

# 堰筑法公路隧道土建结构技术状况评定方法

全迅<sup>1</sup>, 许强<sup>2\*</sup>, 李宏哲<sup>2</sup>

(1. 苏州市公路事业发展中心, 江苏 苏州 320508; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京市 100088)

**摘要:**堰筑法隧道技术状况评定方面的技术体系与现行规范无法有效匹配,为全面评估堰筑法公路隧道的结构技术状况,采用结构解析理念建立由区段、部位、分项和构件等多层级组成的评定体系。采用层次分析法确定隧道各区段结构分项指标权重,建立堰筑法公路隧道土建结构技术状况评定方法。该文以苏州阳澄西湖隧道为依托进行技术状况评定,结果表明:阳澄西湖隧道技术状况评分与现行规范基本一致,同时评定结果更加全面,可为类似堰筑法公路隧道土建结构的技术状况评定提供参考。

**关键词:**公路隧道;堰筑法;层次分析法;土建结构;状况评定

**中图分类号:** U459.2

**文献标志码:** A

堰筑法是在水中修建临时性围堰,防止水和土进入建筑物的修建位置,在围堰内排水,形成干法施工环境,开挖基坑,利用明挖顺作法修筑隧道的一种施工工法<sup>[1]</sup>。由于堰筑法相较钻爆法、盾构法、沉管法等工法在风险、造价控制、工程可行性上具有明显优势,近年来采用该工法修建的隧道建设里程得到不断增长,中国已建成及在建的代表性堰筑法公路隧道有武汉东湖隧道、澳门大学河底隧道及苏锡常南部高速太湖隧道等<sup>[2]</sup>。

针对公路隧道的技术状况评定,现行的 JTG H12—2015《公路隧道养护技术规范》<sup>[3]</sup>采用 9 项结构分项制定了定性与定量相结合的技术状况评定方法,主要适用于钻爆法山岭隧道;上海、广州等城市对盾构法、沉管法隧道的技术状况评定制定了相应的地方标准<sup>[4-5]</sup>,但针对堰筑法公路隧道的结构分项权重尚无指导性规范标准。部分学者也对隧道的技术状况评定方法开展了相关研究,并取得了一定成果。林志等<sup>[6]</sup>结合公路桥梁的技术状况评定思路,提出了隧道土建结构最差段落评分修正方法,补充了隧道结构分项指标定性与定量相结合的评定标度;蒋雅君等<sup>[7]</sup>在 DE-RU 评价法的基础上系统性建立了运营公路隧道结构技术状况的 DES 评价技术体系;吴华勇<sup>[8]</sup>针对城市盾构隧道的结构特点,提出了一种盾构隧道结构技术状况分段量化评定方法;王永东等<sup>[9]</sup>考虑了隧道衬砌病害的相互影响,建立了一套基于病害关联性的隧道衬

砌技术状况评价方法。由于堰筑法公路隧道与钻爆法隧道、盾构隧道结构分项类型存在较大差异,堰筑法隧道土建结构的技术状况评定技术体系方面需要进一步的研究与探索。

该文以苏州阳澄西湖隧道为依托项目,采用结构解析思路建立由区段、部位、分项和构件等多层级组成的堰筑法隧道结构技术状况评定体系,重点对构件评分方法进行系统研究,采用层次分析法确定各区段隧道结构分项指标权重,对堰筑法公路隧道土建结构技术状况评定方法进行初步探索。

## 1 堰筑法公路隧道土建结构技术状况评定思路

堰筑法公路隧道与钻爆法隧道相比在结构上存在以下特点:① 隧道纵向存在多区段分布,如隧道洞口向洞身方向存在敞开段、暗埋段,有时也可能存在主线、匝道等区段;② 隧道存在变形缝、防火板、中管廊道等结构分项。

对堰筑法公路隧道土建结构技术状况的评定思路整体上与该规范保持一致,采用构件→分项→区段→整体的评定思路。首先对堰筑法公路隧道的土建结构分别按构件、分项、部位、区段进行结构解析,将构件作为最小单元,通过建立构件状况值评定标准,在隧道构件层次开始评定技术状况值;然后根据区段内最差构

收稿日期:2022-02-16(修改稿)

作者简介:全迅,男,大学本科,高级工程师, E-mail:507362547@qq.com

\* 通信作者:许强,男,硕士,工程师, E-mail:1129419174@qq.com

件评分确定不同区段的结构分项状况值,再根据各区段分项评分及权重计算区段技术状况评分,最后根据隧道各区段评分得到总体土建结构技术状况评分。

2 技术状况评定体系与方法

依托苏州阳澄西湖隧道建立堰筑法公路隧道土建

结构技术状况评定体系。阳澄西湖隧道是苏州市G312下穿阳澄湖的一个重要节点工程,隧道主线全长2.31 km。其中暗埋段1.81 km,湖东敞开段及湖西敞开段各250 m。另外隧道湖东侧南北线各有一处匝道,匝道敞开段长180 m,暗埋段长220 m(图1)。

2.1 评定体系

依据结构形式一致、材料一致、环境条件基本一

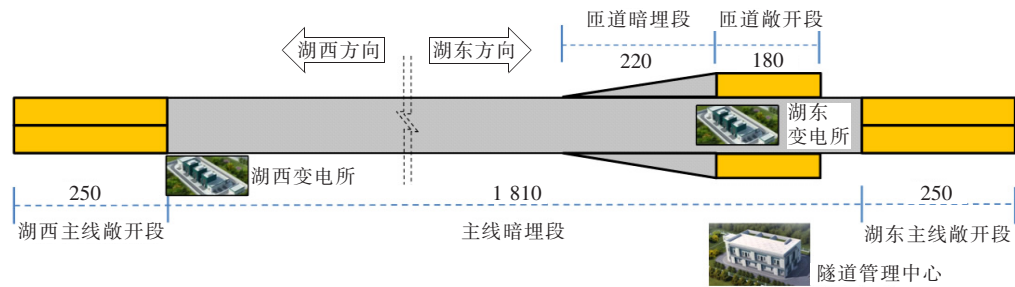


图 1 阳澄西湖隧道平面分布示意图(单位:m)

致、能够合理编号以识别与定位的原则,采用结构单元解析法对隧道结构进行拆分。阳澄西湖隧道按湖东主线敞开段、湖西主线敞开段、主线暗埋段、进口匝道敞开段、进口匝道暗埋段、出口匝道敞开段、出口匝道暗埋段划分为7个区段。

将隧道结构区段按结构部位、分项与构件单元进行拆分。以隧道主线暗埋段结构解析为例,隧道结构技术状况评定体系如表1所示。

2.2 评定方法

(1) 构件单元状况值评定

结构构件状况值评定标准主要参考现行JTG H12—2015《公路隧道养护技术规范》及堰筑法隧道特有构件病害调研统计得到的病害参数指标而制定,主要参数指标包括表1所示分项层级包含的16项构件单元指标,根据各构件单元的特点,结合堰筑法隧道病害检查要点,对堰筑法隧道相对于现行规范的特有分项如主体结构变形缝、路面伸缩缝、防撞侧石、防火板、安全通道门等针对性制定相关构件的状况值评定技术标准。

其中混凝土结构等主体结构构件(指标)按照病害或破损的严重程度状况值从低到高划分为5级,分别对应赋予0~4分的分值;防撞侧石、装饰板等附属设施构件状况值从低到高划分为4级,分别对应赋予0~3分的分值。此项内容主要参照现行规范中土建结构技术状况评定标准的划分等级执行,以变形缝及防撞侧石构件为例,其状况值的划分标准如表2、3所示。

(2) 评定流程

对隧道结构具体的技术状况评定流程如下:

第1步:结构构件根据构件状况值评定标准进行技术状况值评分(值域0~4)。

第2步:选择分数最低的构件评分作为其所属评定区段分项的评分。

第3步:区段各分项评分×分项权重=区段评分。

第4步:各区段评分×区段权重=隧道整体评分。

表 1 堰筑法隧道主线暗埋段结构技术状况评定体系

| 区段 B  | 部位 C | 分项 D    | 构件   |
|-------|------|---------|------|
| 主线暗埋段 | 洞门   | 洞门结构    |      |
|       |      | 洞门装饰    |      |
|       | 主体结构 | 混凝土结构   |      |
|       |      | 变形缝     |      |
|       |      | 防火板     |      |
|       |      | 装饰板     |      |
|       |      | 排水设施    | 构件 1 |
|       | 附属结构 | 路面铺装    | 构件 2 |
|       |      | 路面伸缩缝   | ...  |
|       |      | 防撞侧石    | 构件 N |
|       |      | 安全通道门   |      |
|       |      | 设备箱门    |      |
|       |      | 预埋件及悬吊件 |      |
|       | 电缆通道 | 电缆支架    |      |
|       | 安全通道 | 排水沟     |      |
|       |      | 上下盖板    |      |

表 2 变形缝技术状况值评判标准

| 状况值 | 技术状况描述  |
|-----|---|
| 0   | 完好,无破坏现象  |
| 1   | 变形缝处存在轻微裂纹;接缝处存在轻微碎边;存在水迹,但无液态水流出;存在轻微错位;不影响交通和隧道安全     |
| 2   | 接缝处存在轻微渗水;接缝处局部存在错位;可能影响交通和隧道安全                         |
| 3   | 接缝处出现明显水迹,存在流动液态水;影响交通和隧道安全                             |
| 4   | 变形缝处存在大范围裂缝;变形缝接缝处严重碎边;接缝处出现喷射水流,接缝处存在大范围错位;严重影响交通和隧道安全 |

表 3 防撞侧石技术状况值评判标准

| 状况值 | 技术状况描述                              |                                |
|-----|-------------------------------------|--------------------------------|
|     | 定性描述                                | 定量描述                           |
| 0   | 防撞侧石结构完好                            | —                              |
| 1   | 防撞侧石少量缺角、缺损,尚未影响其使用功能               | 防撞侧石损坏长度≤10%;缺失长度≤3%           |
| 2   | 部分防撞侧石缺损、开裂,部分功能丧失,可能会影响交通安全        | 防撞侧石损坏长度>10%且≤20%;缺失长度>3%且≤10% |
| 3   | 防撞侧石缺损开裂或缺失严重,原有功能丧失,倒伏、侵入限界,影响交通安全 | 防撞侧石损坏长度>20%;缺失长度>10%          |

(3) 评定方法

根据各区段的分项权重,对隧道区段的 16 项构件指标进行评定,计算出结构区段的技术状况值。

隧道各区段技术状况评定按下式计算:

$$V_{JGCI}=100\cdot\left[1-\frac{1}{4}\sum_{i=1}^n\left\{V_{JGCI_i}\times\frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n\omega_i}\right\}\right]\quad(1)$$

式中: $\omega_i$  为分项权重; $V_{JGCI_i}$  为分项状况值,值域 0~4。

3 权重计算

3.1 层次分析法计算权重流程

研究基于层次分析法(AHP)<sup>[11-13]</sup>,将隧道各区

段结构分项作为一个整体进行权重分配,通过对元素之间的两两比较,构造判断矩阵,采用定性分析与定量分析相结合的方法计算隧道技术状况评定的分项指标权重。各分项权重计算步骤如下。

(1) 递阶层次评定结构模型的建立

将隧道作为整体结构,建立不同区段的分项递阶层次评定结构模型,如图 2 所示。

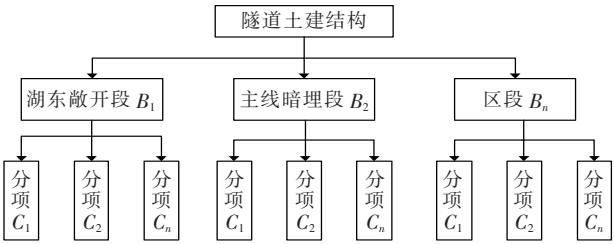


图 2 分项递阶层次评定结构模型

(2) 构造各区段分项的判断矩阵

对于各区段的分项,采用 1~9 九标度法构建判断矩阵,在同一层次上由多位专家针对分项的相对重要性按 1~9 的等级建立两两比较判断矩阵进行排序(数值越大表示越重要,反之不重要,则用相应的倒数表示),如表 4 所示。

表 4 判断矩阵

| 分项                | 分项                |                   |     |                   |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----|-------------------|
|                   | 分项 C <sub>1</sub> | 分项 C <sub>2</sub> | ... | 分项 C <sub>n</sub> |
| 分项 C <sub>1</sub> | c <sub>11</sub>   | c <sub>12</sub>   | ... | c <sub>1n</sub>   |
| 分项 C <sub>2</sub> | c <sub>21</sub>   | c <sub>22</sub>   | ... | c <sub>2n</sub>   |
| ...               | ...               | ...               | ... | ...               |
| 分项 C <sub>n</sub> | c <sub>n1</sub>   | c <sub>n2</sub>   | ... | c <sub>nn</sub>   |

注: $c_{ij}=1/c_{ji}$ ,其中 $i,j=1,2,\cdots,n,i$ 不等于 $j$ 。

(3) 单一元素相对权重的计算

通过多位专家打分,结合九标度法计算原则,建立各指标层的指标间重要程度定性描述,根据相关结构分项指标元素的重要程度分析得到各结构分项指标的相对权重,具体计算方法见参考文献[12]。

3.2 隧道分项权重

通过上述层次分析法对阳澄西湖隧道 7 大区段的结构分项权重进行了计算及分配,以主线暗埋段为例,各结构权重分配如表 5 所示。

3.3 隧道各区段权重分配

根据隧道各区段里程长度占比,采用专家调查法对阳澄西湖隧道 7 大区段的权重进行分配,权重分配结果如表 6 所示。

表 5 主线暗埋段分项权重

| 部位      | 分项      | 分项权重/% | 小计/% |
|---------|---------|--------|------|
| 洞门      | 洞门结构    | 5.25   | 7    |
|         | 洞门装饰    | 1.75   |      |
| 暗埋段主体结构 | 混凝土结构   | 38.10  | 51   |
|         | 变形缝     | 12.90  |      |
|         | 防火板     | 1.05   |      |
|         | 装饰板     | 3.15   |      |
| 暗埋段附属结构 | 排水设施    | 4.90   | 35   |
|         | 安全通道门   | 2.45   |      |
|         | 路面铺装    | 9.10   |      |
|         | 路面伸缩缝   | 2.80   |      |
|         | 防撞侧石    | 2.80   |      |
|         | 设备箱门    | 1.75   |      |
|         | 预埋件及悬吊件 | 7.00   |      |
| 电缆通道    | 电缆支架    | 2.00   | 2    |
| 安全通道    | 排水沟     | 2.15   | 5    |
|         | 上下盖板    | 2.85   |      |
| 合计      |         |        | 100  |

表 6 隧道各区段权重分配

| 区段名称    | 权重/% | 区段名称    | 权重/% |
|---------|------|---------|------|
| 湖东主线敞开段 | 11   | 进口匝道暗埋段 | 7    |
| 湖西主线敞开段 | 11   | 出口匝道敞开段 | 4    |
| 主线暗埋段   | 56   | 出口匝道暗埋段 | 7    |
| 进口匝道敞开段 | 4    |         |      |

4 阳澄西湖隧道技术状况评定

4.1 该文研究方法评定结果

基于阳澄西湖隧道的定期检查资料及数据,主线暗埋段技术状况与整体土建结构技术状况评分如表 7、8 所示。

根据计算结果,阳澄西湖隧道土建结构技术状况值( $V_{JGCI}$ )为 86.30,评定等级为 1 类。

4.2 现行 JTG H12—2015《公路隧道养护技术规范》评定结果

根据现行隧道养护技术规范,阳澄西湖隧道土建

表 7 主线暗埋段技术状况评分

| 里程                          | 技术状况值 |      |      |      |      |      |      |       |      |      |        |      |      |
|-----------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|--------|------|------|
|                             | 洞门    | 主体结构 | 防火板  | 装饰板  | 排水设施 | 通道门  | 路面铺装 | 路面伸缩缝 | 防撞侧石 | 设备箱门 | 悬吊件预埋件 | 安全通道 | 电缆廊道 |
| K83+440~K84+000             | 0     | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 1    | 1     | 1    | 0    | 0      | 0    | 0    |
| K84+000~K84+500             | —     | 1    | 1    | 0    | 0    | 0    | 1    | 1     | 1    | 0    | 0      | 0    | 0    |
| K84+500~K85+000             | —     | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 1    | 1     | 1    | 0    | 0      | 0    | 0    |
| K85+000~K85+250             | 0     | 1    | 1    | 0    | 0    | 0    | 1    | 1     | 1    | 0    | 0      | 0    | 0    |
| $\text{Max}(V_{JGCI_{ij}})$ | 0     | 0    | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 1     | 1    | 1    | 0      | 0    | 0    |
| 权重 $w_i$ /%                 | 7     | 51   | 1.05 | 3.15 | 4.90 | 2.45 | 9.10 | 2.80  | 2.80 | 1.75 | 7.00   | 5.00 | 2.00 |
| 技术状况评分( $V_{JGCI}$ )        | 82.09 |      |      |      |      |      |      |       |      |      |        |      |      |

表 8 该文方法隧道土建结构技术状况评分

| 区段      | $w_i$ /% | 区段评分  | 土建结构技术状况 |
|---------|----------|-------|----------|
| 湖东主线敞开段 | 11       | 93.75 | 86.30    |
| 湖西主线敞开段 | 11       | 93.75 |          |
| 主线暗埋段   | 56       | 82.09 |          |
| 进口匝道敞开段 | 4        | 99.20 |          |
| 进口匝道暗埋段 | 7        | 83.93 |          |
| 出口匝道敞开段 | 4        | 99.20 |          |
| 出口匝道暗埋段 | 7        | 84.26 |          |

结构技术状况  $V_{JGCI}$  值为 89.25,评定等级为 1 类。评定表如表 9 所示。

该文建立的堰筑法隧道评定方法与现行公路隧道评定方法在土建结构技术状况评分与等级评分方面一致性较强。同时,该文提出的针对堰筑法隧道评定方法具有以下优势:① 将堰筑法公路隧道划分为独立的区段进行评定,在获得土建结构总体技术状况等级的同时还获得了隧道各区段的结构技术状况,方便养护单位对不同区段隧道结构针对性制定养护维修计划;② 针对堰筑法隧道的结构解析,技术状况评定全面涵



表9 按规范的阳澄西湖隧道土建结构技术状况评分(洞门、洞口)

| 里程                                 | 状况值   |     |    |      |      |    |     |      |
|------------------------------------|-------|-----|----|------|------|----|-----|------|
|                                    | 主体结构  | 渗漏水 | 路面 | 防撞侧石 | 排水设施 | 吊顶 | 内装饰 | 标志标线 |
| K83+240~K83+500                    | 0     | 0   | 1  | 1    | 0    | 0  | 0   | 0    |
| K83+500~K84+000                    | 0     | 1   | 1  | 1    | 1    | 1  | 0   | 0    |
| K84+000~K84+500                    | 0     | 0   | 1  | 1    | 0    | 1  | 0   | 0    |
| K84+500~K85+000                    | 0     | 0   | 1  | 1    | 1    | 1  | 0   | 0    |
| K85+000~K85+550                    | 0     | 0   | 1  | 1    | 0    | 1  | 0   | 0    |
| $\text{Max}(V_{\text{JGCI}_{ij}})$ | 0     | 1   | 1  | 1    | 1    | 1  | 0   | 0    |
| 权重 $w_i/\%$                        | 30    | 10  | 15 | 2    | 6    | 10 | 2   | 5    |
| 土建结构技术状况                           | 89.25 |     |    |      |      |    |     |      |

注:洞口:状况值:0,权重:15%;洞门:状况值:0,权重:5%。

盖了得到隧道各个分项和构件,评定结果更加精确全面。

5 结论与讨论

(1) 采用结构解析理念和层次分析法,开展堰筑法公路隧道土建结构技术状况评定方法研究,包括堰筑法隧道评定体系框架、构件单元评定方法的建立、各层指标权重的确定、评定流程的确定等内容。

(2) 该文提出的方法全面涵盖了堰筑法公路隧道的结构分项,在得到隧道总体技术状况等级的同时,还可以得到隧道分区段技术状况等级,可为隧道精准养护提供支撑。

(3) 苏州阳澄西湖隧道的实际工程案例表明,该文评定方法得到的隧道总体技术状况得分与现有规范具有较好的一致性,为堰筑法公路隧道土建结构技术状况评定工作提供了一定的参考依据和新的途径。

参考文献:

[1] 王梦恕. 水下交通隧道的设计与施工[J]. 中国工程科学, 2009,11(7):4—10.

[2] 陈建芹,冯晓燕,魏怀,等. 中国水下隧道数据统计[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(3):483—516.

[3] 重庆市交通委员会. 公路隧道养护技术规范:JTG H12—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[4] 同济大学. 盾构法隧道结构服役性能鉴定规范:DG/T

J08—2123—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

[5] 广州市城市道路养护管理中心,广州市市政集团有限公司. 内河沉管隧道管养技术规范:DBJ/T 15—156—2019[S]. 北京:中国城市出版社,2019.

[6] 林志,陈思,陈相. 隧道土建结构技术状况评定方法研究[J]. 隧道建设(中英文),2017,37(5):537—542.

[7] 蒋雅君,陶双江,杨露,等. 基于 DRU 评价方法的运营公路隧道土建结构技术状况综合评价技术研究[J]. 隧道建设(中英文),2017,37(10):1 239—1 245.

[8] 吴华勇. 城市盾构隧道技术状况评定方法研究[J]. 城市道桥与防洪,2020(6):220—223.

[9] 王永东,叶铭,郑卓琦,等. 基于病害关联性的运营隧道衬砌技术状况评价研究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(4):684—691.

[10] 张素磊,张顶立,陈淮,等. 运营隧道衬砌结构技术状况的评定方法研究[J]. 北京交通大学学报,2013,37(4):19—23.

[11] 彭张林. 综合评价过程中的相关问题及方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2015.

[12] 斯新华,黄倩文,黄文韬,等. 基于层次分析法的常规公路桥梁技术状况评定方法[J]. 公路交通技术,2020,36(6):91—97.

[13] 洪平,刘鹏举. 层次分析法在铁路运营隧道健康状态综合评判中的应用[J]. 现代隧道技术,2011,48(1):28—32.

[14] 洪志国,李炎,范植华,等. 层次分析法中高阶平均随机一致性指标(RI)的计算[J]. 计算机工程与应用,2002,38(12):45—47.