

下穿既有运营公路大断面浅埋隧道方案优选及监测分析

周 文^{1,2}

(1. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300; 2. 中铁建大桥工程局集团第五工程有限公司 四川 成都 610015)

摘要:在建商合杭客运专线新大力寺隧道下穿安徽省 208 省道段,隧道埋深浅,隧道围岩节理裂隙发育、稳定性差。新大力寺隧道施工过程中, S208 省道正常运营; 针对隧道实际工程情况, 选择更优的施工方案的保证省道正常运营与施工隧道的安全是工程的重难点问题。以新大力寺隧道下穿 S208 公路段工程为背景, 采用数值模拟方法, 对比分析了二台阶法、三台阶法、六步 CD 法和双侧壁导坑法等 4 种施工方案施工引起的下穿省道路面沉降变化, 新建隧道围岩和支护结构的稳定性; 考虑省道行车荷载对下穿隧道施工的影响, 分析不同施工行车荷载影响下隧道施工的稳定性。基于数值模拟分析结果表明: 采用六步 CD 法施工, 下穿隧道结构的变形及结构内力控制良好, 隧道施工引起的路面沉降较小; 但六步 CD 法施工中隧道拱顶位置衬砌内力较大, 施工中采用少扰动原则, 减少对隧道拱顶围岩的影响。

关键词:隧道工程; 下穿公路; 数值分析; 施工技术; 现场监测

中图分类号: U25

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)04-0520-08

Scheme optimization and monitoring analysis of large section shallow buried tunnel on existing highway

ZHOU Wen^{1,2}

(1. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China;

2. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group 5th Co., Ltd., Chengdu 610015, China)

Abstract: Xindali-temple tunnel under construction of Shangqiu-Hangzhou passenger dedicated line runs through 208 provincial highway in Anhui province. The tunnel is buried shallow and joints and fractures in surrounding rocks are developed, resulting in poorly stability and high construction risk and difficulty. S208 provincial highway is in normal operation during the tunnel construction. According to the actual engineering geology of the tunnel, choosing a better construction plan to ensure the normal operation of the provincial highway and the safe construction of the tunnel is the primary problem to be solved. Based on the research background of Xindalis-temple tunnel passing through S208 highway section, this paper analyzes the settlement of provincial road surface caused by four construction schemes: two-step method, three-step method, six step CD method and double side wall heading method, as well as the stability of surrounding rock and supporting structure of the tunnel and the influence of highway road load on tunnel construction. Results show that: (1) The six-step CD method is more effective in controlling the displacement, deformation and internal force of the tunnel. (2) In the six-step CD construction, the internal force of the lining of the vault position is significantly higher than that of other parts, so the disturbance to the soil layer of the vault should be reduced. (3) The six-step CD method is adopted to realize the safe construction of the tunnel under normal operation conditions of highway road.

Key words: tunnel engineering; underpass highway; numerical analysis; construction technology; filed monitoring

近年来,国内隧道工程蓬勃发展,网线日益复杂,形成的浅埋、大断面甚至超大断面隧道下穿既有运营公路等复杂地质工况隧道相继出现^[1-2]。新建隧道下穿既有公路施工不可避免地会对地层产生扰动,引起地层的不均匀沉降,严重的会造成既有公路路面破坏。在确保既有路线正常运营的情况下,保证新建隧道施工安全是施工中必须

解决的关键问题^[3]。

针对新建隧道施工引起的下穿既有公路路面的沉降问题,国内外相关专家进行了较为全面的研究^[4-7]。基于对隧道不同下穿方向的研究,张鹏等^[4]给出了隧道与路面正交下穿情况下开挖对路面影响范围最大的认识。叶飞等^[8]研究了列车移动荷载对围岩的动力响应,得出了动力荷载下围岩受

影响的范围值。在大断面隧道的开挖工法中，台阶法、CD法和双侧壁导坑法是目前采用较多的方法^[9-13]；但在新建隧道下穿既有运营公路的施工中，隧道开挖引起下穿高速公路的路面沉降，在浅埋和地质条件差的地层中，现有的施工方案将无法支持下穿段施工的安全要求，需要及时对施工方案进行调整，采用一次开挖面积小、多台阶开挖和预留核心土开挖方案及工程措施，减小运营公路路面结构的沉降^[14-16]。对开挖断面面积超过 150 m² 双线客运专线浅埋隧道，目前可供参考和借鉴的工程案例较少，需要结合具体的工程进行有针对性的研究；同时对新建隧道下穿既有运营公路施工的研究，目前主要针对新建隧道施工对地表运营公路的影响研究，对公路运营荷载对新建隧道支护结构的影响的研究较少，难以直接指导实际隧道的施工与设计。

以在建商合杭客运专线新大力寺隧道下穿安徽省 S208 运营公路工程为背景，采用数值模拟和现场监测相结合的方法。对既有运营省道行车荷载作用下，隧道采用双侧壁导坑法、六步 CD 法、三台阶法和二台阶法等四种施工方案施工时的稳定性进行了数值模拟研究，对比不考虑行车荷载作用时 4 种施工方案的稳定性及施工对既有运营公路路面结构变形的影响。基于两种条件下的下穿隧道结构的稳定性及下穿隧道施工对运营公路路面结构变形的影响情况，提出了安全、可行的较为经济的隧道下穿段的施工方案；跟踪隧道下穿段的施工，对隧道结构的变形和施工引起的路面沉降进行现场监测，现场监测数据同数值分析结果的对比分析验证了基于数值模拟分析推荐方案的合理、可行性。新大力寺超大断面浅埋隧道下穿既有运营公路施工案例为同类隧道的设计与施工提供了借鉴。

1 下穿公路段工程概况

1.1 隧道概况

商合杭客运专线新大力寺隧道位于安徽省巢湖市，为单洞双线隧道，全长 3 354 m，DK 446+620 ~ DK 446+790 段隧道浅埋，开挖断面达 151.3 m²，且 DK 446+695~DK 446+715 段下穿 S208 省道，为新大力寺隧道重点控制段。大力寺隧道隧址位置见图 1 所示。

新大力寺隧道隧址位于剥蚀丘陵区，褶皱构造发育，自然坡度 15~40°，地表植被发育。隧道覆土从上至下依次为：粉质粘土 Q^{4al+pl}、粗角砾土

Q^{4al+pl}、强风化灰岩 P_{1q}、强风化泥岩 C₁₋₂、弱风化石英砂岩 D_{3w} 以及弱风化粉砂岩 S_{2f}。



图 1 新大力寺隧道隧址位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tunnel site

新大力寺隧道下穿运营公路段地质剖面见图 2 所示，表 1 给出了新大力寺隧道下穿公路段隧道的支护参数表。

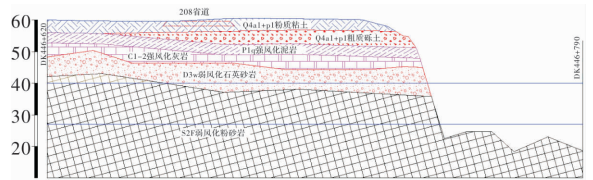


图 2 隧道下穿段地质剖面图

Fig. 2 The geological section of tunnel

表 1 隧道支护参数

Tab. 1 Parameter table of tunnel support

项目	材料及规格	结构尺寸
初期支护	长管棚	$L=60.0\text{ m}$,
		环向间距 40 cm,
		$\alpha=1.5^\circ$
	钢拱架	纵向间距 60 cm
	钢筋网	20×20 cm
	喷射混凝土 C35、C25 混凝土	$d=28\text{ cm}$
	二衬混凝土 C40、C35 混凝土	$d=40\text{ cm}$

1.2 下穿公路隧道方案初选

商合杭客专新大力寺隧道下穿安徽省 208 省道工程，比较双侧壁导坑法、六步 CD 法、三台阶法以及二台阶法等四种施工方案在开挖过程中对地表道路结构沉降、隧道结构的变形及隧道支护结构受力的影响。

隧道双侧壁导坑法施工方案施工示意图见图 3 所示，隧道施工依据图中标号顺序进行，下部滞后

上部4 m,先施工隧道左侧,左侧超前右侧15 m,右部超前中部30 m;六步CD法的施工同双侧壁导坑法一样,先施工隧道左侧,左侧超前右侧15 m;隧道台阶法施工时,上台阶超前下台阶15 m。

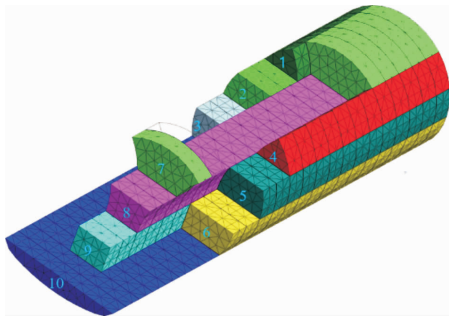


图3 隧道双侧壁法施工工序
Fig. 3 Construction procedure

2 模型建立及方案优化

基于商合杭客专在建的新大力寺隧道下穿公路段工程,针对不同施工方案对既有运营公路、隧道位移、变形以及隧道支护的结构受力影响等问题,采用弹塑性有限元程序,建立三维计算模型,对台阶法、六步CD法和双侧壁导坑法等施工过程进行数值模拟分析,确定隧道该段安全、可行的施工优化方案。

2.1 数值模型及模型参数

新大力寺隧道断面矢高12.78 m,隧道最大跨度14.80 m;隧道入口段埋深为18.00 m,下穿段埋深23.00 m。下穿段建模中,模型在X、Y、Z方向上的尺寸为110 m×92 m×170 m,见图4所示。

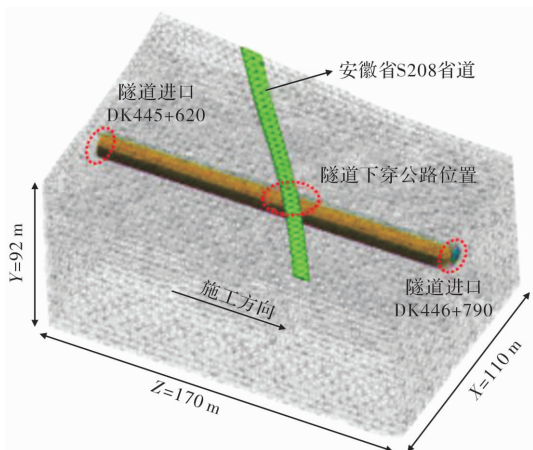


图4 数值计算模型

Fig. 4 Numerical calculation model

隧道下穿段分析模型上表面为自由面,模型前、后、左、右侧面及下表面仅施加法向约束。模型围岩采用Mohr-Coulomb本构关系,支护结构

采用弹性本构关系。

数值模拟计算中,隧道的初期支护喷射混凝土及二次衬砌均采用2D板单元模拟,通过在对应的施工阶段中激活单元的方式,实现初期支护的喷射混凝土及二次衬砌的施工。隧道初期支护体系中的锚杆、管棚分别采用1D植入式桁架单元和梁单元模拟。钢筋网与钢拱架的支护效果,通过提高喷射混凝土的弹性模量的方式实现。钢筋网、钢拱架与初期支护喷射混凝土的共同作用效果,采用(1)式进行等效弹性模量折算。

$$E = E_0 + \frac{S_g E_g}{S_0} \quad (1)$$

式中: E 为折算后的初期支护等效弹性模量; E_0 为喷射混凝土的弹性模量; E_g 为钢筋弹性模量; S_g 为钢筋截面积; S_0 为混凝土截面积。

围岩及支护结构物理力学参数,见表2。

表2 数值计算参数

Tab. 2 Parameters of surrounding rock

围岩名称	弹性模量 /MPa	重度 /kN·m ⁻³	泊松比	内聚力 /kPa	内摩 擦角/°
粉质黏土	20	15.7	0.26	32	15
粗角砾土	44	21.5	0.30	30	20
泥岩	20 000	20.4	0.19	30	25
石英砂岩	29 000	24.9	0.16	87	30
粉砂岩	36 000	21.3	0.13	150	35
初期支护	21 500	25	0.20	—	—
二次衬砌	32 500	25	0.20	—	—

2.2 数值模拟方案

2.2.1 行车荷载

安徽省208省道为双向四车道一级公路,行车荷载均布荷载 $q_k=10.5$ kN/m,集中荷载 $P_k=360$ kN。横向荷载分布于四车道上,考虑汽车荷载的折减作用,取折减系数为0.67;纵向跨径低于150 m,不考虑荷载的纵向折减。新大力寺隧道下穿段数值分析模型的行车荷载见式(2)和式(3)所示。

$$q_k' = 10.5 \times 0.67 \text{ kN/m} = 7.04 \text{ kN/m} \quad (2)$$

$$P_k' = 360 \times 0.67 \text{ kN} = 241.2 \text{ kN} \quad (3)$$

2.2.2 模拟计算方案

数值模拟计算中,采用钝化对应网格单元实现隧道开挖,采用激活网格施加支护结构。数值模拟采用1.0 m施工步长,初期支护喷射混凝土支护紧跟开挖作业。

双侧壁导坑法模拟施工步骤:(1)施工隧道洞

口位置的超前管棚;(2)施工①部的开挖支护,进尺至4.0 m时,开挖②部第一环;(3)顺序施工①~③部的开挖支护,①部进深至15.0 m时,开挖施工④部的第一环;(4)顺序施工①部~⑥部的开挖支护,①部进尺至45.0 m时,开挖施工⑦部的第一环。

六步CD法施工工序和施工间距同双侧壁法。

台阶法模拟施工步骤:(1)施工隧道进口位置的超前管棚;(2)上台阶的开挖施工及支护,进尺至15.0 m时,开挖下一台阶的第一环。

3 数值模拟结果及分析

3.1 运营公路变形特性

省道S208中线地表沉降曲线及隧道轴线地表的沉降变形曲线见图5和图6所示。据图5所示的公路路面的变形曲线可知:六步CD法施工方案引起的公路路面的最大沉降量最小,为19.43 mm;其次为双侧壁导坑法,其最大沉降量为19.64 mm,较CD法的变形量大了0.21 mm,变化约为1%;三台阶法施工引起的省道地表沉降的最大达到了22.45 mm,较CD法变形量大了3.02 mm,变化量达15.43%。但就最大值出现的位置而言,四种施工方案下路面沉降的变形峰值均稳定在隧道轴线位置。

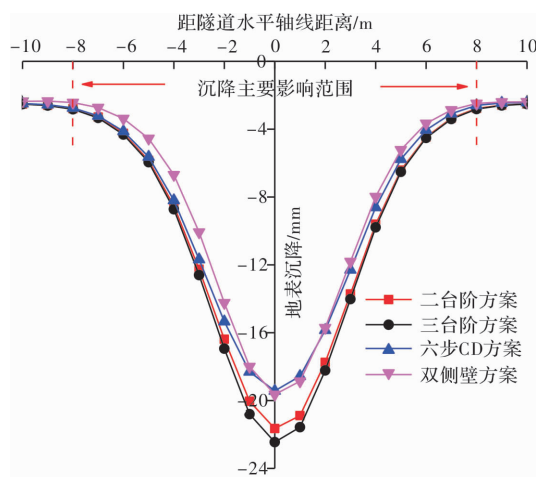


图5 运营公路路面中线的地表沉降曲线

Fig. 5 Highway centerline surface subsidence

据图6给出的隧道轴向地表变形曲线可知:沿隧道轴线方向,四种施工方案引起的路面峰值的沉降变形值集中出现在DK 446+708位置,其中,六步CD法施工方案引起的最大沉降量最小,为19.23 mm;其次为双侧壁导坑法,最大沉降量为19.14 mm;二台阶法施工引起的沉降量最大,此时路面沉降最大值达22.75 mm。

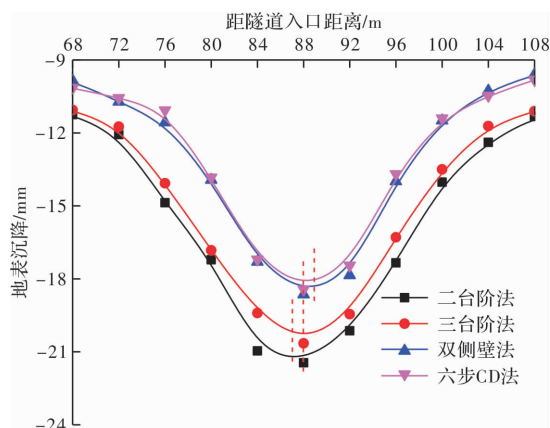


图6 隧道轴线地表沉降

Fig. 6 Surface settlement of tunnel axis

综合分析公路与隧道地表位移曲线可知:省道轴线与隧道轴线交叉位置地表的位移变形量最大;此时,沿隧道轴线方向,路面的地表沉降最大位置出现在隧道的中部,距隧道进口约88 m的位置(DK 446+708),该断面为研究区间的控制断面。

3.2 隧道位移的特性

为明确省道正常运营条件下,新大力寺隧道与省道交叉段施工过程中的隧道内部位移情况以及隧道的支护结构的受力情况,以DK 446+708处隧道断面为研究对象,在断面拱顶及拱腰位置布设位移的监测点;在拱顶、拱腰、拱肩、拱底及拱脚位置布设应力的监测点。

(1) 隧道拱顶沉降位移

四种方案模拟施工过程中的拱顶沉降曲线见图7,随着隧道掌子面逐渐逼近目标断面,断面拱顶位置的监测点累计竖向位移量逐渐加大;当掌子面位于监测点前方10.0 m时,隧道拱顶位移发生变化;当掌子面位于监测点-10.0 m~+10.0 m位置时,拱顶位移变化剧烈(主要变化区间);掌子面远离测点10.0 m后,拱顶位移变化趋于稳定。四种施工方案引起测点的变化主要集中在测点前后约20.0 m的范围内。

对比图7中拱顶沉降变化曲线可知:CD法施工隧道拱顶位移量最小,为23.63 mm;其次为双侧壁导坑法,最大沉降量为28.09 mm,较CD法变形量增加了4.46 mm,增加了约19%;二台阶法施工引起的省道路面的沉降量为30.17 mm,较CD法的沉降量增加了6.54 mm,增加了约28%;三台阶法施工引起的省道路路面沉降量最大,达31.51 mm,较CD法变形量增加了7.88 mm,增加了约33%;但就控制效果而言,CD法施工拱

顶位移量的差异 4~8 mm, 拱顶位移的控制效果明显。

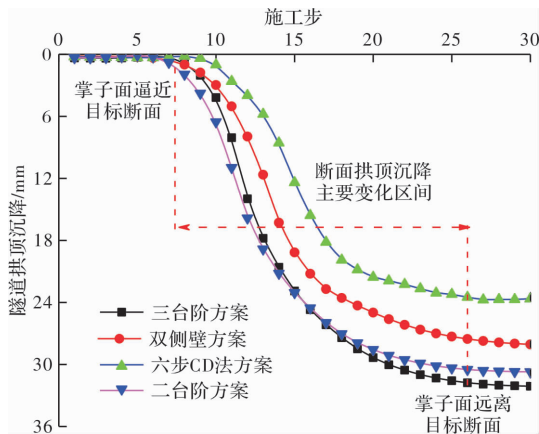


图7 隧道拱顶沉降

Fig. 7 Settlement of tunnel vault

(2) 隧道水平收敛位移

给出的研究断面隧道洞内水平收敛变化曲线见图8所示。由图可见, 掌子面位于测点断面前方 10.0 m 的位置处施工时, 隧道洞内水平收敛量基本不变; 但当掌子面位于监测点 -10.0 m ~ +12.0 m 位置时, 隧道的拱腰水平收敛变化剧烈(主要变化区间); 掌子面远离测点 10.0 m 后, 拱腰水平收敛变化趋于稳定。

对比分析图8给出的隧道的水平收敛变化曲线可知: 四种方案稳定水平收敛量由小至大依次为三台阶法的 15.86 mm、二台阶法的 16.54 mm、CD法的 17.96 mm 和双侧壁法的 20.23 mm; 其中, 三台阶法较其他的隧道施工方案分别增大了约 4%、13% 和 28%。

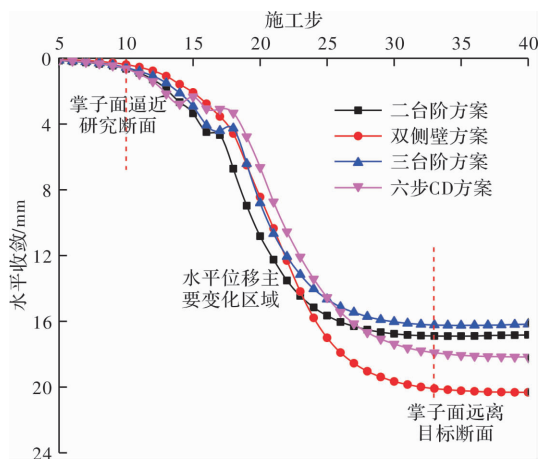


图8 隧道水平收敛

Fig. 8 Horizontal convergence of tunnel

隧道典型断面内部位移变化见表3所示, 三台阶施工时, 隧道的水平收敛控制效果最好, 但对隧道拱顶沉降的控制效果最差; 双侧壁法对拱顶

沉降的控制效果较好, 但其对水平收敛位移的控制效果最差。因此, 以水平收敛与拱顶沉降的双重判据, 三台阶法与双侧壁导坑法的控制效果均不理想。二台阶法在水平位移控制方面较 CD 法好, 但二台阶法在拱顶位移控制方面较 CD 法差, 因此, 基于位移的控制效果, 采用六步 CD 法对隧道洞内变形的控制效果最好。

表3 隧道位移变化量

Tab. 3 Tunnel displacement

施工方案	水平收敛/mm	拱顶沉降/mm
三台阶法	15.86	31.51
二台阶法	16.54	30.17
六步 CD 法	17.96	23.63
双侧壁导坑法	20.23	28.09

3.3 支护结构受力特性

新大力寺隧道采用不同的施工方案施工过程中, 隧道的初期支护结构上的主应力最大值位置处的大主应力的变化曲线见图9。四种施工方案引起的目标断面的主应力最大值见表4所示。

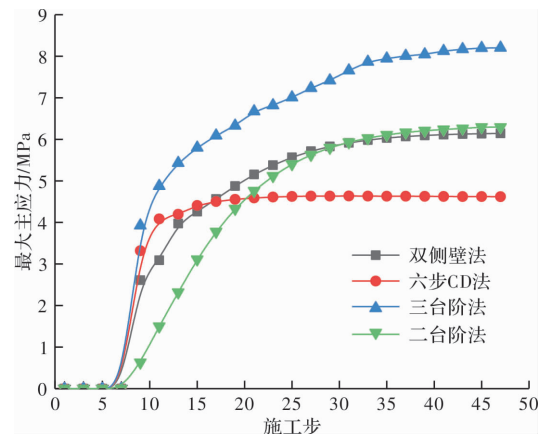


图9 最大主应力

Fig. 9 The maximum principal stress

由图9给出的变化曲线可见: 在施工的初期阶段, 二台阶法较其他方案的应力变化更加平缓; 六步 CD 法支护结构上的应力发展较快, 并在短期内达到稳定; 稳定阶段 CD 法最大主应力的稳定值最低。对比表4中四种施工方案引起的目标断面主应力的变化, 六步 CD 法引起的初期支护结构上的应力最小, 其次为双侧壁导坑法, 三台阶法施工引起的支护结构上的内力最大。测点部位上 CD 法与双侧壁法最小主应力为正值, 对隧道的安全更有利。CD 法与双侧壁法的最大、最小主应力的差值分别为 1 163.16 kPa 和 855.09 kPa。因此, 基于支护结构的受力情况, 推荐采用六步 CD 法。

表 4 初支结构内力

Tab. 4 Internal forces of the initial support

施工方案	最大主应力/kPa	最小主应力/kPa
六步 CD 法	4 916.89	436.66
双侧壁导坑法	6 080.05	1 291.75
三台阶法	9 686.98	-562.94
二台阶法	7 172.28	-402.29

4 基于数值分析的施工建议及监测

4.1 基于数值分析的施工方案优化

隧道下穿 S208 省道施工过程中，为保证公路的正常运营，须对地表的沉降严格控制，台阶法施工引起省道路面变形量较大，不作考虑。六步 CD 法和双侧壁导坑法在控制省道地表位移方面效果好，且两者差异较小。六步 CD 法在隧道洞内位移及支护结构受力方面控制效果优于双侧壁导坑法，同时，双侧壁导坑法施工工序复杂，效率低，结合实际工程的情况，建议采用六步 CD 法施工。

为保证隧道安全快速的施工，基于数值模拟结果，提出三条施工建议：

(1)隧道下穿省道位置地表路面位移量最大，下穿段区间施工中，建议扩大小导管注浆范围等措施，降低地层沉降变形对地表运营省道的影响。

(2)隧道入口处围岩的位移较大，施工过程中，为保证超前支护措施的施工质量，应避免入口位置围岩出现过大的变形或坍塌。

(3)六步 CD 法施工中，拱顶位置的支护结构内力高于拱腰和拱肩位置 30 % 以上，在交叉段施工中应尽量减少对拱顶位置围岩的扰动，严格控制左右侧洞施工间距，避免左右侧施工扰动的叠加。

4.2 现场施工效果监测

通过对比分析所选施工方案中隧道衬砌内力与既有省道地表沉降与工程施工过程中实测值，进一步验证所选方案计算结果的可靠性。衬砌内力测点布置及结果对比曲线见图 10 和图 11；S208 省道中线变形位移测点及结果对比曲线见图 12 和图 13。

据图 11 可知，拱顶、拱肩及拱腰部位衬砌内力逐步降低。拱顶位置衬砌内力变化速率最大，其次为拱腰位置；拱肩部位衬砌内力变化周期最长，其次为拱腰位置，拱顶部位衬砌内力最大，且变化速率最大，为断面最危险位置。数值模拟计算中，未能考虑所有的影响因素，测点内力监

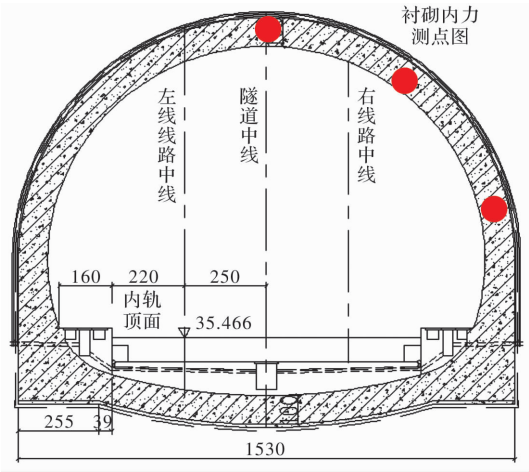


图 10 衬砌内力测点布置图

Fig. 10 Layout of lining internal force measuring points

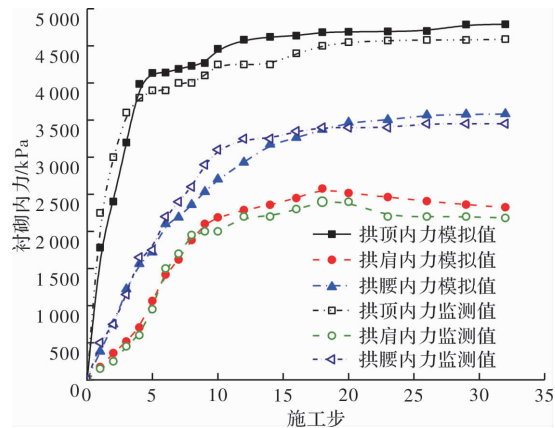


图 11 隧道衬砌内力

Fig. 11 Internal forces of tunnel lining

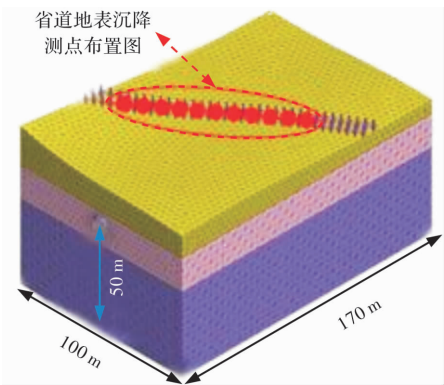


图 12 省道地表沉降测点布置图

Fig. 12 Layout of surface settlement measurement points in provincial highway

测值低于模拟值，但模拟值与监测值曲线趋势基本相同。

据图 13 地表沉降曲线可知，省道中线地表沉降主要影响范围约 20 m，且主要影响范围内省道位移实测值高于模拟值，变形峰值差为 14.1 %；次要影响区域内模拟值与实测值接近。同时，两

曲线变形趋势基本相同,数据之间的差异对规律的影响较小,数值模拟计算结果可靠。

隧道轴线方向拱顶稳定阶段位移及隧道累计水平收敛监测曲线见图14,据图14可知:隧道拱顶沉降呈现递减的趋势,入口位置拱顶位移量最大,为26.73 mm;隧道水平收敛量变化平缓,水平收敛量在13~16 mm范围,靠近典型断面DK446+708位置,隧道水平收敛量最大,约为15.5 mm,满足变形控制值30 mm要求。

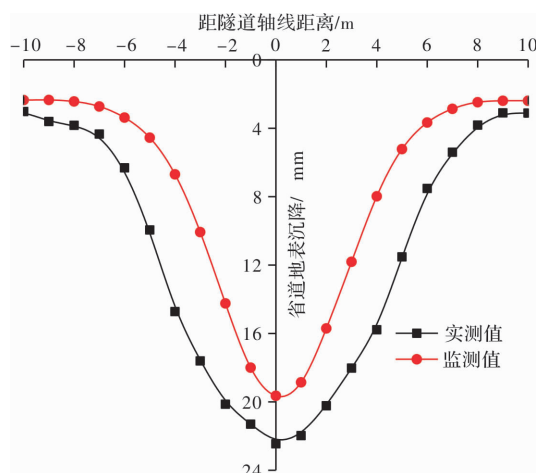


图13 地表沉降量对比

Fig. 13 Comparison of settlement

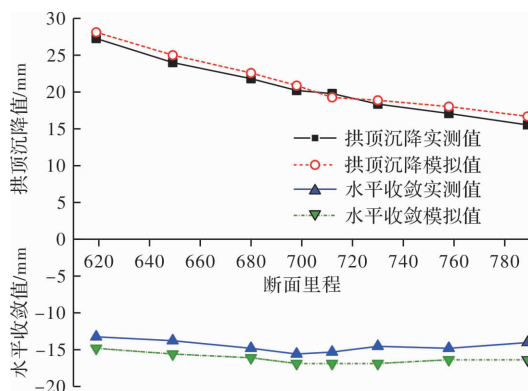


图14 隧道位移变形

Fig. 14 Horizontal convergence of tunnel

整体上隧道拱顶沉降与收敛实测值低于数值模拟结果,实测数据有更高的安全储备,但两者在数值上差异较小,且曲线整体走势一致,说明数值模拟结果可靠。

5 结论

结合在建新大力寺隧道下穿208省道的地质条件及工程特点,分别针对双侧壁导坑法、六步CD法、二台阶法以及三台阶法进行了数值模拟,对不同施工方案在控制隧道净空收敛、地表及拱顶沉降及支护结构受力情况做出合理的分析,并结

合现场的实测资料得出主要结论如下:

(1)六步CD法在控制地表沉降及隧道支护结构受力方面相对双侧壁导坑法方案及台阶法方案效果更好;三台阶法在控制隧道水平收敛方面效果较六步CD法更优,综合对比四种施工方案数值模拟结果,提出新大力寺隧道与S208省道交叉段采用六步CD法施工。

(2)新大力寺隧道与S208省道交叉段六步CD法施工中拱顶位置衬砌内力高于拱腰与拱肩位置内力。

(3)新大力寺隧道与S208省道交叉段六步CD法方案数值模拟结果与实测结果趋势基本一致,隧道下穿公路段的安全施工的同时保证了省道的正常运营。

参考文献 References

- [1] 郑俊杰,包德勇,龚彦峰,等.铁路隧道下穿既有高速公路隧道施工控制技术研究[J].铁道工程学报,2006,23(8):80-84.
ZHENG Junjie, BAO Deyong, GONG Yanfeng, et al. Study on construction control technology of railway tunnel passing through existing highway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 23(8): 80-84.
- [2] 曹成勇,施成华,彭立敏,等.下穿高速公路的浅埋大跨隧道开挖力学行为分析[J].现代隧道技术,2017,54(5):122-129,154.
CAO Chengyong, SHI Chenghua, PENG Limin, et al. Analysis of the mechanical behaviors of shallow-Buried large-Span tunnels under expressways[J]. Modern Tunneling Technology, 2017, 54(5): 122-129, 154.
- [3] 朱正国,黄松,朱永全.铁路隧道下穿公路引起的路面沉降规律和控制基准研究[J].岩土力学,2012,33(2):558-563,576.
ZHU Zhengguo, HUANG Song, ZHU Yongquan. Study of road surface settlement rule and controlled criterion for railway tunnel undercrossing highway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 558-563, 576.
- [4] 张鹏,谭忠盛.浅埋隧道下穿公路引起的路面沉降控制基准[J].北京交通大学学报,2008,32(4):137-140.
ZHANG Peng, TAN Zhongsheng. Pavement settlement standard induced by shallow buried tunnel to under-traverse highway[J]. Journal of Beijing Jiao Tong University, 2008, 32(4): 137-140.
- [5] 贾蓬,赵文,周佳俊,等.浅埋铁路隧道下穿高速公路施工方法比选[J].北京工业大学学报,2014,40(8):

- 1256-1262.
- JIA Peng, ZHAO Wen, ZHOU Jiajun, et al. Optimal analysis of excavation method of a shallow tunnel beneath expressway[J]. Journal of Beijing University of technology, 2014,40(8):1256-1262.
- [6] 王万平,韩常领,李建斐. 超浅埋小间距隧道穿越既有公路变形规律模拟研究[J]. 现代隧道技术,2013,50(2):94-101.
- WANG Wanping, HAN Changling, LI Jianfei. Simulation study on the deformation law of a shallow-buried tunnel with small spacing that passes under an existing highway[J]. Modern Tunneling Technology, 2013,50(2):94-101.
- [7] 胡守云. 三明南铁路隧道下穿高速公路施工关键技术及道路安全防控措施[J]. 施工技术,2016,45(17), 118-123.
- HU Shouyun. The key construction technology and road safety prevention and control measures for san-ming south railway tunnel underneath passing expressway[J]. Construction Technology, 2016, 45 (17), 118-123.
- [8] 叶 飞,丁文其,王国波,等. 列车移动荷载对下穿公路隧道稳定性影响研究[J]. 岩土力学,2008,29(2): 549-552.
- YE Fei, DING Wenqi, WANG Guobo, et al. Influence of moving train load on stability of underlying highway tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics,2008, 29(2):549-552.
- [9] 吴占瑞,漆泰岳,唐进才. 浅埋大断面隧道施工工法优化分析[J]. 工业建筑,2012,49(8): 102-107.
- WU Zhanrui, QI Taiyue, TANG Jincai. Optimization analysis of shallow-buried large section tunnel construction method[J]. Railway Engineering, 2012,49(8): 102-107.
- [10] 午向阳,蒋宗全,李鹏飞,等. 大断面隧道下穿高速公路施工方案优化研究[J]. 铁道建筑,2010,50(11): 40-42.
- WU Xiangyang, JIANG Zongquan, LI Pengfei, et al Study on optimization of construction plan for large section tunnel under expressway[J]. Railway Engineering, 2010,50(11):40-42.
- [11] 唐明明,王芝银,李云鹏. 穿越公路偏压小净距隧道施工方法探讨[J]. 岩土力学,2011,32(4):1163-1168.
- TANG Mingming, WANG Zhiyin, LI Yunpeng. Study of construction methods for crossing bias small interval highway tunnel. [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 34 (4):1163-1168.
- [12] 陈林杰,梁波,王国喜. 浅埋暗挖超大断面地铁车站隧道开挖方法研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(4):928-933.
- CHEN Linjie, LIANG Bo, WANG Guoxi. Study of excavation method for shallow-buried subway station tunnels with super-large section [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9 (4): 928-933.
- [13] 张顶立,李鹏飞,候燕娟,等. 浅埋大断面软岩隧道施工影响下建筑物安全性控制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(1):95-102.
- ZHANG Dingli, LI Pengfei, HOU Yanjuan, et al. Experimental study on safety control of building during construction of shallow-buried soft rock tunnel with large section. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1):95-102.
- [14] 李健,谭忠盛,喻渝,等. 下穿高速公路浅埋大跨度黄土隧道施工措施研究[J]. 岩土力学,2011,32(9): 2803-2809.
- LI Jian, TAN Zhongsheng, YU Yu, et al. Research on construction procedure for shallow large-span tunnel undercrossing highway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32 (9): 2803- 2809.
- [15] 杨广武,关龙,刘军,等. 盾构法隧道下穿既有结构三维数值模拟分析[J]. 中国铁道科学,2009,30(6):54-60.
- YANG Guangwu, GUAN Long, LIU Jun, et al. Three-dimensional numerical simulation analysis of the shield-driven tunnel crossing under the existing structure[J]. China Railway Science,2009.30(6) :54-60.
- [16] 宋战平,王童,周建军,等. 浅埋偏压大断面隧道施工优化及受力特征分析[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(2):459-468.
- SONG Zhanping, WANG Tong, ZHOU Jianjun, et al. Analysis of construction optimization and mechanical characteristic of shallow large section tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017,13 (2):459-468.

(编辑 沈 波)