

浅埋偏压公路隧道衬砌裂损病害统计及成因反演分析

万建国, 张政, 阳德志

(中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要:基于广东地区某三车道高速公路隧道浅埋偏压段衬砌裂损病害检测数据,采用数理统计方法对衬砌裂损病害进行统计分析。结合隧道施工及检测情况,对浅埋偏压段隧道结构受力情况分别采用荷载—结构法和地层—结构法进行了数值反演计算。计算结果表明:对于隧道的浅埋偏压段,地层—结构法得到的衬砌受力情况更加吻合隧道衬砌裂损状态,受隧道施工及地形偏压的影响,浅埋侧隧道拱部围岩塑性应变和围岩压力大于深埋侧,因衬砌钢筋保护层较厚,导致钢筋无法有效约束裂缝发展,进而造成浅埋侧衬砌大面积开裂。

关键词:浅埋偏压;公路隧道;衬砌裂损;统计规律;成因反演

1 引言

随着中国交通基础设施建设的持续发展,特别是西南山岭地区隧道数量和规模的逐步增加,越来越多的隧道会面临洞口段浅埋偏压、不良地质地形情况。相对于常规隧道而言,偏压隧道结构受力更为复杂,施工难度大,容易出现山体滑塌、初支失稳和二衬开裂等工程事故。其主要原因是对偏压隧道的结构受力特性掌握不清楚,造成设计方案缺乏针对性,以及施工工法、措施选择不合理等。因此浅埋偏压隧道受力特征、围岩失稳机制、裂损衬砌安全性能等关键问题受到工程科技人员的日益关注。

目前,偏压隧道围岩压力主要参考铁路、公路隧道设计规范中推荐的基于刚体滑块极限平衡法推导的公式。随着偏压隧道工程实践的增多和研究的深入,发现规范规定的计算模型与工程实际存在一定的出入。雷明峰采用模型试验对浅埋偏压隧道的围岩压力和衬砌结构力学行为以及破坏机制进行了研究;邱业建等结合室内模型试验结果和相关联流动法则,构建了浅埋偏压隧道围岩压力的极限上限解;吕国仁利用数值模拟的方法对浅埋偏压段施工过程进行仿真模拟,得到了隧道不同开挖工序时各阶段围岩及支护结构的变形

和应力变化情况;刘学增采用模型试验研究了偏压荷载下裂缝特征对衬砌变形特性、力学响应、破坏过程、极限承载力的影响规律。

目前浅埋偏压段隧道测试数据多为施工阶段或模型试验采集,实际上隧道复合式衬砌结构承担的围岩释放荷载具备明显的时空特性,随着时间的推移,隧道进入运营期后支护结构力学状态较施工阶段可能发生较大变化。该文基于广东地区某高速公路三车道隧道浅埋偏压段衬砌裂损病害检测数据,采用数理统计方法对衬砌裂损病害进行统计。结合隧道施工及检测情况,对浅埋偏压段隧道结构受力情况分别采用荷载—结构法和地层—结构法进行数值反演计算。

2 工程概况

隧道工程区属构造剥蚀丘陵区,地形切割强烈,沟谷发育,地面高程为330~448 m,相对高差118 m左右,进出口自然山坡坡角为25°~40°。洞顶覆盖层为粉质黏土,洞身围岩为粗粒花岗岩。进出口段覆盖层厚度为4~11 m,全、强风化层厚25~32 m。隧道为双向六车道,全长478 m。隧道进口、中部、出口的线间距分别为14.7、17.2、16.4 m,为分离式小净距隧道。衬砌内轮廓高8 m,宽15.49 m。隧道纵断面如图1所示。

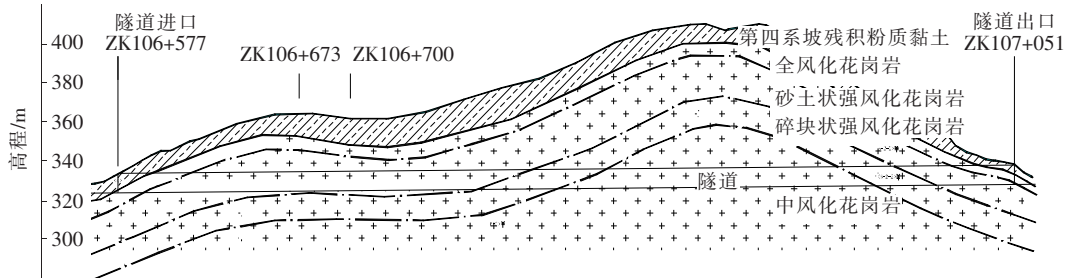


图1 隧道纵断面

3 二衬裂损及衬砌施工情况

左线隧道 ZK106+673~ZK106+700 段于 2014 年 9 月 4 日开挖完成,2014 年 9 月 15 日二衬施工完成。在该段衬砌完成后,再进行右线隧道同里程段的开挖和支护。该段二衬设计厚度 60 cm,衬砌每延米对称均布 6 根 $\phi 25$ mm 钢筋,钢筋保护层厚度 5.8 cm。2015 年 10 月 19 日隧道在交工验收期间发现左隧道该里程范围内二衬右侧拱腰至拱顶多处开裂(图 2),

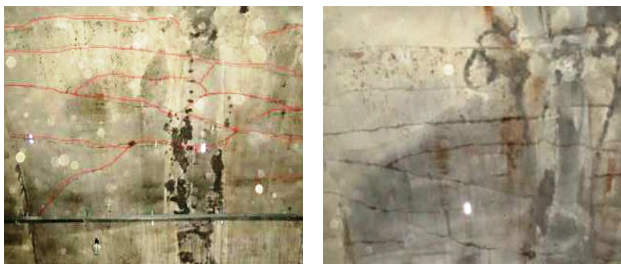


图2 衬砌裂缝图

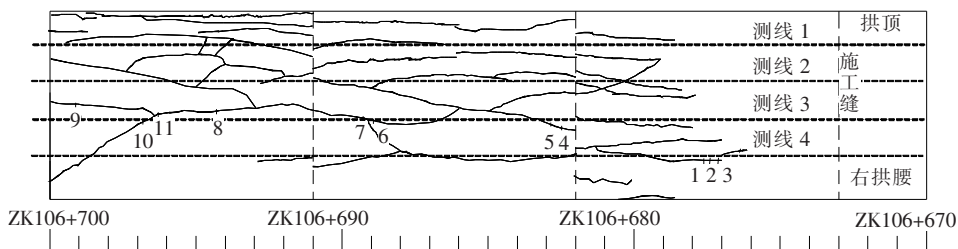


图3 裂缝展布图

表1 裂缝宽度和深度统计

测点编号	宽度/mm	深度/mm	测点编号	宽度/mm	深度/mm
1	0.78	63	5	1.10	91
2	0.90	104	7	1.32	130
3	0.92	87	8	1.62	121
10	1.00	79	9	2.14	125
4	1.04	61	11	2.20	126
6	1.08	68			

随后委托检测单位对该段二衬进行了检测。检测内容主要包括衬砌裂损情况(裂缝位置、宽度和深度)以及衬砌施工情况(二衬厚度、钢筋保护层厚度、混凝土实度和脱空缺陷情况、二衬混凝土强度)。

3.1 裂缝规律统计及分析

通过对该隧道裂缝的统计发现,ZK106+673~ZK106+700 段衬砌裂纹的发育有以下规律:

(1) 隧道裂缝展布如图 3 所示,从裂缝形态来看,该段裂缝以纵向裂缝为主,且裂缝在施工缝位置贯通发育,在两条纵向裂缝间或者裂缝端头发展为斜向裂缝,无环向裂缝;从裂缝分布部位来看,裂缝全部分布在右侧拱腰至拱顶的范围。

(2) 现场采用裂缝测宽仪对 5 条典型裂缝上 11 个测点的宽度进行测量,测量结果见表 1。从裂缝宽度来看,上述测点裂缝宽度均大于 0.5 mm,最大裂缝宽度达到 2.2 mm,越靠近 ZK106+700 裂缝宽度值越大,斜向裂缝和纵向裂缝交叉处测点的裂缝宽度大于两侧裂缝宽度。

(3) 现场采用跨孔自动超声检测仪对上述测点裂缝深度进行检测,检测结果表明裂缝宽度越大,裂缝深度越深,且斜向裂缝和纵向裂缝交叉处测点的裂缝深度大于两侧裂缝深度,最大裂纹深度为 13 cm。

隧道衬砌裂缝为公路隧道运营过程中常见的病害,在混凝土构件后期的使用过程中,20%的裂缝是由于荷载原因产生的,包括变形与荷载的共同作用,而另外有 80%以上的混凝土结构裂缝由结构次应力引起。

邹育麟等对重庆地区 14 座高速公路隧道的裂缝进行了统计,外部荷载直接作用引起的衬砌开裂多以斜裂缝和纵向裂缝为主,且大部分裂缝处于轻微张开(裂缝宽度 $<1\text{ mm}$),而该隧道纵向裂缝和张开型(裂缝宽度 $\geq 1\text{ mm}$)裂缝占比远高于文献[13]中一般高速公路隧道统计数据,纵向张开型裂缝在隧道局部密集出现表明裂缝与隧道衬砌受力状态密切相关。

3.2 二衬施工情况

为进一步探究 ZK106+673~ZK106+700 段衬砌裂损原因,检测单位对二衬厚度、钢筋保护层厚度、混凝土密实度、脱空缺陷情况、二衬混凝土强度进行了检测。

现场在隧道拱部布置 17 条测线,由于现场裂缝分布在隧道右侧拱腰至拱顶之间,故在该范围对测线进行了加密,测线布置见图 4,采用地质雷达对二衬厚度、钢筋混凝土保护层厚度和二衬背后空洞情况进行检测,并采用回弹法和钻芯法测定该段衬砌混凝土强度等级。检测结果表明:测段内钢筋保护层厚度为 10~82.3 cm,其中隧道右侧拱腰至拱顶间(测试线 1~7)钢筋保护层平均厚度为 31 cm,左侧拱腰至拱顶间(测设线 8~10)钢筋保护层平均厚度为 39 cm,均远超设计值 5.8 cm。该段二衬混凝土较密实,未发现明显脱空或空洞等缺陷,二衬厚度基本符合设计要求(60 cm),衬砌混凝土强度符合设计 C30 要求,钢筋直径和间距满足设计要求。

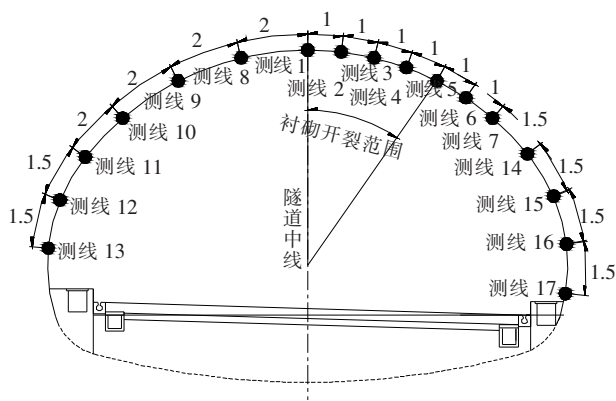


图 4 测线横断面布置图(单位:m)

4 计算模型

4.1 计算断面的选取

根据 ZK106+673~ZK106+700 段裂缝统计情况,该文选取衬砌裂损最为严重的 ZK106+700 位置二衬作为研究对象,该断面地形、地质信息见图 5。

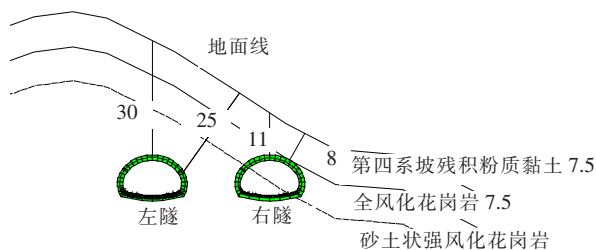


图 5 ZK106+700 断面(单位:m)

4.2 计算方法

为真实反演隧道在偏压荷载作用下的受力状态,该文选取两种计算方法进行对比分析,分别为荷载—结构法和地层—结构法。荷载—结构法采用规范规定的荷载,见图 6,考虑围岩对结构的约束作用,二衬采用厚度为 60 cm 的梁单元,采用有限元软件计算结构内力。考虑到现场左隧二衬施工时初期支护变形未收敛的实际情况,计算中不考虑初支的荷载分担。

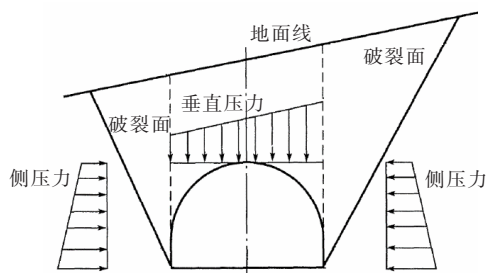


图 6 荷载图示

地层—结构法中按照实际地形与地层分布建立数值计算模型,考虑消除模型的边界效应,采用二维弹塑性分析,围岩采用摩尔—库仑单元,衬砌采用弹性梁单元,计算模型见图 7。鉴于衬砌施工完成 1 年之后隧道开裂,且二衬浇筑时初支变形未收敛,故不考虑施工中分部开挖对围岩短期荷载释放的影响,但考虑后行洞(右洞)施做对先行洞(左洞)的影响。

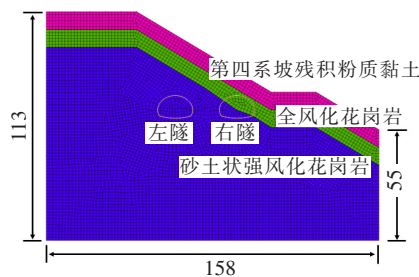


图 7 地层—结构法计算模型(单位:m)

4.3 计算参数

计算采用地勘报告提供的围岩物理参数指标,二衬力学参数采用规范规定数值,围岩与支护结构的物

理力学参数如表 2 所示。

表 2 围岩与支护结构的物理力学参数

材料名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	泊松比
粉质黏土	18.5	0.05	22	18	0.45
全风化 花岗岩	19.5	1.00	25	25	0.40
强风化 花岗岩	19.5	1.20	30	25	0.35
二衬	25.0	31.00	—	—	0.20

5 计算结果分析

5.1 衬砌弯矩计算结果分析

采用荷载—结构法和地层—结构法计算二衬弯矩,结果如图 8、9 所示。

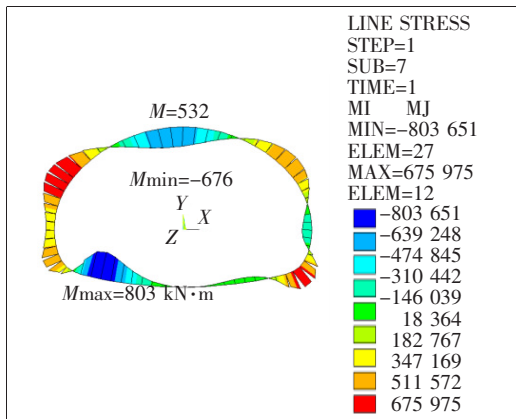


图 8 荷载—结构法弯矩图(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

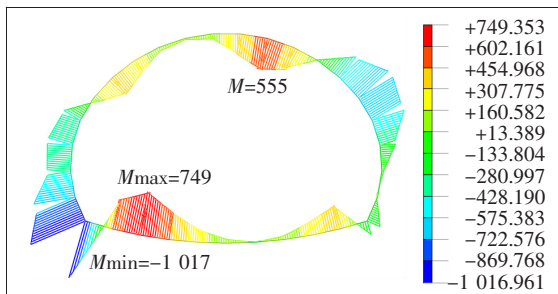


图 9 地层—结构法弯矩图(右洞开挖后)(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

由图 8、9 可知:荷载—结构法左隧二衬最大正弯矩出现在隧道左侧拱脚位置,数值为 $803 \text{ kN} \cdot \text{m}$;最大负弯矩出现在隧道左侧拱顶位置,数值为 $-676 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。地层—结构法左隧二衬最大正弯矩出现在

隧道左侧拱脚,数值为 $749 \text{ kN} \cdot \text{m}$;最大负弯矩也出现在隧道左侧拱脚位置,数值为 $-1.017 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。考虑到隧道拱脚及仰拱变形受到仰拱填充的刚性约束,其实际受力情况与计算情况会存在一定差异,该文献仅讨论隧道拱圈受力情况。

两种计算方法得到隧道拱部弯矩分布存在较为明显差异,荷载—结构法左半幅拱圈较右半幅拱圈弯矩值更大,而地层—结构法的计算结果恰好相反,隧道右半幅拱圈弯矩值较左侧大。从两种计算方法得到的隧道拱部弯矩绝对值来看,地层—结构法得到的拱部正负弯矩值均比荷载—结构法的计算结果大。

考虑到该隧道 ZK106+673~ZK106+700 段二衬左右半幅施工情况基本相同,裂缝均出现在右半幅,表明二衬拱部右半幅内力较左半幅大,故地层—结构法得到的衬砌受力情况更加吻合隧道衬砌裂损状态。

5.2 围岩稳定性分析

隧道支护结构承受围岩塑性变形产生的荷载,当隧道围岩失稳时,会产生明显的局部塑性变形,这种局部化现象一旦发生,变形将会相对集中在局部变形区域内,隧道开挖后围岩的塑性变形如图 10 所示。

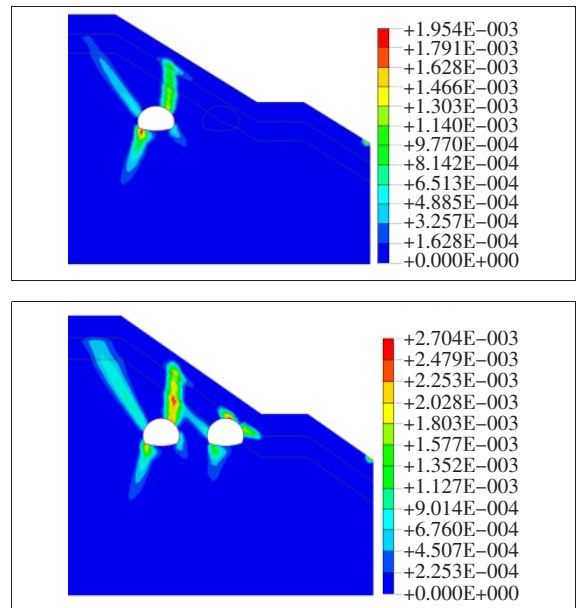


图 10 地层剪切应变云图

左隧开挖后,左隧围岩塑性变形显著集中在连接左拱脚和右拱顶的斜线方向。因隧道施工的影响,隧道右侧拱部逐渐产生剪切应变并向地表发展,并在粉质黏土和全风化花岗岩交界位置积累塑性剪切变形。而之后的右隧开挖进一步加剧了左隧围岩塑性区的发

展,其塑性区的剪切变形数值显著增大,塑性区范围也进一步扩大。鉴于作用在隧道衬砌结构上的围岩荷载主要是围岩的塑性变形、松动破坏所产生,故上述分析也进一步印证了偏压地形下左隧右半幅弯矩大于左半幅的计算结论。

5.3 衬砌裂损原因分析

图 11 为地层—结构法得到的隧道衬砌主拉应力展布图,图中隧道右侧拱顶以及右侧拱腰位置的最大主拉应力数值均超过 C30 混凝土极限抗拉强度 2.2 MPa,故二衬拱部右侧隧道内表面以及右拱腰外表面混凝土都会产生裂缝。结合 ZK106+700 断面二衬钢筋保护层检测情况,拱顶右侧测线 1~4 范围内二衬内侧混凝土保护层平均厚度为 52 cm,钢筋位于混凝土受压区,不能约束裂缝发展扩大,因此左隧右侧拱腰至拱顶出现贯通型纵向裂缝。

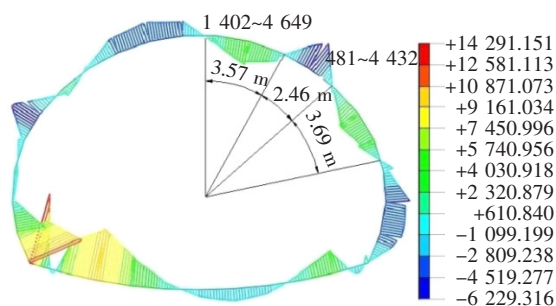


图 11 衬砌主拉应力展布图(单位:kPa)

6 结论

(1) 隧道 ZK106+673~ZK106+700 段存在浅埋偏压,隧道开挖支护过程中,左隧右侧拱部围岩出现明显的塑性区,右隧开挖后左隧周边围岩塑性变形进一步加剧,围岩变形压力随之增加,当二衬混凝土拉应力超过其极限抗拉强度,衬砌局部开裂。因左隧右侧拱腰至拱顶钢筋保护层厚度过大,钢筋不能有效约束裂缝的发展,因此该范围出现贯通型纵向裂缝。故施工中应严格控制不良地质段,特别是浅埋偏压段二衬钢筋的排间距和保护层厚度,以保证钢筋和混凝土协同受力。

(2) 对于隧道的浅埋偏压段,采用地层—结构法计算的拱部弯矩比荷载—结构法大,且得到的衬砌受力情况更吻合隧道衬砌裂损状态。在浅埋偏压隧道设计过程中,应采用地层—结构法对设计结果进行必要的复核。

(3) 相对于温度、混凝土收缩徐变产生的衬砌裂缝,二衬承载能力不足引起的裂缝更具有规律性,其宽度和深度一般也较大。在隧道运营过程中发现该类型的裂缝,特别是纵向裂缝集中出现时应引起警觉,及时采取加固维护措施,避免二衬结构发生整体失稳破坏。

参考文献:

- [1] 李军. 软岩偏压隧道中夹岩施工扰动效应及控制技术[J]. 中外公路, 2020(2).
- [2] 刘涛, 沈明荣, 袁勇. 偏压连拱隧道围岩稳定性模型试验与数值分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008(4).
- [3] 谢红强, 何川, 林刚. 开挖工况对偏压连拱隧道结构及上覆山体稳定性的影响[J]. 现代隧道技术, 2007(1).
- [4] 杨小礼, 眭志荣. 浅埋小净距偏压隧道施工工序的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007(4).
- [5] 叶靖宇, 刘浩龙, 刘雄. 浅埋偏压软岩段大断面连拱隧道施工技术研究[J]. 中外公路, 2020(5).
- [6] 王英学, 周佳媚, 高波. 偏压滑坡地段围岩受力特征测试分析[J]. 岩土力学, 2002(6).
- [7] 丁文其, 王晓彤, 李志刚, 等. 龙山浅埋大跨度连拱隧道施工方案优化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(22).
- [8] 雷明锋, 彭立敏, 施成华, 等. 浅埋偏压隧道衬砌受力特征及破坏机制试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013(8).
- [9] 邱业建, 彭立敏, 雷明锋. 浅埋偏压隧道围岩压力上限法解析解[J]. 土木工程学报, 2015(6).
- [10] 吕国仁, 隋斌, 王永进, 等. 浅埋偏压隧道开挖数值模拟及稳定性研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2013(4).
- [11] 刘学增, 刘文艺, 桑运龙, 等. 偏压荷载下裂损特征对隧道衬砌受力影响试验[J]. 土木工程学报, 2015(10).
- [12] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [13] 邹育麟, 何川, 周艺, 等. 重庆高速公路现役营运隧道渗漏水病害统计及成因分析[J]. 公路交通科技, 2013(1).
- [14] TG 3370.1—2018 公路隧道设计规范(第一册土建工程)[S].