

公路黄土隧道设计与施工技术规范

Technical Specifications for Design and Construction of
Highway Tunnels in Loess

2024-07-09 发布

2024-10-01 实施

中华人民共和国交通运输部发布

前 言

根据《交通运输部关于下达2019年度公路工程行业标准制修订项目计划的通知》（交公路函〔2019〕427号）的要求，由长安大学承担《公路黄土隧道设计与施工技术规范》（以下简称“本规范”）的制定工作。

本规范编制组在广泛调研公路黄土隧道工程实践的基础上，总结了我国近年来黄土隧道勘察、设计和施工的经验与科研成果，充分吸收借鉴了国内外黄土隧道的勘察、设计和施工技术相关经验，在此基础上以多种方式广泛征求了全国相关单位和专家的意见，对主要问题进行了反复修改，最终完成了本规范的编制工作。

本规范包括11章和4个附录，内容包括：1总则、2术语和符号、3基本规定、4工程地质勘察、5洞口及洞门、6支护和衬砌、7辅助工程措施、8地基处理、9防排水、10施工、11监控量测，附录A新近堆积黄土的判别、附录B黄土地貌类型、附录C黄土湿陷性评价、附录D公路黄土隧道围岩物理力学参数表。

本规范由陈建勋、罗彦斌、陈丽俊、王传武、李尧负责起草第1、2、6、7、11章和附录A、B、C、D，由韦虎、张国庆负责起草第3章，由宁振民、陈建勋负责起草第4章，由王永刚、唐学军负责起草第5章，由姜杰、宿钟鸣负责起草第8章，由曹校勇、赵红负责起草第9章，由田过勤、罗彦斌、杨建红负责起草第10章。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本规范日常管理组，联系人：陈建勋（地址：陕西省西安市碑林区南二环路中段长安大学330信箱，邮编：710064；电话：029-82334822；电子邮箱：chenjx1969@163.com），以便修订时参考。

主 编 单 位：长安大学

参 编 单 位：中交第一公路勘察设计院有限公司

陕西省交通规划设计研究院有限公司

山西交通科学研究院集团有限公司

山西省交通规划勘察设计院有限公司

甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司

甘肃路桥建设集团有限公司

山西路桥建设集团有限公司

新疆交通规划勘察设计院有限公司

主 编：陈建勋

主要参编人员：罗彦斌 陈丽俊 王传武 李 尧 曹校勇 宁振民

韦 虎 姜 杰 杨建红 唐学军 王永刚 宿钟鸣

赵 红 张国庆 田过勤

主 审:郭小红

参与审查人员:王华牢 程崇国 李 响 任少强 余 波 张金夫
邵生俊 喻 渝 李德武 谭忠盛 李志厚 唐 颖
朱光仪 朱永全 程 勇 王法岭 袁永新 胡建刚
杨彦民 李宁军 王 联 王明年 王晓谋 王永东
于 光

参 加 人 员:翟正平 骆维斌 赵鹏宇 刘伟伟 刘建龙 徐龙飞
田超鹏 陈 浩 胡昌涛 张亚军

目次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	4
3	基本规定	6
4	工程地质勘察	10
4.1	一般规定	10
4.2	黄土分类	10
4.3	隧道调查	12
4.4	工程地质调绘	12
4.5	勘探与测试	13
4.6	工程地质评价	15
4.7	围岩分级	16
5	洞口及洞门	20
5.1	一般规定	20
5.2	洞口工程	20
5.3	洞门工程	22
6	支护和衬砌	23
6.1	一般规定	23
6.2	荷载	23
6.3	明洞衬砌	28
6.4	复合式衬砌	29
7	辅助工程措施	34
7.1	一般规定	34
7.2	围岩稳定措施	34
7.3	富水段处理措施	35
8	地基处理	38
8.1	一般规定	38
8.2	洞口地基	39
8.3	洞身地基	40
8.4	处理方法	41

9 防排水46

9.1 一般规定46

9.2 地表防排水47

9.3 洞口防排水47

9.4 洞内防排水48

10 施工50

10.1 一般规定50

10.2 洞口51

10.3 明洞52

10.4 洞身开挖52

10.5 超前支护及预加固54

10.6 初期支护54

10.7 二次衬砌55

10.8 防排水56

11 监控量测58

11.1 一般规定58

11.2 量测项目选择59

11.3 量测断面测点布置61

11.4 量测频率62

11.5 变形控制基准63

附录 A 新近堆积黄土的判别65

附录 B 黄土地貌类型66

附录 C 黄土湿陷性评价67

附录 D 公路黄土隧道围岩物理力学参数表70

本规范用词用语说明71

1 总则

1.0.1 为指导和规范公路黄土隧道勘察、设计和施工，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于新建和改扩建公路黄土隧道勘察、设计和施工。

1.0.3 公路黄土隧道建设应结合黄土的特点，因地制宜，遵循安全耐久、经济合理、技术先进、低碳节能的原则。

1.0.4 公路黄土隧道勘察、设计和施工应贯彻国家有关技术经济政策，积极稳妥地采用新技术、新材料、新设备和新工艺。

1.0.5 公路黄土隧道勘察、设计和施工应加强环境保护。

1.0.6 公路黄土隧道勘察、设计和施工除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定。

条文说明

本规范仅结合黄土特点，规定了公路黄土隧道建设的关键技术要点，故除执行本规范外，隧道勘察、设计和施工还需符合国家和公路行业现行的有关标准及技术要求。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 公路黄土隧道 highway tunnels in loess
修筑在黄土地层中的公路隧道。

2.1.2 黄土 loess

第四纪以来在干旱、半干旱气候条件下沉积的，以黄色粉土颗粒为主，质地均一，含碳酸钙及少量易溶盐，具有大孔隙，垂直节理发育的特殊土。

条文说明

第四纪以来在干旱、半干旱气候条件下沉积形成，具有以下特征的土为黄土：

- (1) 颜色为淡黄、灰黄、黄褐、棕褐或棕红色。
- (2) 颗粒组成以粉粒（0.005~0.075mm）为主，一般不含粗颗粒，富含碳酸钙，常形成钙质结核。
- (3) 具多孔性，一般肉眼可见大孔隙、虫孔等。孔隙比一般为0.7~1.2。
- (4) 土质均匀、无层理，有堆积间断的剥蚀面和埋藏的古土壤层。
- (5) 具垂直节理，边坡在天然状态下能保持直立。
- (6) 表层多具湿陷性，易产生潜蚀形成陷穴或落水洞。

具有上述大部分特征，含层理、颗粒组成比较复杂（含砾石、砂等）的土，为黄土状土。

2.1.3 新近堆积黄土 recently deposited loess

沉积年代短，具高压缩性，承载力低，均匀性差，在50~150kPa压力下变形较大的全新世（ Q_4 ）黄土。

2.1.4 新黄土（ Q_3 、 Q_4 ） new loess

晚更新世以来沉积的黄土和黄土状土。

2.1.5 老黄土 (Q_1 、 Q_2) old loess

早更新世、中更新世期间沉积的黄土。

2.1.6 湿陷性黄土 collapsible loess

在一定压力下受水浸湿，土的结构迅速破坏，并产生显著附加下沉的黄土。

2.1.7 非湿陷性黄土 noncollapsible loess

在一定压力下受水浸湿，无显著附加下沉的黄土。

2.1.8 自重湿陷性黄土 loess collapsible under overburden pressure

在上覆土的饱和自重压力作用下受水浸湿，产生显著附加下沉的湿陷性黄土。

2.1.9 非自重湿陷性黄土 loess noncollapsible under overburden pressure

在上覆土的饱和自重压力作用下受水浸湿，不产生显著附加下沉的湿陷性黄土。

2.1.10 湿陷变形 collapsible deformation

湿陷性黄土或具有湿陷性的其他土（如欠压实的素填土、杂填土等）在一定压力作用下，下沉稳定后，受水浸湿所产生的附加下沉。

2.1.11 湿陷系数 coefficient of collapsibility

单位厚度的环刀试样，在一定压力下，下沉稳定后，浸水饱和所产生的附加下沉。

2.1.12 自重湿陷系数 coefficient of collapsibility under overburden pressure

单位厚度的环刀试样，在上覆土的饱和自重压力作用下，下沉稳定后，浸水饱和产生的附加下沉。

2.1.13 黄土隧道地基 loess tunnel foundation

黄土隧道仰拱（基底）下，承受隧道结构作用力的地层。

2.1.14 黄土隧道地基湿陷量的计算值 calculated collapse of loess tunnel foundation

对隧道地基不同埋深黄土采样，通过室内压缩试验测取其实际压力下的湿陷系数，分层计算湿陷量的累计值。

2.1.15 黄土隧道地基湿陷等级 collapsibility grade of loess tunnel foundation

依据黄土的自重湿陷量和湿陷量划分的湿陷性黄土隧道地基（场地）的级别。

2.1.16 钢架喷网锁脚锚杆（管）组合结构 steel rib, shotcrete, steel mesh, and feet-lock bolt (pipe) combined structure

钢架、喷射混凝土、钢筋网与锁脚锚杆（管）联合使用的隧道初期支护结构。

2.1.17 锁脚锚杆（管） feet-lock bolt (pipe)

为减小隧道拱（墙）脚位移，在隧道拱（墙）脚位置斜向下打设，并与钢架连接的锚杆或锚管。

2.1.18 初期支护大拱脚 large arch foot in initial support

为防止隧道开挖后拱部沉降过大，对初期支护拱脚扩大，以加大受压面积的辅助施工措施。

2.1.19 非接触量测 non-contact measurement

在不接触被测目标点的情况下，获取被测点的空间位移信息的量测方法。

2.1.20 变形控制基准 deformation control benchmark

对隧道施工过程中位移等监控量测项目设定的变形限值。

2.2 符号

B ——隧道开挖宽度；

c ——黏聚力；

E_s ——压缩模量；

H ——隧道理深；

H_t ——隧道开挖高度；

h ——隧道底部到地面的距离；

h_i ——隧道基底下第 i 层土的厚度；

h_p ——天然湿度和结构土样在加压至一定压力时下沉稳定后的高度；

h'_p ——天然湿度和结构土样在浸水（饱和）作用下附加下沉稳定后的高度；

h_z ——天然湿度和结构土样在加压至该土样上覆土的饱和自重压力时下沉稳定后的高度；

h'_z ——加压稳定后的土样在浸水（饱和）作用下附加下沉稳定后的高度；

h_0 ——天然湿度和结构土样原始高度；

I_L ——液性指数；

I_p ——塑性指数；

k ——渗透系数；

P_{sh} ——湿陷起始压力；

q_u ——无侧限抗压强度；
 S_r ——饱和度；
 v_s ——围岩剪切波波速；
 α ——压缩系数；
 γ ——围岩重度；
 Δ_s ——湿陷量计算值；
 Δ_{zs} ——自重湿陷量实测值；
 Δ'_{zs} ——自重湿陷量计算值；
 δ_s ——湿陷系数；
 δ_{si} ——隧道基底下第*i*层土的湿陷系数；
 δ_{zs} ——自重湿陷系数；
 δ_{zsi} ——隧道基底下第*i*层土的自重湿陷系数；
 ρ ——密度；
 ρ_d ——干密度；
 φ ——内摩擦角；
 w ——天然含水率；
 w_L ——液限；
 w_P ——塑限。

3 基本规定

3.0.1 公路黄土隧道工程地质勘察应按设计阶段的要求，采用综合勘察和综合分析方法，查明工程建设场地的自然地理和地质条件，提供资料完整、评价正确的工程地质勘察报告。

3.0.2 公路黄土隧道应选择在稳定的黄土地层中，避免穿越滑坡、崩塌、错落、陷穴、泥流等严重不良地质地段。必须通过时，应采取切实可行的工程技术措施。

3.0.3 公路黄土隧道洞身位置选择应遵循宁深勿浅、宁内勿外的原则，选择在埋深较大、顶面平整的塬、梁等地形凸起的地带，不宜选择在有封闭洼地的浅埋地段和靠近深切冲沟地段。

条文说明

对中心挖深大于30m的路堑，需进行路、隧方案比选。

3.0.4 公路黄土隧道洞身宜避免长距离穿越黄土与下伏基岩地层分界面（或不整合面），或其他含水层分界处。

条文说明

工程实践表明，在黄土与古近系（E）、新近系（N）等下伏基岩地层的分界面（或不整合面）往往易集聚大量地下水，黄土含水率极高，甚至处于饱和状态。隧道洞身长段落穿越该地层时，围岩稳定性差，修建难度极大，运营期隧道病害频发。因此，公路黄土隧道洞身要求避免长距离穿越黄土与黏土、砂砾、卵石土等基岩的地层分界面（或不整合面）。

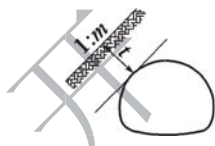
3.0.5 公路黄土隧道洞身通过湿陷性黄土地层时，应对场地和地基进行湿陷性评价，选择在湿陷性较小、湿陷性地层较薄及长度较短的段落通过。

3.0.6 公路黄土隧道轴线应避免与长大干渠、输水管道等近距离并行布设，宜远离

水库、池塘等地表水丰富的地段。

3.0.7 傍山公路黄土隧道的位置宜向山体内侧布置，并应避免受河流冲刷的影响。公路黄土隧道外侧拱肩山体覆盖层厚度不宜小于表3.0.7的数值。

表3.0.7 公路黄土隧道外侧拱肩山体覆盖层最小厚度 t (m)

围岩级别	地面坡率						图示
	1 : 0.5	1 : 0.75	1 : 1	1 : 1.5	1 : 2.0	1 : 2.5	
IV	21	18	15	12	9	9	
V	33	30	27	24	21	18	

- 注：1. t 为不需要采取特殊加固措施的隧道外侧拱肩至地面的地层最小厚度。
2. $1 : m$ 为地面横坡坡率。
3. 表中所列数值应扣除表面风化破碎层和坡积层厚度。
4. 表中所列数值适用于双车道公路黄土隧道。
5. VI级围岩的 t 值应通过分析计算后确定。

3.0.8 分离式公路黄土隧道左右洞的净距应结合隧道洞口接线、地形、地质条件以及开挖宽度等因素综合确定，宜取2.0~3.0倍开挖宽度。

条文说明

研究表明，公路黄土隧道左右洞净距大于2.0倍开挖宽度时，左右洞的塑性区没有贯通，后行洞开挖对先行洞影响较小。调研表明，山西、陕西地区以黏质黄土为主，一般以1.5~2.5倍开挖宽度作为左右洞的控制间距；甘肃地区粉质黄土分布较广且湿陷性较大，一般以2.5~3.0倍开挖宽度作为左右洞的控制间距。

3.0.9 黄土隧道在洞口地形狭窄、桥隧相连、受既有建（构）筑物限制时，洞口局部地段可采用小净距隧道，左右洞净距不宜小于1.0倍隧道开挖宽度。

3.0.10 黄土隧道不宜采用连拱隧道结构形式。

条文说明

公路黄土连拱隧道开挖宽度大、施工工序多，对围岩扰动大，结构受力复杂，施工风险大、造价高、工期长，且隧道衬砌易产生裂缝。

3.0.11 公路黄土隧道纵坡不宜小于0.5%。

条文说明

调研结果表明,公路黄土隧道在运营期间,排水系统易产生钙质结晶,造成排水管堵塞,引发隧道渗漏水。提高隧道纵坡有利于及时排水,减少钙质结晶的形成。

3.0.12 公路黄土隧道衬砌内轮廓应采用曲边墙拱形断面。

3.0.13 长隧道、特长隧道内未设硬路肩或硬路肩宽度小于2.5m时,单洞两车道公路黄土隧道应设紧急停车带,单洞三车道公路黄土隧道可不设紧急停车带,但应加强交通工程与救援设施的设置。

条文说明

《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)第8.0.3条第4款中对紧急停车带设置规定如下:“山岭特长、长隧道内不设硬路肩或硬路肩宽度小于2.5m时,单洞两车道隧道应设置紧急停车带,单洞三车道隧道宜设置紧急停车带。”对应条文说明如下:“但当地质条件差、加宽后施工风险大、造价增加很高时,经论证后单洞三车道隧道可不设置紧急停车带,但应完善交通工程与救援设施。”

黄土属特殊性岩土,围岩分级以V级为主,地质条件差,施工工序繁杂,经常交叉作业,且反复扰动围岩,围岩应力释放时间长,变形难以控制,设计、施工风险大。此外,单洞三车道公路黄土隧道设置紧急停车带造价较高。根据陕西黄延高速公路扩能工程双洞六车道隧道紧急停车带设计文件,隧道采用三层衬砌,初期支护采用HW200×200钢架,钢架间距0.5m,拱部采用 $L=8\text{m}$ 自进式锚杆,超前支护采用 $\phi 50\times 4\text{mm}$ 双层超前小导管预支护,每延米建安费近20万,一个紧急停车带估算造价约1000万元,与正洞相比工程费用增加约35%,故经专家论证后该项目最终取消了紧急停车带。

调研结果表明,已建成的82km/60座三车道高速公路黄土隧道,包括沧榆高速公路神木至府谷段8座隧道、京昆高速公路平阳段8座隧道、王城高速公路2座隧道、兰秦快速路忠和至水阜段4座隧道、国家高速公路北京至拉萨线西宁南绕城公路工程8座隧道、黄延高速公路扩能工程20座隧道、G30西宝改扩建工程8座隧道、郑州至云台山高速公路2座隧道,由于施工难度过大,大多未设置紧急停车带。

3.0.14 公路黄土隧道穿越或临近地表既有建(构)筑物时,应分析隧道修建对其的影响,并应有对应的处置措施。

条文说明

公路黄土隧道施工时,土体扰动区域大,会产生地表沉降槽和施工地表裂缝,甚至产生坍塌,且坍塌前无明显先兆,从而影响地表建(构)筑物安全。

3.0.15 公路黄土隧道应贯彻动态设计和信息化施工的思想，制定地质观察、黄土颗粒分析、含水率实时测试和监控量测总体方案，及时动态调整支护参数和施工方法。

3.0.16 公路黄土隧道宜采用机械化配套施工，应遵循管超前、短进尺、强支护、早成环、严防水、勤量测的施工原则，并采取锁拱脚、稳定掌子面等措施控制围岩变形。

交通运输部信息公开
浏览专用

4 工程地质勘察

4.1 一般规定

4.1.1 公路黄土隧道工程地质勘察应根据勘察设计阶段的任务和目的，针对黄土隧道的特点，进行隧道调查、工程地质调绘、勘探与测试及室内试验等工作，查明隧道工程地质及水文地质条件。勘察成果应齐全、准确，满足设计和施工要求。

4.1.2 公路黄土隧道勘察应查明隧址区的地层结构，确定隧道围岩的工程地质特征和岩土体的物理力学指标。

4.1.3 公路黄土隧道勘察应进行地下水调查、测试及动态分析，并评价地下水对隧道工程的影响。

4.1.4 公路黄土隧道应进行围岩分级、洞室和边仰坡稳定性评价、黄土湿陷性评价，以及滑坡、崩塌、泥石流等不良地质对隧道稳定性的影响评价，并提出工程措施建议。

4.1.5 公路黄土隧道工程地质勘察应符合现行《公路工程地质勘察规范》(JTG C20)的有关规定。

4.2 黄土分类

4.2.1 黄土地质年代分类应符合表4.2.1的规定。新近堆积黄土的判别应符合本规范附录A的有关规定。

表4.2.1 黄土地质年代分类

地质年代		地层名称		湿陷性特征
年龄 MaBp	地层时代			
<0.01	全新世 Q ₄	近期 Q ₄ ²	新近堆积黄土状土	具有湿陷性，常具有高压缩性
		早期 Q ₄ ¹	黄土状土	一般具有湿陷性
0.01 ~ 0.128	晚更新世 Q ₃	马兰黄土	新黄土	

续表 4. 2. 1

地质年代		地层名称		湿陷性特征
年龄 MaBp	地层时代			
0.128 ~ 0.78	中更新世 Q ₂	离石黄土	老黄土	上部部分土层具有湿陷性
0.78 ~ 2.58	早更新世 Q ₁	午城黄土		不具有湿陷性

4. 2. 2 黄土液性指数分类应符合表 4. 2. 2 的规定。

表 4. 2. 2 黄土液性指数分类

黄土状态	坚硬	硬塑	可塑	软塑	流塑
液性指数 I_L	$I_L \leq 0$	$0 < I_L \leq 0.25$	$0.25 < I_L \leq 0.75$	$0.75 < I_L \leq 1$	$I_L > 1$

4. 2. 3 黄土含水率分类应符合表 4. 2. 3 的规定。

表 4. 2. 3 黄土含水率分类

含水状态	低含水率	一般含水率	高含水率	极高含水率
含水率 w (%)	$w < 10$	$10 \leq w < 17$	$17 \leq w < 25$	$w \geq 25$

条文说明

大量研究表明，在地下水的作用下黄土地基易发生湿陷变形或增湿变形，黄土的含水率增加 3%，就能明显地改变其力学特性。黄土抗剪强度与含水率关系的研究表明，当黄土含水率在 10%~17% 之间时，随着含水率的增加，黏聚力和内摩擦角下降幅度较小；当黄土含水率在 17%~25% 之间时，随着含水率的增加，黏聚力和内摩擦角均显著下降；当黄土含水率不小于 25% 时，掌子面难以自稳，需进行预加固；依据黄土抗剪强度与含水率关系，将黄土含水率划分为低含水率、一般含水率、高含水率和极高含水率。

黄土隧道围岩自稳能力和地基承载力与黄土含水率紧密相关，隧道施工过程中如黄土含水率发生显著变化，需重新测定含水率，并据此及时修正围岩分级、设计参数和施工方法。

4. 2. 4 黄土塑性指数分类应符合表 4. 2. 4 的规定。

表 4. 2. 4 黄土塑性指数分类

分类名称	砂质黄土	粉质黄土	黏质黄土
塑性指数 I_p	$I_p < 6$	$6 \leq I_p < 17$	$I_p \geq 17$

条文说明

基于 19364 组试验资料，包括甘肃 1166 组，宁夏 1318 组，青海 4949 组，陕西 7897 组，山西 2517 组，河南 607 组，山东 657 组，内蒙古 36 组，辽宁 179 组，黑龙江 38 组，绘制了液限、塑限、黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、黏聚力、内摩擦角等与塑性指数

间的散点图。通过统计黄土中的黏粒、粉粒和砂粒等粒组含量与塑性指数间曲线在转折点处的塑性指数值，同时参考黏聚力和内摩擦角的变化，确定砂质黄土与粉质黄土的塑性指数界限值为6，粉质黄土与黏质黄土的塑性指数界限值为17。

4.2.5 黄土湿陷性分类应符合表4.2.5的规定。

表 4.2.5 黄土湿陷性分类

名称	非湿陷性黄土	湿陷性黄土
湿陷系数 δ_s	$\delta_s < 0.015$	$\delta_s \geq 0.015$

4.3 隧道调查

4.3.1 公路黄土隧道调查应重点调查隧址区自然地理和地质条件，选择合适的洞身、洞口位置，落实各类工程措施的设置条件。

4.3.2 公路黄土隧道调查应包括下列内容：

- 1 气候资料收集，包括气温、降雨量、积雪量、最大冻结深度等。
- 2 地形、地貌、植被分布、沟谷形态、水文条件。
- 3 洞口、洞身附近的村镇分布、人口密集程度以及有影响的建（构）筑物、自然或人工坑洞、水库、池塘、长大干渠、输水管道、地表农作物、文物古迹、自然保护区、水源地、矿山、市政管网及规划等。
- 4 影响洞口边仰坡或洞身稳定的地形和不良地质条件，调查是否存在浅埋、偏压、滑坡、错落、陷穴等不良地质现象。
- 5 施工便道设置条件、施工场地布置、进洞以及辅助坑道设置的工程地质条件。
- 6 弃渣场内不良地质、沟谷水文条件、周边建（构）筑物、环境敏感点、弃渣便道、运距等。

4.4 工程地质调绘

4.4.1 公路黄土隧道工程地质调绘前应搜集区域地质、工程地质、水文地质资料，地区性黄土相关研究资料，遥感图像及解译资料，气象、地震、环境地质和地质灾害资料，以及既有隧道工程勘察设计及施工等相关资料。

4.4.2 公路黄土隧道遥感图像解译应包括下列内容：

- 1 黄土的分布范围、地形地貌类型及特征，区分黄土的堆积、侵蚀、潜蚀及重力地貌等。黄土地貌类型的判别应符合本规范附录B的有关规定。
- 2 黄土滑坡、错落、崩塌、泥石流、地裂缝、陷穴等不良地质的分布及范围。

3 地表水体的分布范围及形态，地下水露头及湿地范围。

4.4.3 公路黄土隧道地质调绘应包括下列内容：

- 1 黄土地貌的类型及特征。
- 2 黄土地层的分布、地质年代及成因类型；黄土层序、厚度，土层颜色、结构、物质成分、包含物、密实度及潮湿程度等；与下伏岩层的接触面形态及接触面附近的赋水情况，下伏基岩的地层及风化情况。
- 3 井、泉分布，地下水位埋深、季节变化幅度、升降趋势及其与地表水体、灌溉情况和开采地下水强度的关系，并取代表性水样进行侵蚀性分析；当隧道范围内有水库及其他地表水体时，应查明其分布范围及形态，评价其对隧道的影响，提出合理的工程措施建议。
- 4 不良地质的分布范围、性质、规模、成因及发展趋势，评价其对隧道的影响，并对隧道及辅助坑道洞口斜坡的稳定性进行评价。
- 5 湿陷性黄土场地的分布范围、厚度、湿陷类型及等级，评价其对隧道地基的影响。
- 6 隧道影响范围内的黄土陷穴、人为坑洞的分布及特征。
- 7 大气降水的汇集、径流对黄土地貌的剥蚀作用及其对山坡稳定的影响；沟床变迁和地表水对谷坡的侵蚀情况。
- 8 既有建（构）筑物的现状、变形情况及原因，既有不良地质治理工程的方法及效果。

4.4.4 各阶段工程地质调绘比例尺宜符合表4.4.4的规定。

表 4.4.4 各阶段工程地质调绘比例尺

阶段划分	预可	工可	初勘	详勘
比例尺	1 : 50 000 ~ 1 : 100 000	1 : 10 000 ~ 1 : 50 000	1 : 2 000 ~ 1 : 10 000	1 : 500 ~ 1 : 2 000

4.4.5 调绘点密度、调绘宽度、成图精度应符合现行《公路工程地质勘察规范》(JTG C20)的有关规定。

4.5 勘探与测试

4.5.1 公路黄土隧道的勘探方法宜以钻探、挖探为主，原位测试和物探相结合的综合勘探方法，并应符合下列规定：

- 1 勘探点应结合不同地貌单元布置，重点查明地层结构、厚度及岩土特性，黄土与下伏基岩接触界面的形态等。
- 2 勘探点间距应结合隧址工程地质条件复杂程度确定，短隧道不宜少于2个钻孔，

中隧道不宜少于3个钻孔，长隧道及特长隧道的勘探点平均间距不宜大于500m；浅埋、岩土分界面、含水层（或饱和软黄土）以及不良地质等地段，勘探点间距应加密；隧道洞口及明洞工程应布置勘探点，必要时可增加横断面勘探。

3 勘探孔应布置在隧道结构外侧5~15m，孔深应符合下列规定：

1) 洞口或浅埋段非自重湿陷性黄土场地的勘探深度应钻至隧道设计高程以下不小于10m。

2) 洞口或浅埋段自重湿陷性黄土场地，陇西、陇东、陕北、晋西地区勘探深度应钻至隧道设计高程以下不小于15m，其他地区不应小于10m。

3) 洞身地段勘探深度应钻至隧道设计高程以下10m。

4) 用于评价黄土湿陷性的勘探孔深度应大于隧道地基压缩层深度，并应有适量勘探孔穿透湿陷性土层，且满足评价要求。

4 钻探、取样、原位测试应符合现行《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB 50025）的有关规定。

5 勘探钻孔宜结合孔深进行剪切波测试，必要时可进行电阻率测井，测井范围应从隧道拱顶以上3倍隧道开挖宽度处至勘探钻孔孔底。

6 勘探点使用完毕后，应及时分层回填夯实，恢复原地貌形态。

4.5.2 工程物探应采用纵向和横向布线，纵向勘探线可沿隧道轴线或外轮廓线布置，数量1~3条。隧道洞口应布置横向测线，洞身宜根据工程需要布置横向测线。工程物探应根据隧道地形、埋深、物性条件等选定物探方法和技术参数，物探解译深度不宜小于隧道设计高程以下2倍隧道开挖宽度。

4.5.3 公路黄土隧道勘探孔应根据工程需要和评价要求取原状土样进行物理力学指标试验，并应符合下列规定：

1 隧道洞身及基底以下黄土层除进行常规压缩和剪切试验外，还应进行黄土湿陷性试验。黄土试样的抗剪强度宜采用饱和状态下的固结不排水剪切试验。

2 对地下水位线较浅的隧道应根据设计需要进行渗透和固结等试验。

3 黄土物理力学指标室内试验项目可按表4.5.3选用，试验方法应符合现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）的有关规定。

4 黄土物理力学指标的分析和选定应符合现行《公路工程地质勘察规范》（JTG C20）及《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB 50025）的有关规定。

表 4.5.3 黄土物理力学指标室内试验项目

测试项目	隧道洞口	隧道洞身
颗粒分析	+	(+)
天然含水率 w (%)	+	+
密度 ρ (g/cm ³)	+	+
液限 w_L (%)	+	+

续表 4.5.3

测试项目	隧道洞口	隧道洞身
塑限 w_p (%)	+	+
黏聚力 c (kPa)	+	+
内摩擦角 φ (°)		
无侧限抗压强度 q_u (kPa)	(+)	(+)
压缩系数 α (MPa ⁻¹)	+	+
压缩模量 E_s (MPa)	+	+
湿陷系数 δ_s	+	+
自重湿陷系数 δ_{zs}	+	+
湿陷起始压力 P_{sh} (kPa)	+	(+)
渗透系数 k (cm/s)	(+)	(+)
碳酸钙含量 (%)	(+)	(+)

注：“+”为必做项目；“（+）”为选做项目。

4.5.4 公路黄土隧道地基承载力确定应符合下列规定：

- 1 宜根据静力触探、旁压试验、载荷试验等原位测试方法实测取得。
- 2 不具备原位测试条件时，可根据物理力学特性指标及工程经验确定。

4.6 工程地质评价

4.6.1 公路黄土隧道工程场地的评价，应在综合分析黄土的物理力学性质、湿陷性特征、水文地质条件、环境地质条件的基础上，针对工程特点进行。

4.6.2 公路黄土隧道应对黄土湿陷性进行评价，并应符合本规范附录C的有关规定。

4.6.3 公路黄土隧道应评价自然山坡形态、黄土地层结构特征及其水文地质条件，以及黄土陷穴、落水洞、滑坡、错落等不良地质对洞口山体稳定性的影响。

4.6.4 公路黄土隧道应评价新老黄土界面、土石界面的地下水赋存状态及含水层或饱和黄土软弱带对工程的影响，预测施工中可能发生的地质灾害，提出对应的工程措施建议。

4.6.5 公路黄土隧道应划分隧道围岩级别，预测隧道涌水量，提出洞口仰坡坡率及防护措施的建议。

4.6.6 公路黄土隧道工点资料应结合工程的类型和规模，按地貌单元、地层时代、

成因类型和结构特征，分别进行湿陷性、物理力学指标的汇总和统计分析。

4.7 围岩分级

4.7.1 公路黄土隧道围岩分级应采用定性和定量相结合的方法综合评判，应按黄土形成时代、状态、节理发育程度、含水率、围岩剪切波波速及隧道开挖后的围岩稳定状态等指标，进行隧道基本围岩分级划分，并结合黄土塑性指数、隧道埋深等因素对隧道基本围岩分级进行修正。

4.7.2 公路黄土隧道基本围岩分级应符合表4.7.2的规定。

表 4.7.2 公路黄土隧道基本围岩分级

围岩分级		黄土地层	围岩主要工程地质特征	围岩剪切波波速 v_s (m/s)	围岩开挖后 稳定状态
IV	IV ₁	老黄土 (Q ₁ 、Q ₂)	坚硬为主；钙质含量高，局部成层，土质致密； 节理不发育～较发育；低含水率～一般含水率	$v_s > 250$	拱部无支护时 掉块、坍塌；侧 壁有时失稳
	IV ₂		硬塑为主；钙质结核零星分布，土质较致密； 节理不发育～较发育；低含水率～一般含水率		
V	V ₁	老黄土 (Q ₁ 、Q ₂)	可塑为主；钙质含量少，土质较疏松；节理较 发育～发育；一般含水率～高含水率	$150 < v_s \leq 250$	拱部和侧壁易 坍塌，处理不当 会出现大坍塌； 浅埋时易出现地 表沉降（陷）或 塌至地表
		新黄土 (Q ₃ 、Q ₄ ^I)	坚硬～硬塑；土质较疏松；陷穴及节理不发育； 低含水率～一般含水率		
	V ₂	新黄土 (Q ₃ 、Q ₄ ^I)	可塑～软塑；土质疏松；陷穴及节理较发育～ 发育；一般含水率～高含水率		
VI		饱和黄土、 新近堆积黄土 (Q ₄ ^{II})	软塑～流塑或松软结构的土层；高含水率～极 高含水率	$v_s \leq 150$	极易坍塌、变 形；易出现地表 沉降（陷）或塌 至地表

条文说明

围岩分级是隧道工程设计和施工的基础。岩石隧道采用围岩坚硬程度和完整程度作为围岩分级的基本指标，显然不适合于黄土物理力学性质的描述。在长安大学《黄土隧道支护设计与关键施工技术研究》的研究中，采用定性特征和定量指标相结合的综合评判方法，结合黄土形成时代、状态、节理发育程度、围岩开挖后的稳定状态等定性指标和围岩剪切波波速定量指标，明确了黄土围岩分级指标及获取方法，并考虑隧道土质特征、地下水及隧道埋深等因素进行修正，建立了黄土潮湿状态定性描述与定量指标的对应关系，提出了公路黄土隧道围岩分级标准，形成了公路黄土隧道围岩分级方法，建立了公路黄土隧道围岩分级体系，如图4-1所示。将黄土隧道围岩分为IV₁、IV₂、V₁、V₂和Ⅵ级共5个级别，具体分级指标如下：

(1) 黄土形成时代：工程界常采用地层的形成时代对黄土进行分类， Q_1 和 Q_2 属于老黄土， Q_3 和 Q_4 属于新黄土，现行《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1)将 Q_1 和 Q_2 黄土分为Ⅳ级， Q_3 和 Q_4 黄土分为Ⅴ级。

(2) 黄土状态：黄土状态在土类划分、土体状态判别方面具有重要作用。液性指数 I_L 可以反映黏质土的软硬与干湿状态，与天然含水率密切相关，现行《公路工程地质勘察规范》(JTG C20)中规定了各状态对应的液性指数，依此将黄土状态划分为坚硬、硬塑、可塑、软塑、流塑5个状态。一般通过野外观察得到黄土围岩状态的定性描述，使用天然含水率试验、液塑限试验得到黄土状态的定量描述，黄土状态定性描述与定量指标的对应关系见表4-1所列。

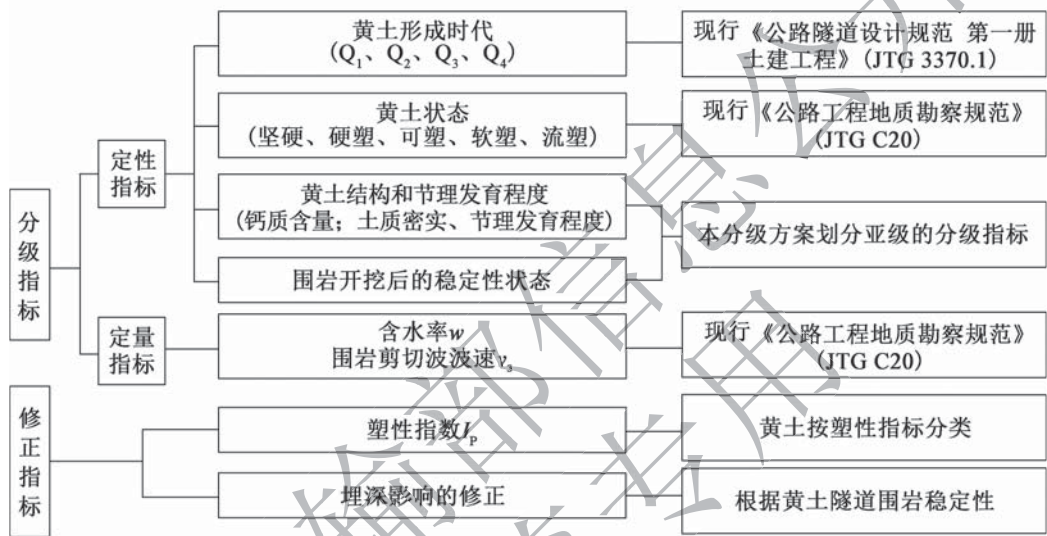


图4-1 公路黄土隧道围岩分级思路及分级指标

表4-1 黄土状态定性描述与定量指标的对应关系

黄土状态	坚硬	硬塑	可塑	软塑	流塑
定性描述 (野外鉴定)	扰动后能用手捏成饼，边上多裂口	扰动后两手相压土成饼状，黏于手掌，揭掉后掌中有湿痕			扰动后手捏有明显湿痕，有土黏于手上
定量指标 (液性指数 I_L)	$I_L \leq 0$	$0 < I_L \leq 0.25$	$0.25 < I_L \leq 0.75$	$0.75 < I_L \leq 1.0$	$I_L > 1.0$

(3) 黄土结构和节理发育程度：钙质结核（俗称“料姜石”或“姜结石”）是黄土中碳酸盐存在的方式之一，其主要成分是碳酸钙（ CaCO_3 ）。碳酸钙在黄土中含量很大，约为10.75%~15.80%，对黄土强度的形成起很大的作用，其含量及赋存状态，与黄土的坚固性和稳定性关系密切。因此，将钙质含量和土质的密实程度作为黄土结构的主要指标进行黄土围岩划分。

黄土的节理和裂隙属于宏观构造，已超出孔隙的范畴，是黄土最普遍而特殊的性质，与工程地质问题密切相关，尤其是对于隧道工程建设有重要影响，同时黄土构造节理也是黄土地下水的运移通道，例如黄土陷穴。因此，将黄土节理发育程度和陷穴作为

黄土围岩分级的指标之一。

(4) 含水率 w : 在反映黄土物理力学特性的参数中, 含水率较易于获取, 且能够有效地反映黄土的力学特性。大量研究表明, 随着黄土含水率的增加, 黄土黏聚力和内摩擦角减小, 抗剪强度降低。依据黄土抗剪强度与含水率关系, 本规范将黄土含水率划分为低含水率、一般含水率、高含水率和极高含水率, 将黄土含水率作为黄土围岩分级的指标之一。

(5) 围岩剪切波波速 v_s : 剪切波速是一个重要的工程特性参数, 可以反映原位土体的诸多物理和力学性质, 属于综合性指标。围岩剪切波波速不仅可以反映黄土的密度, 而且可以反映黄土的含水率、孔隙比、塑性指数等, 与黄土的物理力学指标之间具有良好的相关性。

《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018) 中采用纵波波速进行岩体完整程度计算辅助围岩分级, 这是由于自然界里大多数岩石可以看作弹性体, 但对于土体, 只有小应变情况下才被视作弹性体。土体波速试测结果表明, 土体中剪切波波速比较稳定, 基本上反映了土体骨架的弹性特征。因此, 采用剪切波波速作为黄土隧道围岩分级的指标, 结合《公路工程地质勘察规范》(JTG C20—2011) 表 7.10.6 规定的场地土分类确定剪切波波速范围。

(6) 围岩开挖后的稳定性状态: 隧道围岩稳定性一般是指隧道开挖后的洞身稳定性, 是围岩分级的重要指标之一, 一般采用围岩的自稳能力进行判断。对于黄土隧道, 通过工程实践总结, 发现Ⅳ级围岩隧道开挖后拱部无支护时掉块、坍塌, 侧壁有时失稳; 拱部和侧壁易坍塌, 处理不当会出现大坍塌; Ⅴ级围岩隧道开挖后浅埋时易出现地表沉降(陷)或塌至地表; Ⅵ级围岩隧道开挖后极易坍塌、变形; 易出现地表沉降(陷)或塌至地表。

4.7.3 黄土隧道围岩分级可在基本围岩分级的基础上按下列原则进行修正:

- 1 当黄土塑性指数 $I_p < 6$ 时, 可降低 1 个亚级。
- 2 浅埋地段围岩级别可降低 1 级或 1 个亚级。
- 3 当同时符合 1 和 2 款规定时, 不应简单叠加, 应结合地质条件综合考虑。除经勘探确认符合Ⅵ级围岩特征外, 围岩分级不宜直接降级到Ⅵ级。

条文说明

1 塑性指数代表塑性状态的范围, 塑性指数越大说明黄土中的黏粒含量越高。同一时期的黄土堆积, 塑性指数越大土质越紧密; 塑性指数越小, 粉(砂)粒含量越高, 土质就越疏松。 $I_p < 6$ 为砂质黄土, 一般土质疏松, 隧道易产生塌方。建议当黄土塑性指数 $I_p < 6$ 时, 围岩分级时降低 1 个亚级。

2 浅埋隧道的围岩自承能力差, 其围岩稳定性不如深埋隧道, 建议在围岩分级时降低 1 级或 1 个亚级。

4.7.4 公路黄土隧道深埋与浅埋分界可按表 4.7.4 确定。

表 4.7.4 公路黄土隧道深埋与浅埋分界

黄土类型	深埋与浅埋分界
老黄土 (Q_1 、 Q_2)	$1.4 (H_t+B) \sim 2.1 (H_t+B)$
新黄土 (Q_3 、 Q_4)	$2.2 (H_t+B) \sim 2.6 (H_t+B)$

注： H_t 为隧道开挖高度； B 为隧道开挖宽度。

条文说明

隧道深浅埋分界是确定设计荷载的前提和基础。《铁路黄土隧道技术规范》(Q/CR 9511—2014)通过理论推导得出深浅埋判定式，结合郑西客运专线多座黄土隧道（黏性和砂性黄土为主）现场试验所得土性参数进行计算得出临界深度范围。其规定铁路黄土隧道的深浅埋分界应根据黄土形成时代及隧道断面尺寸确定，其中老黄土（ Q_1 、 Q_2 ）隧道可取 $1.4 (H_t+B) \sim 1.7 (H_t+B)$ ，新黄土（ Q_3 、 Q_4 ）隧道可取 $1.8 (H_t+B) \sim 2.1 (H_t+B)$ ，其中 H_t 为隧道开挖高度， B 为隧道开挖宽度。

调研结果表明，公路黄土隧道深埋与浅埋临界深度一般大于铁路黄土隧道。这是由于铁路隧道一般以单洞双线为主，而高速公路隧道以双洞四车道或六车道为主，相邻两洞施工过程中存在相互影响（即双洞效应）。大量研究表明，双洞效应会在施工期间增大土体扰动范围和中央土柱应力，甚至导致双洞塑性区贯通和中央土柱压缩破坏。通过总结甘肃省已建的岷柳高速公路、平定高速公路、宝天高速公路，以及兰州南绕城高速公路黄土特性及众多黄土隧道修建经验，结合黄土隧道建设过程中地表裂缝发育情况、黄土颗粒组成、湿陷敏感性、陷穴发育程度和土体直立性等，陇西地区（以粉性黄土为主，属自重湿陷强敏感区，黄土陷穴发育程度强，土体直立性一般）隧道深浅埋临界深度一般取 $2.8 (H_t+B) \sim 3.2 (H_t+B)$ ；陇东地区（以粉黏性黄土为主，属自重湿陷敏感区，黄土陷穴发育程度中等，土体直立性好）隧道深浅埋临界深度一般取 $2.5 (H_t+B) \sim 2.8 (H_t+B)$ 。通过总结陕西省多座黄土隧道修建经验，发现志丹以北（粉砂性黄土为主）两车道隧道埋深小于60m时出现多次冒顶事故（预留核心土环形开挖法），故志丹以北粉砂性黄土两车道隧道的深浅埋临界深度为60m较为合理；发现志丹以南（黏性黄土为主）两车道隧道埋深小于30m时出现多次冒顶事故（预留核心土环形开挖法），故志丹以南黏性黄土两车道隧道的深浅埋临界深度为30m较为合理。本规范在参考《铁路黄土隧道技术规范》(Q/CR 9511—2014)的基础上，结合公路黄土隧道深埋与浅埋的分界特征，提出了公路黄土隧道深埋与浅埋临界深度的范围。

4.7.5 黄土隧道围岩物理力学参数宜通过室内或现场试验获取；无试验数据时，可按本规范附录D中表D选用。

条文说明

公路黄土隧道各级围岩的物理力学参数一般需要通过室内或现场试验获得。本规范通过对大量黄土隧道工程和相关文献进行调研，结合国家和行业现行有关标准的规定，总结得到表D中黄土隧道围岩物理力学参数。

5 洞口及洞门

5.1 一般规定

5.1.1 公路黄土隧道洞口位置应根据地形、地貌、黄土性质、洞外相关工程、施工条件，以及环境保护和运营要求等因素综合确定。

5.1.2 公路黄土隧道洞口设计宜遵循早进晚出、宁正勿斜、宁坡勿沟的原则，洞口应避免大挖大刷。

条文说明

早进晚出是指隧道早进洞、晚出洞，旨在贯彻不破坏就是对环境最大的保护的设计理念；宁正勿斜是指隧道洞口线路尽量与等高线正交，使隧道正面进入山体；宁坡勿沟是指隧道洞口尽量选择在稳定的坡体部位，避免选择在沟谷的中心或沟底低洼处。

5.1.3 公路黄土隧道洞口边仰坡支挡防护应根据黄土的工程特性、气象条件、水文地质条件及边仰坡高度等因素综合确定。

5.1.4 公路黄土隧道的洞口和洞门设计应安全稳定且与地形、自然环境相协调。

5.2 洞口工程

5.2.1 洞口位置的选择应符合下列规定：

- 1 洞口应选择在坡体稳定，利于排水的位置。
- 2 洞口应避免选择在沟谷的中心或沟底低洼处。
- 3 洞口段轴线宜与地形等高线垂直或呈大角度相交，避免斜交进洞。
- 4 缓坡地段进洞时，应结合浅埋段长度、边仰坡高度、边仰坡防护、排水、施工条件和占用耕地等因素，综合分析确定洞口位置。

条文说明

2 黄土地区冲沟附近多发育陷穴或坑洞，地层整体性、稳定性差，洞口位置的选择要避免设在冲沟附近，必须通过时要对洞口区域开展详细调查，查明陷穴发育特征，上下游联通情况，采取封闭回填处理。

4 缓坡地段进洞时，由于黄土地层结构特性、施工对地层的扰动影响，裂缝基本会由隧道拱顶贯通至地表，易坍塌冒顶，长距离缓坡路段需综合分析，通过调整路线纵坡、浅埋段长度并结合边坡稳定、防护和景观等方面综合考虑确定洞口位置。

5.2.2 应降低洞口边仰坡开挖高度，高度不宜大于20m。当开挖高度大于20m时，应进行稳定性评价。

5.2.3 边仰坡较高或位于高陡自然斜坡地段时，宜接长明洞工程；存在偏压时，应采取抗偏压的工程措施。

5.2.4 新黄土边仰坡可采用缓坡率的骨架防护、植被防护等形式，老黄土边仰坡设置应遵循多台阶、陡坡率、宽平台、固坡脚的原则。边仰坡形式宜采用直线形、上缓下陡折线形、阶梯形。

5.2.5 边仰坡开挖高度及坡率，宜根据黄土地貌单元、时代成因、构造节理、地下水分布、降雨量以及路基边坡设置情况综合确定，并应符合下列规定：

1 边仰坡高度每3~6m设一处平台，平台宽度宜为2~4m；当边仰坡高度大于20m时，可增设4~6m的宽平台，并根据稳定性计算确定。

2 $Q_1 \sim Q_2$ 老黄土地层，边坡坡率宜为1:0.5~1:0.75； $Q_3 \sim Q_4$ 新黄土地层，边坡坡率宜为1:0.75~1:1.25。

3 宜结合岩土层分界面确定平台及变坡点位置。

5.2.6 明洞洞顶回填土石表面应铺设不小于0.5m厚的黏土隔水层，并与边坡搭接良好；隔水层以上宜铺设厚度不小于0.3m的耕植土；洞顶回填面应设置排水设施。

条文说明

大量通车运营的隧道在洞口段出现渗漏现象，因此要加强洞口段防排水措施。为防止洞顶地表汇水的渗透，回填土表面需铺设黏土隔水层。回填土与边坡的搭接处往往是水流的良好通道，由于水流的渗透软化作用，易产生回填土体的滑移，因此回填土与边坡需搭接良好。在黏土隔水层上加铺0.3m厚的耕植土，是为防止干旱季节黏土干裂，失去隔水作用，有耕植土也便于种草、植树。

5.3 洞门工程

5.3.1 洞门形式应根据洞口地形、地貌、黄土性质及环境要求综合比选确定。洞口边仰坡较高较陡时，宜采用端墙式或翼墙式洞门；洞口边仰坡较缓、地形平顺对称、地层稳定，可采用削竹式洞门。

条文说明

洞门形式的选择要求结合洞口条件综合比选确定，确保洞口边仰坡稳定、排水畅通、洞门结构安全稳定，降低运营风险，实现与周围环境的和谐统一。

5.3.2 端墙式或翼墙式洞门设计应符合下列规定：

- 1 洞门端墙、翼墙应按挡土墙结构进行设计，洞门结构应满足稳定性要求。
- 2 洞门端墙两侧嵌入路堑边坡深度不应小于0.5m。
- 3 洞顶仰坡与洞顶回填顶面的交线至洞门端墙墙背的水平距离不宜小于1.5m；洞顶排水沟沟底至拱顶衬砌外缘的最小厚度不应小于1.0m；洞门端墙墙顶应高出墙背回填面0.8m以上。
- 4 洞门端墙、翼墙应根据需要设置变形缝和泄水孔。

5.3.3 洞门端墙基础应符合下列规定：

- 1 基础应设置于稳固的地基上，地基承载力应通过计算确定，并不应小于250kPa，埋入黄土地基深度不应小于1.0m，基底高程应在最大冻结深度以下不小于0.25m。
- 2 基础位于湿陷性黄土地层时，应根据黄土地基的湿陷等级、湿陷类型、湿陷层厚度、湿陷量和承载力等特征指标，采取换填、挤密桩、旋喷桩等地基加固措施。

条文说明

当洞门基础或明洞地基位于湿陷性黄土地基时，需根据黄土地基的湿陷性指标，结合场地及施工条件，一般采用扩大基础、地基换填等措施；当湿陷性黄土地基较厚时，多采用挤密桩、旋喷桩、树根桩等复合地基措施消除湿陷性，提高地基承载力和稳定性，按复合地基设计，具体参数需通过计算确定。

5.3.4 削竹式洞门设计应符合下列规定：

- 1 洞门伸出设计回填坡面长度不应小于0.8m，洞顶回填土厚度不宜小于1.0m。
- 2 洞门削竹面仰斜坡率不应小于设计回填坡面坡率。
- 3 设计回填坡面宜按两侧自然山坡坡率回填，坡面应植草覆盖，并应保证稳定。

6 支护和衬砌

6.1 一般规定

6.1.1 公路黄土隧道应采用曲边墙带仰拱的复合式衬砌结构。

6.1.2 公路黄土隧道围岩压力应根据地形、地质条件、埋深、支护条件、施工方法、相邻隧道间距等因素确定。

6.1.3 公路黄土隧道初期支护及二次衬砌设计参数应根据围岩级别、埋深、断面尺寸等因素，采用工程类比及计算分析确定。在施工过程中，应根据超前地质预报及现场监控量测信息对设计支护参数进行调整。

6.1.4 公路黄土隧道初期支护宜适当加强。

6.1.5 公路黄土隧道初期支护应封闭成环，并应采取控制拱脚沉降措施。

6.2 荷载

6.2.1 作用在隧道结构上的荷载应按现行《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1)的有关规定分类与组合。

6.2.2 公路黄土隧道结构自重可按结构设计尺寸及材料标准重度计算，结构附加恒载应按实际情况计算。

6.2.3 深埋公路黄土隧道围岩压力计算，应符合下列规定：

1 垂直均布压力可按式 (6.2.3-1) 计算：

$$q = \frac{b\gamma - c}{\lambda_T \tan \varphi} \left(1 - e^{-\lambda_T \frac{H}{b} \tan \varphi} \right) \quad (6.2.3-1)$$

式中： q ——垂直均布压力 (kN/m^2)；

b ——洞顶可能沉降土柱宽度的一半 (m)，按式 (6.2.3-2) 计算：

$$b = \frac{B}{2} + H_t \times \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (6.2.3-2)$$

B ——隧道开挖宽度 (m)；

H_t ——隧道开挖高度 (m)；

γ ——围岩重度 (kN/m^3)，可按本规范附录D取值；

c ——黏聚力 (kPa)，可按本规范附录D取值；

λ_T ——隧道上方岩土层中水平应力与垂直应力之比，太沙基根据试验建议 λ_T 取 1 ~ 1.5，一般取 1；

H ——隧道埋深，即隧道顶部至地面的距离 (m)；

φ ——内摩擦角 ($^\circ$)，可按本规范附录D取值。

2 水平侧压力可按式 (6.2.3-3) 和式 (6.2.3-4) 计算：

$$e_1 = q \times \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (6.2.3-3)$$

$$e_2 = (q + \gamma H_t) \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (6.2.3-4)$$

式中： e_1 、 e_2 ——隧道拱顶与底部的水平侧压力 (kN/m^2)。

条文说明

式 (6.2.3-1) ~ 式 (6.2.3-4) 为太沙基围岩压力计算公式，深埋黄土公路隧道均布荷载示意如图 6-1 所示。

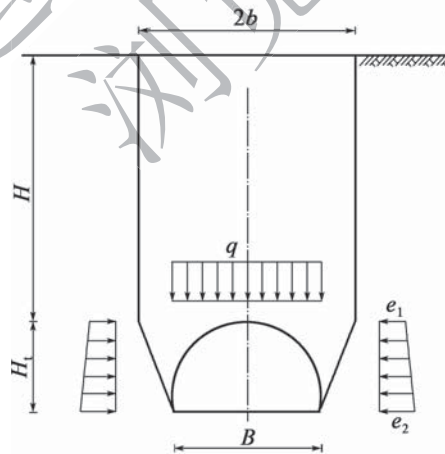


图 6-1 深埋黄土公路隧道均布荷载示意

太沙基 (K. Terzaghi) 围岩压力计算方法中，松散围岩被视为具有一定黏聚力的松散介质，假定隧道开挖后将引起洞顶围岩沉降。通过计算发现，当埋深大于一定临界值时，竖向围岩压力趋于定值，其适用于计算深埋隧道。另外，由于使用太沙基计算方法可能出现负值，更适用于围岩等级较差的围岩。黄土的工程特性和深埋黄土隧道围岩的

谢家杰计算理论中,假设由于隧道支撑变形,导致拱部以上岩土体沉降,部分拱部以上围岩重量由于岩土体抗剪和摩擦作用转移至拱部两侧三棱体并带动其沉降。谢家杰计算方法适用普氏地层坚固系数小于或等于3的较软地层,施工时可能发生拱部沉降并引起山体变形的浅埋隧道。黄土的工程特性和浅埋黄土隧道围岩的破坏模式满足上述要求,故谢家杰计算方法适用于浅埋黄土隧道的围岩压力的计算。

大量已有研究通过对比不同黄土隧道围岩压力计算值与黄土隧道围岩压力实测值,表明《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)式(D.0.2-11)的围岩压力计算值能够包络浅埋黄土隧道围岩压力实测值。

6.2.5 当现场无法准确测得黏聚力或内摩擦角等参数时,公路黄土隧道垂直均布压力可按式(6.2.5-1)计算,水平均布压力可按式(6.2.5-2)计算:

$$q = \gamma H \left[1 - e^{-0.76 \times 1.35^S - 4 \times \frac{B}{H_1} \times \frac{B}{H}} \right] \quad (6.2.5-1)$$

$$e = \gamma H \left[1 - e^{-0.76 \times 1.49^S - 4 \times \frac{B}{H_1} \times \frac{B}{H}} \right] \quad (6.2.5-2)$$

式中: S ——围岩级别,按4、5整数取值。

条文说明

式(6.2.5-1)和式(6.2.5-2)是对Ⅳ级围岩、Ⅴ级围岩条件下,35个黄土隧道断面围岩压力实测值回归统计得到的经验公式。不适用于Ⅵ级围岩黄土隧道围岩压力的确定。

近年来,大量黄土隧道围岩压力现场实测结果表明,黄土隧道围岩压力实测值与各种已有计算理论或经验公式计算值总是存在较大差异。究其原因是:一方面,已有计算理论或经验公式大多是基于传统矿山法隧道工程实践提出的,以松弛荷载理论为基础,认为隧道主要承受松动压力,这是由当时的技术水平和历史局限性造成的;而目前隧道按新奥法原理设计与施工,以岩承理论为基础,及时施作的初期支护有效地限制了围岩变形,抑制了围岩松动区的产生,围岩变形作用在支护结构上的压力即为形变压力,形变压力与围岩的位移和时间有密切关系,显然形变压力小于松动压力。另一方面,目前隧道按新奥法设计与施工,隧道支护体系由超前预加固或预支护、初期支护和二次衬砌组成。现场围岩压力测试过程中,土压力盒是在隧道已施作超前预加固或预支护的情况下,在隧道开挖后埋设的,所以现场实测值只反映了初期支护承受的围岩压力,没有包含超前预加固或预支护承担的围岩压力,而事实是超前预加固或预支护对保证围岩稳定起到很重要的作用。

根据对实测围岩压力值的统计分析,结合实测围岩压力值和各种理论或经验公式围岩压力计算值的对比,发现指数函数 q (或 e) $= \gamma H \left[1 - e^{-A \times \frac{B}{H_1} \times \frac{B}{H}} \right]$ 能够很好地拟合垂直围

岩压力 q (或水平围岩压力 e) 和隧道埋深 H 、开挖宽度 B 、开挖高度 H_1 的关系, 其中 A 为常数。对比分析拟合公式计算结果, IV级围岩垂直围岩压力实测值的包络度为 90%, IV级围岩水平围岩压力实测值包络度为 84.2%; V级围岩垂直围岩压力实测值的包络度为 89.2%, V级围岩水平围岩压力实测值的包络度为 87.5%, 如图 6-3 和图 6-4 所示。

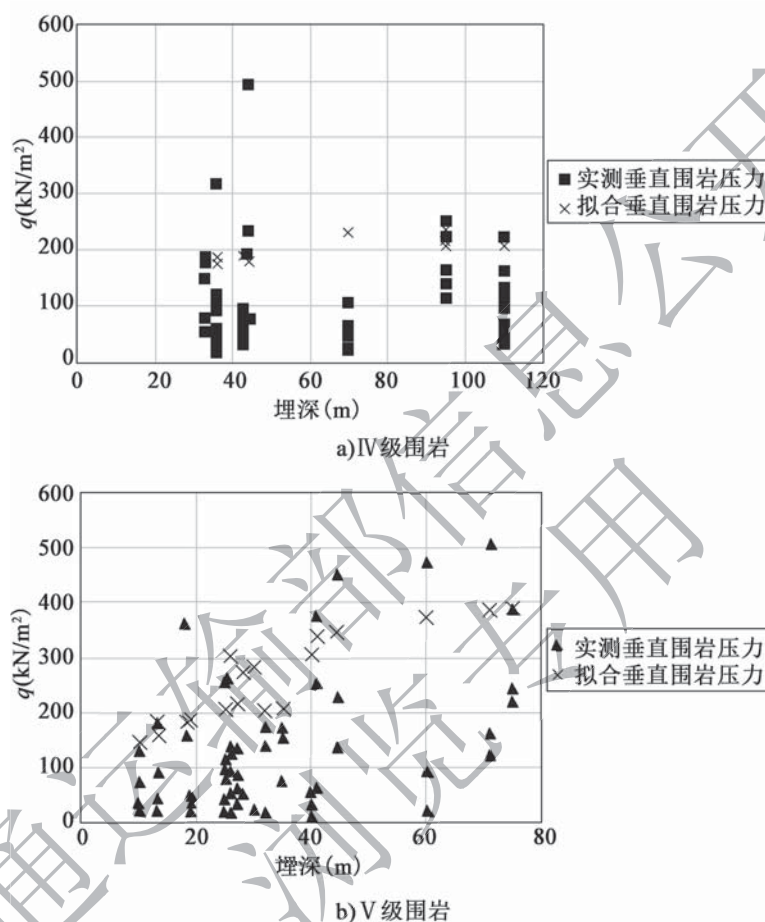


图 6-3 垂直围岩压力与埋深关系

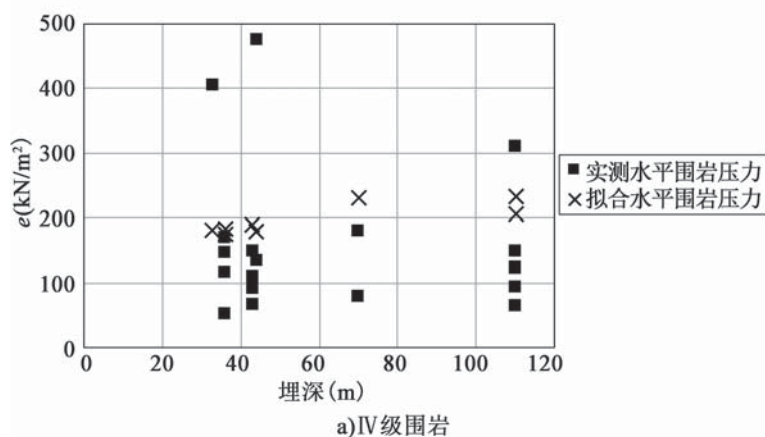


图 6-4

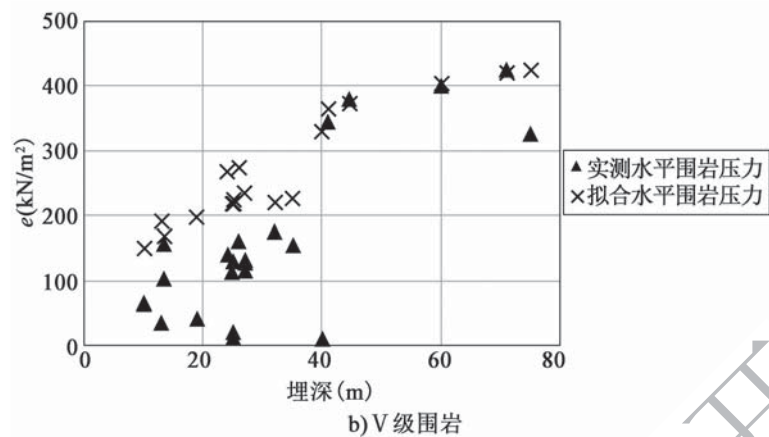


图6-4 水平围岩压力与埋深关系

值得注意的是，现场测试结果表明，黄土隧道垂直围岩压力现场实测值往往小于理论计算值（使用太沙基公式计算的深埋隧道围岩压力或谢家桢公式计算的浅埋隧道围岩压力），而水平围岩压力现场实测值与理论计算值比较接近，甚至出现垂直围岩压力实测值小于水平围岩压力实测值的情况。究其原因，黄土隧道结构采用超前支护（或预加固）、初期支护和二次衬砌组成的复合式衬砌结构，现场测试时，压力盒是在超前支护或预加固施作以后埋设的，因而现场测试只能测得作用在初期支护上的围岩压力，没有测到被超前支护或预加固承担的围岩压力。同时，由于超前支护或预加固主要在隧道拱部范围设置，故垂直围岩压力实测值较小。

6.2.6 隧道产生偏压时，作用于隧道衬砌上的偏压力，应按地形、地貌、黄土性质及覆土厚度确定。

6.2.7 明洞回填荷载应按设计回填参数确定，回填土物理力学指标应按实际回填料和设计要求取值。

6.2.8 可变荷载和偶然荷载应按现行《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》（JTG 3370.1）的有关规定计算。

6.3 明洞衬砌

6.3.1 明洞衬砌应采用钢筋混凝土结构。

6.3.2 明洞的结构类型应根据地形、地质及施工条件等因素综合确定。地形严重偏压、边坡过高的地段，可采用偏压明洞结构。

6.3.3 明洞基础位于湿陷性黄土地基上时，应根据黄土的湿陷等级、类型、地基湿陷性黄土的厚度及湿陷量等特征，采取消除黄土湿陷性的措施。

6.4 复合式衬砌

6.4.1 公路黄土隧道初期支护应采用钢架喷网锁脚锚杆（管）组合结构。

条文说明

20世纪80年代以前，黄土隧道按矿山法设计与施工，采用整体式衬砌（模筑混凝土衬砌及砌体衬砌）。20世纪80年代后期，新奥法在黄土隧道工程中得到推广应用，隧道采用复合式衬砌，其中初期支护采用喷射混凝土、系统锚杆、钢筋网与钢架联合支护的结构形式。工程实践表明，黄土隧道中锚杆的拉拔力达不到设计的要求，其支护效果不显著。2005年以来，长安大学联合相关单位，针对黄土隧道支护理论、设计方法和施工技术的关键共性问题开展了系统研究。结果发现黄土隧道拱部系统锚杆受压，支护作用不显著；黄土隧道拱部沉降显著大于净空收敛，且拱部初期支护整体沉降比例较大。据此提出了黄土隧道取消系统锚杆，加强钢架，增设锁脚锚杆（管），以控制隧道拱部沉降，建立了钢架、喷射混凝土、钢筋网与锁脚锚杆（管）联合使用的黄土隧道初期支护结构，黄土隧道衬砌结构如图6-5所示。近20年来，该成果在陕西省吴子高速公路32座黄土隧道、神府高速公路墩梁隧道得到成功应用，推广应用于哈尔滨绕城公路天恒山隧道（软可塑及软亚黏土地层）、青兰高速公路隧道、西安地铁、兰州地铁，以及郑西、宝兰和大西铁路客运专线等数十个国家重点建设项目的数百座黄土隧道，这些隧道建成通车以来，衬砌结构稳定，运营效果良好，技术经济效益显著。

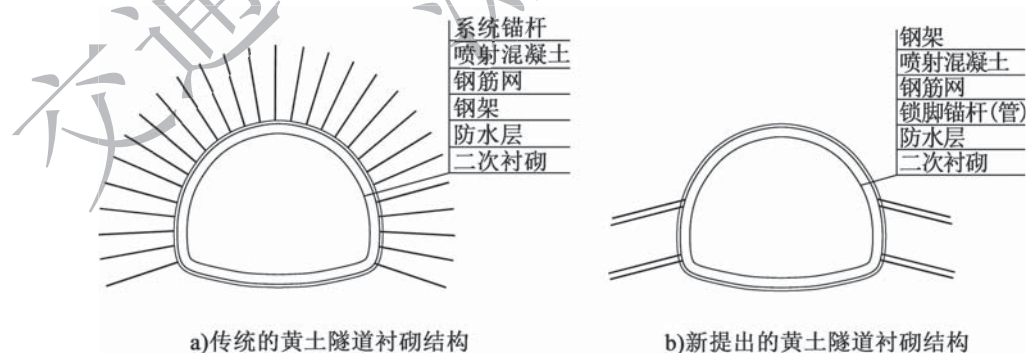


图6-5 黄土隧道衬砌结构

6.4.2 公路黄土隧道初期支护应有足够的刚度和强度，能够承受隧道施工期间可能出现的全部荷载。

6.4.3 公路黄土隧道喷射混凝土强度等级不宜低于C25。

6.4.4 公路黄土隧道锁脚锚杆（管）应有足够的强度和刚度，并应与钢架有效连接，锁脚锚杆（管）长度宜为3～5m，直径不宜小于25mm。

6.4.5 公路黄土隧道可采取设置初期支护大拱脚、纵向托梁、混凝土垫块等控制拱脚沉降措施，必要时可设置临时仰拱。

6.4.6 公路黄土隧道初期支护参数可采用工程类比确定，并宜通过计算分析进行验算。当无资料时，可按表6.4.6选用。在施工过程中，应根据现场监控量测信息对设计支护参数进行必要的调整。

表 6.4.6 公路黄土隧道支护衬砌设计参数

车道数			两车道				三车道			
围岩级别			Ⅳ ₁	Ⅳ ₂	V ₁	V ₂	Ⅳ ₁	Ⅳ ₂	V ₁	V ₂
初期支护	预留变形量（cm）		10 ~ 12	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25	25 ~ 30
	喷射混凝土厚度（cm）		22 ~ 24	24	26	26 ~ 28	26	26	28	28 ~ 31
	钢架	型号	I16I 或 18	I18	I20a	I20 或 I22a	I20a	I20b	I22a 或 I22b	I25a 或 H175
		间距（m）	0.8 ~ 1.0	0.8 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8	0.5 ~ 0.7	0.8 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8	0.5 ~ 0.7	0.5 ~ 0.7
	钢筋网	直径（mm）	8	8	8	8	8	8	8	8
		间距（cm）	20×20	20×20	20×20	15×15	20×20	20×20	20×20	15×15
	锁脚锚杆（管）	直径（mm）	25	25	42	50	42	42	50 ~ 76	50 ~ 76
		长度（m）	3	3	3.5	3.5	3.5	3.5	4	4
		角度	锁脚锚杆（管）应斜向下打设，和水平方向夹角尽可能大，但不能超过钢架拱脚切线和水平方向的夹角							
二次衬砌钢筋混凝土（cm）		拱墙厚度	40 ~ 45	40 ~ 45	45 ~ 50	50 ~ 55	50 ~ 55	50 ~ 55	55 ~ 60	60 ~ 70
		仰拱厚度	40 ~ 45	40 ~ 45	45 ~ 50	50 ~ 55	50 ~ 55	50 ~ 55	55 ~ 60	60 ~ 70

注：Ⅵ级围岩段落应通过试验或计算确定支护衬砌设计参数。

6.4.7 公路黄土隧道二次衬砌应满足强度、刚度和耐久性要求，仰拱厚度不应小于拱墙厚度。

6.4.8 公路黄土隧道二次衬砌宜采用模筑钢筋混凝土结构，混凝土强度等级不应低于C30。

6.4.9 公路黄土隧道二次衬砌设计时应明确先期施工仰拱，拱墙衬砌采用整体式模板台车一次浇筑的施工方式。

6.4.10 公路黄土隧道二次衬砌应按初期支护变形基本稳定后施作进行设计，对于浅埋、偏压、初期支护变形不收敛、有沉降控制要求等地段，宜加强初期支护。

6.4.11 公路黄土隧道二次衬砌设计参数可采用工程类比确定，并应通过计算分析进行验算。当无资料时，可按表 6.4.6 选用。在施工过程中，应根据现场监控量测信息对设计支护参数进行必要的调整。

6.4.12 公路黄土隧道应根据围岩级别和隧道开挖宽度确定设计预留变形量，并结合施工监控量测结果进行调整。

6.4.13 净距小于 $2.0B$ 的小净距公路黄土隧道，应对支护衬砌进行适当加强；净距小于 $1.0B$ 的小净距公路黄土隧道，应对支护参数及施工开挖方案进行专项研究。

6.4.14 公路黄土隧道初期支护及二次衬砌结构内力和变形可采用荷载-结构法分别计算，对结构安全系数、变形和地基承载力进行验算。结构抗裂有要求时，应进行抗裂验算。

6.4.15 公路黄土隧道初期支护结构内力计算应符合下列规定：

1 宜考虑施工过程中初期支护结构形式、荷载和约束条件的变化，分阶段建立初期支护结构力学计算模型。

2 初期支护荷载可按本规范第 6.2 节推荐公式计算确定。

3 当初期支护向围岩变形时，应考虑围岩对初期支护的抗力作用。弹性抗力系数应通过现场载荷试验等方法测定，无实测资料时可按本规范附录 D 选取。

4 仰拱施作前，初期支护宜按拱（墙）脚受弹性链杆支承的两铰拱结构进行计算，且应考虑锁脚锚杆（管）对初期支护拱（墙）脚的约束作用。

5 仰拱施作后，可不考虑锁脚锚杆（管）支护作用，初期支护可按无铰拱结构计算。

条文说明

本规范规定公路黄土隧道采用复合式衬砌，其中初期支护采用由钢架、喷射混凝土、钢筋网与锁脚锚杆（管）组成的联合支护结构，如图 6-5b）所示。

1 公路黄土隧道采用台阶法等进行分部开挖和支护，施工过程中初期支护结构形式、荷载及约束条件随施工阶段的不同均发生动态变化，有必要分阶段建立初期支护结构力学计算模型，计算分析施工过程中初期支护结构安全性和拱脚稳定性。

2 根据最不利工况的设计原则，仰拱施作后初期支护的荷载分担比例可以假定二次衬砌施作时围岩与初期支护已经完全稳定，二次衬砌不参与承载，仅作为安全储备，作用在隧道结构上的荷载全部由初期支护承担。

4 黄土隧道仰拱施作前，初期支护墙脚沉降和收敛变形往往较为显著。将初期支护视为墙脚受弹性链杆支承的两铰拱结构较为符合实际，如图 6-6 所示， K_h 和 K_v 分别为初期支护拱（墙）脚处的水平支承刚度和竖向支承刚度。

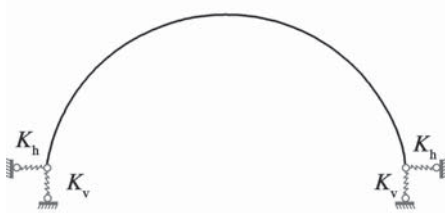


图 6-6 仰拱施作前初期支护拱(墙)脚约束条件示意

初期支护拱(墙)脚处的竖向支承刚度 K_v 由拱(墙)脚地基和锁脚锚杆(管)共同提供,可以表示为: $K_v = K_{vg} + K_{vp}$, K_{vg} 、 K_{vp} 分别为拱(墙)脚地基和锁脚锚杆(管)为初期支护拱(墙)脚提供的竖向支承刚度。 K_{vg} 可以表示为: $K_{vg} = k_v A_f$, 式中 k_v 为拱(墙)脚处的地基反力系数; A_f 为沿隧道纵向每延米初期支护拱(墙)脚与地基的接触面积。

现场测试表明,施工过程中黄土隧道变形以拱部沉降为主,锁脚锚杆(管)端部主要受到初期支护拱(墙)脚沉降变形过程中作用的竖向荷载 V_{jp} ,据此建立黄土隧道锁脚锚杆(管)的力学计算模型,如图 6-7 所示。在竖向荷载 V_{jp} 作用下,锁脚锚杆(管)受到周围地层提供的横向地基反力、端阻力和侧阻力。利用弹性地基梁、摩擦桩和端承桩相关理论计算锁脚锚杆(管)为初期支护拱(墙)脚提供的竖向支承刚度 K_{vp} 。

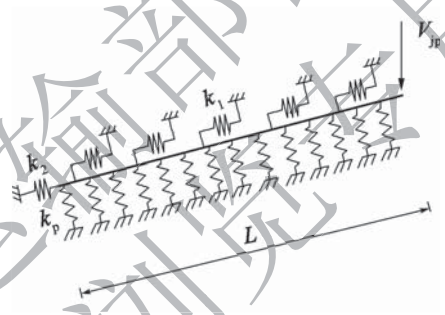


图 6-7 锁脚锚杆(管)力学计算模型

初期支护拱(墙)脚的水平支承刚度 K_h 需通过拱(墙)脚水平支承反力和水平位移测试数据反算得到。

5 黄土隧道施作仰拱及仰拱回填后,初期支护墙脚已较为稳固,此时将拱墙部位初期支护视为无铰拱结构(图 6-8),按整体一次性受力进行计算,且无须再考虑锁脚锚杆(管)的支护作用。

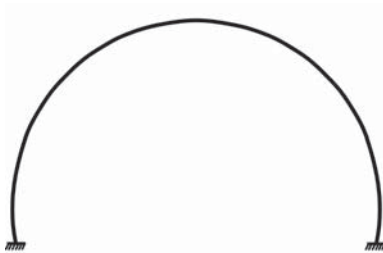


图 6-8 仰拱施作后初期支护墙脚约束条件示意

6.4.16 公路黄土隧道仰拱可按两端受竖向集中荷载的弹性地基曲梁进行计算。

6.4.17 公路黄土隧道二次衬砌结构内力计算可按现行《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1)的有关规定计算,二次衬砌荷载可按本规范第6.2节推荐公式计算确定。

条文说明

根据最不利工况的设计原则,确定二次衬砌的荷载分担比例,可以假定初期支护失效,退出工作,作用在隧道结构上的荷载全部由二次衬砌承担。

7 辅助工程措施

7.1 一般规定

7.1.1 应根据地形、地质条件、隧道断面、埋深和施工方法等，采取相应的辅助工程措施。

7.1.2 公路黄土隧道通过浅埋段、严重偏压段、自稳性差或下穿建（构）筑物的地段时，根据地质条件及开挖方法可采取超前管棚、超前小导管、超前玻璃纤维锚杆和掌子面喷射混凝土等辅助工程措施。

7.1.3 公路黄土隧道通过富水地段时，可采取井点降水、超前钻孔排水、超前帷幕注浆、高压劈裂注浆和超前水平旋喷桩等辅助工程措施。

7.2 围岩稳定措施

7.2.1 公路黄土隧道洞口段、穿越埋深小于20m的沟谷地段、对地面沉降控制有较高要求的浅埋段、塌方段等，可采取超前管棚支护措施，并应符合下列规定：

- 1 洞口段可采用壁厚6mm的 $\phi 108$ 无缝钢管，当有建（构）筑物时也可采用 $\phi 159$ 无缝钢管，管棚长宜为20~40m。施作范围宜为拱部 120° ，钢管环向间距宜为350~400mm，外插角宜为 $1^\circ \sim 3^\circ$ 。
- 2 洞身段可采用壁厚6mm的 $\phi 89$ 无缝钢管，管棚长宜为10m。施作范围宜为拱部 120° 。
- 3 钢管内应插入钢筋笼或钢筋束，并采用强度等级不低于M20的水泥砂浆填充。

7.2.2 公路黄土隧道开挖后掌子面不能自稳地段、拱部易出现剥落或局部坍塌的地段，可采取超前小导管支护措施，并应符合下列规定：

- 1 施作范围宜为拱部 120° ，外插角宜为 $10^\circ \sim 15^\circ$ ，宜采用壁厚为3.5mm的 $\phi 42$ 或 $\phi 50$ 无缝钢管，管长宜为3.5m或4m，环向间距宜为400mm。
- 2 隧道位于砂粒含量较大的黄土地段时，可采用超前密排小导管，施作范围宜为

拱部 150° ，环向间距宜为200mm。

3 钢管内应采用水泥砂浆填充。

7.2.3 公路黄土隧道洞口段通过不良地质地段时，应依据地形、地质条件采取抗滑桩、深层水泥土搅拌桩、高压旋喷桩和洞外注浆加固等措施，洞内可采取超前密排小导管支护措施。

7.2.4 公路黄土隧道掌子面易失稳时，可采取喷射混凝土封闭掌子面、超前预注浆加固措施。

7.2.5 公路黄土隧道采用大断面或全断面开挖时，可采用超前玻璃纤维锚杆加固掌子面前方围岩，玻璃纤维锚杆循环长度宜为10~30m，搭接长度应不少于6m。

7.3 富水段处理措施

7.3.1 公路黄土隧道通过富水地段时，应遵循以排为主、适度堵水的原则，综合确定处理措施。

7.3.2 位于地下水位以下的砂质黄土、粉质黄土隧道，出现流砂、流泥、涌水时，可采取井点降水措施，并宜建立监测系统。

7.3.3 公路黄土隧道可能出现流水或涌水的地段，可采取超前钻孔排水或引排水管集中排放。

7.3.4 公路黄土隧道掌子面易发生突泥、流坍地段，可采取超前帷幕注浆堵水，并对隧道围岩或开挖掌子面进行加固。

条文说明

在高含水率黄土地段、掌子面易坍塌地段和初期支护变形异常地段，采取超前管棚措施支护后掌子面稳定性改善效果不佳时，采取帷幕注浆措施对前方围岩的预加固效果较好。帷幕注浆单循环施工长度25m，注浆范围为开挖轮廓线外5~8m。注浆材料采用水泥-水玻璃双浆液（体积比1:1）为主，普通水泥浆液（水灰比0.8~1）为辅。注浆效果评定采用P-Q-T曲线分析法和孔内成像检查孔法。

7.3.5 极高含水率黄土地段、土体处于软塑-流塑状态地段、地下水汇集出现涌泥流泥地段，可采取高压劈裂注浆预加固措施，并应符合下列规定：

- 1 应在掌子面或塌方体前方设置止浆墙，止浆墙厚度不宜小于2m，高度可根据隧道断面确定。
- 2 加固范围较长时，应分段分循环进行，一个注浆循环长度不宜大于30m。下一循环中，开挖预留长度不宜小于5m。
- 3 注浆应采用后退式分段注浆。
- 4 注浆材料可选早强硫铝酸盐水泥单液浆、水泥-水玻璃双液浆、水溶性聚氨酯等。
- 5 注浆结束标准应以压力为主要控制标准，注浆终压宜为5~8MPa，现场根据实际情况可进行调整。
- 6 注浆效果应按注浆孔数量5%，且不宜少于3孔钻孔检查。
- 7 检查标准应为检查孔不坍孔、不涌泥，检查孔出水量小于0.2L/m·min。

条文说明

调研结果表明，目前陕西省有两座石质隧道断层破碎带出现了涌泥，两座黄土隧道发生了塌方冒顶伴随涌泥，这四座隧道均采用高压钻注一体机实施高压劈裂注浆加固，处理的地段长10~30m，较好地解决了注浆钻孔不能成孔和普通注浆水泥浆液不能进入饱和黄土的问题，工程实际效果较好。

7.3.6 在砂粒含量较大或极高含水率地段，公路黄土隧道埋深较浅且可能出现渗水、流水、涌水时，可采取地表超前竖向旋喷桩堵水预加固，并应符合下列规定：

- 1 应配备排浆沟及泥浆池，施工中应将废弃的浆液导入或排入泥浆池，沉淀凝结后应集中运至弃渣场妥善处理。
- 2 施工前应通过成桩试验性施工确定水泥浆浓度、喷浆量、喷浆压力、喷浆提升速度等施工工艺参数，试桩数量不得少于5根。
- 3 宜使用低压钻至预定深度，钻孔倾斜度不应大于1%。
- 4 应在钻孔结束后开始横向喷射，从钻头侧面喷射出高压浆液与压缩空气，气流压力（风压）宜为0.7~0.9MPa。
- 5 旋喷时应边喷射高压浆液与压缩空气，边旋转提升，喷射压力宜为25~40MPa，提升速度宜为0.1~0.2m/min，旋转速度宜为10~20r/min，浆液流量宜为60~100L/min。
- 6 28d龄期后，可采用钻芯取样的方法检测旋喷桩的强度和长度，检测点数量不应少于3处。

7.3.7 在砂粒含量较大或极高含水率地段，公路黄土隧道埋深较深且可能出现流水、涌水时，可采取洞内超前水平旋喷桩堵水预加固，并应符合下列规定：

- 1 超前加固范围应结合地质条件和水文条件等因素确定，加固范围较大时，应分段分循环进行，一个循环长度宜为15m。

- 2 桩径宜为0.6m，桩间净距宜为0.4m，外插角宜为 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。
- 3 超前水平旋喷桩可内插 $\phi 89$ 钢管加固，钢管环向间距宜为1.0m，长度宜为15m，布置范围宜为拱部 120° 。
- 4 注浆参数应结合现场试验确定，注浆材料宜选用强度等级42.5的普通硅酸盐水泥，水灰比宜为0.8~1.2，并掺入适量速凝剂，也可掺入适量膨润土。
- 5 成桩强度宜为5.0~8.0MPa。

交通运输部信息公开
浏览专用

8 地基处理

8.1 一般规定

8.1.1 公路黄土隧道地基承载力或湿陷变形不满足设计要求时，应进行地基处理。

条文说明

公路黄土隧道地基承载力不足会诱发隧道拱（墙）脚沉降。隧道施工期间易发生变形侵限，甚至造成塌方；隧道运营期间，易发生衬砌开裂、掉块，甚至垮塌，路面开裂、隆起，检修道和电缆沟槽变形、开裂等，严重影响隧道施工安全和正常运营。

8.1.2 应根据黄土特性、施工条件、施工效果、材料来源、处置位置及环境等因素选择地基处理措施。

8.1.3 公路黄土隧道地基处理严禁直接采用盐渍土、膨胀土、冻土、有机质土等不良土料和粗粒料等透水性材料。

8.1.4 公路黄土隧道地基处理应与防排水相结合，并应遵循防治并重的原则。

8.1.5 公路黄土隧道地基符合下列条件之一时，宜采取地表封闭隔水、洞内加强排水等措施防止地基湿陷：

1 非自重湿陷性地基。

2 II、III级自重湿陷性场地，在降雨与灌溉水源条件下，自然排水顺畅，且无集中入渗通道。

条文说明

当黄土含水率高或被水浸泡会引起黄土结构破坏，造成黄土地基湿陷和承载力不足。因此，在黄土隧道施工时需做好对水的处理。

在干旱、半干旱地区，当无集中入渗通道时，大气降雨及地表灌溉入渗作用下地基土湿度远小于饱和湿度，即使隧底下分布湿陷性黄土层，也不会发生浸水饱和湿陷变

形，只是一种增湿变形，增湿引起的地基变形量较少，能够满足隧道工后沉降控制的要求。

8.1.6 公路黄土隧道地基符合下列条件之一时，均可按一般土质进行处理：

- 1 地基湿陷量的计算值小于或等于50mm。
- 2 在非自重湿陷性黄土场地，地基内各土层的湿陷起始压力值，均大于其附加应力与上覆土体的饱和自重压力之和。

8.1.7 采用桩基加固隧道地基时，宜在仰拱开挖前完成。

8.1.8 公路黄土隧道进行地基处理时，应加强施工监控量测。

8.2 洞口地基

8.2.1 公路黄土隧道洞口地基承载力应通过计算确定，不宜小于250kPa，基础底面压力应按现行《建筑地基基础设计规范》（GB 50007）中基础底面压力公式计算确定。

8.2.2 公路黄土隧道明洞地基宜进行整体处治，处治宽度应不小于明洞基底开挖宽度。当开挖深度小于3m时，应将相应侧处治宽度加宽1~2m。

8.2.3 公路黄土隧道洞口和明洞工程地基处理方法可按表8.2.3选取。

表 8.2.3 公路黄土隧道洞口和明洞工程地基处理方法的选择

处理方法	适用范围及条件	地基处理深度（m）
换填垫层	厚度3m以内的湿陷性黄土地基，地下水位以上	0.5~3
钢管桩	空洞、粉质黄土、砂质黄土等，饱和度不大于65%的湿陷性黄土	桩长5~12
高压旋喷桩	黏质黄土（流塑、软塑、可塑）、粉质黄土、砂质黄土、 Q_3 与 Q_4 黄土、高含水率与极高含水率黄土、泥状、湿陷性黄土等	桩长5~12
灰土挤密桩	地下水位以上的黄土、湿陷性黄土等，黄土含水率小于25%、饱和度不大于65%	桩长3~15
树根桩	人工填土、空洞、粉质黄土、砂质黄土、 Q_3 与 Q_4 黄土等	桩长3~20

条文说明

隧道洞门和明洞工程地基处理方法选择时，需根据黄土地基湿陷性等级、湿陷类型、湿陷层厚度、湿陷量以及施工条件和材料来源等综合考虑，确保经济合理，方案科学。换填垫层尺寸和厚度参照现行《建筑地基处理技术规范》（JGJ 79）中换填垫层相关计算确定。

8.3 洞身地基

8.3.1 公路黄土隧道洞身地基承载力和湿陷变形不满足设计要求时，应进行地基处理，地基处理方法可按表 8.3.1 选取。

表 8.3.1 公路黄土隧道洞身地基处理方法的选择

处理方法	适用范围及条件	地基处理深度 (m)
换填垫层	厚度 0.5m 以内的湿陷性黄土地基，地下水位以上，局部或整片用混凝土换填	小于 0.5
钢管桩	空洞、粉质黄土、砂质黄土等，饱和度不大于 65% 的湿陷性黄土	桩长 5 ~ 10
高压旋喷桩	黏质黄土（流塑、软塑、可塑）、粉质黄土、砂质黄土、Q ₃ 与 Q ₄ 黄土、高含水率与极高含水率黄土、泥状、湿陷性黄土等	桩长 5 ~ 12
注浆	人工填土、空洞、粉质黄土、砂质黄土、Q ₃ 与 Q ₄ 黄土等	孔深 3 ~ 10
灰土挤密桩	地下水位以上的黄土、湿陷性黄土等，黄土含水率小于 25%、饱和度不大于 65%	桩长 5 ~ 10
树根桩	人工填土、空洞、粉质黄土、砂质黄土、Q ₃ 与 Q ₄ 黄土等	桩长 3 ~ 15

条文说明

根据隧底土质情况、水文情况等，洞内地基处理一般采取换填垫层、注浆、桩基法等措施。洞身地基处治时因振动对隧道安全有一定隐患，可能导致隧道结构开裂或掉块现象发生。因此，采用桩基方案处治时，需要采用无振动或减振的施工方法，以减少对隧道结构稳定性的影响。

换填垫层采用灰土等隔水性材料垫层，主要目的是隔水，防止地基土后期渗水软化导致结构病害。

灰土挤密桩对土质地基处治有较好的效果，但其施工中压实桩孔内灰土时，对围岩扰动大，可能会影响结构稳定；此外，灰土挤密桩施工设备高度较高，隧道洞内施工空间不足，导致无法施工或施工效果差，因此建议通过现场试验确定施工是否可行。

8.3.2 公路黄土隧道极高含水率或发生涌流水段落，可结合井点降水措施进行地基处理，并设置排水沟或渗水沟。

条文说明

黄土隧道洞身段采用降水固结法进行地基处理，根据土体的富水状况、降水效果和处治要求等确定降水方案，通过现场试验确定降水点位置和深度。井点降水一般采用洞内井点降水和地表井点降水，根据隧道的地形、地质、施工条件和现场试验来确定降水措施。

8.4 处理方法

8.4.1 换填垫层处理黄土隧道地基时，应符合下列规定：

- 1 采用灰土垫层换填时，石灰掺量应通过现场试验确定。试验或工程经验缺乏时，宜按消石灰8%、磨细生石灰6%控制，灰土压实度不应小于97%。
- 2 换填垫层的地基承载力宜通过现场载荷试验确定，并应进行下卧层承载力的验算。无试验资料时，估算的石灰土垫层承载力特征值不宜超过250kPa。
- 3 换填开挖前应完成锁脚、临时支撑等措施，每次换填开挖长度不宜大于3m。施工过程中，应分层压实并测定压实度。
- 4 应检测垫层承载力，每个独立工点或分项工程检测点不应少于3处，承载力应满足设计要求。
- 5 垫层承载力特征值应根据现场原位试验结果确定。

8.4.2 钢管桩处理黄土隧道地基时，应符合下列规定：

- 1 加固范围、桩径、桩长应结合黄土隧道基底承载力、土质情况和现场施工条件等确定。
- 2 宜采用无缝钢管，分段长度宜为3~6m，直径宜为50~150mm，壁厚不应小于4mm。钢管装卸、运输、堆置时，应避免冲击、振动损失，并防止变形。
- 3 桩内宜注水泥浆、水泥砂浆，也可采用强度等级不低于C20的混凝土灌注。
- 4 钢管连接应采用套管焊接的等强度连接方式，焊接完成后冷却时间应不少于5min。
- 5 腐蚀性环境下，钢管桩应采取防腐处理。
- 6 宜采用梅花形、矩形布置。应根据隧底土质情况合理选择沉桩工艺，宜采用旋转成孔、静压等工艺，按先中间后两边的顺序施工。
- 7 当采用静压、锤压等方式时，桩头应设置桩帽。静压沉桩宜将桩一次性压到底；锤击沉桩应采取减震措施。

条文说明

- 2 钢管桩选材、直径、壁厚等需符合设计要求，尽量减少钢管的装卸和运输次数，尤其是大口径钢管，要注意钢管两端变形，必要时加装防止变形设备。
- 3 钢管内充填水泥浆成桩时，一般通过现场试验确定水泥浆的注浆压力、浆液配比、凝结时间等。
- 4 钢管连接通常采用套管焊接，不论哪种方式都需避免在接头处形成强度薄弱区。钢管接头焊接通常采用二氧化碳气体保护自动焊、半自动二氧化碳气体保护焊及手工电弧焊等工艺。施工环境温度低于0℃时，通常对焊口两侧各100mm范围预热后再进行

焊接。

5 钢管桩的腐蚀速率因其所处环境的不同而不同。处于水位以上时,单面腐蚀率0.05mm/年;处于水位以下时,单面腐蚀率0.03mm/年;处于水位波动区时,单面腐蚀率0.1~0.3mm/年。防腐措施一般采用外表面涂防腐层,以增加腐蚀余量及保护阴极。

7 钢管桩沉桩方式选用时要综合考虑施工工期、安全等因素,遵循施工振动对隧道结构无明显影响的原则,一般采用对隧道结构基本无影响的旋转成孔、静压等方式。锤击沉桩方式对隧道稳定性影响较大,需通过模拟现场试验或现场试验分析成桩扰动对隧道结构稳定性的影响。

8.4.3 高压旋喷桩处理黄土隧道地基时,应符合下列规定:

1 加固范围、桩径、桩长应根据黄土隧道对基底承载力、稳定性和变形的要求,以及现场施工条件等确定,并宜穿透软弱土层到达承载力相对较高的土层。

2 宜结合土质条件、桩体强度和桩径等因素计算确定桩长、桩间距、注浆量,桩间距宜为平均桩径的2~3倍。其布置形式宜采用正方形或三角形。

3 单管法、二重管法的高压水泥浆浆液流压力和三重管法的高压水射流压力应大于20MPa,可根据成桩直径、地质条件选用不同的旋喷桩施工工艺。

4 单管法成孔直径不宜大于500mm,二重管法成孔直径不宜大于750mm,三重管法成孔直径不宜大于900mm。

5 注浆材料为水泥浆时,水灰比宜为0.8~1.2,有特殊要求时,可添加外加剂或掺合料,其类型和掺量应通过试验确定。

6 喷射孔与高压注浆泵的距离不宜大于50m,应从下而上逐渐提升进行注浆,喷射管分段提升的搭接长度不应小于100mm,桩位偏差不得大于50mm。

7 宜在桩顶设置200~300mm厚垫层,材料可采用灰土、水泥土等。

8 高压喷射注浆时应配置浆液自动计量装置,出现压力骤然下降、上升或冒浆异常时,应查明原因并及时采取措施。

9 高压喷射注浆完毕应迅速拔出喷射管,必要时应在原孔位采取冒浆回灌或二次注浆等措施。

条文说明

4 单管法、二重管法、三重管法是旋喷桩的基本施工工艺,在不同的地质条件下,各种工艺成桩直径区间较大,在同一种土体中成桩直径也差别较大,需要根据设计要求采取相应的工艺。

5 水泥浆液的水灰比越小,旋喷注浆处理地基的承载力越高。施工中因注浆设备的原因,水灰比太小时,喷射有困难,故水灰比取0.8~1.2,生产实践中常用0.9。

6 为避免间断注浆导致的桩体不连续现象,规定两次喷射范围需进行搭接。

8.4.4 注浆处理黄土隧道地基时,应符合下列规定:

- 1 注浆范围、孔距、孔深应根据隧底土质特性、病害情况、水文地质、施工条件等，结合工程经验确定。
- 2 注浆孔宜采用梅花形布置，间距宜为1.0~2.0m；注浆管宜采用钢管或硬质塑料管，管径宜为42~110mm。
- 3 注浆水泥宜选用强度等级42.5的普通硅酸盐水泥，可适量掺入粉煤灰，掺入量不宜大于30%，特殊地质条件也可采用化学浆液。
- 4 注浆压力应根据隧底地层特性及注浆工艺确定，可采用1~2MPa。处理隧底空洞时，注浆初期可采用自流注浆。
- 5 注浆施工前应进行现场试验性施工，确定施工工艺及参数。
- 6 应通过现场试验确定注浆的有效范围和注浆量。
- 7 注浆压力逐步上升，达到设计终压且吸浆率小于5~10L/min时，继续注浆10~20min后方可结束隧底注浆。
- 8 采用混凝土（片石）回填、吹砂等方法处治隧底空洞时，应先充填后注浆。
- 9 注浆施工时应监测隧道结构的变形情况，不得影响隧道结构的稳定性。

条文说明

3 因水泥浆材的结石体强度高、造价低、材料来源丰富、浆液配置方便，采空区地基加固处理时注浆材料一般为纯水泥浆。粉煤灰颗粒比水泥细，掺入适量的粉煤灰有助于保持浆体的悬浮状态，避免发生离析，并通过减少沉积来改善可泵性和可灌性。同时，由于粉煤灰具有火山灰活性并含有一定量的水溶性硫酸盐，有助于增加胶结性和水泥的抗硫酸盐性。工程实践中，一般根据实际情况在水泥浆液中掺入砂、黏性土、粉煤灰、水玻璃等掺合料。

9 注浆过程中如果出现影响隧道结构稳定性的问题时，一般采取降低注浆压力或采用间歇注浆、改变注浆材料或缩短注浆凝胶时间、停止注浆或调整注浆方案等措施。

8.4.5 灰土挤密桩处理黄土隧道地基时，应符合下列规定：

- 1 加固范围、桩径、桩长应结合黄土隧道基底承载力、土质情况和现场施工条件等确定。
- 2 成桩时应选用对隧道结构影响小的工艺，宜选用机械成孔法、螺旋钻法、洛阳铲法、振动法等工艺。
- 3 宜从隧道两墙脚向中间隔孔进行成桩，必要时可纵向分段进行。
- 4 桩径宜为300~600mm，桩距可为2~3倍桩径，按等边三角形布置，墙脚适当加密。
- 5 处理深度小于或等于12m时，宜采用挤土挤密成孔，挤密孔直径宜为350~450mm；处理深度大于12m时，可采用挤土挤密成孔，也可采用预钻孔。预钻孔直径宜为300~600mm，挤密后成桩直径宜为450~800mm。
- 6 灰土挤密桩中消石灰与土的体积比宜为2:8或3:7，应采用粒径不大于5mm、

CaO+MgO 含量不低于 60% 的消石灰。

7 土料宜选用粉质黏土，土料中有机物含量不应大于 5%，土粒径不应大于 15mm，不得含有冻土、膨胀土和垃圾土。

8 桩孔内填料宜采用素土、灰土或水泥土，严禁使用粗颗粒填料；应分层回填夯实，每层回填料厚度不宜大于 300mm，填料的平均压实系数不应小于 0.97，各层压实系数最小值不应小于 0.93。

9 桩顶部可铺设 300 ~ 600mm 厚的垫层，垫层材料可采用体积比 2 : 8 或 3 : 7 的灰土、水泥土。铺设桩顶垫层前，桩顶高程以上的预留松动土层应挖除或夯实。

10 施工过程中，应监测成孔、回填料质量及夯实效果，并做好施工记录。

条文说明

2 灰土挤密桩的成桩工艺需结合施工工期，综合分析选用。一般情况下选用螺旋钻法；采用振动法时，需做模拟现场试验或现场试验分析成桩扰动对隧道稳定性的影响。

3 为避免因挤压而造成相邻孔出现缩孔和塌孔现象，灰土挤密桩施工沿纵向分段进行。

4 整片处理地基时，填料孔数按 $n = A/A_e$ 计算，式中 n 为填料孔数， A 为拟处理的地基面积 (m^2)； A_e 为单个填料孔所承担的处理面积 (m^2)，正三角形布孔时， $A_e = (1.05s)^2 \pi/4$ ，式中 s 为桩间距。

5 当要求处理深度不太大时，挤土挤密成孔更加经济。当挤密法处理深度较大时，才能充分体现出预钻孔的优势（施工噪声低，振动影响小），能减少长桩施工长时间振动对隧道结构的影响。采用预钻孔挤密法施工时，在处理效果相同的条件下，不仅工序增多，而且材料增加量也较大。

8 孔内夯实灰土及其他强度较高的材料，有利于提高复合地基承载力或减少地基处理宽度的作用；湿陷性黄土地区挤密桩使用粗颗粒填料时，会增加地基的渗透性，形成过水通道，不利于防水。

8.4.6 树根桩处理黄土隧道地基时，应符合下列规定：

1 桩径宜为 150 ~ 400mm，桩长不宜小于 3m；可采用直桩或斜桩布置。

2 孔口 1.0 ~ 2.0m 范围内宜设置套筒，钻至设计桩长以下 100 ~ 200mm 宜进行清孔。

3 单桩竖向承载力宜通过单桩载荷试验确定；当无试验资料时，可按现行《建筑地基基础设计规范》(GB 50007) 的有关规定估算。

4 桩身混凝土强度等级不应低于 C25。桩体材料宜采用细石混凝土或碎石填料注浆。

5 采用碎石填料注浆时，宜采用水灰比不大于 0.55 的普通硅酸盐水泥浆。采用细石填料时，其粒径宜为 10 ~ 25mm，投入量不应小于计算桩孔体积的 0.9 倍，注浆管应提前插至孔底。

6 采用一次注浆时,起始注浆压力不宜小于1MPa,待浆液从孔底压出后,注浆压力可调为0.1~0.3MPa,直至溢出孔口后停止注浆。

7 采用二次注浆时,应在一次注浆浆液初凝后进行,注浆压力宜为1~3MPa。

8 采用间隔、间歇施工或增加速凝剂掺量等措施,防止冒浆和串孔。

9 注浆拔管后应在桩顶填充碎石,并在桩顶1~2m范围内补充注浆,桩顶高程应满足设计要求。桩顶应浇注承台或与隧道仰拱一起浇注。

10 桩体宜全长配筋,对仅承受竖向荷载的桩配筋不应小于2/3桩长。主筋宜采用直径为12~18mm的钢筋,且不少于3根,钢筋保护层厚度宜为40~60mm。

条文说明

1 树根桩加固通过压力灌浆使桩的外表面变粗糙,增加桩与土之间的附着力,使桩和基础联结成一体。具有施工场地小(平面尺寸满足1.0m×1.5m,净空高度满足2.5m即可),施工噪声和振动小,对隧道围岩扰动小,施工方便等优点。

2 一般情况下,仅在孔口处设置套筒,保证孔口处土方不塌落。对于端承桩或基底承载力特别低而影响浇筑质量时,一般设置全长套筒。

7 采用二次注浆的树根桩,需插两根注浆管。采用较大注浆压力是为了克服初凝浆液的凝聚力,并且剪裂周围土体,产生劈裂现象。浆液初凝时间根据水泥品种和外加剂掺量确定,一般控制在45~60min范围。

9 注浆拔管后孔内混凝土和浆液面会下降,为使桩顶高程满足设计要求,提出在桩顶填充碎石和补充注浆的规定。

9 防排水

9.1 一般规定

9.1.1 公路黄土隧道防排水应结合黄土地层特点、地形、地貌及水文地质条件，遵循防、排、截、堵相结合，因地制宜，综合治理的原则，妥善处理地表水和地下水，达到防水可靠、排水畅通。

条文说明

防：要求隧道衬砌结构、防水层具有防水能力，防止地下水透过防水层、衬砌结构渗入洞内。

排：隧道需要有畅通的排水设施，将衬砌背后、路面结构层下的渗水、积水排入洞内中心水沟或路侧边沟，排出洞外。排出衬砌背后的积水，能减少或消除衬砌背后的水压力，排得越好，衬砌渗漏水的概率就越小，防水也就更容易；排出路面结构层下的积水，能防止路面冒水、翻浆、结构破坏。

截：对可能渗漏到隧道的地表水等积水设置截水沟或排水沟引排。地表水要采取回填积水坑洼地、封闭地面渗漏点、设置截水沟等措施引排，减少地表水下渗；对积水采取引流措施。

堵：针对隧道围岩富水地段，采用向围岩内注浆、设堵水墙等封堵方法，将地下水堵在围岩内，防止或减少地下水流失。

地表水与地下水存在一定的联系，公路黄土隧道防排水设计需结合水文地质条件、施工技术水平、工程防水等级、材料来源和成本等，选择适宜的方法对地表水、地下水进行妥善处理，结合黄土隧道衬砌结构设计，采取可靠的防水、排水措施，使洞内外形成一个完整、通畅的防排水系统。

9.1.2 公路黄土隧道应完善地表防排水系统，防止地表水下渗。

9.1.3 公路黄土隧道设计应加强施工缝、变形缝防水。

9.1.4 公路黄土隧道基底应采取措施，排除基底积水。

9.1.5 寒冷地区公路黄土隧道防排水应做到衬砌背后不积水，不冻结。

9.2 地表防排水

9.2.1 对隧道附近的黄土陷穴、落水洞应采用回填夯实土或灌注水泥砂浆、混凝土、水泥黄土浆等方法处理，表层宜采用0.3~0.5m厚的灰土夯填封闭。严禁就近取土，避免在隧道开挖影响范围内形成凹地。

9.2.2 对隧道稳定性有影响的冲沟，应采取整平、封闭、回填等措施处治，并做好周边截水和排水设施。浅埋黄土隧道洞顶有沟谷通过时，沟底应采用混凝土铺砌，铺砌范围距隧道开挖边线净距应不小于30m。

9.2.3 公路黄土隧道浅埋段洞顶存在窖井、水渠、池塘、水浇地等时，应采取防止水体下渗的措施。

条文说明

公路黄土隧道浅埋段洞顶存在水浇地时，设计、施工需重视灌溉水下渗引起的围岩稳定性降低及次生病害，必要时需采取防止灌溉水下渗的技术措施，如水地变旱地、节水滴灌等。尤其在洞口浅埋段，需防止灌溉水下渗至隧道围岩而引发的地基湿陷沉降、拱脚沉降及路面开裂等病害。

9.2.4 地表裂缝应及时封闭，进行隔水处理。可采用表层开槽后，再夯填0.3~0.5m厚灰土的处理方法，灰土应分层夯实，并高出原地面0.1m；地表裂缝较深时，可灌注水泥砂浆。

9.3 洞口防排水

9.3.1 公路黄土隧道洞口边仰坡坡顶应设置截水沟，并应在边仰坡开挖前修建完成。

9.3.2 洞口截排水系统布设应符合下列规定：

- 1 应遵循远接远排的原则，截排水沟宜设置在边仰坡开挖线5m以外。
- 2 截排水沟尺寸应根据洞口段坡面汇水面积确定。
- 3 应结合地形、相接路基、桥梁墩台岸坡等综合设置。
- 4 截排水设施应采取基础加固和防渗漏措施。

条文说明

黄土隧道洞口截排水是一个系统工程，中间环节失效会导致排水系统失效，需结合洞口地形特征，截排水设施需远接远排，将地表水引排至工程影响范围以外；重视截水沟、急流槽、消力池等截排水设施的基础加固，实际运营中常因地表水下渗和冲刷等影响，导致坡面平台沉降和排水沟的断裂等情况，需要加强防渗漏措施以防止渗漏或不均匀沉降导致断裂失效。

9.3.3 截水沟和排水沟坡度不应小于0.5%，当纵坡过陡时，应设置急流槽或跌水连接。

9.3.4 截水沟和排水沟应采用混凝土或聚乙烯（PE）、聚氯乙烯（PVC）等材料，水沟基础应设置于稳定的地基上。当位于湿陷性黄土地层时，应进行地基处理。

条文说明

近年来，黄土地区部分隧道工程出现了因水沟开裂、沉降等导致不同程度的水害问题，考虑到混凝土施工工艺简便，施工质量易于控制，为提高排水沟的抗裂性能，截水沟、排水沟、平台水沟等要求采用混凝土浇筑。黄土地区因湿陷、冲蚀沉降导致水沟开裂进而出现水害问题较多，因此水沟基础需稳定。当地基的稳定性不能满足要求时，需采取地基换填、基础加深等措施，防止因黄土湿陷、冲蚀沉降导致水沟开裂。湿陷性黄土地段的排水沟渠需采用现浇混凝土、浆砌混凝土预制块或浆砌片石封闭，铺砌层下需设防渗土工织物，需采用将沟底和沟坡全部覆盖的全铺方式。

9.3.5 隧道施工用水宜采用稳高压供水系统，洞口处设置的高位蓄水池应采取防渗水措施，当设在洞顶或两侧时，距隧道开挖边线净距宜不小于30m。

9.4 洞内防排水

9.4.1 公路黄土隧道防水应符合下列规定：

- 1 隧道混凝土衬砌应满足抗渗要求，抗渗等级不宜小于P8，寒冷地区不宜小于P10。
- 2 防水卷材及胶黏剂应具有良好的耐久性、耐穿刺性、耐腐蚀性和耐菌性。
- 3 施工缝、变形缝应采用止水构件。

9.4.2 隧道内排水宜按地下水和清洗污水、消防污水分开排放的原则进行设计，排水系统由环向、纵向、横向排水管及排水边沟（槽）、中心排水沟、检查井等组成，排水系统应便于维护，并应符合下列规定：

- 1 环向排水管直径不宜小于50mm，外部宜采用透水材料包裹。
- 2 隧道两侧墙脚纵向排水管坡度宜与隧道纵坡一致，直径不宜小于110mm，排水管不得占用衬砌的有效厚度，并宜设置混凝土基座。
- 3 横向排水管的直径不宜小于110mm，横向坡度不宜小于1%，其纵向间距应为10~20m，地下水发育地段可适当加密。
- 4 环向、纵向、横向排水管宜通过三通连接。
- 5 湿陷性黄土地段隧道侧式暗沟或中心排水沟应做好接头防漏水措施。
- 6 中心排水沟（管）断面尺寸应根据隧道地下水涌水量、长度、纵坡等因素确定，地下水发育、易结晶的隧道中心排水沟（管）直径不宜小于600mm。
- 7 纵向排水管每间隔50m可布设一处沉砂检查井；侧式暗沟或中心排水沟（管）每100m应布设一处沉砂检查井或根据实际地质情况加密。

条文说明

湿陷性黄土公路隧道中心排水沟（管）通常采用钢筋混凝土圆管，采用预制加工，并设置渗水孔。

9.4.3 极高含水率黄土隧道宜在仰拱底部中心位置设置排水盲沟，底部应设置土工布，两侧应设置碎石反滤层。

条文说明

由于中心排水沟（管）一般设置于黄土隧道仰拱填充层内，隧道地下水丰富时，汇集到仰拱基底的地下水无法通过隧道中心排水沟（管）排出，造成基底黄土含水率增大，引起黄土地基湿陷变形或增湿变形，易出现两侧墙脚不均匀沉降，进而诱发路面隆起、开裂问题。针对公路黄土隧道出现的这些病害，甘肃、山西、陕西等地在新建或病害治理的黄土隧道仰拱底设置了排水盲沟，效果较好，未出现新的类似病害。

9.4.4 隧底有渗水的地段，路面结构底宜沿隧道纵向每隔3~8m设置横向透水盲管。

9.4.5 洞外水不应流入洞内，可在洞口设置反向排水沟或采取横向截水措施。

9.4.6 洞内排水系统宜通过钢筋混凝土管、转向（检查）井、缓冲池等设施与洞外排水系统顺接，排水系统施作完成后应对周边地表进行平整、加固处理。

9.4.7 地下水位线以下且存在明确补给来源的公路黄土隧道，应根据黄土性质、地下水发育特征，采取降、排、堵相结合的综合治水措施。

10 施工

10.1 一般规定

10.1.1 公路黄土隧道应按设计文件施工，并根据开挖后实际地质情况和监控量测信息实施动态管理。

10.1.2 公路黄土隧道施工方法应根据隧道长度、宽度、结构形式、埋置深度、掌子面稳定性、黄土含水率、设备配备、沉降控制及工期等因素综合确定。

10.1.3 公路黄土隧道施工前，应编制施工组织设计和专项施工方案，并开展施工风险评估。

10.1.4 公路黄土隧道施工场地布置应遵循因地制宜、统一规划、安全方便、节地环保的原则。必要时，应采取保证施工场地及周边边坡稳定的工程措施。

10.1.5 公路黄土隧道应采用机械开挖，并根据施工方法、施工进度等配置施工机械，组织均衡生产，提高生产效率。

10.1.6 公路黄土隧道施工应根据围岩情况和监控量测结果，针对性地采取辅助工程措施。

10.1.7 公路黄土隧道施工前，应查明影响隧道稳定的洞顶地表裂缝、冲沟、黄土陷穴、落水洞等，并应采取措施及时处治。

条文说明

由于黄土的多孔性、湿陷性，遇水易湿陷软化，其抗剪强度和抗压强度随含水率增加显著降低，水对黄土地层整体性和稳定性的危害性极大，且反应灵敏。回填、铺砌位于隧道附近的地表冲沟、陷穴、裂缝等，做好地表水的引排设施可以有效减少地表水下渗。大量黄土隧道施工期调查表明，随着隧道的掘进，黄土地层受扰动后易产生地层沉

降、地表开裂，在地表水等影响下诱发新的陷穴或坑洞，不及时跟踪调查、封闭处治，易引发进一步的病害。

10.1.8 公路黄土隧道施工应采取控制开挖进尺、初期支护及时封闭成环、施作锁脚锚杆（管）等控制隧道沉降变形的措施。

10.1.9 公路黄土隧道应做好施工用水管理，配备充足的抽水设备和排水器材，防止施工用水下渗。

10.1.10 公路黄土隧道施工中应进行监控量测，做好地表观测、洞内掌子面地质观察、地基湿陷性核查及黄土含水率等物理力学参数的土工试验。

10.2 洞口

10.2.1 公路黄土隧道洞口开挖和进洞施工应避开雨季和冻融期，宜在雨季前完成排水系统。

10.2.2 桥隧相连时，隧道洞口施工应减少相互影响。

10.2.3 便道开挖不得影响隧道洞口边坡稳定。

10.2.4 公路黄土隧道洞口施工场地应平整、硬化，不得积水。

10.2.5 公路黄土隧道应及时完成洞门及洞口工程。

10.2.6 公路黄土隧道截水沟和排水沟施工应符合下列规定：

- 1 洞顶截水沟和排水沟采用机械开挖时，应预留 0.3m 厚的土体用小型设备或人工清刷，超挖处应采用混凝土回填。
- 2 边仰坡开挖平台截水沟应与路基排水沟衔接。
- 3 截水沟和排水沟每 5 ~ 10m 宜设置沉降缝，沉降缝应充填密实，不得渗水。

10.2.7 洞口开挖与防护应符合下列规定：

- 1 洞口边仰坡应自上而下开挖，不得掏底开挖或上下重叠开挖。
- 2 应采用人工配合机械开挖，及时整修成型。

3 边仰坡应分级开挖，分级防护。

4 洞口边仰坡开挖及地表恢复应符合环境保护规定，做好水土保持。

10.2.8 公路黄土隧道进洞前，应先核查边仰坡坡体稳定情况，并应清除、加固或支挡松散体及不稳定土体。

10.3 明洞

10.3.1 公路黄土隧道洞口受地形限制出现高陡边坡或仰坡时，应及时施作明洞。

10.3.2 公路黄土隧道每1~2模的明洞衬砌应设置1道变形缝。

10.3.3 明洞防水层施作前应清除拱背的尖锐突出物，必要时可用砂浆抹平或进行打磨。

10.3.4 公路黄土隧道明洞拱背应及时对称回填，并应符合下列规定：

- 1 回填应在结构混凝土强度达到设计强度后进行。
- 2 明洞拱背回填应在防水层和排水设施施工完成后进行。
- 3 宜采用人工配合机械回填、小型机具夯实。
- 4 明洞拱背应分层回填，分层厚度不应大于0.2m，两侧高差不应大于0.6m。
- 5 明洞回填土压实度不宜小于90%。

10.4 洞身开挖

10.4.1 公路黄土隧道进洞前，应按设计要求完成边仰坡防护、超前预支护及地基处理等工作。

10.4.2 洞身开挖过程中，应根据设计文件和超前地质预报及监控量测结果，掌握掌子面地质情况，选择适宜的开挖方法，及时调整支护参数。

10.4.3 洞身可能发生掌子面失稳、掉块、片帮、坍塌、冒顶及突水等地段，应采取相应预处理措施。

10.4.4 公路黄土隧道洞身开挖宜选择利于机械化施工作业的施工方法，公路黄土隧道洞身开挖方法可按表10.4.4选取。

表 10.4.4 公路黄土隧道洞身开挖方法

围岩级别		开挖方法	
		两车道隧道	三车道隧道
IV	IV ₁	两台阶法	三台阶法（超短台阶法）
	IV ₂		
V	V ₁	两台阶法	三台阶法（超短台阶法）、中隔壁法（CD法）
		两台阶预留核心土环形开挖法	中隔壁法（CD法）、交叉中隔壁法（CRD法）、双侧壁导坑法
	V ₂	两台阶预留核心土环形开挖法、三台阶法（超短台阶法）	中隔壁法（CD法）、交叉中隔壁法（CRD法）、双侧壁导坑法
VI		交叉中隔壁法（CRD法）、双侧壁导坑法	

条文说明

黄土隧道围岩自稳能力较差，开挖后应力集中程度大，施工中通常以分部开挖法，即采用分块小断面开挖、支护及时封闭成环的方式来降低风险。尤其是公路黄土隧道，由于其开挖断面大、结构扁平、受力复杂等特点，普遍采用两台阶预留核心土环形开挖法、三台阶法（超短台阶法）、中隔壁法（CD法）、交叉中隔壁法（CRD法）、双侧壁导坑法等。基于长安大学《大跨度黄土公路隧道结构稳定性及控制技术研究》《黄土隧道修筑关键技术》《大跨度高含水率黄土公路隧道设计与施工综合技术研究》的研究成果，从控制沉降、工期、施工难易程度和造价等方面对比了各种公路黄土隧道施工方法，公路黄土隧道开挖方法对比见表 10-1 所列。

表 10-1 公路黄土隧道开挖方法对比

施工方法	重要指标对比				
	沉降	工期	施工难度	初期支护拆除情况	造价
两台阶预留核心土环形开挖法	最大	最短	简单	没有拆除	低
三台阶法（超短台阶法）	较大	短	一般	没有拆除	低
中隔壁法（CD法）	较小	较短	较复杂	拆除少	较高
交叉中隔壁法（CRD法）	较小	长	复杂	拆除多	高
双侧壁导坑法	小	最长	最复杂	拆除多	最高

10.4.5 公路黄土隧道开挖时，拱脚处和墙脚处应预留 300mm 厚土体，宜采用小型设备或人工开挖。

10.4.6 公路黄土隧道开挖断面设计预留变形量应根据监控量测结果及时调整。

10.4.7 公路黄土隧道开挖循环进尺宜为 0.5 ~ 1.5m。

10.4.8 对向开挖的公路黄土隧道，当两开挖面相距2~3倍隧道开挖宽度时，应改为单向开挖，并应及时施作停挖端的仰拱和二次衬砌；当两开挖面相距1倍隧道开挖宽度时，应撤离停挖端掌子面附近的人员和设备。

10.4.9 分离式公路黄土隧道左右洞施工存在相互影响时，应先开挖地形条件不利或围岩较差的隧道，先行洞二次衬砌和后行洞掌子面纵向距离应根据隧道间距、围岩情况及监控量测数据综合确定。

10.4.10 公路黄土隧道仰拱应利用仰拱栈桥全幅整体开挖及施作，并应符合下列规定：

- 1 应控制仰拱到掌子面的距离。
- 2 围岩自稳能力较差时，仰拱开挖长度不应大于3m。
- 3 仰拱开挖深度不应小于设计值，超挖部分应采用同级混凝土回填。
- 4 应做好排水设施，清除底面松渣。
- 5 当围岩含水率较高时，宜在仰拱开挖前采取降水措施，并应设置集水坑。
- 6 仰拱开挖后应及时施作仰拱初期支护，缩短仰拱开挖面暴露时间。

10.5 超前支护及预加固

10.5.1 公路黄土隧道超前管棚、超前小导管等的钻孔施工，不得采用水钻。

10.5.2 超前管棚、超前小导管钢管内应填充密实。

条文说明

为避免注浆浆液中水对黄土增湿作用，钢管内采用水泥砂浆或小石子混凝土填充，使管体形成钢管混凝土后打入，以提高超前导管的纵向支撑刚度。

10.5.3 掌子面超前注浆预加固、地基注浆加固前，应进行现场注浆试验，确定注浆量、浆液配比、注浆压力及施工速率等控制参数。

10.6 初期支护

10.6.1 初期支护应紧跟开挖面及时施作，并应及时封闭成环。

条文说明

初期支护是否封闭以及封闭时距掌子面的距离，对公路黄土隧道变形影响十分显

著，尤其对于浅埋大跨度新黄土隧道，初期支护及时封闭是控制拱部整体沉降的重要措施。高含水率和极高含水率地段的初期支护封闭处距离掌子面的距离不超过1~2倍开挖洞径，时间不超过20d，必要时根据监控量测数据进一步缩短封闭距离和时间。

10.6.2 喷射混凝土宜采用湿喷工艺，机械手连续喷射作业。

10.6.3 公路黄土隧道喷射混凝土配合比应满足设计强度和喷射工艺要求。喷射混凝土中宜加入能使土体表面凝固的材料。

10.6.4 公路黄土隧道喷射混凝土作业应符合下列规定：

- 1 应先从钢架两侧向钢架背部喷射作业，然后分段、分片、分层按由下而上的顺序进行。
- 2 每次喷射混凝土厚度宜控制在50~150mm，拱顶每次喷射厚度不宜超过100mm。
- 3 后一层喷射混凝土应在前一层喷射混凝土终凝后进行，后一层喷射混凝土作业前，应吹洗受喷面。
- 4 每次喷射混凝土作业结束后应及时清除回弹及掉落在拱脚的堆积废料。
- 5 喷射混凝土终凝2h后，应进行养护，养护时间应不少于7d。
- 6 公路黄土隧道喷射混凝土宜采用喷雾养护。

10.6.5 钢架轮廓尺寸应根据设计预留变形量和监控量测结果动态调整。

10.6.6 锁脚锚杆（管）应按设计要求打设，并与钢架焊接牢固，不得采用湿式成孔。

10.6.7 钢架安装时，应与围岩间留有不小于20mm的间隙，每间隔2m应采用混凝土楔块或木楔块楔紧。

10.7 二次衬砌

10.7.1 公路黄土隧道二次衬砌施工应及时施作二次衬砌仰拱及仰拱回填层，再结合监控量测结果，待隧道围岩变形基本稳定后，施作二次衬砌拱墙。

10.7.2 二次衬砌施工应采用全断面衬砌模板台车，衬砌模板台车必须具有足够的强度、刚度和稳定性。

10.7.3 仰拱二次衬砌混凝土应整体浇筑，顶部应使用弧形模板。

10.7.4 模板台车就位前应检测初期支护净空断面尺寸及相关隐蔽工程。

10.7.5 二次衬砌一次浇筑长度宜为9m。

条文说明

通过对已运营公路黄土隧道病害调查,发现采用长12m衬砌模板台车施工的公路黄土隧道二次衬砌混凝土表面开裂现象较为普遍,表面裂缝主要集中在二次衬砌长度9m附近,而采用长9m衬砌模板台车施工的黄土隧道二次衬砌表面开裂现象明显减少。

10.7.6 二次衬砌变形缝宜适当加密,拱墙衬砌与仰拱衬砌的变形缝应竖向对齐。

10.7.7 二次衬砌混凝土应采用分层浇筑工艺,应采取相应措施预防拱顶部位出现空洞。

条文说明

二次衬砌混凝土浇筑时需采用台车定位限位辅助装置、二次衬砌分层浇筑系统、衬砌拱顶灌注防空洞监测系统,确保二次衬砌混凝土质量满足设计要求。

10.7.8 二次衬砌模板台车脱模应符合下列规定:

- 1 不承受外荷载的拱、墙混凝土强度应不小于7.5MPa。
- 2 承受围岩压力的拱、墙混凝土强度应满足设计要求。

10.8 防排水

10.8.1 公路黄土隧道中心排水沟(管)施工应符合下列规定:

- 1 中心排水沟(管)基础坡度、段落坡度、单管坡度应协调一致,并应满足设计要求。
- 2 中心排水沟(管)预留泄水孔部分应采用滤水砂、砾石、碎石等透水性良好的材料设置反滤层,材料粒径应满足渗水要求。
- 3 中心排水沟(管)反滤层顶面在浇筑上部混凝土时应铺设隔离层。
- 4 中心排水沟(管)作为施工期间排水通道时,进水口应设置遮挡格栅,施工完成后应冲洗、疏通。

10.8.2 环向、纵向、横向排水盲管施工应符合下列规定:

- 1 环向排水盲管应紧贴渗水围岩表面敷设,并应采取防止水泥浆窜入堵塞排水管的保护措施;纵向设置间距应满足设计要求,在地下水丰富地段应加密设置。

2 环向、纵向、横向排水盲管应采用三通连接，横向排水盲管与中心排水沟（管）连接，应控制好各衔接部位高程及连接质量。

3 施工期间应对地下水盐类结晶等情况进行观测记录。

10.8.3 路面施工前应对排水系统进行疏通，并进行通水试验。

10.8.4 应加强施工用水管理，采取防止施工用水下渗的措施。

10.8.5 应及时引排拱脚、墙脚和仰拱底的渗水与积水。

10.8.6 集水坑、临时排水沟周边宜铺设防水材料，或采用排水管排水。

交通运输部信息公示
浏览专用

11 监控量测

11.1 一般规定

11.1.1 监控量测方案应根据黄土隧道地质条件、埋深、宽度、支护衬砌参数、施工工法及周边环境等条件综合确定。

11.1.2 监控量测应作为关键工序纳入现场施工组织，及时反馈信息。

条文说明

工程实践表明，隧道设计单独孤立地使用力学计算或经验方法都不能取得良好的效果。在施工过程中，对围岩受力和变形进行监控量测，对数据加以系统分析，并及时反馈到施工中，为隧道在不同地质条件下选择合理的开挖方法、支护方式、支护时机提供科学的依据；为修改支护参数和变更设计提供直接信息。具有确保施工安全、保证结构稳定、评价设计是否经济合理的重要作用。

11.1.3 现场监控量测方法应简单、可靠、经济、实用。监控量测数据采集和处理宜采用数据自动采集技术、远程数据传输技术及分析管理系统。

11.1.4 下穿重要的建（构）筑物时，应按地面和建（构）筑物变形控制要求明确控制基准值。

11.1.5 公路黄土隧道浅埋段应加强对地表沉降和拱部沉降的监控量测，深埋段应重视对拱脚位移的监控量测。

11.1.6 拱部沉降和净空变化监测宜采用非接触观测法。采用全站仪量测黄土隧道初期支护变形时，应符合下列规定：

- 1 全站仪测距精度应不低于 $m_s=2\text{mm}+2\times 10^{-6}$ ，测角精度应不低于 $m_\alpha=2''$ 。
- 2 当全站仪精度为 $m_s=2\text{mm}+2\times 10^{-6}$ ， $m_\alpha=1''$ 时，后视基准点与监测断面的水平距离宜为 50 ~ 150m，测站点与监测断面的水平距离宜为 40 ~ 60m。

3 当全站仪精度为 $m_s=2\text{mm}+2\times 10^{-6}$, $m_\alpha=2''$ 时, 后视基准点与监测断面的水平距离宜为 50 ~ 150m, 测站点与监测断面的水平距离不宜大于 40m。

条文说明

以往隧道工程施工中采用的变形量测方法为接触量测: 拱部沉降采用精密水准仪量测, 净空收敛采用收敛计量测。这种方法量测时劳动强度大、效率低, 而且常与施工互相干扰。当采用环形开挖留核心土法时, 在核心土未开挖前, 由于核心土的阻挡, 接触法将无法进行量测, 这会造成初测滞后, 从而丢失一部分甚至是一大部分前期隧道围岩变形信息, 因而量测结果不能真实完整地反映隧道围岩变形。尤其是随着大断面隧道的日益增多, 施工方法多变, 传统的接触量测方法已经无法满足隧道施工的要求。近些年来, 全站仪在我国的工程测量中已经得到了广泛应用, 普通全站仪的测距精度可以达到 $\pm (2\text{mm}+2\times 10^{-6})$ 甚至 $\pm (1\text{mm}+1\times 10^{-6})$, 测角精度普遍可以达到 $1''\sim 0.5''$ 。测量仪器精度的逐步提高和计算机技术的发展, 为隧道围岩变形采用全站仪非接触量测提供了必要的硬件条件。全站仪非接触量测监测隧道围岩变形的优点:

- (1) 测量时不需要接触测点, 测量过程更加快速, 降低劳动强度。
- (2) 测量过程中不干扰其他施工工序的正常有序进行。
- (3) 操作简单, 监测结果直观, 并可以及时反馈监测信息。
- (4) 每个断面可以监测多个部位的下沉值, 收敛测线的布设也更加灵活。
- (5) 克服接触量测的初测滞后性, 确保数据的完整性。

通过在隧道施工现场对传统接触量测、全站仪自由设站三维坐标量测和对边测量(RDM)进行对比试验, 分析了三种方法的测量精度和优点, 对比测试结果表明, 核心土开挖前隧道发生了 17.7% 的拱部沉降量和 28.8% 的水平收敛值, 这部分量值是接触量测法测不到的; 采用全站仪对边测量法量测隧道净空收敛比全站仪三维坐标法精度高, 故推荐采用全站仪对边测量法量测隧道变形。

对不同精度全站仪对边测量隧道变形的误差计算和分析表明, 采用条文中规定的后视基准点与监测断面的水平距离、测站点与监测断面的水平距离时, 全站仪对边测量隧道变形的精度小于 1mm, 监控量测成果能够满足黄土隧道工程建设的要求。

11.1.7 量测测点应牢固可靠、不易损坏, 易于识别, 并应采取保护措施。

11.2 量测项目选择

11.2.1 公路黄土隧道施工监控量测项目可分为必测项目和选测项目, 项目选择应符合下列规定:

- 1 必测项目: 洞内外观察、黄土含水率、拱部沉降、周边位移、地表沉降。
- 2 选测项目: 围岩压力、喷射混凝土应力、钢架应力、初期支护与二次衬砌之间

接触压力、二次衬砌混凝土应力、二次衬砌钢筋应力、纵向连接筋应力、土体内部位移、锁脚锚杆（管）应力、围岩剪切波波速、渗水压力等。

11.2.2 公路黄土隧道开挖应及时进行洞内观察、地质素描及数码成像，必要时应取样进行物理力学试验。

11.2.3 公路黄土隧道现场监控量测项目及仪器可按表 11.2.3 选取。

表 11.2.3 公路黄土隧道现场监控量测项目及仪器

序号	项目名称		仪器		测试仪器量测精度	量程
1	必测项目	洞内外观察	现场观察，数码相机、地质罗盘		—	—
2		黄土含水率	烘箱、天平、干燥器、称量盒等		0.1g	—
3		拱部沉降 (拱顶和拱脚)	精密水准仪		0.1mm	—
			全站仪		1mm	
4		周边位移	收敛计		0.01mm	—
			全站仪		1mm	
5	地表沉降	精密水准仪		0.1mm	—	
6	选测项目	围岩压力	振弦式土压力传感器		综合误差<0.1% F.S.	0 ~ 0.4MPa
7		喷射混凝土应力	振弦式混凝土应变传感器		综合误差<0.1% F.S.	±1 000με
8		钢架应力	格栅钢架	振弦式钢筋应力传感器	综合误差<0.1% F.S.	±2 000με
			型钢钢架	振弦式表面应变传感器		±2 000με
9		接触压力	振弦式土压力传感器		综合误差<0.1% F.S.	0 ~ 0.3MPa
10		二次衬砌混凝土应力	振弦式混凝土应变传感器		综合误差<0.1% F.S.	±1 000με
11		二次衬砌钢筋应力	振弦式钢筋应力传感器		综合误差<0.1% F.S.	±1 000με
12		纵向连接筋应力	振弦式钢筋应力传感器		综合误差<0.1% F.S.	±1 000με
13		土体内部位移	机械式多点位移传感器		0.07mm	30 ~ 60mm
14		锁脚锚杆轴力	振弦式锚杆测力计		综合误差<0.1% F.S.	±2 000με
15		锁脚锚管应力	光栅光纤测力锚管		综合误差<0.1% F.S.	±2 500με
16		围岩剪切波波速	声波检测仪		声时测量相对误差：电信号优于±0.5%，声信号优于±1.0%；幅值测量级线性：每 6dB 优于±0.9dB，最小分度至少为 1dB，总线性范围不低于产品技术指标要求	幅值测量范围不小于 60dB
17		渗水压力	渗压计		综合误差<0.1% F.S.	0 ~ 0.6MPa

注：F. S. 为元件的满量程。

条文说明

针对公路黄土隧道的工程特点，在现行《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660)量测项目基础上，增加了黄土含水率、锁脚锚杆轴力、锁脚锚管应力和围岩剪切波波速等项目，并给出了测试仪器精度和量程。

隧道施工过程中，初期支护拱部沉降和周边位移采用全站仪量测；二次衬砌拱部沉降采用精密水准仪量测，周边位移采用收敛计量测。其原因是隧道施工过程中初期支护变形量大，全站仪即可满足量测要求；二次衬砌施作后，隧道变形量小，全站仪不能满足精度要求，需采用量测精度小的精密水准仪和收敛计量测变形。

11.3 量测断面测点布置

11.3.1 公路黄土隧道应根据黄土类别，每50m测1次含水率，必要时可适当加密。

11.3.2 地表沉降测点应在隧道开挖前布设。地表沉降测点和隧道内测点应布置在同一断面上。无特殊要求时，地表沉降量测断面纵向间距可按表11.3.2的要求布置。

表 11.3.2 地表沉降量测断面纵向间距

隧道埋深与开挖宽度、高度	$2B < H \leq 2(B+H_1)$	$B < H \leq 2B$	$H \leq B$
纵向间距 (m)	15 ~ 30	10 ~ 15	5 ~ 10

注：H为隧道埋深；B为隧道开挖宽度；H₁为隧道开挖高度。

条文说明

在进行隧道地表沉降量测时，沿隧道横断面方向的地表沉降量测边界要求设置在隧道开挖影响范围以外，并在开挖影响范围以外设置基准点。地表沉降量测在距开挖面前方(H₁+H)处开始，直到衬砌结构封闭、沉降基本停止为止。地表沉降量测频率与周边位移和拱部沉降的量测频率相同。

地表沉降量测断面布设在由设计确定的特别重要的施工地段，包括地表有建（构）筑物地段。对施工中地表发生塌陷并经修补过的地段，以及预先探测到地层中存在建（构）筑物或空洞的施工地段，测点尽量接近建（构）筑物或空洞上方。

地表沉降测点横向间距为2~5m。在隧道中线附近测点适当加密，一般隧道中线两侧量测范围不小于(H+B)，地表有控制性建（构）筑物时，量测范围适当加宽。

11.3.3 拱部沉降测点和净空变化测点应布置在同一断面上。量测断面间距Ⅴ级围岩可按5m布置，Ⅳ级围岩可按10m布置。

11.3.4 拱顶沉降测点原则上设置在拱顶轴线附近，当跨度较大时，应结合施工方法在拱部增设测点。净空变化量测可按每台阶或每分部布置一条测线，对浅埋、偏压

或含水率较大的隧道段落可增加斜测线。不同工法非接触位移测点可按图 11.3.4 布置。

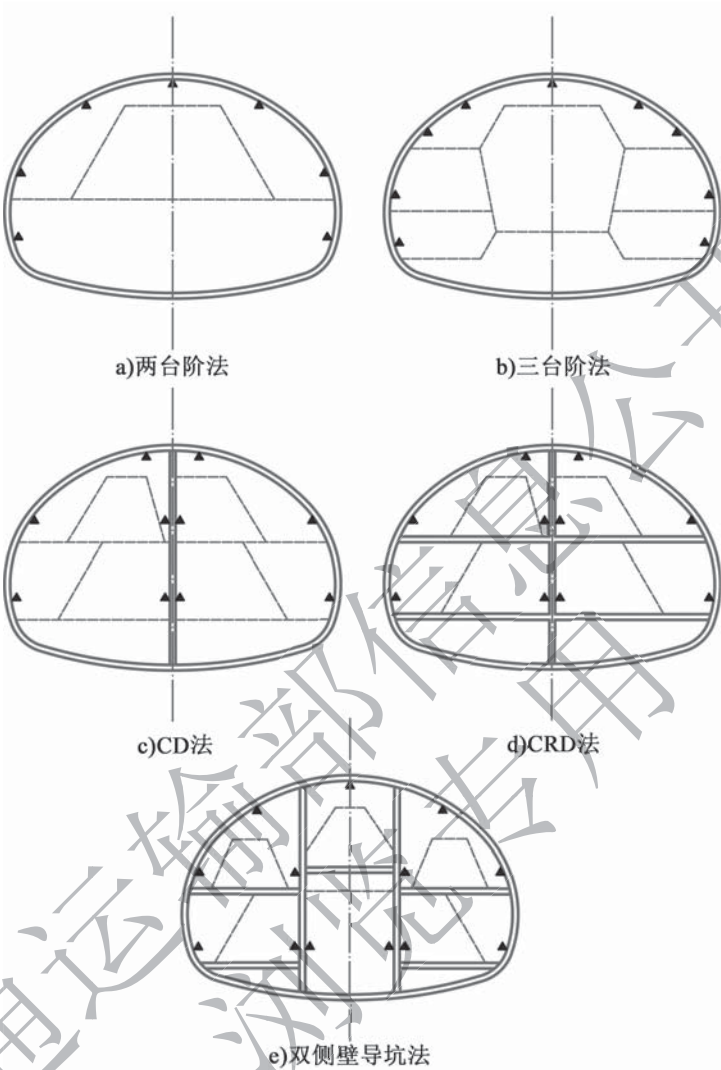


图 11.3.4 不同工法非接触位移测点布置示意

11.4 量测频率

11.4.1 必测项目量测频率应根据测点距开挖面的距离及位移速率分别确定，宜取两者中较大值。当施工状况发生变化时（开挖下台阶、仰拱或拆除临时支护等）或出现异常情况或遇到不良地质时，应增大量测频率。

条文说明

监控量测频率按表 11-1 和表 11-2 选择，并与现行《公路隧道施工技术规范》（JTG/T 3660）规定的量测频率比较取较大值。

表 11-1 按距开挖面距离确定的监控量测频率

监控量测断面距开挖面距离 (m)	(0 ~ 1) B	(1 ~ 2) B	(2 ~ 5) B	>5B
监控量测频率	2次/d	1次/d	1次/ (2 ~ 3) d	1次/ (3 ~ 7) d

注：B为隧道开挖宽度，CRD法、双侧壁导坑法开挖宽度指分部开挖宽度。

表 11-2 按位移速率确定的监控量测频率

位移速率 (mm/d)	≥5	1 ~ 5	0.5 ~ 1	0.2 ~ 0.5	<0.2
监控量测频率	(2 ~ 3) 次/d	1次/d	1次/ (2 ~ 3) d	1次/3d	1次/ (3 ~ 7) d

11.4.2 选测项目量测频率应根据设计和施工要求以及必测项目反馈的信息综合确定。

11.5 变形控制基准

11.5.1 监控量测控制基准应根据黄土地层物理力学性质、施工方法、施工安全、隧道结构的长期稳定性，以及建（构）筑物特点和重要性等因素制定。

11.5.2 施工过程中应根据监控量测反馈的信息情况，进一步调整和完善控制基准值。分部开挖法施工的隧道每分部应分别建立位移控制基准值，同时应考虑各分部之间的相互影响。

11.5.3 黄土隧道洞口、浅埋、下穿建（构）筑物等特殊地段应及时施作初期支护的仰拱，尽快施作二次衬砌仰拱及仰拱回填层，二次衬砌拱墙宜在围岩达到基本稳定时施作。

条文说明

以往黄土隧道施工要求二次衬砌紧跟，造成二次衬砌开裂非常普遍。黄土隧道围岩具有自身强度低、变形大和流变性强的特性，如果二次衬砌过早施作，围岩持续变形会导致二次衬砌承受过大的形变压力，这样在二次衬砌混凝土还未完全硬化强度不足时就承受过大的荷载，势必导致混凝土的先天“内伤”，在后续荷载作用下，隧道二次衬砌就可能会出现开裂甚至塌方，这些现象在许多工程实例中都发生过。

由于黄土隧道变形持续时间长，若不及时采取措施加以控制，必然会诱发更大的变形，造成净空侵限甚至塌方，因此，在施工时要加强初期支护，特别是初期支护的仰拱要及时施作，同时二次衬砌的仰拱要紧跟，以控制隧道发生较大的变形。在围岩达到基本稳定时施作二次衬砌的拱墙部位。

11.5.4 公路黄土隧道监控量测应按现行《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660) 的

有关规定建立等级管理、信息反馈和报告制度，并应符合下列规定：

1 实测位移值不应大于隧道的极限位移，并按表 11.5.4 位移管理等级施工。极限位移不应大于设计预留变形量，设计预留变形量应根据监控量测结果动态修正。

表 11.5.4 黄土隧道位移管理等级

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

注：U 为实测位移值， U_0 为隧道的极限位移值。

2 速率大于 1.0mm/d 时，围岩处于急剧变形状态，应加强初期支护；速率变化在 0.3 ~ 1.0mm/d 时，应加强观测，做好加固的准备；速率小于 0.3mm/d 时，围岩达到基本稳定。

3 当围岩位移速率不断下降时，围岩处于稳定状态；当围岩位移速率保持不变时，围岩尚不稳定，应加强支护；当围岩位移速率上升时，围岩处于危险状态，必须立即停止掘进，采取应急措施。

条文说明

2 通过对吴子高速公路七座黄土隧道（围岩等级为Ⅳ级和Ⅴ级）161 个有效拱部沉降测点进行统计分析，有 141 个测点的最终位移速率超过 0.2mm/d（占 87.6%），其中Ⅳ级围岩拱部沉降速率均值为 0.38mm/d，Ⅴ级围岩拱部沉降速率均值为 0.44mm/d；对 45 个有效净空收敛测线进行统计分析，有 29 个水平收敛最终位移速率超过 0.2mm/d（占 64.4%），其中Ⅳ级围岩净空收敛速率均值为 0.36mm/d，Ⅴ级围岩净空收敛速率均值为 0.43mm/d。考虑黄土隧道围岩的弹塑黏性和变形收敛缓慢的特征，从保证二次衬砌承载能力的角度，建立黄土隧道围岩蠕变本构模型，根据现场实测数据反演得到围岩蠕变参数，结合数值模拟，对初期支护不同变形速率下的二次衬砌强度安全系数进行计算，以安全系数 2.0 作为控制指标，发现小于 0.3mm/d 时初期支护基本稳定，为二次衬砌最佳支护时机。

附录 A 新近堆积黄土的判别

A.0.1 现场鉴定新近堆积黄土，应符合下列规定：

1 堆积环境：黄土塬、梁、峁的坡脚和斜坡后缘；冲沟两侧及沟口处的洪积扇和山前坡积地带；河道拐弯处的内侧，河漫滩及低阶地；山间或黄土梁、峁之间凹地的表层；平原上被淹埋的池沼洼地。

2 颜色：灰黄、黄褐、棕褐，常相杂或相间。

3 结构：土质不均、松散、大孔排列杂乱。常混有岩性不一的土块，多虫孔和植物根孔。铣挖容易。

4 包含物：常含有机质；斑状或条状氧化铁；有的混砂、砾或岩石碎屑；有的混有砖瓦陶瓷碎片或朽木片等人类活动的遗物；有时混钙质结核，呈零星分布。在大孔壁上常有白色钙质粉末，在深色土中，白色物呈现菌丝状或条纹状分布，在浅色土中，白色物呈星点状分布。

A.0.2 现场鉴定不明确时，试验指标判定应符合下列规定：

1 在 50 ~ 150kPa 压力段变形较大，小压力下具高压缩性。

2 可利用式 (A.0.2-1)、式 (A.0.2-2) 判定：

$$R = -68.45e + 10.98\alpha - 7.16\gamma + 1.18w \quad (\text{A.0.2-1})$$

$$R_0 = -154.80 \quad (\text{A.0.2-2})$$

式中： e ——孔隙比；

α ——压缩系数 (MPa^{-1})，宜取 50 ~ 150kPa 或 0 ~ 100kPa 压力下的大值；

γ ——重度 (kN/m^3)；

w ——天然含水率 (%)。

3 当 $R > R_0$ 时，可将该土判定为新近堆积黄土。

附录B 黄土地貌类型

表B 黄土地貌类型

地貌类型		亚类	地貌特征
堆积地貌	黄土高原	黄土塬	黄土高原受现代沟谷切割后，保存下来的平坦地面，周边为沟谷环绕
		黄土梁	顶面平坦，两侧为深切的冲沟，中部为长条状的黄土低丘。长数百米、数千米到上千米，宽数十米到上百米
		黄土峁	孤立的黄土丘陵，顶面平坦或微有起伏，呈圆穹状。大多数是由黄土梁进一步切割而成
	黄土平原		分布于新构造运动下降区，是由黄土堆积形成的低平原，局部发育沟谷，无梁、峁
	河谷阶地		沿河谷及大型河谷两岸分布（或断续分布），表层全部由冲积-洪积黄土等沉积物堆积的阶地
侵蚀地貌	大型河谷		形成及发展与一般侵蚀河谷相似，但其形成发展过程有时还伴随有风积黄土堆积
	冲沟		因黄土土质疏松，常伴有重力崩塌、潜蚀作用，因此发展快，其特征是沟深、壁陡、向源侵蚀作用显著
潜蚀地貌	碟形洼地		流水聚集，使黄土发生湿陷或潜蚀，引起地面下沉后形成的一种直径数米至数十米的凹地
	黄土陷穴		地表水沿黄土孔隙、裂隙下渗潜蚀形成的黄土洞穴
	黄土井		黄土陷穴向下发展，形成深度大于宽度若干倍的洞穴
	黄土桥		两个黄土陷穴之间被水流串通，在陷穴崩塌之后残存的土体呈桥状洞穴
	黄土柱		黄土沿垂直节理崩塌后残存的土柱
重力地貌	崩塌体		由于黄土冲沟深切，岸坡高陡，土体突然迅速向下崩落，在坡脚下形成的地貌形态
	黄土滑坡		黄土斜坡地带，土体在重力和地下水的作用下产生山坡变形的地貌形态

附录C 黄土湿陷性评价

C.0.1 公路隧道穿越湿陷性黄土地层时，应进行湿陷性评价，并应符合下列规定：

1 黄土的湿陷性应按室内浸水（饱和）压缩试验，在一定压力下测定的湿陷系数 δ_s 值判定，并应符合下列规定：

- 1) 当湿陷系数 δ_s 的值小于0.015时，应定为非湿陷性黄土。
- 2) 当湿陷系数 δ_s 的值不小于0.015时，应定为湿陷性黄土。
- 3) 湿陷性黄土湿陷程度划分应按表C.0.1确定。

表 C.0.1 湿陷性黄土湿陷程度划分

湿陷系数 δ_s	$0.015 \leq \delta_s \leq 0.03$	$0.03 < \delta_s \leq 0.07$	$\delta_s > 0.07$
湿陷程度	湿陷性轻微	湿陷性中等	湿陷性强烈

2 湿陷系数 δ_s 可按式（C.0.1）计算：

$$\delta_s = \frac{h_p - h'_p}{h_0} \quad (\text{C.0.1})$$

式中： h_p ——保持天然湿度和结构的土样，加压至一定压力时，下沉稳定后的高度（mm）；

h'_p ——上述加压稳定后的土样，在浸水（饱和）作用下，附加下沉稳定后的高度（mm）；

h_0 ——土样的原始高度（mm）。

3 湿陷系数 δ_s 测定方法除应符合现行《公路土工试验规程》（JTG 3430）的有关规定外，尚应满足下列要求：

1) 测定湿陷系数 δ_s 的试验终止压力，基底以下10m以内的土层应采用200kPa。10m以下至非湿陷性黄土层顶面应采用300kPa。

2) 对压缩性较高的新近堆积黄土，基底以下5m以内的土层，终止压力宜采用100~150kPa；5~10m和10m以下至非湿陷性黄土层顶面，终止压力应分别采用200kPa和上覆土的饱和自重压力。

C.0.2 自重湿陷系数 δ_{zs} 可按式（C.0.2）计算：

$$\delta_{zs} = \frac{h_z - h'_z}{h_0} \quad (\text{C.0.2})$$

式中： h_z ——保持天然湿度和结构的土样，加压至该土样上覆土的饱和自重压力时，下沉稳定后的高度（mm）；

h'_z ——上述加压稳定后的土样，在浸水（饱和）作用下，附加下沉稳定后的高度（mm）；

h_0 ——土样的原始高度（mm）。

C.0.3 湿陷性黄土场地自重湿陷量计算值 Δ_{zs} 的计算，应符合下列规定：

1 湿陷性黄土场地自重湿陷量计算值 Δ_{zs} ，可按式（C.0.3）计算：

$$\Delta_{zs} = \beta_0 \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i \tag{C.0.3}$$

式中： δ_{zsi} ——隧道基底下第*i*层土的自重湿陷系数；

h_i ——隧道基底下第*i*层土的厚度（mm）；

β_0 ——因地区土质而异的修正系数。在缺乏实测资料时，陇西地区可取1.80，陇东、陕北、晋西、宁夏地区可取1.40，关中地区可取0.90，其他地区可取0.40。

2 湿陷性黄土隧道地基自重湿陷量计算值 Δ_{zs} 应自隧道基底算起，至其下非湿陷性黄土层的顶面为止。埋深10m范围内自重湿陷系数 δ_{zs} 小于0.015，埋深10~15m的自重湿陷系数 δ_{zs} 小于0.02，埋深大于15m的自重湿陷系数 δ_{zs} 小于0.025时，不应累计计算。

C.0.4 湿陷性黄土场地的湿陷类型，应根据自重湿陷量实测值 Δ'_{zs} 或计算值 Δ_{zs} ，按表C.0.4确定。

表 C.0.4 湿陷性黄土场地的湿陷类型

场地湿陷类型	评价指标
	自重湿陷量（ Δ'_{zs} 或 Δ_{zs} ）
非自重湿陷性黄土场地	Δ'_{zs} 或 $\Delta_{zs} \leq 70\text{mm}$
自重湿陷性黄土场地	Δ'_{zs} 或 $\Delta_{zs} > 70\text{mm}$

注：当自重湿陷量的实测值和计算值出现矛盾时，应按自重湿陷量的实测值判定。

C.0.5 湿陷性黄土隧道地基受水浸湿饱和时，湿陷量计算值 Δ_s 的计算，应符合下列规定：

1 湿陷量计算值 Δ_s 可按式（C.0.5）计算：

$$\Delta_s = \sum_{i=1}^n \beta \delta_{si} h_i \tag{C.0.5}$$

式中： δ_{si} ——隧道基底下第*i*层土的湿陷系数；

h_i ——隧道基底下第*i*层土的厚度（mm）；

β ——考虑隧道基底以下黄土受水浸湿可能性和侧向挤出等因素的修正系数。当缺乏实测资料时，隧道基底以下0~5m深度范围内，可取1.5；5~10m深度范围内，非自重湿陷性黄土场地可取1.0，自重湿陷性黄土场地可取工

程所在地区的 β_0 值且不小于1.0；10m以下至非湿陷性黄土层顶面，在非自重湿陷性黄土场地的陇西、陇东、陕北、晋西、宁夏地区可取1.0，其余地区取工程所在地区的 β_0 值，在自重湿陷性黄土场地，可取工程所在地区的 β_0 值。

2 湿陷性黄土隧道地基湿陷量计算值 Δ_s ，应自隧道基底算起，在非自重湿陷性黄土场地应计算至基底以下10m（或地基压缩层）深度为止；在自重湿陷性黄土场地，应自隧道基底算起，至其下非湿陷黄土层的顶面止。其中，埋深10m范围内自重湿陷系数 δ_{si} 小于0.015，埋深10~15m的自重湿陷系数 δ_{si} 小于0.02，埋深大于15m的自重湿陷系数 δ_{si} 小于0.025时，不应累计计算。

C.0.6 公路黄土隧道地基湿陷等级，应根据自重湿陷量实测值 Δ'_s 或计算值 Δ_s 和湿陷量计算值 Δ_s ，按表C.0.6确定。

表 C.0.6 公路黄土隧道地基湿陷等级

湿陷类型		非自重湿陷场地	自重湿陷场地	
自重湿陷量计算值 Δ_{zs} (mm)		$\Delta_{zs} \leq 70$	$70 < \Delta_{zs} \leq 350$	$\Delta_{zs} > 350$
湿陷量计算值 Δ_s (mm)	$50 < \Delta_s \leq 100$	I (轻微)	I (轻微)	—
	$100 < \Delta_s \leq 300$		II (中等)	
	$300 < \Delta_s \leq 700$	II (中等)	II (中等) 或 III (严重)	III (严重)
	$\Delta_s > 700$	II (中等)	III (严重)	IV (很严重)

注：对 $70\text{mm} < \Delta_{zs} \leq 350\text{mm}$ 、 $300\text{mm} < \Delta_s \leq 700\text{mm}$ 一档划分，当 $\Delta_s > 600\text{mm}$ 、 $\Delta_{zs} > 300\text{mm}$ 时，可判为III级，其他情况可判为II级。

附录D 公路黄土隧道围岩物理力学参数表

表D 公路黄土隧道围岩物理力学参数表

围岩 级别	重度 γ (kN/m ³)	孔隙比 e	天然含水率 w (%)	弹性抗力 系数 k (MPa/m)	变形模量 E (MPa)	泊松比 μ	内摩擦角 φ (°)	黏聚力 c (MPa)
IV ₁	14 ~ 21	0.6 ~ 0.8	3 ~ 15	140 ~ 260	15.27 ~ 27.07	0.28 ~ 0.31	25 ~ 35	0.050 ~ 0.160
IV ₂	13 ~ 18	0.65 ~ 0.9	5 ~ 17	100 ~ 190	14.09 ~ 20.61	0.31 ~ 0.34	20 ~ 30	
V ₁	13 ~ 17	0.7 ~ 1	5 ~ 25	70 ~ 160	12.25 ~ 18.02	0.34 ~ 0.37	15 ~ 25	0.020 ~ 0.050
V ₂	12 ~ 16	0.8 ~ 1.1	10 ~ 25	40 ~ 120	7.84 ~ 14.64	0.37 ~ 0.40		
VI	11 ~ 16	0.9 ~ 1.2	17 ~ 30	<40	0.88 ~ 3.87	0.40 ~ 0.43	<20	<0.020

注：表中当黄土含水率取较大值时，力学参数取较小值。

本规范用词用语说明

1 本规范执行严格程度的用词，采用下列写法：

- 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”，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，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

- 1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定”。
- 2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》(×××)的有关规定”。
- 3) 当引用本规范中的其他规定时，表述为“应符合本规范第×章的有关规定”“应符合本规范第×.×节的有关规定”“应符合本规范第×.×.×条的有关规定”或“应按本规范第×.×.×条的有关规定执行”。