
3 健康诊断指标判定标准研究

确定了隧道与地下结构工程健康诊断指标体系以后，结合现场调查与检测结果对工程结构的状态进行评价与判定，为了使判断结果与工程结构状态相一致，判断过程中必须使用一定的指标判定标准，这就需要建立相应的指标判断标准库。诊断隧道与地下工程结构的健康状态是一个具有层次性过程，其有整体健康与局部健康之分，从单个判定指标出发制定的标准，只是判定过程的一项内容，并不能全面反映隧道结构的整体状况，需要叠加并结合其他的指标进行，逐层判定，最后确定隧道与地下结构工程健康状况。

各国根据自己的国情和工程经验，分别根据自己工程结构健康级别制定了相应的指标。我国《公路隧道养护技术规范》、《铁路工务技术手册——隧道》，日本《公路隧道维持管理便览》，美国《公路和铁路交通隧道检查手册》，我国《地下工程防水技术规范》等，从定性、定量、定性与定量相结合的角度出发，制定了隧道与地下工程结构运营后结构物状态的各项标准与指标。另外，大量的学者与工程技术人员根据自己的认识与经验等，对于隧道与地下工程结构的判定标准给予改进或补充，进一步完善了评价系统的整体性，推动了地下工程学科的进步与发展。

但是从实际工程判定结构状态的方法，目前还是主要集中在工程经验方面，科学的判定方法应用还是具有局限性，这主要是受到各项判定指标在初始数据采集过程中，度量方法、取值范围和度量单位之间各不相同造成的，导致了在同一个问题的描述中由于判断指标不具

有可比性，因此，将健康诊断指标应用之前统一转换为无单位的标准值，将会便于判断指标与判定方法的快速推广与应用。

基于以上的思路与方法，本章结合国内外规范、规定和大量的文献资料进行深入研究，建立单项指标的判定标准库，建立与健康等级相对应的判定指标，建立隧道与地下工程结构局部与整体健康状态判定数据库。

3.1 支护结构裂缝的判定标准

3.1.1 支护结构裂缝长度、宽度的判定标准

对于地下工程和房屋建筑等混凝土结构，裂缝对结构的损伤比较大，我国和世界其他国家对此都比较重视，研究成果亦十分丰富，有足够的经验和工程实例可以借鉴。各国的规范和技术手册等在这一方面都有较为明确的判定标准。

我国《铁路工务技术手册——隧道》中，按照衬砌裂缝的宽度将衬砌裂缝定量的划分为4级。而在《铁路隧道设计规范》中针对钢筋混凝土衬砌结构构件，按荷载基本组合所求得的最大裂缝宽度不应大于0.2 mm。李治国根据我国行业领域的相关规范或标准相关规定，并参照国内多座公路隧道、区间隧道、地下铁道、铁路隧道和车站等地下工程结构的设计标准和多座带有病害隧道的调查结果、统计分析资料和具体的整治措施及经验等，将钢筋混凝土结构衬砌的隧道裂缝宽度影响程度分为4级，并利用断裂力学的方法研究了衬砌开裂后隧道的稳定性。在美国《铁路交通隧道和地下建筑物检查方法和程序》中，将衬砌裂缝定性地分为轻微的、中等的、严重的3级。在美国《公路和铁路交通隧道检查手册》中，对非预应力

混凝土衬砌，按衬砌裂缝宽度将衬砌裂缝定量地分为 3 级；对预应力混凝土衬砌，衬砌裂缝宽度超过 0.1 mm 时就认为是严重的，不超过 0.1 mm 是中等的^[4, 5, 121]。上述 3 种判定方法的结果见表 3.1。

表 3.1 衬砌裂缝宽度判定标准

代表名称	裂缝宽度判定			
	裂缝宽度 b/mm			
中国	大	中	小	毛
	>20	$2 \sim 20$	$0.3 \sim 2$	≤ 0.3
美国	严重	中等	轻微	
	>3.2	$0.8 \sim 3.2$	≤ 0.8	
李治国	严重影响	较大影响	较小影响	轻微
	≥ 0.5	$0.3 \sim 0.5$	$0.2 \sim 0.3$	< 0.2

日本在《铁道土木构造物等维持管理标准·同解说（隧道编）》中，给出了根据衬砌裂缝的长度和宽度对衬砌裂缝进行定量判定分级的标准，见表 3.2。在日本《公路隧道维持管理便览》和我国《公路隧道养护技术规范》中，也都给出了根据衬砌裂缝长度和宽度对衬砌裂缝进行定量判定的标准，两个标准基本相同。判定时，首先根据衬砌裂缝有无发展情况将衬砌裂缝分为存在开展的裂缝和无法确定是否存在开展的裂缝两类，然后根据衬砌裂缝的长度和宽度给出了这两种情况下的衬砌裂缝判定标准，见表 3.3 和表 3.4，其中，表中的裂缝是以水平方向的裂缝或剪断裂缝为主要对象的，对于横向裂缝，可将判定分级相应降低一个等级即可^[4, 5, 121]。对宽度为 0.3~0.5 mm 以上的裂缝，其分布密度大于 2 m/m² 时，可提高一个判定等级或者采用判定等级中较高的等级。在我国《铁路桥隧建筑物劣化评定标准——隧道》中，则采用定量和定性相结合的方法将衬砌裂缝分为 5 级，定量时综合考虑了衬砌裂缝的长

度和宽度^[4, 5, 121], 见表 3.5。

表 3.2 日本铁路隧道衬砌裂缝判定标准

裂缝长度 l/m	裂缝宽度 b/mm		
	>10	$5 \sim 10$	<5
>5	A ₁ /AA	A ₁	A ₁
$3 \sim 5$	A ₁	A ₁	A ₂

表 3.3 衬砌裂缝存在开展时的判定标准

裂缝长度 l/m	裂缝宽度 b/mm	
	>5	≤ 5
>3	2A/3A	1A/2A
≤ 3	1A	1A

表 3.4 当无法确定衬砌裂缝是否存在开展时的判定标准

裂缝长度 l/m	裂缝宽度 b/mm		
	>10	$5 \sim 10$	≤ 5
>5	2A/3A	1A/2A	1A/2A
$3 \sim 5$	2A	1A/2A	1A
≤ 3	1A/B	1A/B	1A/B

表 3.5 我国铁路隧道衬砌裂缝的判定标准

判定		裂缝状态
A	AA	长度 $l > 10$ m, 宽度 $b > 5$ mm, 且变形继续发展, 拱部开裂呈块状, 有可能掉落
	A ₁	l 为 $5 \sim 10$ m, $b > 5$ mm; 开裂使衬砌呈块状, 在外力作用下有可能崩塌和剥落
B		$l < 5$ m 且 $5 \text{ mm} \geq b \geq 3$ mm; 裂缝有发展, 但速度不快
C		$l < 5$ m 且 $b < 3$ mm
D		一般龟裂或无发展状态

目前, 对混凝土裂缝特征的测定主要是基于手工测量的方法, 人为误差较大, 且精度和效率较低, 为了克服这一缺点, 为有效进行混凝土裂缝的定量评价, 国外学者已致力于用图像分析技术来着手研究^[108-111], 而国内则很少见报道^[112, 113]。

在我国《公路隧道养护技术规范》和日本《公路隧道维持管理便览》中，都给出了衬砌裂缝只是在表述上略有区别的基本相同的定性判定标准。为此，衬砌裂缝的定性判定标准可以采用表 3.6 所示的标准。

表 3.6 公路隧道衬砌裂缝的定性判定标准

判 定	3A	2A	1A	B
裂缝状态	裂缝密集，出现剪切裂缝，并且发展速度快	裂缝密集，出现剪切裂缝，并且发展速度较快	存在裂缝，有一定发展趋势	存在裂缝，但无发展趋势

所以，从目前的成熟经验和实用性出发，图像分析技术目前处于科研前沿，尚不能得到广泛推广和应用。较为成熟和容易掌握的方法就是目前考虑裂缝长度与宽度的规范方法。因此，综合考虑我国隧道规范和相关科研成果，采用支护结构裂缝长度和宽度的判定标准见表 3.7。

表 3.7 支护结构裂缝长度与宽度判定标准

健康状态	裂 缝 状 态
病 危	长度 $l > 10$ m，宽度 $b > 5$ mm，且变形继续发展，拱部开裂呈块状，有可能掉落，裂缝密集，出现剪切裂缝，并且发展速度快
病 变	$l < 5$ m 且 $5 \text{ mm} \geq b \geq 3 \text{ mm}$ ；裂缝有发展，裂缝密集，出现剪切裂缝，并且发展速度较快
亚健康	$l < 5$ m 且 $b < 3$ mm，存在裂缝，有一定发展趋势
健 康	无裂缝或有少量裂缝，但并无发展趋势，一般只是局部龟裂或无发展状态

3.1.2 支护结构裂缝深度的判定标准

支护结构开裂后，除了在表观上具有长度和宽度的度量方式，为了全面了解裂缝的空间三维状态，必须了解隧道支护结构裂缝的深度。在我国《公路隧道支护技术规范》(JTG H12

—2003) 中介绍了裂缝检查深度的方法：钻孔取芯法和超声波检测法。但是对于裂缝深度的判定标准却并未给出，对于裂缝的深度判定带来了一定的人为性和盲目性。

为了单独研究支护结构裂缝深度对结构承载力的影响，广大的科技工作者和技术人员做了不懈的努力。冯晓燕^[115]、李治国^[116]和张玉军等根据铁山隧道病害实例，利用有限元法和断裂力学的方法，分析了带裂缝隧道的稳定性。作者在现场观察和检测中发现，铁山隧道二次衬砌的裂缝主要集中在隧道起拱线附近。为了计算方便，分别假定每个断面上裂缝分别为 2 条和 4 条，并对称地位于隧道起拱线处和拱腰。计算结果分别如表 3.8、表 3.9、图 3.1 和图 3.2 所示。

表 3.8 铁山隧道二次衬砌稳定性系数 f (2 条裂缝, $\beta_1 = 45^\circ$)

深度/cm		宽度/mm						
		10.0	5.0	1.0	0.5	0.3	0.2	0.1
5	f	59.04	85.2	166.72	151.9	159.06	167.21	173.08
10	f	47.09	48.49	67.77	71.24	73.51	77.76	79.34
15	f	47.55	46.92	64.14	69.24	62.74	59.42	56.55
20	f	12.62	9.45	10.61	10.27	11.05	11.95	12.51
25	f	6.27	6.51	6.15	5.85	6.01	6.10	6.11
30	f	1.16	1.19	1.26	1.31	1.34	1.38	1.39

表 3.9 铁山隧道二次衬砌稳定性系数 f (4 条裂缝, $\beta_1 = 45^\circ$, $\beta_2 = 70^\circ$)

深度/cm		宽度/mm						
		10.0	5.0	1.0	0.5	0.3	0.2	0.1
5	f	42.26	81.20	98.84	119.5	125.32	131.12	143.12
10	f	38.5	32.08	39.45	34.48	35.91	36.80	37.88
15	f	15.51	16.57	19.02	17.83	18.52	19.34	20.31
20	f	12.63	12.66	13.33	13.29	13.34	13.47	13.85

25	f	5.74	5.80	6.52	6.30	6.32	6.34	6.35
30	f	0.52	0.46	0.41	0.42	0.43	0.43	0.43

从表 3.8、表 3.9、图 3.1 和图 3.2 中可以看出，带裂缝工作的隧道支护结构的安全系数随着裂缝深度的增加而逐步减小的趋势十分明显，这与实际工程实践相吻合。图 3.1 和图 3.2 中曲线中的阶梯递减规律亦是明显：当裂缝深度与衬砌厚度之比由 0 达到 $1/3$ 之前，衬砌支护结构的安全系数递减速率最大，是隧道支护结构承载能力下降最快的阶段；当裂缝深度与衬砌厚度之比由 $1/3$ 增大到 $1/2$ 时，随着裂缝条数的增加，结构承载能力下降，但是趋势较为平缓，速率比前者要小的多；当裂缝深度与衬砌厚度之比由 $1/2$ 增大到 $2/3$ 时，结构的承载能力进一步减小，速率进一步降低；当裂缝深度与衬砌厚度之比增大到 $2/3$ 以上时，结构承载能力降低速率接近于 0，曲线接近于直线段。

从以上的分析可以看出，随着裂缝深度与衬砌厚度之比 k 的增大，结构的承载能力降低，单从裂缝深度单个指标出发，不考虑支护结构合理保护层厚度的影响，从安全性的角度出发，拟采用如表 3.10 所示的隧道与地下工程支护结构裂缝深度健康诊断判定标准。

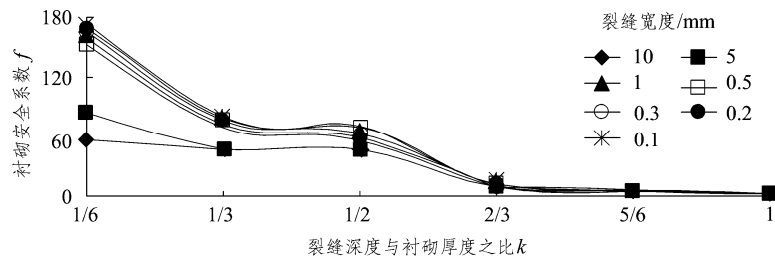


图 3.1 具有两条裂缝的隧道安全系数分布曲线

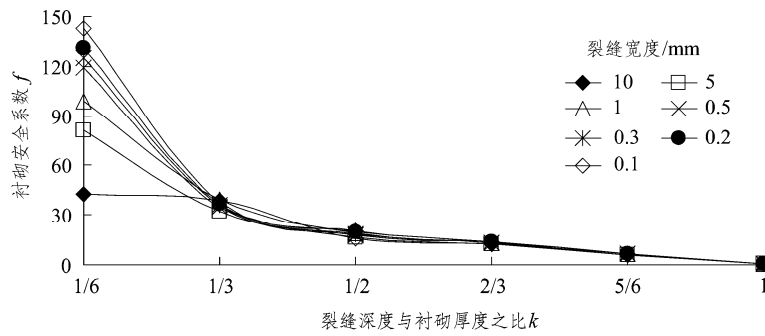


图 3.2 具有 4 条裂缝的隧道安全系数分布曲线

表 3.10 支护结构裂缝深度判定标准

结构状态	健康	亚健康	病变	病危
k (裂缝深度/支护厚度)	$k < 1/3$	$1/3 \leq k < 1/2$	$1/2 \leq k \leq 2/3$	$k > 2/3$

3.1.3 支护结构裂缝延展性的判定标准

支护机构裂缝的进一步发展，将会严重影响支护结构的承载能力。在支护结构中，部分裂缝会自动闭合，不影响隧道与地下支护结构的使用功能。但是多数裂缝的发展性需要进行判断，我国《公路隧道掩护技术规范》(JTG H12—2003) 中介绍了裂缝简易检查方法，根据裂缝开展性的有无大致判定基准，见表 3.3 和表 3.4。考虑裂缝长度与宽度的基础上，建立的基于支护结构裂缝延展性的判定标准，见表 3.7。

3.1.4 支护结构裂缝发展方向的判定标准

常见的隧道裂缝有单缝、双缝、环形缝、X 形缝、树枝斜缝、龟裂等。按裂缝走向及其与隧道纵向的相互关系可分为纵向裂缝、环向裂缝、斜向裂缝 3 种。日本在水工隧洞中，为了建立开裂的评价基准，曾进行了一次大规模的调查。针对 25 座发电站的引水隧洞的开裂，共有 3 388 组，平均每 26 m 就有一组，裂缝的分布方向分布见表 3.11。

表 3.11 按开裂方向进行的分类表

方 向	组 数	比率/%
横 向	2 933	88
纵 向	259	8
双 向	126	4
合 计	3 318	100

从表 3.11 中可以看出，其中约 90%从力学看是对结构安全性影响很小的横向开裂，纵向和双向的开裂只占到了 12%左右。裂缝的分布分析情况如图 3.3 所示。

在横向开裂中，对安全性影响较小的一条开裂有 2 928 组，占 98%；在纵向开裂中，对安全性影响较小的一条开裂有 194 组，占 75%；只在拱部有多条或者在拱部和边墙有多条，或在边墙有多条的有 50 组，占 19%；而安全性较低的，多条开裂长度超过 3 个拱架的有 3 组，不超过 1%。在双向开裂中，安全性高的直线开裂只有一条的有 7 组，占 5%，安全性低，难于分类的有 29 组，占 21%，而安全性最低的，多条开裂长度超过 3 个拱架的有 47 组，不超过 35%。因此，隧道裂缝中纵向、横向和双向裂缝占到了 90%，其他的不足 12%，据此可以掌握判定等级的趋势。

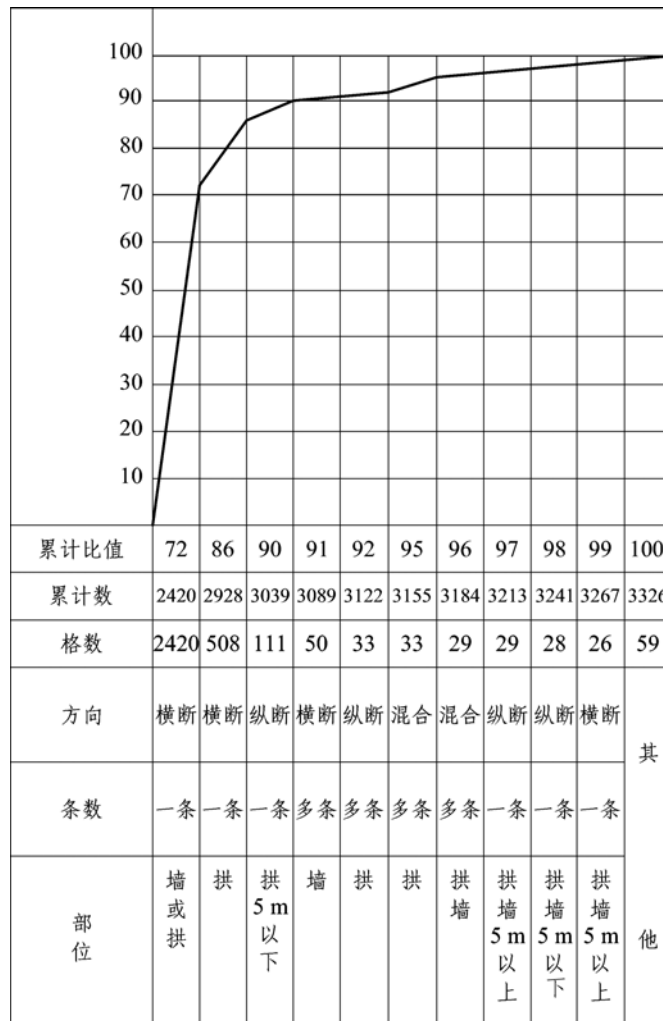


图 3.3 开裂分析图

有关部门曾对我国铁路 88 座典型隧道，全长 78 km，裂纹总长度 32 482 延长米的裂损情况进行了调查统计。纵向裂纹、斜向裂纹及环向裂纹 3 种类型情况见表 3.12。根据统计资料数据显示：纵向裂纹约占 80%，斜向裂纹约占 5%，环（横）向裂纹约占 15%^[2]。

从以上的分析可以看出，裂缝在隧道中广泛存在，但是从目前的力学作用机理来看，横向裂缝对结构正常承载能力影响不大，而拱部和边墙的纵向裂缝和斜向裂缝，破坏结构的整体性，危害较大。因此，综合考虑隧道与地下工程中支护结构裂缝的部位和力学作用机理，

联系裂缝的减弱支护结构承载能力的作用，拟定的隧道与支护结构裂缝发展方向的判定标准

见表 3.13。

表 3.12 我国隧道混凝土衬砌裂缝情况调查统计

裂缝种类	占裂缝长度的比例	部位	占裂缝长度的比例
纵向裂缝	79.3%	拱腰纵裂	64.7%
		边墙纵裂	19.9%
		拱脚纵裂	12.2%
		拱顶纵裂	3.22%
双向裂缝	4.9%	拱部、边墙	
环向裂缝	14.1%	拱部、边墙	

表 3.13 基于支护结构裂缝发展方向判定标准

结构状态	裂缝方向状态
健康	无纵向裂纹，斜向裂纹不多于两条，横向裂纹局部出现，在衬砌环向未贯通
亚健康	无纵向裂缝，有少量横向和斜向裂纹，局部出现龟裂，但裂纹长度不大于 1 m
病变	拱部、边墙出现两条及以上纵向裂纹，横向和斜向裂纹多于两条，有龟裂出现，漏水或析晶状况严重，但开裂长度不大于 5 m，且开裂趋势进一步增加不明显
病危	拱部、边墙出现两条以上纵向裂纹，开裂长度超过 5 m，且开裂趋势明显