

衬砌背后空洞对隧道抗震性能影响分析^①

聂子云¹, 张春雷¹, 李凤翔²

(1.铁道第三勘察设计院集团有限公司,天津 300251; 2.中铁工程设计咨询集团有限公司,北京 100020)

摘要:目前关于隧道震害问题的研究主要集中于隧道洞门和洞口段,实际上仍有不少洞身衬砌在地震中产生严重震害,其中一个重要原因便是衬砌背后存在空洞或者回填不密实。通过大型有限元软件 ABAQUS,采用无限元边界解决地震波的反射震荡问题,研究衬砌背后空洞对隧道的地震动力响应的影响。通过分析得到:密实状态下,即使在较大地震动力作用下,衬砌结构仍处于良好的受压状态;一旦衬砌背后存在空洞,地震作用下脱空区衬砌产生很大拉应力,可能导致衬砌开裂坍塌;同时,空洞处周边围岩产生塑性区,易引起岩体松弛掉落冲击衬砌。

关键词:隧道;衬砌背后空洞;地震;主拉应力;塑性区

中图分类号:U452.2⁺8

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2015)01-0138-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0138

Effect of Void behind Lining on Seismic Performance of Tunnel

NIE Zi-yun¹, ZHANG Chun-lei¹, LI Feng-xiang²

(1.The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300251, China;

2.China Railway Engineering Consulting Group Co. Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract: At present, analyses of seismic damage to tunnels have focused on the tunnel portal and portal section. However, there are still many deeply-buried tunnels that have been badly damaged by earthquakes; an important reason for this is the existence of voids behind the lining or because the lining backfill is not dense. However, studies on the relationship between voids behind the lining and the dynamic characteristics of earthquakes are few. In this study, the seismic performance of a tunnel with voids behind the lining are studied using the finite element software ABAQUS. The analysis reveals the following: if the lining is tightly and firmly stuck to the surrounding rocks, even under larger seismic action, the lining remains in a good state of compression. Once voids are present behind the lining, the lining that does not have the support of the surrounding rock comes under great tensile stress, resulting in cracking of the lining, which causes tunnel collapse. In addition, during earthquakes, larger plastic deformation appears in the surrounding rock without lining support than in those with lining support, causing the rock to more easily relax and fall off.

Key words: tunnel; void behind lining; earthquake; principal tensile stress; plastic zone

0 引言

地下结构由于受到岩土(石)的约束作用,地震时受到的惯性力和位移都较少,因此一般认为其抗震性能要明显优于地上结构(图 1)。尽管如此,不

少地震还是对地下结构造成了不同程度的破坏,甚至有不少隧道产生严重震害。如 1999 年台湾集集地震对台湾 57 座隧道中的 49 座造成了不同程度的破坏^[1]。2008 年我国汶川大地震后,李天斌^[2]和高

① 收稿日期:2014-08-20

作者简介:聂子云(1987—),男,江西九江人,助理工程师,硕士,主要从事隧道及地下工程方面设计研究工作。E-mia:nieziyun2011@163.com

波^[3]分别对都汶公路上的 11 座和 18 座隧道进行了现场震害调研,其中 5% 的隧道出现轻度震害,22% 为中度震害,73% 为严重震害。

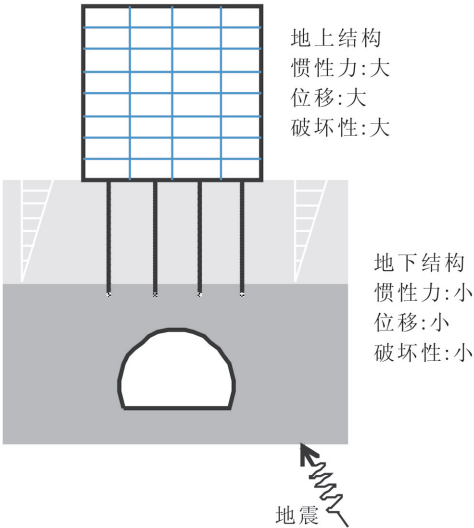


图 1 地震作用下地面结构和地下结构的行为差异示意图

Fig.1 Difference of behavior between surface structures and underground structures during earthquake

隧道洞口段,由于埋深浅、围岩风化严重,其抗震性能差,故在地震中洞门和洞口段衬砌破坏严重,是目前学者有关隧道抗震研究最多的课题,如周培德^[4]、崔光耀^[5]、曹小平^[6]等都对强震作用下隧道洞口段的动力特性和震害机理进行了分析探讨。但事实上有不少具有一定埋深的隧道衬砌在地震中也会发生严重破坏,甚至坍塌。图 2 为 2004 年日本新泻地震中受损严重的 Uonuma 隧道^[7],可以看到巨大的混凝土衬砌(约 5 t)从拱部坍塌掉落在钢轨上,这是日本新干线运营后发生最严重的隧道破坏事故,花了近两个月才恢复通行。图 3 为 2008 年汶川地震中龙溪隧道距离洞口 200 m 左右处塌方情况,从图中可以看出虽然塌方段围岩条件较好,但是拱顶出现很大塌腔。

不少深埋隧道在地震中出现严重破坏,笔者认为其中一个很重要的原因是衬砌背后空洞的存在。日本 Uonuma 隧道塌方事故发生后,调查组对该隧道进行了专项地质调查及衬砌背后检测,发现衬砌背后存在较大空洞。高峰^[8]根据对已有震害的调查及资料分析,发现施工质量未能保证、回填不密实的隧道容易遭受地震破坏。分析可知,空洞的存在去除了围岩对相应衬砌的约束作用,脱空区衬砌表现出与地面结构类似的动力反应特征,更容易遭到破

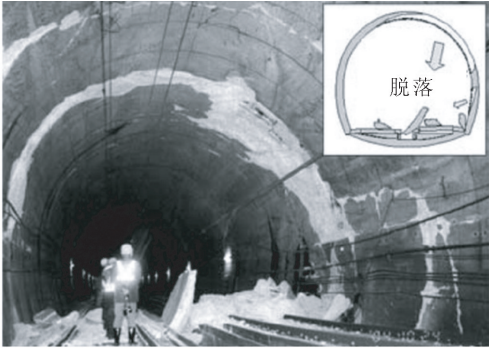


图 2 Uonuma 隧道塌方

Fig.2 Colopse of the Uonuma tunnel



图 3 龙溪隧道塌方

Fig.3 Collapse of the Longxi tunnel

坏。因此,针对目前运营隧道普遍存在衬砌背后空洞这一现象展开抗震性能的影响研究是十分有必要的,特别是由于施工工艺限制,管理能力不足等原因,拱顶位置往往是空洞病害的重灾区,本文采用大型有限元分析软件 ABAQUS 研究分析了拱顶背后空洞对隧道抗震性能的影响。

1 计算模型

1.1 积分算法

与地上结构不同,地下洞室结构由于赋存于岩土介质之中,受到周围岩土体的约束作用显著,致使地其动力反应一般不明显表现出自振特性,特别是低阶模态的影响^[9]。因此对地下洞室进行自振特性求解和反应谱计算的意义相对不大,较为合理的分析方法是采用动力非线性时程计算求解方法^[10]。

ABAQUS 提供了两种动力非线性方程的求解方法:Standard 隐式积分算法和 Explicit 显式积分算法。鉴于 Standard 隐式模块很适合模拟岩土应力平衡及开挖问题,且把其结果导入 Explicit 比较麻烦,而显式和隐式在地震动分析中获得的解答相差很小,为此。本文采用 Standard 隐式算法。

1.2 无限元边界

采用固定边界时由于向外传播的地震波在边界处又会反射回模型,位移波动随时间增长出现反复振荡,而实际地震波向远场传播时能量是逐渐逸散的,因此固定边界给出的结果并不合理。为保证任何入射情况下均无反射波,引入了无限元人工边界。无限元单元本身包含阻尼系数^[11-12],相当于施加了一种黏性边界,能够很好地体现能量逸散的效果,体现地层辐射阻尼效应,从而给出合理的结果。

无限元人工边界的应力为:

$$f^{\text{damp}} = dV \tag{1}$$

式中: d 为无限元阻尼系数; V 为介质粒子的振动速度。

由式(1)可以看到,无限元人工边界的应力仅与该无限元内结点该时刻的振动速度反应值相关,物理上相当于在边界结点每个方向施加一个一端固定的单向阻尼元件。

1.3 数值模型

假设某隧道埋深为 30 m,拱顶存在 30°范围空洞,模型尺寸如图 4 所示。地震动从隧道底部 60 m 有限元-无限元交界处输入。空洞的存在可以通过挖除空洞处土体实现,如图 4(b),但是考虑到本文

不讨论空洞深度的影响,而且往往回填不密实也会起到和空洞同样的脱空效果,同时总的土体体积并不一定减少,故本文通过解除脱空衬砌和围岩的接触属性来实现衬砌背后空洞的存在。

1.4 材料参数

有限元围岩采用摩尔-库伦塑性本构模型,无限域围岩及衬砌结构采用线弹性本构模型。无限域围岩弹性参数与有限域弹性参数相同,静力开挖与地震动力分析中材料的计算参数均相同。动力计算中以 Reyleigh 阻尼形式定义材料的阻尼,由于地震作用下结构的刚度阻尼占主导作用,为此所有介质阻尼只考虑刚度阻尼。本文材料阻尼参照^[7]选取,围岩及衬砌的物理力学参数见表 1。

1.5 地震动荷载

地震动荷载选取经典的印度 Koyna 大坝地震加速度时程(图 5)。该地震动最大水平加速度幅值为 0.474 g($t=3.13$ s),最大竖向加速度幅值为 0.312 g($t=3.8$ s),其中 $g=9.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,时程采样间隔 0.02 s,地震加载时间取 10 s。本文考虑地震烈度为Ⅷ度,对应水平加速度峰值为 0.2 g,竖向加速度峰值取为水平加速度峰值的 2/3,对 Koyna 地震波进行调整后输入。

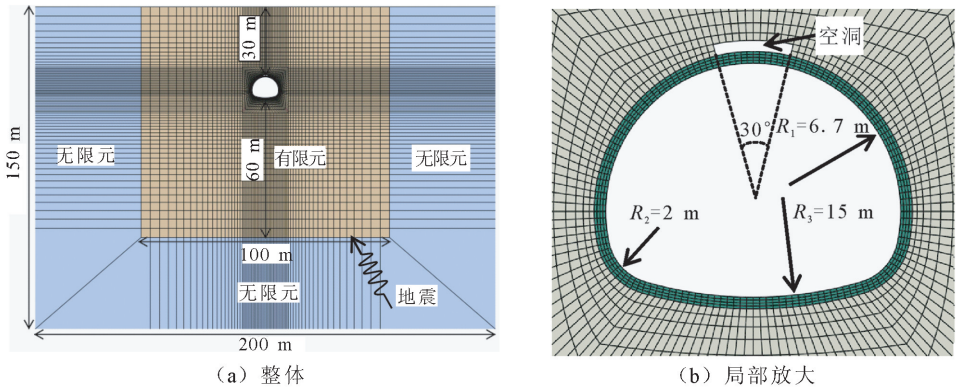


图 4 数值模型
Fig.4 Numerical model

表 1 数值计算基本材料参数

Table 1 Basic material parameters of rock and lining in numerical simulation

材料类型	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	刚度阻尼 β	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{^\circ})$
V 级围岩有限域	20	1	0.35	0.001 7	100	27
V 级围岩无限域	20	1	0.35	0.001 7	-	-
C25 衬砌	25	28	0.2	0.003	-	-

2 计算结果分析

建立 4 种计算工况模型进行对比分析:(1)衬砌

处于密实状态下,不受地震作用;(2)衬砌处于密实状态下,受到地震作用;(3)衬砌背后存在空洞,不受地震作用;(4)衬砌背后存在空洞,受到地震作用。

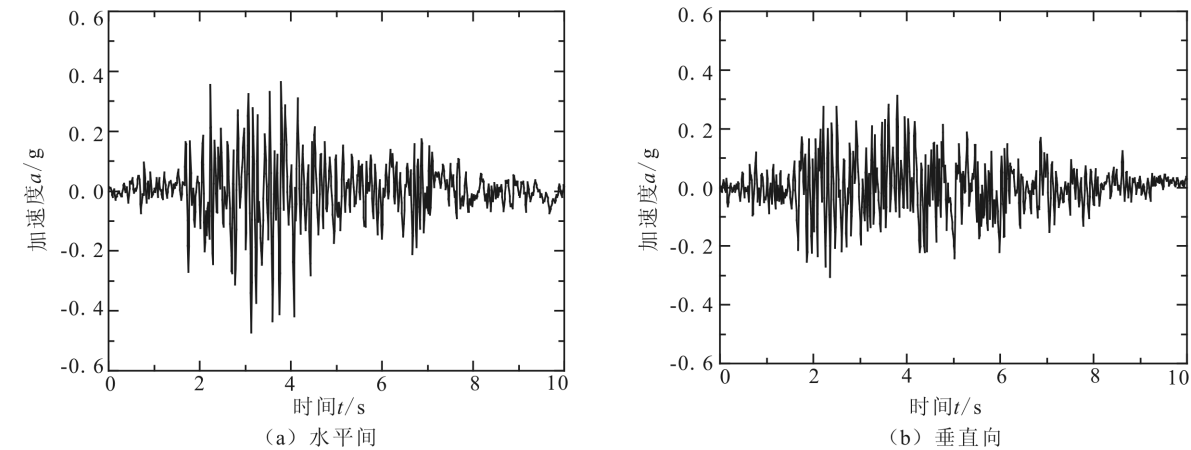


图 5 Koyna 地震水平和竖直加速度时程曲线

Fig.5 Horizontal and vertical acceleration time-history curves under koyna earthquake

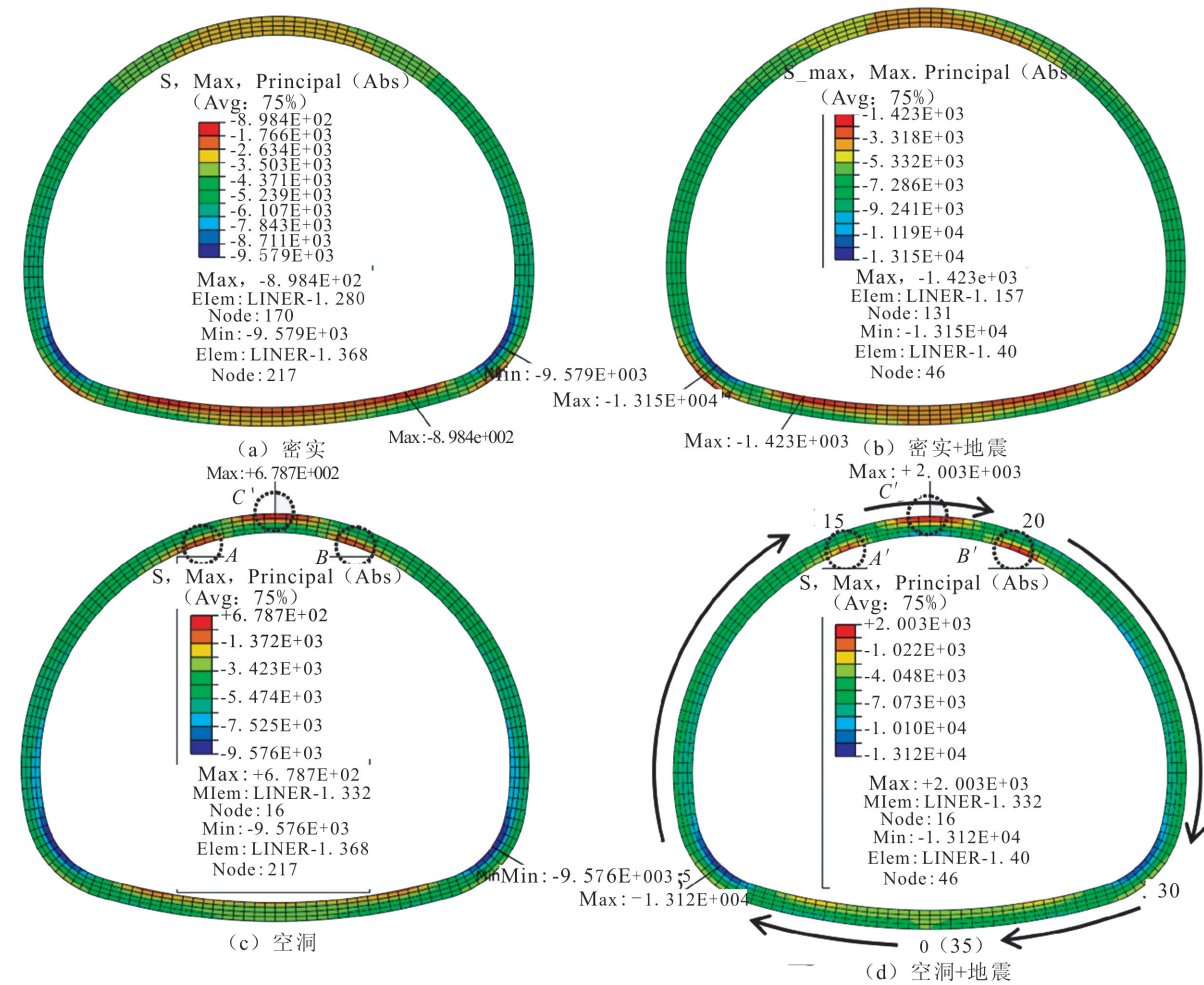


图 6 各工况下衬砌主应力云图

Fig.6 Principal stress contour of the lining under different working conditions

经过计算可以得到各工况下衬砌主应力云图,如图 6 所示。

从图 6(a)可以看出,密实状态下衬砌只产生压应力,最大压应力位于墙角处(为 9.6 MPa),远小于

衬砌极限压应力,可见衬砌处于良好的受压状态。

图 6(b)显示,密实状态在地震动荷载下,衬砌仍只受压应力,最大压应力位于墙角处(为 13.2 MPa),较密实状态下增大 30%左右,仍远小于衬砌极限压

应力。可见如果衬砌处于密实状态,即使在较大地震作用下,衬砌仍处于良好的受力状态。图 6(c)为拱顶存在 30°范围空洞时衬砌的受力状态,从图中可以看出,衬砌仍以压应力为主,最大压应力为 9.6 MPa,但在衬砌脱空区外侧中心(A)和脱空区内侧边缘(B′、C′)产生拉应力,由于空洞较小,最大拉应力仅为 0.7 MPa,衬砌最大拉、压应力仍远小于衬砌极限拉、压应力,衬砌处于安全状态。图 6(d)为拱顶存在 30°范围空洞时并在地震作用下衬砌的受力状态,从图中可以看出,衬砌脱空区外侧中心(A)和脱空区内侧边缘(B、C)产生较大拉应力,最大值为 2.0 MPa,已经接近混凝土极限抗拉强度。由此可见,如果衬砌背后存在空洞,即使空洞范围较小,也将极大地降低隧道的抗震性能。这就不难解释日本 Uonuma 隧道在地震中的灾难性坍塌事故。

从分析中可知衬砌拉应力为控制应力,为更直观地反映空洞和地震耦合作用对衬砌拉应力的影响,建立以衬砌仰拱中心为起终点的环向路径,如图 6(d)箭头所示,可以得到衬砌内、外侧主拉应力沿该

路径的曲线图(图 7)。

从图 7 中可以看出:当衬砌处于密实状态时,有地震和无地震状况下的衬砌拉应力曲线图吻合很好,且几乎不产生拉应力,说明地震对密实状态下的衬砌影响不大。当衬砌背后存在空洞时,除了衬砌脱空区内侧边缘和脱空区外侧中心主拉应力出现较小波动外,其他部位与密实状态下衬砌受力状态吻合得很好,说明较小空洞对衬砌结构的受力状态影响不大;如果存在地震作用,脱空衬砌内外侧会出现应力集中现象,产生很大拉应力,说明地震会很大程度地放大衬砌背后空洞破坏效应,或者说衬砌背后空洞会很大程度地放大地震的破坏效应,足见两者耦合作用对衬砌的破坏是不容小觑的。

上文主要讨论地震对隧道衬砌的影响,事实上地震还会对围岩的受力状态产生较大影响。经过计算发现密实和空洞静力状态下,初砌周边围岩不产生明显的塑性区,而地震作用下则正好相反,如图 8 所示。

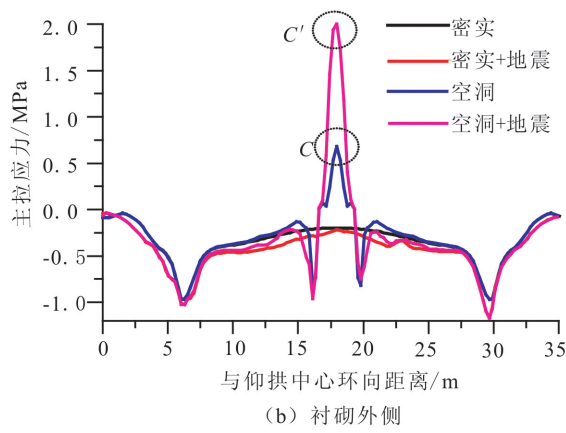
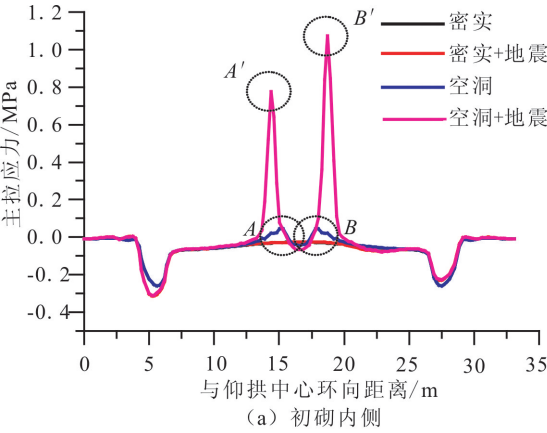


图 7 衬砌主拉应力沿衬砌内、外侧分布曲线图

Fig.7 Principle tensile stress distribution inside and outside of the lining

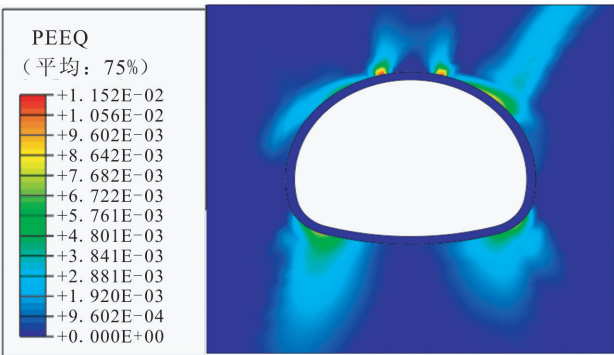
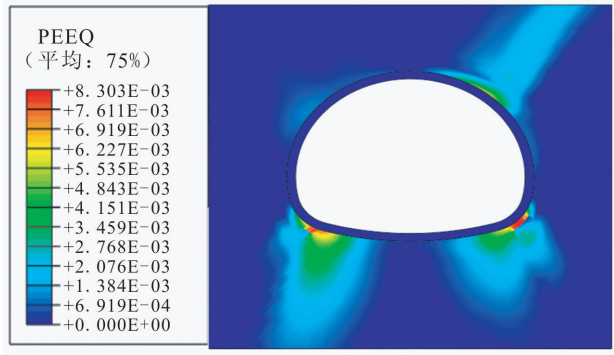


图 8 地震作用下衬砌周边围岩塑性区

Fig.8 Plastic zone in surrounding rock of the lining during earthquake

从图 8(a)可以看出,当衬砌和围岩接触密实时,在地震作用下墙角和右拱肩处围岩产生明显的塑性区,最大等效塑性应变为 0.008,位于墙角处。图 8(b)表明,拱顶背后存在空洞时,地震作用下围岩主要塑性区分布位置与密实状态下基本一致,且最大塑性值出现在空洞与衬砌交界处,为 0.01,并有贯通趋势,如果空洞周边围岩塑性区贯通,空洞处围岩将发生松动坍塌,对衬砌产生冲击作用。

综上所述,衬砌背后空洞极大地降低隧道的抗震性能,主要体现为两个方面:(1)地震作用下脱空衬砌内侧边缘和外侧中心产生较大拉应力,极易产生拉裂破坏;(2)地震作用下空洞与衬砌交界处围岩产生较大塑性应变,空洞围岩容易松弛坍塌,冲击衬砌。

4 结论

通过分析衬砌背后空洞对隧道的地震动力响应的影响,得到以下主要结论:

(1) 密实状态下,衬砌结构只产生压应力,最大压应力远小于混凝土极限抗拉强度,衬砌处于良好的受力状态。

(2) 密实状态,在地震动力作用下,衬砌结构较静力状态下衬砌压应力有所增大,但是增长幅度有限,不会导致衬砌破坏,衬砌仍处于良好的受压状态。

(3) 如果衬砌背后存在空洞,空洞范围有限,脱空区衬砌内外侧将产生较小拉应力,对衬砌的整体受力状态存在一定不利影响,但是不至于导致衬砌破坏。

(4) 如果衬砌背后存在空洞,即使空洞范围有限,在地震动力作用下脱空衬砌内外侧也将产生很大拉应力,可能导致脱空衬砌拉裂破坏;再者,地震作用会导致空洞周边围岩产生较大塑性区,空洞处围岩易松弛坍塌,对衬砌存在潜在冲击威胁。

参考文献(References)

- [1] 李育枢.山岭隧道地震动力响应及减震措施研究[D].上海:同济大学,2006.
LI Yu-shu, Study on Earthquake Responses and Vibration-absorption Measures for Mountain Tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [2] 李天斌.汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J].工程地质学报,2009,16(6):742-750.
LI Tian-bin, Failure Characteristics and Influence Factor Analysis of Mountain Tunnels at Epicenter Zones of Great Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 16

- (6):742-750. (in Chinese)
- [3] WANG Zheng-zheng, GAO Bo. Investigation and Assessment on Mountain Tunnels and Geotechnical Damage After the Wenchuan Earthquake[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(2): 546-558.
- [4] 周德培.强震区隧道洞口段的动力特性研究[J].地震工程与工程振动,1998,18(1):124-130.
ZHOU De-pei. Dynamic Behavior of Portal Part of Tunnel Subjected to Strong Ground Motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(1): 124-130. (in Chinese)
- [5] 崔光耀,王明年,于丽,等.汶川地震公路隧道洞口结构震害分析及震害机理研究[J].岩土工程学报,2013,35(6):1084-1091.
CUI Guang-yao, WANG Ming-nian, YU Li, et al. Seismic Damage and Mechanism of Portal Structure of High Way Tunnels in Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1084-1091. (in Chinese)
- [6] 曹小平.强震作用下山岭隧道洞口段地震响应分析及减震措施研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10):2160-2160.
CAO Xiao-ping. Research on Dynamic Response at Portal Section of Mountain Tunnel Under Intense Earthquake and Shock Absorption Measure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2160-2160. (in Chinese)
- [7] Shimizu M, Suzuki T, Kato S, et al. Historical Damages of Tunnels in Japan and Case Studies of Damaged Railway Tunnels in the Mid Niigata Prefecture Earthquakes [J]. Underground Space-the 4th Dimension of Metropolises, 2007: 1937-1943.
- [8] 高峰.地下结构动力分析若干问题研究[D].成都:西南交通大学,2003年.
GAO Feng. Research on Some Problems of Dynamic Analysis on Underground Structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
- [9] 林皋.地下结构抗震分析综述(上) [J].世界地震工程,1990,6(2):1-10.
LIN Gao. Review of Underground Structure Seismic Analysis (I) [J]. World Earthquake Engineering, 1990, 6(2): 1-10. (in Chinese)
- [10] 赵宝友.大型岩体洞室地震响应及减震措施研究[D].大连:大连理工大学,2009.
ZHAO Bao-you. Research on Seismic Response and Seismic Resistance Measure for Large Rock Cavern Under Earthquake Motion[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [11] Hibbitt Karlsson, Sorensen Inc. ABAQUS Theory Manual and Analysis User's Manual [R]. Pawtucket: Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc, 2002.
- [12] 黄胜,陈卫忠,杨建平,等.地下工程地震动力响应及抗震研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(3):483-490.
HUANG Sheng, CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, et al. Research on Earthquake Ake-induced Dynamic Response and Aseismic Measures for Underground Engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 483-490. (in Chinese)