

引文格式:崔凌岳,王福文,孙铁成.浅埋暗挖交叉相贯隧道施工力学行为试验研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(2):115-123.

CUI Lingyue, WANG Fuwen, SUN Tiecheng. Experimental study on construction mechanical behavior of shallow-buried concealed intersecting tunnel[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(2): 115-123.

DOI:10.19815/j.jace.2022.03013

# 浅埋暗挖交叉相贯隧道施工力学行为试验研究

崔凌岳<sup>1</sup>, 王福文<sup>2</sup>, 孙铁成<sup>3,4</sup>

- (1. 中铁十八局集团第一工程有限公司, 河北 涿州 072750; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037;  
3. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043;  
4. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**为完善浅埋暗挖交叉相贯隧道在施工过程中的受力形式及变形特征,依托青岛某地铁工程,根据所选地铁车站的地质条件及衬砌结构特点浇筑衬砌模型并配制围岩相似材料,利用模型试验对采用全断面法在V级围岩环境下进行的风道和车站主体开挖过程的力学行为展开研究,并从隧道衬砌结构变形及地层内部位移变化规律两方面分析了浅埋暗挖交叉相贯隧道全断面开挖施工的力学行为。结果表明:对于交叉相贯位置处的隧道结构,已有隧道结构将改变后续施工隧道衬砌结构应变最大值及其出现位置;位于交叉相贯隧道结构附近不同象限内的围岩分别处于水平变形累加区和往复区;地表竖向变形最大点位于后续施工的车站上方且与交叉相贯位置存在一定距离,而在交叉相贯位置处的地表竖向变形值稍小;模型试验明确了交叉相贯隧道在施工过程中围岩及衬砌结构的变形特征,给出了隧道结构地表最大变形与施工步序间的时空关系;研究结果可为相关交叉相贯隧道结构的施工及设计提供依据。

**关键词:**地下结构;交叉相贯隧道;模型试验;浅埋暗挖;地表沉降

中图分类号:TU921

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)02-0115-09

## Experimental study on construction mechanical behavior of shallow-buried concealed intersecting tunnel

CUI Lingyue<sup>1</sup>, WANG Fuwen<sup>2</sup>, SUN Tiecheng<sup>3,4</sup>

- (1. The First Engineering Co., Ltd. of China Railway 18th Bureau Group Corporation Limited, Zhuozhou 072750, Hebei, China; 2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd, Beijing 100037, China;  
3. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China; 4. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China)

**Abstract:** In order to improve the stress form and deformation characteristics of the shallow-buried concealed intersecting tunnel during the construction process, based on a subway project in Qingdao, the lining model was poured according to the geological conditions of the selected subway station and the characteristics of the lining structure, and the similar materials of the surrounding rock were prepared. The model test was used to study the mechanical behavior of the

收稿日期:2023-03-03

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(5217083250)

作者简介:崔凌岳(1972-),男,高级工程师,E-mail:2439235409@qq.com。

通信作者:孙铁成(1974-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:sjz\_sti@stdu.edu.cn。

air duct and the main body of the station during the excavation process using the full-section method in the grade-V surrounding rock environment. The mechanical behavior of the full-section excavation of the shallow-buried concealed intersecting tunnel was analyzed from two aspects; the deformation of the tunnel lining structure and the internal displacement of the stratum. The results show that for the tunnel structure at the intersecting position, the existing tunnel structure will change the maximum strain and its position of the lining structure of the subsequent construction tunnel. The surrounding rock in different quadrants near the cross-intersecting tunnel structure is in the horizontal deformation accumulation zone and the reciprocating zone respectively. The maximum vertical deformation point of the surface is located above the station of the subsequent construction and has a certain distance from the intersection position, while the vertical deformation value of the surface at the intersection position is slightly smaller. The model test clarifies the deformation characteristics of the surrounding rock and lining structure during the construction of the intersecting tunnel, and gives the temporal and spatial relationship between the maximum surface deformation of the tunnel structure and the construction sequence. The research results can provide a basis for the construction and design of related intersecting tunnel structures.

**Key words:** underground construction; intersecting tunnel; model test; shallow-buried tunneling; surface subsidence

**Author resumes:** CUI Lingyue(1972-), male, senior engineer, E-mail: 2439235409@qq.com; SUN Tiecheng(1974-), male, PhD, professor, E-mail: sjz\_sti@stdu.edu.cn.

## 0 引言

随着中国地下工程建设的快速发展,为了最大限度地利用地下空间,不同类型的交叉隧道应运而生。其中,交叉相贯隧道因连接结构形式复杂、应力集中、隧道之间相互影响大等原因,具有较大的施工难度,且对施工过程的安全度要求较高<sup>[1-4]</sup>。

模型试验是对地下结构受力行为及变形规律进行研究的重要手段之一,国内外学者利用模型试验方法对地下结构已进行了诸多研究并取得了丰硕成果<sup>[5-15]</sup>,但关于地下结构在侧面交叉相贯的模型试验研究较少。刘新荣等<sup>[16]</sup>对不同高度的分叉隧道进行了三维模型试验,研究不同高度的新分叉隧道施工对现有隧道的影响;Genis 等<sup>[17]</sup>通过数值模拟研究了交叉浅埋隧道的稳定性评估;谢雄耀等<sup>[18]</sup>进行了一系列模型试验,以研究重叠隧道中盾构隧道施工对现有隧道的影响;李学峰等<sup>[19]</sup>设计了能够模拟隧道分步开挖的室内模型试验装置,并用该试验装置进行了砂土地层中新建隧道施工引起近接水平平行隧道位移的试验研究,重点研究了两平行隧道间净距、埋深对既有隧道位移的影响;杨志浩等<sup>[20]</sup>开展了公路隧道下穿倾斜煤层采空区室内相似模型试验,考虑了不同开挖进尺和初期支护参数的影响,

测量了隧道开挖过程中采空区附近地层的移动和初期支护的内力;阿卜杜拉等<sup>[21]</sup>开展了大尺寸盾构隧道开挖模型试验,真实地模拟了隧道的开挖过程,研究了盾构下穿对既有隧道内力的影响。

随着地下空间的逐步开发,交叉相贯结构形式在地下工程中越来越常见,而对于此类结构的受力行为及变形特征还存在许多待完善之处。为使工程设计和研究人员对交叉相贯结构在施工过程中的力学行为有更深入的了解,本文依托青岛地铁 3 号线某车站工程,选择地铁车站主体和风道交叉相贯部位的结构开展模型试验研究,详细介绍了该模型的原型、模型设计、试验设备和试验方法,分析了多个关键位置的垂直、水平变形和衬砌应变随施工过程的发展,明确了交叉相贯隧道在施工过程中围岩及衬砌结构的变形特征,进而为相关隧道结构的施工提供了依据。

## 1 试验内容及方法

### 1.1 模型相似法则及材料

模型试验考虑了 8 组相似比参数,根据相似理论<sup>[18]</sup>,利用方程分析法和量纲分析法推导的相似比见表 1。因涉及到地下结构的施工过程模拟,故在模拟试验中加入了时间相似比。

表 1 模型试验中各参数相似比

Table 1 Similarity ratio of parameters in model test

参数	几何	弹性模量	密度	黏聚力	摩擦角	应变	应力	时间
相似比	40	60	1.5	60	1	1	60	0.025

考虑到模拟试验的复杂性以及可操作性,对模型试验进行假设和近似:①未考虑实际围岩的分层和不均匀特性,而是假设地下结构处于均质围岩中且用均质材料来模拟围岩;②受目前试验条件及试验设备的制约,在模型试验中未考虑地下水的作用;③衬砌模型较薄,使其内部配筋变得异常困难,故在衬砌模型内部未配置钢筋;④实际地铁车站为包含初衬和二衬的复合衬砌结构,初衬是强度设计标号为 C25、厚 35 cm 的喷射混凝土结构,二衬是强度设计标号为 C45、厚 80 cm 的浇筑混凝土结构,依据模型试验的几何相似比和当前的试验条件,将复合衬砌简化为单层衬砌进行浇筑。利用强度等效原则计算后,最终确定以强度设计标号为 C30、厚 120 cm 的浇筑混凝土衬砌结构进行模拟,按几何相似比确定的衬砌模型厚度为 3 cm。

模型试验中衬砌由石膏、石英砂、重晶石和水制成。围岩简化成 V 级围岩,由粉煤灰、粉土、砂和油制成,通过调整混合料的配合比和饱和度,以达到围岩的设计摩擦角、密度和黏聚力,其中粉煤灰和粉土主要用于调节混合料的密度。通过试验确定了用于模拟隧道衬砌的石膏、石英砂、重晶石和水的配合比为 1:1:3.125:1.875,用于模拟围岩的粉煤灰、粉土、砂和油的配合比为 10:6:3:1,且期望参数和实际参数之间的差异小于 5%。表 2 和表 3 分别为隧道衬砌和围岩的原型及模型的物理力学参数。

表 2 衬砌原型和模型的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of lining prototype and model

C30 衬砌参数	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	抗压强度/ MPa	弹性模量/ MPa	泊松比
原型	2.50	15.00	31 000	0.2
模型	1.67	0.25	517	0.2

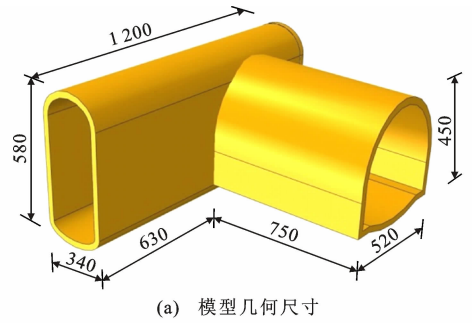
表 3 围岩原型和模型的物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of surrounding rock prototype and model

V 级围岩参数	密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )
原型	1.70	50.00	20
模型	1.13	0.83	20

## 1.2 试验设备及试验方法

试验采用的模型箱为无盖六面体,净空尺寸为 3.0 m(长) $\times$ 3.0 m(宽) $\times$ 1.8 m(高)。为模拟围岩



(a) 模型几何尺寸



(b) 制备完成模型

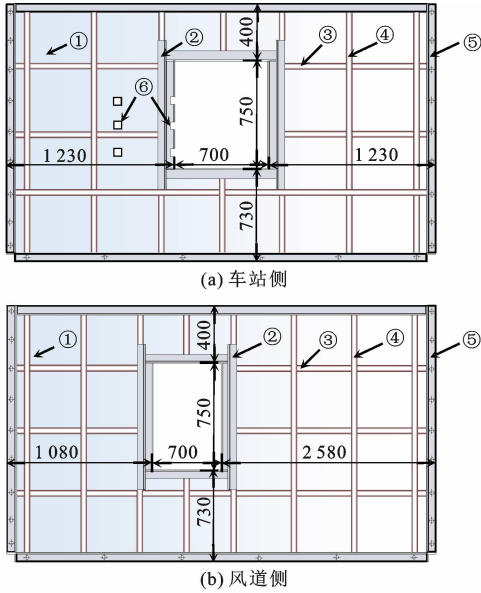
图 1 地铁车站及风道模型(单位:mm)

Fig. 1 Model of subway station and ventilation duct (unit:mm)

的开挖及地下结构的施工,在相交的模型箱两侧面分别预留 75 cm $\times$ 50 cm 和 75 cm $\times$ 70 cm 洞口,并在其外侧焊制马口以便安放可随时拆卸的木质挡土板条,每一木板条尺寸为 125 cm(长) $\times$ 10 cm(宽) $\times$ 5 cm(厚)。另外,为量测围岩在开挖过程中的水平变形,在模型箱侧壁上设置若干 5 cm $\times$ 5 cm 孔洞,其位置根据测点位置确定。模型箱主要构造及尺寸如图 2 所示。

衬砌应变采用 5 mm $\times$ 3 mm 的胶基应变片作为传感器,利用 UCAM-60B 静态应变仪采集数据。土压力采用面积为 117.28 mm<sup>2</sup> 的微型压力盒采集。根据试验要求,在地表同一位置处需要测量地表和围岩内部的竖向变形。因地表空间有限而制约了千分表或其他常规仪器的使用,试验采用高精度激光测距仪作为测距设备,并配合位移探杆实现位移精确测量,测量精度可达 0.1 mm。

根据地铁车站埋深的实际尺寸,依据相似理论推算出模型试验中的风道埋深为 18 cm,车站埋深为 21 cm。模型试验采用步长为 15 cm 的全断面法分段开挖,风道和车站分别设置为 8 段和 5 段。在围岩的开挖过程中,采用镀锌铁皮制作的临时支撑对所形成的围岩洞室进行支护。当开挖步长达到 15 cm 后,在临时支护内侧安置衬砌管片;当开挖洞室到达风道顶端时,将临时支护取出再安置衬砌管



(c) 模型箱

注：①—5 mm 厚钢板；②—L型槽钢；③—钢管梁  
④—钢管柱；⑤—框架角钢；⑥—预留孔

图 2 模型箱主要构造及尺寸(单位:mm)

Fig. 2 The structures and sizes of model casing (unit:mm)

片。由于试验设备的限制,模型试验的实施顺序按照先模拟风道衬砌施工(1~8段),然后再由车站端开挖围岩以模拟车站衬砌施工(9~13段),最终从车站端的围岩洞体内部破除风道侧壁来实现风道与车站的交叉相贯,开挖步序如图3所示。试验模型贯通后,间隔4h采集各项数据,直至数据相对稳定为止。

为保障模型试验能够顺利实施,采取了如下措施:①对模型箱侧壁进行光滑处理和设置预埋箱以减小试验的边界效应;②通过预埋定位标志物来保证风道和车站结构在围岩中的精确位置;③采取预埋方式埋设微型压力盒和位移测杆来保证试验数据的测试精度。

## 2 试验结果分析

### 2.1 围岩竖向变形分析

围岩竖向位移测点共计25组,测点具体布置位

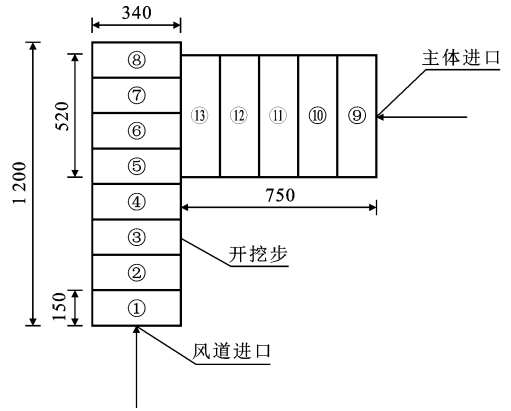


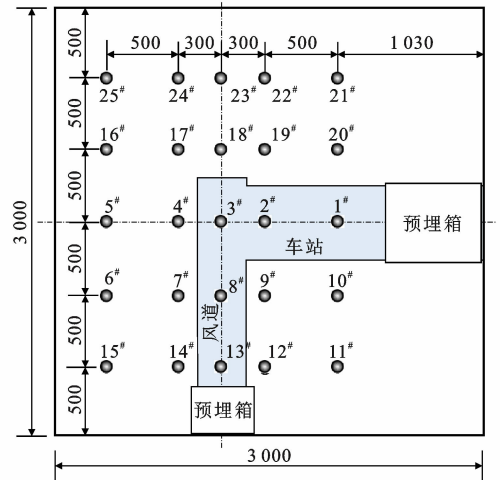
图 3 模型试验开挖步序(单位:mm)

Fig. 3 Excavation sequence of model test (unit:mm)

置及编号如图4所示。每一组测点需测量地表和距风道拱顶外边界5cm处的竖向位移。虽然车站与风道的埋深不同,但为了使沉降变形数据具有可比性,车站上部1#、2#围岩内部变形测点埋深仍取为13cm。



(a) 竖向位移测点布置照片



(b) 竖向位移测点布置

图 4 竖向位移测点布置(单位:mm)

Fig. 4 Layout of vertical deformation measuring point (unit:mm)

位于风道和车站结构轴线位置上方的地表竖向变形随模拟步序的变化规律如图5所示,其中负号

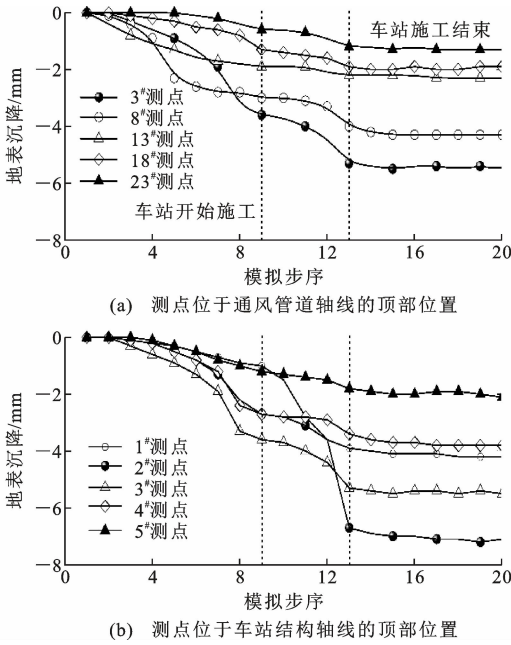


图 5 地表沉降随模拟步序的变化曲线  
Fig. 5 Variation curves of surface settlement with simulation sequence

表示地表沉陷,正号表示地表隆起。由图 5 可知:

(1)隧道掌子面向前推进的过程中,位于掌子面上方偏后一定距离处的地表竖向变形依次出现突变,变化量占竖向变形终值的 30%~40%;掌子面周围的地应力在围岩开挖后得到迅速释放,且由于地下结构的上覆土层薄,在其内所形成的土拱效应弱,致使该效应对竖向变形几乎没有支撑作用,从而使地表竖向变形出现突变,但因掌子面前方围岩对地表沉降具有约束作用,故变形出现突变的位置与掌子面有一定的距离。该距离与掌子面形状及大小、围岩物性、临时支护形式、隧道结构设置时间等诸多因素相关。具体的相关性规律将在后续研究中进行分析。

(2)对于未采取超前支护的浅埋暗挖地下结构,围岩全断面开挖会造成竖向变形的地表范围在隧道横断面上向隧道两侧延伸的长度大于 1 倍覆土厚度;围岩开挖后所形成的地下空间由于没有超前支护及上覆土层的有力约束,故此类地下空间与深基坑的地表沉降机理相似,由此可阐释地表出现变形的范围较其他隧道类型大的原因。此结论可通过 15# 和 25# 测点的地表具有竖向变形来证明。

(3)地表竖向变形最大点位于后续施工的车站上方且与交叉相贯位置存在一定距离,而交叉相贯位置处的地表竖向变形值稍小;受模型试验条件制约,车站与风道的贯通是采用先破除风道侧壁再施

做车站结构的顺序来实现,风道侧壁对交叉相贯位置处具有一定的支撑作用;另外,车站结构跨度(520 mm)大于风道结构跨度(340 mm),且车站结构施工需开挖的围岩空间大于风道结构。在此双重因素影响下,2# 测点地表竖向变形值最大,位于风道结构上方的 3# 测点竖向变形值次之。

### 2.2 围岩水平变形分析

围岩水平位移测点共计 18 个。在风道两侧距其侧壁外边界 10 cm 处布置 1#~12# 测点,其中 7#~9# 测点距车站侧壁外边界 50 cm,10#~12# 测点距车站侧壁外边界 10 cm。在车站两侧距车站侧壁外边界 10 cm 处布置 13#~18# 测点,且测点距风道侧壁外边界 10 cm。测点布置位置及编号如图 6 所示。部分测点的水平变形随模拟步序的变化如图 7 所示,其中水平变形的负号表示向地下结构内侧收敛,正号表示向地下结构外侧扩张。由图 7 可知:

(1)掌子面通过测点位置一定距离后,围岩的水平变形出现突变,并且试验采用全断面开挖法,使得水平变形亦最大;掌子面逐步接近水平变形测点位

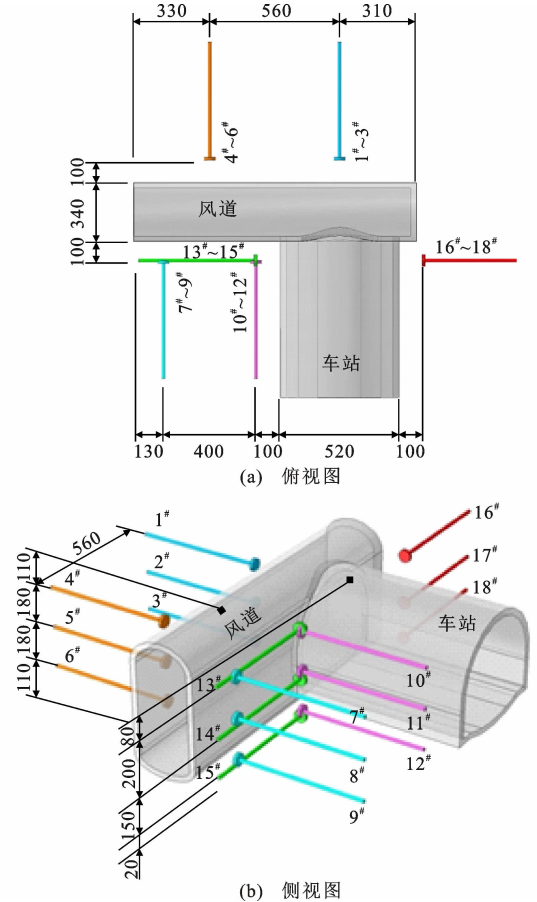


图 6 水平位移测点布置(单位:mm)  
Fig. 6 Layout of horizontal deformation measuring point (unit:mm)

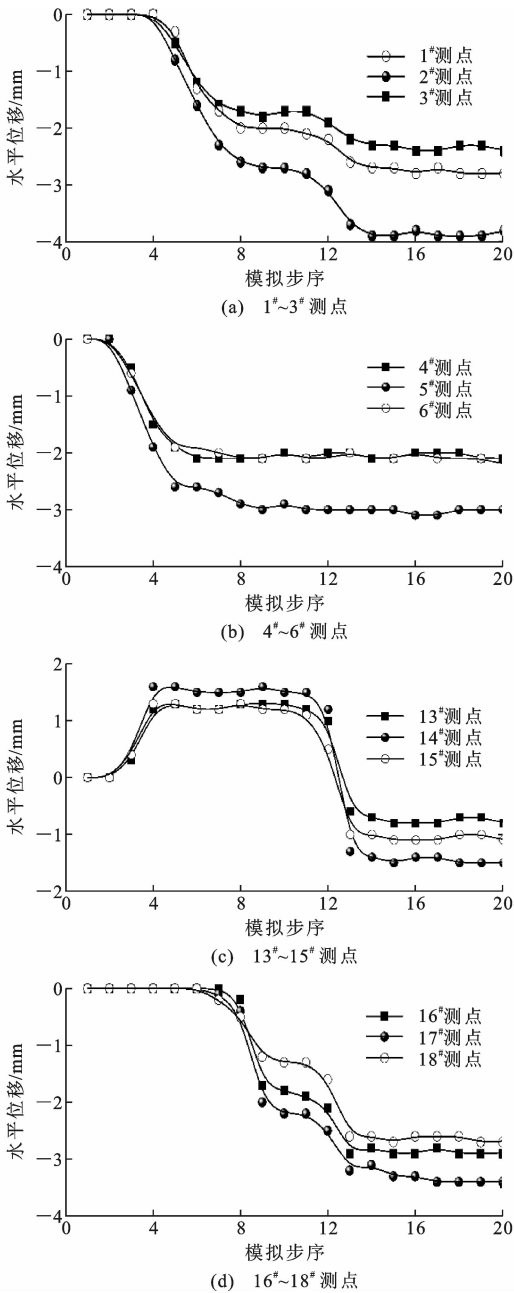


图7 围岩水平位移随模拟步序变化曲线

Fig. 7 Variation curves of horizontal deformation of surrounding rock with simulation sequence

置的过程亦是围岩扰动区逐渐发展到测点位置处的过程,该变化过程使围岩的水平变形从无到有。当掌子面通过水平变形测点位置时,虽然地应力得到释放,但该位置的变形仍受掌子面前方土体的约束,故只有掌子面通过变形测点位置一定距离后,该约束得到减弱,围岩在水平方向(包括平行和垂直隧道轴线两个方向)的变形才出现突变。

(2)掌子面与其前方测点的距离是该点沿隧道轴线方向水平变形的决定因素,水平变形随此距离的减小而逐步增大;掌子面前方土体对地层沿隧道

轴线和垂直于轴线方向的水平变形具有较强的约束作用。如前所述,该作用通常可用位于轴线上的测点到掌子面之间的距离来描述。

(3)由于地下交叉相贯结构在施工过程中的相互干扰,使位于不同象限内的地层水平变形随模拟步序变化而呈现的规律不同。由于风道的施工已经使该结构周围地层沿其轴线方向产生了水平变形,当车站施工时,因围岩应力释放而使车站结构周围地层产生垂直于其轴线的收敛变形,故位于风道和车站结构共同影响区域内的13#~15#测点地层水平变形具有往复变化特征,而1#~3#、16#~18#测点地层水平变形具有累加特征。呈现的规律之所以不同,主要是由于此类地下结构的施工对围岩进行二次扰动所致。为减小该现象对隧道施工造成的负面影响,工程技术人员需要在施工过程中采取各项措施以减小对围岩的扰动。

### 2.3 衬砌应变分析

隧道衬砌上共布置5个应变测试断面,其中风道衬砌上布置3个断面,车站衬砌上布置2个断面。应变片布设位置及编号如图8所示。部分测点的衬砌应变随试验持续时间的变化曲线如图9所示。由图9可知:

(1)衬砌铺设完毕后的较短时间内,衬砌不同部位的应变增幅不同,但衬砌应变随试验持续时间的延长均呈缓慢增加的趋势,且最终趋于恒值。由于试验条件的限制,在模拟开挖过程中地下围岩洞室

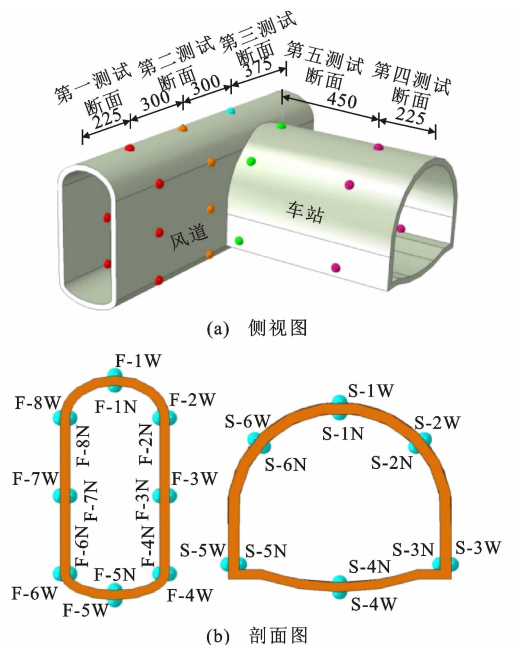


图8 应变探针布置(单位:mm)

Fig. 8 Arrangement of strain probes (unit:mm)

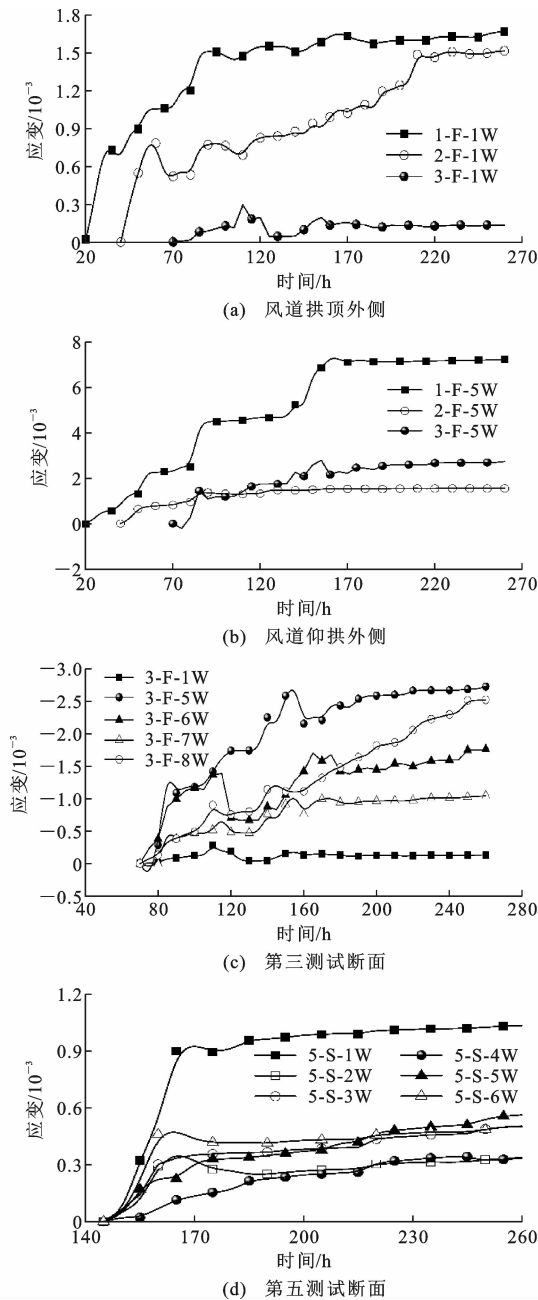


图9 衬砌应变-时间曲线

Fig. 9 Lining strain-time curves

不可能与衬砌结构外轮廓完全相同,而是存在一定程度的超挖;另外,衬砌结构置入围岩后,需通过对结构与围岩之间的缝隙进行回填来实现它们的紧密接触。围岩超挖量的多少以及此缝隙回填的密实程度均可影响衬砌应变的增幅程度,而随着试验持续时间的延长,围岩应力得到逐步释放,衬砌应变数据呈现缓慢增加趋势。当围岩应力全部释放完毕后,衬砌应变将趋于恒值不变,衬砌结构的真实受力状态得以反映。

(2)对于交叉相贯位置处的隧道结构,已有隧道结构将改变后续施工隧道衬砌应变最大值及出现的

位置;对于远离交叉相贯位置处的风道和车站结构,在施工过程中因几何位置相距较远而使其相互干扰程度较弱,故可将其施工过程理解为近似的独立施工。风道和车站结构在无相互干扰的情况下施工完毕,因上覆土层的土压力较小,衬砌应变最大值出现在仰拱处,这一现象在第一至第四测试断面的试验数据中可得到证实。另外,对于后续施工并靠近相贯位置的车站结构,先期施工完毕的风道结构对围岩具有支撑作用,因此其衬砌应变最大值位于拱顶处且小于其他测量断面,证明此处衬砌的受力形态不同于车站结构其他位置处。该结论可由第五测试断面处的测试数据进行验证。

(3)在后续车站结构向风道逐步靠近及破除风道侧壁后的试验过程中,风道侧壁不同位置处的应变变化规律不同。当车站结构的开挖施工逐步靠近风道侧壁时,作用于风道一侧的土压力逐渐减小,而另一侧的土压力逐步释放,致使第三测试断面上的F-6W、F-7W和F-8W测点处的衬砌应变呈增大趋势。在风道侧壁结构破除后,第三测试断面F-6W测点位置的衬砌应变出现突变,通过结构自身的应力调整使此处应变在较短时间内趋于稳定,而在结构拱肩F-8W位置的衬砌应变则缓慢增加,并且持续时间较长,趋于稳定后其应变值仅次于位于仰拱处的应变最大值。另外,所述衬砌力学行为的转变过程可通过1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>测点水平变形随模拟步序的变化规律进行间接证明。

### 3 结语

(1)地表竖向变形最大值位于后续施工的车站上方且与交叉相贯位置存在一定距离,而交叉相贯位置处的地表竖向变形值稍小。

(2)地下交叉相贯结构施工相互干扰,使位于此类结构相互干扰区与非相互干扰区的围岩分别处于水平变形往复区和累加区。

(3)对于交叉相贯位置处的隧道结构,已有隧道结构将改变后续施工隧道衬砌应变最大值出现的位置,且在后续车站结构向风道逐步靠近及破除风道侧壁后的试验过程中,风道侧壁不同位置处的应变变化规律不同。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 112-113.

- QIAN Qihu. Meet the climax of urban underground space development in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 112-113.
- [2] 陈涛. 小间距立体交叉隧道上穿施工结构变形分析[J]. 铁道建筑技术, 2020(6): 108-112.  
CHEN Tao. Deformation analysis of small spacing stereo cross tunnel overpassing construction structure[J]. Railway Construction Technology, 2020(6): 108-112.
- [3] 王海龙, 董捷, 武志辉, 等. 隧道近接施工对上部既有重载铁路隧道安全稳定影响研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(6): 102-111.  
WANG Hailong, DONG Jie, WU Zhihui, et al. Impact of undercrossing tunnel on safety and stability of existing heavy-duty railway tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(6): 102-111.
- [4] 贾宝新, 贾志波, 陈扬. 基于间距折减法浅埋小净距交叉隧道安全性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(2): 507-513.  
JIA Baoxin, JIA Zhibo, CHEN Yang. Safety analysis of shallow intersecting tunnel with low net-distance based on the method of spacing reduction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(2): 507-513.
- [5] 宫志群, 徐吉祥, 李阳, 等. 盾构隧道开挖引起围土变形模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增2): 546-553.  
GONG Zhiqun, XU Jixiang, LI Yang, et al. Model test study on deformation law of soil around shield tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 546-553.
- [6] 冯义. 大跨度小净距公路隧道模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增1): 18-23, 31.  
FENG Yi. Study on the model test of large-span and small-spacing road tunnel model[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S1): 18-23, 31.
- [7] KIANI M, AKHLAGHI T, GHALANDARZADEH A. Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 51: 108-119.
- [8] TSINIDIS G, PITILAKIS K, MADABHUSHI G. On the dynamic response of square tunnels in sand[J]. Engineering Structures, 2016, 125: 419-437.
- [9] 臧宏阳, 王非. 盾构隧道施工时地层沉降模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 568-572.  
ZANG Hongyang, WANG Fei. Large-scale physical modelling on the ground settlement induced by shield tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 568-572.
- [10] LEI M F, PENG L M, SHI C H. Model test to investigate the failure mechanisms and lining stress characteristics of shallow buried tunnels under unsymmetrical loading[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2015, 46: 64-75.
- [11] GILLIS K M, DASHTI S, HASHASH Y M A, et al. Seismic response of a cut-and-cover underground structure in dry sand: centrifuge modeling[C]//ICPMG. Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 2014. Perth: CRC Press, 2014: 991-997.
- [12] TSINIDIS G, PITILAKIS K, HERON C, et al. Experimental and numerical investigation of the seismic behavior of rectangular tunnels in soft soils[C]//PAPADRAKAKIS M, PAPADOPOULOS V, PLEVRIS V. Proceedings of the 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Kos Island: COMPDYN, 2013: 1152-1174.
- [13] 李新志, 李术才, 李树忱, 等. 极浅埋大跨度连拱隧道地表沉降模型试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(6): 1118-1121.  
LI Xinzhi, LI Shucui, LI Shuchen, et al. Study with geomechanical model test on surface subsidence of extremely shallow large-span double-arch tunnel[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(6): 1118-1121.
- [14] 方林, 蒋树屏, 林志, 等. 穿越断层隧道振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2709-2713, 2820.  
FANG Lin, JIANG Shuping, LIN Zhi, et al. Shaking table model test study of tunnel through fault[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2709-2713, 2820.
- [15] SUN T C, YUE Z R, GAO B, et al. Model test study on the dynamic response of the portal section of two parallel tunnels in a seismically active area[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2011, 26(2): 391-397.
- [16] 刘新荣, 郭子红, 裴丽, 等. 交错既有隧道次生力学效应三维模型试验[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2609-2616.  
LIU Xinrong, GUO Zihong, PEI Li, et al. Three-

- dimensional model test for secondary mechanical effect of existing forked tunnel with different altitudes [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(9): 2609-2616.
- [17] GENIS M, YILMAZ O, AKSOY C O, et al. Assessment of the stability of intersecting shallow tunnels with numerical modeling [J]. *Computer Methods for Geomechanics: Frontiers and New Applications*, 2011(2): 1049-1053
- [18] 谢雄耀, 牛俊涛, 杨国伟, 等. 重叠隧道盾构施工对先建隧道影响模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(10): 2061-2069.
- XIE Xiongyao, NIU Juntao, YANG Guowei, et al. Model test for effects of construction of shield tunneling in overlapping tunnels on existing tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(10): 2061-2069.
- [19] 李学峰, 杜守继, 张得焯. 砂土中隧道施工引起近接隧道位移的试验研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(2): 270-275.
- LI Xuefeng, DU Shouji, ZHANG Dexuan. Model test study on displacements of existing tunnel induced by adjacent tunnel construction in sandy soil [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(2): 270-275.
- [20] 杨志浩, 方勇, 杨斌, 等. 公路隧道下穿倾斜煤层采空区室内开挖模型试验 [J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(4): 974-981, 1055.
- YANG Zhihao, FANG Yong, YANG Bin, et al. Indoor model test of highway tunnel construction underlying inclined mined out area [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(4): 974-981, 1055.
- [21] 阿卜杜拉, 雷春明, 田雨, 等. 盾构下穿对既有隧道影响的模型试验研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(增2): 540-545.
- QAYTMAS Abdul Motaleb, LEI Chunming, TIAN Yu, et al. Model test study on influence of the undercrossing shield tunnel on the existing tunnel [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(S2): 540-545.