



同济大学交通运输工程学院
COLLEGE OF TRANSPORTATION ENGINEERING
TONGJI UNIVERSITY

城市轨道交通 结构设计与施工

Structural Design and Construction in
Urban Mass Transit

城市轨道交通与铁道工程系

周顺华、宫全美

Structural Design and Construction in Urban Mass Transit

- 本节主讲：宫全美

- 办 公 室：交通学院663

- 联系电话：69583652

- 电子邮箱：gongqm@tongji.edu.cn

第六章

暗挖法 结构设计





暗挖法施工断面的主要型式

暗挖法基本原理

深埋隧道与浅埋隧道

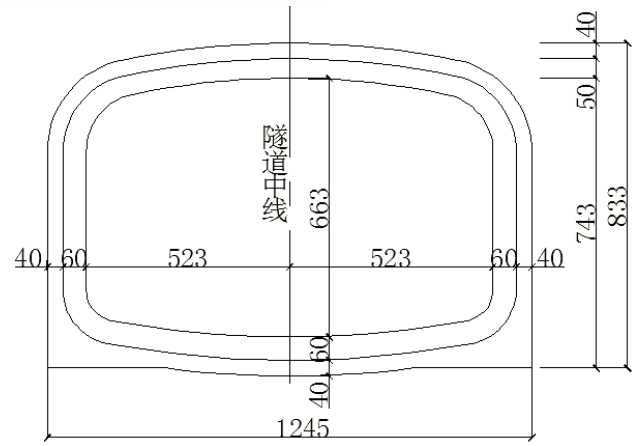
初期支护设计与变形控制

二次衬砌结构设计

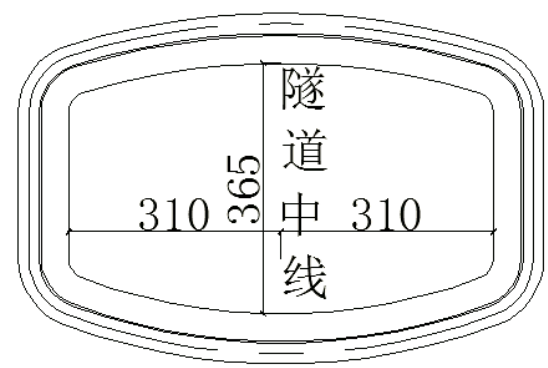


一、暗挖法施工断面的 主要型式

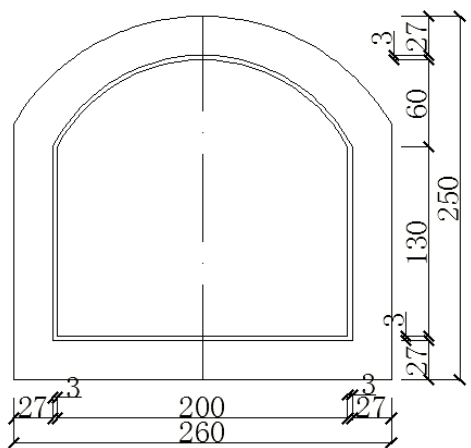
按跨度分类-单跨



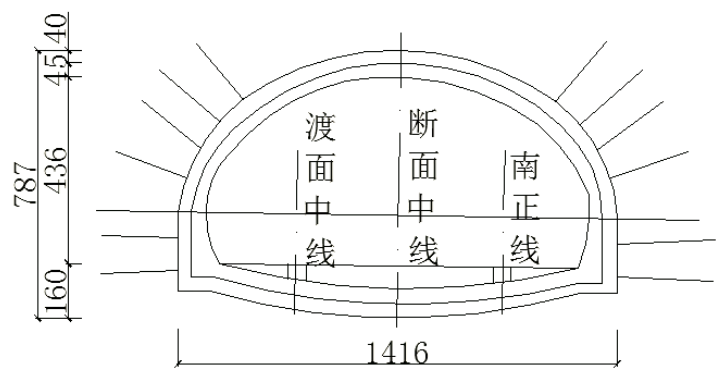
◆ 厦门杏林大桥暗挖隧道断面



◆ 杭州机场路人行过街地道

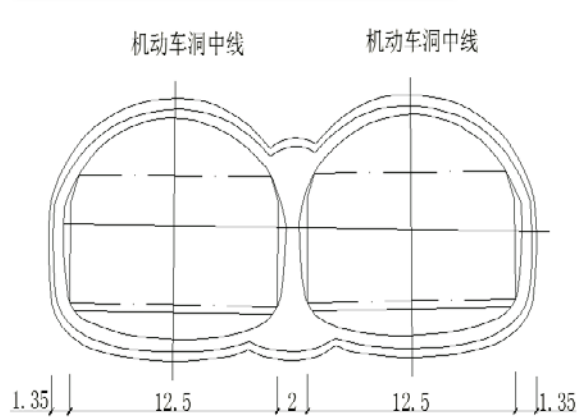


◆ 热力管线衬砌断面

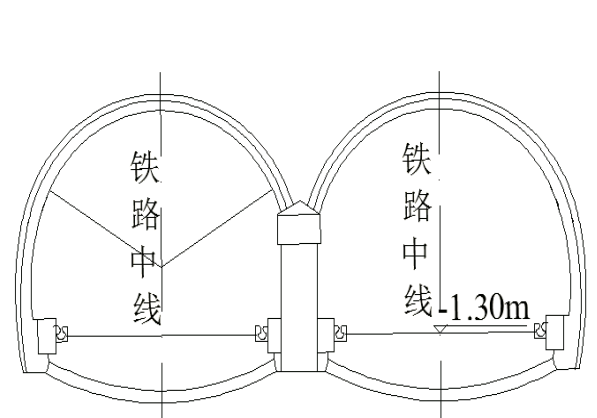


◆ 北京市地铁复兴门折返线衬砌断面

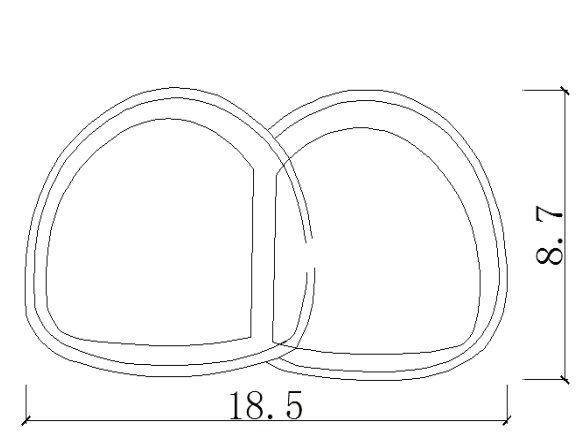
按跨度分类-双跨



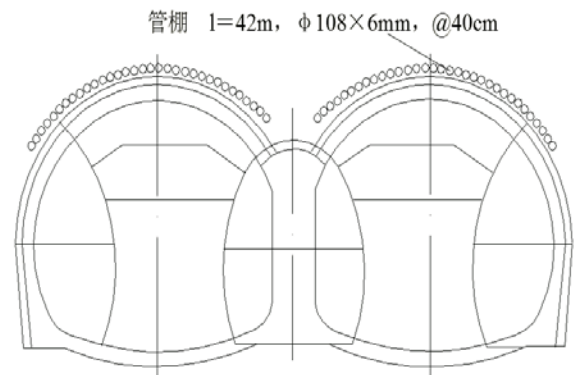
洛阳市东出口过焦枝铁路-道路隧道横断面



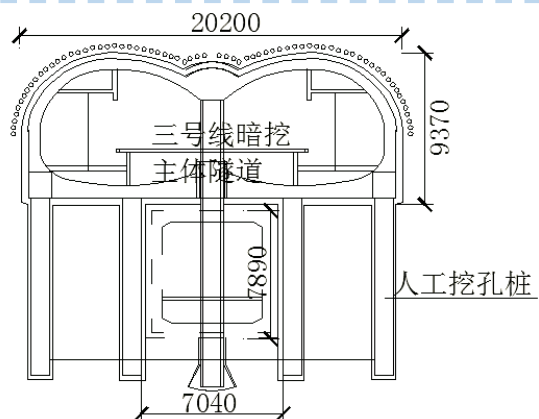
南京市鼓楼道路隧道



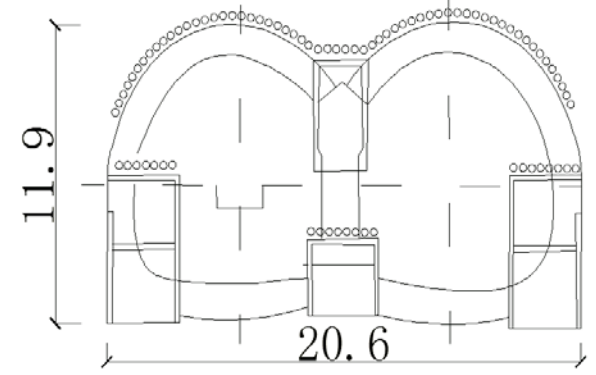
德国柏林广场地铁站



黄梅山隧道进出口段

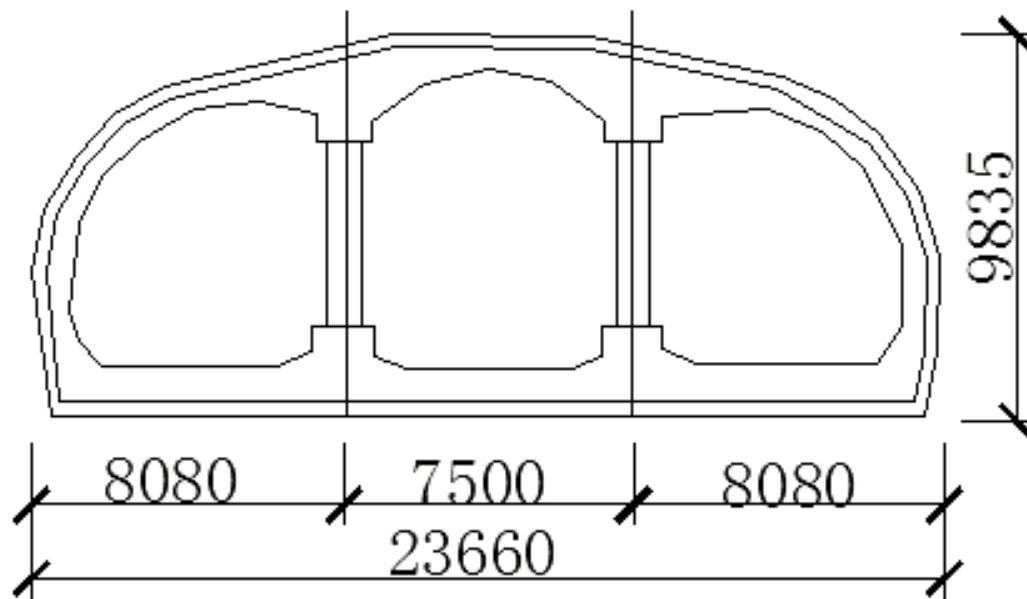


广州地铁3号线林和西站



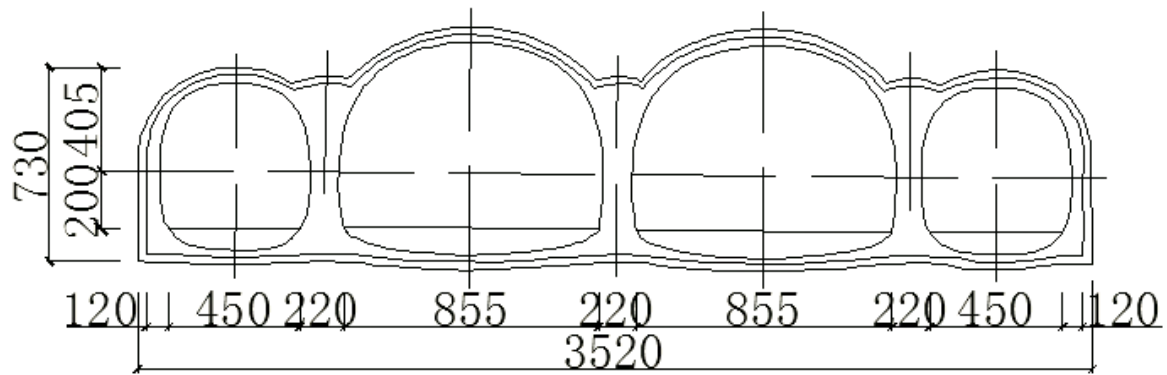
北京市新桥地铁站隧道断面

按跨度分类-三跨

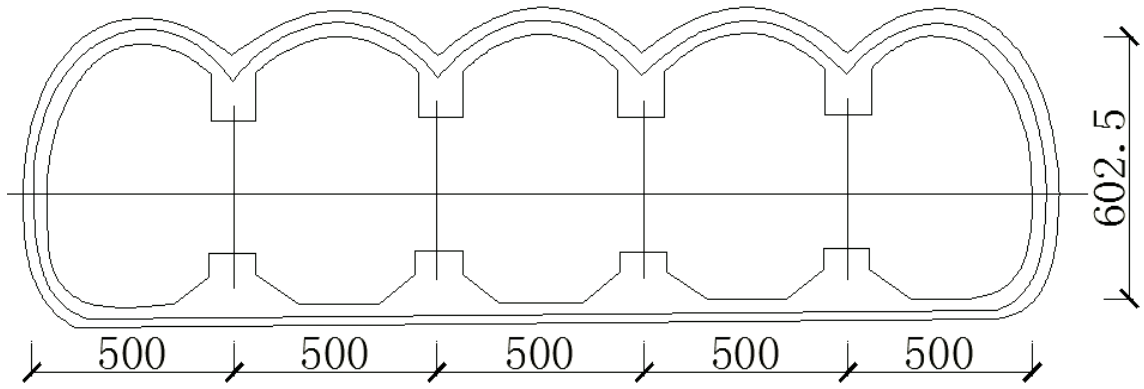


东单地铁站衬砌断面 (单位 : mm)

按跨度分类-多跨



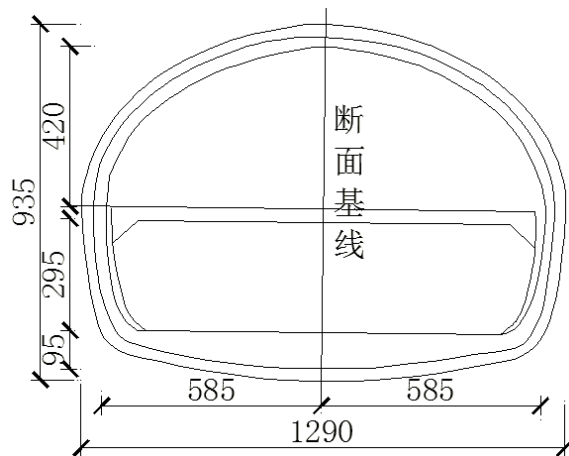
福州市象山城市道路隧道衬砌断面 (单位: cm)



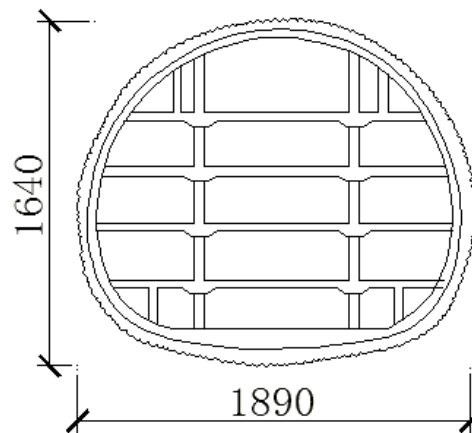
北京市月坛地下商业街五跨连供断面 (单位: cm)

按层数分类

- ◆ **单层**：采用**浅埋暗挖法**施工的隧道多为单层，单层结构设计施工难度相对较小，如道路隧道、市政管线隧道、人行隧道、地铁区间隧道、出入口等。
- ◆ **双层**：为充分利用地下空间，减少占地，节省投资，有些地下结构设计为双层。
- ◆ **多层**：在浅埋工程中，多层结构设计施工难度极大，技术复杂，地面沉降难以控制。



原国家计委地下停车场衬砌端面



德国兰茨贝格三层地下停车场断面

按断面形状分类

- ◆ 通常分为**马蹄形**断面、**蛋形**断面、**圆形**断面。马蹄形断面一般用于山岭隧道，蛋形断面一般用于第四纪地层和极软弱地层中，圆形断面多用于水工隧道。

按边墙形状分类

- ◆ **直墙式**主要应用于侧向压力较小的浅埋隧道，以提高断面的利用率；
- ◆ 当浅埋隧道位于软弱地层中，地质条件较差，围岩自稳性差，隧道的结构形式多采用**曲墙式**，并尽可能圆顺，以减少应力集中点；



二、暗挖法基本原理



新奥法

- ◆ 利用隧洞开挖后围岩应力重分布的**时间效应**适时施加支护并与围岩共同作用，从而利用围岩的自身承载力，达到围岩稳定的目的。

浅埋暗挖法

- ◆ 采用先柔后刚复合式衬砌新型支护结构体系，初期支护按承担全部基本荷载设计，二次模筑衬砌作为安全储备；初期支护与二次衬砌共同承担特殊荷载；采用多种辅助工法，超前支护，改善加固围岩，调动部分围岩的自承能力；采用不同的开挖方法及时支护、封闭成环，使其与围岩共同作用形成联合支护体系；在施工过程中应用监控量测信息反馈和优化设计，实现不塌方、少沉降、安全生产和施工。
- ◆ 基本原则：**管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤测量**

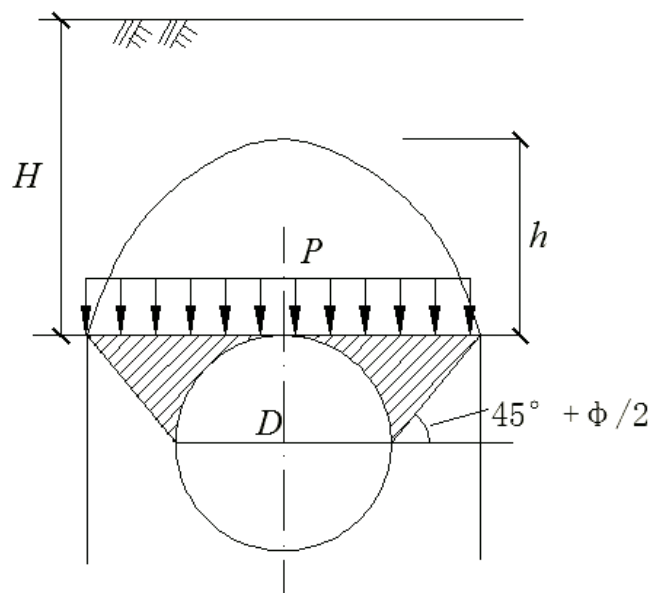


三、深埋隧道与浅埋隧道

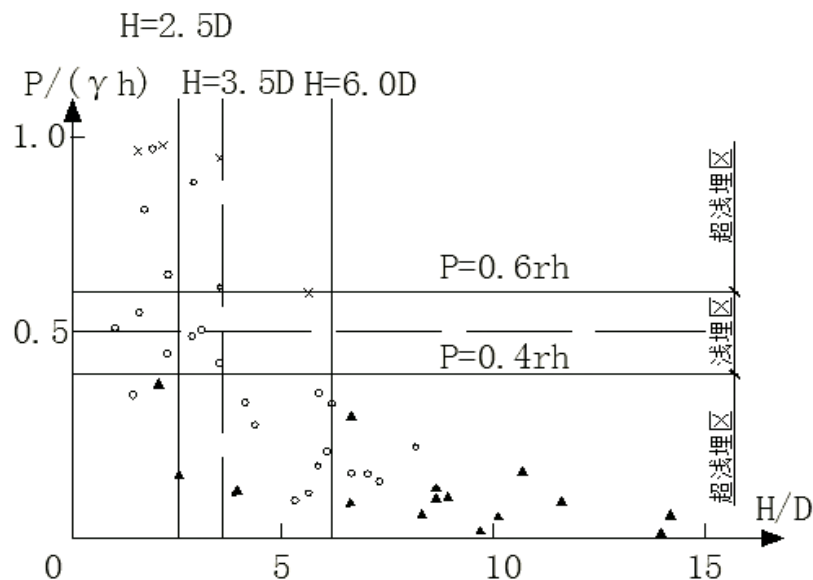


分界标准

根据隧道塌方高度进行界定



塌落拱示意图



H/D 与 $P/\gamma h$ 关系

围岩变形过大时隧道上方会形成塌落拱（压力拱），当埋深大于2倍塌方高度时，才能用塌落拱公式计算。塌落拱高度与**围岩级别**有很大关系



分界标准

根据工程设计经验进行界定

分界深度建议值和有关的计算值（单位：m）

级别	围岩级别		I	II	III	IV	V	VI
单 线	2倍塌方高度		1.3	2.58	4.8	8.8	19.2	38.4
	隧规分界深度		0.96	2.24	4.22	11.15	23.25	47.25
	一般分界深度					16.9~20. 3	17.5~24.5	35~42
	建议 分界 深度	按洞径	0.15D~0. 3D	0.3D~0.5 D	0.5D~1.0 D	1.5D~2.5 D	2.5D~3.5D	4D~6D
		按埋深	0.9~1.8		10.5~17. 5	10.5~17. 5	17.5~24.5	28~42
双 线	隧规分界深度		0.88	3.46	6.8	18.3	36.3	72
	一般分界深度					33.8~40. 6	51~61.8	76~102.7
	建议 分界 深度	按洞径	0.15D~0. 3D	0.3D~0.5 D	0.5D~1.0 D	1.5D~2.5 D	2.5D~3.5D	4D~6D
		按埋深	1.8~3.0	3.0~5.7	5.9~11.7	16.1~26. 8	32~44.8	52~78



分界标准

根据隧道塌方高度进行界定

浅埋隧道覆盖厚度值(m)

围岩级别	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
单线隧道覆盖厚度	5~7	10~14	18~25
双线隧道覆盖厚度	8~20	15~20	30~35

根据工程设计实践经验，对于铁路**单线**和**双线**隧道，深埋与浅埋隧道分界以**2.5倍**塌方高度来确定。当地面水平或接近水平，且隧道覆盖厚度小于上表所列数值时，可按浅埋隧道设计，上表的高限（上限）数值在水文及工程地质条件较差时采用；反之，采用表上的底限（下限）数值。



判定方法

- ◆ 覆跨比判别法。覆跨比即覆盖土厚度 H 与隧道跨度 D (隧道断面直径)之比, $H/D \leq 0.4$ 为超浅埋隧道, $H/D > 0.4$ 为浅埋隧道。
- ◆ 盖层整体下沉时, 即洞内拱顶变位值 $\leq$ 地面沉降值时(即 $S_{\text{顶}} \leq S_{\text{表}}$)可视为超浅埋。
- ◆ 若隧道结构顶部进入地面以下 5m 范围的管道层中时, 统称超浅埋。
- ◆ 在具备试验条件的情况下, 用实测压力(P)与垂直土柱重量(rh)之比确定深埋、浅埋或超浅埋。当 $P/rh \leq 0.4$ 为深埋隧道, $0.4 < P/rh \leq 0.6$ 为浅埋隧道, $P/rh > 0.6$ 为超浅埋隧道。超浅埋隧道在初期支护作用下, 围岩塑性区一般可达到地面, 覆盖层易发生整体位移下沉。

隧道围岩压力计算

◆ 深埋隧道



普氏公式

太沙基公式

其它经验公式

◆ 浅埋隧道



松散荷载

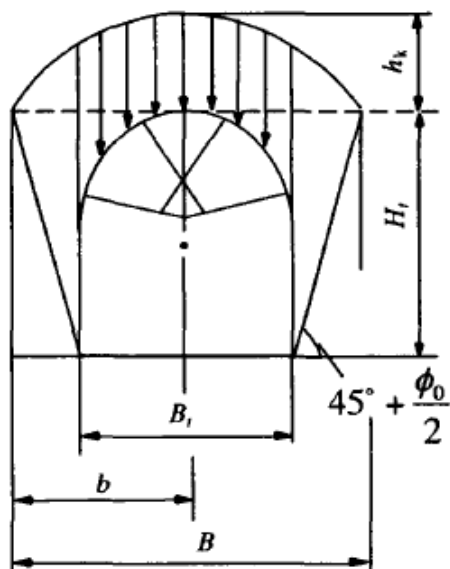
◆ 超浅埋隧道



全土柱加地面动、静换算荷载

隧道围岩压力计算

普氏公式



普氏理论计算图示

塌落拱的形状和尺寸（高度 h_k 和跨度 b_t ）与岩体的坚固性系数 f 有关，表达式为：

$$h_k = b_t / f \quad \varphi_0 = \arctan f$$

$$b_t = b + H_t \cdot \tan(45^\circ - \varphi_0 / 2)$$

h_k --塌落拱高度(m)

b_t --塌落拱的半跨度(m)，其中 b 为隧道净跨之半(m)， H_t 为隧道的净高(m)， φ_0 为岩体的计算摩擦角。

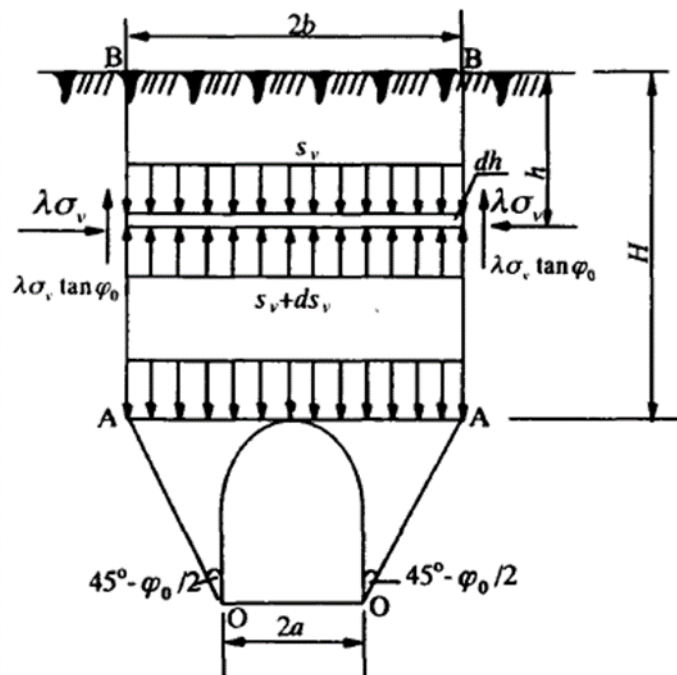
围岩垂直均布松动压力为：

$$q = \gamma h_k$$

- ◆ 普氏理论以开挖后隧道上方形成平衡拱为依据，因此在不能形成平衡拱的岩层（如流沙、淤泥）或上覆岩层很薄不能形成平衡拱时，不宜采用；
- ◆ 普氏公式仅适用于深埋隧道的情形。

隧道围岩压力计算

太沙基公式



太沙基计算图示

岩体视为散粒体，认为隧道开挖后，其上方的岩体因隧道的变形而下沉，并假定隧道量测土体发生主动破坏，斜向上发展到拱顶高度，并垂直发展到地面，隧道上岩层中任意点的松弛垂直土压力计算公式为：

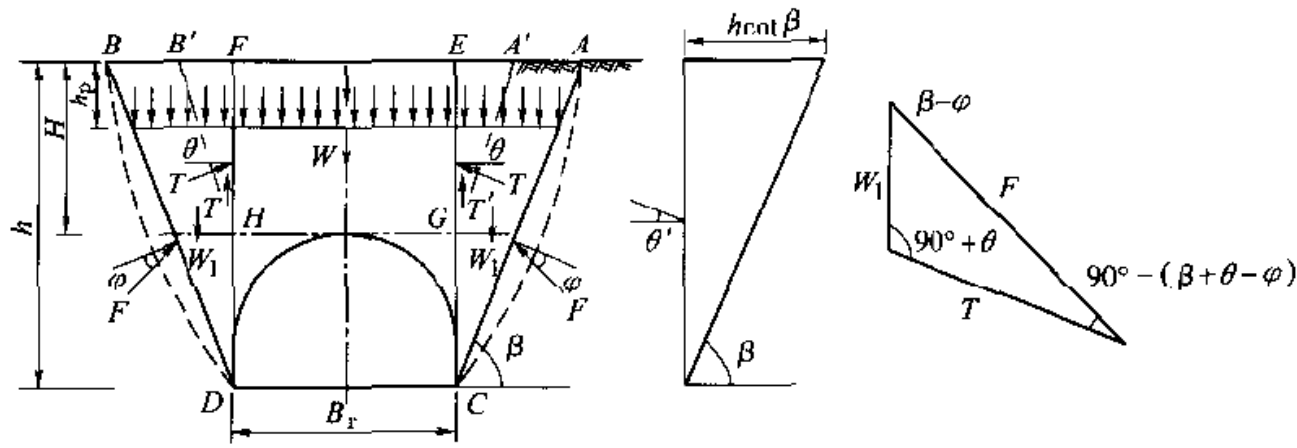
$$\sigma_v = \frac{\gamma b}{\tan \varphi \lambda} (1 - e^{-\lambda \tan \varphi \frac{h}{b}})$$

$h \uparrow$, $e^{-\lambda \tan \varphi \frac{h}{b}} \rightarrow 0$, 则 σ_v 趋于某一固定值, 且 $\sigma_v = \frac{\gamma b}{\tan \varphi \lambda}$

太沙基根据实验结果，得出 $\lambda = 1 \sim 1.5$ 。

隧道围岩压力计算

谢家桢理论



谢家桢理论计算简图

- λ --侧压力系数
- φ --土体计算摩擦角
- β --破裂面与水平面的夹角
- θ --顶板土柱两侧摩擦角

由整个土体ABCD的平衡条件可推导出隧道上任意点的垂直土压力计算公式为：

$$\sigma_v = \gamma h \left(1 - \frac{\lambda h \tan \theta}{b} \right)$$

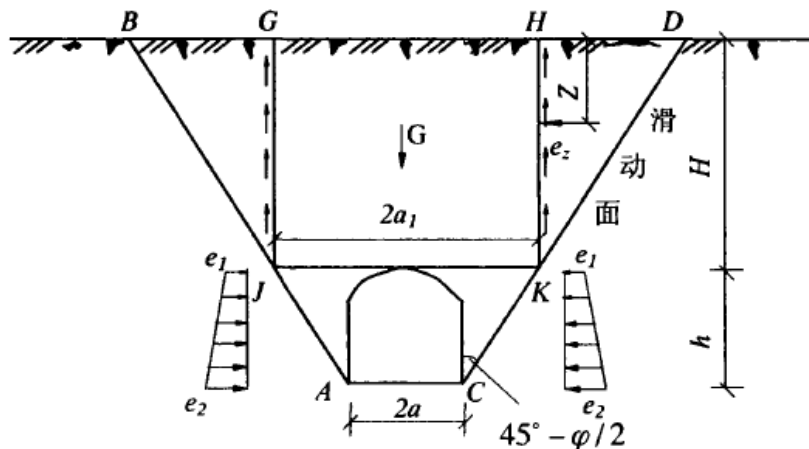
$$\lambda = \frac{\tan \beta - \tan \varphi}{\tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \varphi - \tan \theta) + \tan \varphi \tan \theta]}$$

$$\tan \beta = \tan \varphi + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi + 1) \tan \varphi}{\tan \varphi - \tan \theta}}$$

围岩级别	I、II、III	IV	V	VI
值	0.9	0.7~0.9	0.5~0.7	0.3~0.5

隧道围岩压力计算

比尔鲍曼公式



比尔鲍曼计算图示

隧道上方不同深度土体内的竖向土压力计算公式为：

$$\sigma_v = \gamma h \left[1 - \frac{h}{2a_1} K_1 - \frac{c}{\gamma a_1} (1 - aK_2) \right]$$

其中：

$$K_1 = \tan \varphi \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad K_2 = \tan \varphi \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$$

h--隧道上覆土厚度

c--围岩内聚力

$$a_1 = a + h \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$$

h--隧道高度，a--隧道宽度之半

隧道围岩压力计算

◆ 隧道设计规范公式

深埋隧道

$$q = \gamma h$$

$$h = 0.45 \times 2^{s-1} \omega$$

$$\omega = 1 + i(B - 5)$$

其中:

q--垂直均布压力(kN/m²);

S--围岩级别, 如III级围岩S=3;

γ--围岩重度(kN/m³);

w--宽度影响系数;

B--隧道宽度(m);

i--围岩压力增减系数;

当B<5m时, 取i=0.2; B>5m时, 取i=0.1

浅埋隧道

竖直地层荷载采用谢家侏理论的
计算公式。

浅埋隧道

$$q = \gamma \cdot H$$

其中:

q--垂直均布压力(kN/m²);

γ--隧道上覆围岩重度(kN/m³);

H--隧道埋深, 指隧道顶至地面的距离(m)。

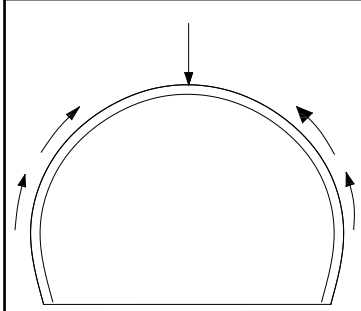
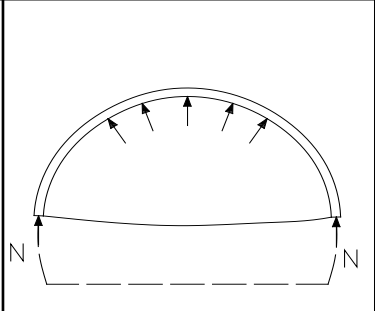
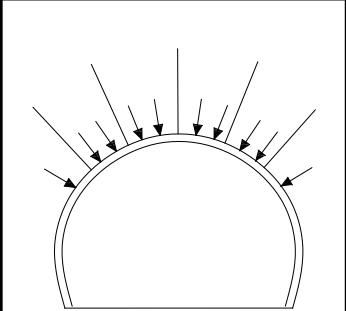
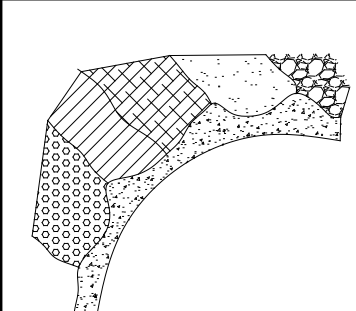
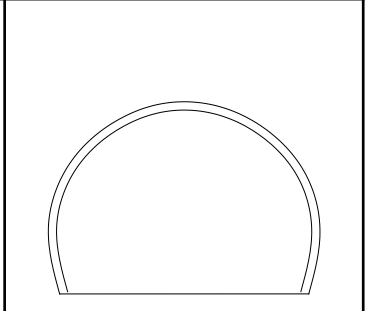


四、初期支护设计与 变形控制



初期支护类型及适用条件

喷射混凝土

与围岩的附着力、抗剪的支护效果 由于喷混凝土与围岩的附着力，可分散作用在喷混凝土上的外力，同时加强隧道周边裂隙的抗剪能力，并可在壁面形成承载拱，在裂隙发育的硬岩等作用效果大。	内压、闭合效果 喷混凝土作为一个连续的构件支持围岩，可约束围岩的变形，给围岩以支护力，使围岩保持三轴的应力状态。此外早期采用仰拱使断面临时闭合也发挥了支护效果。此效果在软岩和砂土围岩中大。	外力分配效果 走完传递土压到钢支撑、锚杆等上的构件而发挥作用。	软弱层补强效果 填平凹凸不平处、跨越软弱层，防止应力集中，补强软弱层等的效果。	被覆效果 开挖后，因及早被覆壁面，可防止围岩风化、止水、微粒子流失等的效果。
				



初期支护类型及适用条件

喷射钢纤维混凝土

钢纤维喷射混凝土是一种采用喷射法施工的典型的复合材料，同时含有抗拉强度不高的混凝土和抗裂性大、弹性模量高的钢纤维材料。通过掺入适量的钢纤维，可以明显提高混凝土的抗拉强度、阻止混凝土中原有缺陷（微裂缝）的扩展并延缓新裂缝的出现、提高混凝土的变形能力以及改善混凝土的韧性和抗冲击性能。

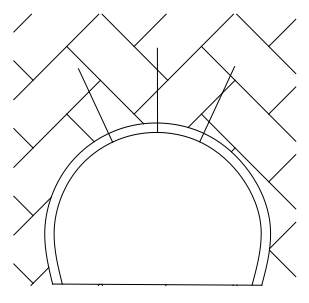
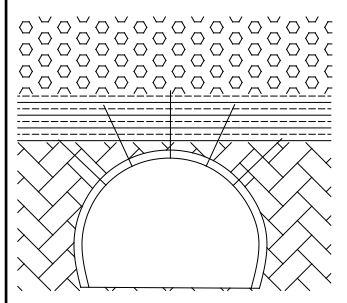
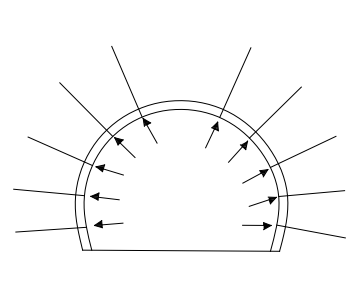
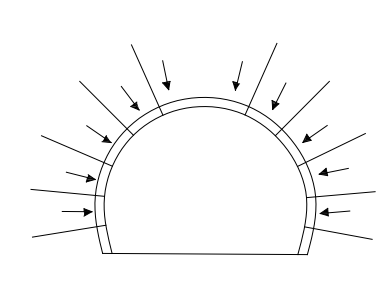
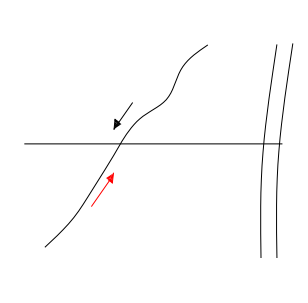
水泥裹砂喷射混凝土

水泥裹砂喷射混凝土是将水泥与部分砂子拌合造壳，然后将其与砂石干混合料分别压送至喷嘴附近的混合管合流喷出，其粉尘量相当于或低于湿喷工艺，而回弹量则可降低到10~20%以下，混凝土的强度也较高。在具体应用中有可分为在干骨料中掺入速凝剂的早强型和掺入水泥的高强型。另外，还有掺入钢纤维的纤维水泥裹砂喷射混凝土，纤维长度可达30mm，且其喷射距离与干喷相同。由于该新工艺具有许多原喷射工艺所不具备的优点，因而其应用领域在不断扩大。



初期支护类型及适用条件

锚杆

悬吊效果	梁效果	内压效果	拱效果	围岩改良效果
把因爆破而松动的岩体固定在没有松动的围岩上，防止掉落。在裂隙发育的围岩中雨喷混凝土并用，效果更佳。	锚杆的叠合效应可使隧道周边分离的层状围岩产地剪力形成组合梁的效果。	锚杆轴力通过喷混凝土作用在隧道壁面上发挥了内压效果，使隧道附近保持三轴应力状态。这抑制了隧道周边围岩的塑性化和扩大，同时也发挥了抑制隧道净空位移的效果。	由于系统锚杆的内压效果，对一体化的围岩，形成了承载拱，提高了隧道周边围岩的承载能力，也发挥了抑制隧道净空位移的效果。	围岩内插入锚杆后增大了围岩自身的抗剪强度，围岩屈服后的残余强度也增大了。因此，锚杆能够改善围岩的特性。
				



初期支护类型及适用条件

型钢拱架和格栅钢架

支撑形式	优点	缺点
钢支撑	- 架设后能够立即承载，充分发挥其力学作用 - 加工比较容易，但需要较大的加工设备 - 安装及构件连接比较简洁、方便	- 背后的混凝土不易填充密实，留有空隙 - 重量大，架设安装困难 - 钢支撑的变形与混凝土变形不协调，混凝土易开裂
格栅拱架	- 架设后不能立即承载，必须与喷混凝土配合，才能发挥其力学作用 - 加工容易，且不需要大型加工设备 - 重量小，易于架设安装 - 具有一定的柔性，能够适应围岩的变形	- 喷混凝土完全包裹格栅，整体性好，背后不易留有空隙 - 架设后不能立即承载，一次支护作用小 - 在围岩变形大的场合，不能有效地控制围岩变形

在隧道的初期支护体系中，型钢拱架和格栅钢架的支护机理是在喷射混凝土还不能提供足够强度时，由钢拱架或格栅承受围岩荷载，减缓围岩变位速度，随着喷射混凝土层的凝结硬化和强度的逐渐增长，围岩荷载转向喷射混凝土、钢拱架或格栅联合支护体系共同承担。



初期支护设计

初期支护的厚度

初期支护的厚度一般不低于250mm，常用的厚度为250mm、300mm、350mm。

初期支护的厚度统计表

工程名称	北京地铁浅埋暗挖区间	广州、深圳地铁浅埋暗挖区间	杭州机场路人行过街通道	厦门杏林暗挖隧道工程	西单站
初支厚度 (mm)	250	300	300	350	300
二衬厚度 (mm)	300	300	400	1000	500

强度等级

一般采用C20混凝土，跨度较大或受力较大的结构也可以采用C25、C30混凝土。

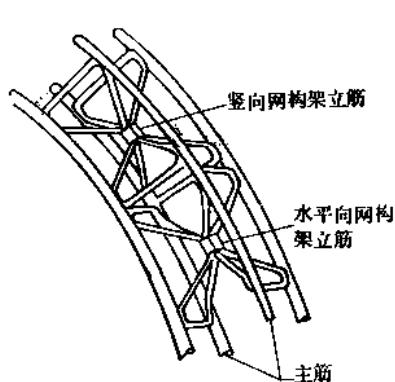


初期支护设计

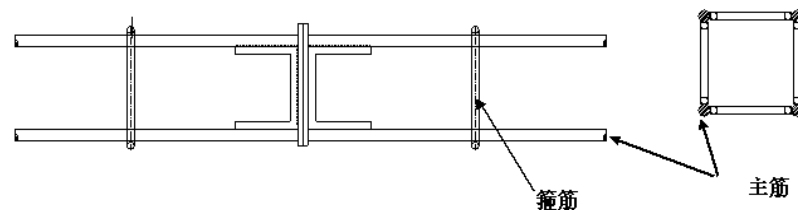
刚拱架

钢拱架设计参数主要包括：

- 钢拱架的间距一般为0.5~1.2m；
- 钢格栅主筋外净保护层厚度不小于40mm；
- 钢拱架从受力角度考虑应尽量减少接头。



麻花状格栅



由4根或6根主筋加箍筋
和架立钢筋组成的格栅

初期支护设计

钢筋网

钢筋网可提高喷施混凝土的抗剪和粘结强度，能提高喷层的整体性，使其应力分布均匀，从而减少混凝土收缩和喷层裂缝。

- 钢筋直径一般为4~10mm，常用的为6~8mm；
- 钢筋间距宜为100~300mm；
- 钢筋网保护层厚度应不小于20mm。

锚杆

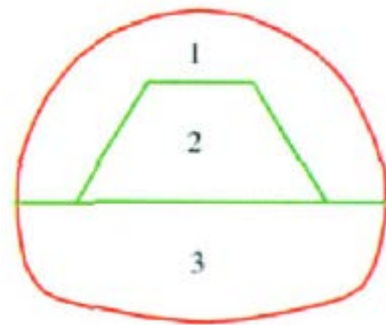
在山岭隧道中，锚杆和喷射混凝土围岩共同组成支护体系，对提高围岩稳定性具有不可或缺的作用。

- 锚杆上下排间距不宜小于2.5m；锚杆水平方向间距不宜小于2.0m；
 - 锚杆锚固体上覆土层厚度不应小于4.0m，锚杆锚固段长度不应小于4.0m；
 - 倾斜锚杆的倾角不应小于 130° ，并不得大于 450° ，以 $150^\circ \sim 350^\circ$ 为宜。
- 然而，在土质浅埋隧道中锚杆的作用却不明显，特别是在城市土质浅埋地下工程中一般不设锚杆，在需要加固地层的地方设注浆锚管。

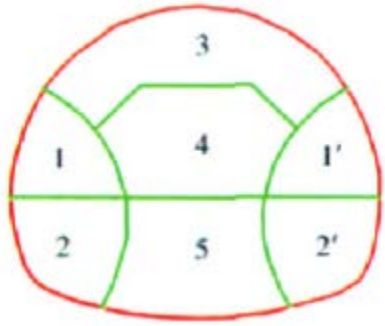


变形控制技术

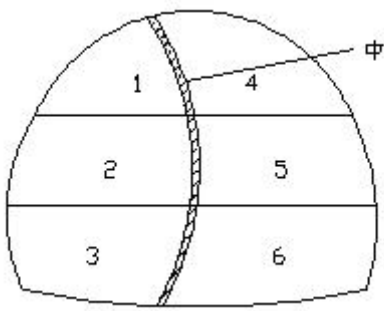
选择合适的施工方法



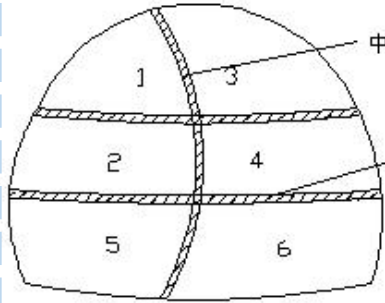
环形开挖预留核心土



眼镜法



CD法



CRD法

施工方法	环形开挖预留核心土法	双侧壁导洞法	CD法	CRD法
施工风险	较大	较小	小	最小
施工难度	大	一般	小	小
技术难度	低	较高	较高	高
沉降量	大	较小	较小	小
施工进度	快	慢	一般	慢
适用范围	隧道跨度小；地质较好；对沉降控制无要求	隧道跨度大；超浅埋	隧道跨度大；对沉降控制要求较严格	隧道跨度大；对沉降控制要求很严格



变形控制技术

控制隧道开挖引起的变形可从以下方面着手：

◆ 加强初期支护

根据穿越的地层条件、周围环境变形控制要求等条件选择合理的初期支护方式及参数。

◆ 控制施工进尺及台阶长度

◆ 加强现场量测

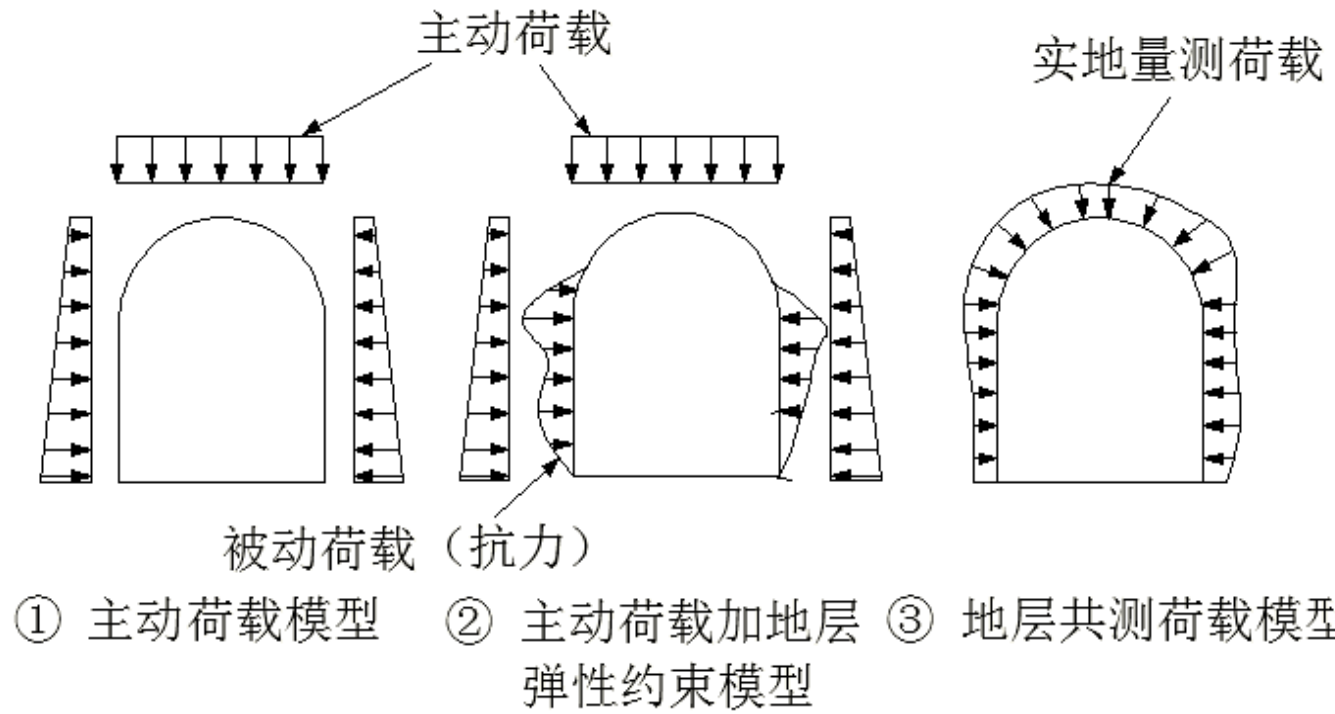
为正确选择施作衬砌时间和掌握围岩变形状况提供依据。



五、二次衬砌结构设计

二次衬砌结构设计

计算模型-荷载结构模式



荷载-结构模式

二次衬砌结构设计

◆ 计算模型-连续介质模型

计算方法主要有数值解法和解析解法两种。数值解法是把围岩视作弹塑性体或黏弹塑性体，并与支护一起采用有限元或边界元方法进行求解，可以直接算出围岩与支护的应力和变形状态；解析解法往往具有多种功能，能考虑岩体中的节理裂隙、层面、地下水渗流、岩体膨胀性等影响，是目前理论计算法中的主要方法。

荷载计算方法

荷载种类

荷载类型	荷载名称		荷载计算及取值
永久荷载	结构自重		按实际考虑
	地层压力	竖向压力	按计算截面以上全部土柱重量计算
		水平压力	主、被土压力按朗金土压力公式计算，水土压力采用水土分算
	水压力及浮力		按最不利地下水位计算静水压力及全部浮力
	混凝土收缩及徐变影响力		混凝土收缩的影响按降低温度的方法计算。 混凝土徐变的影响按提高温度的方法计算
	侧向地层抗力及地基反力		侧向地层抗力及地基反力按结构型式及其在荷载作用下的变形、结构与地层刚度、施工方法等情况及土层性质，根据所采用的结构计算简图和计算方法加以确定
可变荷载	基本可变荷载	地面车辆荷载	地面车辆荷载按20KN/m ² 的均布荷载并不计冲击力的影响
		地面车辆引起的侧向力	按20KN/m ² 的均布荷载作用于地层上考虑
		地铁车辆荷载及其冲击力	地铁列车荷载按所采用的车辆轴重、排列和制动力计算，并按通过的重型设备车辆考虑
		人群荷载	按4KN/m ² 的均布荷载作用于站厅、站台板上考虑
	施工荷载		施工机具、地面堆载、材料堆载按20KN/m ² 考虑
偶然荷载	人防荷载		按当地人防等效静载
	地震作用		按当地设防烈度考虑



荷载计算方法

荷载组合

- 对于承载力极限状态，应依据作用效应的基本组合和偶然组合进行设计，具体组合可表示为：
基本组合：永久荷载+基本可变荷载；
偶然组合：永久荷载+部分可变荷载+地震荷载（或人防荷载）；
- 对于正常使用极限状态采用荷载的基本组合。

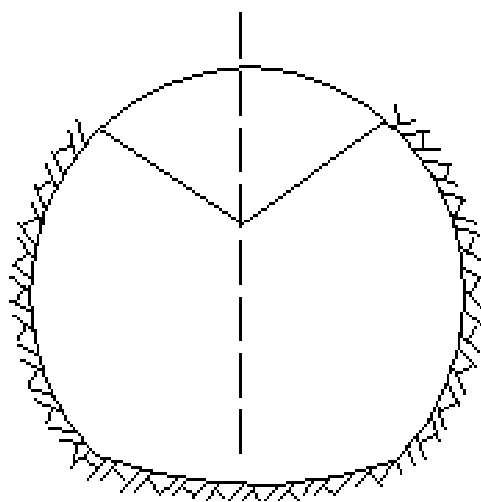
荷载组合与分项系数

组合 \ 荷载种类	永久荷载	可变荷载	人防荷载	地震荷载
基本组合1：永久荷载+基本可变荷载	1.35	1.4		
标准组合2：永久荷载+基本可变荷载	1.0	1.0		
偶然组合3：永久荷载+地震荷载	1.2	1.0		1.3
偶然组合4：永久荷载+人防荷载	1.2	1.0	1.0	

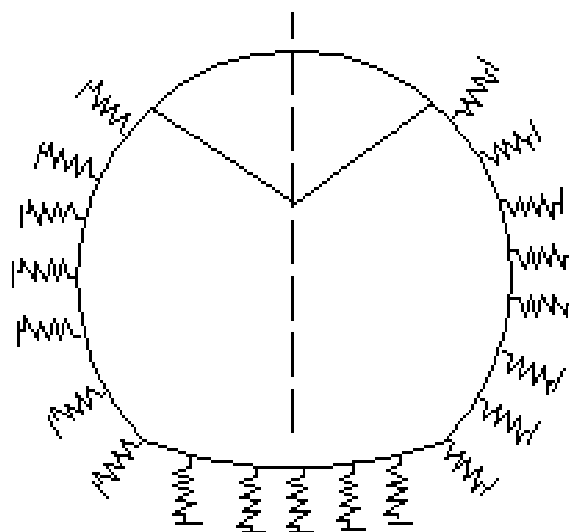


结构计算

◆ 简化计算图示



弹性地基梁计算图示



弹性链杆法计算图示

结构计算

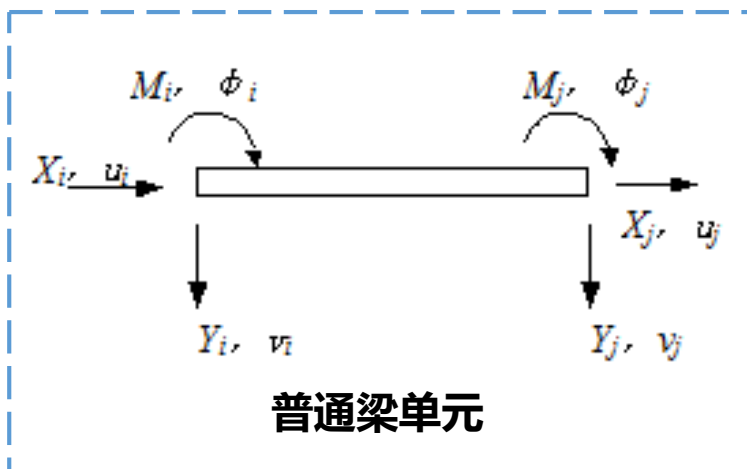
分析步骤1

整体坐标系下的普通等直梁单元的刚度矩阵：

$$\beta = \frac{12EI}{GA_s L^2}; \quad \alpha = \frac{AL^2(1+\beta)}{12I}; \quad l = \cos \varphi; \quad m = \sin \varphi$$

L--单元长 A_s --单元有效剪切面积，对于矩形截面， $A_s=A/1.2$

E--弹性模量 I--单元的转动惯量

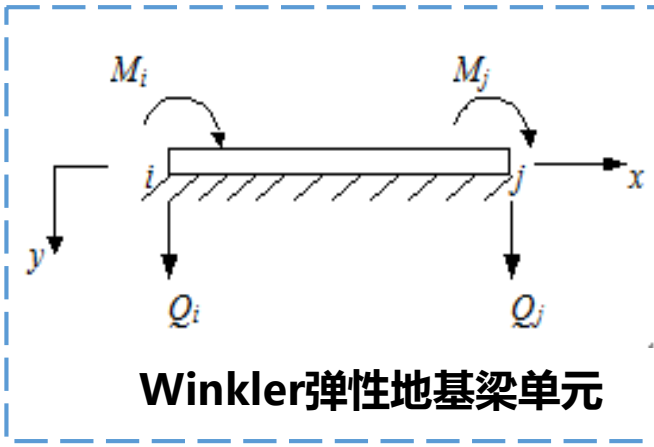


$$[K]^e = \frac{EI}{L(1+\beta)} \begin{bmatrix} \frac{12}{L^2}(m^2 + \alpha l^2) & -\frac{12}{L^2}(1-\alpha)lm & \frac{6m}{L} & -\frac{12}{L^2}(m^2 + \alpha l^2) & \frac{12}{L^2}(1-\alpha)lm & \frac{6m}{L} \\ \frac{12}{L^2}(\alpha m^2 + l^2) & -\frac{6l}{L} & \frac{12}{L^2}(1-\alpha)lm & -\frac{12}{L^2}(\alpha m^2 + l^2) & \frac{6l}{L} & -\frac{6l}{L} \\ 4+\beta & -\frac{6m}{L} & \frac{6l}{L} & 2-\beta & \frac{12}{L^2}(m^2 + \alpha l^2) & -\frac{12}{L^2}(1-\alpha)lm \\ -\frac{6m}{L} & \frac{6l}{L} & \frac{12}{L^2}(1-\alpha)lm & -\frac{6l}{L} & \frac{12}{L^2}(\alpha m^2 + l^2) & \frac{6l}{L} \\ \frac{12}{L^2}(m^2 + \alpha l^2) & -\frac{12}{L^2}(1-\alpha)lm & \frac{6m}{L} & -\frac{12}{L^2}(m^2 + \alpha l^2) & \frac{12}{L^2}(1-\alpha)lm & \frac{6m}{L} \\ \frac{12}{L^2}(\alpha m^2 + l^2) & -\frac{6l}{L} & \frac{6l}{L} & -\frac{12}{L^2}(\alpha m^2 + l^2) & \frac{6l}{L} & -\frac{6l}{L} \end{bmatrix}$$

结构计算

分析步骤1

整体坐标系下的Winkler弹性地基梁单元刚度矩阵



$$[K]^e = \frac{EI}{L(1+\beta)}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{12}{L^2}(m^2 + \alpha l^2) & -\frac{12}{L^2}(1-\alpha)lm & \frac{6m}{L} & -\frac{12}{L^2}(m^2 + \alpha l^2) & \frac{12}{L^2}(1-\alpha)lm & \frac{6m}{L} \\ \frac{12}{L^2}(\alpha m^2 + l^2) & -\frac{6l}{L} & \frac{12}{L^2}(1-\alpha)lm & -\frac{12}{L^2}(\alpha m^2 + l^2) & -\frac{6l}{L} & \frac{12}{L^2}(1-\alpha)lm \\ 4+\beta & -\frac{6m}{L} & \frac{6l}{L} & 2-\beta & -\frac{12}{L^2}(m^2 + \alpha l^2) & \frac{12}{L^2}(\alpha m^2 + l^2) \\ \frac{12}{L^2}(m^2 + \alpha l^2) & -\frac{12}{L^2}(1-\alpha)lm & -\frac{6m}{L} & \frac{12}{L^2}(\alpha m^2 + l^2) & \frac{6l}{L} & 4+\beta \end{bmatrix}$$

结构计算

分析步骤2

在梁单元的每一个节点处设置一个法向的弹性支承杆件，其刚度为：

$$K = K_n B l_i$$

K_n --地层法向弹性抗力系数

B --梁计算宽度，常取1m或标准段

l_i --单元长度

在单元长度较小的情况下，采用这一假定其精度能满足要求。

结构计算

分析步骤3

将临时支撑划分为杆单元。对于小间距隧道中间土层亦简化为杆单元。
其整体坐标系下单元的刚度矩阵为：

$$[K]^e = [T]^T [k]^e [T]$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \lambda & & & & \\ & \lambda & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \end{bmatrix} \quad [\lambda] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [k]^e = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ 0 & 1 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

θ --杆单元轴向与整体坐标系x轴的夹角，反时针为正；

A--支撑截面积；

E--支撑或弹性模量；

l--杆单元长度。

结构计算

◆ 分析步骤4

将分布荷载按静力等效原则离散为等效节点力；

◆ 分析步骤5

按直接刚度法原理组集结构体系的总刚度矩阵和荷载列阵，形成结构体系的平衡方程： $[K]\{\delta\} = \{P\}$

◆ 分析步骤6

引入必要的位移约束条件。

◆ 分析步骤7

求解平衡方程得到结构体系的节点位移 $\{\delta\} = [K]^{-1}\{P\}$

◆ 分析步骤8

根据各单元的节点位移计算各单元的内力 $\{S\}^e = [K]^e [T]\{\delta\}^e = [B]\{\delta\}^e$



思考题





1. 为什么要区分深、浅埋？
2. 如何理解浅埋条件下预支护的作用？
3. 暗挖结构横断面形式选择的依据是什么？



QUESTION AND DISCUSSION



「 谢 谢 ! 」

