

公路隧道近距离上跨铁路隧道爆破施工研究

杨兴宝

(中交路桥华北工程有限公司,北京 101102)

[摘要] 以新建首环高速公路承平段 TJ2 标大鹿圈 1 号隧道为例,研究新建公路隧道近距离上跨既有高速铁路隧道爆破施工影响,并介绍新建隧道拱部光面爆破、墙部预裂爆破的微振综合控制爆破技术及爆破振动控制措施。研究表明,大鹿圈 1 号隧道施工引起的既有平安堡隧道主体结构及轨道结构位移和应力变化主要发生在两隧道交叉段正上方附近施工期,且平安堡隧道主体结构和轨道结构变形与受力均处于安全范围内。

[关键词] 隧道;爆破;开挖;受力;变形

[中图分类号] U45

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)21-0084-06

Study on Blasting Construction of Highway Tunnel Across Railway Tunnel at Close Distance

YANG Xingbao

(CCCC Road Bridge North China Engineering Co., Ltd., Beijing 101102, China)

Abstract: Taking the Daluquan No. 1 Tunnel of TJ2 section in the Chengde to Pinggu District, Beijing section of the Capital Ring Expressway as an example, the influence of blasting construction of the new highway tunnel on the existing high-speed railway tunnel is studied, and the micro-vibration comprehensive control blasting technology of the new tunnel arch smooth blasting and wall pre-splitting blasting, and blasting vibration control measures are introduced. The research results show that the displacement and stress changes of the main structure and track structure of the existing Ping'anpu Tunnel caused by the construction of Daluquan No. 1 Tunnel mainly occur in the construction period near the intersection of the two tunnels, and the deformation and stress of the main structure and track structure of the Ping'anpu Tunnel are within the safe range.

Keywords: tunnels; blasting; excavation; force; deformation

1 工程概况

首环高速公路承平段 TJ2 标大鹿圈 1 号隧道为分离式隧道,右线起讫桩号为 K15+047—K16+597,全长 1 550m;左线起讫桩号为 ZK15+024—ZK16+616,全长 1 592m。大鹿圈 2 号隧道为分离式岩质隧道,右线起讫桩号为 K16+705—K18+341,全长 1 636m;左线起讫桩号为 ZK16+689—ZK18+282,全长 1 593m。京沈高速铁路平安堡隧道位于燕山山脉中段,全长 5 068m,为单洞双线隧道,内线间距 5.0m,最大埋深 243m。

大鹿圈 1 号隧道于里程 K16+258(ZK16+308)位置附近近距离上跨既有平安堡隧道(见图 1),两

隧道夹角约 34°,交叉点左、右线垂直高度分别为 43.1、42.1m。大鹿圈 1 号隧道在交叉位置的埋深约 135m,设计标高约 676.500m,高速铁路路面设计标高约 634.400m,平均高差 42.6m。

隧址区出露地层为燕山期侵入的中粗粒正长岩和第四系残坡积碎石,区内地表水系不发育,受季节降水补给,需注意暴雨期间雨水的冲刷破坏作用,必要时采取截流、疏排措施。地下水主要为孔隙水及基岩风化带内的裂隙水,水量受孔隙率、裂隙发育程度等影响。区域内地表水和地下水对混凝土无腐蚀性,对钢结构具有微腐蚀性。

2 大鹿圈隧道施工影响分析

2.1 计算模型建立

采用 MIDAS GTS 软件建立三维数值模型(见图 2,3),考虑隧道相对位置关系、围岩级别、施工方法

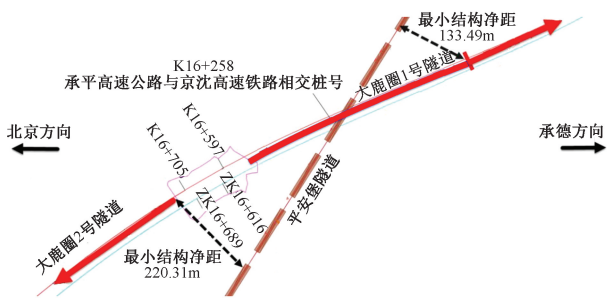


图 1 大鹿圈隧道与平安堡隧道位置关系

Fig. 1 Location relationship between Daluquan Tunnel and Ping'anpu Tunnel

等确定模型尺寸为 230m×170m×210m(长×宽×高),隧道开挖外缘至左、右边界最小距离为 50m,约 3.3 倍开挖跨度,可满足计算精度要求。设置模型顶面为自由边界,在模型底面设置竖向约束,在模型其他面均设置法向约束。隧道初期支护采用板单元模拟,二次衬砌采用三维实体单元模拟,本构模型为弹性模型。土体采用三维实体单元模拟,假设为理想弹塑性材料,本构模型采用修正莫尔-库仑模型。

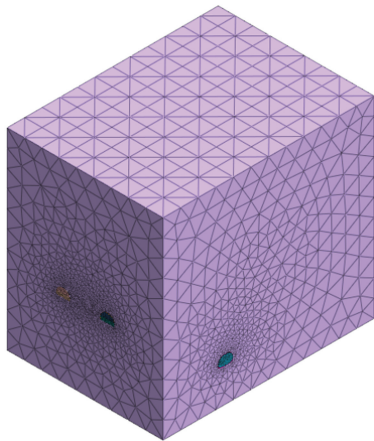


图 2 整体模型

Fig. 2 Overall model



图 3 隧道模型

Fig. 3 Tunnel model

2.2 计算参数

本研究采用的材料物理力学参数如表 1 所示。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

材料	重度/ (kN · m ⁻³)	弹性 模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩 擦角/ (°)
Ⅲ级围岩	23	—	0.30	0.7	39
Ⅳ级围岩	20	—	0.35	0.2	27
隧道初期支护 (C25 喷射混凝土)	22	23.0	0.20	—	—
隧道衬砌 (C30 混凝土)	23	31.5	0.20	—	—

2.3 模拟过程

- 1) 模型建立后,在自重荷载作用下求解至平衡,达到初始应力平衡状态,并将位移清零。
 - 2) 模拟平安堡隧道施工过程,将土体部分钝化,激活隧道初期支护和二次衬砌,达到隧道与土体之间的应力平衡状态,并将产生的位移清零。
 - 3) 大鹿圈 1 号隧道左线采用上下台阶法开挖,模拟土体开挖。
 - 4) 大鹿圈 1 号隧道左、右线贯通后,钝化人行通道处土体,模拟人行通道开挖,激活人行通道初期支护和二次衬砌,达到平衡状态,直至施工完成。
- 根据模拟过程,设置施工步 1~12 依次为:施加重力荷载和位移边界,平衡地应力→施工平安堡隧道,位移清零→大鹿圈 1 号隧道左线开挖 30m→大鹿圈 1 号隧道左线开挖 60m→大鹿圈 1 号隧道左线开挖 90m,右线开挖 30m→大鹿圈 1 号隧道左线开挖 120m,右线开挖 60m→大鹿圈 1 号隧道左线开挖 150m,右线开挖 90m→大鹿圈 1 号隧道左线开挖 180m,右线开挖 120m→大鹿圈 1 号隧道左线开挖 210m,右线开挖 150m→大鹿圈 1 号隧道左线开挖 230m,右线开挖 180m→大鹿圈 1 号隧道左线开挖 230m,右线开挖 230m→人行通道施作完成。

2.4 计算结果与分析

2.4.1 平安堡隧道位移

大鹿圈 1 号隧道施工引起的既有平安堡隧道竖向位移云图如图 4 所示。由图 4 可知,随着大鹿圈 1 号隧道的开挖,交叉核心段平安堡隧道逐渐产生隆起,且隆起量基本逐渐增大;当大鹿圈 1 号隧道开挖至平安堡隧道正上方时(施工步 8),平安堡隧道隆起量达最大,为 0.98mm;随着大鹿圈 1 号隧道开挖掌子面逐渐远离平安堡隧道,平安堡隧道隆起量小幅度减小;大鹿圈 1 号隧道人工通道施作完成后,平安堡隧道隆起量略微增大。

平安堡隧道隆起导致邻近围岩或土体应力重分布,引起地层损失,使交叉位置两端隧道出现局

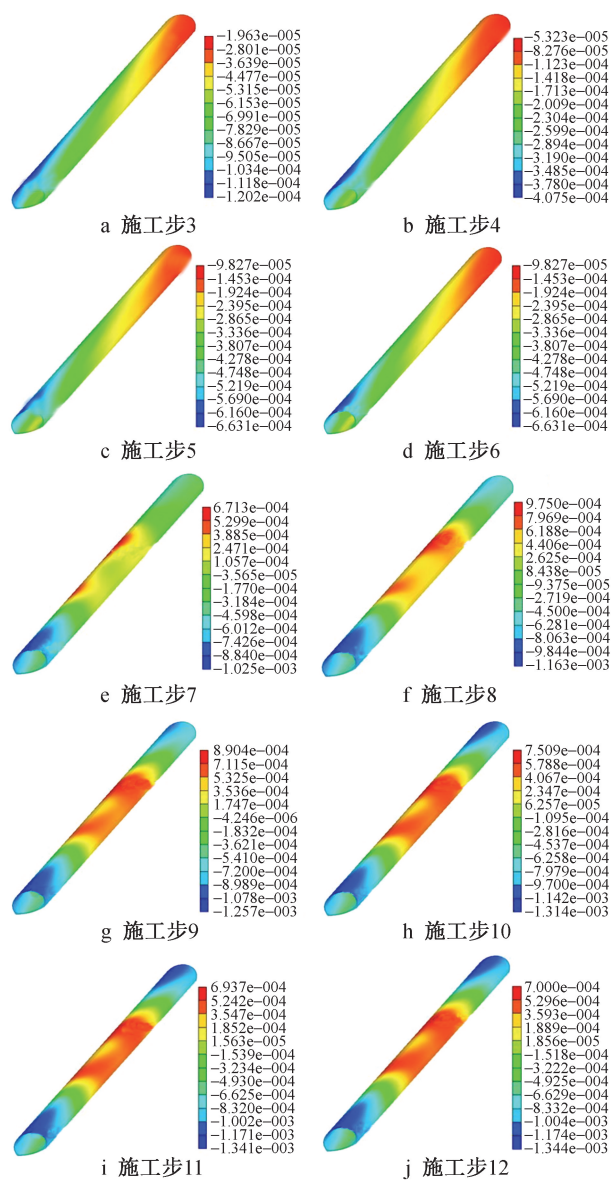


图 4 平安堡隧道竖向位移云图(单位:m)

Fig. 4 Vertical displacement of Ping'anpu Tunnel (unit:m)

部沉降,最大沉降为 1.34mm。

综上所述,大鹿圈 1 号隧道整个施工过程中既有平安堡隧道竖向位移为-1.34~0.98mm,满足 $\leq 5\text{mm}$ 的安全控制要求。同时,平安堡隧道主要发生竖向变形,水平变形远小于竖向变形,可知其水平位移也满足安全控制要求。

2.4.2 轨道结构位移

平安堡隧道轨道结构位移云图如图 5 所示。由图 5 可知,轨道结构最大隆起为 0.51mm,最大沉降为-0.60mm,均满足安全控制要求。

2.4.3 平安堡隧道应力

大鹿圈 1 号隧道施工引起的既有平安堡隧道应力云图如图 6 所示。由图 6 可知,大鹿圈 1 号隧道

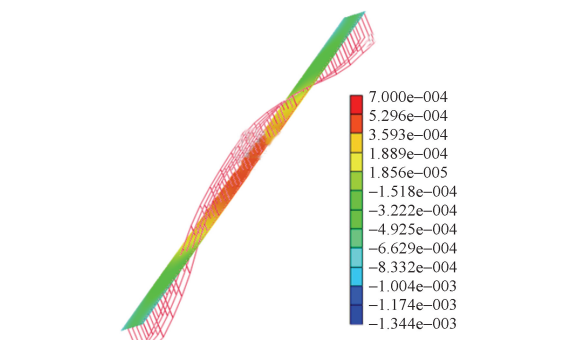


图 5 轨道结构位移云图(单位:m)

Fig. 5 Displacement of track structure (unit:m)

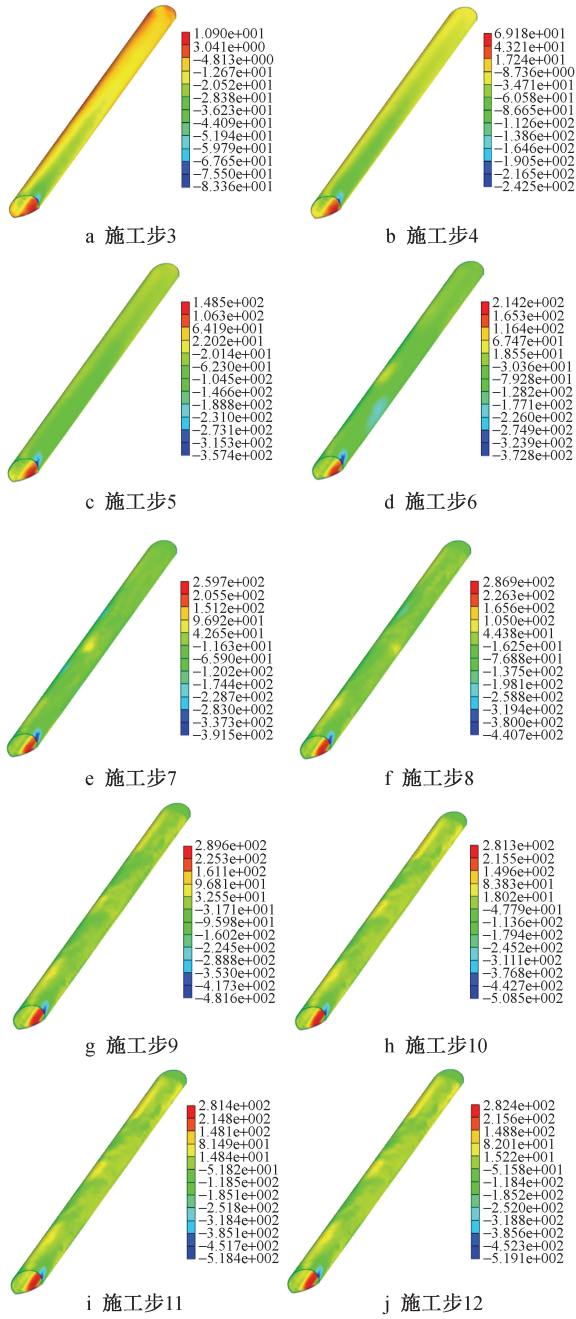


图 6 平安堡隧道应力云图(单位:kPa)

Fig. 6 Stress of Ping'anpu Tunnel (unit:kPa)

开挖引起的扰动作用对平安堡隧道主体结构应力造成了影响,拉应力为混凝土结构控制应力,在大鹿圈1号隧道开挖过程中,平安堡隧道最大拉应力小于C30混凝土容许应力值,可知平安堡隧道主体结构受力处于安全范围内。

3 隧道爆破开挖施工

大鹿圈1号隧道开挖采用光面爆破技术,须控制爆破用药量,遵循“短进尺、弱爆破”原则,减小对围岩的扰动,控制围岩变形,保证开挖幅面规整,控制超挖,杜绝欠挖,遇软弱破碎围岩严格控制循环进尺及爆破规模。

3.1 爆破参数

1) III级围岩段

大鹿圈1号隧道III级围岩段采用两台阶法短进尺开挖,每个循环进尺3m,1.5个循环/d,掏槽孔、掘进孔、辅助孔、底板孔、周边孔均采用直径32mm药卷,爆破参数如表2所示。

2) IV级围岩段

大鹿圈1号隧道IV级围岩段采用两台阶法短进尺开挖,每个循环进尺1.6m,1.5个循环/d,掏槽孔、掘进孔、辅助孔、底板孔、周边孔均采用直径32mm药卷,爆破参数如表3所示。

3) V级围岩段

大鹿圈1号隧道V级围岩段采用三台阶法短进尺开挖,每个循环进尺1m,1.5个循环/d,掏槽孔、掘进孔、辅助孔、底板孔、周边孔均采用直径32mm

表 2 III级围岩段爆破参数

Table 2 Blasting parameters of grade III surrounding rock

部位	炮孔名称	起爆顺序	孔数/个	炮孔长度/m	填塞长度/m	装药长度/m	装药量/kg	雷管数量/个
上台阶	掏槽孔	1	4	0.6	0.2	0.4	1.6	4
		2	4	2.3	0.2	2.1	8.4	4
		3	4	3.1	0.2	2.9	11.6	4
	辅助孔	4	9	2.8	1.4	1.4	12.6	9
		5	11	2.8	1.4	1.4	15.4	11
		6	14	2.8	1.4	1.4	19.6	14
		7	16	2.8	1.4	1.4	22.4	16
		8	19	2.8	1.4	1.4	26.6	19
		9	21	2.8	1.4	1.4	29.4	21
	周边孔	10	50	2.8	2.0	0.8	40.0	50
	底孔	11	23	2.8	1.4	1.4	32.2	23
下台阶	掘进孔	1	16	3.5	1.7	1.8	28.8	16
		2	16	3.5	1.7	1.8	28.8	16
	周边孔	3	10	3.5	1.7	1.8	18.0	10
	底孔	4	23	3.5	1.7	1.8	41.4	23

表 3 IV级围岩段爆破参数

Table 3 Blasting parameters of grade IV surrounding rock

部位	炮孔名称	起爆顺序	孔数/个	炮孔长度/m	填塞长度/m	装药长度/m	装药量/kg	雷管数量/个
上台阶	掏槽孔	1	4	1.1	0.2	0.9	3.6	4
		2	4	1.5	0.2	1.3	5.2	4
		3	4	2.1	0.2	1.9	7.6	4
	辅助孔	4	9	1.9	1.0	0.9	8.1	9
		5	11	1.9	1.0	0.9	9.9	11
		6	14	1.9	1.0	0.9	12.6	14
		7	16	1.9	1.0	0.9	14.4	16
		8	19	1.9	1.0	0.9	17.1	19
		9	21	1.9	1.0	0.9	18.9	21
	周边孔	10	50	1.9	1.5	0.4	20.0	50
	底孔	11	23	1.9	1.0	0.9	20.7	23
下台阶	掘进孔	1	16	1.9	1.0	0.9	14.4	16
		2	16	1.9	1.0	0.9	14.4	16
	周边孔	3	10	1.9	1.5	0.4	4.0	10
	底孔	4	23	1.9	1.0	0.9	20.7	23

药卷,爆破参数如表 4 所示。

3.2 关键施工技术

大鹿圈 1 号隧道单口、双洞同时掘进,根据环境条件、围岩条件采用台车钻孔及光面爆破和预裂爆破工艺,工艺流程如图 7 所示。爆破时主要采用乳化油炸药,周边眼爆破采用专用光爆炸药及不耦合装药结构,辅助眼采用耦合装药结构。炮眼深度为 1.0~1.5m,炮眼直径为 40~50mm,间隔装药。起爆管采用安全系数高的电子雷管,按照围岩级别采用不同的起爆方式,同时限定最大一段起爆药量,减小爆破振动的影响。

大鹿圈 1 号隧道围岩等级多为Ⅲ~Ⅴ级,在开挖过程中采用拱部光面爆破、墙部预裂爆破的微振综合控制爆破技术,将爆破引起的附近质点振动速度控制为<5cm/s,在最大限度上降低爆破产生的振动,减轻对围岩和周围建筑物的扰动,保证围岩稳定,进而保证施工安全和既有建筑物安全。

综合运用工程类比法、计算法和经验法,确定大鹿圈 1 号隧道爆破振动控制参数(见表 5),施工前在平安堡隧道中每隔 10m 设置监测点,采用 DSVM-2A 型振动测试仪实时监测振动速度,及时调整爆破参数。仪器配套分析软件可根据速度、加速度、位移等数据进行概率密度分析、频谱分析等,实

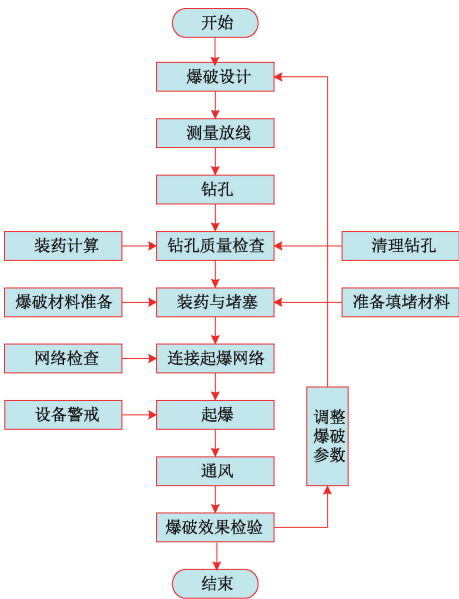


图 7 钻爆施工工艺流程

Fig. 7 Process of drilling and blasting construction

现信息化施工。根据相关要求,振动速度传至高速铁路线路时须≤2cm/s,大鹿圈 1 号隧道掌子面距京沈高速铁路最近距离为 175m,掌子面围岩级别为Ⅲ级,根据爆破设计,Ⅲ级围岩全断面爆破时一次起爆药量最大,为 387.2kg,计算得到传至京沈高速铁路时振动速度为 1.2cm/s<2cm/s,在允许范围内。

表 4 Ⅴ级围岩段爆破参数

Table 4 Blasting parameters of grade V surrounding rock

部位	炮孔名称	起爆顺序	孔数/个	炮孔长度/m	填塞长度/m	装药长度/m	装药量/kg	雷管数量/个
上台阶	掏槽孔	1	4	1.6	1.0	0.6	2.4	4
		2	4	1.2	1.0	0.2	0.8	4
		3	4	1.2	1.0	0.2	0.8	4
		4	4	1.2	1.0	0.2	0.8	4
		5	10	1.2	1.0	0.2	2.0	10
	周边孔	6	37	1.2	1.1	0.1	3.7	37
	底孔	7	18	1.2	1.1	0.1	1.8	18
中台阶	辅助孔	1	13	1.2	0.9	0.3	3.9	13
		2	14	1.2	0.9	0.3	4.2	14
		3	15	1.2	0.9	0.3	4.5	15
		4	15	1.2	0.9	0.3	4.5	15
		5	16	1.2	0.9	0.3	4.8	16
		6	16	1.2	0.9	0.3	4.8	16
	周边孔	7	28	1.2	1.1	0.1	2.8	28
	底孔	8	24	1.2	0.9	0.3	7.2	24
下台阶	辅助孔	1	13	1.2	0.9	0.3	3.9	13
		2	14	1.2	0.9	0.3	4.2	14
		3	15	1.2	0.9	0.3	4.5	15
		4	15	1.2	0.9	0.3	4.5	15
	周边孔	5	28	1.2	1.1	0.1	2.8	28
	底孔	6	24	1.2	0.9	0.3	7.2	24

表 5 爆破振动控制参数

Table 5 Blasting vibration control parameters

爆破类别	围岩类型	岩石单轴抗压强度/ MPa	周边眼间距/ mm	周边眼最小抵抗线/ mm	相对距	至内排崩落眼间距/ mm	装药集中度/ (kg·m ⁻¹)
光面爆破	中硬岩	30~60	450~650	600~800	0.7~1.0	—	0.20~0.30
	软岩	<30	300~500	450~650	0.5~0.8	—	0.07~0.12
预裂爆破	中硬岩	30~60	400~450	—	—	400	0.20~0.25
	软岩	<30	350~400	—	—	300	0.07~0.12
预留光面层 光面爆破	中硬岩	30~60	400~450	500~600	0.8~1.0	—	0.10~0.15
	软岩	<30	400~450	500~600	0.7~0.9	350	0.07~0.12

大鹿圈 1 号隧道施工时运渣车和混凝土运输车多次往返于交叉处,两隧道在交叉处的垂直距离为 42m,根据振动监测数据,严格控制运渣车和混凝土运输车装载量,将机械振动控制在允许范围内。

4 结语

1)对新建高速公路大鹿圈 1 号隧道近距离上跨既有高速铁路平安堡隧道爆破施工影响进行分析,结果表明,大鹿圈 1 号隧道施工引起的平安堡隧道主体结构与轨道结构位移和应力变化主要发生在两隧道交叉段正上方附近施工期。

2)大鹿圈 1 号隧道施工引起的平安堡隧道主体结构最大沉降为-1.34mm,最大隆起为 0.98mm,可知平安堡隧道主体结构变形处于安全范围内。

3)大鹿圈 1 号隧道施工引起的平安堡隧道轨道结构最大沉降为-0.60mm,最大隆起为 0.51mm,可知平安堡隧道轨道结构变形处于安全范围内。

4)大鹿圈 1 号隧道施工引起的平安堡隧道主体结构最大拉应力小于 C30 混凝土容许应力值,可知平安堡隧道主体结构受力处于安全范围内。

参考文献:

[1] 唐锐,赖孝辉,丁尧,等. 铁路隧道斜井近距离下穿公路隧道的影
响及处治措施研究[J]. 四川建筑,2023,43(5):66-71.
TANG R, LAI X H, DING Y, et al. Study on the influnce and
treatment measures of the inclined shaft of the railway tunnel
passing under the highway tunnel at a close distance [J].
Sichuan architecture, 2023,43(5): 66-71.

[2] 林豪,郭洪雨,王洪存,等. 杭温高铁梧坞超大断面隧道上穿
高速公路隧道爆破施工影响分区[J]. 铁道建筑,2023,63
(11):107-110.
LIN H, GUO H Y, WANG H C, et al. Impact zoning of blasting
construction of Wuwu Super Large Cross-section Tunnel on

Hangzhou to Wenzhou High-speed Railway passing through
expressway tunnel [J]. Railway engineering, 2023,63 (11):
107-110.

[3] 唐锐,赖孝辉,丁尧,等. 公、铁隧道近距离交叉建设时序影响
研究[J]. 公路,2023,68(8):383-392.
TANG R, LAI X H, DING Y, et al. Research on the influence of
construction sequence of highway and railway tunnel close
intersection[J]. Railway,2023,68(8):383-392.

[4] 秦浩斌. S 形隧道上穿施工诱发运营盾构隧道变形机制及过
程控制研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2023.
QIN H B. Study on deformation mechanism and process control of
shield tunnel induced by construction of S-shaped tunnel [D].
Baotou: Inner Mongolia University of Science &
Technology, 2023.

[5] 薛炀皓. 山岭公路隧道钻爆施工对上覆岩体及铁路影响研究
[D]. 贵阳:贵州大学,2023.
XUE Y H. Study on the influence of drilling and blasting
construction of mountain highway tunnel on overlying rock mass
and railway [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.

[6] 李广伟. 新建隧道爆破施工对临近既有隧道的稳定性影响分
析[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(5):185-192.
LI G W. Analysis of the influence of blasting construction of new
tunnels on the stability of adjacent existing tunnels [J]. Journal
of water resources and architectural engineering, 2022, 20 (5):
185-192.

[7] 黄斌. 新建隧道上跨既有铁路隧道的施工技术研究[J]. 城市
建筑,2022,19(16):189-191.
HUANG B. Research on construction technology of new tunnel
crossing existing railway tunnel [J]. Urbanism and architecture,
2022,19 (16): 189-191.

[8] 黄斌. 上跨临近既有铁路隧道爆破振动控制响应效应研究
[J]. 福建建筑,2022(7):89-95.
HUANG B. Study on the response effect of blasting vibration
control of adjacent existing railway tunnels [J]. Fujian
architecture & construction, 2022 (7): 89-95.