

大断面矩形盾构隧道横断面地震响应分析

王治坤¹, 孙 巍², 官林星², 禹海涛³

[1. 同济大学, 上海市 200092; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092;

3. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海市 200092]

摘 要: 研究大断面矩形盾构隧道的地震响应特性, 以上海虹桥临空地下连接通道工程为例, 建立大断面矩形盾构隧道横断面抗震计算的动力时程有限元分析模型。数值模型考虑了上海软土的动力特性和衬砌管片接头, 合理模拟了场地土-矩形隧道结构的动力相互作用。通过建立均质刚度管片模型, 对比分析了管片接头对矩形隧道动力响应的影响, 并进一步探讨了管片接头旋转刚度变化对层间位移和结构内力的影响规律。结果表明: 地震作用下均质刚度模型与管片接头模型的动力响应差异较大, 与管片接头模型相比, 均质刚度模型无法表现出接头位置处管片错位和内力突变, 且峰值弯矩和轴力值也明显放大, 其中弯矩峰值放大高达 2.29 倍, 建议矩形抗震设计时采用管片接头模型; 管片接头转动刚度对矩形隧道动力响应影响显著, 随着接头刚度降低, 结构层间位移逐渐增加, 但管片峰值弯矩和剪力显著减小。研究可为大断面矩形盾构隧道的抗震设计提供科学依据。

关键词: 大断面矩形隧道; 时程分析法; 管片接头; 地震响应分析; 结构内力

中图分类号: TU435

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0271-05

0 引 言

近年来地震频发, 对工程场地和地下结构的安全性构成了威胁。过去人们多认为地下结构抗震性能优于上部结构, 但日本阪神地震中区间隧道及大开车站的严重破坏^[1-2], 提醒人们地下结构的抗震问题需要值得关注。因此, 研究地下结构的地震动力响应问题尤为重要。

目前, 地下结构抗震设计方法通常包括自由场变形法^[3], 反应位移法^[4], 反应加速度法^[5], 动力时程法等, 其中动力时程法因其适用性强、能够模拟复杂结构形式等优势而被广泛采用。魏晓刚等^[6]基于有限元分析, 探讨了地震作用下矩形隧道在加速度时程、频谱特性、位移及土压力等方面的动力响应; 李永靖等^[7]研究了不同类型软土地层条件下矩形地铁隧道的地震反应特性; 龚国栋等^[8]以天津 Z2 线一期工程为例, 采用动力时程法分析了盾构管片横截面内力响应特征。此外, 在矩形隧道横断面抗震计算方面, 国内外规范^[9-10]多建议采用梁单元建模, 但对于管片接头的模拟并未有详细的规定, 一般有均匀刚度和

弹性铰接头^[11]两种。其中均匀刚度模型较为简单, 但偏离实际且通常会高估或低估结构动力响应, 弹性铰接头模型可以根据相对转角反算接头张开量和压缩量, 但接头转动弹簧刚度较难选取, 弹簧刚度的变化也可能会对隧道结构的地震响应产生影响, 但目前研究对其影响机理尚不清晰。

本文以上海市虹桥临空园区地下连接通道^[12]为例, 建立大断面矩形盾构隧道横断面抗震计算的二维动力时程有限元分析模型。该模型充分考虑的动力人工边界、场地非线性和土-结构相互作用的合理模拟, 并与均质刚度隧道模型对比, 揭示了矩形隧道管片接头转动刚度变化对结构地震响应的影响, 为大断面矩形盾构隧道的抗震措施和减震设计提供指导。

1 数值模型

1.1 工程背景

本研究以虹桥临空园区 10-3、11-3 地块地下连接通道^[13-14]为工程背景。该通道位于上海市长宁区临空经济园区内, 其纵剖面见图 1。地下连接通道长约 30 m, 由两个工作井和一段矩形盾构隧道组成。

根据工程场地勘察报告, 大断面盾构隧道所在土层条件见表 1。矩形隧道的覆土厚度约为 6 m, 隧道的顶部有信息排管, 污水管, 煤气, 电力排管等市政管线, 工程条件复杂。图 2 给出了隧道结构的主要截

收稿日期: 2023-11-07

作者简介: 王治坤(1992—), 男, 硕士, 从事地下建筑方面研究工作。

通信作者: 禹海涛(1983—), 男, 博士, 教授, 从事地下结构防灾减灾方面的研究工作。电子信箱: yuhaitao@tongji.edu.cn

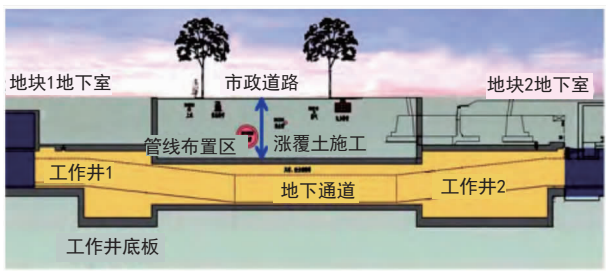


图 1 地下连接通道纵断面图

面尺寸,其管片横断面外包尺寸为 9 750 mm(宽)× 4 950 mm(高),扁平率为 0.44,拱顶的起拱量约为 150 mm,拱腰起拱量约为 100 mm。衬砌环由 6 块复合管片拼装而成,分别为拱顶块(F 块)、左上块(LU 块)、右上块(RU 块)、左下块(LD 块)、右下块(RD 块)、拱底块(D 块)。衬砌管片形式为复合夹层管片,外层为钢板,内芯填充混凝土。混凝土等级为 C60,钢板采用 Q345 钢。衬砌管片纵向与环向均采用直螺栓连接且通缝拼装。

表 1 地层参数

序号	土层名称	层厚 /m	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	φ /($^{\circ}$)	C/kPa
1	褐黄-灰黄色粉质黏土	2.02	17.6	17	6
2	灰色淤泥质粉质黏土	2.05	17.2	15.5	10
3	灰色砂质粉土	1.73	18.2	29	4
4	灰色淤泥质黏土	11.96	16.6	11	9
5	灰色黏土	5.28	17.2	10	10

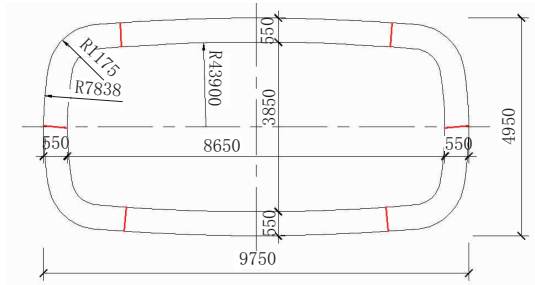


图 2 衬砌环断面图(单位:mm)

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)^[15],该工程隧道结构所在场地地基土属于软弱土,抗震设防烈度为 7 度,场地类别为 IV 类。场地设计基本地震加速度为 $0.10g$ (g 为自由落体加速度),且所属的设计地震分组为第一组。根据区域地质资料,拟建场地晚更新世以来从未发生断裂等构造活动,且拟建场地覆盖层较厚,不考虑软土震陷的影响。

1.2 有限元模型

本研究采用二维动力时程有限元模型,分析软件选用大型通用有限元分析软件 ABAQUS。根据《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)^[16] 附录 A

中不同岩土剪切波速值表,确定各个土层中剪切波的传播速度,取加权平均值 $C_s=150\text{ m/s}$,根据地勘资料取为 $1.7\times 10^3\text{ kg/m}^3$,动剪切模量为 $3.834\times 10^4\text{ kPa}$ 。矩形隧道模型管片的抗弯刚度 $EI=8.41\times 10^5\text{ kN}\cdot\text{m}^2$,当拱腰起拱量为 100 mm 时,其管片形心线半径 $r=7.83\text{ m}$ 。将土体-矩形隧道相互作用计算模型应用于地下结构的横断面地震反应分析。

数值模型地层深度为 30 m,宽度为 80 m,结构埋深 6 m,见图 3。地层采用平面应变单元(CPE4R),衬砌管片采用梁单元(B21)进行模拟,环向接头被模拟为转动弹簧(CPE3),模型底部采用固定人工边界,侧向采用等位移边界,地震动输入方向为水平横向,分析采用 $0.1g$ 上海人工波(E2 设防地震动水平),见图 4。考虑上海软土地场的分层地层,采用等效线性化本构模型考虑土体的剪切模量和阻尼比动力特性,地层网格选用四面体网格,结构和地层总网格数约为 2 万,沿深度方向的网格尺寸最大为 0.4 m,满足网格尺寸小于 $1/8$ 最小波长的条件。

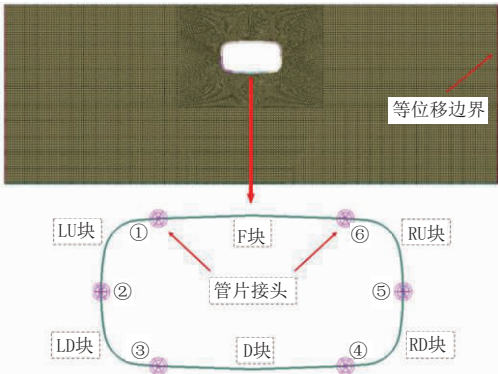


图 3 地层-结构有限元计算模型

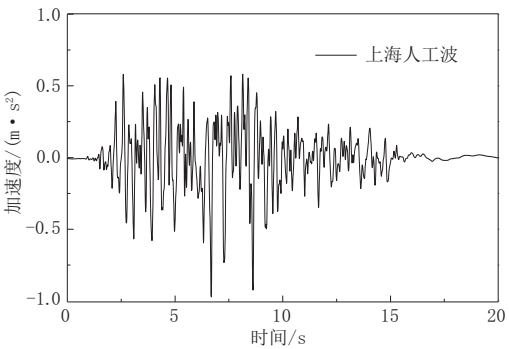


图 4 上海人工波(加速度峰值 0.1g)

1.3 分析工况

计算模型采用转动、轴向和剪切弹簧模拟衬砌管片环向接头,其中转动弹簧起主要控制作用^[11],其刚度综合反映了管片接头性能及其在外荷载作用下的变形大小,并直接影响衬砌管片的内力响应。为了评价环向接头转动刚度对结构地震响应的影响,定

义无量纲转动弹簧系数^[12]:

$$k_{\theta}^* = k_{\theta} \cdot r / EI \quad (1)$$

式中: k_{θ}^* 和 k_{θ} 分别为管片之间环向接头的无量纲转动弹簧系数和转动弹簧刚度; E 为弹性模量; I 为横断面惯性矩。其中 k_{θ}^* 为管片环向接头转动刚度与管片本身刚度的相对关系,可用来评价接头转动刚度对结构受力和变形的影响。

详细分析工况如下,其中工况 1~5 分别研究了管片接头转动刚度的影响,考虑接头拉压弹簧刚度和剪切弹簧刚度为 $104 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$,管片接头转动刚度分别为 $k_{\theta}=10^4, 10^5, 10^6, 10^7, 10^8 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 。工况 6 提供了均质刚度隧道作为对比,以更好的揭示管片接头存在对衬砌结构的动力影响。此外,根据文献中^[17]有关矩形盾构隧道横向刚度有效率的定义,在常见地层条件、管片结构和接头型式下,矩形盾构管片横向刚度有效率在 0.3~0.8 之间变化。因此,综合考虑本文计算模型中接头刚度比和接头数量等因素,确定均质刚度模型的横向刚度有效率 η 取为 0.8。

2 矩形隧道动力响应分析

由于盾构隧道地震响应主要取决于周围地层的振动特性,本节首先研究了有无管片接头存在情况下结构变形的结构变形,并进一步探讨了接头转动刚度对结构层间位移,弯矩,轴力和剪力的影响。

2.1 矩形隧道层间位移

矩形隧道结构的层间位移为结构顶板与结构底板的最大侧向位移之差,是评判结构抗震性能的重要指标之一。图 5 给出了隧道管片接头不同转动刚度影响下矩形隧道的层间位移时程曲线,并与均质刚度模型进行对比。可以看出,随着管片接头转动刚度的增加,结构的层间位移逐渐减小,这是由于接头转动刚度的增加导致矩形隧道结构的侧向刚度变大,引起的结构侧向变形逐渐较小。此外,从数值上来看, $k_{\theta}=10^4 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 情况(工况 1)下的最大层间位移为 2.299 mm,相比较均质刚度模型放大了 15.6%,当接头转动刚度 $k_{\theta}=106 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 情况(工况 3)时,最大层间位移为 2.024 mm,相比较均质刚度模型(工况 6)仅放大了 1.4%。结果表明:当管片接头转动刚度大于 $k_{\theta}=10^6 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 时,本工程矩形结构的层间位移可以近似通过均值刚度模型计算。

2.2 结构内力分布

图 6、图 7 给出了管片接头模型(工况 1)和均值刚度模型(工况 6)结构层间位移最大时刻($t=7.50 \text{ s}$),

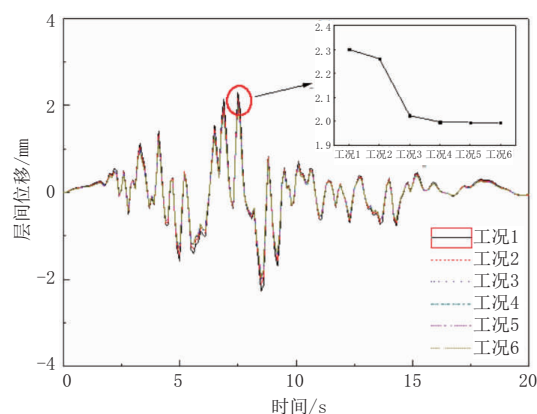


图 5 矩形隧道的层间位移时程曲线

衬砌管片的内力(弯矩,剪力和轴力)分布。图 7 中可以看出,结构弯矩、轴力近似反对称分布,拱腰部位(LU 块, LD 块, RU 块, RD 块)相比较拱顶底部位(F 块, D 块)承受了更大的弯矩和轴力,其中峰值弯矩和峰值轴力出现在结构的四个角点位置。结构横断面内剪力呈近似对称分布,拱腰部位(LU 块, LD 块, RU 块, RD 块)同样承受了更大的剪力,但峰值剪力出现在结构四个角点位置的两侧。此外,由于管片接头的存在,接头位置有明显的内力突变现象,尤其是在拱腰部位和拱顶底部位的连接处(①,③,④,⑥),剪力突变更为显著。

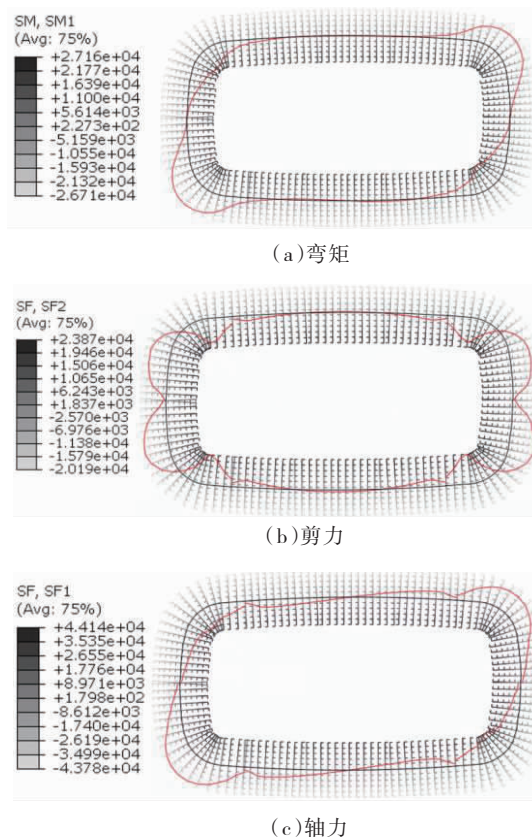


图 6 工况 1 情况下矩形管片的内力

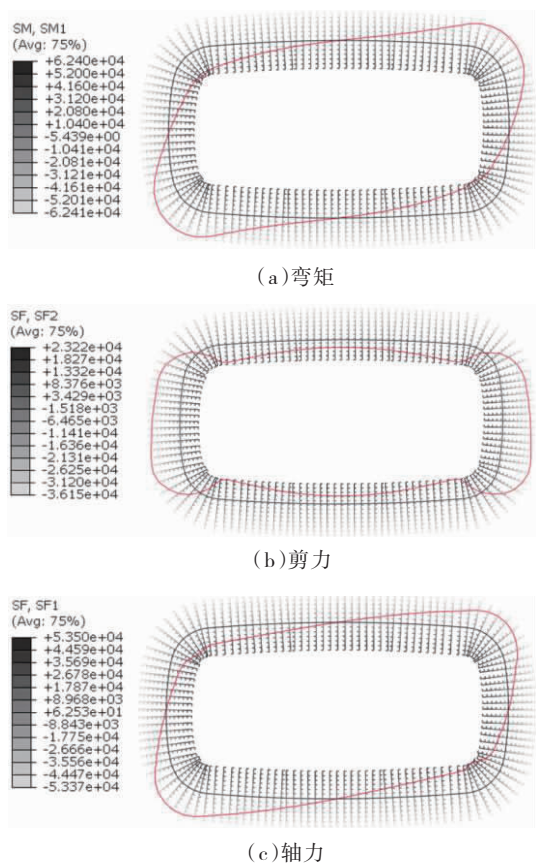


图7 工况6下矩形结构的管片内力

图7中可以看出,均质刚度模型的结构弯矩、轴力同样呈近似反对称分布,结构剪力呈近似对称分布。然而,相比较管片接头模型,均质刚度模型横断面内内力分布连续,没有表现出相邻管片接头处的内力突变。此外,两种结构形式的结构剪力分布明显不同。由于管片接头的存在,管片接头模型中拱腰接头位置(②和⑤)的剪力趋近于0,峰值剪力出现在结构四个角点的两侧,而均质刚度模型中拱腰部位的剪力呈现“外凸”分布,峰值剪力出现在拱腰接头位置(②和⑤),这一差异需在抗震设计中引起重视。

从数值上来看,均质刚度模型的内力值明显大于管片接头模型,尤其是结构弯矩和轴力,即均质刚度模型的峰值弯矩和轴力相比与管片接头模型放大了将近2.29倍和1.21倍。结果表明:若在矩形隧道抗震设计时不考虑管片接头的存在,会导致结构内力被明显高估,这一现象也应该引起工程设计人员的关注。

2.3 峰值结构内力

图8给出了管片接头不同转动刚度影响下矩形隧道的内力峰值,其中横坐标表示峰值内力的正负值,纵坐标表示管片接头的转动刚度值。可以看出,随着管片接头转动刚度的增加,管片峰值轴力

基本不发生变化。然而,接头转动刚度对结构弯矩和剪力影响显著,随着接头转动刚度的增加,管片的峰值弯矩和峰值剪力显著放大。相比于转动刚度 $k_{\theta}=10^4 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$, $k_{\theta}=10^8 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 下的正负峰值弯矩分别放大了41.1%和43%,正负峰值剪力分别放大了28.6%和24.9%。此外,当接头转动刚度大于 $k_{\theta}=10^6 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 时,管片的峰值弯矩和峰值剪力基本保持不变。结果表明,当管片转动刚度增加到一定数值(如 $k_{\theta}=10^6 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$),结构内力不会随着结构刚度增加而发生变化。

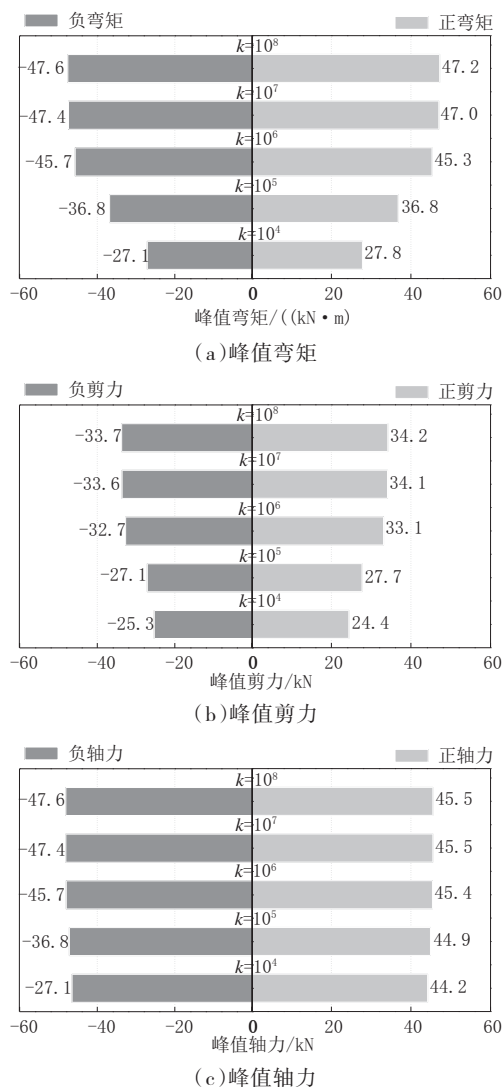


图8 管片接头不同转动刚度条件下的结构内力峰值

3 结 语

本文针对上海市虹桥临空园区地下连接通道工程实例,采用动力时程分析方法,以均质刚度模型为参照,研究了隧道管片接头对结构内力和位移变形的影响,并进一步探讨了地震作用下大断面矩形盾构隧道不同管片接头转动刚度对结构层间位移和结

构内力的影响规律。主要结论如下:

(1)地震作用下,均质刚度模型与管片接头模型的动力响应差异较大,随着管片接头刚度的增加,矩形隧道结构的侧向刚度逐渐增加,隧道层间位移逐渐变小。当管片接头转动刚度增大至 $k_{\theta}=10^6 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ 及以上时,层间位移基本保持不变。

(2)矩形隧道横断面弯矩和轴力在地震作用下呈近似反对称分布,剪力呈近似对称分布,峰值内力出现在矩形隧道结构的四个角点及附近位置。但与管片接头模型相比,均质刚度模型在拱腰部分的剪力呈“外凸”分布,峰值剪力出现在拱腰中间部位,且内力峰值也明显放大,其中弯矩峰值放大高达 2.29 倍。

(3)随着管片接头旋转刚度的增加,结构轴力基本保持不变,但结构弯矩和剪力明显增加。当接头转动刚度增加至 $k_{\theta}=10^6 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ 时,结构管片的峰值弯矩和剪力达到最大。

参考文献:

- [1] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, IWAFUJI M. Damage to Daikai subway station[J]. Soils Found, 1996(36):283-300.
- [2] 王瑞民, 罗奇峰. 阪神地震中地下结构和隧道的破坏现象浅析[J]. 灾害学, 1998, 13(2):63-66.
- [3] NEWMARK N M. Problems in wave propagation in soil and rock[J]. Proceedings of Int. symp. wave Propagation & Dynamic Properties of Earth Materials, 1968.
- [4] 耿萍, 张景, 何川, 等. 隧道横断面反应位移法基本原理及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3478-3485.
- [5] 刘晶波, 陆喜欢, 宝鑫. 不同规范建议的反应加速度法的比较研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1):47-56.
- [6] 魏晓刚, 刘会丽, 杨柳川, 等. 矩形隧道结构的地震动力破坏研究[J]. 地震研究, 2022, 45(3):405-415.
- [7] 李永靖, 马启郁, 张淑坤, 等. 软土矩形地铁隧道地震反应特性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4):104-107.
- [8] 龚国栋, 梁建文, 巴振宁, 等. 复杂软土盾构隧道横断面抗震时程分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(增刊 1): 106-112.
- [9] GB/T 51336—2018, 地下结构抗震设计标准[S].
- [10] ISO 23469, Bases for design of structures—Seismic actions for designing geotechnical works[S]. ISO International Standard, 2005.
- [11] 陈怀伟. 考虑接头影响的盾构隧道地震响应分析[J]. 都市轨道交通, 2018, 31(3):78-85.
- [12] 孙巍, 官林星. 大断面矩形盾构法隧道设计研究与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [13] 孙巍, 官林星, 温竹茵. 大断面矩形盾构法隧道的受力分析与工程应用[J]. 隧道建设, 2015, 35(10):1028-1033.
- [14] 温竹茵. 大型矩形盾构近距离穿越管线影响研究[J]. 城市道桥与防洪, 2018(4): 202-207.
- [15] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- [16] GB 50111—2006, 铁路工程抗震设计规范[S].
- [17] 丁祖德, 付江, 王志良, 等. 类矩形盾构隧道横向刚度有效率分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(12):3181-3188.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com