

高烈度地震区公路隧道抗震设防长度的三维数值模拟

张良翰, 吴荣琴

(云南省建设基础设施投资有限公司, 云南 昆明 650500)

摘要:以某高烈度地震区浅埋公路隧道洞口段为研究对象,采用有限元数值分析方法分析隧道洞口的抗震设防长度及其影响因素。结果表明,Ⅲ类围岩的深埋隧道洞口,在进洞约 4 倍隧道跨径后衬砌结构内力响应明显减小;在Ⅱ类围岩浅埋洞口段,整个浅埋段的衬砌结构内力响应均无减缓迹象;隧道洞口抗震设防长度的设置不仅与围岩类别有关,还与洞口段埋深有关,当洞口浅埋且地质状况较差时,抗震设防长度一般应覆盖整个浅埋段。

关键词:隧道;洞口;抗震设防长度;埋深;高烈度地震区

中图分类号:U452.2

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)06-0133-04

隧道洞口段是抗震设防的薄弱地带。1970 年云南通海大地震、1995 年日本阪神大地震、2008 年汶川大地震等震害及其研究表明,隧道洞口段是遭受破坏最严重的部位之一。在设计地震区隧道时,洞口的衬砌一般应予以加强。国内外学者对隧道洞口抗震设防长度及其影响因素开展了一定研究,如:高峰等对不同围岩材料、衬砌类型的地震设防长度进行研究,指出抗震设防长度主要与洞口段围岩性质有关,围岩类别越低,抗震设防长度越长,而隧道的断面形式及洞口段临空面的存在与隧道设防长度关系不大;苏惠等对隧道洞口段的地震响应进行数值分析,得到了各工况下沿隧道轴线方向衬砌边墙墙脚最大应力和位移变化曲线,并据此确定了洞口段隧道结构的抗震设防长度;索然绪等指出在瑞利波作用下,隧道洞口的埋深是影响隧道抗震设防长度的主要参数,洞口埋深达到一定程度后无需进行抗震设防;耿萍等采用数值模拟方法对跨度 6.4 m 的铁路隧道洞口抗震设防长度进行求解,提出该隧道的抗震设防长度为 3 倍隧道跨度较合适。该文以某双向两车道公路隧道为例,采用三维有限元分析方法对高烈度地震区隧道的抗震设防长度进行求解,分析影响隧道抗震设防长度的主要因素,为隧道抗震设计提供参考。

1 数值模拟对象及模型的建立

1.1 模拟对象

以某高烈度地震区双向两车道二级公路隧道的

进口与出口为研究对象,采用数值分析方法对隧道进出口的抗震设防长度及影响因素进行研究。该隧道全长 8 125.4 m,净宽 9 m。隧道进口仰坡基岩裸露,洞顶无覆盖,坡度陡,约 60°,斜坡走向 16°,与隧道轴线方向近直交;岩性为白云岩,较坚硬,受构造作用影响,岩体节理裂隙较发育,呈中~厚层状或镶嵌结构,岩体较破碎~较完整;围岩类别为Ⅲ、Ⅳ类。出口位于斜坡中部,斜坡之后为一缓坡平台,宽约 300 m,斜坡与隧道轴线方向近直交;植被茂密,第四系残坡积松散碎石土零星覆盖,厚度 1~4 m,下伏基岩为较破碎~破碎状千枚岩;围岩稳定性差,无自稳能力,易产生塑性变形和坍塌,属Ⅱ类围岩;埋深 13~15 m,整个浅埋段的长度约为 380 m。隧道进出口纵断面见图 1。

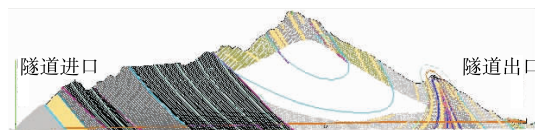


图 1 隧道纵断面示意图

1.2 本构模型

采用有限元分析软件 ABAQUS 进行分析,根据该隧道围岩特性,围岩本构模型选用 ABAQUS 软件中的 Mohr-Coulomb 模型。模型包括 5 个参数,分别为弹性模量 E 、泊松比 ν (控制弹性行为) 和有效粘聚力 c 、有效内摩擦角、剪胀角 (控制塑性行为)。衬砌砼选用线弹性模型。围岩、初期支护及二次衬砌的力学参数见表 1。

表 1 围岩及衬砌的力学参数

材料类型	弹性模量/GPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	剪胀角/(°)	密度(kg·m ⁻³)
Ⅱ类围岩	1.0	0.40	0.15	30	5	2 000
Ⅲ类围岩	3.0	0.33	0.30	36	5	2 200
Ⅳ类围岩	17.0	0.30	0.90	40	5	2 400
C20 砼	25.5	0.20				
C25 砼	28.0	0.20				
C30 砼	30.0	0.20				

1.3 模型的建立

为消除边界的不利影响,计算范围横向取 8 倍洞径;考虑到围岩性质和隧道埋深的影响,纵向范围,隧道进洞口模型取 180 m,出洞口取 280 m;竖向均从洞口处路面标高往下取 50 m。初期支护采用常规单元,二次衬砌采用壳单元。在底边、4 个侧边设置无限元动力边界,有限元计算网格见图 2~4。

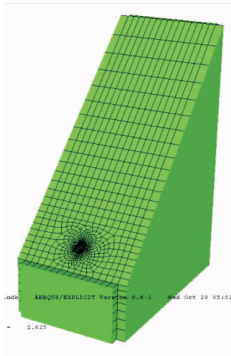


图 2 隧道进口端计算模型

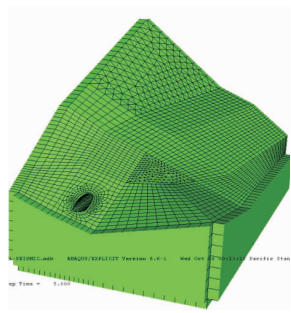


图 3 隧道出口端计算模型

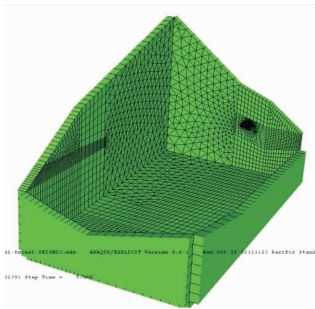


图 4 隧道出口端无限元人工动力边界设置

2 计算结果分析

2.1 计算方法

先采用 ABAQUS Standard 隐式算法计算开挖支护静力,再采用 Explicit 显式算法处理地震问题。隧道所处地区按八度烈度地震设防,设计峰值加速度取 0.2g,实际计算曲线由地震实测曲线将峰值等比例降低后得到,计算中同时考虑隧道横向、纵向和竖向地震波的影响,其中竖向地震分量取为水平分量的 2/3。因计算耗时太久,三维动力计算的地震波仅截取包含峰值响应的 5 s 时程记录进行计算。

2.2 进口段数值模拟结果

如表 2 所示,各断面拱顶和拱底的横向与纵向最大位移沿断面进深的增大几乎不产生变化,竖向位移最大值的变化也很小,说明地震发生时,隧道随地层一起产生整体运动,不同位置断面的位移相差很小;沿隧道轴向各位置处位移变化不大,说明洞口段各位置处位移响应无太大区别。比较隧道拱顶处位移与模型底部(隧道出口高度往下 50 m 深度)位移,拱顶横向、纵向位移有所减小,竖向位移有所增大,其中拱顶横向位移减少为底部的 80%,纵向位移减少为 90%,竖向位移增大到底部的 120%。

表 2 进口段各断面处拱顶位移 mm

横断面 位置	横向位移		纵向位移		竖向位移	
	最大值		最大值		最大值	
	模型底部	拱顶	模型底部	拱顶	模型底部	拱顶
洞口处	20	16	20	18	14	16
进洞 17 m	20	16	20	18	14	17
进洞 35 m	20	16	20	18	14	17
进洞 58 m	20	16	20	18	14	17
进洞 87 m	20	16	20	18	14	16
进洞 116 m	20	16	20	18	14	15
进洞 140 m	20	16	20	18	14	15
进洞 157 m	20	16	20	18	14	13

如图 5 所示,沿整个隧道纵向,横向和竖向加速

度都呈现逐步减小的趋势,进入隧道约 20 m 后,加速度响应值开始趋于平缓;进洞 90 m 后出现上翘,造成这种情况的主要原因为计算边界的影响。

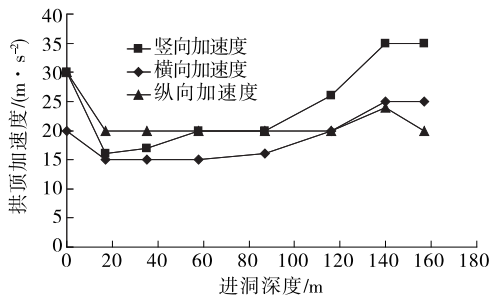


图 5 进口段拱顶加速度最大值变化曲线

如图 6、图 7 所示,沿整个隧道纵向,横向弯矩(隧道横断面方向的弯矩)表现出逐步减小的趋势,横向轴力则表现出逐步增大的趋势,进洞约 40 m 后弯矩和拱顶轴力开始趋于平缓,而拱底轴力在进洞约 80 m 后趋于平缓。

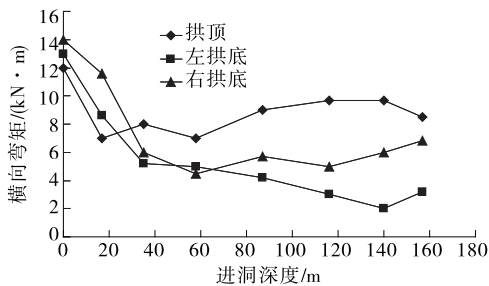


图 6 进口段横向弯矩最大值变化曲线

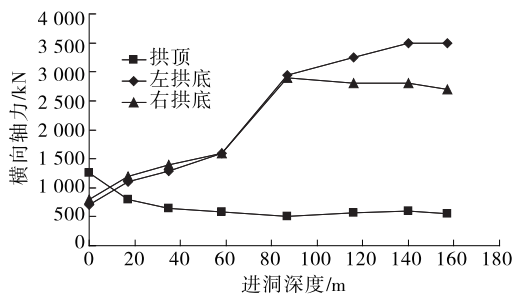


图 7 进口段横向轴力最大值变化曲线

尽管轴力并没有呈现逐步减小的趋势,但由于隧道内的轴力均为压应力,轴向受压工况并不是控制工况,综合上述数值分析结果,隧道进口段的抗震设防长度可设为 40 m。

2.3 出口段数值模拟结果

如表 3 所示,各断面拱顶和拱底的横向、纵向与竖向最大位移沿断面进深产生的变化很小,说明洞口段各位置处位移响应区别不大;比较隧道拱顶处位移与模型底部位移,拱顶竖向位移有所增大,从底

部位置的 15 mm 增大到拱顶位置的约 20 mm,另两个方向位移变化不大。

表 3 出口段各断面处拱顶位移 mm

横断面 位置	横向位移		纵向位移		竖向位移	
	最大值		最大值		最大值	
	模型底部	拱顶	模型底部	拱顶	模型底部	拱顶
洞口处	21	18.7	22	20	15	20
进洞 16 m	21	18.1	22	20	15	20
进洞 31 m	21	19.2	22	20	15	20
进洞 60 m	21	20.0	22	20	15	20
进洞 111 m	21	20.0	22	20	15	20
进洞 163 m	21	17.6	22	20	15	20
进洞 232 m	21	15.0	22	17	15	17

如图 8 所示,沿整个隧道纵向,横向和竖向加速度变化不大,两者平均值接近,约为 7 m/s²;纵向加速度在洞口 20 m 位置发生陡降,从 24 m/s²降至 8 m/s²,在进洞 50 m 后逐渐趋于平缓,平均值为 12 m/s²。

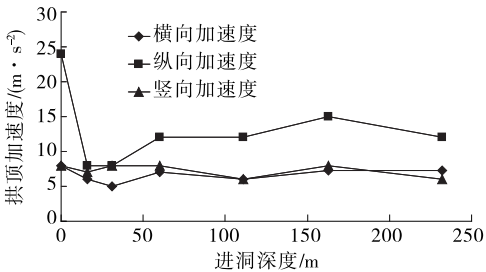


图 8 出口段拱顶加速度最大值变化曲线

如图 9、图 10、表 4 所示,沿整个隧道纵向,横向

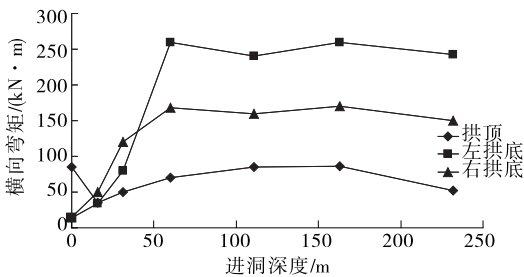


图 9 出口段横向弯矩最大值变化曲线

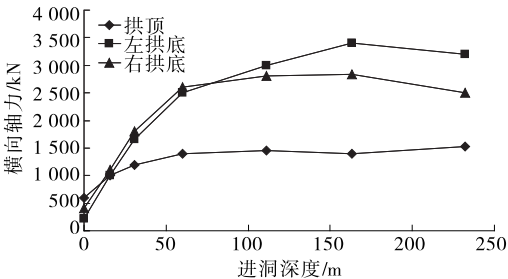


图 10 出口段横向轴力最大值变化曲线

表4 出口段衬砌不同部位的内力值

横断面位置	横向弯矩最大值/(kN·m)			横向轴力最大值/kN		
	拱顶	左拱底	右拱底	拱顶	左拱底	右拱底
洞口处	12.0(4.0)	13.0(2.2)	-14.0(-2.0)	-1 250(-250)	-700(-360)	-800(-360)
进洞 17 m	7.0(3.0)	8.6(4.0)	-11.6(-4.0)	-800(-400)	-1 100(-700)	-1 200(-700)
进洞 35 m	8.0(4.5)	5.2(3.6)	-6.0(-3.5)	-650(-470)	-1 280(-900)	-1 400(-900)
进洞 58 m	7.0(4.0)	5.0(1.5)	-4.5(-2.0)	-580(-340)	-1 600(-1 160)	-1 600(-1 160)
进洞 87 m	9.0(6.0)	4.2(2.4)	-5.7(-2.0)	-500(-300)	-2 950(-2 200)	-2 900(-2 200)
进洞 116 m	9.7(7.0)	3.0(1.5)	-5.0(-1.0)	-560(-320)	-3 250(-2 250)	-2 800(-2 250)
进洞 140 m	9.7(7.0)	-2.0(-0.6)	6.0(1.0)	-600(-340)	-3 500(-2 400)	-2 800(-2 400)
进洞 157 m	8.5(7.0)	-3.2(-1.2)	6.8(1.5)	-550(-360)	-3 500(-2 400)	-2 700(-2 400)

注:弯矩以内侧受拉为负、外侧受拉为正;轴力以受压为负;括号中数值为震前内力值。

弯矩和横向轴力均表现出逐步增大的趋势,进洞约 60 m 后横向弯矩及横向轴力均趋于平缓。

出口段横向弯矩及横向轴力并未随进洞深度增大而降低,这是因为所取计算范围为浅埋段,且均为Ⅱ类围岩,地质条件很差,抗震设防长度需增大,建议在整个 400 m 长的浅埋段均进行抗震设防。

3 结论

结合某高烈度地震区双向两车道浅埋公路隧道工程的地质特点,应用有限元分析方法对浅埋隧道的抗震设防长度进行三维数值模拟分析,研究隧道洞口抗震设防长度及其影响因素。主要结论如下:

(1) 该隧道进口段围岩为Ⅲ、Ⅳ类围岩,隧道埋深较深,抗震设防长度以 40 m 为宜,约为隧道跨度的 4 倍;出口段围岩为Ⅱ类围岩,且埋深较浅,需在整个出洞口 400 m 的浅埋段均进行抗震设防。

(2) 隧道洞口抗震设防长度的设置不仅与围岩类别有关,还与隧道埋深密切相关。洞口段松软、破碎的围岩越长,隧道抗震设防长度越长;隧道埋深越

浅,隧道抗震设防长度越长;当浅埋段所处地质状况较差时,抗震设防长度一般应覆盖整个浅埋段。

参考文献:

- [1] 李乔,赵世春.汶川大地震工程震害分析[M].成都:西南交通大学出版社,2008.
- [2] 郭军,王明年,田尚志.高烈度地震区公路隧道明洞抗震计算分析[J].岩土工程学报,2007,29(11).
- [3] 高峰,石玉成,严松宏,等.隧道洞口段的抗震设防长度[J].中国公路学报,2006,19(3).
- [4] 苏惠,焦胜军,杨江朋.右江南岸隧道洞口段结构抗震设防长度研究[J].路基工程,2010(6).
- [5] 索然绪,王艳艳.瑞利波作用下隧道洞口段的抗震设防长度[J].现代隧道技术,2011,48(4).
- [6] 耿萍,曹东杰,唐金良,等.铁路隧道洞口合理抗震设防长度[J].西南交通大学学报,2012,47(6).
- [7] 李小云,戴俊.城市浅埋隧道的抗震及减震措施研究[J].现代隧道技术,2011,48(1).

收稿日期:2019-03-20

《中外公路》2020 年征订通知

《中外公路》(原《国外公路》)创刊于 1980 年,双月刊,由长沙理工大学主管、主办。邮局公开发行至全国公路、市政、铁路、水利、建筑等系统和相关行业,发行量大,影响面广。属全国中文核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、首届(2006 年)中国高校特色科技期刊、中国高校技术类优秀期刊、中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊,由中国科学技术信息研究所组织评选)、湖南省十佳科技期刊、“桥梁工程与隧道工程”栏目荣获首届(2008 年)湖南省优秀栏目、2009 年获全国高校科技期刊优秀编辑质量奖、中国期刊全文数据库及中国核心期刊(遴选)数据库全文收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊、多次被评为交通部、湖南省优秀期刊。

2020 年《中外公路》为大 16 开,页码 176 页以上,每册定价 15.00 元,全年 6 期共 90.00 元。

邮发代号:42-63。读者也可通过邮局或银行汇款至杂志社直接订阅。

地址:长沙理工大学云塘校区 58 号信箱

邮编:410114

收款单位:《中外公路》编辑部

户名:长沙理工大学

帐号:18-051401040000158

开户行:长沙市农行高云支行

电话:0731-85258033(带传真)

联系人:白雪

E-mail: zhongwaigonglu@vip.163.com