

# 几种施工质量缺陷的动力特性分析<sup>\*</sup>

欧阳磊<sup>1</sup>, 廖艳程<sup>1</sup>, 凌同华<sup>1</sup>, 李毅<sup>2</sup>, 冯志强<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学, 湖南 长沙 410004; 2.中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要:** 当隧道存在施工质量缺陷时, 不仅会影响正常使用下的寿命, 且在地震作用下极易发生破坏。文中采用 ANSYS 软件分析隧道存在空洞、初期支护厚度和强度不足、锚杆长度不足等质量缺陷时的动力特性, 并对各质量缺陷进行参数敏感性分析, 找出最敏感的质量缺陷。结果表明, 隧道存在空洞时, 会改变隧道的受力特性, 使空洞处拉应力较大; 当隧道存在锚杆长度不足、初期支护厚度和强度不足缺陷时, 对加速度响应虽有影响但影响有限, 而对最大主应力响应的影响很明显; 初期支护厚度的敏感性最大, 在质量控制时要格外注意。

**关键词:** 隧道; 施工质量缺陷; 动力响应分析; 敏感性分析

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)05-0178-05

由于隧道建设过程中地质探查不明、管理不到位、施工不规范造成已建或在建隧道中多数存在施工质量缺陷, 轻则导致隧道衬砌开裂、剥落、渗漏水, 重则导致衬砌破坏甚至坍塌。中国是一个地震多发国家, 由地震动造成的地下结构损坏日趋增多, 其中存在施工质量缺陷的隧道极易发生破坏, 而隧道破坏所带来的损失巨大, 甚至致命。故对存在各种质量缺陷的隧道进行动力响应分析具有一定意义。

目前海内外专家对存在施工质量缺陷的隧道进行了一些研究: 宋瑞刚等采用 ANSYS 模拟二次衬砌背后存在空洞的情形, 分析了空洞位置、大小及空洞群对支护结构截面安全因子的影响; 张成平等通过数值模拟研究隧道存在双空洞的安全性, 得出衬砌背后存在双空洞会显著改变支护结构的应力分布, 使结构处于不稳定受力状态; 余健等通过模型试验研究改变隧道所受应力场、围岩等级、空洞位置对衬砌承载能力的影响; 蒋玉波采取理论研究和数值分析相结合的方法研究地震作用下存在空洞隧道的动力响应规律, 分析了空洞位置、尺寸等因素对隧道及围岩受力的影响, 并提出了简化的地震响应计算方法; 陈明奎通过数值模拟研究了地震作用下拱顶空洞尺寸不同、地震烈度不同对衬砌结构动力响应的影响, 并对空洞加固处理的加固圈参数进行了优化; 应国刚通过室内模型试验和数值计算得到了存在空洞隧道应力重分布的特征与规律。上述研究仅针对空洞, 对其他缺陷研究很少, 且没有进行敏感性

分析, 没有定量比较质量缺陷参数的影响。为此, 该文选取几种典型质量缺陷进行动力响应分析, 总结各质量缺陷下的响应特点, 在此基础上对各质量缺陷进行参数敏感性分析, 找出敏感度最高的参数, 为工程质量控制提供参考。

## 1 有限元模型和计算参数

### 1.1 有限元模型

研究结果表明, 模型范围取值大小会对隧道动力反应计算精度产生影响, 模型横向范围取值大于 5 倍洞径时可取得较稳定的结果。基于此, 建立隧道模型(见图 1)时上、下、左、右各取 5 倍洞径, 采用理想弹塑性模型 Drucker-Prager, 利用 Link1 单元模拟锚杆、Beam3 单元模拟二次衬砌、Plane182 单元模拟初期支护结构和围岩, 钢拱架和钢筋焊接网不予模拟, 其加固效果采用增加初期支护结构的弹性模量表示。

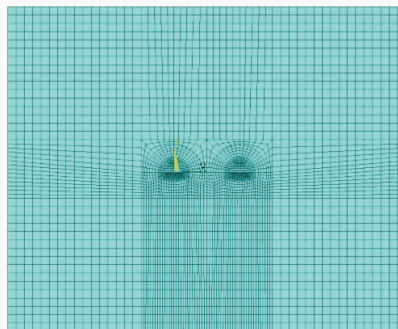


图 1 隧道有限元模型

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678071)

依据 JTG D70—2004《公路隧道设计规范》与工程勘察报告,围岩及支护结构的力学参数见表 1。

表 1 围岩与支护结构的力学参数

材料 类型	弹性模量/ GPa	泊松 比	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粘聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)
V 级围岩	2.06	0.34	2 248	22	0.2
喷射砼	20.00	0.25	2 200	—	—
锚杆	200.00	0.30	7 000	—	—
衬砌	28.00	0.20	2 500	—	—

1.2 边界条件

考虑到模型边界已取得足够大,能取得较满意的结果,且该文主要考虑竖向地震波的作用,在模型上施加简单边界:模型底部施加竖向约束,左右两侧施加水平约束,顶面为自由面。

1.3 阻尼参数

采用瑞利线性组合阻尼,其假设阻尼矩阵为刚度矩阵和质量矩阵的线性组合,即:

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K]$$
 (1)

式中:  $\alpha$  和  $\beta$  为常数,可按式(2)求得。

$$\begin{cases} \alpha+\beta\omega_i=2\omega_i\xi_i \\ \alpha+\beta\omega_j=2\omega_j\xi_j \end{cases}$$
 (2)

式中:  $\omega_i, \xi_i, \omega_j, \xi_j$  分别为阵型向量  $\phi_i, \phi_j$  对应的自振角频率和阻尼比。

可根据结构阵型分析结果,选取两种贡献较大的阵型,取与其相对应的  $\xi, \omega$  值得到  $\alpha, \beta$ 。一般取阻尼比为 0.05。

1.4 地震波的输入

采用较常用的惯性力法,即将地震荷载以加速度的形式加载到模型上。地震波选用 EI-centro 波,其最大加速度为 3.417 m/s<sup>2</sup>,将地震波振幅调整为 0.2g,使其满足 8 度抗震设防烈度。计算时取地震波前 10 s,激振方向为竖向。地震波加速度时程曲线见图 2。

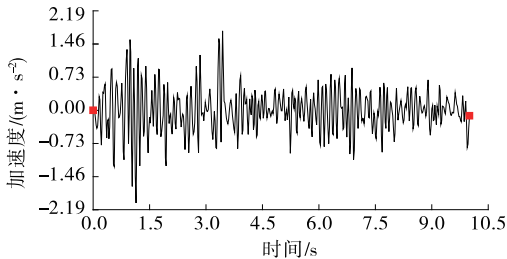


图 2 EI-centro 波加速度时程曲线

1.5 计算工况

在实际施工过程中,由施工产生的质量缺陷较多,这里主要考虑空洞径向长度  $R$ 、空洞环向间距  $C$ 、锚杆长度  $B$ 、初期支护厚度  $H$  和初期支护强度  $Q$  等方面质量缺陷对隧道动力特性的影响。为此,设置如下工况:

(1) 取空洞径向长度为 0(无空洞)、1、1.5、2.0 m 4 种情形进行分析。

(2) 取两空洞环向间距为 0(无空洞)、9°、18°、27° 4 种情形进行分析(见图 3)。

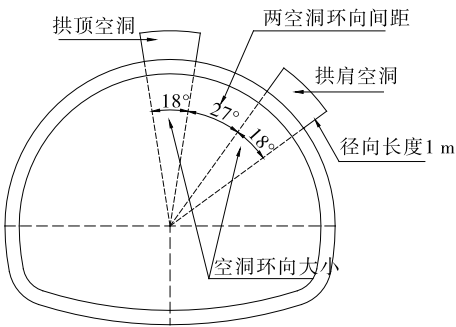


图 3 两空洞位置大小示意图

(3) 取初期支护厚度为 10、15、20、25 cm 4 种情形进行分析。

(4) 取初期支护强度为 C10、C15、C20 3 种情形进行分析。

(5) 取锚杆长度为 2.0、2.5、3.0、4.0 m 4 种情形进行分析。

因在动力分析后需对缺陷参数进行敏感性分析,针对各质量缺陷选定一个基准参数集(见表 2)。

表 2 各参数的基准值

参数	基准值
空洞径向长度 $R$ /m	1
空洞环向间距 $C$ /(°)	9
初期支护厚度 $H$ /cm	25
初期支护强度 $Q$	C20
锚杆长度 $B$ /m	4

2 计算结果及分析

2.1 两空洞不同环向间距下的动力响应

2.1.1 加速度响应

两空洞环向间距为 9°时拱顶监测点的加速度时程曲线见图 4,空洞不同环向间距时各监测点的峰值加速度见表 3。

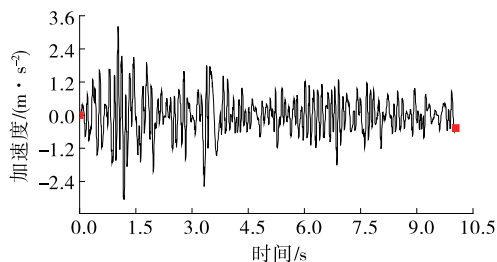


图4 两空洞环向间距为9°时拱顶监测点的  
加速度时程曲线

表3 空洞不同环向间距时各监测点的峰值加速度

监测点	两空洞不同环向间距(°)时的 峰值加速度/(m·s <sup>-2</sup> )			
	0	9	18	27
拱顶	2.412	3.213	2.835	2.537
左拱肩	2.384	3.181	2.803	2.505
右拱肩	2.384	3.189	2.813	2.517
左拱腰	2.348	2.841	2.562	2.480
右拱腰	2.348	2.820	2.564	2.474
左拱脚	2.339	2.473	2.472	2.471
右拱脚	2.340	2.475	2.470	2.467
拱底	2.341	2.342	2.341	2.342

由图4和表3可知:与无空洞(两空洞环向间距为零)情形相比,空洞的存在改变了结构的受力状态,使加速度响应失去了对称性。随着空洞环向间距的减小,空洞及其附近监测点的加速度增幅增大,其中两空洞之间的区域增幅最大,在空洞环向间距为9°时最大增幅为33.77%,空洞环向间距为18°时最大增幅为17.99%,空洞环向间距为27°时最大增幅为5.57%。

### 2.1.2 应力响应

两空洞环向间距为9°时右拱腰监测点的最大主应力时程曲线见图5,空洞不同环向间距时各监测点的最大主应力见表4。

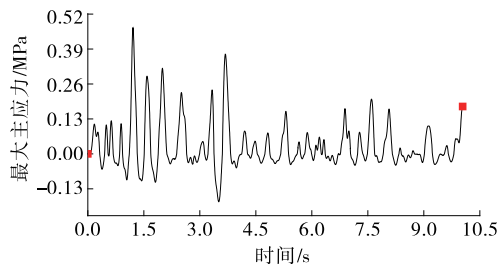


图5 两空洞环向间距为9°时右拱腰监测点的  
最大主应力时程曲线

表4 空洞不同环向间距时各监测点的最大主应力

监测点	两空洞不同环向间距(°)时的 最大主应力/MPa			
	0	9	18	27
拱顶	0.274 2	0.383 1	0.343 5	0.315 4
左拱肩	0.415 3	0.418 9	0.415 1	0.420 6
右拱肩	0.338 1	0.471 1	0.431 0	0.420 8
左拱腰	0.460 1	0.481 0	0.480 6	0.481 2
右拱腰	0.468 4	0.469 8	0.486 6	0.486 8
左拱脚	0.402 3	0.403 6	0.401 8	0.403 3
右拱脚	0.382 3	0.389 6	0.403 4	0.403 6
拱底	0.234 9	0.237 6	0.234 7	0.236 5

由图5和表4可知:在地震荷载作用下,随着两空洞环向间距的减小,各监测点的最大主应力增大,其中空洞附近区域增幅最大;空洞环向间距为9°时最大增幅为39.72%,空洞环向间距为18°时最大增幅为27.48%,空洞环向间距为27°时最大增幅为24.46%。随着两空洞环向间距的减小,支护结构的拉应力有较大增长,增长较大的区域均在空洞附近,这主要是因为空洞处没有围岩的约束,可随着地震波动向空洞方向变形,空洞及空洞附近拉应力得到较大增长。

## 2.2 初期支护厚度不同时的动力响应

### 2.2.1 加速度响应

初期支护厚度为15 cm时拱顶监测点的加速度时程曲线见图6,不同初期支护厚度时各监测点的峰值加速度见表5。

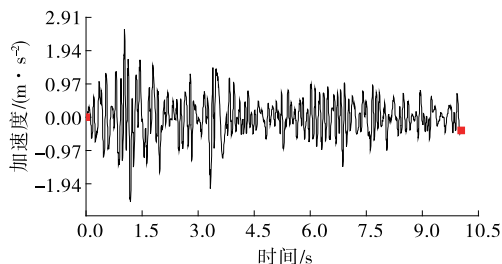


图6 初期支护厚度为15 cm时拱顶监测点的  
加速度时程曲线

由图6和表5可知:地震荷载作用下,初期支护厚度的整体减少并未改变地震波的特性,各工况下的地震波曲线大致相同,但加速度峰值各有不同,初期支护厚度越小加速度峰值越大;随着喷射砼厚度的减少,加速度峰值有所增加,但增加幅度不大,最大增幅为0.47%,出现在左拱肩处,说明喷射砼厚度整体减少对加速度虽有影响但影响能力有限;4种

表 5 不同初期支护厚度时各监测点的加速度峰值

监测点	不同初期支护厚度(cm)时的 峰值加速度/(m·s <sup>-2</sup> )			
	10	15	20	25
拱顶	2.561	2.559	2.557	2.549
左拱肩	2.531	2.529	2.528	2.519
右拱肩	2.532	2.530	2.528	2.519
左拱腰	2.487	2.486	2.486	2.481
右拱腰	2.488	2.487	2.486	2.481
左拱脚	2.472	2.472	2.473	2.472
右拱脚	2.473	2.474	2.474	2.473
拱底	2.336	2.337	2.337	2.341

注:初期支护厚度为整体厚度,下同。

工况下拱顶监测点的加速度峰值最大,说明拱顶是抗震关键点,在抗震设计时需重点关注。

2.2.2 应力响应

初期支护厚度为 15 cm 时右拱腰监测点的最大主应力时程曲线见图 7,不同初期支护厚度时各监测点的最大主应力见表 6。

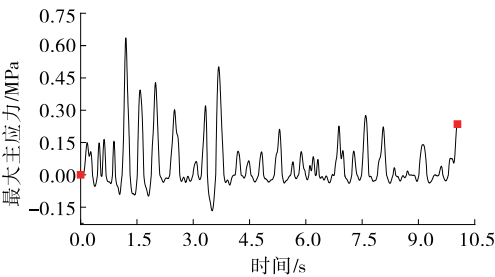


图 7 初期支护厚度为 15 cm 时右拱腰监测点的最大主应力时程曲线

表 6 不同初期支护厚度时各监测点的最大主应力

监测点	不同初期支护厚度(cm)时的 最大主应力/MPa			
	10	15	20	25
拱顶	0.355 0	0.350 8	0.346 8	0.274 2
左拱肩	0.516 8	0.499 6	0.484 1	0.415 3
右拱肩	0.524 9	0.511 0	0.494 3	0.338 1
左拱腰	0.652 0	0.628 1	0.604 7	0.460 1
右拱腰	0.658 4	0.634 9	0.611 7	0.468 4
左拱脚	0.512 3	0.480 1	0.455 5	0.402 3
右拱脚	0.515 9	0.482 8	0.457 6	0.382 3
拱底	0.234 9	0.234 8	0.235 0	0.234 9

由图 7 和表 6 可知:初期支护厚度变化对支护结构最大主应力的影响较大。随着初期支护厚度的

减少,各监测点的最大主应力均提高,且增幅相差不大,其中右拱肩监测点增幅最大,为 55.24%;最大主应力虽有正有负,但主要还是以正的拉应力为主,且拉应力在数值上占绝对优势,说明地震作用下隧道主要受拉应力作用,对隧道抗震不利;右拱腰的最大主应力最大,是抗震薄弱部位。

2.3 其他工况下的动力响应分析

按照上述分析步骤对不同空洞径向长度、初期支护强度、锚杆长度时隧道的加速度响应和应力响应进行分析。受篇幅所限,只给出这些工况下的主要分析结论:

(1) 随着空洞径向长度的增大,最大主应力增大,体现在时程曲线上为幅值增大;空洞的出现改变了隧道的受力状态,改变了最大主应力响应的对称性,且在空洞附近有较大拉应力,对隧道不利。

(2) 随着初期支护强度的降低,各监测点的最大主应力不同幅度增大,其中右拱肩监测点增幅最大,为 28.33%,且左拱肩、右拱肩、左拱脚监测点的最大主应力越来越接近。

(3) 锚杆长度、初期支护强度减小对隧道不利,应在施工中注意避免。

2.4 质量缺陷各参数敏感性分析

为对具有不同物理单位、物理性质的参数进行敏感性比较,先对参数进行无量纲处理,其中最重要的是定义敏感性函数  $S_j(k_j)$  和敏感度因子  $S_j^*$ 。

$$S_j(k_j) = \left| \frac{dW(k_j)}{dk_j} \right| \frac{k_j}{W} \tag{3}$$

式中:  $W$  为最大主应力  $P$  与参数的函数关系式;  $k_j$  为任意参数。

将参数  $k_j$  的基准参数值代入式(3)即可得到敏感度因子  $S_j^*$ 。 $S_j^*$  是一组无量纲非负实数,其值越大,则参数  $k_j$  每次微小变化都会引起  $P$  很大的反应;  $S_j^*$  值越小,则无论参数  $k_j$  怎么变化都不会影响  $P$ 。因此,可根据  $S_j^*$  的大小判断参数的敏感度。

主要分析空洞径向长度  $R$ 、空洞环向间距  $C$ 、锚杆长度  $B$ 、初期支护厚度  $H$ 、初期支护强度  $Q$  的敏感性。利用前面求得的各工况下的最大主应力  $P$  建立最大主应力  $P$  和质量缺陷参数之间的函数关系式,再将其代入式(3)求得敏感度函数,将基准值代入式(3)求得敏感度因子,最后比较各敏感度因子的大小。表 7 为基准值下各参数的敏感度因子。

由表 7 可知:地震荷载作用下,以最大主应力作为判定隧道结构动力响应的指标,其中最为敏感的



表7 基准值下各参数的敏感度因子

参数	基准值	敏感度因子	参数	基准值	敏感度因子
R	1 m	0.034 9	Q	C20	0.154 1
C	9°	0.033 8	B	4 m	0.109 6
H	25 cm	1.581 0			

因素是初期支护厚度,其敏感度高达1.581;其次分别是初期支护强度、锚杆长度、空洞径向长度、两空洞环向间距。因此,在隧道施工质量控制中需重点控制初期支护厚度和强度。

### 3 结论

(1) 空洞的出现改变了围岩及隧道的受力,使空洞附近的应力较集中,且主要为拉应力,会给隧道支护结构带来不利影响。

(2) 随着空洞之间距离的减少,隧道结构的应力有较大增长,增长较大的区域均在空洞附近,这主要是因为在地震荷载作用下空洞处没有围岩的约束,可随着地震波动向空洞方向变形,从而使空洞及其附近的拉应力增大。

(3) 初期支护厚度和强度越小,各监测点的最大主应力越大,且增幅较大;锚杆长度的影响有限。

(4) 空洞、锚杆长度、初期支护强度和厚度变化等因素均对隧道动力特性有较大影响,应在施工中注意避免,如果出现要及时处理。

(5) 几种质量缺陷参数中,对隧道结构动力响应敏感性最大的为初期支护厚度,其次是初期支护

强度、锚杆长度、空洞径向长度、两空洞环向间距。施工质量控制时要严格控制初期支护厚度。

### 参考文献:

- [1] 洪开荣.我国隧道及地下工程发展现状与展望[J].隧道建设,2015(2).
- [2] 宋瑞刚,张顶立.“接触问题”引起的隧道病害分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(4).
- [3] 张成平,冯岗,张旭,等.衬砌背后双空洞影响下隧道结构的安全状态分析[J].岩土工程学报,2015,37(3).
- [4] 余健,何川,汪波,等.衬砌背后空洞对隧道结构承载力影响的模型试验研究[J].公路交通科技,2008,25(1).
- [5] 蒋玉波.衬砌后空洞对隧道动力稳定性影响规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [6] 陈明奎.强震作用下拱顶背后空洞对隧道结构稳定性影响分析[D].成都:西南交通大学,2015.
- [7] 应国刚.衬砌背后空洞对隧道结构体系安全性的影响机理研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- [8] 凌同华,谢伟华,周凯,等.基于敏感性分析的浅埋偏压隧道支护参数优化[J].交通科学与工程,2016,32(3).
- [9] 朱正国,耿亚帅,武杰,等.地震作用下隧道衬砌背后空洞影响机制研究[J].铁道工程学报,2015(9).
- [10] 章光,朱维申.参数敏感性分析与试验方案优化[J].岩土力学,1993,14(1).
- [11] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].
- [12] 余辉,王吉庆,肖钦.基于地质雷达的隧道工程衬砌无损检测及应用[J].公路与汽运,2015(3).

收稿日期:2017-03-15

(上接第134页)

其温度场进行仿真分析可行。

(2) 由于防护栏等设施的遮挡使横桥向出现了温差,且数值较大,在计算温度效应时有必要考虑横桥向的温度梯度。

(3) 所建立的数值模型可用于预测整个梁段内所有节点的温度数据。

### 参考文献:

- [1] BS 5400—7:1978, Teel, concrete and composite bridges, part2: specifications for loads[S].
- [2] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [3] Miao C Q, Shi C H. Temperature gradient and its effect on flat steel box girder of long-span suspension bridge [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(8).
- [4] 彭友松.混凝土桥梁结构日照温度效应理论及应用研

究[D].成都:西南交通大学,2007.

- [5] 顾斌,陈志坚,陈欣迪,等.温度作用对带铺装层钢桥面板疲劳效应的影响研究[J].工程力学,2016,33(5).
- [6] 张玉萍,杨宁,李传习.无铺装层钢箱梁日照温度场分析[J].工程力学,2011,28(6).
- [7] 缪长青,史长华.大跨悬索桥扁平钢箱梁温度梯度与温度影响研究[J].中国科学:技术科学,2013(10).
- [8] 王高新,丁幼亮,王晓晶,等.苏通大桥扁平钢箱梁温度场长期监测与统计分析[J].公路交通科技,2014,31(2).
- [9] 吴咏双.日照条件下公路箱形组合梁桥温度场与温度应力分析[D].成都:西南交通大学,2015.
- [10] 曹九林.沥青路面温度场及应力场的数值模拟研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.

收稿日期:2017-03-20