

3.5.1.5 悬臂拼装施工 ★★★

1) 概述

悬臂拼装施工包括块件的预制、运输、拼装及合龙。它与悬浇施工具有相同的优点，不同之处在于悬拼以吊机将预制好的梁段逐段拼装。

悬臂拼装优缺点：

项目	内容
优点	<ul style="list-style-type: none"> (1) 梁体预制可与桥梁下部构造施工同时进行，平行作业缩短了建桥周期。 (2) 预制梁混凝土龄期比悬浇法的长，从而减少了悬拼成梁后混凝土的收缩和徐变。 (3) 预制场或工厂化的梁段预制生产利于整体施工的质量控制。
缺点	<ul style="list-style-type: none"> (1) 悬臂拼装采用梁段间的接缝、预应力束的穿束连接张拉，使结构整体性相对差一些。 (2) 因梁段已完成预制，能调整的余地相对较小，再加上施工中有许多不确定因素，造成施工变形控制难度较大。 (3) 悬臂拼装需要起吊大块预制梁段，对预制场地、设备等配置要求高，致使造价偏高。

2) 悬拼梁段预制

梁段预制方法分为长线法及短线法。

(1) 长线法：组成梁体的所有梁段均在固定台座上的活动模板内浇筑且相邻段的拼合面应相互贴合浇筑，缝面浇筑前涂抹隔离剂，以利脱模。

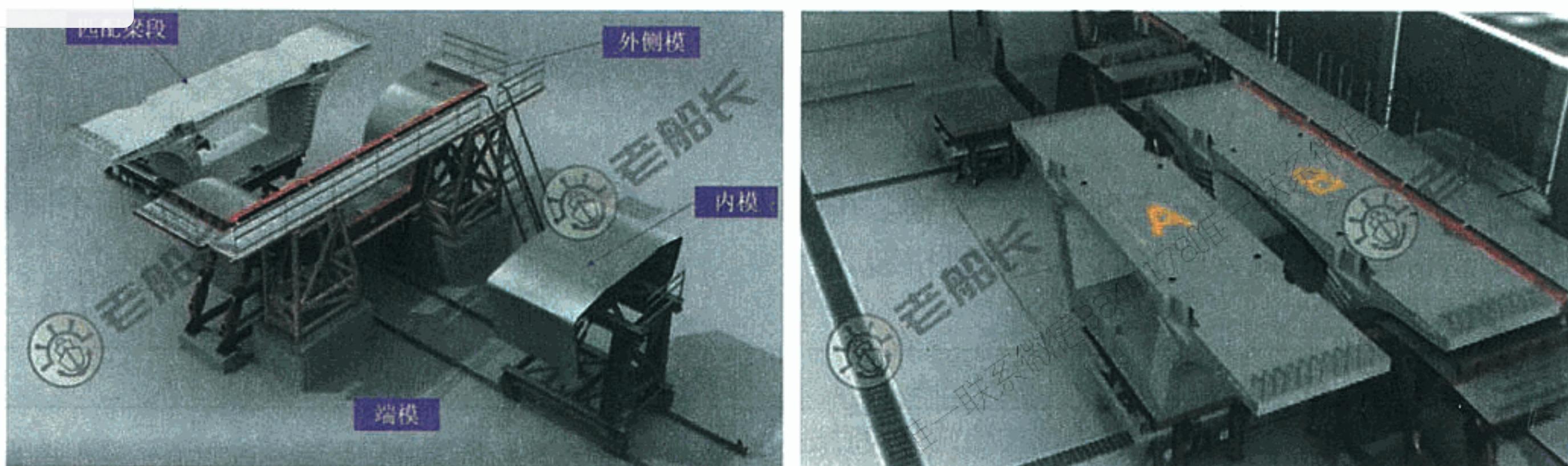
优点是由于台座固定可靠，成桥后梁体线性较好；缺点是占地较大，地基要求坚实，混凝土的浇筑和养护移动分散。

长线法梁段预制工序：预制台座建造→台座立面、平面线形调整→外模安装→刷隔离剂，堵缝→安装底腹板普通钢筋及预应力管道→内模安装→安装普通钢筋及预应力管道→混凝土浇筑及养护→拆除模板→台座立面、平面线形调整→预制下一节段。

(2) 短线法：梁段在固定台座能纵移的模内浇筑。待浇梁段一端设固定模架，另一端为已浇梁段（配筑梁段），浇筑完毕达到强度后运出原配筑梁段，达到强度要求梁段为下一待浇梁段配筑。如此周而复始，台座仅需3个梁段长。

优点是场地较小，浇筑模板及设备基本不需要移机，可调的底、侧模便于平竖曲线梁段的预制；缺点是精度要求高，施工要求严，施工周期相对较长。

短线法梁段预制工序：台车及模板系统加工→端模、底模及外侧模安装→匹配梁段定位→钢筋骨架吊装→内模就位→固定端模复测→混凝土浇筑及养护→拆除模板→匹配梁段转运存放→新浇筑梁段移至匹配梁位置→匹配梁段定位→下一块段施工。



3) 梁段的拼接

(1) 0号块：为了确保连续梁分段悬拼施工的平衡和稳定，常与悬浇方法相同，将构件支固临时固结，必要时在墩两侧加设临时支架，以满足悬拼的施工需要。

(2) 1号块：1号块是紧邻0号块两侧的第一箱梁节段，也是悬拼构件的基准梁段，是全路安装质量的关键，一般采用湿接缝连接。湿接缝拼装梁段施工程序包括：吊机就位→提升、起升1号梁段→安装波纹管→中线测量→丈量湿接缝的宽度→调整波纹管→高程测量→检查中线→固定1号梁段→安装湿接缝的模板→浇筑湿接缝混凝土→湿接缝养护、拆模→张拉预应力筋→压浆→下一梁段拼装。

(3) 其他梁段拼装

① 移动式导梁架桥机施工

悬臂节段拼装工艺流程：架桥机安装及调试→运梁就位→架桥机落钩起吊箱梁至桥面→**节段胶结层涂抹**→临时预应力张拉→胶结层养护至固化→悬拼预应力钢束张拉→架桥机解钩，前移至下一个节段施工。

整跨拼装工艺流程：架桥机安装及调试→运梁就位→梁段吊装及调整→**节段胶结层涂抹**→临时预应力张拉→胶结层养护至固化→整孔预应力张拉→整孔落梁就位→架桥机纵移过孔，吊钩前移至下一个节段施工。

② 悬拼吊机法节段拼装工艺流程：吊机安装及调试→梁端就位→起吊梁段、试拼→节段胶结层涂抹→临时预应力张拉→胶结层养护至固化→悬拼预应力钢束张拉→吊机解钩，前移至下一个节段施工。

③ 浮吊悬拼工艺流程：浮吊船移动就位→梁预制节段驳船运输到位→移动浮吊挂钩，固定缆风绳，起吊→浮吊调整梁段起吊高度，停钩靠近待吊墩位→稳住浮吊，起钩→就位停钩，稳住浮吊，梁段调正→调整梁段，浮吊落钩→摘钩，移船。

4) 悬臂拼装应注意的要点

- (1) 梁段的存放场地应平整，承载力应满足要求，支垫位置应与吊点一致。
- (2) 节段预制前，应在预制场地建立精密测量的**平面控制网**和**高程控制网**，设置**测量控制点**、**测量塔及靶标**。
- (3) 节段应在混凝土强度达到设计强度的**75%**后方可脱模并拆除。
- (4) 模板拆除后应及时对节段进行检查验收，测量其外形尺寸，并标出梁高及纵横轴线。
- (5) 节段的起吊、搬运、存放应符合下列规定：

①台座上叠放节段层数宜不超过两层。

②节段存放时间宜不少于 90d。

(6) 悬臂拼装施工应符合下列规定：

①施工前应按施工荷载对起吊设备进行强度、刚度和稳定性验算，其安全系数应 ≥ 2 。节段安装前，应对起吊设备进行全面安全技术验收，并应分别进行 1.25 倍设计荷载的静载和 1.1 倍设计荷载的动载试验。

(7) 接缝处理应符合下列规定：

①采用胶接缝的节段，涂胶前应进行试拼。胶粘剂进场后应进行力学性能及作业性能的抽检，其各项性能应满足结构设计与节段拼装的要求。节段的匹配面应平整，尘土、油脂等污染物及松散混凝土和浮浆应清除干净，涂胶前的匹配面应进行干燥处理。

②胶粘剂宜采用机械拌和，使用过程中应连续搅拌并保持其均匀性。胶粘剂应涂抹均匀，覆盖整个匹配面，涂抹厚度宜不超过 3mm。胶接缝施加临时预应力时，挤压压力宜为 0.2MPa，胶粘剂应在梁体的全断面被挤出，且胶接缝的挤压应在 3h 以内完成；施工时间超过明露时间的 70% 时，在固化前应清除被挤出的胶结料。**【2014 案 II】**

(8) 节段拼装的预应力施工应符合下列规定：

①采用胶接缝的节段，拼装工作结束并经检查符合要求后，应立即施加预应力对接缝进行挤压；采用湿接缝的节段，应在接缝混凝土强度达到设计强度的 80% 以上时方可对其施加预应力。

②临时预应力钢束在结构永久预应力施工完成后方可拆除。

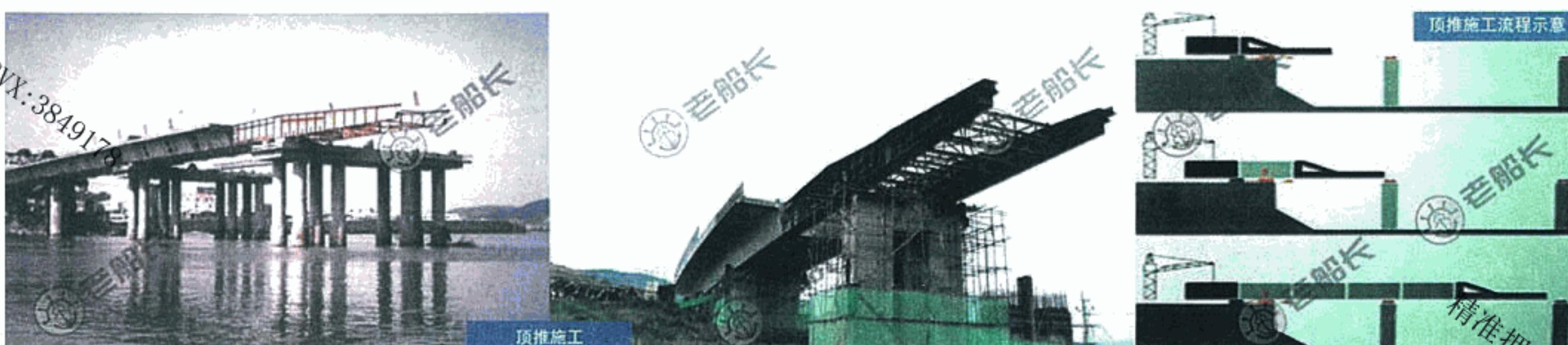
③节段拼装完成并施加预应力后方可放松起吊吊钩，再立即对预应力孔道进行压浆和封锚。

5) 悬臂拼装合龙段施工

悬臂拼装合龙段施工工艺流程：合龙段起吊就位→合龙段临时锁定→湿接缝预应力管道连接→穿合龙预应力束→安装湿接缝模板→现浇湿接缝，养护，脱模→张拉预应力束→解除临时锁定。

3.5.1.6 顶推施工 ★★

1) 概述



顶推法多应用于预应力钢筋混凝土等截面连续梁桥和斜拉桥梁的施工。顶推施工是在桥台的后方的引道或引桥上设置预制施工场地，分节段浇筑梁体，用纵向预应力筋将浇筑节段与已完成的梁体连成整体，在梁体前端安装钢导梁，用千斤顶纵向顶推，使梁体通过各墩顶的临时滑动支座面就位，这样分段预制，逐段顶推，待全部顶推就位后，落梁、结构体系转换、更换正式支座，完成桥梁施工。（教材表述有问题，应该先更换支座再落梁）

顶推施工的方法可分为单点顶推和多点顶推。

顶推施工主要临时设施及机具设备有：起重机、顶推平台（预制台座）、混凝土拌合楼、混凝土输送泵、导梁（鼻梁）、横向导向（纠偏装置）、辅助墩（临时墩）、顶推设备（顶推千斤顶）、滑动装置等。

（1）顶推法施工特点

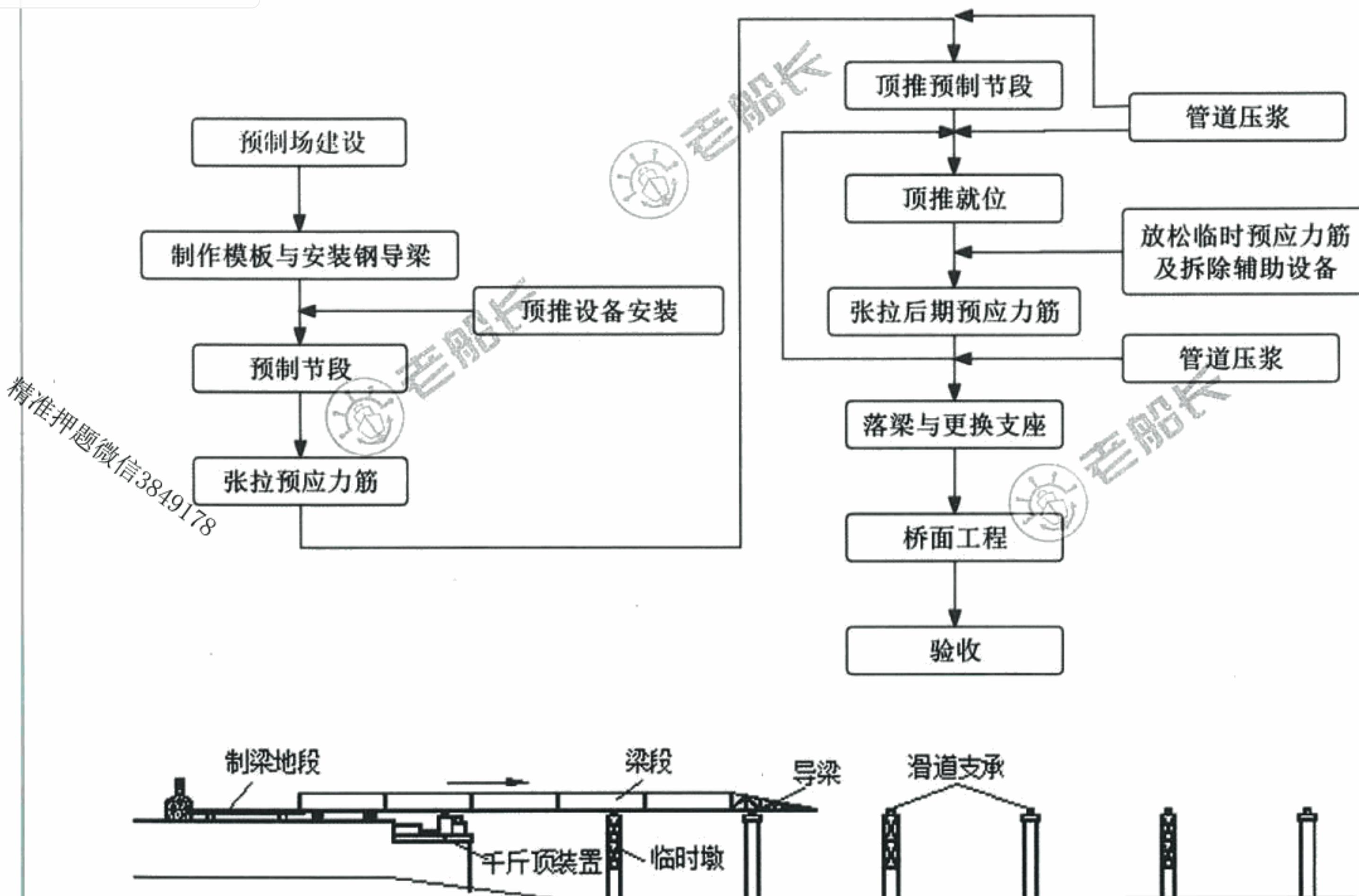
- ①节省施工用地，工厂化制作，结构整体性好，能保证构件质量。
- ②无需大型起吊设备、大量的施工脚手架，可不中断交通或通航。可在深谷和宽深河道上的桥梁、高架桥以及等曲率曲线桥、带有曲线的桥、坡桥上采用。
- ③连续梁的顶推跨径 30~50m 最为经济有利，如果跨径大于此值，则需要临时墩等辅助手段。逐段顶推施工宜在等截面的预应力混凝土连续梁桥中使用，也可在组合梁、斜拉桥、拱桥的主梁上使用。**【2018 案 I】**
- ④不适应多跨变高梁，曲率变化的曲线桥和竖向曲率大的桥梁，受顶推悬臂弯矩的限制，顶推跨径大于 70~80m 不经济。

（2）顶推施工分类

分类依据	类型
①按顶推动力装置的多少	单点顶推、多点顶推
②按动力装置的类别	步距式顶推、连续顶推
③按施加水平力的方法	水平+竖向千斤顶法、拉杆千斤顶法
④按支承系统	临时滑道支承装置顶推施工、永久支承装置顶推施工
⑤按顶推方向	单向顶推、双向（相对）顶推
⑥按箱梁节段的成形方式	分段顶推（预制组装、分段顶推）、阶段顶推（逐段制梁、逐段顶推）

（3）顶推法施工工序

顶推法施工工序：~~预制场建设→制作模板与安装钢导梁→顶推设备安装→预制节段→张拉预应力筋→顶推预制节段→管道压浆~~（循环第 4~7 工序）→顶推就位→放松临时预应力筋及拆除辅助设备→张拉后期预应力筋→管道压浆→落梁与更换支座→桥面工程→验收。**【2018 案 I】**



2) 顶推施工要点

(1) 预制场地

①宜在预制场地上搭设固定或活动的作业棚，使梁段的施工作业不受天气影响，便于混凝土养护。预制场地长度应考虑梁段悬出时反压段的长度、梁段底板与腹（顶）板预制长度、导梁拼装长度、机具设备材料进入预制作业线的长度；宽度应考虑梁段两侧施工作业的需要。

②台座的轴线应与桥梁轴线的延长线重合，台座的纵坡应与桥梁的纵坡一致。

(2) 导梁和临时墩施工

①导梁的长度宜为顶推跨径的 0.6~0.8 倍，刚度宜为主梁的 1/15~1/9。

②钢梁顶推施工时，导梁与钢梁之间宜采用焊接连接或螺栓连接。

③对于跨径 >50m 的梁桥宜设置临时墩。

④临时墩一般只设置滑道而不设顶推装置，若必须加设顶推装置，应通过计算确定。

⑤各联主梁顶推作业完成并落梁到正式支座上以后，应将临时墩拆除。

(3) 梁段顶推

①水平-竖向千斤顶顶推方式的滑动装置，一般应由摩擦垫、滑块（支承块）、滑板、滑道组成。**【2018 案 I】**

②采用单点或多点水平千斤顶方式顶推时，实际总顶推力应≥计算顶推力的 2 倍。

③宜在墩台上设置导向装置，防止梁体在顶推过程中产生偏移。

④顶推时至少应在两个墩上设置保险千斤顶。如遇顶推故障需采用竖向千斤顶将梁顶高时，最大顶升高度不得超过设计规定或不得大于 10mm，起顶的反力值不得大于计算反力的 1.1 倍。

(4) 落梁

①永久支座应在落梁前安装。**【2018 案 I】**

3.5.1.7 钢箱梁安装 ★★

1) 钢桥施工概述

按照力学体系分类，钢桥有梁、拱、索三大基本体系和组合体系桥；按照主梁结构形式，可分为钢板梁、钢箱梁、钢桁梁、结合梁；按照连接方式，可分为铆接、焊接、栓接、栓焊连接。



根据钢桥基本构件结构外形和构造的不同，钢桥制造可分为杆系、板系、管系结构。

当需要修改设计时，应取得原设计单位的同意，并应签署设计变更文件。

2) 钢桥的主要特点

(1) 钢材材质均匀，工作可靠度高，其抗拉、抗压和抗剪强度都较高，因而相对同跨度的桥梁，钢桥自重轻，便于运输和架设安装，适合修建大跨度桥和特大跨度桥。

(2) 钢材塑性和韧性好，抗冲击和振动能力高，不易突然断裂损坏。

(3) 钢桥的构件适合于工业化生产制造，便于运输，工地安装速度快，效率高，质量好，工期短。

(4) 钢桥在受到破坏后，易于修复和更换，适宜于战备和灾害恢复的快速抢修。

(5) 钢桥易被腐蚀，因此需要经常检查和定期喷涂防腐涂料，因此钢桥与其他桥梁相比，养护费用较高。

3) 钢桥架设 **【2018 多 I】**

(1) 主要方法

①自行吊机整孔架设法：适用于架设短跨径的钢板梁。

②门架吊机整孔架设法：适用于地面或河床无水、少水，现场能修建低路堤、栈桥、上铺轨道的条件。

③浮吊架设法：适用于河水较深、备有大吨位浮吊的条件。

④支架架设法：适用于桥下净空不高、水深较浅的条件，可用于架设各种跨径、各种类型的钢桥。

⑤缆索吊机拼装架设法：适用于各种地形、地质、水文条件，可架设各类梁桥、拱桥、刚构桥和加劲钢梁等。

⑥转体架设法：适用于地形相宜、桥下有交通通行的条件，可用于中等跨径的梁桥。

⑦顶推滑移架设法：适用于桥头路基或引桥上能够拼装钢梁的条件，宜于短距离纵向桥梁或横移法架梁以及横移更换旧梁，可架设单孔或多孔梁桥。

⑧拖拉架设法：适用于河滩无水或水深较浅、易于建立支墩、桥头路基或引桥上能够拼装钢梁及平移梁的条件。

⑨浮运架设法：适用于深水河流或滨海河流处，可架设各类大跨径钢桥。

⑩浮运拖拉与浮运平转架设法：适用于深水河流或滨海河流处，可架设各类大跨径钢桥。

⑪悬臂拼装架设法：适用于各类地形、水文、通航、墩高等条件，是架设钢桥的主要方法之一。

【补充】钢箱梁施工三个阶段：①板单元制作；②梁段整体组装及预拼装；③桥位连接（栓接、焊接）。

4) 大节段钢箱梁架设

①安装时应对大节段钢箱梁的倾角和钢丝绳的拉力进行实时监测，如超出预定的范围，应及时调整。

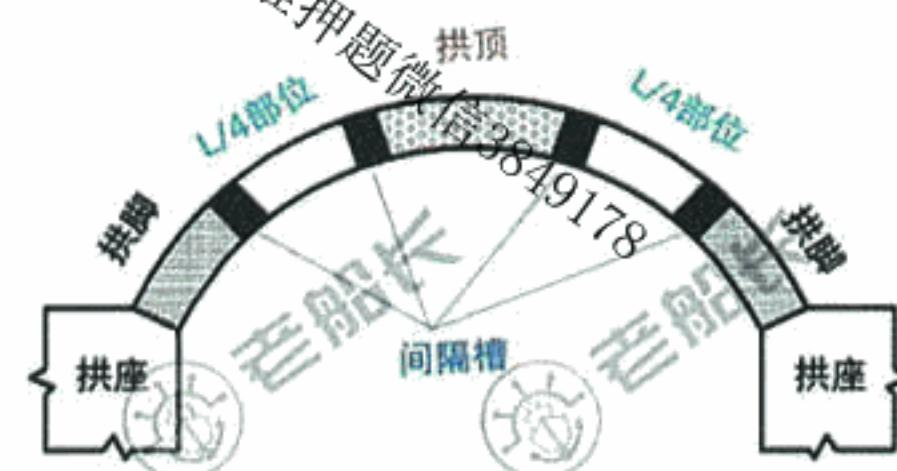
②大节段钢箱梁的安装定位应按初定位和精确定位两个步骤进行。初定位时宜设置导向装置，使大节段钢箱梁在导向装置的引导下较为准确地就位；精确定位时宜采用三维调节装置，对大节段钢箱梁的平面位置和高程进行反复精确调整，使其达到设计要求的安装精度。

3.5.2 拱桥施工

3.5.2.1 拱（支）架上现浇混凝土拱圈 ★

跨径较小的拱圈或拱肋，应按拱圈的全宽从两端拱脚向拱顶对称地连续浇筑混凝土，并应在拱脚混凝土初凝前全部完成。（连续浇筑）

跨径较大的拱圈或拱肋，应沿拱跨方向分段对称浇筑，分段的位置宜设置在拱顶、L/4部位、拱脚、拱架节点等处；各段的接缝面应与拱轴线垂直，各分段点应预留间隔槽。（分段浇筑）



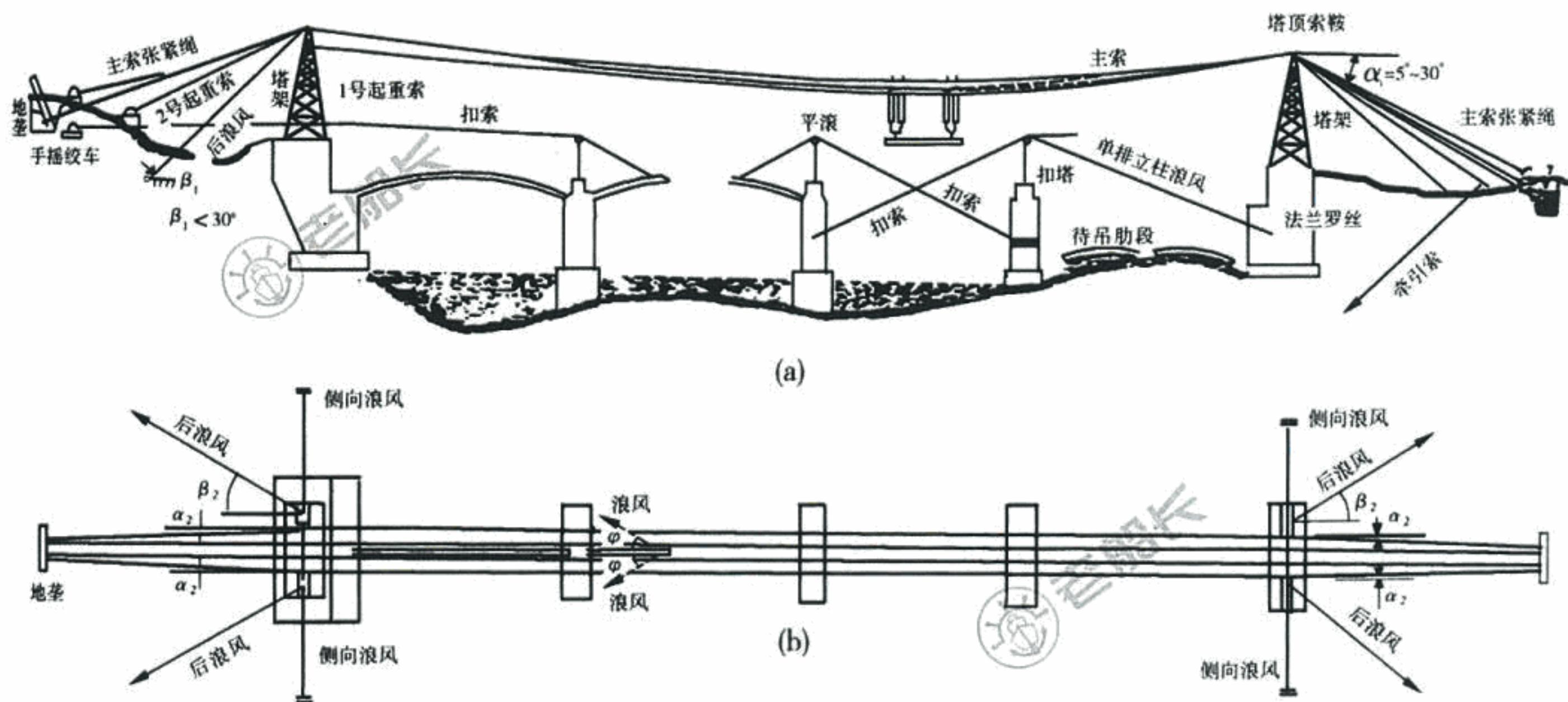
采用在拱架上组装部分预制部件然后现浇混凝土的方法施工大跨径钢筋混凝土箱形拱圈，组装和现浇均应从两拱脚向拱顶对称进行。拱圈的底、腹板混凝土强度达到设计强度的85%后方可安装盖板，布设钢筋，现浇顶板混凝土。（分环、分段浇筑）

3.5.2.2 缆索吊装施工 ★★

在峡谷或水深流急的河段上，或在通航的河流上需要满足船只的正常通行时可选用缆索吊装施工，缆索吊装由于具有跨越能力大，水平和垂直运输机动灵活，适应性广，施工比较稳妥方便等优点，在拱桥施工中被广泛采用。

主要施工设备包括缆索吊机塔架、缆索吊机主索（承重索）、起重索、牵引索、扣索、工作

索、风缆、横移索、跑车（天车、骑马滑车）、索鞍、锚碇等。【2019 案 I】



1. 主要施工工序

采用缆索吊装法进行拱桥无支架安装的主要施工工序为：在在预制场**预制**拱肋（箱）和拱上结构→将预制拱肋和拱上结构通过平车等运输设备**移植**至缆索吊装位置→将分段预制的拱肋**吊运**至安装位置→利用**扣索**对分段拱肋进行**临时固定**→吊装合龙段拱肋→对各段拱肋进行轴线调整→**主拱圈合龙**→拱上结构安装。【2019 案 I】

2. 施工要点

- (1) **主缆**宜采用**钢丝绳**，安全系数应 ≥ 3 ；**抗风钢丝绳**的安全系数应 ≥ 2 。
- (2) 拱肋安装时，宜从**拱脚段**开始，依次**向拱顶**分段吊装就位。
- (3) 松索应按**拱脚段扣索**、**次拱脚段扣索**、**起重索**的先后顺序。【2021 单 I】
- (4) 拱肋接头的**焊接作业**应在调整完轴线偏差、嵌塞并压紧接头缝钢板后且**全部松索成拱前**进行。

3.5.2.3 转体施工 ★

1) 概述

上部结构转体施工是跨越深谷、急流、铁路和公路等特殊条件下的有效施工方法，具有不干扰运输、**不中断交通**、不需要复杂的悬臂拼装设备和技术等优点，转体施工分为**平转法**、**竖转法**、**平竖结合法**。

平转法施工是将桥体上部结构整跨或从跨中分成两个半跨，利用两岸地形搭设排架（土胎模）预制，在桥台处设置**转盘**，将预制的整跨或半跨悬臂桥体置于其上，待混凝土达到设计强度后**胎架**，以桥台和锚碇体系或锚固桥体重力平衡，再用牵引系统牵引转盘，待桥体上部结构平转至对岸成跨中**合龙**，而后浇灌合龙段接头混凝土，待其达到设计强度后**封固转盘**，完成全桥施工。

平转法分为**有平衡重**转体施工和**无平衡重**转体施工两种方法，平转施工主要适用于**刚构梁式**

桥、斜拉桥、钢筋混凝土拱桥、钢管拱桥。（工序简记：预制→脱架→转动→合龙→封固转盘。）

竖转法主要适用于转体重量不大的拱桥或某些桥梁预制部件（塔、斜腿、劲性骨架）。【2018】

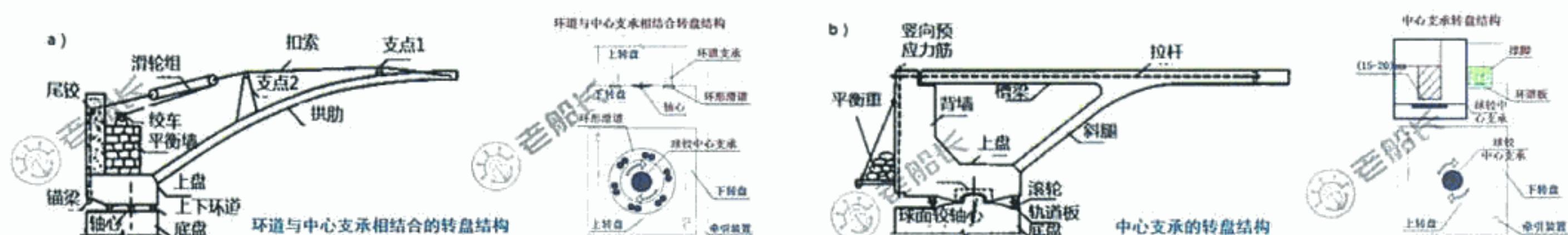
单 I】

2) 平转法施工

(1) 有平衡重转体

有平衡重转体施工的特点是转体重量大。

①对跨径较大、转动体系重心较高的拱桥，宜采用环道与中心支承相结合的转盘结构；对中、小跨径的拱桥，可采用中心支承的转盘结构。



②扣索张拉到位、拱圈卸架后，应有 24h 的观测阶段，检验锚固、支承体系的可靠程度，同时应观测拱结构的变形状态及随气温变化的规律，确定转体前拱顶的高程。

③转体合龙应在当日最低温度时进行。合龙应严格控制拱肋的高程和轴线。合龙段混凝土达到设计强度后，应分批、分级松扣，拆除扣、锚索。

(2) 无平衡重转体

无平衡重转体主要适用于大跨度拱桥施工，是把有平衡重转体施工中的拱圈扣索拉力通过设置在两岸岩体中锚碇平衡。

合龙口混凝土达到设计强度的 85% 后，应按对称、均衡的原则，分级卸除扣索。

3.5.2.4 钢管混凝土拱 ★

1. 钢管拱肋的制造加工规定

- (1) 钢管拱肋制造完成后，应在厂内进行不少于三个安装节段的试拼装。
- (2) 拱肋节段的对接接头宜与母材等强度焊接。所有焊缝均应进行外观检查，焊缝内部质量应达到Ⅱ级以上标准，熔透焊缝应进行 100% 的超声波探伤。

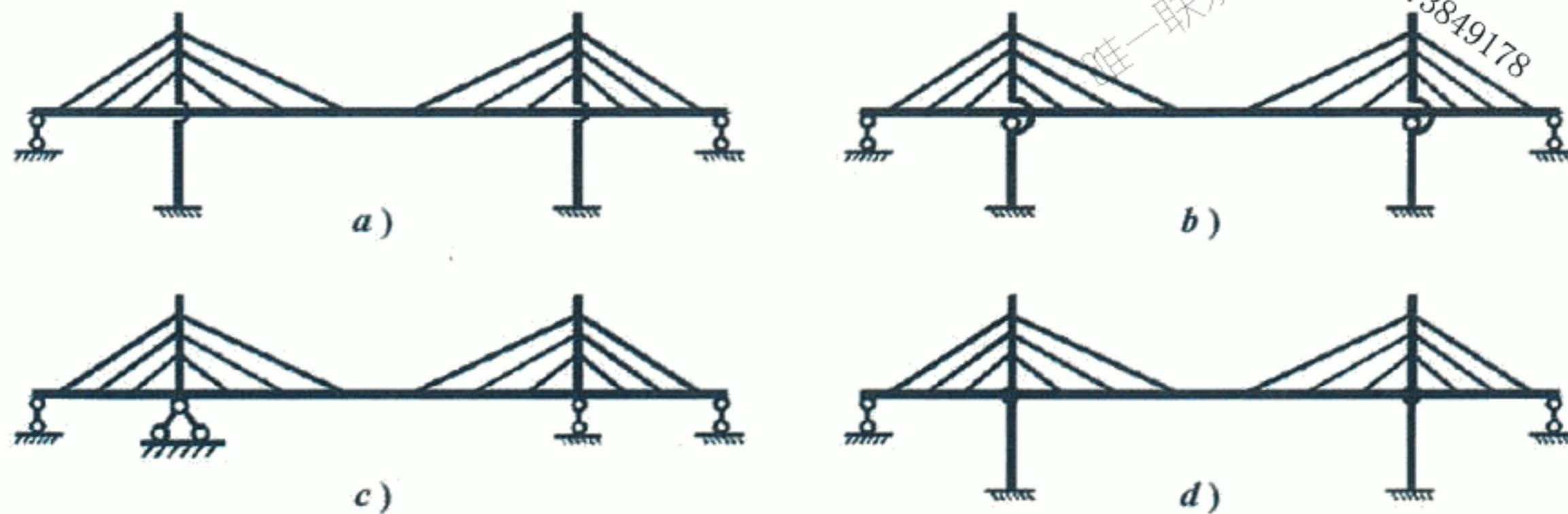
2. 混凝土施工规定

- (1) 混凝土应采用泵送顶升压注施工。
- (2) 压注前应先清洗内管，润湿管壁并泵入适量水泥浆，然后再正式压注混凝土。
- (3) 应由拱脚至拱顶对称、均衡地压注混凝土，有腹箱的断面应先管后腹。压注应连续进行，不得中断，直至拱顶端的溢流管排出正常混凝土时方可停止。
- (4) 缀板间的混凝土不宜采用压注施工。
- (5) 大跨径钢管混凝土拱桥宜采用多级泵送工艺。

3.5.3 斜拉桥施工 ★★★

斜拉桥由梁、塔、索三种基本构件组成桥梁结构体系。

斜拉桥按主梁的受力状态分为漂浮体系、支承体系、塔梁固结体系、刚构体系。【2021 多 I】



分类	特点
漂浮体系	塔墩固结、塔梁分离，主梁除两端有支承外，其余全部为拉索悬吊的多点弹性支承的单跨梁。
支承体系	塔墩固结、塔梁分离，主梁在墩、塔处均设有支座，为具有多点弹性支承的三跨连续梁，所有墩上支座均不约束纵向位移的称为半漂浮体系。
塔梁固结体系	塔梁固结并支承在墩上，梁的内力和挠度同主梁与塔柱的弯曲刚度比值有关，这种体系的连续支座至少有一个为纵向固定。（塔梁固结、塔墩分离）
刚构体系	梁塔墩互为固结，形成跨度内具有多点弹性支承的刚构

斜拉桥施工主要包括主塔、主梁、拉索的施工等。



斜拉桥的索塔施工时，应对其平面位置、倾斜度、应力、线形进行监测和控制；上部结构施工时，应对其施工过程中的索力、高程、索塔偏位等参数进行监测和控制。【2023 案 I】

1. 索塔施工

1) 索塔施工方法及主要设备

(1) 裸塔宜用爬模法施工，横梁较多的高塔宜用劲性骨架挂模提升法施工。

裸塔现浇施工主要采用翻模、滑模、爬模方法：【2017 单 I、2013 案 I】

①翻模：应用较早，施工简单，能保证几何尺寸（包括复杂断面），外观整洁。但模板高空翻转，操作危险，沿海地区不宜用此法。

②滑模：施工速度快，劳动强度小，但技术要求高，施工控制复杂，外观质量较差，易污染。一般倾斜度较大，预留孔道及埋件多的索塔不宜用此法。

(3) **爬模**：爬模兼有滑模和翻模的优势，适用于斜拉桥一般索塔的施工。施工安全，质量可靠，修补方便。国内外大多采用此法。

(2) 索塔施工机械设备一般包括起重设备、施工电梯、安全通道，还有混凝土浇筑设备、供水设备、混凝土养护设备等。塔式起重机可安装在两柱中间。混凝土的垂直运输一般采用泵送。泵管宜设在施工电梯旁，便于接管、拆管和采取降温或保温措施，或处理堵管等。【2023案I、2013案I】

2) 索塔施工要点

(1) 混凝土索塔的施工应符合下列规定：

①宜采取适当措施缩短塔座与承台、塔柱与塔座之间浇筑混凝土的间隔时间，间歇期宜 $\leq 15d$ 。

②索塔与主梁不宜同时交叉施工，必须交叉施工时应采取保证质量和施工安全的措施。索塔塔柱施工时宜设置劲性骨架以保证钢筋架立、模板安装和拉索预埋导管空间定位的精度；劲性骨架宜采用型钢制作。【2023案I】

③横梁施工应设置可靠的支架系统。体积过大的横梁可沿高度方向分次浇筑，但分次浇筑的间隔时间宜 $\leq 15d$ 。

④塔柱和横梁可同步施工或异步施工，异步施工时塔柱与横梁之间浇筑混凝土的间隔时间应 $\leq 30d$ 。

(2) 钢锚梁

2. 主梁施工

1) 混凝土主梁的特点及施工方法

主梁施工方法与梁式桥基本相同，大体分四种：悬臂法、支架法、顶推法、平转法。

老船长经典秒杀口诀：诸葛亮平定四川选址成都

3. 拉索施工

1) 拉索制作与防护

(1) 拉索防护

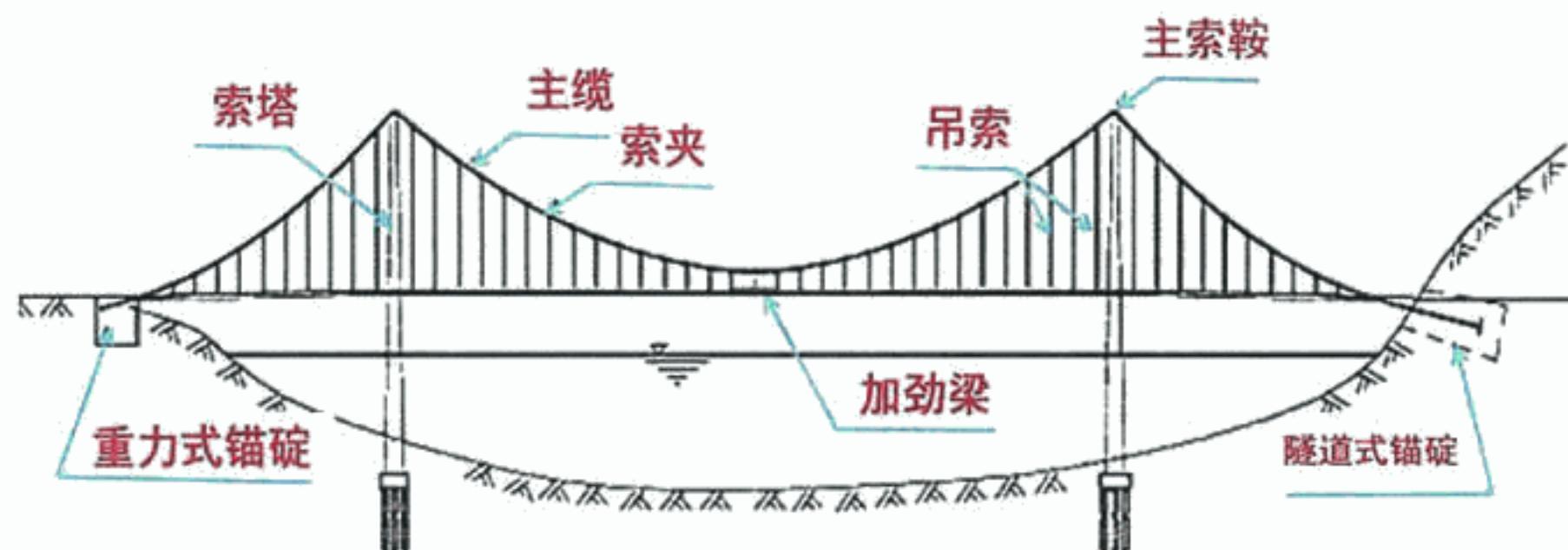
斜拉索防护可分为临时防护和永久防护两种，防护类型主要有：封闭索防护、平行索用塑料罩套保护、套管压浆法、预应力混凝土索套防护、直接挤压护套法。

(2) 拉索安装

(1) 拉索可在塔端或梁端进行单端张拉，张拉时应按索塔的顺桥向两侧及横桥向两侧对称同步进行。张拉宜以测定的索力或油压表量值为准，以延伸值作为校核；对大跨度斜拉桥，宜采用无应力索长和索力双控的方法，且宜以索长控制为主，以索力作为校核。

3.5.4 悬索桥施工 ★★★

悬索桥是利用主缆和吊索作为加劲梁的悬吊体系，将荷载作用传递到索塔和锚碇的桥梁。悬索桥主要结构由主缆、索塔、锚碇、吊索、加劲梁组成。



1. 悬索桥分类及施工内容

1) 悬索桥分类

按主缆锚固方式分为**地锚式**（多用，大跨度）和**自锚式**（跨度不大）悬索桥。

2) 悬索桥的施工内容（锚碇、索塔、主缆、加劲梁）

悬索桥**下部工程**包括**锚碇基础、锚体、塔柱基础**等施工，**上部工程**包括**主塔、主缆、吊索、加劲梁**的施工。

悬索桥施工主要工序包括：基础施工→塔柱和锚碇施工→**先导索跨越工程**→**牵引系统和猫道系统**→**猫道面层和抗风缆架设**→**索股架设**→**索夹和吊索安装**→加劲梁架设和桥面铺装（→主缆防护→猫道拆除）。

2. 锚碇施工【2017 多 I】

锚碇是悬索桥的主要承重构件，主要抵抗来自主缆的拉力并传递给地基基础，按受力形式的不同可分为**重力式锚碇、隧道式锚碇、岩锚**。

重力式锚碇依靠自身巨大的**重力**抵抗主缆拉力，重力式锚碇由**基础、锚体、锚固系统**三部分组成。锚体的结构一般由锚块、散索鞍支墩、后锚室、前锚室侧墙和顶板、后浇段等组成。

隧道式锚碇的锚体嵌入地基基岩内。只适合在**基岩坚实完整**的地区。

岩锚是通过锚固钢绞线或锚杆**直接锚固于岩体**，将荷载传递至基岩，岩锚与隧道锚的主要**区别**在于：隧道锚是将主缆索股通过锚固系统集中在一个隧洞内锚固，隧洞内浇筑混凝土形成锚塞体；而**岩锚**则将锚固系统的预应力筋分散设置在单个岩孔中锚固，**不需要**浇筑混凝土**锚塞体**，高质量的岩体替代了锚塞体，从而节省大量混凝土锚体材料。

1) 主缆锚固体系

锚固系统是主缆索股与锚碇的连接构造，也是主缆的传力系统，主缆索股锚固系统按使用材料、结构构造和传力机理，可分为**型钢锚固系统**和**预应力锚固系统**两种类型。

(1) 型钢锚固系统

型钢锚固系统一般由**锚杆、锚梁、支撑架**三部分组成，前部有设锚梁和不设锚梁两种形式。根据锚块前部有无锚梁，可分为**前锚梁式型钢锚固系统**和**拉杆式型钢锚固系统**。

施工程序如下：锚杆、锚梁制作→现场拼装锚支架（部分）→安装后锚梁→安装锚杆于锚支架→安装前锚梁→精确定位→浇筑锚体混凝土。

(2) 预应力锚固系统

根据材料不同，分为预应力**钢绞线锚固系统**和预应力**粗钢筋锚固系统**。

预应力锚固系统施工程序如下：基础施工→安装预应力管道→浇筑锚体混凝土→穿预应力筋→安装锚固连接器→预应力筋张拉→预应力管道压浆→安装与张拉索股。

3. 索塔施工

1) 塔身施工

国内大跨度悬索桥塔身主要采用钢筋混凝土塔，国外主要采用钢塔。

混凝土塔柱施工工艺与斜拉桥塔身基本相同。

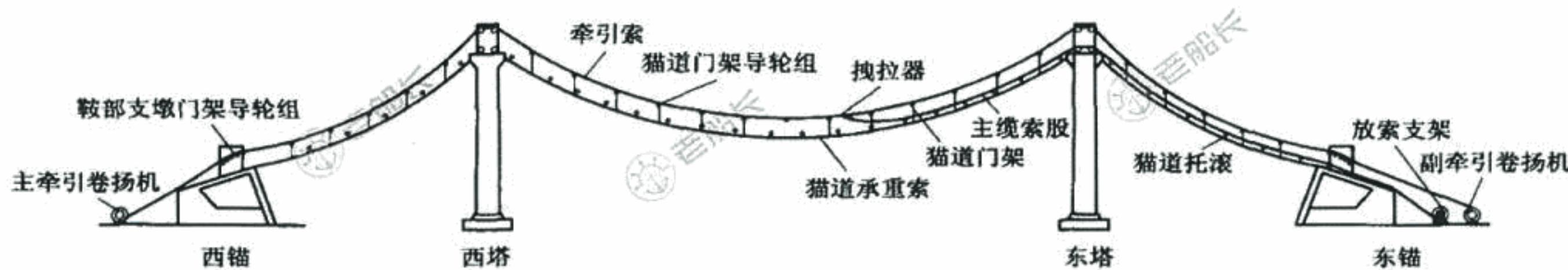
2) 索鞍施工

主索鞍施工程序：安装塔顶门架→钢框架安装→吊装上下支承板→吊装鞍体等。

4. 主缆施工【2013 单 I】

主缆架设工程包括准备工作、主缆架设、防护和收尾工作等，主缆施工难度大、工序多，其主要施工程序如下：牵引系统→猫道→主缆架设→紧缆→索夹安装与吊索架设。

1) 牵引系统



牵引系统是架设于两锚碇之间，跨越索塔用于空中拽拉的牵引设备，主要承担猫道架设、主缆架设以及部分牵引吊运工作，常用的牵引系统有循环式和往复式两种。

通常方法是先将先导索跨越（水系或沟壑），再利用先导索将牵引索由空中架设。

2) 猫道【2020 单 I、2019 多 I】

(1) 猫道设计应符合下列规定：

①猫道的线形宜与主缆空载时的线形基本平行。猫道的扶手高宜为1.5m。猫道间宜设置若干条横向人行通道。

②面层及横向通道宜从索塔塔顶开始，同时向跨中和锚碇方向对称、平衡地进行架设安装。

③主缆架设完成、加劲梁安装前，应将猫道改挂于主缆上，改挂前应拆除横向通道。

④主缆的防护工程及检修道安装完成后，可进行猫道的拆除工作。猫道拆除宜按中跨从塔顶向跨中方向、边跨从塔顶向锚碇方向的顺序进行。

3) 主缆架设

锚碇和索塔工程完成、主索鞍和散索鞍安装就位、牵引系统架设完成后，即可进行主缆架设。主缆架设方法主要有空中纺丝法（AS 法）和预制平行索股法（PPWS 法）。

(1) 主缆的紧缆应分为预紧缆和正式紧缆两阶段进行。

①预紧缆应在温度稳定的夜间且将主缆全长分为若干区段分别进行。

②正式紧缆时，应采用紧缆机将主缆挤压整形成圆形，其作业可在白天进行。

(2) 主缆缠丝工作宜在二期恒载完成后进行。

(3) 主缆的防护涂装宜在桥面铺装完成后进行。

4) 索夹与吊索施工

(1) 索夹螺栓的紧固应按安装时加劲梁吊装后、全部二期恒载完成后三个荷载阶段分步

进行。

5. 加劲梁施工

6. 施工控制

(1) 悬索桥上部构造施工应对下列部位或项目进行监测和控制：

①索塔、锚碇的沉降和位移。

②在主索鞍的钢格栅定位前，应对索塔裸塔进行 36h 连续变形观测；在主缆架设安装前，应进行索塔和锚碇的联测。

③主缆架设安装过程中，对基准索股的连续监测应 $\geq 3d$ ，对索塔和锚碇的沉降及位移监测应 ≥ 3 次。

④索夹安装前，对主缆的线形以及两侧主缆的相对误差，应进行 $\geq 3d$ 的连续观测。

⑤每一节段加劲梁吊装后，均应对索塔和锚碇的沉降及变位、主缆的线形、加劲梁的线形等进行监测。

3.5.5 桥梁施工监控 ★

一、桥梁监测

桥梁监测系统对以下几个方面进行监控：桥梁结构在正常环境与交通条件下运营的物理与力学状态；桥梁重要非结构构件（如支座）和附属设施（如振动控制元件）的工作状态；结构构件耐久性；桥梁所处环境条件。【2012 多 I】

3.6 桥面及附属工程

3.6.1 支座与伸缩装置施工 ★★

1. 支座施工

(1) 支座应存放在干燥通风的库房内，不得直接置于地面，应垫高堆放整齐，保持清洁；支座不得与酸、碱、油类和有机溶剂等相接触，且应距热源至少 1m 以上。

(2) 调整支座的顶面高程时，应采用钢垫片对支座进行支垫，支垫处在支座安装完成后留下的空隙应采用环氧树脂砂浆填实。

(3) 板式橡胶支座的安装应符合下列规定：

①支座安装时，应对其顶面和底面进行检查核对，避免反置。

②梁、板的就位应准确且其底面应与支座顶面密贴，否则应将梁、板吊起，对支座进行重新调整安装；梁、板安装时不得采用撬棍移动梁、板的方式进行就位。

(4) 盆式支座的安装施工应符合下列规定：

①活动支座安装前应采用适宜的清洁剂擦洗各相对滑移面，擦净后应在四氟滑板的储油槽内注满硅脂类润滑剂。

2. 伸缩装置施工

(1) 伸缩装置宜在桥面铺装施工完成后，采用反开槽的方式进行安装。

(2) 伸缩装置安装前，应按现场的**实际气温**调整其安装定位值。

3.6.2 桥面铺装与防排水施工 ★★

1. 桥面铺装

1) 混凝土桥面铺装

(1) 沥青混凝土桥面铺筑前应洒布**粘层**沥青。

2) 钢桥面铺装

(1) 应采用**无损检测法**检测钢桥面沥青混凝土铺装质量，**不得**采用**钻孔法**。

2. 桥面防排水施工

(1) 铺设桥面防水层时应符合下列规定：

①防水层**不宜在雨天或低温**下铺设。

②防水层施工完成但**未达到规定的时间**，**不得**开放交通。

(2) 泄水孔顶面不宜高于水泥混凝土调平层顶面，在泄水孔的边缘宜设渗水盲沟，使桥面上的积水能顺利排出。

3.6.3 桥面防护设施与桥头搭板施工 ★★

1. 桥面防护设施

(1) 混凝土防撞护栏施工应符合下列规定：

①防撞护栏应在桥面**两侧对称**施工。

②就地现浇的防撞护栏宜在顺桥向每间隔 5~8m 设一道断缝或假缝；**温差较大的地区**，断缝或假缝的设置**间距**宜再适当**减小**。

③防撞护栏的**钢筋**应与**梁体**的预留钢筋可靠**连接**。

④宜采用坍落度**较低**的干硬性混凝土，浇筑时应分层进行，分层厚度宜不超过 200mm；振捣时应采取适当措施使模板表面的气泡逸出。

2. 桥头搭板施工

(1) 台后地基如为软土，预压应在搭板**施工前**完成。

(2) 钢筋混凝土桥头搭板施工应符合下列规定：

①钢筋混凝土搭板及枕梁宜采用**就地浇筑**的方式施工。

②浇筑搭板混凝土时应按搭板的坡度由**低处向高处**进行。

3.7 桥梁工程质量通病及防治措施

3.7.1 钻孔灌注桩断桩防治 ★★

1. 原因分析

(1) 集料级配差，混凝土和易性差而造成离析卡管；混凝土坍落度小；石料粒径过大，导管

直径较小，混凝土灌注过程中堵塞导管，且在混凝土初凝前未能疏通好，中断施工，形成断桩。

- (2) 首批灌注的混凝土不能埋住导管，从而形成断桩。
- (3) 提拔导管时，由于测量或计算错误，或用力过量，从而使导管拔出混凝土面，或使导管口处于泥浆或泥浆与混凝土的混合层中，形成断桩。
- (4) 提拔导管时，钢筋笼卡住导管，在混凝土初凝前无法提起，造成混凝土灌注中断，形成断桩。
- (5) 导管接口渗漏致使泥浆进入导管内，在混凝土内形成夹层，造成断桩。
- (6) 导管埋置深度过深，无法提起或将导管拔断，灌注中断造成断桩。
- (7) 混凝土不能连续灌注。

老船长点拨提示：

问题原因——错误做法

预防措施——正确做法

治理措施——补救办法

2. 防治措施【2022案I、2014单II、2012单II、2005单I】

(1) 当混凝土堵塞导管时，可采用**拔插抖动导管**（注意不可将导管口拔出混凝土面）疏通，当所堵塞的导管长度较短时，也可以用**型钢插入**导管内来疏通，也可以在导管上固定**附着式振捣器**进行振动来疏通导管内的混凝土。

(2) 当钢筋笼卡住导管时，可设法**转动导管**，使其脱离钢筋笼。

3.7.2 钢筋混凝土梁桥预拱度偏差防治 ★

1. 原因分析

(1) 现浇梁：由于支架形式多样，对地基在荷载作用下的沉陷、支架弹性变形和混凝土梁挠度的计算所依据的一些参数均是建立在经验值上的，因此计算预拱度往往与实际发生的有一定的差距。

(2) 预制梁：一方面，由于**混凝土强度的差异、混凝土弹性模量不稳定**导致梁的起拱值的不稳定、施加预应力时间差异、架梁时间不一致，从而使预拱度计算时各种假定条件与实际情况不一致，造成预拱度的偏差。另一方面，理论计算公式建立在一些试验数据的基础上，**理论计算与实际本身存在偏差**。

2. 防治措施【2019案I、2014多I】

(1) 保证支架基础、支架及模板的施工质量，并按要求进行**预压**，确保模板的标高偏差在允许范围内。

(2) 严格控制张拉时的混凝土强度，控制张拉的试块应与梁板**同条件养护**，对于预制梁还需控制混凝土的弹性模量。

(3) 严格控制预应力筋在结构中的位置，**波纹管定位应准确**。

(4) 钢绞线伸长值计算应采用同批钢绞线弹性模量的实测值。

(5) 预制梁存梁时间不宜过长。

3.7.3 箱梁两侧腹板混凝土厚度不均防治 ★

1. 原因分析【2024案 I】

- (1) 箱梁模板设计不合理。
- (2) 模板强度不足，或箱梁内模没有固定牢固，使内模与外模相对水平位置发生偏差。
- (3) 箱梁内模由于刚度不够，在浇筑混凝土过程中发生变形。
- (4) 混凝土没有对称浇筑，导致单侧压力过大，使内模偏向另一侧。

2. 防治措施

- (1) 内模要坚固，刚度符合相关施工规范要求。
- (2) 将箱梁内模固定牢固，使其上下左右均不能移动。
- (3) 内模与外模在两侧腹板部位设置支撑。
- (4) 浇筑腹板混凝土时，两侧应对称进行。

3.7.4 钢筋混凝土结构构造裂缝防治 ★

1. 原因分析【2017 单 II】

钢筋混凝土结构的构造裂缝是指由于结构非荷载原因产生的混凝土表面裂缝，影响因素有：

1) 材料原因

- (1) 水泥质量不好，如水泥安定性不合格等，浇筑后导致产生不规则的裂缝。
- (2) 集料含泥料过大时，随着混凝土干燥、收缩，出现不规则的花纹状裂缝。
- (3) 集料风化严重，将形成以集料为中心的锥形剥落。

2) 施工原因

- (1) 混凝土搅拌时间和运输时间过长，导致整个结构产生细裂缝。
- (2) 模板移动鼓出将使浇筑后不久的混凝土产生与模板移动方向平行的裂缝。
- (3) 基础与支架的强度、刚度、稳定性不够引起支架下沉，这种不均匀下沉或脱模过早，会导致混凝土产生裂缝，这种裂缝宽度一般较大。
- (4) 接头处理不当，导致施工缝变成裂缝。
- (5) 养护问题，塑性收缩状态将会在混凝土表面发生方向不定的收缩裂缝，这类裂缝尤以大风、干燥天气最为明显。
- (6) 混凝土高度突变以及钢筋保护层较薄部位，由于振捣或析水过多造成沿钢筋方向的裂缝。

(7) 大体积混凝土未采用缓凝和降低水泥水化热的措施、使用了早强水泥的混凝土，受水化热的影响浇筑后 2~3d 导致结构中产生裂缝；同一结构物的不同位置温差大，导致混凝土凝固时因收缩所产生的应力超过混凝土极限抗拉强度或内外温差大导致表面抗拉应力超过混凝土极限抗拉强度而产生裂缝。



(8) 水胶比大的混凝土，由于干燥收缩，会在龄期 2~3 个月内产生裂缝。

2. 防治措施【2013 单 I、2013 单 II、2006 案 I】

- (1) 选用优质的水泥及集料。
- (2) 合理设计混凝土的配合比，改善集料级配、降低水胶比、掺加粉煤灰及缓凝剂等；尽可能采用较小水胶比及较低坍落度的混凝土。
- (3) 避免混凝土搅拌很长时间后才浇筑。
- (4) 保证模板质量及安装效果，避免出现模板移动、鼓出等问题。
- (5) 基础与支架应有较好的强度、刚度、稳定性并应采用预压措施；避免出现支架下沉或模板的不均匀沉降，不得脱模过早。
- (6) 混凝土浇筑时要振捣充分，混凝土浇筑后要及时养护并保证养护效果。
- (7) 大体积混凝土应优选矿渣水泥等低水化热水泥；采用遮阳凉棚的降温或布置冷却水管等措施，以降低混凝土水化热、推迟水化热峰值出现；同一结构物的不同位置温差应满足设计及规范要求。

3.7.5 悬臂浇筑钢筋混凝土箱梁的施工（挠度）控制 ★

1. 原因分析【2009 案 I】

悬臂浇筑钢筋混凝土箱梁桥的施工合龙标高误差是由于梁体采用节段悬臂浇筑施工，施工过程中立模标高的计算采用的参数与实际有差异，计算公式为经验公式造成的，影响因素有：

- (1) 混凝土重力密度的变化、截面尺寸的变化。
- (2) 混凝土弹性模量随时间的变化。
- (3) 混凝土的收缩徐变规律与环境的影响。
- (4) 日照及温度差异引起挠度的变化。
- (5) 张拉有效预应力的大小。
- (6) 结构体系转换以及桥墩变位也会对挠度产生影响。
- (7) 施工临时荷载对挠度的影响。

2. 防治措施【2010 多 I、2009 单 I、2006 案 I】

- (1) 对挂篮进行加载试验，消除非弹性变形，并向监测人员提供非弹性变形值及挂篮荷载-弹性变形曲线。
- (2) 在 0 号块箱梁顶面建立相对坐标系，以此相对坐标控制立模标高值；施工过程中及时采集观测断面标高值并提供给监控人员。
- (3) 温度控制：在梁体上布置温度观测点进行观测，掌握箱梁截面内外温差和温度在界面上的分布情况，以获得较准确的温度变化规律。
- (4) 挠度观测：在箱梁的顶底板布置测点，在一天中温度变化相对小的时间，测立模时、混凝土浇筑前、混凝土浇筑后、预应力束张拉前、预应力束张拉后的标高。
- (5) 应力观测：在梁体合理布置测试断面和测点，在施工过程中测试截面的应力变化与应力分布情况，验证各施工阶段被测梁段的应力值和仿真分析的吻合情况。



(6) 严格控制施工过程中不平衡荷载的分布及大小。

3.7.6 桥面铺装病害防治 ★

1. 原因分析【2013 多 I】

桥面铺装病害形成原因：**梁体预拱度过大**，桥面铺装设计厚度难以满足施工允许误差；施工质量控制不严，桥面铺装混凝土质量差；**桥头跳车和伸缩缝破坏引起的连锁破坏**；**桥梁结构的大变形**引起沥青混凝土铺装层的破坏；水害引起沥青混凝土铺装的破坏；铺装防水层破损导致桥面铺装的破坏等。桥面铺装常规性破坏与一般路面破坏原理相同。

2. 防治措施

- (1) 常规破坏同路面通病防治。
- (2) 加强对主梁的施工质量控制，避免出现预拱度过大。
- (3) 加强桥面铺装施工质量控制，严格控制钢筋网的安装。
- (4) 提高桥面防水混凝土的强度，避免出现防水混凝土层的破坏。
- (5) 桥梁应加强桥面排水的设计和必要的水量计算；优化桥面铺装的混凝土配合比设计，选用优质集料，提高桥面铺装的施工和养护质量。

3.7.7 桥梁伸缩缝病害防治 ★

1. 防治措施

- (1) 精心设计，选择合理的伸缩装置。
- (2) 严格按既定施工工序和工艺标准的要求施工。
- (3) 提高锚固件焊接质量。
- (4) 提高后浇混凝土或填缝料的施工质量，加强填缝混凝土的振捣密实，确保混凝土达到设计强度标准，及时养护，无空隙、空洞。
- (5) 避免伸缩装置两侧的混凝土与桥面系的相邻部位结合不紧密。

3.7.8 桥头跳车防治 ★

1. 原因分析

桥头跳车是由于桥台为刚性体，桥头路基为塑性体，在车辆长期通过的影响及路基填土自然固结沉降下，桥台与桥头路基形成高差导致桥头跳车。

主要影响因素有：

- (1) 台后地基强度与桥台地基强度不同、台后填料自然固结压缩。
- (2) 桥头路堤及堆坡范围内地基填筑前处理不彻底。
- (3) **台后压实度达不到标准**，高填土引道路堤本身出现的压缩变形。
- (4) 路面水渗入路基，使路基土软化，水土流失造成桥头路基引道下沉；回填不及时或积水

而引起的桥头回填土压实度不够。

- (5) 台后沉降大于设计容许值。
- (6) 台后填土材料不当，或填土含水量过大。

(7) 软基路段台前预压长度不足，软基路段桥头堆载预压卸载过早，软基路段桥头处软基处理深度不到位，质量不符合设计要求。

2. 防治措施【2017 案 II、2013 多 II、2008 多 II】

(1) 选用合适的压实机具，采用先进的台后填土施工工艺，确保台后及时回填，回填压实度达到要求。

(2) 改善地基性能，提高地基承载力，减少差异沉降。保证足够的台前预压长度。连续进行沉降观测，保证桥头沉降速率达到规定范围内再卸载。确保桥头软基处理深度符合要求，严格控制软基处理质量。

(3) 有针对性地选择台后填料，提高桥头路基压实度。如采用砂石料等固结性好、变形小且透水的填筑材料处理桥头填土。

(4) 做好桥头路堤的排水、防水工程，设置桥头搭板。

(5) 优化设计方案，采用新工艺加固路堤。

3.8 桥梁工程改（扩）建

3.8.1 桥梁工程改（扩）建施工 ★

1. 桥梁改扩建方案

按上部结构与下部结构的连接处理主要有以下三种方案：

- ① 新旧桥梁的上部结构与下部结构互不连接；
- ② 新旧桥梁的上部结构和下部结构相互连接；
- ③ 新旧桥梁的上部结构连接而下部结构分离。

老船长经典总结：上部结构不单独分开

2. 新旧桥梁上部结构拼接的构造要求【2014 单 I】

根据桥梁上部结构不同类型，一般采用以下的拼接连接方式：

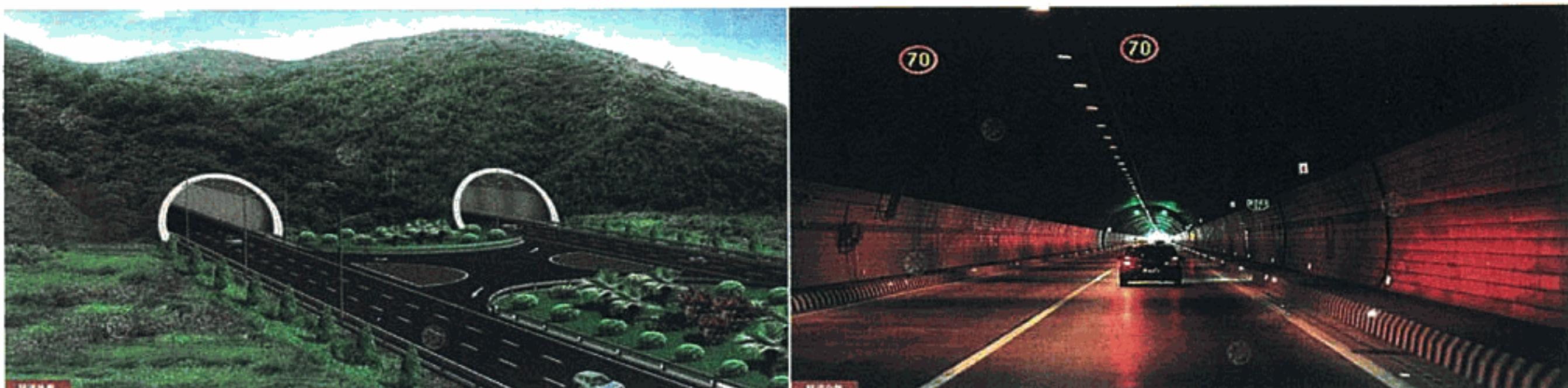
(1) 钢筋混凝土实心板和预应力混凝土空心板桥，新旧板梁拼接之间宜采用铰接或近似于铰接连接。

(2) 预应力混凝土 T 形梁或组合 T 形梁桥，新旧 T 形梁之间拼接宜采用刚性连接。

(3) 连续箱梁桥，新旧箱梁之间拼接宜采用铰接连接。

老船长经典秒杀口诀：提纲（仅 T 梁为刚接）

第4章 隧道工程



4.1 隧道围岩分级与隧道构造

4.1.1 隧道围岩分级 ★★★

1. 围岩分级【2022 多 I、2018 案 II、2013 案 I、2006 单 II】

隧道围岩分级是设计、施工的基础。施工方法的选择、衬砌结构类型及尺寸的确定、隧道施工劳动定额、材料消耗标准的制定都要以围岩分级作为主要依据。

老船长经典秒杀口诀：分级防尘老好

围岩级别	围岩岩体或土体主要定性特征	岩体基本质量指标 BQ 或 岩体修正质量指标 [BQ]
I	坚硬岩，岩体完整	> 550
II	坚硬岩，岩体较完整 较坚硬岩，岩体完整	550 ~ 451
III	坚硬岩，岩体较破碎 较坚硬岩，岩体较完整 较软岩，岩体完整，整体状或巨厚层状结构	450 ~ 351
IV	坚硬岩，岩体破碎 较坚硬岩，岩体较破碎~破碎 较软岩，岩体较完整~较破碎 软岩，岩体完整~较完整	350 ~ 251
V	土体：1. 压密或成岩作用的黏性土及砂性土； 2. 黄土（Q ₁ 、Q ₂ ）； 3. 一般钙质、铁质胶结的碎石土、卵石土、大块石土 较软岩，岩体破碎 软岩，岩体较破碎~破碎 全部极软岩和全部极破碎岩 一般第四系的半干硬至硬塑的黏性土及稍湿至潮湿的碎石土、卵石土、圆砾、角砾土及黄土（Q ₁ 、Q ₂ ），非黏性土呈松散结构，黏性土及黄土呈松软结构	≤ 250

围岩级别	围岩岩体或土体主要定性特征	岩体基本质量指标 BQ 或 岩体修正质量指标 [BQ]
VI	软塑状黏性土及潮湿、饱和粉细砂层、软土等	

巧记规律

	坚硬	较坚硬	较软	软
完整	I	II	III	IV
较完整	II	III	IV	
较破碎	III	IV		V
破碎	IV		V	V极

2. 判定围岩级别的方法【2021 多 II、2020 案 I、2019 单 II、2013 单 II】

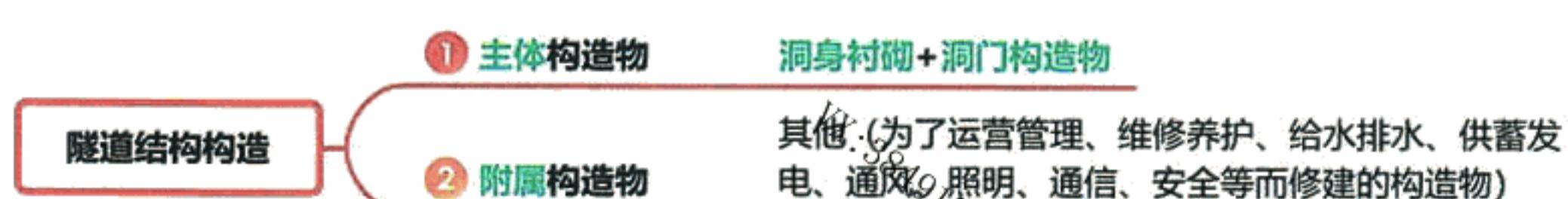
(1) 隧道围岩级别的综合评判宜采用两步：



老船长经典秒杀口诀：出软水

(2) 现场实践中，多以工程类比法或经验法判定围岩级别。

4.1.2 隧道构造 ★★★



【2022 单 II、2013 单 I、2007 单 II】

1. 隧道的分类【2023 案 II、2022 案 II】

1) 按跨度分为四类：小跨度隧道、一般跨度隧道、中等跨度隧道、大跨度隧道。

隧道按跨度分类

分类	开挖宽度 B (m)	说明
小跨度隧道	$B < 9$	平行导洞、服务隧道、车行横洞、人行横洞、风道及施工通道
一般跨度隧道	$9 \leq B < 14$	单洞两车道隧道
中等跨度隧道	$14 \leq B < 18$	单洞三车道隧道、单洞双车道+紧急停车带隧道
大跨度隧道	$B \geq 18$	单洞四车道隧道、单洞三车道+紧急停车带隧道

提示：紧急停车带算一条车道

老船长经典秒杀口诀：夸父赌博就意思一把

【补充】隧道净宽：隧道内轮廓断面的最大宽度。

隧道开挖宽度：考虑了二衬、初期支护、预留变形量后开挖轮廓的最大开挖宽度。

2) 按**长度**分为四类：**特长隧道、长隧道、中隧道、短隧道。**

隧道按长度分类

分类	特长隧道	长隧道	中隧道	短隧道
隧道长度 L (m)	$L > 3000$	$1000m < L \leq 3000$	$500m < L \leq 1000$	$L \leq 500$

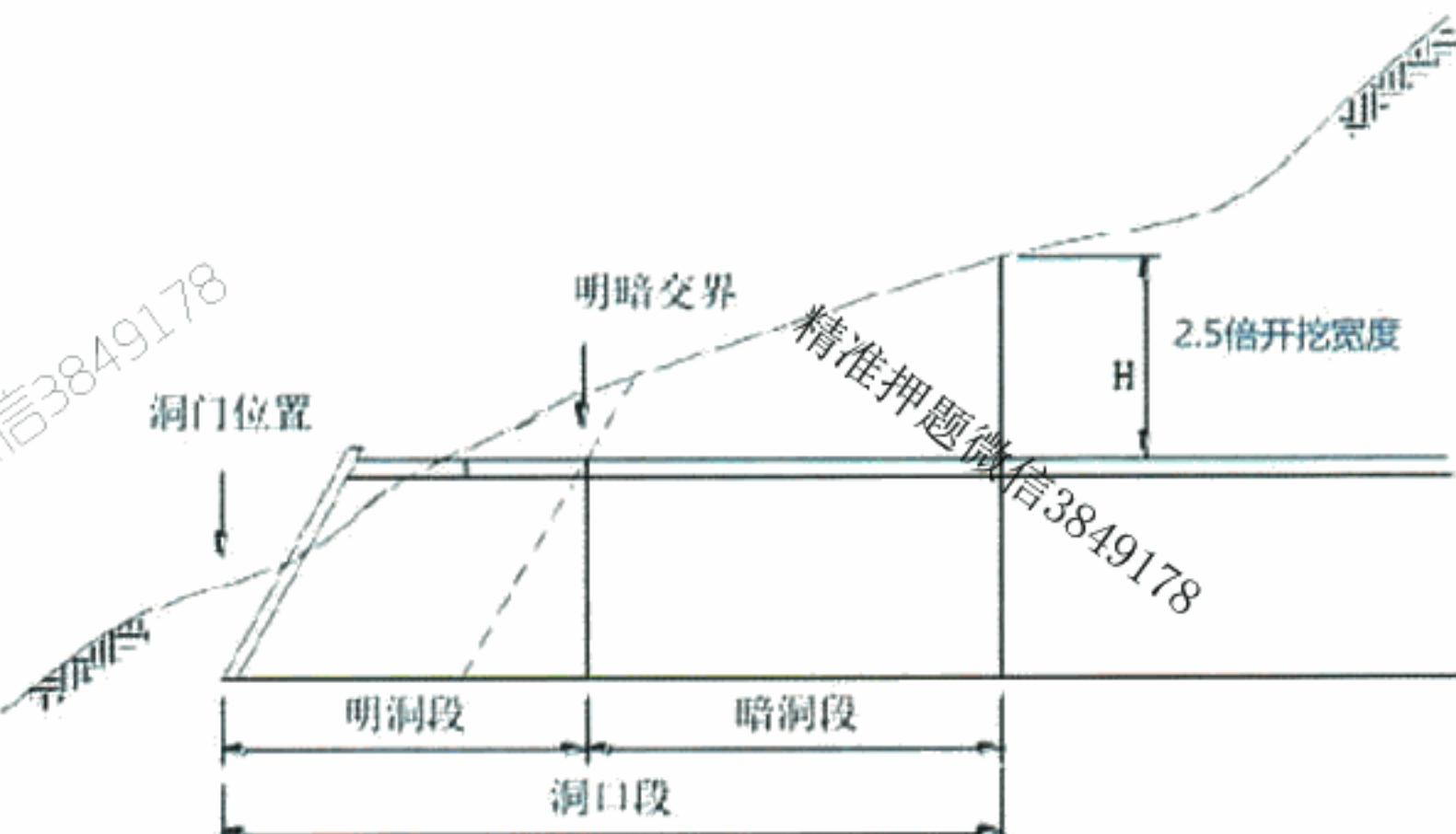
老船长经典秒杀口诀：短中长特武夷山

【补充】隧道按埋深分为浅埋和深埋。

浅埋段：隧道上部覆盖层 ≤ 2.5 倍隧道洞跨的隧道区段。

深埋段：隧道上部覆盖层 > 2.5 倍隧道洞跨的隧道区段。

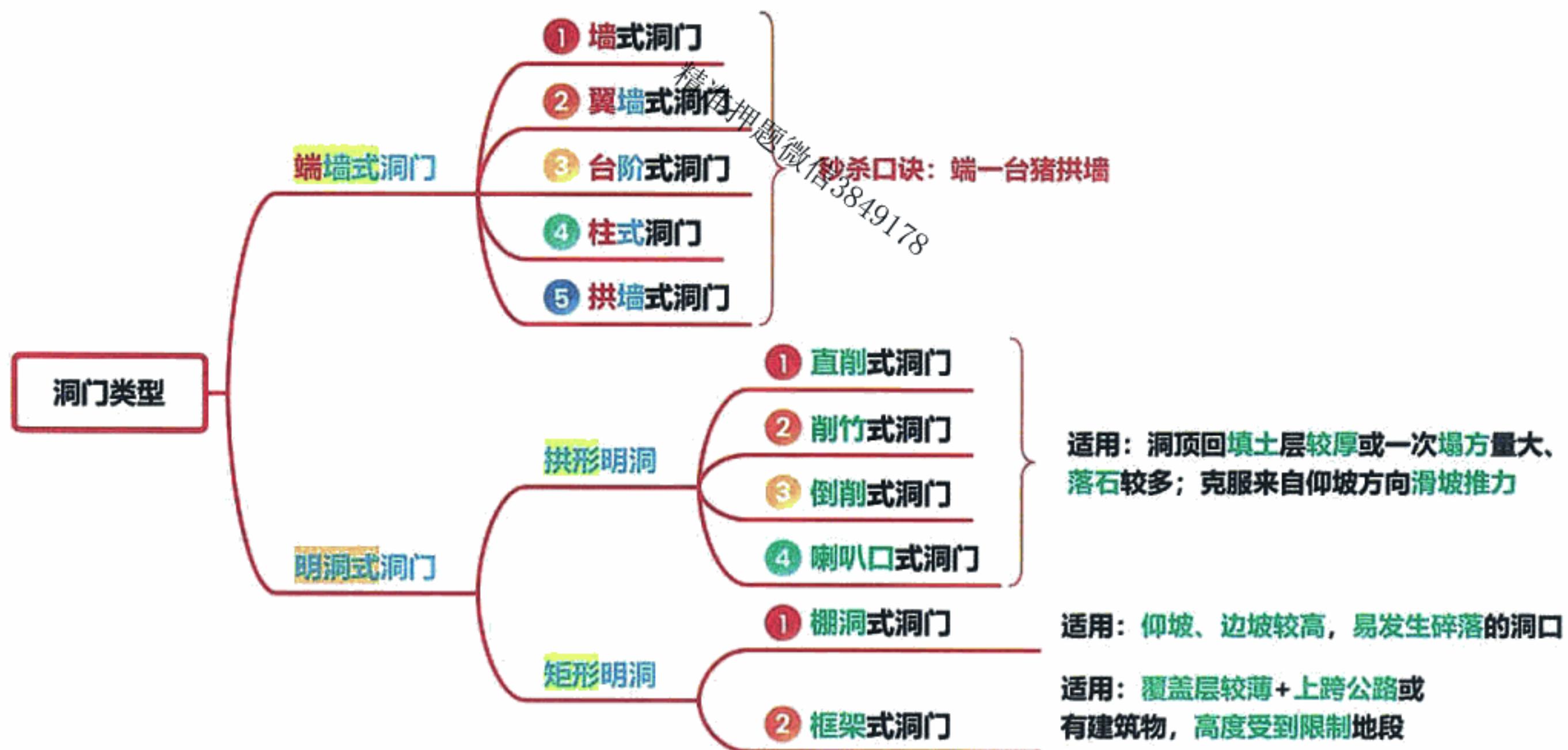
【补充】按隧道间的距离分为：连拱隧道、小净距隧道、分离式隧道。



2. 洞门类型及构造

1) 洞门类型 **【2021 案 I、2013 多选】**

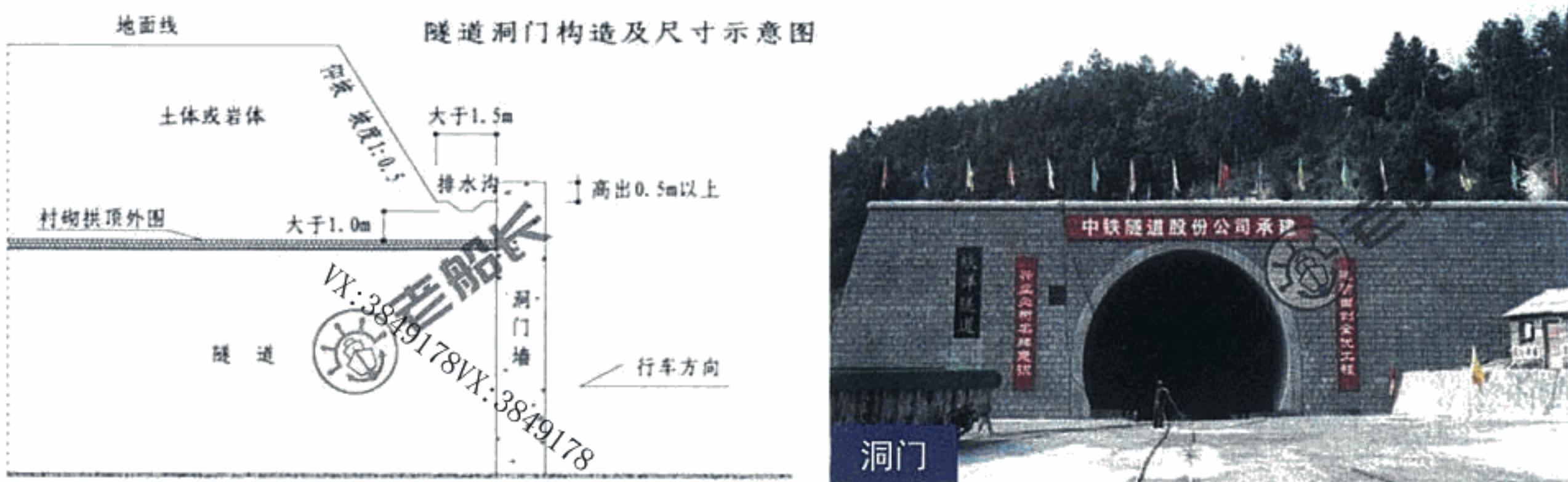
隧道**洞门的作用是支撑洞门正面仰坡和路堑边坡，拦截仰坡上方少量剥落、掉块，维护边坡、仰坡的稳定，并将坡面汇水引离隧道。**



2) 洞门构造

(1) 洞门端墙和翼墙应具有抵抗来自仰坡、边坡土压力的能力。洞门墙墙身最小厚度不应小于 0.5m，翼墙墙身厚度不应小于 0.3m。

(2) 洞顶仰坡与回填顶面的交线至洞门端墙墙背的水平距离不宜小于 1.5m；洞顶排水沟沟底至拱顶衬砌外缘的最小厚度不应小于 1.0m；洞门端墙墙顶应高出墙背回填面 0.5m。



(3) 洞门端墙应根据需要设置伸缩缝、沉降缝和泄水孔。

(4) 洞门端墙基础应置于稳固地基上，并埋入地面下一定深度。

- ① 嵌入岩石地基的深度不应小于 0.2m；
- ② 埋入土质地基的深度不应小于 1.0m；
- ③ 基底埋置深度应大于靠墙设置的各种沟、槽底的埋置深度。
- ④ 地基为冻胀土层时，基底高程应在最大冻结深度以下不小于 0.25m。

(5) 洞门结构应满足抗震要求。

明洞式洞门构造应符合下列规定：

- (1) 洞口段衬砌应采用钢筋混凝土结构。
- (2) 洞口段衬砌应伸出原山坡坡面或设计回填坡面不小于 500mm。

- (3) 洞口段衬砌端面可呈直削、削竹、倒削竹或喇叭形。
- (4) 采用削竹式洞门时，削竹面仰斜坡率应陡于或等于原山坡坡率或设计回填坡面坡率。
- (5) 设计回填坡面宜按自然山坡坡度回填。采用土石回填时，坡率不宜陡于 1:1，表面宜植草覆盖。
- (6) 边、仰坡较陡时，为避免落石，可适当延长明洞长度。

3. 明洞类型及构造【2015 单 II、2012 案 II】

1) 明洞类型

以明挖法修建的隧道称为明洞。

宜设置明洞的情况：

- ① 洞顶覆盖层薄，不宜大开挖修建路堑且难于用暗挖法建隧道时；
- ② 路基或隧道洞口或路堑地段受塌方、岩堆、落石、泥石流等不良地质危害时；
- ③ 修建路堑会危及附近重要建（构）筑物安全时；
- ④ 公路、铁路、沟渠和其他人工构造物在隧道上方通过，不宜采用暗挖施工或立交桥跨越时；
- ⑤ 为减少洞口开挖、保护洞口自然景观，需延伸隧道长度时。

2) 明洞构造

(1) 明洞应采用钢筋混凝土结构。

(2) 半路堑拱形明洞应考虑偏压，拱形明洞外侧边墙宜适当加厚。地形条件允许时，可采用反压回填或设置反压墙。

(3) 当拱形明洞侧压力较大或地基承载力不足时，应设仰拱。

(4) 在地质条件有明显变化的地段，应设置沉降缝；气温变化较大地区，可根据明洞长度设置伸缩缝。

4. 隧道衬砌类型及构造

1) 隧道衬砌类型

隧道衬砌形式主要有锚喷衬砌、整体式衬砌和复合式衬砌。

按隧道断面形状分为曲墙式、直墙式和连拱式等。【2015 案 I】

公路等级	位置及围岩等级	衬砌类型
高速、一级、二级	—	复合式衬砌
三级、四级	洞口段、IV~V级围岩洞身段	复合式衬砌、整体式衬砌
	I~III级围岩洞身段	喷锚衬砌

2) 隧道衬砌构造

(1) 衬砌断面宜采用曲边墙拱形断面。

(2) 围岩较差、侧压力较大、地下水丰富的地段可设仰拱，一般IV~VI级围岩地段设仰拱。路面与仰拱之间可采用混凝土或片石混凝土填充。隧底围岩较好、边墙基底承载力和稳定性满足要求时，可不设仰拱。

(3) 洞口段应设加强衬砌，两车道隧道不应小于 10m。

(4) 围岩较差地段衬砌应向围岩较好地段延伸 5~10m。

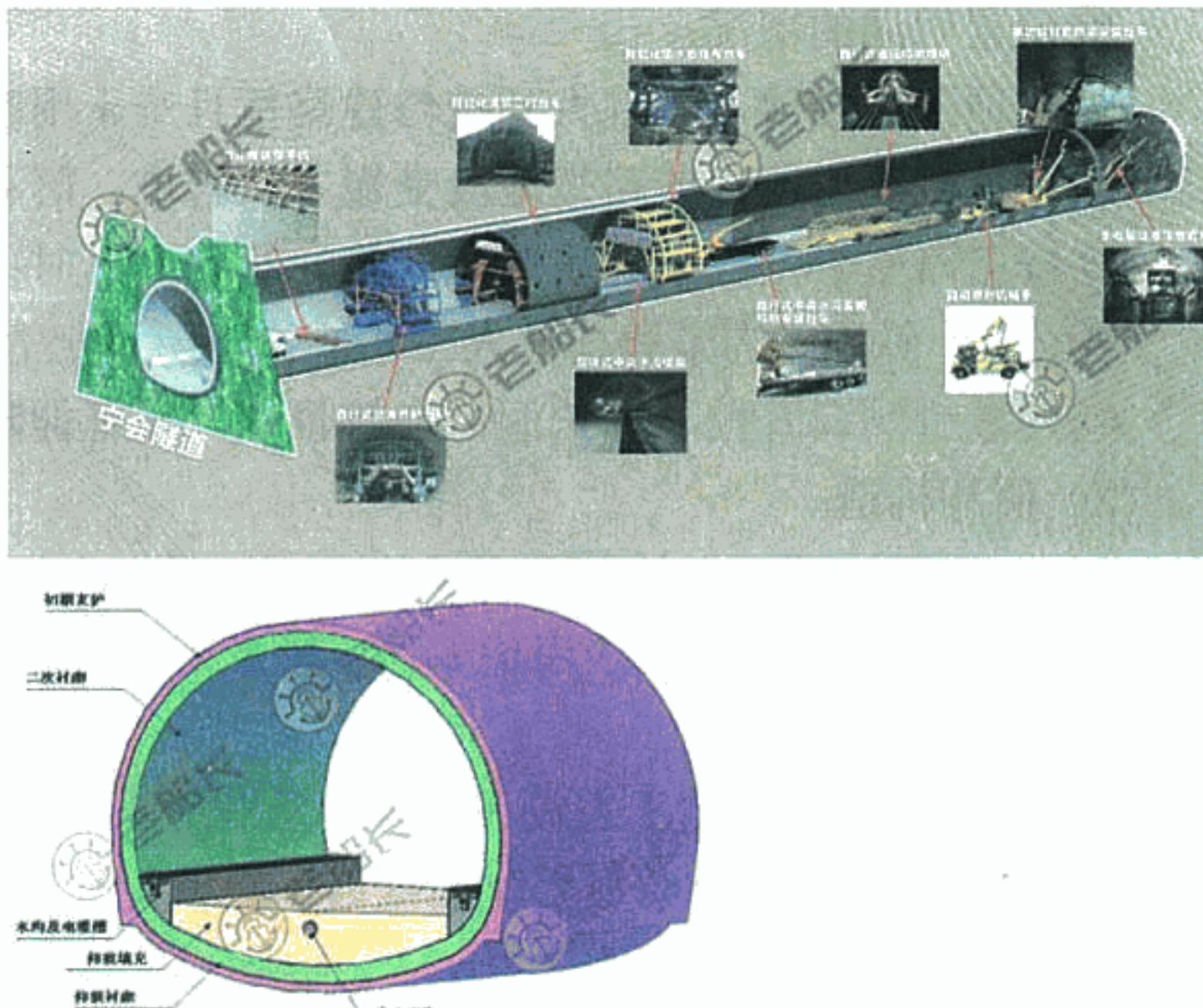
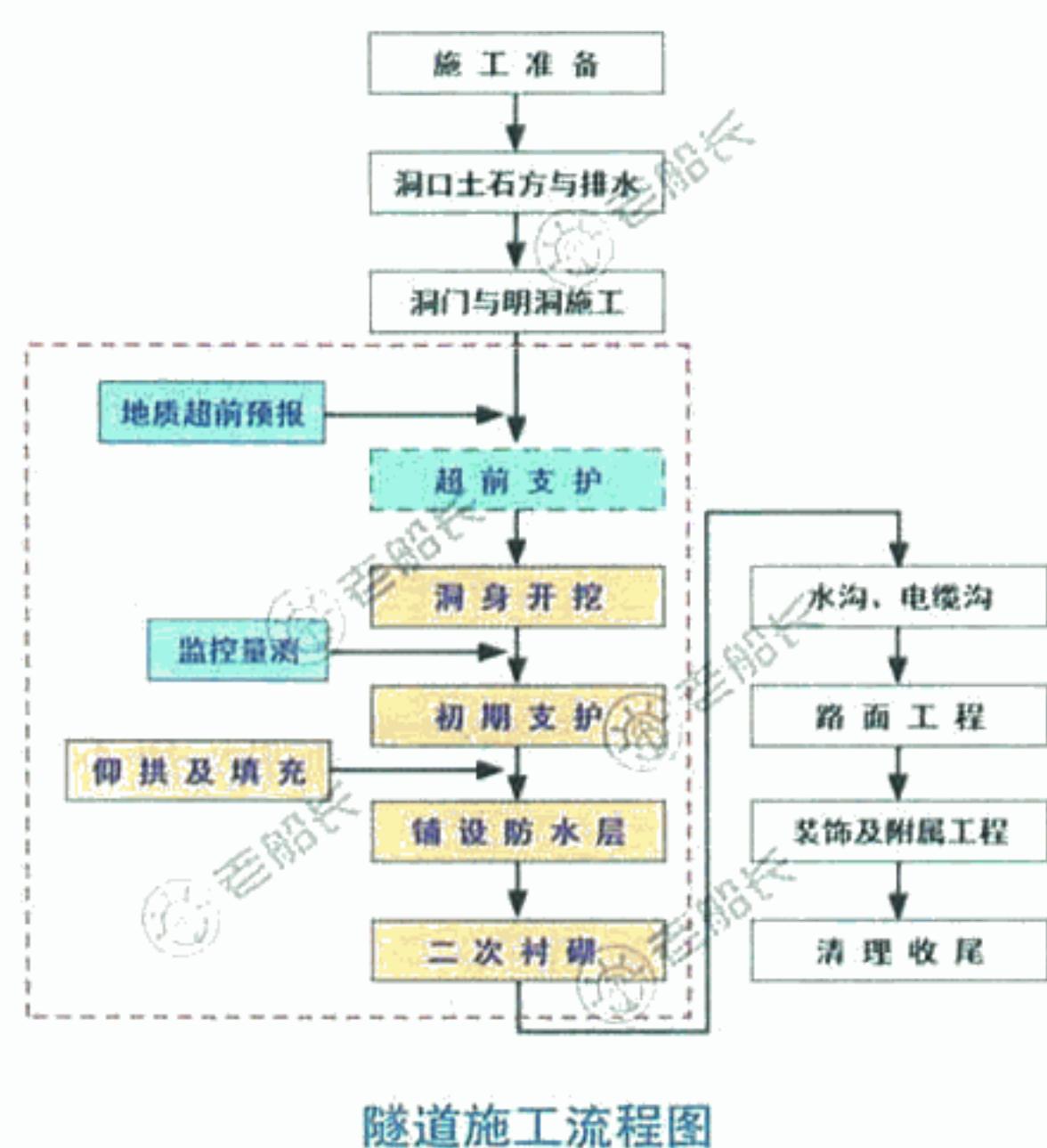
(5) 偏压衬砌段应向一般衬砌段延伸，延伸长度应根据偏压情况确定，不宜小于 10m。

(6) 净宽大于3.0m的横通道与主洞的交叉段，主洞与横通道衬砌均应加强。加强段衬砌应向各交叉洞延伸，主洞延伸长度不应小于5.0m，横通道延伸长度不应小于3.0m。延伸长度范围内不宜设变形缝。

【补充】洞身构造：分为一次衬砌和二次衬砌、防排水构造、内装饰、顶棚及路面等。

4.2 隧道地质超前预报和监控量测技术

4.2.1 隧道地质超前预报 ★★



隧道施工常规地段应实施跟踪地质调查，不良地质地段应进行地质超前预报。地质预测预报应作为必备工序纳入施工组织管理。

1. 隧道地质超前预报的目的

(1) 在施工前期地质勘察成果的基础上，进一步查明掌子面前方一定范围内围岩的地质条件，进而预测前方的不良地质以及隐伏的重大地质问题。

- (2) 为信息化设计和施工提供依据。
- (3) 为降低地质灾害发生风险提供预警。
- (4) 为编制交竣工文件提供地质资料。

2. 隧道地质超前预报的内容

- (1) 地层岩性预报，特别是对软弱夹层、破碎地层、煤层及特殊岩土的岩性预报。
- (2) 地质构造预报，特别是对断层、节理裂隙密集带、褶皱等影响岩体完整性的构造发育情况的预报。
- (3) 不良地质预报，特别是对岩溶、人为坑洞、瓦斯等发育情况的预报。
- (4) 地下水预报，特别是对岩溶管道水以及富水断层、富水褶皱轴及富水地层中的裂隙水等发育情况的预报。

【总结】地质（岩性、构造、不良）、水

3. 隧道地质超前预报方法

隧道地质超前预报方法主要有：**地质调查法**、**超前钻探法**、**物理勘探法**、**超前导洞法**、**水力联系观测**。【2012 案 II、2011 案 I】

老船长经典秒杀口诀：雨豹钻地洞看水

超前预报方法	内容
(1) 地质调查法	是隧道施工超前地质预报的 基础 ，适用于各种地质条件隧道，调查内容应包括 隧道地表补充地质调查和隧道内地质素描 。
(2) 物理勘探法	适用于长、特长隧道或地质条件复杂隧道的地质超前预报，主要包括 弹性波反射法 、 地质雷达法 、 陆地声呐法 、 红外探测法 、 瞬变电磁法 、 高分辨直流电法 。【2023 单 II、2021 单 I】
(3) TSP 法	适用于各种地质条件，对 断层 、 软硬接触面 等面状结构反射信号较为明显。【2021 单 II】
(4) 地质雷达法	适用于 岩溶 、 采空区 探测，也可用于探测断层破碎带、软弱夹层等不均匀地质体。
(5) 超前钻探法	富水构造破碎带 、 富水岩溶发育地段 、 煤系或油气地层 、 瓦斯发育区 、 采空区 以及 重大物探异常地段 等地质复杂隧道和 水下隧道 必须采用 超前钻探法 预报、评价前方地质情况。【2021 单 II】
(6) 超前导洞法	可采用 平行超前导洞法 和 隧道内超前导洞法 ，两座并行隧道可根据先行开挖的隧道预测后开挖隧道的地质条件。
(7) 水力联系观测	当隧道 排水 或 突涌水 对地下水资源或周围建（构）筑物产生重大影响时，应进行 水力联系观测 。

4. 隧道地质超前预报的分级与分类【2019 单 I、2018 单 I】

1) 地质超前预报的分级

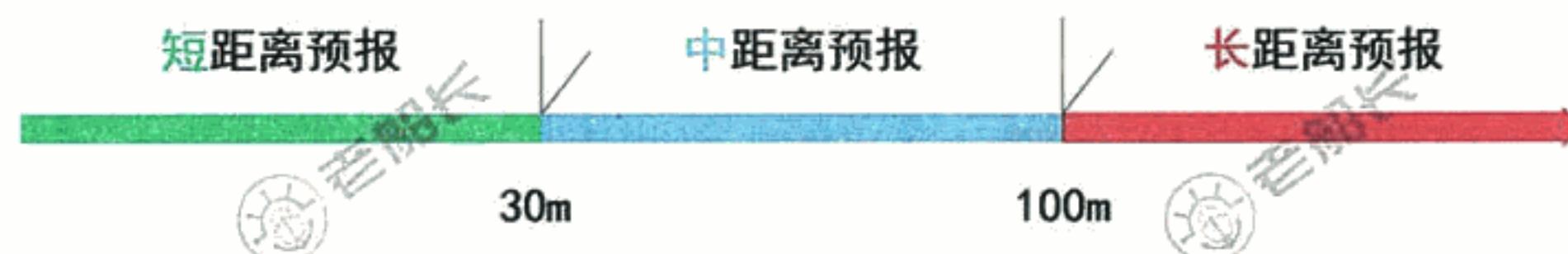
根据地质复杂程度，包括岩溶发育程度、涌水涌泥程度、断层稳定程度、地应力影响程度和瓦斯影响程度，地质预测预报分为**A、B、C**和**D**四个等级。

超前预报等级	采用超前预报方法
A 级地质超前预报	采用 地质分析法 、 弹性波反射法 （地震波法、水平声波剖面法、陆地声呐法）、 地质雷达法 、 高分辨直流电法 、 超前水平钻探法 等进行综合预报。
B 级地质超前预报	采用 地质分析法 、 弹性波反射法 （地震波法、水平声波剖面法、陆地声呐法），辅以 高分辨直流电法 、 地质雷达法 ，必要时进行超前水平钻孔。
C 级超前地质预报	以地质分析法为主 。对重要地质层界面、断层或物探异常地段宜采用 弹性波反射法 （地震波法、水平声波剖面法、陆地声呐法）进行探测，必要时采用超前水平钻孔。
D 级超前地质预报	采用 地质分析法 ，必要时补充其他方法。

2) 地质超前预报按预报长度可以分为以下三类：

按预报长度分类	预报长度 L (m)	可采用方法
短距离预报	L < 30	地质调查法 、 超前钻探法
中距离预报	30 ≤ L < 100	
长距离预报	L ≥ 100	弹性波反射法

3849178

**超前地质预报按预报长度分为三类****4.2.2 隧道施工监控量测技术 ★★★**

隧道开工前，应编制施工全过程监控量测方案。内容应包括：量测项目、量测仪器选择、测点布置、量测频率、数据处理、信息反馈、组织机构、管理体系等。

老船长经典秒杀口诀：提点心骑驴数相纸

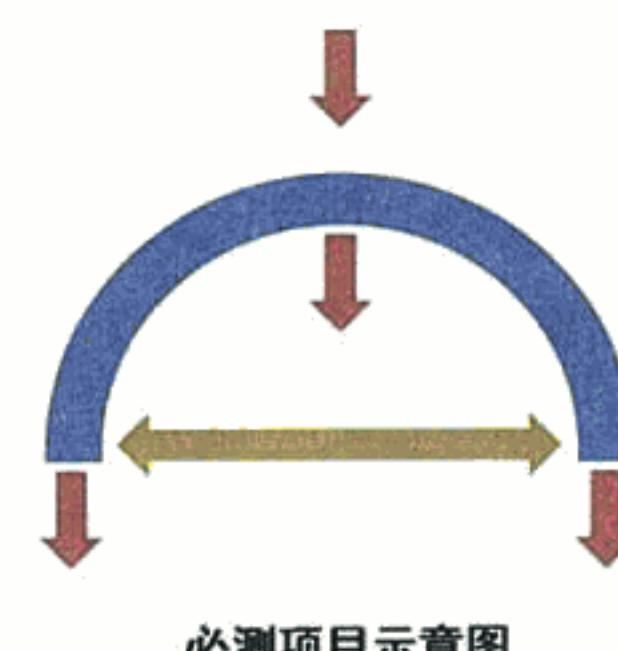
1. 监控量测的目的（了解）

- (1) 掌握围岩和支护的动态信息并及时反馈，指导施工作业。
- (2) 通过对围岩和支护的变形、应力量测，为修改设计提供依据。

2. 量测内容与方法【2023单I、2022案II、2021多II、2018案II、2017单II、2014多I、2011单I、2010案I、2009单II】

- (1) 现场量测分为必测项目和选测项目两大类。

隧道现场监控量测必测项目		
序号	项目名称	方法及工具
1	洞内、外观察	现场观测、地质罗盘
2	周边位移	收敛计、全站仪
3	拱顶下沉	
4	地表下沉	水准仪、(钢)钢尺、全站仪
5	拱脚下沉	



老船长经典秒杀口诀：周董表定焦

【2011多I】下列复合式衬砌隧道施工监控量测项目中，属于必测的有（ ）。

- A. 周边位移 B. 围岩体内位移 C. 拱顶下沉
D. 钢支撑内力及外力 E. 围岩压力及两层支护间压力

【答案】AC

【2014多I】下列隧道现场监控量测项目中，属于选测项目的有（ ）。

- A. 周边位移 B. 围岩压力 C. 围岩体内位移 D. 锚杆轴力

【答案】BCD

(2) 复合式衬砌和喷锚衬砌隧道施工时必须进行必测项目的量测。

(3) 洞内必测项目，各测点宜在靠近掌子面、不受爆破影响范围内尽快安设，初读数应在每次开挖后 12h 内、下一循环开挖前取得，最迟不得超过 24h。

(4) 洞内必测项目各测点应埋入围岩中，深度不应小于 0.2m，不应焊接在钢架上，外露部分应有保护装置。

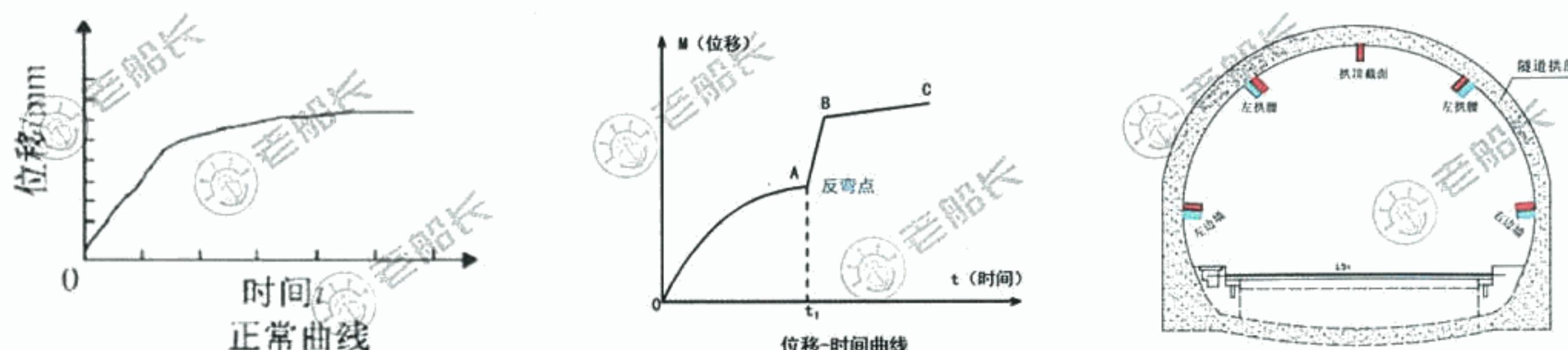
(5) 各项量测作业均应持续到量测断面开挖支护全部结束，临时支护拆除完成，且变形基本稳定后 15~20d。

3. 量测数据处理与应用

(1) 应及时对现场量测数据绘制时态曲线（或散点图）和空间关系曲线。

(2) 当位移-时间曲线趋于平缓时，应进行数据处理回归分析，以推算最终位移和掌握位移变化规律。

(3) 当位移-时间曲线出现反弯点时，则表明围岩和支护已呈不稳定状态，此时应密切监视围岩动态，并加强支护，必要时暂停开挖。**【2013 案 II、2011 案 I】**



(4) 隧道监控量测工作应根据控制基准建立预警机制，可按下表实行分级管理。（分为 3 级）**【2022 案 II、2023 单 II】**

位移管理等级

管理等级	管理位移 (mm)	施工状态
III	$U < (U_0/3)$	可正常施工
II	$(U_0/3) \leq U \leq (2U_0/3)$	应加强支护
I	$U > (2U_0/3)$	应采取特殊措施

注：U—实测位移值； U_0 —设计极限位移值

【补充了解】通常情况下，设计图纸会给出隧道初期支护的预留变形量，为了确保围岩和初期支护不侵入二次衬砌空间，并保证二次衬砌以后，隧道建筑限界准确，可将隧道的设计预留变形量作为极限位移进行控制。

遇到下列情况之一时，也应提出预警并分级管理。

- ① 支护结构出现开裂，实行 I 级管理；
- ② 地表出现开裂、坍塌，实行 I 级管理；
- ③ 渗水压力或水流量突然增大，实行 II 级管理；
- ④ 水体颜色或悬着物发生变化，实行 II 级管理。

老船长经典秒杀口诀：开水一二（开裂-I 级管理；水-II 级管理。）

(5) 二次衬砌应在满足下列要求时进行：

- ①隧道水平净空变化速度及拱顶或底板垂直位移速度明显下降；
②隧道位移相对值已达到相对位移量的 90%以上。

对浅埋、软弱、高地应力围岩等特殊地段应视现场情况确定。

4. 量测管理

隧道现场监控量测应成立专门测量小组，由施工单位或委托其他单位承担量测任务。不得中断工作。

5. 竣工文件中应包括的量测资料

- (1) 现场监控量测计划。
- (2) 实际测点布置图
- (3) 围岩和支护的位移-时间曲线图、空间关系曲线图以及量测记录汇总表。
- (4) 经量测变更设计和改变施工方法地段的信息反馈记录。
- (5) 现场监控量测说明

【总结】三图一表一计划

4.3 隧道施工

4.3.1 隧道施工准备与施工测量 ★★

1. 施工准备

隧道开工前，应完成分项工程划分、先期工程施工方案编制、混凝土配合比设计等技术准备工作。

1) 施工场地

- (1) 应事先规划，以洞口为中心布置并减少与现有道路交叉和干扰。
- (2) 隧道洞外宜设置机械设备安装、维修和停放的场地。
- (3) 砂石料应分区存放。
- (4) 施工场地周边开挖应采取降低开挖高度和面积、挡护等保持边坡稳定措施。

2) 临时工程

【补充】临时工程主要包括四通（通水、通电、通路、通信畅通）一平（平整场地）及临时房屋等。

临时工程应符合下列规定：

(1) 严禁将临时房屋和设施布置在可能受洪水、泥石流、塌方、滑坡及雪崩等自然灾害威胁的地段。

(2) 临时工程应在隧道开工前完成。

3) 施工人员、材料和设备

(1) 隧道施工人员应经过岗前专业培训，接受安全、职业健康等教育。特种作业人员应持证上岗。

(2) 施工前应对施工人员进行技术交底。

(3) 二次衬砌模板台车宜在隧道开挖进洞前准备到位。

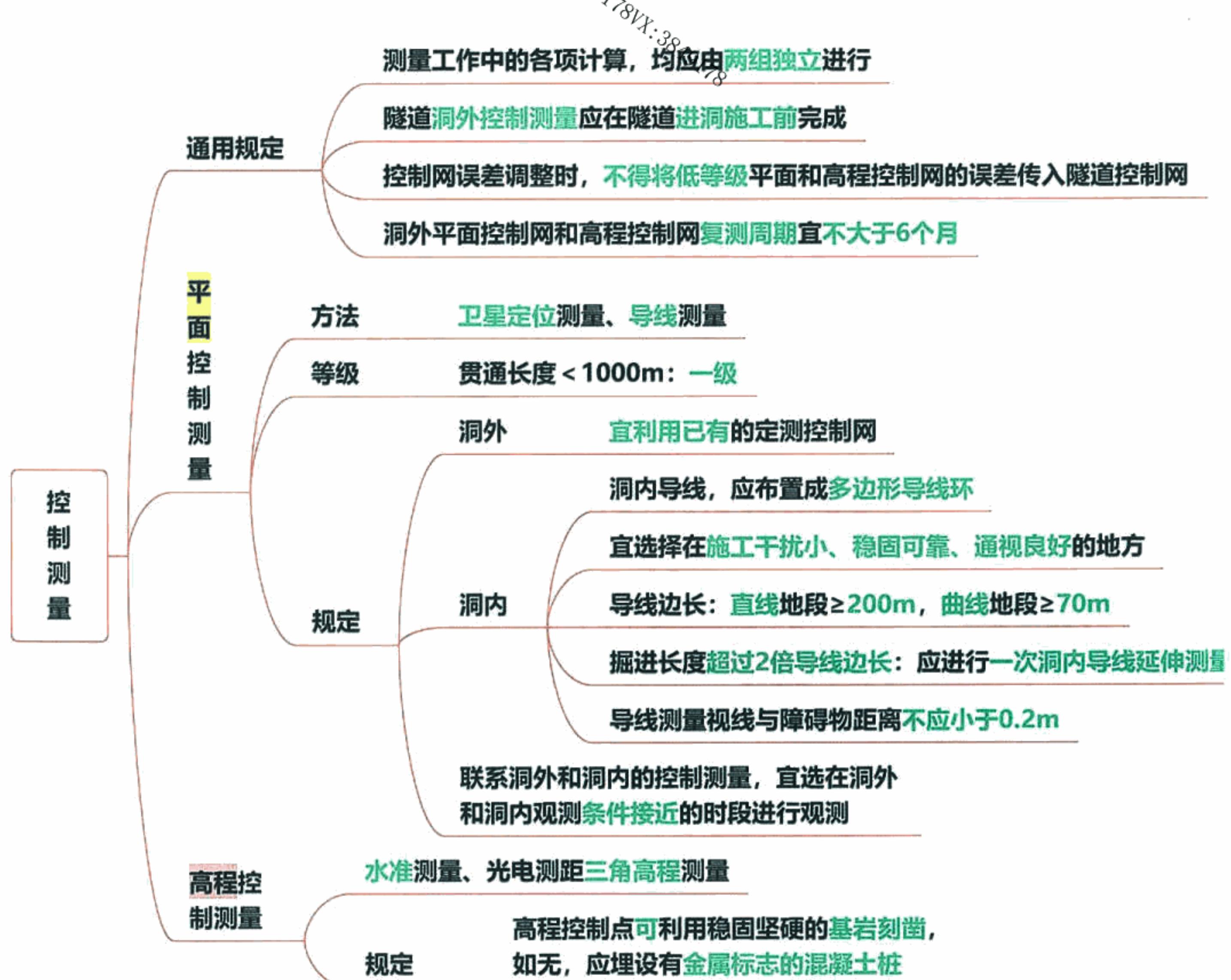
4) 风险控制

(1) 应依据风险评估结论，对风险等级较高的分部分项工程编制专项施工方案。

2. 施工测量

隧道施工测量的平面坐标系和高程系统宜与定测隧道控制网坐标系和高程系统一致。平面控制网的运算及平差计算的基准平面宜与定测控制网一致，或者采用隧道纵断面设计高程的平均高程面。投影分带位置不宜设在隧道处。

1) 控制测量

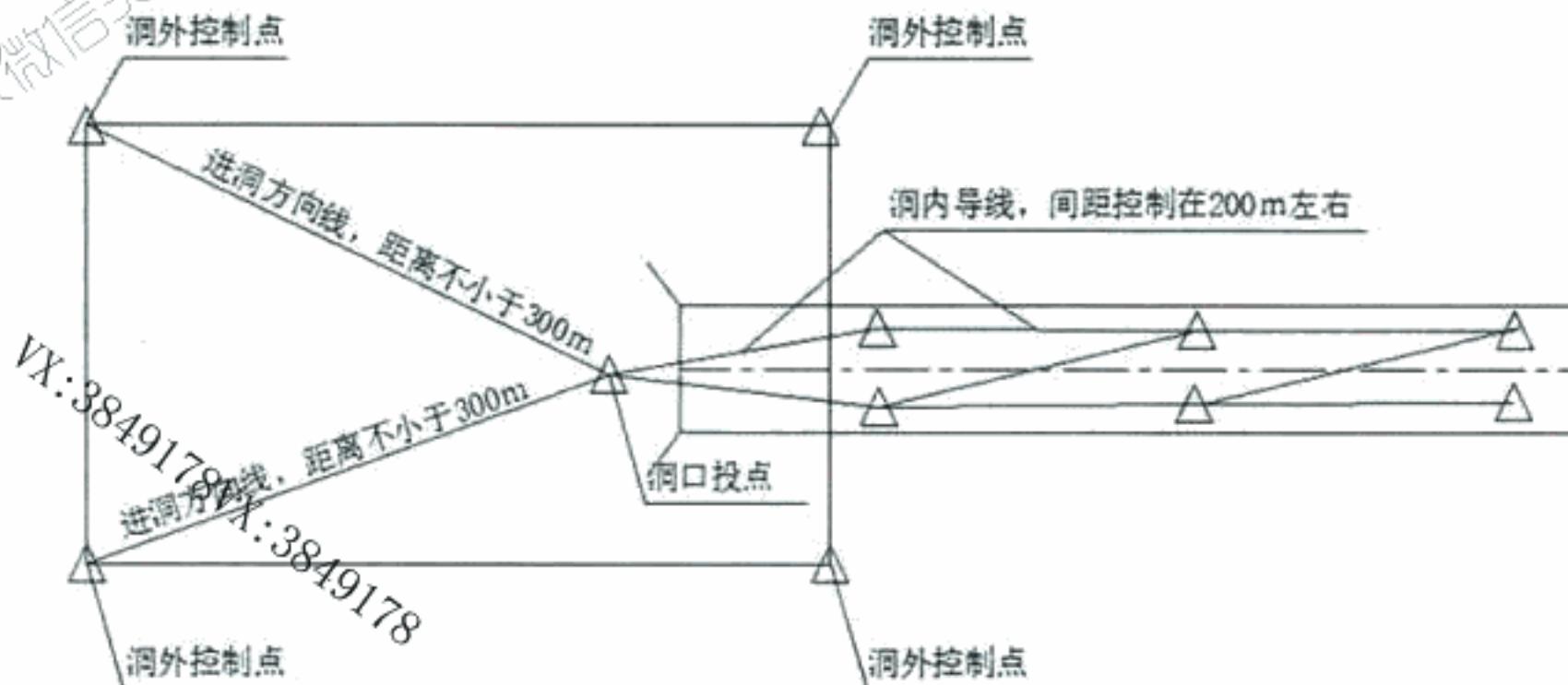


2) 放样测量

(1) 用导线法进行洞内控制测量的隧道，需要使用施工中线点放样时，应由洞内导线测设施工中线。

(2) 用中线法进行洞内测量的隧道，直线地段宜采用正倒镜延伸直线法。

隧道洞内、外导线布设示意图



(3) 供衬砌用的临时中线点的间距宜与模板长度一致。

(4) 防水板施工前，应复核中线位置和高程，检查断面尺寸，确定衬砌施工后的衬砌厚度和净空满足规范和设计要求。

(5) 直线段，可使用激光设备导向。

3) 贯通误差测定及调整

(1) 采用导线法测量时，在贯通面附近定一临时点，由两端分别测量该点的坐标，所得的闭合差分别投影至贯通面及其垂直方向，得出实际的横向和纵向贯通误差，再将全站仪置于该临时点测求方位角贯通误差。

(2) 采用中线法测量时，由两端向中间进行测量，在贯通面上分别得出中线点，量出两点的横向和纵向距离，即为该隧道的实际贯通误差。

(3) 由两端向中间进行水准测量，分别测至贯通面附近的同一高程控制点或中线点上，所测得的高程差值即为实际的高程贯通误差。

(4) 隧道贯通后，洞内导线、施工中线及高程的实际贯通误差，应在贯通面两侧未衬砌段调整。该贯通误差调整段的长度应根据中线形式、贯通误差值、支护和衬砌（包括仰拱）施工情况综合确定，宜大于100m，贯通面两侧对称。

两端开挖至贯通误差调整地段时，开挖断面宜适当加宽。二次衬砌在贯通前施工时，贯通误差调整地段开挖断面应加宽；加宽值宜不超过贯通极限误差允许值的一半。

贯通长度 $L < 3000m$ 的横向贯通误差限值 $\leq 150mm$ ，高程中误差 $\leq 70mm$ 。

4) 交（竣）工测量

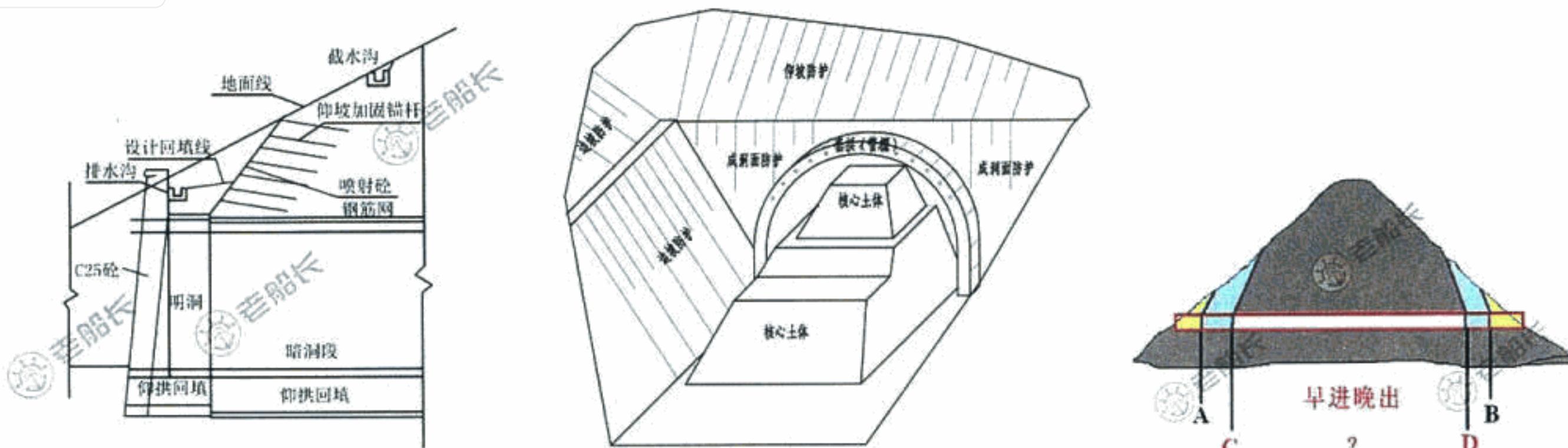
(1) 应提交贯通测量技术成果书、贯通误差的实测成果和说明、净空断面测量和永久中线点、水准点的实测成果及示意图。

4.3.2 隧道洞口、明洞施工 ★★★

1. 洞口工程

洞口工程是指洞口土石方、边仰坡、洞门及其相邻的翼墙、挡土墙及洞口排水系统等。

【补充】隧道洞口施工流程：截水沟施工→边、仰坡开挖→边、仰坡防护→套拱及长管棚施工。



隧道洞口开挖应遵循“早进晚出”的原则。

1) 洞口开挖与防护规定

(1) 洞口边坡及仰坡应自上而下开挖，不得掏底开挖或上下重叠开挖。

(2) 宜采用人工配合机械开挖，或者采用控制爆破措施减少对边仰坡及围岩的扰动。（即：光面爆破和预裂爆破。严禁采用大爆破。）

2) 洞口截、排水设施规定

(1) 洞口截、排水设施应在雨季和融雪期之前完成。【2022案I】

(2) 截水沟迎水面不得高于原地面。【2022案I】

3) 洞门墙施工规定【2020单I】

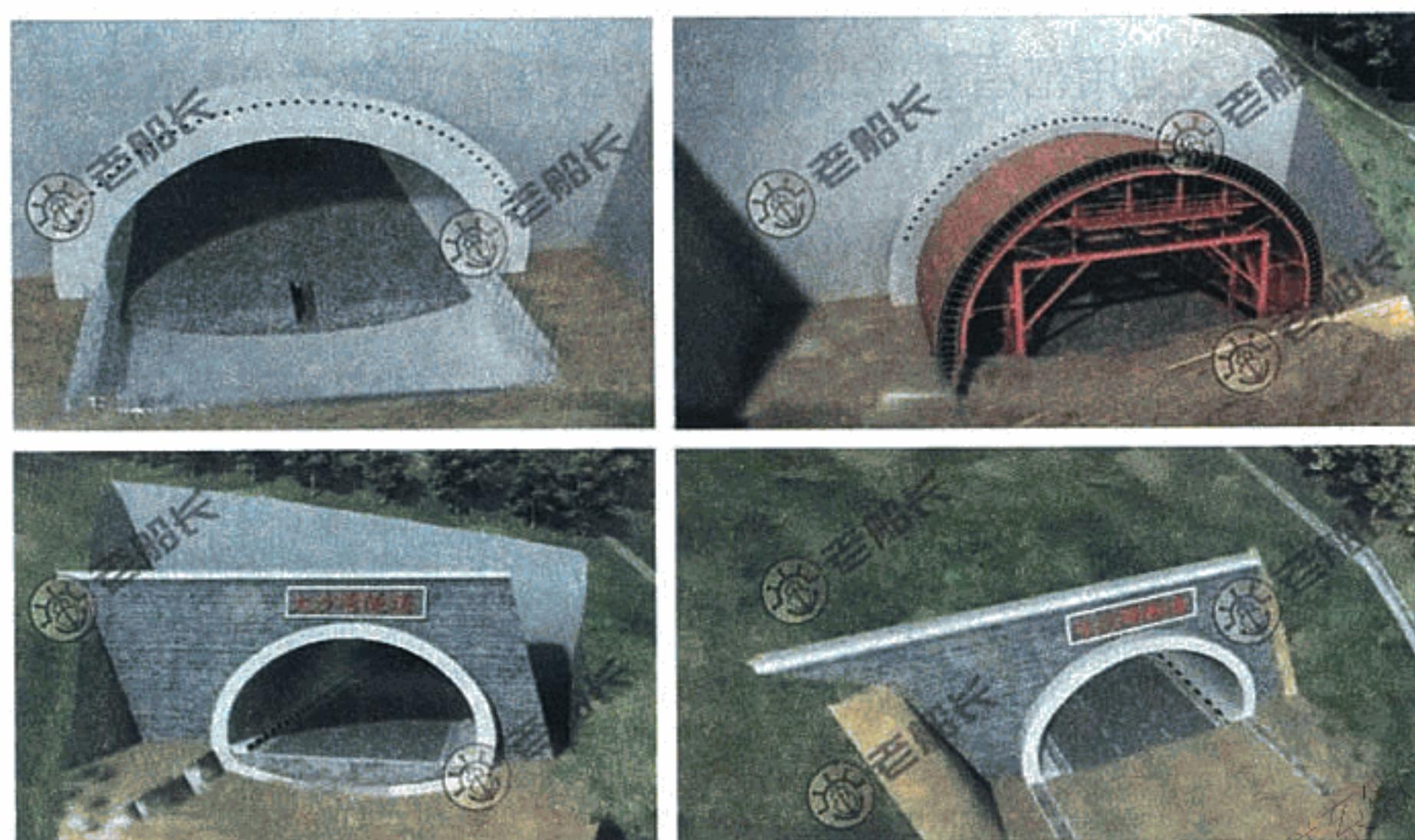
(1) 洞门墙宜在洞口衬砌施工完成后及时施作。

(2) 洞口砌筑两侧端墙砌筑和回填应对称进行。

(3) 洞门墙背排水设施应与洞门墙同步施工。

2. 明洞工程

【补充】明洞施工流程：仰拱及填充施工→衬砌混凝土施工→铺设防水层和排水盲管→洞门墙施工→明洞回填。



1) 明洞边墙基础施工规定

(1) 基础开挖应核对地质条件，检测地基承载力。当地基不满足设计要求时，应及时上报监

理、设计单位，并按设计单位提供的处理方案施工。

(2) 偏压和单压明洞外边墙的基底，在垂直路线方向应按设计要求挖成一定坡度的斜坡，提高边墙抗滑力。

(3) 基础混凝土灌注前必须排除坑内积水，边墙基础完成后应及时回填。

2) 明洞回填施工规定

(1) 明洞拱背回填应在外模拆除、防水层和排水盲管施工完成后进行；人工回填时，拱圈混凝土强度应不小于设计强度的75%。机械回填时，拱圈混凝土强度应不小于设计强度。

(2) 明洞两侧回填水平宽度小于1.2m的范围应采用浆砌片石或同级混凝土回填。

(3) 回填材料不宜采用膨胀岩土。

(4) 回填顶面0.2m可用耕植土回填。

(5) 明洞土石回填应对称分层夯实，分层厚度不宜大于0.3m，两侧回填高差不应大于0.5m，回填到拱顶以上1.0m后，方可采用机械碾压。

(6) 单侧设有反压墙的明洞回填应在反压墙施工完成后进行。

(7) 回填时不得倾填作业。

(8) 洞门顶排水沟砌筑在填土上时，应在夯实后砌筑。

3. 浅埋段工程

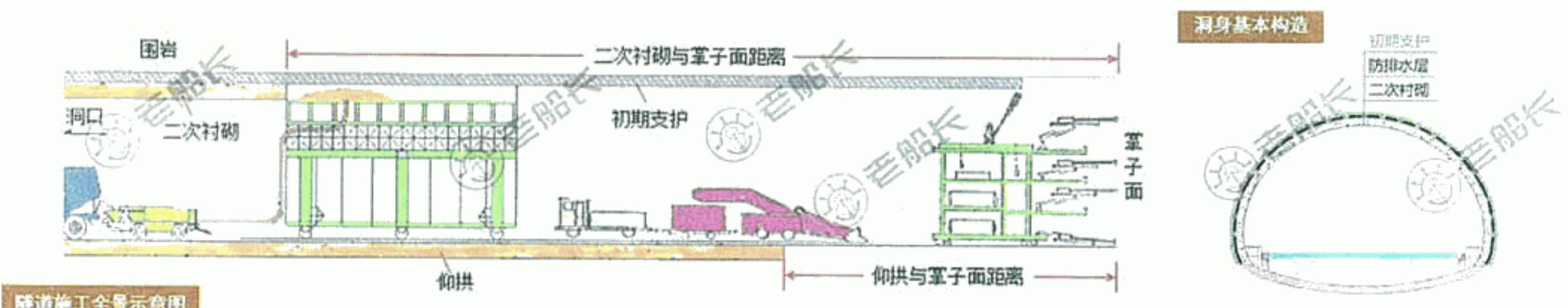
浅埋段的开挖施工应遵循“管超前、严注浆、短开挖、强支护、早封闭、勤量测、速反馈、控沉陷”的原则。

围岩自稳能力差的浅埋段，可选择地表降水、地表加固、管棚、超前小导管、预注浆等辅助工程措施。

浅埋隧道应加强初期支护和减小爆破振动，及时施作初期支护，尽早施作二次衬砌。

4.3.3 隧道开挖 ★★★

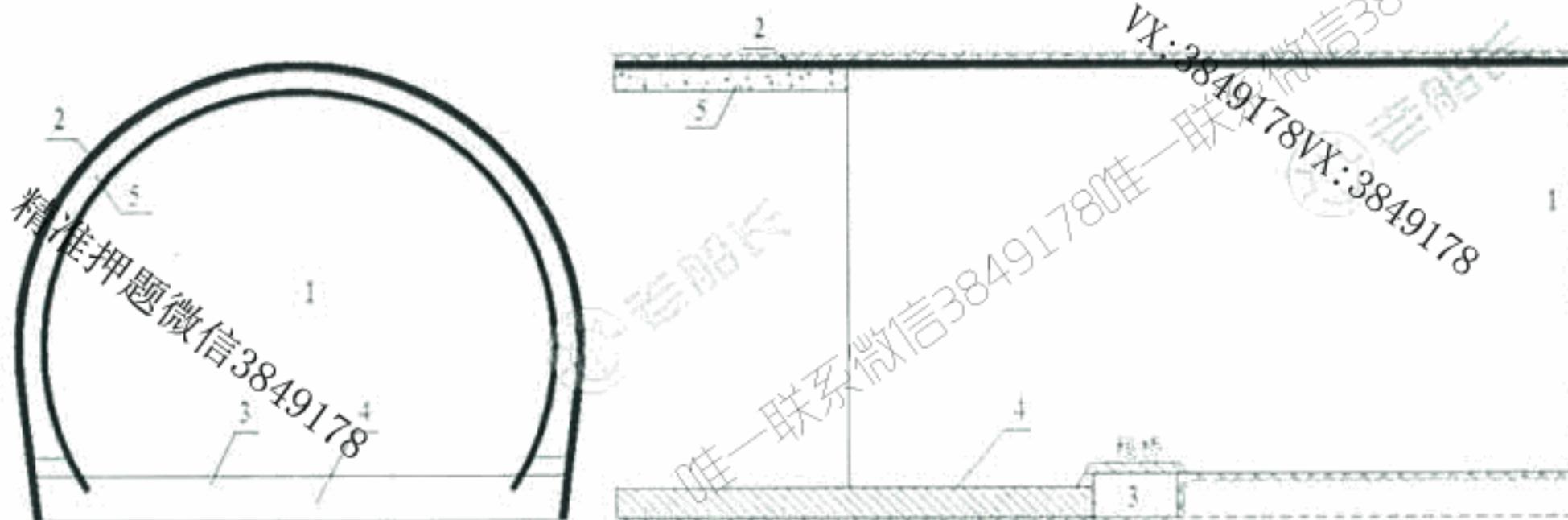
1. 隧道主要开挖方法及适用范围【2023案I、2022案I、2022单I、2021单II、2020多II、2019案II、2018案I、2018多I、2017案II、2015案I、2015单I、2013案I、2013多I、2012单II、2011案I、2010案I、2010单II、2009单I、2005多I】



1) 开挖方法

公路隧道的开挖方法主要有全断面法、台阶法、环形开挖预留核心土法、中隔壁法、交叉中隔壁法及双侧壁导坑法。

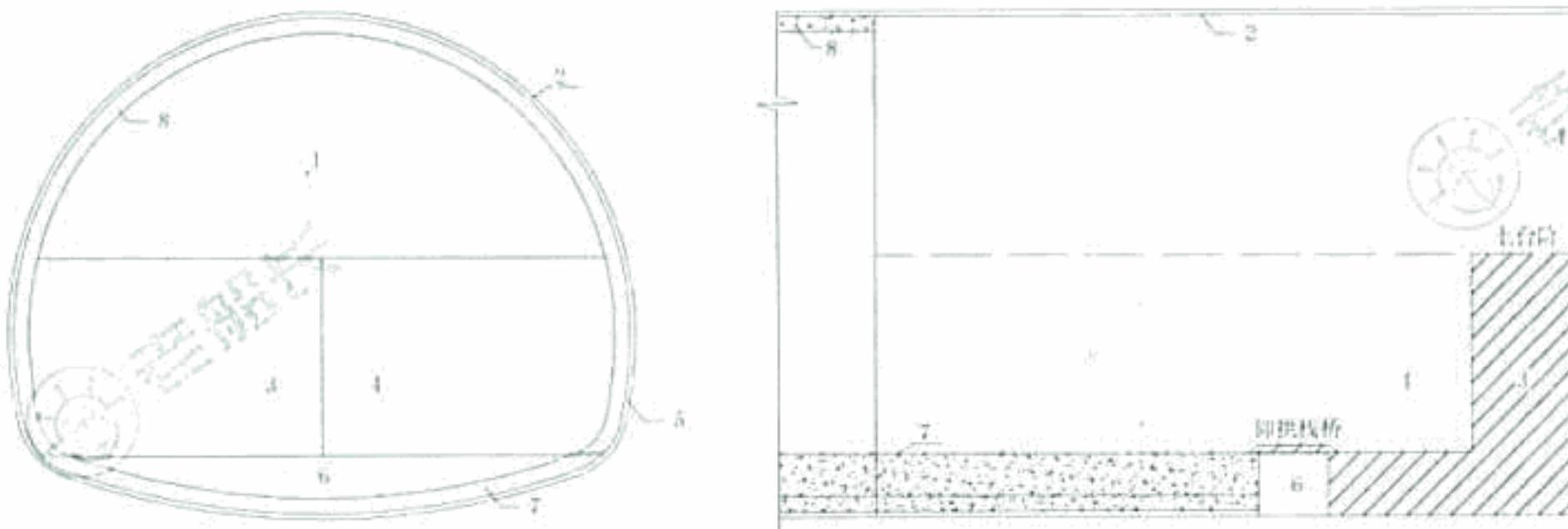
(1) 全断面法：按设计断面一次基本开挖成形的施工方法。



注：1-全断面开挖；2-初期支护；3-隧道底部开挖（拱底）；4-底板（仰拱及填充）浇筑；5-拱墙二次衬砌

全断面法施工工序示意图

(2) **台阶法**：先开挖上半断面，待开挖至一定距离后再同时开挖下半断面，上下半断面同时并进的施工方法。



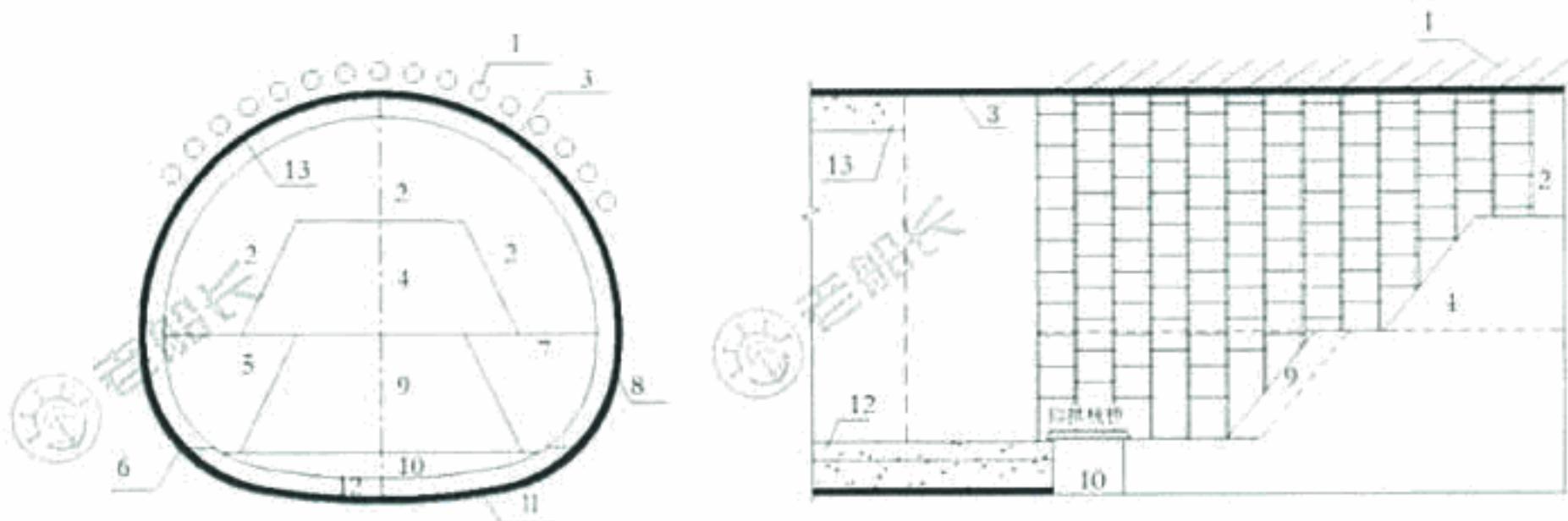
注：1-上台阶开挖；2-上台阶初期支护；3、4-下台阶错开开挖；5-下台阶初期支护；6-底部开挖（拱底）；
7-仰拱及填充（底板）；8-二次衬砌

两台阶法施工工序示意图

【补充】台阶长度：超短台阶（3~5m）；短台阶（5~50m）；长台阶（>50m）。

老船长经典秒杀口诀：三无五菱（假的）

(3) **环形开挖预留核心土法**：先开挖上台阶成环形，并进行支护，再分部开挖中部核心土、两侧边墙的施工方法。

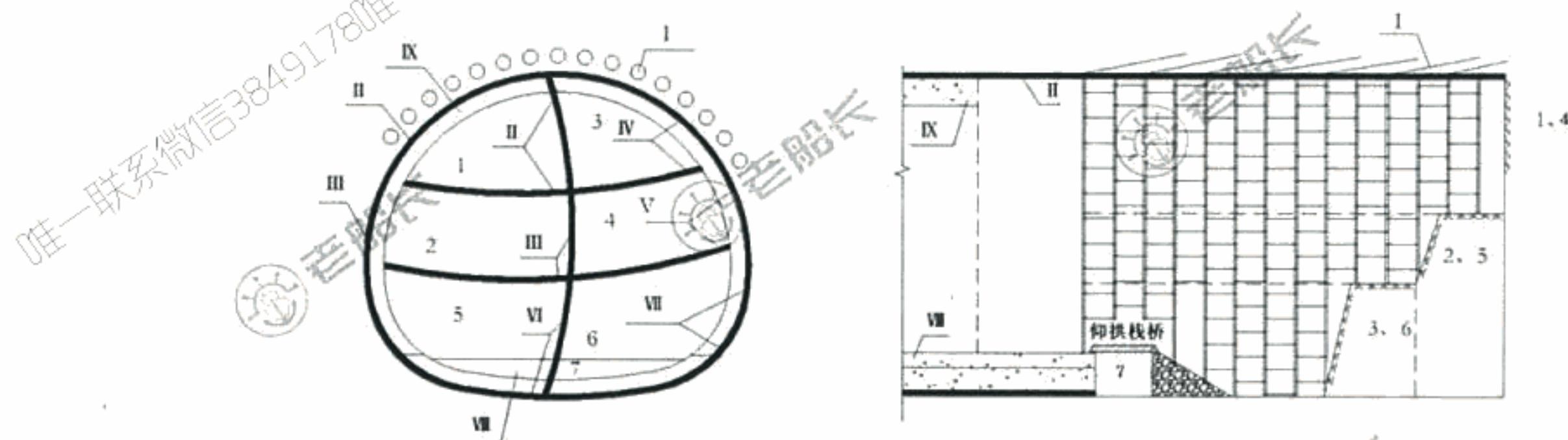


注：1-超前支护；2-上部环形导坑开挖；3-上部初期支护；4-上部核心土开挖；5、7-两侧开挖；6、8-两侧初期支护；9-下部核心土开挖；10-仰拱开挖；11-仰拱初期支护；12-仰拱及填充混凝土；13-拱墙二次衬砌

两台阶环形开挖留核心土法开挖法施工工序示意图

(4) 中隔壁法 (CD 法)：在软弱围岩大跨隧道中，先开挖隧道的一侧，施作中隔壁墙，然后再分部开挖隧道另一侧的施工方法。

(5) 交叉中隔壁法 (CRD 法)：是一种在中隔壁法的基础上增加临时仰拱，更快地封闭初支的施工方法。



注：1-超前支护；2-左侧上部开挖；3-左侧中部初期支护成环；4-右侧上部开挖；5-左侧下部开挖；6-右侧中部初期支护成环；7-右侧下部开挖；8-拆除中隔壁及临时仰拱；9-仰拱及填充混凝土；10-拱墙二次衬砌

交叉中隔壁法施工工序示意图

(6) 双侧壁导坑法：先开挖隧道两侧的导坑，进行初期支护，再分部开挖剩余部分的施工方法。

2) 适用范围 (教材有问题，按此表格记熟)

不同围岩条件和开挖断面适宜的开挖方法

序号	开挖方法	围岩级别	
		双车道隧道	三车道隧道
1	全断面法	I~III	I~II
2	台阶法	III~IV	II~III
	短台阶法	IV~V	III~IV
	超短台阶法	V	IV
3	环形开挖留核心土法	V~VI	III~IV
	中隔壁法		IV~V
	交叉中隔壁法		IV~VI
	双侧壁导坑法	--	V~VI

2. 隧道开挖的要求【2014 单 II、2007 单 I】

1) 全断面法施工应符合的要求

(1) 循环进尺：III 级围岩宜控制在 3m 左右，I、II 级围岩，使用气腿式凿岩机时可控制在 4m 左右。

2) 台阶法施工应符合的要求

(1) 台阶开挖高度宜为 2.5~3.5m。台阶数量可采用二台阶或者三台阶，不宜大于三个台阶。

(2) 上台阶开挖每循环进尺, III级围岩宜不大于3m; IV级围岩宜不大于2榀钢架间距; V级围岩宜不大于1榀钢架间距。IV、V级围岩下台阶每循环进尺宜不大于2榀钢架间距。

下台阶单侧拉槽长度宜不超过15m。

(3) 下台阶左、右侧开挖宜前后错开3~5m, 同一榀钢架两侧不得同时悬空。

(4) 下台阶应在上台阶喷射混凝土强度达到设计强度的70%以后开挖。

3) 环形开挖留核心土法施工应符合的要求

(1) 台阶开挖高度宜为2.5~3.5m。(同台阶法)

(2) 环形开挖每循环进尺, V级围岩宜不大于1榀钢架间距, IV级围岩宜不大于2榀钢架间距。中下台阶每循环进尺不得大于2榀钢架间距。核心土面积不小于断面面积的50%。

(3) 拱部超前支护完成后, 方可开挖上台阶环形导坑; 留核心土长度宜为3~5m, 宽度宜为隧道开挖宽度的1/3~1/2。

(4) 各台阶留核心土开挖每循环进尺宜与其他分部循环进尺相一致。

(5) 核心土与下台阶开挖应在上台阶支护完成且喷射混凝土强度达到设计强度的70%后进行。

下台阶左、右侧开挖应错开3~5m, 同一榀钢架两侧不得同时悬空。(同台阶法)

(6) 仰拱施作应紧跟下台阶, 及时闭合成稳固的支护体系。

4) 中隔壁法、交叉中隔壁法施工应符合的要求

二者通用要求:

(1) 开挖进尺不得大于1榀钢架间距。

(2) 初期支护完成、强度达到设计规定(100%设计强度)后方可进行下一分部的开挖。

(3) 临时支护拆除宜在仰拱施工前进行。临时支护拆除后, 应及时浇筑仰拱、填充仰拱、施作拱墙二次衬砌。

交叉中隔壁法独有要求:

(1) 每个台阶底部均应按设计规定及时施作临时钢架或临时仰拱。

(2) 临时支护拆除前后, 应进行变形量测。

5) 双侧壁导坑法施工应符合的要求

(1) 导坑跨度宜为整个隧道开挖宽度的1/3。

(2) 导坑与中间土体同时施工时, 导坑应超前30~50m。

(3) 侧壁导坑开挖后, 应及时施工初期支护并尽早形成封闭环。

(4) 临时支护拆除宜在仰拱施工前进行。临时支护拆除后, 应及时浇筑仰拱、填充仰拱、施作拱墙二次衬砌。(同CD、CRD)

(5) 临时支护拆除前后, 应进行变形量测。(同CRD)

6) 仰拱部位开挖应符合的要求

(1) 必要时, 仰拱应紧跟掌子面。

(2) 仰拱开挖长度: 土和软岩应不大于3m, 硬岩应不大于5m。开挖后应及时施作仰拱初期支护、二次衬砌及填充。

(3) 应做好排水措施, 清除底面积水和松渣, 严禁松渣回填。

7) 开挖方法转换应符合的要求

(1) 分部断面变大、支护变弱应在较好的围岩段中进行。

(2) 转换前应进行技术交底。

(3) 转换应逐渐过渡。

3. 隧道超欠挖控制（宁超勿欠）

隧道开挖轮廓应根据设计开挖轮廓和围岩变形量确定，规定预留变形量可根据设计预测值或下表选择初始值，并根据监控量测信息调整。

双车道隧道开挖轮廓预留变形量

围岩级别	I	II	III	IV	V	VI
预留变形量 (mm)	-	-	20~50	50~80	80~120	依据设计和现场监控量测信息确定

(1) 应严格控制欠挖，当岩层完整、岩石抗压强度 $>30MPa$ ，确认不影响衬砌结构稳定和强度时，允许岩石个别突出部分（每 $1m^2$ 内不宜大于 $0.1m^2$ ）欠挖，但其隆起量不得大于 $50mm$ 。拱脚、墙脚以上 $1m$ 范围内及净空图折角对应位置严禁欠挖。【2021 案 I】

(2) 应采取光面爆破、提高钻孔精度、控制药量等措施，提高作业人员的技术水平。

(3) 开挖后宜采用断面仪或激光投影仪直接测定开挖面面积，并绘制断面图。

(4) 当采用钢架支撑时，如围岩变形较大，支撑可能沉落或局部支撑难以拆除时，应适当加大开挖断面，预留支撑沉落量，保证衬砌设计厚度。

(5) 宜减少超挖。

(6) 超挖应回填密实，超挖回填应符合下列规定：【2023 多 II】

超挖类型	处理方法	
①拱部坍塌形成的超挖	应编制方案，经审批后按方案处理	
②沿设计轮廓线的均匀超挖	A. 有钢架	可采用喷射混凝土回填，或增大钢架支护断面尺寸，使钢架贴近开挖轮廓。在施工二次衬砌时，以二次衬砌混凝土回填
	B. 无钢架	可在施工二次衬砌时，以二次衬砌混凝土回填
③局部超挖	超挖量 $\leq 200mm$ 时，宜采用喷射混凝土回填密实	
④边墙部位超挖	可采用混凝土或片石混凝土回填	

4. 钻孔爆破掘进施工技术要点

钻孔爆破掘进是公路隧道最常采用的掘进方式。

1) 钻孔机具

隧道工程中常使用的凿岩机有：风动凿岩机、液压凿岩台车。

2) 炮孔布置和周边孔的控制爆破

掘进工作面的炮孔可分为掏槽孔、辅助孔、周边孔。

(1) 掏槽孔布置

将开挖面上某一部位的岩石掏出一个槽，以形成新的临空面，为其他炮孔的爆破创造有利条件。掏槽炮孔一般要比其他炮孔深 $100\sim 200mm$ ，以保证爆破后开挖深度的一致。

掏槽孔可分成斜孔掏槽和直孔掏槽两大类。

①斜孔掏槽：其特点是掏槽孔与开挖面斜交。常用的有锥形掏槽、楔形掏槽、单向掏槽，其中最常用的是垂直楔形掏槽。斜孔掏槽的优点是可以按岩层的实际情况选择掏槽方式和掏槽角度，

容易把岩石抛出，而且所需掏槽孔的个数较少；缺点是孔深受坑道断面尺寸的限制，也不便于多台钻机同时凿岩。

②直孔掏槽：直孔掏槽可以实行多机凿岩和钻孔机械化，能加快掘进速度。直孔掏槽凿岩作业比较方便，不需随循环进尺的改变而变化掏槽形式，仅需改变炮孔深度；直孔掏槽石渣抛掷距离也可缩短，所以目前现场多采用直孔掏槽。

(2) 辅助孔布置

辅助孔的作用是进一步扩大掏槽体积和增大爆破量，为周边孔创造有利的爆破条件。主要解决间距和最小抵抗线问题，多由工地经验决定，一般最小抵抗线略大于炮孔间距。

(3) 周边孔布置

周边孔的作用是爆破后使坑道断面达到设计的形状和规格。周边孔原则上沿着设计轮廓均匀布置，间距和最小抵抗线应比辅助孔的小，以便爆出较为平顺的轮廓。

(4) 周边孔的控制爆破

【补充】周边炮孔痕迹保存率可按下式计算，不同岩质炮孔痕迹保存率，应符合下列规定：1) 硬岩 $\geq 80\%$ ；2) 中硬岩 $\geq 70\%$ ；3) 软岩 $\geq 50\%$ 。

$$\text{周边炮孔痕迹保存率} = \frac{\text{残留有痕迹的炮孔数}}{\text{周边孔总数}} \times 100\%$$

①光面爆破的特点【2021 单 II、2020 单 I】

光面爆破是指爆破后断面轮廓整齐，超挖和欠挖符合规定要求的爆破，其主要标准是：

- A. 开挖轮廓成型规则，岩面平整。
- B. 岩面上保存 50%以上孔痕，且无明显的爆破裂缝。
- C. 爆破后围岩壁上无危石。

隧道施工中采用光面爆破，对围岩的扰动比较轻微；大大减少了超欠挖量，节约大量的混凝土和回填片石，加快施工进度；围岩壁面平整、危石少，减轻了应力集中现象，避免局部塌落，并为喷锚支护创造了条件。

②光面爆破的主要参数

光面爆破的主要参数包括周边孔的间距(E)、光面爆破层的厚度(W)、周边孔密集系数(K=E/W)、周边孔的线装药密度等。

老船长经典秒杀口诀：吃光剧毒米线

影响光面爆破参数选择的因素很多，主要有岩石的爆破性能、炸药品种、一次爆破的断面大小及形状等，其中影响最大的是地质条件。

③预裂爆破及主要参数【2013 案 I、2012 单 I、2009 案 I、2006 单 I】

光面爆破与预裂爆破对比

项目	光面爆破	预裂爆破
起爆顺序	掏槽孔→辅助孔→周边孔	周边孔→掏槽孔→辅助孔
对围岩的扰动情况	相对大	相对小
钻孔工作量	小	大
周边孔间距、最小抵抗线	-	比光面爆破的小