

# 上下斜交盾构隧道施工净距对既有隧道影响的模型试验研究

王超东<sup>1</sup>, 赖鹏安<sup>1</sup>, 曹洋<sup>2</sup>, 杨生<sup>2</sup>

(1. 中交二公局第四工程有限公司, 河南 洛阳 471000; 2. 福州大学 土木工程学院)

**摘要:**以福州地铁2号线鼓山至上洋区间隧道斜交上穿施工为背景,通过室内模型试验研究两隧道净距变化时,新建隧道上穿施工对周围土层及既有隧道附加内力的影响,为滨海富水软弱地层中盾构隧道小净距施工起到指导作用。结果表明:新建隧道上穿施工过程中,同一土层平面上距离隧道轴线越近的土体受扰动影响越明显,对应土压力变化越大,不同层面土体越靠近新建隧道受影响越显著;既有隧道受上部隧道施工影响,各测点附加内力变化规律相似,影响范围主要集中在新建隧道开挖断面前后 $-1.0D\sim 1.5D$ 区域;当隧道施工净距减小时,既有隧道上方土层受扰动影响更为显著,对应隧道结构附加内力峰值与变化率均明显增加。

**关键词:**盾构隧道;斜交上穿;穿越净距;富水软土;模型试验

## 1 引言

随着城市轨道交通建设的快速发展,路网结构逐渐形成。与此同时,地铁盾构隧道在施工过程中的交叠穿越问题也随之出现,且穿越净距正逐渐缩小。

国内外学者对隧道近接施工相关问题进行了大量研究,并取得了丰富的成果。蒋华春等针对盾构下穿地下通道这一现象,利用三维建模分析方法研究了结构受力变形规律,提出相应施工控制对策;陈发东通过数值分析方法研究了盾构侧穿桩基施工对地层及内部桩体的影响;张海波依托上海地铁明珠线叠交隧道工程,使用有限元软件研究近距离施工时既有衬砌结构变形的规律;陈先国针对近距离双线隧道,使用数值计算软件,分析不同影响因素下双线隧道相互影响规律,认为主要影响因素有围岩等级、隧道间的间距等;刘秋常、曾学艺、胥明等从地层注浆的角度,对比探讨了加固措施对盾构穿越施工影响的改善效果。

试验研究方面,Obert通过室内试验与数值模拟相验证的方法,研究了不同净距条件下新建隧道施工对既有隧道二衬内力的影响规律;李学峰设计了能够模拟隧道分步开挖的室内模型试验装置,开展了砂土地层中新建隧道施工引起近接平行隧道位移的试验研

究,得到两平行隧道间净距、埋深对既有隧道位移的影响规律;朱合华等依托上海地铁M8线区间隧道工程,开展在不同埋深、不同刀盘开口率及不同推进速度等盾构参数影响下的模型试验研究,得到盾构参数之间及其与地层特性之间的适应性关系;何川等采用数值分析与模型试验相互验证的手段,得出不同围岩条件、隧道净距、顶推力作用因素对盾构隧道正交下穿既有隧道所引起既有隧道的变位和附加内力分布变化的影响规律。

目前对于盾构隧道近接施工影响的研究多集中在净距大于1倍洞径范围,对于斜交小净距隧道的研究相对较少。该文以福州地铁2号线穿越既有隧道工程(最小净距3.87 m)为研究背景,通过室内模型试验手段,研究滨海富水软弱土层环境中,新建隧道以不同净距,尤其是小于1倍洞径小净距上穿施工对既有隧道及周边地层的影响规律,以期类似地铁工程建设提供参考。

## 2 工程概况

福州地铁2号线全长30.623 km,区间线路采用盾构法施工,隧道内径为5.5 m,外径为6.2 m,由混凝土管片拼接而成。上洋一鼓山区间4条线路并行,

并于中间段位置由出入线 30°小角度上穿正线。由于两正线上穿辅助线状况基本相同,取右线隧道穿越区域关系及对应地层特性如图 1 所示,其中正线埋深 10.75 m,与既有出入线净距为 3.87 m,约为 0.5 倍洞径。

隧道开挖所处地层以淤泥和淤泥质土等滨海富水软弱土层为主,强度较低,具体参数见表 1。施工场地初见水位埋深为 0.50~3.60 m,混合稳定水位埋深为 0.80~3.70 m,承压含水层中砂、卵石层的稳定水位埋深为 2.18 m。

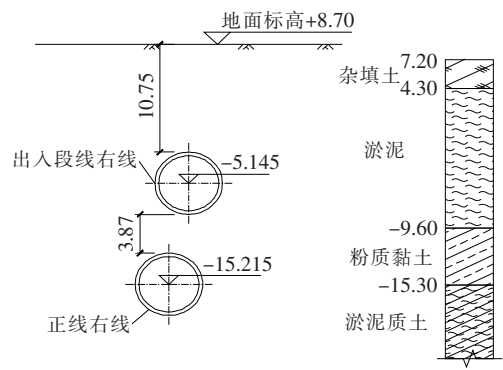


图 1 近接剖面图(单位:m)

表 1 土层参数

名称	层厚/ m	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	泊松比
人工填土	2.9	1.85	2.60	6.0	18.0	0.32
淤泥	11.7	1.64	1.83	10.4	5.8	0.38
黏土	4.5	1.96	5.63	29.6	13.2	0.31
淤泥质土	15.1	1.74	3.23	18.0	11.6	0.39

### 3 试验设计

#### 3.1 相似比确定

考虑到盾构施工对周边土层的影响范围,于隧道横纵断面方向各取  $3D \sim 5D$  长度为研究区域,其中  $D$  为隧道直径,对应实际大小为  $60 \text{ m} \times 60 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。基于相似比理论,同时为便于试验顺利开展,确定缩尺试验模型的几何相似比为  $S_L = 1 : 20$ ,常规重力场中重力加速度相似比取  $S_a = 1 : 1$ ,弹性模量相似比为  $S_E = 1 : 20$ ,进而运用量纲分析法确定其他试验参量相似比,由此得到此次模型试验的外围尺寸为长 300 cm、宽 300 cm 和高 150 cm。

#### 3.2 模型土

试验过程中需考虑盾构开挖对土层的扰动效果,因此模型土的性质主要通过密度、黏聚力、内摩擦角和压缩模量进行控制,又因现场穿越地层以软弱土为主,模型土制作则以此类土为目标,配制时以重晶石粉、粉细砂、膨润土、洗衣液、水为原料。通过调节重晶石粉比例改变模型土密度,调节粉细砂比例改变内摩擦角,调节膨润土比例改变压缩模量,调节洗衣液比例改变黏聚力。利用正交试验方法,最终确定配比为每 1 kg 标准模型土中,重晶石粉 140 g,粉细砂 560 g,膨润土 120 g,洗衣液 30 g,水 150 g。虽未能完全满足相似要

求,但仍属于高压缩性土,且其余参数能较好地满足相似要求,所得模型土参数如表 2 所示。

表 2 模型土参数

项目	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
原型土	1.83	3.18	17.50	10.3
模型土	1.90	1.13	1.13	10.3

#### 3.3 盾构模型

隧道衬砌断面为圆形断面,外径 6.2 m,内径 5.5 m,管片采用 C55 钢筋混凝土预制而成,环纵向接头螺栓选用 6.8 级的钢材,厚度为 0.35 m,幅宽为 1.2 m。原型盾构管片纵向刚度为  $27.45 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。基于上述相似比参数控制方法,试验采用直径为 31 cm 的 PE 管作为隧道管片模型材料,在试验中必须考虑隧道接头对隧道模型刚度的削弱作用,根据刚度等效原理,则实际模型盾构管片的材料纵向抗弯刚度为  $10.64 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。具体材料各项参数如表 3 所示。

表 3 管片参数

项目	直径/m	弹性模量/GPa	厚度/m	环宽/m
原型管片	6.20	34.50	0.35	1.20
模型管片	0.31	1.77	0.01	0.06

模型盾构机如图 2 所示,由支撑、千斤顶、电机、连杆、刀盘、推拉杆和管片组成。模拟开挖的主要过程为:转动杆与前端刀盘相连,转动电机固定在可推拉前进的具有一定刚度的钢板平台上。管片架在前端支撑和后端支撑上,管片与后端钢板平台支撑相固定,转动电机转动前端刀盘切削土体,千斤顶顶在后端固定支撑上顶推钢板带动管片向前推进,达到开挖与安装管片共同进行的目的。盾构机共掘进 32 环,每掘进一环,在施工平台上用砖铺满钢板平台与后端固定支撑的空隙,减小千斤顶顶推长度,使得千斤顶的顶推力沿砖头传向后端固定支撑上,掘进参数如表 4 所示。



图 2 模型盾构机及管片

表 4 盾构机掘进参数

项目	单环进尺/cm	速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	顶推力/kPa
原型	120	28.62	5	200
模型	6	6.00	5	10

3.4 试验工况

模型盾构机自东向西掘进,分别将隧道净距设置为 1.0*D*、0.75*D* 和 0.5*D*,其中 *D* 为盾构隧道模型直径,取为 31 cm,对应实际盾构隧道直径为 6.2 m。模型箱上部新建隧道开挖高度不变,在其中放置模型土过程中,于对应高差位置处放置既有隧道模型,并保持各工况两隧道交叠角为 30°。

试验过程中将针对两隧道间土层压力及既有隧道结构内力进行监测。净距为 0.5*D* 工况下共布置两层土压力盒,分别为距既有隧道顶面 5、10 cm;净距为 0.75*D* 时共布置 3 层土压力盒,分别为距既有隧道顶面 5、10、15 cm;净距为 1.0*D* 时共布置 4 层土压力盒,分别为距既有隧道顶面 5、10、15、20 cm,分别对应工程现场尺寸 1、2、3、4 m。以 1.0*D* 工况为例,土压力盒分层布置如图 3 所示。在同一平面上土压力盒布置以两隧道交点为中心,向平行及垂直于既有隧道方向 50 cm 处各布置一个,各平面布置如图 4 所示。

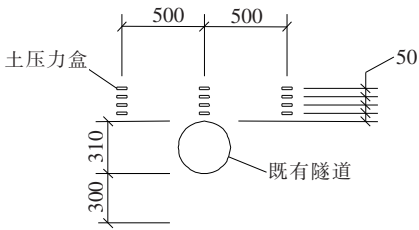


图 3 土压力盒分层测点布置(单位:mm)

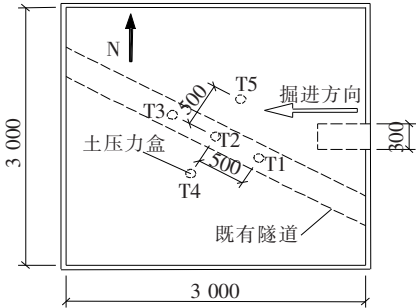


图 4 土压力盒平面测点布置(单位:mm)

沿既有隧道纵向共布置 5 个纵向内力测量断面粘贴测力应变片,其中中间断面位于与新建隧道交点处,各断面间隔 25 cm,如图 5 所示。通过静态应变采集系统测得各点应变,并结合模型盾构隧道参数,经式(1)、(2)换算得到既有隧道轴力 *N* 和弯矩 *M* 大小。

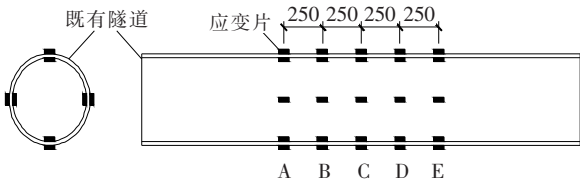


图 5 附加内力测点布置(单位:mm)

$$N=A \cdot \sigma \tag{1}$$

$$M=W \cdot \sigma \tag{2}$$

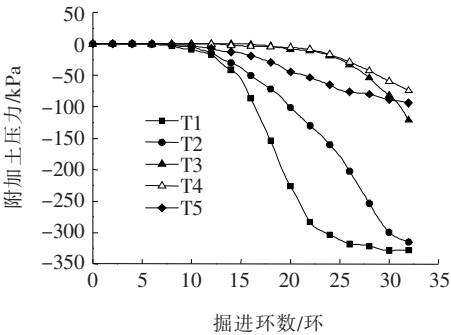
式中:*A* 为管片截面面积;*W* 为管片抗弯惯性矩; $\sigma$  为由应变测量及圆管模量计算所得应力值。

4 1.0*D* 净距结果分析

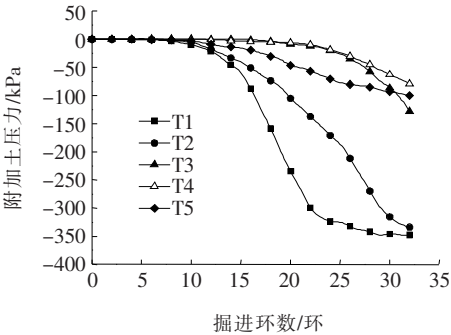
4.1 土压力

当新建隧道与既有隧道成 30°夹角,净距为 1.0*D* 时,开挖引起土层扰动规律如图 6 所示,最大变幅如表 5 所示,表 5 数据均按相似比关系换算成原型值,其中 *H* 为测点距已建隧道拱顶的实际距离。

由图 6 及表 5 可以看出:新建隧道开挖引起周围地层扰动规律不统一。各测点附加土压力变化主要发生在距新建盾构掌子面 −1.5*D*~1.0*D*,在掘进后期



(a)  $H=1\text{ m}$



(b)  $H=2\text{ m}$

图 6 附加土压力变化曲线

表 5 掘进完成时各测点附加土压力值

测点编号	附加土压力/kPa		增幅/ %
	$H=1\text{ m}$	$H=2\text{ m}$	
T1	-326.07	-347.62	6.60
T2	-315.22	-334.00	5.96
T3	-121.31	-126.54	4.31
T4	-74.33	-76.76	3.27
T5	-94.27	-97.89	3.84

附加土压力缓慢增长且逐渐趋于稳定。在相同平面上,由于 T1 距离初始掌子面位置最近,其附加土压力大于既有隧道轴线上的 T2、T3 测点。T4、T5 测点在既有隧道两端,且距离较远,其附加土压力较小。在既有隧道轴线上 T3 测点附加土压力也相对较小,是由于试验未掘进至该测点断面。在同一立面上,各测点附加土压力变化曲线相一致,距离既有隧道拱顶越近,附加土压力值越小,且沿既有隧道轴线上的土压力测点增幅较大,而两侧的增幅相对较小。

4.2 附加内力

由于模型试验中只掘进 32 环,未到达 D、E 断面,因此只选取 A、B、C 为分析断面。当新建隧道与既有隧道成  $30^\circ$  夹角时,开挖引起既有隧道纵向附加内力变化规律如图 7、8 所示,图中数据均按相似比关系换

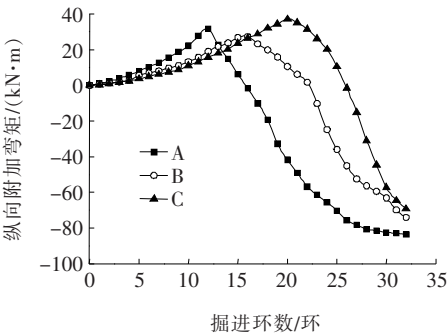


图 7 既有隧道纵向附加弯矩变化曲线

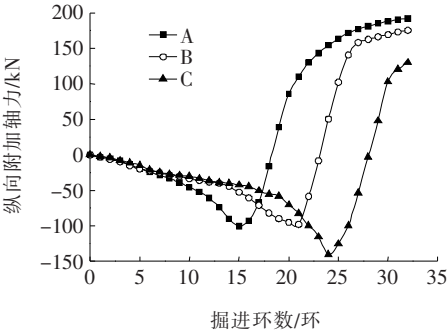


图 8 既有隧道纵向附加轴力变化曲线

算成原型值。  
由图 7、8 可知:A、B、C3 个测量断面的附加弯矩及附加轴力沿掘进方向依次出现转折点。在附加弯矩和附加轴力出现峰值前,既有隧道产生正的附加纵向弯矩和负的纵向轴力,随着新建隧道的掘进两者分别向相反方向发展。当新建隧道掘进至测点断面前  $1.0D$  处,该断面的纵向附加弯矩出现峰值,当掘进至某测点断面前  $0.3D$  处,该断面的附加轴力出现峰值,且各断面间的弯矩和轴力值相差不大。

5 工况对比分析

5.1 土压力

由于试验中只掘进 32 环,未达到 T3 测点断面,而既有隧道两侧的 T4、T5 附加土压力变化较小,且研究对象是既有隧道,因此选取在  $H=1\text{ m}$  及  $H=2\text{ m}$  的平面上 T1、T2 作为分析目标。当新建隧道与既有隧道净距变化时,开挖引起 T1、T2 测点在  $H=1$ 、 $H=2\text{ m}$  平面上土层扰动变化规律如图 9、10 所示。

由图 9、10 可知:各工况的 T1、T2 附加土压力变化曲线规律与原型试验的规律相类似。掘进完成时, T1 在  $H=1\text{ m}$  的平面上的附加土压力分别为  $-328.07$ 、 $-376.69$ 、 $-437.91\text{ kPa}$ ,较  $1.0D$  工况增

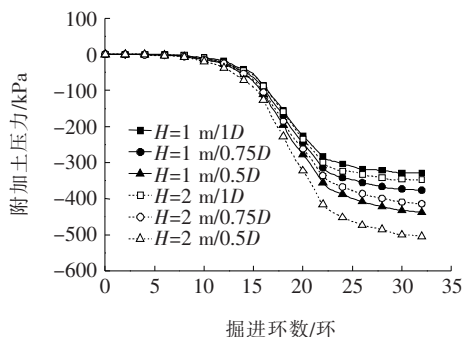


图9 T1附加土压力变化曲线

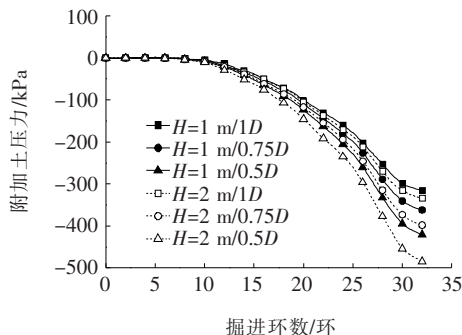


图10 T2附加土压力变化曲线

幅约为14.82%、33.48%。在 $H=2$  m的平面上分别为-347.62、-414.45、-504.60 kPa,较1.0D工况增幅约为19.22%、45.16%。在相同T1测点 $H=2$  m平面较 $H=1$  m平面的增幅约为5.96%、10.02%、15.23%。因此在距既有隧道拱顶相同距离的平面上,随着净距的减小,既有隧道上方附加土压力值增幅越大,对土层的扰动影响越显著。在距既有隧道拱顶不同距离的平面上,相同测点位置土压力变化随着净距的减小影响效果也逐渐增大。主要是由于两隧道净距减小时, $H=1$  m与 $H=2$  m平面离新建隧道开挖面的距离也随之越近,从而引起较大的附加土压力变化。

## 5.2 附加内力

由于A、B、C测点断面附加内力变化规律相似,因此选取分叉段A与重叠段C作为分析目标。在不同净距的影响下,新建盾构隧道上穿既有隧道施工引起的既有隧道纵向附加内力变化如图11、12所示。

由图11、12可知:新建隧道以不同净距上穿既有隧道施工过程中引起既有隧道纵向附加内力曲线变化规律基本一致,当掘进完成时,A测点附加弯矩分别为-83.65、-113.76、-153.92 kN·m,较1.0D工况增幅约为35.99%、84.00%。C测点附加弯矩分别为-69.31、-90.26、-123.53 kN·m,较1.0D工况增幅约为30.22%、78.22%。A测点附加轴力分别为192.07、268.89、349.57 kN,较1.0D工况增幅约为

39.98%、82.01%。C测点附加轴力分别为130.25、180.35、234.06 kN,较1.0D工况增幅约为38.46%、79.70%。说明相同测点附加内力随着两隧道净距的减小而显著增大,对既有隧道的安全越不利。且在相同工况下,A测点附加内力大于C测点,说明沿着既有隧道纵向,离新建隧道初始掌子面越近的测点,其附加内力受施工影响越大。

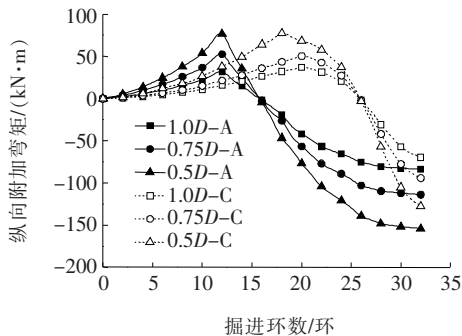


图11 不同工况下纵向附加弯矩变化曲线

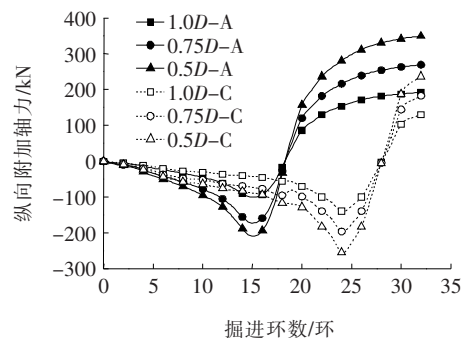


图12 不同工况下纵向附加轴力变化曲线

## 6 结论

通过盾构斜交穿越室内模型试验,研究了盾构隧道上穿施工对周围土体及既有隧道结构的影响,可为滨海富水软土地层中小净距盾构穿越施工提供一定参考,得到以下结论:

(1) 新建隧道开挖过程中,同一土层沿隧道轴向方向的土体受扰动影响较大,两侧相对较小。两隧道间不同土层中,距离新建隧道拱底越近,附加土压力值变化越明显。

(2) 小净距盾构隧道斜交上穿施工过程中,既有隧道各测点附加内力变化曲线规律相似,主要影响范围为新建隧道掘进断面前后 $1.0D \sim 1.5D$ 区域,且距新建隧道掌子面越近,附加内力变化越大。

(3) 两隧道施工净距越小,既有隧道上方各土层

# BIM 技术在桥隧相接部位方案设计中的应用

黄成岑<sup>1</sup>, 李洋溢<sup>2</sup>, 袁通<sup>2</sup>

(1. 广西交通投资集团有限公司, 广西南宁 530029; 2. 广西交通设计集团有限公司)

**摘要:**依托某高速公路在偏压地形条件下桥隧相接部位局部基础落空案例,通过对比介绍初始拟定方案和采用 BIM 技术确定的最终方案,说明了采用 BIM 技术在该方案确定过程中的优越性。

**关键词:**桥隧相接; 基础落空; BIM 技术

BIM 技术( Building Information Modeling)是对工程项目的物理特征、功能特性和管理要素的共享数字化表达。近年来,BIM 技术以其可视化、信息化等特点在建筑行业得到了快速的发展。其在项目建设过程中具有显著的优势:① 在建设过程中,运用 BIM 多维度模拟功能可对施工方案提前预演,并有助于精细化管理,实现对项目的高效控制;② BIM 模型中构件所包含的信息可以表达构件的属性和行为,支持数字化的分析工作。当前 BIM 技术在中国公路建设领域还处于逆向设计阶段,即采用传统的设计手段完成后,

通过 BIM 技术对设计成果进行演示。该文依托某高速公路建设过程中遇到的在偏压地形情况下桥隧相接部位局部基础落空的案例,结合三维倾斜摄影技术和 BIM 技术实现三维实景建模,通过提取特殊部位的横断面等信息,进而确定较为精准的设计方案。

## 1 项目概况

某高速公路设计时速为 80 km/h,桥隧占比约 50%,其中桥隧相接部位较多。图1为某隧道进口与

受扰动影响越显著。两隧道施工净距减小至 1 倍洞径以内时,既有隧道附加内力变化规律相似,但峰值增加明显,将在一定程度上影响结构稳定性。

## 参考文献:

- [1] 孙均,刘洪洲. 交叠隧道盾构法施工土体变形的三维数值模拟[J]. 同济大学学报,2002(4).
- [2] Yamaguchi I, Yamazaki I, Kiritani Y. Study of Ground-Tunnel Interactions of Four Shield Tunnels Driven in Close Proximity in Relation to Design and Construction of Parallel Shield Tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology,1998,13(3):289-304.
- [3] 蒋华春,傅鹤林,梁新权,等. 盾构隧道下穿地道桥施工扰动效应及控制对策研究[J]. 中外公路,2017(2).
- [4] 陈发东. 盾构隧道施工对临近桥梁桩基及周围土体影响的模拟研究[J]. 中外公路,2018(6).
- [5] 张海波,殷宗泽,朱俊高. 近距离叠交隧道盾构施工对老隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学,2005(2).
- [6] 陈先国,王显军. 近距离重叠隧道的二维和三维有限元分

析[J]. 西南交通大学学报,2003(6).

- [7] 刘秋常,马百顺,陈守开. 盾构施工不同加固措施对临近高架桥桩基影响研究[J]. 中外公路,2018(1).
- [8] 曾学艺,李垚,彭斌. 大直径盾构隧道穿越粉细砂地层注浆加固预处理研究[J]. 中外公路,2017(2).
- [9] 胥明,张细宝,刘卫,等. 南昌地铁盾构下穿建筑物注浆加固技术研究[J]. 中外公路,2016(1).
- [10] Obert. Parametric Studies on the Interaction between Existing and New Bored Tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2004(4).
- [11] 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(2).
- [12] 朱合华,徐前卫,郑七振,等. 软土地层土压平衡盾构施工参数的模型试验研究[J]. 土木工程学报,2007(9).
- [13] 汪洋,何川,曾东洋,等. 盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J]. 铁道学报,2010(2).
- [14] 何川,曾东洋. 盾构隧道结构设计及施工对环境的影响[M]. 成都:西南交通大学出版社,2015.