

地铁列车运营引起的地基土应力状态变化分析

丁 智¹, 葛国宝², 魏新江¹, 蒋吉清¹

(1. 浙江大学城市学院土木工程系, 浙江 杭州 310015; 2. 浙江省天然气开发有限公司, 浙江 杭州 310058)

摘要: 将地铁列车移动荷载简化为多个移动轮轴荷载, 基于弹性半空间内 Mindlin 解, 分别以单个轮轴荷载和列车移动荷载为例, 研究了地铁列车荷载作用线正下方地基土中的动应力特征、应力路径变化及主应力轴旋转, 分析了不同隧道埋深下荷载作用线正下方土单元应力状态变化。结果表明, 单个轮载移动线正下方计算土单元的主应力轴旋转了 180° 且方向始终为顺时针。荷载向土单元移动时, 隧道埋深越大, 下方土单元应力增长也越快。在多个轮载作用下, 土单元的动应力和主应力轴旋转具有持续循环特性, 循环次数与列车车厢节数有关, 由于相邻轮载的影响, 一个循环内主应力轴旋转角度并非单调递增或递减, 而是具有来回震荡过程的特性。

关键词: 地铁; 应力状态; 主应力轴旋转; 应力路径; 移动荷载

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0647-05

作者简介: 丁 智(1983-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事轨道交通施工及运营对周边环境影响方面的教学和科研工作。E-mail: dingz@zucc.edu.cn。

Variation of stress state of foundation soils induced by running subway

DING Zhi¹, GE Guo-bao², WEI Xin-jiang¹, JIANG Ji-qing¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China; 2. Zhejiang Natural Gas Exploration Co., Ltd., Hangzhou 310058, China)

Abstract: The moving load of subway train is simplified as a plurality of moving wheel loads. Based on the Mindlin solution in elastic half-space, taking one moving load and one moving train load as examples, in which the characteristics of dynamic stress, stress path and principal stress axis rotation of soil elements under the load-moving line are analyzed. The variation of stress state of soil elements under the load-moving line is studied when the tunnel is at different depths. It is found that the principal stress axis rotates 180° clockwise for the soil elements under the load moving line during one load-moving, when the tunnel is deeper, the stress of soils grows faster. Under multiple wheel load moving, the dynamic stress and principal stress axis rotation of the soil elements perform circulation characteristics continuously. The circulation number relates to the number of train carriages. Because of the effect of the adjacent load, the angle of principal stress axis rotation does not monotonically increase or decrease in one circulation, but it is characterized by a back and forth oscillation process.

Key words: subway; stress state; principal stress axis rotation; stress path; moving load

0 引言

随着城市地下空间的发展, 地铁正逐渐成为各大城市的主干交通。据统计, 截止到 2010 年, 中国大陆包括北京、天津、上海、广州、南京、深圳、杭州等在内的 32 座城市已建或即将开建地铁^[1]。但地铁运营引起的地基沉降问题也越来越突出, 上海地铁 1 号线建成后未通车的 2 年 3 个月内基本没有沉降, 但在建成后 4 年运营期间人民广场站——新闻路站区间隧道最大累计沉降量超过 145 mm^[2], 上海地铁 2 号线建成后 5 年运营期间世纪公园站——江苏路站区间隧道最大累计沉降量超过 130 mm^[3], 都远远超过了《地铁隧道保护条例》所规定的 20 mm 总位移量的标准。引起

地铁隧道沉降的因素较多, 如土体的固结、蠕变或长期交通荷载作用下的振陷, 以及地下水位的变化。其中地铁列车移动荷载引起的振动及土体单元应力变化具有重要的影响。

轨道交通荷载作用下地基中土单元的应力路径以及主应力轴旋转比较特殊, 与传统的地震、机械振动、波浪荷载等动荷载引起的土单元应力路径和主应力旋转有所不同。机械振动一般可以简化为简谐荷载, 地震和波浪荷载可以简化为来回循环荷载, 但是不能同时

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278463); 浙江省自然科学基金项目(LQ12E08009); 杭州市科技计划项目(20130834M06)

收稿日期: 2013-07-17

反映出主应力轴连续旋转以及主应力的差连续变化^[4]。目前针对轨道交通引起的地基中土单元的应力状态变化的方法主要有数值分析法^[5-6]、理论解析法^[7-9]和室内试验方法^[10-12]等, 比较典型的是 Ishihara 等提出的静力解析法和王常晶等提出动力解析法。

Ishihara^[7]利用静力 Boussinesq 解模拟地面轨道交通得到土单元的应力, 用荷载距考察点的距离变化来模拟荷载的移动, 得到了考察点的应力路径。这种方法很好地反映了轮轴荷载引起土单元主应力轴旋转的性质, 也便于计算分析, 但这种方法无法考虑高速列车移动对地基土应力状态的影响。Chen 等^[8]、王常晶等^[9]利用移动荷载作用下地基的动应力解答, 分析了荷载移动正下方和移动线外土单元的应力状态变化及主应力旋转, 考虑了荷载速度对应力路径的影响。其研究结果表明, 当荷载速度接近地基内部剪切波速时, 动应力峰值急剧增大, 当荷载速度低于地基内部剪切波速时, 动力解大小与静力解相似, 静力方法可以适用。

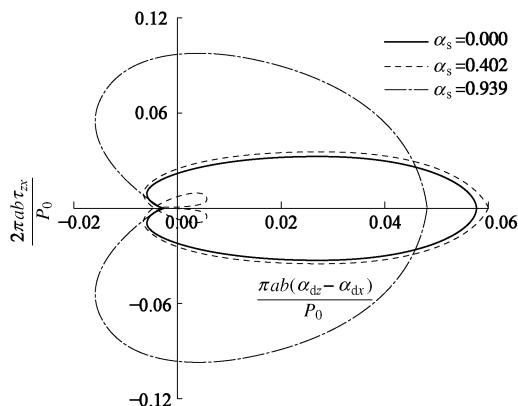


图 1 不同列车荷载移动速度时的水平剪应力和应力分量差的关系 (α_s 为列车速度与地基土剪切波速之比)

Fig. 1 Relation between horizontal shear stress and difference of stress component under different train load moving velocities (α_s is the ratio of train load moving velocity to shear wave velocity)

迄今为止的文献都基于高铁或路面交通, 关于一定埋置深度的地铁列车运营引起的地基应力状态变化及主应力轴旋转相关研究还未见报道。理论和实测均表明当列车荷载速度与地基土剪切波速的比值不超过 0.4 时, 荷载移动速度时的水平剪应力和应力分量差曲线形状和大小均与静力解相近, 如图 1 所示; 超过 0.5~0.6 时, 动力响应明显增大, 此时必须用动力方法进行分析^[8, 13]。而我国地铁列车运营速度最大一般为 80 km/h 左右, 地基内剪切波速为 260 km/h 左右, 列车荷载速度远低于地基内部剪切波速, 其比值为 0.308, 小于 0.4, 因此静力方法可以适用于研究地铁列车运营引起的地基土体应力特征分析。

地铁运行引起土体单元应力路径及主应力轴旋转本质上是由于地铁运行作用在轨道及地基土上的力。文献[8]认为列车产生的地基土振动主要是低频振动 (0~20 Hz), 低频部分主要是由移动荷载引起的地基土响应; 高频响应主要由道床不均匀、轨道不平顺和车体自身振动等所引起的, 但这些高频部分在轨道外部地基内很快就衰减得很小。因此本文对地铁列车作用力进行简化, 将该力视为沿前进方向以一定速度运动的周期性集中力, 并将集中作用力施加在地基土上。以弹性半空间 Mindlin 解^[14]为基础, 用荷载距考察点的距离变化来模拟荷载的移动, 以单个轮轴荷载和列车移动荷载为研究对象, 分析了地铁列车运营引起的地基应力状态变化及主应力轴旋转。

1 地铁运营引起的应力状态变化及主应力轴旋转分析

1.1 单个移动荷载

如图 2 所示, 土为均质土, 地铁荷载作用深度为 $z=10$ m, 计算土单元位于隧道正下方 3 m ($x=0, y=0$ m, $z=13$ m), 地铁列车荷载简化为单个轮载, 不考虑隧道的轨道及衬砌刚度影响。地铁列车以 $v_0=15$ m/s (54 km/h) 的速度运行, 用荷载与计算土单元的水平距离变化来模拟荷载的移动, 列车与计算土单元的水平距离为 $x=-30$ m 时, 即 $t=-2$ s 时刻开始研究计算土单元的应力状态变化, 直到 $t=2$ s 列车离开计算土单元水平距离 $x=30$ m。

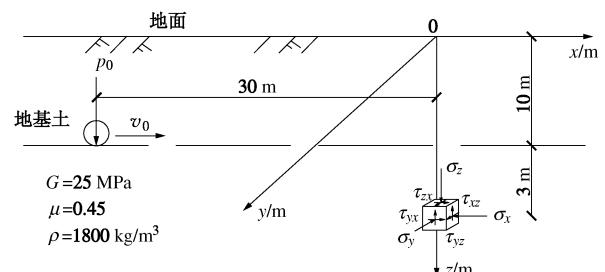


图 2 单个轮载移动引起的土单元应力状态分析示意图

Fig. 2 Diagram of stress state analysis induced by one wheel load

运用弹性半空间内的任意一点 $M(x, y, z)$ 的 Mindlin 解, 在荷载移动线正下方即 $y=0$ 平面上的土单元, 其剪应力 $\tau_{xy}=0, \tau_{yz}=0$, 所以 y 方向的动应力即为主应力 σ_y , 其值很小且始终为中主应力 σ_2 , 可以不考虑影响。现在仅对 $x-z$ 平面上的应力状态和主应力轴变化进行研究。由图 3 可以看出, 正应力 σ_x 与 σ_z 的图形是关于 $x=0$ 对称的, 剪应力 τ_{xz} 的图形关于 $x=0$ 反对称。当荷载移动接近计算土单元正上方时, 土单元应力变化较大, 并且 σ_z 接近 1.3 kPa 远大于其它两个动应力。而在荷载离计算土单元较远时, 3 个应力分量大小相近。

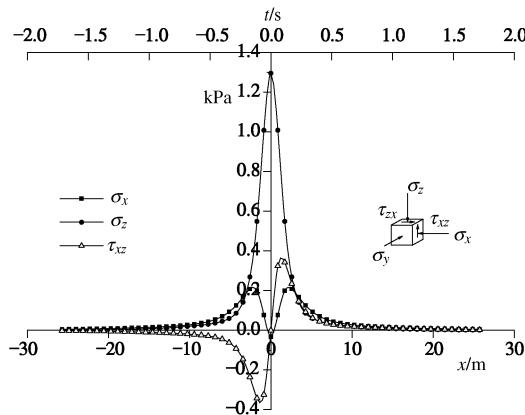


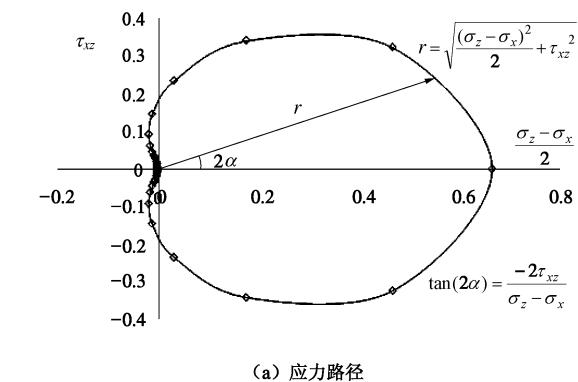
图 3 计算土单元动应力随时间和荷载的变化

Fig. 3 Change of dynamic stress of soil elements under load-moving line with time and moving coordinate

图 4 (a) 是用水平剪应力和应力分量差表示的荷载移动过程中计算土单元应力路径变化, 曲线上任意一点的矢量模量为

$$r = \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \quad (1)$$

矢量角等于最大主应力与 x 轴的夹角 α 的 2 倍。



(a) 应力路径

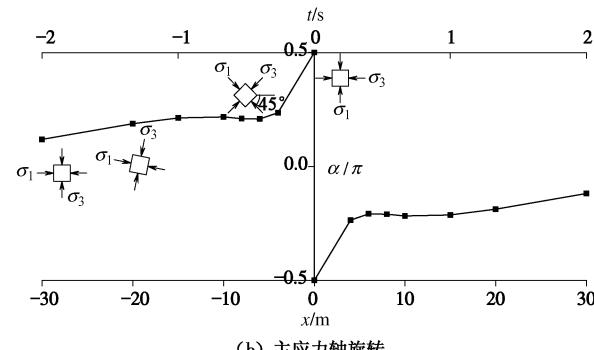


图 4 荷载移动线正下方土单元应力路径及主应力轴旋转

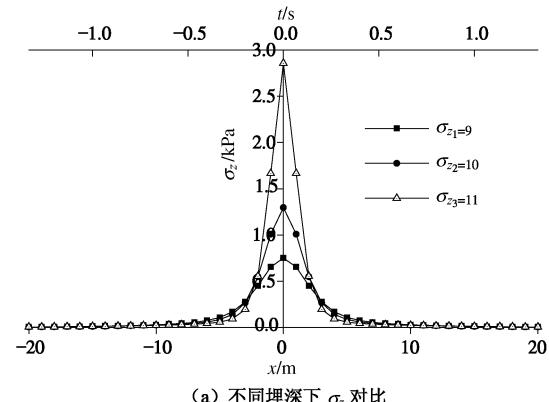
Fig. 4 Stress path and principal stress axes rotation of soil elements under load-moving line

主应力夹角为从 x 轴到主应力轴旋转所转过的角度, 顺时针为正, 逆时针为负, 主应力夹角范围 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 。当轮载向土单元移动时, 水平剪应力的增长速度要大于应力差分量的增长速度。到达 B 点时, 此时应力差分量为 0, 土单元处于单剪状态。当荷载继续

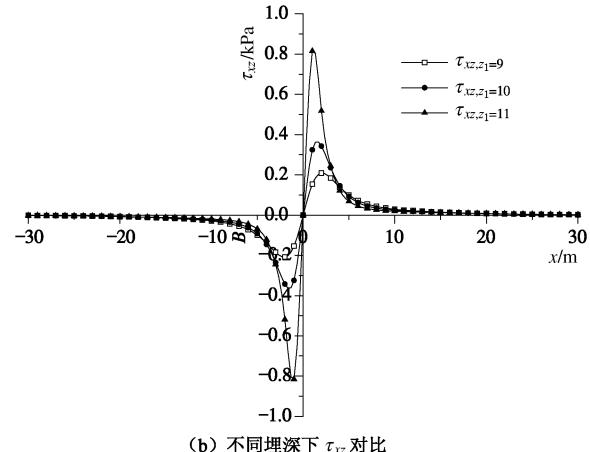
向土单元移动时, 水平剪应力和应力差分量继续增大, 在 C 点时前者达到最大。随后水平剪应力开始减小, 而应力差分量继续增大, 逐渐成为主要的应力分量。在 D 点, 荷载移动到土单元正上方, 水平剪应力为 0, 且应力差分量达到最大, 土单元处于纯三轴剪切状态。荷载远离土单元的过程中, 应力状态与上述过程相反。

图 4 (b) 为最大主应力 σ_1 与 x 轴的夹角随移动坐标和时间的变化。当荷载向计算土单元移动时, σ_1 与 x 轴的夹角逐渐增大, 到计算土单元正上方时夹角为 $\pi/2$, 此后荷载离开计算土单元移动, σ_1 与 x 轴的夹角逐渐减小并且为负。整个过程中主应力轴顺时针旋转了 180° 。

图 5 (a) 和图 5 (b) 是用本文方法得到荷载作用深度分别为 $z_1 = 9$ m, $z_2 = 10$ m, $z_3 = 11$ m 时, 荷载移动线正下方土单元 ($y=0, x=0, z=13$) 应力变化情况。可以发现移动列车荷载作用下: 当荷载离计算土单元水平距离较远时, 隧道埋深越深, 土单元应力越小, 但是随着列车靠近土单元, 土单元应力不断增长, 隧道埋深越大, 土单元应力增长也越快, 并在距计算土单元水平距离 $-2 < x < 2$ m 范围内时, 埋深较大隧道以下土单元的应力超过埋深较小隧道以下的土单元应力, 呈现隧道埋深越大, 土单元应力越大的现象。



(a) 不同埋深下 σ_z 对比



(b) 不同埋深下 τ_xz 对比

图 5 不同隧道埋深下土单元应力状态

Fig. 5 Stress state of soil elements at different depths of tunnel

1.2 列车移动荷载

在研究单个轮载引起地基应力状态变化及主应力轴旋转的基础上,通过相同的方法,分析列车移动过程中地基土应力状态变化。取地铁列车荷载作用深度 $z=10\text{ m}$,计算土单元位于隧道正下方 $3\text{ m}(x=0\text{ m}, y=0\text{ m}, z=13\text{ m})$ 。列车模型如图6,一节车厢共有4对轮子,相邻轮子之间的距离分别为 2.5 m 和 15 m ,相邻车厢间轮子间最近距离为 5 m 。列车取5节车厢,总长 120 m ,每节车厢重 20 t 。

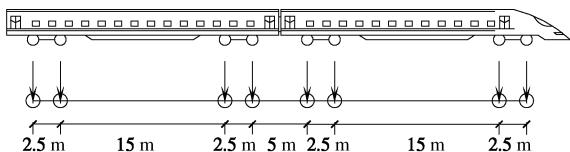


图6 列车模型

Fig. 6 Train model

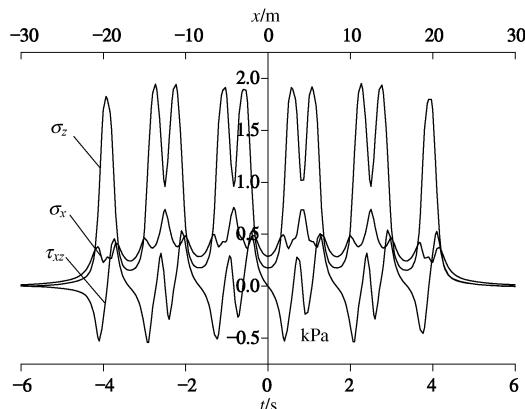


图7 列车荷载作用下计算土单元动应力

Fig. 7 Stresses of soil elements induced by train load

考虑地铁列车运营时速度 $v_0=15\text{ m/s}$,列车荷载通过轮子作用在地基土上,列车车头与计算土单元的水平距离为 $x=-30\text{ m}$ 时,即 $t=-6\text{ s}$ 时刻开始研究计算土单元的应力状态变化,直到 $t=6\text{ s}$ 时刻列车车尾离开计算土单元水平距离 $x=30\text{ m}$ 。因此在 t 时刻列车车头与计算土单元的水平距离为

$$x=v_0 \times (6+t) - 30 \quad (2)$$

计算土单元的应力为各个轮载在该点产生应力的叠加。为了更好的反映列车运动的连续性,本文每隔 0.1 s (列车移动 1.5 m)计算一次土单元的应力。图7为计算土单元在列车移动荷载作用下动应力变化,可以看出在列车荷载作用下,土单元的动应力具有循环特性,从列车车头离计算土单元的水平距离 30 m 开始,到车尾离开计算土单元的水平距离 30 m 时,共产生10个循环,正好为车厢节数的两倍。根据计算土单元与列车的相对位置,可以将图7曲线分为I、II、III 3阶段。第1阶段对应列车从初始位置移动到第1

节车厢的第1组轮轴荷载通过土单元,动应力的第1个循环是由第1组轮轴荷载通过引起的。第II阶段包括4个循环周期,对应列车除第1组和最后1组轮轴荷载外的荷载通过土单元,每2节相邻车厢的相邻2组轮轴荷载的通过引起一个循环。虽然每个循环周期中动应力数值并不完全相等,但可以认为这4个循环周期中主应力轴旋转是相同的,只需要对其中一个周期进行研究,如图8所示。第III阶段对应列车最后1组轮轴荷载通过直到列车远离土单元,这组轮轴荷载的通过引起最后1个循环。

土单元中主应力轴的转动同样也具有循环特性,每一个循环中主应力轴的旋转与单个轮荷载情况下类似,但是由于相邻轮载的影响,一个循环内主应力轴并非单调递增或递减,而是具有来回震荡的特性。从图8中可以看出,在一列列车接近、通过、远离土单元的过程中,主应力轴旋转了 10 个 180° ,在每旋转一个 180° 的过程中,其变化规律与单个移动荷载作用下土单元主应力旋转的规律相似。

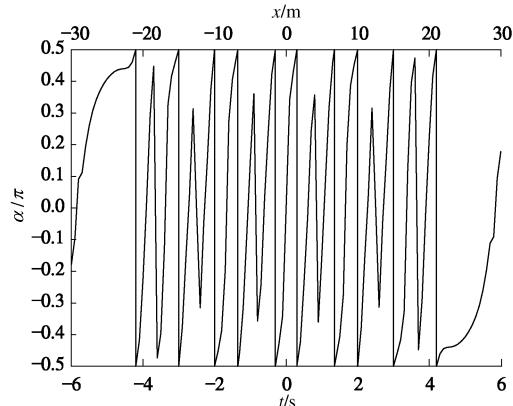


图8 移动荷载作用下计算土单元的主应力轴旋转

Fig. 8 Principal stress axis rotation of soil elements induced by train

2 结 论

本文在弹性半空间内Mindlin解的基础上,分别以单个轮轴荷载和多个轮轴荷载两种情况,对地铁列车运营引起的地基应力状态变化进行了分析,给出了地铁移动荷载作用下土单元的动应力变化规律:

(1) 单个轮轴荷载作用下,计算土单元主应力轴旋转了 180° 且方向始终为顺时针。在荷载移动的整个过程中,土单元的应力状态由最初的单剪模式变化到三轴剪切模式并最终回到单剪模式。

(2) 随着列车靠近土体单元,土单元应力不断增长,并在距计算土单元一定距离时,埋深较大隧道以下土单元的应力超过埋深较小隧道以下的土单元应力,并呈现隧道埋深越大,土单元应力越大的现象。

(3) 在列车荷载作用下, 土单元的动应力具有持续循环特性, 循环次数与列车车厢节数有关。列车远离计算点的过程与接近计算点的过程中应力的变化互为相反过程。每一个循环中主应力轴的旋转并非单调递增或递减, 而是具有来回震荡过程的特性。

本文考虑城市地铁列车行车速度一般小于 80 km/h, 将动力响应问题简化为静力问题求解, 若某些特殊地段和时刻地铁列车速度大于 80 km/h, 则需考虑列车速度对地基土应力的影响, 这一部分内容将在后面做进一步研究。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 351 – 364. (WANG Meng-shu. An overview of development of railways, tunnels and underground works in China[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(4): 351 – 364. (in Chinese))
- [2] 陈基炜, 詹龙喜. 上海市地铁一号线隧道变形测量及规律分析[J]. 上海地质, 2000(2): 51 – 56. (CHEN Ji-wei, ZHAN Long-xi. Deformation measuring of the metro tunnel and deformation data analysis of shanghai metro line No.1[J]. Shanghai Geology, 2000, (2): 51-56. (in Chinese))
- [3] 韦 凯, 宫全美, 周顺华. 隧道长期不均匀沉降预测的蚁群算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(8): 993 – 998. (WEI Kai, GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua. Ant colony algorithms of long-term uneven settlement prediction in tunnel[J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition), 2009, 37(8): 993 – 998. (in Chinese))
- [4] 徐建平, 谢伟平. 典型动力荷载作用下的应力路径及土动力分析方法[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2002, 19(2): 42 – 45. (XU Jian-ping, XIE Wei-ping. Paths of stress under typical dynamics load and the summary of dynamic analytical methods of soil[J]. Journal of Huazhong University of SCI & Tech (Urban Science Edition), 2002, 19(2): 42 – 45. (in Chinese))
- [5] 边学成, 胡 婷, 陈云敏. 列车交通荷载作用下地基土单元的应力路径[J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 86 – 92. (BIAN Xue-cheng, HU Ting, CHEN Yun-min. Stress path in soil element of ground under moving traffic loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11): 86 – 92. (in Chinese))
- [6] 刘雪珠, 陈国兴, 储 勇. 列车引起的地基土应力状态变化的三维有限元分析[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 159 – 167. (LIU Xue-zhu, CHEN Guo-xing, CHU Yong. Stress states of soil elements induced by train passage on the basis of 3D finite element analysis[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(2): 159 – 167. (in Chinese))
- [7] ISHIHARA K. Soil behavior in earthquake geotechnics[M]. New York: Oxford University Press Inc, 1996.
- [8] CHEN Y M, WANG C J, CHEN R P, et al. Characteristics of stresses and settlement of ground induced by train[C]// TAKEMIYA H ed. Environmental Vibration Prediction, Monitoring and Evaluation. London: Taylor and Francis/Balkema, 2005: 33 – 42.
- [9] 王常晶, 陈云敏. 列车移动荷载在地基中引起的主应力轴旋转[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(5): 950 – 954. (WANG Chang-jing, CHEN Yun-min. Principal stress axes rotation in ground induced by train moving load [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2010, 44(5): 950 – 954. (in Chinese))
- [10] 陈国兴, 潘 华. 轨道交通振动作用引起的土单元应力路径特征及其在室内试验中的模拟[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊): 340 – 345. (CHEN Guo-xing, PAN Hua. The characteristics and laboratory test simulation of stress path induced by traffic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S0): 340 – 345. (in Chinese))
- [11] 王常晶, 温日琨, 陈云敏. 交通荷载引起的主应力轴旋转室内试验模拟探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3412 – 3416. (WANG Chang-jing, WEN Ri-kun, CHEN Yun-min. Discussion on laboratory test simulation of principal stress axes rotation induced by traffic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3412 – 3416. (in Chinese))
- [12] 沈 扬, 周 建, 龚晓南, 等. 主应力轴循环旋转对超固结黏土性状影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1514 – 1519. (SHEN Yang, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan, et al. Influence of principal stress rotation on overconsolidated clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1514 – 1519. (in Chinese))
- [13] EASON G. The stresses produced in a semi-infinite solid by a moving surface force[J]. International Journal of Mechanics A: Solids, 1965, 2: 581 – 609.
- [14] MINDLIN R. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, 7(5): 195 – 202.

(本文责编 黄贤沙)