

公路隧道维修加固技术规程

Code of practice for maintenance and reinforcement of highway tunnel

2024-03-28 发布

2024-06-01 实施

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	2
5 调查、检测与勘察	2
5.1 一般规定	2
5.2 调查	3
5.3 检测	3
5.4 勘察	4
6 加固处治	4
6.1 一般规定	4
6.2 加固材料	4
6.3 总体设计	6
6.4 荷载	6
6.5 结构计算	8
6.6 围岩加固	9
6.7 提高衬砌承载力	10
6.8 增设支点	12
7 不良地质处治	13
7.1 一般规定	13
7.2 洞口山体滑动	13
7.3 软弱地基	13
7.4 高水压	14
7.5 岩溶	14
7.6 膨胀性围岩	15
8 裂缝修补及渗漏水处治	15
8.1 一般规定	15
8.2 裂缝修补	15
8.3 渗漏水处治	16
9 监控量测	16
9.1 一般规定	16
9.2 施工期间监测	17
9.3 运营期间监测	17
附录 A（规范性） 洞口横向滑坡荷载	19
A.1 滑体下切隧道荷载	19

A.2 滑体越顶隧道荷载.....	21
附录 B（规范性） 洞口纵向滑坡附加荷载	23
参考文献.....	25

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广西壮族自治区交通运输厅提出并宣贯。

本文件由广西交通运输标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：广西交通设计集团有限公司、广西路建工程集团有限公司、广西北投交通养护科技集团有限公司、西南交通大学。

本文件主要起草人：周祥、孙朋雷、覃冠华、李臣光、郑寰宇、骆俊晖、宋伟、周东迎、邓胜强、禰仕航、梁海深、吴春伟、郭懿、王涛、李晓敏、蒙东升、蒋雅君、梁峻海、陈广深、唐国军、李洋溢、畅振超、吴勇、王鸣冠、吴雄波。

公路隧道维修加固技术规程

1 范围

本文件界定了公路隧道维修加固技术的相关术语与定义,规定了公路隧道维修加固的总体要求以及调查、检测与勘察、加固处治、不良地质处治、裂缝修补及渗漏水处治、监控量测的技术要求。

本文件适用于广西壮族自治区行政区域内钻爆法山岭公路隧道土建结构的维修加固设计、施工和监测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 700 碳素结构钢
- GB/T 1499.1 钢筋混凝土用钢 第1部分:热轧光圆钢筋
- GB/T 1499.2 钢筋混凝土用钢 第2部分:热轧带肋钢筋
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB 50367 混凝土结构加固设计规范
- GB 50728 工程结构加固材料安全性鉴定技术规范
- JTG 3370.1 公路隧道设计规范 第一册 土建工程
- JTG F90 公路工程施工安全技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

隧道维修加固 tunnel maintenance and reinforcement

对发生隧道病害的围岩、结构、构件采取工程措施,使其满足安全性、耐久性及使用功能要求。

3.2

换拱 replace lining

对原衬砌拱墙结构整体或局部拆除后重新施作的加固方法。

3.3

增设套拱 add arch sleeve

沿原衬砌表面增设拱形混凝土结构,与原衬砌形成共同承载体的加固方法。

3.4

粘贴抗拉材料 paste tensile material

对隧道衬砌表面粘贴钢板、复合纤维材料等抗拉材料,提高衬砌结构抗弯能力的加固方法。

3.5

增设支点 add fulcrum

通过型钢、锚杆、锚索、钢管等临时或永久结构增加衬砌支撑点，提高衬砌抵抗继续变形的承载能力。

3.6

内嵌钢架 embedded steel arch

通过对既有衬砌切槽，埋设钢架，并采用高强混凝土、喷射混凝土等填料填塞使得钢架与既有衬砌形成整体从而提高承载力的加固方式。

3.7

叠合式套拱 folding arch

通过采取设置连接钢筋、锚栓、混凝土凿毛界面、胶粘接等连接措施，使得既有结构与新增套拱接触界面能够传递剪力形成整体共同受力的套拱。

3.8

复合式套拱 composite arch

新增套拱与既有结构之间界面未进行处理，新增套拱与既有结构主要通过径向传力形成协同受力的套拱。

3.9

高水压 high water pressure

隧道承受压力水头超过5m，可造成衬砌承压、路面变形的水压。

4 总体要求

- 4.1 隧道的维修加固应根据检测评定、评估结论或鉴定论证结论及委托方提出的要求进行。
- 4.2 隧道的维修加固宜综合考虑其安全、技术、经济、环保、交通影响等因素进行方案比选，避免不必要的拆除或更换。
- 4.3 维修加固后达到的功能要求及设计工作年限，应根据隧道结构破坏后果的严重性、结构的重要性，由委托方与设计方按实际情况共同商定。
- 4.4 对于维修加固过程中可能出现倾斜、失稳、过大变形或坍塌的隧道结构，应采取临时性安全措施。
- 4.5 对于可靠度要求高、维修加固经济性差、耐久性不足、无法彻底解决病害诱因的隧道段，应结合安全性、经济性、可靠性进行维修加固与拆除重建方式的比选。
- 4.6 隧道维修加固应根据工作年限和使用环境进行设计。
- 4.7 隧道维修加固应积极稳妥地采用新技术、新材料、新设备、新工艺，多方位提升隧道数字化、信息化、智能化维修加固水平。
- 4.8 隧道维修加固除应符合本文件的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

5 调查、检测与勘察

5.1 一般规定

- 5.1.1 隧道维修加固前调查应符合 5.2 规定，并根据调查结果分析是否需要进行检测及勘察。
- 5.1.2 调查、检测与勘察应相互结合，互为补充，为隧道维修加固提供充分依据。
- 5.1.3 调查、检测与勘察应根据维修加固的需要及时动态调整内容和方法。

5.1.4 隧道维修加固的调查可作为勘察或检测的一部分，检测与勘察应有明确结论。

5.2 调查

5.2.1 应调查搜集病害隧道勘察、设计和施工资料，经常性检查、定期检查、特殊检查报告及运营期间保养维修、病害处治等资料。

5.2.2 隧道维修加固的调查应根据实际条件，向参与修建的相关人员了解施工全过程实际情况，包括施工期间的掌子面照片、开挖方法及施工期监控量测、地质预报、变更设计及特殊地质处理和专项设计等资料。

5.2.3 隧道维修加固应调查隧址段的地形地貌、工程地质、水文地质、地表水以及植被变化情况。

5.2.4 隧道洞身病害段存在裂缝的，应对裂缝的长度、宽度、形态、分布情况进行调查，并将调查结果进行记录。

5.2.5 隧道洞口段出现病害的，应重点调查洞门墙的变形开裂情况、洞门基础的埋置情况、二次衬砌的变形开裂情况、隧道边仰坡的稳定情况、隧顶山体的变形及开裂情况、洞口排水系统的工作情况。

5.2.6 隧道路面出现隆起病害时，应结合雨季雨量重点调查隧道排水系统的工作状况、二次衬砌仰拱或底板设置情况、隧底地质情况、地下水水压情况以及隆起路段附近出水口、相邻隧道排水系统工作情况，必要时调查山体可能存在的裂隙水通道。

5.2.7 内装饰、电缆沟槽等隧道附属设施出现病害时，应调查与附属设施相邻隧道主体结构的病害类型、形态。

5.2.8 隧道衬砌结构存在渗漏水时，应对渗漏水的位置、出水形态、裂缝发育情况、排水系统情况、衬砌表面质量等进行调查。

5.2.9 隧道维修加固的调查结果应汇总成册，并根据调查结果对下一步工作提出要求及建议。

5.2.10 隧道维修加固的调查结果应与勘察、检测结果充分融合，为病害成因分析、维修加固设计与施工提供依据。

5.3 检测

5.3.1 应根据病害情况对变形情况、裂缝情况、衬砌质量情况、围岩情况进行病害检测。

5.3.2 变形检测应对隧道净空断面、平面线型、纵面坡度、沉降高程变化、附属设施变形情况进行测量及检测。

5.3.3 裂缝检测应对裂缝的长度、宽度、深度及裂缝宽度的变化情况进行检测，裂缝深度可采用超声波等物探并结合钻孔取芯验证的方法进行检测。

5.3.4 衬砌质量检测应对衬砌表面病害、保护层厚度、衬砌强度、衬砌厚度、钢筋锈蚀、碳化深度、仰拱施工质量、仰拱充填层情况进行检测。

5.3.5 应对衬砌背后围岩状况进行检测，宜采取无损检测、钻孔检测的方式查清围岩破碎、空洞、含水等地质情况。

5.3.6 检测评定报告成果应包括：

- 对所测专项给出明确的检测结论，对所测专项涉及的相关标度进行评定；
- 对缺损或病害的成因、范围、数量、程度等情况的分析；
- 隧道结构的养护维修及病害处治建议。

5.4 勘察

- 5.4.1 现有调查及检测结果无法支撑隧道维修加固设计时，应进行补充勘察。
- 5.4.2 补充勘察应包括水文地质勘察、工程地质勘察，勘察手段一般包括资料搜集、地质调查、物探、钻探、现场力学试验以及必要的监测、测量工作。
- 5.4.3 因围岩压力持续增长而需要加固的围岩段，应补充取样钻孔，并进行孔内测试，重新判定围岩级别，并提出物理力学指标。
- 5.4.4 存在软弱地基病害段，应补充钻孔，查明软弱层类型、深度、范围，可采用平板载荷试验等原位测试方法测试地基承载力特征值。
- 5.4.5 存在高水压病害段，应查明地下水补给、地下水位、水质情况，评价地下水的影响，计算涌水量，提出水压折减系数。
- 5.4.6 隧道洞口山体滑坡病害段，应补充钻探及物理力学试验，查明工程地质、水文地质、滑动面，并对滑体的稳定性及滑体对隧道的作用进行评价。
- 5.4.7 膨胀性围岩隧道，应查明膨胀性岩土的物理力学性质及对隧道结构的影响。
- 5.4.8 岩溶区隧道的维修加固，应综合采用物探、钻探等手段查明岩溶的发育情况：
 - 对与隧道相交的溶洞，查明隧道周边完整岩盘保护层厚度、溶洞内充填物状况；
 - 对隐伏岩溶，查明隐伏岩溶的位置、空间分布，评价隐伏溶洞对隧道的影响；
 - 对存在水害地段，进行水文调查，查明岩溶水的补给、径流和排泄情况，评价岩溶水对隧道的影响。
- 5.4.9 勘察成果应包含以下内容：
 - 勘察内容、勘察方法、勘察手段；
 - 围岩判定结果、地下水情况、不良地质情况、物理力学参数；
 - 病害的主要原因推测；
 - 病害段维修加固的处治建议。

6 加固处治

6.1 一般规定

- 6.1.1 隧道的加固设计应以原勘察设计、施工、检测资料为基础，结合调查、检测与勘察成果进行成因分析，针对性的提出设计方案。
- 6.1.2 应对病害进行分类，并针对性的制定病害处治方案，病害处治方案应从安全、技术、经济、环保、交通影响、施工可行性等方面进行方案比选。
- 6.1.3 加固设计不应改变隧道的原设计建筑限界。必须改变原设计建筑限界时，应进行行车安全性、行车速度、通行能力等方面的论证。
- 6.1.4 涉及到预留洞室、电缆沟的加固处治应结合机电、消防设施改造进行。
- 6.1.5 加固处治施工前应制定专项施工方案，专项施工方案应符合 JTG F90 的要求。
- 6.1.6 对于规模及影响较大的加固设计，应采取多方案设计，择优推荐。

6.2 加固材料

- 6.2.1 加固材料的品种规格和性能指标应符合国家、行业现行相关标准的规定并满足设计要求。
- 6.2.2 衬砌加固采用的喷射混凝土强度等级不应低于 C25，模筑混凝土强度等级宜比原结构强度提高

一级，且不应低于 C25，补偿收缩混凝土强度等级不应低于 C30。

6.2.3 钢筋混凝土中的钢筋，应符合 GB/T 1499.1、GB/T 1499.2 的规定，锚杆预应力筋宜采用预应力螺纹钢；植筋应采用热轧带肋钢筋，不应采用光圆钢筋。

6.2.4 粘贴钢板、钢带宜采用 Q355 级钢材，型钢、钢管宜采用 Q235 级、Q355 级钢材，钢材的性能应符合 GB/T 700 和 GB/T 1591 的规定，钢材的性能设计值应按 GB 50017 的规定采用，重要结构的焊接构件，应采用 Q235-B 级、Q355-C 级钢材。

6.2.5 纤维复合材料可采用碳纤维、玻璃纤维及芳纶纤维，其品种和性能应符合表 1 的规定。

表1 纤维复合材料主要力学性能指标

纤维类别		性能项目					
		抗拉强度 标准值 MPa	弹性模量 MPa	断裂 伸长率 %	弯曲 强度 MPa	纤维复合材料 混凝土正拉黏 结强度 MPa	层间剪切 强度 MPa
碳纤维	高强度 I 型	≥3400	≥2.4×10 ⁵	≥1.6	≥700	≥2.5，且为混 凝土内聚破坏	≥45
	高强度 II 型	≥3000	≥2.0×10 ⁵	≥1.5	≥600		≥35
玻璃纤维	S 型（高强）	≥2200	≥1.0×10 ⁵	≥2.5	≥600		≥40
	E 型（无碱）	≥1500	≥7.2×10 ⁵	≥1.8	≥500		≥35
芳纶纤维	高强度 I 型	≥2100	≥1.1×10 ⁵	≥2.2	≥400		≥40
	高强度 II 型	≥1800	≥0.8×10 ⁵	≥2.6	≥300		≥30

6.2.6 注浆材料可采用水泥(砂)浆、水泥~水玻璃浆、超细水泥浆、水溶性聚氨酯浆液、丙烯酸盐浆液等，水溶性聚氨酯浆液性能指标见表 2，丙烯酸盐浆液性能指标见表 3，其他材料参见有关规范要求。

表2 水溶性聚氨酯浆液性能指标

性能项目		性能要求
浆液性能	黏度 (MPa·s)	<1000
	抗渗指标 (MPa)	>0.9
	遇水膨胀率 (%)	≥20
与混凝土黏结强度 (MPa)		≥1.1
结石体抗压强度 (MPa)		<1.5

表3 丙烯酸盐浆液性能指标

性能项目		性能要求	
		I 型	II 型
浆液性能	黏度 (MPa·s)	≤10	
	渗透系数 (cm/s)	≤1×10 ⁻⁶	≤1×10 ⁻⁷
	遇水膨胀率 (%)	≥30	
固砂体抗压强度 (MPa)		≥0.2	≥0.4

6.3 总体设计

- 6.3.1 结构加固方法应配合使用裂缝修补技术、锚固技术、防锈蚀技术和防排水设施恢复技术。
- 6.3.2 加固设计应结合原结构的实际受力状态，充分考虑加固后组合结构的应变滞后、协同受力、及结合面连接问题。
- 6.3.3 加固设计应对交通组织、监控量测、临时加固措施等提出安全、技术要求。
- 6.3.4 加固设计应安全可靠、易于实施，采取有效措施，确保新旧结构间连接可靠，并加强对原有构件的保护。
- 6.3.5 应对病害类型进行分类，根据病害类型针对性处治，病害处治设计见表4。

表4 隧道病害处治设计分类

病害	特征	设计重点
非结构性裂缝	浅层裂缝、收缩裂缝、温差裂缝、张开的施工缝、温差裂缝	以封闭提高耐久性为主
施工缺陷	二次衬砌空洞、漏筋、混凝土不密实、防水系统失效、排水系统堵塞、混凝土不密实、施工冷缝	以注浆、凿除恢复为主
承载力不足	结构性裂缝、衬砌大变形、衬砌压裂崩落、附属设备掉落、材料劣损破坏	提高结构承载力
软弱地基	路面沉降、路面隆起、电缆沟挤裂、衬砌不均匀沉降、路面变形损坏	进行地基处理
高水压	突水突泥、衬砌开裂、路面拱起、喷水、渗漏水	结构加强、排水、围岩加固等
洞口山体滑坡	山体位移、结构阻滑段受力集中、洞门结构位移破坏	减载、结构加强、控制推移变形
膨胀性压力	各方向挤压结构、变形量大、反复加卸载	围岩加固、结构加强、排水措施、圆形轮廓

6.4 荷载

- 6.4.1 由环境、材料、施工或设计等因素引起的隧道病害，在围岩压力变化不超10%时，隧道加固宜按新建隧道计算荷载。
- 6.4.2 隧道病害由外力引起，病害无继续发展趋势时，荷载计算应符合以下规定：
- 结构存在轻微破损时，按新建隧道计算荷载；
 - 结构存在破坏或较严重破坏时，按新建隧道低一级围岩的物理力学参数计算。
- 6.4.3 隧道病害由外力引起且尚在发展时，荷载计算应符合以下规定：
- 计算围岩压力时，采用至少低一级围岩的物理力学参数进行计算；
 - 由地下水压力引起衬砌破损时，荷载计算考虑衬砌外围水压力的影响，当隧道病害段水文地质条件复杂且地下水压力较大时，进行专项研究；
 - 膨胀性围岩、软岩形变产生的压力根据塑性变形理论及施工措施估算围岩形变压力，可能引起隧道衬砌结构严重破坏时，进行围岩压力专项研究；

——滑坡引起隧道衬砌结构破损较严重时，通过坡体稳定性分析确定边坡滑动对隧道衬砌结构产生的附加荷载。

6.4.4 隧址区因相临近隧道、边坡、构筑物等施工造成隧道产生病害时，应根据隧道与临近施工的隧道、边坡、构筑物的空间位置关系进行荷载专项研究，评估爆破振动、边坡卸荷、隧道开挖造成的荷载变化。

6.4.5 衬砌背后空洞注浆或围岩注浆产生的荷载，应包括注浆压力荷载和浆液自重荷载。注浆压力荷载可按线性方式分布计算；浆液自重荷载宜根据填充的浆液高度、重度进行计算。

6.4.6 洞口山体滑动时应计算滑体产生的附加荷载，宜符合以下规定：

——滑体大角度横向下切隧道且采取了有效措施控制隧道纵向变形时，按附录 A 的规定进行横向滑动荷载计算；

——滑体小角度纵向下切隧道且采取了有效措施控制横向变形时，按附录 B 的规定进行纵向滑动荷载计算，计算时可结合施工缝、隧道围岩、滑面的位置及工程经验确定下滑力扩散系数；

——下滑方向与隧道斜交时，宜根据下滑力在纵横向的分力分别按照附录 A、附录 B 计算附加荷载并进行叠加。

6.4.7 运营期抗水压复合式衬砌的水压荷载应由二次衬砌承担，施工期初期支护的水压荷载应结合临时排水条件、排水系统排水能力及工程经验综合分析确定。运营期抗水压复合式衬砌二次衬砌的水压力荷载可按式（1）计算，水压力折减系数可按表 5、表 6 取值。

$$P = \beta \gamma_w H \dots\dots\dots (1)$$

式中：

P ——水压力荷载标准值，单位为千帕（kPa）；

β ——折减系数；

γ_w ——水的重度，单位为千牛每立方米（kN/m³）；

H ——作用水头，单位为米（m）。

表5 岩溶隧道水压力折减系数

出水形态	围岩破碎程度	堵水加固圈	折减系数
岩溶区地下水主管道离隧道较远，呈现溶孔涌流、裂隙节理渗流状态	完整及较完整	完整或加固后隔水岩盘 > 8 m	0~0.2
		完整或加固后隔水岩盘 < 8 m	0.2~0.4
	较破碎、破碎、极破碎	加固后堵水圈 > 8 m	0.2~0.4
		加固后堵水圈 < 8 m	0.4~0.6
岩溶主管道离隧道较远，支管道离隧道较近或与隧道相交，地下水呈现涌流状态	完整及较完整	完整或加固后隔水岩盘 > 8 m	0.2~0.4
		完整或加固后隔水岩盘 < 8 m	0.4~0.6
	较破碎、破碎、极破碎	加固或堵塞后堵水圈 > 8 m	0.4~0.6
		有效堵水圈 < 8 m	0.6~0.8
岩溶地下水过水主通道或大型溶洞涌水	岩溶填充物充填	加固或堵塞后堵水圈 > 5 m	0.7~0.9
		有效堵水圈 < 5 m	0.9~1.0
	无岩溶填充物或局部岩溶填充物充填		1.0
注1：未采取加固措施的管道流，水压力折减系数取 1.0。			
注2：水文条件较为复杂时，结合流场分析综合确定水压力折减系数。			

表6 泥砂岩隧道水压力折减系数

出水形态	围岩破碎程度	堵水加固圈	折减系数
汇水、储水主通道离隧道较远，隧道处呈现孔隙流、裂隙节理渗流状态	完整及较完整	完整或加固后隔水岩盘>8m	0~0.2
		完整或加固后隔水岩盘<8m	0.2~0.4
	较破碎、破碎、极破碎	加固后堵水圈>8m	0.2~0.4
		加固后堵水圈<8m	0.4~0.6
汇水、储水主通道离隧道较远，支通道离隧道较近或与隧道相交，地下水呈现涌流状态	完整及较完整	完整或加固后隔水岩盘>8m	0.2~0.4
		完整或加固后隔水岩盘<8m	0.4~0.6
	较破碎、破碎、极破碎	加固或堵塞后堵水圈>8m	0.4~0.6
		有效堵水圈<8m	0.6~0.8
隧道处于地下水过水、储水主通道	较破碎、破碎、极破碎	加固或堵塞后堵水圈>5m	0.7~0.9
		有效堵水圈<5m	0.9~1.0

注：水文条件较为复杂时，结合流场分析综合确定水压力折减系数。

6.4.8 隧道衬砌设置深部泄水孔时，可对抗水压衬砌段的水压荷载进行折减，按式（2）、（3）计算，隧道建成后渗水孔设计流量峰值应小于隧道排水系统的最大排水能力。

$$P = \beta_0 \beta_{\gamma_w} H \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta_0 = 1 - \frac{Q}{Q_0} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

β_0 ——计入渗水量的水压折减系数；

Q ——隧道建成后渗水孔设计流量峰值，单位为立方米每秒（ m^3/s ）；

Q_0 ——开挖后毛洞状态下的实测流量峰值或运营时高水压状态下对应的排泄流量值，单位为立方米每秒（ m^3/s ）。

6.4.9 因隧道围岩长期风化、劣化造成隧道病害时，计算围岩压力时宜按在运营期可能产生的最大劣化程度考虑围岩级别、物理力学参数。

6.5 结构计算

6.5.1 当原衬砌已接近丧失承载能力时，加固后的衬砌结构验算不宜考虑原衬砌的作用。

6.5.2 隧道病害计算模型应符合以下规定：

- 衬砌厚度不足，按隧道衬砌的实际厚度进行计算；
- 按实测的材料弹性模量、抗压强度和抗拉强度值进行计算；
- 采用荷载结构法计算时，衬砌背后空洞处不计围岩压力和地层抗力；采用地层结构法计算时，空洞按实际几何尺寸建模分析；
- 结构存在裂缝，贯通裂缝可采用“塑性铰”模拟；素混凝土衬砌受拉区开裂，采用有效面积计算；钢筋混凝土衬砌受拉区开裂，开裂部分拉应力全部由钢筋承担，混凝土采用有效面积计算。

6.5.3 采用套拱加固时，计算应符合以下规定：

- 采用叠合式套拱时，按整体受力进行计算其内力；

- 叠合式套拱承载力验算可参照 JTG 3370.1 进行验算，宜考虑结构传力界面的应力滞后的不利影响，叠合式结构的承载力取值不宜大于计算值的 0.9 倍；
 - 采用复合式套拱时，可不考虑新增套拱和原有结构的剪切作用，按照径向传力模型或根据经验给予不同的分配比例进行套拱内力计算；
 - 复合式套拱的验算应采取既有结构与套拱分别验算，可参照 JTG 3370.1 进行验算。
- 6.5.4 采用粘贴钢板和粘贴纤维复合材料加固时，加固层和原衬砌结构宜按无相对滑移、变形协调状态考虑，进行结构验算时，验算方法按照 GB 50367 进行验算。
- 6.5.5 锚杆加固衬砌结构，采用地层结构法计算时，锚杆宜采用杆单元或实体单元进行模拟；采用荷载结构法计算时，锚杆宜采用弹簧单元进行模拟。
- 6.5.6 采用荷载结构法计算时，围岩弹性抗力系数应根据实际围岩情况测定；无实测资料时，可按 JTG 3370.1 选取。
- 6.5.7 衬砌背后空洞注浆后，结构内力计算应计入原空洞处的围岩弹性抗力。
- 6.5.8 围岩采用注浆加固时，宜对加固范围的围岩按承载拱计算，承载拱和衬砌共同承担围岩压力。
- 6.5.9 当采用多种加固方法处治时，宜考虑前序方法对围岩力学性能的改善及衬砌结构承载能力的提高进行加固计算。
- 6.5.10 洞口洞门加固计算应符合以下规定：
- 边仰坡采用锚杆、锚索、抗滑桩等加固措施时，验算加固后的稳定性；
 - 洞口有危岩体分布或边仰坡有崩塌可能时，计算预测落石的运动轨迹、范围及对结构的影响；
 - 采取防护网措施时，对防护网的布设位置、范围、强度等进行分析；
 - 加固后的洞门端墙按照 JTG 3370.1 对结构及整体稳定性进行计算。

6.6 围岩加固

- 6.6.1 围岩加固可采用地表注浆、洞内注浆以及增设锚杆等加固方法。
- 6.6.2 地表注浆适用于洞口段或洞身浅埋段，洞内注浆适用于岩体破碎、空洞段，锚杆加固适用于 II~IV 级围岩。
- 6.6.3 地表注浆灌浆孔应根据病害特点进行布孔，布孔深度在隧道两侧宜深入潜在滑裂面以内，在隧道洞身范围内宜距离初期支护不小于 50 cm。
- 6.6.4 洞内注浆加固施工应按由下向上、由少水处向多水处、先两端后中间的顺序施工；地下水富集、有水压的段落，宜先设置泄水孔排水，再进行注浆。
- 6.6.5 洞内注浆钻孔施工，既有衬砌部分钻孔应采用回转式钻孔。围岩钻进过程中易塌孔时，宜采用跟管钻进工艺，注浆结束后，应按设计要求封孔，封孔材料应能与原衬砌进行粘结。
- 6.6.6 注浆前应进行注浆速度、注浆压力、配合比等参数试验，注浆对素混凝土衬砌产生的压力不宜大于 0.1 MPa，对钢筋混凝土产生的压力不宜大于 0.2 MPa，注浆可造成衬砌破坏、失稳时，应对衬砌采用临时加固措施。
- 6.6.7 注浆材料应根据功能需要进行选择，一般情况下可采用水泥（砂）浆，岩体孔隙、裂隙较小时可采用超细水泥浆，有堵水要求时可采用化学浆液、水泥—水玻璃浆。
- 6.6.8 注浆过程中发生异常，可采取降低注浆压力、间歇注浆、调整注浆材料等手段进行施工。注浆结束后宜采取钻孔取芯法等方法对注浆效果进行检查，检查孔应封填密实。
- 6.6.9 注浆施工宜充分考虑其对排水系统的不利影响，应采取减小对排水系统的影响。注浆结束后应对原排水系统进行检查，存在堵塞、破坏现象时，应进行疏通、恢复或采取其他可靠措施。
- 6.6.10 采用锚杆加固时，宜与既有衬砌配合使用，锚杆的布置宜按照梅花形布置，间距不宜低于 1 m。

锚杆宜采用全长粘结型锚杆，锚杆孔内宜采用高强水泥浆进行灌孔。锚杆的长度宜采取类比、理论分析、数值分析综合确定，锚杆超过设计加固圈的长度不宜小于 1 m。

6.6.11 围岩加固施工应制定质量控制方案，加强施工管控及验收。

6.7 提高衬砌承载力

6.7.1 应根据病害类型、净空条件、既有衬砌承载力、补强程度确定提高承载力的方法，可采取粘贴抗拉材料、内嵌钢架、增设套拱、喷锚支护、换拱等，具体可参照表 7 选用。

表7 提高衬砌承载力方法

加固方式	适用类型	承载特点
粘贴抗拉材料	表层弯拉结构性裂缝	利用材料抗拉强度，主要为表层处理
内嵌钢架	素混凝土结构、内圈净空限制	利用嵌入钢架与既有衬砌形成组合承载结构
增设套拱	内圈净空可以利用、内圈净空无限制	利用净空再增加一层衬砌
喷锚支护	局部缺陷、内圈净空可以利用	利用喷锚支护与围岩、既有衬砌形成协同受力
换拱	无法满足长期承载的要求、软弱基础 高水压等处治需换拱	破除旧衬砌，重新施作衬砌承载

6.7.2 粘贴钢板（带）、粘贴复合纤维材料加固，符合以下规定：

- 粘贴钢板（带）、粘贴复合纤维材料加固适用于局部抗拉强度不足的情况，在与既有衬砌有效粘结的情况下，可利用粘贴钢板（W 钢带）增大衬砌刚度和抗拉能力；
- 粘贴钢板（带）、粘贴复合纤维材料应采用锚栓、结构胶等方法与既有衬砌有效锚固，保障与既有结构的协调变形能力；
- 粘贴在衬砌面上的钢板（带），其外表面应进行防锈蚀处理。表面防锈蚀材料对钢板及胶粘剂应无害；
- 粘贴在混凝土构件表面上的纤维复合材料，不应直接暴露于阳光或有害介质中，其表面应进行防护处理。表面防护材料应对纤维及胶粘剂无害，且应与胶粘剂有可靠的粘结强度及相互协调的变形性能；
- 粘贴钢板（带）、粘贴纤维复合材进行加固时，其长期使用的环境温度不应高于 60℃，黏贴用的结构胶粘剂相关技术参数可按 GB 50728 执行；
- 粘贴钢板（带）、粘贴纤维复合材加固的既有衬砌，其现场实测混凝土强度等级不应低于 C20，混凝土表面的正拉粘结强度不应低于 1.5 MPa；
- 纤维复合材料、钢板（带）粘贴前，应清除衬砌表面的剥落、疏松、蜂窝、腐蚀等劣化部分及附着物；
- 粘贴钢板（带）锚栓施工应按照孔位标定、钻孔、清孔、植入锚栓的顺序进行施工，钻孔应清理干净、保持干燥，与钢筋位置冲突时，应适当调整钻孔位置；
- 粘贴钢板应采用压力注胶法进行粘贴施工，注胶前应先用封边胶将钢板周围封闭，注胶应按从下至上的顺序进行；
- W 钢带宜采用涂胶法或压力注胶法进行粘贴施工，采用涂胶法施工时，涂刷的胶层厚度不应小于 5 mm，粘贴时应适当加压至有胶体从钢带两边流出；

- 粘贴纤维复合材料施工时，基面底胶应涂抹均匀，不应漏刷、流淌或有气泡，胶面应保持平整，有毛刺时，应打磨平顺并补胶，胶涂刷完毕静置固化至不触变时，再进行下一步工序，若涂刷时间超过 7 d，应清除原底胶，重新施作底胶；
- 粘贴多层纤维复合材料时，应待上层指触干燥后及时粘贴下一层，各层搭接位置不应在同一截面，每层搭接位置的净距应大于 200 mm。

6.7.3 内嵌钢架加固应符合以下规定：

- 内嵌钢架加固应根据既有衬砌的厚度、需要提高承载力幅度、施工安全性确定钢架的型号、间距、设置范围，内嵌钢架加固段应向相邻段落延伸 1 m~2 m；
- 内嵌钢架的开槽宽度大于钢架的宽度应不小于 5 cm，开槽深度不宜大于原二次衬砌厚度的 2/3，开槽深度应满足钢架保护层厚度要求；
- 内嵌钢架宜全断面布置或环形闭合，当仅布置拱圈断面时，拱脚应设置大锁脚或增加横撑。内嵌钢架开槽槽内宜采用自密实补偿收缩混凝土进行填充；
- 内嵌钢架宜配合纵向钢板（带）使用，钢板（带）宜与钢架及既有衬砌有效粘结；
- 嵌入钢架施工宜采用机械切割工艺进行开槽，开槽时应采取跳槽施工并对开槽部位衬砌加强观测，必要时采取钢管、钢架支撑等临时措施；
- 槽内填充自密实补偿收缩混凝土时，自密实补偿收缩混凝土应搅拌均匀，分层连续浇筑，槽内应填充密实与原衬砌混凝土应平顺连接。

6.7.4 增设套拱加固应符合以下规定：

- 增设套拱前应对建筑限界进行复核，侵入建筑限界时，应研究调整隧道的运营技术标准；
- 套拱可采用钢筋混凝土、型钢混凝土结构，其厚度、间距、布置范围应根据病害特点布置；
- 套拱的布置范围应结合承载力要求和基础稳定情况确定，当刚度要求高、地基稳定性差时，宜设置仰拱，未设置仰拱时，应采取锁脚、横撑等限制拱脚变形的措施。套拱基础落在电缆槽，应设置锁脚，并将底部施工平整；
- 套拱的变形缝宜与既有衬砌相同，套拱混凝土强度等级不应低于 C30；
- 套拱与既有衬砌的结合应根据协同受力模式不同采取不同处理方式。采用叠合式套拱时，为使既有衬砌与套拱形成整体共同受力，应采用凿毛、植筋、铺设钢筋网等措施使新旧混凝土形成整体结构；
- 采用型钢混凝土套拱时，型钢间应采用钢板条连接提高其纵向稳定性，型钢的间距宜控制在 0.5 m~1.2 m；
- 模筑混凝土套拱宜采用模板台车施工，混凝土应振捣密实，施工缝、变形缝应做好防水处理；
- 复合式套拱加固施工时，应按设计要求施工防排水系统，并做好与原防排水系统的衔接。

6.7.5 喷锚支护加固应符合以下规定：

- 喷锚支护可用于局部缺陷处理，配合型钢混凝土提高结构承载力；
- 喷锚支护进行局部加固时，喷射混凝土应与钢筋网、锚杆等配合使用，锚杆长度不应小于 3 m，喷射混凝土可通过凿毛、植筋与周边混凝土锚固；
- 喷射混凝土进行整体加固时，应全断面布置，喷混凝土宜与钢架及锚杆配合使用，锚杆间距宜为 1 m~2 m，锚杆长度宜穿过既有衬砌不小于 3 m，锚杆宜与钢架进行连接，拱脚应设置锁脚或横撑；
- 锚杆钻孔时应采用回转式钻孔，钻孔内可采用自膨胀类灌浆材料；
- 喷射混凝土厚度不宜小于 5 cm，必要时可采用钢纤维喷射混凝土；

——喷锚支护施工时，钢筋网应与锚固筋连接牢靠，当采用双层钢筋网时第二层钢筋网应在第一层钢筋网被喷射混凝土全部覆盖后进行铺挂。

6.7.6 换拱加固符合以下规定：

——根据病害类型、程度、范围不同，换拱可分为整体换拱和局部换拱，换拱设计时根据需要选用合理的换拱类型；

——应根据衬砌病害情况、地质条件、施工环境，确定衬砌换拱范围、结构形式、支护参数；

——换拱后新建衬砌宜采用钢筋混凝土结构，当建筑限界满足要求时，不宜拆除既有初期支护；

——局部换拱时，更换范围宜向需更换病害范围外扩大不小于 300 mm，拱部衬砌宜对称更换，应采取凿毛、植筋、局部增设锚杆等措施，提高新旧混凝土的结合性；

——局部采用混凝土换拱时，宜采用现浇补偿收缩混凝土，设置抗裂钢筋网；

——拆除换拱前应进行预加固，预加固可根据情况采取周边临时支撑、围岩加固、锚杆锚索等措施，应对换拱段落段前后设置一定距离的临时支护措施，确保结构和施工的安全；

——换拱拆除施工应编制专项施工方案，拆除衬砌宜采用机械切割、静态爆破、凿除等工艺，减少对周边围岩与衬砌的影响；

——换拱施工应纵向分段、间隔施工，各分段拆除前可在边界采用切割机切割出深度为 5 cm~10 cm 的分界线；

——换拱施工应按照先拱圈后仰拱、先拱部后边墙的顺序进行拆除，需拆除原初期支护时，应及时进行喷射混凝土、架设钢架、打设锚杆等后续施工工序；

——拱部每次拆除的纵向长度，V级围岩不宜大于 1m，IV级围岩不宜大于 2m，III级围岩不宜大于 3m，接近不拆除段落前，宜在分界处解除纵向 0.5m~1m 范围的衬砌，断开两段衔接；

——拆除仰拱时，应先拆除路面结构及附属设施后，可采用静态开挖、松动爆破等分层拆除仰拱填充及仰拱结构，仰拱拆除纵向分段长度应根据病害情况确定，不宜超过 3 m；

——拱部不拆除仅拆除仰拱时，应采用锁脚、支撑纵梁、临时支撑等安全措施，每次拆换长度宜结合围岩稳定性确定，不宜超过 3 m；

——衬砌混凝土宜采用模板台车浇筑施工，换拱段落短时可采用小模板浇筑施工，应满足衬砌表面平整度要求。

6.7.7 提高承载力施工应制定质量控制方案，加强施工管控及验收。

6.8 增设支点

6.8.1 当已建成二次衬砌持续开裂或已建成初期支护持续变形时，可采用增设支点的方式进行加固。

6.8.2 支点位置宜选择在向隧道净空方向挠曲的部位，包括二次衬砌内表面开裂区、初期支护钢架向内挠曲区、拱脚内收敛区。

6.8.3 二次衬砌开裂段可采用预应力锚索、预应力锚杆增设支点，锚索、锚杆应与二次衬砌或初期支护钢架有效锚固。

6.8.4 临时加固增设支点时，宜与横撑、钢套拱、钢斜撑配合使用，临时支撑间应设置纵向连接，提高侧向稳定性。

6.8.5 临时钢套拱与既有衬砌间应设置钢垫板，钢斜撑与横撑、钢套管接触处宜进行焊接。

6.8.6 钻孔造成二次衬砌背后防水层破损的，应采取抗渗漏措施。

6.8.7 增设多个支点进行永久加固时，宜综合考虑结构的病害分布、病害成因、加固后的受力状态，合理布设支点的位置。

6.8.8 增设支点施工前应编制施工组织方案，并对支点处新增支撑与既有结构的连接提出质量控制要

求。

7 不良地质处治

7.1 一般规定

7.1.1 因不良地质引起的隧道病害，处治方案应根据不良地质的具体类型、影响程度、工程地质及水文地质条件综合确定。

7.1.2 因不良地质引起的隧道病害，应以治理源头为重点，降低不良地质对衬砌结构产生的不利影响。

7.1.3 当不良地质的处治规模较大时，应对洞内处治和洞外处治两种方法进行比选论证，合理选择处治方法。

7.1.4 不良地质处治施工应编制专项施工方案，存在较大施工安全风险时，应进行专项风险评估。

7.2 洞口山体滑动

7.2.1 隧道洞口山体滑动为浅层滑动、洞内结构承载能力满足要求时，可采取卸载、回填反压、山体加固等措施进行治理。

7.2.2 隧道洞口山体产生滑动、山体下切隧道、推移洞门墙时，应采取山体治理、洞内加固、洞门墙加固等综合治理措施。

7.2.3 对滑体进行卸载时，卸载部位宜集中在为滑体提供动力的范围，卸载后隧道洞顶覆土厚度不宜小于 5 m，因卸载形成的边坡应与山体地形平顺过渡，并对边坡进行必要的防护，确保边坡稳定。

7.2.4 对滑体进行加固时，可采取注浆，增设锚杆、锚索等措施进行加固。锚固段位于隧道影响范围内时，应制定措施消除其对隧道的不利影响。

7.2.5 洞门及洞口明洞抗滑力不足时，可在洞门墙处设置翼墙或墙前抗滑桩，增强其阻滑能力。

7.2.6 洞内衬砌因滑体下切开裂时，应对山体处治后的受力情况进行分析，根据分析结果对衬砌采取裂缝处治、提高承载力等处理措施。

7.2.7 山体深层滑动面穿过隧道衬砌时，可采取抗滑桩、隧道洞口回填反压、抗滑翼墙等综合措施。

7.2.8 洞口山体处治后，应进行坡面防护及绿化，并设置完善的截、排水措施。

7.2.9 山体卸载开挖，优先采用机械开挖，需要进行爆破时，应采用松动弱爆破的方式。

7.2.10 山体卸载施工过程中，应加强施工组织，做好拦截防护。

7.2.11 滑坡处治完成后，应恢复地表截、排水系统。

7.3 软弱地基

7.3.1 软弱地基病害段处治前应查明软弱地基的类型、岩土力学参数、结构病害形态及发展趋势。

7.3.2 软弱地基的处治应与结构措施配合使用，重点控制软弱地基的失稳和持续变形造成结构的进一步破坏。

7.3.3 存在软弱洞渣时，可采用低标号混凝土换填处治，开挖过程中应分段开挖，减小对衬砌拱脚的扰动。

7.3.4 无仰拱地段存在较薄的遇水软化层时，宜采取增设仰拱的方式进行基础处理，增设的仰拱可采用植筋的方式与既有拱圈连接成整体，增设仰拱施工期间，既有衬砌宜增设锁脚及临时横撑。

7.3.5 一般可采用微型桩进行地基处理，微型桩可采用钢管桩、树根桩等形式。微型桩可根据地质条件采用预成孔灌浆成桩法、后压浆粘结成桩法。微型桩顶部宜设置传力垫台，垫台应有效支托衬砌结构。

7.3.6 存在松散块石时，可采用注浆小导管对松散块石进行注浆，注浆过程中应预留排气孔。

7.3.7 存在松散砂层、软塑黏土层，且厚度较大时，可采用旋喷桩进行旋喷注浆加固，旋喷施工完成后，无仰拱段应增设横向板，有仰拱段应对因旋喷施工的仰拱进行加固。

7.3.8 软弱层深度较深，基础存在长期沉降、不均匀沉降问题时，可采用桩板支托衬砌的方式处治软弱地基。桩板的布置方式要考虑桩的施工可行性、板的受力特点以及与对拱圈的有效支托问题。

7.3.9 软弱地基段的衬砌加固方式应与软弱地基的处治方式相适应，拱圈与基础部分应有可靠的传力方式。

7.4 高水压

7.4.1 高水压病害段处治前应查清高水压的来源、影响范围、病害发展趋势等基本情况。

7.4.2 高水压病害段应采取结构措施、截排水措施以及围岩加固等综合措施进行处治。

7.4.3 在不影响生态，工程规模可控时，可采取地表改沟、截流、排洪隧洞等进行降压。

7.4.4 不具备完全解决地下水的补给、排泄问题条件时，应充分利用隧道既有的排水系统，设置泄水孔、汇水槽、集水横洞等导流设施，导流设施应与隧道既有排水设施有效衔接。隧道既有排水设施排水能力不足时，宜进行排水设施改造，提高其排水能力。

7.4.5 高水压病害段可分段处治，根据涌水区域可分为端头段、抗水压段、毗邻影响区，抗水压段的衬砌应具备抗水压能力，端头段应具备减小水压窜水的能力，毗邻影响区作为过渡段处理。

7.4.6 抗水压端头段及抗水压段衬砌应按照抗水压设防进行加固，抗水压段衬砌宜考虑水压不均匀分布的不利影响，抗水压段应设置泄水设施。

7.4.7 抗水压毗邻影响区衬砌应进行加固，其抗水压能力不宜小于抗水压段的一半，纵向设置长度不小于 5 m，并设置泄水孔。

7.4.8 高水压病害段具备条件时，可对围岩进行注浆加固。注浆材料选择时，应考虑水压对注浆施工的影响。注浆施工可根据地下水的流动性进行工艺选择，地下水可能造成浆液流失时，宜采用快速固化的水泥水玻璃双液浆注浆工艺。

7.4.9 高水压处治施工宜选择水压小、波动不大的季节进行施工，施工中应采取泄水、抽排水等措施。

7.5 岩溶

7.5.1 岩溶不良地质造成隧道产生病害时，应根据勘察、施工、检测、病害现象等分析岩溶不良地质对隧道衬砌的作用类型，并据此进行加固设计施工。

7.5.2 岩溶不良地质可根据岩溶空穴、岩溶充填物、岩溶水三种类型考虑其对隧道的不利影响，岩溶充填物产生软弱地基问题时，可按 7.3 规定处治；岩溶水产生高水压时，可按 7.4 规定处治。

7.5.3 岩溶空穴塌落对隧道衬砌产生冲击荷载时，可采取钻孔泵送混凝土或灌注砂浆设置防护层，并在防护层后吹砂形成缓冲层。

7.5.4 岩溶空穴段在既有衬砌结构后形成塌落堆积体，造成结构承载力不满足要求时，可在增加临时支撑加固后采取压力灌浆对塌落堆积体进行固结，固结后的塌落堆积体不能有效分散既有衬砌受力时，宜配合衬砌结构加固措施。

7.5.5 既有隧道穿越溶洞洞壁，溶洞洞壁对既有隧道衬砌产生偏压造成病害时，可通过设置锚杆、预应力锚索、回填反压平衡等措施，解决既有隧道结构偏压承载问题。

7.5.6 软塑、可塑岩溶充填物造成隧道衬砌产生病害时，宜优先采取提高衬砌承载能力的措施。岩溶充填物具有膨胀性时，其处治方法可按 7.6 规定处治。

7.5.7 岩溶水排水系统应根据峰值流量、平均流量合理考虑其排泄路径，并符合以下规定：

——岩溶水造成隧道病害时，应优先采取以排为主的措施；

- 裂隙岩溶水可采用封堵措施，按 8.3 规定处治；
- 岩溶水的排水可利用既有路面边沟，必要时可凿槽引排入中央排水系统或增设排水沟；
- 岩溶水峰值流量大、平均流量小时，可在既有排水系统的基础上设置集水廊道、缓冲架空层等构造，对岩溶水峰值流量进行消峰；
- 一般措施无法解决岩溶水问题时，宜采用排水隧洞引排隧道范围的岩溶水。

7.5.8 岩溶水因含泥砂量大，可能造成隧道排水系统进一步淤积堵塞时，宜在病害段设置沉砂设施、抽砂、冲洗等设备，沉砂设施、机电设备宜利于维护。

7.6 膨胀性围岩

7.6.1 膨胀性围岩造成隧道衬砌严重损伤，无法持续承载时，宜对衬砌进行换拱。换拱符合以下规定：

- 断面形状宜调整为圆形或接近圆形；
- 宜采用复合式衬砌，初期支护及二次衬砌均应设置仰拱，二次衬砌及仰拱应采用钢筋混凝土结构，其承载能力应满足承载膨胀压力的要求；
- 应提高预留变形量，初期支护宜采用可收缩的钢架，预留变形量及钢架收缩变形量宜根据围岩情况进行确定。

7.6.2 围岩膨胀性较为轻微，仅造成隧道衬砌小范围开裂时，可对衬砌结构进行加固。衬砌加固符合以下规定：

- 对膨胀围岩进行加固，加固范围应包括拱顶、边墙及仰拱范围，加固方式可采取全环注浆、长锚杆、预应力锚索、钢管桩等措施；
- 结合围岩加固情况，对既有隧道衬砌进行补强，提高衬砌结构的承载力；
- 无仰拱段落可增设钢筋混凝土仰拱，钢筋混凝土仰拱应与既有衬砌拱脚可靠连接。

7.6.3 隧道拆除重建段及新增仰拱段的防排水设计应遵循堵排结合、综合治理的原则，减少地下水与膨胀岩体的接触。

8 裂缝修补及渗漏水处治

8.1 一般规定

8.1.1 裂缝存在渗漏水时，应分析两者的成因关系，结合特征采取一种或多种措施协同处治。

8.1.2 裂缝修补前应对裂缝的类型进行研判，区分结构性裂缝和非结构性裂缝。

8.1.3 渗漏水处治主要针对漏水量小、影响范围小、不具备形成过高水压的段落，存在高水压或地下水排泄不畅问题时，应先治理后再进行渗漏水处治。

8.1.4 当渗漏水严重且排水对环境的影响较大时，宜先进行围岩注浆堵水，再进行结构渗漏水处治。

8.1.5 裂缝处漏水时，应先对渗漏水处治后再进行裂缝病害处治。

8.2 裂缝修补

8.2.1 在进行分析判定后，非结构性裂缝可进行裂缝修补，结构性裂缝应在维修加固后进行裂缝修补。

8.2.2 非结构性裂缝宽度不大于 0.2 mm 时，可采用表面封闭处理。

8.2.3 结构性裂缝及宽度大于 0.2 mm 的非结构性裂缝，可采用注射法进行裂缝处理，注射法注浆宜采用低压注浆，压力不宜大于 0.1 MPa，需要加大压力时宜结合工艺试验进行确定。

8.2.4 裂缝修补材料符合以下规定：

- 裂缝的封闭及补强可采用改性环氧树脂类、改性丙烯酸醋类、改性聚氨醋类等的修补胶液及配套打底液、修补胶和聚合物注浆料，其安全性指标应符合 GB 50728 规定；
- 活动裂缝的修补及混凝土与其他材料接缝界面干缩性裂隙的封堵可采用无流动性的有机硅酮、聚硫橡胶、改性丙烯酸醋、聚氨醋等柔性嵌缝密封胶类修补材料；
- 裂缝宽度大于 1.0 mm 的静止裂缝可采用超细无收缩水泥注浆料、改性聚合物水泥注浆料以及不回缩微膨胀水泥等无机胶凝材料类修补材料；
- 裂缝表面的封护与增强可采用无碱玻璃纤维、耐碱玻璃纤维或高强度玻璃纤维织物、碳纤维织物或芳纶纤维等纤维复合材料及与其适配的胶粘剂。

8.2.5 注射灌浆修补裂缝时，可根据裂缝深度采取骑缝灌浆、斜缝灌浆方式，灌浆孔宜交叉布置，间距可为 200 mm~300 mm，裂缝灌浆前应对裂缝凿槽并采用胶凝材料封堵，灌浆后应对灌浆孔进行封孔。

8.2.6 裂缝处治施工前，应对缝口表面进行处理，使基面平顺、干燥、无附着物，处理范围沿裂缝两侧宽度均不应小于 50 mm。

8.2.7 活动裂缝应在维修加固不再发展后再修补表面缺陷及装饰，裂缝的表面修饰方案应结合混凝土面的色差情况进行，修补后的表面宜与衬砌表面协调。

8.3 渗漏水处治

8.3.1 渗漏水处治应遵循堵排结合、综合治理的原则，一般可采取导水、堵水、涂刷防水层、截水、排水等技术方法。

8.3.2 隧道排水能力不足时，应采取截、排水、堵水措施，存在高水压时应进行高水压病害处治后再进行渗漏水处治。

8.3.3 渗漏水处治符合以下规定：

- 大面积渗漏水可采取灌浆止水、增设泄水孔、开槽导水、增加横向导水管等综合措施；
- 浸渗、滴漏时，宜采用导水法处治；
- 渗漏水状态为涌流、喷射时，宜降低水位后采用导水法处治；
- 变形缝、施工缝处渗漏水处治应根据渗漏水情况采用导水法、增设泄水孔、沟槽注浆止水法等技术方法；
- 渗漏水处治开槽时应以环向开槽为主，应避免进行斜向、纵向开槽，减少开槽范围。

8.3.4 当衬砌背后存在较大空洞时，宜采用衬砌背后空洞注浆进行处治。

8.3.5 存在面状渗水且混凝土不密实时，可采用针孔灌浆对局部疏松段落进行堵水。

8.3.6 渗漏水处治前应对原排水系统进行检查，存在堵塞、破坏现象时，应进行疏通、恢复。

9 监控量测

9.1 一般规定

9.1.1 维修加固施工期间应进行监测，维修加固完成后可根据病害情况进行运营期监测。

9.1.2 维修加固施工期间监控量测宜采用自动化监测与人工监测相配合的方式，运营期监测宜采用自动化监测的方式。

9.1.3 需要进行运营期监测时，维修加固段的监控量测的布点及监测项目宜按照永临结合的原则进行，运营期有效监测时长应根据病害情况及影响时间确定，一般不宜小于 2 年。

9.2 施工期间监测

9.2.1 维修加固施工期间应对病害段衬砌及相邻段既有衬砌进行监控量测，具体可根据病害类型参照表 8 进行选择。

表8 施工期间监测项目表

病害类型	必测项目	选测项目	专项监测
非结构性裂缝、施工缺陷	拱顶下沉、净空收敛	—	—
承载力不足	拱顶下沉、净空收敛、拱脚变形	混凝土应力、围岩压力、裂缝变化	地表建构筑物监测、振动监测、深层测斜
软弱地基	拱顶下沉、净空收敛、拱脚变形、路面变形	混凝土应力、围岩压力、裂缝变化、路面开裂	
高水压		混凝土应力、围岩压力、裂缝变化、水压监测、路面开裂	
洞口山体滑坡	滑体表层位移、拱顶下沉、净空收敛、拱脚变形、路面变形	滑体支护结构应力、隧道混凝土应力、围岩压力、裂缝变化、水压监测、路面开裂	

9.2.2 隧道换拱的初期支护监测内容应包含沉降、收敛变形监测。

9.2.3 既有衬砌裂缝监测应包括裂缝宽度变化以及衬砌的沉降、收敛变形。

9.2.4 处于持续变形的衬砌，在加固期间应增设表面应变计，监测衬砌应力变化情况。

9.2.5 隧道穿越岩溶溶腔病害段，溶洞稳定影响施工安全时，应监测溶洞壁位移。

9.2.6 洞口山体滑动段宜埋设测斜孔，对施工期间洞口山体滑动情况进行监测。

9.2.7 具备形成高水压的段落宜进行水压监测。

9.3 运营期间监测

9.3.1 维修加固段运营期间监测点应利用施工期间的监测点，运营期的监测可根据病害类型参照表 9 进行选择。

表9 运营期监测项目表

运营期监测	选测项目	专项监测
承载力不足	混凝土应力、裂缝变化	地下水变化监测 地表建构筑物监测 深层测斜
软弱地基	混凝土应力、裂缝变化、路面变形	
高水压	混凝土应力、裂缝变化、路面变形、水压	
洞口山体滑坡	滑体支护结构应力、混凝土应力、裂缝变化、路面变形、洞门墙变形、山体位移	

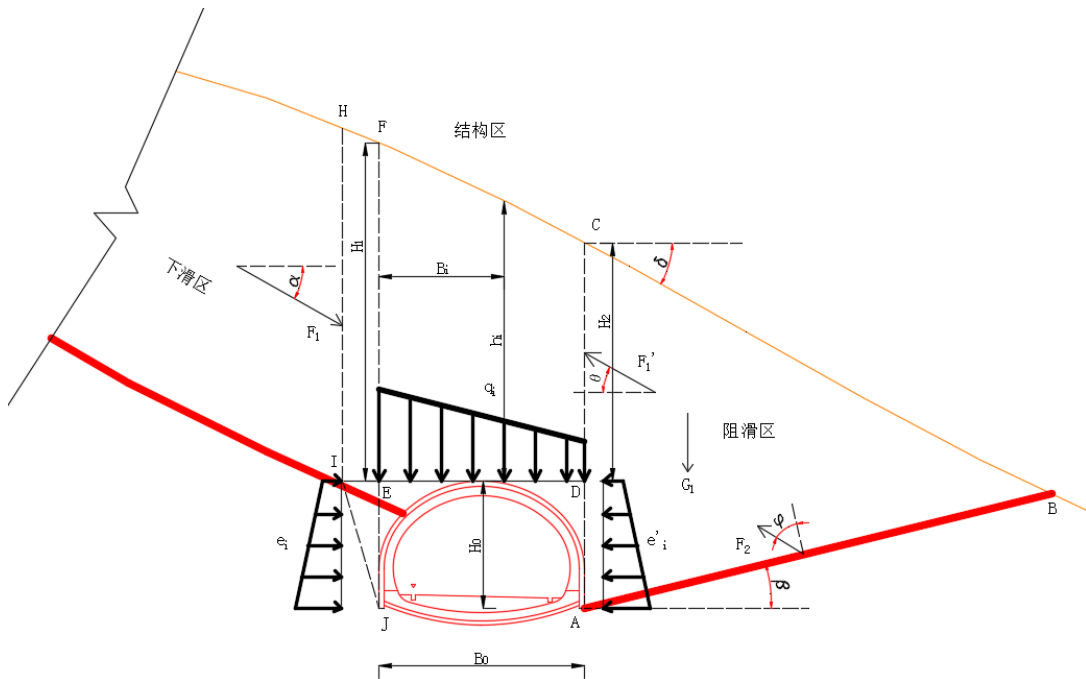
9.3.2 抗水压衬砌段宜对二次衬砌后水压、初期支护后水压进行监测，渗压计应采用钻孔埋设的方式进行，渗压计应设过滤装置，渗压计的数据应进行自动化采集。

- 9.3.3 抗水压段、换拱段初期支护、换拱段二次衬砌等宜设钢筋计、应变计等进行监测。
- 9.3.4 洞口山体滑动时，可根据需要对地表位移及深层变形进行监测。
- 9.3.5 高水压段排水系统因堵塞造成高水压时，宜对隧道排水流量进行长期监测。

附录 A
(规范性)
洞口横向滑坡荷载

A.1 滑体下切隧道荷载

A.1.1 滑坡直接下切隧道时,可分为下滑区、结构区、阻滑区三个区域,横向滑坡荷载计算简图见图A.1。



图A.1 横向滑坡荷载计算简图

A.1.2 滑坡直接下切隧道时,横向滑坡荷载可根据下滑区、结构区、阻滑区三个区域平衡关系求出隧道的分布荷载,其荷载计算如下:

(a) 下滑区将对结构区产生倾斜向下的力 F_1 ,阻滑区将对结构区产生倾斜向上的荷载 F'_1 ,结构区还受到拱顶岩土体重力 γh_i ,设下滑力 F_1 产生的竖向力方向向下,按照三角形分布在ID宽度范围内,阻滑区作用在EF范围内,根据力的分布关系, B_i 处的竖向荷载按式(A.1)计算。

$$q_i = \frac{2F_1(\tan(45-\frac{\varphi}{2})h_0+B_0-B_i)\sin\alpha}{(\tan(45-\frac{\varphi}{2})H_0+B_0)^2} - \frac{2B_iF_1\sin\theta}{B_0} + \gamma h_i \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

- q_i ——隧道洞顶竖向荷载,单位为千牛(kN);
- F_1 ——下滑区隧道顶土体陷落处剩余下滑力合力,单位为千牛(kN);
- φ ——岩体摩擦角,单位为度(°);
- B_0 ——隧道开挖宽度,单位为米(m);
- B_i ——由下滑一侧隧道边算起至计算点i处的距离,单位为米(m);
- H_0 ——隧道高度,单位为米(m);

- α ——下滑方向角，单位为度（°）
- F'_1 ——阻滑区阻滑力合力，单位为千牛（kN）；
- θ ——阻滑区滑面摩擦角，单位为度（°），参照JTG 3370.1取值
- γ ——围岩重度，单位为千牛每立方米（kN/m³）；
- h_i ——结构区下滑侧覆土厚度，单位为米（m）。

(b) 式(A.1)中 F'_1 需要根据平衡关系求出，取阻滑区形成的三角块ABC为隔离对象，根据三力平衡关系，按式(A.2)计算。

$$F'_1 = \frac{\gamma(H_0+H_2)^2(\cos\varphi\tan\beta+\sin\varphi)}{2(\tan\delta+\tan\beta)(\cos(\varphi+\theta)-\sin((\varphi+\theta)\tan\beta)} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

- H_2 ——结构阻滑区侧隧道拱顶的覆土厚度，单位为米（m）；
- β ——阻滑区破裂角，单位为度（°）；
- δ ——地面倾角，单位为度（°）。

(c) 式(A.2)中 β 为未知参数，设滑坡时阻滑处于极限状态，则可得式(A.3)，又令参数A、B、C分别为式(A.4)、式(A.5)、式(A.6)，可得式(A.7)。

$$\frac{d(F'_1)}{d(\tan\beta)} = 0 \dots\dots\dots (A.3)$$

$$A = \sin(\varphi + \theta) \cos\varphi \dots\dots\dots (A.4)$$

$$B = 2\sin\varphi \sin(\varphi + \theta) \dots\dots\dots (A.5)$$

$$C = \cos(\varphi + \theta) (\tan\delta\cos\varphi - \sin\varphi) + \tan\delta\sin\varphi \sin(\varphi + \theta) \dots\dots\dots (A.6)$$

$$\tan\beta = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \dots\dots\dots (A.7)$$

式中：

A、B、C ——参数。

(d) 侧压力系数 λ 按式(A.8)计算，左侧的侧向压力由下滑力竖向力、下滑区破裂角岩体自重、下滑力水平力产生，左侧水平力分布按式(A.9)、式(A.10)计算。

$$\lambda = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \dots\dots\dots (A.8)$$

$$e_1 = \lambda \left(\gamma H_1 + \frac{2F_1 \sin\alpha}{\tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) H_0 + B_0} \right) + \frac{2F_1 H_1 \cos\alpha}{(H_0 + H_1)^2} \dots\dots\dots (A.9)$$

$$e_2 = \lambda \left(\gamma h(H_1 + H_0) + \frac{2F_1 \sin\alpha}{\tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) H_0 + B_0} \right) + \frac{2F_1 \cos\alpha}{H_0 + H_1} \dots\dots\dots (A.10)$$

式中：

- λ ——侧压力系数；
- e_i ——下滑区侧隧道结构受到的侧压力，单位为千帕（kPa）；
- H_1 ——结构下滑区侧隧道拱顶的覆土厚度，单位为米（m）。

(e) 右侧的侧向压力为阻滑力水平分力产生，按照三角分布的原则，右侧水平力分布力按式(A.11)、式(A.12)计算。

$$e'_1 = \frac{2F'_1 H_2 \cos\theta}{(H_0 + H_2)^2} \dots\dots\dots (A. 11)$$

$$e'_2 = \frac{2F'_1 \cos\theta}{H_0 + H_2} \dots\dots\dots (A. 12)$$

式中：

e'_i ——阻滑区侧隧道结构受到的侧压力，单位为千帕（ kPa ）。

A. 2 滑体越顶隧道荷载

下滑区滑面越顶隧道时，需要考虑牵引荷载对隧道的影响，荷载可按照隧道破裂影响区内、滑面以下岩体自重荷载和破裂影响区内阻滑力合力的作用计算，见图A. 2。

(a) 设阻滑力合力反作用力均匀分布在破裂宽度范围内，再考虑到拱顶到滑面的岩土自重，竖向分布荷载按式(A. 13)计算。

$$q_i = \frac{E_1 \sin\eta}{2 \tan(45 - \frac{\varphi}{2}) H_0 + B_0} + \gamma h_i \dots\dots\dots (A. 13)$$

(b) 左侧的侧向压力由阻滑力竖向力、滑面以下岩体自重、阻滑力水平力产生，其值按式(A. 14)、式(A. 15)计算。

$$e_1 = \lambda \left(\gamma H_1 + \frac{E_1 \sin\eta}{2 \tan(45 - \frac{\varphi}{2}) H_0 + B_0} \right) + \frac{2F_1 H_1 \cos\eta}{(H_0 + H_1)^2} \dots\dots\dots (A. 14)$$

$$e_2 = \lambda \left(\gamma h(H_1 + H_0) + \frac{E_1 \sin\eta}{2 \tan(45 - \frac{\varphi}{2}) H_0 + B_0} \right) + \frac{2F_1 \cos\eta}{H_0 + H_1} \dots\dots\dots (A. 15)$$

式中：

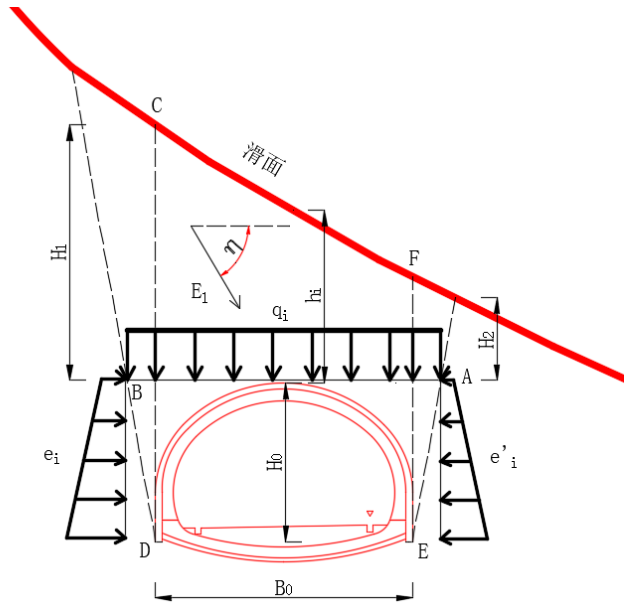
E_1 ——破裂范围内阻滑反力合力，单位为千牛（ kN ）；

η ——阻滑合力水平角，单位为度（ $^\circ$ ）。

(c) 右侧的侧向压力由阻滑力竖向力、滑面以下岩体自重，其值按式(A. 16)、式(A. 17)计算。

$$e'_1 = \lambda \left(\gamma H_2 + \frac{E_1 \sin\eta}{2 \tan(45 - \frac{\varphi}{2}) H_0 + B_0} \right) \dots\dots\dots (A. 16)$$

$$e'_2 = \lambda \left(\gamma h(H_2 + H_0) + \frac{E_1 \sin\eta}{2 \tan(45 - \frac{\varphi}{2}) H_0 + B_0} \right) \dots\dots\dots (A. 17)$$



图A.2 越顶牵引荷载计算简图

附录 B
(规范性)
洞口纵向滑坡附加荷载

B.1 滑坡体对隧道纵向产生下滑力时，可根据滑坡与隧道相切的位置分为隧道阻滑区和牵引区，相关位置关系见图 B.1，隧道阻滑区受到剩余下滑力 F 作用， F 可以分为竖向分力 F_1 和水平分力 F_2 。

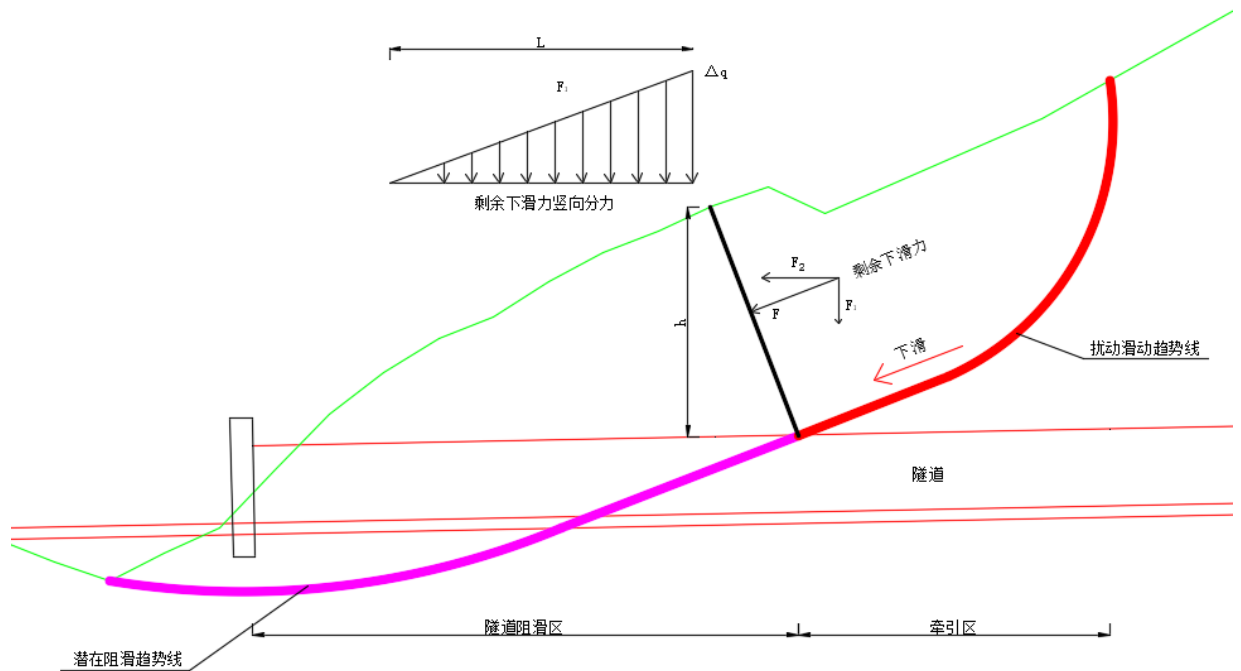


图 B.1 纵向滑坡荷载计算简图

B.2 剩余下滑力水平分力 F_2 应由隧道阻滑区承载，应根据隧道周边的围岩情况分析水平分力 F_2 对洞口及隧道结构的不利影响。

B.3 剩余下滑力的竖向分力 F_1 可简化为隧道结构的附加竖向荷载，作用范围可简化为隧道结构范围，分布方式按三角形分布。竖向荷载分布值可按式 (B.1) 计算，分布宽度可按式 (B.2) 计算，侧向压力可按式 (B.3) 计算。

$$\Delta q = \frac{2F_1}{BL} \dots\dots\dots (B.1)$$

$$L = h \tan \theta \dots\dots\dots (B.2)$$

$$\Delta e = \lambda \Delta q \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

Δq ——三角形分布的竖向附加分布荷载 (kPa)；

B ——隧道开挖宽度，单位为米 (m)；

L ——竖向分布荷载的长度，单位为米 (m)；

h ——阻滑区交界处土柱高度，单位为米 (m)；

θ ——附加竖向力的扩散角，结合工程经验确定；

Δe ——附加侧向荷载，单位为千帕（ kPa ）；

λ ——侧压力系数。

参 考 文 献

- [1] JTG/T 3660—2020 公路隧道施工技术规范
 - [2] JTG/T 5440—2018 公路隧道加固技术规范
 - [3] JTG H12—2015 公路隧道养护技术规范
-

中华人民共和国广西地方标准

公路隧道维修加固技术规程

DB45/T 2832-2024

版权专有 侵权必究