

文章编号:1005-0523(2016)01-0023-07

# 地铁振动荷载作用下土体动剪应力分析

贺腾飞,周顺华,徐司慧

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

**摘要:**以南京地铁10号线下穿长江段大直径单洞双线盾构工程为背景,研究地铁列车振动荷载作用下大直径单洞双线地铁盾构隧道周围土体的动剪应力规律。采用车辆-轨道垂向统一模型,计算地铁运行时产生的轮轨力,借助有限元方法,将该轮轨力作为地铁列车荷载输入,系统分析单、双列车动载两种情况下,隧道周围土体的动剪应力,同时对冲切槽段冲刷前后土体动剪应力的变化进行对比研究。研究表明:地铁列车荷载作用下,隧道拱腰及底部区域动剪应力较大,动剪应力随列车通过数量增加而变化的幅度平缓;单列车通过时隧道周围土体动剪应力呈不对称分布;冲切槽段冲刷后隧道拱腰附近土体动剪应力增大,最大增加幅度达80%,其余区域较冲刷前减小,最大减小幅度约17%。

**关键词:**地铁列车;振动荷载;大直径盾构隧道;动剪应力

中图分类号:U451+.3

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.01.004

随着我国城市建设的发展,地铁建设取得了长足的进步。由于地铁列车荷载具有作用时间长、周期性明显的特点,其长期循环作用会对隧道周围土体的应力场产生较大影响,引起土体动剪应力变化,甚至导致土层发生液化,进而对隧道及其周边建(构)筑物的安全产生威胁。因此研究地铁列车荷载作用下隧道周围土体动剪应力的分布规律具有重要意义。

国内学者针对地铁列车荷载作用下土体的动应力响应问题进行了探讨。唐益群等<sup>[1]</sup>通过室内动三轴试验,以南京地铁三山街站底部的原状淤泥质粉质粘土为研究对象,分析了在地铁振动荷载作用下淤泥质粉质粘土的动强度和动应力-动应变的变化规律。张曦等<sup>[2]</sup>通过现场试验,以上海地铁2号线附近的饱和软粘土为研究对象,分析了在地铁振动荷载作用下饱和软粘土的动应力变化规律,提出了土体动应力衰减计算公式。张庆华等<sup>[3]</sup>通过室内模型试验,分析了土体在反复动载作用下产生的动应力随时间变化的规律,提出了动应力累计效应的概念,并对动应力的累计特征、控制因素及其影响规律进行了研究。宫全美等<sup>[4]</sup>利用有限单元法分析了地铁运行荷载引起的地基土动应力比值的变化规律、影响范围及动应力比值与列车运行次数的关系。

上述研究多以常规尺寸盾构隧道为研究对象,但是随着经济的日益发展,交通量剧增,修建大直径盾构隧道成为发展趋势。由于单洞双线大直径盾构隧道横截面积大,地铁列车荷载更容易引起隧道周围局部土体动剪应力过大,对隧道结构及地铁运营安全产生威胁,但是针对大直径单洞双线盾构隧道中列车荷载作用下土体动剪应力的研究却鲜见于文献<sup>[5-6]</sup>。

本文以南京地铁10号线越江段大直径单洞双线盾构工程为背景,采用车辆-轨道垂向统一模型计算地铁运行时产生的轮轨力,以此为激励荷载,利用有限元软件ADINA,系统分析单、双列车动载两种情况下隧道周围土体的动剪应力规律,针对越江隧道特有的冲刷问题,选取冲切槽段典型断面,对冲刷前后土体动剪应力的变化进行对比分析,为进一步研究列车荷载作用下土体液化问题提供参考。

收稿日期:2015-07-13

作者简介:贺腾飞(1990—),男,硕士,河南濮阳人。

通讯作者:周顺华(1964—),男,教授,博士,博士生导师,主要从事轨道交通工程的研究。

## 1 工程背景

南京地铁 10 号线江心洲站-滨江大道站区间下穿长江,为大直径单洞双线盾构工程。隧道内径 10.2 m,外径 11.2 m,隧道横断面见图 1。隧道主要穿越土层为粉砂和细砂层,沿线水头压力高,区间还穿越冲切槽段,该处覆土厚度变化大,在地铁列车荷载的长期作用下,土层内可能出现较大的动剪应力变化,改变隧道结构受力,甚至会对隧道结构产生威胁。

根据区间沿线地质情况、隧道埋深及历史冲刷数据,选取断面 L10-1 进行单、双列车动载两种情况下土体动剪应力的计算,L10-1 断面为靠近车站处,隧道全断面处于②-4d1-2 粉砂、细砂中,覆土厚度为 16.7 m。选取断面 L10-2 进行冲切槽处冲刷前后的对比计算,L10-2 断面位于长江冲切槽段,隧道上部所在土层为②-4d1-2 粉砂、细砂,下部所在土层为②-5d1 粉砂、细砂,在三百年冲刷线时隧道最小覆土厚度不足 6 m。两个计算断面地层图见图 2。

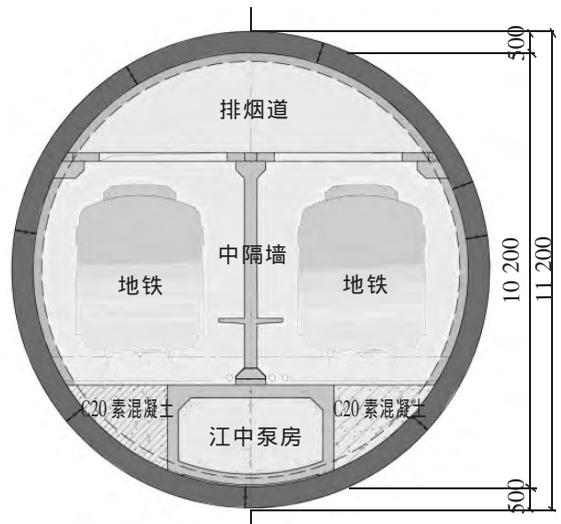


图 1 隧道横断面

Fig.1 Cross section of tunnel

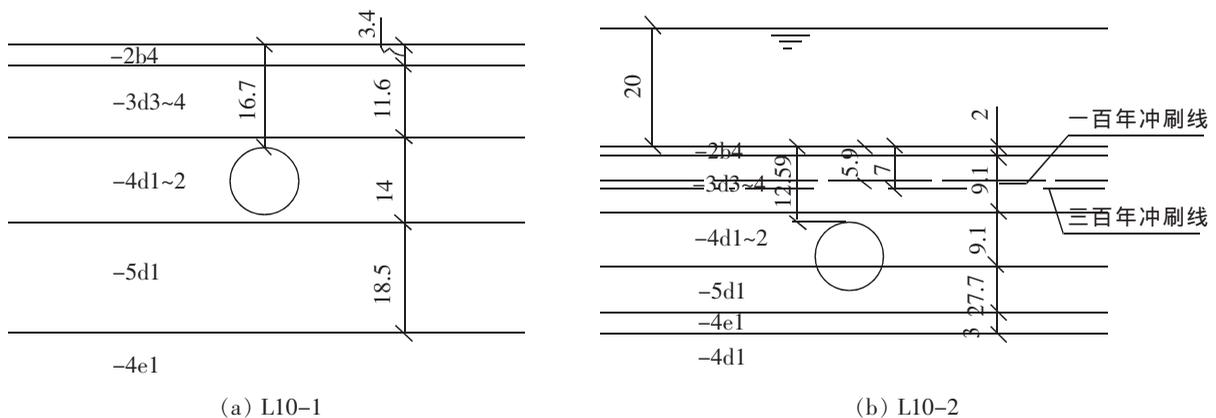


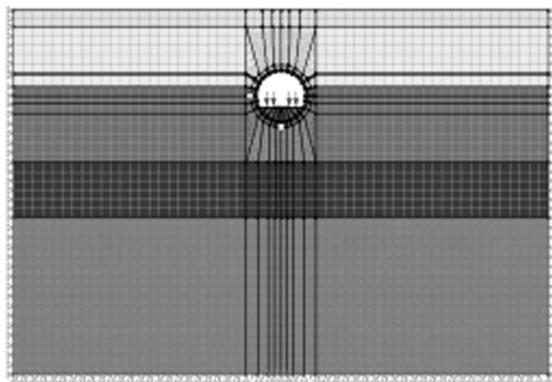
图 2 计算断面地层图

Fig.2 Stratigraphic section

## 2 动剪应力计算

### 2.1 计算模型

采用有限单元法,利用 ADINA 软件建立二维有限元模型。土体及隧道均为平面实体单元,土体采用 Mohr-Coulomb 破坏准则,混凝土采用线弹性材料。材料阻尼模型采用 Rayleigh 阻尼,混凝土的阻尼比为 0.05,粉砂、细砂的阻尼比为 0.21<sup>[7]</sup>。在水平方向,计算范围取自隧道边缘起向两侧各延伸 60 m(即左右两侧各超过 5D,D 为隧道直径),竖向计算深度自隧道边缘向下延伸 65 m(超过 5D),计算中忽略边界对动力计算的影响。模型顶面为自由边界,两侧为水平固定约束,底面全约束。为方便分析隧道周边各点动剪应力变化规律,将隧道 82 等分,并对隧道周边节点从隧道顶开始按逆时针方向进行编号,模型网格及隧道周边节点编号如图 3 所示。地层及结构材料参数见表 1,根据已有研究,计算时粘土动弹性模量取值约为弹性模量的 5 倍<sup>[8]</sup>,砂土动弹性模量取值约为弹性模量的 3~5 倍<sup>[9]</sup>。



(a) 有限元模型网格



(b) 隧道周边节点编号

图 3 有限元模型  
Fig.3 FEM model

表 1 材料物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of the materials

材料名称	土重度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	动弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	动泊松比
②-2b4 淤泥质粉质粘土	18.9	51.75	11	5.4	0.47
②-3d3-4 粉砂、细砂	19.5	46.97	8	32.3	0.36
②-4d1-2 粉砂、细砂	19.4	47.29	8	31.8	0.36
②-5d1 粉砂、细砂	19.6	45.82	9	31.3	0.36
④-4d1 中砂、粗砂	20.1	47.23	10	31.1	0.38
混凝土衬砌	25	$4.5\times 10^4$			0.2

## 2.2 地铁列车振动荷载

列车振动荷载是一复杂问题,本文通过采用车辆-轨道垂向统一模型分析轮轨间的作用力。计算时,钢轨视为弹性点支承基础上的梁,钢轨支承点按实际扣件节点间距布置,扣件及轨下垫板、橡胶套靴及块下垫板简化为两层均布的线性弹簧和粘滞阻尼,弹性支承块简化为一质量体,混凝土整体道床视为刚性基础,轮轨垂向作用由 Hertz 非线性弹性接触理论确定<sup>[10]</sup>。

南京地铁为二系悬挂的 A 型车,轴重不大于 170 kN,车辆具体参数按文献[4]中取值。钢轨采用  $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$  轨,计算参数见表 2。整体道床采用 C30 混凝土,轨枕采用 C50 混凝土,垫板刚度为  $70 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,车辆运行速度为  $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。根据《地下铁道工程施工及验收规范》(GB 50299-1999)中对轨顶高低差的竣工验收标准,计算中考虑的轨道初始高低不平顺值取为 2 mm,计算得到列车通过时的轮轨力时程变化见图 4。

表 2 钢轨计算参数

Tab.2 Calculation parameters of rail

计算参数	符号	参数值
钢轨弹性模量/MPa	$E_r$	$2.059\times 10^5$
钢轨截面惯性矩/ $\text{m}^4$	$I_r$	$3.217\times 10^{-5}$
钢轨每米质量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$m_r$	60.64

### 2.3 计算方案

在运营过程中,大部分情况下大盾构隧道中仅有单列车通过,但是双向均有列车通过的情况相对较危险,因此针对 L10-1 断面选取双列车通过和仅有隧道左侧单列车通过时两个工况进行研究;由于江中水流湍急,不断下冲会在江底形成冲切槽,对于越江隧道下穿冲切槽段,隧道覆土厚度受冲刷影响会周期性变化,进而对隧道周围土体动剪应力大小及分布产生影响。南京地铁 10 号线江心洲站-滨江大道站区间江中部分冲切槽处隧道覆土厚度最小时不足 6 m(小于隧道直径),因此针对该断面 L10-2 进行冲刷前后的对比分析。计算方案见表 3。

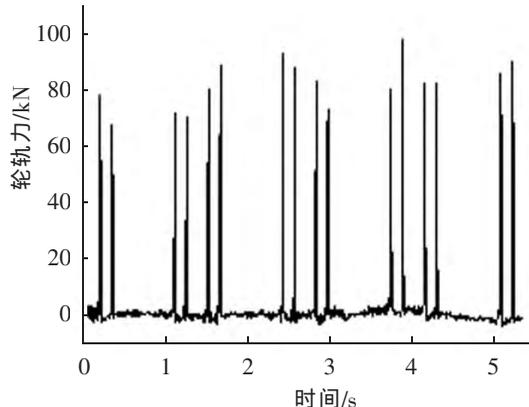


图 4 轮轨力时程曲线

Fig.4 Time history of wheel-rail force

表 3 计算方案

Tab.3 Calculation conditions

断面	工况 1	工况 2
L10-1	单列车通过	双列车通过
L10-2	双列车通过时,冲刷前	双列车通过时,冲刷后

计算中每列车通过时间为 7 s,在忽略行车间隔的情况下,研究连续通过 10 列车时隧道周围土体动剪应力的变化情况。从动剪应力的空间分布、时域变化两方面出发进行分析,结果所提取的动剪应力为最大动剪应力,即 $(\sigma_1-\sigma_3)/2$ 。

## 3 计算结果分析

### 3.1 动剪应力空间分布特征

图 5 为 L10-1 断面隧道内双列车通过、左侧单列车通过两种情况下,列车通过次数分别为 1,2,4,6,8,10 时隧道周围土体动剪应力分布。由图 5(a)可知,双列车荷载作用下,动剪应力在隧道拱腰附近和隧道底部两个区域数值较大,在隧道底部区域值最大,其原因为列车振动荷载经道床、管片直接传递至隧道周边,引起的动剪应力较大。由图 5(b)可知,隧道左侧作用单列车荷载时,动剪应力分布不对称,由于仅有隧道左侧施加荷载,隧道右侧轨腰附近(55 号节点附近)的动剪应力峰值明显减小,隧道左侧拱腰附近和隧道底部区域仍保持较大的动剪应力水平。

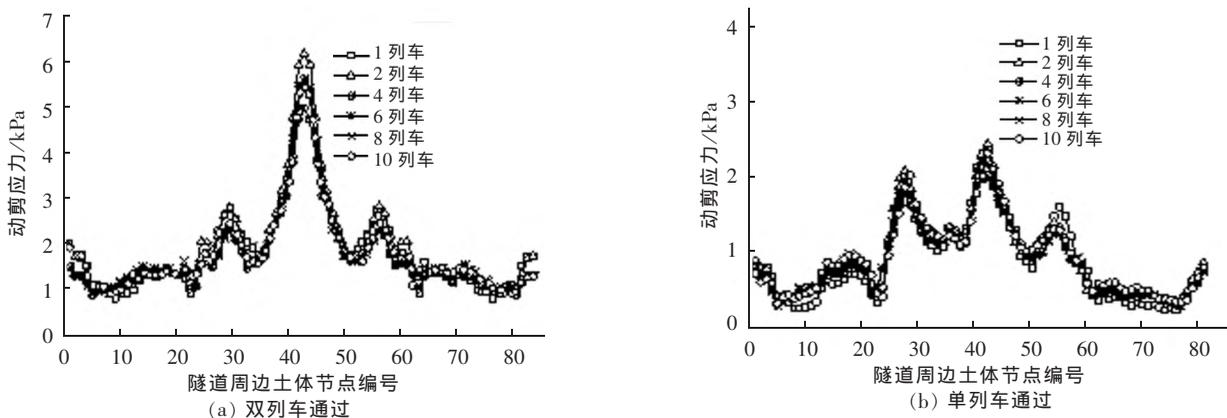


图 5 L10-1 断面隧道周边各节点动剪应力

Fig.5 Dynamic shear stress of nodes around the tunnel in the section of L10-1

将隧道内双列车通过、左侧单列车通过两种情况下,土体各点动剪应力的最大值进行对比,绘制于图 6。由图 6 可知,由于单列车通过时列车荷载较双列车减小,隧道周围土体动剪应力相应减小,在隧道底部区域动剪应力最大值较双列车通过时减小约 62%。

3.2 动剪应力随时间变化特征

选取 L10-1 断面动剪应力空间分布规律中得出的动剪应力最大值节点(隧道底部 42 节点),第 1 列车通过时该点动剪应力变化见图 7。由图 7 可知,双列车通过与左侧单列车通过时,动剪应力在荷载作用初期较小,随着荷载作用次数增加动剪应力迅速增加。计算中忽略行车间隔,未考虑孔隙水压力的消散作用,将每列车通过时该点动剪应力最大值列于表 4。由表 4 分析可知,动剪应力在第 1 列车通过时已达到相对稳定状态,在后续列车通过时,双列车通过情况下动剪应力峰值变化幅度在 11%以内,左侧单列车通过时变化幅度在 14%以内;相同列车通过次数时,左侧单列车通过动剪应力最大值较双列车通过时减小,最大减小幅度为 64.91%。

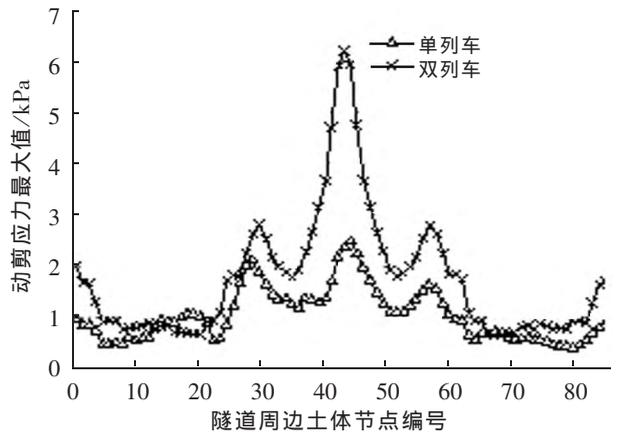
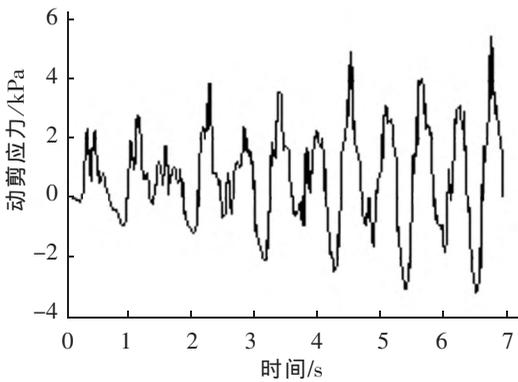
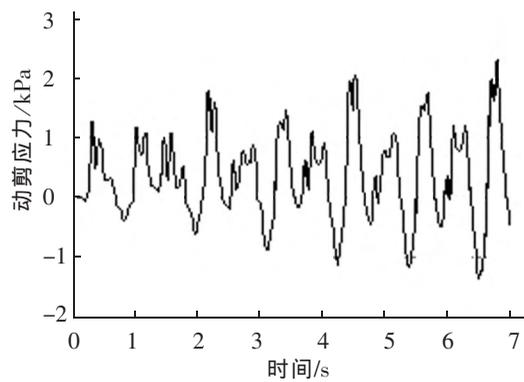


图 6 单列车与双列车隧道周边各节点动剪应力最大值对比  
Fig.6 Dynamic shear stress of nodes around the single-train and double-train tunnel



(a) 双列车通过



(b) 单列车通过

图 7 第 1 列车时间内动剪应力时程曲线

Fig.7 Time history of dynamic shear stress of the maximum node when the first train passes

表 4 L10-1 断面不同列车通过次数时动剪应力最大值(kPa)

Tab.4 Maximum dynamic shear stress in the section of L10-1 with different passing times of trains

列车通过次数	双列车通过动剪应力最大值/kPa	单列车通过动剪应力最大值/kPa	单列车较双列车减小幅度/%
1	5.52	2.33	57.79
2	6.17	2.29	62.88
3	5.48	2.29	58.21
4	4.96	2.00	59.67
5	5.25	2.11	59.81
6	5.64	2.10	62.76
7	5.62	2.04	63.70
8	5.70	2.00	64.91
9	5.66	2.02	64.31
10	5.43	2.15	60.41

### 3.3 冲刷前后对比

图8为L10-2断面冲刷前和冲刷后,列车通过次数为10时,隧道周围土体动剪应力分布对比。由图8可知,在隧道底部区域,冲刷后土体动剪应力较冲刷前减小,幅度最大为17%;在隧道拱腰区域,冲刷后土体动剪应力较冲刷前增大,最大增加幅度达80%。前9列列车通过时,隧道周围土体动剪应力在冲刷前与冲刷后变化规律与此类似,变化幅度有所减小。表5为不同数量列车通过时,冲刷前后隧道周围土体动剪应力的最大值。由表5可知,冲刷前隧道周围土体最大动剪应力随列车次数增加的变化幅度最大为26%,冲刷后该数值为18%;相同列车通过次数时,冲刷后动剪应力最大值较冲刷前减小,最大减小幅度为23.26%。

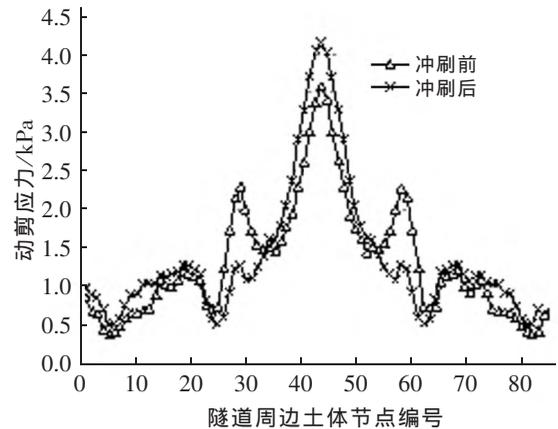


图8 10列车通过后冲刷前与冲刷后隧道周边各节点动剪应力对比

Fig.8 Dynamic shear stress of nodes around the tunnel before and after erosion when 10 trains pass

表5 L10-2断面不同列车通过次数时动剪应力最大值(kPa)

Table5 Maximum dynamic shear stress in the section of L10-2 of different passing times of trains

列车通过次数	冲刷前动剪应力最大值/kPa	冲刷后动剪应力最大值/kPa	冲刷后较冲刷前减小幅度/%
1	3.70	3.02	18.37
2	3.79	3.26	13.98
3	3.75	3.25	13.33
4	4.06	3.28	19.21
5	4.07	3.49	14.25
6	3.98	3.74	6.03
7	4.23	3.76	11.11
8	4.37	3.82	12.58
9	4.36	3.74	14.22
10	4.17	3.20	23.26

## 4 结论

以南京地铁10号线越江段大直径单洞双线盾构工程为背景,建立分析模型,针对单洞双线地铁盾构隧道中列车荷载作用下土体动剪应力进行研究,得到如下结论:

1) 地铁列车荷载作用下,隧道拱腰及隧道底部区域土体动剪应力较大,在研究土层液化问题时应对这两个区域土层重点关注;未考虑孔隙水压力影响情况下,列车荷载作用初期动剪应力随列车通过次数的增加而变化较明显,后续列车荷载作用时变化幅度减小。

2) 对单、双列车动载两种情况的对比研究表明,单列车通过时隧道周围土体动剪应力呈不对称分布,动剪应力较双列车通过时减小,隧道底部减小幅度达62%。

3) 对冲切槽处冲刷前后的对比研究表明,冲刷后隧道拱腰区域土体动剪应力较冲刷前有所增大,最大增加幅度达80%,其他区域出现不同程度减小,幅度在17%以内。

## 参考文献:

- [1] 唐益群,王艳玲,黄雨,周载阳. 地铁行车荷载下土体动强度和动应力-应变关系[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(6):701-704.
- [2] 张曦,唐益群,周念清,王建秀,赵书凯. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和和软黏土动力响应研究[J]. 土木工程学报,2007,40(2):85-88.
- [3] 张庆华,汤连生,吴玉刚,尹敬泽. 反复动载下土体的动应力累积效应及量化模型研究[J]. 水文地质工程地质,2009,36(6):76-79.
- [4] 宫全美,徐勇,周顺华. 地铁运行荷载引起的隧道地基土动力响应分析[J]. 中国铁道科学,2005,26(5):47-51.
- [5] ZHU H,ZHANG X,YANG X,et al. Effect of subway operation load on cross section deformation of Large-Diameter shield tunnel [C]//CICTP Smart, and Sustainable Multimodal Transportation Systems, ASCE,2014:1248-1258.
- [6] 李亮,张丙强,杨小礼. 高速列车振动荷载下大断面隧道结构动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(23):4259-4265.
- [7] 陈国兴,刘雪珠. 南京及邻近地区新近沉积土的动剪切模量和阻尼比的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(8):1403-1410.
- [8] 刘江平,罗银河,张英德. 黏土动、静弹性模量相关性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(2):427-431.
- [9] 王绍鹏. 土体动弹性模量与动剪切模量关系对比研究[D]. 大连:大连理工大学,2009:35-39.
- [10] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 3 版. 北京:科学出版社,2007.

## Analysis of Dynamic Shear Stress of Soil Around the Tunnel under Subway Vibration Load

He Tengfei, Zhou Shunhua, Xu Sihui

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Based on the large-diameter shield tunnel of cross-river part of Line Subway 10 in Nanjing, this study researches the law of dynamic shear stress of soil around the tunnel under subway train loading. The wheel-rail coupling model is adopted to calculate the wheel-rail force, which is used as the input load. Finite element method is adopted to analyze dynamic shear stress change of soil around tunnel under subway train loading in the working conditions of single-train and double-train passing and punching-shear segment before and after scouring. Results show that dynamic shear stress is greater near the tunnel haunch and under the bottom, and changes little with the train passing. The dynamic shear stress distributes unsymmetrically during single-train passing, reaching a lower value in punching-shear segment with the decrease rate of about 17% while increasing 80% near the tunnel haunch after scouring.

**Key words:** subway train; vibration load; large-diameter shield tunnel; dynamic shear stress

(责任编辑 王建华)