

文章编号: 1007-2993(2024)05-0560-06

# 基于 HSS 模型双线隧道上跨施工对既有地铁影响

李文乾<sup>1</sup> 黄高亮<sup>2</sup> 朱潇昂<sup>1</sup> 刘明洪<sup>1</sup> 陈俞超<sup>3</sup> 胡安峰<sup>3</sup>

(1. 中铁十局集团城市轨道交通工程有限公司, 广东广州 510000; 2. 杭州市建设工程质量安全监督总站, 浙江杭州 310005; 3. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江杭州 310030)

**【摘要】** 针对某新建盾构隧道近接上跨既有地铁项目, 基于小应变硬化模型(HSS), 建立了三维有限元模型, 通过与实测数据和莫尔-库伦模型计算结果的对比, 验证了 HSS 模型计算的可靠性和优越性。在此基础上, 进一步分析了新建隧道施工引起的既有隧道竖向变形特征, 及隧道水平净距和叠交角度两参数对既有隧道变形的影响规律。结果表明: HSS 模型计算结果与实测值吻合较好, 能有效预测既有地铁隧道的变形; 在新建隧道上跨穿越的影响下, 既有地铁隧道产生竖向隆起变形, 且变形主要发生在盾构下穿前的 1.5 倍新建隧道直径到穿越后的 2 倍新建隧道直径范围内; 既有地铁隧道隆起峰值点会随着盾构二次穿越而发生偏移, 且其竖向变形曲线呈现出“双峰”趋势; 增大双线隧道水平净距和新旧隧道叠交角度, 都能使既有隧道的变形减小。

**【关键词】** 盾构隧道; 上跨穿越; 隧道竖向位移; 数值计算; HSS 本构模型

**【中图分类号】** U455

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.05.009

## Influence of Double Track Shield Tunnel Overpassing Construction on Existing Subways Based on HSS Model

Li Wenqian<sup>1</sup> Huang Gaoliang<sup>2</sup> Zhu Xiaolang<sup>1</sup> Liu Minghong<sup>1</sup> Chen Yuchao<sup>3</sup> Hu Anfeng<sup>3</sup>

(1. China Railway Tenth Bureau Group Urban Rail Transit Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China; 2. Hangzhou Construction Project Quality and Safety Supervision Station, Hangzhou 310005, Zhejiang, China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310030, Zhejiang, China)

**【Abstract】** A three-dimensional finite element model was established based on the HSS constitutive model for a newly constructed shield tunnel adjacent to an existing subway project. The correctness of the numerical calculation was verified by comparing it with measured data. On this basis, further analysis was conducted on the vertical deformation characteristics of existing tunnels caused by the construction of new tunnels, as well as the influence of the two parameters of tunnel horizontal clearance and overlap angle on the deformation of existing tunnels. The results show that the calculated results of HSS model are in good agreement with the measured values, and can effectively predict the deformation of existing subway tunnel. Under the influence of the new tunnel overpassing, the existing subway tunnel has vertical uplift deformation, and the deformation mainly occurs in the range of 1.5 times the diameter of the new tunnel before the shield tunneling under-crossing to 2 times the diameter of the new tunnel after the crossing. The uplift peak point of the existing subway tunnel will shift with the second crossing of the shield, and its vertical deformation curve shows a "double peak" trend. Increasing the horizontal clearance of double track tunnels and the overlapping angle of new and old tunnels can reduce the deformation of existing tunnels.

**【Key words】** shield tunneling; shield overpassing; vertical displacement of tunnel; numerical calculation; HSS constitutive model

### 0 引言

受前期规划施工经验不足和未来城市发展需要的影响, 地层中多线叠交的地铁线路将越来越多, 地

铁线路的建设逐渐趋于复杂化<sup>[1-4]</sup>。探究新建隧道近接穿越对既有隧道的变形影响规律, 对保障既有隧道的正常运营与安全维护具有重要的现实意义。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51978612)

**作者简介:** 李文乾, 男, 1990 年生, 汉族, 河北邢台人, 学士, 助理工程师。研究方向: 隧道工程施工技术管理。E-mail: 844260617@qq.com

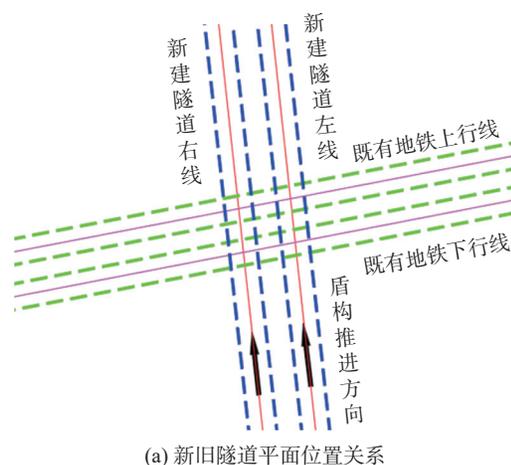
房明等<sup>[5]</sup>采用有限元方法研究了新建隧道盾构正交下穿施工对既有隧道的影响,并探究了不同条件下,盾构下穿施工对既有隧道位移的影响。Wang等<sup>[6]</sup>基于有限元软件,采用土体硬化小应变模型分析了盾构施工对上覆地下管线的影响。丁智等<sup>[7]</sup>依托杭州地铁1号线项目,采用数值分析的方法,得到新建盾构隧道不同穿越工况下既有地铁的变形和内力分析及近接分区的范围。黄德中等<sup>[8]</sup>采用离心模拟试验与现场实测相结合的方法,分析了上海外滩盾构通道上穿地铁2号线引起的既有隧道变形规律。Liang等<sup>[9]</sup>通过将隧道视为具有一定等效抗弯刚度的连续欧拉-伯努利梁的基础上提出了一种用于评估上穿施工对既有隧道产生的影响的理论方法,并通过有关工程验证了该方法的合理性。张琼方等<sup>[10]</sup>通过分析杭州地铁4号线盾构隧道下穿运营隧道1号线的实测数据,研究了盾构近距离穿越对既有地铁隧道的变形影响。张孟喜等<sup>[11]</sup>通过三维有限元数值模拟手段,确定了新建隧道施工的合理注浆压力,并得到了广州地铁七号线的变形规律。张毫毫等<sup>[12]</sup>则通过非连续精细化模型,着重分析了隧道正交下穿施工扰动下,既有盾构隧道管片与接头的受力和变形规律。许有俊等<sup>[13]</sup>通过对呼和浩特市浅埋暗挖隧道四种施工方案的比选,得到了上穿工程中控制盾构隧道上浮变形的最优方案及其上浮变形规律。

尽管目前已有学者开展了盾构施工影响规律研究,但其研究大多是针对双线叠交隧道掘进施工开展的,研究的工况主要为下穿工况,且在建立数值模型时多数使用莫尔-库仑本构模型。而HS-Small本构模型(HSS)作为硬化土体本构模型的扩展,能考虑小应变范围内土体剪切模量随应变增大而衰减的特点,同时可以考虑软黏土的压硬性与其剪胀性<sup>[14]</sup>,在模拟软黏土中有独特的优越性。因此本文依托杭州某新建地铁隧道上跨既有地铁线的实际工程,基于HSS本构建立相应的三维数值模型,分析新建双线隧道近接上跨施工过程中既有地铁隧道的沉降变化趋势,并在此基础上分析双线隧道水平净距和新建隧道叠交角度两因素对隧道变形的影响规律。研究成果对类似隧道上跨工程有一定的参考意义。

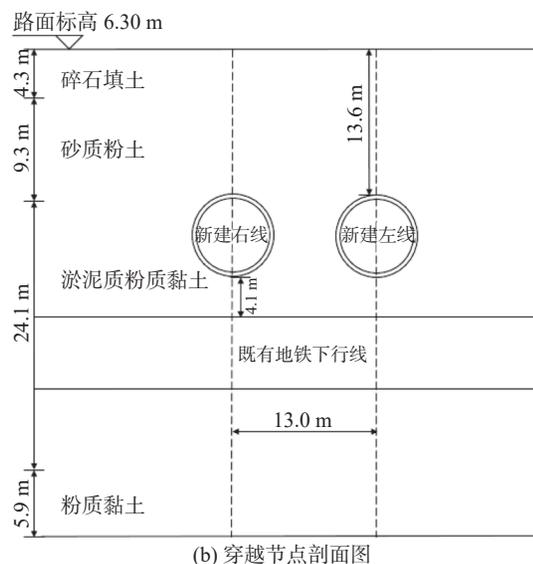
## 1 工程概况

杭州某新建盾构隧道在一区间上跨既有地铁线,交角为 $86^\circ$ ,其平面位置关系见图1(a)。隧道穿越节点剖面图见图1(b),既有地铁隧道外径6.2 m,内径5.5 m,埋深24.8 m,上下行线间距10.6 m;新建隧道外径6.9 m,内径6.1 m,上覆土层厚度13.6 m,左右

两线间距13 m。新旧隧道穿越节点处竖向净距为4.1 m。土层自地面往下可划分为碎石填土层、砂质粉土层、淤泥质粉质黏土层、粉质黏土层和岩层,其中新旧四条隧道都位于淤泥质粉质黏土层。



(a) 新旧隧道平面位置关系



(b) 穿越节点剖面图

图1 穿越区间新建隧道与既有地铁线位置关系及土层分布

## 2 数值模型

### 2.1 模型建立

为更有效研究新建隧道上跨施工对既有地铁隧道的变形影响规律,本文利用PLAXIS 3D软件建立了三维有限元模型。研究表明<sup>[15]</sup>,由盾构施工引起的应力重分布集中在3~5倍新建隧道直径范围内,因此建立了尺寸为 $94\text{ m}\times 83\text{ m}\times 43\text{ m}$ 的三维有限元模型(见图2(a))。既有地铁隧道和新建隧道的相对位置关系及新建盾构隧道模拟的详细信息见图2(b),模型中的新建隧道范围对应于实际施工中的左右两线第15环—第77环。模型位移边界条件为:顶部为自由边界,四周侧边界法向固定以及底部边界完全固定。

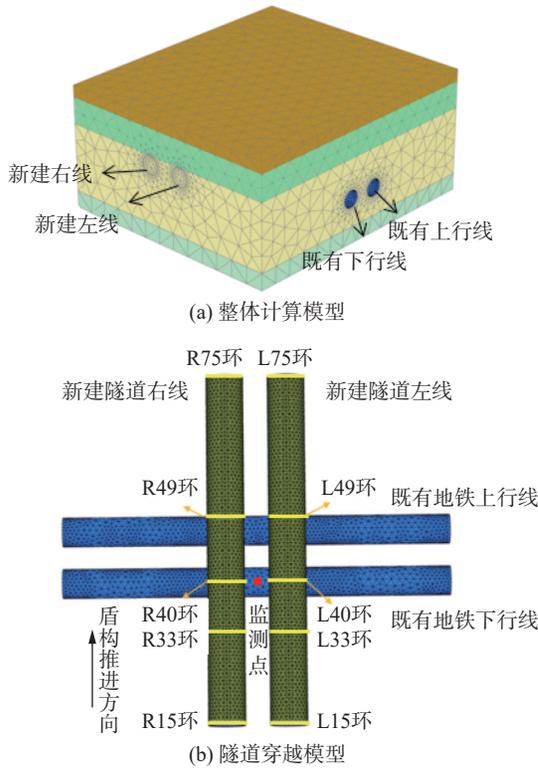


图2 三维有限元模型

2.2 模型参数

土体依次采用 HS-Small 和莫尔-库仑模型(M-C)模拟。HS-Small 模型是以 HS 模型为基础,由 Benz 提出的一种本构模型,其特点是可以全面反映土体的卸荷和小应变特性<sup>[16]</sup>。模型中采用的土体有效抗剪强度指标  $c'$ 、 $\varphi'$  主要依据工程剪切试验中所得到的强度指标取值;剪胀角  $\psi$  取为  $0^{[17]}$ ;根据文献 [14, 18] 取  $E_{50}^{ref} : E_{oed}^{ref} : E_{ur}^{ref} = 1 : 1 : 4$ ,  $E_{ur}^{ref} : G_0^{ref} = 1 : 1.5$ ;  $\gamma_{0.7}$  一般

介于  $(1.5 \sim 2.8) \times 10^{-4}$  之间,根据土层性质进行经验取值<sup>[18]</sup>;  $p^{ref}$  和  $R_f$  按 PLAXIS 默认值取为 100 kPa 和 0.9。既有隧道衬砌和盾构机盾壳采用板单元模拟,均为各项同性弹性材料。考虑到每环衬砌由多块管片拼接而成,衬砌的弹性模量进行一定的折减,折减因子取 0.85。土层及结构详细参数取值见表 1。

2.3 分步施工模拟

模拟中主要分两个阶段:一是既有隧道的开挖,二是新建盾构隧道的上跨穿越。本文主要研究的是既有隧道在第二阶段产生的变形,因此在第一阶段既有隧道开挖完成后,将土体和结构产生的位移重置为零。在第二阶段新建隧道的盾构施工模拟中根据实际工况先模拟新建隧道左线穿越,再模拟右线穿越,两线分开施工减小隧道掘进对既有线路的影响。新建隧道施工模拟中考虑掌子面压力、注浆压力、千斤顶推力和地层损失。

根据工程地勘报告及现场实测数据,地下水位设置为 -3 m,仅考虑土体的自重应力和地下水压力,不考虑渗流固结及蠕变等影响;分别取掌子面压力、注浆压力、千斤顶推力为 0.2, 0.4 和 1.55 MPa;地层损失则通过盾构开挖面收缩来考虑,其值根据文献 [19-21] 并结合工程实际施工情况,设置为 0.5%。模拟盾构机长 9 m,如图 3 所示,首先在盾构机前方对土体施加掌子面压力,盾构机壳用板单元模拟并设置面收缩,其次在盾构机后方施加注浆压力,然后激活衬砌混凝土单元,最后在衬砌截面上施加千斤顶反力,盾构开挖步长设定为 1.5 m。盾构机按以上设定逐环开挖,直至新建隧道贯通。

表 1 土层及结构参数

名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c'/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$\varphi'/(^{\circ})$	$E_{50}^{ref}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$E_{oed}^{ref}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$E_{ur}^{ref}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$E'/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$\nu$	$G_0^{ref}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$\gamma_{0.7}$
碎石填土	19.0	0	15	3500	3500	14000	3500		21000	$2 \times 10^{-4}$
砂质粉土	19.2	4	24	7000	7000	28000	14000		42000	$2 \times 10^{-4}$
淤泥质粉质黏土	17.3	13.5	10.5	2500	2500	10000	12500		15000	$1.5 \times 10^{-4}$
粉质黏土	19.4	25	14	6000	6000	24000	30000		36000	$1.5 \times 10^{-4}$
衬砌	24						$2.93 \times 10^8$	0.1		
盾壳	120						$2 \times 10^8$	0		

3 数值计算结果分析

3.1 模型验证

图 4(a)给出了盾构机掘进过程中既有隧道下行线中点处道床竖向位移监测值和相应计算结果对比,监测点位置见图 2(b)。可以看到数值计算结果和监测数据反映的既有隧道竖向位移规律基本一致,下方

既有隧道随着左右线盾构机的穿越有两次明显隆起。但莫尔-库仑模型所得的计算结果显著大于监测数据,这主要是因为使用 M-C 模型计算时无法考虑土体卸载的影响,因此较 HSS 模型,周边土体更早达到塑性状态。且隧道掘进时,周围土体发生小应变变形, M-C 模型也无法考虑小应变状态下土体刚度大的特

性, 因此相较于 HSS 模型, M-C 模型计算得到的隧道变形显著大于实测结果。

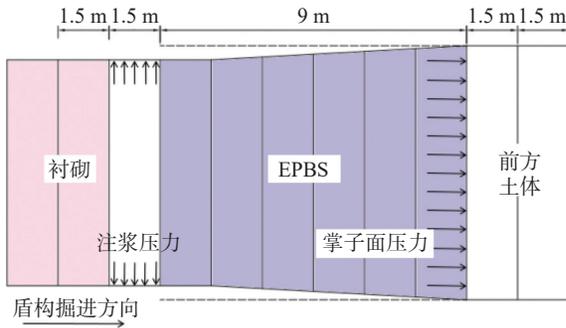
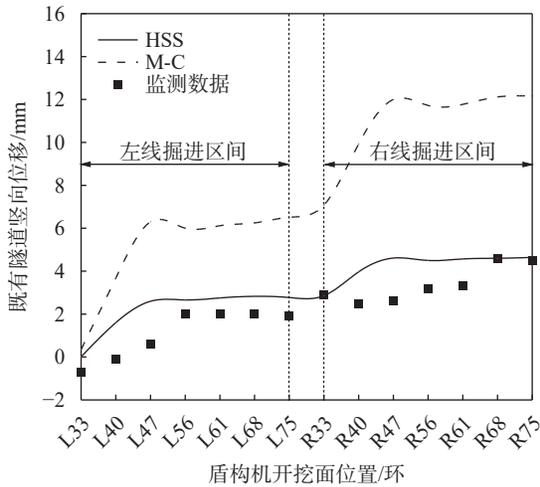
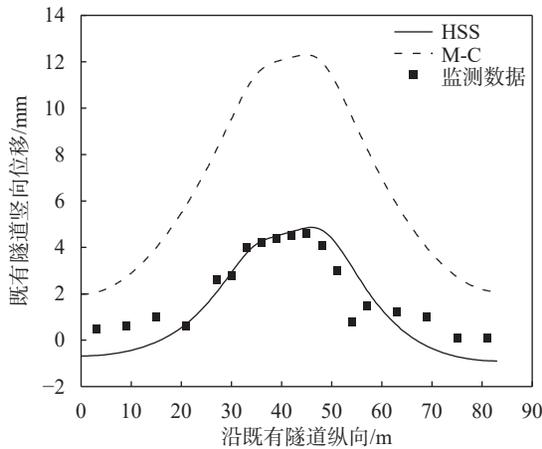


图3 盾构施工模拟



(a) 既有隧道下行线竖向位移监测值与计算结果对比



(b) 掘进至R75时既有隧道下行线竖向位移监测值与计算结果对比

图4 既有隧道监测值与计算结果对比

图4(b)给出了盾构机掘进至右线75环时沿既有隧道下行线纵向各位置处竖向位移监测值与计算值。不难发现, HSS模型计算结果与沉降监测值十分接近。而M-C模型计算结果偏大, 隧道实际上浮峰值约为其模拟计算结果的40%。这同样是因为M-C模型无法考虑土体的卸载及小应变特征。以上结果验证了本文数值模型的可靠性, 同时也说明了相较

于M-C模型, HSS模型更适合用于分析盾构掘进施工对既有隧道的影响。

### 3.2 既有隧道竖向变形分析

3.1节验证了计算结果的可靠性, 且说明了HSS模型能更好地预测既有隧道变形。因此在本节中, 结合HSS模型的计算结果, 重点分析在新建盾构隧道上跨施工全过程中, 既有地铁下行线道床的竖向变形特征。

如图5所示, 盾构首次穿越至L33环, 此时开挖面距既有隧道交叉处约为 $1.5D$ ,  $D$ 为新建隧道直径, 既有隧道几乎没有发生竖向变形, 但当左线盾构驶至既有隧道下行线正上方时, 即掘进至L40环, 既有隧道产生明显的隆起变形, 隆起峰值为2.3mm; 随盾构继续掘进至L49环, 此时开挖面离交叉点约为 $2D$ , 既有隧道下行线隆起值达3.7mm, 而当盾构远离上跨影响区驶至L75环时, 既有隧道竖向位移基本和前一工况保持一致, 没发生明显变化。从既有隧道各阶段竖向位移曲线的纵坐标峰值差值大小可以明显看出, 新建隧道上跨对既有隧道的竖向位移影响主要发生在盾构穿越前的 $1.5D$ 至穿越后 $2D$ 区域内。

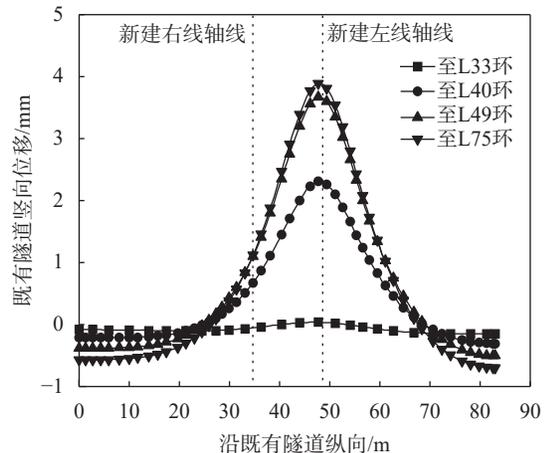


图5 左线盾构穿越时既有隧道竖向位移曲线

盾构右线二次穿越时既有隧道竖向位移曲线见图6。可以看到两次穿越影响下, 既有隧道表现出的变形规律基本相同, 但隆起峰值不同, 左线上跨完成时, 既有隧道隆起峰值为3.9mm, 等到右线上跨完成时, 即盾构至R75环, 隆起峰值达4.9mm, 由此也可以看出盾构二次穿越对既有隧道的竖向变形影响小于盾构首次穿越。主要因为土体在经历了首次穿越作用后, 应力场重新分布, 土体已经部分紧密了, 且首次穿越后铺设完成的衬砌管片对隧道周边土体也起到一定的支撑加固作用。此外, 相比于左线穿越, 右线穿越时既有隧道隆起峰值位置发生了偏移, 且既有

隧道竖向变形曲线呈现出“双峰”趋势,这主要是受左右两线近距离穿越施工产生的叠加效应的影响。

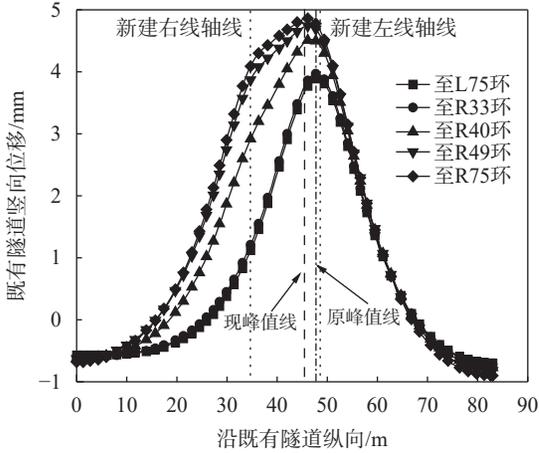


图6 右线盾构穿越时既有隧道竖向位移曲线

### 3.3 双线隧道水平净距影响分析

为揭示新建隧道参数对既有隧道变形的影响规律,此处建立了简化有限元模型。根据本文依托工程,

对隧道及土层进行以下规定:新建隧道埋深 24 m,新建隧道和既有隧道结构相同,直径  $D$  均为 6 m,新建隧道考虑的施工参数取值与前文所述一致。土层简化为单一土层,参数取值见表 2。

图 7 给出了新建双线隧道与既有隧道的平面相对位置关系。分别取新建隧道水平净距  $L$  为  $1D, 1.5D, 2D, 3D$  分析其对既有隧道竖向变形的影响。如图 8 所示,当隧道净距为  $1D$  时,既有隧道竖向变形曲线有“双峰”趋势,但还是单一峰值点。当  $L$  大于  $1D$  时,既有隧道变形曲线由单峰变成了双峰,且峰值点对应于相应两条新建隧道轴线的上方。这也验证了前文计算既有地铁线下行线竖向变形时有“双峰”趋势规律的正确性。随着新建双线隧道水平净距的增加,既有隧道竖向变形峰值减小但影响范围相应增加,且既有隧道竖向变形曲线会逐渐出现两个明显的峰值点,分别位于新建隧道的轴线上方。主要因为隧道水平间距增大,新建双线隧道对既有隧道变形的叠加效应会随之减弱。

表 2 土层参数

名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$\varphi/(\text{°})$	$E_{50}^{\text{ref}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$G_0^{\text{ref}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$\gamma_{0.7}$
淤泥质粉质黏土	18	13.5	10.5	3000	3000	12000	18000	$1.5 \times 10^{-4}$

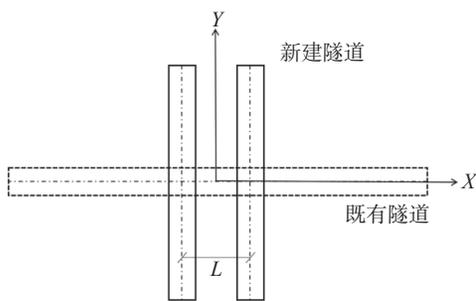


图7 新建双线隧道与既有隧道平面位置关系

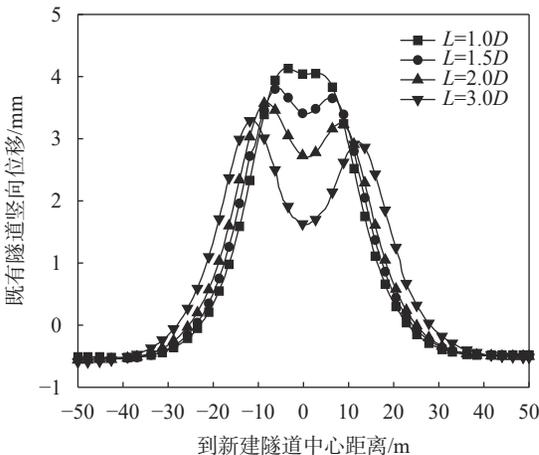


图8 不同水平净距下既有隧道竖向位移曲线

### 3.4 新建隧道叠交角度影响分析

本节着重考虑新建隧道叠交角度的影响(见图 9),分别取新建隧道叠交角度  $\theta$  为  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  四种情况进行分析。如图 10 所示,随着叠交角度的增加,既有隧道隆起峰值递减。新建隧道正上跨时对既有隧道的影 响最小,其原因主要是叠交角度大时,两隧道交叉范围较小,使得既有隧道受扰动区间缩小,既有隧道隆起值相应减小。叠交角度从  $30^\circ$  增至  $90^\circ$  时,既有隧道隆起峰值减少了 41%。因此,可以通过适当增大新建隧道的叠交角度来控制下方既有隧道的隆起。

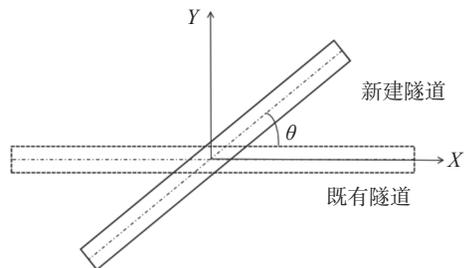


图9 新建隧道水平夹角示意图

## 4 结论

本文针对杭州某新建盾构隧道近接上跨既有地

铁的项目,建立了三维有限元分析模型,并通过与现场监测数据和莫尔-库仑模型的计算结果对比,验证了 HSS 模型计算的可靠性和优越性。随后进一步分析得到了双线盾构隧道上跨施工影响下的既有地铁线变形规律,主要结论如下:

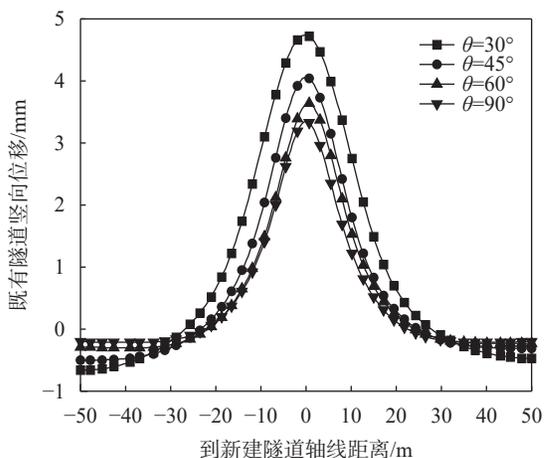


图 10 不同叠交角度下既有隧道竖向位移曲线

(1)HSS 模型计算结果与实测值吻合较好,相比于莫尔-库仑模型,能更好地预测既有地铁隧道的变形。

(2)新建隧道上跨施工会引起既有地铁隧道隆起,且隆起变形主要发生在盾构机穿越隧道前的 1.5D 至穿越后 2D 区域内。

(3)既有隧道隆起峰值点随着盾构机二次穿越而发生偏移,既有地铁隧道竖向变形曲线呈现出“双峰”趋势。

(4)随着新建双线隧道水平净距的增加,既有隧道竖向隆起峰值减小。同时既有隧道竖向变形曲线会逐渐出现两个明显的峰值点,均位于新建隧道的轴线上。

(5)新建隧道叠交角度越大,既有隧道受扰动的范围越小,隆起峰值也相应越小。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 于 群. 盾构隧道近距离下穿既有隧道影响规律的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [ 2 ] 张盛红. 盾构隧道下穿施工对上部既有隧道的影响研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [ 3 ] 赵宇鹏. 盾构隧道近距离上跨既有隧道施工影响与控制研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [ 4 ] 陈湘生, 李兴高. 复杂环境下盾构下穿运营隧道综合技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- [ 5 ] 房 明, 刘 镇, 周翠英, 等. 新建隧道盾构下穿施工对既有隧道影响的三维数值模拟 [J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(1): 67-72.
- [ 6 ] WANG Y, KONG L W, WANG Y L, et al. Analysis of influence of shield tunneling on overlying underground pipelines based on HSS model[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018, 423(1): 012017.
- [ 7 ] 丁 智, 吴云双, 张 霄, 等. 软土盾构隧道近距离穿越既有地铁影响数值分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2018, 49(3): 663-671.
- [ 8 ] 黄德中, 马险峰, 王俊淞, 等. 软土地区盾构上穿越既有隧道的离心模拟研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 520-527.
- [ 9 ] LIANG R, XIA T, HONG Y, et al. Effects of above-crossing tunnelling on the existing shield tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 58: 159-176.
- [ 10 ] 张琼方, 夏唐代, 丁 智, 等. 盾构近距离下穿对已建地铁隧道的位移影响及施工控制 [J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3561-3568.
- [ 11 ] 张孟喜, 张 靖, 吴应明, 等. 全风化岩层中双线盾构上穿近邻地铁隧道影响分析 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 100-108.
- [ 12 ] 张毫毫, 雷明锋, 刘凌晖, 等. 新建隧道下穿施工对既有上卧盾构隧道扰动影响规律研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(2): 396-404.
- [ 13 ] 许有俊, 秦浩斌, 李文博, 等. 浅埋暗挖隧道近距离平行上跨对既有盾构隧道的变形影响分析 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 118-127.
- [ 14 ] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 269-278.
- [ 15 ] 苏晓堃. 隧道开挖数值模拟的围岩边界取值范围研究 [J]. 铁道工程学报, 2012, 29(3): 64-68.
- [ 16 ] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[M]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2007.
- [ 17 ] BRINKGREVE R B J, BROERE W. Plaxis material models manual[M]. Netherlands: [s. n.], 2006.
- [ 18 ] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1766-1774.
- [ 19 ] 吴昌胜, 朱志铎. 不同直径盾构隧道地层损失率的对比研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2257-2265.
- [ 20 ] 魏 纲. 盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1354-1361.
- [ 21 ] 朱才辉, 李 宁. 隧道施工诱发地表沉降估算方法及其规律分析 [J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 533-542.