

中华人民共和国行业标准

公路隧道设计规范

Code for Design of Road Tunnel

JTG D70—2004

主编单位：重庆交通科研设计院

批准部门：中华人民共和国交通部

实施日期：2004 年 11 月 01 日

人民交通出版社

2004·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

中华人民共和国行业标准公路隧道设计规范/重庆交通科研设计院主编. —北京: 人民交通出版社, 2004.8
ISBN 7-114-05180-8

I. 中… II. 重 III. 公路隧道-隧道工程-设计-行业标准-中国 IV. U459.2-65

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 079953 号

中华人民共和国行业标准

公路隧道设计规范

JTG D70—2004

重庆交通科研设计院 主编

人民交通出版社出版发行

(100011 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号)

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本: 880 × 1230 1/16 印张: 16.25 字数: 360 千

2004 年 9 月 第 1 版

2004 年 9 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—10000 册 定价: 50.00 元

ISBN 7-114-05180-8

关于发布《公路隧道设计规范》 (JTG D70—2004)的公告

第 19 号

现发布《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004),自 2004 年 11 月 1 日起实行,原《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90)同时废止。

《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)中第 1.0.3、1.0.5、1.0.6、1.0.7、3.1.1、3.1.3、7.1.2、8.1.2、10.1.1、15.1.1、15.1.2、16.1.1 条为强制性条文,必须按照国家有关工程建设标准强制性条文的有关规定严格执行。《工程建设标准强制性条文》(公路工程部分)2002 版中关于《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90)的强制性条文同时废止。

《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)由重庆交通科研设计院负责编制,规范的管理权和解释权归交通部,日常解释和管理工作的由重庆交通科研设计院负责。

请各有关单位在实践中注意积累资料,总结经验,及时将发现的问题和修改意见函告重庆交通科研设计院(地址:重庆市南岸区五公里,邮政编码:400067),以便修订时参考。

特此公告。

中华人民共和国交通部

二〇〇四年七月九日

前 言

《公路隧道设计规范》(JTJ 026)自 1990 年 12 月 1 日发布实施以来,对推进我国公路隧道工程科技进步和规范其设计行为均起到了积极的作用。但是,随着我国近十多年来隧道建设实践经验的积累和技术进步,该规范当时所依托的技术已有相当一部分较为陈旧,许多规定已明显落后于工程实际,极不适应当前隧道建设的需要,因此需要对该规范进行全面修订。为此,交通部以交公路发[1999]82 号文下达了修订《公路隧道设计规范》的决定。根据该文通知,重庆交通科研设计院为修订工作主编单位,浙江省交通规划设计研究院、同济大学、中交第一公路勘察设计研究院、重庆交通学院为参编单位,并邀请有关技术专家组成《公路隧道设计规范》修订编制组。

在编制过程中,编制组对全国已建和在建的公路隧道进行了较广泛的调查研究,搜集并分析了大量设计文件、工程报告、营运管理报告,就有关专题进行了研究,并听取了全国有关设计院和专家的意见。考虑到我国公路隧道技术起步较晚,其经验和基础性工作不足,因此在我国经验的基础上又采用或借鉴了国外公路隧道的成功经验和先进技术。

本规范修订内容以高速公路隧道和一、二级公路隧道为主,同时也考虑到低等级公路隧道的需要,体现了高速公路隧道与一般公路隧道相结合;在技术上,既采纳了成熟的新理论、新方法、新材料,又考虑到我国目前的技术现状,保留了一部分当前实用的较传统技术。本规范各条文的规定均以可靠的技术依据和较成熟的经验为基础,对于一些目前我国没有实践经验或不够成熟的技术内容没有纳入或仅作出原则性的规定。

修订中,充分考虑了与其它相关标准、规范的协调性,并保持一致。同时,在全面修订的原则下,尽量按原规范的风格编排撰写。本次修订的重点为隧道调查、围岩分级、总体设计、喷锚支护与衬砌、洞口段工程、结构计算、特殊构造设计、特殊地质地段设计等,并增加了三车道隧道、连拱隧道和小净距隧道等内容。本规范主要由总则、隧道调查及围岩分级、总体设计、建筑材料、荷载、洞口与洞门、衬砌结构、结构计算、防水与排水、小净距及连拱隧道、辅助通道、辅助工程、特殊地质地段、路基与路面、机电及其它设施等内容组成。

本规范由重庆交通科研设计院负责解释工作。为使本规范更能符合我国公路建设的实际情况,请各有关单位在执行过程中将发现的问题和意见及时函告重庆交通科研设计院(地址:重庆市南岸区五公里,邮编:400067)。

主 编 单 位:重庆交通科研设计院

参 编 单 位:浙江省交通规划设计研究院

同济大学

中交第一公路勘察设计研究院

重庆交通学院

主要起草人:蒋树屏 杨林德 刘 伟 何林生 程崇国 吴德兴

王华牢 赵明阶 王晓雯 李 勇 王石春 黄伦海

目次

1 总则	1
2 主要术语与符号	3
2.1 术语	3
2.2 符号	5
3 隧道调查及围岩分级	7
3.1 一般规定	7
3.2 资料搜集	8
3.3 地形与地质调查	9
3.4 气象调查	10
3.5 工程环境调查	10
3.6 围岩分级	14
4 总体设计	14
4.1 一般规定	14
4.2 隧道位置选择	15
4.3 隧道线形设计	20
4.4 隧道横断面设计	21
4.5 施工计划	21
5 建筑材料	23
5.1 一般规定	28
5.2 材料性能	28
6 荷载	29
6.1 一般规定	30
6.2 永久荷载	30
6.3 可变荷载	31
6.4 偶然荷载	31
7 洞口及洞门	31
7.1 一般规定	31
7.2 洞口工程	32
7.3 洞门工程	32
8 衬砌结构设计	33

8.1	一般规定	33
8.2	喷锚衬砌	33
8.3	整体式衬砌	36
8.4	复合式衬砌	36
8.5	明洞衬砌	38
9	结构计算	41
9.1	一般规定	41
9.2	衬砌计算	41
9.3	明洞计算	44
9.4	洞门计算	44
9.5	构造要求	45
10	防水与排水	49
10.1	一般规定	49
10.2	防水	49
10.3	排水	50
10.4	洞口与明洞防排水	51
11	小净距及连拱隧道	52
11.1	小净距隧道	52
11.2	连拱隧道	52
12	辅助通道	54
12.1	一般规定	54
12.2	竖井	55
12.3	斜井	56
12.4	平行导坑与横洞	57
12.5	横通道、风道及地下机房	57
13	辅助工程措施	59
13.1	一般规定	59
13.2	地层稳定措施	59
13.3	涌水处理措施	60
14	特殊地质地段	62
14.1	一般规定	62
14.2	膨胀性围岩	62
14.3	溶洞与采空区	62
14.4	流沙	63
14.5	瓦斯地层	63
14.6	黄土	64
14.7	岩爆	65

15 隧道内路基与路面	66
15.1 一般规定	66
15.2 路基	66
15.3 路面	68
16 机电及其它设施	68
16.1 通风	69
16.2 照明	71
16.3 交通工程	72
16.4 其它设施	73
附录 A 围岩分级有关规定	76
附录 B 隧道标准内轮廓	78
附录 C 型钢特性参数表	84
附录 D 释放荷载的计算方法	86
附录 E 浅埋隧道荷载的计算方法	89
附录 F 偏压隧道衬砌荷载的计算方法	91
附录 G 明洞设计荷载的计算方法	94
附录 H 洞门土压力荷载的计算方法	96
附录 I 荷载结构法	99
附录 J 地层结构法	107
附录 K 钢筋混凝土受弯和受压构件配筋量计算方法	113
附录 L 本规范用词说明	115
附件 《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)条文说明	117
1 总则	121
2 主要术语与符号	124
3 隧道调查及围岩分级	135
4 总体设计	151
5 建筑材料	160
6 荷载	163
7 洞口及洞门	167
8 衬砌结构设计	183
9 结构计算	190
10 防水与排水	199
11 小净距及连拱隧道	206
12 辅助通道	212
13 辅助工程措施	220
14 特殊地质地段	228
15 隧道内路基与路面	

16 机电及其它设施	238
附录 A 围岩分级有关规定	245

1 总则

1.0.1 为给山岭公路隧道设计提供技术准则,制定本规范。

1.0.2 本规范适用于以钻爆法为主要开挖手段的各级公路双车道隧道,其它形式的公路隧道可参照执行。

1.0.3 隧道规划和设计应遵循能充分发挥隧道功能、安全且经济地建设隧道的基本原则。

隧道设计应有完整的勘测、调查资料,综合考虑地形、地质、水文、气象、地震和交通量及其构成,以及营运和施工条件,进行多方案的技术、经济、环保比较,使隧道设计符合安全实用、质量可靠、经济合理、技术先进的要求。

1.0.4 公路隧道按其长度可分为四类,如表 1.0.4 所示。

表 1.0.4 公路隧道长度分类

分类	特长隧道	长隧道	中隧道	短隧道
长度(m)	$L > 3\,000$	$3\,000 \geq L > 1\,000$	$1\,000 \geq L > 500$	$L \leq 500$

注:隧道长度系指两端洞门墙墙面与路面的交线同路线中线交点间的距离。

1.0.5 隧道主体结构必须按永久性建筑设计,具有规定的强度、稳定性和耐久性;建成的隧道应能适应长期营运的需要,方便维修作业。

1.0.6 应加强隧道支护衬砌、防排水、路面等主体结构设计与通风、照明、供配电、消防、交通监控等营运设施设计之间的协调,形成合理的综合设计。必要时应对有关的技术问题开展专项设计和研究。

1.0.7 隧道土建设计应体现动态设计与信息化施工的思想,制定地质观察和监控量测的总体方案;地质条件复杂的隧道,应制定地质预测方案,以及时评判设计的合理性,调整支护参数和施工方案。通过动态设计使支护结构适应于围岩实际情况,更加安全、经济。

1.0.8 隧道设计应贯彻国家有关技术经济政策,积极慎重地采用新技术、新材料、新设备、新工艺。

1.0.9 隧道设计必须符合国家有关国土管理、环境保护、水土保持等法规的要求。应注意节约用地,保护农田及水利设施,尽量保护原有植被,妥善处理弃渣和污水。

1.0.10 公路隧道设计除应符合本规范外,尚应符合国家现行的有关标准和规范。

2 主要术语与符号

2.1 术语

2.1.1 公路隧道 road tunnel

供汽车和行人通行的隧道,一般分为汽车专用和汽车与行人混用的隧道。

2.1.2 山岭隧道 mountain tunnel

指贯穿山岭或丘陵的隧道。是相对于城市隧道和水下隧道,表示修建场所不同的名称。

2.1.3 岩石质量指标 Rock Quality Designation(RQD)

指 10cm 以上长度的岩心累计的钻孔长度百分比。

2.1.4 岩体分级 rock mass classification

以土木工程为对象,将岩石集合体(岩体)分成稳定程度不同的若干级别。

2.1.5 环境调查 environmental survey

因修建隧道而对路线周围的环境影响进行的调查。

2.1.6 水文调查 hydrological survey

对隧道工程及周边环境有影响的地表水和地下水所进行的调查。

2.1.7 地质调查 geological survey

为了解岩体或地层的分布、形成年代、风化程度或地质构造等而进行的调查。

2.1.8 隧道涌水 water inflow into tunnel

伴随隧道开挖,从隧道周边围岩流入隧道内的地下水。

2.1.9 荷载 load

指作用于结构物而使结构产生应力的力量。

2.1.10 围岩压力 surrounding rock pressure

隧道开挖后,因围岩变形或松散等原因,作用于洞室周边岩体或支护结构上的压力。

2.1.11 偏压 unsymmetrical pressure

作用于隧道的压力左右不对称,一侧压力特大的情况;作用于隧道结构上的不对称荷载。

2.1.12 松散压力 loosening pressure

指因隧道的开挖爆破、支护的下沉以及衬砌背后的空隙等原因,致使隧道周边的围岩产生松动,以相当于一定高度的围岩重力,作为直接荷载作用于隧道支护和衬砌上的土压。

2.1.13 新奥法 NATM(New Austrian Tunneling Method)

新奥法是应用岩体力学的理论,以维护和利用围岩的自承能力为基点,采用锚杆和喷射混凝土为主要支护手段,及时地进行支护,控制围岩的变形和松弛,使围岩成为支护体系的组成部分,并通过对围岩和支护的量测、监控来指导隧道和地下工程设计施工的方法和原则。

2.1.14 净空断面(内轮廓) inner section

指隧道衬砌内侧的断面面积、形状。

2.1.15 洞门 portal

在隧道的洞口部位,为挡土、坡面防护等而设置的隧道结构物。

2.1.16 衬砌 lining

为控制和防止围岩的变形或坍落,确保围岩的稳定,或为处理涌水和漏水,或为隧道的内空整齐或美观等目的,将隧道的周边围岩被覆起来的结构体。

2.1.17 仰拱 invert

为改善隧道上部支护结构受力条件而设置在隧道底部的反向拱形结构。

2.1.18 小净距隧道 neighborhood tunnel

指上下行双洞洞壁净距较小,不能按独立双洞考虑的隧道结构。

2.1.19 连拱隧道 multi-arch tunnel

指两洞拱部衬砌结构通过中柱相连接的隧道结构。

2.1.20 竖井 vertical shaft

为改善营运通风或施工条件而竖向设置的坑道。

2.1.21 斜井 incline, inclined shaft

为改善营运通风或施工条件按一定倾斜角度设置的坑道。

2.1.22 横通道 horizontal adit

将隧道划分成几个工区进行施工时,为搬入材料和出渣等而设置的大体上接近水平的作业坑道。横通道有时也可用于营运通风。

2.1.23 超前导坑 advancing drift

因隧道断面较大或围岩条件复杂等,在开挖中采用全断面法有困难的情况下,往往在隧道的开挖断面内超前开挖小断面的隧道,这种小断面的隧道称为超前导坑。

2.1.24 通风 ventilation

将隧道内有害气体排出洞外的一种换气行为。

2.1.25 照明 lighting

通过在隧道内设置灯具,达到行车安全所要求的亮度。

2.2 符号

BQ ——岩体基本质量指标;

$[BQ]$ ——岩体基本质量指标修正值;

R_c ——岩石单轴饱和抗压强度;

R_a ——混凝土或砌体的抗压强度;

R_l ——混凝土的抗拉极限强度;

$I_{S(50)}$ ——实测的岩石点荷载强度指数;

K_1 ——地下水影响修正系数;

K_2 ——主要软弱结构面产状影响修正系数;

K_3 ——初始应力状态影响修正系数;

K_v ——岩体完整性系数;

J_v ——岩体体积节理数;

S_n ——第 n 组节理每米长测线上的条数;

S_k ——每立方米岩体非成组节理条数;

- v_{pm} ——岩体弹性纵波速度；
 v_{pr} ——岩石弹性纵波速度；
 σ_{max} ——垂直洞轴线方向的最大初始应力；
 γ ——围岩重度；
 k ——弹性抗力系数；
 E ——变形模量；
 μ ——泊松比；
 φ ——计算摩擦角；
 B ——隧道开挖断面宽度；
 W ——行车道宽度；
 L_L ——左侧向宽度；
 L_R ——右侧向宽度；
 L ——侧向宽度；
 C ——余宽；
 J ——检修道宽度；
 h ——检修道或人行道高度；
 R ——人行道宽度；
 H ——隧道建筑限界高度；
 K ——围岩弹性抗力系数；
 δ ——衬砌位移值；
 n ——开挖边坡坡率；
 m ——回填土石面坡率。

3 隧道调查及围岩分级

3.1 一般规定

3.1.1 应根据隧道不同设计阶段的任务、目的和要求,针对公路等级、隧道的特点和规模,确定搜集、调查资料的内容和范围,并认真进行调查、测绘、勘探和试验。调查的资料应齐全、准确,满足设计要求。

3.1.2 调查应分施工前调查和施工中调查两个阶段。施工前各阶段的调查内容、范围、精度等应符合相应设计阶段的要求;施工中的调查应及时进行,预报和解决施工中遇到的地质问题,为验证或修改设计、施工提供依据。

3.1.3 应根据隧道所通过地区的地形、地质条件,并综合考虑调查的阶段、方法、范围等,编制相应的调查计划。在调查过程中,如发现实际地质情况与预计的情况不符,应及时修正调查计划。

3.1.4 围岩分级应采用定性划分和定量相结合的方法综合评判。

3.2 资料搜集

3.2.1 应全面搜集隧道地区的下列既有资料:

- 1 地形地貌资料、图件,以及有关的遥感与遥测资料;
- 2 工程地质、水文地质特别是自然地质灾害的种类、性质、规模、危害程度等资料,并分析各种灾害与隧道工程的关系;
- 3 地质测绘、勘探资料和各类图件,并对资料的准确性和可能存在的问题进行分析,同时提出调查计划;
- 4 隧道地区的气温、降水、风速和风向等气象资料;
- 5 地震历史、地震动峰值加速度系数等资料;
- 6 沿线地区交通量及其车辆构成情况、矿产资源等;
- 7 有关的法令、法规。

3.2.2 搜集社会环境、施工条件和邻近既有工程等资料。

3.3 地形与地质调查

3.3.1 隧道调查各阶段的目标、内容及范围可按表 3.3.1 拟定。

表 3.3.1 各阶段调查的目标、内容及范围

阶 段	目 标	内容和方法	范 围	
施 工 前	踏 勘	为路线走向比选提供区域地形、地质、环境等基本资料	搜集、分析既有资料及沿路线进行地面踏勘	大于路线可能方案的范围
	初 勘	获取路线所需地形、地质、其它环境资料,为方案比较及下阶段调查提供基础资料	搜集、分析既有资料,现场踏勘、测绘和必要的勘探工作	大于比选方案的范围
	详 勘	获取技术设计、施工计划、预算等所需的地质、环境等资料	详细进行地形、地质、环境等调查;按要求进行钻探、物探、测试等	隧道路线两侧及周围地区,特长、长隧道和岩溶隧道范围应适当扩大
施 工 中	预报和确认施工中出现的工程地质、水文地质问题;验证或变更设计、调整施工方法等	地形、地质、环境补充调查;洞内观测、量测、超前探测预报,地质灾害及防治措施	隧道内及地面受施工影响的范围	

3.3.2 隧道工程测绘应遵守下列规定:

- 1 按设计阶段的要求,搜集或测绘地形图、纵断面图、横断面图等;
- 2 测绘资料的图纸内容、精度,应符合《公路工程地质勘察规范》(JTJ 064)和《公路勘测规范》(JTJ 061)的要求;
- 3 在隧道辅助通道和洞口附近,应按规定设置平面控制点和水准点。

3.3.3 施工前各阶段的地形与地质调查应包括自然地理概况以及工程地质和水文地质等,并按阶段要求重点调查和分析以下内容:

- 1 地层、岩性及地质构造变动的性质、类型和规模;
- 2 断层、节理、软弱结构面特征及其与隧道的组合关系,围岩的基本物理力学性质;
- 3 地下水类型及地下水位、含水层的分布范围及相应的渗透系数、水量和补给关系、水质及其对混凝土的侵蚀性,有无异常涌水、突水;
- 4 崩塌、错落、岩堆、滑坡、岩溶、自然或人工坑洞、采空区、泥石流、流沙、湿陷性黄土、盐渍土、盐岩、地热、多年冻土、冰川等不良地质和特殊地质现象,及其发生、发展的原因、类型、规模和发展趋势,分析其对隧道洞口和洞身稳定的影响程度。
- 5 隧道通过含有有害气体或有害矿体的地层时,应查明其分布范围、有害成分和含量,

并预测和评价其对施工、营运的影响,提出防治措施。

6 按《中国地震动参数区划图》(GB 18306)的规定或经地震部门鉴定,确定隧道所处地区的地震动峰值加速度系数。

3.3.4 地形、地质调查应注意做好以下工作:

1 当隧道地区存在区域性断裂构造时,特别是存在全新活动的断裂和发震断层时,应调查新构造活动的痕迹、特点和与地震活动的关系,并查明其对隧道工程的影响程度。

2 当隧址区存在影响隧道方案的重大不良地质、特殊地质情况时,应进一步搜集调查地质资料,综合分析,预测隧道开挖后可能出现塌方、滑动、挤压、岩爆、突然涌水、流沙及瓦斯溢出等的地段,并提出相应的工程措施,为方案比选和隧道设计提供依据。

3 水文地质条件复杂的隧道(含岩溶隧道)除按一般隧道进行调查、勘探、试验外,必要时还应进行水文地质动态观测或进行专题研究。

4 路线越岭的隧道,应查明不同的越岭高程的地质条件,进行全面的技术、经济比较,选择工程地质条件较好的位置穿越。

5 沿河傍山地段的隧道,应调查分析斜坡地质结构特征及其稳定性和水流冲刷对山体和洞身稳定的影响。

6 濒临水库地区的隧道,应查明岸坡的稳定性,水库库容及水位(含浪高和壅水高)等。当隧道穿过岩溶洼地或坡立谷间的峰丛斜坡底部时,应查明洼地或坡立谷的季节性壅水的最高水位高程。

3.3.5 施工中的地质调查,宜采取地面补充调查,开挖工作面直接观察、素描、摄像、量测。对于工程地质、水文地质复杂的隧道,可采用超前地震波反射、声波反射、地质雷达等地球物理手段,或采用超前钻孔、平行导坑、试验坑道等进行超前探测,及时预报可能发生地质灾害的位置、性质。施工中工程地质调查应完成以下任务:

1 根据对围岩性质的直接观察、量测和试验资料,核定岩性、地质构造、地下水等情况,分析判定实际揭露的围岩级别;

2 及时预报和解决施工中遇到的工程地质和水文地质问题;

3 为验证和修改(变更)设计及调整施工方案提供依据。

3.4 气象调查

3.4.1 气象调查的内容应包括隧道地区的气温、气压、风速、风向、降雨量、积雪量、降雪的程度和天数、冻结深度等,其中气温、风速、降雨、积雪应调查其极端值。

3.4.2 必要时应在隧址处设立气象观测点(站)进行观测,持续搜集当地气象资料。

3.5 工程环境调查

3.5.1 应对隧道场区及邻近地区相关地表水系、地下水露头、涌泉、温泉、沼泽、天然和人工湖泊、植被、矿产资源以及动植物生态等自然环境状况进行调查。

3.5.2 应对场区内土地使用情况、农田、水利设施、建筑物、地下管线情况等进行调查。若场区内有公园、保护林、文化遗址、纪念建筑等需要保护的重要地物时,除应调查它们的现状外,还应提出隧道建设对其环境影响评价和保护措施。

3.5.3 应对生产生活用水、交通状况、施工和营运噪声、振动、污水及废气排放等对生态环境的影响进行调查;应对施工和营运中地下水大量流失可能造成地表沉降、塌陷、地面建筑物破坏、民众生产生活用水枯竭等环境问题的影响程度进行调查和预测。

3.5.4 施工条件调查应包括:

- 1 施工便道、施工场地、拆迁、弃渣场地、供水、供电和通讯条件;
- 2 建筑材料的来源、品质、数量等;
- 3 其它可能影响施工的因素。

3.6 围岩分级

3.6.1 隧道围岩分级的综合评判方法宜采用两步分级,并按以下顺序进行:

- 1 根据岩石的坚硬程度和岩体完整程度两个基本因素的定性特征和定量的岩体基本质量指标 BQ ,综合进行初步分级。
- 2 对围岩进行详细定级时,应在岩体基本质量分级基础上考虑修正因素的影响,修正岩体基本质量指标值。
- 3 按修正后的岩体基本质量指标 $[BQ]$,结合岩体的定性特征综合评判、确定围岩的详细分级。

3.6.2 围岩分级中岩石坚硬程度、岩体完整程度两个基本因素的定性划分和定量指标及其对应关系应符合下列规定:

- 1 岩石坚硬程度可按表 3.6.2-1 定性划分。
- 2 岩石坚硬程度定量指标用岩石单轴饱和抗压强度 R_c 表达。 R_c 一般采用实测值,若无实测值时,可采用实测的岩石点荷载强度指数 $I_{S(50)}$ 的换算值,即按式(3.6.2)计算。

$$R_c = 22.82 I_{S(50)}^{0.75} \quad (3.6.2)$$

- 3 R_c 与岩石坚硬程度定性划分的关系可按表 3.6.2-2 确定。

表 3.6.2-1 岩石坚硬程度的定性划分

名 称	定性鉴定	代表性岩石
硬 质 岩	坚硬岩 锤击声清脆,有回弹,震手,难击碎;浸水后大多无吸水反应	未风化~微风化的花岗岩、正长岩、闪长岩、辉绿岩、玄武岩、安山岩、片麻岩、石英片岩、硅质板岩、石英岩、硅质胶结的砾岩、石英砂岩、硅质石灰岩等
	较坚硬岩 锤击声较清脆,有轻微回弹,稍震手,较难击碎;浸水后有轻微吸水反应	1 弱风化的坚硬岩; 2 未风化~微风化的熔结凝灰岩、大理岩、板岩、白云岩、石灰岩、钙质胶结的砂页岩等
软 质 岩	较软岩 锤击声不清脆,无回弹,较易击碎;浸水后指甲可刻出印痕	1 强风化的坚硬岩; 2 弱风化的较坚硬岩; 3 未风化~微风化的凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩、泥质砂岩、粉砂岩、页岩等
	软岩 锤击声哑,无回弹,有凹痕,易击碎;浸水后手可掰开	1 强风化的坚硬岩; 2 弱风化~强风化的较坚硬岩; 3 弱风化的较软岩; 4 未风化的泥岩等
	极软岩 锤击声哑,无回弹,有较深凹痕,手可捏碎;浸水后可捏成团	1 全风化的各种岩石; 2 各种半成岩

表 3.6.2-2 R_c 与岩石坚硬程度定性划分的关系

R_c (MPa)	> 60	60 ~ 30	30 ~ 15	15 ~ 5	< 5
坚硬程度	坚硬岩	较坚硬岩	较软岩	软岩	极软岩

4 岩体完整程度可按表 3.6.2-3 定性划分。

表 3.6.2-3 岩体完整程度的定性划分

名 称	结构面发育程度		主要结构面的结合程度	主要结构面类型	相应结构类型
	组数	平均间距(m)			
完整	1~2	> 1.0	好或一般	节理、裂隙、层面	整体状或巨厚层结构
较完整	1~2	> 1.0	差	节理、裂隙、层面	块状或厚层状结构
	2~3	1.0 ~ 0.4	好或一般		块状结构
较破碎	2~3	1.0 ~ 0.4	差	节理、裂隙、层面、小断层	裂隙块状或中厚层结构
	> 3	0.4 ~ 0.2	好		镶嵌碎裂结构
			一般		中、薄层状结构
破碎	> 3	0.4 ~ 0.2	差	各种类型结构面	裂隙块状结构
		< 0.2	一般或差		碎裂状结构
极破碎	无序		很差		散体状结构

注:平均间距指主要结构面(1~2组)间距的平均值。

5 岩体完整程度的定量指标用岩体完整性系数 K_v 表达。 K_v 一般用弹性波探测值,若无探测值时,可用岩体体积节理数 J_v 按表 3.6.2-4 确定对应的 K_v 值。

表 3.6.2-4 J_v 与 K_v 对照表

J_v (条/ m^3)	< 3	3 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 35	> 35
K_v	> 0.75	0.75 ~ 0.55	0.55 ~ 0.35	0.35 ~ 0.15	< 0.15

6 K_v 与定性划分的岩体完整程度的对应关系可按表 3.6.2-5 确定。

表 3.6.2-5 K_v 与定性划分的岩体完整程度的对应关系

K_v	> 0.75	0.75 ~ 0.55	0.55 ~ 0.35	0.35 ~ 0.15	< 0.15
完整程度	完整	较完整	较破碎	破碎	极破碎

7 岩体完整程度的定量指标 K_v 、 J_v 的测试和计算方法应符合附录 A.0.1 的规定。

3.6.3 围岩基本质量指标 BQ 应根据分级因素的定量指标 R_c 值和 K_v 值按式(3.6.3)计算。

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v \quad (3.6.3)$$

使用式(3.6.3)时应遵守下列限制条件:

- 1 当 $R_c > 90K_v + 30$ 时,应以 $R_c = 90K_v + 30$ 和 K_v 代入计算 BQ 值;
- 2 当 $K_v > 0.04R_c + 0.4$ 时,应以 $K_v = 0.04R_c + 0.4$ 和 R_c 代入计算 BQ 值。

3.6.4 围岩详细定级时,如遇下列情况之一,应对岩体基本质量指标 BQ 进行修正:

- 1 有地下水;
- 2 围岩稳定性受软弱结构面影响,且由一组起控制作用;
- 3 存在高初始应力。

围岩基本质量指标修正值 $[BQ]$ 可按式(3.6.4)计算。

$$[BQ] = BQ - 100(K_1 + K_2 + K_3) \quad (3.6.4)$$

式中: $[BQ]$ ——围岩基本质量指标修正值;

BQ ——围岩基本质量指标;

K_1 ——地下水影响修正系数;

K_2 ——主要软弱结构面产状影响修正系数;

K_3 ——初始应力状态影响修正系数。

K_1 、 K_2 、 K_3 值可分别按附录 A 中表 A.0.2-1、表 A.0.2-2、表 A.0.2-3 确定。

围岩极高及高初始应力状态的评估,可按附录 A 中表 A.0.3 规定进行。

3.6.5 可根据调查、勘探、试验等资料,岩石隧道的围岩定性特征,围岩基本质量指标 BQ ,或修正的围岩质量指标 $[BQ]$ 值,土体隧道中的土体类型、密实状态等定性特征,按表 3.6.5 确定围岩级别。

表 3.6.5 公路隧道围岩分级

围岩级别	围岩或土体主要定性特征	围岩基本质量指标 BQ 或修正的围岩基本质量指标 $[BQ]$
I	坚硬岩,岩体完整,巨整体状或巨厚层状结构	> 550
II	坚硬岩,岩体较完整,块状或厚层状结构; 较坚硬岩,岩体完整,块状整体结构	$550 \sim 451$
III	坚硬岩,岩体较破碎,巨块(石)碎(石)状镶嵌结构; 较坚硬岩或较软硬岩层,岩体较完整,块状体或中厚层结构	$450 \sim 351$
IV	坚硬岩,岩体破碎,碎裂结构; 较坚硬岩,岩体较破碎~破碎,镶嵌碎裂结构; 较软岩或软硬岩互层,且以软岩为主,岩体较完整~较破碎,中薄层状结构	$350 \sim 251$
	土体:1 压密或成岩作用的粘性土及砂性土; 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	
V	较软岩,岩体破碎; 软岩,岩体较破碎~破碎; 极破碎各类岩体,碎、裂状,松散结构	≤ 250
	一般第四系的半干硬至硬塑的粘性土及稍湿至潮湿的碎石土,卵石土、圆砾、角砾土及黄土(Q_3 、 Q_4)。非粘性土呈松散结构,粘性土及黄土呈松软结构	
VI	软塑状粘性土及潮湿、饱和粉细砂层、软土等	

注:本表不适用于特殊条件的围岩分级,如膨胀性围岩、多年冻土等。

当根据岩体基本质量定性划分与 $[BQ]$ 值确定的级别不一致时,应重新审查定性特征和定量指标计算参数的可靠性,并对它们重新观察、测试。

在工程可行性研究和初步勘测阶段,可采用定性划分的方法或工程类比的方法进行围岩级别划分。

3.6.6 各级围岩的物理力学参数宜通过室内或现场试验获取,无试验数据和初步分级时,可按附录 A 中表 A.0.4-1 选用;岩体结构面抗剪断峰值强度参数可按附录 A 中表 A.0.4-2 选用。

3.6.7 各级围岩的自稳能力宜根据围岩变形量测和理论计算分析来评定,也可按附录 A.0.5 作出大致的评判。

4 总体设计

4.1 一般规定

4.1.1 隧道设计应满足公路交通规划的要求,其建筑限界、断面净空、隧道主体结构以及营运通风、照明等设施,应按《公路工程技术标准》(JTG B01)规定的预测交通量设计。当近期交通量不大时,可采取一次设计,分期修建。

4.1.2 隧道总体设计应遵循以下原则:

1 在地形、地貌、地质、气象、社会人文和环境等调查的基础上,综合比选隧道各轴线方案的走向、平纵线形、洞口位置等,提出推荐方案。

2 地质条件很差时,特长隧道的位置应控制路线走向,以避免不良地质地段;长隧道的位置亦应尽可能避开不良地质地段,并与路线走向综合考虑;中、短隧道可服从路线走向。

3 根据公路等级和设计速度确定车道数和建筑限界。在满足隧道功能和结构受力良好的前提下,确定经济合理的断面内轮廓。

4 隧道内外平、纵线形应协调,以满足行车的安全、舒适要求。

5 根据隧道长度、交通量及其构成、交通方向以及环保要求等,选择合理的通风方式,确定通风、照明、交通监控等机电设施的设置规模。必要时特长隧道应作防灾专项设计。

6 应结合公路等级、隧道长度、施工方法、工期和营运要求,对隧道内外防排水系统、消防给水系统、辅助通道、弃渣处理、管理设施、交通工程设施、环境保护等作综合考虑。

7 当隧道与相邻建筑物互有影响时,应在设计与施工中采取必要的措施。

4.2 隧道位置选择

4.2.1 隧道位置应选择在稳定的地层中,尽量避免穿越工程地质和水文地质极为复杂以及严重不良地质地段;当必须通过时,应有切实可靠的工程措施。

4.2.2 穿越分水岭的长、特长隧道,应在较大面积地质测绘和综合地质勘探的基础上确定路线走向和平面位置。对可能穿越的垭口,应拟定不同的越岭高程及其相应的展线方案,结合路线线形及施工、营运条件等因素,进行全面技术经济比较后确定。

4.2.3 路线沿河傍山地段,当以隧道通过时,其位置宜向山侧内移,避免隧道一侧洞壁过薄、河流冲刷和不良地质对隧道稳定的不利影响。应对长隧道方案与短隧道群或桥隧群方案进行技术经济比较。

4.2.4 隧道洞口不宜设在滑坡、崩塌、岩堆、危岩落石、泥石流等不良地质及排水困难的沟谷低洼处或不稳定的悬崖陡壁下。应遵循“早进晚出”的原则,合理选定洞口位置,避免在洞口形成高边坡和高仰坡。

4.2.5 濒临水库地区的隧道,其洞口路肩设计高程应高出水库计算洪水位(含浪高和壅水高)不小于 0.5m,同时应注意由于水的长期浸泡造成库壁坍塌对隧道稳定的不利影响,并采取相应的工程措施。

隧道设计洪水频率标准可按表 4.2.5 取值;当观测洪水高于标准值时,应按观测洪水设计;当观测洪水的频率在高速公路、一级公路超过 1/300,二级公路超过 1/100,三、四级公路超过 1/50 时,则应分别采用 1/300、1/100 和 1/50 的频率设计。

表 4.2.5 隧道设计水位的洪水频率标准

公路等级 隧道类别	高速公路、一级公路	二级公路	三级公路	四级公路
特长隧道	1/100	1/100	1/50	1/50
长隧道	1/100	1/50	1/50	1/25
中、短隧道	1/100	1/50	1/25	1/25

4.3 隧道线形设计

4.3.1 应根据地质、地形、路线走向、通风等因素确定隧道的平曲线线形。当设为曲线时,不宜采用设超高的平曲线,并不应采用设加宽的平曲线。隧道不设超高的圆曲线最小半径应符合表 4.3.1-1 的规定。当由于特殊条件限制隧道平面线形设计为需设超高的曲线时,其超高值不宜大于 4.0%,技术指标应符合《公路路线设计规范》的有关规定。隧道的停车视距与会车视距应符合表 4.3.1-2 的规定。

表 4.3.1-1 不设超高的圆曲线最小半径(m)

设计速度(km/h)	120	100	80	60	40	30	20
路拱							
≤2.0%	5 500	4 000	2 500	1 500	600	350	150
> 2.0%	7 500	5 250	3 350	1 900	800	450	200

表 4.3.1-2 公路停车视距与会车视距

公路等级	高速公路、一级公路				二、三、四级公路				
设计速度(km/h)	120	100	80	60	80	60	40	30	20
停车视距(m)	210	160	110	75	110	75	40	30	20
会车视距(m)	—	—	—	—	220	150	80	60	40

4.3.2 高速公路、一级公路的隧道应设计为上、下行分离的独立双洞。分离式独立双洞的最小净距,按对两洞结构彼此不产生有害影响的原则,结合隧道平面线形、围岩地质条件、断面形状和尺寸、施工方法等因素确定,一般情况可按表 4.3.2 取值。一座分离式双洞隧道,可按其围岩代表级别确定两洞最小净距。

在桥隧相连、隧道相连、地形条件限制等特殊地段隧道净距不能满足表 4.3.2 的要求时,可采取小净距隧道或连拱隧道形式,但应作出充分的技术论证和比较研究,并制订可靠的技术保障措施,确保工程质量。

表 4.3.2 分离式独立双洞间的最小净距

围岩级别	I	II	III	IV	V	VI
最小净距(m)	$1.0 \times B$	$1.5 \times B$	$2.0 \times B$	$2.5 \times B$	$3.5 \times B$	$4.0 \times B$

注: B ——隧道开挖断面的宽度。

4.3.3 隧道内纵面线形应考虑行车安全性、营运通风规模、施工作业效率和排水要求,隧道纵坡不应小于 0.3%,一般情况不应大于 3%;受地形等条件限制时,高速公路、一级公路的中、短隧道可适当加大,但不宜大于 4%;短于 100m 的隧道纵坡可与该公路隧道外路线的指标相同。当采用较大纵坡时,必须对行车安全性、通风设备和营运费用、施工效率的影响等作充分的技术经济综合论证。

4.3.4 隧道内的纵坡形式,一般宜采用单向坡;地下水发育的长隧道、特长隧道可采用双向坡。纵坡变更的凸形竖曲线和凹形竖曲线的最小半径和最小长度应符合表 4.3.4 的规定。

隧道内纵坡的变换不宜过大、过频,以保证行车安全视距和舒适性。

表 4.3.4 竖曲线最小半径和最小长度(m)

设计速度(km/h)		120	100	80	60	40	30	20
凸形竖曲线半径	一般值	17 000	10 000	4 500	2 000	700	400	200
	极限值	11 000	6 500	3 000	1 400	450	250	100
凹形竖曲线半径	一般值	6 000	4 500	3 000	1 500	700	400	200
	极限值	4 000	3 000	2 000	1 000	450	250	100
竖曲线长度		100	85	70	50	35	25	20

4.3.5 隧道洞外连接线应与隧道线形相协调,并符合以下规定:

- 1 隧道洞口内外各 3s 设计速度行程长度范围的平面线形应一致。
- 2 隧道洞口内外各 3s 设计速度行程长度范围的纵面线形应一致,有条件时宜取 5s 设计速度行程。
- 3 当隧道建筑限界宽度大于所在公路的建筑限界宽度时,两端连接线应有不短于 50m 的、同隧道等宽的路基加宽段;当隧道限界宽度小于所在公路建筑限界宽度时,两端连接线的路基宽度仍按公路标准设计,其建筑限界宽度应设有 4s 设计速度行程的过渡段与隧道洞口衔接,以保持隧道洞口内外横断面顺适过渡。
- 4 长、特长的双洞隧道,宜在洞口外合适位置设置联络通道,以利车辆调头。

4.3.6 间隔 100m 以内的短隧道群,宜整体考虑其平、纵线形技术指标。

4.4 隧道横断面设计

4.4.1 各级公路隧道建筑限界如图 4.4.1,在建筑限界内不得有任何部件侵入。各级公路隧道建筑限界基本宽度应按表 4.4.1 执行,并符合以下规定:

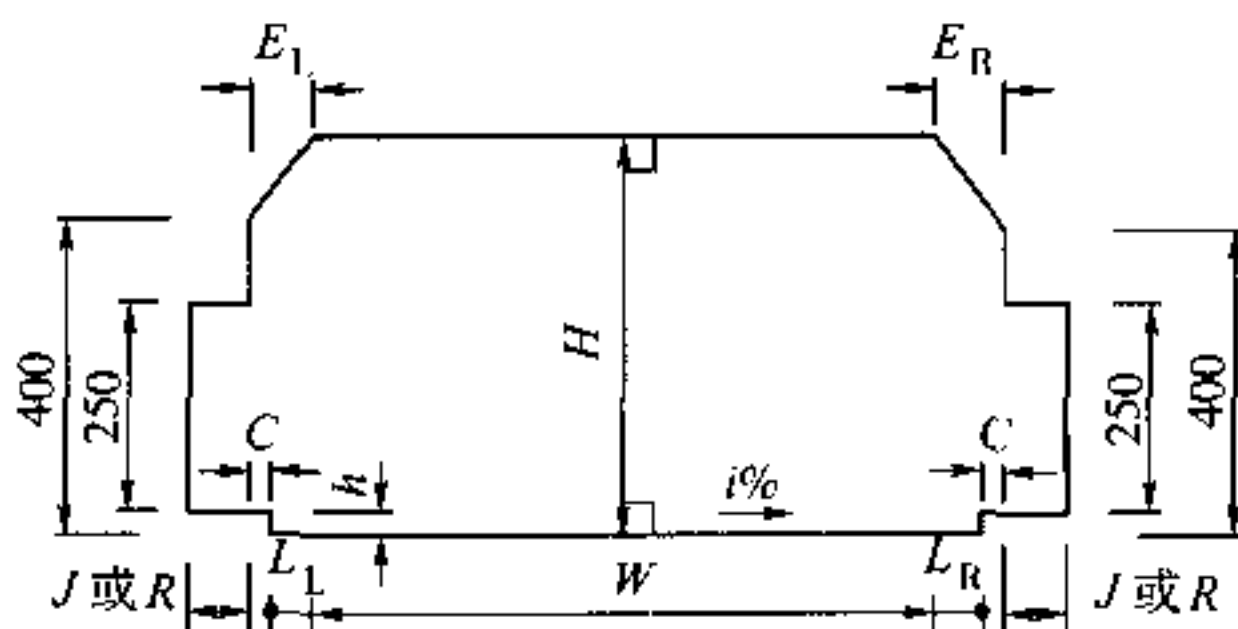


图 4.4.1 公路隧道建筑限界(单位:cm)

H -建筑限界高度; W -行车道宽度; L_L -左侧向宽度; L_R -右侧向宽度; C -余宽; J -检修道宽度; R -人行道宽度; h -检修道或人行道的高度; E_L -建筑限界左顶角宽度, $E_L = L_L$; E_R -建筑限界右顶角宽度,当 $L_R \leq 1\text{m}$ 时, $E_R = L_R$,当 $L_R > 1\text{m}$ 时, $E_R = 1\text{m}$

- 1 建筑限界高度,高速公路、一级公路、二级公路取 5.0m;三、四级公路取 4.5m。
- 2 当设置检修道或人行道时,不设余宽;当不设置检修道或人行道时,应设不小于 25cm 的余宽。
- 3 隧道路面横坡,当隧道为单向交通时,应取单面坡;当隧道为双向交通时,可取双面坡。坡度应根据隧道长度,平、纵线形等因素综合分析确定,一般可采用 1.5% ~ 2.0%。
- 4 当路面采用单面坡时,建筑限界底边线与路面重合;当采用双面坡时,建筑限界底边线应水平置于路面最高处。

表 4.4.1 公路隧道建筑限界横断面组成最小宽度(单位:m)

公路等级	设计速度 (km/h)	车道宽度 W	侧向宽度 L		余宽 C	人行道 R	检修道 J		隧道建筑限界净宽		
			左侧 L_L	右侧 L_R			左侧	右侧	设检修道	设人行道	不设检修道、人行道
高速公路	120	3.75×2	0.75	1.25			0.75	0.75	11.00		
	100	3.75×2	0.50	1.00			0.75	0.75	10.50		
一级公路	80	3.75×2	0.50	0.75			0.75	0.75	10.25		
	60	3.50×2	0.50	0.75			0.75	0.75	9.75		
二级公路	80	3.75×2	0.75	0.75		1.00				11.00	
	60	3.50×2	0.50	0.50		1.00				10.00	
三级公路	40	3.50×2	0.25	0.25		0.75				9.00	
四级公路	30	3.25×2	0.25	0.25	0.25						7.50
	20	3.00×2	0.25	0.25	0.25						7.00

注:①三车道隧道除增加车道数外,其它宽度同表;增加车道的宽度不得小于 3.5m。

②连拱隧道的左侧可不设检修道或人行道,但应设 50cm(120 km/h 与 100 km/h 时)或 25cm(80 km/h 与 60 km/h 时)的余宽。

③设计速度 120km/h 时,两侧检修道宽度均不宜小于 1.0m;设计速度 100km/h 时,右侧检修道宽度不宜小于 1.0m。

5 单车道四级公路的隧道应按双车道四级公路标准修建。

4.4.2 高速公路和一级公路隧道内应设置检修道。其它等级公路隧道,应根据隧道所在地区的行人密度、隧道长度、交通量及交通安全等因素确定人行道的设置。检修道或人行道宜双侧设置;检修道或人行道的宽度按表 4.4.1 规定选取;检修道或人行道的高度可按 20~80cm 取值,并综合考虑以下因素:

- 1 检修人员步行时的安全;
- 2 紧急情况时,驾乘人员拿取消防设备方便;
- 3 满足其下放置电缆、给水管等的空间尺寸要求。

4.4.3 隧道内轮廓设计除应符合隧道建筑限界的规定外,还应满足洞内路面、排水设施、装饰的需要,并为通风、照明、消防、监控、营运管理等设施提供安装空间,同时考虑围岩变形、施工方法影响的预留富裕量,使确定的断面形式及尺寸符合安全、经济、合理的原则。隧道断面宜采用附录 B 所示的内轮廓形状。公路等级和设计速度相同的一条公路上的隧道断面宜采用相同的内轮廓。

4.4.4 隧道内路侧边沟应结合检修道、侧向宽度、余宽等布置,其宽度应小于侧向宽度,并布置于车道两侧。

4.4.5 长、特长隧道应在行车方向的右侧设置紧急停车带。双向行车隧道,其紧急停车带应双侧交错设置。紧急停车带的宽度,包含右侧向宽度应取 3.5m,长度应取 40m,其中有效长度不得小于 30m。紧急停车带的设置间距不宜大于 750m。停车带的路面横坡,长隧道可取水平,特长隧道可取 0.5%~1.0%或水平。紧急停车带建筑限界的构成如图 4.4.5,具体尺寸按 4.4.1 条和 4.4.2 条规定执行。

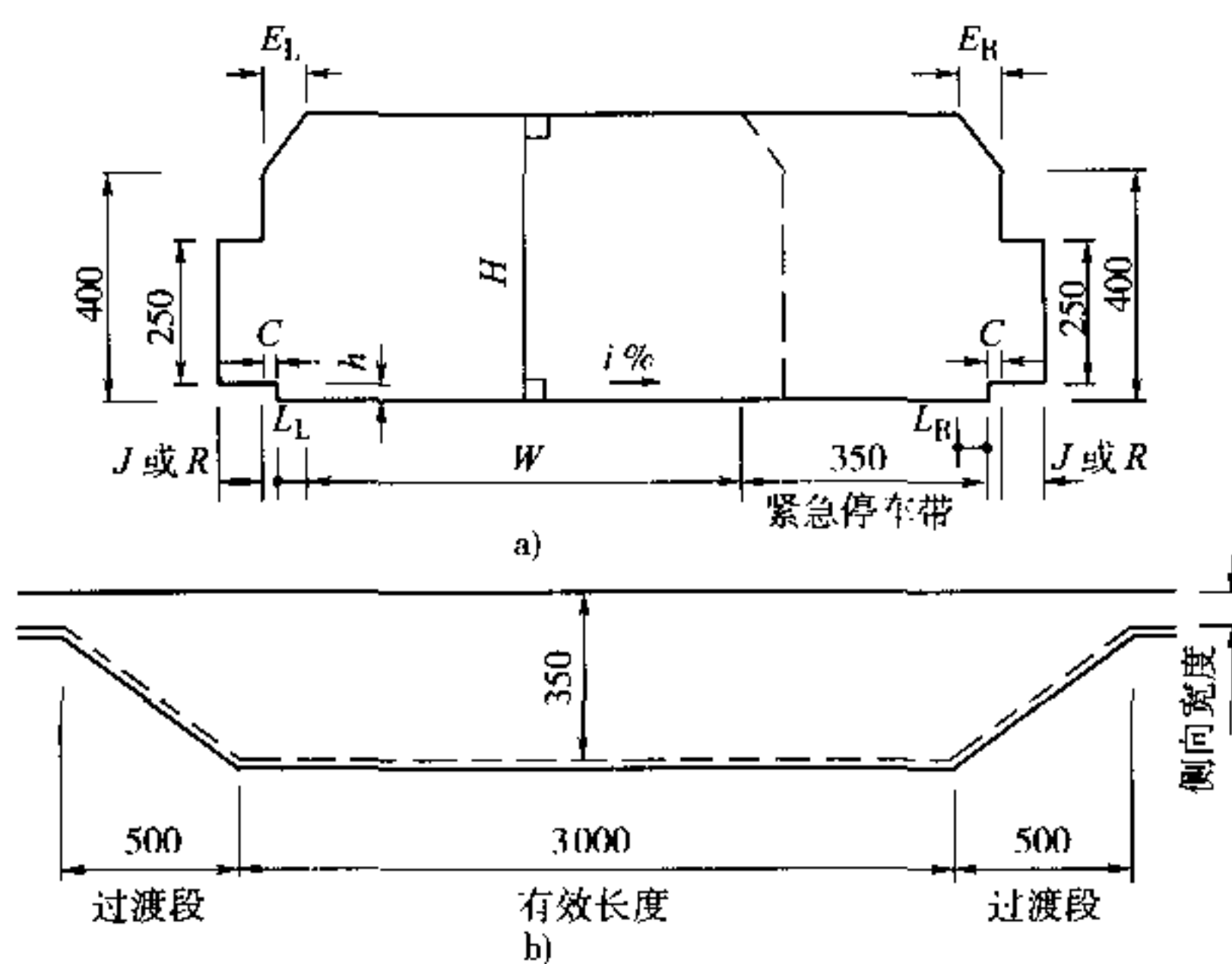


图 4.4.5 紧急停车带的建筑限界、宽度和长度(单位:cm)

a)宽度构成及建筑限界;b)长度

不设检修道、人行道的隧道,可不设紧急停车带,但应按 500m 间距交错设置行人避车洞。

4.4.6 上、下行分离式独立双洞的公路隧道之间应设置横向通道,并符合下列规定:

1 横通道的断面建筑限界一般规定如图 4.4.6。

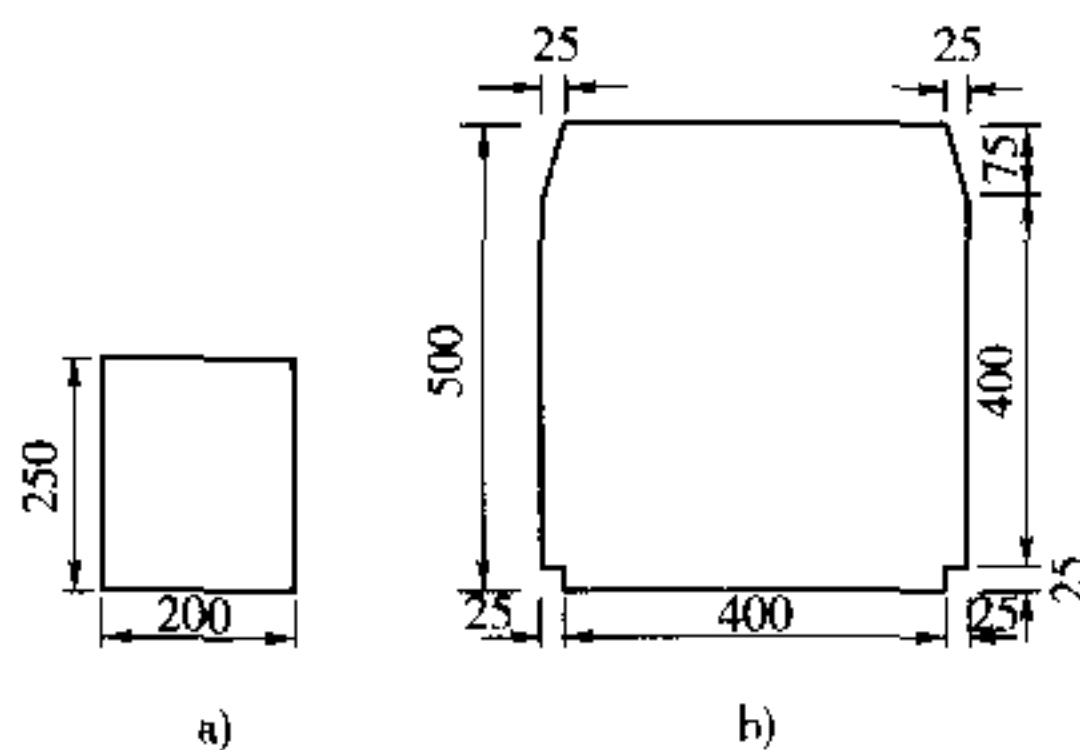


图 4.4.6 横通道的断面建筑限界(单位:cm)

a)人行横通道;b)车行横通道

2 人行横通道的设置间距可取 250m,并不大于 500m。

3 车行横通道的设置间距可取 750m,并不得大于 1 000m;长 1 000 ~ 1 500m 的隧道宜设 1 处,中、短隧道可不设。

4.5 施工计划

4.5.1 隧道设计应制订合理的施工计划。施工计划主要包括:总工期要求、施工方法的确定、合理工区的划分、辅助通道的用途、施工便道、弃渣场、临时设施、监控量测方案等。制订施工计划应遵循下列原则:

1 应考虑隧道长度、断面、工期要求、地质条件和当地自然条件等,确定合理的施工方法和施工进度。

2 工区划分应考虑隧道纵坡变化、水文与地质条件、渣场和便道修建条件以及土石方平衡等综合因素。

3 应结合工程地质与水文地质超前预报、施工方法以及营运通风方式等,对辅助通道的设置目的、作用、必要性作出技术经济论证。

4 必要时应根据隧道的建设规模、地质条件等,对主要施工机械设备、大型洞内临时设备、洞外临时设备的技术指标作出要求。

5 建筑材料

5.1 一般规定

5.1.1 隧道工程常用的各类建筑材料,可选用下列强度等级:

- 1 混凝土 C50、C40、C30、C25、C20、C15、C10;
- 2 石材 MU100、MU80、MU60、MU50、MU40;
- 3 水泥砂浆 M25、M20、M15、M10、M7.5、M5;
- 4 喷射混凝土 C30、C25、C20;
- 5 混凝土砌块 MU30、MU20;
- 6 钢筋 HPB235、HRB335、HRB400。

5.1.2 隧道工程各部位的建筑材料,其强度等级不应低于表 5.1.2-1 和表 5.1.2-2 的规定。

表 5.1.2-1 衬砌及管沟建筑材料

工程部位 \ 材料种类	混 凝 土	片石混凝土	钢筋混凝土	喷射混凝土
拱圈	C20	—	C25	C20
边墙	C20	—	C25	C20
仰拱	C20	—	C25	C20
底板	C20	—	C25	—
仰拱填充	C10	C10	—	—
水沟、电缆槽	C25	—	C25	—
水沟、电缆槽盖板	—	—	C25	—

表 5.1.2-2 洞 门 建 筑 材 料

工程部位 \ 材料种类	混 凝 土	钢筋混凝土	片石混凝土	砌 体
端墙	C20	C25	C15	M10 水泥砂浆砌片石、块石或混凝土砌块镶面
顶帽	C20	C25	—	M10 水泥砂浆砌粗料石
翼墙和洞口挡土墙	C20	C25	C15	M7.5 水泥砂浆砌片石
侧沟、截水沟	C15	—	—	M5 水泥砂浆砌片石
护坡	C15	—	—	M5 水泥砂浆砌片石

注:①护坡材料可采用 C20 喷射混凝土。
 ②最冷月份平均气温低于 -15℃的地区,表中水泥砂浆的强度应提高一级。

5.1.3 建筑材料的选用应符合下列规定:

- 1 应符合结构强度和耐久性的要求,同时满足抗冻、抗渗和抗侵蚀的需要。
- 2 当有侵蚀性水经常作用时,所用混凝土和水泥砂浆均应采用具有抗侵蚀性能的特种水泥和集料配制,其抗侵蚀性能的要求视水的侵蚀特征确定。
- 3 最冷月份平均气温低于 -15°C 的地区及受冻害影响的隧道,混凝土强度等级应适当提高。

5.1.4 混凝土和砌体所用的材料除应符合国家有关标准规定外,尚应符合下列要求:

- 1 混凝土不应使用碱活性集料。
- 2 钢筋混凝土构件中,钢筋的技术条件应符合现行国家标准《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB 1499)与《钢筋混凝土用热轧光圆钢筋》(GB 13013)的规定。
- 3 片石强度等级不应低于 MU40,块石强度等级不应低于 MU60,混凝土砌块强度等级不应低于 MU20,有裂缝和易风化的石材不应采用。
- 4 片石混凝土内片石掺用量不得超过总体积的 30%。

5.1.5 喷锚支护采用的材料除应符合 5.1.1~5.1.3 条的有关规定外,尚应符合下列要求:

- 1 喷射混凝土应优先采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,也可采用矿渣硅酸盐水泥。
- 2 粗集料应采用坚硬耐久的碎石或卵石,不得使用碱活性集料;喷射混凝土中的石子粒径不宜大于 16mm,喷射钢纤维混凝土中的石子粒径不宜大于 10mm;集料级配宜采用连续级配,细集料应采用坚硬耐久的中砂或粗砂,细度模数宜大于 2.5,砂的含水率宜控制在 5%~7%。
- 3 锚杆的杆体直径宜为 20~32mm,杆体材料宜采用 HRB335、HRB400 钢;垫板材料宜采用 HPB235 钢。
- 4 锚杆用的各种水泥砂浆强度不应低于 M20。
- 5 钢筋网材料可采用 HPB235 钢,直径宜为 6~12mm。

5.1.6 混凝土和喷射混凝土中掺加的各种外加剂,其性能应满足下列要求:

- 1 对混凝土的强度及其与围岩的粘结力基本无影响,对混凝土和钢材无腐蚀作用。
- 2 对混凝土的凝结时间影响不大(除速凝剂和缓凝剂外)。
- 3 不易吸湿,易于保存;不污染环境,对人体无害。

5.1.7 喷射钢纤维混凝土中的钢纤维宜采用普通碳素钢制成,并满足下列要求:

- 1 宜用等效直径为 0.3~0.5mm 的方形或圆形断面。

- 2 长度宜为 20 ~ 25mm,长度直径比宜为 40 ~ 60。
- 3 抗拉强度不得小于 380MPa,并不得有油渍和明显的锈蚀。

5.1.8 初期支护的钢架宜用钢筋或 H 形、工字形、U 形型钢制成,也可用钢管或钢轨制成。各种型钢的特性参数见附录 C。

5.1.9 隧道内路面材料应符合现行《公路沥青路面设计规范》和《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40)的有关规定。

5.1.10 隧道内防水材料应符合现行国家标准《地下工程防水技术规范》(GB 50108)的规定。隧道内常用的防水材料可选用防水混凝土、防水卷材、中埋式止水带(条)、背贴式止水带或止水浆液。

5.2 材料性能

5.2.1 常用建筑材料的重度应按表 5.2.1 的规定采用。

表 5.2.1 建筑材料的标准重度或计算重度

材料名称	混凝土	片石混凝土	钢筋混凝土 (配筋率在 3% 以内)	钢材	浆砌片石	浆砌块石	浆砌粗料石
重度(kN/m ³)	23	23	25	77	22	23	25

注:钢筋混凝土配筋率大于 3% 时,其重度应计算确定。

5.2.2 混凝土的强度标准值应按表 5.2.2 采用。

表 5.2.2 混凝土强度标准值(MPa)

混凝土强度等级 强度种类	C15	C20	C25	C30	C40	C50
轴心抗压 f_{ck}	10	13.5	17	20	27	33.5
弯曲抗压 f_{cmk}	11	15	18.5	22	29.5	36
轴心抗拉 f_{tk}	1.4	1.7	2.0	2.2	2.7	3.1

注:①混凝土垂直浇筑,且一次浇筑层高度大于 1.5m 时,表中强度值应乘以系数 0.9。

②计算现浇钢筋混凝土轴心受压构件时,如截面中的边长或直径小于 30cm,则表中强度值应乘以系数 0.8,当构件质量(如混凝土成形、截面和轴线尺寸等)确有保证时,则不受此限制。

③离心混凝土的设计强度应按有关专门规定取用。

5.2.3 混凝土的强度设计值应按表 5.2.3 采用。

表 5.2.3 混凝土强度设计值(MPa)

混凝土强度等级 强度种类	C15	C20	C25	C30	C40	C50
轴心抗压 f_{cd}	7.5	10	12.5	15	20	25
弯曲抗压 f_{crd}	8.5	11	13.5	16.5	21.5	27.5
轴心抗拉 f_{ctd}	0.93	1.13	1.33	1.47	1.80	2.07

5.2.4 混凝土的受压弹性模量 E_c 应按表 5.2.4 采用。混凝土的剪切弹性模量可按表 5.2.4 数值乘以 0.43 采用。混凝土的泊松比可采用 0.2。

表 5.2.4 混凝土的弹性模量 E_c (GPa)

混凝土强度等级	C15	C20	C25	C30	C40	C50
弹性模量 E_c	26	28	29.5	31	33.5	35.5

5.2.5 钢筋的抗拉强度标准值及其抗拉强度和抗压强度的设计值应按表 5.2.5 采用。

表 5.2.5 钢筋抗拉和抗压强度的设计值与标准值(MPa)

钢筋种类	HPB235	HRB335
抗拉强度标准值 f_{sk}	235	335($d=8\sim 25\text{mm}$), 315($d=28\sim 40\text{mm}$)
抗拉或抗压强度设计值 f_{sd}, f_{cd}	188	268

注:表中 d 为钢筋直径。

5.2.6 钢筋的弹性模量应采用 210GPa。

5.2.7 砂浆砌体抗压强度设计值应按下列规定采用:

- 1 混凝土预制块砂浆砌体抗压强度设计值 f_{cd} 应按表 5.2.7-1 的规定采用。
- 2 块石砂浆砌体的抗压强度设计值 f_{cd} 应按表 5.2.7-2 采用。

表 5.2.7-1 混凝土预制块砂浆砌体抗压强度设计值 f_{cd} (MPa)

砂浆强度等级 砌块混凝土强度等级	M20	M15	M10	M7.5	M5
C40	8.10	6.92	5.74	5.15	4.56
C30	7.01	5.99	4.97	4.46	3.90
C20	5.73	4.89	4.06	3.64	3.22
C15	4.96	4.24	3.51	3.15	2.79

表 5.2.7-2 块石砂浆砌体的抗压强度设计值 f_{cd} (MPa)

砂浆强度等级 石材强度等级	M20	M15	M10	M7.5	M5
MU100	8.54	7.29	6.04	5.43	4.80
MU80	7.64	6.52	5.41	4.85	4.29
MU60	6.61	5.65	4.68	4.20	3.72
MU50	6.04	5.16	4.28	3.84	3.39
MU40	5.40	4.61	3.83	3.43	3.04

注:对各类石砌体,应按表中数值分别乘以系数:细料石砌体为 1.5;半细料石砌体为 1.3;粗料石砌体为 1.2;干砌勾缝石砌体为 0.8。

3 片石砌体的抗压强度设计值 f_{cd} 应按表 5.2.7-3 采用。

表 5.2.7-3 片石砌体的抗压强度设计值 f_{cd} (MPa)

砂浆强度等级 石材强度等级	M20	M15	M10	M7.5	M5
MU100	2.0	1.71	1.41	1.27	1.13
MU80	1.79	1.53	1.26	1.14	1.01
MU60	1.55	1.32	1.09	0.98	0.87
MU50	1.41	1.21	1.00	0.90	0.79
MU40	1.26	1.08	0.89	0.80	0.71

5.2.8 砌体的抗压弹性模量采用 10~15GPa。砌体的抗剪弹性模量宜采用抗压弹性模量的 0.4 倍。

5.2.9 混凝土和钢筋混凝土结构中用的混凝土的极限强度应按表 5.2.9 采用。

表 5.2.9 混凝土的极限强度 (MPa)

混凝土强度等级 强度种类	C15	C20	C25	C30	C40	C50
抗压 R_a	12.0	15.5	19.0	22.5	29.5	36.5
弯曲抗压 R_w	15.0	19.4	24.2	28.1	36.9	45.6
抗拉 R_t	1.4	1.7	2.0	2.2	2.7	3.1

注:①片石混凝土的抗压极限强度可采用表中数值。

②表中弯曲抗压极限强度按 $R_w = 1.25 R_a$ 换算。

5.2.10 混凝土的容许应力应按表 5.2.10 采用。

表 5.2.10 混凝土的容许应力(MPa)

混凝土强度等级 应力种类	C15	C20	C25	C30	C40	C50
弯曲及偏心受压应力 $[\sigma_w]$	6.1	7.8	9.6	11.2	14.7	18.2
弯曲拉应力 $[\sigma_w]$	0.36	0.43	0.50	0.50	—	—
剪应力 $[\tau]$	0.70	0.85	1.00	1.10	1.35	1.55

注:①片石混凝土的容许应力可采用表中数值。

②计算主要荷载+附加荷载时,除剪应力外可提高30%。

5.2.11 钢筋的容许应力应按表 5.2.11 采用。

表 5.2.11 钢筋的容许应力(MPa)

钢筋种类 容许应力	主要荷载	主要荷载+附加荷载
HPB235	130	160
HRB335	180	230

5.2.12 喷射混凝土的设计强度等级不应低于 C20,不同强度等级喷射混凝土的设计强度应按表 5.2.12 采用。

表 5.2.12 喷射混凝土的设计强度值(MPa)

混凝土强度等级 强度种类	C20	C25	C30
轴心抗压	10.0	12.5	15
弯曲抗压	11.0	13.5	16.5
抗拉	1.1	1.3	1.5

注:①喷射混凝土的强度指采用喷射大板切割法,制作成边长为 10cm 的立方体试块,在标准条件下养护 28d,用标准试验方法所得的极限抗压强度乘以 0.95 的系数。

②粘结力可采用劈裂法或在喷层上直接拉拔测定。

5.2.13 喷射混凝土的重度可取 22kN/m^3 ,弹性模量应按表 5.2.13 采用。

表 5.2.13 喷射混凝土弹性模量(GPa)

喷射混凝土强度等级	弹性模量	喷射混凝土强度等级	弹性模量
C20	21	C30	25
C25	23		

5.2.14 砌体的极限强度应按表 5.2.14 采用。

表 5.2.14 砌体的极限强度 (MPa)

强度种类 砌体种类		抗压 R_a				抗剪 R_j
		片石	块石	粗料石	混凝土砌块	
砂浆强度等级	M7.5	3.0	—	—	—	0.35
	M10	3.5	5.5	8.0	5.5	0.40
	M15	4.0	6.0	9.0	6.0	0.50

注:混凝土砌块高度 h 超过 20cm 时,表中混凝土块砌体的抗压极限强度应乘以下列提高系数 c :

$h \leq 40\text{cm}$ 时, $c = 0.6 + 0.02h$; $h > 40\text{cm}$ 时, $c = 1.2 + 0.005h$ 。当 c 大于 1.7 时,取 1.7。

5.2.15 石砌体和混凝土块砌体轴心及偏心受压的容许应力应按表 5.2.15 采用。

表 5.2.15 石砌体和混凝土块砌体轴心及偏心受压容许应力 (MPa)

砌体种类	石料和混凝土块强度等级	水泥砂浆强度等级			
		M20	M10	M7.5	M5
片石砌体	MU100	3.0	2.2	1.9	1.7
	MU80	2.7	2.0	1.7	1.5
	MU60	2.3	1.85	1.5	1.25
	MU50	2.1	1.6	1.3	1.1
块石砌体	MU100	5.6	4.9	—	—
	MU80	4.7	4.1	—	—
	MU60	3.8	3.2	—	—
	MU50	3.3	2.8	—	—
粗料石砌体	MU100	7.1	5.0	—	—
	MU80	6.0	4.8	—	—
	MU60	4.9	4.1	—	—
	MU40	3.7	3.4	—	—
混凝土块砌体	MU30	5.6	4.7	—	—
	MU20	4.4	3.6	—	—

注:①介于表列石料或水泥砂浆强度等级之间的其它砌体的受压容许应力可用内插法确定。

②混凝土块高度 h 超过 20cm 时,混凝土块砌体的容许应力应以表中数值乘以下列提高系数 c :

$h \leq 40\text{cm}$ 时, $c = 0.6 + 0.02h$; $h > 40\text{cm}$ 时, $c = 1.2 + 0.005h$ 。当 c 大于 1.7 时,取 1.7。

③如有特殊需要必须用细料石及半细料石砌体时,受压容许应力可按粗料石砌体的受压容许应力分别乘以提高系数 1.43 及 1.14,但提高后的受压容许应力不应大于水泥砂浆抗压极限强度的一半。

6 荷载

6.1 一般规定

6.1.1 隧道结构上的荷载应按表 6.1.1 分类。

表 6.1.1 隧道荷载分类

编 号	荷 载 分 类		荷 载 名 称
1	永久荷载		围岩压力
2			土压力
3			结构自重
4			结构附加恒载
5			混凝土收缩和徐变的影响力
6			水压力
7	可变荷载	基本可变荷载	公路车辆荷载,人群荷载
8			立交公路车辆荷载及其所产生的冲击力、土压力
9			立交铁路列车活载及其所产生的冲击力、土压力
10		其它可变荷载	立交渡槽流水压力
11			温度变化的影响力
12			冻胀力
13			施工荷载
14	偶然荷载		落石冲击力
15			地震力

注:编号 1~10 为主要荷载;编号 11、12、14 为附加荷载;编号 13、15 为特殊荷载。

6.1.2 荷载应根据隧道所处的地形、地质条件、埋置深度、结构特征和工作条件、施工方法、相邻隧道间距等因素确定。施工中如发现与实际不符,应及时修正。对于地质复杂的隧道,必要时应通过实地量测确定。

6.1.3 在隧道结构上可能同时出现的荷载,应按承载能力和满足正常使用要求的检验分别进行组合,并按最不利组合进行设计。

6.1.4 明洞荷载组合时应符合下列规定:

1 计算明洞顶回填土压力,当有落石危害须检算冲击力时,可只计洞顶实际填土重力和落石冲击力的影响,不计塌方堆积土石重力。

2 当明洞上方与公路立交时,应考虑公路车辆荷载。公路车辆荷载计算应按《公路工程技术标准》(JTG B01)的有关规定执行。

3 当明洞上方与铁路立交时,应考虑列车活载。列车活载应按铁路标准活载的有关规定计算。

6.1.5 本规范所列之外的特殊荷载,在荷载计算与组合时应作特殊处理。

6.2 永久荷载

6.2.1 隧道结构自重可按结构设计尺寸及材料标准重度计算,结构附加恒载一般应按实际情况计算。

6.2.2 I~IV级围岩中的深埋隧道,围岩压力为主要形变压力,其值可按释放荷载计算。释放荷载可按附录 D 的公式确定。

6.2.3 IV~VI级围岩中深埋隧道的围岩压力为松散荷载时,其垂直均布压力及水平均布压力可按下列公式计算:

1 垂直均布压力按式(6.2.3)计算。

$$q = \gamma h \quad (6.2.3)$$

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

式中: q ——垂直均布压力(kN/m^2);

γ ——围岩重度(kN/m^3);

S ——围岩级别;

ω ——宽度影响系数, $\omega = 1 + i(B - 5)$;

B ——隧道宽度(m);

i —— B 每增减 1m 时的围岩压力增减率,以 $B = 5\text{m}$ 的围岩垂直均布压力为准,当 $B < 5\text{m}$ 时,取 $i = 0.2$; $B > 5\text{m}$ 时,取 $i = 0.1$ 。

2 水平均布压力按表 6.2.3 的规定确定。

表 6.2.3 围岩水平均布压力

围岩级别	I、II	III	IV	V	VI
水平均布压力 e	0	$< 0.15q$	$(0.15 \sim 0.3)q$	$(0.3 \sim 0.5)q$	$(0.5 \sim 1.0)q$

注:应用式(6.2.3)及表 6.2.3 时,必须同时具备下列条件:

- ① $H/B < 1.7$, H 为隧道开挖高度(m), B 为隧道开挖宽度(m)。
- ② 不产生显著偏压及膨胀力的一般围岩。

6.2.4 浅埋隧道围岩压力可按附录 E 确定。

6.2.5 隧道可能产生偏压时,应根据偏压的状态和程度采取相应的治理措施,当预期不能消除偏压影响时,应在荷载组合与分布中加以考虑。作用于隧道衬砌上的偏压力,应视地形、地质条件以及围岩的覆盖厚度确定。偏压隧道的围岩压力可按附录 F 确定。

6.2.6 计算明洞的回填土压力,其填料的物理力学指标,无试验资料时可按表 6.2.6 采用。回填土石所产生的土压力可按附录 G 确定。

表 6.2.6 填料的物理力学指标

填料名称	重度 γ (kN/m ³)	计算摩擦角 φ_c
干砌片石	20	50°
回填土石	19	35°

6.2.7 作用于洞门墙背的主动土压力可按库仑理论计算,当墙背仰斜或直立时,土压力采用水平方向,其值可按附录 H 确定。

6.3 可变荷载

6.3.1 明洞上公路车辆荷载及其所产生的冲击力、土压力应按照现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)的有关规定计算。

6.3.2 明洞上立交铁路列车活载及其所产生的冲击力、土压力应按照现行《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002.1)的有关规定计算。

6.3.3 变形受约束的结构,应考虑温度变化和混凝土收缩徐变对结构的影响。

6.3.4 最冷月份平均气温低于 -15°C 地区的隧道应考虑冻胀力,冻胀力可根据当地的自然条件、围岩冬季含水量及排水条件等通过研究确定。

6.3.5 施工荷载应根据施工阶段、施工方法和施工条件确定。

6.4 偶然荷载

6.4.1 当有落石危害需检算冲击力时,可通过现场调查或有关计算验证。

6.4.2 地震荷载应按现行《公路工程抗震设计规范》的规定计算确定。

7 洞口及洞门

7.1 一般规定

7.1.1 洞口位置应根据地形、地质条件,同时结合环境保护、洞外有关工程及施工条件、营运要求,通过经济、技术比较确定。

7.1.2 隧道应遵循“早进洞、晚出洞”的原则,不得大挖大刷,确保边坡及仰坡的稳定。

7.1.3 洞口边坡、仰坡顶面及其周围,应根据情况设置排水沟及截水沟,并和路基排水系统综合考虑布置。

7.1.4 洞门设计应与自然环境相协调。

7.2 洞口工程

7.2.1 洞口位置的确定应符合下列要求:

1 洞口的边坡及仰坡必须保证稳定。有条件时,应贴壁进洞;条件限制时,边坡及仰坡的设计开挖最大高度可按表 7.2.1 控制。

表 7.2.1 洞口边、仰坡控制高度

围岩分级	I~II			III		IV			V~VI	
边、仰坡坡率	贴壁	1:0.3	1:0.5	1:0.5	1:0.75	1:0.75	1:1	1:1.25	1:1.25	1:1.5
高度(m)	15	20	25	20	25	15	18	20	15	18

注:设计开挖高度系从路基边缘算起。

- 2 洞口位置应设于山坡稳定、地质条件较好处。
- 3 位于悬崖陡壁下的洞口,不宜切削原山坡;应避免在不稳定的悬崖陡壁下进洞。
- 4 跨沟或沿沟进洞时,应考虑水文情况,结合防排水工程,充分比选后确定。
- 5 漫坡地段的洞口位置,应结合洞外路堑地质、弃渣、排水及施工等因素综合分析确定。
- 6 洞口设计应考虑与附近的地面建筑及地下埋设物的相互影响,必要时采取防范措施。

7.2.2 洞口工程的设计应遵循下列规定:

- 1 洞口边坡、仰坡应根据实际情况采取加固防护措施,有条件时应优先采用绿化护坡。
- 2 当洞口处有坍方、落石、泥石流等时,应采取清刷、延伸洞口、设置明洞或支挡构造物等措施。

7.3 洞门工程

7.3.1 隧道应修建洞门,洞门形式的设计应保证营运安全,并与环境协调。设在城镇、旅游区附近及高速公路、一级公路的隧道,尤应注意与环境相协调,有条件时,洞门周围应植树绿化。

7.3.2 洞门宜与隧道轴线正交。

7.3.3 洞门构造及基础设置应遵循下列规定:

- 1 洞口仰坡坡脚至洞门墙背的水平距离不宜小于 1.5m,洞门端墙与仰坡之间水沟的沟底至衬砌拱顶外缘的高度不小于 1.0m,洞门墙顶高出仰坡脚不小于 0.5m。
- 2 洞门墙应根据实际需要设置伸缩缝、沉降缝和泄水孔;洞门墙的厚度可按计算或结合其它工程类比确定。
- 3 洞门墙基础必须置于稳固地基上,应视地形及地质条件,埋置足够的深度,保证洞门的稳定。

基底埋入土质地基的深度不应小于 1.0m,嵌入岩石地基的深度不应小于 0.5m;基底标高应在最大冻结线以下不小于 0.25m;地基为冻胀土层时,应进行防冻胀处理。基底埋置深度应大于墙边各种沟、槽基底的埋置深度。
- 4 松软地基上的基础,可采取加固基础措施。
- 5 洞门结构应满足抗震要求。

8 衬砌结构设计

8.1 一般规定

8.1.1 公路隧道应作衬砌,根据隧道围岩地质条件、施工条件和使用要求可分别采用喷锚衬砌、整体式衬砌、复合式衬砌。高速公路、一级公路、二级公路的隧道应采用复合式衬砌;三级及三级以下公路隧道,在 I、II、III 级围岩条件下,隧道洞口段应采用复合式衬砌或整体式衬砌,其它段可采用喷锚衬砌。

8.1.2 隧道衬砌设计应综合考虑地质条件、断面形状、支护结构、施工条件等,并应充分利用围岩的自承能力。衬砌应有足够的强度和稳定性,保证隧道长期安全使用。

8.1.3 衬砌结构类型和尺寸,应根据使用要求、围岩级别、工程地质和水文地质条件、隧道埋置深度、结构受力特点,并结合工程施工条件、环境条件,通过工程类比和结构计算综合分析确定。在施工阶段,还应根据现场监控量测调整支护参数,必要时可通过试验分析确定。

8.1.4 衬砌设计应符合下列规定:

- 1 衬砌断面宜采用曲边墙拱形断面。
- 2 隧道围岩较差地段应设仰拱。仰拱曲率半径应根据隧道断面形状、地质条件、地下水、隧道宽度等条件确定。路面与仰拱之间可采用混凝土或片石混凝土填充。当隧道边墙底以下为整体性较好的坚硬岩石时,可不设仰拱。
- 3 隧道洞口段应设加强衬砌。加强衬砌段的长度应根据地形、地质和环境条件确定,一般情况下两车道隧道应不小于 10m,三车道隧道应不小于 15m。
- 4 围岩较差地段的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,一般不小于 10m。
- 6 净宽大于 3.0m 的横通道与主洞的交叉段均应设加强段衬砌,加强段衬砌应向各交叉洞延伸,主洞延伸长度不小于 5.0m,横通道延伸长度不小于 3.0m。

8.2 喷锚衬砌

8.2.1 喷射混凝土厚度不应小于 50mm,不宜大于 300mm。

8.2.2 钢筋网喷射混凝土设计应符合下列规定：

- 1 钢筋网网格应按矩形布置,钢筋间距宜为 150 ~ 300mm。
- 2 钢筋网钢筋的搭接长度应不小于 $30d$ (d 为钢筋直径)。
- 3 钢筋网喷射混凝土保护层厚度应不小于 20mm,当采用双层钢筋网时,两层钢筋网之间的间隔距离应不小于 60mm。
- 4 单层钢筋网喷射混凝土厚度不得小于 80mm,双层钢筋网喷射混凝土厚度不得小于 150mm。
- 5 钢筋网应配合锚杆一起使用,钢筋网宜与锚杆绑扎连接或焊接。

8.2.3 钢纤维喷射混凝土设计应符合下列规定：

- 1 钢纤维掺量宜为干混合料质量的 1.5% ~ 4% ($33 \sim 96\text{kg/m}^3$)。
- 2 钢纤维喷射混凝土的设计强度等级不应低于 C25。

8.2.4 为提高喷射混凝土的抗裂性能,可采用合成纤维喷射混凝土,合成纤维喷射混凝土的设计强度等级不应低于 C20,合成纤维喷射混凝土应根据试验确定其掺量。

当防水要求较高时,可采用强度等级大于 C30 的高性能喷射混凝土。

8.2.5 锚杆支护设计应根据隧道围岩条件、隧道断面尺寸、作用部位、施工条件等合理选择锚杆设计参数。锚杆种类如下：

- 1 全长粘结型锚杆有：普通水泥砂浆锚杆、早强水泥砂浆锚杆、树脂锚杆、水泥卷锚杆、中空注浆锚杆和自钻式注浆锚杆等。
- 2 端头锚固型锚杆有：机械锚固锚杆、树脂锚固锚杆、快硬水泥卷端头锚杆等。
- 3 摩擦型锚杆有：缝管锚杆、楔管锚杆、水胀锚杆等。
- 4 预应力锚杆。

8.2.6 永久支护的锚杆应为全长粘结型锚杆或预应力注浆锚杆。其它类型的锚杆不能作为永久支护,当需作永久支护时,锚孔内必须注满砂浆或树脂。

8.2.7 自稳时间短的围岩,宜采用全粘结树脂锚杆或早强水泥砂浆锚杆。

8.2.8 锚杆露头应设托板,托板长、宽、厚宜不小于 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。

8.2.9 在 III、IV、V、VI 级围岩条件下,锚杆应按系统锚杆设计,并符合下列规定：

- 1 锚杆一般应沿隧道周边径向布置,当结构面或岩层层面明显时,锚杆应与岩体主结构面或岩层层面呈大角度布置。

- 2 锚杆应按矩形排列或梅花形排列。
- 3 锚杆间距不得大于 1.5m。间距较小时,可采用长短锚杆交错布置。
- 4 两车道隧道系统锚杆长度一般不小于 2.0m,三车道隧道系统锚杆长度一般不小于 2.5m。

8.2.10 局部不稳定的岩块宜设置局部锚杆,可采用全长粘结型锚杆、端头锚固型锚杆、预应力锚杆,锚固端应置于稳定岩体内,锚杆参数应通过计算确定。

8.2.11 软岩、收敛变形较大的围岩地段,可采用预应力锚杆,预应力锚杆的预加应力应不小于 100kPa。预应力锚杆的锚固端必须锚固在稳定岩层内。

8.2.12 岩体破碎、成孔困难的围岩,宜采用自进式锚杆。

8.2.13 在围岩条件较差地段或地面沉降有严格限制时,应在初期支护内增设钢架。常用的钢架有:钢筋格栅钢架、工字形型钢钢架、U 形型钢钢架和 H 形型钢钢架。钢架支护宜优先选用格栅钢架。格栅钢架主筋宜采用 HRB335、HRB400 钢,辅筋宜采用 HPB235 钢。型钢钢架支护宜采用工字形钢、U 形钢和 H 形型钢钢架。

8.2.14 在设置超前支护的地段,可设置钢架作为超前锚杆、超前小导管、超前大管棚等的尾端支点。

8.2.15 钢架支护的一般规定:

- 1 钢架支护必须有足够的刚度和强度,能够承受隧道施工期间可能出现的荷载。
- 2 钢架支护间距宜为 0.5~1.5m。
- 3 采用钢架支护的地段连续使用钢架的数量不少于 3 榀;钢架支护榀与榀之间必须用直径为 18~22mm 的钢筋连接,连接筋的间距不大于 1m,并在钢架支护内缘、外缘交错布置。
- 4 钢架应分节段制作,节段与节段之间通过钢板用螺栓连接或焊接。
- 5 钢架与围岩之间的混凝土保护层厚度不应小于 40mm;临空一侧的混凝土保护层厚度不应小于 20mm。

8.2.16 大面积淋水地段、膨胀性地层、能造成衬砌腐蚀的地段、最冷月份平均气温低于 -5℃的地区或有冻害的地段,不宜采用喷锚衬砌。

8.2.17 喷锚衬砌可采用工程类比法或数值计算,并结合现场监控量测进行设计。

8.3 整体式衬砌

8.3.1 整体式衬砌截面可设计为等截面或变截面。对设仰拱的地段,仰拱与边墙宜采用小半径曲线连接,仰拱厚度宜与拱圈厚度相同。

8.3.2 明洞衬砌与洞内衬砌交界处或不设明洞的洞口段衬砌,在距洞口 5~12m 的位置应设沉降缝;在洞内,软硬地层明显分界处宜设沉降缝;在连续 V、VI 级围岩中每 30~80m 应设沉降缝一道。

8.3.3 严寒与酷热温差变化大的地区,特别是在最冷月份平均气温低于 -15°C 的寒冷地区,距洞口 100~200m 范围的衬砌段应根据情况增设伸缩缝。

8.3.4 沉降缝、伸缩缝缝宽应大于 20mm,缝内可夹浸沥青木板或沥青麻丝。伸缩缝、沉降缝应垂直于隧道轴线设置。

8.3.5 沉降缝、伸缩缝可兼作施工缝。在设有沉降缝、伸缩缝的位置,施工缝宜调整到同一位置。

8.3.6 不设仰拱的地段,衬砌边墙基底应置于稳固的地基之上,在洞门墙厚度范围内,边墙基础应加深到与洞门墙基础底相同的标高。

8.3.7 在有明显偏压的地段,应采用抗偏压衬砌,抗偏压衬砌宜采用钢筋混凝土结构。

8.3.8 隧道横洞与主洞的交叉段衬砌宜采用钢筋混凝土结构。

8.3.9 地震动峰值加速度系数大于 0.2 的地区,洞口段及软弱围岩段的衬砌宜采用钢筋混凝土结构。

8.3.10 当采用钢筋混凝土衬砌结构时,混凝土强度等级不应小于 C25,受力主筋的净保护层厚度不小于 40mm。

8.4 复合式衬砌

8.4.1 复合式衬砌是由初期支护和二次衬砌及中间夹防水层组合而成的衬砌形式。复合式衬砌设计应符合下列规定:

- 1 初期支护宜采用锚喷支护,即由喷射混凝土、锚杆、钢筋网和钢架等支护形式单独

或组合使用,并应符合 8.2 节的规定。锚杆支护宜采用全长粘结锚杆。

2 二次衬砌宜采用模筑混凝土或模筑钢筋混凝土结构,衬砌截面宜采用连接圆顺的等厚衬砌断面,仰拱厚度宜与拱墙厚度相同。二次衬砌应符合 8.3.2 ~ 8.3.10 条的规定。

3 在确定开挖断面时,除应满足隧道净空和结构尺寸外,还应考虑初期支护并预留适当的变形量。预留变形量的大小可根据围岩级别、断面大小、埋置深度、施工方法和支护情况等,采用工程类比法预测。当无预测值时可参照表 8.4.1 选用,并应根据现场监控量测结果进行调整。

表 8.4.1 预留变形量(mm)

围岩级别	两车道隧道	三车道隧道	围岩级别	两车道隧道	三车道隧道
I	—	—	IV	50 ~ 80	80 ~ 120
II	—	10 ~ 50	V	80 ~ 120	100 ~ 150
III	20 ~ 50	50 ~ 80	VI	现场量测确定	

注:围岩破碎取大值;围岩完整取小值。

8.4.2 复合式衬砌可采用工程类比法进行设计,并通过理论分析进行验算。初期支护及二次衬砌的支护参数可参照表 8.4.2-1、表 8.4.2-2 选用,并应根据现场围岩监控量测信息对设计支护参数进行必要的调整。

表 8.4.2-1 两车道隧道复合式衬砌的设计参数

围岩级别	初 期 支 护						二次衬砌厚度(cm)		
	喷射混凝土厚度(cm)		锚杆(m)			钢筋网	钢架	拱、墙 混凝土	仰拱 混凝土
	拱部、边墙	仰拱	位置	长度	间距				
I	5	—	局部	2.0	—	—	—	30	—
II	5~8	—	局部	2.0~2.5	—	—	—	30	—
III	8~12	—	拱、墙	2.0~3.0	1.0~1.5	局部 @25×25	—	35	—
IV	12~15	—	拱、墙	2.5~3.0	1.0~1.2	拱、墙 @25×25	拱、墙	35	35
V	15~25	—	拱、墙	3.0~4.0	0.8~1.2	拱、墙 @20×20	拱、墙、 仰拱	45	45
VI	通过试验、计算确定								

表 8.4.2-2 三车道隧道复合式衬砌的设计参数

围岩级别	初 期 支 护							二次衬砌厚度(cm)	
	喷射混凝土厚度(cm)		锚杆(m)			钢筋网	钢架	拱、墙 混凝土	仰拱 混凝土
	拱部边墙	仰拱	位置	长度	间距				
I	8	—	局部	2.5	—	局部	—	35	—
II	8~10	—	局部	2.5~3.5	—	局部	—	40	—
III	10~15	—	拱、墙	3.0~3.5	1.0~1.5	拱、墙 @25×25	拱、墙	45	45
IV	15~20	—	拱、墙	3.0~4.0	0.8~1.0	拱、墙 @20×20	拱、墙、 仰拱	50, 钢筋 混凝土	50
V	20~30	—	拱、墙	3.5~5.0	0.5~1.0	拱、墙 (双层) @20×20	拱、墙、 仰拱	60, 钢筋 混凝土	60, 钢筋 混凝土
VI	通过试验、计算确定								

注:有地下水时,可取大值;无地下水时,可取小值。采用钢架时,宜选用格栅钢架。

8.4.3 对软弱流变围岩、膨胀性围岩,隧道支护参数的确定还应考虑围岩形变压力继续增长的作用。

8.5 明洞衬砌

8.5.1 下列情况应设明洞衬砌:

- 1 洞顶覆盖层薄,不宜大开挖修建路堑,并难于用暗挖法修建隧道的地段。
- 2 路基或隧道洞口受边坡坍方、岩堆、落石、泥石流等不良地质危害;修建路堑会危及到附近重要建筑物安全的地段。
- 3 铁路、公路、沟渠和其它人工构造物必须在隧道上方通过,不宜采用暗洞或立交桥涵跨越时。
- 4 为了保护洞口的自然景观而延伸隧道长度时。

8.5.2 选择明洞的结构类型,应根据地形、地质、施工条件,考虑结构安全、经济实用、美观等因素综合分析确定。

- 1 边坡一次塌方量大、落石较多且基底地质条件较好时,宜采用拱形明洞。
- 2 当路基外侧地形狭窄、内外侧墙基底地质明显不同,外侧基础工程量较大或洞顶荷载较小时,可采用棚洞。
- 3 在建筑高度受到限制或地基软弱的地方,可采用框架明洞。
- 4 为保护洞口自然环境或防止洞口边、仰坡滚石须加长隧道而修建明洞时,可采用拱形、箱形明洞,并可在洞顶植草、植树等。

8.5.3 明洞衬砌设计应符合下列规定：

- 1 当采用拱形明洞时,可按整体式衬砌设计。
- 2 半路堑拱形明洞应考虑偏压,拱形明洞外边墙宜适当加厚。当地形条件允许时,可考虑采用反压回填、设反压墙平衡偏压荷载,减小或消除偏压。
- 3 当拱形明洞边墙侧压较大及地层松软时,宜设仰拱。
- 4 明洞宜采用钢筋混凝土结构。
- 5 采用棚洞结构时,顶板一般可采用 T 形、Π 形或空心板截面构件,内边墙可采用挡墙结构;当内侧岩体完整、坚固、无地下水时,可采用锚杆挡墙;外侧边墙可视地形、地基、边坡坍方、落石等情况选用墙式、柱式、刚架等结构类型。
- 6 当明洞作为整治滑坡的措施时,应按支挡工程设计,并应采取综合治理措施,确保滑坡体稳定和明洞安全。
- 7 在地质情况变化较大地段应设置沉降缝;气温变化较大地区,应根据长度等情况设置伸缩缝。

8.5.4 明洞基础设计应符合下列规定：

- 1 明洞基础应置于稳固的地基上,明洞基础底标高不宜高于隧道侧沟沟底标高或路面基层标高。
- 2 当基岩埋深较浅时,基础可设置于基岩上;当基础位于软弱地基上时,可采用仰拱、整体式钢筋混凝土底板,也可采用桩基、扩大基础、基础加深和地基加固处理等措施。
- 3 外墙基础趾部应保证一定的嵌入基岩深度和护基宽度。在冻胀性土上设置明洞基础时,基底埋置深度应不小于冰冻线以下 250mm。当地基为斜坡地形时,地基可切割成台阶。
- 4 当地基外侧受水流冲刷影响时,应采取加固和防护措施。
- 5 明洞外边墙、棚洞立柱基础埋置深度超过路面以下 3m 时,宜在路面以下设置钢筋混凝土横向水平拉杆,并锚固于内边墙基础或岩体中,或用锚杆锚固于稳定的岩体中;立柱可在路基平面处加设纵撑,应与相邻立柱及内边墙连接。

8.5.5 明洞洞顶回填、拱背处理应根据明洞设置的目的、作用,以及地形条件、山坡病害而定,并符合下列规定：

- 1 当山坡有严重的危石、崩塌威胁时,应予清除或作加固处理。为防护一般的落石、崩塌危害时,明洞拱背回填土厚度不宜小于 1.5m,填土表面应设置一定的排水坡度。
- 2 不设洞门端墙时,可采用拱背部分裸露、按自然山坡坡度填土,填土表面一般应植草。
- 3 立交明洞上的填土厚度应结合公路、铁路、沟渠及其它人工构造物的标高、自然环境、美化要求和结构设计等研究确定,必要时可设护拱。
- 4 当明洞顶设置过水、泥石流等渡槽、沟渠及其它构造物时,设计应考虑其影响。一

般过水沟渠或普通截水沟沟底距洞顶外缘厚度不小于 1.0m。当为排泄山沟洪水、泥石流等的渡槽时,泥石流等渡槽沟渠底距洞顶外缘不小于 1.5m。

8.5.6 明洞边墙背后回填,应根据明洞类型、地质条件、设计要求和施工方法按下列要求确定:

- 1 衬砌设计考虑地层弹性抗力时,边墙背后超挖部分应用混凝土或浆砌片石回填。
- 2 衬砌设计只计墙背地层或回填土主动土压力时,边墙背后回填料的内摩擦角不应小于地层的计算摩擦角或设计的回填料的计算摩擦角。

9 结构计算

9.1 一般规定

9.1.1 隧道结构应按破损阶段法验算构件截面的强度。结构抗裂有要求时,对混凝土构件应进行抗裂验算,对钢筋混凝土构件应验算其裂缝宽度。

9.1.2 本章适用于静力问题的分析。

9.2 衬砌计算

9.2.1 深埋隧道中的整体式衬砌、浅埋隧道中的整体或复合式衬砌及明洞衬砌等应采用荷载结构法计算。深埋隧道中复合式衬砌的二次衬砌也可采用荷载结构法计算。荷载结构法的计算原理可见附录 I。

9.2.2 采用荷载结构法计算隧道衬砌的内力和变形时,应通过考虑弹性抗力等体现围岩对衬砌变形的约束作用。弹性抗力的大小及分布,对回填密实的衬砌构件可采用局部变形理论,按式(9.2.2)计算确定。

$$\sigma = k\delta \quad (9.2.2)$$

式中: σ ——弹性抗力的强度(MPa);

k ——围岩弹性抗力系数,无实测数据时可按附录 A 中表 A.0.4-1 选用;

δ ——衬砌朝向围岩的变形值(m),变形朝向洞内时取为零。

9.2.3 计算带仰拱的衬砌,当先做仰拱后建边墙时,应考虑仰拱对结构内力的影响;当仰拱在边墙之后施作时,则可不考虑。

9.2.4 按破损阶段验算构件截面的强度时,应根据不同的荷载组合,分别采用不同的安全系数,并应不小于表 9.2.4-1 和表 9.2.4-2 所示的数值。验算施工阶段的强度时,安全系数可采用表 9.2.4-1 和表 9.2.4-2“永久荷载 + 基本可变荷载 + 其它可变荷载”栏内的数值乘以折减系数 0.9。

表 9.2.4-1 混凝土和砌体结构的强度安全系数

破坏原因	圬工种类	混 凝 土		砌 体	
	荷载组合	永久荷载 + 基本可变荷载	永久荷载 + 基本可变荷载 + 其它可变荷载	永久荷载 + 基本可变荷载	永久荷载 + 基本可变荷载 + 其它可变荷载
混凝土或砌体达到抗压极限强度		2.4	2.0	2.7	2.3
混凝土达到抗拉极限强度		3.6	3.0		

表 9.2.4-2 钢筋混凝土结构的强度安全系数

破坏原因	荷载组合	永久荷载 + 基本可变荷载	永久荷载 + 基本可变荷载 + 其它可变荷载
钢筋达到计算强度或混凝土达到抗压或抗剪极限强度		2.0	1.7
混凝土达到抗拉极限强度		2.4	2.0

9.2.5 I~V 级围岩中,复合式衬砌的初期支护应主要按工程类比法设计。其中 IV、V 级围岩的支护参数应通过计算确定,计算方法为地层结构法。地层结构法的计算原理可见附录 J。

9.2.6 复合式衬砌中的二次衬砌,I~III 级围岩中为安全储备,并按构造要求设计;IV、V 级围岩中为承载结构,可用地层结构法计算内力和变形。

9.2.7 进行衬砌计算时,围岩地层的特性参数值应按地质资料选用,无资料时可按附录 A 中表 A.0.4-1 选用。隧道开挖后,应按监控量测结果对其修正。

9.2.8 按承载能力设计时,复合式衬砌初期支护的允许洞周相对收敛值应根据围岩地质条件分析确定,缺乏资料时可按表 9.2.8 选用。

表 9.2.8 允许洞周水平相对收敛值(%)

围岩级别	埋深(m)	< 50	50 ~ 300	> 300
III		0.10 ~ 0.30	0.20 ~ 0.50	0.40 ~ 1.20
IV		0.15 ~ 0.50	0.40 ~ 1.20	0.80 ~ 2.00
V		0.20 ~ 0.80	0.60 ~ 1.60	1.00 ~ 3.00

注:①水平相对收敛值系指收敛位移累计值与两测点间距离之比。

②硬质围岩隧道取表中较小值,软质围岩隧道取表中较大值。

③拱顶下沉允许值一般可按本表数值的 0.5~1.0 倍采用。

④本表所列数值在施工过程中可通过实测和资料积累作适当修正。

9.2.9 衬砌计算时,应使其在变形后仍满足净空要求。

9.2.10 整体式衬砌的混凝土偏心受压构件,其轴向力的偏心距不宜大于截面厚度的 0.45 倍;对于半路堑式明洞外墙、棚式明洞边墙和砌体偏心受压构件,则不应大于截面厚度的 0.3 倍。基底偏心距应符合表 9.4.1 的规定。

9.2.11 混凝土和砌体矩形截面轴心及偏心受压构件的抗压强度应按式(9.2.11)计算。

$$KN \leq \varphi \alpha R_a b h \quad (9.2.11)$$

式中: R_a ——混凝土或砌体的抗压极限强度,按表 5.2.9 和表 5.2.14 采用;

K ——安全系数,按表 9.2.4-1 采用;

N ——轴向力(kN);

b ——截面宽度(m);

h ——截面厚度(m);

φ ——构件纵向弯曲系数,对于贴壁式隧道衬砌、明洞拱圈及墙背紧密回填的边墙,可取 $\varphi = 1$,对于其它构件,应根据其长细比按表 9.2.11-1 采用;

α ——轴向力的偏心影响系数,按表 9.2.11-2 采用。

表 9.2.11-1 混凝土及砌体构件的纵向弯曲系数

H/h	<4	4	6	8	10	12	14	16
纵向弯曲系数 φ	1.00	0.98	0.96	0.91	0.86	0.82	0.77	0.72
H/h	18	20	22	24	26	28	30	
纵向弯曲系数 φ	0.68	0.63	0.59	0.55	0.51	0.47	0.44	

注:① H 为构件的高度, h 为截面短边的边长(当轴心受压时)或弯矩作用平面内的截面边长(当偏心受压时)。

②当 H/h 为表列数值的中间值时, φ 可按内插法求得。

表 9.2.11-2 偏心影响系数 α

e_0/h	α	e_0/h	α	e_0/h	α	e_0/h	α	e_0/h	α
0.00	1.000	0.10	0.954	0.20	0.750	0.30	0.480	0.40	0.236
0.02	1.000	0.12	0.923	0.22	0.698	0.32	0.426	0.42	0.199
0.04	1.000	0.14	0.886	0.24	0.645	0.34	0.374	0.44	0.170
0.06	0.996	0.16	0.845	0.26	0.590	0.36	0.324	0.46	0.142
0.08	0.979	0.18	0.799	0.28	0.535	0.38	0.278	0.48	0.123

注:①表中 e_0 为轴向力偏心距。

②表中 $\alpha = 1.000 + 0.648(e_0/h) - 12.569(e_0/h)^2 + 15.444(e_0/h)^3$ 。

9.2.12 按抗裂要求,混凝土矩形截面偏心受压构件的抗拉强度应按式(9.2.12)计算。

$$KN \leq \varphi \frac{1.75 R_1 b h}{\frac{6e_0}{h} - 1} \quad (9.2.12)$$

式中: R_1 ——混凝土的抗拉极限强度,按表 5.2.9 采用;

其它符号意义同前。

注:当为混凝土矩形截面构件, $e_0 \leq 0.20h$ 时,系抗压强度控制承载能力,可不按式(9.2.12)计算; $e_0 > 0.20h$ 时,系抗拉强度控制承载能力,可不按式(9.2.11)计算。

9.2.13 整体式衬砌的拱脚截面,当混凝土为间歇浇筑或边墙用砌体、拱圈用混凝土时,其偏心距应与 9.2.10 条砌体构件的规定相同,计算截面抗压强度时,安全系数也应采用表 9.2.4-1 所示对砌体规定的数值。

9.2.14 钢筋混凝土受弯和偏心受压构件的截面强度可按附录 K 计算。

9.2.15 钢筋混凝土衬砌结构构件,按荷载基本组合求得的最大裂缝宽度 $w_{\max}$ 不应大于 0.2mm。

9.2.16 对于受弯构件,按荷载的基本组合计算的最大挠度值不应大于表 9.2.16 规定的允许值。

表 9.2.16 受弯构件的允许挠度

构件类型		允许挠度
梁、板构件	$l_0 \leq 5\text{m}$	$l_0/250$
	$5\text{m} < l_0 \leq 8\text{m}$	$l_0/300$
	$l_0 > 8\text{m}$	$l_0/400$

9.2.17 钢筋混凝土受弯构件在各种荷载组合作用下的变形(挠度和转角),可根据给定的刚度按材料力学的方法计算。

9.3 明洞计算

9.3.1 明洞衬砌应按破损阶段计算构件截面强度,并根据不同荷载组合,采用表 9.2.4-2 的安全系数值。

9.3.2 当墙背围岩对边墙变形有约束作用时,应按 9.2.2 条考虑弹性抗力的影响。

9.4 洞门计算

9.4.1 采用挡墙式洞门时,洞门墙可视作挡土墙,按极限状态验算其强度,并应验算绕墙趾倾覆及沿基底滑动的稳定性。验算时应符合表 9.4.1 的规定,并应符合《公路路基设计规范》、《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》、《公路桥涵地基与基础设计规范》的有关规定。

表 9.4.1 洞门墙主要验算规定

墙身截面荷载 效应值 S_d	$\leq$ 结构抗力效应值 R_d (按极限状态计算)	墙身截面荷载 效应值 S_d	$\leq$ 结构抗力效应值 R_d (按极限状态计算)
墙身截面偏心距 e	≤ 0.3 倍截面厚度	滑动稳定安全系数 K_s	≥ 1.3
基底应力 σ	$\leq$ 地基容许承载力	倾覆稳定安全系数 K_0	≥ 1.6
基底偏心距 e	岩石地基 $\leq B/5 \sim B/4$; 土质 地基 $\leq B/6$ (B 为墙底厚度)		

对于高洞门墙,为避免拉应力过大,设计时应控制截面拉应力。

9.4.2 洞门设计计算参数应按现场试验资料采用。当缺乏试验资料时,可参照表 9.4.2 选用。

表 9.4.2 洞门设计计算参数

仰坡坡率	计算摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	重度 γ (kN/m^3)	基底摩擦系数 f	基底控制压应力 (MPa)
1:0.5	70	25	0.60	0.80
1:0.75	60	24	0.50	0.60
1:1	50	20	0.40	0.40 ~ 0.35
1:1.25	43 ~ 45	18	0.40	0.30 ~ 0.25
1:1.5	38 ~ 40	17	0.35 ~ 0.40	0.25

9.4.3 钢筋混凝土洞门的截面最小配筋率应符合 9.5.4 条的规定。

9.5 构造要求

9.5.1 隧道建筑物各部结构的截面最小厚度应大于表 9.5.1 的数值。

表 9.5.1 截面最小厚度 (cm)

建筑材料种类	隧道和明洞衬砌			洞门端墙、翼墙和 洞口挡土墙
	拱 圈	边 墙	仰 拱	
混凝土	20	20	20	30
片石混凝土		50	50	50
浆砌粗料石		30		30
浆砌片石		50		50

9.5.2 混凝土基础台阶的坡线和竖直线之间的夹角不应大于 45° ; 当为砌体基础时, 不应大于 35° 。

9.5.3 钢筋混凝土构件中受力钢筋的混凝土保护层最小厚度应符合表 9.5.3 的规定。

表 9.5.3 混凝土保护层最小厚度(cm)

构件厚度	保护层最小厚度		构件厚度	保护层最小厚度	
	非侵蚀性环境	侵蚀性环境		非侵蚀性环境	侵蚀性环境
< 15	根据情况确定	根据情况确定	31 ~ 50	3.5	4
15 ~ 30	3	3.5	> 50	4	5

注: ①明洞和洞门均采用表中非侵蚀性环境栏内的数值。

②有防火要求时, 保护层最小厚度应按相应规范考虑。

9.5.4 钢筋混凝土结构构件中纵向受力钢筋的截面最小配筋率应符合表 9.5.4 的规定。

表 9.5.4 钢筋混凝土结构构件中纵向受力钢筋的截面最小配筋率(%)

受力类型	最小配筋率					
受压构件	全部纵向钢筋	0.6				
	一侧纵向钢筋	0.2				
受弯构件、偏心受拉、轴心受拉构件一侧的受拉钢筋	钢筋种类	混凝土强度等级				
		C20	C25	C30	C40	C50
	HPB235	0.25	0.25	0.30	0.35	0.40
	HRB335	0.20	0.20	0.20	0.25	0.30

注: ①受压构件全部纵向钢筋最小配筋率, 当采用 HRB400 钢筋时, 应按表中规定减小 0.1。

②偏心受拉构件中的受压钢筋, 应按受压构件一侧纵向钢筋考虑。

③受压构件的全部纵向钢筋和一侧纵向钢筋的配筋率以及轴心受拉构件和小偏心受拉构件一侧受拉钢筋的配筋率应按构件的全截面面积计算; 受弯构件、大偏心受拉构件一侧受拉钢筋的配筋率应按全截面面积扣除受压翼缘面积后的截面面积计算。

④当钢筋沿构件截面周边布置时, “一侧纵向钢筋”系指沿受力方向两个对边中的一边布置的纵向钢筋。

9.5.5 钢筋的弯起及锚固应符合下列规定:

1 钢筋的弯起如图 9.5.5。

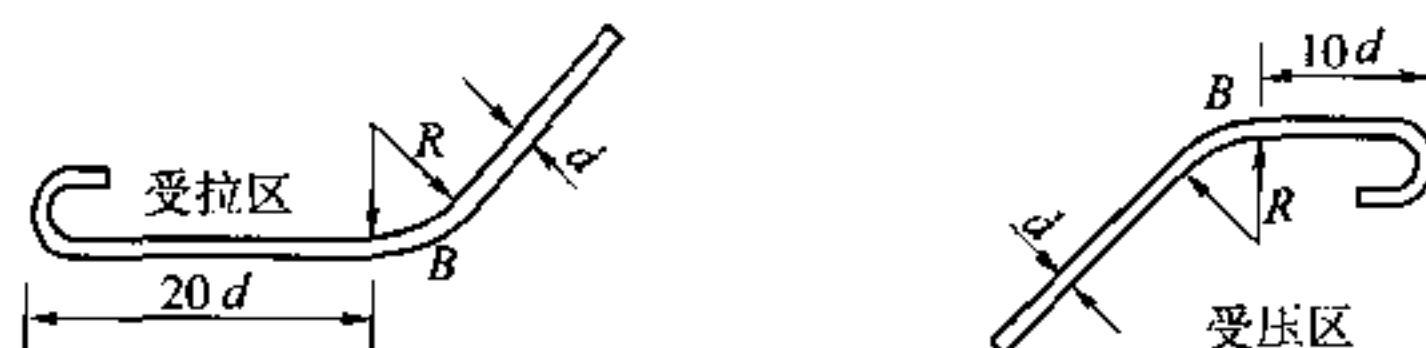


图 9.5.5 弯起钢筋端部构造

当纵向受力钢筋需弯起时,弯起钢筋的弯终点 B 处应留有锚固长度,该长度在受拉区不应小于 $20d$,在受压区不应小于 $10d$,光圆钢筋在端部尚应设弯钩。位于梁侧底层的钢筋不应弯起。

弯起钢筋的弯起角,对于梁宜取 45° 或 60° ;对于板不宜小于 30° 。

弯起钢筋最小弯曲半径 R ,钢筋为 HPB235 时为 $10d$;钢筋为 HRB335 时为 $12d$ (d 为钢筋直径)。

2 钢筋的锚固长度应符合表 9.5.5 的规定。

表 9.5.5 钢筋的锚固长度

钢筋类别		HPB235 光面钢筋	HRB335 螺纹钢
锚固条件			
受压钢筋自不受力处算起的锚固长度	$\geq 30d$	不设弯钩	—
	$< 30d$	$10d$ 加直钩	—
	$\geq 20d$	—	不设弯钩
	$< 20d$	—	$10d$ 加直钩
受拉构件的钢筋按粘结力计算的锚固长度	在无横向压力区域	$30d$ 加半圆钩	$20d$ 加直钩
	在有横向压力区域	$15d$ 加半圆钩	$10d$ 加直钩
受弯构件、偏心受压构件的受拉钢筋自不受力处算起的锚固长度	在受压区	$10d$ 加直钩	$10d$ 不设弯钩
	在受拉区 (在困难情况下)	$20d$ 加半圆钩	$20d$ 加直钩
弯起钢筋伸到受压区的长度	$\geq 20d$	不设与纵筋平行的直段,端部采用直钩	不设与纵筋平行的直段,且不设弯钩
	$< 20d$	设与纵筋平行长度为 $10d$ 的直段,并加直钩	设与纵筋平行长度为 $15d$ 的直段,且不设弯钩

9.5.6 轴心受压构件的配筋构造应符合下列规定:

1 仅受轴心压力并配有纵筋及一般箍筋的构件:

- 1) 纵筋截面积不应小于构件截面积的 0.5% ,也不宜大于 3% ;
- 2) 纵筋的直径不宜小于 12mm ;
- 3) 箍筋的间距不应超过纵筋直径的 15 倍,也不应大于构件横截面的最小尺寸;
- 4) 箍筋的直径不应小于纵筋直径的 $1/4$,也不应小于 6mm 。

2 当采用螺纹钢筋时:

- 1) 纵筋的截面积不应小于螺旋圈内核心面积的 0.6% ;
- 2) 核心截面积不应小于构件截面积的 $2/3$;
- 3) 螺纹钢筋的螺距不应大于核心直径的 $1/5$,同时也不应大于 80mm ;
- 4) 螺纹钢筋换算截面不应小于纵筋的截面积,同时也不应超过该截面积的 3 倍;
- 5) 纵筋截面积与螺纹钢筋换算截面积之和不应小于该截面积的 10% 。

9.5.7 直径大于 25mm 的光圆钢筋以及所有螺纹钢筋的接头均应采用焊接;直径较小的光面钢筋可以采用搭接,此时钢筋端部应弯成半圆形弯钩,两钩切点间的距离对受拉钢筋不得小于 $30d$,对受压钢筋不得小于 $20d$,在搭接范围内应用铁丝捆扎。

焊接接头的抗拉强度不应低于钢筋本身的强度。

9.5.8 钢筋的直径和间距应符合表 9.5.8-1 ~ 表 9.5.8-3 的要求。

表 9.5.8-1 柱中钢筋的直径和间距(mm)

类 别	直 径 d	间 距
纵向受力钢筋(主筋)	≥ 12	净距 ≥ 50 , 中距 ≤ 350
箍筋	≥ 6 ; $\geq d/4$ (d 为主筋中的最大直径); 纵向钢筋配筋率 $> 3\%$ 时, ≥ 8	≤ 400 ; $\leq$ 截面的短边尺寸; $\leq 15d$ (绑扎骨架中) 或 $\leq 20d$ (焊接骨架中), d 为纵筋中的最小直径。在绑扎的搭接接头 l_d 长度范围内,当搭接钢筋为受压时, $\leq 10d$ (d 为主筋中最小直径), 且 ≤ 200
构造钢筋	偏心受压柱,当截面高度 $h \geq 600\text{mm}$ 时,应在柱长边设置纵向构造钢筋, $d = 10 \sim 16$, 间距 ≤ 500	

表 9.5.8-2 板中钢筋的直径和间距(mm)

类 别	直 径 d	间 距
纵向受力钢筋(主筋)	受力钢筋常用 6, 8, 10	板厚 $h \leq 150\text{mm}$ 时, ≤ 200 ; $h > 150\text{mm}$ 时, $\leq 1.5h$, 且不应大于 300
构造钢筋	分布钢筋常用 $d \geq 6$, 间距 ≤ 200	

表 9.5.8-3 梁中钢筋的直径和间距(mm)

类 别	直 径 d	间 距
纵向受力钢筋(主筋)	梁高 $h < 300\text{mm}$ 时, ≥ 6 ; $h \geq 300\text{mm}$ 时, ≥ 10	净距 $\geq d$, 同时下部钢筋 $\geq 25\text{mm}$, 上部钢筋 $\geq 30\text{mm}$ 。下部钢筋多于两排时, 其横向中距应是下面两排中距的 2 倍
箍筋	梁高 $h \leq 250\text{mm}$ 时, ≥ 4 ; $250\text{mm} < h \leq 800\text{mm}$ 时, ≥ 6 ; $h > 800\text{mm}$ 时, ≥ 8 ; 配有计算的受压钢筋时, $\geq d/4$ (d 为受压钢筋中的最大直径)	梁高 $150\text{mm} < h \leq 300\text{mm}$ 时, 150 ~ 200; $300\text{mm} < h \leq 500\text{mm}$ 时, 200 ~ 300; $500\text{mm} < h \leq 800\text{mm}$ 时, 250 ~ 350; $h > 800\text{mm}$ 时, 300 ~ 500。 $V > 0.07f_{cd}bh_0 + 0.05N_{p0}$ 时, 取小值, 反之, 取大值 (V 为剪力设计值; N_{p0} 为混凝土法向预应力等于零时预应力钢筋及非预应力钢筋的合力; f_{cd} 为混凝土轴心抗压强度设计值)
构造钢筋	1 架立钢筋, 梁跨 $l < 4\text{m}$ 时, $d \geq 6$, $l = 4 \sim 6\text{m}$ 时, $d \geq 8$, $l > 6\text{m}$ 时, $d \geq 10$; 2 梁侧构造钢筋及拉筋, 梁高 $h > 700\text{mm}$ 时, 在梁两侧面沿高度每隔 300 ~ 400mm 应设一根 $d \geq 10$ 的构造钢筋, 并以拉筋联系, 拉筋直径一般与箍筋同, 间距 500 ~ 700mm, 常为箍筋间距的倍数	

注: 当按计算需设置弯起钢筋时, 前一排(对支座而言)的弯起点至后一排的弯终点的距离不应大于表中 $V > 0.07f_{cd}bh_0 + 0.05N_{p0}$ 时的箍筋间距。

10 防水与排水

10.1 一般规定

10.1.1 隧道防排水应遵循“防、排、截、堵结合,因地制宜,综合治理”的原则,保证隧道结构物和营运设备的正常使用和行车安全。隧道防排水设计应对地表水、地下水妥善处理,洞内外应形成一个完整通畅的防排水系统。

10.1.2 高速公路、一级公路、二级公路隧道防排水应满足下列要求:

- 1 拱部、边墙、路面、设备箱洞不渗水。
- 2 有冻害地段的隧道衬砌背后不积水,排水沟不冻结。
- 3 车行横通道、人行横通道等服务通道拱部不滴水,边墙不淌水。

10.1.3 三级公路、四级公路隧道应做到:

- 1 拱部、边墙不滴水,路面不积水,设备箱洞不渗水。
- 2 有冻害地段的隧道衬砌背后不积水,排水沟不冻结。

10.1.4 当采取防排水工程措施时,应注意保护自然环境。当隧道内渗漏水引起地表水减少,影响居民生产、生活用水时,应对围岩采取堵水措施,减少地下水的渗漏。

10.2 防水

10.2.1 隧道地表沟谷、坑洼积水、渗水对隧道有影响时,宜采用疏导、勾补、铺砌和填平等处治措施。废弃的坑穴、钻孔等应填实封闭。隧道附近的水库、池沼、溪流、井泉水、地下水,当有可能渗入隧道时,应采取防止或减少其下渗的处理措施。

10.2.2 隧道采用复合式衬砌时,在初期支护与二次衬砌之间应设置防水板及无纺布。要求如下:

- 1 无纺布密度不小于 $300\text{g}/\text{m}^2$ 。
- 2 防水板应采用易于焊接的防水卷材,厚度不小于 1.0mm ,接缝搭接长度不小于 100mm 。

10.2.3 隧道二次衬砌应满足抗渗要求。混凝土的抗渗等级,有冻害地段及最冷月份平均气温低于 -15°C 的地区不低于 S8,其余地区不低于 S6。

10.2.4 隧道二次衬砌的施工缝、沉降缝、伸缩缝应采取可靠的防水措施。

10.2.5 有侵蚀性地下水时,应针对侵蚀类型,采用抗侵蚀混凝土,压注抗侵蚀浆液,或铺设抗侵蚀防水层。

10.2.6 围岩破碎、涌水易坍塌地段,宜向围岩内预注浆。向衬砌背后压浆时,应防止因压浆而堵塞衬砌背后的排水管道。

10.2.7 当隧道位于常水位以下,又不宜排泄时,隧道衬砌应采用抗水压衬砌。

10.3 排水

10.3.1 隧道洞内宜按地下水和营运清洗污水、消防污水分离排放的原则设置纵向排水系统,应能保证排水畅通,避免洞内积水。

10.3.2 隧道内排水应符合下列规定:

- 1 路面两侧应设纵向排水沟,引排营运清洗水、消防水和其它废水。
- 2 隧道纵向排水坡宜与隧道纵坡一致。
- 3 路侧边沟可设置为开口式明沟或暗沟。当边沟为暗沟时,应设沉沙池、滤水篦,其间距宜为 25 ~ 30m。
- 4 检修道或人行道的道面应考虑排水,可酌情设 0.5% ~ 1.5% 的横坡,亦可在墙脚与检修道交角处设宽 50mm、深 30mm 的纵向凹槽,以利道面清洁排水。

10.3.3 路面结构底部排水设施应符合下列规定:

- 1 路面结构下宜设纵向中心水沟(管),集中引排地下水。
- 2 中心水沟(管)断面积应根据隧道长度、纵坡、地下水渗流量,通过水力计算确定。
- 3 中心水沟(管)纵向应按间距 50m 设沉沙池,并根据需要设检查井。检查井的位置、构造不得影响行车安全,并应便于清理和检查。
- 4 隧底应设横向导水管,以连接中心水沟(管)与衬砌墙背排水盲管。横向导水管的直径不宜小于 100mm,横向坡度不应小于 2%,其纵向间距应根据地下水量确定,一般可按 30 ~ 50m 设置。当不设隧底中心水沟(管)时,横向导水管的纵向间距不宜小于 10m。
- 5 路面底部应设不小于 1.5% 的横向排水坡度。
- 6 寒冷和严寒地区有地下水的隧道,最冷月份平均气温低于 -10°C 时,应采用深埋

中心水沟;最冷月份平均气温低于 -25°C 时,应在隧道下设防寒泄水隧洞。

10.3.4 隧道衬砌外排水设施应符合下列规定:

- 1 在衬砌两侧边墙背后底部应设沿隧道的纵向排水盲管(沟),其孔径不应小于80mm。
- 2 沿衬砌背后环向应设置导水盲管,其纵向间距不应大于20m,遇水量较大时,环向盲管应加密。对有集中出水处,应单独设竖向盲管。环向盲管、竖向盲管的直径不应小于50mm。
- 3 环向盲管、竖向盲管应与边墙底部的纵向排水盲管(沟)连通;纵向排水盲管(沟)应与横向导水管连通,以形成完整的纵横向排水系统。环向盲管、竖向盲管、纵向排水盲管应用无纺布包裹。

10.3.5 当地下水发育,含水层明显,又有长期充分补给来源时,可利用辅助坑道排水或设置泄水洞等截、排水设施。

10.3.6 当洞内水质有侵蚀时,应采取适当措施,防止排水造成环境污染。

10.4 洞口与明洞防排水

10.4.1 隧道、辅助坑道的洞口及明洞应设置截水沟和排水沟,洞口边坡、仰坡应采取防护措施,防止地表水的下渗和冲刷。

10.4.2 为防止洞外水流入隧道内,可在洞口外设置反向排水边沟或采取截流措施。

10.4.3 明洞防排水要求如下:

- 1 明洞顶部应设置必要的截、排水系统。
- 2 回填土表面宜铺设隔水层,并与边坡搭接良好。
- 3 靠山侧边墙底或边墙后宜设置纵向和竖向盲沟,将水引至边墙泄水孔排出。
- 4 衬砌外缘应敷设外贴式防水层。
- 5 明洞与隧道接头处应做好防水处理。

11 小净距及连拱隧道

11.1 小净距隧道

11.1.1 小净距隧道是指隧道间的中间岩柱厚度小于表 4.3.2 建议值的特殊隧道布置形式。宜用于洞口地形狭窄或有特殊要求的中、短隧道,也可用于长或特长隧道洞口局部地段。

11.1.2 小净距隧道设计应符合下列要求:

- 1 应根据隧道地质条件,进出口地形条件,结合使用要求,经综合比选后确定最小净距。
- 2 应优先选用复合式衬砌,支护参数应经工程类比、计算分析综合确定。
- 3 设计应考虑相应的施工方法,并提出各类方法的具体要求。
- 4 设计与施工应遵循“少扰动、快加固、勤量测、早封闭”的原则,并将中间岩柱的稳定与加固作为设计与施工的重点。
- 5 小净距隧道监控量测应根据不同围岩级别制订量测计划。应把中间岩柱稳定、浅埋段地表沉降和爆破振动对相邻洞室的影响作为监控量测的重要内容。
- 6 在地震动峰值加速度大于 0.15 的地区选用小净距隧道时,宜进行抗震强度和稳定性验算。

11.1.3 为确保小净距隧道的安全,应对相邻双洞最大临界震动速度按净距、围岩级别、支护实施阶段分别进行控制,最大临界震动速度可通过试验确定,无资料时可参照《爆破安全规程》(GB 6722)取值。

11.1.4 小净距隧道有偏压时,支护参数、施工方法、施工顺序宜进行特殊设计。

11.2 连拱隧道

11.2.1 连拱隧道主要适用于洞口地形狭窄,或对两洞间距有特殊要求的中、短隧道。

11.2.2 连拱隧道按中墙结构形式不同分为整体式中墙和复合式中墙两种形式,在有条件加大中墙厚度的地段宜选用复合式中墙连拱隧道形式。

11.2.3 连拱隧道设计必须结合洞外接线、地形、地质和施工条件进行,并应符合下列规定:

- 1 隧道暗挖段应优先采用复合式衬砌,支护参数可采用工程类比或计算分析确定。
- 2 中墙设计应在满足结构设计与安全的前提下,综合考虑洞外接线要求、防排水系统的可靠性等因素。
- 3 两车道连拱隧道设计为整体式中墙时,中墙厚度不宜小于 1.4m;设计为复合式中墙时,中墙厚度不宜小于 2.0m。三车道连拱隧道设计为整体式中墙时,中墙厚度不宜小于 1.6m;设计为复合式中墙时,中墙厚度不宜小于 2.2m。
- 4 整体式中墙的连拱隧道应注意纵向施工缝的预留位置、施工缝止水方式、中墙纵向排水管与防水层的布置,避免施工缝渗漏水、防水层顶破和排水管堵塞。复合式中墙的连拱隧道防排水设计与独立双洞隧道基本相同。
- 5 连拱隧道应根据结构需要设置变形缝,双洞变形缝应在同一位置设置,并应注意隧道纵向荷载对结构的影响。
- 6 连拱隧道监控量测可参照《公路隧道施工技术规范》(JTJ 042)的相应要求进行,并以拱部垂直位移、中墙以上的拱部水平位移为重点。
- 7 连拱隧道设计应考虑相应的施工方法,并提出各类方法的具体要求,辅助施工措施应作专项设计。
- 8 采用导洞施工时,应对导洞围岩情况认真观察记录,并及时反馈信息,根据围岩变化情况和监控量测资料及时调整设计与施工方案。导洞宽度宜大于 4m。
- 9 设计中应采取有效辅助措施,防止施工中拱部推力不平衡对中墙结构造成危害。
- 10 在地震动峰值加速度大于 0.15 的地区,连拱隧道应进行抗震强度和稳定性验算。

11.2.4 为确保连拱隧道施工安全,应对相邻洞室的最大临界震动速度进行控制,一般不宜大于 15m/s。

11.2.5 连拱隧道有偏压时,应对支护参数与施工方法进行特殊设计。

12 辅助通道

12.1 一般规定

12.1.1 为满足营运通风、逃生救灾等要求或增加施工开挖面,应设置辅助通道。满足营运通风、救灾要求而设置的营运辅助通道为竖井、斜井、平行导坑、横通道、风道、地下风机房等;为增加施工开挖面而设置的施工辅助通道为竖井、斜井、平行导坑、横洞等。

12.1.2 应根据隧道长度、施工期限、地形、地质、水文等条件,结合通风、救灾、排水及弃渣的需要,通过技术经济比较,合理选设竖井、斜井、平行导坑、横洞及风道。

12.1.3 营运辅助通道的断面尺寸应根据通风需要、管路布置和逃生救灾要求确定;施工辅助通道的断面尺寸应根据施工要求、地质条件、支护类型、设备技术条件及工作环境要求等因素确定。

12.1.4 营运辅助通道一般应设模筑衬砌,并要求内壁面平滑;施工辅助通道根据情况可采用喷锚衬砌。辅助通道岔洞和正洞联结处应作加强设计。

12.1.5 施工辅助通道在隧道主体工程竣工后不予利用者,在保证隧道安全的条件下应作如下处理:

- 1 整理排水系统,使其畅通。
- 2 加强洞(井)口、软弱围岩段及辅助通道与正洞连接段的衬砌。
- 3 封闭洞(井)口时应设置安全检查设施。

12.1.6 辅助通道的洞(井)口位置选择、施工场地布置及弃渣处理等,应注意环境保护、少占耕地,防止弃渣堵塞河道、沟渠、道路交通,并应减少由于辅助通道的修建对农田、水利设施和生活用水的影响。

12.1.7 应根据地下水水量和施工组织安排,选择竖井、斜井井底的排水方式和相应的设施。应根据运量要求、提升方式、运输设备等因素,合理布置竖井、斜井井底的场地。

12.2 竖井

12.2.1 竖井的布置应符合下列规定：

- 1 井口位置的高程应高出洪水频率为 1/100 的水位至少 0.5m。
- 2 竖井平面位置的选择应综合考虑施工与营运的需要。
- 3 竖井断面宜采用圆形，井筒内应设置安全梯。

12.2.2 竖井的衬砌应符合下列规定：

- 1 竖井井口应设混凝土或钢筋混凝土井颈，马头门应作模筑混凝土衬砌。
- 2 井口段、地质条件较差的井身段及马头门的上方宜设壁座，其形式、间距可根据地质条件、施工方法及衬砌类型确定。衬砌参数可按表 12.2.2 选用。

表 12.2.2 竖井衬砌参数

围岩 级别	喷锚衬砌		支护衬砌	复合衬砌		
	$D < 5\text{m}$	$5\text{m} \leq D \leq 7\text{m}$		初期支护		二次 衬砌
				$D < 5\text{m}$	$5\text{m} \leq D \leq 7\text{m}$	
I	喷混凝土厚 10cm	喷混凝土厚 10~15cm, 必要时 局部设锚杆	模筑混凝土 或钢筋混凝土 厚 30cm, 砌体厚 40cm	—	—	—
II	喷混凝土厚 10~15cm, 锚杆长 1.5~2m, 间距 1~ 1.5m	喷混凝土厚 15 ~20cm, 锚杆长 2 ~2.5m, 间距 1m, 配钢筋网, 必要时 加钢圈梁	模筑混凝土 或钢筋混凝土 厚 30cm, 砌体厚 50cm	—	—	—
III	喷混凝土厚 15~20cm, 锚杆长 2~2.5m, 间距 1m, 配钢筋网, 必要时 设钢圈梁	喷混凝土厚 20cm, 锚杆长 2.5 ~3m, 间距 1m, 配 钢筋网, 加钢圈梁	混凝土或钢 筋混凝土厚 40cm, 砌体厚 60cm	喷混凝土厚 5~ 10cm, 锚杆长 1.5 ~2m, 间距 1m, 必 要时配钢筋网	喷混凝土厚 10~15cm, 锚杆长 2~2.5m, 间距 1m, 必要时局部配钢 筋网	30cm
IV	—	—	混凝土或钢 筋混凝土厚 50cm, 砌体厚 70cm	喷混凝土厚 10~15cm, 锚杆长 2~2.5m, 间距 1m, 必要时配钢筋网	喷混凝土厚 15 ~20cm, 锚杆长 2.5~3m, 间距 0.75 ~1m, 配钢筋网	40cm
V	—	—	混凝土或钢 筋混凝土厚 60cm, 砌体厚 80cm	喷混凝土厚 15 ~20cm, 锚杆长 2.5~3m, 间距 0.75 ~1m, 配钢筋网, 必要时配钢圈梁	喷混凝土厚 20~ 25cm, 锚杆长 3~3.5m, 间距 0.5 ~0.7m, 配钢筋网, 必要时配钢圈梁	50cm

注：①VI 级围岩地段应采用特殊支护措施。

② D 为竖井直径。直径大于 7m 的竖井应作专项设计。

12.2.3 竖井必须设有安全设施,并采取相关安全措施。

12.3 斜井

12.3.1 斜井的布置应符合下列规定:

- 1 井口位置的高程应高出洪水频率为 1/100 的水位至少 0.5m。
- 2 斜井提升方式应根据提升量、斜井长度及井口地形选择。

各种提升方式的斜井倾角规定如下:

- 1) 箕斗提升时不大于 35° ;
- 2) 串车提升时不大于 25° ;
- 3) 胶带输送机提升时不大于 15° ;
- 4) 无轨运输时不大于 12° 。

3 与隧道中线连接处的平面交角,在满足施工与营运要求的前提下,应尽可能采用大角度。

4 井身纵断面不宜变坡,井口和井底变坡点应设置竖曲线,竖曲线半径宜采用 12~20m。

5 斜井必须设置宽度不小于 0.75m 的人行道,倾角大于 15° 时应设置台阶。

12.3.2 斜井井口段和地质较差的地段宜作衬砌,衬砌参数可按表 12.3.2 选用。

表 12.3.2 斜井、平行导坑、横洞及风道衬砌参数

围岩级别	喷锚衬砌	模筑混凝土衬砌	复合衬砌	
			初期支护	二次衬砌
I	5cm	20cm	不支护,局部喷混凝土或水泥砂浆护面	20cm
II	5cm	20cm	局部喷射混凝土,厚度 5cm	20cm
III	10cm,局部锚杆长 2~2.5m	25~30cm	喷混凝土厚 5~8cm,局部设锚杆,长 2m	20cm
IV	—	35~40cm	喷混凝土厚 8~10cm,拱部设锚杆,长 2~ 2.5m,间距 1~1.2m,必要时拱部设钢筋网	25~30cm
V	—	45~50cm 必要时设仰拱	喷混凝土厚 10~15cm,设系统锚杆,长 2.5 ~3m,间距 1m,设钢筋网	35~40cm, 必要时设仰拱

注:①IV 级围岩地段应特殊设计。

②喷锚衬砌仅适用于地下水不发育,无侵蚀性并能保证光面爆破效果的 I~III 级围岩地段。

③适用于通道宽度不大于 5m,当通道宽度大于 5m 时另行设计。

12.3.3 斜井必须有相应的安全措施,并在适当位置设挡车设备,严防溜车。倾角在 15° 以上的斜井应有轨道防滑措施。

12.4 平行导坑与横洞

12.4.1 长度在 3 000m 以上或确有特殊需要的隧道,可采用平行导坑,其位置选择应符合下列要求:

- 1 宜设在地下水补给源一侧。
- 2 与隧道的净距应根据地质条件、施工方法等因素确定。
- 3 坑底高程宜低于隧道底面高程 0.2 ~ 0.6m。

12.4.2 平行导坑应设置水沟,其过水断面、沟底坡度等应根据排水需要和正洞排水统一考虑。

12.4.3 傍山、沿河隧道需设辅助通道时宜考虑采用横洞,其位置应考虑施工需要,并应设向横洞外不小于 0.3% 的下坡,以利排水。

12.4.4 平行导坑与横洞的衬砌参数可按表 12.3.2 选用。

12.5 横通道、风道及地下机房

12.5.1 营运用横通道的设置间距和断面建筑限界应符合本规范 4.4.6 条的规定。施工用横通道的间距应根据施工需要和工程进度确定,不宜小于 120m。

横通道的位置,在原则上满足以上条件下应尽量避免通过断层、破碎带等不良地质地段。

12.5.2 风道设置应满足下列要求:

- 1 风道在弯曲、变径、分叉等断面变化处应采取曲线相连接,平顺过渡。内壁面应平滑,减小摩阻力。
- 2 送风机前后附近的风道内不得产生偏流、回流及涡流等。当弯道为 90° 时,应在转角处设置导流叶片。
- 3 在风道吸入口应设置网状门,防止异物吸入。
- 4 应防止风道内和风道口结冰。
- 5 风机房内的连接风道应充分考虑风量控制、应急时风机运转等因素,确定合理的风道形状及切换方法。
- 6 风道内必须采取防排水措施,严禁渗漏水。
- 7 风道隔板必须密封并具有耐久性,不得漏风。
- 8 当隧道照明设施和应急设施的管线和器械设置于风道内时,应在合适位置设置检修用进出口、楼梯和照明灯具。

12.5.3 将通风机械设备设置于地下洞室时应满足下列要求：

- 1 地下机房宜靠近隧道布置。
- 2 地下机房空间应能布置轴流风机、电气设备、控制设备和其它辅助机电设备,并有大型设备搬运通道和工作通道等。
- 3 当风机分期安装时应考虑预留空间和连接装置。
- 4 地下机房应采取严格的防排水措施,严禁渗漏水。
- 5 地下机房与风道的连接处,其周壁必须密封,严禁漏风。

12.5.4 横通道、风道的衬砌参数可按表 12.3.2 选用;地下机房应根据洞室规模和设备安装要求作特殊设计。

13 辅助工程措施

13.1 一般规定

13.1.1 当隧道通过浅埋、严重偏压、岩溶流泥地段、砂土层、砂卵(砾)石层、回填土、自稳性差的软弱破碎地层、断层破碎带以及大面积淋水或涌水地段时,应采用辅助工程措施。辅助工程措施有管棚、超前导管、超前钻孔注浆、超前锚杆、地表砂浆锚杆、地表注浆加固、护拱、井点降水、深井排水等。

13.1.2 隧道设计可根据不同地质条件、环境条件和施工条件采用相应的辅助工程措施。

13.2 地层稳定措施

13.2.1 管棚法设计应遵循下列原则:

- 1 管棚的形状和导管的布置方式应根据隧道开挖面的形状选择。
- 2 导管环向间距应根据地层性质、地层压力、导管设置部位、钻孔机具和隧道开挖方式等条件确定,一般为 30 ~ 50cm,纵向两组管棚间应有不小于 3.0m 的水平搭接长度。
- 3 导管宜选用热轧无缝钢管,外径宜为 80 ~ 180mm,长度为 10 ~ 45m,分段安装,分段长 4 ~ 6m。
- 4 导管上的注浆孔孔径宜为 10 ~ 16mm,间距宜为 15 ~ 20cm,呈梅花形布置。
- 5 当需增加管棚钢架支护的刚度时,可在钢管内注入水泥砂浆。
- 6 在护拱上沿隧道开挖轮廓线纵向钻设的管棚孔不得侵入隧道开挖轮廓线。孔深设计宜为 10 ~ 45m。护拱的基础应放在稳定的基础上。

13.2.2 超前小导管设计应遵循下列原则:

- 1 小导管宜采用直径 42 ~ 50mm 的无缝钢管,长度宜为 3 ~ 5m。
- 2 小导管前部注浆孔孔径宜为 6 ~ 8mm,间距宜为 10 ~ 20cm,呈梅花形布置,尾部长度不小于 30cm。
- 3 小导管环向设置间距可为 20 ~ 50cm,外插角 10° ~ 30°,两组小导管间纵向水平搭接长度不小于 100cm。
- 4 小导管应与格栅钢架组成支护系统。

13.2.3 超前钻孔注浆设计应遵循下列原则:

- 1 根据地质状况,选用合理的计算方法确定注浆范围。
- 2 注浆孔应根据注浆范围、注浆长度、浆液材料、扩散半径以及工程要求等条件布置。
- 3 注浆孔径应不小于 110mm,注浆压力应根据现场试验确定。
- 4 注浆材料根据地质条件及涌水情况确定。

13.2.4 超前锚杆设计应遵循下列原则:

- 1 超前锚杆设置范围,对于拱部超前锚杆宜为隧道拱部外弧全长的 $1/6 \sim 1/2$ 。
- 2 锚杆直径宜取 20 ~ 25mm。
- 3 锚杆长度宜为 3 ~ 5m,拱部超前锚杆纵向两排之间应有 1m 以上的水平搭接段。
- 4 锚杆间距,IV 级围岩宜为 40 ~ 60cm,V 级围岩宜为 30 ~ 50cm。
- 5 锚孔直径不应小于 40mm,可设一排或数排。
- 6 超前锚杆外插角宜为 $5^\circ \sim 30^\circ$ 。
- 7 充填砂浆宜采用早强砂浆,其强度等级不应低于 M20。

13.2.5 地表砂浆锚杆设计应遵循下列原则:

- 1 锚杆宜垂直地表设置,根据地形及主结构面具体情况也可倾斜设置。
- 2 锚杆宜采用 HRB335 钢筋,直径 16 ~ 22mm,由单根钢筋或多根钢筋并焊组成,间距宜为 1.0 ~ 1.5m,呈梅花形布置。
- 3 锚孔直径应大于杆体直径 30mm,充填不得低于 M20 的水泥砂浆。
- 4 锚杆长度可根据隧道覆盖层厚度确定,一般取地面至隧道拱部外缘线之间的距离。
- 5 加固宽度可按 1 ~ 2 倍隧道宽度考虑。

13.2.6 地表注浆加固设计应遵循下列原则:

- 1 地表注浆加固范围,沿隧道纵向应超出不良地质地段 5 ~ 10m。
- 2 注浆孔应竖向设置,注浆孔径应不小于 110mm,可按梅花形或矩形排列布孔;注浆孔深应根据实际情况确定。
- 3 孔间距宜为单孔浆液扩散半径的 1.4 ~ 1.7 倍。

13.2.7 对于浅埋隧道,且隧道上方两侧(或一侧)地表有建筑物时,可采用墙式遮挡法。

13.3 涌水处理措施

13.3.1 注浆止水设计除应符合 13.2.3 条外,还应遵循下列原则:

- 1 注浆范围宜覆盖围岩松动圈。

2 注浆段的长度应根据地质条件、涌水量和水压力等因素确定。

3 注浆孔中心间距应根据注浆帷幕厚度、浆液扩散半径以及各孔扩散范围相互重叠等因素确定,可为浆液扩散半径的 1.5~1.7 倍;浆液扩散半径根据不同的地质条件、注浆压力、浆液种类等在现场试验确定,亦可按工程类比法选定,并在施工中不断修正。

13.3.2 超前钻孔排水设计应遵循下列原则:

- 1 采取排水措施,保证钻孔排出的水迅速排出洞外。
- 2 超前钻孔的孔底应超前开挖面 1~2 个循环进尺。

13.3.3 超前导洞排水设计应遵循下列原则:

- 1 导洞应和正洞平行或接近平行。
- 2 导洞底标高应低于正洞底标高。
- 3 导洞应超前正洞 10~20m,至少应超前 1~2 个循环进尺。

13.3.4 井点降水设计应遵循下列原则:

- 1 当降水深度为 3~6m 时,可采用井点降水。
- 2 井点的布置应根据地层的渗透系数、降水范围及降水深度等因素综合确定。
- 3 深度小于 5m 时,可采用单排井点。井点间距可通过计算确定。
- 4 滤水管应深入含水层,各滤水管的高程应相同。

13.3.5 深井降水设计应遵循下列原则:

- 1 当降水深度大于 6m 时,可采用深井降水。
- 2 在隧道两侧地表面布置井点,间距可通过计算确定。
- 3 井底应置于隧底以下 3~5m。
- 4 深井抽水时应有相应的地面排水措施。

14 特殊地质地段

14.1 一般规定

14.1.1 当隧道通过膨胀岩层、黄土地层、含水未固结围岩、溶洞、破碎带、岩爆、流沙以及瓦斯溢出地层时,应根据具体情况采用相应辅助工程措施。

14.1.2 特殊地质地段的隧道,除采用特殊设计外,还应在施工中加强围岩和地下水位变化观察、支护和衬砌受力量测,如发现设计与实际情况不符,应及时修正设计。

14.2 膨胀性围岩

14.2.1 膨胀性围岩隧道支护衬砌形状宜采用圆形或接近圆形的断面。

14.2.2 膨胀性围岩隧道应采用先柔后刚、先让后顶、分层支护的设计方法。

14.2.3 膨胀性围岩隧道应采用复合式衬砌,初期支护喷射混凝土最大厚度不应超过25cm。二次衬砌宜采用等厚、圆顺断面,宜采用钢筋混凝土衬砌,衬砌厚度不宜大于50cm。

膨胀性围岩隧道支护衬砌均应设置仰拱。

14.2.4 当膨胀压力引起大变形时,初期支护宜采用预留纵向变形缝的喷混凝土支护,并采用可缩式钢架,同时加密高强度锚杆,以抵御膨胀压力。

14.2.5 膨胀性围岩隧道仰拱应及时施作,使支护衬砌尽早形成闭合结构,以增加衬砌的整体承载能力,控制边墙变形,防止底鼓现象。

14.2.6 膨胀性围岩隧道必须做好隧底的防水排水工作,防止水流浸泡基底。

14.3 溶洞与采空区

14.3.1 通过岩溶地区的隧道,可采用跨越、加固洞穴、引排截流岩溶水、清除或加固充

填物、回填夯实、封闭地表塌陷、疏排地表水等综合治理设计方案。

14.3.2 对于规模较大溶洞、或暗河通道、或有松软充填物的溶洞、或基础处理工程修建困难的地段,应采用跨越通过。

14.3.3 对跨径较小、无水的溶洞,可根据其与隧道相交的位置及其充填情况,采用混凝土、浆砌片石予以回填封闭。

14.3.4 当隧道拱顶部有较大规模空溶洞时,可视溶洞洞壁的岩石稳定程度,在溶洞顶部采用喷锚加固,并采用隧道护拱及拱顶回填的办法处治。

14.3.5 当个别溶洞处理困难时,可采取迂回导坑绕过溶洞的方法。

14.3.6 对于隧道底部溶洞充填物应根据具体情况采取桩基、注浆、换填等措施进行加固。

14.3.7 对管道岩溶水应采取宜疏不宜堵的原则处理。对裂隙岩溶水应根据实际情况采用相应的处治措施。

14.3.8 对穿越采空区的隧道,应根据采空区的分布范围、大小、深度、积水及其上覆岩层稳定情况,采取加固、回填、封闭地表塌陷、疏排水等综合处治措施。

14.4 流沙

14.4.1 穿越流沙地段的隧道应根据流沙特性、规模,综合考虑物质组成、贯入度、相对密度、粒径分布、塑性指数、地层承载力、滞水层分布、地下水压力和渗透系数等因素确定设计方案。

14.4.2 通过流沙地段的隧道应遵循下列设计原则:

- 1 加强防排水设计,必要时可采取井点降水法。
- 2 衬砌可采用工字型钢支撑,设置底梁,支撑的上下、纵横均应连接牢固。
- 3 对于流沙逸出口附近较干燥围岩,应采用锚杆或混凝土层加固围岩。

14.5 瓦斯地层

14.5.1 通过瓦斯地层的隧道,衬砌断面宜采用带仰拱的封闭式衬砌或加厚铺底,并视地质情况向不含瓦斯地段延伸 10~20m。

14.5.2 含瓦斯地层隧道应采用单层或多层全封闭结构,并提高混凝土的抗渗性。

14.5.3 含瓦斯地层的喷射混凝土厚度不应小于 15cm,模筑混凝土二次衬砌厚度不应小于 40cm。

14.5.4 瓦斯地层宜采用超前导坑法开挖,探查瓦斯种类和含量,并加强施工通风,以稀释瓦斯浓度。

14.5.5 隧道竣工后,应继续对瓦斯渗入及含量进行监测,当封堵等措施仍无法隔绝瓦斯渗漏时,应考虑增设营运期间机械通风。

14.5.6 通过瓦斯地层的隧道,钻爆设计应遵循《公路隧道施工技术规范》(JTJ 042)的相关规定。

14.6 黄土

14.6.1 黄土地区的隧道,应视黄土分类、物理力学性能和施工方法等确定衬砌结构。

14.6.2 黄土地区隧道应采用曲墙衬砌。

14.6.3 采用复合式衬砌时,开挖后宜以钢支撑、钢筋网喷射混凝土和锚杆作初期支护,必要时宜采用超前锚杆、管棚加固。

14.6.4 位于隧道附近地表的冲沟、陷穴、裂缝应回填、铺砌,并设置地表水的引排设施。

14.6.5 黄土地区的隧道,在因构造节理切割而形成的不稳定部位应加强支护。当隧道覆盖层浅、地层稳定性差时,可按本规范第 13 章中地层稳定方法的辅助工程措施设计。

14.6.6 黄土隧道洞门设计应遵循下列原则:

- 1 非湿陷性黄土地基上的隧道洞门设计应考虑地表水冲刷防护。
- 2 湿陷性黄土地基上的隧道洞门,应根据黄土的物理力学性质,对端、翼墙地基采取适当的换填夯实措施。
- 3 黄土隧道洞门墙背上的压力可按库仑理论计算,同时应考虑土壤粘聚力的作用。

14.7 岩爆

14.7.1 岩爆地段的隧道设计应根据岩爆烈度等级采取有效的防治措施。

14.7.2 岩爆地段隧道初期支护可采用喷射混凝土、系统锚杆和钢筋网,形成喷、锚、网的一体组合支护;岩爆烈度级别较高时,可以采取超前应力释放措施,并辅以超前锚杆、增设格栅钢架支撑等措施。

15 隧道内路基与路面

15.1 一般规定

15.1.1 隧道路基应稳定、密实、匀质,为路面结构提供均匀的支承。

15.1.2 隧道路面应具有足够的强度和平整、耐久、抗滑、耐磨等性能。

15.2 路基

15.2.1 当隧道衬砌设置仰拱时,仰拱的填充材料和填充要求应符合第5章、第8章的规定;不设仰拱的隧道,其路基应置于稳定的石质地基上。

15.2.2 隧道内路基宜设完整的中央管(沟)排水系统。对不设仰拱的隧道,当路面上面层采用沥青面层铺装时,其排水系统应使地下水位不高于路基顶面以下30cm。在季节性冰冻地区,地下排水系统应符合《公路路基设计规范》有关防冻深度的要求。

15.3 路面

15.3.1 各级公路隧道可采用水泥混凝土路面。有条件时,可采用沥青混合料上面层与水泥混凝土下面层组成的复合式路面。

15.3.2 不设仰拱的隧道路面结构宜设整平层、基层和面层;设仰拱的隧道路面可只设基层和面层。

15.3.3 各级水泥混凝土路面结构可靠度设计标准、材料性能和结构参数及变异水平、设计方法、标准轴载、材料组成和性质参数均应符合现行《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTGD40)的有关规定。

15.3.4 岩石路基的整平层混凝土的弯拉强度值应与基层相同,厚度为10~15cm。

15.3.5 基层宜采用素混凝土,适宜的厚度范围为12~20cm,其抗压强度不低于C20或

弯拉强度不低于 1.8MPa。在其弯拉强度值超过 1.8MPa 时,应设置与混凝土面层相对应的横向缩缝;一次摊铺宽度大于 7.5m 时,应设纵向缩缝。

15.3.6 水泥混凝土面层

1 二、三、四级公路隧道路面一般宜采用设接缝的普通水泥混凝土面层;一级公路、高速公路隧道路面宜采用连续配筋混凝土面层或钢纤维混凝土面层。其层面板厚度、接缝构造与布设间距、钢纤维混凝土的钢纤维掺量、连续配筋混凝土的配筋率、面层特殊部位的配筋均应符合现行《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40)的有关规定。

2 路面表面构造应采用刻槽、压槽、拉毛或凿毛等方法制作,构造深度在使用初期应满足表 15.3.6 的要求。表面构造采用刻槽时,宜采用纵向刻槽,或同时采用纵向和横向刻槽。

表 15.3.6 各级公路水泥混凝土路面面层的表面构造深度要求

公路等级	高速公路、一级公路	二、三、四级公路,汽车横向通道
构造深度(mm)	0.8~1.2	0.6~1.0

注:采用复合式路面时,作为下面层的水泥混凝土,其表面构造除外。

15.3.7 复合式路面沥青上面层

1 当采用复合式沥青路面上面层时,沥青面层应具有与混凝土面板粘结牢固、防水渗入、抗滑耐磨、低温抗开裂、高温抗车辙、抗剥离的良好性能;必要时,可采用阻燃性良好的、有利于光电照明、反光特性良好的沥青路面类型。

2 隧道复合式路面沥青上面层铺装结构应由粘结层和沥青面层组成。沥青面层厚度一般为 8~10cm,宜采用双层式沥青面层。其表面层应采用抗滑表层,沥青混合料配合比设计、高低温性能、水稳性等要求应符合《公路沥青路面设计规范》的有关规定。沥青表面层的厚度、混合料类型宜与洞外路段相同。

3 粘结层是使沥青下面层、防水层与混凝土面板联接成整体的结构层;在粘结层上应设置防水层。关于粘结层、防水层的要求应符合现行《公路沥青路面设计规范》有关对水泥混凝土桥面沥青铺装的规定。

15.3.8 当洞内采用水泥混凝土路面而洞外采用沥青路面时,应符合如下规定:

1 高速公路和一级公路的中、长隧道和特长隧道,洞内一段路面应与洞外路段保持一致,其长度不小于《公路隧道通风照明设计规范》(TJT 026.1)对隧道照明引入段、适应段和过渡段的长度规定且不小于 300m。

2 二、三、四级公路隧道及高速公路和一级公路的中、短隧道,洞内一段路面宜与洞外路段保持一致,其长度不小于 3s 的设计速度行程距离,且不小于 50m。

16 机电及其它设施

16.1 通风

16.1.1 公路隧道通风设计应综合考虑交通条件、地形、地物、地质条件、通风要求、环境保护要求、火灾时的通风控制、维护与管理水平、分期实施的可能性、建设与营运费用等因素。

16.1.2 隧道通风应符合以下要求：

- 1 单向交通的隧道设计风速不宜大于 10m/s, 特殊情况下可取 12m/s; 双向交通的隧道设计风速不应大于 8m/s; 人车混合通行的隧道设计风速不应大于 7m/s。
- 2 风机产生的噪声及隧道中废气的集中排放应符合环保的有关规定。
- 3 确定的通风方式在交通条件等发生变化时, 应具有较高的稳定性, 并能适应火灾工况下的通风要求。
- 4 隧道内营运通风的主流方向不应频繁变化。

16.1.3 隧道通风主要应对一氧化碳(CO)、烟雾和异味进行稀释。

16.1.4 CO 设计浓度

1 采用全横向通风方式与半横向通风方式时, CO 设计浓度可按表 16.1.4-1 取值; 采用纵向通风时, CO 设计浓度可按表 16.1.4-1 所列各值提高 50ppm 取值。

表 16.1.4-1 CO 设计浓度 δ

隧道长度(m)	$\leq 1\ 000$	$\geq 3\ 000$
δ (ppm)	250	200

注: 隧道长度为 1 000 ~ 3 000m 时, 可按插入法取值。

2 交通阻滞(隧道内各车道均以怠速行驶, 平均车速为 10km/h)时, 阻滞段的平均 CO 设计浓度可取 300ppm, 经历时间不超过 20min。阻滞段的计算长度不宜大于 1km。

3 人车混合通行的隧道长度不宜超过 2 000m, 其 CO 设计浓度应按表 16.1.4-2 取值。

表 16.1.4-2 CO 设计浓度 δ

隧道长度(m)	$\leq 1\ 000$	$\geq 2\ 000$
$\delta(\text{ppm})$	150	100

注:隧道长度为 1 000~2 000m 之间时,可按插入法取值。

16.1.5 烟雾设计浓度

1 采用钠灯光源时,烟雾设计浓度应按表 16.1.5 取值;采用荧光灯光源时,烟雾设计浓度应提高一级。

表 16.1.5 烟雾设计浓度 δ

计算行车速度(km/h)	100	80	60	40
$K(\text{m}^{-1})$	0.006 5	0.007 0	0.007 5	0.009 0

2 当烟雾浓度达到 0.012m^{-1} 时,应按采取交通管制等措施考虑。

3 隧道内进行养护维修时,应按现场实际烟雾浓度不大于 0.0035m^{-1} 考虑。

16.1.6 稀释异味

1 隧道空间不间断换气频率不宜低于每小时 5 次;交通量较小或特长隧道,可采用每小时 3~4 次。

2 采用纵向通风的隧道,隧道内换气风速不应低于 2.5m/s 。

16.1.7 通风设计时必须考虑火灾对策,长度大于 1 500m 且交通量较大的隧道应考虑排烟措施。火灾时的排烟风速可按 $2\sim 3\text{m/s}$ 取值。

16.1.8 选用的风机,在环境温度 250°C 情况下其可靠运转时间应不低于 60min。

16.2 照明

16.2.1 长度大于 100m 的隧道应设置照明。

16.2.2 照明设计应综合考虑环境条件、交通状况、土建结构设计、供电条件、建设与营运费用等因素。

16.2.3 照明设计路面亮度总均匀度(U_0)应不低于表 16.2.3-1 的要求,路面亮度纵向均匀度(U_1)应不低于表 16.2.3-2 的要求。

表 16.2.3-1 路面亮度总均匀度 U_0

设计交通量 N (辆/h)		U_0
双车道单向交通	双车道双向交通	
$\geq 2\,400$	$\geq 1\,300$	0.4
≤ 700	≤ 360	0.3

注:当交通量在中间值时,可按插入法取值。

表 16.2.3-2 亮度纵向均匀度 U_1

设计交通量 N (辆/h)		U_1
双车道单向交通	双车道双向交通	
$\geq 2\,400$	$\geq 1\,300$	0.6~0.7
≤ 700	≤ 360	0.5

注:当交通量在中间值时,可按插入法取值。

16.2.4 中间段亮度

1 中间段亮度可按表 16.2.4 取值。

表 16.2.4 中间段亮度 L_{in} (cd/m²)

计算行车速度 (km/h)	双车道单向交通 $N > 2\,400$ 辆/h 或双车道双向交通 $N > 1\,300$ 辆/h	双车道单向交通 $N \leq 700$ 辆/h 或双车道双向交通 $N \leq 360$ 辆/h
100	9.0	4.0
80	4.5	2.0
60	2.5	1.5
40	1.5	1.5

2 当双车道单向交通 $700 \text{ 辆/h} < N \leq 2\,400 \text{ 辆/h}$,双向交通 $360 \text{ 辆/h} < N \leq 1\,300 \text{ 辆/h}$ 且通过隧道的行车时间超过 135s 时,可按表 16.2.4 的 80%取值。

3 人车混合通行的隧道中,中间段亮度不得低于 2.5 cd/m^2 。

4 隧道两侧墙面 2m 高范围内,宜铺设反射率不小于 0.7 的墙面材料。

5 灯具布置应满足闪烁频率低于 2.5Hz 或高于 15Hz 的要求。

6 中间段灯具的平面布置形式可采用单光带布置、两侧交错布置或两侧对称布置。

7 紧急停车带宜采用荧光灯光源,其照明亮度应大于 7 cd/m^2 。

8 连接通道亮度应大于 2 cd/m^2 。

16.2.5 入口段亮度可按式(16.2.5)计算。

$$L_{th} = k \cdot L_{20}(S) \quad (16.2.5)$$

式中: L_{th} ——入口段亮度(cd/m^2);

k ——入口段亮度折减系数,可按表 16.2.5 取值;

$L_{20}(S)$ ——洞外亮度(cd/m^2)。

表 16.2.5 入口段亮度折减系数 k

设计交通量 N (辆/h)		k			
		计算行车速度 v_1 (km/h)			
双车道单向交通	双车道双向交通	100	80	60	40
≥ 2400	≥ 1300	0.045	0.035	0.022	0.012
≤ 700	≤ 360	0.035	0.025	0.015	0.010

注:当交通量在中间值时,可内插取值。

16.2.6 过渡段照明

1 过渡段亮度

过渡段由 TR_1 、 TR_2 、 TR_3 三个照明段组成,与之对应的亮度可按表 16.2.6-1 取值。

表 16.2.6-1 过渡段亮度

照明段	TR_1	TR_2	TR_3
亮度	$L_{w1} = 0.3L_{th}$	$L_{w2} = 0.1L_{th}$	$L_{w3} = 0.035L_{th}$

2 过渡段长度

各过渡段的长度可按表 16.2.6-2 取值。

表 16.2.6-2 过渡段长度 D_{tr}

计算行车速度 v_1 (km/h)	D_{tr1} (m)	D_{tr2} (m)	D_{tr3} (m)
100	106	111	167
80	72	89	133
60	44	67	100
40	26	44	67

16.2.7 出口段照明

1 在单向交通隧道中,应设置出口段照明;出口段长度宜取 60m,亮度宜取中间段亮度的 5 倍。

2 在双向交通隧道中,可不设出口段照明。

16.2.8 隧道照明灯具的防护等级应不低于 IP65。

16.3 交通工程

16.3.1 公路隧道交通工程设计内容主要包括标志、标线、交通监控、通风与照明控制、紧急呼叫、火灾报警、防灾与避难、供配电和中央控制管理等。

16.3.2 公路隧道交通工程分级,应根据隧道长度和隧道交通量两个因素划分为 A、B、

C、D 四级。

16.3.3 隧道交通工程设施配置应遵循下列原则：

- 1 根据隧道交通工程分级,设施配置采用前期配置、后期完善的方法。
- 2 长度 1.0km 以上的公路隧道各类设施的配置规模应根据预测交通量进行总体规划设计,并据此一次性征用土地和实施基础工程、地下管线及预留预埋工程等。
- 3 各设施(系统)应视技术发展和交通量增长情况等逐步补充完善。

16.4 其它设施

16.4.1 公路隧道内壁装饰应结合隧道位置、使用要求进行,力求安全、经济、美观、实用,并符合下列规定：

- 1 内壁装饰不得侵入建筑限界。
- 2 内壁装饰材料应具有无毒、耐火、吸水膨胀率低、反光率高、便于清洗、耐磨和耐用的特点,并符合室外建筑材料相关规范的要求。
- 3 内壁装饰高度不宜低于路面以上 2m。

16.4.2 公路隧道可根据需要设置消音设施,消音设施不得侵入建筑限界。

16.4.3 隧道内各类设施的悬挂及安装配件应根据其承重和耐久性要求,进行强度和防腐设计。

附录 A 围岩分级有关规定

A.0.1 岩体完整程度的定量指标 K_v 和 J_v 值的测试和计算方法应符合以下规定:

1 岩体完整性指标(K_v),应针对不同的工程地质岩组或岩性段,选择有代表性的点、段,测试岩体弹性纵波速度,并应在同一岩体取样测定岩石纵波速度。按下式计算:

$$K_v = (v_{pm}/v_{pr})^2 \quad (\text{A.0.1-1})$$

式中: v_{pm} ——岩体弹性纵波速度(km/s);

v_{pr} ——岩石弹性纵波速度(km/s)。

2 岩体体积节理数(J_v (条/ m^3)),应针对不同的工程地质岩组或岩性段,选择有代表性的露头或开挖壁面进行节理(结构面)统计。除成组节理外,对延伸长度大于 1m 的分散节理亦应予以统计。已为硅质、铁质、钙质充填再胶结的节理不予统计。

每一测点的统计面积不应小于 $2\text{m} \times 5\text{m}$ 。岩体 J_v 值应根据节理统计结果按下式计算:

$$J_v = S_1 + S_2 + \cdots + S_n + S_k \quad (\text{A.0.1-2})$$

式中: S_n ——第 n 组节理每米长测线上的条数;

S_k ——每立方米岩体非成组节理条数(条/ m^3)。

A.0.2 岩体基本质量影响因素的修正系数 K_1 、 K_2 、 K_3 的取值可分别按表 A.0.2-1、表 A.0.2-2 和表 A.0.2-3 确定。无表中所示情况时,修正系数取零。

表 A.0.2-1 地下水影响修正系数 K_1

BQ 地下水出水状态	> 450	450 ~ 351	350 ~ 251	< 250
潮湿或点滴状出水	0	0.1	0.2 ~ 0.3	0.4 ~ 0.6
淋雨状或涌流状出水,水压 < 0.1MPa 或单位出水量 < 10L/min·m	0.1	0.2 ~ 0.3	0.4 ~ 0.6	0.7 ~ 0.9
淋雨状或涌流状出水,水压 > 0.1MPa 或单位出水量 > 10L/min·m	0.2	0.4 ~ 0.6	0.7 ~ 0.9	1.0

表 A.0.2-2 主要软弱结构面产状影响修正系数 K_2

结构面产状及其 与洞轴线的组合关系	结构面走向与洞轴线夹角 < 30°, 结构面倾角 30° ~ 75°	结构面走向与洞轴线夹角 > 60°, 结构面倾角 > 75°	其它组合
K_2	0.4 ~ 0.6	0 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4

表 A.0.2-3 初始应力状态影响修正系数 K_3

BQ	> 550	550 ~ 451	450 ~ 351	350 ~ 251	< 250
初始应力状态					
极高应力区	1.0	1.0	1.0 ~ 1.5	1.0 ~ 1.5	1.0
高应力区	0.5	0.5	0.5	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1.0

A.0.3 根据岩体(围岩)钻探和开挖过程中出现的主要现象,如岩芯饼化或岩爆现象,可按表 A.0.3 详估围岩的应力情况。

表 A.0.3 高初始应力地区围岩在开挖过程中出现的主要现象

应力情况	主 要 现 象	R_c/σ_{max}
极高应力	1 硬质岩:开挖过程中有岩爆发生,有岩块弹出,洞壁岩体发生剥离,新生裂缝多,成洞性差; 2 软质岩:岩芯常有饼化现象,开挖过程中洞壁岩体有剥离,位移极为显著,甚至发生大位移,持续时间长,不易成洞	< 4
高应力	1 硬质岩:开挖过程中可能出现岩爆,洞壁岩体有剥离和掉块现象,新生裂缝较多,成洞性差; 2 软质岩:岩芯时有饼化现象,开挖过程中洞壁岩体位移显著,持续时间较长,成洞性差	4 ~ 7

注: σ_{max} 为垂直洞轴线方向的最大初始应力。

A.0.4 各级围岩的物理力学参数及结构面抗剪强度,应通过室内或现场试验获得。如无实测数据时,可按以下各款选取:

1 各级围岩物理力学参数可按表 A.0.4-1 选用。

表 A.0.4-1 各级围岩的物理力学指标标准值

围岩级别	重度 γ (kN/m^3)	弹性抗力系数 k (MPa/m)	变形模量 E (GPa)	泊松比 μ	内摩擦角 φ ($^\circ$)	粘聚力 C (MPa)	计算摩擦角 φ_0 ($^\circ$)
I	26 ~ 28	1 800 ~ 2 800	> 33	< 0.2	> 60	> 2.1	> 78
II	25 ~ 27	1 200 ~ 1 800	20 ~ 33	0.2 ~ 0.25	50 ~ 60	1.5 ~ 2.1	70 ~ 78
III	23 ~ 25	500 ~ 1 200	6 ~ 20	0.25 ~ 0.3	39 ~ 50	0.7 ~ 1.5	60 ~ 70
IV	20 ~ 23	200 ~ 500	1.3 ~ 6	0.3 ~ 0.35	27 ~ 39	0.2 ~ 0.7	50 ~ 60
V	17 ~ 20	100 ~ 200	1 ~ 2	0.35 ~ 0.45	20 ~ 27	0.05 ~ 0.2	40 ~ 50
VI	15 ~ 17	< 100	< 1	0.4 ~ 0.5	< 20	< 0.2	30 ~ 40

注:①本表数值不包括黄土地层。

②选用计算摩擦角时,不再计内摩擦角和粘聚力。

2 岩体结构面抗剪断峰值强度参数可按表 A.0.4-2 选用。

表 A.0.4-2 岩体结构面抗剪断峰值强度

序号	两侧岩体的坚硬程度及结构面的结合程度	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	粘聚力 $C(\text{MPa})$
1	坚硬岩, 结合好	> 37	> 0.22
2	坚硬 ~ 较坚硬岩, 结合一般; 较软岩, 结合好	$37 \sim 29$	$0.22 \sim 0.12$
3	坚硬 ~ 较坚硬岩, 结合差; 较软岩 ~ 软岩, 结合一般	$29 \sim 19$	$0.12 \sim 0.08$
4	较坚硬 ~ 较软岩, 结合差 ~ 结合很差; 软岩, 结合差; 软质岩的泥化面	$19 \sim 13$	$0.08 \sim 0.05$
5	较坚硬岩及全部软质岩, 结合很差; 软质岩泥化层本身	< 13	< 0.05

A.0.5 各级围岩自稳能力可按表 A.0.5 作出判断。

表 A.0.5 隧道各级围岩自稳能力判断

围岩级别	自 稳 能 力
I	跨度 20m, 可长期稳定, 偶有掉块, 无塌方
II	跨度 10 ~ 20m, 可基本稳定, 局部可发生掉块或小塌方; 跨度 10m, 可长期稳定, 偶有掉块
III	跨度 10 ~ 20m, 可稳定数日 ~ 1 个月, 可发生小 ~ 中塌方; 跨度 5 ~ 10m, 可稳定数月, 可发生局部块体位移及小 ~ 中塌方; 跨度 5m, 可基本稳定
IV	跨度 5m, 一般无自稳能力, 数日 ~ 数月内可发生松动变形、小塌方, 进而发展为中 ~ 大塌方。 埋深小时, 以拱部松动破坏为主, 埋深大时, 有明显塑性流动变形和挤压破坏; 跨度小于 5m, 可稳定数日 ~ 1 个月
V	无自稳能力, 跨度 5m 或更小时, 可稳定数日
VI	无自稳能力

注: ①小塌方: 塌方高度 $< 3\text{m}$, 或塌方体积 $< 30\text{m}^3$ 。

②中塌方: 塌方高度 $3 \sim 6\text{m}$, 或塌方体积 $30 \sim 100\text{m}^3$ 。

③大塌方: 塌方高度 $> 6\text{m}$, 或塌方体积 $> 100\text{m}^3$ 。

附录 B 隧道标准内轮廓

B.0.1 隧道内轮廓标准,即拱部为单心半圆,侧墙为大半径圆弧,仰拱与侧墙间用小半径圆弧连接。

两车道隧道标准内轮廓断面如图 B.0.1 所示。

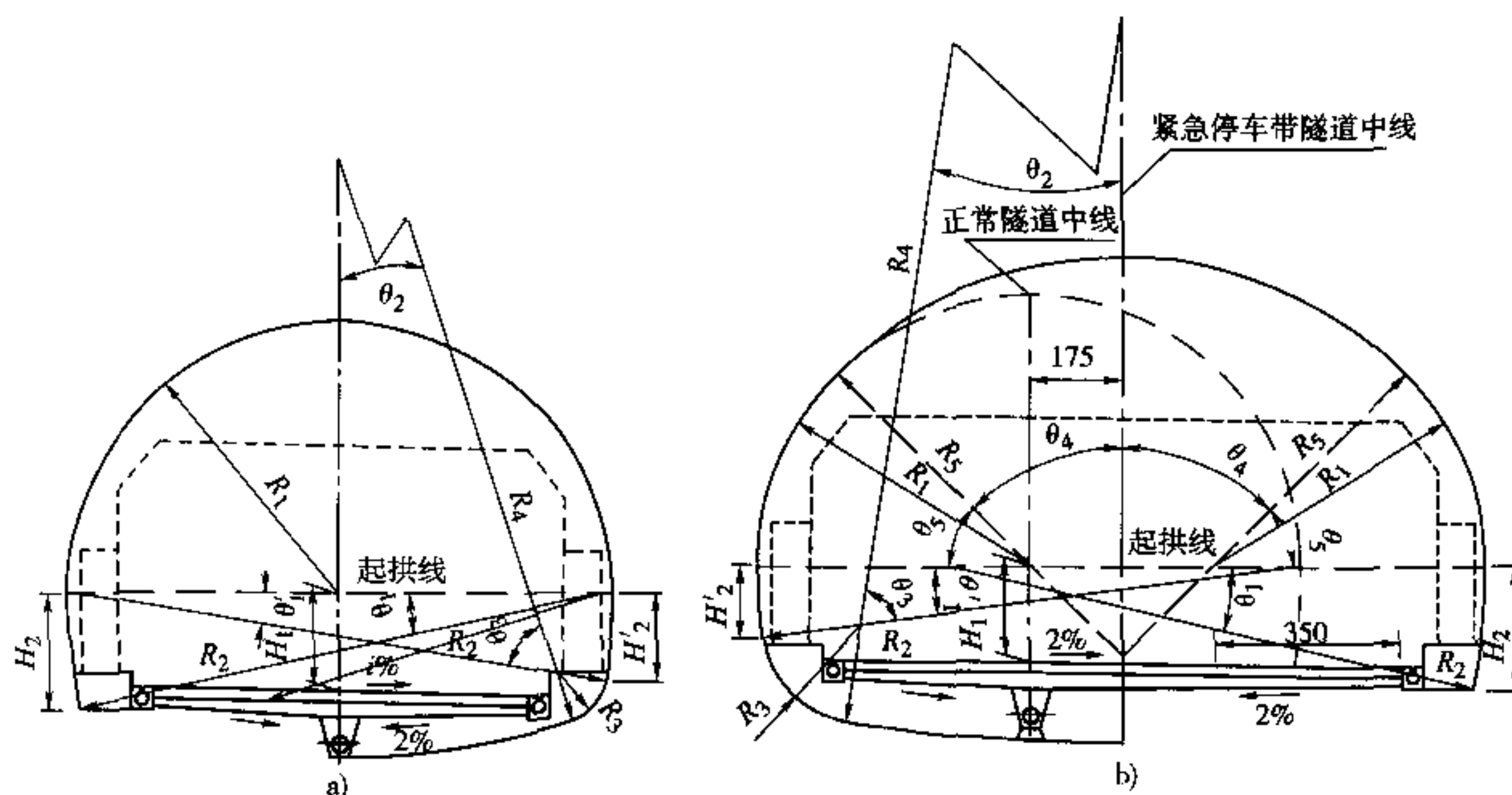


图 B.0.1 两车道隧道标准内轮廓断面(单位:cm)

a)标准断面;b)紧急停车带断面

R_1 -拱部圆弧半径; R_2 -侧墙圆弧半径; R_3 -侧墙与仰拱连接段圆弧半径; R_4 -仰拱圆弧半径; H_1 -路面至起拱线的高度; H_2 -侧墙结构高度; H'_2 -设仰拱时的侧墙结构高度(侧墙与仰拱连接点至起拱线的高度); θ_1 -起拱线与 R_2 的夹角; θ'_1 -设仰拱时起拱线与 R_2 的夹角; θ_2 -隧道结构中心线与 R_4 的夹角; $\theta_3 = 90^\circ - (\theta'_1 + \theta_2)$; R_5 -紧急停车带拱部圆弧半径; θ_4 -半径为 R_5 的拱部圆弧段夹角; R_6 -拱部与侧墙连接段圆弧半径; θ_5 -半径为 R_6 的圆弧段夹角

B.0.2 三车道隧道标准内轮廓断面如图 B.0.2 所示。

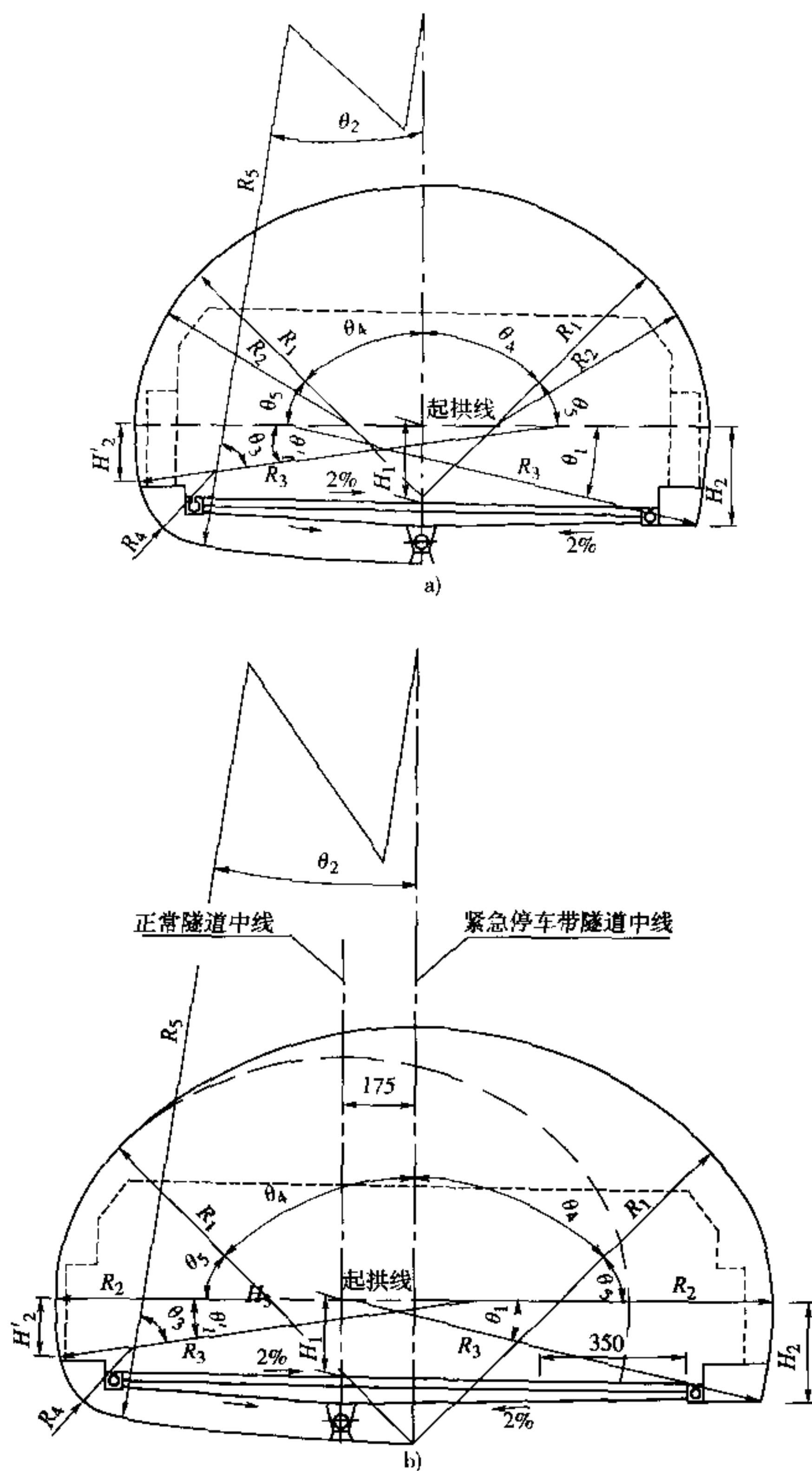


图 B.0.2 三车道隧道标准内轮廓断面(单位:cm)

a)标准断面;b)紧急停车带断面

R_1 -拱部圆弧半径; R_2 -拱部与侧墙连接段圆弧半径; R_3 -侧墙圆弧半径; R_4 -侧墙与仰拱连接段圆弧半径; R_5 -仰拱圆弧半径; H_1 -路面至起拱线的高度; H_2 -侧墙结构高度; H'_2 -设仰拱时的侧墙结构高度(侧墙与仰拱连接点至起拱线的高度); θ_1 -起拱线与 R_3 的夹角; θ'_1 -设仰拱时起拱线与 R_2 的夹角; θ_2 -隧道结构中心线与 R_5 的夹角; $\theta_3 = 90^\circ - (\theta'_1 + \theta_2)$; θ_4 -半径为 R_1 的拱部圆弧段夹角; θ_5 -半径为 R_2 的圆弧段夹角

附录 C 型钢特性参数表

表 C.0.1 工字钢截面特性参数表

型号	截面尺寸(mm)						截面 面积 (cm ²)	理论 质量 (kg/m)	参 考 数 值						
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	<i>r</i>	<i>r₁</i>			<i>X—X</i>				<i>Y—Y</i>		
									<i>I_x</i> (cm ⁴)	<i>W_x</i> (cm ³)	<i>i_x</i> (cm)	<i>I_x, S_x</i>	<i>I_y</i> (cm ⁴)	<i>W_y</i> (cm ³)	<i>i_y</i> (cm)
10	100	68	4.5	7.6	6.5	3.3	14.345	11.261	245	49.0	4.14	8.59	33.0	9.72	1.52
12.6	126	74	5.0	8.4	7.0	3.5	18.118	14.223	188	77.5	5.20	10.8	46.9	12.7	1.61
14	140	80	5.5	9.1	7.5	3.8	21.516	16.890	712	102	5.76	12.0	64.4	16.1	1.73
16	160	88	6.0	9.9	8.0	4.0	26.131	20.513	1 130	141	6.58	13.8	93.1	21.2	1.89
18	180	94	6.5	10.7	8.5	4.3	30.756	24.143	1 660	185	7.36	15.4	122	26.0	2.00
20a	200	100	7.0	11.4	9.0	4.5	35.578	27.929	2 370	237	8.15	17.2	158	31.5	2.12
20b	200	102	9.0	11.4	9.0	4.5	39.578	31.069	2 500	250	7.96	16.9	169	33.1	2.06
22a	220	110	7.5	12.3	9.5	4.8	42.128	33.070	3 400	309	8.99	18.9	225	40.9	2.31
22b	220	112	9.5	12.3	9.5	4.8	46.528	36.524	3 570	325	8.78	18.7	239	42.7	2.27
25a	250	116	8.0	13.0	10.0	5.0	48.541	38.105	5 020	402	10.2	21.6	280	48.3	2.40
25b	250	118	10.0	13.0	10.0	5.0	53.541	42.030	5 280	423	9.94	21.3	309	52.4	2.40
28a	280	122	8.5	13.7	10.5	5.3	55.404	43.492	7 110	508	11.3	24.6	345	56.6	2.50
32a	320	130	9.5	15.0	11.5	5.8	67.156	52.747	11 100	692	12.8	27.5	460	70.8	2.62
32b	320	132	11.5	15.0	11.5	5.8	73.556	57.741	11 600	726	12.6	27.1	502	76.0	2.61
32c	320	134	13.5	15.0	11.5	5.8	79.956	62.765	12 200	760	12.3	26.8	544	81.2	2.61
36a	360	136	10.0	15.8	12.0	6.0	76.480	60.037	15 800	875	14.4	30.7	552	81.2	2.69
36b	360	138	12.0	15.8	12.0	6.0	83.680	65.689	16 500	919	14.1	30.3	582	84.3	2.64
36c	360	140	14.0	15.8	12.0	6.0	90.880	71.341	17 300	962	13.8	29.9	612	87.4	2.60
40a	400	142	10.5	16.5	12.5	6.3	86.112	37.598	21 700	1 090	15.9	34.1	660	93.2	2.77
40b	400	144	12.5	16.5	12.5	6.3	94.112	73.878	22 800	1 140	15.6	33.6	692	96.2	2.71
40c	400	146	14.5	16.5	12.5	6.3	102.112	80.158	23 900	1 190	15.2	33.2	727	99.6	2.65
45a	450	150	11.5	18.0	13.5	6.8	102.446	80.420	32 200	1 430	17.7	38.6	855	114	2.89
45b	450	152	13.5	18.0	13.5	6.8	111.446	87.485	33 800	1 500	17.4	38.0	894	118	2.84
45c	450	154	15.5	18.0	13.5	6.8	120.446	94.550	35 300	1 570	17.1	37.6	938	122	2.79
50a	500	158	12.0	20.0	14.0	7.0	119.304	93.654	46 500	1 860	19.7	42.8	1 120	142	3.07

续上表

型号	截面尺寸(mm)						截面 面积 (cm ²)	理论 质量 (kg/m)	参 考 数 值						
	h	b	d	t	r	r ₁			X—X				Y—Y		
									I _X (cm ⁴)	W _X (cm ³)	i _X (cm)	I _X , S _X	I _Y (cm ⁴)	W _Y (cm ³)	i _Y (cm)
50b	500	160	14.0	20.0	14.0	7.0	129.304	104.504	48 600	1 940	19.4	42.4	1 170	146	3.01
50c	500	162	16.0	20.0	14.0	7.0	139.304	109.354	50 600	2 080	19.0	41.8	1 220	151	2.96
56a	560	166	12.5	21.0	14.5	7.3	135.435	106.316	65 600	2 340	22.0	47.7	1 370	165	3.18
56b	560	168	14.5	21.0	14.5	7.3	146.635	115.108	68 500	2 450	21.6	47.2	1 490	174	3.16
56c	560	170	16.5	21.0	14.5	7.3	157.835	123.900	71 400	2 550	21.3	46.7	1 560	183	3.16
63a	630	176	13.0	22.0	15.0	7.5	154.658	121.407	93 900	2 980	24.5	54.2	1 700	193	3.31
63b	630	178	15.0	22.0	15.0	7.5	167.258	131.298	98 100	3 000	24.2	53.5	1 810	204	3.29
63c	630	180	17.0	22.0	15.0	7.5	179.858	141.189	102 000	3 300	23.3	52.9	1 920	214	3.27

表 C.0.2 宽翼缘 H 型钢截面特性参数表

代号	截面尺寸(mm)					截面 面积 (cm ²)	理论 质量 (kg/m)	参 考 数 值					
	<i>H</i>	<i>B</i>	<i>T</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>R</i>			<i>X—X</i>			<i>Y—Y</i>		
								<i>I</i> _X (cm ⁴)	<i>W</i> _X (cm ³)	<i>i</i> _X (cm)	<i>I</i> _Y (cm ⁴)	<i>W</i> _Y (cm ³)	<i>i</i> _Y (cm)
HK100a	96	100	5.0	8.0	12	21.2	16.7	349	72	4.1	133	26	2.51
b	100	100	6.0	10.0	12	26.0	20.4	449	89	4.2	167	33	2.53
c	120	106	12.0	20.0	12	53.2	41.8	1 142	190	4.6	399	75	2.74
HK120a	114	120	5.0	8.0	12	25.3	19.9	606	106	4.9	230	38	3.02
b	120	120	6.5	11.0	12	34.0	26.7	864	144	5.0	317	52	3.06
c	140	126	12.5	21.0	12	66.4	52.1	2 017	288	5.5	702	111	3.25
HK140a	133	140	5.5	8.5	12	31.4	24.7	1 033	155	5.7	389	55	3.52
b	140	140	7.0	12.0	12	43.0	33.7	1 509	215	5.9	549	78	3.58
c	160	146	13.0	22.0	12	80.6	63.2	3 291	411	6.4	1 144	156	3.77
HK160a	152	160	6.0	9.0	15	38.8	30.4	1 672	220	6.6	615	76	3.98
b	160	160	8.0	13.0	15	54.3	42.6	2 491	311	6.8	889	111	4.05
c	180	166	14.0	23.0	15	97.1	76.2	5 098	566	7.2	1 758	211	4.26
HK180a	171	200	6.0	9.5	15	45.3	35.5	2 510	293	7.4	924	102	4.52
b	180	200	8.5	14.0	15	65.3	51.2	3 830	425	7.7	1 362	151	4.57
c	200	206	14.5	24.0	15	113.3	88.9	7 482	748	8.1	2 579	277	4.77
HK200a	190	220	6.5	10.0	18	53.8	42.3	3 691	383	8.3	1 335	133	4.98
b	200	220	9.0	15.0	18	78.1	61.3	5 695	569	8.5	2 003	200	5.06

续上表

代号	截面尺寸(mm)					截面 面积 (cm ²)	理论 质量 (kg/m)	参 考 数 值					
	H	B	T ₁	t ₂	R			X—X			Y—Y		
								I _X (cm ⁴)	W _X (cm ³)	i _X (cm)	I _Y (cm ⁴)	W _Y (cm ³)	i _Y (cm)
c	220	226	15.0	25.0	18	131.3	103.1	10 641	967	9.0	3 650	354	5.27
HK220a	210	240	7.0	11.0	18	64.3	50.5	5 409	515	9.2	1 954	177	5.51
b	220	240	9.5	16.0	18	91.0	71.5	8 090	735	9.4	2 842	258	5.59
c	240	248	15.5	26.0	18	149.4	117.3	14 604	1 217	9.9	5 011	443	5.79
HK240a	230	260	7.5	12.0	21	76.8	60.3	7 762	674	10.1	2 768	230	6.00
b	240	260	10.0	17.0	21	106.0	83.2	11 258	938	10.3	3 922	326	6.08
c	270	268	18.0	32.0	21	199.6	156.7	24 288	1 799	11.0	8 152	657	6.39
HK260a	250	260	7.5	12.5	24	86.8	68.2	10 453	836	11.0	3 666	282	6.50
b	260	260	10.0	17.5	24	118.4	93.0	14 918	1 147	11.2	5 133	394	6.58
c	290	268	18.5	32.5	24	219.6	172.4	31 305	2 159	11.9	10 447	779	6.90
HK280a	270	280	8.0	13.0	24	97.3	76.4	13 671	1 012	11.9	4 761	340	7.00
b	280	280	10.5	18.0	24	131.4	103.1	19 268	1 376	12.1	6 593	470	7.08
c	310	288	18.5	33.0	24	240.2	188.5	39 546	2 551	12.8	13 161	914	7.40
HK300a	290	300	8.5	14.0	27	112.5	88.3	18 261	1 259	12.7	6 307	420	7.48
b	300	300	11.0	19.0	27	149.1	117.0	25 163	1 677	13.0	8 561	570	7.58
c	320	305	16.0	29.0	27	225.1	176.7	40 948	2 559	13.5	13 734	900	7.81
d	340	310	21.0	39.0	27	303.1	237.9	59 198	3 482	14.0	19 401	1 251	8.00
HK320a	305	203	7.8	13.0	27	80.8	63.4	13 783	903	13.1	1 819	179	4.75
b	311	205	9.6	16.0	27	98.6	77.4	17 137	1 102	13.2	2 306	225	4.84
c	308	254	9.0	14.5	27	105.0	82.4	18 619	1 209	13.3	3 968	312	6.15
d	311	254	9.4	16.0	27	113.8	89.3	20 516	1 319	13.4	4 379	344	6.20
e	310	300	9.0	15.5	27	124.4	97.6	22 926	1 479	13.6	6 983	465	7.49
f	320	300	11.5	20.5	27	161.3	126.7	30 821	1 926	13.8	9 237	615	7.57
g	359	309	21.0	40.0	27	312.0	245.0	68 132	3 795	14.8	19 707	1 275	7.95
HK340a	330	300	9.5	16.5	27	133.5	104.8	27 690	1 678	14.4	7 434	495	7.46
b	340	300	12.0	21.5	27	170.9	134.2	36 654	2 156	14.6	9 688	645	7.53
c	377	309	21.0	40.0	27	315.8	247.9	76 369	4 051	15.6	19 709	1 275	7.90
HK360a	342	203	7.7	13.5	27	85.3	67.0	18 235	1 066	14.6	1 889	186	4.71
b	345	204	8.5	15.0	27	94.2	74.0	20 322	1 178	14.7	2 130	208	4.76
c	347	205	9.6	16.5	27	104.0	81.7	22 391	1 290	14.7	2 378	232	4.78
d	351	255	10.8	18.0	27	132.0	103.7	29 721	1 693	15.0	4 985	391	6.14

续上表

代号	截面尺寸(mm)					截面 面积 (cm ²)	理论 质量 (kg/m)	参 考 数 值					
	H	B	T ₁	t ₂	R			X—X			Y—Y		
								I _X (cm ⁴)	W _X (cm ³)	i _X (cm)	I _Y (cm ⁴)	W _Y (cm ³)	i _Y (cm)
e	359	257	12.8	22.0	27	159.7	125.3	36 920	2 056	15.2	6 239	485	6.25
HK360f	350	300	10.0	17.5	27	142.8	112.1	33 087	1 890	15.2	7 885	525	7.43
g	360	300	12.5	22.5	27	180.6	141.8	43 191	2 399	15.5	10 139	675	7.49
h	395	308	21.0	40.0	27	318.8	250.3	84 864	4 296	16.3	19 520	1 267	7.82
HK400a	390	300	11.0	19.0	27	159.0	124.8	45 066	2 311	16.8	8 562	570	7.34
b	400	300	13.5	24.0	27	197.8	155.3	57 678	2 883	17.1	10 817	721	7.40
c	432	307	21.0	40.0	27	325.8	255.7	104 116	4 820	17.9	19 333	1 259	7.70
d	452	417	30.0	50.0	27	528.9	415.2	182 051	8 055	18.6	60 533	2 903	10.70
e	492	432	45.0	70.0	27	769.5	604.0	289 894	11 784	19.4	94 376	4 369	11.10
HK430a	415	260	10.0	17.0	27	132.8	104.2	41 765	2 012	17.7	4 990	383	6.13
b	420	261	11.2	19.5	27	150.7	118.3	48 140	2 292	17.9	5 791	443	6.20
c	431	265	14.8	25.0	27	195.1	153.2	63 620	2 252	18.1	7 775	586	6.31
d	425	203	13.5	22.0	27	147.0	115.4	44 652	2 101	17.4	3 085	303	4.58
HK450a	440	300	11.5	21.0	27	178.0	139.7	63 718	2 896	18.9	9 463	630	7.29
b	450	300	14.0	26.0	27	218.0	171.1	79 884	3 550	19.1	11 719	781	7.33
c	478	307	21.0	40.0	27	335.4	263.3	131 481	5 501	19.8	19 337	1 259	7.59
HK500a	490	300	12.0	23.0	27	197.5	155.1	86 971	3 549	21.0	10 365	691	7.24
b	500	300	14.5	28.0	27	238.6	187.3	107 172	4 286	21.2	12 622	841	7.27
c	524	306	21.0	40.0	27	344.3	270.3	161 926	6 180	21.7	19 153	1 251	7.46
HK550a	540	300	12.5	24.0	27	211.8	166.2	11 928	4 145	23.0	10 817	721	7.15
b	550	300	15.0	29.0	27	254.1	199.4	13 687	4 970	23.2	13 075	871	7.17
c	572	306	21.0	40.0	27	354.4	278.2	197 980	6 922	23.6	19 156	1 252	7.35
HK600a	590	300	13.0	25.0	27	226.5	177.8	141 204	4 786	25.0	11 269	751	7.05
b	600	300	15.5	30.0	27	270.0	211.9	171 037	5 701	25.2	13 528	901	7.08
c	620	305	21.0	40.0	27	363.7	285.5	237 443	7 659	25.6	18 973	1 244	7.22
HK650a	640	300	13.5	26.0	27	241.6	189.7	175 174	5 474	26.9	11 722	781	6.97
b	650	300	16.0	31.0	27	286.3	224.8	210 612	6 480	27.1	13 982	932	6.99
c	668	305	21.0	40.0	27	373.7	293.4	281 663	8 433	27.5	18 977	1 244	7.13
HK700a	690	300	14.5	27.0	27	260.5	204.5	215 296	6 240	28.7	12 177	811	6.84
b	700	300	17.0	32.0	27	306.4	240.5	256 883	7 339	29.0	14 439	962	6.87
c	716	304	21.0	40.0	27	383.0	300.7	329 273	9 197	29.3	18 795	1 236	7.01

续上表

代号	截面尺寸(mm)					截面 面积 (cm ²)	理论 质量 (kg/m)	参 考 数 值					
	H	B	T ₁	t ₂	R			X—X			Y—Y		
								I _X (cm ⁴)	W _X (cm ³)	i _X (cm)	I _Y (cm ⁴)	W _Y (cm ³)	i _Y (cm)
HK800a	790	300	15.0	28.0	30	285.8	224.4	303 435	7 681	32.6	12 636	842	6.65
b	800	300	17.5	33.0	30	334.2	262.3	359 076	8 976	32.8	14 901	993	6.68
c	814	303	21.0	40.0	30	404.3	317.3	442 590	10 874	33.1	18 624	1 229	6.78
HK900a	890	300	16.0	30.0	30	320.5	251.6	422 066	9 484	36.3	13 545	903	6.50
b	900	300	18.5	35.0	30	371.3	291.4	494 056	10 979	36.5	15 813	1 054	6.53
c	910	302	21.0	40.0	30	423.6	332.5	570 425	12 536	36.7	18 449	1 221	6.60

表 C.0.3 窄翼缘 H 型钢截面特性参数表

代号	截面尺寸(mm)					截面 面积 (cm ²)	理论 质量 (kg/m)	特 性 参 数					
	H	B	T ₁	t ₂	r			X—X			Y—Y		
								I _X (cm ⁴)	W _X (cm ³)	i _X (cm)	I _Y (cm ⁴)	W _Y (cm ³)	i _Y (cm)
HZ ₈₀	80	46	3.8	5.2	5	7.6	6.0	80	20	3.2	8	3	1.04
HZ ₁₀₀	100	55	4.1	5.7	7	10.3	8.1	171	34	4.0	15	5	1.23
HZ ₁₂₀	120	64	4.4	6.3	7	13.2	10.4	317	52	4.9	27	8	1.45
HZ ₁₄₀	140	73	4.7	6.9	7	16.4	12.9	541	77	5.7	44	12	1.65
HZ ₁₆₀	160	82	5.0	7.4	9	20.1	15.8	869	108	6.6	68	16	1.84
HZ ₁₈₀	180	91	5.3	8.0	9	23.9	18.8	1 316	146	7.4	100	22	2.05
HZ ₂₀₀	200	100	5.6	8.5	12	28.5	22.4	1 943	194	8.3	142	28	2.24
HZ ₂₂₀	220	110	5.9	9.2	12	33.4	26.2	2 771	251	9.1	204	37	2.48
HZ ₂₄₀	240	120	6.2	9.8	15	39.1	30.7	3 891	324	10.0	283	47	2.69
HZ ₂₇₀	270	135	6.6	10.2	15	45.9	36.1	5 789	428	11.2	419	62	3.02
HZ ₃₀₀	300	150	7.1	10.7	15	53.8	42.2	8 355	557	12.5	603	80	3.35
HZ ₃₃₀	330	160	7.5	11.5	18	62.6	49.1	11 766	713	13.7	787	98	3.55
HZ ₃₆₀	360	170	8.0	12.7	18	72.7	57.1	16 264	903	15.0	1 043	122	3.79
HZ ₄₀₀	400	180	8.6	13.5	21	84.5	66.3	23 127	1 156	16.5	1 317	146	3.95
HZ ₄₅₀	450	190	9.4	14.6	21	98.8	77.6	33 741	1 499	18.5	1 657	176	4.42
HZ ₅₀₀	500	200	10.2	16.0	21	115.5	90.7	48 197	1 927	20.4	2 141	214	4.31
HZ ₅₅₀	550	210	11.1	17.2	24	134.4	10.5	67 114	2 440	22.3	2 666	253	4.45
HZ ₆₀₀	600	220	12.0	19.0	24	156.0	122.4	92 080	3 069	24.3	3 386	307	4.66

工字钢的截面图及标注符号如图C.0.1所示。H型钢的截面图及标注符号如图C.0.2所示。

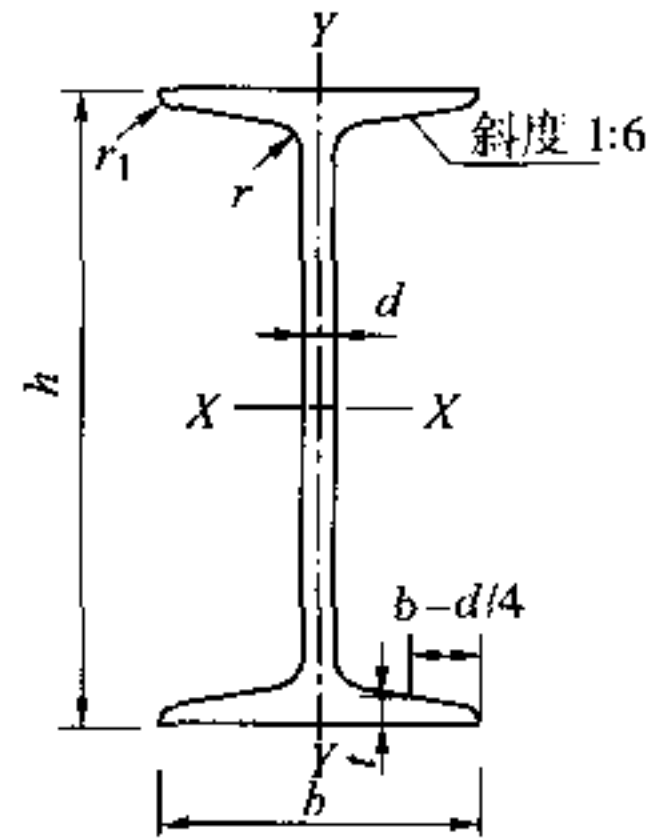


图 C.0.1 工字钢的截面图及标注符号

h -高度; b -腿高度; d -腰厚度; t -平均腿厚度; r -内圆弧半径; r_1 -腿端圆弧半径; I -惯性矩; W -截面系数; i -惯性半径; S -半截面的净力矩

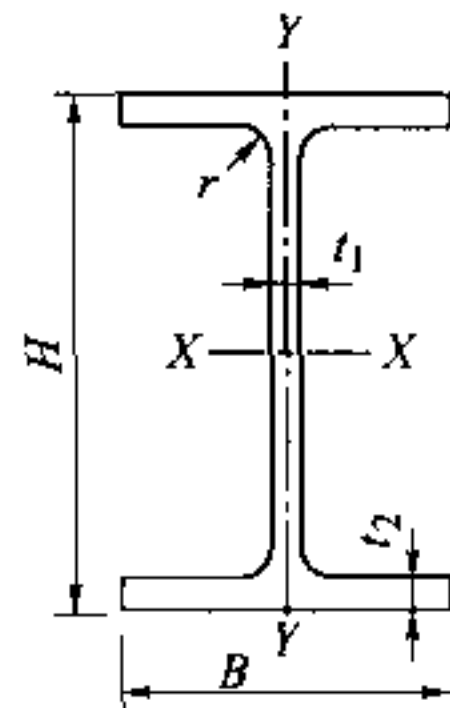


图 C.0.2 H型钢的截面图及标注符号

H -高度; B -宽度; t_1 -腹板厚度; t_2 -翼缘厚度; r -工艺圆弧半径

附录 D 释放荷载的计算方法

IV 级以下围岩,喷射混凝土层将在同围岩共同变形的过程中对围岩提供支护抗力,使围岩变形得到控制,从而使围岩保持稳定。与此同时,喷层将受到来自围岩的挤压力。这种挤压力由围岩变形引起,常称做“形变压力”。

IV 级以下围岩一般呈现塑性和流变特性,洞室开挖后变形的发展往往会持续较久的时间。采用模筑混凝土支护围岩时,顶替原有临时支护时扰动围岩以及衬砌同周围岩体不密贴都可招致松散压力,而当坍塌发展到一定程度时,衬砌将与围岩密贴,并随围岩变形的继续发展,衬砌也将受到挤压,从而经受形变压力。可见围岩与支护间形变压力的传递是一个随时间的推进而逐渐发展的过程。这类现象习称时间效应。

有限元分析中,形变压力常在计算过程中同时确定,而作为开挖效应的模拟,直接施加的荷载是在开挖边界上施加的释放荷载。

释放荷载可由已知初始地应力或与前一步开挖相应的应力场确定。先求得预计开挖边界上各结点的应力,并假定各结点间应力呈线性分布,然后反转开挖边界上各结点应力的方向(改变其符号),据以求得释放荷载,如图 D 所示。

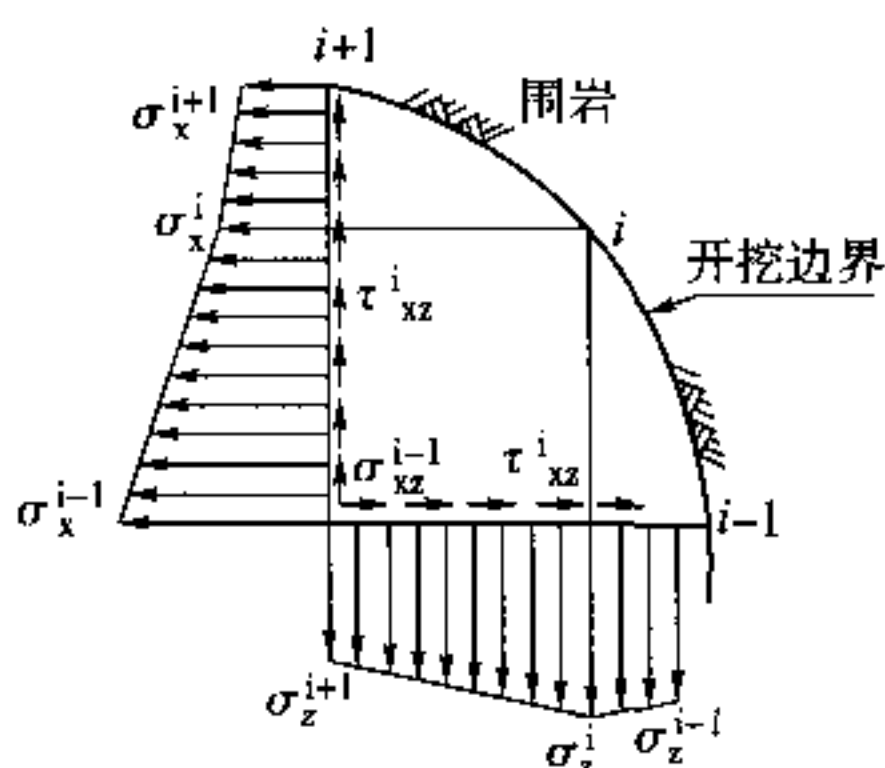


图 D 开挖边界结点

D.0.1 初始地应力的确定

初始地应力 $\{\sigma_0\}$ 的确定常需专门研究。对岩石地层,初始地应力可分为自重地应力和构造地应力两部分。其中自重地应力可由有限元法求得,构造地应力可由位移反分析方法确定。如将其假设为均布应力或线性分布应力,并将其与自重地应力叠加,则可得到初始地应力的计算式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= a_1 + a_4 z \\ \sigma_z &= a_2 + a_5 z \\ \tau_{xz} &= a_3 \end{aligned} \right\} \quad (\text{D.0.1-1})$$

式中 $a_1 \sim a_5$ 为常数, z 为竖向坐标值。

对软土地层,初始地应力的垂直分量可取为自重应力,水平分量则常由根据经验给出的水平侧压力系数 K_0 算得,初始计算式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \sum \gamma_i H_i \\ \sigma_x &= K_0 \cdot (\sigma_z - P_w) + P_w \end{aligned} \right\} \quad (\text{D.0.1-2})$$

式中: σ_z, σ_x ——为竖向和水平向初始地应力;

γ_i ——计算点以上第 i 层土的重度;

H_i ——相应土层的厚度;

P_w ——计算点的孔隙水压力。

D.0.2 释放荷载的计算

对各开挖阶段的状态,有限元分析的表达式可写为

$$[K]_i \{\Delta\delta\}_i = \{\Delta F_r\}_i + \{\Delta F_a\}_i \quad (i = 1, L) \quad (D.0.2-1)$$

式中: L ——开挖阶段数;

$[K]_i$ ——第 i 开挖阶段岩土体和结构的总刚度矩阵,由式 $[K]_i = [K]_0 + \sum_{\lambda=1}^i [\Delta K]_{\lambda}$ 计算;

$[K]_0$ ——岩土体和结构(开挖开始前存在时)的初始总刚度矩阵;

$[\Delta K]_{\lambda}$ ——第 λ 开挖阶段的岩土体和结构刚度的增量或减量,用以体现岩土体单元的挖除、填筑及结构单元的施作或拆除;

$\{\Delta F_r\}_i$ ——第 i 开挖阶段开挖边界上的释放荷载的等效结点力;

$\{\Delta F_a\}_i$ ——第 i 开挖阶段新增自重等的等效结点力;

$\{\Delta\delta\}_i$ ——第 i 开挖阶段的结点位移增量。

采用增量初应变法解题时,对每个开挖步,增量加载过程的有限元分析的表达式为

$$[K]_{ij} \{\Delta\delta\}_{ij} = \{\Delta F_r\}_i \alpha_{ij} + \{\Delta F_a\}_{ij} \quad (i = 1, L; j = 1, M) \quad (D.0.2-2)$$

式中: M ——各开挖步增量加载的次数;

$[K]_{ij}$ ——第 i 开挖步中施加第 j 增量步时的刚度矩阵, $[K]_{ij} = [K]_{i-1} + \sum_{\xi=1}^j [\Delta K]_{i\xi}$;

α_{ij} ——第 i 开挖步第 j 增量步的开挖边界释放荷载系数,开挖边界荷载完全释放时

有 $\sum_{j=1}^M \alpha_{ij} = 1$;

$\{\Delta F_a\}_{ij}$ ——第 i 开挖步第 j 增量步新增自重等的等效结点力;

$\{\Delta\delta\}_{ij}$ ——第 i 开挖步第 j 增量步的结点位移增量。

增量时步加荷过程中,部分岩土体进入塑性状态后,由材料屈服引起的过量塑性应变以初应变的形式被转移,并由整个体系中的所有单元共同负担。每一时步中,各单元与过量塑性应变相应的初应变均以等效结点力的形式起作用,并处理为再次计算时的结点附加荷载,据以进行迭代运算,直至时步最终计算时间,并满足给定的精度要求。

岩土体单元出现受拉破坏或节理、接触面单元发生受拉或受剪破坏时,也可按原理与上述方法类同的方法处理。单元发生破坏后,沿破坏方向的单元应力需予转移,计算过程将其处理为等效结点力,据以进行迭代计算。

附录 E 浅埋隧道荷载的计算方法

E.0.1 浅埋和深埋隧道的分界,按荷载等效高度值,并结合地质条件、施工方法等因素综合判定。按荷载等效高度的判定公式为

$$H_p = (2 \sim 2.5) h_q \quad (\text{E.0.1-1})$$

式中: H_p ——浅埋隧道分界深度(m);

h_q ——荷载等效高度(m),按下式计算:

$$h_q = \frac{q}{\gamma} \quad (\text{E.0.1-2})$$

q ——用式(6.2.3)算出的深埋隧道垂直均布压力(kN/m²);

γ ——围岩重度(kN/m³)。

在矿山法施工的条件下,IV~VI级围岩取

$$H_p = 2.5 h_q \quad (\text{E.0.1-3})$$

I~III级围岩取

$$H_p = 2 h_q \quad (\text{E.0.1-4})$$

E.0.2 浅埋隧道荷载分下述两种情况分别计算:

1 埋深(H)小于或等于等效荷载高度 h_q 时,荷载视为均布垂直压力。

$$q = \gamma \cdot H \quad (\text{E.0.2-1})$$

式中: 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,指坑顶至地面的距离(m)。

侧向压力 e 按均布考虑时其值为

$$e = \gamma \left(H + \frac{1}{2H_t} \right) \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi_c}{2} \right) \quad (\text{E.0.2-2})$$

式中: e ——侧向均布压力(kN/m²);

H_t ——隧道高度(m);

φ_c ——围岩计算摩擦角(°),其值见表 A.0.4-1。

2 埋深大于 h_q 小于等于 H_p 时,为便于计算,假定土体中形成的破裂面是一条与水平成 β 角的斜直线,如图 E.0.2-1 所示。 $EFHG$ 岩土体下沉,带动两侧三棱土体(如图中 FDB 和 ECA)下沉,整个土体 $ABDC$ 下沉时,又要受到未扰动岩土体的阻力;斜直线 AC 或 BD 是假定的破裂面,分析时考虑内聚力 C ,并采用了计算摩擦角 φ ;另一滑面 FH 或 EG 则并非破裂面,因此,滑面阻力要小于破裂面的阻力,若该滑面的摩擦角为 θ ,则 θ 值应小

于 φ 值,无实测资料时, θ 可按表 E.0.2 采用。

表 E.0.2 各级围岩的 θ 值

围岩级别	I、II、III	IV	V	VI
θ 值	0.9φ	$(0.7 \sim 0.9)\varphi$	$(0.5 \sim 0.7)\varphi$	$(0.3 \sim 0.5)\varphi$

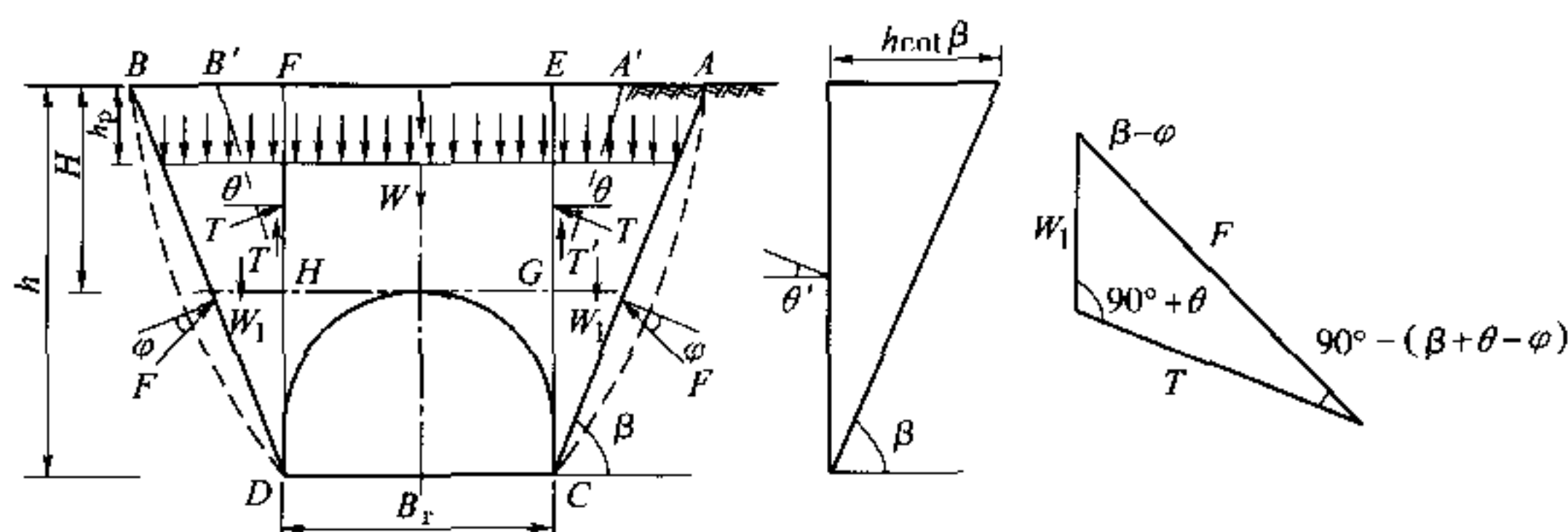


图 E.0.2-1

由图 E.0.2-1 可见,隧道上覆岩体 EFHG 的重力为 W ,两侧三棱岩体 FDB 或 ECA 的重力为 W_1 ,未扰动岩体整个滑动土体的阻力为 F ,当 EFHG 下沉,两侧受到阻力 T 或 T' ,作用于 HG 面上的垂直压力总值 $Q_{\text{浅}}$ 为

$$Q_{\text{浅}} = W - 2T' = W - 2T\sin\theta \quad (\text{E.0.2-3})$$

三棱体自重为

$$W_1 = \frac{1}{2} \gamma h \frac{h}{\tan\beta} \quad (\text{E.0.2-4})$$

式中: h ——坑道底部到地面的距离(m);

β ——破裂面与水平面的夹角($^\circ$)。

由图据正弦定理可得

$$T = \frac{\sin(\beta - \varphi)}{\sin[90^\circ - (\beta - \varphi + \theta)]} W_1 \quad (\text{E.0.2-5})$$

将式(E.0.2-4)代入可得

$$T = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\lambda}{\cos\theta} \quad (\text{E.0.2-6})$$

$$\lambda = \frac{\tan\beta - \tan\varphi_c}{\tan\beta[1 + \tan\beta(\tan\varphi_c - \tan\theta) + \tan\varphi_c \tan\theta]} \quad (\text{E.0.2-7})$$

$$\tan\beta = \tan\varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2\varphi_c + 1)\tan\varphi_c}{\tan\varphi_c - \tan\theta}} \quad (\text{E.0.2-8})$$

式中: λ ——侧压力系数;

其它符号意义同前。

至此,极限最大阻力 T 值可求得。得到 T 值后,代入式(E.0.2-3)可求得作用在 HG 面上的总垂直压力 $Q_{\text{浅}}$ 。

$$Q_{\text{浅}} = W - 2T\sin\theta = W - \gamma h^2 \lambda \tan\theta \quad (\text{E.0.2-9})$$

由于 GC 、 HD 与 EG 、 EF 相比往往较小,而且衬砌与土之间的摩擦角也不同,前面分析时均按 θ 计,当中间土块下滑时,由 FH 及 EG 面传递,考虑压力稍大些对设计的结构也偏于安全,因此,摩阻力不计隧道部分而只计洞顶部分,即在计算中用 H 代替 h ,这样式 (E.0.2-9) 为

$$Q_{\text{浅}} = W - \gamma H^2 \lambda \tan\theta$$

由于 $W = B_t H \lambda$, 故

$$Q_{\text{浅}} = \gamma H (B_t - H \lambda \tan\theta) \quad (\text{E.0.2-10})$$

式中: B_t ——坑道宽度(m)。

换算为作用在支护结构上的均布荷载(图 E.0.2-2), 即

$$q_{\text{浅}} = \frac{Q_{\text{浅}}}{B_t} = \gamma H \left(1 - \frac{H}{B_t} \lambda \tan\theta \right) \quad (\text{E.0.2-11})$$

式中: $q_{\text{浅}}$ ——作用在支护结构上的均布荷载(kN/m^2);

其它符号意义同前。

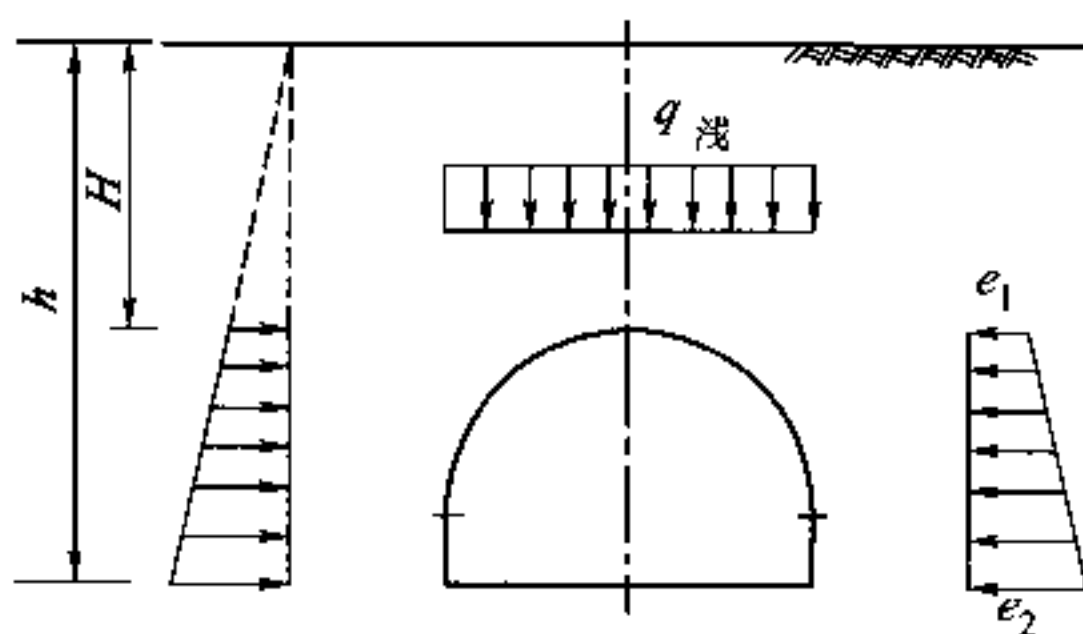


图 E.0.2-2

作用在支护结构两侧的水平侧压力为

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= \gamma H \lambda \\ e_2 &= \gamma h \lambda \end{aligned} \right\} \quad (\text{E.0.2-12})$$

侧压力视为均布压力时,

$$e = \frac{1}{2} (e_1 + e_2) \quad (\text{E.0.2-13})$$

附录 F 偏压隧道衬砌荷载的计算方法

F.0.1 偏压隧道垂直压力的计算(图 F.0.1)

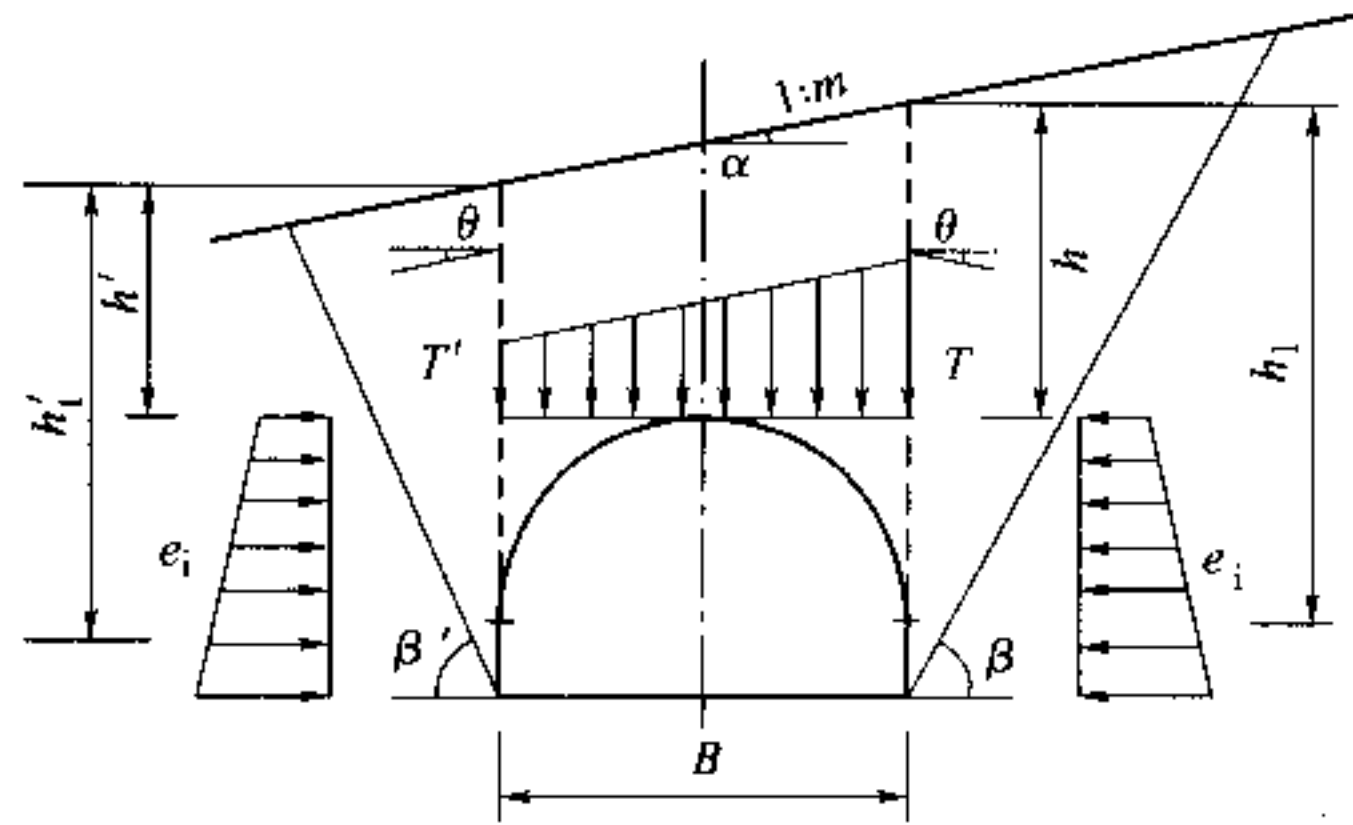


图 F.0.1 偏压分布图

假定偏压分布图形与地面坡一致。

$$Q = \frac{\gamma}{2} [(h + h')B - (\lambda h^2 + \lambda' h'^2) \tan \theta] \quad (\text{F.0.1-1})$$

式中: h 、 h' ——内、外侧由拱顶水平至地面的高度(m);

B ——坑道跨度(m);

γ ——围岩重度(kN/m^3);

θ ——顶板土柱两侧摩擦角($^\circ$),当无实测资料时,可参考表 E.0.2 选取;

λ 、 λ' ——内、外侧的侧压力系数,由下式计算:

$$\lambda = \frac{1}{\tan \beta - \tan \alpha} \times \frac{\tan \beta - \tan \varphi_c}{1 + \tan \beta (\tan \varphi_c - \tan \theta) + \tan \varphi_c \tan \theta} \quad (\text{F.0.1-2})$$

$$\lambda' = \frac{1}{\tan \beta' + \tan \alpha} \times \frac{\tan \beta' - \tan \varphi_c}{1 + \tan \beta' (\tan \varphi_c - \tan \theta) + \tan \varphi_c \cdot \tan \theta} \quad (\text{F.0.1-3})$$

$$\tan \beta = \tan \varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi_c + 1)(\tan \varphi_c - \tan \alpha)}{\tan \varphi_c - \tan \theta}} \quad (\text{F.0.1-4})$$

$$\tan \beta' = \tan \varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi_c + 1)(\tan \varphi_c + \tan \alpha)}{\tan \varphi_c - \tan \theta}} \quad (\text{F.0.1-5})$$

α ——地面坡坡角($^\circ$);

φ_c ——围岩计算摩擦角($^\circ$);

β 、 β' ——内、外侧产生最大推力时的破裂角($^\circ$)。

F.0.2 偏压隧道水平侧压力的计算

内侧:
$$e_i = \gamma \cdot h_i \lambda \quad (\text{F.0.2-1})$$

外侧:
$$e_i = \gamma \cdot h'_i \lambda' \quad (\text{F.0.2-2})$$

式中: h_i 、 h'_i ——内、外侧任意一点 i 至地面的距离(m)。

附录 G 明洞设计荷载的计算方法

G.0.1 拱圈回填土石垂直压力

$$q_i = \gamma_1 h_i \quad (\text{G.0.1-1})$$

式中: q_i ——明洞结构上任意点 i 的回填土石垂直压力值(kN/m^2);

γ_1 ——拱背回填土石重度(kN/m^3);

h_i ——明洞结构上任意点 i 的土柱体高度(m)。

G.0.2 拱圈回填土石侧压力

$$e_i = \gamma_1 h_i \lambda \quad (\text{G.0.2-1})$$

式中: e_i ——任意点 i 的侧压力值(kN/m^2);

γ_1 、 h_i ——符号意义同前;

λ ——侧压力系数,按以下两种情况计算:

1) 填土坡面向上倾斜(图 G.0.2-1),按无限土体计算。

$$\lambda = \cos \alpha \frac{\cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \varphi_1}}{\cos \alpha + \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \varphi_1}} \quad (\text{G.0.2-2})$$

2) 填土坡面向上倾斜(图 G.0.2-2),按有限土体计算。

$$\lambda = \frac{1 - \mu n}{(\mu + n) \cos \rho + (1 - \mu n) \sin \rho} \cdot \frac{mn}{m - n} \quad (\text{G.0.2-3})$$

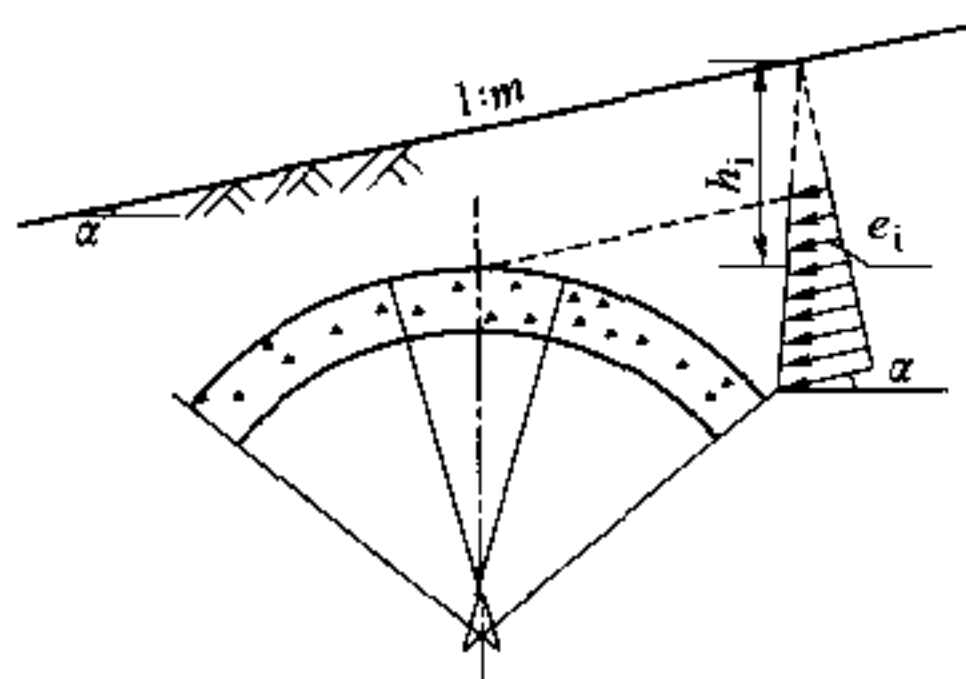


图 G.0.2-1

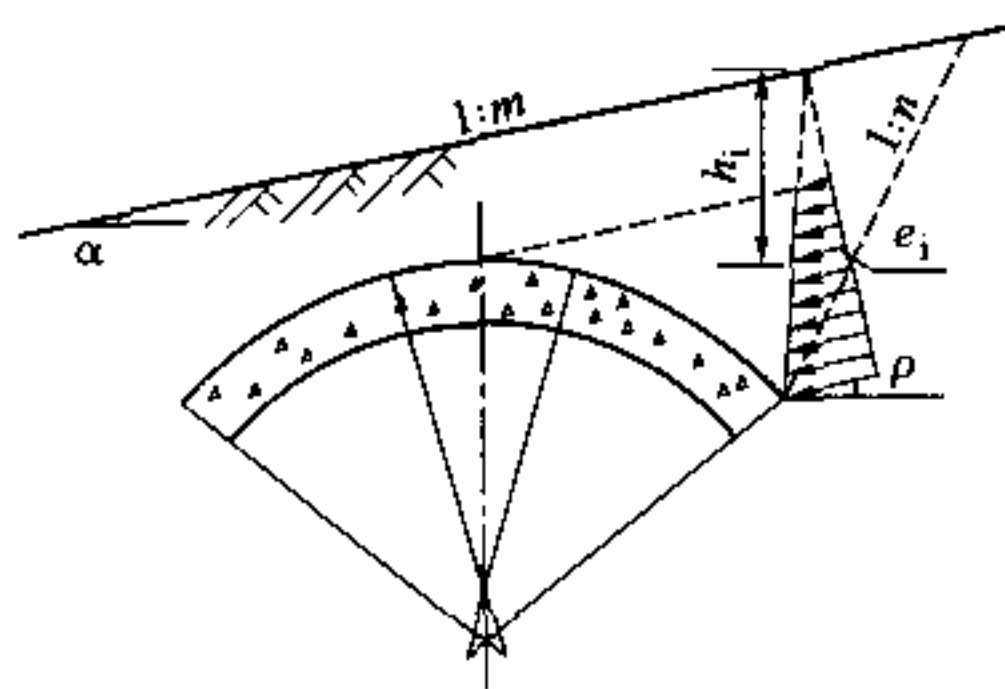


图 G.0.2-2

式中: α ——设计填土面坡度角($^\circ$);

- φ_1 ——拱背回填土石计算摩擦角($^\circ$);
 ρ ——侧压力作用方向与水平线的夹角($^\circ$);
 n ——开挖边坡坡率;
 m ——回填土石面坡率;
 μ ——回填土石与开挖边坡面间的摩擦系数。

G.0.3 边墙回填土石侧压力

$$e_i = \gamma_2 h_i' \lambda \quad (\text{G.0.3-1})$$

式中: γ_2 ——墙背回填土石重度(kN/m^3);

h_i' ——边墙计算点换算高度(m), $h_i' = h_i'' + \frac{\gamma_1}{\gamma_2} h_1$;

h_i'' ——墙顶至计算位置的高度(m);

h_1 ——填土坡面至墙顶的垂直高度(m);

λ ——侧压力系数,按下列三种情况进行计算:

1) 填土坡面向上倾斜(图 G.0.3-1)

$$\lambda = \frac{\cos^2 \varphi_2}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin \varphi_2 \sin(\varphi_2 - \alpha')}{\cos \alpha'}} \right]^2} \quad (\text{G.0.3-2})$$

2) 填土坡面向下倾斜(图 G.0.3-2)

$$\lambda = \frac{\tan \theta_0}{\tan(\theta_0 + \varphi_2)(1 + \tan \alpha' \tan \theta_0)} \quad (\text{G.0.3-3})$$

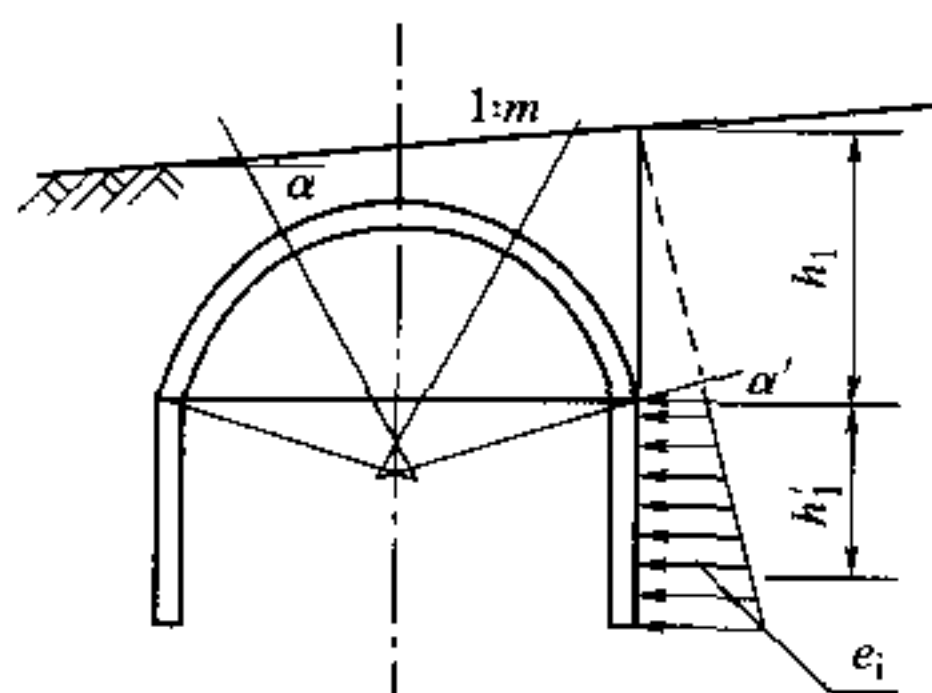


图 G.0.3-1

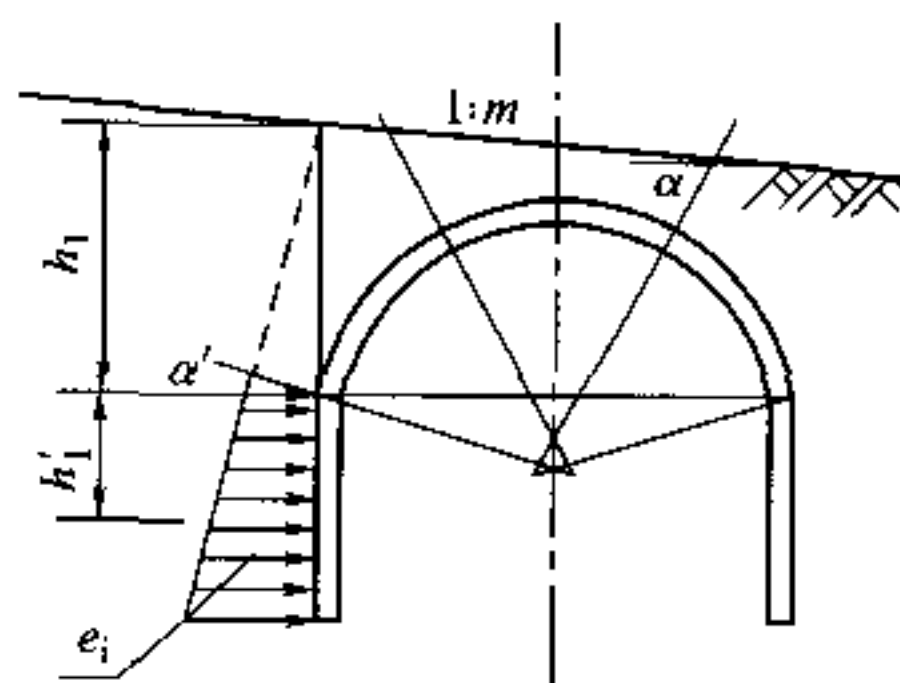


图 G.0.3-2

式中: φ_2 ——墙背回填土石计算摩擦角($^\circ$)。

$$\alpha' = \arctan\left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \tan \alpha\right) \quad (\text{G.0.3-4})$$

$$\tan \theta_0 = \frac{-\tan \varphi_2 + \sqrt{(1 + \tan^2 \varphi_2)(1 + \tan \alpha' / \tan \varphi_2)}}{1 + (1 + \tan^2 \varphi_2) \tan \alpha' / \tan \varphi_2} \quad (\text{G.0.3-5})$$

3)填土坡面平时

$$\lambda = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_2}{2} \right) \quad (\text{G.0.3-6})$$

附录 H 洞门土压力荷载的计算方法

H.0.1 隧道门端墙、翼墙及洞门挡土墙可按下列公式计算：

1 最危险破裂面与垂直面之间的夹角

$$\tan \omega = \frac{\tan^2 \varphi + \tan \alpha \tan \varepsilon - \sqrt{(1 + \tan^2 \varphi)(\tan \varphi - \tan \varepsilon)(\tan \varphi + \tan \alpha)(1 - \tan \alpha \tan \varepsilon)}}{\tan \varepsilon (1 + \tan^2 \varphi) - \tan \varphi (1 - \tan \alpha \tan \varepsilon)} \quad (\text{H.0.1-1})$$

式中： φ ——围岩计算摩擦角(°)；

ε 、 α ——地面坡角与墙面倾角(°)，如图 H.0.1。

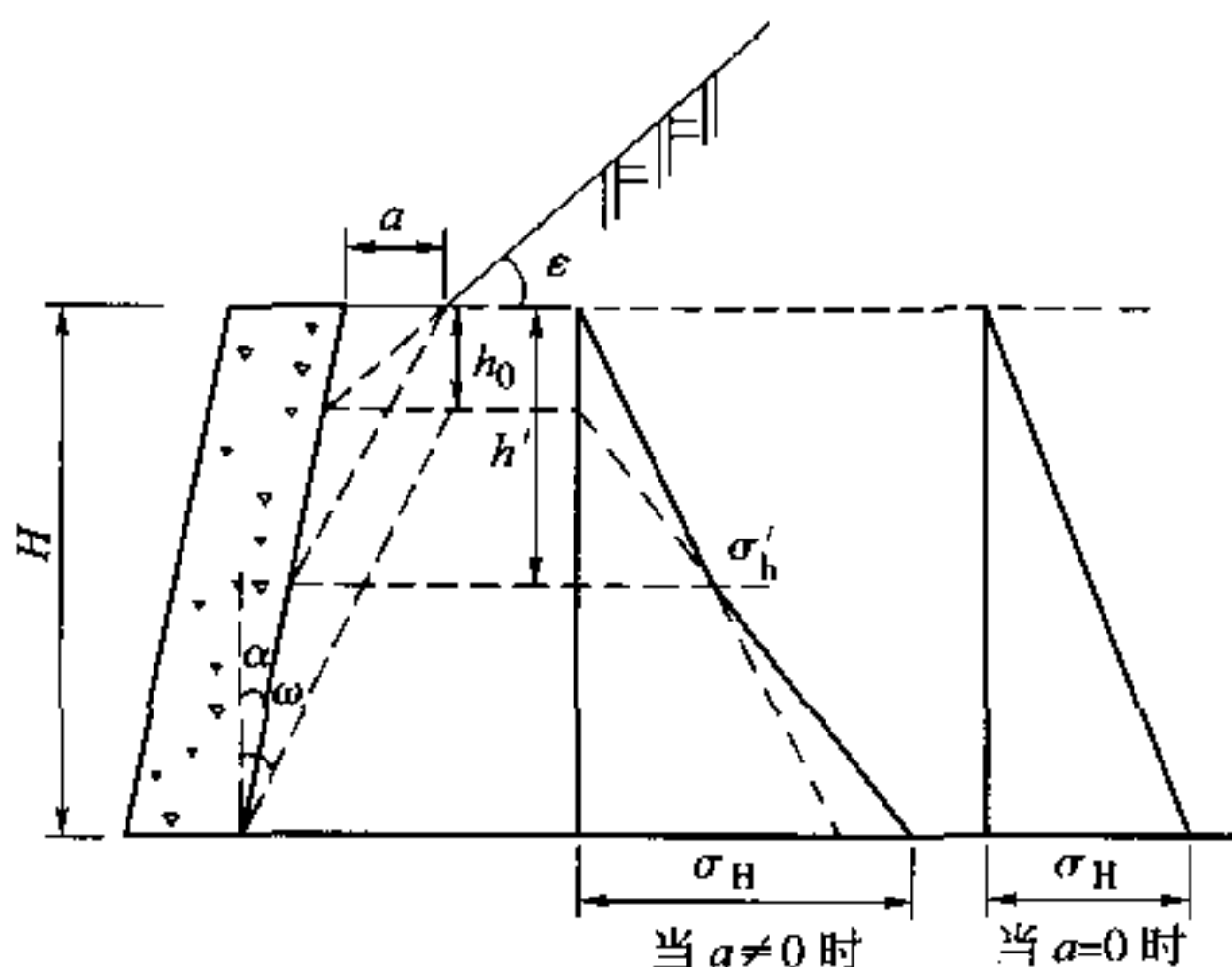


图 H.0.1

2 土压力

$$E = \frac{1}{2} \gamma \lambda [H^2 + h_0(h' - h_0)] b \xi \quad (\text{H.0.1-2})$$

$$\lambda = \frac{(\tan \omega - \tan \alpha)(1 - \tan \alpha \tan \varepsilon)}{\tan(\omega + \varphi)(1 - \tan \omega \tan \varepsilon)} \quad (\text{H.0.1-3})$$

$$h' = \frac{\alpha}{\tan \omega - \tan \alpha} \quad (\text{H.0.1-4})$$

式中： E ——土压力(kN)；

γ ——地层重度(kN/m³)；

λ ——侧压力系数；

ω ——墙背土体破裂角(°)；

b ——洞门墙计算条带宽度(m);

ξ ——土压力计算模式不确定性系数,可取 $\xi = 0.6$ 。

H.0.2 明洞门端墙土压力计算可参考有关设计手册。

1 总则

1.0.1 为给山岭公路隧道设计提供技术准则,制定本规范。

1.0.2 本规范适用于以钻爆法为主要开挖手段的各级公路双车道隧道,其它形式的公路隧道可参照执行。

1.0.3 隧道规划和设计应遵循能充分发挥隧道功能、安全且经济地建设隧道的基本原则。

隧道设计应有完整的勘测、调查资料,综合考虑地形、地质、水文、气象、地震和交通量及其构成,以及营运和施工条件,进行多方案的技术、经济、环保比较,使隧道设计符合安全实用、质量可靠、经济合理、技术先进的要求。

1.0.4 公路隧道按其长度可分为四类,如表 1.0.4 所示。

表 1.0.4 公路隧道长度分类

分类	特长隧道	长隧道	中隧道	短隧道
长度(m)	$L > 3\,000$	$3\,000 \geq L > 1\,000$	$1\,000 \geq L > 500$	$L \leq 500$

注:隧道长度系指两端洞门墙墙面与路面的交线同路线中线交点间的距离。

1.0.5 隧道主体结构必须按永久性建筑设计,具有规定的强度、稳定性和耐久性;建成的隧道应能适应长期营运的需要,方便维修作业。

1.0.6 应加强隧道支护衬砌、防排水、路面等主体结构设计与通风、照明、供配电、消防、交通监控等营运设施设计之间的协调,形成合理的综合设计。必要时应对有关的技术问题开展专项设计和研究。

1.0.7 隧道土建设计应体现动态设计与信息化施工的思想,制定地质观察和监控量测的总体方案;地质条件复杂的隧道,应制定地质预测方案,以及时评判设计的合理性,调整支护参数和施工方案。通过动态设计使支护结构适应于围岩实际情况,更加安全、经济。

1.0.8 隧道设计应贯彻国家有关技术经济政策,积极慎重地采用新技术、新材料、新设备、新工艺。

附录 I 荷载结构法

1.0.1 设计原理

荷载结构法的设计原理认为,隧道开挖后地层的作用主要是对衬砌结构产生荷载,衬砌结构应能安全可靠地承受地层压力等荷载的作用。计算时先按地层分类法或由实用公式确定地层压力,然后按弹性地基上结构物的计算方法计算衬砌的内力,并进行结构截面设计。

1.0.2 计算原理

1 基本未知量与基本方程

取衬砌结构结点的位移为基本未知量。由最小势能原理或变分原理可得系统整体求解时的平衡方程为

$$[K]\{\delta\} = \{P\} \quad (I.0.2-1)$$

式中: $[K]$ ——衬砌结构的整体刚度矩阵,为 $m \times m$ 阶方阵, m 为体系结点自由度的总个数;

$\{\delta\}$ ——由衬砌结构结点位移组成的列向量,即 $\{\delta\} = [\delta_1 \ \delta_2 \ \cdots \ \delta_m]^T$;

$\{P\}$ ——由衬砌结构结点荷载组成的列向量,即 $\{P\} = [P_1 \ P_2 \ \cdots \ P_m]^T$ 。

矩阵 $\{P\}$ 、 $[K]$ 和 $\{\delta\}$ 可由单元的荷载矩阵 $\{P\}^e$ 、单元的刚度矩阵 $[k]^e$ 和单元的位移向量矩阵 $\{\delta\}^e$ 组装而成,故在采用有限元方法进行分析时,需先划分单元,建立单元刚度矩阵 $[k]^e$ 和单元荷载矩阵 $\{P\}^e$ 。

隧道承重结构轴线的形状为弧形时,需用折线单元模拟曲线。划分单元时,只需确定杆件单元的长度。杆件厚度 d 即为承重结构的厚度,杆件宽度取为 1(m)。相应的杆件横截面面积为 $A = d \times 1(\text{m}^2)$,抗弯惯性矩为 $I = \frac{1}{12} \times 1 \times d^3(\text{m}^4)$,弹性模量 $E(\text{kN}/\text{m}^2)$ 取为混凝土的弹性模量。

2 单元刚度矩阵的计算

设梁单元在局部坐标系下的结点位移为 $\{\delta\} = [u_i, v_i, \theta_i, u_j, v_j, \theta_j]^T$, 对应的结点力为 $\{f\} = [X_i, Y_i, M_i, X_j, Y_j, M_j]^T$, 则有

$$\{f\} = [\bar{k}]^e \{\delta\} \quad (I.0.2-2)$$

式中 $[\bar{k}]^e$ 为梁单元在局部坐标系下的刚度矩阵,并有

$$[k]^e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (1.0.2-3)$$

式中: l ——梁单元的长度;

A ——梁的截面积;

I ——梁的惯性矩;

E ——梁的弹性模量。

对于整体结构而言,各单元采用的局部坐标系均不相同,故在建立整体矩阵时,需按式(1.0.2-4)将按局部坐标系建立的单元刚度矩阵 $[k]^e$ 转换成结构整体坐标系中的单元刚度矩阵 $[k]^e$ 。

$$[k]^e = [T]^T [\bar{k}]^e [T] \quad (1.0.2-4)$$

式中: $[T]$ ——转置矩阵,表达式为

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.0.2-5)$$

β ——局部坐标系与整体坐标系之间的夹角。

3 地层反力作用模式

地层弹性抗力由下式给出:

$$F_n = K_n \cdot U_n \quad (1.0.2-6)$$

$$F_s = K_s \cdot U_s \quad (1.0.2-7)$$

其中,

$$K_n = \begin{cases} K_n^+ & U_n \geq 0 \\ K_n^- & U_n < 0 \end{cases} \quad (1.0.2-8)$$

$$K_s = \begin{cases} K_s^+ & U_s \geq 0 \\ K_s^- & U_s < 0 \end{cases} \quad (1.0.2-9)$$

式中: F_n 、 F_s ——分别为法向和切向弹性抗力;

K_n 、 K_s ——相应的围岩弹性抗力系数,且 K^+ 、 K^- 分别为压缩区和拉伸区的抗力系数,通常令 $K_n^- = K_s^- = 0$ 。

杆件单元确定后,即可确定地层弹簧单元,它只设置在杆件单元的结点上。地层弹簧单元可沿整个截面设置,也可只在部分结点上设置。沿整个截面设置地层弹簧单元时,计算过程中需用迭代法作变形控制分析,以判断出抗力区的确切位置。

附录 J 地层结构法

J.0.1 设计原理

地层结构法的设计原理,是将衬砌和地层视为整体共同受力的统一体系,在满足变形协调条件的前提下分别计算衬砌与地层的内力,据以验算地层的稳定性和进行结构截面设计。

目前计算方法以有限单元法为主,适用于设计构筑在软岩或较稳定的地层内的衬砌。

J.0.2 初始地应力的计算

1 初始自重应力

初始自重应力通常采用有限元法或给定水平侧压力系数的方法计算。

1)有限元法

即初始自重应力由有限元法算得,并将其转化为等效结点荷载。

2)给定水平侧压力系数法

即在给定水平侧压力系数 K_0 值后,按下式计算初始自重地应力:

$$\sigma_z^s = \sum \gamma_i H_i \quad (\text{J.0.2-1})$$

$$\sigma_x^s = K_0(\sigma_z - p_w) + p_w \quad (\text{J.0.2-2})$$

式中: σ_{zg} 、 σ_{xg} ——竖直方向和水平方向初始自重地应力;

γ_i ——计算点以上第 i 层岩石的重度;

H_i ——计算点以上第 i 层岩石的厚度;

p_w ——计算点的孔隙水压力,在不考虑地下水头变化的条件下, p_w 由计算点的静水压力确定,即 $p_w = \gamma_w \cdot H_w$ (γ_w 为地下水的重度, H_w 为地下水的水位差)。

2 构造应力

构造地应力可假设为均布或线性分布应力。假设主应力作用方向保持不变,则二维平面应变的普遍表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^s &= a_1 + a_4 z \\ \sigma_z^s &= a_2 + a_5 z \\ \tau_{xz}^s &= a_3 \end{aligned} \right\} \quad (\text{J.0.2-3})$$

式中: $a_1 \sim a_5$ ——常系数;

z ——竖直坐标。

3 初始地应力

将初始自重应力与构造应力叠加,即得初始地应力。

J.0.3 本构模型

1 岩石单元

1) 弹性模型

对于平面应变问题,横观各向同性弹性体的应力增量可表示为

$$\{\Delta\sigma\} = \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{zx} \end{Bmatrix} = [D] \{\Delta\epsilon\} = \begin{bmatrix} \frac{E_0 E_v - \mu_{vh}^2 E_h^2}{E_0} & \frac{E_h E_v \mu_{vh} (1 + \mu_{hh})}{E_0} & 0 \\ \frac{E_h E_v \mu_{vh} (1 + \mu_{hh})}{E_0} & \frac{E_v^2 (1 - \mu_{hh}^2)}{E_0} & 0 \\ 0 & 0 & G_{hv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_x \\ \Delta\epsilon_z \\ \Delta\gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (\text{J.0.3-1})$$

式中: E_v ——竖直方向(z)弹性模量;

E_h ——水平方向(x, y)弹性模量;

μ_{vh} ——竖直向应变引起水平向应变的泊松比(竖直面内的泊松比);

μ_{hh} ——水平面内的泊松比;

G_{hv} ——竖向平面内的剪切模量。

各向同性弹性体的应力增量可表示为

$$\{\Delta\sigma\} = \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{zx} \end{Bmatrix} = [D] \{\Delta\epsilon\} = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_x \\ \Delta\epsilon_z \\ \Delta\gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (\text{J.0.3-2})$$

2) 非线性弹性模型

采用邓肯-张模型的假设,并认为应力-应变关系可用双曲线关系近似描述,则在主应力 σ_3 保持不变时

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1} \quad (\text{J.0.3-3})$$

轴向应变 ϵ_1 和侧向应变 ϵ_3 之间假设也存在双曲线关系,即有

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_3}{f + d\epsilon_3} \quad (\text{J.0.3-4})$$

式中 a, b, f, d 均为由试验确定的参数。

在不同应力状态下弹性模量的表达式为

$$E_i = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi} \right]^2 Kp_0 \left(\frac{\sigma_3}{p_0} \right)^n \quad (\text{J.0.3-5})$$

式中: R_f ——破坏比,数值小于 1(一般在 0.75 ~ 1.0 之间);

C 、 φ ——土的内聚力和内摩擦角；

p_0 ——大气压力，一般取 100kPa；

K 、 n ——由试验确定的参数。

不同应力状态下泊松比的表达式为

$$\mu_i = \frac{G - F \lg\left(\frac{\sigma_3}{p_0}\right)}{(1 - A)^2} \quad (\text{J.0.3-6})$$

$$A = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)d}{Kp_0\left(\frac{\sigma_3}{p_0}\right)^n \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi}\right]} \quad (\text{J.0.3-7})$$

式中 G 、 F 、 d 为由试验确定的参数。

由 E_i 和 μ_i 即可确定该应力状态下的弹性矩阵 $[D]$ 。

3) 弹塑性模型

① 屈服准则

材料进入塑性状态的判断准则采用 Drucker-Prager 或 Mohr-Coulomb 屈服准则，其中 Drucker-Prager 屈服准则的表达式为

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (\text{J.0.3-8})$$

式中： I_1 ——应力张量的第一不变量；

J_2 ——应力偏量的第二不变量，并有

$$\alpha = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2\varphi}}$$

$$k = \frac{\sqrt{3}C\cos\varphi}{\sqrt{3 + \sin^2\varphi}} \quad (\text{J.0.3-9})$$

Mohr-Coulomb 屈服准则的表达式为

$$f = \frac{1}{3} I_1 \sin\varphi - \left(\cos\theta + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin\theta \sin\varphi \right) \sqrt{J_2} + C\cos\varphi = 0 \quad (\text{J.0.3-10})$$

式中： $\theta = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left(\frac{-3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{(J_2)^{\frac{3}{2}}} \right)$ ， $-\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{6}$ ；

J_3 ——应力偏量的第三不变量。

② 弹塑性矩阵

材料进入塑性状态后，其弹塑性应力-应变关系的增量表达式为

$$\{d\sigma\} = \left\{ [D] - \frac{[D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D]}{A + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\}} \right\} \{d\epsilon\}$$

$$= ([D] - [D_p]) \{d\epsilon\} = [D_{ep}] \{d\epsilon\} \quad (\text{J.0.3-11})$$

式中： $[D]$ 、 $[D_p]$ 、 $[D_{ep}]$ ——分别为材料的弹性矩阵、塑性矩阵和弹塑性矩阵；

A ——与材料硬化有关的参数,理想弹塑性情况下, $A = 0$;

f ——屈服面函数;

g ——塑性势面函数,采用关联流动法则时, $g = f$ 。

③弹塑性分析的计算过程

增量时步加荷过程中,部分岩土体进入塑性状态后,由材料屈服引起的过量塑性应变以初应变的形式被转移,并由整个体系中的所有单元共同负担。每一时步中,各单元与过量塑性应变相应的初应变均以等效结点力的形式起作用,并处理为再次计算时的结点附加荷载,据以进行迭代运算,直至时步最终计算时间,并满足给定的精度要求。

4)粘弹性模型

三元件广义 Kelvin 模型,由弹性元件和 Kelvin 模型串联组成,如图 J.0.3 所示。其应力应变关系式为

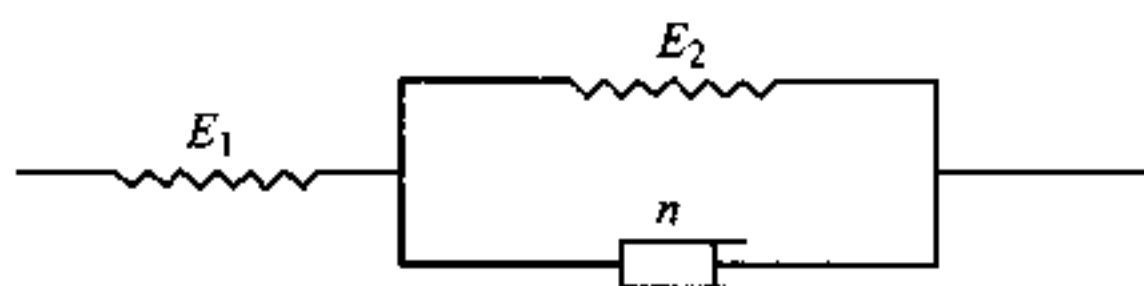


图 J.0.3 广义 Kelvin 模型

$$\frac{\eta}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} + \sigma = \frac{\eta E_1}{E_1 + E_2} \dot{\epsilon} + \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon \quad (\text{J.0.3-12})$$

衬砌施作后的蠕变方程为

$$\epsilon(t) = \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta} t}) \right] \sigma_0 = \sigma_0 J(t) \quad (\text{J.0.3-13})$$

式中: $J(t)$ ——蠕变柔量;

σ_0 ——常量应力。

2 梁单元

与附录 I 中“单元刚度矩阵的计算”相同。

3 杆单元

设杆单元在局部坐标系中的结点位移为 $\{\bar{\delta}\} = [\bar{u}_i, \bar{v}_i, \bar{u}_j, \bar{v}_j]^T$, 对应的结点力为 $\{\bar{f}\} = [\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \bar{X}_j, \bar{Y}_j]^T$, 则有

$$\{\bar{f}\} = [\bar{k}] \{\bar{\delta}\} \quad (\text{J.0.3-14})$$

其中 $[\bar{k}]$ 为杆在局部坐标系下的单元刚度矩阵, 并有

$$[\bar{k}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{l} & 0 & \frac{EA}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{J.0.3-15})$$

式中: l ——杆长;

A ——杆的截面积;

E ——杆的弹性模量。

4 接触面单元

接触面采用无厚度节理单元模拟,不考虑法向和切向的耦合作用时,有增量表达式

$$\begin{Bmatrix} \Delta\tau_s \\ \Delta\sigma_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_s \\ \Delta u_n \end{Bmatrix} = [K^e] \begin{Bmatrix} \Delta u_s \\ \Delta u_n \end{Bmatrix} \quad (\text{J.0.3-16})$$

式中: K_s ——接触面的切向刚度;

K_n ——接触面的法向刚度。

接触面材料的应力-应变关系一般为非线性关系,并常处于塑性受力状态。当屈服条件采用莫尔-库伦屈服条件,并假定节理材料为理想弹塑性材料及采用关联流动法则时,对平面应变问题,可导出接触面单元剪切滑移的塑性矩阵为

$$[D_p] = \frac{1}{S_0} \begin{bmatrix} K_s^2 & K_s S_1 \\ K_s S_1 & S_1^2 \end{bmatrix}$$

式中: $S_0 = K_s + K_n \tan^2 \varphi$;

$S_1 = K_n \tan \varphi$;

φ ——接触面的内摩擦角。

对处于非线性状态的接触面单元,应力与相对位移间的关系式为

$$\begin{aligned} \tau_s &= K_s \cdot \Delta u_s \\ \sigma_n &= K_n v_m \frac{\Delta u_n}{v_m - \Delta u_n} \quad (\Delta u_n < v_m) \end{aligned}$$

式中: v_m ——接触面单元的法向最大允许嵌入量。

J.0.4 单元模式

1 一维单元

对两结点一维线性单元,设结点位移为 $\{\delta\} = \{u_i, v_i, u_j, v_j\}$ 时,单元上任意点的位移为

$$u = \sum N_i u_i \quad (\text{J.0.4-1})$$

式中 N 为插值函数,并有

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{1-\xi}{2} \\ N_2 &= \frac{1+\xi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{J.0.4-2})$$

2 三角形单元

对三结点三角形单元,设结点坐标为 $\{x_i, y_i, x_j, y_j, x_m, y_m\}$, 结点位移 $\{\delta\} = \{u_i, v_i, u_j, v_j, u_m, v_m\}$, 对应的结点力 $\{F\} = \{X_i, Y_i, X_j, Y_j, X_m, Y_m\}$, 则当取线性位移模式时,单元内任意点的位移为

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = [N] \{\delta\} \quad (\text{J.0.4-3})$$

式中: $[N]$ ——形函数矩阵, 即

$$[N] = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_m & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_m \end{bmatrix} \quad (\text{J.0.4-4})$$

其中: $N_i = \frac{1}{2\Delta}(a_i + b_i x + c_i y)$;

$$a_i = x_i y_m - x_m y_i;$$

$$b_i = y_j - y_m;$$

$$c_i = x_m - x_i;$$

Δ ——单元面积。

3 四边形单元

采用四结点等参单元, 并设结点位移为 $\{\delta\} = \{u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3, u_4, v_4\}^T$ 时, 位移模式可由双线性插值函数给出, 形式为

$$\begin{cases} u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4 \\ v = N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3 + N_4 v_4 \end{cases} \quad (\text{J.0.4-5})$$

式中 N 为插值函数, 即

$$\begin{cases} N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \\ N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \\ N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \\ N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta) \end{cases} \quad (\text{J.0.4-6})$$

J.0.5 施工过程的模拟

1 一般表达式

开挖过程的模拟一般通过在开挖边界上施加释放荷载实现。将一个相对完整的施工阶段称为施工步, 并设每个施工步包含若干增量步, 则与该施工步相应的开挖释放荷载可在所包含的增量步中逐步释放, 以便较真实地模拟施工过程。具体计算中, 每个增量步的荷载释放量可由释放系数控制。对各施工阶段的状态, 有限元分析的表达式为

$$[K]_i \{\Delta\delta\}_i = \{\Delta F_r\}_i + \{\Delta F_g\}_i + \{\Delta F_p\}_i \quad (i = 1, L) \quad (\text{J.0.5-1})$$

$$[K]_i = [K]_0 + \sum_{\lambda=1}^i [\Delta K]_{\lambda} \quad (i \geq 1) \quad (\text{J.0.5-2})$$

式中: L ——施工步总数;

$[K]_i$ ——第 i 施工步岩土体和结构的总刚度矩阵;

$[K]_0$ ——岩土体和结构(施工开始前存在)的初始总刚度矩阵;

$[\Delta K]_{\lambda}$ ——施工过程中,第 λ 施工步的岩土体和结构刚度的增量或减量,用以体现岩土体单元的挖除、填筑及结构单元的施作或拆除;

$\{\Delta F_r\}_i$ ——第 i 施工步开挖边界上的释放荷载的等效结点力;

$\{\Delta F_g\}_i$ ——第 i 施工步新增自重等的等效结点力;

$\{\Delta F_p\}_i$ ——第 i 施工步增量荷载的等效结点力;

$\{\Delta \delta\}_i$ ——第 i 施工步的结点位移增量。

对每个施工步,增量加载过程的有限元分析的表达式为

$$[K]_{ij} \{\Delta \delta\}_{ij} = \{\Delta F_r\}_i \cdot \alpha_{ij} + \{\Delta F_g\}_{ij} + \{\Delta F_p\}_{ij} \quad (i=1, L; j=1, M) \quad (J.0.5-3)$$

$$[K]_{ij} = [K]_{i-1} + \sum_{\xi=1}^j [\Delta K]_{i\xi} \quad (J.0.5-4)$$

式中: M ——各施工步增量加载的次数;

$[K]_{ij}$ ——第 i 施工步中施加第 j 荷载增量步时的刚度矩阵;

α_{ij} ——与第 i 施工步第 j 荷载增量步相应的开挖边界释放荷载系数,开挖边界荷载

完全释放时有 $\sum_{j=1}^M \alpha_{ij} = 1$;

$\{\Delta F_g\}_{ij}$ ——第 i 施工步第 j 增量步新增单元自重等的等效结点力;

$\{\Delta \delta\}_{ij}$ ——第 i 施工步第 j 增量步的结点位移增量;

$\{\Delta F_p\}_{ij}$ ——第 i 施工步第 j 增量步增量荷载的等效结点力。

2 开挖工序的模拟

开挖效应可通过在开挖边界上设置释放荷载,并将其转化为等效结点力模拟。表达式为

$$[K - \Delta K] \{\Delta \delta\} = \{\Delta P\} \quad (J.0.5-5)$$

式中: $[K]$ ——开挖前系统的刚度矩阵;

$[\Delta K]$ ——开挖工序中挖除部分的刚度;

$\{\Delta P\}$ ——为开挖释放荷载的等效结点力。

开挖释放荷载可采用单元应力法或 Mana 法计算,具体方法见附录 D。

3 填筑工序的模拟

填筑效应包含两个部分,即整体刚度的改变和新增单元自重荷载的增加,其计算表达式为

$$[K + \Delta K] \{\Delta \delta\} = \{\Delta F_g\} \quad (J.0.5-6)$$

式中: K ——填筑前系统的刚度矩阵;

ΔK ——新增实体单元的刚度;

$\{\Delta F_g\}$ ——新增实体单元自重的等效结点荷载。

4 结构的施作与拆除

结构施作的效应体现为整体刚度的增加及新增结构的自重对系统的影响,其计算式为

$$[K + \Delta K] \{\Delta \delta\} = \{\Delta F_g^s\} \quad (J.0.5-7)$$

式中: K ——结构施作前系统的刚度矩阵;

ΔK ——新增结构的刚度;

$\{\Delta F_g\}$ ——施作结构自重的等效结点荷载。

结构拆除的效应包含整体刚度的减小和支撑内力释放的影响,其中支撑内力的释放可通过施加一反向内力实现,其计算表达式为

$$[K - \Delta K]\{\Delta\delta\} = -\{\Delta F\} \quad (\text{J.0.5-8})$$

式中: K ——结构施作前系统的刚度矩阵;

ΔK ——拆除结构的刚度;

$\{\Delta F\}$ ——拆除结构内力的等效结点力。

5 增量荷载的施加

在施工过程中施加的外荷载,可在相应的增量步中用施加增量荷载表示,其计算式为

$$[K]\{\Delta\delta\} = \{\Delta F\} \quad (\text{J.0.5-9})$$

式中: K ——增量荷载施加前系统的刚度矩阵;

$\{\Delta F\}$ ——施加的增量荷载的等效结点力。

附录 K 钢筋混凝土受弯和受压构件配筋量计算方法

K.0.1 钢筋混凝土受弯构件的截面强度应按下列公式计算(图 K.0.1):

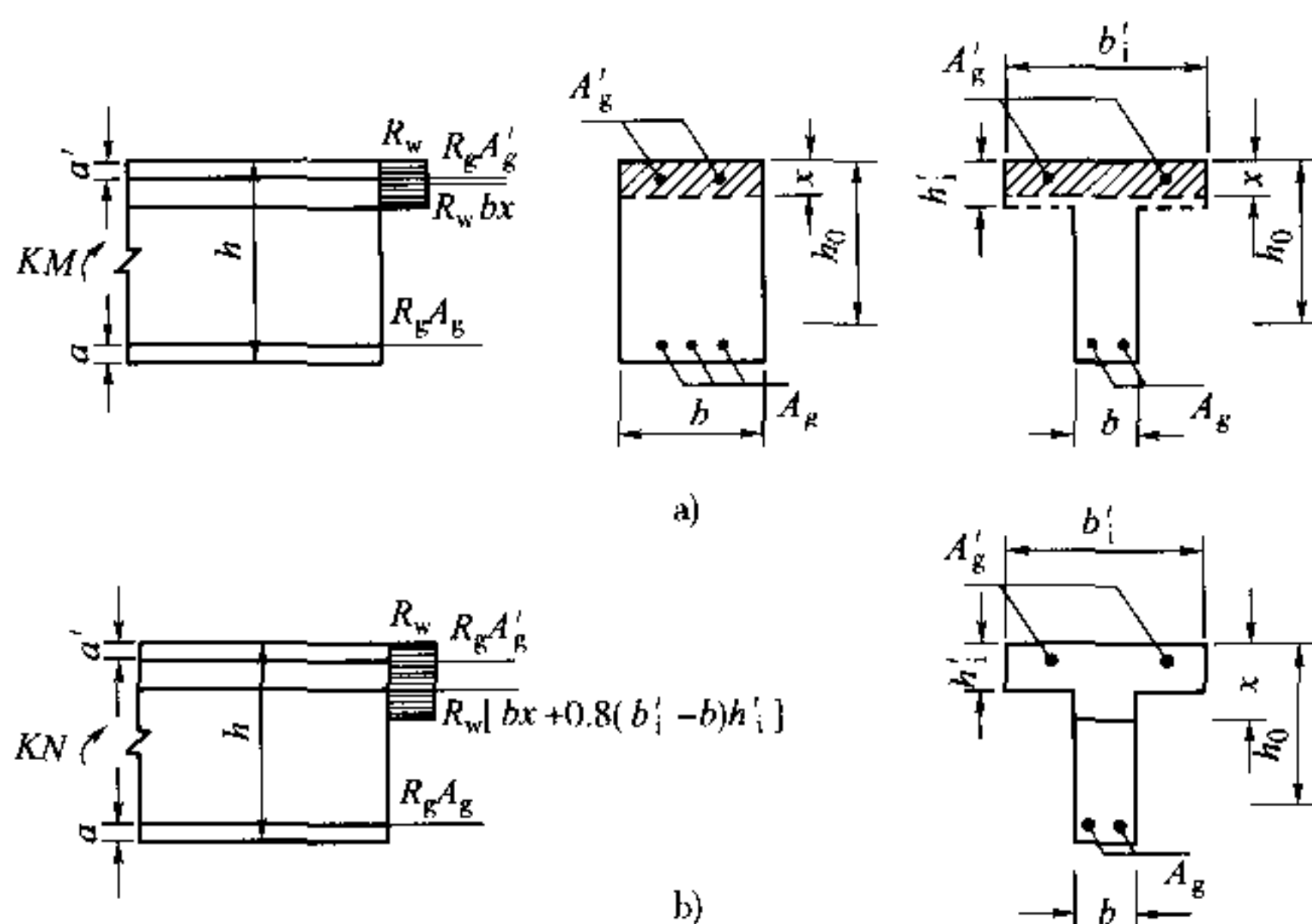


图 K.0.1 钢筋混凝土受弯构件截面强度计算

a) 受压区面积为矩形; b) 受压区面积为 T 形

1 受压区面积为矩形时

$$KM \leq R_w bx (h_0 - x/2) + R_g A'_g (h_0 - a') \quad (\text{K.0.1-1})$$

中性轴的位置按下式确定:

$$R_g (A_g - A'_g) = R_w bx \quad (\text{K.0.1-2})$$

2 受压区面积为 T 形时

$$KM \leq R_w [bx (h_0 - x/2) + 0.8(b'_1 - b)h'_1 (h_0 - h'_1/2)] + R_g A'_g (h_0 - a') \quad (\text{K.0.1-3})$$

中性轴的位置按下式确定:

$$R_g (A_g - A'_g) = R_w [bx + 0.8(b'_1 - b)h'_1] \quad (\text{K.0.1-4})$$

按上述公式计算受弯构件时,混凝土受压区的高度应符合式(K.0.1-5)及式(K.0.1-6)的要求,截面强度应符合式(K.0.1-7)的要求。但在构造中如无受压钢筋或计算中不考虑受压钢筋时,只需符合式(K.0.1-5)的要求。

$$x \leq 0.55h_0 \quad (\text{K.0.1-5})$$

$$x \geq 2a' \quad (\text{K.0.1-6})$$

$$KM \leq 0.5 R_w b h_0^2 \quad (\text{K.0.1-7})$$

式中: K ——安全系数,按表 9.2.4-2 采用;

M ——弯矩(MN·m);

R_w ——混凝土弯曲抗压极限强度标准值, $R_w = 1.25 R_a$,按表 5.2.2 采用;

R_g ——钢筋的抗拉或抗压计算强度标准值,按表 5.2.13 采用;

A_g 、 A'_g ——受拉和受压区钢筋的截面面积(m^2);

a 、 a' ——自钢筋 A_g 或 A'_g 的重心分别至截面最近边缘的距离(m);

h ——截面高度(m);

h_0 ——截面的有效高度(m), $h_0 = h - a$;

x ——混凝土受压区的高度(m);

b ——矩形截面的宽度或 T 形截面的肋宽(m);

b'_i ——T 形截面受压区翼缘计算宽度(m),按表 K.0.1 各项中的最小值采用;

h'_i ——T 形截面受压区翼缘的高度(m)。

表 K.0.1 T 形截面受压区翼缘的宽度

序 号	考 虑 情 况	肋 形 梁	独 立 梁
1	按跨度	$l/3$	$l/3$
2	按梁肋净距	$b + s$	—
3	按翼缘高度 h'_i ($h'_i/h_0 \geq 0.1$)	—	$B + 12h'_i$

K.0.2 矩形和 T 形截面的受弯构件,其截面应符合下式要求:

$$KQ \leq 0.3 R_a b h_0 \quad (\text{K.0.2})$$

式中: K ——安全系数,按表 9.2.4-2 采用;

Q ——剪力(MN);

b ——矩形截面的宽度或 T 形截面的肋宽(m);

其余符号意义同前。

K.0.3 计算斜截面的抗剪强度时,其计算位置应按下列规定采用:

- 1 支座边缘处的截面(图 K.0.3 截面 1-1);
- 2 受拉区弯起钢筋弯起点处的截面(图 K.0.3 截面 2-2 及 3-3);
- 3 受拉区箍筋数量与间距改变处的截面(图 K.0.3 截面 4-4)。

K.0.4 矩形和 T 形截面的受弯构件,当仅配有箍筋时,其斜截面的抗剪强度应按下列公式计算:

$$KQ \leq Q_{kh} \quad (\text{K.0.4-1})$$

$$Q_{kh} = 0.07 R_a b h_0 + \alpha_{kh} R_g \frac{A_k}{S} h_0 \quad (\text{K.0.4-2})$$

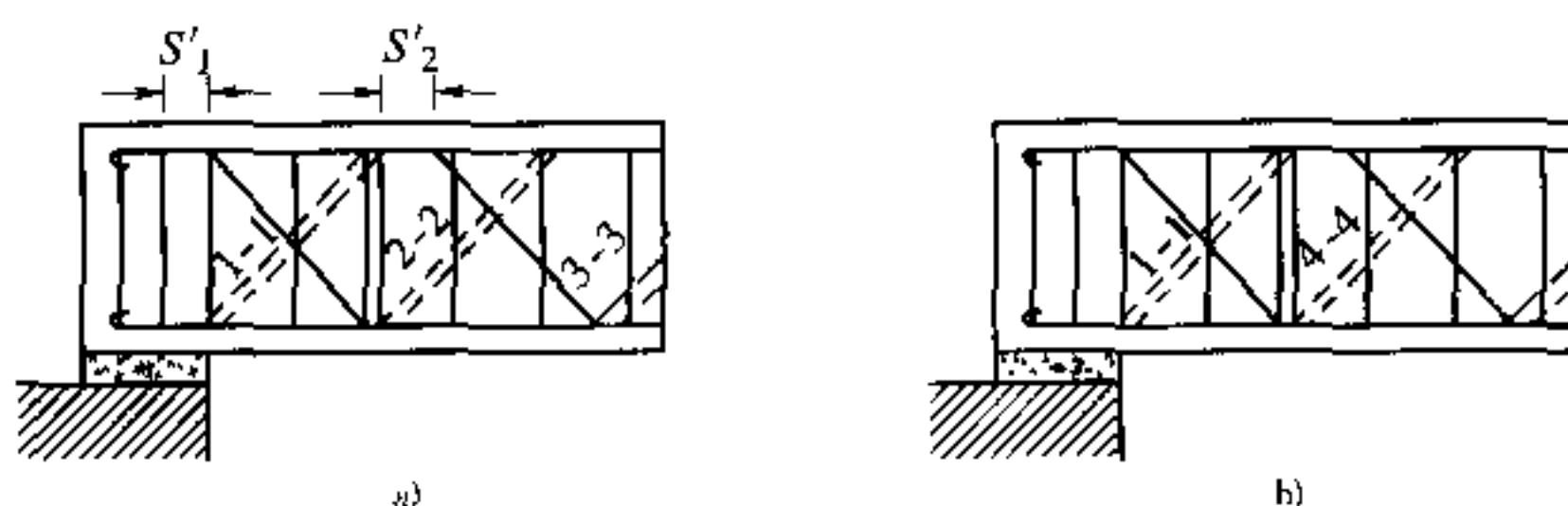


图 K.0.3 斜截面抗剪强度的计算位置图

a) 弯起钢筋; b) 纵筋及箍筋

1-1-支座边缘处的斜截面; 2-2 及 3-3-受拉区弯起钢筋弯起点的斜截面; 4-4-箍筋数量与间距改变处的斜截面

式中: Q ——斜截面的最大剪力(MN);

Q_{kh} ——斜截面上受压区混凝土和箍筋的抗剪强度(MPa);

α_{kh} ——抗剪强度影响系数, 当 $KQ/(bh_0) \leq 0.2R_a$ 时, $\alpha_{kh} = 2.0$, 当 $KQ/(bh_0) = 0.3R_a$ 时, $\alpha_{kh} = 1.5$, 当 $KQ/(bh_0)$ 为中间数值时, α_{kh} 值按直线内插法取用;

A_k ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积(m^2), $A_k = na_k$, 此时, 箍筋的间距应符合第 9.5.6 条的要求;

n ——在同一截面内箍筋的肢数;

a_k ——单肢箍筋的截面面积(m^2);

S ——沿构件长度方向上箍筋的间距(m);

R_g ——箍筋的抗拉计算强度标准值, 按表 5.2.5 采用。

K.0.5 矩形和 T 形截面的受弯构件, 当配有箍筋和弯起钢筋时, 其斜截面的抗剪强度应按下式计算:

$$KQ \leq Q_{kh} + 0.8R_g A_g A_w \sin\theta \quad (K.0.5)$$

式中: Q ——在配置弯起钢筋处的剪力(MN), 按第 K.0.6 条的规定采用;

A_w ——配置在同一弯起平面内的弯起钢筋的截面面积(m^2), 弯起钢筋的间距应符合第 9.5.6 条的要求;

θ ——弯起钢筋与构件纵向轴线的夹角($^\circ$)。

K.0.6 计算弯起钢筋时, 剪力 Q 值可按下列规定采用[图 K.0.3a)]:

- 1 当计算第一排(对支座而言)弯起钢筋时, 取用支座边缘处的剪力值;
- 2 当计算以后的每排弯起钢筋时, 取用前一排(对支座而言)弯起钢筋起点处的剪力值。

K.0.7 矩形和 T 形截面的受弯构件, 当符合式(K.0.7)的要求时, 则不需要进行斜截面的抗剪强度计算, 仅需根据第 9.5.6 条的规定, 按构造要求配置箍筋。

$$KQ \leq 0.07 R_a b h_0 \quad (\text{K.0.7})$$

K.0.8 钢筋混凝土矩形截面的大偏心受压构件($x \leq 0.55h_0$),其截面强度应按下式计算(图 K.0.8):

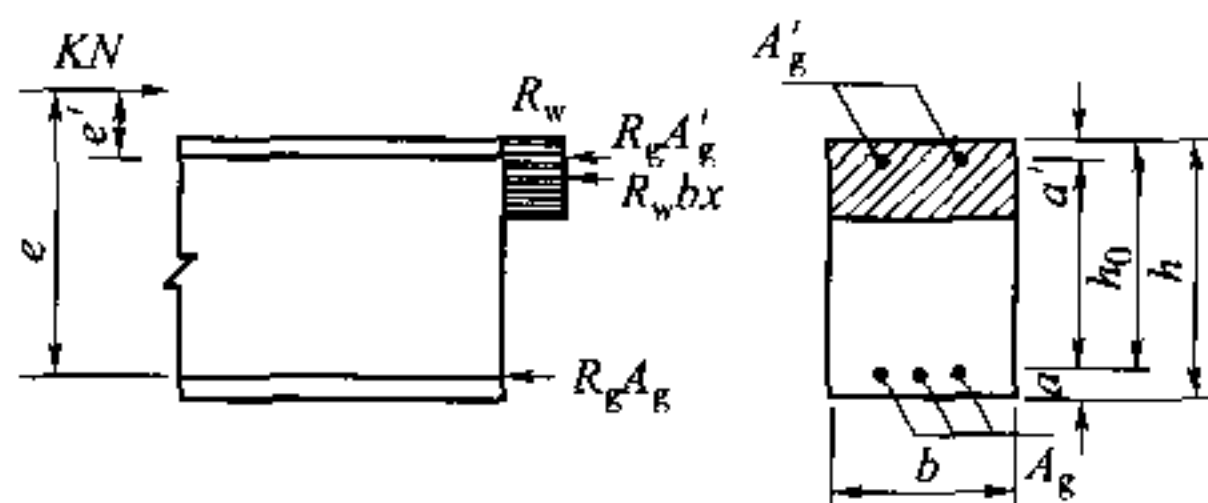


图 K.0.8 钢筋混凝土大偏心受压构件截面强度计算

$$KN \leq R_w b x + R_g (A'_g - A_g) \quad (\text{K.0.8-1})$$

或 $KN_e \leq R_w b x (h_0 - x/2) + R_g A'_g (h_0 - a') \quad (\text{K.0.8-2})$

此时,中性轴的位置按下式确定:

$$R_g (A_g e \mp A'_g e') = R_w b x (e - h_0 + x/2) \quad (\text{K.0.8-3})$$

当轴向力 N 作用于钢筋 A_g 与 A'_g 的重心之间时,式(K.0.8-3)中的左边第二项取正号;当 N 作用于 A_g 与 A'_g 两重心以外时,则取负号。

如计算中考虑受压钢筋时,则混凝土受压区的高度应符合式(K.0.1-6)的要求,如不符合,则按式(K.0.8-4)计算。

$$KNe' \leq R_g A_g (h_0 - a') \quad (\text{K.0.8-4})$$

式中: N ——轴向力(MN);

e, e' ——钢筋 A_g 与 A'_g 的重心至轴向力作用点的距离(m);

其它符号意义同前。

当按式(K.0.8-4)求得的构件截面强度比不考虑受压钢筋更小时,则计算不应考虑受压钢筋。

K.0.9 钢筋混凝土矩形截面的小偏心受压构件($x > 0.55h_0$),其截面强度均应按式计算(图 K.0.9):

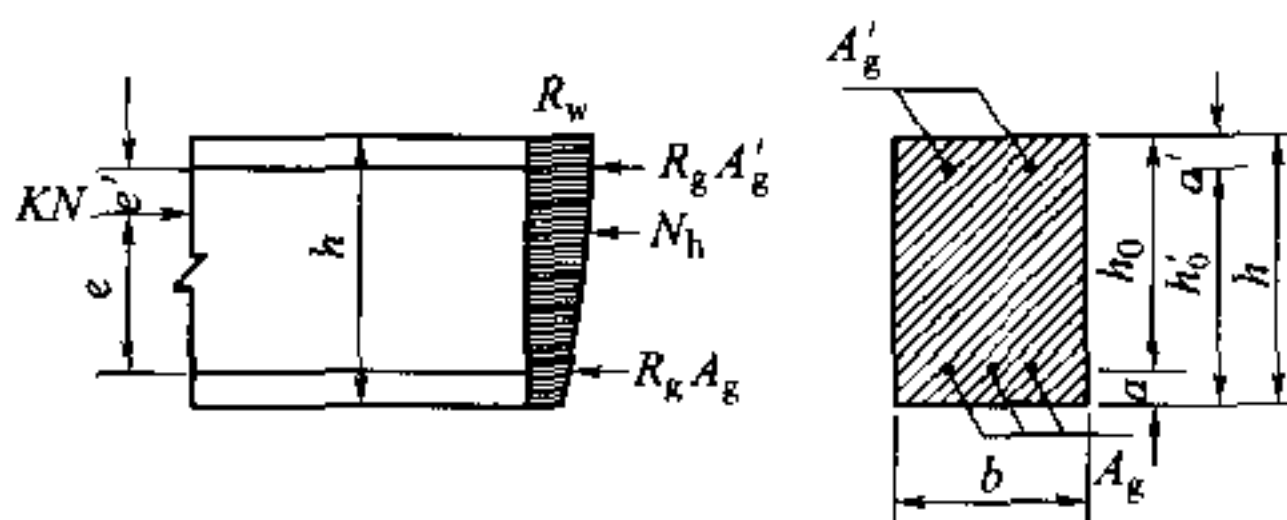


图 K.0.9 钢筋混凝土小偏心受压构件截面强度计算

$$KNe \leq 0.5 R_a b h_0^2 + R_g A'_g (h_0 - a') \quad (\text{K.0.9-1})$$

当轴向力 N 作用于钢筋 A_g 的重心与钢筋 A'_g 的重心之间时,尚应符合下列要求:

$$KNe' \leq 0.5 R_a b h_0^2 + R_g A_g (h_0 - a) \quad (\text{K.0.9-2})$$

式中符号意义同前。

K.0.10 计算钢筋混凝土矩形截面的偏心受压构件时,应考虑构件在弯矩作用平面内的挠度使轴向力偏心距增大的影响。此时,应将轴向力的偏心距 e_0 乘以偏心距增大系数 η 。 η 值按下式计算:

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{KN}{10\alpha E_c I_0} H^2} \quad (\text{K.0.10-1})$$

式中: K ——安全系数,按表 9.2.4-2 采用;

E_c ——混凝土的受压弹性模量,按第 5.2.4 条规定;

I_0 ——混凝土全截面(包括钢筋)的换算截面惯性矩(m^4);

H ——构件的高度(m);

α ——与偏心距有关的系数,按下式计算:

$$\alpha = \frac{0.12}{0.3 + \frac{e_0}{h}} + 0.17 \quad (\text{K.0.10-2})$$

当 $e_0/h \geq 1$ 时,取 $\alpha = 0.26$ 。

对于隧道衬砌、明洞拱圈和墙背紧密回填的明洞边墙,以及当构件高度与弯矩作用平面内的截面边长之比 $H/h \leq 8$ 时,可取 $\eta = 1$ 。

偏心受压构件,除应计算弯矩作用平面的强度以外,尚应按轴向受压构件验算弯矩作用平面的强度。此时,不考虑弯矩的作用,但应按表 K.0.10 考虑纵向弯曲系数。

表 K.0.10 钢筋混凝土构件的纵向弯曲系数

H/b	≤ 8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
纵向弯曲系数 φ	1.00	0.98	0.95	0.92	0.87	0.81	0.75	0.70	0.65	0.60	0.56	0.52

注:① H 为构件计算长度,两端刚性固定时, $H = 0.5l$; 一端刚性固定、另一端为不移动的铰时, $H = 0.7l$; 两端均为不移动的铰时, $H = l$; 一端刚性固定、另一端为自由端时, $H = 2l$ 。

② l 为构件的全长, b 为矩形截面构件短边尺寸。

K.0.11 钢筋混凝土受拉、受弯和偏心受压构件,其最大裂缝宽度 $w_{\max}$ 可按式 (K.0.11) 计算,当 $e_0 \leq 0.55h_0$ 时,可不进行裂缝宽度的检算。

$$w_{\max} = \alpha \phi \gamma (2.7 C_s + 0.1 d / \rho_{te}) \sigma_s / E_s \quad (\text{K.0.11})$$

式中: α ——构件受力特征系数,对轴心受拉构件取 $\alpha = 2.7$,对受弯和偏心受压构件取 $\alpha = 2.1$,对偏心受拉构件取 $\alpha = 2.4$;

ϕ ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数, $\phi = 1.1 - 0.65 f_{ctk} / (\rho_{te} \sigma_s)$, 其中, ρ_{te} 为按有效受拉混凝土面积计算的纵向受拉钢筋配筋率, $\rho_{te} = A_s / A_{ce}$, 当 $\rho_{te} <$

0.01时,取 $\rho_{te} = 0.01$;

A_s ——受拉区纵筋面积;

A_{ce} ——有效受拉混凝土截面面积(图 K.0.11),对受拉构件, A_{ce} 取构件截面面积,对受弯、偏心受压和偏心受拉构件,取 $A_{ce} = 0.5bh + (b_f - b)h_1$,对矩形截面,取 $A_{ce} = 0.5bh$ (b 、 h 分别为混凝土截面的宽度及高度),当 $\phi < 0.4$ 时,取 $\phi = 0.4$,当 $\phi > 1.0$ 时,取 $\phi = 1.0$,对直接承受重复荷载的构件,取 $\phi = 1.0$;

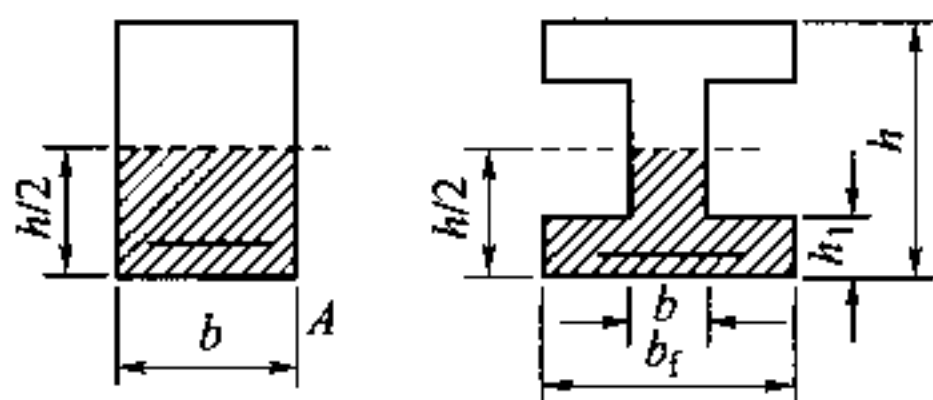


图 K.0.11 有效受拉混凝土截面面积

γ ——纵向受拉钢筋表面特征系数,螺纹钢筋取 0.7,光面钢筋取 1.0;

C_s ——最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离(mm),当 $C_s < 20$ 时,取 $C_s = 20$;

d ——钢筋直径(mm),当采用不同直径的钢筋时, $d = 4A_s/u$,此处 u 为纵向受拉钢筋截面周长的总和;

σ_s ——纵向受拉钢筋的应力(MPa),按第 K.0.12 条计算;

E_s ——钢筋的弹性模量(MPa),按第 5.2.6 条采用。

K.0.12 检算裂缝宽度时,构件纵向受拉钢筋应力可按下列公式计算:

$$1 \text{ 受弯构件} \quad \sigma_s = M_s / (0.87h_0A_s) \quad (\text{K.0.12-1})$$

$$2 \text{ 偏心受压构件} \quad \sigma_s = N_s(e - z) / (A_s z) \quad (\text{K.0.12-2})$$

$$3 \text{ 轴心受拉构件} \quad \sigma_s = N_s / A_s \quad (\text{K.0.12-3})$$

$$4 \text{ 偏心受拉构件} \quad \sigma_s = N_s e' / [A_s(h_0 - a_s')] \quad (\text{K.0.12-4})$$

式中: M_s 、 N_s ——按荷载组合计算出的弯矩值(MN·m)和轴力值(MN);

A_s ——受拉区纵向钢筋截面面积(m^2);

e ——轴向压力作用点至纵向受拉钢筋合力点之间的距离(m),计算式为 $e = \eta e_i + y_{sp}$,其中 e_i 为初始偏心距(m), η 为考虑挠曲影响的偏心距增大系数,按表 K.0.10 的规定取值, y_{sp} 为自截面重心至 A_s 合力点的距离;

z ——纵向受拉钢筋合力点至受压区合力之间的距离(m), $z = [0.87 - 0.12(h_0/e)^2]h_0$,且 $z < 0.87h_0$;

a_s' ——纵向非预应力钢筋受压钢筋合力点至截面近边的距离(m);

e' ——轴向力作用点至纵向受压钢筋合力点的距离(m);

h_0 ——截面有效高度(m)。

附录 L 本规范用词说明

对执行本规范条文严格程度的用词采取以下写法：

1 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”或“可”，反面词采用“不宜”。

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词：

正面词采用“可”或“允许”，反面词采用“不可”或“不允许”。

