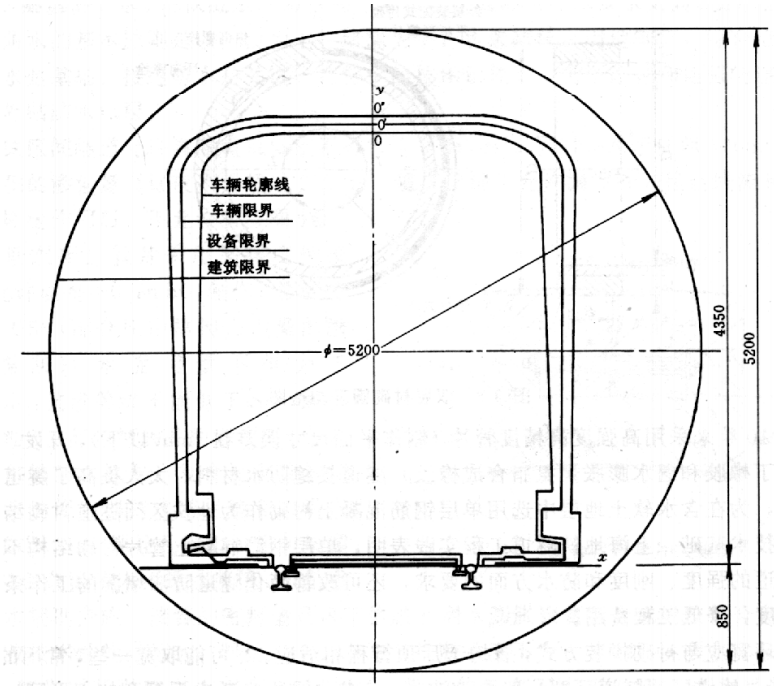
10 盾构法隧道结构



新中国成立以来开通地铁城市及地铁里程变化情况

年份	总长度（公里）
1969	54.1

注：数据不含港澳台

21数据新闻实验室出品

数据来源：中国城市轨道交通协会、wind、公开资料整理

本讲内容

10.1 衬砌形式和构造

10.2 衬砌圆环内力计算

10.3 衬砌断面设计

10.4 隧道防水及其综合处理

10.5 盾构新型管片衬砌形式简介

10.6 算例

盾构隧道简介

- 盾构（shield）是一种钢制的活动防护装置或活动支撑，是通过软弱含水层，特别是河底、海底，以及城市居民区修建隧道的一种机械。
- 头部可以安全地开挖地层，尾部可以装配预制管片或砌块，迅速地拼装成隧道永久衬砌。
- 盾构推进主要依靠盾构内部设置的千斤顶。

适用条件

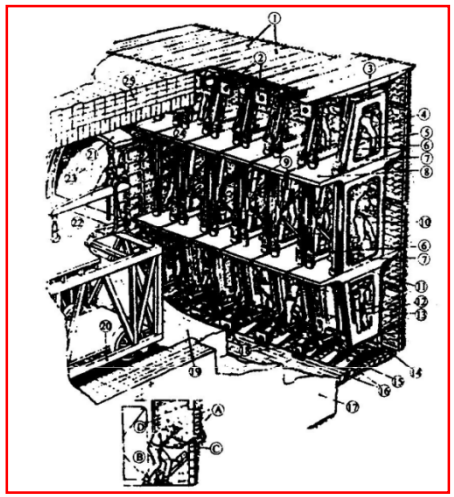
- 在松软含水地层中修建隧道、水底隧道及地下铁道时采用各种不同形式的盾构施工最有意义，特别是该施工方法属地表以下暗挖施工，不受地面交通、河道、航运、潮汐、季节等条件的影响，

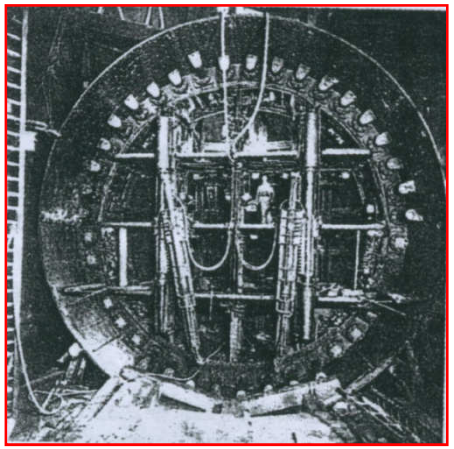
盾构隧道的历史

- 用盾构法修建隧道开始于1818年，法国工程师布鲁诺尔；
- 1825年在英国泰晤士河下首次用矩形盾构建造隧道；
- 近代，日本盾构法得到了迅速发展，用途越来越广，并研制了大量新型盾构；
- 我国于1957年北京下水道工程中首次出现2.6m小盾构；
- 上海市延安东路过江道路隧道使用11.0 m直径的大盾构；

盾构工法

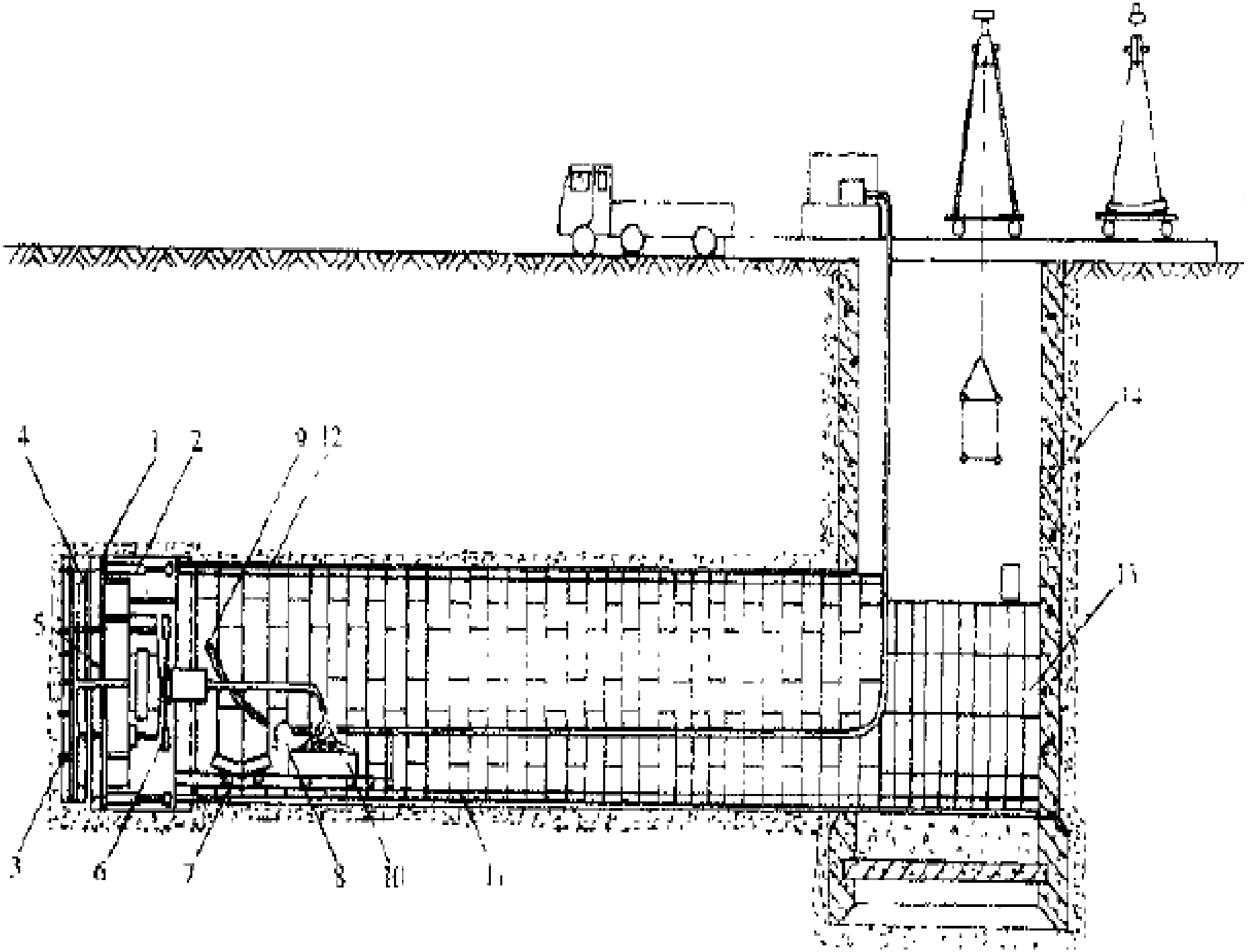
- 1806年,工程师 Brunel 针对松散饱和软土层发明了最早的**网格式盾构**并提出专利。
- 1818年, Brunel从蛆虫腐蚀船底成洞得到启发，提出了**全封闭螺旋式**盾构工法(土压平衡盾构的原型)。
- 1825～1843年， Brunel设计的**方形铸铁框盾构**贯通了泰晤士河的第一条隧道。





- 1869年，Burlow和Great负责建造泰晤士河的第二条隧道， Great采用新开发的圆形盾构、扇形铸铁管片。
- 1886年，Great在南伦敦铁路隧道施工中使用了盾构和压气组合工法，为现在的盾构工法奠定了基础。

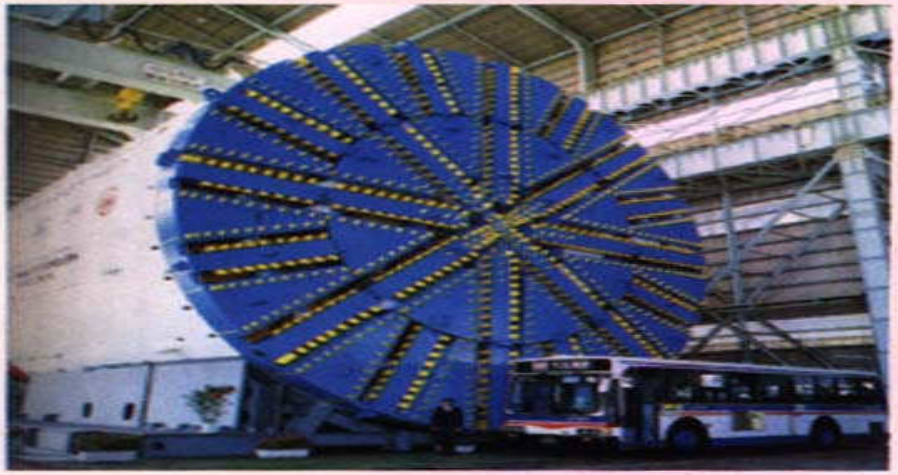
隧道全线贯通，跨上中环最后一环！
上海城建隧道股份
上海城建隧道股份


4
1
2
9
12
5
3
6
7
8
10
11
14
13

上料
hoist
盾构头来

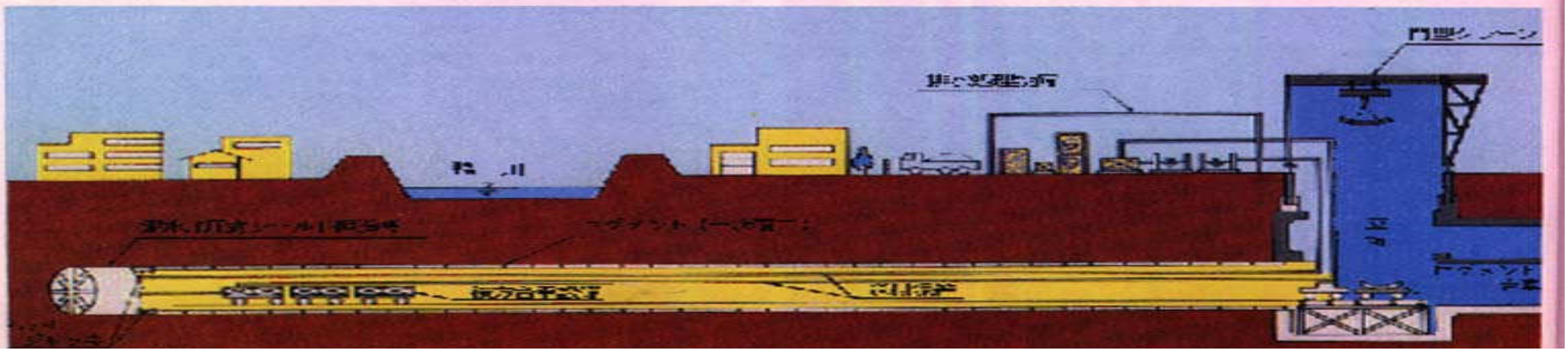
彩图 7

彩图 8

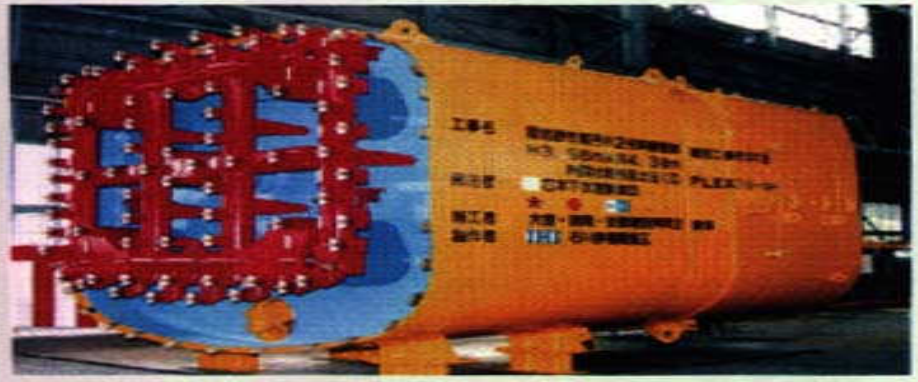


彩图 9

彩图 10

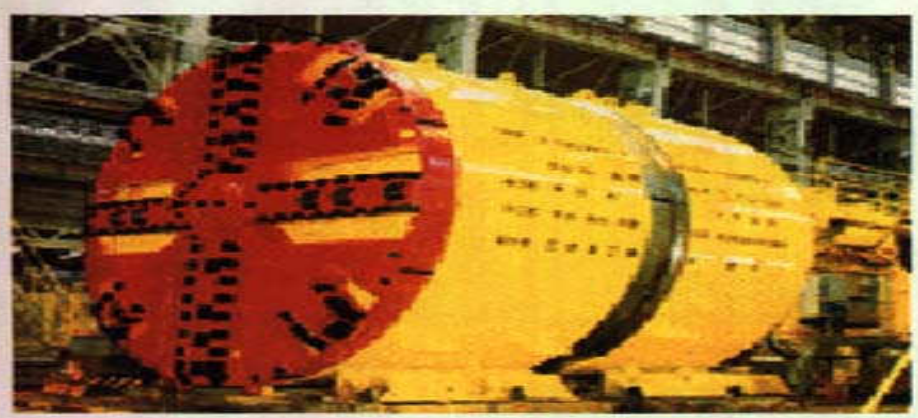


（彩色插图）



彩图 1

彩图 2

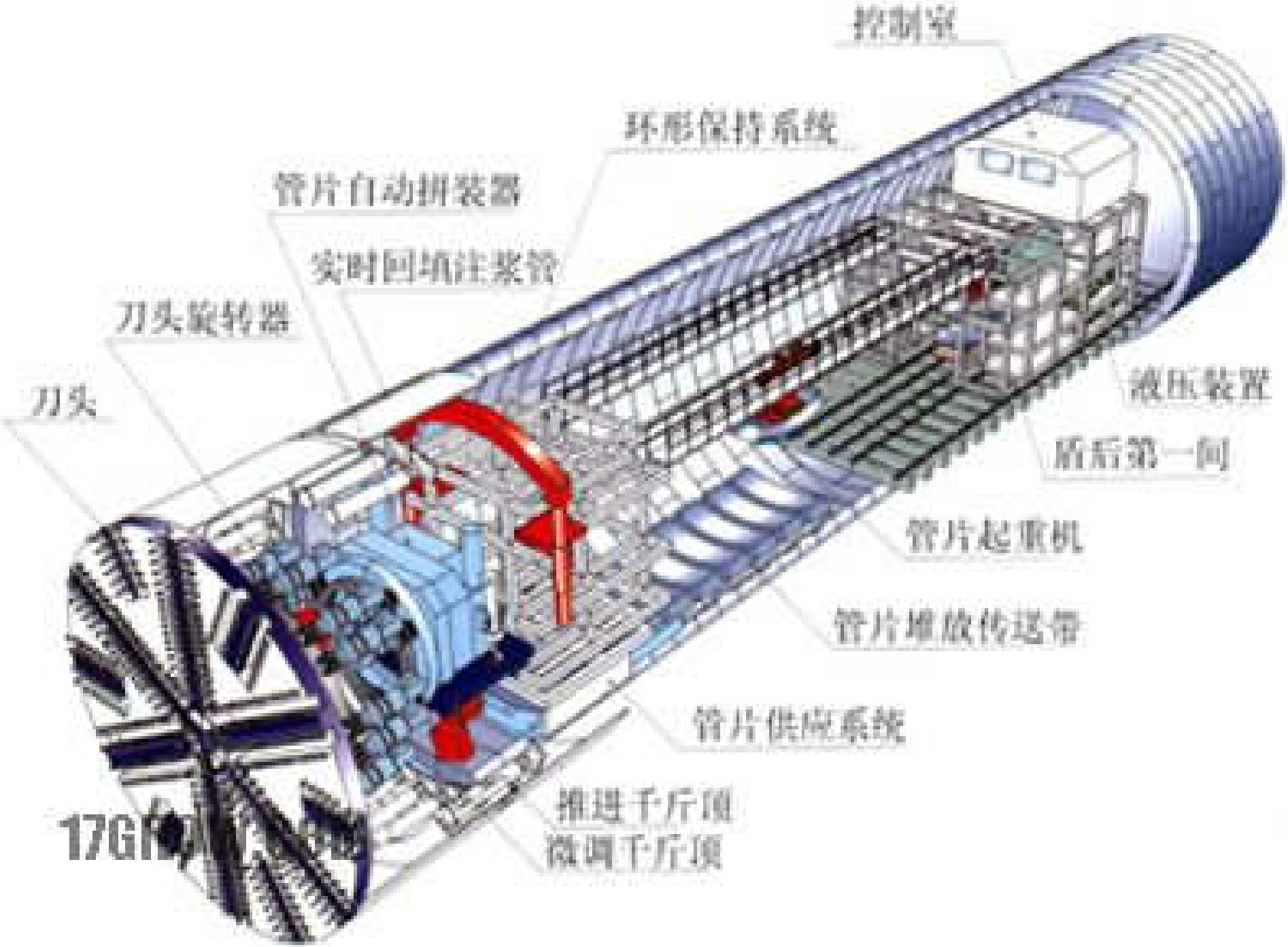


彩图 3

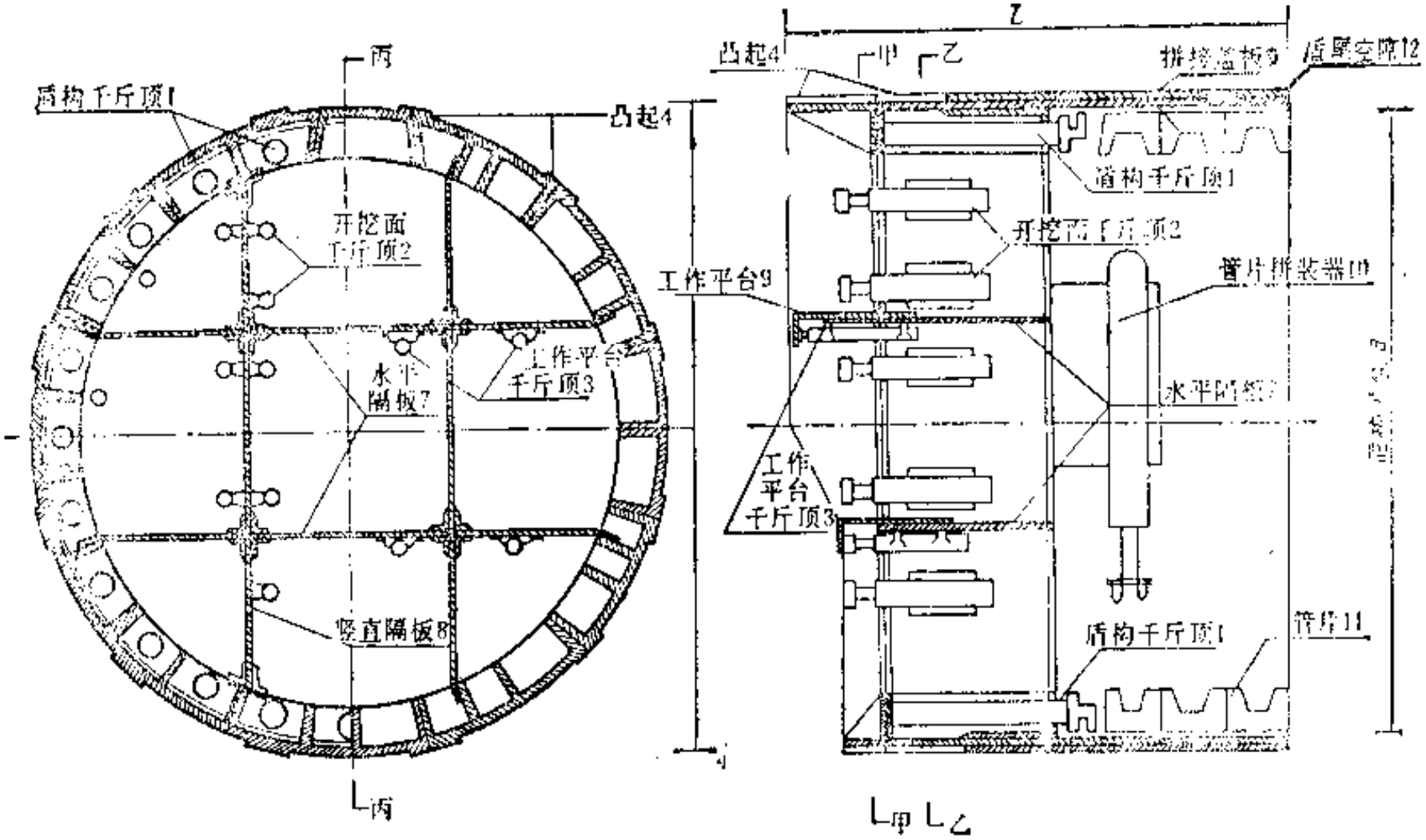
彩图 4

彩图 5

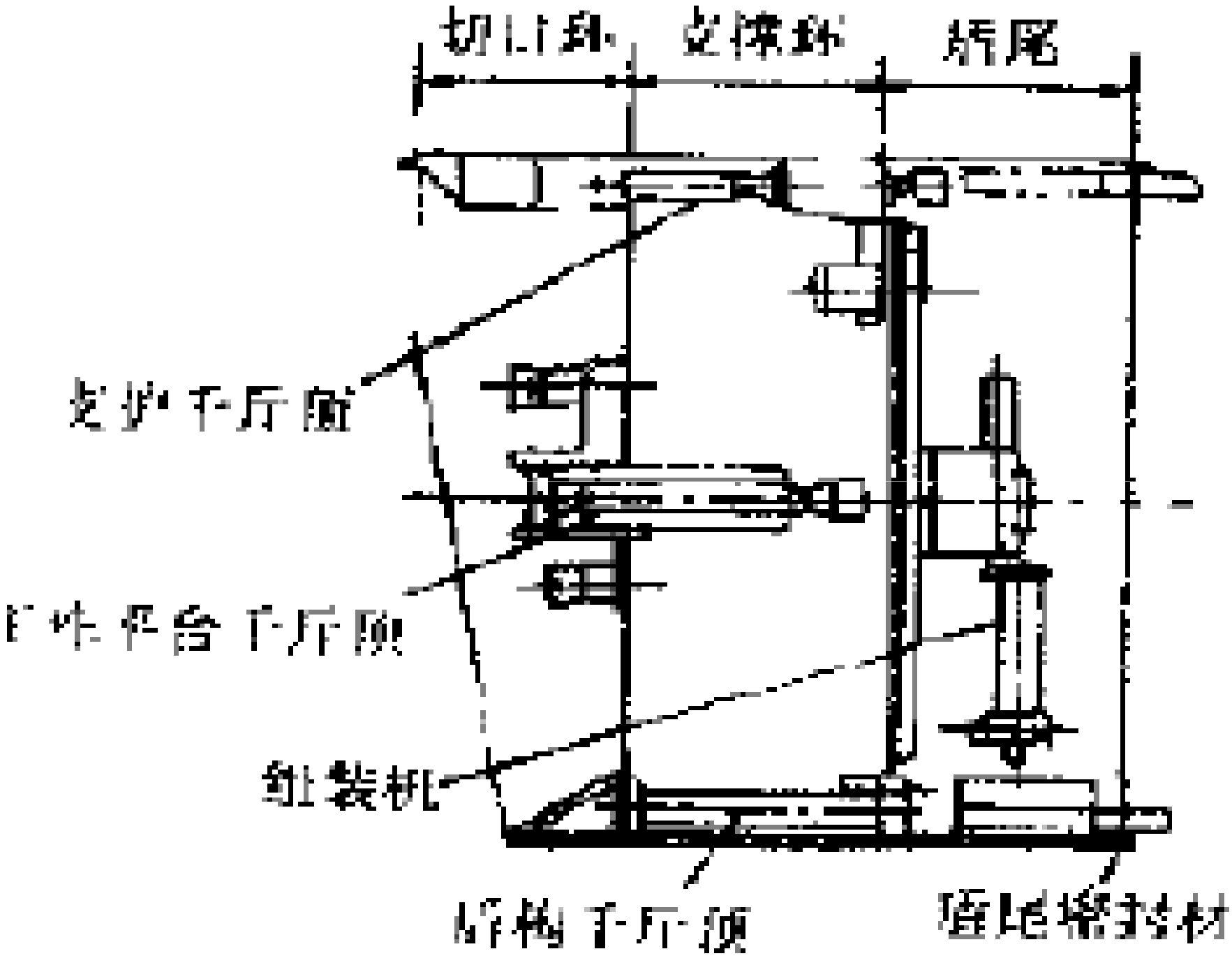
彩图 6


控制室
环形保持系统
管片自动拼装器
实时回填注浆管
刀头旋转器
刀头
液压装置
盾后第一间
管片起重机
管片堆放传送带
管片供应系统
推进千斤顶
微调千斤顶

通常由盾构壳体、推进系统、拼装系统、出土系统等四大部分组成。



1-1 (切口环)；2-2 (支承环)；3-3 (纵剖面)


切上料
皮带机
船尾
支护千斤顶
矿车平台千斤顶
组装机
桁梁千斤顶
混凝土模板

A 盾构壳体

- 盾构壳体由切口环、支承环、盾尾与竖直隔板、水平隔板组成，并由外壳钢板连成整体。
- 切口环：开挖；上下宽度可以等值、也可以不等值，甚至是活动的。
- 容纳各种专门的挖土设备。
- 支承环：承受荷重的核心部分，刚性较好的圆环结构。
- 水平隔板和竖直隔板：增加盾构刚度，水平承受拉力，竖直承受压力。
- 盾尾：掩护工人在其内部安装衬砌。

文心
AIT
2796-3131
墨香明水
8502-6828

B 推进系统

- 由盾构千斤顶和液压设备组成，上下左右活塞杆伸出长度不同达到纠偏目的。
- 盾构千斤顶一般是沿支承环圆周均匀分布的。

C 拼装系统

- 衬砌拼装器又称举重臂，是拼装系统的主要设备，以油压系统为动力，一般举重臂均安装在支承环上。
- 举重臂能作旋转、径向运动，还能沿隧道中轴线作往复运动。
- 完成这些运动的精度应该保证待装配的管片上的螺栓孔能和已装配好的螺栓孔对齐，以便螺栓固定。

D 出土系统

- 出土方式一般有三种：
- （1）有轨运输：皮带运输机－矿车－洞口－垂直起吊至地面
- （2）无轨运输：自卸卡车
- （3）管道运输：混合泥浆，压力输出，出土连续化

10.1.1 衬砌断面的形式与选型

A 衬砌结构作用

A.1 在施工阶段中。作为施工临时支撑用，并承受盾构千斤顶顶力以及其它施工荷重。

A.2 竣工后，作为隧道永久性支撑结构，支承衬砌结构周围的水、土压力以及使用阶段和某些特殊需要的荷重。

A.3 防止泥、水渗入，满足隧道结构的预期使用要求。

A.4 在外层装配式衬砌结构内现浇混凝土或钢筋混凝土内衬，这对于隧道防水、防锈蚀，修正隧道施工误差以及用作隧道内部装饰发挥进一步作用。如果在二层衬砌间的连接结构措施得到满足，则二层衬砌可视作整体性结构而共同抵抗外荷载。

衬砌拼装

- 隧道衬砌是在盾构尾部壳保护下的空间内进行拼装。
- 组成：铸铁、钢、钢筋混凝土或钢与钢筋混凝土的复合材料等制成的管片或砌块。
- 结构受力及使用要求决定盾构及衬砌结构形式并决定其拼装方法。

拼装方法

- 重臂拼装或拱托架拼装；
- 通缝拼装（管片的纵缝环对齐）或错缝拼装；
- 螺栓联结的管片或无螺栓联结的砌块等。
- 按其程序可分为“先纵后环”和“先环后纵”。
- 采用举重臂拼装管片的原则应是自下而上，左右交叉，最后封顶成环。

装配式圆形衬砌构造

- “管片”是建成隧道后的永久性支撑结构，应满足强度要求、使用要求；
- 施工阶段须装配简便、容易替换、承受盾构千斤顶顶力及其它施工荷载。

成型钢筋分类堆放

钢筋笼焊接

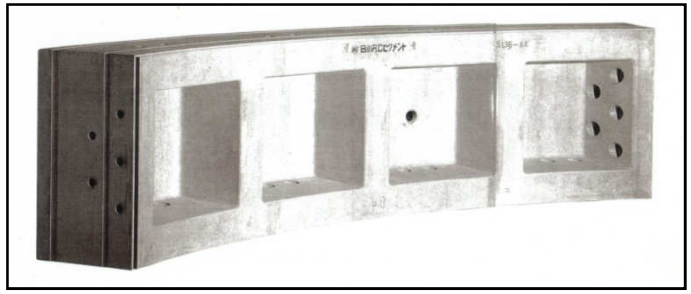
成型钢筋笼堆放

钢筋笼入模就位

成品管片水平运输

预制建筑网
precast.com.cn

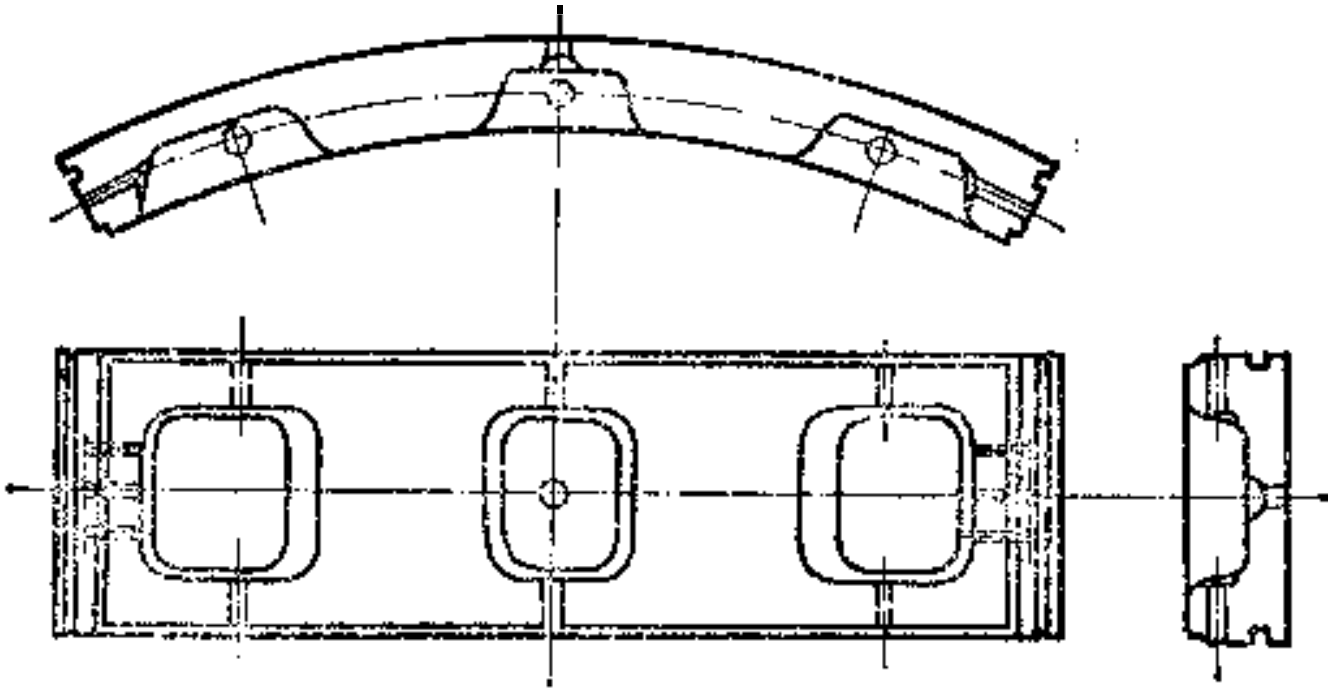
10.1.2 衬砌的分类及其比较



A 按材料及形式分类：

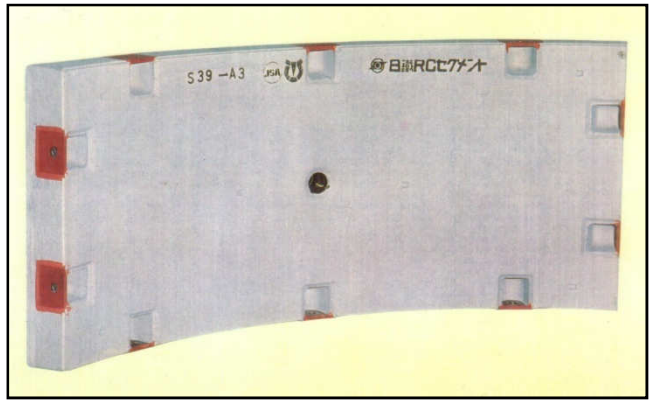
i) 钢筋混凝土管片

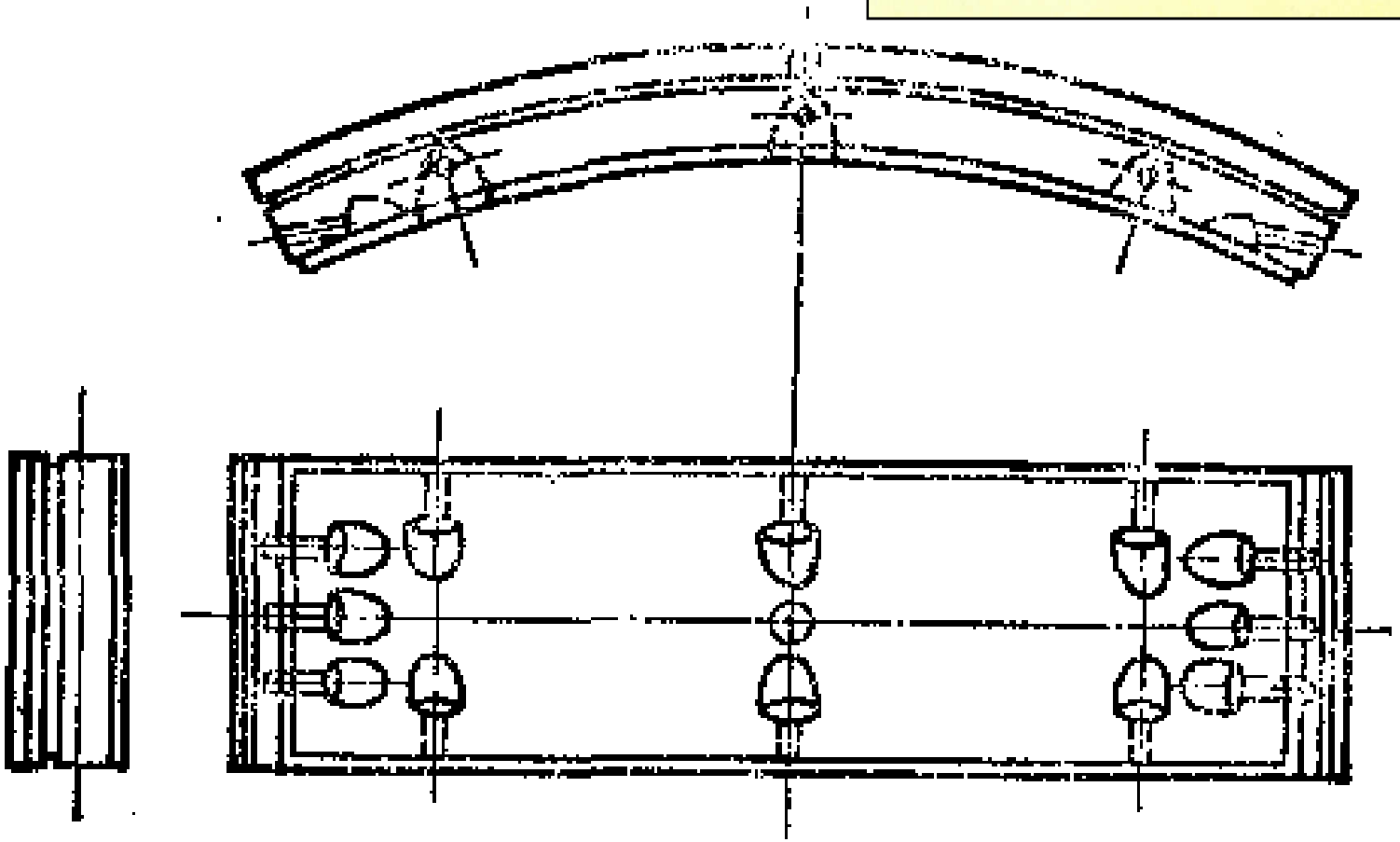
1）箱形管片



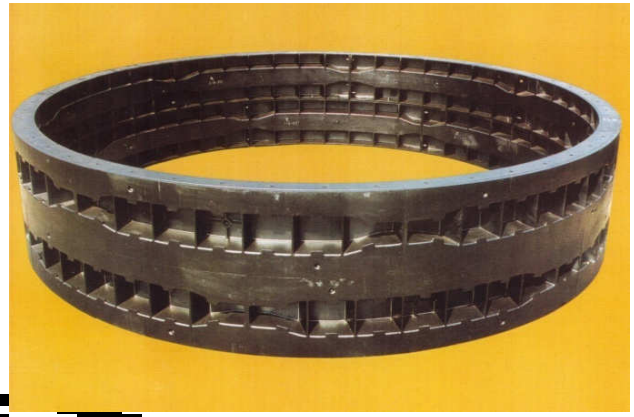
P235

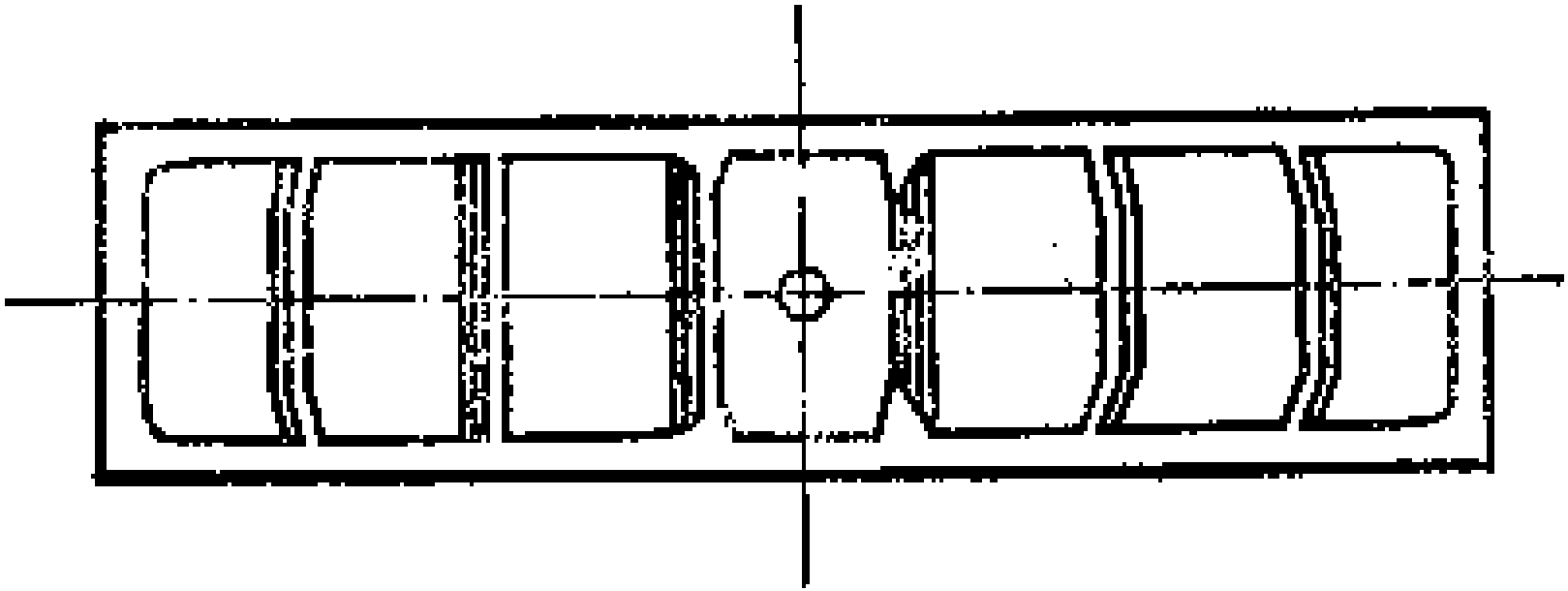
2）平板形管片





ii) 铸铁管片

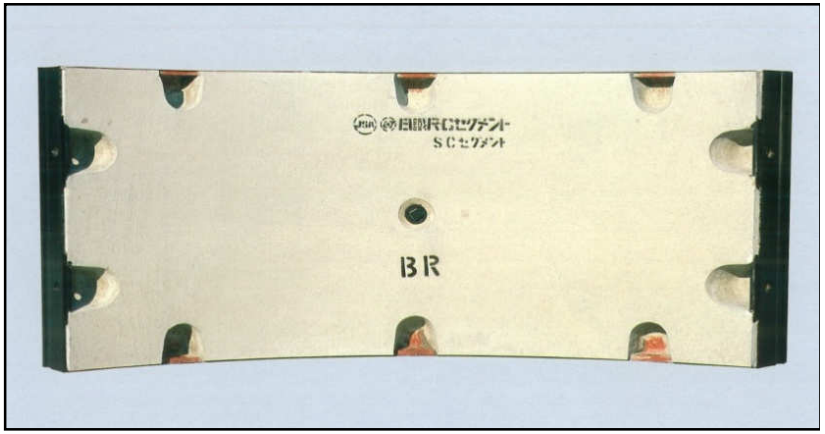




iii) 钢管片

iv) 复合管片

外壳采用钢板制成，在钢壳内浇注钢筋混凝土，组成一复合结构，其重量比钢筋混凝土管片轻，刚度比钢管片大，金属消耗量比钢管片小。



缺点：耐蚀性差，加工复杂冗繁。

B 按结构型式分类

B.1 管片

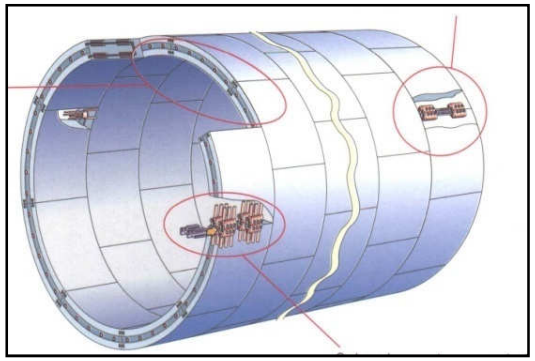
适用于不稳定地层内各种直径的隧道内，接缝间通过螺栓予以连接。由错缝拼装的钢筋混凝土衬砌环近似地可视为一均质刚性圆环，接缝由于设置了一排或二排的螺栓可承受较大的正、负弯矩。

B.2 砌块

一般适用于含水量较少的稳定地层内。由于隧道衬砌的分块要求，使由砌块拼成的圆环（超过三块以上）成为一个不稳定的多铰圆形结构。衬砌结构在通过变形后（变形量必须予限制）地层介质对衬砌环的约束使圆环得以稳定。

P236

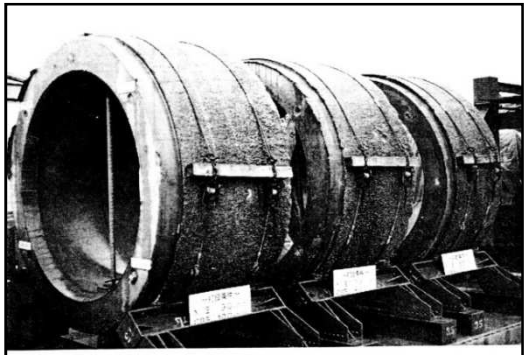
C 按形成方式分类



装配式衬砌

分为装配式衬砌和挤压混凝土衬砌。

目前我国广泛使用的是钢筋混凝土管片或砌块。



写真－2　コンクリート覆工体出来型

P237

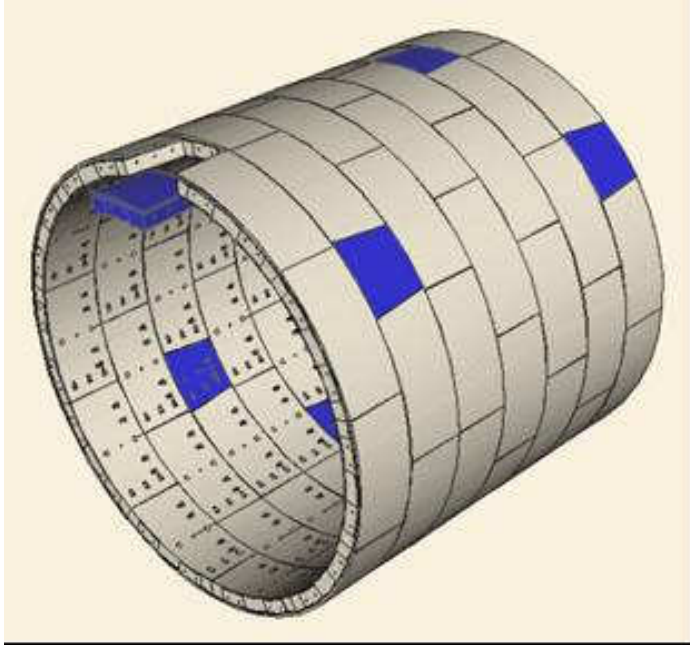
D 按构造型式分类

大致可分为单层及双层衬砌两种型式。

修建在饱和含水软土地层内的隧道，由于目前对隧道防水（特别是接缝防水）还没有得到完善的解决；影响了使用要求，因此较多的还是选择双层衬砌结构，外层是装配式衬砌结构，内层是内衬混凝土或钢筋混凝土层。

P237

10.1.3 装配式钢筋混凝土管片



目前出于国内外应用装配式钢筋混凝土管片较为普遍，这里着重介绍钢筋混凝土管片的构造。

A 环宽

根据国内外实践经验，无论是钢筋混凝土管片或全属管片，环宽一般在300～1200mm之间，常用的是750—900mm。

P238

B 分块

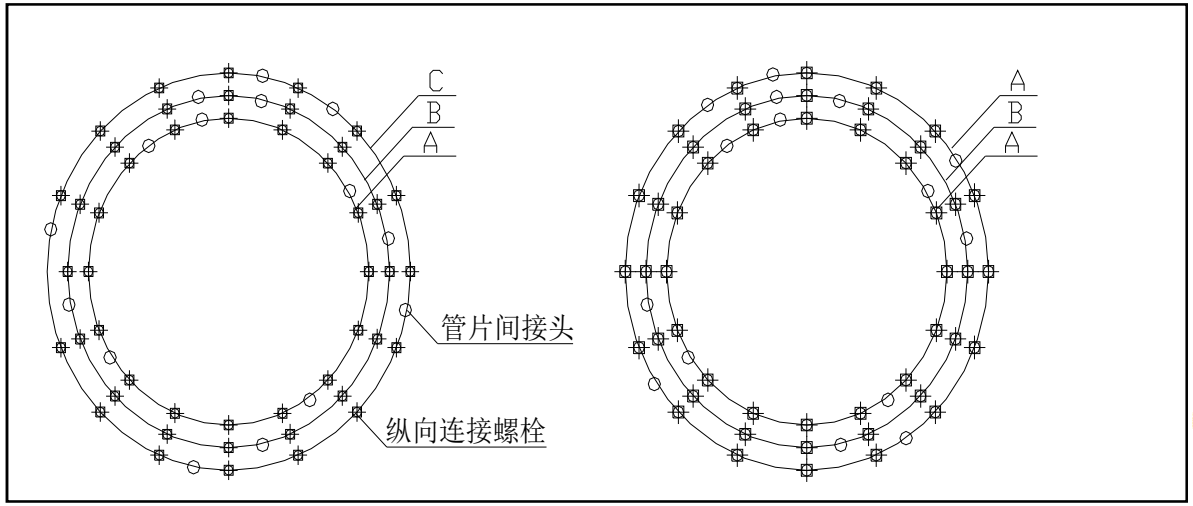
单线地下铁道衬砌一般可分成6～8块，双线地下铁道衬砌可分为8～10块，小断面隧道可分为4～6块。

C 封顶管片形式

根据隧道施工的实践经验，考虑到施工方便以及受力的需要，目前封顶块一般趋向于采用小封顶形式、封顶块的拼装形式有两种，一为径向楔入，另一为纵向插入。

错逢拼装形式

D 拼装形式



圆环的拼装型式有通缝、错缝两种，所有衬砌环的纵缝环环对齐的称为短缝，而环间纵缝相互错开，犹如砖砌体一样的称为错缝。

◆**通缝**

1.甲型：环向短直螺栓、纵向为头尾相 接的长螺栓

2.乙型：环向单头螺栓、纵向为弯螺栓

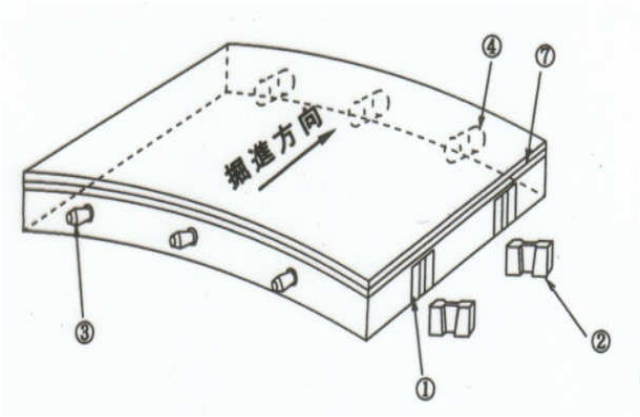
3.丙型：环向、纵向为短直螺栓

◆**错缝**： A-B-A，A-B-C

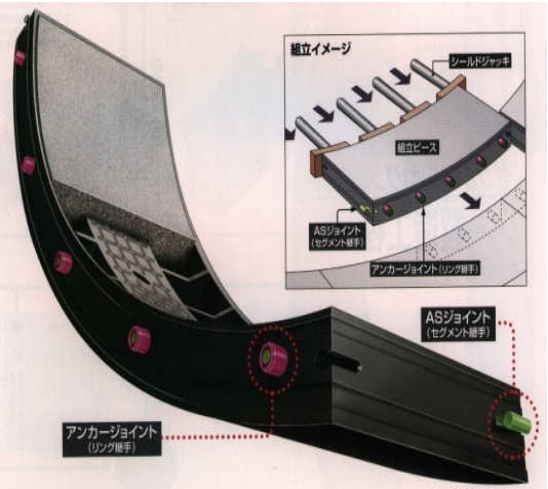
10.1.4　管片接头构造

10.1.5　其他构造

10.1.4 管片接缝（头）构造



- 管片间的接缝（头）（下称接头）有两类：沿纵向（接头面平行于纵轴）的称**纵向接头**，沿环向（接头面垂直于纵轴）的称**环向接头**。
- 从其力学特性可分为**柔性和刚性接头**；前者要求相邻管片间允许产生微小的转动与压缩，后者则是通过增加螺栓数量等手段，力图在构造上使接头刚度与构件本身相同。
- 基本的接头结构有**螺栓接头、铰接头、销插入式接头、楔形接头、榫接头**等等。



P239

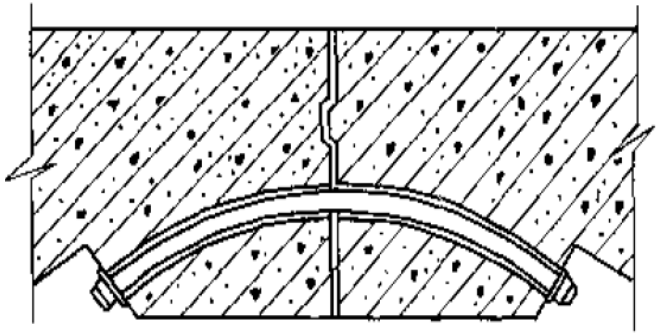


图10-4 弯螺栓连接形式

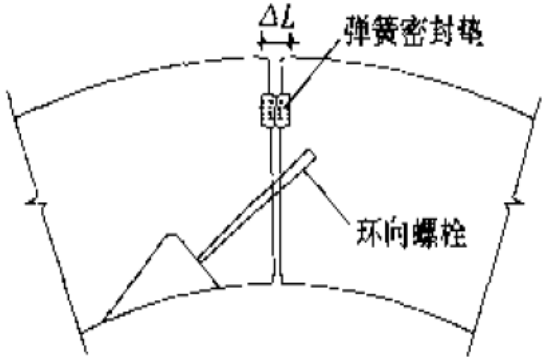


图10-6 斜直螺栓连接形式

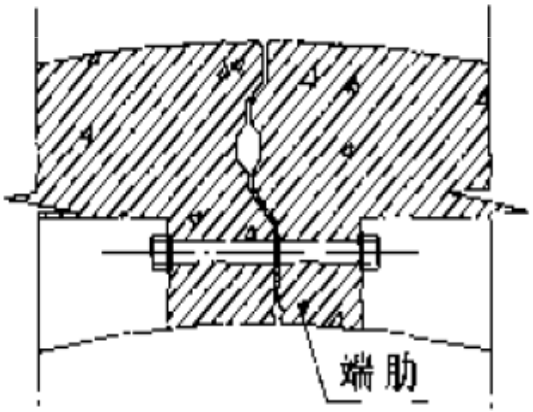


图10-5 直螺栓连接形式

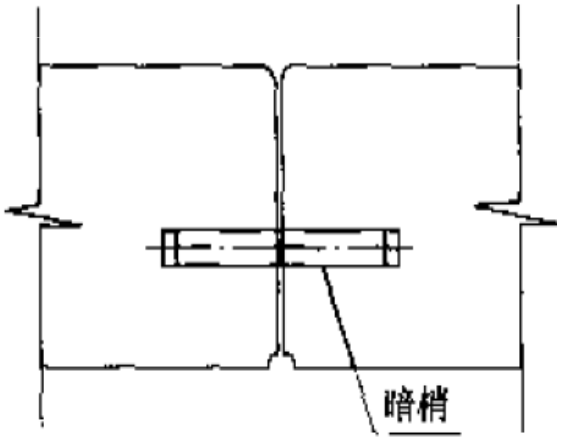


图10-7 暗销接头

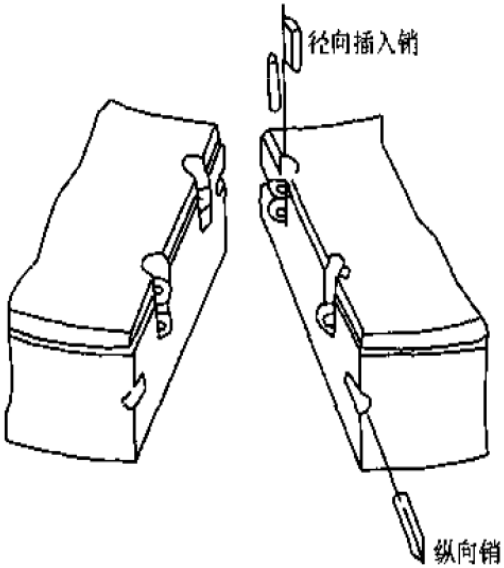
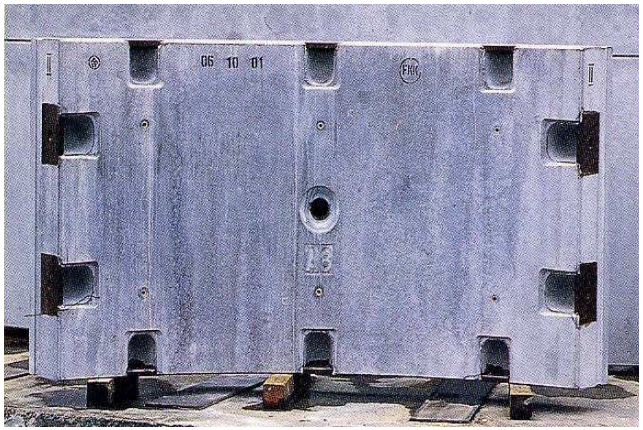


图10-8 纵径向销接头

内侧完全光滑型・单向接触组装的管片的构造（滑动式销钉管片）

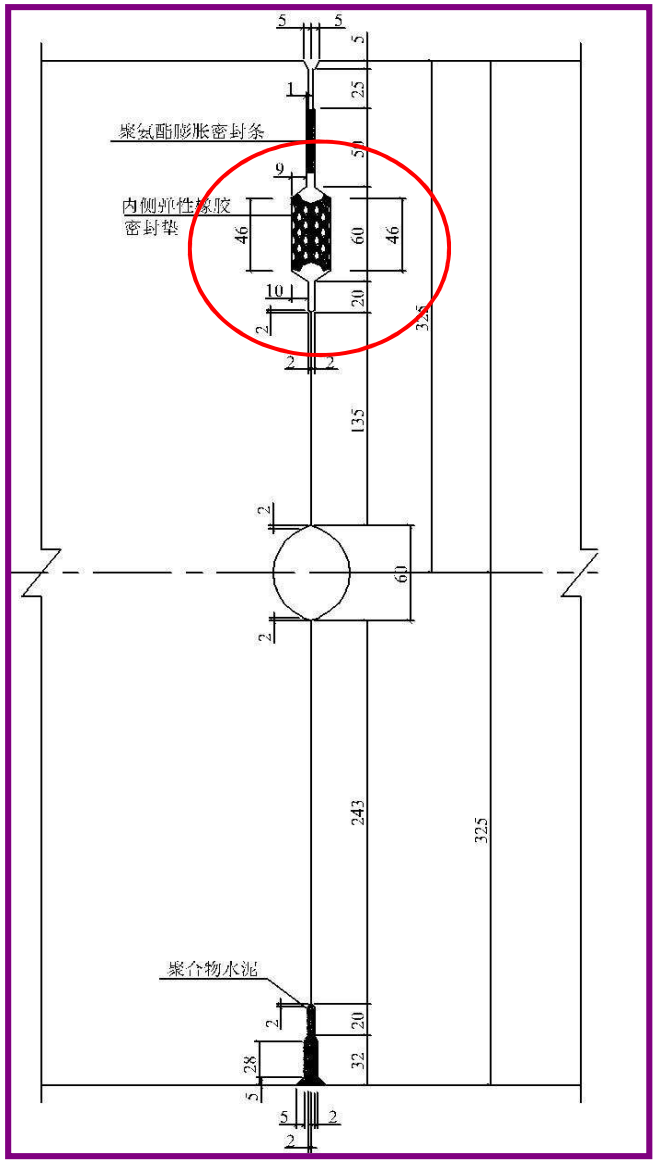
滑动式销钉管片

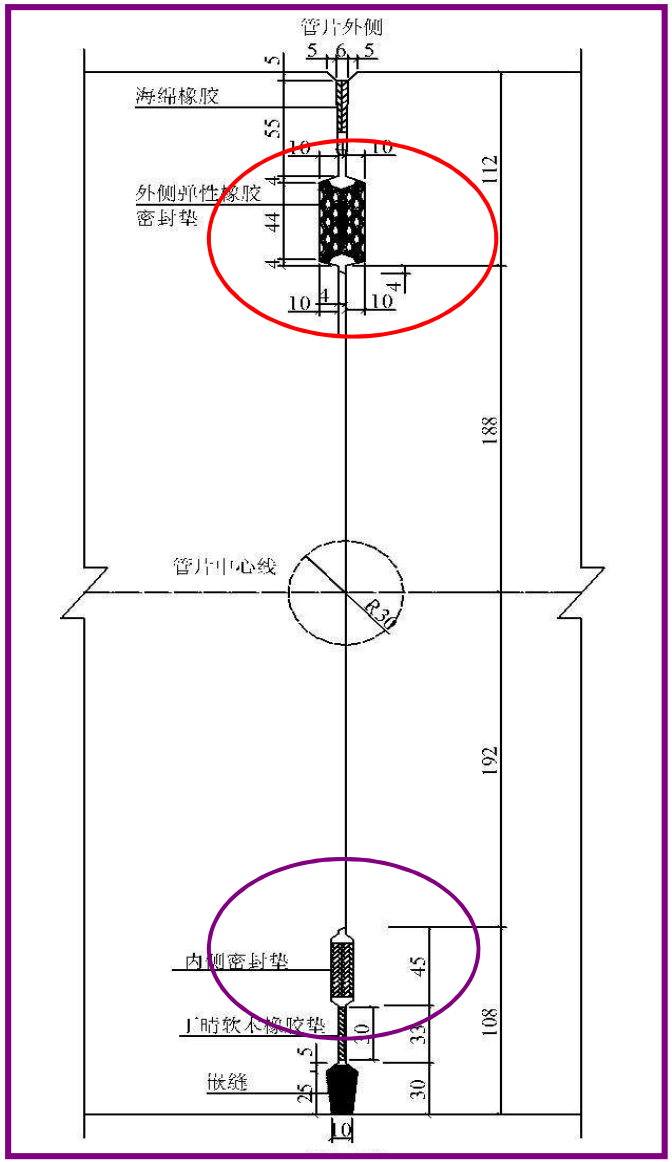
滑动式销钉管片安装后隧道



传统的螺栓或销钉管片

常规的螺栓或销钉管片安装成型后隧道


聚氨酯膨胀密封条
内侧弹性橡胶
密封垫
聚合物水泥


管片外侧
海绵橡胶
外侧弹性橡胶
密封垫
管片中心线
内侧密封垫
丁腈软木橡胶垫
嵌缝

10.1.5 其它构造

（一）纵肋

- 对钢管片和钢筋混凝土箱型管片，纵肋配置必须保证千斤顶推力均匀传递。
- 钢制管片上，纵肋必须考虑等间隔配置，其数量至少要按2条纵肋支承1块压力垫的比例配置，否则不可能均匀传递千斤顶推力。
- 对箱型管片，纵肋的配置方法应和钢制管片的一样，其数量一般和盾构千斤顶数量相同。

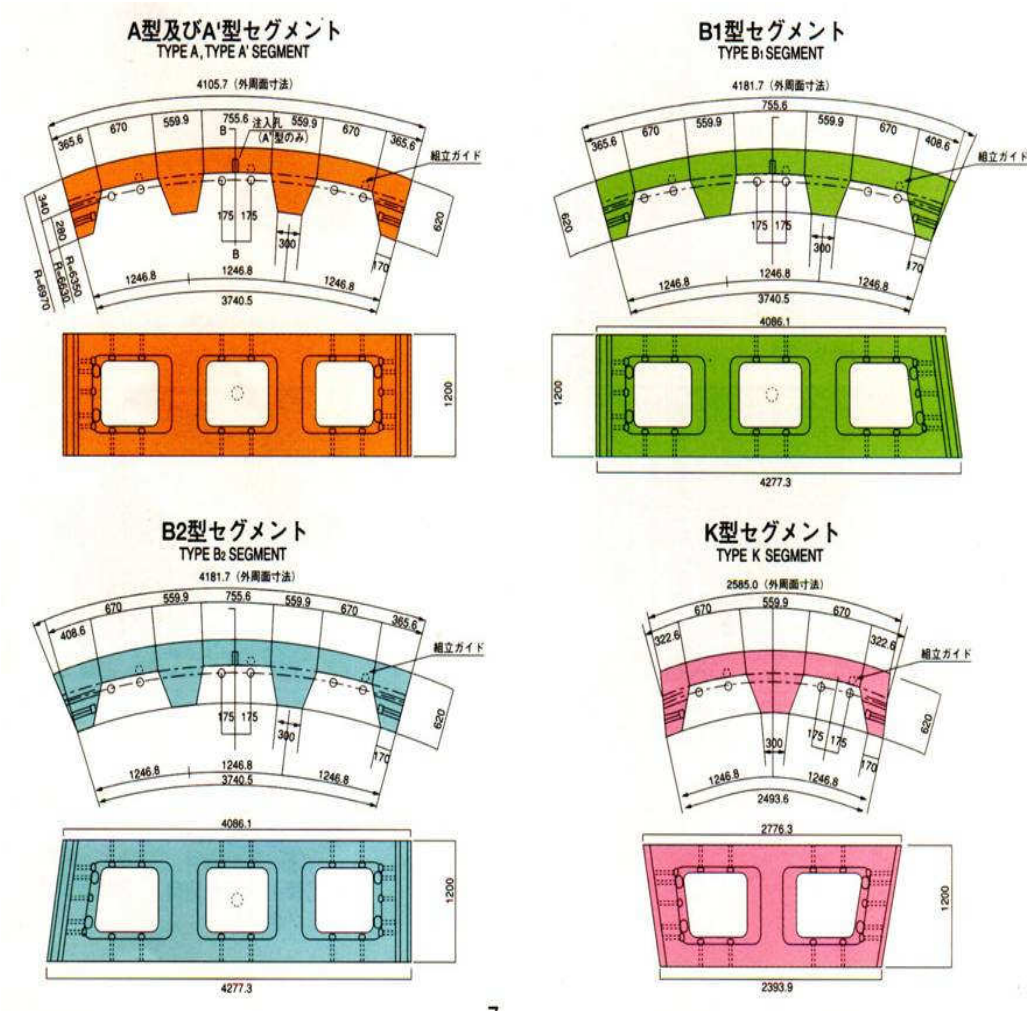
10.1.5 其它构造

（二）注浆孔

- 为均匀注浆，通常每个管片上设置一个或一个以上注浆孔。由于注浆孔数量的增加会增加可能的渗漏水通道，且目前广泛采用盾尾同步壁后注浆方式，管片上的注浆孔往往用作二次注浆。因而，国内采用较多的是每个管片上仅设置一个注浆孔。
- 注浆孔直径须依据使用的注浆材料确定，一般采用内径50mm左右。

（三）起吊环

◆必须考虑设置起吊环。混凝土平板型管片和球墨铸铁管片大多将壁后注浆孔同时兼作起吊环使用，而钢管片则需另设置起吊配件。



拼装型式

- 一般有通缝、错缝拼装两种。
- 纵缝环环对齐的称通缝，适用于需要拆除管片修建旁侧通道或结构需要比较柔的情况下，以便于进行结构处理。
- 纵缝互相错开，对称错缝，其优点在于能加强圆环接缝刚度，使圆形结构可近似地按均质圆环等刚度考虑，因此使用较普遍，缺点是错缝拼装容易使管片顶碎。

环、纵向螺栓

- 环向螺栓根据接缝内力情况可设置成单排或双排。
- 双排：外排螺栓抵抗负弯矩，内排螺栓抵抗正弯矩。
- 纵向螺栓目的是使隧道衬砌结构具有抵抗隧道纵向变形的能力，一块管片设3~4个螺栓。
- 螺栓材料一般采用高强度合金钢，直螺栓。

10.2 衬砌圆环内力计算

衬砌结构有两个最基本的使用要求：

隧道一是满足结构强度，刚度的要求，以承受诸如水、土压力以及一些特殊使用要求的外荷载。

二是提供一个能满足使用要求的工作环境，保持隧道内部的干燥和洁净。

上述两个要求不是相互矛盾而是密切相关的。特别是在饱和含水软土地层中采用装配式钢筋混凝土管片结构，尤以衬砌防水的这个矛盾更为突出，与工程成功与否关系较大，必须予以注意。

P242

隧道衬砌结构必须根据工程的使用要求（埋深程度、横断面几何尺寸以及其它使用要求等）所选定的隧道施工方法，隧道沿线的地层地质，水文情况进行必要的设计验算和选择。

壳体应根据施工的需要尽可能薄一些。“泰沙基”的这种观点在目前也有现实的指导意义。

（深埋泰沙基公式确定土压力）

10.2.1 钢筋混凝土管片的设计要求和方法

A 按造强度、变形、裂缝限制等需要分别进行验算。

B 确定衬砌结构的几个工作阶段——施工荷载阶段，基本使用荷载阶段和特殊荷载阶段，提出各个工作阶段的荷载和安全质量指标要求（衬砌裂缝宽度，接缝变形和直径变形的允许量，隧道抗渗防漏指标，结构安全度，衬砌内表面平整度要求等）进行各个工作阶段和组合工作阶段的结构验算。

P242

10.2.2 结构计算方法的选择

目前装配式圆形隧道衬砌结构的计算方法大都把衬砌环看作一按自由变形的均质（等刚度）圆环计算，而接缝上的刚度不足往往采用衬砌环的错缝拼装予以弥补。这种加强接缝刚度的处理和均质（等刚度）圆环计算方法在饱和含水地层中的隧道衬砌计算用得较为普遍。

10.2.3 荷载的确定

衬砌的设计不仅应满足隧道使用阶段的承载及功能要求，还要满足施工过程中的安全性要求。

基本荷载——在设计时所必须考虑的荷载；

附加荷载——在施工中或竣工后作用的荷载；是根据隧道的使用目的，施工条件以及周围环境进行考虑的荷载。

特殊荷载——根据围岩条件、隧道的使用条件所必须特殊考虑的荷载。

P243

表10-2（a） 荷載的分类

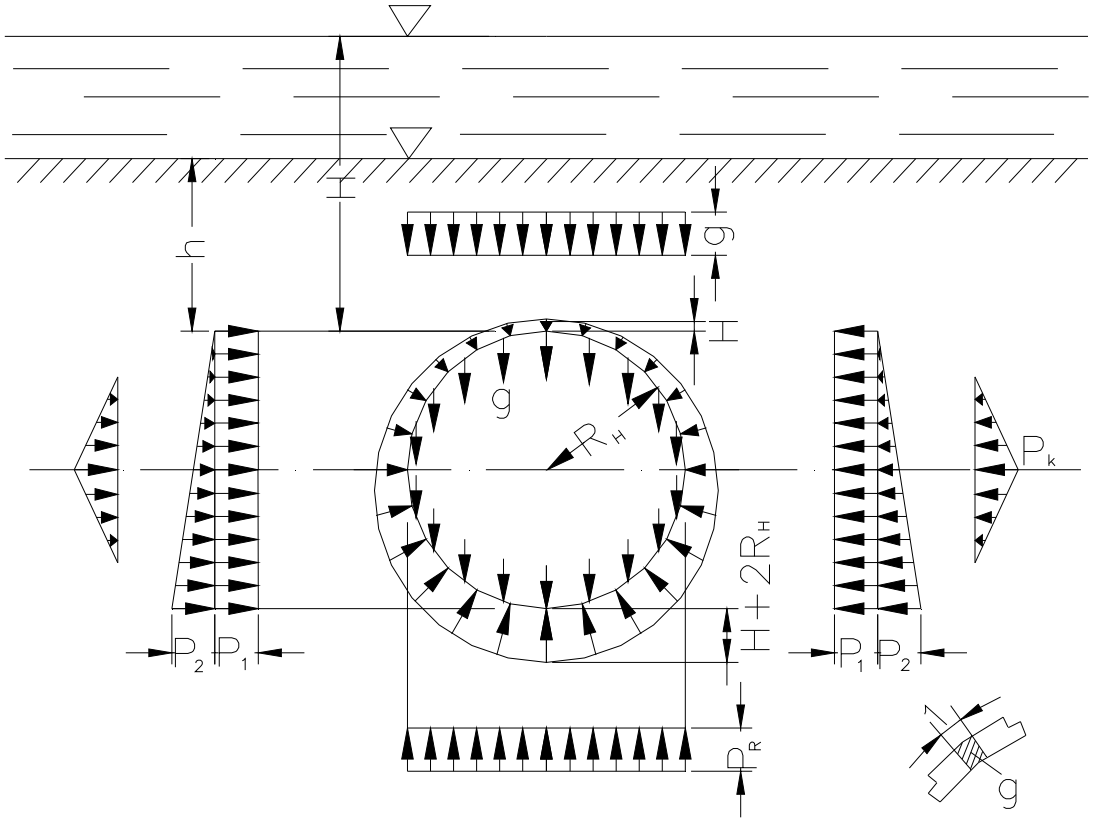
基本荷載	1. 地层压力
	2. 水压力
	3. 自重
	4. 上覆荷載的影响
	5. 地基抗力
附加荷載	6. 内部荷載
	7. 施工荷載
	8. 地震的影响
特殊荷載	9. 平行配置隧道的影响
	10. 接近施工的影响
	11. 其他

表10-2（a） 荷载的分类

计算工况 荷载种类	荷载组合 系数	第一组合 施工阶段	第二组合 运行阶段	第三组合 地震验算
地面超载	1.4	√	√	√
结构自重	1.2	√	√	√
地层垂直水土压力	1.2	√	√	√
水平水土压力	1.2	√	√	√
外水压力	1.2	√	√	√
道路设计荷载	1.4	√	√	√
盾构千斤顶顶力	1.2	√		
不均匀注浆压力	1.2	√		
地震荷载	1.3			√

A 基本使用阶段（衬砌环宽按1.0 m考虑）

荷载简图见图10-9



A.1 自重

$$g = \gamma_h \delta$$

γ_h 钢筋混凝土容重 （ t/m^3 ）

一般取为2.5-2.6

δ 管片厚度 （ m ），当采用箱形管片时可考虑采用折算厚度

A.2 竖向土压

$$q = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i h_i$$

γ_i 衬砌顶部以上各个土层的容重，在地下水位以下的土层容重取浮容重 （ t/m^3 ）

h_i 衬砌顶部以上各个土层的厚度 (m)

A.3 拱背土压

$$G = 2\left(1 - \frac{\pi}{4}\right) R_H^2 \bullet \gamma = 0.43 R_H^2 \gamma$$

γ 土容重（ t/m^3 ）

R_H 衬砌圆环计算半径（ m ）

A.4 地面超载

当隧道埋深较浅时，必须考虑地面荷载的影响，日本资料一般取 $20kN/m^2$

此项荷载可累加到竖向土压项中。

A.5 侧向均匀土压

$$p_1 = q \bullet \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) - 2c \bullet \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

式中　　q--竖向土压(t/m)；

γ，φ，c——衬砌圆环侧向各个土层的土体的容重，

内摩擦角，内聚力的加权平均值。

$$\gamma = \frac{\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \ldots\ldots + \gamma_n h_n}{h_1 + h_2 + \ldots\ldots + h_n} \qquad (\mathrm{kN/m^3})$$

$$\varphi = \frac{\varphi_1 h_1 + \varphi_2 h_2 + \ldots\ldots + \varphi_n h_n}{h_1 + h_2 + \ldots\ldots + h_n} \qquad （度数）$$

$$c = \frac{c_1 h_1 + c_2 h_2 + \ldots\ldots + c_n h_n}{h_1 + h_2 + \ldots\ldots + h_n} \qquad (\mathrm{kN/m})$$

土体

A.6 侧向三角形主动

$$p_2 = 2R_H \bullet \gamma \bullet \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

A.7 侧向土体抗力

按温克尔局部变形理论计算，抗力图形呈一等腰三角形，抗力范围按与水平直径上下呈45 考虑。

$$P_k = k \bullet y$$

式中 k——衬砌圆环侧向地层(弹性)压缩(kN/m^3)；

y ——衬砌圆环在水平直径处的变形量(m)。 $y = \dfrac{(2q - p_1 - p_2 + \pi g)R_H^4}{24(\eta EJ + 0.0454kR_H^4)}$

式中 EJ ——衬砌圆环抗弯刚度(kN·m^2)

η ——衬砌圆环抗弯刚度的折减系数，η=0.25～0.8。

8．水压： 按静水压考虑(kN/m)，法向作用下衬砌结构上。

9．拱底反力

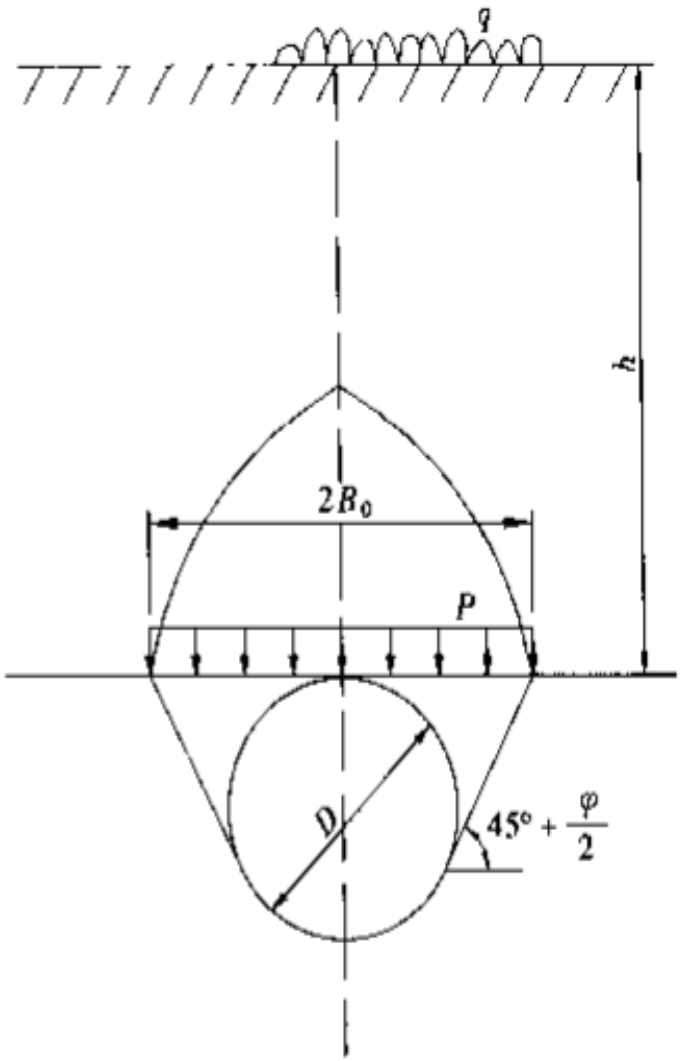
$$p_R = q + \pi g + 0.2146R_H\gamma - \frac{\pi}{2}R_H \qquad (\text{kN/m}^3)$$

深埋地层竖向土压

泰沙基公式以及苏联的普罗托季雅柯诺夫公式。

竖向土压（松动荷载）　　表 10－3

泰沙基公式	$p=\frac{B_0(\gamma-c/B_0)}{tg\varphi}[1-\exp(-\frac{h}{B_0}tg\varphi)]+q\cdot\exp(-\frac{h}{B_0}tg\varphi)$
普氏公式	$p=\frac{2}{3}\gamma\frac{B_0}{tg\varphi}$



P246

侧向主动土压

- 侧向主动土压大都按朗金公式计算。
- 但侧压常受地层、施工方法和衬砌结构刚度的影响，有时会出现很大的差异。例如在采用挤压盾构法施工时，刚开始时侧压很大、顶压小于侧压，隧道出现“竖鸭蛋”现象。
- 含水砂土层采用水土分算原则，含水粘土层中则采用水土合算原则。
- 确定侧压系数时必须谨慎对待，日本隧道衬砌设计常对侧压系数选择范围大致在0.3～0.8之间，也有不超过0.7的做法。

A.8 水压

按静水压力考虑。

A.9 拱底反力

$$P_R = q + \pi g + 0.2146 R_H \gamma - \frac{\pi}{2} R_H \bullet \gamma_w$$

式中符号同前。

用目前土力学理论和有关公式计算隧道外围的荷载情况，计算结果往往是较为粗糙，有时甚至会出现与实际外荷情况截然相反的情况。较为可行的办法是先作一般的理论计算，再进行实地的现场量测，根据试验结果对原来设计进行必要的修改。

B 施工阶段

隧道衬砌结构在到达基本使用阶段前，已经历了一系列的施工阶段荷载的考验。衬砌结构在施工阶段有可能碰到比基本使用阶段更为不利的工作条件，产生了极为不利的内力状态。导致出现了衬砌结构的开裂、破碎、变形、沉陷和漏水等严重情况。这种情况尤以在盾构推进过程为甚，必须进行现场观测和相应的附加验算，并提出改进措施。

B.1 管片拼装

钢筋混凝土管片拼装成环时，对纵向接缝拧紧螺栓，由于管片制作精度不高，环面接触不平，往往在拧紧螺栓时，使管片局部出现较大的集中应力，导致管片开裂和存在着局部内应力。

B.2 盾构推进

由于制作和拼装的误差管片的环缝面往往是参差不平的。当盾构千斤顶施加在环缝面上，特别是千斤顶顶力存在偏心状态情况下，极易使管片开裂和顶碎。这种现象在目前往往被看作为衬砌设计的一个重要的控制因素。

$$\sigma = \frac{P}{F} \le [\sigma]/K$$

P 盾构总推力（t）

F 环缝面积（m^2）

$[\sigma]$ 混凝土容许抗压强度（$t/m^2;kg/cm^2$）

K 安全系数，一般取大于3

B.3 衬砌背后压注

为了改善衬砌结构的工作条件和防止地面出现大量的沉降量，在衬砌背后的建筑空隙内注以水泥浆或水泥砂浆等材料。在软土地层中注浆材料常不是均匀分布在衬砌四周，而仅是局部聚集在注浆孔的一定范围内，过高的注浆压力常引起圆环变形和出现局部的集中应力，封顶楔形块管片也会向内滑移，为了控制这种不利工作条件的出现，必须对注浆压力进行一定的控制。

B.4 衬砌环刚出清尾的初期

衬砌顶部土压即迅速作用到衬砌上，而侧压却因某种原因未能及时作用，这时衬砌可能处于比基本使用阶段更为不利的工作条件。

衬砌结构在施工阶段引起的不利工作条件的因素很多，难以事先估计。目前一般的处理方法是从实地观测和提出相应改进措施外，通常采用一个笼统的附加安全系数，以保证衬砌结构的一定安全度。

C 特殊荷载阶段

衬砌结构除对上述两个工作阶段进行结构验算外，根据使用需要还得进行特殊荷载阶段的验算，这种特殊荷重往往属于瞬时性的荷载，且荷载作用时间又短，但这个工作阶段的验算往往是控制衬砌结构设计的关键。在此阶段进行结构验算时，可妥善合理选择结构的附加安全系数和适当提高建筑材料的物理力学性能指标。

➢ 荷载—结构法

10.2.4 衬砌内力计算

A 按自由变形均质圆环内力计算

在饱和含水软土地层中，主要由于工程上的防水要求对由装配式衬砌组成的衬砌圆环，其接缝必须具有一定的刚度，以减小接缝变形量。由于相邻环间按错缝拼装，并设置一定数量的纵向螺栓或在环缝上设有凹凸榫（sǔn）槽，使纵缝刚度有了一定的提高。因此，圆环可近似地认为一均质刚性圆环。

P251

衬砌圆环上的荷载分布见下图

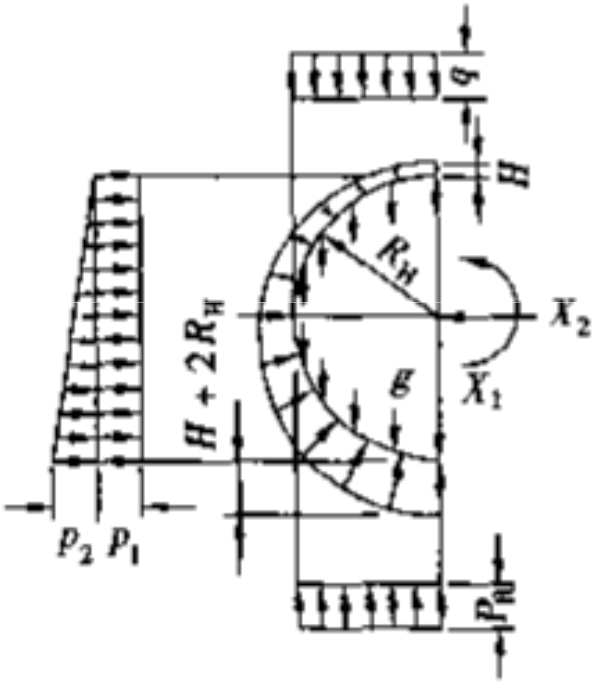


图 10-14　计算简图

由于荷载的对称性，故整个圆环为二次超静定结构。按结构力学力法原理，可解出各个截面上的M、N值(表10-7)。

断面内力系数表　　表 10－7

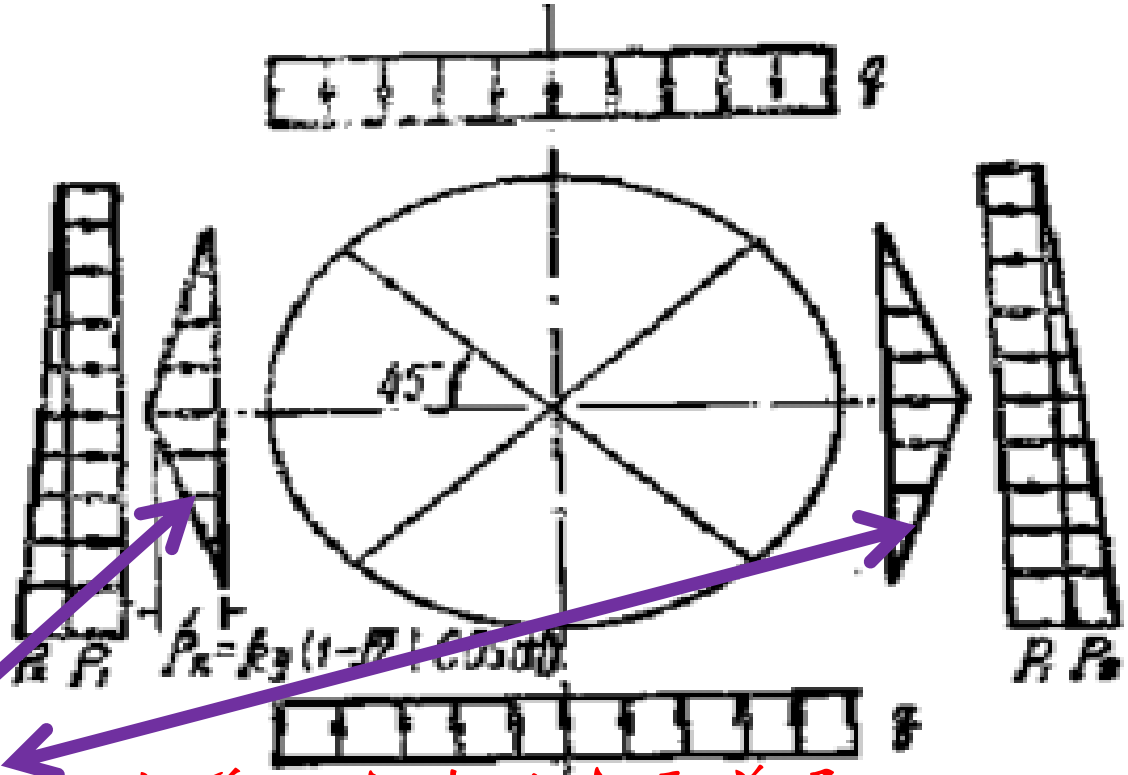
荷重	截面位置	内力		P
		$M(t-m)$	$N(t)$	
自重	$0\sim\pi$	$gR_H^2(1-0.5\cos\alpha-\alpha\sin\alpha)$	$gR_H(\alpha\sin\alpha-0.5\cos\alpha)$	g
⊥荷重	$0\sim\frac{\pi}{2}$ $\frac{\pi}{2}\sim\pi$	$qR_H^2(0.193+0.106\cos\alpha-0.5\sin^2\alpha)$ $qR_H^2(0.693+0.106\cos\alpha-\sin\alpha)$	$qR_H(\sin^2\alpha-0.106\cos\alpha)$ $qR_H(\sin\alpha-0.106\cos\alpha)$	q
底部反力	$0\sim\frac{\pi}{2}$ $\frac{\pi}{2}\sim\pi$	$P_RR_H^2(0.057-0.106\cos\alpha)$ $P_RR_H^2(-0.443+\sin\alpha-0.106\cos\alpha-0.5\sin^2\alpha)$	$0.106P_RR_H\cos\alpha$ $P_RR_H(\sin^2-\sin\alpha-0.10\cos\alpha)$	P_R
水压	$0\sim\pi$	$-R_H^3(0.5-0.25\cos\alpha-0.52\sin\alpha)$	$R_H^2(1-0.25\cos\alpha-0.52\sin\alpha)+HR$	
均布荷载	$0\sim\pi$	$P_1R_H^2(0.25-0.5\cos^2\alpha)$	$P_1R_H\cos^2\alpha$	P_1
△侧压	$0\sim\pi$	$P_2R_H^2(0.25\sin^2\alpha+0.083\cos^3\alpha-0.063\cos\alpha-0.125)$	$P_2R_H\cos\alpha(0.063+0.5\cos\alpha-0.25\cos^2\alpha)$	P_2

注：R_H：衬砌计算半径（m）

α：计算断面与圆环垂直轴的夹角。

B 考虑土体介质侧向弹性抗力的圆环内力计算

仍按均质刚度圆环计算。

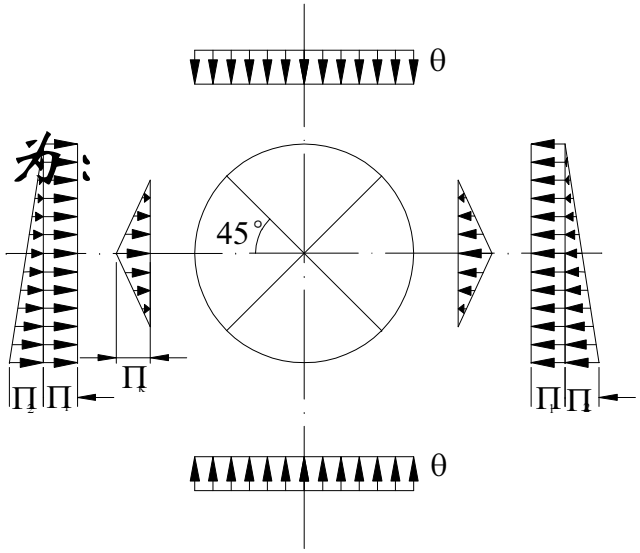


侧向弹性抗力 与前一方法的主要差异

土体抗力图形分布在水平直径上下各45度的范围内，在水平直径处：

$$P_k = ky\left(1-\sqrt{2}\left|\cos\alpha\ \right|\right)$$

圆环水平直径处受荷后最终半径变形值为：



$$y = \frac{\left(2q - p_1 - p_2 + \pi q\right)R_H^4}{24\left(\eta EJ + 0.045kR_{\mathrm{H}}^4\right)}$$

将由 P_k 引起的圆环内力和其他衬砌外荷引起的圆环内力叠加，即最终的圆环内力(表10-8)。

P_k 引起的圆环内力表　　表 10－8

内力	$0 \le \alpha \le \frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4} \le \alpha \le \frac{\pi}{2}$
M	$(0.2346 - 0.3536\cos\alpha)P_k R_H^2$	$(-0.3487 + 0.5\cos^2 + 0.2357\cos^3)P_k R_H^2$
N	$0.3536\cos\alpha P_k R_H$	$(-0.707\cos\alpha + \cos^2\alpha + 0.707\sin^2\alpha\cos\alpha Z)P_k R_H$
Q	$0.3536\sin\alpha P_k R_H$	$(\sin\alpha\cos\alpha - 0.707\cos^2\alpha\sin\alpha)P_k R_H$

P252

荷　　载	弯　　矩	轴　　力	剪　　力
垂直荷载 $P_{e1}+P_{w1}$	$M=\frac{1}{4}(1-2\sin^2\theta)(P_{e1}+P_{w1})R_c^2$	$N=(P_{e1}+P_{w1})R_c\cdot\sin^2\theta$	$Q=-(P_{e1}+P_{w1})R_c\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta$
水平荷载 $q_{e1}+q_{w1}$	$M=\frac{1}{4}(1-2\cos^2\theta)(q_{e1}+q_{w1})R_c^2$	$N=(q_{e1}+q_{w1})R_c\cdot\cos^2\theta$	$Q=(q_{e1}+q_{w1})R_c\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta$
水平三角形荷载 $q_{e2}+q_{w2}-q_{e1}-q_{w1}$	$M=\frac{1}{48}(6-3\cos\theta-12\cos^2\theta+4\cos^3\theta)$ $(q_{e2}+q_{w2}-q_{e1}-q_{w1})R_c^2$	$N=\frac{1}{16}(\cos\theta+8\cos^2\theta-4\cos^3\theta)$ $(q_{e2}+q_{w2}-q_{e1}-q_{w1})R_c$	$Q=\frac{1}{16}(\sin\theta+8\sin\theta\cdot\cos\theta-4\sin\theta\cdot\cos^2\theta)$ $(q_{e2}+q_{w2}-q_{e1}-q_{w1})R_c$
地基抗力 $q_k=k\delta$	$0\le\theta\le\frac{\pi}{4}$ M=（$0.2346-0.3536\cos\theta$）$k\cdot\delta\cdot R_c^2$ $\frac{\pi}{4}\le\theta\le\frac{\pi}{2}$ $M=(-0.3487+0.5\sin^2\theta+0.2357\cos^3\theta)k\cdot\delta\cdot R_c^2$	$0\le\theta\le\frac{\pi}{4}$ N=$0.3536\cos\theta\cdot k\cdot\delta\cdot R_c$ $\frac{\pi}{4}\le\theta\le\frac{\pi}{2}$ $N=(-0.7071\cos\theta+\cos^2\theta+0.7071\sin^2\theta\cdot\cos\theta)$ $k\cdot\delta\cdot R_c$	$0\le\theta\le\frac{\pi}{4}$ $Q=0.3536\sin\theta\cdot k\cdot\delta\cdot R_c$ $\frac{\pi}{4}\le\theta\le\frac{\pi}{2}$ $Q=(\sin\theta\cdot\cos\theta-0.7071\cos^2\theta\sin\theta)k\cdot\delta\cdot R_c$
自重 g	$0\le\theta\le\frac{\pi}{2}$ $M=\left(\frac{3}{8}\pi-\theta\cdot\sin\theta-\frac{5}{6}\cos\theta\right)g\cdot R_c^2$ $\frac{\pi}{2}\le\theta\le\pi$ $M=\left[-\frac{1}{8}\pi+(\pi-\theta)\cdot\sin\theta-\frac{5}{6}\cos\theta-\frac{1}{2}\pi\cdot\sin^2\theta\right]$ $g\cdot R_c^2$	$0\le\theta\le\frac{\pi}{2}$ $N=\left(\theta\cdot\sin\theta-\frac{1}{6}\cos\theta\right)g\cdot R_c$ $\frac{\pi}{2}\le\theta\le\pi$ $N=\left(-\pi\cdot\sin\theta+\theta\cdot\sin\theta+\pi\cdot\sin^2\theta-\frac{1}{6}\cos\theta\right)$ $g\cdot R_c$	$0\le\theta\le\frac{\pi}{2}$ $Q=-\left(\theta\cdot cos\,\theta+\frac{1}{6}sin\,\theta\right)g\cdot R_c$ $\frac{\pi}{2}\le\theta\le\pi$ $Q=\left[(\pi-\theta)\cos\theta-\pi\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta-\frac{1}{6}\sin\theta\right]g\cdot R_c$

C 日本修正惯用法

事实上拼装管片接头上弯矩的传递主要由环间剪切来完成，目前考虑接头的影响主要通过假定弯矩传递的比例来实现。国际隧道协会推荐两种估算方法。

Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining 可供参考

即 η-ξ 法和旋转弹簧（半铰）（K-ξ 法）。

P252

➢ 国际隧协推荐两种估算方法，即 η - ξ 法和旋转弹簧（半铰）K-ξ（法）。P252

（1）η -ξ 法

圆环抗弯刚度为 ηEJ（η 为抗弯刚性的有效率，η ≤1），计及圆环水平直径处变位y，两侧抗力 p_k=ky后，考虑错缝拼装管片接头部弯矩的传递，结构整体加强效果。

◆接头处

$$M_j=(1-\xi)M \qquad N_j=N$$

◆管片

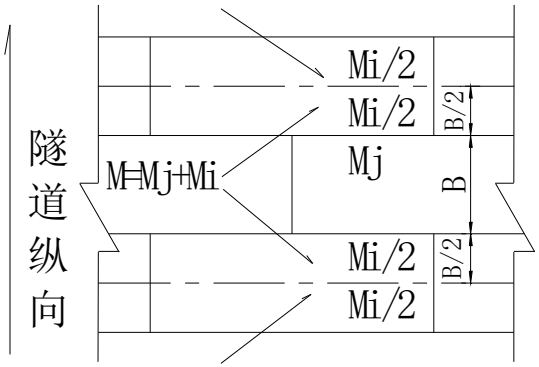
$$M_s=(1+\xi)M \qquad N_s=N$$

式中 ξ ——弯矩调整系数

0.6≤ η ≤0.8， 0.3≤ ξ ≤0.5。

如果管片环内没有接头，则

η =1， ξ =0



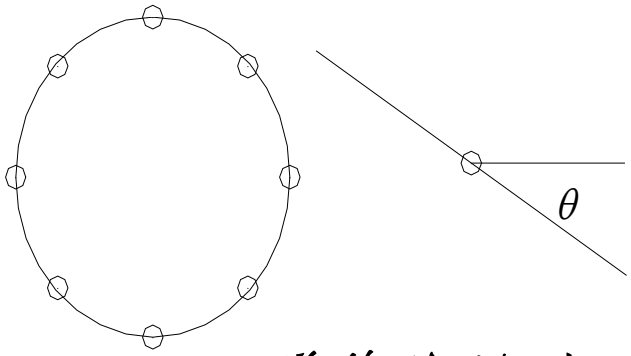
错缝拼装弯矩传递及分配示意图

P252

（2） K-ξ法

用一个旋转弹簧（半铰）模拟接头，且假定弯矩与转角成正比。

$$M=K\theta$$

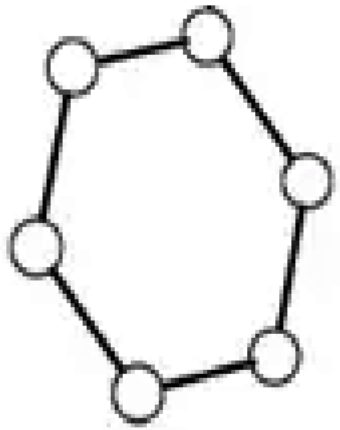


弹簧铰模型

- 管片环没有接头，则K= ∞ ， ξ =0 。
- 若假定管片环的接头为铰接，则K= 0 ， ξ =1

P253

D 按多铰圆环计算圆环内力



在衬砌外围土体介质能明确地提供土体的弹性抗力条件下，装配式衬砌圆环可按多铰圆环计算。多铰圆环的接缝构造，可分为设置防水螺栓、设置拼装施工要求用的螺栓，或不设置螺栓而代以各种几何形状的样槽的几种形式。

日本山本法

该原理在于圆环多铰衬砌环在主和被动土压作用下产生变形，圆环由一不稳定结构逐渐转变成稳定结构，

P253 圆环变形过程中，铰不发生突变。

计算中的几个假定

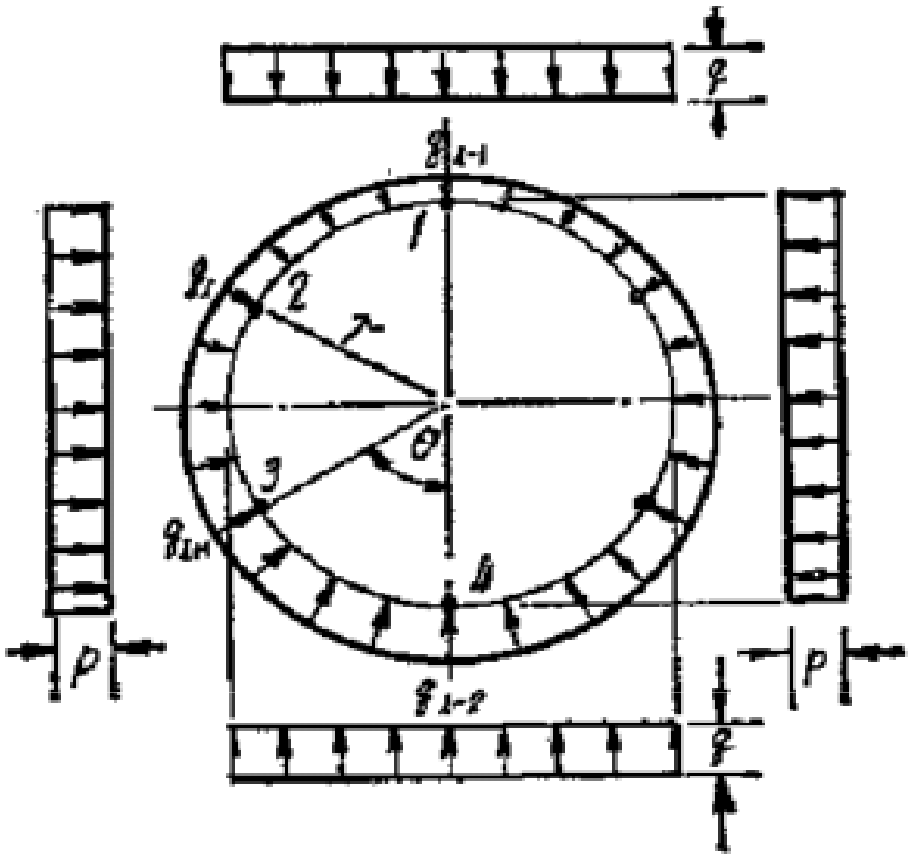
1）适用于圆形结构。

2）衬砌环在转动时，管片或砌块视作刚体处理。

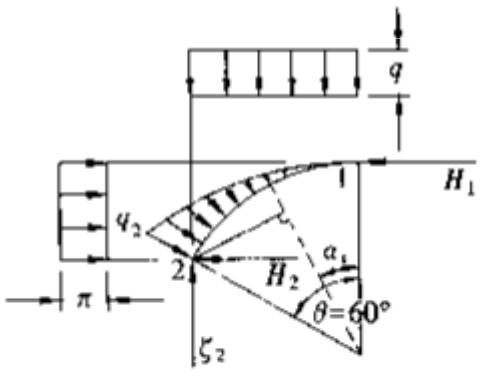
3）衬砌环外围土抗力按均变形式分布，土抗力的计算要满足衬砌环稳定性的要求，土抗力作用方向全部朝向圆心。

4）计算中不计及圆环与土体介质间的摩擦力，这对于满足结构稳定性是偏于安全的。

5）土抗力和变位间关系按文克列尔（勒Winkler）公式计算。

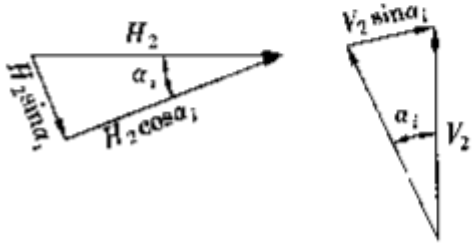


一起快速看书
P254-257



衬砌各个截面处地层抗力方程式：

$$q_{\alpha i} = q_{i-1} + \frac{(q_i - q_{i-1})\alpha_i}{\theta_i - \theta_{i-1}}$$



10.3 衬砌断面设计

衬砌结构在各个工作阶段的内力计算完成后，就可分别或组合几个工作阶段的内力情况进行断面选择。断面选择在各个不同工作阶段具有不同的内容和要求。

在基本使用荷载阶段，需进行抗裂或裂缝限制，强度和变形等验算，而在组合基本荷载阶段和特殊荷载阶段的衬砌内力时，一般仅进行强度的检验、变形和裂缝开展可不予以考虑。

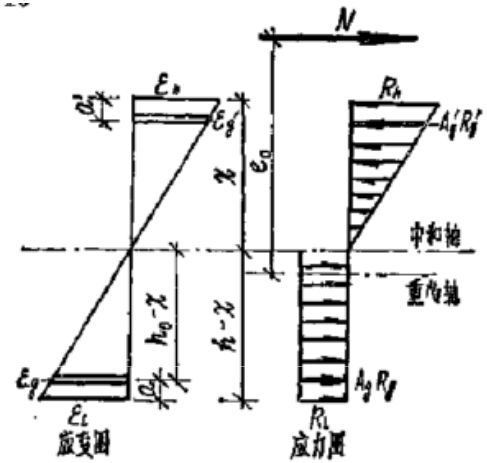
10.3.1 抗裂及裂缝限制的计算

对一些使用要求较高的隧道工程，衬砌必须进行抗裂或裂缝宽度限制的计算，以防止钢筋锈蚀面影响工程使用寿命。

A 抗裂计算

当衬砌不允许出现裂缝时，需进行抗裂计算。

偏压构件断面上的内力分别为弯矩M、轴向力N。



$\Sigma X=0$

$$N+(h-x)b\cdot x\cdot R_l+A_g e_g E_g=A_g' e_g' E_g+\frac{1}{2}R_h\cdot x\cdot b$$

从上式可解出中和轴高度x。

$\Sigma M_{A_g}=0$

$$KN(e_0+h_0-x)+(h-x)\cdot b\cdot R_l\left(\frac{h-x}{2}-a\right)$$

$$=\frac{1}{2}R_h\cdot x\cdot b\left(\frac{2}{3}x+h_0-x\right)+A_g'R_g'(h_0-a')$$

由上式可解出K。

如对偏心距e_0取K，

$$N(K_{e_0}e_0+h_0-x)+(h-x)\cdot b\cdot R_l\cdot\left(\frac{h-x}{2}-a\right)$$

$$=\frac{1}{2}R_h\cdot x\cdot b\cdot\left(\frac{2}{3}x+h_0-x\right)+A_g'R_g'(h_0-a')$$

由上式可求出K_{e_0}。

K或K_{e_0}都要求大于或等于1.3。

为偏于安全计，常按Ke0验算。（可由拉、压区的钢筋面积联合调整Ke0）。

B 裂缝宽度验算

由前一节计算出变形后，即可算出裂缝的宽度，然后结合相应的规范进行验算。

10.3.2 衬砌断面强度计算

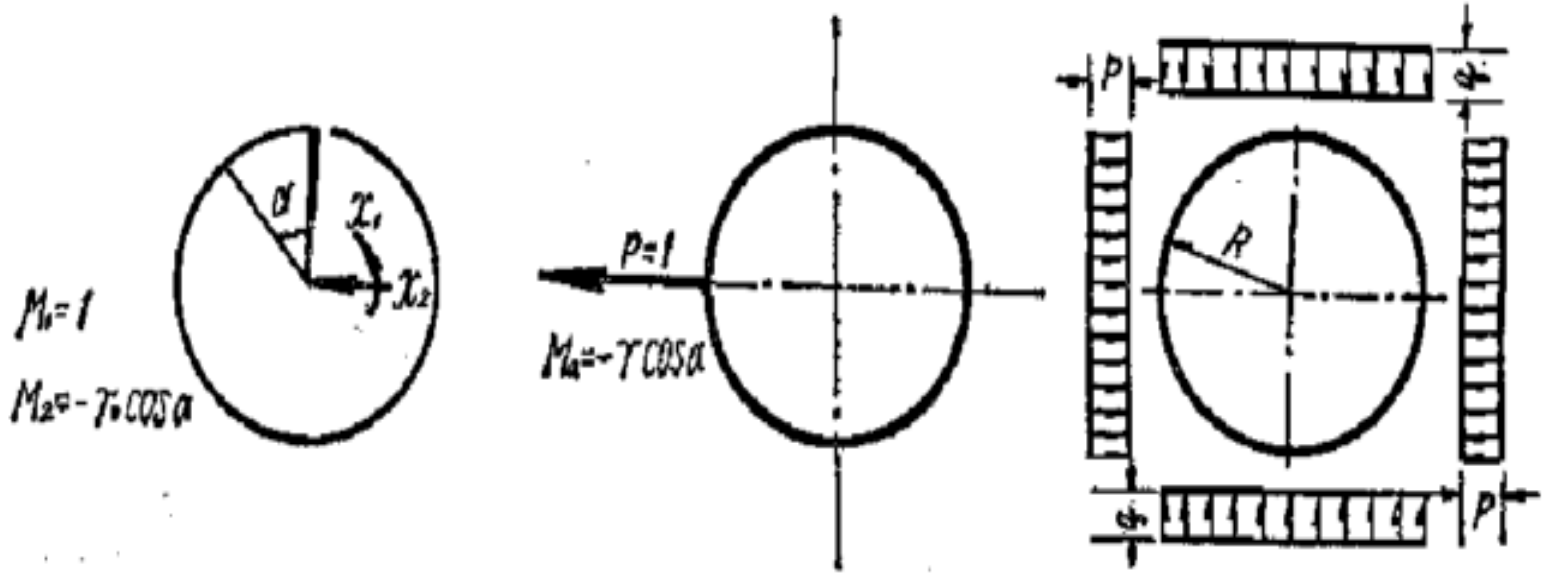
衬砌结构根据不同工作阶段的最不利内力，分别进行正负弯矩的偏压构件强度计算和截面选择。

基本使用荷载阶段隧道衬砌构件的强度计算，可接《钢筋混凝土结构设计规范》（GB50010-2002）中表11、12规定的强度安全系数进行。偏压构件可取强度安全系数K—1.55。

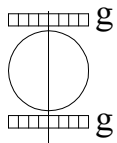
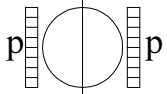
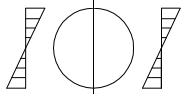
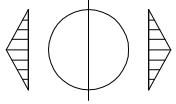
基本使用荷载和特殊荷载组合阶段的强度安全系数可按特殊规定进行。

10.3.3 衬砌圆环的直径变形计算

为满足隧道使用上和结构计算的需要，必须对衬砌圆环的直径变形量计算和控制，直径变形的计算可采用一般结构力学方法求得（图乘法，表10-9）。



各种荷载条件下的圆环水平直径变形系数　　表 10—9

编 号	荷重形式	水平直径处（半径方向）	图　示
1	铅直分布荷重 q	$\frac{1}{12}q\cdot r^4/EI$	
2	水平均布荷重 p	$-\frac{1}{12}p\cdot r^4/EI$	
3	等边分布荷重	0	
4	等腰△分布荷重	$-0.0454p_k r^4/EI$	
5	自重	$0.1304g\cdot r^4/EI$	

P260

10.3.4 纵向接缝计算

(一)接缝张开的验算（简化）：

管片拼装之际由于受到螺栓预应力的作用，在接缝上产生预压应力。

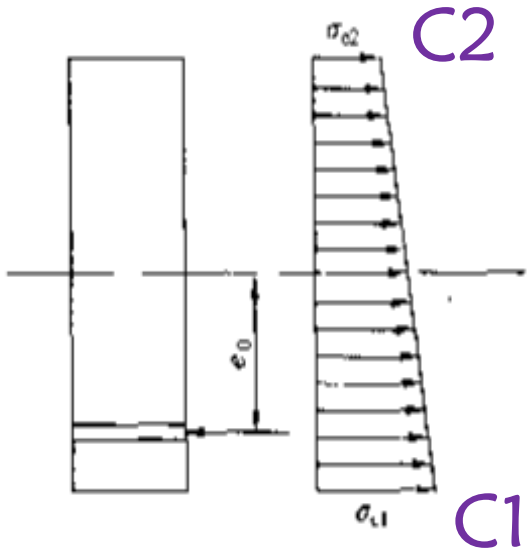


图 10-24 接缝预压应力

$$\frac{\sigma_{c1}}{\sigma_{c2}}=\frac{N}{F}\pm\frac{Ne_0}{W}$$

$$N=\sigma_1\cdot A_g$$

当接缝受到外荷后的应力状态

$$\frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{a2}}=\frac{N}{F}\pm\frac{Ne_0}{W}$$

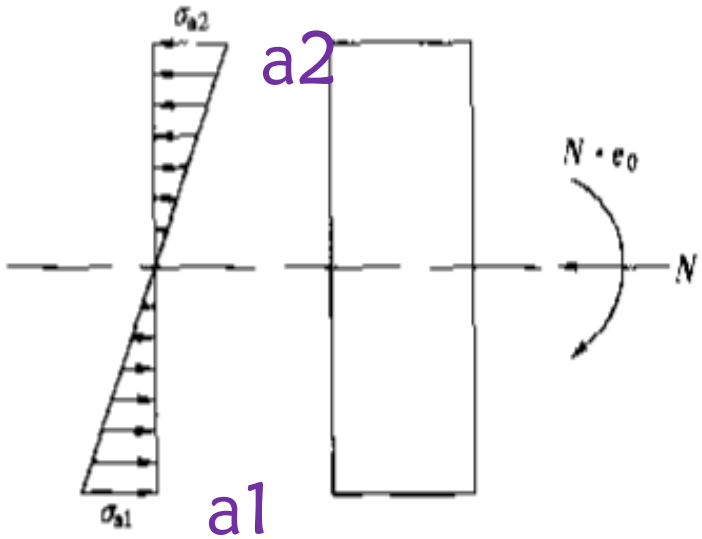


图 10-25 外力作用下的接缝受力状态

P261

最终接缝应力

$$\sigma_p = \sigma_{c2} + \sigma_{a2}$$

$$\sigma_c = \sigma_{c1} + \sigma_{a1}$$

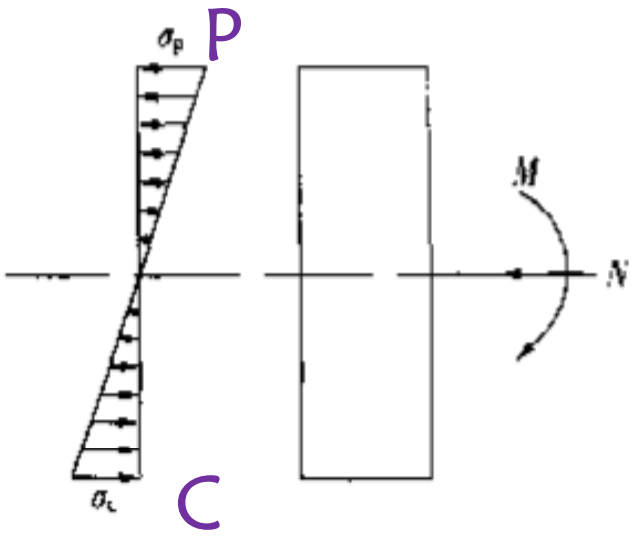


图 10-26　最终接缝应力

接缝变形量

$$\Delta l = \frac{\sigma_p}{E} l$$

式中　E——防水涂料抗拉弹性模量(MPa)

l——涂料厚度(m)。

(二)纵向接缝强度计算

- 都采用一种近似的计算方法，实际的接缝承载能力必须通过接头试验和整环试验求得。

- 一般接缝强度的安全系数应大于断面强度安全系数。

P262

10.3.5 环缝的近似计算

环缝是由钢筋混凝土管片和纵向螺栓两部分组成。

环缝的合成纵向强度

环缝的综合伸长量 $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$

管片伸长量 $\Delta l_1 = \dfrac{M l_1}{E_1 W_1}$

纵向螺栓伸长量 $\Delta l_2 = \dfrac{M l_2}{E_2 W_2}$

式中l_1、E_1、W_1——分别为衬砌环宽(m)，弹性模量(MPa)，截面模量(m)；

l_2、E_2、W_2——分别为纵向螺栓的长度(m)、弹性模量(MPa)、截面模量(m^3)。

P263

环缝的合成刚度

$$(EW)_{合}=\frac{M(l_1+l_2)}{\Delta l}=\frac{M(l_1+l_2)}{\frac{Ml_1}{E_1W_1}+\frac{Ml_2}{E_2W_2}}=\frac{l_1+l_2}{\frac{l_1}{E_1W_1}+\frac{l_2}{E_2W_2}}l$$

环缝的合成抗弯强度

$$M_{(合)}=E_{(合)}\cdot W_{(合)}\cdot\varepsilon_{(合)}$$

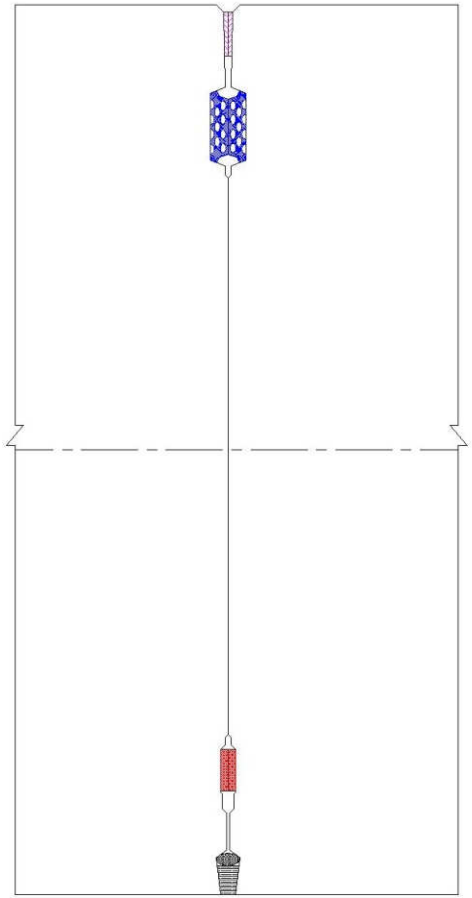
式中 $\varepsilon_{(合)}=\frac{\Delta l_{(合)}}{l_{(合)}}=\frac{l_1\varepsilon_1+l_2\varepsilon_2}{l_1+l_2}$

$$\varepsilon_2=\frac{\sigma_2}{E_2},\quad \varepsilon_1=\varepsilon_2\frac{E_2W_2}{E_1W_1}$$

10.4 隧道防水及其综合处理

在饱和含水软土地层中采用装配式钢筋混凝土管片作为隧道衬砌，除应满足结构强度和刚度的要求外，另一重要的技术课题是完满地解决隧道防水问题，以获得一个干燥的使用环境。

- 必须从管片生产工艺，衬砌结构设计，接缝防水材料等几个方面进行综合处理，其中尤以**接缝防水材料的选择**为突出的技术关键。



一般环纵缝三元乙丙橡胶断面

10.4.1 衬砌的抗渗

- 衬砌埋设在含水地层内，承受着一定静水压力，必须具有相当的抗渗能力，衬砌本身的抗渗能力要求：

（1）合理提出衬砌本身的抗渗指标。

（2）经过抗渗试验的混凝土的合适配合比，严格控制水灰比，一般不大于0.4，另加塑化剂以增加混凝土的和易性。

（3）衬砌构件的最小混凝土厚度和钢筋保护层。

（4）管片生产工艺：振捣方式和养护条件的选择。

（5）严格的产品质量检验制度。

（6）减少管片在堆放、运输和拼装过程中的损坏率。

10.4.2 管片制作精度

- 管片制作精度对于隧道防水效果具有很大的影响。管片制作精度不够引起隧道漏水。
- 制作精度较差的管片，再加上拼装误差的累计，往往导致衬砌拼装缝不密贴而出现了较大的初始接隙，当管片防水密封垫的弹性变形量不能适应初始接隙时就会漏水。
- 管片制作精度的不够，造成管片的顶碎和开裂，造成漏水。
- 必须要有一个高精度的钢模。

P268

10.4.3 接缝防水的基本技术要求

- （1）保持永久的弹性状态和具有足够的承压能力，使之适应隧道长期处于“蠕动”状态而产生的接缝张开和错动。
- （2）具有令人满意的弹性期龄和工作效能。
- （3）与混凝土构件具有一定的粘结力。
- （4）能适应地下水的侵蚀。

- 环缝密封垫需要有足够的承压能力和弹性复原力，能承受和均布盾构千斤顶顶力，防止管片顶碎。并在千斤顶顶力往复作用下，密封垫仍保持良好的弹性变形性能。
- 纵缝密封垫具有比环缝密封垫相对较低的承压能力，能对管片的纵缝初始缝隙进行填平补齐，并对局部集中应力具有一定缓冲和抑制作用。
- 较可靠的是在环、纵缝沿隧道内侧设置嵌缝槽，在槽内填嵌密封缝防水材料。

10.4.4 二次衬砌

- 常采用双层衬砌。
- 在外层装配式衬砌已趋基本稳定的情况下，进行二次内衬浇捣，在内衬混凝土浇筑前应对隧道内侧的渗漏点进行修补堵漏，污泥以高压水冲洗、清理。
- 内衬混凝土层的厚度根据防水和内衬混凝土施工的需要，至少不得小于150mm，也有厚达300mm。

  有在外层衬砌结构内直接浇捣两次内衬混凝土；

  也有在外层衬砌的内侧面先喷注20mm厚的找平层，再铺设油毡或合成橡胶类的防水层，再浇注内衬混凝土层。

- 内衬混凝土一般都采用混凝土泵再加钢模台车配合分段进行，每段大致为8～10m左右。内衬混凝土每二十四小时进行一个施工循环。隧道顶拱部分混凝土质量不易保证，尚需预留压浆孔进行压注填实。
- 也有用喷射混凝土进行二次衬砌。

10.4.5 其它

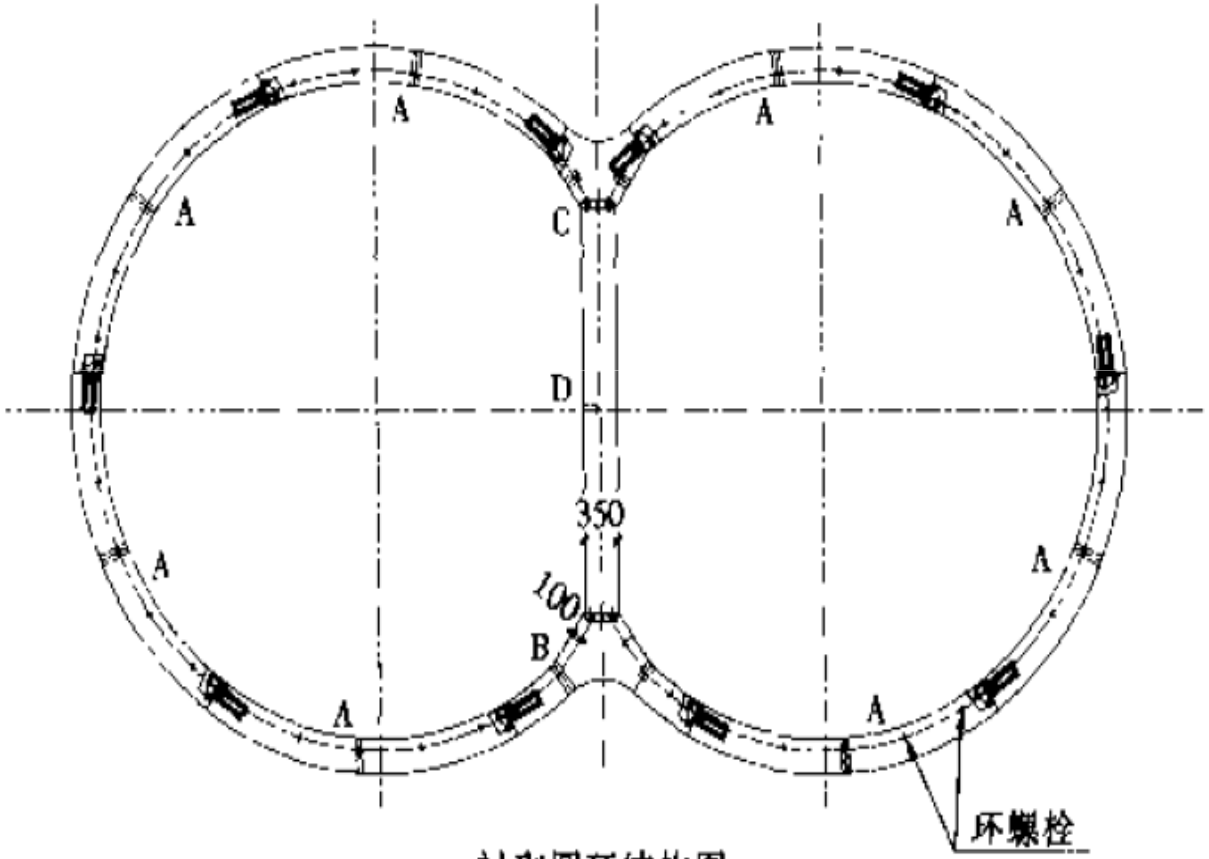
- 隧道防水还有其它的一些附加措施可以采用，诸如隧道外围的压浆，以及地层注浆等，视不同情况予以采用。

10.5 盾构新型管片衬砌形式简介

10.5.1 双圆盾构管片衬砌

- 在城市中修建地铁隧道时，需要同时设置上行线和下行线。
- 上、下行线间距一般较为接近，通常将它们分别设于两条平行隧道或集中设于一条大直径隧道内，具有土方开挖量大、衬砌材料多、工程造价高且施工工期长等缺点。
- 采用双圆盾构施工，则可克服以上不足，一方面可提高施工效率，缩短施工工期，另一方面可减少开挖面积，降低工程造价。

◆在上海轨道交通杨浦线(M线)工程建设中，由于受工期、工况条件等制约，其中有三段区间(开鲁路站-嫩江路站-翔殷路站-黄兴绿地站]累计约2.688km隧道，在国内首次采用双圆衬砌结构。



衬砌圆环结构图

图 10-34　双圆管片衬砌

10.5.2 通用管片衬砌

- 所谓通用管片，就是所有的管片环形式只有一种，它既可用在直线段，如图所示；也可用在曲线段，而不像普通的管片形式将这两者加以区分，需要在曲线段单独设置楔形环。
- 由于我国的盾构法隧道技术发展起步较晚，通用管片在工程实际中应用还较少。主要应用的工程有上海某输水管道，建设中的上海崇明通道隧道段，深圳已建成的地铁一期工程第7标段(盾构区间隧道)。
- 目前在国内采用的2种主流管片环形式是：

  (1) 左转环+直线环+右转环；

  (2) 左转环+右转环。

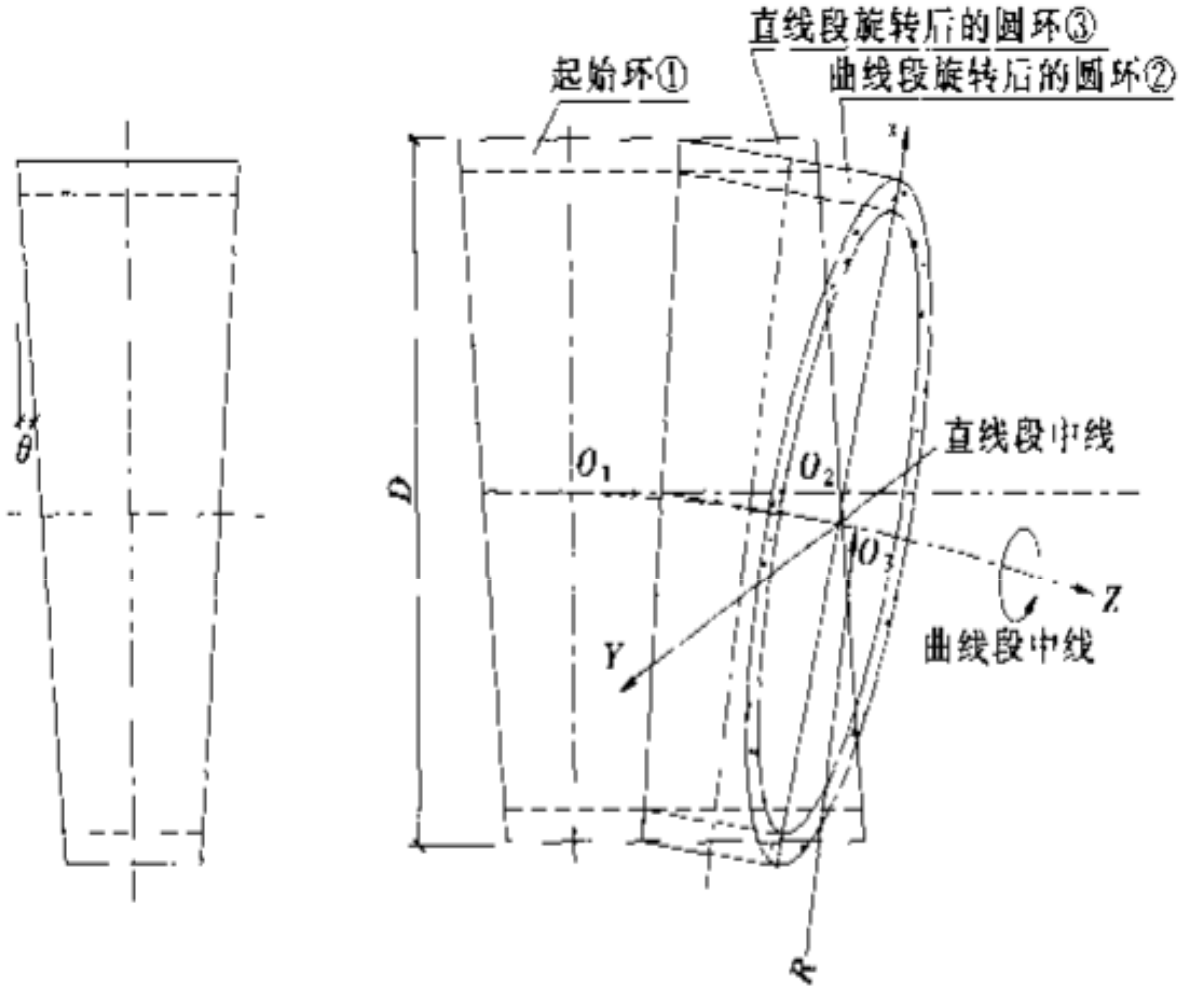


图 10-35　通用管片衬砌示意图

10.5.3 预应力管片

◆2001年，日本就预应力管片进行了试验研究，目的是用于小直径、受内压的隧道，并在寝屋川流域恩智川东干线50m的下水道受内压区间段使用预制预应力管片，如图所示。

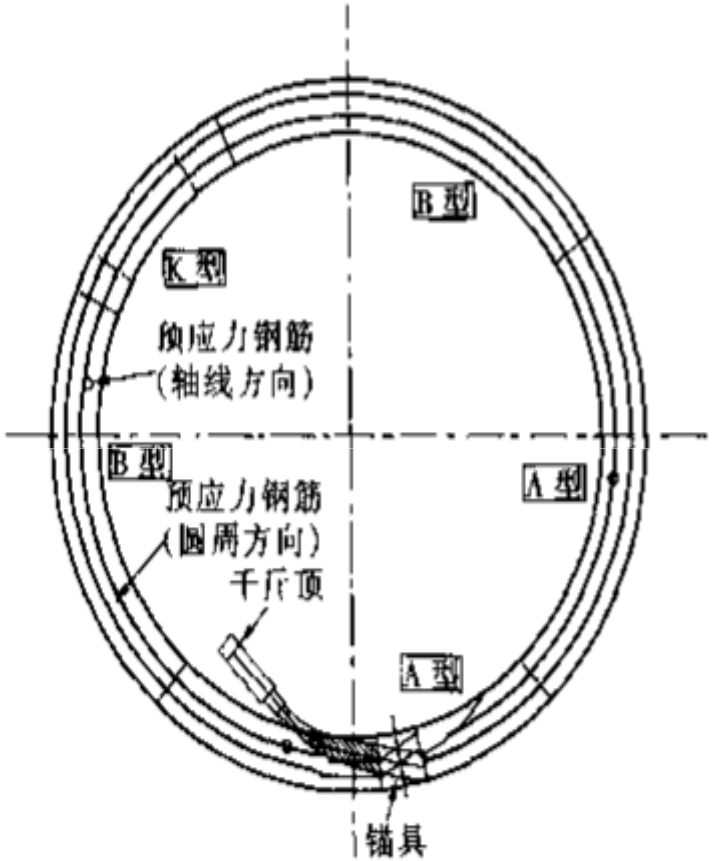


图 10-36 预应力衬砌示意图

- 我国主要在水工隧洞混凝土衬砌采用预应力技术。目前我国采用环锚预应力结构作为水工隧洞混凝土衬砌的大型工程不多，较为重要的是清江隔河岩水电站的4条引水隧道和广西天生桥水电站的引水隧洞，第三个就是小浪底工程的3条排沙洞。
- 目前，预应力管片在地下铁路、公路隧道的应用尽管还没有应用的实例，其可行性还在研究之中，但其应用前景应该是乐观的。

10.5.4 钢纤维复合管片

- 钢纤维混凝土（Steel Fiber Reinforced Concrete，简称SFRC）是20世纪70年代发展起来的新型复合建筑材料。具有优良的物理、力学性能，与普通混凝土相比，其抗拉、抗弯强度及耐磨、耐冲击、耐腐蚀、耐疲劳性、韧性、和抗爆等性能可得到提高，在国内外得到广泛应用。

- 钢纤维混凝土在盾构法隧道中的应用虽然近年来才开始，但是在国外已经推广应用。SFRC的独特性能使其可以较好地弥补前述钢筋混凝土管片的缺点。

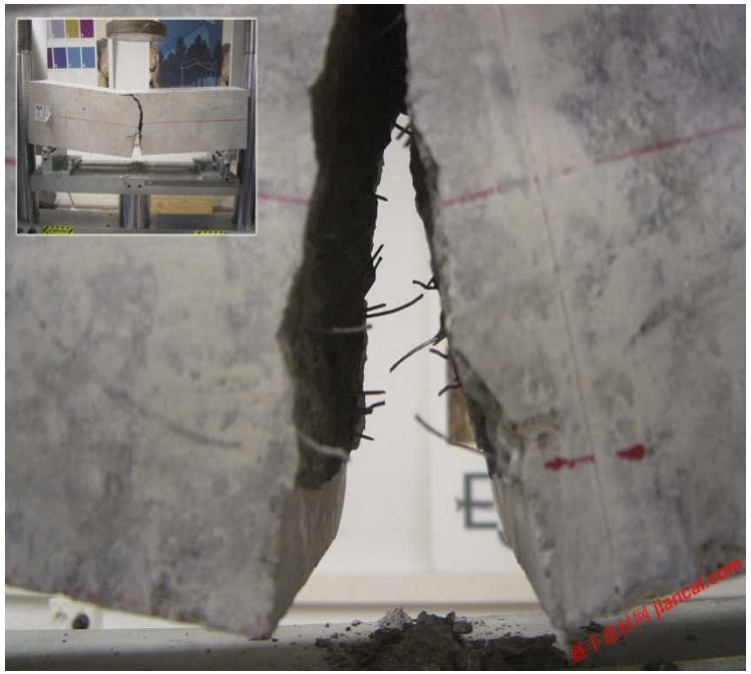
  由于SFRC的纤维有效地改善了结构内部受力，使其损坏率明显下降；

  SFRC就可以确保构件优异的抗裂性；

  此外，采用SFRC对老隧道进行修补、加固，或用于复合衬砌内衬，都具有显而易见的优越性。

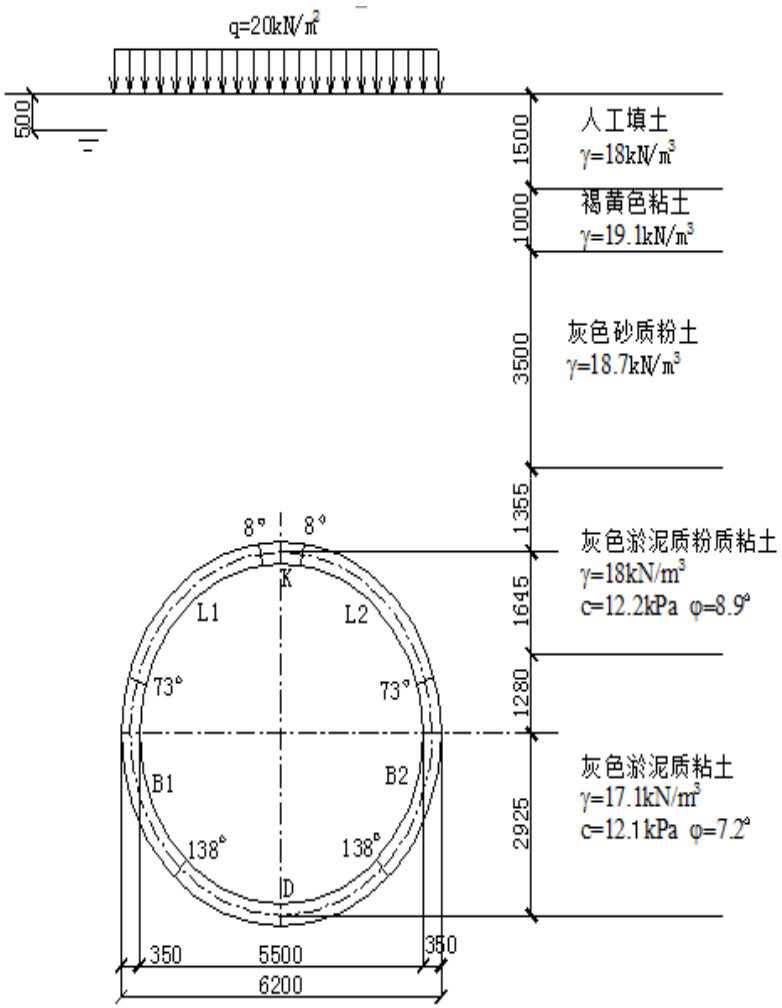
- 第一个钢纤维混凝土管片衬砌工程是在1989年在意大利西西里建造的供水隧道，此工程约4.8km。随后法国、德国、英国、日本等国家相继在地铁隧道和输水管道等方面进行工程实践，管片形式由有筋发展到无筋。从既有工程实践来看，其技术和经济效益都达到了预期要求。

钢纤维混凝土



计 算 题

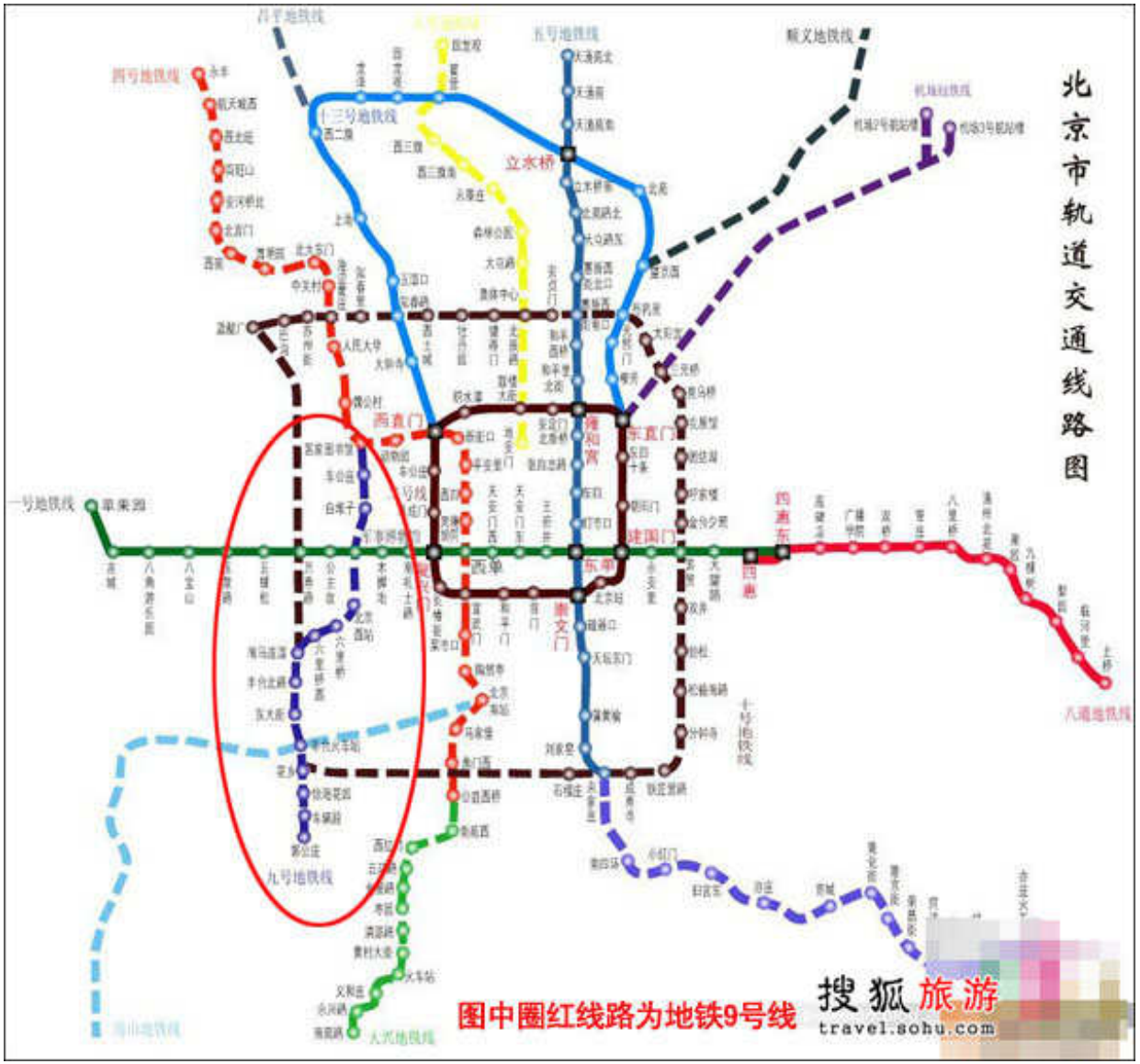
如图所示，为一软土地区地铁盾构隧道的横断面，又一块封顶块K,两块邻接块L,两块标准块B以及一块封底块D六块管片组成，衬砌外径6200mm,厚度为350mm,采用通缝拼装，混凝土强度为C50，环向螺栓为5.8级。管片裂缝宽度允许值为0.2mm,接缝张开允许值为3mm。地面超载为20kPa。试计算衬砌内力，画出内力图，并进行隧道抗浮、管片局部抗压、裂缝、接缝张开等验算及管片配筋计算。

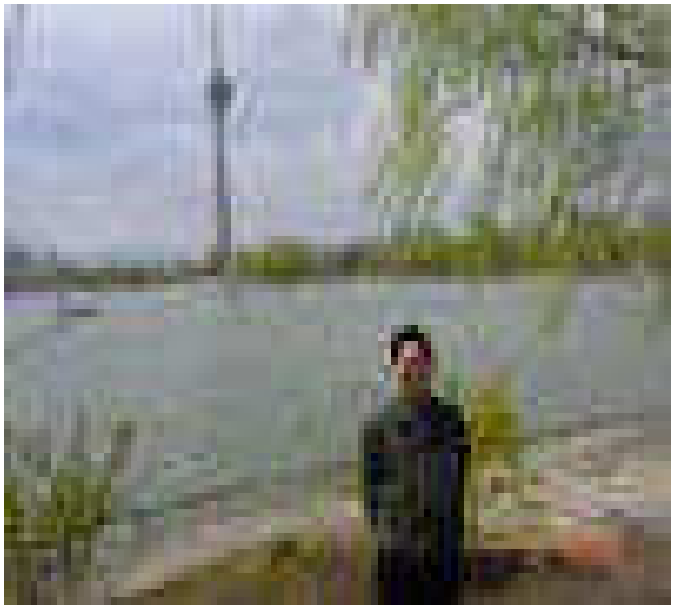


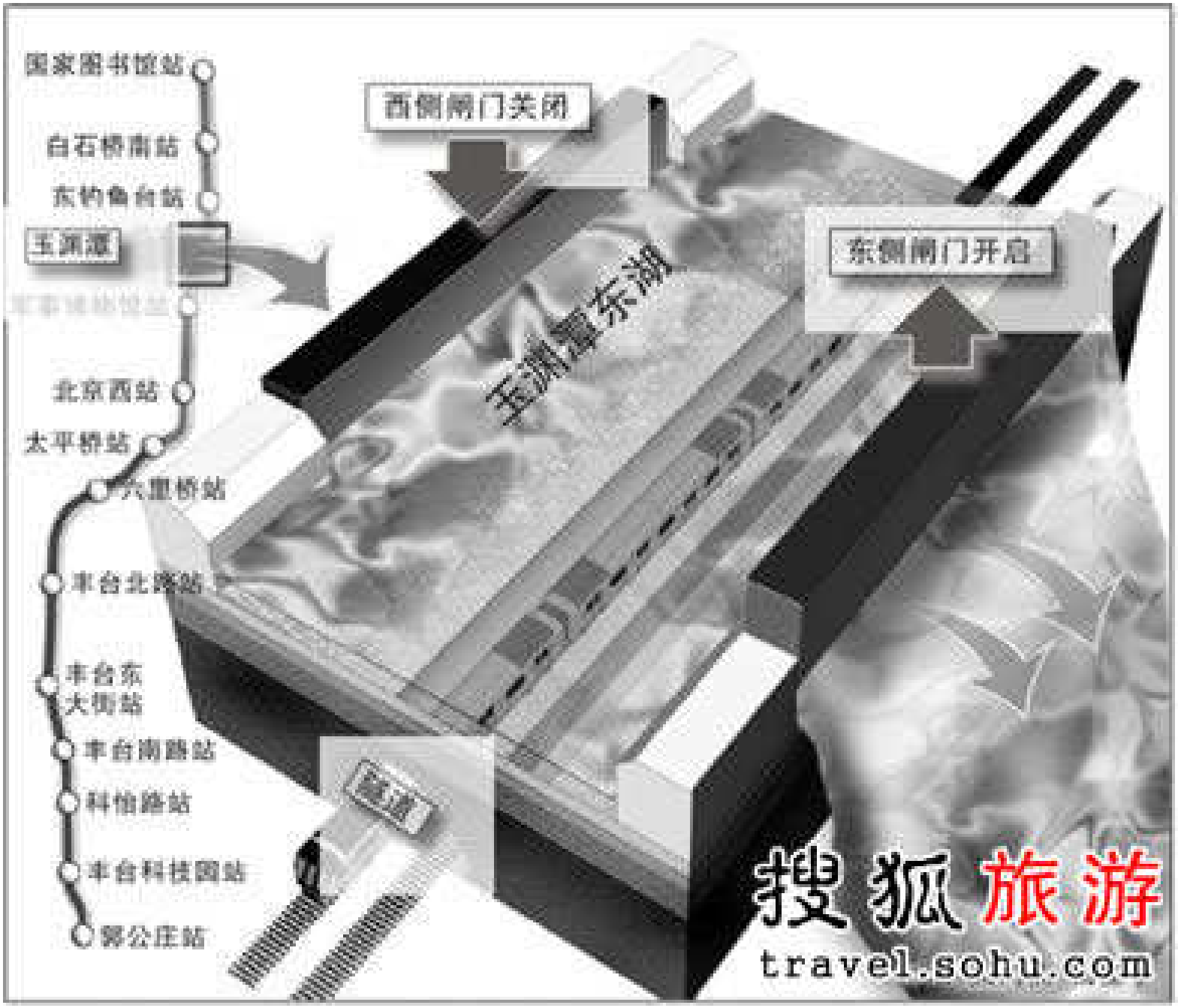
P272

盾构应用实例

实例1 北京地铁9号线


北京市轨道交通线路图
图中圈红线路为地铁9号线
搜狐旅游
travel.sohu.com
九号地线
一号地线
五号地线
十三号地线
立水桥
西直门
东直门
建国门
四惠
四惠东
八通地线
大兴地线
十号地铁线

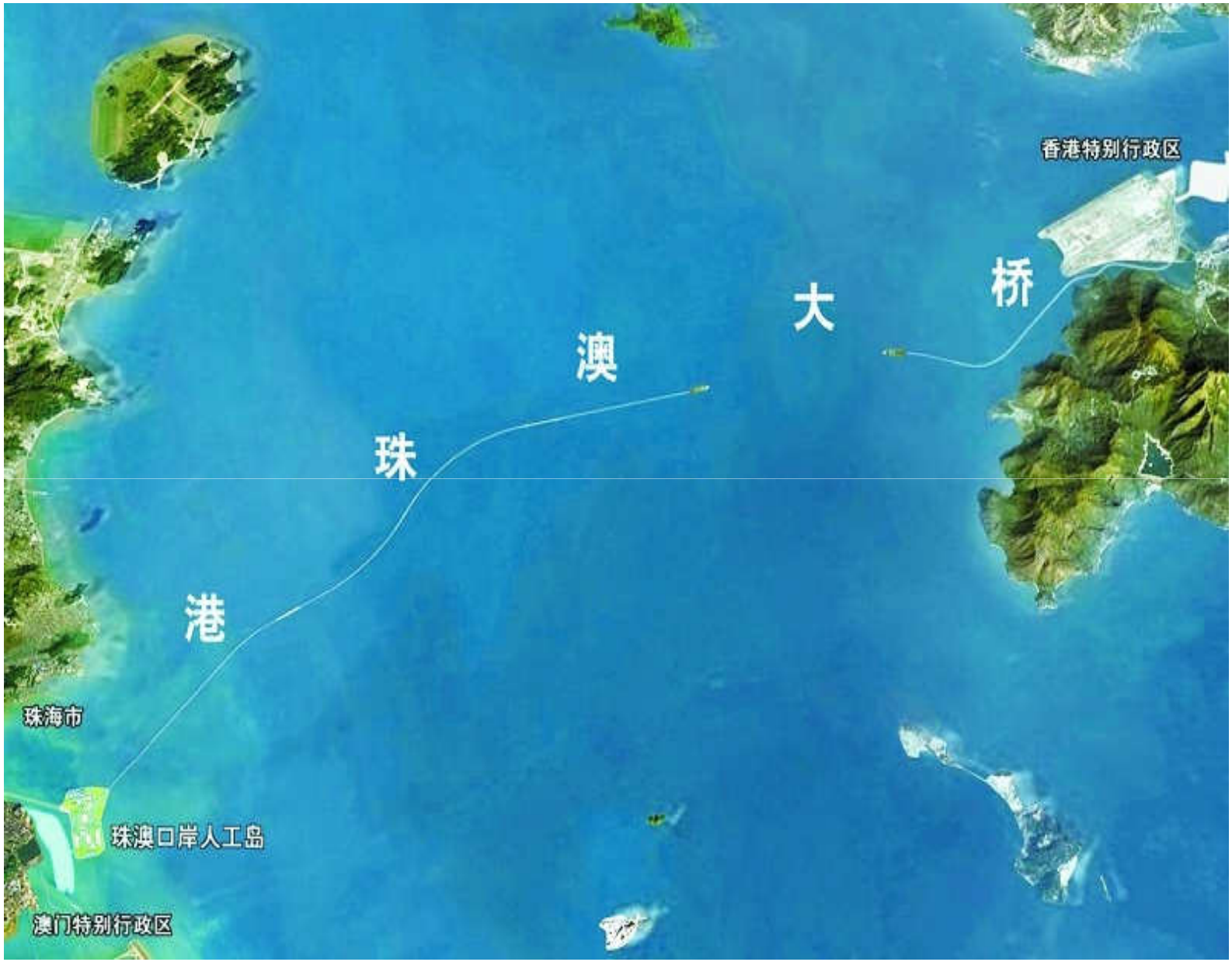



国家图书馆站
白石桥南站
东钓鱼台站
玉渊潭
北京西站
太平桥站
六里桥站
丰台北路站
丰台东大街站
丰台南路站
科怡路站
丰台科技园站
郭公庄站
西侧闸门关闭
东侧闸门开启
玉渊潭东湖
隧道
搜狐旅游
travel.sohu.com

2010年2月20日，巨大的罗威特盾构机开始在玉渊潭湖底17米处悄悄掘进。地铁九号线军事博物馆站至东钓鱼台站的盾构区间开工了，这段地下隧道包括了“穿越”玉渊潭东湖底300米长的距离。

实例2 港珠澳海底隧道方案

港珠澳大桥方案设计


香港特别行政区
桥
大
澳
珠
港
珠海市
珠澳口岸人工岛
澳门特别行政区

技术标准论证

盾构隧道其它技术标准

衬砌结构变形：直径变形≤1‰D（隧道外径）；环缝张开<2mm，纵缝张开<3mm

抗浮安全系数：≥1.2

管片混凝土强度等级：C60

抗渗等级：S12

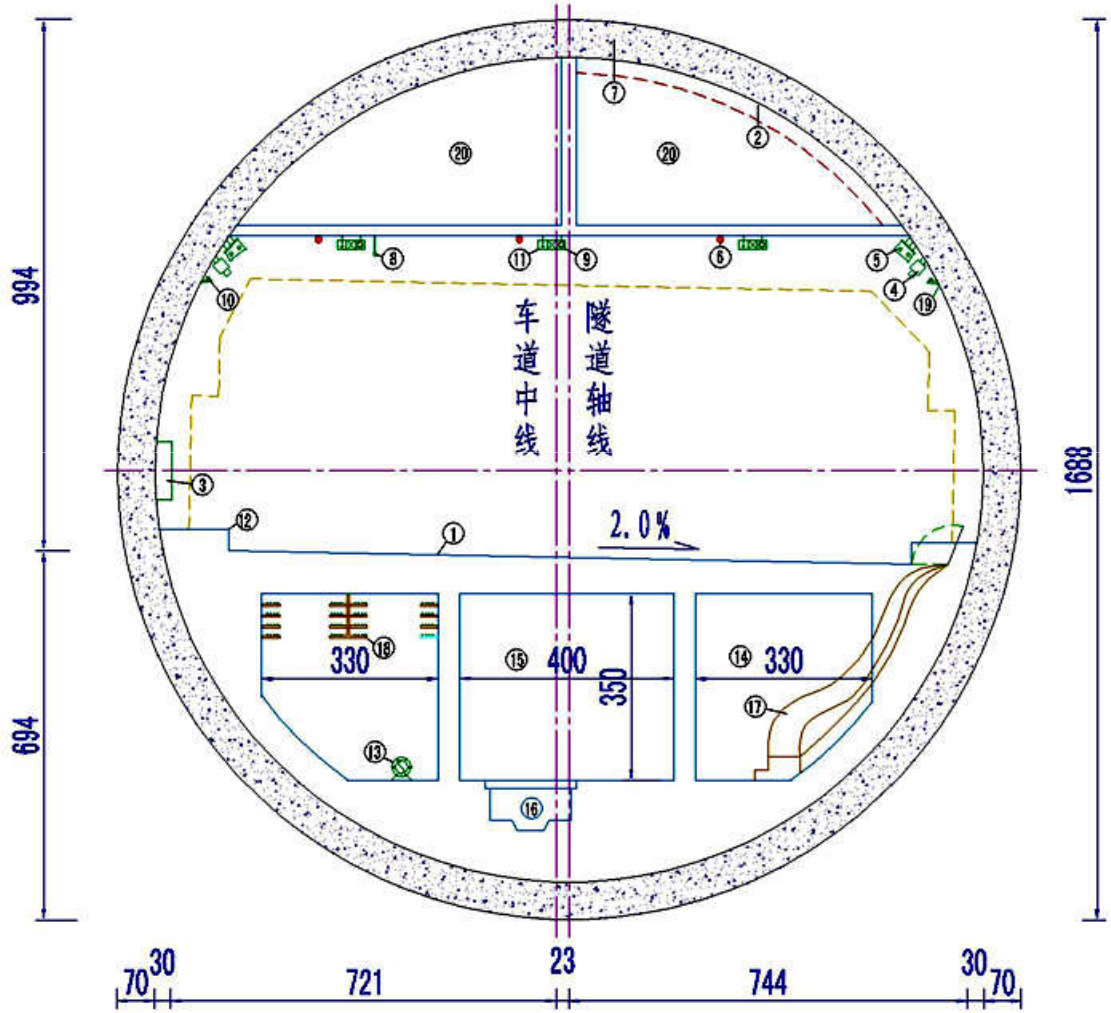
混凝土保护层厚度：50mm

考虑不同工况下的荷载组合等

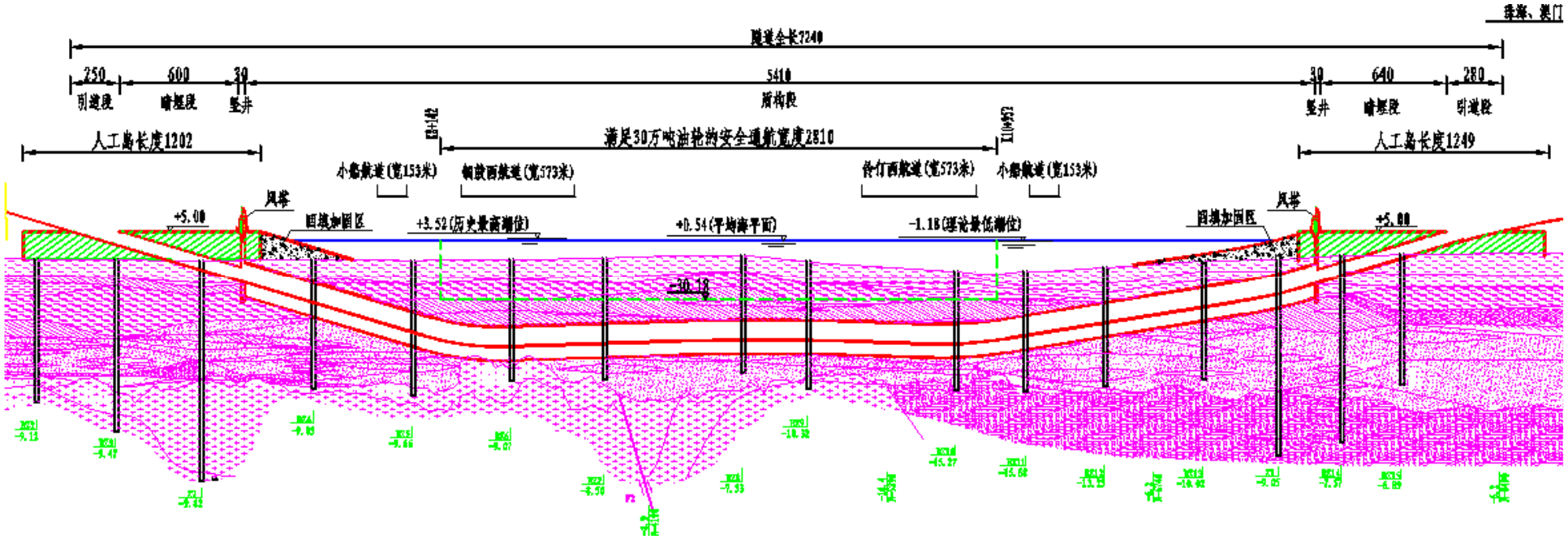
海底隧道技术方案

盾构隧道

横断面布置



盾构隧道纵断面布置


珠海、澳门
隧道全长7240
250
600
30
5410
30
640
280
引道段
暗埋段
竖井
盾构段
竖井
暗埋段
引道段
人工岛长度1202
满足30万吨油轮的安全通航宽度2810
人工岛长度1249
小船航道(宽153米)
铜鼓西航道(宽573米)
伶仃西航道(宽573米)
小船航道(宽153米)
风塔
+5.00
回填加固区
+3.52(历史最高潮位)
+0.54(平均海平面)
-1.18(理论最低潮位)
回填加固区
风塔
+5.00
-30.18

盾构隧道最小埋深

考虑隧道抗浮安全系数和注浆层稳定性，经计算取为0.6D。

管片环结构

7+2+1=10片，错缝拼接

管片接头与防水

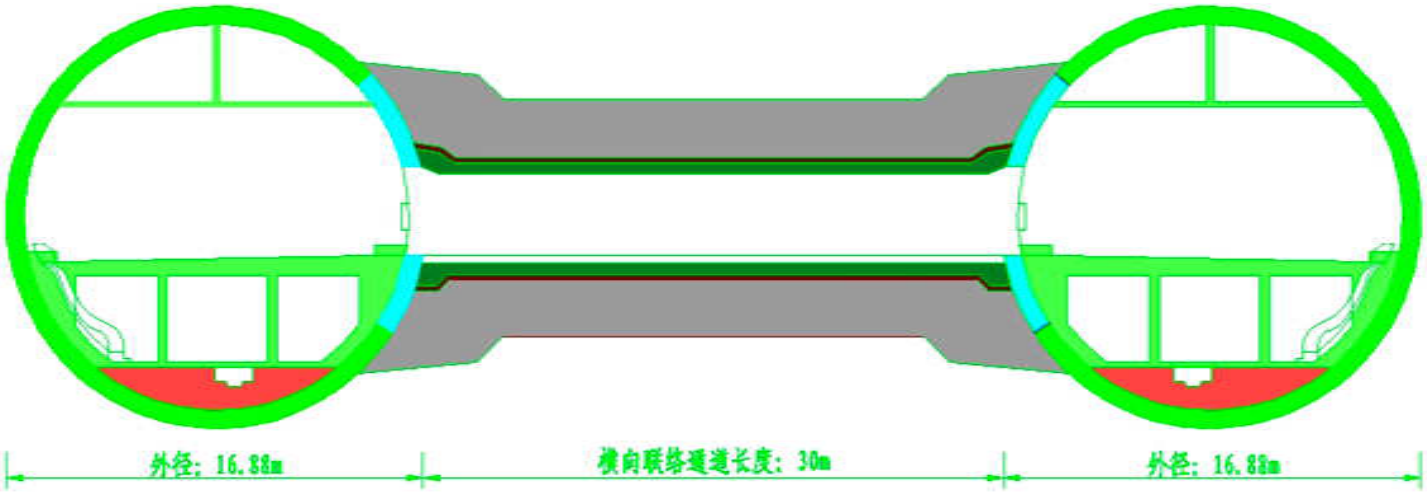
拟选用全面对接式，设置密封垫槽和嵌缝槽，接头采用斜螺栓连接。管片采用 C60 混凝土，抗渗等级 S12。

管片接头 工程名称	接头形式	螺栓形式	螺栓数量
东京湾海底隧道	全面对接式	长直螺栓	横向 66 根 纵向 44 根
南京长江隧道	全面对接式	斜螺栓	横向 40 根 纵向 30 根
狮子洋海底隧道	全面对接式	斜螺栓	
崇明长江隧道	全面对接式	斜螺栓	横向 40 根 纵向 30 根
上海地铁		三种螺栓均有采用，以直螺栓为主	
北京地铁		弯螺栓	
广州地铁一、二、三、号线		弯螺栓	
南京地铁一号线		弯螺栓	
深圳地铁一期工程		弯螺栓	

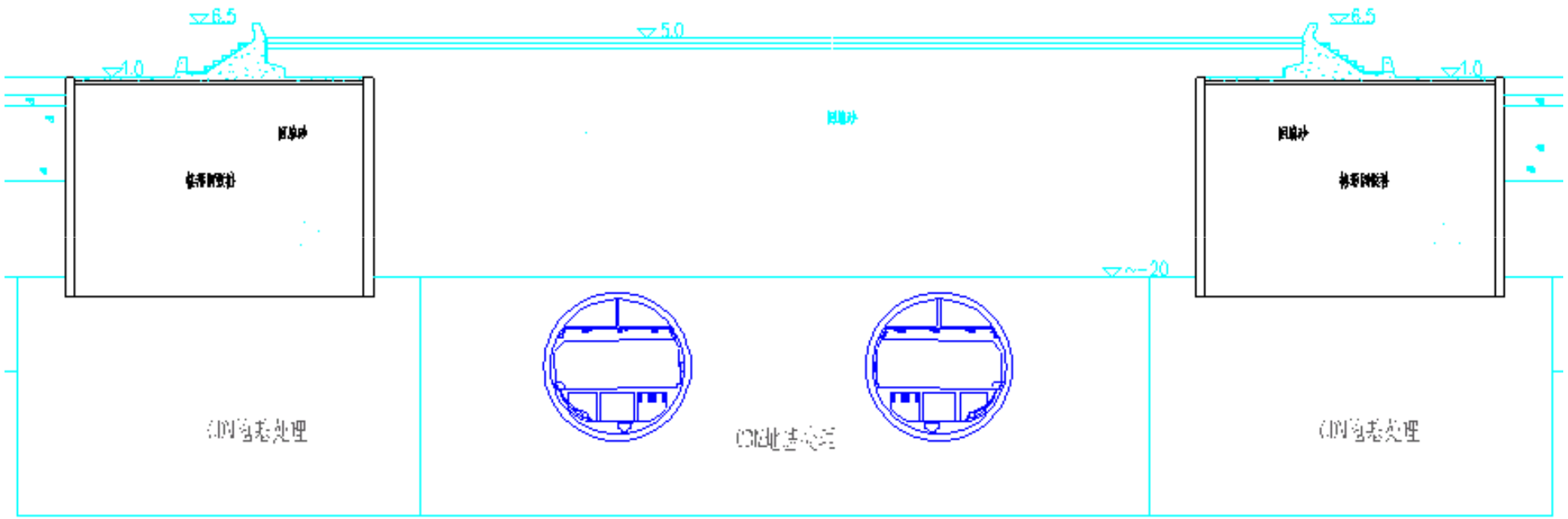
隧道横通道设置

人行横通道暂按间距500m布置,右侧每隔90m设置一处安全口(设滑梯通往纵向疏散通道)。

香港（12月3日）、广东（12月22日）已回复意见。



岛隧结合部

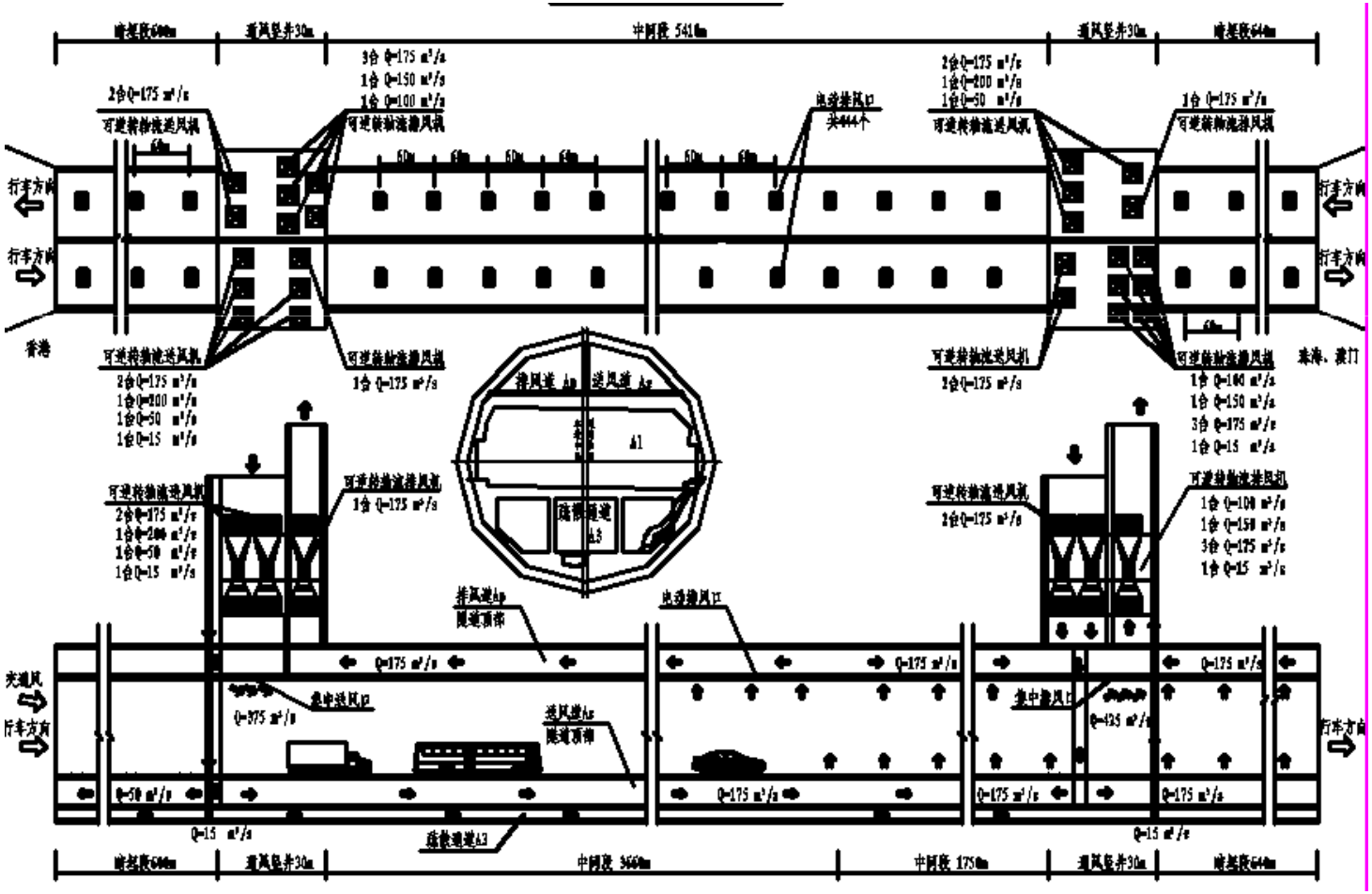


1.筑岛+预沉钢沉箱方案（推荐方案）

2.筑岛+始发/接收井

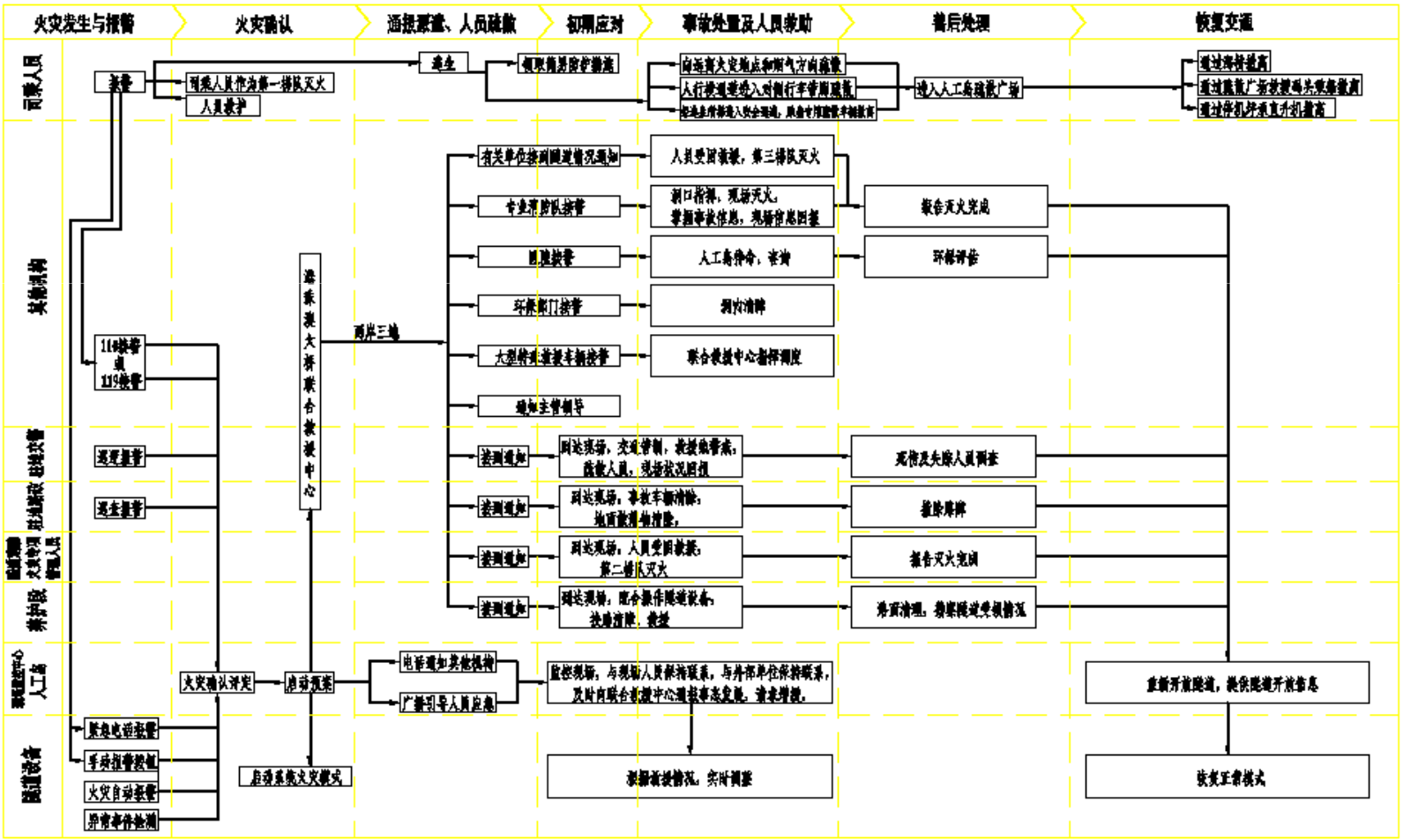
通风方案

半横向+纵向通风方式



消防救援方案

横通道+纵向疏散通道



The end

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