



T/CECS G XXXX: 2019

中国工程建设协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路隧道病害处治技术规程

Technical Specification for Treatment of Highway Tunnel
Diseases

征求意见稿

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

(空白)

征求意见稿

公路隧道病害处治技术规程

Technical Specification for Treatment of Highway Tunnel Diseases

(征求意见稿)

CECS XXX: 20XX

主 编 单 位：广东华路交通科技有限公司

参 编 单 位：重庆交通大学

四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院

广东省交通规划设计研究院股份有限公司

广东省高速公路有限公司

广东交科检测有限公司

批 准 单 位：中国工程建设标准化协会

施 行 日 期：201X 年 XX 月 XX 日

人民交通出版社股份有限公司

目 录

1	总则.....	1
2	术语.....	2
3	基本规定.....	4
3.1	一般规定	4
3.2	病害处治基本原则	4
3.3	病害处治工作程序	5
4	隧道水害处治.....	6
4.1	一般规定	6
4.2	病害分类	6
4.3	成因检测	7
4.4	等级划分	10
4.5	病害处治方法	11
4.6	处治材料	15
5	隧道冻害处治.....	19
5.1	一般规定	19
5.2	病害分类	19
5.3	成因检测	20
5.4	病害分级	20
5.5	处治方法	21
5.6	处治材料	25
6	隧道火灾病害处治.....	28
6.1	一般规定	28
6.2	火灾损伤检测评估	28
6.3	火损处治	32
7	隧道震害处治.....	36
7.1	一般规定	36
7.2	病害分类	36

7.3 成因检测	36
7.4 病害分级	37
7.5 处治方法	38
7.6 处治材料	40
8 隧道承载能力不足处治	42
8.1 一般规定	42
8.2 病害分类	43
8.3 成因检测	46
8.4 病害分级	48
8.5 处治方法	53
8.6 处治材料	64
9 病害处治工程验收检测	69
9.1 一般规定	69
9.2 验收内容	69
9.3 验收评定方法	77

前 言

请各有关单位在审阅过程中，将发现的问题与意见，函告本规程编写组，联系人：张彦龙（地址：广州市白云区广从八路1180号；邮编：510550；邮箱：36067844@qq.com；电话：13926207865），以便下次修订时研用。

主 编 单 位：广东华路交通科技有限公司

参 编 单 位：重庆交通大学

四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院

同济大学

广东省交通规划设计研究院股份有限公司

广东省高速公路有限公司

广东交科检测有限公司

主要起草人：田卿燕、林志、张彦龙、陶双江、聂玉文、黎新才、
刘学增、李清、邓刚、梁淦波、谢卓雄、林海山、
张青青、王辰晨

主 审：聂承凯

1 总则

1.0.1 为指导公路隧道常见病害的检测、评价、处治设计、施工和验收，特制定本规范。

1.0.2 本规程适用于公路山岭隧道土建结构的水害、震害、火灾、冻害和从结构承载能力不足等病害的处治工程。

1.0.3 隧道病害检查和评定要求应按照《公路隧道养护技术规范》（JTG H12-2015）的规定执行。

1.0.4 公路隧道病害处治除应遵守本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 隧道病害 tunnel disease

由于外力、施工、材料劣化、火灾、洪水、地震等造成的影响隧道使用功能的损伤及劣化状态，统称隧道病害。

2.0.2 隧道水害 tunnel water damage

地下水运移作用下引发的影响隧道结构安全和营运安全的病害。

2.0.3 衬砌裂缝 lining crack

隧道衬砌在外载荷或温度的作用下，其表面或内部发生开裂的情况。

2.0.4 衬砌变形 lining deformation

隧道衬砌在外载荷作用下，其轮廓形状发生改变的情况。

2.0.5 渗漏水 leaking water

围岩或土体的水体通过衬砌裂缝或间隙渗透到衬砌内表面发生的浸渗、滴漏、涌流、喷射现象。

2.0.6 隧道冻害 tunnel frost damage

渗漏水在低温状态下产生的影响隧道行车安全的衬砌掉块、开裂，拱部挂冰，侧墙冰柱，路面结冰等灾害。

2.0.7 隧道震害 tunnel earthquake damage

地震作用下引发的地表塌陷、边仰坡失稳、隧道结构物损伤与渗漏水等现象。

2.0.8 隧道火灾病害 tunnel fire damage

由于火灾导致结构和结构材料性能降低的现象。例如：高温下混凝土材料的强度降低。

2.0.9 浸渗 infiltration

渗漏水流量极少，渗漏水状态轻微，或仅在衬砌表面出现水痕

2.0.10 点渗 point infiltration

围岩或土体的水体通过衬砌裂缝或间隙渗透到衬砌内表面发生的浸渗现象呈点状分布。

2.0.11 线渗 line infiltration

围岩或土体的水体通过衬砌裂缝或间隙渗透到衬砌内表面发生的浸渗现象呈线状分布，或浸渗现象沿裂缝呈线状分布。

2.0.12 面渗 face infiltration

围岩或土体的水体通过衬砌裂缝或间隙渗透到衬砌内表面发生的浸渗现象呈面状分布，无法确定具体浸渗点。

2.0.13 滴漏 drip leakage

渗漏水流量呈水滴状间断滴落，渗漏水状态明显。

2.0.14 涌流 flow water

渗漏水流量呈连续柱状水流涌出，渗漏水状态严重。

2.0.15 结构侵蚀 structure erosion

由于衬砌背后腐蚀性环境水的侵蚀作用造成隧道结构物劣化或者损伤的现象。

3 基本规定

3.1 一般规定

- 3.1.1 隧道病害处治前应技术状况为 3-5 的隧道进行安全性评价。
- 3.1.2 隧道病害处治不宜降低原有技术标准。
- 3.1.3 隧道病害处治不宜损伤原结构。
- 3.1.4 隧道病害处治时应制定有效的交通管制与安全保障措施。
- 3.1.5 病害处治设计和施工中应制定相应的应急预案。
- 3.1.6 隧道病害处治应保护生态环境。
- 3.1.7 隧道病害处治应考虑经济性。
- 3.1.8 隧道病害处治后应进行验收,相应段落和处治部位状况值应达到 0 或 1。

3.2 病害处治基本原则

3.2.1 病害处治设计应依据竣工图和设计图相关及检测评估报告进行,并经现场核对。

3.2.2 隧道病害成因检测应符合下列要求:

- 1 针对状况值为 2 类及以上病害,均需进行专项检测分析病害成因后进行病害处治设计。
- 2 病害成因检测应选取多种检测或探测方法进行综合分析。
- 3 病害成因的检测和探测方法应尽量选取对无损检测技术。

4 当必须采用破坏性的检测和探测方法时应尽量减少对结构的破坏程度和范围，并在检测过程中采用必要的安全措施。

3.2.3 隧道病害处治设计原则应符合下列要求：

- 1 有特殊要求的隧道，病害处治时应进行针对特殊要求的检测评估。
- 2 因特殊环境（高温、冻融、腐蚀、地层变形等）造成的隧道结构病害，病害处治设计应采取针对性的处治措施。
- 3 隧道的病害处治应充分考虑隧道排水的要求，防止堵塞排水系统。
- 4 病害处治方案应便于施工，并应减少对交通运营的影响。
- 5 病害处治设计中涉及到的新材料和特殊材料必须经过试验段试验后方可全面采用。

3.3 病害处治工作程序

3.3.1 病害处治工作可按下列程序进行：隧道病害检测评估→病害处治方案初步设计→施工图设计→施工→验收。

3.3.2 病害处治工作施工监理和报检程序宜按照相关规范开展。

4 隧道水害处治

2.1 一般规定

1 隧道水害可按照水害表现形式、水害对隧道营运安全和结构安全的影响程度等进行分类。

2 在病害处治之前，需按专项检测或应急检测的要求开展相关的工作，分析病害的成因，为病害处治设计奠定基础。

3 在水害成因检测的基础上，依据水害对隧道结构安全性和行车安全性的影响进行等级划分，给出水害的状况值。

4 在对水害进行成因检测和分级后选择合适的方法对水害进行防治。

5 水害处治材料应根据水害程度、水害范围和地质情况等综合进行选择，宜采用可维护可更换类型的处治材料。

2.2 病害分类

4.2.1 隧道水害按照对隧道营运安全和结构安全的影响可分为结构破损、涌水涌泥、渗漏水 and 地表塌陷等。

4.2.2 水害中的结构破损是在地下水作用下造成隧道土建结构的破坏和损坏。按照结构破损的部位可分为基底破损和衬砌裂损。

【条文说明】从以往比较严重的水害案例来看，结构破损主要是由于隧道洞身穿越岩溶、断层、构造破碎带等富水地带，隧道病害部位结构设计薄弱或存在缺陷，隧道内防排水设施设置不合理或失效等，在地下水长期作用、急剧升高或岩溶管道流的影响下，导致结构破坏或损坏。

4.2.3 涌水涌泥按照涌出物可分为涌水、涌泥涌沙和涌水涌泥三种。

【条文说明】涌水涌泥主要是由于在隧道施工设计中，未充分考虑隧道结构防水性能，导致地下水渗入，侵蚀混凝土，使混凝土出现裂隙，在地下水作用力、围岩压力、车流压力的相互作用下引发涌水涌泥病害。

4.2.4 渗漏水按照渗漏水病害平面分布可分为：点渗、线渗和面渗；按照渗漏水病害部位渗漏水流量可分为：浸渗、滴漏和涌流。

【条文说明】隧道渗漏水的原因可分为自然因素与人为因素两方面。自然因素主要是指当隧道穿越含水地层、断层带及节理（裂隙）发育的富含裂隙水的地层、可能富有水压的岩

溶地层以及受地表水影响严重的浅埋地层时，就有可能产生隧道渗漏水。人为因素可分为：

①勘测设计阶段对周围地下水的水源、水量、水质调查分析不够；防排水理念落后，防排水设施布置不周；衬砌的防蚀、抗渗专项设计不足。

②施工质量差，造成隧道衬砌开裂，先天防水能力差，或防水混凝土不达标，或防水材料施工不合格，或者是结构工作缝、伸缩缝、沉降缝等接缝处理不当；衬砌水害没有及时发现并治理，造成病害加重。

4.2.5 结构侵蚀按照环境水对混凝土和水泥砂浆的侵蚀作用主要可归纳为3种：溶出性侵蚀（即非结晶性侵蚀）、结晶性侵蚀和复合性侵蚀（溶出性和结晶性侵蚀同时作用或交替作用）。

【条文说明】对溶出性侵蚀，只要能解决衬砌的渗漏水问题，就能达到防蚀的目的。对于结晶性侵蚀，由于侵蚀是因水泥中的化合物与水作用后的新生成物或水中盐类介质析出结晶，发生体积膨胀而导致材料破坏，而析出结晶的条件是混凝土中的干湿变化，干湿变化越频繁，侵蚀速度越快。因此对这类侵蚀，不仅要防渗漏，还要防止混凝土浸水，避免侵蚀水与混凝土发生作用。复合性侵蚀包含了上述2种侵蚀的特性。

4.2.6 路面渗水会导致路面早期出现唧浆、网裂、坑洞等破坏，进一步使路面层和基层整体强度下降并导致严重车辙、沉陷等结构性破坏，从而影响路面服务功能，缩短路面使用寿命。

4.2.7 地表塌陷是隧道水害的次生灾害，是地表岩层、土体在自然或人为因素的作用下向下陷落，并在地面形成塌陷坑洞的地质现象。

【条文说明】地表塌陷的原因主要是地表岩层、土体存在岩溶空腔或受地表水的影响导致泥土流失形成空洞，并在地面形成塌陷坑洞。

4.2.8 隧道挂冰纳入冻害处治中。

2.3 成因检测

4.3.1 结构破损的成因检测可分为对结构的质量检测、不良地质体的探测和地下水补径排规律的调查等，宜采用多种方法进行综合探测。

1 针对基底破损，建议按照表 4.3.1-1 的检测内容及方法确定病害成因。

表 4.3.1-1 隧道基底破损成因检测内容及方法一览表

编号	检测内容	检测方法	备注
1	仰拱厚度和质量	电磁法、钻探法	必做
2	基底回填质量	电磁法、钻探法	必做
3	仰拱下方不良地质体探测	地震波法、电磁波法、电法、钻探法等	必做
4	地下水渗流规律	水文地质调查法、水连通法、地表物探法（反射波法、电磁波法、电法）、钻探法等	
5	水质检测	pH 值法、导电度法、室内成分分析法	
6	基底变形监测	精密水准法	
7	结构安全性评价	荷载-结构法	必做

2 针对衬砌裂损，建议按照表 4.3.1-2 的检测内容及方法确定病害成因。

表 4.3.1-2 隧道衬砌裂损成因检测内容及方法一览表

编号	检测内容	检测方法	备注
1	衬砌厚度和缺陷	电磁法、钻探法	必做
2	衬砌强度	回弹法、超声-回弹法、钻孔取芯法	必做
3	裂缝检测（宽度、深度、长度）	裂缝测宽仪法、超声法、尺量	
4	病害分布特征	人工调查法、快速检测车	
5	衬砌背后不良地质体探测	反射波法、电磁波法、电法、钻探法	必做
6	净空断面	断面仪法、全站仪法	
7	地下水渗流规律	水文地质调查法、水连通法、地表物探法（反射波法、电磁波法、电法）、钻探法等	
8	水质检测	pH 值法、导电度法、室内成分分析法	
9	隧道变形监测	人工测量法、测量机器人法、全断面自动监测法	
10	裂缝发展监测	裂缝计法	
11	水位及水压监测	水位计法、水压力计法	
12	结构安全性评价	荷载-结构法	必做

4.3.2 针对涌水涌泥，建议按照表 4.3.2 的检测内容及方法确定病害成因。

表 4.3.2 隧道涌水涌泥成因检测内容及方法一览表

编号	检测内容	检测方法	备注
1	仰拱厚度和质量	电磁法、钻探法	

2	衬砌厚度和质量	电磁法、钻探法	
3	病害分布特征	人工调查法、快速检测车	
4	衬砌及仰拱背后不良地质体探测	反射波法、电磁波法、电法、钻探法	必做
5	地下水渗流规律	水文地质调查法、水连通法、地表物探法（反射波法、电磁波法、电法）、钻探法等	必做
6	排水系统检查	人工调查法	必做
7	排水能力评估	简易水均衡法、地下水动力学法、	必做
8	水质检测	pH 值法、导电度法、室内成分分析法	
9	水位及水压监测	水位计法、水压力计法	
10	结构安全性评价	荷载-结构法	必做

4.3.3 针对渗漏水，建议按照表 4.3.3 的检测内容及方法确定病害成因。

表 4.3.3 隧道渗漏水成因检测内容及方法一览表

编号	检测内容	检测方法	备注
1	病害分布特征	人工调查法、快速检测车	必做
2	衬砌及仰拱背后不良地质体探测	反射波法、电磁波法、电法、钻探法	
3	地下水渗流规律	水文地质调查法、水连通法、地表物探法（反射波法、电磁波法、电法）、钻探法等	必做
4	排水系统检查	人工调查法	必做
5	排水能力评估	简易水均衡法、地下水动力学法、	
6	水质检测	pH 值法、导电度法、室内成分分析法	
7	结构安全性评价	荷载-结构法	

4.3.4 针对地表塌陷，建议按照表 4.3.4 的检测内容及方法确定病害成因。

表 4.3.4 隧道地表塌陷成因检测内容及方法一览表

编号	检测内容	检测方法	备注
1	病害特征	人工普查法	必做

2	地下水渗流规律	水文地质调查法、水连通法、地表物探法（反射波法、电磁波法、电法）、钻探法等	水文地质调查法必做
3	地表排水系统检查	人工调查法	
4	地表沉降监测	人工法、自动监测法	
5	地下水水位监测	水位计法	

2.4 等级划分

4.4.1 依据《公路隧道养护技术规范》（JTG H12-2015）对隧道病害等级的划分原则，可将隧道水害状况值划分为 5 个等级，水害等级宜按照表 4.1.1 进行划分。

表 4.4.1 水害等级划分表

状况值	水害现象								
	渗漏水			涌水涌泥	结构破损		侵蚀、锈蚀		
	边墙	拱部	路面		衬砌	基础	边墙衬砌	拱部衬砌	钢筋
0	无	无	无	无	无	无	无	无	无
1	表面浸渗	表面浸渗	局部轻微积水	涌水量 0-100m ³ /d	轻微的变形、开裂（无发展或已停止发展）	轻微的沉降和裂缝，但无发展或已停止发展；	局部轻微侵蚀	局部轻微侵蚀	表面局部锈蚀。
2	小股涌流、少量挂冰、墙脚积冰	滴漏、少量挂冰	局部积水	涌水量 100-500m ³ /d，涌泥	变形、开裂（发展缓慢）	基础有局部沉降、隆起、破损和裂缝。	起层、轻微剥落；	轻微起层	表面大面积锈蚀。
3	喷射水流	涌流、较大挂冰	渗水，存在较大面积积水	涌水量 100-500m ³ /d，突泥	严重变形、开裂（发展迅速）；边墙衬砌起层和剥落；	较大面积沉降、隆起、破损和裂缝等	大面积剥落	明显起层	断面因锈蚀而明显减小。

4	/	喷射水流、大量挂冰	渗水严重，大面积严重积水、漫水、结冰或堆冰	涌水量大于500m ³ /d，突泥，高压	明显的永久变形、贯穿性裂缝密集、拱部衬砌起层或剥落	大面积沉陷、隆起、破损、断裂。	/	剥落或掉落	锈断。
---	---	-----------	-----------------------	---------------------------------	---------------------------	-----------------	---	-------	-----

4.4.2 隧道地表塌陷由于不会对隧道结构安全和营运安全造成直接的影响，不进行等级划分。

2.5 病害处治方法

4.5.1 依据不同的等级推荐不同的处治方法如表 4.5.1 所示。

表 4.5.1 隧道水害处治方法推荐表

处治方法		隧道水害类型及分级															
		结构破损					涌水 涌泥		渗漏水				侵蚀 锈蚀			地表 塌陷	
		基底 破损		衬砌 裂损					浸 渗	滴 漏	涌流	喷射					
		3	4	2	3	4	3	4	1	2	2、3	3、4	2	3	4	/	
结构 加固	衬砌背后空洞注浆				★	★											
	喷射混凝土					○							○	☆	★		
	钢带加固				★	☆								★			
	锚杆加固				☆	○								☆	★		
	嵌拱				★	★											
	套拱				☆	○									★		
	换拱		☆			○									☆		
	隧底加固	★	★														
	裂缝低压注浆修补			★		☆		☆	☆	○	○	○	☆	★			
	裂缝表面封缝			★		☆		☆	☆	○	○	○	☆	★			
围岩 处置	围岩注浆	★	★				★	★			★	★	☆	★	★	☆	
排水 止水	凿槽埋管引排				○		○	○		☆	☆	☆					
	明装接水盒				☆		☆	☆		★	★	★		☆	☆		
	边墙打泄水孔	☆	★		☆	★	☆	★		☆	☆	★		☆	☆		
	井点降水	☆	★		☆	★	☆	★		☆	☆	★		☆	☆		
	衬砌表面施做防水涂层						☆	☆	★	☆			★	☆	☆		
	排水导洞		☆			☆	☆	☆			☆	☆					

地表	地表修建截排水沟			☆	☆	☆	★			○	☆				★
处治	岩溶缺陷回填处治			☆	☆	☆	★			○	☆				★

注：符号说明：★——对病害处治非常有效的方法；☆——对病害处治比较有效的方法；○——对病害处治有些效果的方法。

4.5.2 隧道结构加固方法除裂缝处治外其他方法需在确定隧道承载能力不足的情况下才进行选择，并由专业的设计单位出具设计图纸后施工。

4.5.3 围岩处治与结构加固相同，需进行专项的设计。

4.5.4 隧道排水止水措施主要针对隧道的渗漏水，除排水导洞外其他可在日常养护中进行。

1 凿槽埋管引排

(1) 适用范围：对施工缝、变形缝及伸缩缝较严重渗漏水、衬砌渗漏水严重段，采用凿槽埋管引排的方式进行处治。

(2) 施工工艺及方法：

①在严重渗漏水裂缝处凿槽埋管（推荐采用半剖 $\phi 100$ 聚氯乙烯管）将水引至排水沟，凿槽须有足够的宽度和深度，采用机械切槽，埋管须完全嵌入。

②在聚氯乙烯管外部用水中固化封边胶堵水，外敷遇水膨胀腻子条。

③然后在凿槽内充填杜拉纤维防水砂浆，在砂浆与原二次衬砌混凝土交界处涂刷界面胶。

④待砂浆具有一定强度后，在砂浆处沿裂缝方向施作一条割缝，供其变形之用。同时在凿槽内的边墙处钻泄水孔进行泄水。

2 明装接水盒

(1) 适用范围：对严重渗水环向裂缝，采用明接不锈钢排水盒的方法，对施工缝、变形缝及伸缩缝较严重渗漏水处，采用明接不锈钢排水盒、打泄水孔的方法。

(2) 施工工艺及方法：

①在渗漏水裂缝接水盒施工范围进行表面清理，确保清理后的衬砌表面平整、洁净。

②涂刷聚硫建筑密封胶边粘铺不锈钢接水盒边用 M8 的膨胀螺栓固定接水盒，做到接水盒与衬砌接触面平顺、密封。

3 边墙打泄水孔

(1) 适用范围

对边墙部位严重渗漏水段落,采用在边墙钻孔引排的方式对该区域地下水进行疏排。

(2) 施工工艺及方法

①对于围岩注浆加固地段,在隧道两侧边墙底部增设一排泄水孔,间距 6m 或 4m(渗水严重或施工过程钻孔流量大的加密至 3m 或 2m),孔径为 $\phi 57\text{mm}$ (水量较大部分可调整为 $\phi 75\text{mm}$ 或 $\phi 110\text{mm}$),泄水孔距边墙墙脚 0.5m。泄水孔深度根据隧洞围岩情况具体为,对于(炭质)灰岩地段深度设为 1m,其它围岩地段设为 3.5m。

②钻孔内置排水管,沿钻孔部位在边墙凿槽埋管(半剖 $\phi 110$ 聚氯乙烯管)将水引至电缆沟,然后通过电缆沟和边沟之间泄水通道将水排出。

③施做顺序:边墙引排水在围岩注浆完成后实施。

4 井点降水

(1) 适用范围

对路面渗水严重段落和边墙墙脚渗漏水严重段落,为降低病害区地下水位,在对应隧道边沟采用井点降水处治。

(2) 施工工艺及方法

在隧道边沟的底部增设集水孔,集水孔间距 5m,深度 5m,孔径为 $\Phi 110\text{mm}$,钻孔内置 $\phi 90\text{PVC}$ 管,PVC 管每 10cm 设 4 个渗水孔(孔径 12mm),梅花状全长布置,外裹 2 层透水土工布。

5 衬砌表面施做防水涂层

(1) 适用范围

对隧道衬砌表面出现大面积湿渍,在没有明水流出的情况下,可采用衬砌表面施做防水涂层工艺,对渗漏水病害进行处治。

(2) 施工工艺及方法

衬砌表面涂刷防水涂层工艺如下:基面检查→基面处理→基面润湿→制浆→涂刷防水涂层→养护→检验→验收

①基面检查及处理:处理混凝土基面缺陷,做到无浮浆,无油污,旧混凝土,

用打磨机处理，新混凝土，辅以稀盐酸处理。

②基面润湿：用自来水充分湿润处理过的待施工基面需连续浸润 12 小时以上，使混凝土充分吃透饱和水。

③制浆与用量

依据防水涂料要求配置

④浆材的调制：

a.充分搅 3~5 分钟，使料混和均匀；

b.从配料搅拌到用完须控制在要在 20 分钟内，并在未涂刷前不断搅动；

c.配料一次完成，严禁二次加水。

⑤涂刷/喷涂：

a.防水涂层大面积作业采用喷涂，局部涂刷时需要专用的半硬尼龙刷；

b.须纵横来回涂刷，以保证凹凸处都能涂上；

c.涂第二层时，待第一涂层初凝后手触已干时进行，如第一层涂层已干，则应先喷洒些雾水后再进行第二层的涂刷；

d.在热天，露天施工时，须在早晚进行，防止防水涂层过快干燥影响渗透；切不可盖塑料布。

⑥检验：

a.检查防水涂层，涂层施工是否均匀，有无漏涂部位，否则需再次补涂；

b.防水涂层施工完后，需检查涂层是否有暴皮现象。如有，先去除暴皮部位，再处理基面，再用防水涂层涂料涂刷；

c.防水涂层的返工处理，返工部位的基面，均需润湿打磨，如发现有干燥现象，则需喷水润湿后（不能有积水），再进行涂层施工。

⑦养护：

a.必须用自来水，无论涂刷第一遍还是第二遍后，养护均要在材料表干后即刻进行，使用喷雾式撒水或无冲击力的小水养护，一定要避免水管直接冲刷涂层；

b.要求每天白天喷雾不间断，连续 7 天以上；

c.养护期间应注意尽量避免磕碰。

6 排水导洞（泄水洞）

（1）适用范围

为解决隧道运营阶段中心水沟排水能力不足的问题,可利用辅助坑道或设置泄水洞作为截、排水设施排水。

(2) 施工工艺及方法

①泄水洞位置应根据地质条件、地下水位、流动规律和满足降低地下水等综合因素确定,一般应位于地下水来向的一侧。

②泄水洞设计应符合下列要求:

a.根据地质、地形情况、水源方向、位置、流量、流速、含泥量的大小,选择泄水洞的位置、方向和坡度,并确保排水通畅,防止泄水洞淤塞,同时应考虑后期养护便利。

b.泄水洞的断面尺寸应根据泄水洞流量及施工条件确定,一般不小于 $2.0\times 3.0\text{m}$ (高 $\times$ 宽)。

c.泄水洞的纵向坡度应根据实际情况决定,但不应小于 0.5% ;当坡度较陡水流速度过大时,应设置相应防冲刷措施。

d.泄水洞衬砌应有留有足够的泄水孔以引入地下水,必要时,可增加导坑或导水管将正洞的水引至泄水洞排出。围岩中有细小颗粒可能流失时,应在排水管周边设置反滤层。

e.泄水洞洞口应设置洞门及出水口沟渠,并与地表水系连通,有条件时应考虑将泄水洞排出的水引作灌溉。

③泄水洞的水力计算采用无压等速流计算。

④永久性泄水洞应设置衬砌,衬砌断面形状、支护参数,应根据围岩性质、地下水情况由工程类比或计算确定。 $\text{I}\sim\text{III}$ 级围岩可采用锚喷支护, IV 、 V 级围岩宜采用复合式衬砌。

⑤泄水洞宜设置边沟排水、照明等设施,便于后期维护。

4.5.4 地表处置中塌陷回填处治措施可在日常养护中进行,修建截排水沟需在查清地表径流特征后结合地形进行专项设计。

2.6 处治材料

(1) 排水管

隧道排水管规格、性能应符合国家现行标准《软式透水管》(JC937),聚

乙烯双壁波纹管管材》（GB/T19472.1），《塑料管道系统》（GB/T8806）的有关规定。采用其它新型材料排水管材性能可参考相关国家规范使用和检验。

（2）水泥基渗透结晶型防水涂料

①水泥基渗透结晶型防水涂料性能应符合《水泥基渗透结晶型防水材料》（GB 18445-2012）的规定。

②水泥基渗透结晶型防水涂料的性能指标必须满足下表要求。

表 4.6-1 水泥基渗透结晶型防水涂料的性能指标

序号	试验项目		性能指标	
1	外观		均匀、无结块	
2	含水率/%		≤1.5	
3	细度，0.63mm 筛余/%		≤5	
4	氯离子含量/%		≤0.10	
5	施工性	加水搅拌后	刮涂无障碍	
		20min	刮涂无障碍	
6	抗折强度/MPa，28d		≥2.8	
7	抗压强度/MPa，28d		≥15.0	
8	湿基面粘结强度/MPa，28d		≥1.0	
9	砂浆抗渗性能	带涂层砂浆的抗渗压力/MPa，28d		报告实测值
		抗渗压力比（带涂层）/%，28d		≥250
		去涂层砂浆的抗渗压力/MPa，28d		报告实测值
		抗渗压力比（去涂层）/%，28d		≥175
10	混凝土抗渗性能	带涂层砂浆的抗渗压力/MPa，28d		报告实测值
		抗渗压力比（带涂层）/%，28d		≥250
		去涂层砂浆的抗渗压力/MPa，28d		报告实测值
		抗渗压力比（去涂层）/%，28d		≥175
		带涂层混凝土的第二次抗渗压力/MPa，56d		≥0.8
基准砂浆和基准混凝土 28d 抗渗压力应为 0.4（+0.0，-0.1）MPa，并在产品质量检验报告中列出。				

（3）聚合物水泥防水砂浆

①聚合物水泥防水砂浆性能应符合《聚合物水泥防水砂浆》(JC/T 984-2011)的规定。

②聚合物水泥防水砂浆的物理力学性能应符合下表的要求。

表 4.6-2 聚合物水泥防水砂浆的性能指标

序号	项目				技术指标
1	凝结时间 ^a	初凝/min		≥	45
		终凝/h		≤	24
2	抗渗压力 ^b /MPa	涂层试件	≥	7d	0.5
		砂浆试件	≥	7d	1.0
				28d	1.5
3	抗压强度/MPa，28d				≥ 24.0
4	抗折强度/MPa，28d				≥ 8.0
5	柔韧性（横向变形能力）/mm				≥ 1.0
6	粘结强度/MPa		≥	7d	1.0
				28d	1.2
7	耐碱性				无开裂、剥落
8	耐热性				无开裂、剥落
9	抗冻性				无开裂、剥落
10	收缩性/%			≤	0.15
11	吸水性/%			≤	4.0
注： a、凝结时间可根据用户需要及季节变化进行调整。					
b、当产品使用的厚度不大于 5mm 时测定涂层试件抗渗压力；当产品使用的厚度大于 5mm 时测定砂浆试件抗渗压力。亦可根据产品用途，选择测定涂层或砂浆试件的抗渗压力。					

(3) 油溶性聚氨酯灌浆材料

①油溶性聚氨酯灌浆材料性能应符合《聚氨酯灌浆材料》(JC/T 2041-2010)的规定。

②油溶性聚氨酯灌浆材料性能指标必须达到下表的要求。

表 4.6-3 油溶性聚氨酯灌浆材料的性能指标

序号	试验项目	指标
----	------	----

1	密度/（g/cm ³ ）	≥	1.05
2	粘度/mPa·s	≤	1.0×10 ³
3	凝固时间/s	≤	800
4	不挥发物含量/%	≥	78
5	发泡率/%	≥	1000
6	抗压强度/MPa	≥	6

征求意见稿

5 隧道冻害处治

2.7 一般规定

5.1.1 隧道冻害总体可分两大类：结构损伤类冻害和行车安全类冻害。综合考虑气温和地下水条件对隧道冻害程度的影响，将隧道冻害等级划分为微、轻、中、重和严重 5 个等级。

5.1.2 隧道冻害处治措施分为防冻技术和抗冻技术两类。防冻技术措施主要有敷设保温层、采用电加热、采用离壁式隔热结构和设置保温出水口、深埋排水沟、防寒泄水洞、围岩注浆等；抗冻技术措施主要提高衬砌强度或采用近圆形断面。

2.8 病害分类

5.2.1 隧道冻害总体可分两大类：结构损伤类冻害和行车安全类冻害。

5.2.2 结构损伤类冻害主要包括衬砌裂损、热融塌陷、材料劣化。

【条文说明】衬砌裂损：岩土体中的水份冻结引起积膨胀变形，当这种受到衬砌 岩土体中的水份冻结引起积膨胀变形，当这种受到衬砌 岩土体中的水份冻结引起积膨胀变形，当这种受到衬砌 结构的约束，从而引起作用于衬砌形变压力导致裂损。此外因隧址区温度较大的日差和年，对衬砌结构带来额外应力也 会导致衬砌结构裂 损，这种情况一般发生在高纬度寒区。

热融塌陷：多年冻土地区，隧道开挖后引起原层温度场发生改变多年冻土地区，隧道开挖后引起原层温度场发生改变多年冻土地区，隧道开挖后引起原层温度场发生改变多年冻土地区，隧道开挖后引起原层温度场发生改变发生融化而丧失稳定性。

材料劣化：隧道支护结构如喷射混凝土或模筑，在成龄期受低温作用隧道支护结构如喷射混凝土或模筑，在成龄期受低温作用隧道支护结构如喷射混凝土或模筑，在成龄期受低温作用导致混凝土材料中水份发生冻结，达不到设计预期的强度在后荷载作用下逐步发生破坏。

5.2.3 行车安全类冻害主要包括路面结冰、拱部挂冰。

【条文说明】路面结冰：隧道衬砌漏水，隧道底部冒水，属于因冻胀而导致的结构缺陷形成地下水出水通道，地下水流入或冒出隧道内在地面形成的冻结会造成路面打滑，危及行车安全。

拱部挂冰：地下水从衬砌防水构造缺陷处流出，冻结成冰柱或在路面形层从衬砌防水构造缺陷处流出，冻结成冰柱或在路面形层从衬砌防水构造缺陷处流出，冻结成冰柱或在路面形层倾入隧道建筑限界和影响车辆行驶安全。

2.9 成因检测

5.3.1 隧道冻害的成因检测可分为对冻害现状的调查及形成冻害的温度场及水源调查。下表将检查项目及检查内容作了列举，实际工程中宜采用多种方法进行综合探测。

表 5.3.1-1 隧道冻害检查项目及检查内容一览表

检查项目		检查内容
冻害调查	位置检查	冻害位置及程度调查
	净空变化检查	隧道内轮廓测量（自身变化比较）
裂缝检查	裂缝调查	裂缝的位置、宽度、长度、开裂范围或程度等
	裂缝检测	裂缝的发展变化趋势及其速度；裂缝的方向及深度等
漏水检查	漏水调查	漏水的位置、水量、浑浊、冻结及原有防排水系统的状态等
	漏水检测	水温，pH 值检查、水质化学分析
	防排水系统	拥堵、破坏情况
温度检查	温度检查	隧道纵向温度变化规律
	温度调查	不同月份温度变化规律
衬砌及围岩状况检查	无损检查	无损检测衬砌厚度、空洞、裂缝和渗漏水等，以及钢筋、钢拱架、衬砌配筋位置及保护层厚度、围岩状况、仰拱充填层密实程度及其下岩溶发育情况
	衬砌强度检查	强度简易测定，钻孔取芯，各种强度试验等
	钻孔检查	钻孔测定衬砌厚度等，内窥镜观测衬砌及围岩内部状况
水压力检查		地下水丰富的隧道检查衬砌背后水压力大小、分布及变化规律

2.10 病害分级

5.4.1 根据隧道的寒冷程度及地下水对隧道的危害程度对冻害进行分级。

5.4.2 以最冷月平均气温为控制指标,将隧道所处地区的寒冷程度划分为温、冷、寒、重寒和严寒 5 个等级, 分别对应 0、1、2、3 和 4。

表 5.4.2-1 隧道的寒冷程度

等级	寒冷程度	最冷月平均气温 (°C)
0	温	0~-5
1	冷	-5~-10
2	寒	-10~-15
3	重寒	-15~-20
4	严寒	<-20

5.4.3 以地下水的赋存与补给、地下水渗入隧道情况为指标,将地下水对隧道的危害程度划分为无、轻、中、重和严重 5 个等级, 分别对应 0、1、2、3 和 4。

表 5.4.3-1 地下水对隧道的危害程度划分

等级	危害程度	地下水赋存与补给条件	地下水渗入隧道情况
0	无	干燥隧道	无
1	轻	含少量水隧道, 无补给	少量渗、滴水
2	中	含水隧道, 无补给	渗、涌水
3	重	含水隧道, 水平补给	持续涌水
4	严重	含水隧道, 水平和垂直补给	常年渗、涌水

5.4.4 综合考虑气温和地下水条件对隧道冻害程度的影响,采用综合评判法将隧道冻害等级划分为微、轻、中、重和严重 5 个等级, 分别对应 0、1、2、3 和 4。

表 5.4.4-1 隧道冻害等级划分

冻害等级			地下水条件				
			无	轻	中	重	严重
			0	1	2	3	4
气候条件	温	0	I	I	I	I	I
	冷	1	I	II	II	III	IV
	寒	2	I	II	III	IV	IV
	重寒	3	I	III	IV	IV	V
	严寒	4	I	IV	IV	V	V

2.11 处治方法

5.5.1 防冻技术可按温度、水文和围岩条件三个要素进行分类,温度要素处治措施主要有敷设保温层、采用电加热、采用离壁式隔热结构和设置保温出水口等;水文要素处治措施主要有采用深埋排水沟和防寒泄水洞;围岩要素处治措施主要有围岩注浆。

5.5.2 防冻害技术措施一般是根据隧址区具体的温度环境、水文和围岩条件综合采取多种措施来解决隧道冻害。

5.5.3 抗冻技术主要是依赖结构本身的抗力抵抗冻胀力，主要措施为提高衬砌的材料性能或采用近圆形断面等。

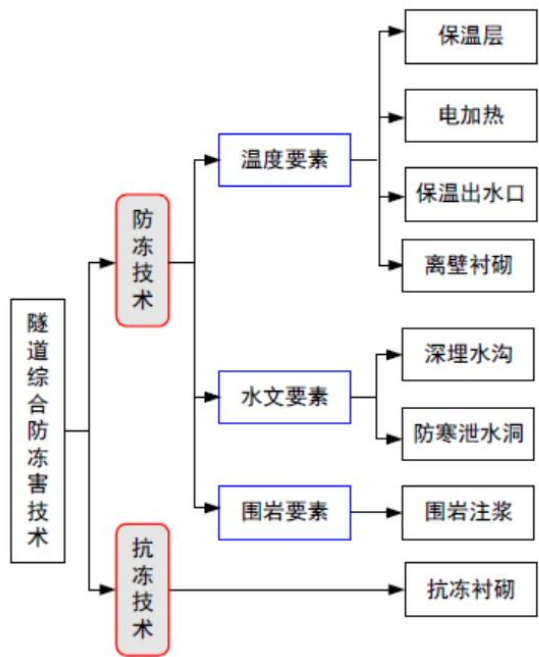


图 5.5.3-1 隧道综合防冻害技术措施

5.5.4 敷设保温层技术是指在衬砌表面或初期支护与二次衬砌之间敷设保温材料，利用保温材料尽量减小围岩中的热量放出或者是外部热量的侵入，以保持隧道衬砌背后的围岩保持原有冻结或融化状态，不发生冻融循环。敷设保温层技术一般适用于冻害等级为Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级的隧道。

5.5.5 敷设保温层的方式有三种：一种是在二次衬砌混凝土内表面上直接敷设保温层，即贴壁式；另一种是在初期支护与二次衬砌之间敷设保温层，即夹心式；还有一种是在衬砌混凝土和保温层之间设置了空气层来增强隔热效果，即离壁式。

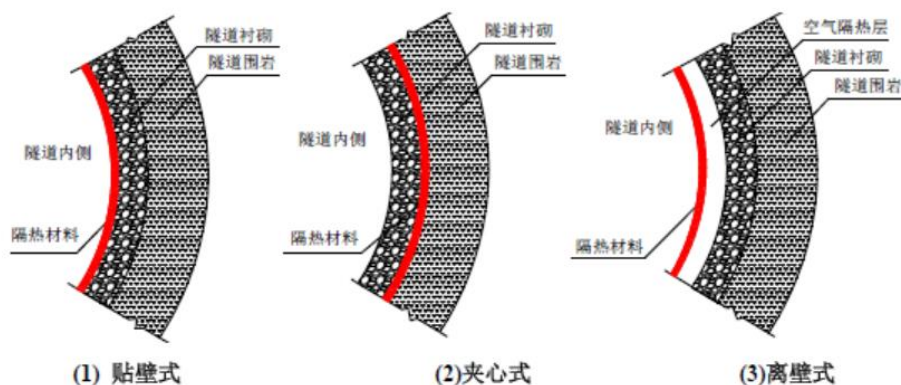


图 5.5.5-1 隧道综合防冻害技术措施

【条文说明】从目前国内的实施效果上看，夹心式由于易吸湿潮、受到压缩和难以维护缺点，目前已基本不采用。贴壁式在大坂山隧道和鹫鸪山隧道的应用相对比较成功，对于复合式衬砌结构的保温层敷设，可采用该种方。而离壁式目前尚处于研究和探索阶段，有待今后通过实际工程积累经验。

5.5.6 电加热防冻技术是对隧道排水系统进行加热来防止冻害的发生。电加热防冻技术一般适用于冻害等级为Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级的隧道。

5.5.7 加热系统布置方式主要有以下几种：

- 1) 采用管式电力加热器；
- 2) 在隧道内的排水系统中设置加热电缆；
- 3) 有的地方利用下热水或蒸汽对水沟进行加热等。

【条文说明】加热防冻技术对防止局部严重冻结地点的冻害和冻结时间比较短的隧道是可行的，但对于比较长隧道、或冻结时间比较长的隧道，可能达不到预期的效果。且多数技术措施都存在能耗大、运营费用高、设备设施维护困难等缺点，故限制和制约了这种技术的应用。目前，采用加热防冻技术主要在前苏联、北欧等国家有一定应用，国内个别铁路隧道（甘肃的七道梁铁路隧道）也曾采用过这种技术。

5.5.8 在严寒地区，深埋水沟、防寒泄水洞及洞外暗沟均应设置保温出水口，以保证水流至洞口时不致发生冻结，堵塞排水通道。冻害等级为Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级的隧道均应设置保温出水口。

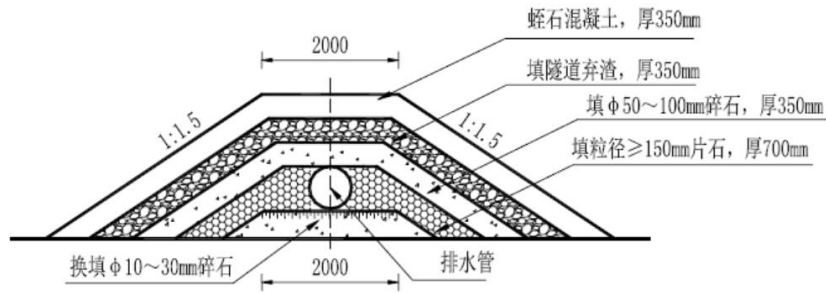


图 5.5.8-1 保温出水口典型构造图

5.5.9 深埋水沟防冻技术指将水沟深置于洞内相应的冻结深度以下，利用地温达到水沟内水流不致冻结的防冻技术。深埋水沟防冻技术一般适用于冻害等级为Ⅱ、Ⅲ级的隧道。

5.5.10 影响深埋水沟冻结的因素除隧址区气温、冻结深度外，还与水量大小、水温、水沟坡度、隧道长度以及隧道走向与寒冷季节主导风向等因素有关。一般可参考下列经验数值选用：

(1) 长度短于 1km 的隧道，水沟埋置深度按当地砂性土最大冻结深度考虑。

(2) 长度大于 1km 的隧道，低端洞口段 300~500m 范围内，水沟埋置深度按当地砂性土的最大冻结深度考虑。其具体长度视隧道长度及隧道走向与寒冷季节主导风向的关系而定，隧道越长或冬季背风的洞口可短些。高端洞口段和洞身段宜按当地粘性土最大冻结深度或略小于当地粘性土的冻结深度考虑。

5.5.11 对公路隧道，深埋水沟一般设置在仰拱底下，衬砌背后的纵向排水主管通过横向排水沟排入中心的深埋水沟内。

5.5.12 冻害等级为Ⅳ、Ⅴ级的隧道，即隧址区最冷月平均气温较低（于-25℃）、最大冻结深度较大（大于 2.5m）且地下水较为丰富的隧道工程，可采用防寒泄水洞作为主要排水通道，减小隧道发生冻害的风险。

5.5.13 防寒泄水洞一般布置于隧道主洞下方，埋置深度除要考虑当地围岩的最大冻结深度外，还应考虑泄水洞的施工不致影响到隧道主洞的稳定性。而泄水洞的断面大小，一般以满足最小施工空间要求即可，泄水洞的施工出渣必要时可采用有轨运输方式。

5.5.14 为方便对防寒泄水洞的检查及夏季通风，每隔一定距离可设置检查井。检查井间距一般为 150~200m。为保证防寒泄水洞发挥良好的地下水排导功能，其拱部及边墙应打设足够的泄水孔，间距一般不小于 1m。防寒泄水洞并应设置保温出水口，避免外界气温与泄水洞内气温发生热量交换，保持泄水洞内排水通畅。

5.5.15 对于高海拔隧道地层，原则上保温设防段内富水的破碎带和含水裂隙围岩段均应采取注浆堵水防冻技术措施。一般可按深埋排水段落全注浆处理。

5.5.16 高海拔地区隧道应对隧道结构采取一定的抗冻技术措施。其建筑材料、断面型式以及其它基本要求如下：

1) 锚杆宜采用砂浆锚杆，锚杆长度以埋入最大冻结深度以下不小于 150cm 确定。

2) 喷射混凝土强度等级不小于 C25，二次衬砌混凝土强度等级不小于 C30。且喷射混凝土及模筑混凝土在拌合时，均需要掺加低温抗冻剂。

3) 从提高材料的抗冻和耐久性能考虑，寒区隧道初期支护必须采用湿喷工艺，以保持混凝土材料的均质性。

4) 二次衬砌截面尺寸通过工程类比和计算确定，其截面最小厚度不小于 40 cm。

5) 仰拱回填不宜采用片石混凝土，宜采用强度等级不小于 C15 的混凝土回填仰拱。

6) 明洞及保温设防段内衬砌断面，宜采用曲墙带仰拱的封闭式结构，仰拱厚度不宜小于拱墙衬砌厚度。

7) 保温设防段内衬砌宜采用钢筋混凝土结构，以提高衬砌结构的延性。

8) 二衬混凝土抗渗等级不小于 S8。

2.12 处治材料

5.6.1 保温材料

保温材料一般是指导热系数小于或等于 $0.2\text{w}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，对热交换具有显著阻抗

性的材料或材料复合体。隧道保温层和排水沟管除应考虑材料的导热系数外，还应考虑材料的吸水率、燃烧性能、强度等指标。

(1) 保温材料的分类

保温材料的品种很多，按材质分类，可分为无机绝保温材料、有机保温材料 and 金属保温材料三大类。见表 5.6.1-1。

表 5.6.1-1 主要保温材料的分类

分类		品种	
纤维状	无机质	天然	石棉纤维
		人造	矿物纤维（矿渣棉、岩棉、玻璃棉、硅酸铝棉等）
	有机质	天然	棉麻纤维、稻草纤维、草纤维等
		人造	软质纤维板类（木纤维板、草纤维板、稻壳板、蔗渣板等）
微孔状	无机质	天然	硅藻土
		人造	硅酸钙、硅酸镁等
	有机质	天然	炭化木材
气泡状	无机质	人造	膨胀珍珠岩、膨胀、加气混凝土，泡沫玻璃，泡沫硅玻璃，火山灰微珠、泡沫板土等
	有机质	天然	软木
		人造	泡沫聚苯乙烯塑料、泡沫聚氨酯塑料、泡沫酚醛树脂，泡沫尿醛树脂，泡沫橡胶，钙塑绝热板等。
层状	金属	铝箔、锡箔等	

(2) 保温材料的性能

主要常见保温材料的性能指标见表 5.6.1-2。

表 5.6.1-2 主要几种保温材料性能对比

材料品种	性能指标						
	密度 (kg/m ³)	导热系数 w/(m·K)	吸水 率 % (V/ V)	使用温 度范围 (°C)	抗冻性	抗压强 度 (MPa)	燃烧性能
硬质聚氨酯泡沫材料 (PUR)	60.4	0.027	3.4	-60~120	低温不脆化、不收缩	≥0.5	B2 级阻燃
膨胀型聚苯乙烯泡沫塑料 (EPS)	40	0.041	≤4	-80~75	耐低温	≥0.1	使用温度不能高于 75°C
挤塑聚苯乙烯发泡保温材料 (XPS)	42	0.030	≤1.5	-85~75	耐低温	≥0.25	——

酚醛泡沫塑料 (PF)	45	0.038	0.03	-55~90	——	0.03	B1 级难燃性
硬质聚氯乙烯 泡沫塑料(PVC)	60	0.036	不吸水	-30~ 400	——	0.15	难燃
干法硅酸铝纤维材料	188	0.037	吸水率低	≤1000	无变形、开裂、 发脆现象	能抗压	A 级不燃材料
防水泡沫石棉	23	0.034	2.0%	-50~ 500	——	——	耐高温
玻璃棉系列	24~96	0.03~ 0.04		-120~ 400	耐低温	——	A 不燃性
岩棉板、矿物棉 板	61~ 200	≤0.044	≤5%	≥600	无裂缝、无剥离	——	不燃
橡塑发泡保温 板	40~ 110	0.038	1.7%	-40~ 105	表面未出现裂 纹, 28 天后 ≤70%	——	难燃 B1 级、 阻燃 B2 级
憎水性珍珠岩	200	0.642	——	-78~ 650	耐低温	1.09	——
水泥珍珠岩制 品	350	0.074	——	500	——	≥0.4	不燃
微孔硅酸钙制 品	<250	0.056	——	<650	——	>1.0	不燃
陶瓷纤维制品	155	0.081	——	1050	——	一般	——
水泥蛭石制品	500	0.094	——	<650	——	0.3~0.6	——
加气混凝土	500	0.126	——	<200	——	>0.4	不燃
炭化软木	120, 180	<0.058、 <0.070	——	<130	——	>1.5	——

6 隧道火灾病害处治

2.13 一般规定

6.1.1 应综合采用定性观察、调查与定量检测反推等方式，确定隧道内发生的火灾场景与规模、火灾峰值温度与持续时间，然后开展隧道结构火灾损伤评估。

6.1.2 火灾后可根据损伤特征将混凝土衬砌损伤程度划分为 5 个等级，火灾损伤等级宜按照表 6.1.2 进行划分。

表 6.1.2 混凝土衬砌损伤等级划分表

损伤程度	损伤指标								
	温度 /°C	混凝土剥落深度/mm	剩余抗压强度/%	混凝土组织结构	喷涂层	混凝土表面观颜色	锤击反应	钢筋暴露	混凝土表面观裂缝现象
无损伤	<300	0	>95	无变化	无脱落	青色灰白色	声音响亮，表面不留锤痕	无	无
轻度损伤	300~600	0~5	50~95	基本原状	有些脱落	青色灰白色	声音较响亮，表面锤痕不明显	0~10%	少量温度收缩形成的细微裂纹
中度损伤	600~900	5~10	20~50	部分改变	部分脱落	微红色灰白色	声音较闷，混凝土粉碎、塌落，表面锤痕明显	10%~25%，无挫曲	结构局部表面出现明显裂缝
严重损伤	900~1200	10~15	10~20	大部分改变	全部脱落	浅黄色	声音发闷，混凝土粉碎、塌落，表面留明显锤痕	25%~50%，至少一根挫曲	结构表面出现较多裂缝，剥落明显
重度损伤	>1200	>15	0~10	完全改变	全部脱落	均匀白色	声音发哑，混凝土严重脱落	50%以上，钢筋挫曲、下挠变形、烧熔等现象	结构表面出现贯穿性裂缝，大面积剥落、坍塌

6.1.3 隧道衬砌结构火灾损伤修复措施应结合火灾损伤等级、结构特点、实地条件、功能要求等因素，按照加固效果可靠、施工简便、经济合理等原则综合分析确定。

2.14 火灾损伤检测评估

6.2.1 隧道结构混凝土材料的损伤检测与评价，应满足以下要求：

1 根据现场火灾可燃物与残余物调研，以及检测后获取的混凝土强度、回弹值、声波值等综合指标，可反演火灾场景。

2 衬砌结构损伤程度的表征量可采用混凝土表观颜色、硬度、脆性、爆裂深度、承载力、变形特性等物理力学指标。

3 为达到快速评定隧道衬砌结构安全状况，宜在现场表观特征观测法的基础上，优先选用回弹法与超声法等无损检测技术。

4 为避免对已经受到火灾危害的衬砌造成二次损伤，在V级围岩、条件较差的IV级围岩地段慎用钻芯取样、钻芯切片、冲击钻入等半损伤检测技术。仅在III级围岩以上地段，且条件许可时，可采用钻芯取样等半损伤技术。

5 由于各地区隧道衬砌混凝土配比及养护条件的差异，可根据地区经验建立专用的衬砌混凝土回弹值-火损强度、声波值-火损强度检测专用曲线。无相关条件时，可参考本规程附录 A 规定的回弹值-火损强度、声波值-火损强度检测专用曲线。

6.2.2 隧道衬砌火损调查可分为初步勘察与详细勘察两个阶段，评估也相应地划分为定性评估与定量评估两个阶段，并应符合以下规定。

1 初步勘察阶段，主要了解火灾发生及灭火过程，对火灾后现场进行目测观察和摄影记录，填写附录 B 衬砌结构火灾调查表和衬砌结构受损情况简单评估表。

2 详细勘察阶段，主要是采用红外扫描、回弹、超声等物理方法对衬砌混凝土材料的烧损厚度、强度等进行详细勘察。

3 定性评估阶段应调查火灾概况，根据表 6.1.2 初步划分火损区域和损伤程度。

4 定量评估阶段应在不同损伤区域实施非破损或微破损试验，根据各检测方法的反演推定最高温度及混凝土残余强度，建立荷载-结构模型，定量地计算评价不同火损区域衬砌结构的安全状态。

6.2.3 衬砌火灾损伤初步勘察及定性评估工作内容应符合下列规定：

1 火灾前隧道状况调查。应收集隧道存档资料和运营记录，包括隧道水文地质状况、设计图纸、设备情况、设备运行记录、通风状况、车辆运行情况和位置等。

2 火灾现场观察记录。对火灾后现场进行表观观察和摄影记录，观察记录内容包括混凝土颜色、裂纹裂缝、爆裂、疏松、钢筋外露以及小金属棒敲击现象等；此外，还应观察现场照明灯具、燃烧残留物等烧损情况，为评判温度场分布提供一手数据。

3 基础火灾证据收集。组织受灾单位或个人、火灾发现者及灭火人员座谈，了解隧道内火灾发生及灭火过程，收集消防部门的火灾灾情鉴定报告，了解起火的时间、起火点位置、起火原因初步判断、火的走向、主要燃烧物、火灾持续时间、火灾的燃烧程度、灭火方式、灾后残留物状态、过火区域、火灾时通风状况等。

4 火损区域划分。在火灾现场初步调查时，采用表面特征观测法、混凝土损伤等级划分表（见表 6.2.1），结合衬砌结构混凝土颜色、裂纹裂缝、爆裂剥落、疏松、钢筋外露、结构变形以及小锤敲击现象等损坏状况，划分火损区域。

5 结构安全性初步鉴定。对火损严重的区域的衬砌结构进行初步安全鉴定，判别其是否仍处于破坏变形阶段，初步估计火损结构能否满足承载力要求，是否会发生大块混凝土掉落甚至结构坍塌，作出是否暂时封闭现场以确保人员安全的决定。在确认现场人员的安全有保障后，方可对灾后现场进行详细勘察。

6 火灾场景初步判断。应根据起火时间、起火位置、起火时隧道运营状况以及灾后残留物状态等确定火灾原因、持续时间和蔓延机理等，并根据燃烧物情况计算火灾载荷，判断初步的火灾场景。

6.2.4 衬砌火灾损伤详细勘察及定量评估工作内容应符合下列规定：

1 表面特征观测法评估受火温度。根据衬砌混凝土表面颜色、裂纹、爆裂疏松、小锤敲击等观测手段快速推定火损区域受火温度，初步得到火灾温度场分布。

2 回弹法检测混凝土强度损失和评估受火温度。根据火损区域划分和火灾场景的初步判断，确定合理的回弹测试点分布，进行回弹法检测。根据试验归纳的火损混凝土表面硬度与回弹值的关系、回弹值（回弹比）与强度损失（强度比）的直接关系、回弹值（回弹比）与受火温度的间接关系，对检测数据进行分析，判断火损区域衬砌混凝土的强度损失，推定各部位最高受火温度。

3 钻芯取（小）样法检测混凝土强度损失和评估受火温度。根据火灾损伤

现场情况和衬砌结构体系受力特征，确定合理的芯样钻取点分布图，采用专门的钻芯机钻取圆柱形芯样，适当加工后在试验机上测定火损后残余抗压强度，并通过强度（强度比）与受火温度的关系，推断芯样钻取点处的最高受火温度。

4 超声法检测混凝土强度损失、火损深度和评估受火温度。选择能反映火损规律的测试点以及钻芯取样法钻取的芯样，根据试验归纳的超声波速（声速比）与强度（强度比）、受火温度的关系，采用对测法检测衬砌混凝土的强度损失和评估受火温度。利用超声法的损伤层检测原理，采用平测法检测代表部位的混凝土火损深度。

5 混凝土烧失量推定法评估受火温度。在火灾现场拣取合适的混凝土剥落块或在代表性部位钻取小块混凝土，进行体积、质量的测试，根据混凝土密度（密度比）与受火温度的关系，推定衬砌混凝土的受火温度。

6 超声法、回弹法检测混凝土强度损失和评估受火温度。采用超声对测法和回弹法在相同部位的检测数据，利用试验结果分析的超声波速（声速比）、回弹值（回弹比）与强度损失（强度比）、受火温度的关系进行衬砌混凝土强度、最高经历温度的判断。

7 综合分析各方法的检测结果，给出火损衬砌混凝土的强度损失、损伤深度和受火温度的结论。

8 根据检测结果修正火灾场景，利用修正后的火灾场景进行衬砌温度场数值模拟和高温残余承载力计算，给出衬砌结构火损情况的计算结果。

9 根据强度损失检测结果和计算结果综合评定不同火损区域衬砌结构的受损程度。

10 作出灾后检测评估报告。

6.2.5 没有直接测定火灾后衬砌混凝土力学参数时，可以根据受火温度按照图6.2.5 选取混凝土的高温下强度和弹性模量。

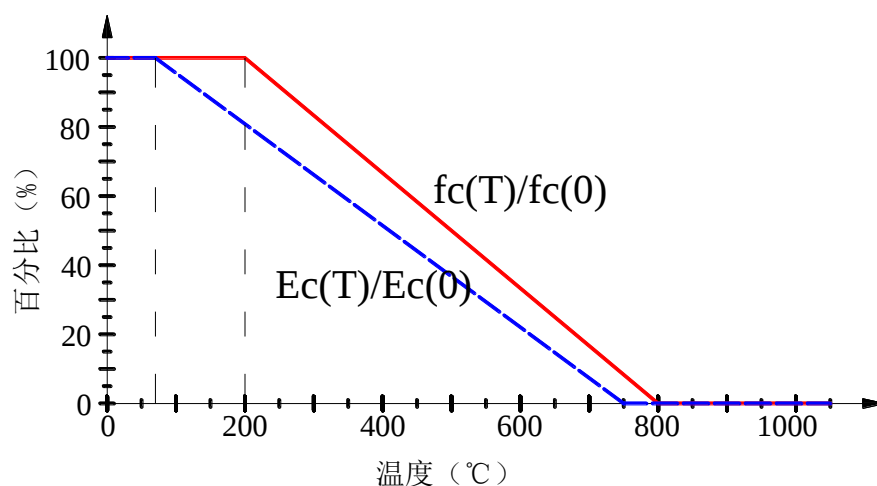


图 6.2.5 混凝土高温强度及弹性模量与温度关系图

6.2.6 没有直接测定火灾后钢筋及螺栓力学参数时,可以根据受火温度按照图 6.2.6 选取钢筋及螺栓的高温强度和弹性模量。

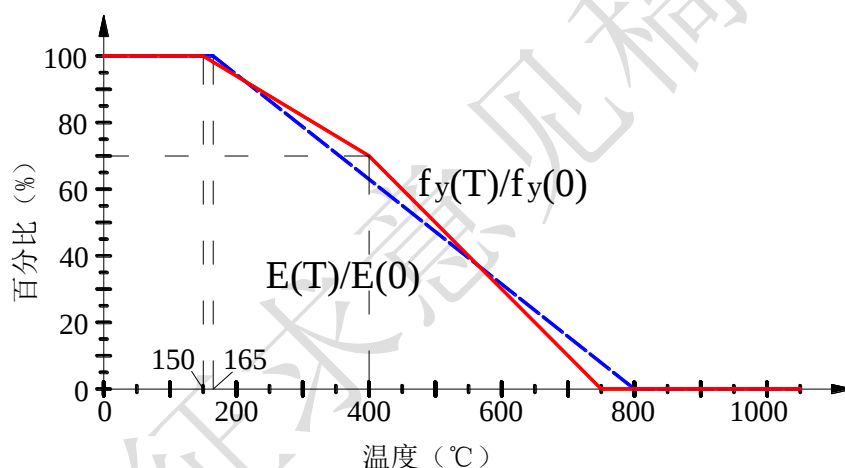


图 6.2.6 钢筋高温屈服强度及弹性模量与温度关系图

2.15 火损处治

6.3.1 一般情况下应根据衬砌火灾受损等级采取下列对应的修复方法。

1 轻度损伤,可采用表面粉刷或将表面污物清理干净、重新进行装修粉刷,局部轻微损伤处采用砂浆抹面修补即可。

2 中度损伤,一般先清除烧松散的混凝土,然后进行砂浆抹面或喷射混凝土修复;对混凝土表面裂缝,可采用水泥浆、聚合物砂浆或环氧树脂进行灌缝修复。

3 严重损伤,应根据剩余承载力计算结果,按照等强原则进行加固。一般

采用挂网锚喷射（纤维）混凝土、粘贴钢板（带）、套拱等方式进行加固。

4 严重损伤，一般应将烧损衬砌予以拆除、重新浇筑混凝土衬砌或者套拱等方式进行加固。

6.3.2 无明显损伤或者轻度损伤的火灾后较为完好的混凝土表面，应采用喷水进行养护。

6.3.3 混凝土表面缺陷可采用混凝土砂浆、聚合物水泥混凝土砂浆、改性环氧混凝土砂浆等材料进行修补，并满足下列技术要求。

1 混凝土表面修补所用材料的性能、品种、规格和质量应符合有关规范和设计的要求，严格按照规定进行施工。

2 修补用材料的强度和其它质量指标应不低于原结构材料，修补用的混凝土强度等级应比原强度提高一级。

3 混凝土表面缺陷修补时原结构表面处理应符合设计要求，与原混凝土结合良好，具有足够的耐久性。

4 缺陷修补完成后表面应无裂缝、起鼓等现象，宜进行表面修饰处理。

6.3.4 混凝土表面裂缝可采用表面封闭法或者注射法进行修补，并满足下列技术要求。

1 表面封闭法适用于小于 0.3mm 宽度的静止裂缝，封闭材料应为低黏度、渗透性良好的胶液。

2 注射法适用于宽度大于 0.3mm 的裂缝。注射材料应为低黏度、可注性好的胶液。注射孔可采用骑缝或斜缝布置方式。

3 当裂缝宽度大于 0.5mm 时，应开槽填充封闭，再注射胶液。填充材料宜为改性环氧树脂类、聚合物砂浆等。

4 裂缝修补材料的性能指标应满足有关规范和设计的要求，严格按照规定进行施工。

5 裂缝修补完成后，宜进行表面修饰处理。

6.3.5 混凝土有爆裂的衬砌结构可采用喷射混凝土法进行加固,并满足下列规定。

- 1 喷射混凝土强度不应低于原衬砌混凝土强度,且不低于 C25。
- 2 可采用合成纤维混凝土、钢纤维混凝土提高其抗裂性能,纤维掺量应根据试验确定。
- 3 裂损严重时喷射混凝土应与钢筋网、锚杆等配合使用,补强锚杆宜采用预应力锚杆。

6.3.6 衬砌混凝土有潜在掉块风险或强度不足,隧道净空富余量小时宜采用粘贴钢板(带)进行加固,并满足下列规定。

- 1 锚栓锚固处的原衬砌混凝土强度等级应不低于 C20。
- 2 应根据火灾损伤情况,计算确定钢板厚度、宽度、间距,钢板厚度不小于 5mm,宜全断布置。
- 3 钢板(带)表面应进行防腐蚀、防锈蚀表面处理,处理材料应对钢板及胶黏剂无害。
- 4 钢板粘结应采用锚栓锚固压力注胶的方法,胶黏剂平均厚度宜为 3~5mm。
- 5 钢板(带)材料应进行耐火防护,满足耐火等级及耐火极限要求。
- 6 应采用有机机械锁键效应的后扩底锚栓或适应开裂混凝土性能的定型化学锚栓连接钢板与衬砌。
- 7 应对锚栓钢材承载力进行验算,不得采用膨胀型锚栓作为连接件。

6.3.7 衬砌结构严重受损、衬砌大面积爆裂(10m² 以上),可采用套拱进行加固,并满足下列规定。

- 1 根据隧道病害程度,计算确定套拱形式、厚度、加固范围。
- 2 套拱形式宜采用钢拱架混凝土套拱或者钢筋混凝土套拱。
- 3 套拱混凝土强度应较原混凝土构件强度高一个等级,且不低于 C25。
- 4 钢拱架混凝土套拱可采用工字钢、H 型钢、钢格栅等,钢拱架间距宜为 0.5m~1.20m。

-
- 5 隧道渗漏水严重时，应在套拱和原衬砌间增设防排水措施。
 - 6 套拱应全断面布置，设置锁脚锚杆（管）稳固基础，必要时可增设仰拱。
 - 7 叠合式套拱可采用植筋、铺设钢筋网等措施确保新旧结构连接。
 - 8 分离式套拱宜采用钢筋混凝土结构。

6.3.8 衬砌混凝土损伤严重、强度已完全丧失、不具备加固条件时应采用换拱加固以置换原衬砌，恢复使用功能。换拱应满足下列规定。

- 1 换拱加固可选用整体换拱和局部衬砌更换。
- 2 根据衬砌病害情况、地质条件、施工环境，计算确定衬砌换拱范围、结构型式、支护参数。
- 3 换拱加固应包括拆除方案，拆除方案设计应包括围岩扩挖及加固、施工临时防护、拆除方法及工艺、监控量测等内容。
- 4 换拱加固设计应制定新旧衬砌结构及防排水系统的衔接措施。
- 5 换拱处衬砌内轮廓宜与原内轮廓保持一致，当原内轮廓断面不能满足使用时，应重新确定断面型式。
- 6 换拱混凝土应较原结构混凝土强度提高一级，并不低于 C30，局部衬砌更换混凝土材料中应掺入微膨胀剂。

7 隧道震害处治

2.16 一般规定

7.1.1 震害处治以恢复原有工程安全、通行能力、服务水平等使用功能为主，原则上执行原技术标准。经技术经济论证后，也可适当降低或提高技术标准。

7.1.2 震害处治原则上执行原抗震设防标准，但根据工程的作用、定位、技术及造价等因素，经论证，可按照新的抗震设防标准进行修复加固或增加抗震设防措施，达到提高抗震减灾能力的目标。

7.1.3 应根据隧道震害程度、地质条件、原设计情况等确定震害处治方案。且应按照因地制宜、技术可行、经济合理、施工安全的原则研究确定。

2.17 病害分类

公路隧道震害类型如下表 7.2-1 所示。

表 7.2-1 公路隧道震害类型表

隧道结构	分部工程	震害类型
土建结构	洞口	边仰坡地表开裂、失稳、垮塌，支挡防护工程出现裂缝、倾斜、下沉，截排水沟开裂、沉陷等
	洞门	洞门墙体开裂、下沉、倾斜、垮塌等
	洞身	衬砌开裂、剥落、错台、垮塌、侵限、脱空、渗水等
	路面	开裂、下沉或隆起、断裂、浸水等
	检修道、电缆沟、预埋沟（槽、管）	开裂、错台等

2.18 成因检测

公路隧道震害检测项目及内容可参照表 7.3-1 所示。

表 7.3-1 检测项目及内容表

隧道结构	分部工程	检测内容
土建结构	洞口	边仰坡山体滑坡、崩塌、落石、沉陷及潜流水等
		边仰坡防护开裂、变形、垮塌等
		截排水沟开裂、变形、沉陷等

隧道结构	分部工程	检测内容
	洞门	墙体开裂、倾斜、沉降、垮塌等
	洞身	衬砌裂缝、剥落、钢筋外露、垮塌等
		隧道平、纵线形发生变化，内轮廓侵蚀等
		衬砌脱空或不密实等
		渗漏水等
	路面	开裂、下沉或隆起等
		渗水
	检修道、电缆沟、预埋沟（槽、管）	开裂、错台等

2.19 病害分级

综合考虑洞口、洞门、洞身、路面、渗漏水、检修道等病害状况，将隧道震害等级划分为 5 个等级，如下表 7.4-1 所示。

表 7.4-1 隧道震害等级划分表

震害等级	主要现象				
	洞口、洞门	洞身	路面	渗漏水	检修道
1	天变比	衬砌无裂缝、剥落等观象或局部有个别细小裂缝但已稳定	无变化	无渗漏水	无变化
2	存在少量落石或崩塌.边仰坡基本稳定，构造物有局部开裂现象，基本不妨碍交通	隧道净空无变化，衬砌结构局部有环向或纵向裂纹，且无发展趋势	局部开裂	局部裂缝有渗漏水	局部开裂
3	洞口区域有滑坡或大量崩塌、落石现象等，边仰坡有不稳定的趋势；构造物有局部开裂或失稳垮塌，已妨碍交通	净空局部有侵限现象，二次衬砌裂纹较多、且有发展趋势	路面大面积开裂、有错台、隆起或下沉现象	多处裂缝有渗漏水	检修道大面积开裂错台等现象
4		二次衬砌混凝土拱墙严重开裂且侵限，有错台现		裂缝有涌水	

		象或局部掉块			
5		衬砌大面积掉块，钢筋外露或扭曲变形，整体坍塌，隧道结构整体失稳		裂缝有喷射水流	

注：1 表示情况正常(无异常情况，或虽有异常情况但很轻微)；2 表示存在异常情况，但不明确，应作进一步检查或观测以确定对策；3 表示异常情况较显著，可能危及行人、行车安全，应准备采取处治措施或特别对策；4 表示异常情况显著，将会危及行人、行车安全，应尽早采取处治措施或特别对策；5 表示异常情况非常显著，已危及行人、行车安全，必须立即采取处治措施或特别对策。

2.20 处治方法

7.5.1 洞口处治措施如下：

1) 清除洞口区域已垮塌的土石及边仰被上方的危石，并做好洞口区域内的临时排水沟，对不稳定的土石方应先支撑后清除或边支撑边清除，防止新的坍塌、崩塌发生。

2) 根据边、仰坡稳定情况，采取增加防护网、喷锚、支挡或接长明洞、棚洞等措施。

3) 边仰坡防护工程、截水沟等进行维修加固或拆除重建。

7.5.2 洞门处治措施如下：

1) 清除危险和潜在危险的洞门结构裂损体。

2) 采用裂缝灌浆等方法加固端墙，对已损坏的帽石及翼墙等进行修复。

3) 采用反压回填、型材（木材或钢材制成）或喷射混凝土加固洞门，防止洞门失稳坍塌。

7.5.3 洞身处治措施如下：

1) 清除衬砌崩落的土砂、掉块以及衬砌表面存在的不稳定混凝土块和金属物。

2) 需要拱架加固区段，对拱顶、拱腹段采用工字钢进行加固支撑，打锚杆挂钢筋网，然后采用喷射混凝土进行封闭处理加固。

3) 衬砌结构发生大范围掉块、坍塌时，应尽快清理坍塌结构和岩体，如坍塌段围岩不稳定，清方期间继续坍塌，应预先进行加固；加固工作困难或无法完全清除坍塌结构和岩体，则可采用坑道法抢通坍塌段。

4) 恢复重建阶段，洞身段病害可参照下表 7.5.3-1 选用。

表 7.5.3-1 洞身段典型震害处治措施表

典型震害	处治措施
裂缝	裂缝修补等
错台	喷（钢纤维）混凝土、套拱、撤换二次衬砌等
掉块	嵌拱补强、套拱等
侵限	嵌拱补强、撤换二次衬砌等
脱空	衬砌背后注浆等
渗漏水	刷防水涂料、凿槽引排、泄水孔等

7.5.4 路面及仰拱处治措施如下：

1) 严重的路面变形需要进行清理、整平，将严重变形裂损体（隆起部分）破碎清理，严重下沉部分用泥土填平、夯实、地表铺设钢板。

2) 做好路面裂损、变形段排水工作，避免地下水浸泡导致裂损、变形段路基变软。

3) 恢复重建阶段，路面及仰拱病害可参照下表 7.5.4-1 选用。

表 7.5.4-1 路面及仰拱典型震害处治措施表

典型震害	处治措施
开裂	裂缝修补等
隆起变形或沉降	更换路面、更换仰拱、增设仰拱等

7.5.5 渗漏水处治措施如下：

1) 隧道内突然涌现大量地下水时，应在洞内设置临时排水设施，加强对水的归纳和整理，使涌、射出的地下水按照指定的方式排放。

2) 采用注浆堵水等方式阻断水源，减少或消除渗漏水。

7.5.6 检修道、电缆沟、预埋沟处治措施如下：

按照原设计恢复重建检修道、电缆沟、预埋沟等构件。

2.21 处治材料

震害处治措施涉及的主要材料如下表 7.6-1~表 7.6-3 所示。

(1) 钢纤维

表 7.6-1 钢纤维性能指标

钢纤维技术指标	
断面形式	方形
等效直径	0.3~0.5mm
单根抗拉强度	≥380Mpa
长度	20~25mm
长径比(L/D)	40~60
掺量	118kg/m ³
参考规范	120-JGJT 221-2010 《钢纤维混凝土应用技术规程》
注：拌合时应保证钢纤维的均匀性。钢纤维砼的粗骨料粒径不宜大于 20mm。	

(2) 微硅粉

表 7.6-2 微硅粉性能指标

微硅粉主要技术指标	
掺量	8%
平均粒径	0.15~0.2μm
比表面积	15~20m ² /g
SiO ₂ 含量	≥85%
粒度(45μm 筛余)	≤10%
参考规范	YB/T115-2004 (微硅粉标准)

(3) 聚丙烯腈纤维添加剂

表 7.6-3 聚丙烯腈纤维添加剂主要技术指标

序号	项目	技术指标
1	掺量	0.8kg/m ³
2	采用直径	12~15μm

3	长度	6~12mm
4	抗拉强度	$\geq 800\text{MPa}$
5	弹性模量	7.0~9.0GPa

征求意见稿

8 隧道承载能力不足处治

2.22 一般规定

8.1.1 隧道承载力不足处治应包括隧道衬砌、横向联络通道等构造物因外荷载、材料老化以及衬砌固有缺陷等因素引起的结构承载力不足的处治。

【条文说明】隧道承载力不足处治是指隧道病害引起的隧道衬砌结构承载力不足所进行的隧道处治。引起隧道衬砌承载力不足的因素很多，针对其成因主要可以归结为结构外力、材料老化、设计施工缺陷、灾害影响等，本章处治主要针对结构外力、材料老化、衬砌固有缺陷等一般因素引起的病害，针对水害、火灾、地震等灾害影响所进行的处治设计相见其他各章。

8.1.2 病害处治工作可按下列程序进行：发现隧道病害—病害调查—隧道病害初步分类与分级—隧道病害成因检测—隧道成因病害分析—隧道结构承载力分析—病害处治。

【条文说明】引起隧道承载力不足的病害处治，一般需经历由表及里、层层分析的过程，其通常以表观病害如裂缝、剥离的发现或定期检查如衬砌背后空洞的揭露等为起点，结合病害结构及营运安全的影响、必要的成因检测结果、隧道所处的地形、地质、设计特点、施工状况等因素，经过综合分析，确定病害成因与处治方法，并以病害处治方案的实施为终点。本条文明确了隧道承载力不足病害处治的一般程序，其中隧道病害调查包括了对土建结构的经常检查、定期检查及应急检查。

8.1.3 引起隧道结构承载力不足的病害可按病害成因进行分类，并按其对隧道营运安全和结构安全的影响进行分级。

8.1.4 在病害处治之前，需按经常检查、常规检查、应急检查的要求开展相关的工作，初步确定病害分类、分级并初步判定病害的成因，为制定病害成因检测、确定病害分类、分级和病害处治设计奠定基础。

8.1.5 病害隧道结构承载力，应根据病害类型、发展程度、结构检测结果予以分析，并宜通过结构承载力计算综合评定，病害隧道结构分析应满足以下原则：

1 结构分析应考虑现有隧道病害的影响，各种计算参数应基于隧道结构的检测结果；

2 结构分析计算应满足《公路隧道设计规范》(JTG D70)，并应结

合隧道的龄期、隧道设计标准、材料性能等进行计算；

3 处治后的结构分析应根据处治后结构的实际受力情况和边界条件进行，选取相应的隧道结构单元进行计算；

【条文说明】病害隧道结构承载力分析是隧道承载力不足病害处治的重要组成部分，其与新建隧道结构分析的主要差别在于，病害结构为既有结构，其结构性能指标在隧道运营多年后可能有存在较大程度的变化，因而分析时必须以隧道现状为基础。条款 1 明确了结构分析应考虑既有病害对现有结构的影响，在分析计算时应把病害影响纳入结构分析模型中，如衬砌裂缝，计算时可认为已开裂的混凝土只能承受压应力和部分剪应力，不能承受拉应力；衬砌厚度不足可按其具体位置、范围、实际厚度纳入模型；衬砌材料劣化则应按实测弹性模量、材料强度来进行计算；而衬砌背后空洞则可通过取消相应位置的地层弹簧及地层压力予以反映。

8.1.6 病害处治措施应根据病害分类、分级、成因分析的结果、隧道结构承载计算及隧道营运情况综合确定。

8.1.7 隧道病害处治材料的选取，应结合处治方法，按安全、可靠、绿色环保、经济等综合考虑，所用材料的品种规格及使用性能，应符合国家、行业相关标准的规定，并满足设计要求。

【条文说明】为了保证隧道病害处治效果，处治材料性能必须符合国家相应标准，并满足设计要求。在材料选取时应注意，隧道为半隐蔽工程，隧道内部空气流动性较差，在处治施工时必须采用不影响施工人员身体健康的无毒、无刺激性产品。目前市场上新材料较多，难免存在鱼目混珠的情况，因此材料进场时应对其品种、级别、包装及出厂日期等检查，并应对其主要性能指标按照国家标准进行复检。

2.23 病害分类

8.2.1 引起衬砌结构承载力不足的病害按病害成因可分为外荷载作用引起的病害、材料劣化引起的病害以及衬砌固有缺陷引起的病害三大类。

【条文说明】隧道病害分类方法很多，目前国内外主要有以下的分类方法：

1 基于病害可见性的分类方法

隧道衬砌结构的病害基于病害可见性，一般分为表面病害和非表面病害两种。所谓表面病害即指肉眼可见的隧道病害，包括隧道衬砌开裂、掉块、严重错台等；非表面病害，一般包括衬砌厚度不够、强度未达到设计标准及衬砌背后空洞等病害。

2 基于病害外观特征的分类方法

所谓隧道病害外观特征是指能够通过观察、量测获得病害特征信息，通过获得的数据可以重新构建隧道病害的数学力学模型，是隧道健康诊断和计算模型的基础。基于隧道病害外观特征的分类方法中，最重要的是分类标准。分类标准的确定不仅与病害外观几何特征、物理特征有关，还与研究者目的相关，显然由于不同研究目的差异，其最终分类必然存在差别，因此分类结构随意性较大。这里列举其中一种较为常见按病害形态作为分类标准的分类，其中与衬砌相关的病害类型有：衬砌裂缝、断面变形侵限、衬砌错台错缝、混凝土剥落分离、表观病害(衬砌背后空洞、混凝土强度不足)。

3 基于病害发生位置属性的分类方法

日本铁路隧道病害专家系统根据病害发生的位置属性对铁路隧道的病害进行分类。具体的做法是将病害按出现的位置进行分类，如衬砌病害、围岩病害等，其中衬砌病害就包括开裂、接触开裂、错动、剥落脱落、变形、材料劣化、砂土流失等；围岩病害则包括下沉、坍塌和滑动。这样划分病害的优点在于，便于根据病害发生的位置为病害的专项整治提供便利。

4 基于结构健康状态的分类方法

考虑到隧道病害信息特征与时间的相关性、隐蔽性、出现的频度、部分病害难以定量及信息量大等特点，从综合全面地考虑隧道土建结构的健康状态出发进行病害分类，其中与衬砌结构相关的病害分类有衬砌裂损、衬砌腐蚀。衬砌裂损主要与衬砌承载力相关，并可进一步细分为衬砌变形、衬砌移动、衬砌开裂、衬砌缺陷等。

5 基于病害成因的分类方法

隧道病害研究中，只有明确隧道病害主要成因，才能采取有效的病害处治方法与对策，所以病害成因分析历来是隧道病害研究的重点内容，因而基于病害成因的病害分类方法也就普遍受研究者重视，而且由于病害类型与病害原因直接相关，因此根据病害分类进行的病害检测及处治也更有针对性。这一方式也为公路隧道养护设计规范所采用，由于本规程所进行的病害分级及病害处治方法的选取均需根据病害检测结果确定，而病害检测项目及标准则依据养护规范执行，因此在总体上采用与养护规范相关的病害分类思路，对于后续的病害分级实施较为有利，因此把引起衬砌承载力不足病害分为外荷载作用引起的病害、材料劣化引起的病害以及衬砌固有缺陷引起的病害三大类。

8.2.2 根据病害成因，外荷载作用引起的病害主要包括衬砌变形、衬砌裂缝、衬砌起层与剥落。

【条文说明】外荷载作用主要是指由围岩所产生的压力作用，一般可分为松散压力、地形或地质形成的偏压、地层滑坡、膨胀性土压等，是衬砌病害形成的重要因素。衬砌变形、衬砌裂缝、衬砌起层与剥落均为衬砌结构在外荷载作用下衬砌病害的主要形式，因此均归类于外荷载作用所引起的病害。

8.2.3 根据病害成因，材料劣化引起的病害主要包括衬砌混凝土强度下降、衬砌钢筋锈蚀及衬砌起层与剥落。

【条文说明】所谓的材料劣化一般是指由于施工因素、环境侵蚀、灾害和人为因素等造成隧道衬砌的质量逐渐降低的过程，一般包括衬砌混凝土强度下降、衬砌钢筋锈蚀。衬砌起层与剥落，既可以由外荷载引发也可能由材料劣化引发，本条特指后者。

8.2.4 根据病害成因，衬砌固有缺陷引起的病害主要包括衬砌背后空洞和衬砌厚度不足。

【条文说明】衬砌背后空洞是衬砌因施工或地质原因所形成的一种特殊状态，其对衬砌结构影响主要有两个方面：第一，改变了衬砌受力条件，在空洞处没有地层抗力作用，此时衬砌结构在周边压力作用下在空洞处易产生开裂或压溃；第二，空洞内围岩的突然性坍塌可能击穿衬砌，引起衬砌结构破坏。衬砌厚度不足一般为施工质量问题，属于衬砌固有缺陷。衬砌厚度不足的评价方式与衬砌混凝土强度下降类似，均以衬砌厚度作为评价主要标准。应当注意衬砌厚度不足，除了因施工引起外，当隧道衬砌处于特殊环境中如侵蚀性环境时，其厚度可能随时间逐渐下降。

8.2.5 衬砌变形是指隧道衬砌在外荷载作用下，其轮廓形状发生改变的情况，一般可分为横断面变形和纵断面变形。

8.2.6 衬砌裂缝是指隧道衬砌在外荷载的作用下，其表面或内部发生开裂的情况，根据其延伸形态可分为环向裂缝、斜向裂缝和纵向裂缝。

8.2.7 衬砌起层与剥落是指由于外荷载或材料劣化的作用，隧道衬砌表面发生的局部破坏并剥落。

8.2.8 衬砌背后空洞是指衬砌与围岩之间存在空隙或两者之间回填不够密实。

8.2.9 衬砌厚度不足是指衬砌有效厚度未达到设计要求。

2.24 成因检测

8.3.1 病害成因检测实施前应先制订完备的检测方案,检测项目应根据初步的病害成因分析的结果制定。

【条文说明】隧道病害成因检测前应制定详细的实施方案,方案制定前应对隧道技术资料、档案以及以往的调查和检测资料进行详细查阅和分析,并对隧道周围的地质及地表环境等展开实地调查,以充分掌握相关的技术信息。在初步判定隧道衬砌结构各种病害产生的原因和发展变化趋势后,合理的选定检测项目,以便于科学的评价隧道病害等级,对症下药的采取处治对策。

8.3.2 病害成因检测应按专项检查实施,具体要求应满足《公路隧道养护设计规范要求》(JTG H12)。

8.3.3 对隧道表面病害主要采取以目测和简易工具测量为主的人工调查法,对于不能用目测和简易工具测量的病害,应采用专门仪器进行测试的检测方法。

8.3.4 针对隧道的不同病害类型和程度,可采用不同的检测方法和技术,主要方法有回弹法、超声回弹综合法、钻孔取芯法、电磁法、超声波法、冲击反射法等。

8.3.5 外荷载作用引起的病害的成因检测可分为衬砌变形与破损检测、衬砌结构检测、围岩状况与不良地质检测、洞口地形调查与变形监测等,一般可结合隧道具体情况按下表,制定检测项目。

表 8.3.5 外荷载引起的病害成因检测内容及方法一览表

编号	检测内容	检测方法	备注
1	隧道结构变形监测(内部断面形状、拱顶下沉、周边收敛)	全站仪法、激光断面仪法、全断面自动监测法	必做
2	衬砌裂缝调查(分布、位置、长度、延伸方向、宽度、深度)	人工调查法、快速检测车、钻孔取芯法、超声波法、裂缝计法、裂缝深度测试仪法	必做
3	衬砌起层与剥落调查(分布、范围、深度、是否会掉落)	人工调查法、快速检测车	必做
4	隧道衬砌状况检测(衬砌厚度、衬砌背后空洞)	电磁法、冲击反射法、超声法、钻孔检查法	必做
5	衬砌混凝土强度检测	回弹法、超声-回弹法、钻孔取芯法	宜做
6	钢筋锈蚀检测	剔凿检测法、电化学测定法、	

		综合分析判定法	
7	碳化深度检测	酚酞液碳化深度检测法	
8	围岩状况检测	电磁法、冲击反射法、超声法、钻孔检查法	
9	围岩内部位移监测	多点位移计法	
10	不良地质体探测	冲击反射法、电磁波法、电法、钻探法	
11	地形和洞口边坡滑动性调查	人工调查法	洞口段必做
12	地表位移监测	全站仪法	洞口段按病害发展程度选做

8.3.6 材料劣化引起的病害的成因检测可分为衬砌结构检测、衬砌变形与破损检测，一般可结合隧道具体情况按下表制定检测项目。

表 8.3.6 材料劣化引起的病害成因检测内容及方法一览表

编号	检测内容	检测方法	备注
1	衬砌混凝土强度检测	回弹法、超声-回弹法、钻孔取芯法	必做
2	钢筋锈蚀检测	剔凿检测法、电化学测定法、综合分析判定法	必做
3	碳化深度检测	酚酞液碳化深度检测法	必做
4	衬砌起层与剥落调查(分布、范围、深度、是否会掉落)	人工调查法、快速检测车	必做
5	隧道衬砌状况检测(衬砌厚度、衬砌背后空洞)	电磁法、冲击反射法、超声法、钻孔检查法	必做
6	隧道结构变形监测(内部断面形状、拱顶下沉、周边收敛)	全站仪法、激光断面仪法、全断面自动监测法	

7	衬砌裂缝调查(分布、位置、长度、延伸方向、宽度、深度)	人工调查法、快速检测车、钻孔取芯法、超声波法、裂缝计法、裂缝深度测试仪法	根据病害发育程度选做
---	-----------------------------	--------------------------------------	------------

8.3.7 衬砌固有缺陷引起的病害的成因检测可分为隧道衬砌状况检测、围岩状况与不良地质检测和隧道结构变形与破损检测，一般可结合隧道具体情况按下表制定检测项目。

表 8.3.7 衬砌固有缺陷引起的病害成因检测内容及方法一览表

编号	检测内容	检测方法	备注
1	隧道衬砌状况检测(衬砌厚度、衬砌背后空洞)	电磁法、冲击反射法、超声波法、钻孔检查法	必做
2	衬砌混凝土强度检测	回弹法、超声-回弹法、钻孔取芯法	必做
3	围岩状况检测	电磁法、冲击反射法、超声波法、钻孔检查法	选做
4	不良地质体探测	冲击反射法、电磁波法、电法、钻探法	选做
5	衬砌裂缝调查(分布、位置、长度、延伸方向、宽度、深度)	人工调查法、快速检测车、钻孔取芯法、超声波法、裂缝计法、裂缝深度测试仪法	根据病害发育程度选做
6	衬砌起层与剥落调查(分布、范围、深度、是否会掉落)	人工调查法、快速检测车	根据病害发育程度选做
7	隧道结构变形监测(内部断面形状、拱顶下沉、周边收敛)	全站仪法、激光断面仪法、全断面自动监测法	

8.3.8 隧道病害的现场检测工作结束后，应及时修补，因检测造成的衬砌结构局部损伤，修补后的衬砌结构应满足承载力的要求。

2.25 病害分级

8.4.1 引起结构承载力不足的隧道衬砌病害分级是通过综合分析隧道分幅或分段的调查和检测结果，来评价隧道各幅或各段结构的病害状态。

8.4.2 幅是指施工模板台车的长度，段是指可以自定义的长度，如洞口段、

洞身段等，人行、车行横洞等联络通道则可视作整体作为单一段。

【条文说明】隧道结构为长条形结构，沿隧道走向，围岩特性、结构厚度等均存在较大差别，因此对隧道衬砌病害评价应分幅或分段进行。由于山岭隧道二次衬砌目前主要采用模板台车现浇施工，故按模板台车长度定义检查分段较为合理，其精度也可满足实际需要。当相邻几幅衬砌受力条件基本相似，则可将相邻几幅衬砌整合在一起按分段进行评价，隧道分段一般不宜大于 100m。人行、车行横洞一般长度较短，因此可按一个整体作为一个单一段进行评价。

8.4.3 引起结构承载力不足的隧道衬砌病害应根据缺损程度、发展状态、对结构及营运安全的影响程度，分为 0~4 五个等级，分级的标准按表 8.4.3。

表 8.4.3 引起结构承载力不足的隧道衬砌病害分级标准表

等级/状况值	评定因素			
	缺损程度	发展趋势	对行人、车辆安全的影响	对隧道结构安全的影响
0	无或非常轻微	无	无影响	无影响
1	轻微	趋于稳定	目前尚无影响	目前尚无影响
2	中等	较慢	将来会影响行人、车辆安全	将来会影响隧道结构安全
3	较严重	较快	已经妨害行人、车辆安全	已经影响隧道结构安全
4	严重	迅速	严重影响行人、车辆安全	严重影响隧道结构安全

【条文说明】表 8.4.3 主要根据《公路隧道养护技术规范》(JTG/T H21-2011)表 4-2 制定。

8.4.4 引起结构承载力不足的隧道衬砌病害等级的划分应根据检测项目、分类病害等级和隧道分幅三个层次进行评价。

1 根据各项检测项目中各项检测指标的评价结果，确定单个检测项目的评价等级；

2 根据各类病害情况中各项检测项目的评价结果，确定单类病害的等级；

3 根据各类病害的评价结果，确定引起结构承载力不足的隧道衬砌分幅或分段病害等级；

8.4.5 外荷载作用引起的病害等级评价，应按衬砌变形、衬砌裂缝、衬砌起层与剥落等检测项目，先分别评价每个项目的病害等级，然后取其中最高一级作为该幅或该段衬砌结构外荷载作用引起的病害的等级。

8.4.6 评价衬砌变形检测项目的病害等级时，可按表 8.4.6，分别评价每个指标的病害等级，然后取最高值作为衬砌变形检测项目的病害等级。

表 8.4.6 衬砌变形检测项目病害等级评价表

等级（状况值）	定量描述		定性描述
	变形速度 v (mm/年)	变形/内限距 s	
1	$v < 1$	$s < 1/4$	衬砌存在裂缝，但对衬砌承载力基本无影响
2	$1 \leq v < 3$	$1/4 \leq s < 1/2$	衬砌裂缝可能发展，近期对衬砌承载暂无明显影响
3	$3 \leq v < 10$	$1/2 \leq s < 3/4$	衬砌开裂较严重，对衬砌承载力有一定影响
4	$v \geq 10$	$s \geq 3/4$	衬砌开裂严重，对衬砌承载力损害严重

注：1 内限距指隧道内轮廓至建筑限界的距离；

2 因山体滑移等导致衬砌变形，应判定为 3 级以上，以采取紧急对策措施。

8.4.7 评价衬砌裂缝检测项目的病害等级时，可按表 8.4.7，分别评价每个指标的病害等级，然后取最高值作为衬砌裂缝检测项目的病害等级。

表 8.4.7 衬砌裂缝检测项目病害等级评价表

等级（状况值）	定量描述		定性描述	备注
	裂缝宽度 b (mm)	裂缝长度 l (m)		
2	$b \leq 3$		衬砌裂缝在发展，近期对衬砌承载力暂无明显影响	裂缝存在发展时
2/3	$b > 3$	$l \leq 5$	衬砌存在一定程度开裂并存在发展，对衬砌承载力可能存在影响	
3/4	$b > 3$	$l > 5$	衬砌开裂较为严重，并存在发展，已影响或严重损害衬砌承载力	
1/2	$b \leq 3$		衬砌存在裂缝，对衬砌承载力基本无影响或近期影响不明显	无法确定裂缝是否存在发展时
2	$3 < b \leq 5$	$l \leq 5$	衬砌裂缝可能发展，近期对衬砌承载力，暂无明显影响	
2/3	$3 < b \leq 5$	$l > 5$	衬砌存在一定程度开裂，对衬砌承载力可能存在影响	
3	$3 < b \leq 5$	$l > 10$	衬砌开裂较严重，对衬砌承载力有一定影响	
2/3	$b > 5$	$l \leq 5$	衬砌存在一定程度开裂，对衬砌承载力可能存在影响	
3	$b > 5$	$l \leq 10$	衬砌开裂较严重，对衬砌承载力有一定影响	
3/4	$b > 5$	$l > 10$	衬砌开裂较严重或严重，已影响或严重损害衬砌承载力	

注：1 表中的裂缝主要以水平方向的裂缝或剪断裂缝为对象，对于横向裂缝，将评定状况值相应地降低 1 个等级即可。

2 当宽为 0.3~0.5mm 以上的裂缝，其分布密度大于 200cm/m² 时，可升高 1 个评定等级

或者采用判定分类中较高的判定。

3 当裂缝众多时，宜将宽度最大的裂缝作为主要检查对象。

8.4.8 评价衬砌起层与剥落检测项目的病害等级时，可按表 8.4.8，分别评价每个指标的病害等级，然后取最高值作为衬砌起层与剥落检测项目的病害等级。

表 8.4.8 衬砌起层与剥落检测项目病害等级评价表

等级(状况值)	定量描述		掉落可能性	定性描述
	剥离直径 d (mm)	剥离深度 t(mm)		
1	$d < 50$	$t < 6$	无	剥离范围小，深度浅，无掉落可能，对衬砌承载力无影响
2	$50 \leq d < 75$	$6 \leq t < 12$		衬砌存在剥离情况，近期对衬砌承载力暂无影响
3	$75 \leq d < 150$	$12 \leq t < 25$	侧墙	剥离较严重，对衬砌承载力有影响；剥离可能掉落，危及行人或车辆
4	$d \geq 150$	$t \geq 25$	拱部	剥离严重，对衬砌承载力有影响；剥离可能掉落，危及行人或车辆

注：1 衬砌剥离指由于外荷载或材料劣化的作用，隧道衬砌表面发生的局部小块剥落。剥离直径指剥离范围的等效圆直径，剥离深度指剥离范围内的最大深度。

2 掉落可能性是指在外荷载作用下或因衬砌材料劣化，导致混凝土剥离而可能掉下。

3 防水砂浆剥离掉下时，当剥落层厚度较薄，可降低 1 个等级。

8.4.9 材料劣化引起的病害等级评价，应按衬砌混凝土强度下降、衬砌钢筋锈蚀、衬砌起层与剥落等检测项目，先分别评价每个项目的病害等级，然后取其中最高一级作为该幅或该段衬砌材料劣化的病害的等级。

8.4.10 衬砌混凝土强度下降评价时应按有效厚度进行，其病害等级可参照表 8.4.15 确定。

8.4.11 评价衬砌钢筋锈蚀检测项目的病害等级时，可按表 8.4.11 确定病害等级。

表 8.4.11 衬砌钢筋锈蚀检测项目病害等级评价表

等级(状况值)	定量描述	定性描述
	钢筋截面损失率 g (%)	
1	$g < 3$	表面或小面积的腐蚀
2	$3 \leq g < 10$	浅孔蚀或钢筋全周生锈
3	$10 \leq g < 25$	钢材断面减小程度明显，钢结构功能受损

4	$g \geq 25$	结构功能严重受损
---	-------------	----------

注：钢筋截面损失率是指由于腐蚀现象而损失掉的钢筋截面面积与未发生腐蚀现象时截面面积的比值。

8.4.12 评价材料劣化引起的衬砌起层与剥落的病害等级时，可按表 8.4.8 确定病害等级。

8.4.13 衬砌固有缺陷引起的病害等级评价，应按衬砌背后空洞、衬砌厚度不足等检测项目，先分别评价每个项目的病害等级，然后取其中最高一级作为该幅或该段衬砌固有缺陷的病害的等级。

8.4.14 评价衬砌背后空洞检测项目的病害等级时，可按表 8.4.14 确定病害等级。

表 8.4.14 衬砌背后空洞检测项目病害等级评价表

等级（状况值）	定量描述	定性描述
	衬砌背后空洞深度 k (mm)	
2	$k < 100$	衬砌侧面存在空隙，估计并由于地下水的作用，空隙会扩大
3	$100 \leq k < 500$	拱部背面存在大的空洞，上部落石可能掉落至拱背
4	$k \geq 500$	衬砌拱部背面存在大的空洞，而且衬砌有效厚度很薄，空腔上部落石可能掉落至拱背

注：当拱背存在高 30cm 以上的空洞且有效衬砌厚度小于 30cm 时，可按 3/4 状况值评定。

【条文说明】衬砌背后空洞可能引发突发性坍塌。关于突发性坍塌，根据国外资料显示，当拱背存在高 30cm 以上的空洞且有效衬砌厚度小于 30cm 时，空腔落石就可能砸坏衬砌结构，国内外均有过类似事例。因此，发现类似情况时，可按 3/4 状况值评定。尤其是曾经发生坍方的地方或节理发育、漏水严重的地段，尤其应给予充分的注意。

8.4.15 评价衬砌厚度不足检测项目的病害等级时应按有效厚度指标进行评价，其等级可参考表 8.4.15 确定，实际的病害等级需结合结构承载力验算结果确定。

表 8.4.15 衬砌厚度不足检测项目病害等级评价表

等级（状况值）	定量描述	定性描述
	有效厚度/设计厚度： q	衬砌承载力

1	$q > 2/3$	损害不严重
2	$1/2 \leq q \leq 2/3$	可能损害
3/4	$q < 1/2$	一定损害/损害明显

注：1 衬砌有效厚度小于 30cm，即可考虑评定等级（状况值）为 2/3，再考虑其它因素综合测定。

【条文说明】衬砌断面承载力与断面强度密切相关。由于单纯采用衬砌断面的砼强度或衬砌厚度均不能很好的描述衬砌断面实际强度，因此本条在评价断面强度时采用有效厚度进行评价。所谓有效厚度，是指混凝土强度不小于设计标准强度的衬砌厚度，当不了解设计标准强度时，可取 15MPa（150kgf/cm²）为标准。衬砌断面强度的变化情况以有效衬砌厚度和设计衬砌厚度之比来表示。例如，设计衬砌厚度为 50cm，实际衬砌厚度为 60cm，其中低于设计标准强度的部分厚度为 20cm，有效厚度就为 40cm，则衬砌劣化程度就是 40/50，尚有 2/3 以上部分是符合设计要求的。这里有一点应引起注意，断面承载力是否可满足结构承载力要求，不仅与断面本身有关，还与断面所处的位置等因素相关，因此上表仅作为参照使用，最终病害等级的确定宜结合结构承载力计算结果确定。

8.4.16 引起结构承载力不足的隧道衬砌病害等级应取外荷载作用、材料劣化以及衬砌固有缺陷引起的病害等级最高值，作为该段或该幅衬砌病害等级。

2.26 处治方法

8.5.1 引起结构承载力不足的隧道衬砌病害一般为多因素联合作用的结果，在具体选择处治措施及工法时应根据隧道病害原因、病害分级、承载力分析结果、隧道运营情况，按照安全、经济、合理的原则制定处治方案。

8.5.2 引起结构承载力不足的隧道衬砌病害处治应包括修复破损结构、消除结构病害、恢复结构物设计标准、维持良好的技术功能状态，并应符合下列规定：

1 处治设计应综合考虑隧道病害成因及病害等级等因素，不同的衬砌病害等级应采用不同的处理原则，一般可按表 8.5.2 确定。

表 8.5.2 不同的衬砌病害等级处理原则表

等级（状况值）	处理原则
1	隧道结构无破损或存在轻微破损，现阶段对行人、行车不会有影响，只需进行监视或观察即可。
2	隧道结构存在一定的破损和病害，这些病害若继续发展，则会危及行人、行车安全，应对病害部位进行重点监视，准备好处治对策和措施，一旦病害继续发展，则应有计划地采取处治对策和措施。

3	隧道结构存在较严重破坏,应尽早采取处治对策和措施,尽早排除危险隐患,防止事故的发生。
4	隧道结构已存在严重破坏,已危及到行人、行车安全,必须立即采取紧急处治对策和措施,不得延误,防止事故的发生。

2 病害等级为 3 级及以上时宜结合病害状态进行衬砌结构承载力验算,衬砌结构承载力计算方法应满足《公路隧道设计规范》(JTG D70)的有关要求。

3 病害处治工程施工完毕后,应对被处治的段落进行检查,其分幅或分段病害等级应降低至 0 级或 1 级。

8.5.3 依据不同的等级及病害原因,应采用不同的处治方法,具体制定处置方案时可参照表 8.5.3 所示。

表 8.5.3 病害处治方法参考表

处 治 措 施 病 害 成 因	表面 清扫	凿 除	断 面 修 复	裂 缝 灌 浆	防 护 网	喷 射 混 凝 土	止 水 排 水	套 拱	衬 砌 背 面 注 浆	锚 杆 加 固	凿槽 嵌拱 或直 接增 设钢 拱	施作 钢带 (板)	灌 浆 锚 固	围 岩 压 浆	更 换 衬 砌	隧 底 加 固	滑 坡 整 治
材质劣化	○	☆	☆	☆	★	☆	○	☆		○	○	○		○	★		
衬砌背面 空洞									★					☆	☆		
衬砌厚度 不足						☆		★	★	☆		☆	○	☆	★		
松弛压力						○	○	○	★	☆	★	○	☆	☆	☆		
偏压						☆	○	☆	☆	★	★	○	★	○	☆	★	☆
地层滑坡							☆	☆	☆	☆	★	○	★		☆	☆	★
膨胀性 土压						☆	○	☆	☆	★	★	○	★		☆	★	
其他原因导致的结构承载力足						☆	○	☆	★	★	★	☆	★			★	☆

注：1 符号说明★一对病害处治非常有效的方法；☆一对病害处治比较有效的方法；○一对病害处治有些效果的方法

2 松弛压力中包含突发性崩溃。

【条文说明】病害产生原因是隧道病害处治的根本，设计时应根据病害成因检测结果、隧道设计资料、施工技术资料、地质条件等综合分析。病害处治方法的选取应以病害处理原则为基础，结合病害原因，从安全、经济、耐久等方面考虑综合确定，比如说衬砌结构某幅存在纵向裂缝，其病害等级最终评定为2级，其病害原因为地形偏压，根据病害处理原则，现阶段应以监测为主，因此在处治措施上则宜采用表面修复为主，辅以加强经常检查、定期检查的措施。本条列举了引起衬砌结构承载力不足病害原因与处治方法，供设计参考。由于隧道病害原因一般很少单独出现，大部分为集中原因重复出现，因此在选定方法前应对各处治方法进行综合研究，充分考虑各种方法的组合。

表中表面清扫、凿除、断面修复、裂缝修补均为一般性措施，其主要作用如下：

- 1 抵御诱发钢筋锈蚀的介质侵入，增加结构耐久性，延长结构实际使用年限；
- 2 通过补强保持衬砌构件完整性；
- 3 恢复衬砌施工功能，提高其防水、抗渗能力；
- 4 消除衬砌裂损等病害对人们形成的心理压力；
- 5 改善衬砌外观。

从上述可以看出，一般性措施主要应用于结构尚有足够承载力的病害处治当中，因此严格的说不属于引起隧道承载力不足的病害处治措施，但是考虑到针对材料略化，一般性措施可以使得衬砌承载力得到改善或部分恢复，而且针对外荷载引起的病害，通过一般性措施处治后亦可起到延缓病害的发展作用，因此统一纳入本章处理措施中。针对一般性措施的使用还有两点应注意：

- 1 一般性措施主要适用于病害等级为2级及以下的病害处治，对于病害等级为3级及以上的病害处治，一般只作为辅助性措施；

- 2 由于一般性措施，不就一般情况而言，施做后并不能改变原衬砌结构的受力条件，因此表中仅在材料劣化原因引起病害一栏中明确其为比较有效的处治方法；

- 3 由外荷载引起的病害，当病害等级为2级时，结合病害情况，仍可采用一般性措施作为处治手段，但从病害长期发展的角度上看宜，在一般性措施以外，额外增加针对病害原因的处治措施。

由于目前行业中暂没有针对病害处治的方法进行统一定义，为了便于设计人

员合理选取处理措施，此处明确各种措施主要实施内容及特点如下，供设计人员参考：

1 表面清扫

表面清扫可防治表面附着有害物对衬砌构成劣化。清扫时应认真调查，确定表面附着有害物的种类，从而选择合适的清洗液。一般说来，进行任何与衬砌表面有关的病害处治如套拱、施做钢带等均需要提前进行表面清扫，确保既有衬砌和补强材料的粘结强度。

2 凿除

凿除是选用喷砂器、高压射水、压缩空气、电动锤、钢凿刀等，将劣化部分除去。衬砌有块状掉落的可能或衬砌局部劣化时，可以对病害部位进行凿除处理。当修复内衬而隧道净空没有富余时，亦可凿除病害范围内的衬砌，再做修复施工。

3 断面修复

断面修复是在凿除处及衬砌断面缺损部分用混有高分子材料的砂浆如改性环氧类的聚合物改性水泥砂浆等进行充填。作为剥落、凿除的后续处治措施，施工时，须采用金属网和锚栓等使之与衬砌一体。

4 裂缝修补

裂缝修补应根据裂缝宽度选用不同的方法，一般有表面封闭法、注射法、压力注浆法和充填密封法等。

表面封闭法是指通过利用混凝土表层微细独立裂缝或网状裂纹的毛细作用吸收低黏度且具有良好渗透性的修补胶液，封闭裂缝的一种方法，必要时还可在衬砌表面黏贴纤维复合材料以增强封护作用，一般适用于裂缝宽度在 0.2mm 以下的静止裂缝修补。

注射法是指通过以一定的压力将低黏度、高强度的裂缝修补胶液注入裂缝腔内，修补裂缝的方法，此方法适用于裂缝宽度 0.1mm~1.5mm 静止的独立裂缝、贯穿性裂缝以及蜂窝状局部缺陷的补强和封闭。

压力注浆法是指在一定时间内，以较高压力将修补裂缝用的注浆料压入裂缝腔内，此法适用于衬砌结构贯穿性裂缝、混凝土的蜂窝状严重缺陷以及深而蜿蜒的裂缝。

充填密封法一般用于裂缝宽度大于 0.5mm 活动裂缝或静止裂缝处理，处理

时可沿裂缝开槽，槽深和槽宽分别为 20mm 和 15mm 的 U 型沟槽，然后采用改性环氧树脂或弹性填缝材料填充，并黏贴纤维复合材料以封闭表面，但应注意该法只能封闭裂缝表面，忽略了裂缝深部的封闭，对裂缝处治并不十分彻底，因此一般不适用于贯通性裂缝。

表面封闭法、注射法及压力注浆法的裂缝注浆材料一般可采用改性环氧树脂类、改性丙烯酸酯类、改性聚氨酯类等的修补胶液，其中包括配套的打底胶、修补胶和聚合物注浆料等的合成树脂类修补材料。活动裂缝的修补，以及混凝土与其他材料接缝截面干缩性裂隙的封堵则可采用无流动性的机硅酮、聚硫橡胶、改性丙烯酸酯、聚氨酯等柔性的嵌缝密封胶类修补材料。裂缝大于 1.0mm 的静止裂缝的修补则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的无机胶凝类材料等

通过裂缝修补可使衬砌结构，因开裂而降低的刚度和整体性得以提高，可有效阻止外界腐蚀性介质通过裂缝深入结构内部，提高结构耐久性，是目前隧道衬砌裂缝修编最为常用的技术。

5 防护网

防护网是用锚栓等把金属网固定在衬砌表面上，以防止衬砌掉落的方法。该法对材料劣化引起的病害处治效果较好，适用于衬砌开裂处、施工缝处较小范围内部分衬砌混凝土有可能掉落且内衬净空没有富余，无法设置拱架等其他措施时的病害处治。设计采用的金属网应选择具有良好耐火性、耐腐蚀性和耐久性的材料，同时要求网目细、重量轻，减少对衬砌增加额外荷载，一般可采用 $\Phi 6.5$ 的钢筋做 10cm×10cm 的网格。施工前应凿除衬砌表面劣化部分，并清理干净。

6 喷射混凝土

喷射混凝土是在比较大的范围内施作 10-15cm 厚的喷射混凝土以达到加强衬砌的方法。当隧道衬砌表面有剥落的情况时，能全面或部分修补、加强衬砌表面。施工前将需要加固部分的衬砌混凝土凿除，并且保证喷射混凝土不侵入隧道限界，然后在衬砌上打孔安装锚杆，一般宜与钢筋网联合使用。施工时先用高压水将凿毛面清洗干净，喷射混凝土，喷射完成后将混凝土表面抹平，并与衬砌光滑顺接。施工时应密切观察衬砌变形位移及周围裂缝的发展情况，确保施工安全。

喷射混凝土的种类很多目前主要有：素混凝土、钢筋网喷射水泥砂浆、钢筋网喷射混凝土和钢纤维喷射混凝土等，具体设计时应根据病害程度和施工条件等因素进行选择。由于喷射混凝土需附着于衬砌表面，因而要求喷射混凝土必须有足够的强度和附着率，当采用钢筋网喷射混凝土时，钢筋网保护层厚度应满足规范要求。

7 止水排水

地下水的浸泡与活动对围岩的强度与稳定性影响较大，合理排泄或封堵地下水，避免其软化隧道周边岩体，往往是加强隧道稳定的重要措施；对于地表滑坡体，有效的防止地表水下渗，降低地下水位，也是治理滑坡关键一环。从衬砌材料劣化发生机理来看，通常水都是不可或缺的因素，有效的防水、引排措施可大大延缓材料劣化的发展，延长结构寿命，因此止水排水措施针对大多数隧道病害处治都是有效的。止水排水的方法很多针对不同的对象，可以采用不同的方法，比如说岩体排水可采用泄水孔、排水渗沟，防水则可以采用注浆堵水等方法，衬砌排水则可采用埋管或暗装接水盒，止水则可根据出水状态，按点渗、线渗、面渗等进行处理，具体的处理措施可参看隧道水害处治一节的要求进行处理。

8 套拱

当原衬砌虽裂损比较严重，但仍有一定的承载能力，而且净空断面存在缩小的可能时，可考虑采用套拱方案进行处治。套拱是在原衬砌外面加一层混凝土，使其与原有衬砌形成共同承载体的处治方法。采用套拱方案有两方面的优点，一是能较大地提高衬砌结构承载能力；二是能重新设置防排水系统，对渗漏水进行彻底的处治。套拱厚度根据病害严重程度确定，一般为 20~35cm，套拱一般宜整环施做，但净空不足时，可采用落道套拱的办法，当受条件限制设置局部套拱时，应加强套拱的拱脚设计，防止因套拱拱脚强度不足，影响结构整体承载力。套拱混凝土等级不应低于 C25，一般宜采用钢筋或格栅钢架混凝土结构。施工时首先凿除墙角混凝土及侵限混凝土，并将原衬砌混凝土表面凿毛，用高压水将表面冲洗干净，然后在墙角处将主筋植入边墙基础，并与套拱钢筋或钢架焊接，套拱与原衬砌之间应用 HRB400 16mm~20mm 钢筋钎钉连接，钎钉须埋入原衬砌内，浇筑套拱前应在原衬砌混凝土表面涂刷混凝土界面剂，增强新旧混凝土之间的粘结力。套拱混凝土厚度较薄，浇筑后拱顶密实度较难保证，因此套拱拆模后要进

压浆，以填充套拱背后空隙，使新旧拱圈连成整体。

9 衬砌背面注浆

衬砌背面注浆是在检测到的衬砌背后空洞处进行钻孔，植入注浆管，并注浆以填充空洞的一种病害处理方法，该方法适用于衬砌和围岩存在的空洞或二次衬砌与初期支护间存在的脱空的情况。压浆填充拱背空洞可改善衬砌受力状态，是提高衬砌承载能力的一项必要措施。对于结构破坏严重或拱背存在空隙或空洞的路段，进行注浆充填，一方面使衬砌与围岩紧密结合，荷载作用均匀，增强围岩弹性抗力，改善衬砌结构的约束条件，起到约束围岩进一步松弛的作用；另一方面能填充围岩孔隙，起到止水的作用。注浆材料应考虑空隙的大小、地下水状况、地质及施工可操作性、经济性等，一般多选用以水泥浆和水泥砂浆为主材的材料。注浆时应严格控制注浆压力，慎防因注浆压力过大，对隧道衬砌及附近的结构物产生不利影响，一般注浆的工作压力宜为 $0.3\sim 0.5\text{MPa}$ 。对二次衬砌背后空洞进行注浆时，为了避免注浆施工破坏原衬砌背后防水板，可根据物探结构，钻孔时深度略小于衬砌厚度，实际注浆时通过注浆压力顶破残留的衬砌混凝土。

10 锚杆加固

锚杆加固是利用锚杆的悬吊作用、组合梁作用、紧固作用及均匀压缩拱作用。在隧道结构产生病害的部位安设锚杆，以提高围岩的整体承载能力，将已产生裂纹的衬砌混凝土与已加固的围岩结合在一起，阻止衬砌结构的进一步破坏。当与喷射混凝土共同施作时，其加固效果更好，可有效的提供补强后衬砌结构的整体承载力，如在喷射混凝土中加入钢筋网或采用钢纤维喷射混凝土，可进一步提供衬砌的抗拉和抗裂性能，该工法适用于外荷载所致衬砌结构出现少量的纵向贯通裂缝。锚杆应沿裂缝走向布置，锚杆长度与间距应结合病害程度、围岩条件、隧道断面形状和尺寸、衬砌状态等确定，设计时应注意锚杆长度应穿过衬砌背后的回填区或围岩松动区，锚固在稳定岩体内。为了保证锚杆的耐久性，一般宜采用中空注浆锚杆，但需要施加预应力时可采用涨壳式的中空注浆锚杆。

11 凿槽嵌拱或直接增设钢拱

衬砌内增设拱架是用弯曲加工的工字钢等钢材沿衬砌内表面一定间隔架设，以增强既有衬砌结构承载力能力的方法。现场施工一般采用热轧工字钢，截面高度为 I14~I22，工字钢间距一般为 $0.5\sim 1.5\text{m}$ 。当衬砌为素混凝土结构，且隧道净

空不足时，亦可在既有衬砌上凿槽把拱架全部或部分嵌入衬砌当中。对于由隧道外荷载作用引起衬砌结构出现大量水平向和斜向裂缝时可采用此项补强加固技术，该方法可提高衬砌的整体刚度及强度，但其单独使用的补强效果较差，通常可与喷射混凝土、锚杆加固等其它方法并用以确定更强的支护效果。由于拱架架设在衬砌内侧，为了保证拱架与衬砌共同承担荷载，必须采用混凝土垫块将缝隙楔紧，同时为了保证钢架的纵向稳定，钢架间应通过纵向连接钢筋进行连接，纵向连接筋环向间距通常可取 1m。另外设计时应注意钢架拱脚的处理，一般宜通过锚栓或钢筋锚固在稳定的边墙基础上，为了保证钢筋的耐久性，应对钢架进行防腐设计。

12 施作钢带(板)

施作钢带(板)是指通过锚栓或胶黏剂等将钢带(板)固定在衬砌内表面，增强衬砌内侧抗拉和抗压性能，从而使衬砌的承载力得到加强的一种方法，主要适用于衬砌开裂严重，衬砌结构需要补强，但衬砌净空不满足设置套拱或拱架的情况。当衬砌厚度略有不足、衬砌混凝土裂缝较为密集时，可采用 W 钢带结合锚杆的方法进行加固。使用时应注意被加固隧道衬砌的混凝土强度及钢带黏贴使用的胶黏剂应满足《混凝土结构加固设计规范》(GB50367)的要求，钢带(板)外表面应进行防腐蚀、防锈蚀及防火处理。当地下水丰富，衬砌结构发生渗漏时，应采用可靠方法优先处治衬砌渗漏水后，方可实施。

13 灌浆锚固

灌浆锚固技术是一种加固衬砌和围岩的措施，主要用于有着较好连通性的溶洞、溶槽、裂隙、土洞、岩体破碎及断层破碎带等地质条件。它是通过在衬砌和围岩上布置钻孔、安装锚杆和高压灌浆的施工方法。该方法不仅可通过围岩注浆加固隧道周边岩体，提高岩体完整性和强度，还可以利用锚杆的悬吊、组合梁等作用把软弱和破碎的岩体锚固成一个整体，以进一步增强其完整性和稳定性。

14 围岩压浆

围岩注浆技术常用于加固隧道周边围岩，其作用原理主要是通过填充、渗透、挤压和粘结作用使原来的松散岩土体胶结成整体，形成强度高、抗渗性强、稳定性好的固结体，不仅可有效提高隧道周边岩体自承能力和稳定性，还可以减少隧道周边岩体发生水土流失的可能性，降低地下水的出涌量，对于松散压力、偏压、

地层滑坡等引起的病害处理均有一定效果。围岩注浆方式多种多样，根据使用功能，隧道注浆可设计为周边注浆、地表注浆等；根据使用效果，可分为加固注浆与止水注浆；根据注浆机理，可分为填充注浆、渗透注浆、劈裂注浆、化学注浆等。注浆方式的选着应根据病害处治的目的、地质条件、地形条件、隧道结构形式等按经济、可靠、可操作性强、处治时间短的原则进行，如隧道洞口前面段宜优先考虑地表注浆，岩体破碎带宜采用渗透注浆，断层破碎带则应根据岩体可注性等采用渗透或高压劈裂注浆。

注浆设计含盖内容很多，主要包括注浆标准、施工范围、注浆材料、浆液扩散半径、钻孔布置、注浆压力、施工方法与注浆顺序等方面，其中注浆材料与注浆压力是最为重要的两项内容，其选取应重点考虑以下问题：

1) 浆液在岩层中应具有良好的渗入性，即在一定的压力下，能渗到一定宽度的裂隙或空洞中去；

2) 浆液凝结成结石后，应具有一定强度和粘结力；

3) 为便于施工和增大浆液的扩散范围，浆液须具有良好的流动性；

4) 浆液具有良好的稳定性，以免过早地产生沉淀，影响浆液的压注；

5) 一般情况下应尽可能采用固体颗粒材料(水泥浆液、水泥水玻璃浆液)。水泥类浆液可以压入颗粒不小于 0.6mm 的粗砂；水玻璃类可压入 0.1mm 的粉砂。只有在固粒材料浆不能达到压浆处理的要求，如岩层裂隙细微、压不进去或涌水大、流速大时，才考虑采用化学浆液；

6)岩溶地段突泥、突水和裂隙较大的地质构造中，为堵塞突泥、涌水通道，在适应压浆设备条件下，可用劈裂法代替渗透注浆。此时针对注浆材料种类、粘度、颗粒性等要求，可适当放宽；

7)注浆压力选择通常需结合注浆材料的选取、扩散半径、钻孔布置、岩体强度等因素决定，一般压力越高，浆液充填越饱满、结石体强度高、不透水性好，并能增大扩散半径以减少注浆孔数，但压力过高，会使裂缝扩大，浆液流失过远甚至危及既有衬砌结构。目前关于注浆压力选取主要由经验确定，并通过现场试验确认；

8) 考虑到注浆设计的复杂性施工前应进行现场试注试验。

15 更换衬砌

隧道承载力模型证明，开裂的衬砌仍然具有一定的承载能力。即便是严重裂损，并局部侵限的衬砌，通过一定补强措施仍可恢复或提高结构承载能力，因此仅当既有结构破损严重或严重劣化，通过其他方法难以恢复时，方可采用更换衬砌进行处理。更换衬砌可根据既有衬砌破损情况，采用局部或整体更换的方法。当采用局部更换时应注意更换部分与原结构相接处的连接及防水处理。新建衬砌的形式和结构尺寸，可结合原衬砌病害产生原因和围岩压力具体情况，参照新建隧道衬砌的标准来拟定。新建衬砌应采用钢筋混凝土结构，必要时亦可采用钢架混凝土，以提高施工速度，但钢架间应采用纵向连接筋连接。新建衬砌一般采用“跳槽开挖、分段施工”的方法进行施工，施工前应首先封闭交通，对拟拆除段前后 5~10m 范围内采用钢拱架进行临时支护，并对拟拆除段衬砌背后围岩进行径向注浆预加固，以防衬砌拆除后围岩坍塌。跳槽间距应由围岩稳定性决定，一般不宜大于 5m，在分段拆除，应制定详细的施工组织计划，特别是原衬砌在施工过程已发生过坍塌的地段，应尤为慎重，每次拆除范围宜在分段的基础上进一步细分，以减少对围岩的扰动。衬砌拆除宜采用静态破碎、机械凿除等方法，不得已采用爆破施工时，应按控制爆破技术进行拆除。一般情况下更换衬砌可按如下程序：第一，对拟拆除段前后 5~10m 范围内采用钢拱架进行临时支护(间距 0.6~1.2m)；第二，对拟拆除段衬砌背后围岩进行注浆固结；第三，拆除旧衬砌、第四，施作钢筋衬砌，必要时应对既有初期支护进行补强。

16 隧底加固

隧底加固一般可分为增设仰拱或基础加固的两种方法。增设仰拱是在原来没有仰拱的隧道中拆除混凝土铺底后施作仰拱，增设仰拱以后不仅可以有效增强衬砌结构的侧向刚度，同时由于仰拱幅面面积远大于衬砌边墙，可有效降低地基承载力，减少隧道沉降。基础加固是利用导管向拱脚基础注浆或者直接向基础中打入小型桩基的方法，以增加基础的承载力、防止基底软化下沉、限制边墙侧向水平位移。增设仰拱与基础加固实际均为对隧道结构基础的加固处理，其作用既有相同，又存在区别。基础加固重点可解决隧道竖向沉降问题，但对侧向变形的限制，显然没有增加仰拱明显，对结构整体刚度的增加也十分有限，但增加仰拱施工难度较大、工期较长、经济性较低，因此对于一般以沉降为主的病害，宜优先考虑基础加固。本工法适用于由于膨胀性土压等引起的隧道内路面隆起、侧壁挤

出、偏压和地基承载力不足等引起的病害。

17 滑坡整治

当隧道结构处于滑坡体中时，仅对隧道结构进行补强，一般难以取得良好的治理效果，设计时应优先考虑滑坡整治，稳定滑坡体后，再进行隧道结构的补强加固或修复。病害处治前应在查明滑坡的成因、性质、类型及构造等，并结合隧道走向、结构形式、滑坡稳定性分析等采取综合防治措施，确保滑坡的稳定、隧道施工及运营的安全。常用的滑坡防治措施有：

1) 排水措施是滑坡防治中应首先考虑的方法，包括地表排水和地下排水。排水措施有许多种如环形截水沟、树枝状排水系统、明沟与渗沟相配合的引水工程等，不同的排水措施有不同的适用条件，具体应结合地表水、地下水的分布及滑坡体位置制定。

2) 减载清方是滑坡治理的常用手段。减载适用于推动式滑坡或由错落转化的滑坡，并且滑床上陡下缓，滑坡后缘及两侧的地层稳定，不致因刷方而引起滑坡向后及两侧发展。牵引式滑坡或滑带土具有卸载膨胀性质的滑坡，不宜采用滑坡减载的方法整治。减载后的坡面，应整平夯实，平台应设较大的横坡，并做好减载范围内的防排水工程。反压是利用滑体上部的减载弃方或滑体附近公路工程开挖的土石方，填于滑体前缘(抗滑地段)，以增加其稳定性。

3) 处理减载清方以外，滑坡处治还可以通过支挡措施处治，具体可根据滑坡的性质，采用抗滑挡墙、抗滑桩、预应力锚索(杆)、钢管桩以及锚索桩、格构锚固等支挡构造物，对滑坡进行整治，以控制滑坡的下滑。

除此以外对于隧道洞口浅埋段还可以采用针对土体加固的地表注浆处理及洞内注浆处理。

隧道病害处治工程仍然是一种隧道工程，鉴于隧道工程的复杂性和不可预知性，其处治依然应遵循信息化设计和动态施工的思想和原则。

2.27 处治材料

8.6.1 隧道病害处治材料选用原则：

1 隧道病害处治材料的品种规格及使用性能，应符合国家、行业相关标准的规定，并满足设计要求。

2 隧道病害处治材料必须通过相关管理部门组织的鉴定。

3 隧道病害处治材料应满足安全、环保的要求。

8.6.2 隧道病害处治使用水泥材料应满足以下要求：

1 隧道结构加固时应采用等级不低于 32.5 级的硅酸盐水泥、快硬硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥；当有耐腐蚀、耐高温及抗冻性的要求时，应采用相应的特种水泥。

2 配合使用的聚合物砂浆时，所用水泥强度等级不应低于 42.5 级。

8.6.3 隧道病害处治使用混凝土材料应满足以下要求：

1 隧道病害处治使用的混凝土其强度等级应比原结构、构件实际强度提高一级，同时应满足结构强度和耐久性的要求。

处治使用的混凝土强度等级升高一级主要是保证新老混凝土有足够的黏结强度，以利于整体受力；部分年代久远的隧道使用的混凝土强度等级很低，处治使用混凝土强度较原结构混凝土强度提高一级后，仍可能较现行通用的衬砌混凝土强度低，若处治使用的混凝土强度等级提高一级后结构强度提升不大，此时应综合考虑加固用混凝土的强度等级，以满足结构强度和耐久性的要求。

2 隧道病害处治使用的混凝土，其粗、细骨料的品种和质量应符合《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52）的要求，拌合用水应符合《混凝土用水标准》（JGJ 63）的规定。

3 隧道病害处治选用的聚合物混凝土、微膨胀混凝土或短纤维混凝土，应在施工前进行试配对其强度、抗干缩性及耐腐蚀性进行检验。

8.6.4 隧道病害处治使用钢材材料应满足以下要求：

1 隧道病害处治使用的钢筋、型钢、钢管的性能应满足《公路隧道设计规范》（JTG D70-2004）的规定。

2 隧道病害处治需要植筋时，宜采用 HRB335 级热轧带肋钢筋，也可采用 HRB400 级和 RRB400 级热轧带肋钢筋。钢带宜采用 W 型钢带。

采用热轧带肋钢筋，主要是为了使植入混凝土后与植筋胶之间有较强的握裹力，增强植入钢筋的可靠性。W 钢带是一种新型支护材料，广泛应用于井下巷道支护，对处理不稳定围岩效果较佳。通过 W 钢带把分散的多根锚杆连接起来，

形成一个整体承载结构，可显著提高支护的整体效果。同平钢带相比，W 钢带抗弯截面模量提高 37 倍，刚度提高 70 倍左右，抗拉强度提高 12%~15%，是一种强度较大的支护材料。

3 隧道病害处治使用钢板、锚固件应符合《混凝土结构加固设计规范》（GB 50367）的规定。

8.6.5 隧道病害处治使用喷射混凝土材料应满足以下要求：

1 喷射混凝土的性能应满足《锚杆喷射混凝土支护技术规范》（GB 50086-2001）的规定。

2 对喷射混凝土的抗拉、弯性能有较高要求时可采用喷射钢纤维混凝土、碳纤维混凝土，钢纤维、碳纤维品种和质量应满足国家相关标准、规范的规定，并满足设计要求。

8.6.6 隧道病害处治使用胶黏剂材料应满足以下要求：

1 隧道加固用胶黏剂，根据所加固结构的重要程度分为 A 级胶和 B 级胶；其中 A 级胶用于重要结构的加固，B 级胶用于一般结构的加固。

2 浸渍、粘贴芳纶纤维复合材料用的胶黏剂，其安全性能指标不应低于 A 级胶的要求，采用的底胶与修补胶也应与之相适配。

3 隧道病害处治使用的胶黏剂，其钢-钢黏结抗剪性能必须经过湿热老化检验合格，湿热老化检验应在 50℃ 和 98% 的相对湿度环境下进行；老化时间：重要构件不得小于 90 天，一般构件不得小于 60 天；经湿热老化后的试件，应在常温下进行钢-钢黏结拉伸抗剪试验，其强度降低的百分率（%）应符合下列要求：

- （1）A 级胶不得大于 10%；
- （2）B 级胶不得大于 15%。

粘贴钢板或型钢用的胶黏剂，其安全性能指标必须符合表 8.6.1 的规定

表 8.6.1 粘贴钢板或型钢用胶黏剂的安全性能指标

性能项目		性能要求	
		A 级胶	B 级胶
胶体性能	抗拉强度（MPa）	≥30	≥25
	抗拉弹性模量	≥3500（3000）	
	抗弯强度（MPa）	≥45	≥35

		且不得呈脆性破坏	
	抗压强度 (MPa)	≥65	
	伸长率 (%)	≥1.3	≥1.0
黏结能力	钢—钢拉伸抗剪强度标准值 (MPa)	≥15	≥12
	钢—钢不均匀扯离强度 (MPa)	≥16	≥12
	钢—钢黏结抗拉强度 (MPa)	≥33	≥25
	与混凝土的正拉黏结强度 (MPa)	≥2.5, 且混凝土为内聚破坏	
不挥发物含量 (固体含量) (%)		≥99	

注：表中括号内的抗拉弹性模量指标仅用于灌注黏结型胶黏剂。

4 隧道病害处治使用的胶黏剂应进行毒性试验，对完全固化的胶黏剂，其检验结果应符合实际无毒卫生等级的规定。不得使用乙二胺作为环氧树脂的固化剂；不得在其中掺入挥发性有毒溶剂和非反应性稀释剂。

5 寒冷地区隧道用胶黏剂应通过耐冻融性能检验。

8.6.7 隧道病害处治使用注浆（胶）材料应满足以下要求：

1 对结构进行处治的围岩注浆和衬砌背后注浆通常采用水泥单液浆或水泥-水玻璃双液注浆，所采用水泥应为普通硅酸盐水泥，所采用水玻璃模数应在 2.4~3.2 之间，浓度在 40°Bé 以上，可根据工程需要可在浆液中加入石膏、氯化钙、粉煤灰、膨润土、矿渣尾粉等掺和物。

2 结构性裂缝注浆宜选用水泥基注浆液，有补强要求时选用改性环氧树脂注浆材料。

3 隧道裂缝注射或压力灌注用的修补胶的安全性能必须符合表 8.6.2 的规定。

表 8.6.2 裂缝修补用胶（注射剂）安全性能指标

性能项目		性能指标
胶体性能	抗拉强度 (MPa)	≥20
	抗拉弹性模量 (MPa)	≥1500
	抗压强度 (MPa)	≥50
	抗弯强度 (MPa)	≥30, 且不得呈脆性破坏
钢—钢拉伸抗剪强度标准值 (MPa)		≥10
不挥发物含量 (固体含量) (%)		≥99

可灌注性	在产品说明书规定的压力下，能注入宽度为0.1mm
------	--------------------------

4 裂缝修补胶浆液应满足固化后收缩性小、固化时间可调节、灌浆工艺简便可靠、固化后不应遗留有害化学物质的要求。

5 隧道衬砌混凝土裂缝修补用聚合物水泥注浆料的安全性能必须符合表 8.6.3 的规定。

表 8.6.3 缝修补用聚合物水泥注浆料安全性能指标

性能项目		性能指标
浆体性能	劈裂抗拉强度 (MPa)	≥ 5
	抗压强度 (MPa)	≥ 40
	抗折强度 (MPa)	≥ 10
注浆料与混凝土正拉粘结强度 (MPa)		≥ 2.5 ，且为混凝土破坏

9 病害处治工程验收检测

2.28 一般规定

9.1.1 病害处治工程质量验收检测由隧道管养单位通过招标或委托有资质的单位进行。

9.1.2 隧道病害处治工程进行质量评定时应具备以下条件：

- 1 合同约定的各项内容已完成；
- 2 施工单位按本规范及相关规定的要求对工程质量自检合格；
- 3 监理工程师对工程质量的评定合格。

9.1.3 验收检测工程参考的规范和标准：

病害处治验收检测应按照隧道的相应规范标准进行验收评定。

2.29 验收内容

9.2.1 验收报告及要求

- 1 验收检测应按基本要求、实测项目、外观质量等检验项目分别检查。
- 2 基本要求病害处治应符合有关技术标准规定并满足设计要求。

9.2.2 实测内容

1 排水设施维修应符合下列基本要求：

- a) 所用材料的类型、规格、数量、质量和性能应满足设计要求和符合现行技术规范的规定。
- b) 排水设施的断面形状、尺寸、位置和埋设深度以及纵坡应符合设计要求。
- c) 修复部分与原结构搭接平顺。

排水设施验收实测内容见表 9.2.2-1。

表 9.2.2-1 排水设施验收实测内容

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1Δ	混凝土(砂浆)强度(MPa)	在合格标准内	按附录 C 或 F 检查

2	断面尺寸(mm)	±20	尺量：每 50m 检查 2 个断面
3Δ	纵向坡度(%)	符合设计要求	水准仪：每 50m 检查 2 点
4	顶面高程 (mm)	0, -20	水准仪：每 30m 测一处，中间拉线

2 人行道（检修道）维修应符合下列基本要求：

a) 维修所使用的材料类型、规格、质量应满足设计要求和符合相关技术规范的规定。

b) 与原人行（检修）道的衔接处应平顺，无错台。

人行道（检修道）验收实测内容见表 9.2.2-2。

表 9.2.2-2 人行道（检修道）验收实测内容

项次	检查项目		规定值或允许偏差		检查方法和频率
1Δ	混凝土强度(MPa)		在合格标准内		按附录 C
2	人行道宽度(mm)		±10		尺量：每 25m 检查 1 处
3	人行道板厚度(mm)		+5		尺量：每 25m 检查 1 处
4	预 制 板 铺 设	相邻板高差 (mm)	有照明	3	水平尺：每 25m 检查 1 处
			无照明	2	
		相邻板缝宽 (mm)	符合设计要求		尺量：每 25m 检查 1 处

3 衬砌背面压（注）浆应符合下列基本要求：

a) 所用材料的类型、质量、规格和性能应满足设计要求和符合现行技术规范的规定。

b) 应根据孔隙位置合理布置注浆孔，压浆前应对衬砌进行临时支挡，注浆过程中应监测注浆压力。

c) 衬砌后空洞压浆应饱满。

d) 地下水富集、有水压的段落，应设置排水孔排水，再进行压浆。

e) 钻孔注浆顺序应由水少向水多方向进行。

衬砌背后充填压（注）浆实测内容见表 9.2.2-3。

表 9.2.2-3 衬砌背后充填压（注）浆验收实测内容

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
----	------	----------	---------

1Δ	浆体强度(MPa)	符合设计要求	按附录 E 检查, 每台班一组
2Δ	空洞	符合设计要求	凿孔或地质雷达法: 凿孔法: 每 10m 检查一个断面, 每个断面从拱顶中线起每 3m 检查 1 点; 地质雷达法: 沿隧道纵向分别于拱顶和两侧拱腰、两侧边墙各布置一条测线, 连续检测。
3	注浆孔间距 (mm)	±50	尺量: 每注浆区域抽查 1 处
4	注浆孔深度 (mm)	符合设计要求	尺量: 每注浆区域抽查 1 处

注: 发现一处空洞, 本评定单元为不合格。

4 喷射混凝土加固应符合下列基本要求:

a) 所用材料类型、质量、规格和性能应满足设计要求和符合现行技术规范的规定。

b) 喷射前, 应检查喷射面的质量, 对衬砌裂缝、剥离等应按设计要求进行处理; 对受喷结构面表面渗漏水、流水处应采取引排、堵水措施。

c) 受喷结构面必须清洁。

d) 采用钢纤维喷射混凝土时, 钢纤维抗拉强度应满足设计要求, 设计无要求时不应低于 380MPa, 且不得有油渍及明显的锈蚀。

喷射混凝土加固实测内容见表 9.2.2-4。

表 9.2.2-4 喷射混凝土加固验收实测内容

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1Δ	喷射混凝土强度 (MPa)		在合格标准内	按附录 D 检查
2Δ	喷层厚度 (mm)	无衬砌	平均厚度≥设计值; 检查点的 60%≥设计值; 最小厚度≥0.5 设计值, 且≥60	凿孔或地质雷达法: 凿孔法: 每 10m 检查一个断面, 每个断面从拱顶中线起每 3m 检查 1 点; 地质雷达法: 沿隧道纵向分别于拱顶和两侧拱腰、两侧边墙各布置一条测线, 连续检测。每 10 米检查 1 个断面, 每个断面检查 5 处, 作为厚度平均值
		有衬砌	平均厚度≥设计值; 检查点的 80%≥设计值; 最小厚度≥0.8 设计值, 且≥50	
3Δ	喷层与接触层状况		无空洞, 无杂物	

4	粘结强度(MPa)	I、II级围岩 ≥ 0.8 III级围岩 ≥ 0.5	直接拉拔法或成型试验法：每 50~100m 检查一组 3 处。
---	-----------	---	---------------------------------

5 套（嵌）拱应符合下列基本要求：

a) 钢架的材质、规格、形式、制作和架设应符合设计文件要求和现行技术标准、规范的要求。

b) 嵌槽应满足设计文件要求，开槽时不应损伤嵌槽周围的混凝土。

c) 嵌槽应填充密实，并与周围混凝土相接平顺。

d) 钢架之间必须用纵向钢筋连接，安装基础必须牢固。

e) 钢架安装基底标高不足时，不得用石块、碎石砌垫，应设置钢板或采用强度等隧道养护工程级不小于 C20 混凝土垫块。

f) 钢架应紧靠初喷面，当与初喷面出现间隙时，应采用钢楔或混凝土预制块使其与初喷面楔紧，顶楔后的连续间隙长度不得大于 2m，间隙应用喷射混凝土喷填密实。

g) 连接钢板与钢架必须焊接牢固，焊缝饱满密实；钢架节段之间必须采用螺栓连接或焊接牢固。

套（嵌）拱加固实测内容见表 9.2.2-5。

表 9.2.2-5 套（嵌）拱加固验收实测内容

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1Δ	钢 拱 架	榫数(榫)	不少于设计值	目测：逐榫检查
		间距(mm)	± 50	尺量：逐榫检查
2Δ	混凝土强度 (MPa)		在合格标准内	按附录 C 检查
3	保护层厚度 (mm)		不小于设计值	钢筋位置测定仪检查：每 10m 检查 3 处
4	嵌槽	纵 向 宽 (mm)	0, +10	尺量：每 10m 检查 5 点
		深(mm)	0, +10	尺量：每 10m 检查 5 点
5	倾斜度 (°)		± 2	测量仪器：逐榫检查
6	拼装偏差 (mm)		± 3	尺量：逐榫检查
7	安 装	横 向	± 50	尺和水准仪：逐榫检查

	偏差 (mm)	竖向	不低于设计标高	
8	连接 钢筋	数量(根)	不少于设计值	目测: 逐榀检查
		间距(mm)	±50	尺量: 逐榀检查 3 处

注: 采用喷射混凝土方法施工的实测项目参照表 9.2.2-4。

6 混凝土衬砌更换应符合下列基本要求:

- 材料的质量和规格应符合设计文件要求和现行技术标准、规范的有关规定。
- 基底承载力应满足设计文件要求, 必要时应进行基底承载力试验。
- 拆除衬砌时应根据围岩地质情况及时进行支撑, 原有破损的衬砌应清理到位。
- 衬砌背后的空隙必须回填注浆。
- 衬砌的内轮廓线应与原有的轮廓线一致。

混凝土衬砌更换实测内容见表 9.2.2-6。

表 9.2.2-6 混凝土衬砌更换验收实测内容

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1Δ	混凝土强度(MPa)	在合格标准内	按附录 C 检查
2Δ	衬砌厚度(mm)	不小于设计值	凿孔或地质雷达法: 凿孔法: 每 10m 检查一个断面, 每个断面从拱顶中线起每 3m 检查 1 点; 地质雷达法: 沿隧道纵向分别于拱顶和两侧拱腰、两侧边墙各布置一条测线, 连续检测。每 10 米检查 1 个断面, 每个断面检查 5 处, 作为厚度平均值
3	墙面平整度(mm)	20	2m 直尺: 每 20m 每侧检查 3 处
4	传力杆间距 (mm)	±20	尺量: 每 10m 检查 5 处
5	传力杆埋置深度 (mm)	≥15D	尺量: 每 10m 检查 5 处
6	施工缝错台 (mm)	≤10	尺量: 每 1 断面检查 5 处

7 增设仰拱应符合下列基本要求:

- a) 仰拱混凝土所用材料应符合设计文件和规范要求。
- b) 与既有衬砌结构连接牢固。
- c) 仰拱基底无杂物、无积水、无虚渣。

增设仰拱实测内容见表 9.2.2-7。

表 9.2.2-7 增设仰拱验收实测内容

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1Δ	混凝土强度(MPa)	在合格标准内	按附录 C 检查
2Δ	仰拱厚度(mm)	不小于设计值	尺量：每 10m 检查一个断面，每个断面检查 5 处
3	钢筋保护层厚度(mm)	+10, -5	尺量：每 10m 检查 1 个断面，每个断面检查 3 处
4	植筋间距(mm)	±10	尺量：每 10m 检查 5 处
5	植筋深度(mm)	≥10D	尺量：每 10m 检查 5 处
6	植筋抗拔力(kN)	不小于 1.2 倍设计值	按附录 F 检验：随机抽查 1%，且不少于 3 根

注：第 4、5 项增设仰拱处前或后有仰拱段适用。其中“D”指钢筋直径。

8 渗、漏水处治应符合下列基本要求：

- a) 水管不得堵塞，管道材料应具有抗老化性和足够强度。
- b) 应先清除衬砌表面灰尘及劣化部分。
- c) 槽内止水材料应填充密实。
- d) 水泥砂浆防水层各层之间应结合牢固，无空鼓现象。
- e) 水泥砂浆防水层施工缝留茬位置应正确，接搓应按层次顺序操作，层层搭接紧密。

渗、漏水处治实测项目内容见表 9.2.2-8、9.2.2-9 所示。

表 9.2.2-8 埋管引排水实测内容

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	管槽尺寸 (mm)	不小于设计文件值	尺量：每 10m 检查 2 处
2	管槽间距(mm)	±20	尺量：每 10m 检查 2 处
3	水管埋设位置(mm)	±20	尺量：每 10m 检查 2 处

4	连接固定点间距 (mm)	± 20	尺量：每管检查 3 处
---	--------------	----------	-------------

表 9.2.2-9 止水实测内容

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	平面尺寸 (mm)	不小于设计值	尺量：每 10m 检查 1 个断面
2	止水层厚度 (mm)	平均厚度 $\geq$ 设计值， 最小厚度 ≥ 0.85 设计值	尺量：每 40m 检查 5 处

9 冻害处治应符合下列基本要求：

- a) 防冻隔温层厚度、长度应符合设计文件要求。
- b) 防冻隔温层的基层应干燥、坚实、平整。

冻害处治实测项目内容见表 9.2.2-10 所示。

表 9.2.2-10 冻害处治实测内容

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1 Δ	防冻隔温层厚度 (mm)		+6	插针法：每 1 m ² 检查一处
2	防冻隔温层长度 (mm)		不小于设计文件	尺量：每 50m 检查一处
3 Δ	搭接长度 (mm)		≥ 100	尺量：每 5 环搭接抽查 3 处
4	缝 宽 (mm)	焊接	焊缝宽 ≥ 10	尺量：每 5 环搭接抽查 3 处
		粘接	粘缝宽 ≥ 50	
5	固定点间距 (m)		满足设计	尺量：每 20m 检查 3 处
6	焊缝密实性		满足设计要求	充气法：每 20m 检查 1 处焊缝
7	钢丝网搭接宽度 (mm)		≥ 100	尺量：每个搭接段检查 3 处
8	龙骨安装偏差 (mm)		≤ 5	尺量：每榀检查 1 处

注：防冻保温层采用中间铺设法时检测 3~6 项次；采用表面喷涂法时，检测 7、8 项次。

9.2.3 外观检查内容

1 排水设施维修外观质量应符合下列规定：

- a) 排水畅通，无淤积。

b) 排水设施完好，无渗漏。

2 人行道（检修道）维修外观质量应符合下列规定：

a) 人行道和检修道构件连结牢固、密贴，线形直顺，表面平整。

b) 勾缝密实均匀，无杂物污染。

3 衬砌背面压（注）浆外观质量应符合下列规定：

a) 封浆孔处理完好。

b) 处理后清洁无污染。

4 喷射混凝土的外观质量应符合下列规定：

喷射混凝土表面无漏喷、离鼓、钢筋网和钢架外露现象。

5 套（嵌）拱的外观质量应符合下列规定：

a) 焊接处无假焊、漏焊、安装时基底无虚渣及杂物，接头连接牢固。

b) 混凝土表面密实，每延米面积中，蜂窝、麻面和气泡面积不超过 1%。蜂窝、麻面深度不超过 5mm。

c) 混凝土表面裂缝宽度不大于 0.15mm。

6 混凝土衬砌更换的外观质量应符合下列规定：

a) 混凝土表面应密实，无裂缝、无污染。每延米的隧道面积中，蜂窝麻面和气泡面积不超过 1%，深度超过 5mm 时应处理。

b) 结构轮廓线条应顺直美观，表面协调一致，维修范围内混凝土颜色应均匀。

c) 混凝土表面裂缝宽度应不大于 0.15mm。

7 增设仰拱的外观质量应符合下列规定：

a) 混凝土衬砌表面密实，每延米面积中，蜂窝、麻面和气泡面积应不超过 1%。蜂窝、麻面深度应不超过 5mm。

b) 混凝土表面裂缝宽度不大于 0.15mm。

8 渗、漏水处治外观质量应符合下列规定：

-
- a) 引、排水管完好畅通、无渗水现象并与衬砌附着牢固。
 - b) 止水砂浆表面平顺，均匀密实。
 - c) 表面整洁无污染。

9 冻害处治外观质量应符合下列规定：

- a) 防冻隔温层表面平顺，无明显突出部分，不得产生裂缝、空鼓、变形。
- b) 防冻隔温层接缝粘贴密实饱满，无气泡、空隙。
- c) 处理过的部位不得出现渗漏水、结冰。

2.30 验收评定方法

9.3.1 一般规定

1 评定时的检查项目、规定值或允许偏差值、检测方法和频率等按照验收内容进行。

2 对于隧道病害处治的单位工程划分如下：每座长隧道为一个单位工程，多个中、短隧道可以合并为一个单位工程，每座隧道分别评定后按中隧道权值为 2，短隧道权值为 1，计算加权平均值作为该单位工程的得分。一般按照围岩级别和衬砌类型每 100m 作为一个分项工程，紧急停车带单独作为一个分项工程。混凝土衬砌采用模板台车，宜按台车长度的倍数划分分项工程。按以上方法划分分项工程时，分段长度可结合工程特点和实际情况进行调整，分段长度不足规定值时，不足部分单独作为一个分项工程。特长隧道的单位工程和分项工程可根据具体情况划分。

3 病害处治工程外观存在严重缺陷和安全隐患或未达到处治所需服务水平不予以评定，经整修达到设计要求后方可组织进行质量评定。

4 对于涉及隧道安全运营的重要工程部位要进行详细检查。

9.3.2 分部工程质量鉴定方法

工程实体评定以本规范规定的抽查项目及频率为基础，按抽查项目的合格率

加权平均计算分部工程的合格率，乘以 100 作为分部工程实测得分；外观检查存在的缺陷，在分部工程实测得分的基础上采用扣分制，扣分累计不得超过 15 分（当扣分累计超过 15 分时，按 15 分扣减，并应在报告中注明）；内业资料审查时资料中存在的问题，在合同段工程质量得分的基础上采用扣分制，扣分累计不得超过 5 分（扣分累计超过 5 分时，并应在报告中注明）。

$$\text{分部工程实测得分} = \frac{\sum (\text{抽查项目合格率} \times \text{权值})}{\sum \text{权值}} \times 100$$

分部工程得分 = 分部工程实测得分 - 外观扣分

9.3.3 单位工程、合同段、病害处治工程工程质量鉴定方法

根据分部工程得分采用加权平均值计算单位工程得分，再逐级加权计算合同段工程质量得分。合同段工程质量得分减去内业资料扣分为该合同段工程质量鉴定得分，采用加权平均值计算建设项目工程质量鉴定得分。

$$\text{单位工程得分} = \frac{\sum (\text{分部工程得分} \times \text{权值})}{\sum \text{权值}} \times 100$$

$$\text{合同段工程质量得分} = \frac{\sum (\text{单位工程} \times \text{单位工程投资额})}{\sum \text{单位工程投资额}} \times 100$$

$$\text{病害处治工程质量得分} = \frac{\sum (\text{合同段工程质量鉴定得分} \times \text{合同段工程投资额})}{\sum \text{合同段工程投资额}} \times 100$$

9.3.4 病害处治工程质量等级鉴定

病害处治工程质量等级应按分部工程、单位工程、合同段、加固项目逐级进行评定，分部工程质量等级分为合格、不合格两个等级；单位工程、合同段、加固项目工程质量等级分为优良、合格、不合格三个等级。

分部工程得分大于或等于 75 分，则分部工程质量为合格，否则为不合格。

单位工程所含各分部工程均为合格，且单位工程得分大于或等于 90 分，质量等级为优良；所含各分部工程均合格且得分大于或等于 75 分，小于 90 分，质量等级为合格；否则为不合格。

合同段（病害处治项目）所含单位工程均为合格，且工程质量鉴定得分大于

或等于 90 分，工程质量鉴定等级为优良；所含单位工程均合格，且得分大于或等于 75 分、小于 90 分，工程质量鉴定等级为合格；否则为不合格。

不合格分部工程经整修、再次处治、补强或返工后可重新进行鉴定，但计算单位工程评分值时按其复评值的 90% 计算。但出现过重大质量事故，造成大面积返工或经再次加固、补强后造成历史性缺陷的工程，其相应的单位工程、合同段工程质量不得评为优良，并视其对建设项目的影 响，由病害处治质量评定委员会决定建设项目工程质量是否可评为优良。

工程质量鉴定得分大于 95 分的合同段（病害处治项目）应满足：没有重大质量隐患，或经过分析没有重大质量隐患；没有可见的较大工程质量瑕疵。

征求意见稿

附录 A 回弹值-火损强度、声波值-火损强度检测专用曲线

A.0.1 公路隧道常用混凝土标号 C20~C35 的残余混凝土强度-回弹值检测公式如表 A.0.1 所示。

表 A.0.1 公路隧道常用混凝土强度-回弹值检测公式

C20		拟合公式	
受火时间	1~2h	$f_{cT}/f_c = 0.0385 e^{3.4168(\frac{k}{22.5})}$	$R^2 = 0.9727$
	4h	$f_{cT}/f_c = 1.206(\frac{k}{22.5}) - 0.129$	$R^2 = 0.9980$
C25		拟合公式	
受火时间	1~2h	$f_{cT}/f_c = 0.0457 e^{3.2025(\frac{k}{25.3})}$	$R^2 = 0.9847$
	4h	$f_{cT}/f_c = 1.129(\frac{k}{25.3}) - 0.116$	$R^2 = 0.9970$
C30		拟合公式	
受火时间	1~2h	$f_{cT}/f_c = 0.0394 e^{3.5002(\frac{k}{28.6})}$	$R^2 = 0.9545$
	4h	$f_{cT}/f_c = 1.129(\frac{k}{28.6}) - 0.116$	$R^2 = 0.9970$
C35		拟合公式	
受火时间	1~2h	$f_{cT}/f_c = 0.0492 e^{3.9538(\frac{k}{33.8})}$	$R^2 = 0.9728$
	4h	$f_{cT}/f_c = 1.378(\frac{k}{33.8}) - 0.105$	$R^2 = 0.9870$

A.0.2 公路隧道常用混凝土标号 C20~C35 的残余混凝土强度-声波值检测公式如表 A.0.2 所示。

表 A.0.2 公路隧道常用混凝土强度-声波值检测公式

C20		拟合公式	
受火时间	1h	$f_{cr}/f_c = 3.4309(\frac{V_t}{3267})^2 - 3.1373(\frac{V_t}{3267}) + 0.8024$	$R^2 = 0.9975$
	2~4h	$f_{cr}/f_c = 1.47(\frac{V_t}{3267}) - 0.386$	$R^2 = 0.9968$
C25		拟合公式	
受火时间	1h	$f_{cr}/f_c = 3.4309(\frac{V_t}{3347})^2 - 3.1373(\frac{V_t}{3347}) + 0.8024$	$R^2 = 0.9993$
	2~4h	$f_{cr}/f_c = 1.581(\frac{V_t}{3347}) - 0.438$	$R^2 = 0.994$
C30		拟合公式	
受火时间	1h	$f_{cr}/f_c = 3.4309(\frac{V_t}{3438})^2 - 3.1373(\frac{V_t}{3438}) + 0.8024$	$R^2 = 0.9964$
	2~4h	$f_{cr}/f_c = 1.693(\frac{V_t}{3438}) - 0.53$	$R^2 = 0.9953$
C35		拟合公式	
受火时间	1h	$f_{cr}/f_c = 3.4309(\frac{V_t}{3675})^2 - 3.1373(\frac{V_t}{3675}) + 0.8024$	$R^2 = 0.9994$
	2~4h	$f_{cr}/f_c = 1.69(\frac{V_t}{3675}) - 0.543$	$R^2 = 0.9928$

附录 B 衬砌结构火灾调查表和衬砌结构受损情况简单评估表

附表 B.0.1 衬砌结构火灾调查表

附表 B.0.1 衬砌结构火灾调查表

案例编号:		勘查日期:	年 月 日		
隧道名称:		所在地址:			
负责人姓名:		住 址:		联系方式:	
围岩级别:	☐ I级围岩 ☐ II级围岩 ☐ III级围岩 ☐ IV级围岩 ☐ V级围岩 ☐ VI级围岩			隧道埋深（火源处）:	m
隧道类型:	☐ 分离式隧道 ☐ 连拱隧道 ☐ 小径距隧道				
结构类型:	☐ 直墙式 ☐ 曲墙式				
衬砌材料:	☐ 素混凝土 ☐ 钢筋混凝土 ☐ 石块砌体 ☐ 砖混材料 ☐ 其他材料				
火灾经过:	发现时间: 月 日 时 分				
	开始灭火时间: 月 日 时 分				
	扑灭火时间: 月 日 时 分				
事故原因:					
火 源:	车 型:	☐ 小汽车	☐ 公交车	☐ 重型货车	☐ 油罐车
	燃烧数量:	辆	辆	辆	辆
燃烧情况	气候条件:	☐ 炎热 ☐ 寒冷 ☐ 强风 ☐ 湿润 ☐ 干燥			
	燃 烧:	☐ 爆炸 ☐ 轰然 ☐ 其他情况			
	主要燃烧材料	☐ 化学易燃物品 ☐ 油料 ☐ 布料 ☐ 其他情况			
受火范围:					
勘查人员签名:					

附表 B.0.2 衬砌结构受损情况简单评估表

附表 B.0.2 衬砌结构受损情况简单评估表

案例编号:					勘查日期:		年 月 日	
勘查项目		颜色变化	残留物估计	裂纹与爆裂情况	钢筋外露情况	结构变形情况	损伤深度 (mm)	受火面积(m²)
受损等级	无损伤							
	轻度损伤							
	中度损伤							
	严重损伤							
	重度损伤							
勘查结果:								
	勘查员签名:							

附录 C 水泥混凝土抗压强度评定

C.0.1 明确了水泥混凝土抗压强度的试验方法。

C.0.2 明确了水泥混凝土抗压强度的检验评定单元；根据养护工程的施工特点，明确了本标准涵盖的各类养护单元水泥混凝土抗压强度的取样检测频率。

交通安全及沿线设施的混凝土基础取样检测频率适用于蒸路段更换、增设工程；零星更换作为小修保养，不受此约束。

C.0.3~C.0.4 本附录水泥混凝土抗压强度的评定方法与现行《公路工程质量检验评定标准（土建工程）》（JTG F80/1）附录 C 的规定是一致的。

征求意见稿

附录 D 喷射混凝土抗压强度评定

D.0.1 明确了喷射混凝土抗压强度的定义及试验方法。制取试块可采用下列方法：

1 喷大板切割法

在施工的同时，将混凝土喷射在 $450\text{mm}\times 350\text{mm}\times 120\text{mm}$ （可制成 6 块）或 $450\text{mm}\times 200\text{mm}\times 120\text{mm}$ （可制成 3 块）的模型内，当混凝土达到一定强度后，加工成 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 的立方体试件。

2 凿方切割法

当采用喷大板切割法对强度有怀疑时，可用凿方切割法。凿方切割法应在具有一定强度的支护上，用凿岩机打密排钻孔，取出长 350mm 、宽约 150mm 的混凝土块，加工成 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 的立方体试件（可制成 3 块）。

D.0.2 明确了喷射水泥混凝土抗压强度的检验评定单元和取样检测频率，与现行《公路工程质量检验评定标准（土建工程）》（JTG F80/1）附录 E 的规定是一致的。

D.0.3~D.0.4 本附录喷射水泥混凝土抗压强度的评定方法与现行《公路工程质量检验评定标准（土建工程）》（JTG F80/1）附录 D 的规定是一致的。

附录 E 水泥砂浆强度评定

E.0.1 明确了砌筑用水泥砂浆强度试件要求、试验及计算方法。

E.0.2 明确了砌筑用水泥砂浆强度的检验评定单元和取样检测频率。

E.0.3 明确了路基、路面基层注（压）浆加固所用水泥砂浆抗折强度和抗压强度的基本试验方法和取样检测频率。

目前，用于路基、路面基层注（压）浆加固的胶合材料的品种很多，施工图设计中应根据本附录的原则规定，明确材料强度要求和试验方法、取样检测频率。

E.0.4、E.0.5 本附录水泥砂浆强度强度的评定方法与现行《公路工程质量检验评定标准（土建工程）》（JTG F80/1）附录 E 的规定是一致的。

附录 F 路面横向力系数评定

F.0.1 明确了路面横向力系数的试验方法。

F.0.2 明确了路面横向力系数的检验评定单元和检测频率。

F.0.3~F.0.6 本附录路面横向力系数的评定方法与现行《公路工程质量检验评定标准（土建工程）》（JTG F80/1）附录 F 的规定是一致的。

征求意见稿