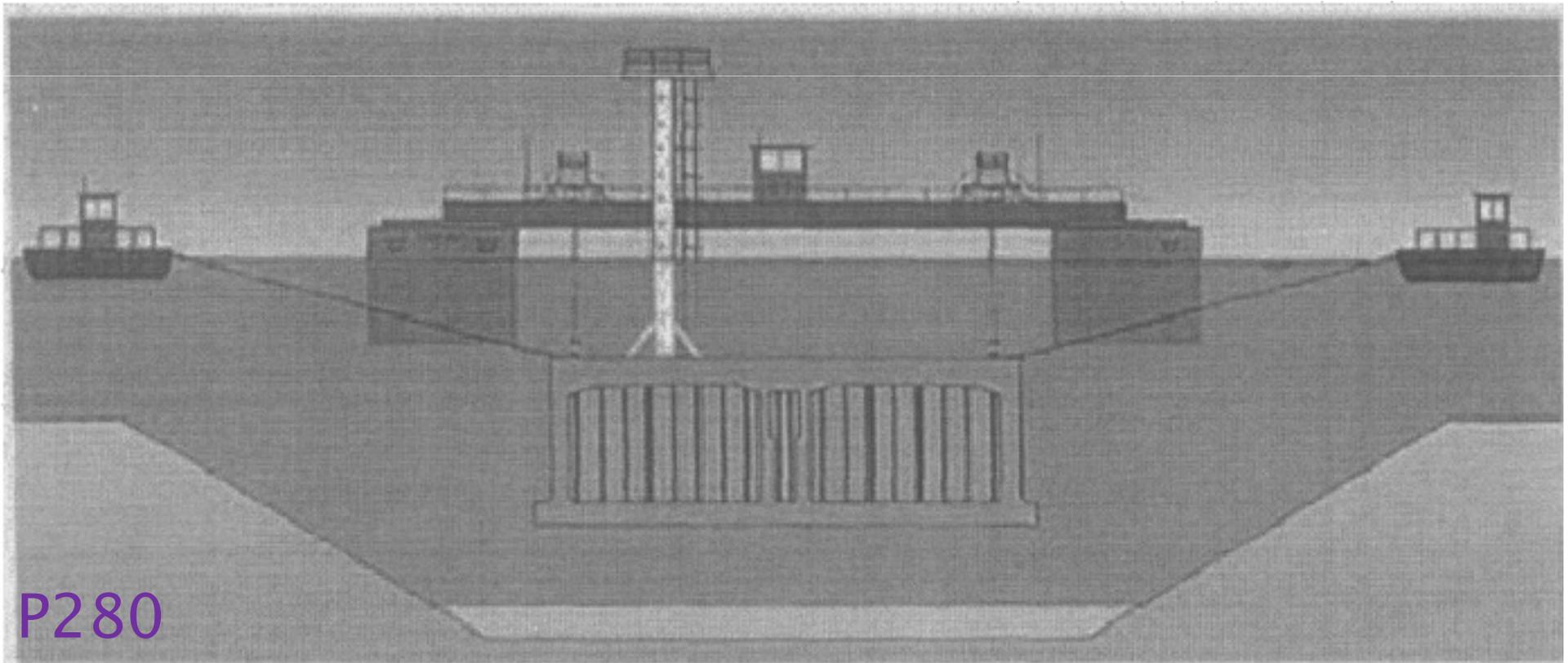
11.3 沉管的防水设计

11.4 变形缝与管段接头设计

11.5 沉管基础设计

11.1 概述

定义：在水底预先挖好沟槽，把在陆上其它地方预制的适当长度的管体，浮运到沉放现场，顺序地沉放到沟槽中，并回填覆盖而形成的结构。



二十世纪50年代解决了两项关键技术——水力压接法和基础处理，沉管法已经成为水底隧道最主要的施工方法，尤其在荷兰(北美、西欧、日本)。

我国现有多条沉管法隧道：上海外环越江隧道（亚洲第1世界第2）上海金山供水隧道，另外在宁波（宁波甬江水底隧道）、广州（广州珠江水底隧道）、香港（香港西区沉管隧道、香港东区沉管隧道）和台湾高雄跨海隧道。

准备建造的琼州海峡隧道（预计35公里）；港珠澳
(6KM)

11.1.1 与其它结构形式和施工方法的比较

A 与桥梁等方案的比较

公路或城市道路遇到江河、港湾时，渡越的办法很多，有轮渡、桥梁、水底隧道等。

i) 轮渡是最简易的，它的优点是基本建设投资少，运营费用亦小；但无法适应较大的交通量。

ii) 桥梁的主要优点是单位长度造价低。在渡越不通行海轮的江、河或海轮达不到的上游河段时，一般总是

首先考虑建桥

First Tay Bridge



Original Tay Bridge before the
1879 collapse



New Tay Bridge



Northern segment of the second Tay Bridge, showing stumps of the original bridge's piers poking above the Tay



Newcastle Upon Tyne



millennium_bridge

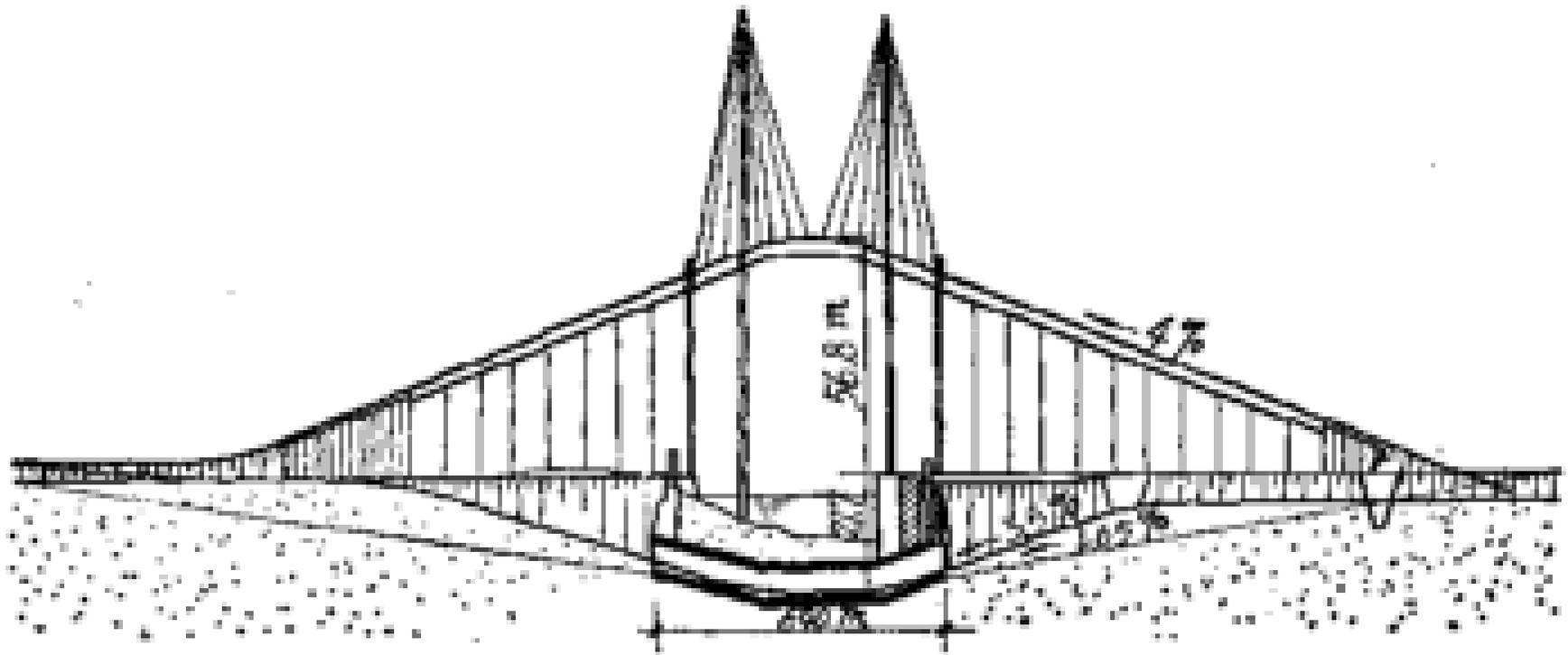




中新网
ChinaNews.com

iii) 水底隧道主要是用在市区港湾或通行海轮的江、河上。

在这种场合下，如采用桥梁渡越，则由于海轮航道净空的需要，桥梁的跨径必须较大，桥下净空很高，引桥加引道的长度也很长，这样的“高桥”，不但总造价常超过一般概念中认为比较贵的水底隧道，而且这么长的引桥、引道在市区内通过，其干扰和影响也不是易于妥善解决的。



桥、隧方案的比较

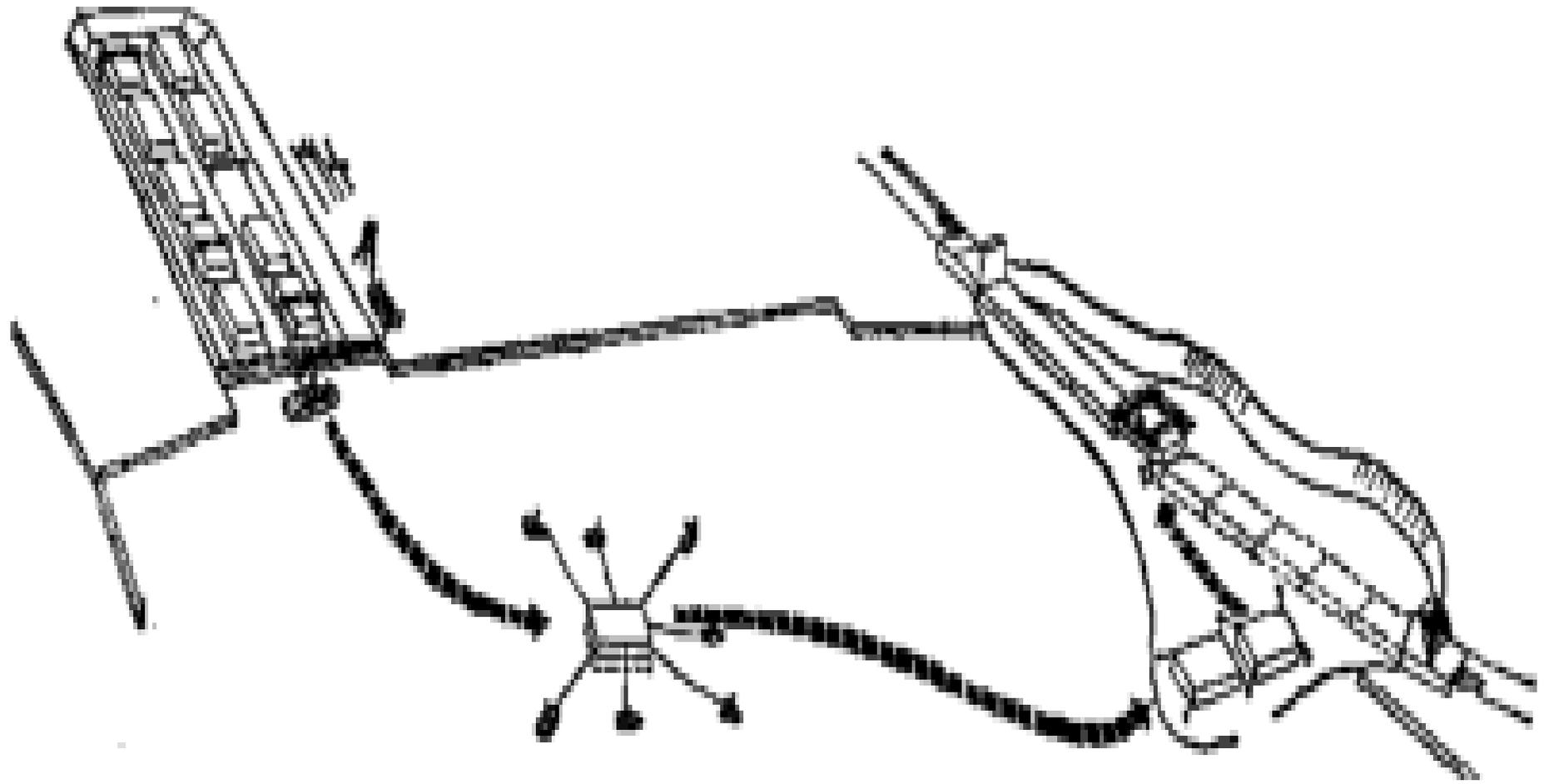
B 与其它施工方法的比较

在水底隧道的施工中，如有条件构筑围堰，则以采用明挖施工最为简单，没有条件构筑围堰时，较常用的是盾构法和沉管法。

从本世纪的五十年代起，由于沉管法的主要技术难关相继突破，它的施工方便、防水可靠、造价便宜等优点，乃更明显突出。所以，在近年来的水底隧道建设中，沉管法已取代了曾经保持了一百多年首居地位的盾构法。（表11-1）

11.1.2 沉管隧道的施工

沉管施工法，亦曾称为预制管段施工法、沉放施工法等。施工时，先在隧址以外的临时干坞内制作钢筋混凝土的隧道管段，两端用临时封墙封围起来。制成后向临时干坞内灌水，使管段逐节浮出水面，并用拖轮拖运到指定位置上去。这时设计隧道处，已预先挖好一个水底沟槽。待管段定位就绪后，向管段里灌水压载，使之下沉。然后把这些沉设完毕的管段在水下联接起来。经覆土回填后，便筑成了隧道。



沉管施工法

沉管结构特点：

1. 隧道的施工质量容易做好；
2. 建筑单价和工程总价均较低；
3. 隧位现场的施工期短；
4. 操作条件好；
5. 对地质条件的适应性强，能在流砂层中施工，不需特殊设备或措施；
6. 适用水深范围几乎是没限制的；
7. 断面形状选择的自由度较大，断面空间的利用率较高；
8. 水流较急时，沉没困难，须用作业台施工；
9. 施工时须与航道部门密切配合，采取措施（如暂时的航道迁移等）保证航道畅通。

11.2 沉管隧道的设计

主要有：总体几何设计，结构设计，通风设计、照明设计，内装设计，给排水设计、供电设计、运行管理设施设计等。

其中总体几何设计非常重要，常是决定隧道工程设计成败的一个关键。

总是千方百计地降低覆盖率，把洞口建筑尽可能地移近水边，带来了通风方式的根本性变革，在隧管中不再设置风道。

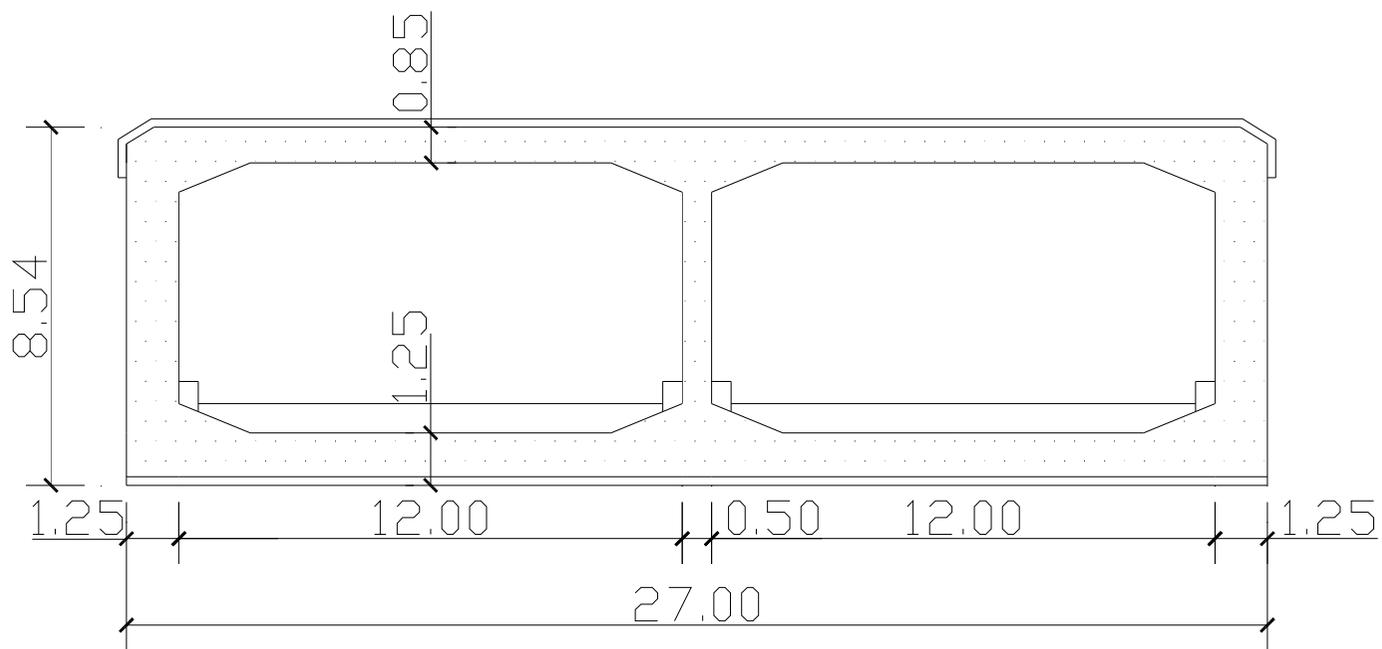
11.2.1 沉管结构的类型

两种基本类型：钢壳沉管和钢筋混凝土沉管。

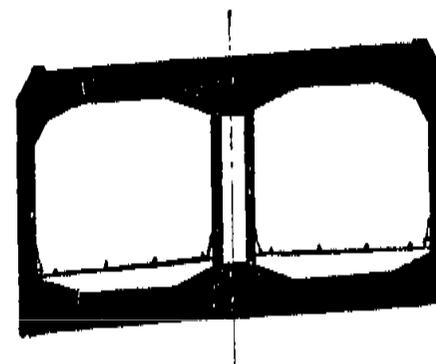
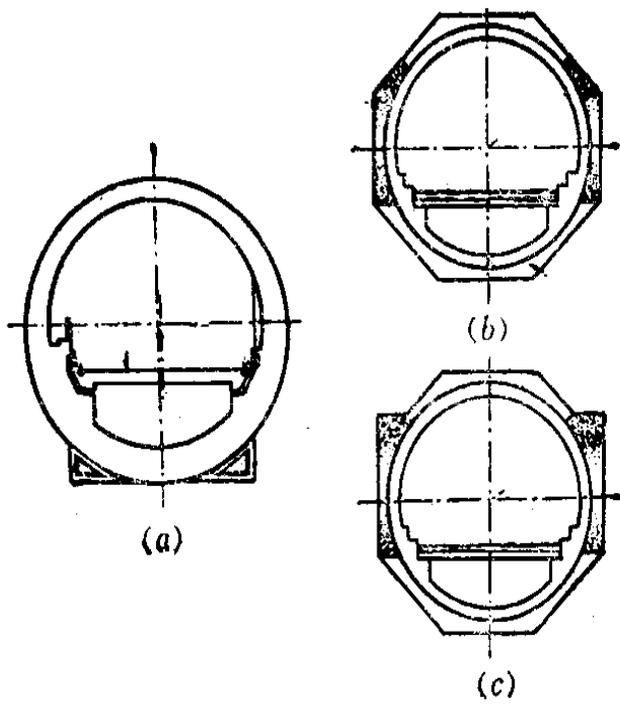
沉管隧道按截面形状有圆形和矩形两类。

(1) 圆形沉管隧道：这类沉管内边均为圆形、外边则为圆形、八角形或花篮形，多半用钢壳作为防水层；

(2) 矩形沉管隧道：在每个断面内可以同时容纳2-8个车道，矩形断面的空间利用率较高；



沉管隧道的断面（矩形）



a圆形 b八角形 c花篮形

P288 图11-7

11.2.2 沉管结构的荷载

结构自重、水压力、土压力、浮力、施工荷载、波浪和
水流压力、沉降摩擦力、车辆活荷载、沉船荷载，地
基反力、温度应力、不均匀沉降所产生的附加应力、
地震等作用。

作用在沉管上的水压力是主要荷载。

沉管荷载表

表 11-2

序号	荷载类型	横 向	纵 向
1	水土压力、结构自重、管段内外压载重	★	★
2	管内建筑及车辆荷载	★	★
3	混凝土收缩应力	★	
4	浮力、地基反力	★	★
5	施工荷载	★	★
6	温差应力	★	★
7	不均匀沉降产生的应力		★
8	沉船抛锚及河道疏浚产生的特殊荷载	★	★
9	地震荷载	★	★

注：表中“★”标记表示作用有该种荷载。

表中 1、2、3、4 项为基本荷载；5、6、7 为附加荷载；8、9 为偶然荷载。

在上述荷载中，只有结构自重及其相应的地基压力是恒载。钢筋混凝土的容重可分别按 $2.46\text{t}/\text{m}^3$ （浮运阶段）及 $2.42\text{t}/\text{m}^3$ （使用阶段）计算。至于路面下的压载混凝土的容重，则由于密实度稍差，一般可按 $2.25\text{t}/\text{m}^3$ 计算。P 285

作用在管段结构上的水压力，是主要荷载之一。在覆土较小的区段中，水压力常是作用在管段上的最大荷载。设计时要按各种荷载组合情况分别计算正常的高、低潮水位的水压力，以及台风时或若干年一遇（如100年一遇）的特大洪水位的水压力。

土压力是作用在管段结构上的另一主要荷载，且常不是恒载。

施工荷载主要是端封墙、定位塔、压载等重量。在进行浮力设计时，应考虑施工荷载。在计算浮运阶段的纵向弯矩时，施工荷载将是主要荷载。如果施工荷载所引起的纵向负弯矩过大，则可调整压载水罐（或水柜）的位置来抵销一部分弯矩。

沉降摩擦力

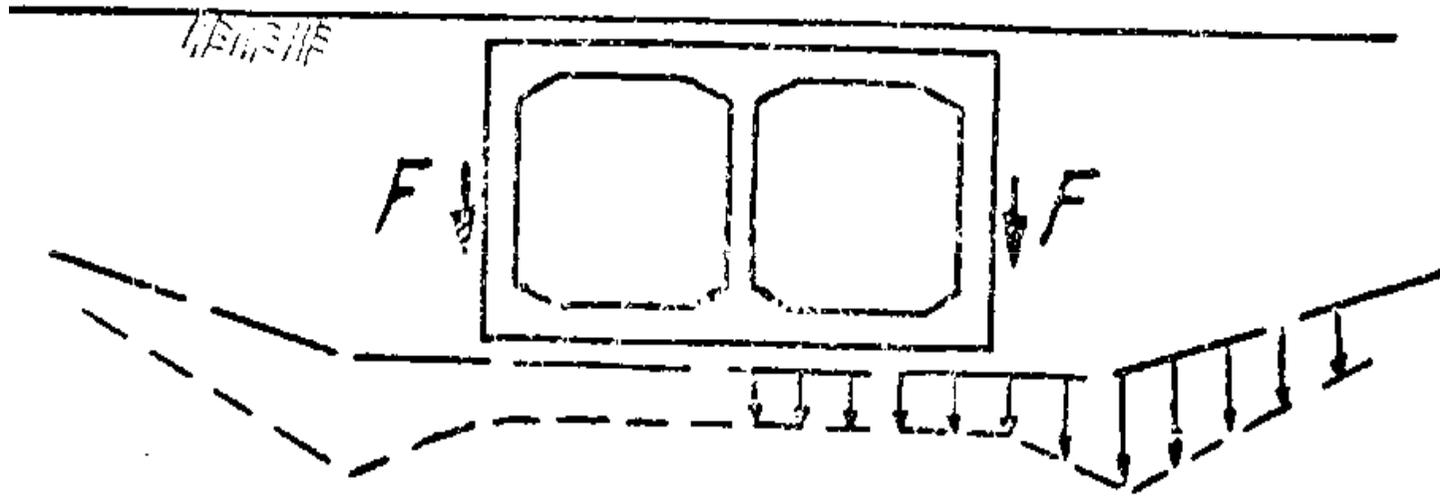
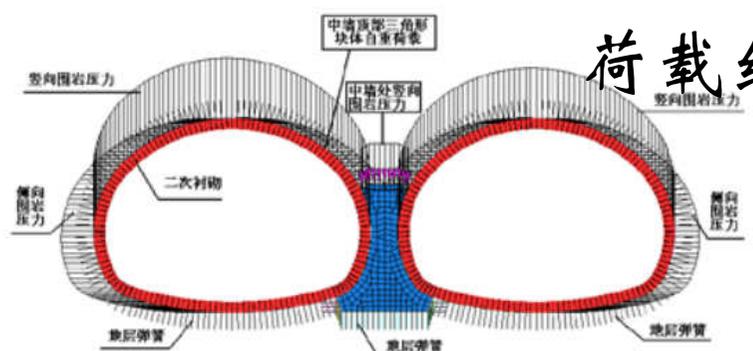


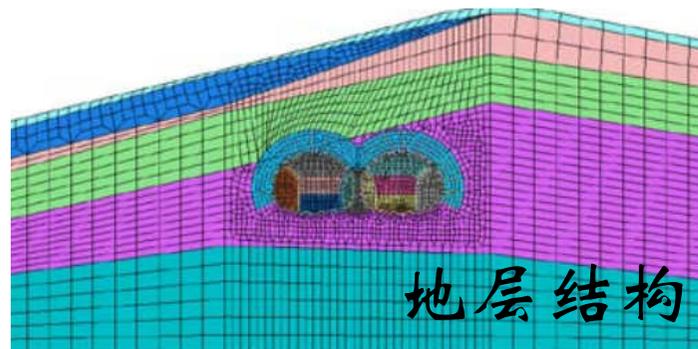
图11-4 沉降摩擦力

地基反力的分布规律

- ⌘ (1) 直线分布；
- ⌘ (2) 反力强度和各点沉降量成正比，即文克尔假定，又可以分为单一系数和多种地基系数的两种；
- ⌘ (3) 假定地基为半无限弹性体，按弹性理论计算反力。



荷载结构法



地层结构法

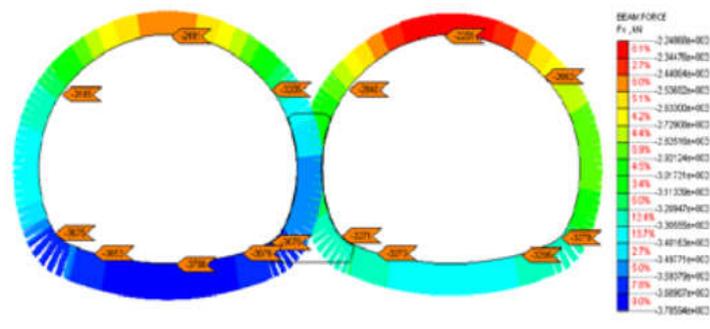


图 5 二次衬砌轴力图

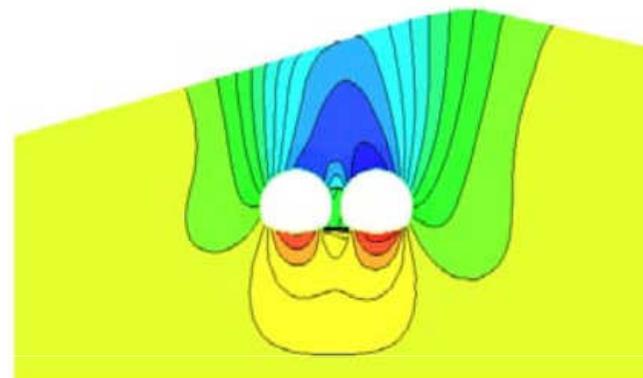


图 8 右洞开挖后的地层竖向位移图

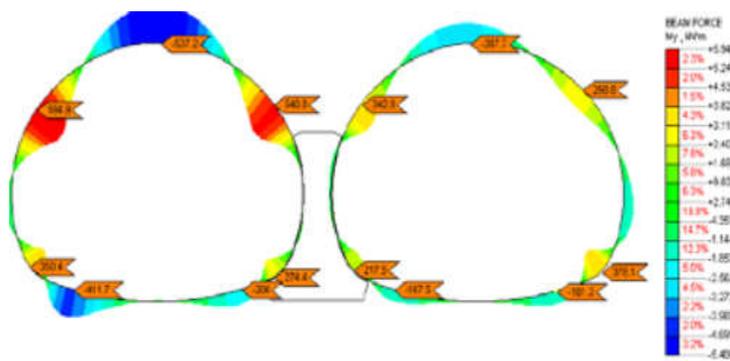


图 6 二次衬砌弯矩图

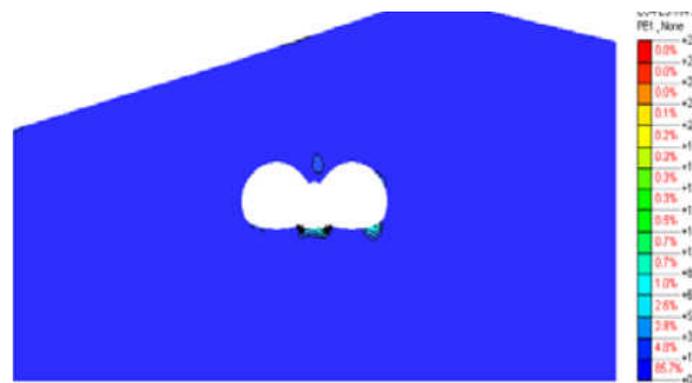
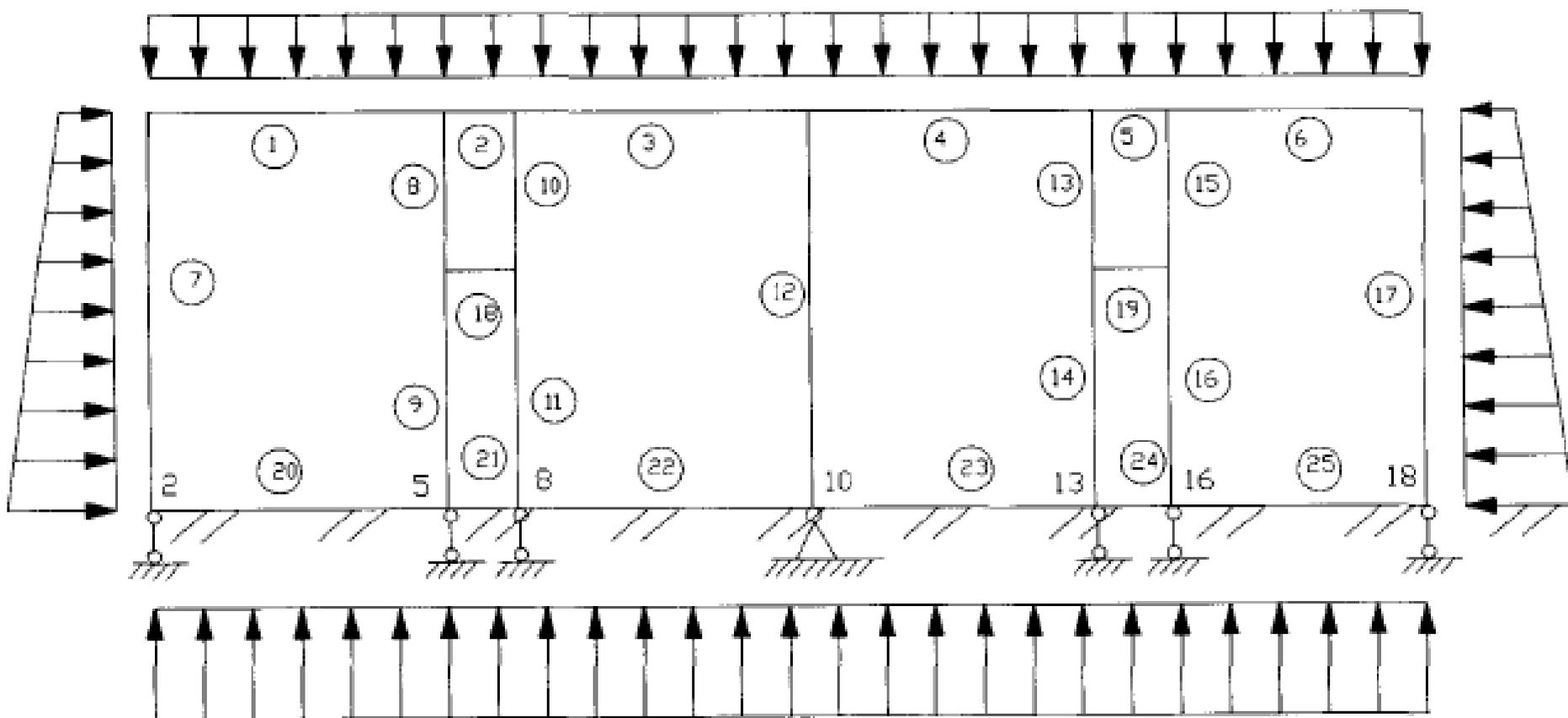


图 10 围岩塑性区图

迈达斯

计算采用荷载-结构法，按一般结构力学原理，应用杆系有限元的方法计算结构的内力及位移。



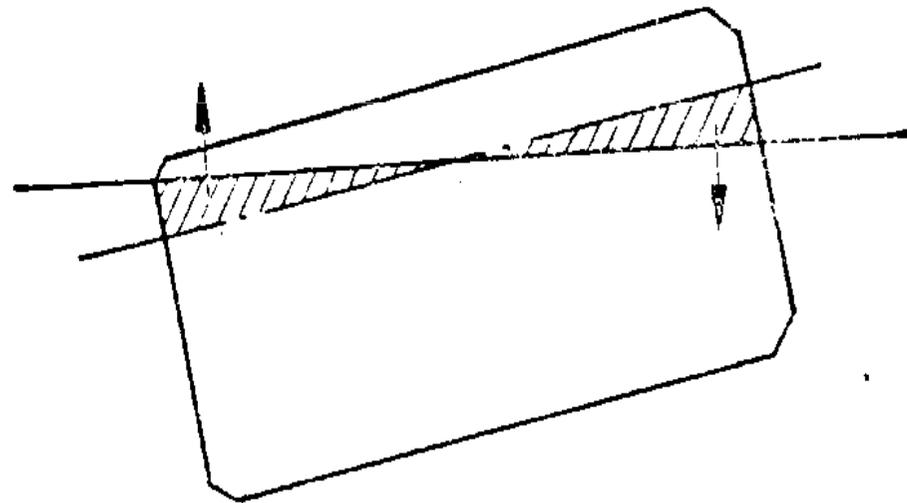
11.2.3 沉管的浮力设计

包括：干舷的选定和抗浮安全系数的验算。

A 干舷

管段在浮运时，为了保持稳定，必须使管顶面露出水面，其露出高度称为干舷。具有一定干舷的管段，遇到风浪后产生反倾力矩，保持平衡。

干舷的高度应适中，过小则稳定性差，过大时沉设困难。



浮力设计时，按照最大混凝土容重、最大混凝土体积和最小河水的比重来计算干舷。

B 抗浮安全系数

在管段沉设施工阶段，应采用1.05~1.1的抗浮安全系数。

管段沉设完毕后，务必大于1.05，防止“复浮”。

设计时需要按照最小混凝土容重、最小混凝土体积和最大河水的比重来计算抗浮安全系数。

C 沉管结构的外廓尺寸

沉管结构的外廓尺寸，必须通过浮力设计才能确定；

沉管结构的外廓高度，往往超过车道净空高度与顶底板厚度之和。

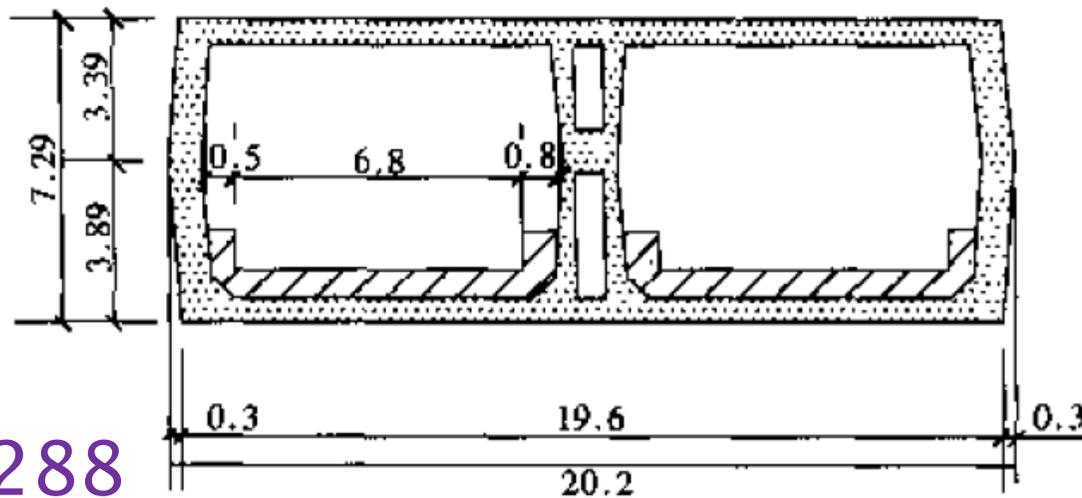


图11-8 沉管的结构

P 288

11.2.4 沉管结构计算与配筋

A 假定断面结构分析

其结构内力分析须经过“截面尺寸——分析内力——修正尺度——复算内力”的几次循环。

避免采用剪力钢筋，常采用变截面或折拱形结构。

不能只以一个断面的结构分析来代表整节管段。多以河中段全长的横断面配筋计算，尽管计算量较大，目前一般采用电算分析。

B 纵向结构计算

施工阶段的沉管纵向受力分析，主要是计算浮运、沉设时，
施工荷载、波浪力所引起的内力。

使用阶段的沉管纵向受力分析，一般按照弹性地基梁理论
进行计算。

C 结构分析与配筋

沉管结构的混凝土强度等级，宜采用C30-C40。

由于沉管结构对贯通裂缝非常敏感，非贯通裂缝宜控制在0.15-0.2mm以下，因此采用钢筋等级不宜过高，不宜采用III级和III级以上的钢筋，容许应力限于135-160MPa。

钢筋的容许应力一般限于135~160MPa，设计时采用的容许应力可按不同的荷载组合条件，分别加以相应的提高率：

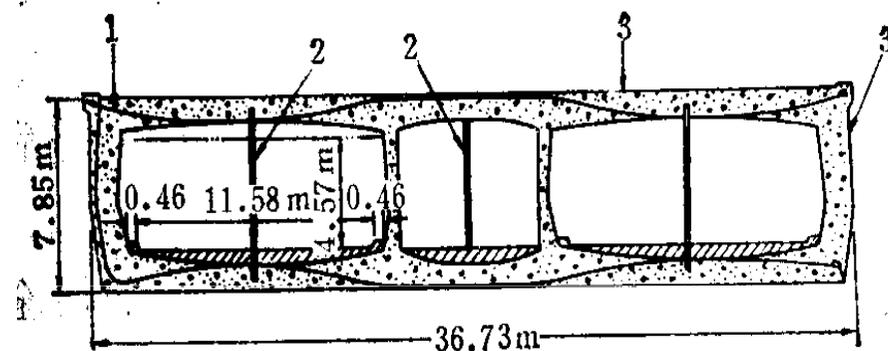
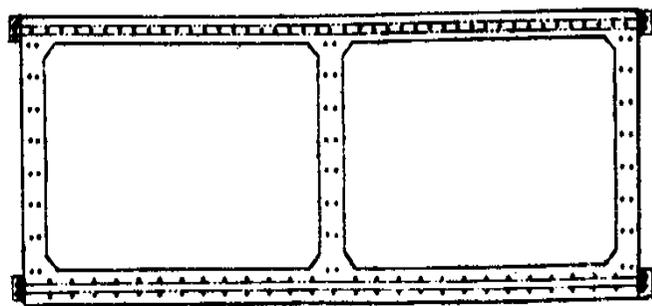
- ◆ A 结构自重 + 保护层、路面、压载重量 + 覆土荷载 + 土压力 + 高潮水压力 0%
- ◆ B 结构自重 + 保护层、路面、压载重量 + 覆土荷载 + 土压力 + 低潮水压力 0%
- ◆ C 结构自重 + 保护层、路面、压载重量 + 覆土荷载 + 土压力 + 台风时或特大洪水水位水压力 30 %

- ◆ D A + 变温影响 15%
- ◆ E A + 特殊荷载（如沉船、地震等）混凝土的主拉应力 30%
- ◆ 其他应力 50%
- ◆ 沉管结构的纵向钢筋，一般不应少于0.25%。

11.2.5 预应力的应用

一般情况下，沉管隧道采用普通混凝土结构而不用预应力混凝土结构。因沉管的结构厚度并非强度决定，而是由抗浮安全系数决定。

当隧道跨度较大，达三车道以上，或者水、土压力又较大时，采用预应力。



■ (a) Almendares 图11-9 (b) Lafontaine 图11-10

■ 1-预应力索; 2-临时拉索; 3-防水层

哈瓦那市

加拿大

P290-291

11.3 沉管的防水

11.3.1 沉管的防水措施

早期的沉管隧道都是利用船厂里的设备和船台，制成钢壳，待钢壳下水之后，再于浮态下进行衬砌混凝土的浇筑。这种钢壳既是施工阶段的外模，又是管段沉没以后使用阶段的防水层。

到六十年代初，开始在一些沉管隧道的工例中，全部采用柔性防水，完全不用钢板。

以上所述都是设在管段外表面的防水措施，可概称外防水。除外防水以外，沉管自身防水亦是一项极为重要的防水措施。

11.3.2 钢壳与防水钢板

钢壳作为防水措施，钢壳缺点不少，主要是：

- (1) 耗钢量大。
- (2) 焊接质量。
- (3) 防锈问题仍未切实解决。
- (4) 钢板与混凝土之间粘结不良。

由于钢壳防水的昂贵而不可靠，改用钢板防水（即仅在管段底板下用钢板防水层）的工例日益增多。

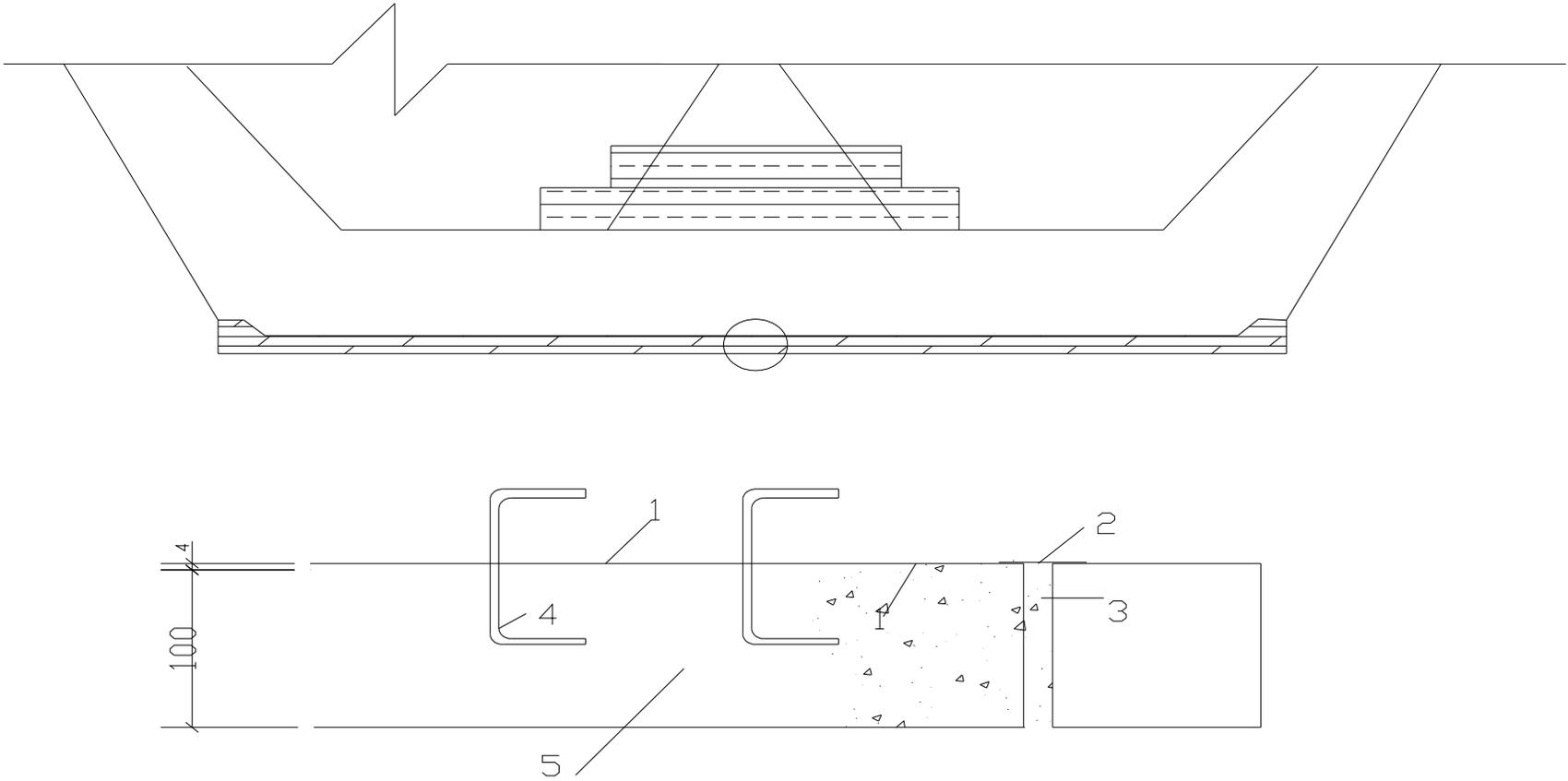


图 11-11 防水钢板德构造

1- 防水钢板； 2- 贴封； 3- 填料； 4-横栓； 5- 混凝土板

防水钢板的单位面积用钢量；比钢壳的单位面积用钢量低得多，仅为其 $1/4$ 左右。主要是钢板厚度可以薄很多，而且又略去大量的加筋及支撑，基本上不再使用型钢。

11.3.3 卷材防水与涂料防水

卷材防水层是用胶料把多层沥青类卷材或合成橡胶类卷材胶合成的粘贴式防水层。

沥青类卷材品种很多，沉管隧道外防水用的卷材，以选用织物卷材为宜，取其强度大，韧性好。

卷材防水的主要缺点是施工工艺较繁，而且在施工操作过程中稍有不慎就会造成“起壳”而返工，返工时非常费事。

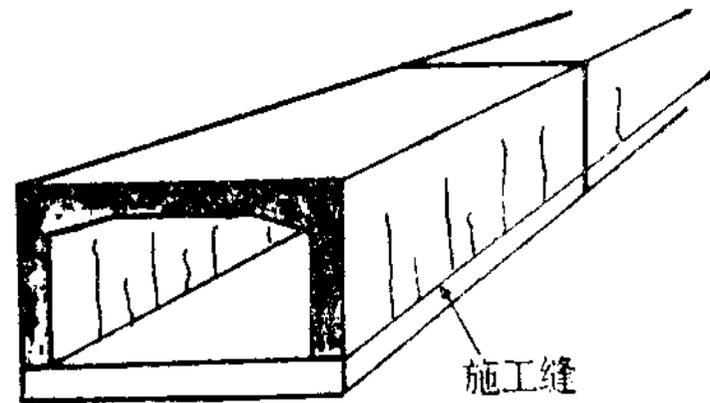
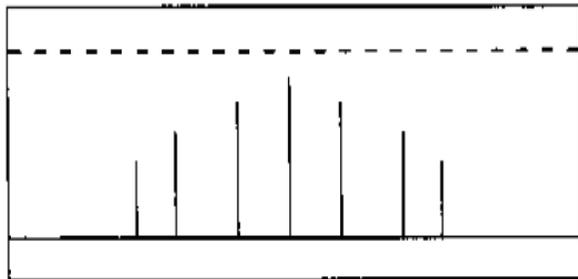
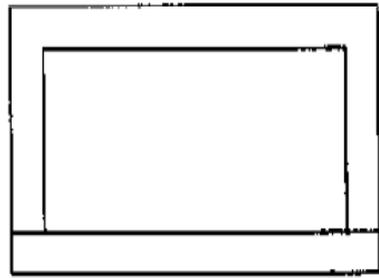
涂料防水渐渐应用到管段防水上来，它最突出的优点是操作工艺比卷材防水简单得多，而且在平整度较差的混凝土面上，可以直接施工。

缺点：它的延伸率还不够；防水涂料的另一要求是能在潮湿的混凝土面上能直接涂布，目前也没有完全解决好。

11.4 变形缝与管段接头设计

11.4.1 变形缝的布置与构造

沉管结构一般都是二次浇筑，常易发生收缩裂缝。不均匀沉降等影响也易致管段开裂。

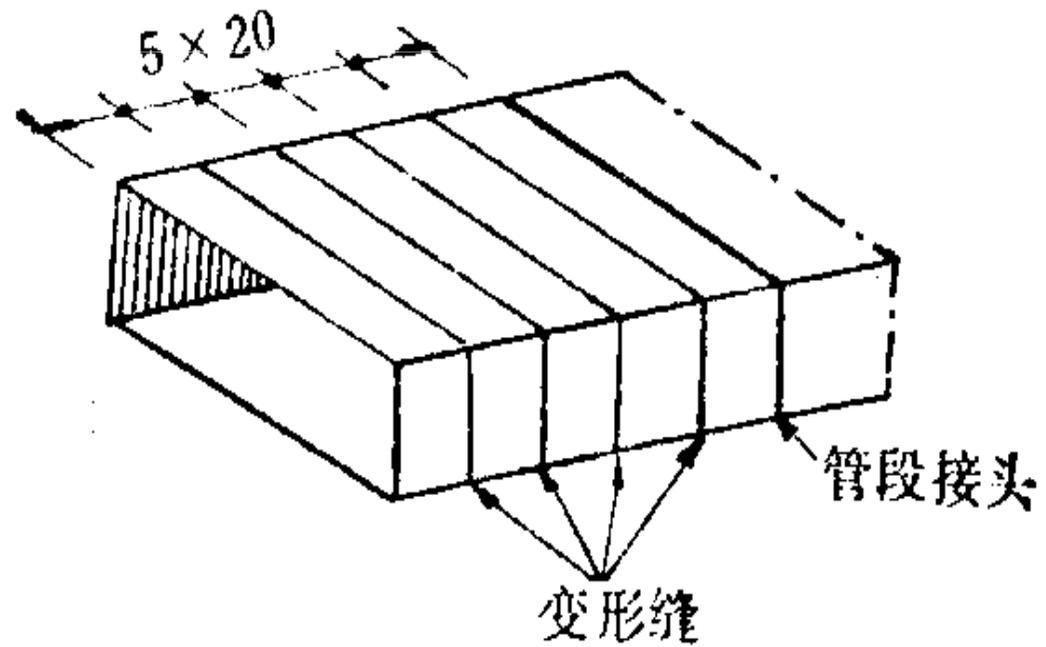


P294

图11-12 常见的收缩裂缝

变形缝

每节管段分割成若干节段，一般为15~20m左右。



变形缝须满足

⌘ i 能适应一定幅度的线变形与角变形。

⌘ ii 在浮运、沉设时能传递纵向弯矩。

⌘ 外排纵向钢筋全部切断。而内排纵向钢筋则暂时不予切断，待沉设完毕后再将跨越变形缝之内排纵向钢筋，全部切断。

⌘ iii 在任何情况下能传递剪力

⌘ 变形前后均能防水，设置止水带

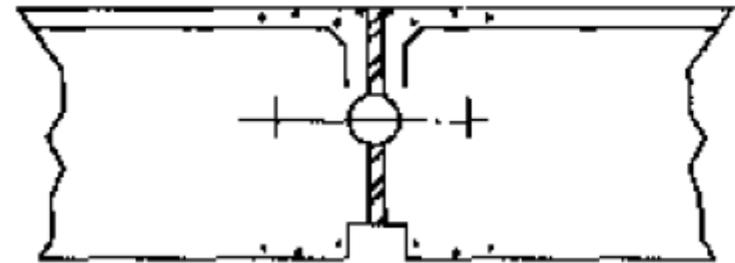


图 11-14 变形缝的临时传力措施图

11.4.2 止水缝带

- ⌘ 普遍的是橡胶止水带和钢边橡胶止水带。
- ⌘ 橡胶止水带可用天然橡胶（含胶率70%）制成，也可用合成橡胶（如氯丁橡胶等）制成。
- ⌘ 地下工程中的橡胶止水带的耐用寿命应在六十年以上。
- ⌘ 经老化加速实验亦可断定其安全年限超过100年。



图 11-16 钢边橡胶止水带
1—钢边（0.7mm厚钢板）



11.4.3 管段接头

管段沉设完毕之后，须与前面已沉设好的管段（简称既设管段）或竖井接合起来。这项联接工作在水下进行，故亦称水下联接。

管段接头应具有以下功能和要求：

第一是水密性的要求，即要求在施工和运营各阶段均不漏水；

第二是接头应具有抵抗各种荷载作用和变形的能力；

第三是接头的各构件功能明确，造价适度；

第四是接头的施工性好，施工质量能够保证，并做到能检修。

常用接头有GINA止水带、OMEGA止水带以及水平剪切键、竖直剪切键、波形连接件、端钢壳及相应的连接件。

GINA带和OMEGA带起防水作用，水平剪切键可承受水平剪力，竖直剪切键可承受竖直剪力及抵抗不均匀沉降，波形连接件增加接头的抗弯抗剪能力，端钢壳主要是起安装端封门和接头其他部件、调整隧道纵坡的作用(图11-17(a))。

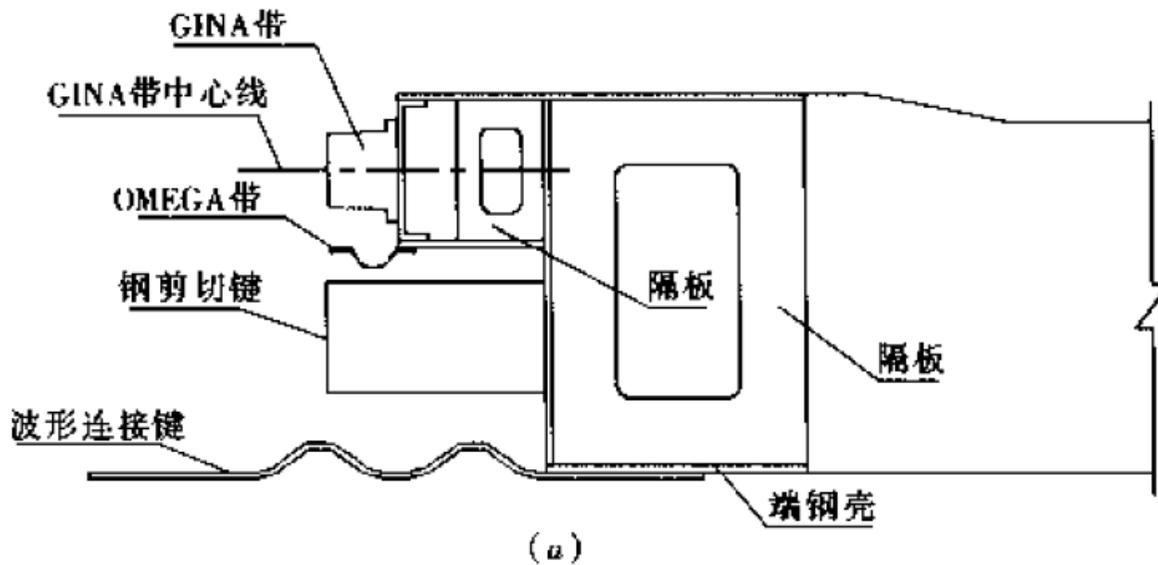


图11-17(a) GINA止水带接头构造图

水下联接的方法有两种

一种是水下混凝土联接法，一种是水力压接法。目前采用水力压接法的较多。

水力压接法就是利用作用在管段上的巨大水压力使安装在管段前端面（即靠近已设管段或竖井的端面）周边上的一圈胶垫发生压缩变形，形成一个水密性相当良好可靠的管段间接头。

水力压接法具有工艺简单、施工方便、质量可靠、工料费省等优点，目前已在各国水底隧道工程中普遍采用。

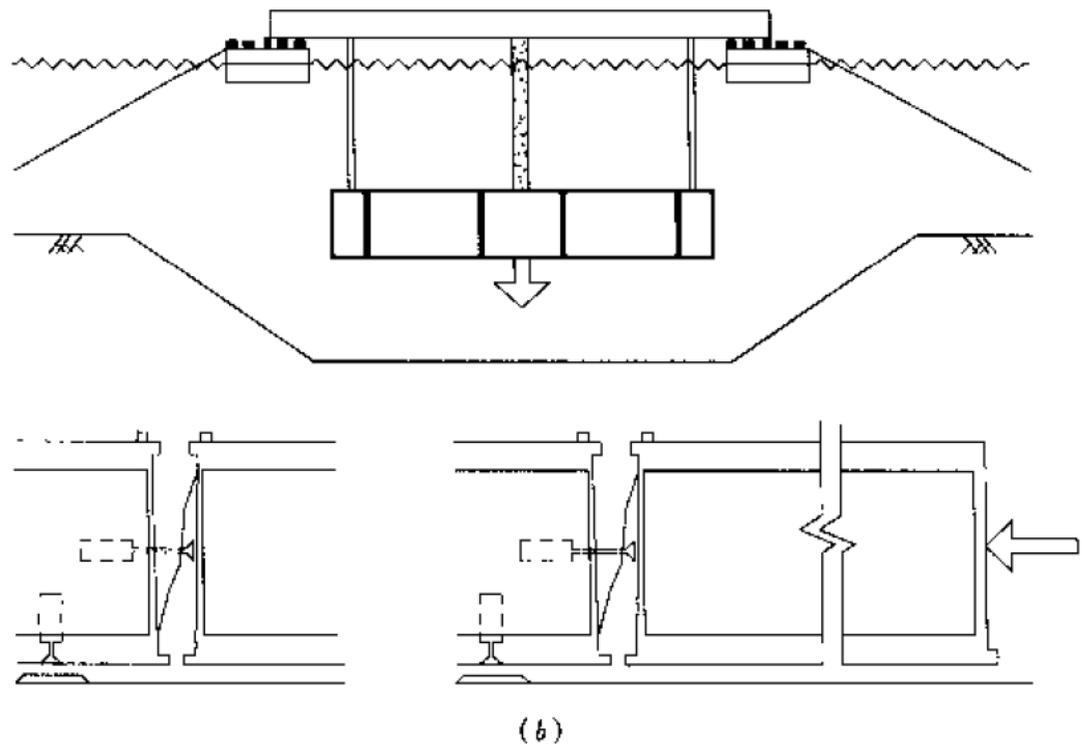


图11-17(b) 水力压接法



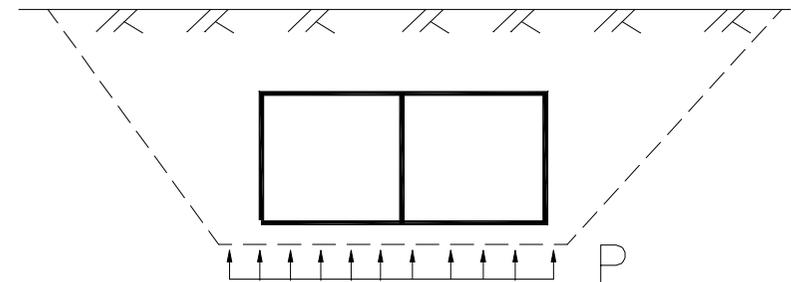
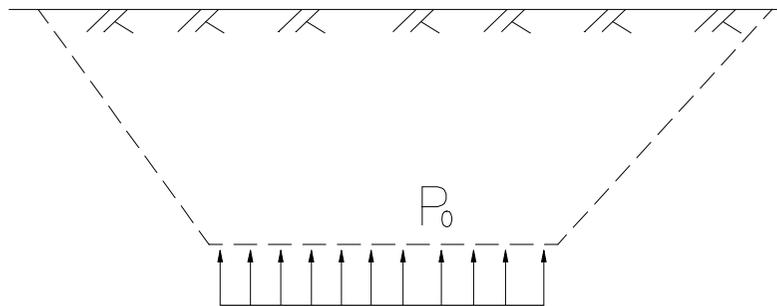
11.5 沉管基础设计

11.5.1 地基条件与沉管基础

在水底沉管隧道中，因作用在沟槽底面的荷载，不

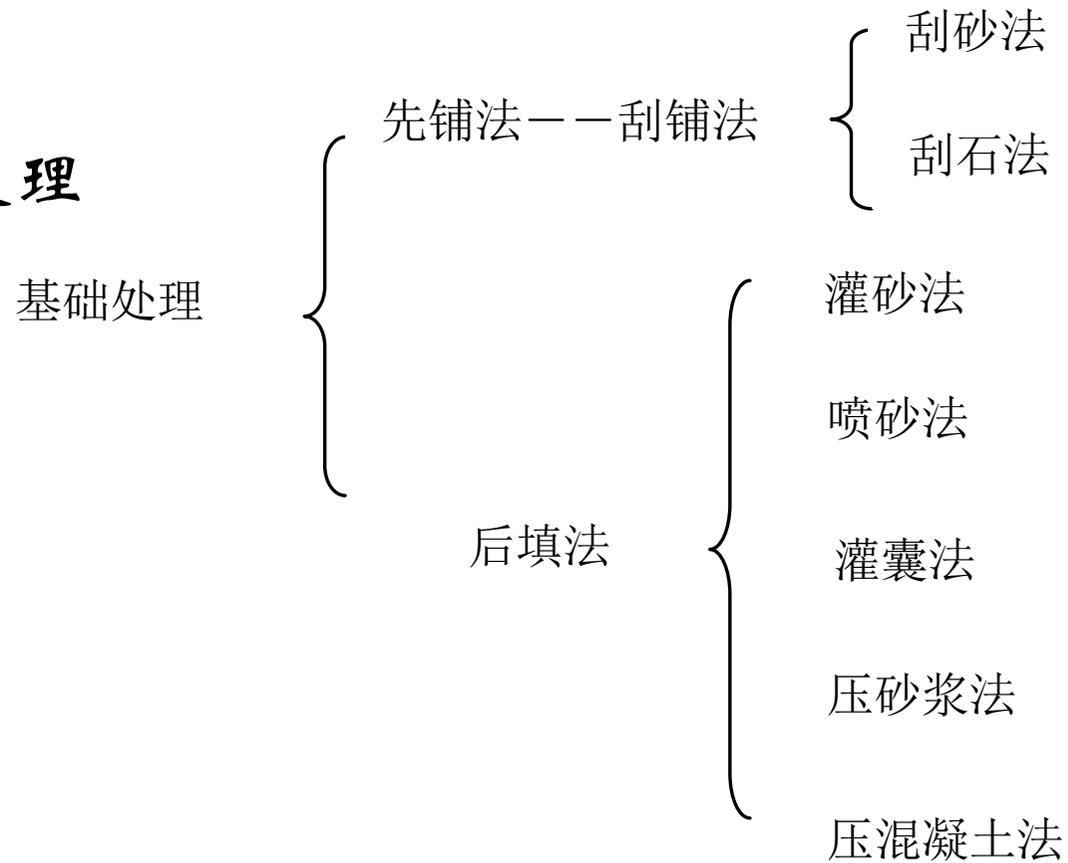
因设置沉管而有所增加，相反，却有所减小。

书P297-298
给出了解释



所以沉管隧道很少需要构筑人工基础以解决沉降问题。

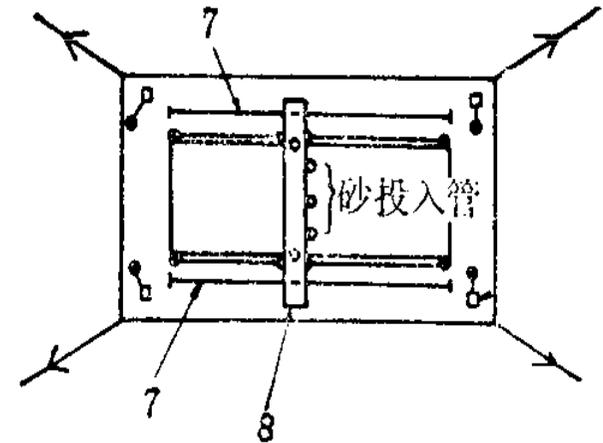
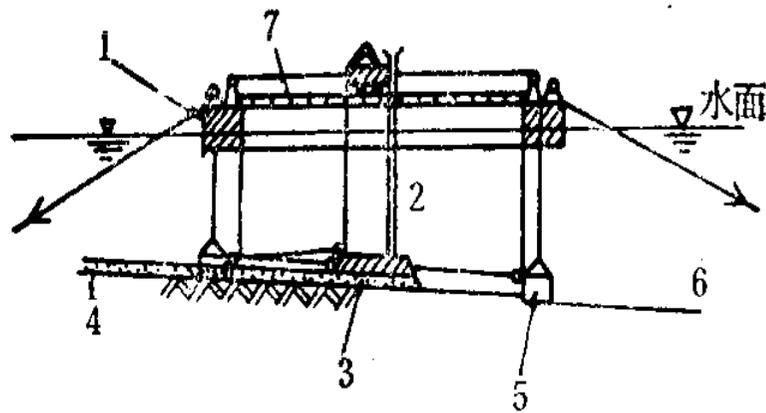
11.5.2 基础处理



其目的不是为了对付地基土的沉降基础以解决沉降，
而是消灭这些有害的空隙。

1) 先铺法

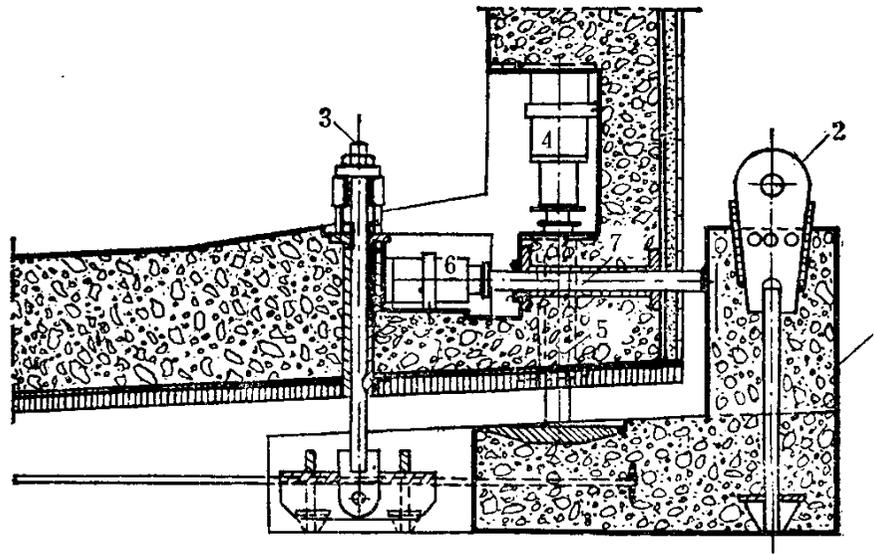
⌘ 先铺法实际上是利用刮铺机将铺垫材料（砂或石）设置成平整的垫层。



- 1-方环形浮箱；2-砂石喂料管；3-刮板；4-砂石垫层（0.6-0.9m）；5-锚块；6-沟槽底面；7-钢轨；8-移形钢梁

2) 后填法

- ✂ 在后填法中，安设水底临时支座，临时支座大多数为道渣堆上设置钢筋混凝土支承板，也可以采用短桩简易墩。



11.5.3 软弱土层上的沉管基础

- ⌘ 一般的解决办法有：
- ⌘ (1) 以粗砂置换软弱土层；
- ⌘ (2) 打砂桩，并加荷预压；
- ⌘ (3) 减轻沉管重量
- ⌘ (4) 采用桩基。

⌘ 沉管隧道中，群桩的桩顶标高不等；

⌘ 采取措施以使各桩能均匀受力：

☒ 水下混凝土传力法；

☒ 灌囊传力法；

⌘ 活动桩顶法

◆ 水下混凝土传力法

基桩打好后，先浇一、二层水下混凝土将桩顶裹住。而后再在水下铺上一层砂石垫层，使沉管荷载经砂石垫层和水下混凝土层传通到桩基上去。

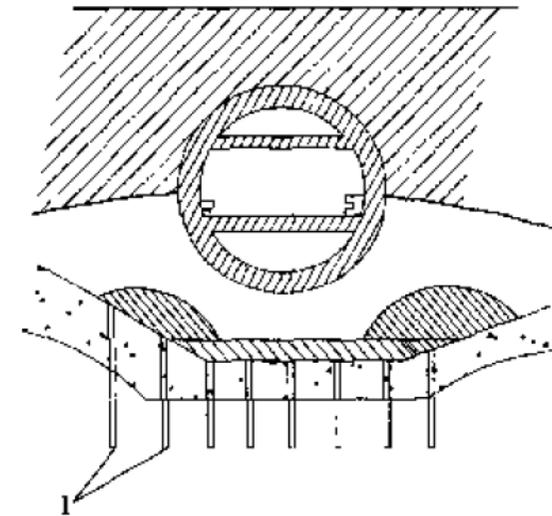


图11-20 水下混凝土传力法
1—水下混凝土

◆ 砂浆囊袋传力法

在管段底部与桩顶之间，用大型化纤囊袋灌注水泥砂浆加以垫实，使所有基桩均能同时受力。所用囊袋既要具有较高的强度，又要具有充分的透水性，以保证灌注砂浆时，囊内河水能顺利地排出囊外。砂浆的强度，不需要太高，略高于地基土的抗压强度即可。但流动度则要高些。故一般均在水泥砂浆中掺入斑脱土泥浆。

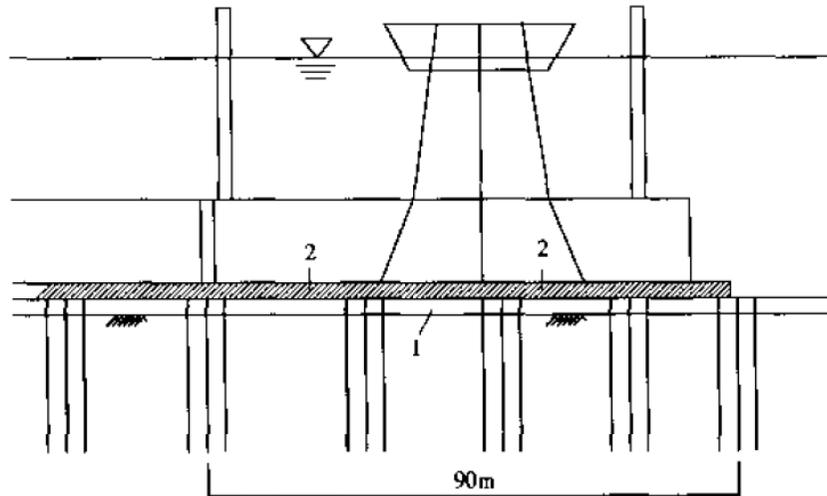
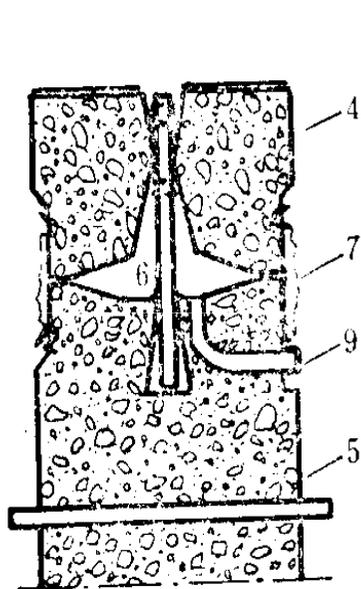
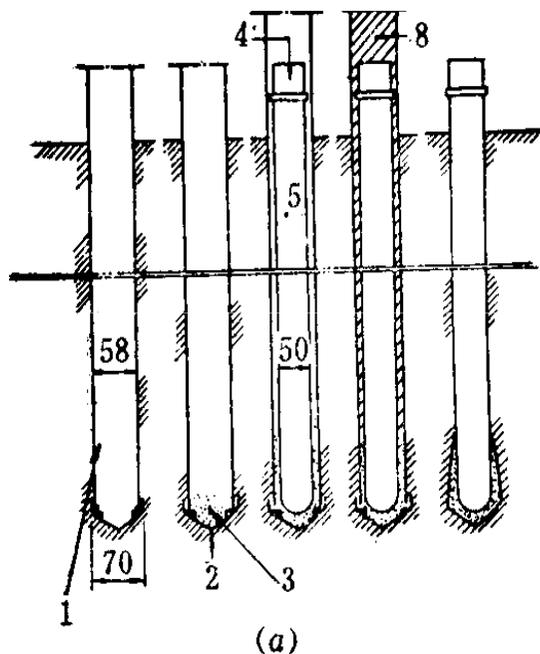


图 11-21 砂浆囊袋传力法
1—砂、石垫层；2—砂浆囊袋

◆ 活动桩顶法

在所有的基桩顶端设一小段**预制混凝土活动桩顶**。在管段沉设完毕后，向活动桩顶与桩身之间的空腔中灌注水泥砂浆，将活动桩顶顶升到与管底密贴接触为止（图11-22）。



(b) 图 11-22 活动桩顶法之一

- 1—钢管桩；2—桩靴；3—水泥浆；4—活动桩顶；5—预制混凝土桩；6—导向管；7—尼龙布囊；8—灌水；9—压浆管

以后日本东京港第一航道水底道路隧道（1973年建成）改用了一种钢制的活动桩顶。在基桩顶部与活动桩顶之间，用软垫层垫实。垫层厚度，按预计沉降量来决定。在管段沉设完毕后，在管底与活动桩顶之间，灌注砂浆加以填实（图 11-23）。

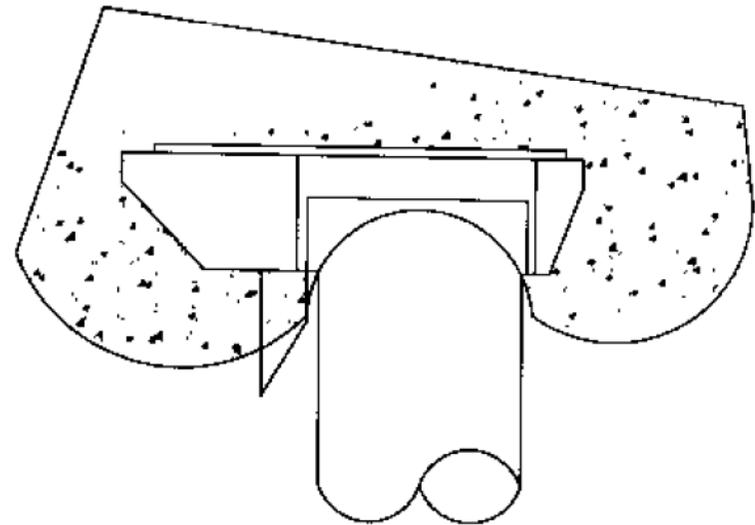


图 11-23 活动桩顶法之二

Th e

e n d

文件名格式：班级 学号 姓名 简略实验名称

邮件标题同文件名

Any questions please 发送至

xingzhengwu@163.com