

DOI: 10.11779/CJGE201802017

强震区隧道施工塌方段震害机理及处治技术研究

王道远^{1, 2, 3}, 崔光耀^{*4}, 袁金秀², 朱长安⁵

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 河北交通职业技术学院土木工程系, 河北 石家庄 050091; 3. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 4. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144; 5. 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 汶川地震公路隧道普通段衬砌垮塌震害均发生在施工塌方段。依托汶川地震公路隧道普通段震害调查资料, 对强震作用下隧道施工塌方段进行震害特征、震害机理及处治技术研究具有重要的意义。揭示了汶川地震区公路隧道施工塌方段震害特征: 软弱围岩施工塌方段均出现了二衬垮塌震害, 严重段落甚至出现衬砌整体垮塌震害。探明了强震区隧道施工塌方段震害机理: 地震惯性力影响明显; 强制位移影响较小。强震区隧道施工塌方段采取“回填注浆+交错设缝”的处治措施后, 主应力和内力的减震率均在35%以上, 这说明“回填注浆+交错设缝”处治措施对隧道施工塌方段抗减震具有明显效果, 是一种行之有效的处治措施。研究结论对于高烈度艰险山区交通生命线的抗减震技术具有重要的意义。

关键词: 强震区; 隧道; 施工塌方段; 震害机理; 处治技术

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)02-0353-07

作者简介: 王道远(1982-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程的教学与研究。E-mail: wtg-888@163.com。

Seismic damage mechanism and treatment technologies of construction landslide section of highway tunnels in highly seismic region

WANG Dao-yuan^{1, 2, 3}, CUI Guang-yao⁴, YUAN Jin-xiu², ZHU Chang-an⁵

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Department of Civil Engineering, Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050091, China; 3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 5. Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Provincial Communications Department, Chengdu 610041, China)

Abstract: In the general section of highway tunnels, the seismic damage, which makes lining collapse, universally occurs in the construction landslide section during Wenchuan Earthquake. Based on the seismic damage survey data of the general section of highway tunnels, it is meaningful to analyze the seismic damage characteristics, seismic damage mechanism and treatment technologies of the construction landslide section of highway tunnels suffering intense earthquake. The seismic damage characteristics of the construction landslide section of highway tunnels in Wenchuan Earthquake regions reveal that the secondary linings in the construction landslide section of weak wall rock suffer collapse or even overall collapse in serious section. The seismic damage mechanism of the construction landslide section of highway tunnels is that the earthquake inertia force is significant and the forced displacement has small influence. After the measure of backfilled grouting and staggered construction joint in the landslide section of highway tunnels in the highly seismic region, the damping rates of the principal stresses and internal forces are all above 35%. It is shown that the processing is effective to the construction landslide section of highway tunnels to improve the anti-seismic capacity. The research results are of important singnificance to the anti-seismic technology in the communication of lifeline engineering in high-intensity earthquake moutainous areas.

Key words: highly seismic region; tunnel; construction landslide section; seismic damage mechanism; treatment technology

0 引言

隧道一般由洞口段、普通段和断层破碎带段构成, 断层破碎带段和洞口段是震害严重及多发段落^[1-4]。过去一直认为隧道普通段震害极少或基本无震害, 2008年汶川8.0级大地震使工程师们认识到强震作用下隧

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408008, 51478277); 国家十二五科技支撑项目(2012BAK09B06); 河北省自然科学基金项目(E201619002); 河北省人才培养经费资助科研项目(A201500116); 河北省重点研发计划项目(172776471)

收稿日期: 2016-02-25

*通讯作者(E-mail: cyao456@163.com)

表 1 隧道施工塌方段震害调查情况

Table 1 Seismic damage situations of tunnel surrounding rock in construction landslide section

隧道名称	所属线路	隧道长度/m	地震烈度	设防烈度	震害类型	震害长度/m	震害段围岩级别	震害原因
龙溪隧道	都映高速	左洞 3658 右洞 3691	11	7	二衬垮塌, 部分段落衬砌整体垮塌	134	V	衬砌背后不密实, 施工中曾出现大变形限限、塌方
烧火坪隧道	都映高速卧龙连接线	450.5	11	7	二衬垮塌	32	V	衬砌背后不密实, 施工中曾出现大变形限限、塌方
友谊隧道	G213 线都映段	950	10	7	二衬垮塌	75	V	衬砌背后不密实, 施工中曾出现大变形限限、塌方

道普通段也会出现严重震害, 如 G213 线友谊隧道普通段出现了二衬垮塌(图 1)的严重震害类型。隧道普通段由均一围岩段、软硬围岩交接段和围岩缺陷段(施工塌方段)组成, 其中施工塌方段震害最为严重^[4-5]。汶川地震隧道普通段衬砌垮塌震害均发生在施工塌方段。



图 1 友谊隧道二衬垮塌

Fig. 1 Collapse of secondary lining of Youyi tunnel

中国西部山区多处于高烈度地震区, 且属于艰险山区, 交通生命线极其脆弱, 有必要深入研究强震作用下隧道施工塌方段的震害特征、震害机理及处治技术。国内外有关专家、学者对断层破碎带段和洞口段的震害机理研究较多, 涉及普通段的震害机理研究还较少^[5-13], 主要有: 汶川地震灾区干线公路典型震害特征分析; 隧道震害影响因素的统计和分析; 汶川地震公路隧道普通段震害调查与震害分析; 汶川地震公路隧道普通段震害规律; 汶川地震公路隧道普通段地震风险模糊综合评价等。本文依托汶川地震公路隧道普通段震害调查资料, 对强震作用下公路隧道施工塌方段进行震害特征、震害机理及处治技术研究, 这对高烈度艰险山区交通生命线的抢通、保通性能的提高以及抗震设防设计有着重要的意义。

1 汶川地震区公路隧道施工塌方段震害调查及震害特征

公路隧道震害调查范围涉及震区(四川、陕西和甘肃三省)19 条国道、省道及典型县乡公路, 共 57

座隧道。调查发现震区都映高速龙溪隧道和烧火坪隧道(图 2(a))、国道 213 线都映段友谊隧道(图 2(b))存在施工造成的围岩塌方, 震害调查情况见表 1 所示。

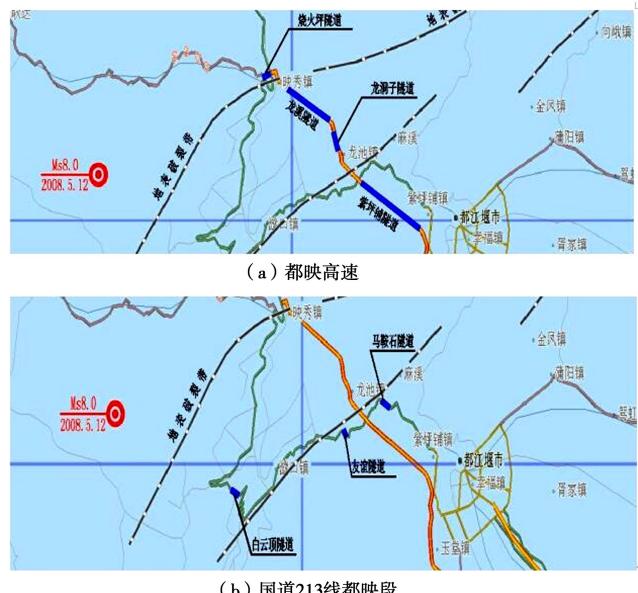


图 2 隧道位置示意图

Fig. 2 Position of tunnels

由表 1 可知, 震区公路隧道存在施工造成的围岩塌方段落均位于 V 级围岩段, 属软弱围岩。围岩施工塌方段均出现了二衬垮塌震害, 严重段落甚至出现衬砌整体垮塌的严重震害类型。

2 隧道施工塌方段震害机理

2.1 研究情况

(1) 计算模型

为研究隧道施工塌方段震害机理, 以友谊隧道围岩塌方较多的边墙部位为研究背景, 利用 FLAC^{3D} 进行数值模拟研究。计算模型长(x 向)×宽(y 向)为: 60 m×110 m, 隧道埋深 80 m。计算模型覆盖层厚 130 m, 为 V 级围岩; 基岩厚 40 m, 为 II 级围岩。隧道初支厚 20 cm, 为 C20 喷射混凝土; 二衬厚 50 cm, 为 C25 模注混凝土。边墙原塌穴内为软弱泥岩夹层, 塌方体积较小(1.5 m×2.2 m×4 m), 采用干砌片石回填并注浆(水玻璃: 水泥=1:1.15)。

围岩与初支之间设置接触面单元, 接触类型为面对面接触, 允许大滑动。监测断面为计算模型中间断面, 测点为监测断面左右边墙围岩侧测点和初支侧测点(图3), 主要研究左右边墙初支处内力、围岩侧与初支侧两测点位移差。计算模型物理力学参数、接触面参数及计算工况见表2~4所示。

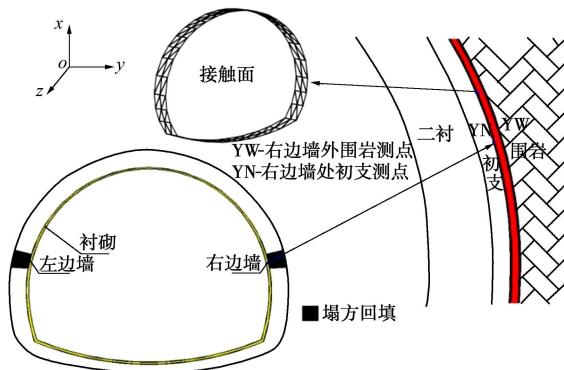


图3 测点布置

Fig. 3 Arrangement of measuring point

表2 计算模型物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of models

地层名称	材料参数				
	γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	E/MPa	μ
II级围岩	25	1500	49	20300	0.25
V级围岩	20	54	21	980	0.45
初期支护	22	—	—	23500	0.20
二次衬砌	25	—	—	30500	0.20

表3 接触面参数

Table 3 Relevant parameters of interface

摩擦系数	黏聚力/kN	法向接触刚度因子	最大渗透范围
0.32	130	0.55	0.05

表4 计算工况

Table 4 Simulation modes

序号	计算模型
A-1	左右边墙围岩塌方并回填注浆
A-2	左右边墙围岩无塌方

计算模型采用理想弹塑性本构模型、自由场边界、Mohr-Coulomb 强度准则及 Rayleigh 阻尼, 临界阻尼比 ξ_{\min} 据经验取为 0.05, 基频 ω_{\min} 为 5.4 Hz(A-1) 和 6.9 Hz(A-2)。

(2) 计算动荷载

计算动荷载选用汶川 8.0 级地震卧龙测站地震波, 加速度时程时间间隔 0.01 s, 持时为 15 s(截取了原波 5~45 s, 能量占原始波的 90%以上)。在计算模型底面同时输入三方向地震波加速度时程进行动力计算。基线校正后地震波加速度时程见图 4 所示。

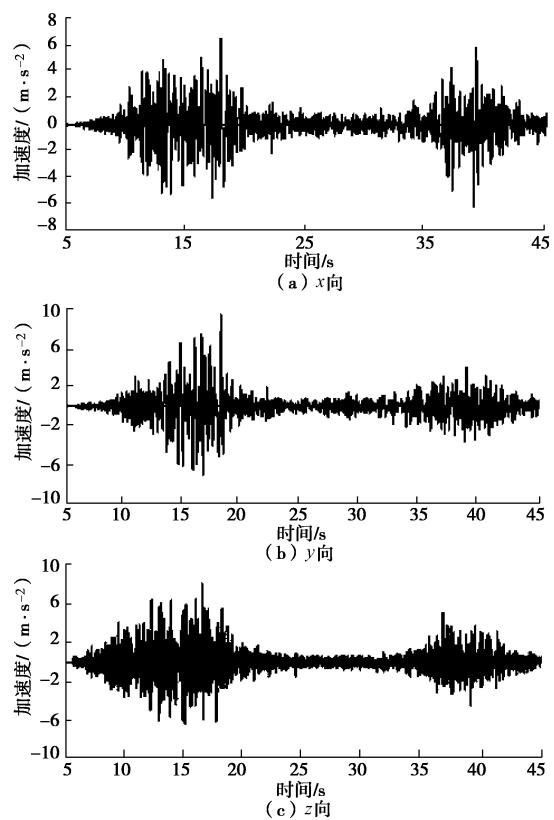


图4 加速度时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of seismic acceleration

2.2 计算结果及数据分析

(1) 地震惯性力分析

提取两计算工况监测断面左右边墙初支侧测点(ZN 测点和 YN 测点) 地震动加速度时程记录, 以工况 A-2 为基点, 计算两测点 PGA(地震动峰值加速度) 放大系数, 见表 5 所示。

表5 PGA 放大系数

Table 5 PGA magnification factors

边墙测点	左边墙 ZN 测点	右边墙 YN 测点
竖向	2.56	2.84
水平向	1.89	1.97

由表 5 可知, 施工塌方段水平向 PGA 比无塌方段增大近 2 倍; 竖直向增大大约 2.5~3 倍。这说明施工塌方段地震惯性力影响明显。

(2) 位移分析

提取两计算工况监测断面左右边墙初支侧和围岩侧测点位移, 并计算位移差(强制位移), 见表 6 所示。

由表 6 可知, 施工塌方段左右边墙测点三方向强制位移均较小, 不超过 0.2 mm, 比无塌方段增加量均小于 15%, 这说明施工塌方段强制位移影响较小。

2.3 现场震害

友谊隧道普通段 K1028+500—K1028+550 段和 K1028+675—K1028+700 段出现二次衬砌垮塌震害,

洞内衬砌多处被震裂, 裂缝宽约 1.0~20 mm 不等, 部分裂缝呈网状开裂, 如图 5, 6 所示。

表 6 边墙处衬砌与围岩两测点位移差值

Table 6 Displacement difference at two measuring points of lining and surrounding rock at side wall

测点	时刻	A-2 工况/mm	A-1 工况/mm	增加百分比/%
左 边 墙	最终时刻	0.135	0.142	5.19
	加速度最大时刻	0.164	0.179	9.15
	最终时刻	0.124	0.138	11.29
	加速度最大时刻	0.146	0.159	8.90
右 边 墙	最终时刻	0.152	0.171	12.50
	加速度最大时刻	0.179	0.193	7.82
左 边 墙	最终时刻	0.129	0.136	5.43
	加速度最大时刻	0.152	0.167	9.87
	最终时刻	0.119	0.131	10.08
	加速度最大时刻	0.130	0.139	6.92
右 边 墙	最终时刻	0.148	0.158	6.76
	加速度最大时刻	0.174	0.189	8.62



图 5 二衬垮塌

Fig. 5 Collapse of secondary lining

根据施工资料, 此两段施工过程中均出现过大变形侵限及塌方事故, 事后事故部位衬砌背后不密实。

3 隧道施工塌方段抗减震处治技术

3.1 处治技术



图 6 衬砌网状开裂、渗水

Fig. 6 Cracking and water penetration of reticular lining

隧道穿越软弱围岩时, 如施工不当, 易出现衬砌开裂、渗水, 初支侵限甚至造成塌方事故。塌方事故后, 应及时清理塌方体, 回填塌腔, 并对回填体进行注浆加固^[2]。但无论采取何种回填方式、回填材料、注浆材料及注浆量, 塌腔内围岩的强度、刚度、节理、产状等参数都无法恢复至原围岩状态, 这也就造成了施工塌方部位地震惯性力增大, 支护结构内力增大, 进而出现衬砌开裂、掉快, 乃至衬砌垮塌震害。基于此, 施工塌方段应结合减震措施进行处治。

目前, 常用的隧道减震措施主要是设置减震缝和减震层。设置减震层成本及施工难度较大, 二衬减震缝可结合施工缝施设, 施工难度小、成本低^[3]。故施工塌方段可采取“回填注浆+交错设缝”(出于防水考虑, 初支和二衬交错设置减震缝)的处治措施。

3.2 研究情况

为研究施工塌方段采取“回填注浆+交错设缝”处治措施的抗减震效果, 以友谊隧道施工塌方段为研究背景, 利用 FLAC^{3D} 进行数值模拟研究。计算模型同 2.1 节, 计算工况见表 7 所示。

减震缝结合模板台车设置, 衬砌节长 12 m, 缝宽 0.1 m, 如图 7, 8 所示。监测断面为施工塌穴中心断面(图 7), 监测点为左右边墙二衬测点(图 3)。

3.3 计算结果及数据分析

提取左右边墙二衬测点主应力、内力及位移时程曲线, 峰值均出现在 18 s 左右, 故提取 17.5~18.5 s 时程曲线进行分析。

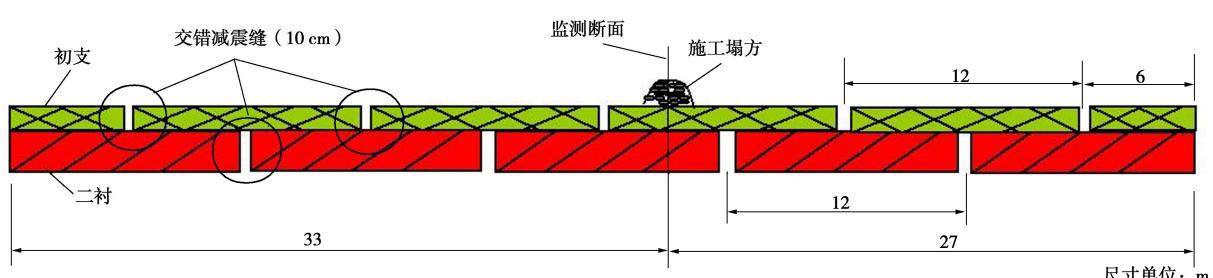


图 7 衬砌交错设置减震缝

Fig. 7 Staggered setting of shock absorption joints between primary and secondary linings

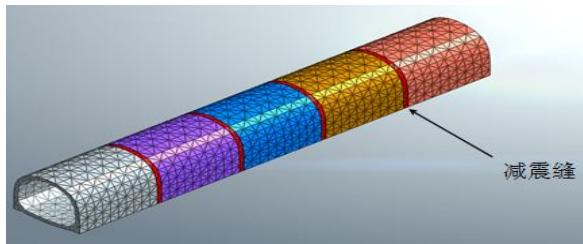


图 8 二衬设置减震缝示意图

Fig. 8 Setting of shock absorption joints of secondary lining

表 7 计算工况

Table 7 Simulation mode

序号	计算模型
B-1	左右边墙围岩塌方, 回填注浆
B-2	左右边墙围岩塌方, 采取回填注浆+交错设缝处治措施

(1) 主应力时程分析

a) 第一主应力分析

左右边墙二衬测点 B-1、B-2 工况第一主应力 17.5~18.5 s 时程曲线如图 9 所示。

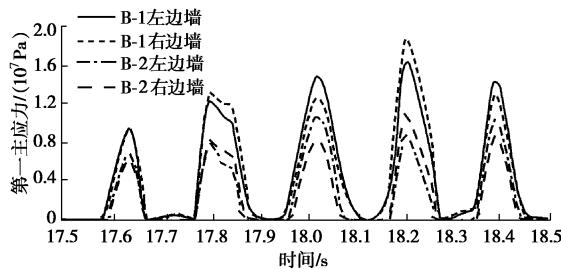


图 9 第一主应力时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of first principal stress

由图 9 可知, 左右边墙施工塌方段采取回填注浆+交错设缝处治措施后, 第一主应力响应峰值绝对值下降明显。其中左边墙第一主应力响应峰值绝对值由 17.00 MPa 降至 10.74 MPa; 右边墙第一主应力响应峰值绝对值由 19.20 MPa 降至 10.98 MPa。

b) 第三主应力分析

左右边墙二衬测点 B-1、B-2 工况第三主应力 17.5~18.5 s 时程曲线如图 10 所示。

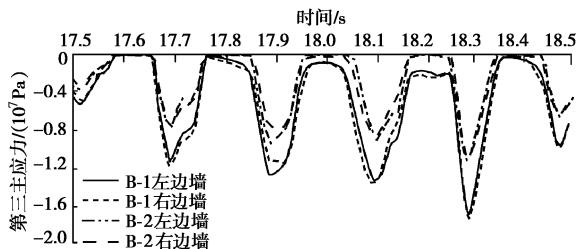


图 10 第三主应力时程曲线

Fig. 10 Time-history curves of third principal stress

由图 10 可知, 左右边墙施工塌方段采取“回填注浆+交错设缝”处治措施后, 第三主应力响应峰值绝对值下降明显。其中左边墙第三主应力响应峰值绝对值由 17.13 MPa 降至 11.08 MPa; 右边墙第三主应力响应峰值绝对值由 17.46 MPa 降至 11.02 MPa。

(2) 内力时程分析

a) 弯矩分析

左右边墙二衬测点 B-1、B-2 工况弯矩 17.5~18.5 s 时程曲线如图 11 所示。

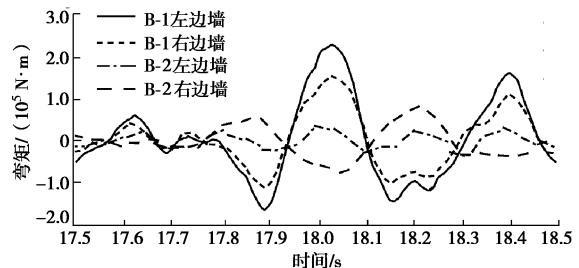


图 11 弯矩时程曲线

Fig. 11 Time-history curves of bending moment

由图 11 可知, 左右边墙施工塌方段采取“回填注浆+交错设缝”处治措施后, 弯矩响应峰值绝对值下降明显。其中左边墙弯矩响应峰值绝对值由 229.1 kN·m 降至 34.40 kN·m; 右边墙弯矩响应峰值绝对值由 151.2 kN·m 降至 81.96 kN·m。

b) 轴力分析

左右边墙二衬测点 B-1、B-2 工况 17.5~18.5 s 轴力时程曲线如图 12 所示。

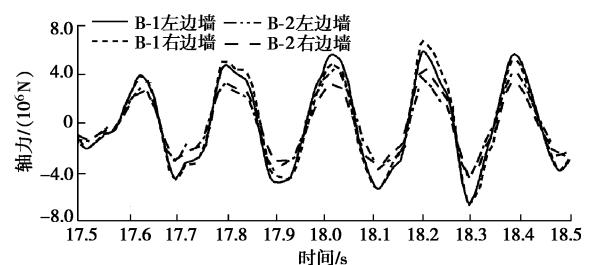


图 12 轴力时程曲线

Fig. 12 Time-history curves of axial force

由图 12 可知, 左右边墙施工塌方段采取回填注浆+交错设缝处治措施后, 轴力响应峰值绝对值下降明显。其中左边墙轴力响应峰值绝对值由 6744 kN 降至 4426 kN; 右边墙轴力响应峰值绝对值由 6831 kN 降至 4406 kN。

(3) 位移时程分析

a) 横向位移分析

左右边墙二衬测点 B-1、B-2 工况 17.5~18.5 s 横向位移时程曲线如图 13 所示。

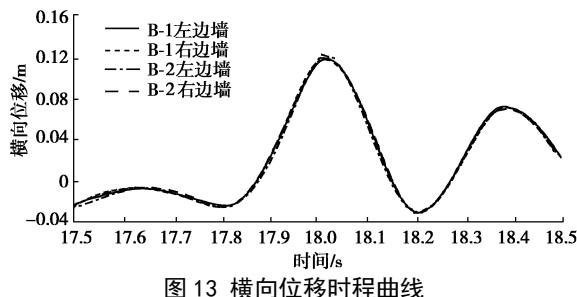


图 13 横向位移时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of lateral displacement

由图 13 可知, 左右边墙施工塌方段采取“回填注浆+交错设缝”处治措施后, 横向位移响应峰值绝对值基本无变化。左右边墙施工塌方段采取处治措施前后横向位移响应峰值绝对值均为 0.12 m。

b) 竖向位移分析

左右边墙二衬测点 B-1、B-2 工况 17.5~18.5 s 竖向位移时程曲线如图 14 所示。

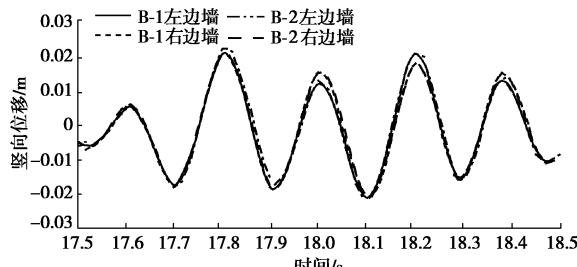


图 14 竖向位移时程曲线

Fig. 14 Time-history curves of vertical displacement

由图 14 可知, 左右边墙施工塌方段采取“回填注浆+交错设缝”处治措施后, 竖向位移响应峰值绝对值基本无变化。左边墙施工塌方段采取处治措施前后竖向位移响应峰值绝对值均为 0.022 m; 右边墙施工塌方段采取处治措施前后竖向位移响应峰值绝对值均为 0.023 m。

(4) 对比分析

提取并对比左右边墙二衬测点主应力、内力及位移响应峰值绝对值, 见表 8 所示。

表 8 对比分析

Table 8 Comparative analysis

测点	项目	B-1 工况	B-2 工况	减震率/%
左 边 墙	第一主应力/MPa	17.00	10.74	36.82
	第三主应力/MPa	17.13	11.08	35.32
	弯矩/(kN·m)	229.1	34.40	84.98
	轴力/kN	6744	4426	34.37
	横向位移/m	0.12	0.12	0.00
	竖向位移/m	0.023	0.023	0.00
右 边 墙	第一主应力/MPa	19.20	10.98	42.81
	第三主应力/MPa	17.46	11.02	36.88
	弯矩/(kN·m)	151.2	81.96	45.79
	轴力/kN	6831	4406	35.50
	横向位移/m	0.12	0.12	0.00
	竖向位移/m	0.022	0.022	0.00

由表 8 可知, 左右边墙施工塌方段采取“回填注

浆+交错设缝”处治措施后, 主应力减震率为 35%~45%; 轴力减震率 35%左右; 弯矩减震率 35%以上, 左边墙测点减震率高达 84.98%; 横向位移和竖向位移基本无影响。这说明采取“回填注浆+交错设缝”处治措施对隧道施工塌方段抗减震具有明显效果, 是一种行之有效的处治措施。

3.4 实际工程中减震缝设置建议

(1) 初支减震缝设置

为了增强初期支护减震缝处抗错断能力, 可在减震缝宽度范围内施作橡胶喷射混凝土(橡胶喷射混凝土为普通喷射混凝土中添加橡胶颗粒, 以提高喷射混凝土的韧性), 喷射厚度取原设计初期支护厚度的 1/3, 在减震缝两侧 5~10 倍宽度范围内也采用橡胶喷射混凝土替代普通喷射混凝土, 并由减震缝处喷射厚度逐渐增厚至初期支护设计厚度, 以实现初期支护与初期支护在减震缝处的柔性铰链连接和刚度渐变, 提高抗错断能力。

(2) 二衬减震缝设置

二衬减震缝设置可结合衬砌台车长度和防水需要同步设置, 即二次衬砌减震缝与施工缝设置在同一断面。施工缝自身需布设中埋式橡胶止水带或迎水面(与防水板相接触面)设置背贴式止水带达到止水目的, 其橡胶止水带本身即可作为二次衬砌减震缝阻隔地震波纵向传递减震材料的一部, 同时用嵌缝膏填充减震缝背水面、沥青砂拌合料填充减震缝隙内部, 进一步增强减震效果。

采用上述技术方案能有效减弱或阻断地震作用下地震波向隧道纵向传播的路径, 提高隧道抗错断能力。

4 结 论

(1) 汶川地震区公路隧道施工塌方段震害特征: 存在施工造成的围岩塌方段落均位于 V 级围岩段, 属软弱围岩; 围岩施工塌方段均出现了二衬垮塌震害, 严重段落甚至出现衬砌整体垮塌的严重震害类型。说明软弱围岩常规塌方处理措施不能保障强震作用下隧道正常运营, 应于施工环节采取行之有效控制措施。

(2) 施工塌方段震害机理: 施工塌方段较无塌方段地震动峰值加速度 PGA 增大 2 倍以上, 强制位移增量小于 15%。即隧道施工塌方段震害以地震惯性力为主, 强制位移为辅。

(3) 隧道施工塌方段采取“回填注浆+交错设缝”的处治措施后, 主应力和内力的减震率均在 35%以上。这说明“回填注浆+交错设缝”处治措施对隧道施工塌方段抗减震具有明显效果, 是一种行之有效的处治措施。

参考文献:

- [1] 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院. “5.12”汶川特大地震四川灾区国省干线公路检测评估技术总结[R]. 成都: 四川省交通厅, 2008. (Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Provincial Communications Department. Conclusion of detecting and evaluating of national and provincial highways in Sichuan Province after “5.12” Wenchuan earthquake[R]. Chengdu: Sichuan Provincial Communications Department, 2008.)
- [2] 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院. “5.12”汶川地震灾区高速公路和国省干线公路恢复重建工程调查、检测、评估[R]. 成都: 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院, 2008. (Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Provincial Communications Department. Investigation, detection and evaluation of the restoration and reconstruction project of highways, national and provincial trunk roads in disaster areas induced by Wenchuan earthquake on May 12, 2008[R]. Chengdu: Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Provincial Communications Department, 2008. (in Chinese))
- [3] 崔光耀, 王明年, 林国进, 等. 汶川地震区典型公路隧道衬砌震害类型统计分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 122 - 127. (CUI Guang-yao, WANG Ming-nian, LIN Guo-jin, et al. Statistical analysis of Earthquake damage types of typical highway tunnel lining structure in Wenchuan seismic disastrous area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(1): 122 - 127. (in Chinese))
- [4] 崔光耀, 刘维东, 倪嵩陟, 等. 汶川地震各地震烈度区公路隧道震害特征研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(6): 1 - 6. (CUI Guang-yao, LIU Wei-dong, NI Song-Zhi, et al. Study on different seismic intensities and earthquake damage to highway tunnels in wenchuan area affected by earthquakes[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(6): 1 - 6. (in Chinese))
- [5] 臧万军, 王 峥. 山岭隧道洞身段震害规律与地震风险模糊综合评价分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 45 - 53. (ZANG Wan-jun, WANG Zheng. A fuzzy comprehensive evaluation of the seismic hazard rule and relevant risks for mountain tunnel bodies[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(1): 45 - 53. (in Chinese))
- [6] 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. Analysis of seismic damage and mechanism of portal structure of highway tunnel in Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1084 - 1091. (in Chinese))
- [7] 崔光耀, 王明年, 林国进, 等. 汶川地震公路隧道洞口段震害机理及抗震对策研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(6): 6 - 10, 22. (CUI Guang-yao, WANG Ming-nian, LIN Guo-jin, et al. Study on earthquake damage mechanism and aseismatic countermeasure of highway tunnel portal section in Wenchuan seismic disastrous area[J]. Modern Tunneling Technology, 2011, 48(6): 6 - 10, 22. (in Chinese))
- [8] 何 川, 李 林, 张 景, 等. 隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 427 - 434. (HE Chuan, LI Lin, ZAHNG Jing, et al. Seismic damage mechanism of tunnels through fault zones[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 427 - 434. (in Chinese))
- [9] 方 林. 穿越断层隧道震害及减震措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (FANG Lin. The research on seismic damage and shock absorbtion measures of the tunnels through fault[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [10] 朱长安. 断层破碎带隧道地震动力响应分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (ZHU Chang-an. Study on seismic dynamic response of tunnel in the fault-rupture zone[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [11] 崔光耀, 王明年, 于 丽, 等. 汶川地震断层破碎带段隧道结构震害分析及震害机理研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(11): 122 - 127. (CUI Guang-yao, WANG Ming-nian, YU Li, et al. Study on the characteristics and mechanism of seismic damage for tunnel structures on fault rupture zone in Wenchuan seismic disastrous area[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(11): 122 - 127. (in Chinese))
- [12] 王明年, 于 丽, 林国进, 等. 隧道抗震与减震[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (WANG Ming-nian, YU Li, LIN Guo-jin, et al. Tunnel seismic and shock absorption[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [13] 王道远, 袁金秀, 朱永全, 等. 高烈度区软硬岩交界段隧道震害机制及减震缝减震技术模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊 2): 4113 - 4121. (WANG Dao-yuan, YUAN Jin-xiu, ZHU Yong-quan, et al. Mechanism of seismic damage and mode test on absorption joint damping technology of tunnel across junction of soft and hard rock in highly seismic area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 4113 - 4121. (in Chinese))