

武汉地铁7号线行车荷载下越江公铁两用隧道 结构动力响应分析*

崔豪^{1,2} 刘晶³ 张志华^{1,2**} 黄金权^{1,2} 聂文婷^{1,2}

(1. 长江水利委员会长江科学院, 430010, 武汉; 2. 水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心, 430010, 武汉;
3. 水利部科技推广中心, 100038, 北京//第一作者, 工程师)

摘要 以武汉地铁7号线越江公铁两用隧道为研究对象, 建立了考虑地铁行车荷载的越江隧道(含钢轨、轨枕、管片及周边岩土体等)离散元模型。在该隧道某截面上选取14个测点, 分析了地铁行车荷载下该截面各层混凝土板的局部动力响应及管片动力响应。结果表明: 管片结构及各混凝土板对称点处的颗粒振动加速度呈对称分布; 随着地铁行车荷载的施加, 排烟道两侧与管片连接处、公路路面板中心区域的剪应力逐渐增大, 易出现裂隙破坏; 地铁行车荷载引起的振动波在管片内的传递以横向振动波和竖向振动波为主; 地铁列车开始通过隧道截面时对隧道管片的影响最大。

关键词 地铁; 越江公铁两用隧道; 行车荷载; 结构动力响应; 离散元模型

中图分类号 U451+.3; U459.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.004

Structural Dynamics Response Analysis of Wuhan Metro Line 7 Rail-cum-Road Cross-river Tunnel under Metro Traffic Load

CUI Hao, LIU Jing, ZHANG Zhihua, HUANG Jinquan, NIE Wenting

Abstract Taking Wuhan Metro Line 7 rail-cum-road cross-river tunnel as research object, a discrete element model of cross-river tunnel under metro traffic load (including rail, sleeper, segment and surrounding soil) is established. 14 measuring points are selected on a section of the tunnel, the local dynamics response and segment dynamics response of the concrete slabs in each layer of the section under metro traffic load are analyzed. Results show that the particle vibration accelerations at the symmetrical points of the segment structure and concrete slabs are symmetrically distributed; with the application of metro traffic load, the shear stress at the connection

between both sides of smoke exhaust duct and segments and the central area of highway pavement slab increases gradually, which is prone to crack failure; the vibration wave caused by metro traffic load is mainly transmitted by transverse vibration wave and vertical vibration wave in the segment. The influence on the tunnel segment is the largest when the metro train starts to pass through the tunnel section.

Key words metro; rail-cum-road cross-river tunnel; traffic load; structural dynamics response; discrete element model

First-author's address Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, 430010, Wuhan, China

地铁行车产生的振动会对隧道周边岩土体及毗邻的地下构筑物产生一定的影响。此外, 对于大断面越江地铁隧道而言, 其结构复杂, 隧道内有诸多混凝土板与管片相连^[1], 在隧道服役期间, 需要考虑地铁列车运行对隧道本身的影响, 如为公铁两用隧道, 还需考虑地铁上方公路上机动车行驶荷载的影响。为此, 需要对大断面越江隧道结构在地铁行车荷载作用下的动力响应进行研究。

本文以武汉地铁7号线(以下简称“7号线”)越江公铁两用隧道某一截面作为研究对象, 建立了考虑地铁行车荷载作用下的大断面越江隧道离散元模型, 着重分析地铁列车行驶过程中大断面越江隧道内各层混凝土板的局部动力响应及管片的动力响应, 以期为该隧道的安全运营与维护提供一定的参考。

1 隧道模型土层及荷载模拟

7号线越江公铁两用隧道位于该线的三阳路

* 国家自然科学基金项目(42077062); 青年人才托举工程项目(2021QNRC001); 湖北省自然科学基金项目(2021CFB129); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CKSF2021446/TB)

** 通信作者

站—徐家棚站区间内,盾构段全长为 2 590 m,隧道管片外径为 15.2 m,内径为 13.9 m,管片厚度为 0.65 m,最大覆土厚度为 39.5 m,最小覆土厚度为 8.4 m。该盾构段内部结构包括Ⅱ型道路结构、弧形板内衬、烟道板及牛腿、疏散平台、两侧闭内衬、防撞侧墙和管廊隔板等。其中,Ⅱ型道路结构采用现浇方式施工。该隧道主要穿过粉细砂地层,局部区段穿越中粗砂、弱胶结砾岩等地层。考虑到土层自重应力、水压力等因素,本文假设土层沿长江流向保持一致,对选址区域进行地铁行车荷载下隧道结构的动力特性研究。在选取的隧道截面土层中,上层为淤泥质土(厚度 7 m),下层为粉细砂(厚度 8 m)。

1.1 土层及结构参数的标定

为了得到各土层的相关力学参数,需要对各土

层进行相应的室内力学试验研究。对于粉细砂土层,文献[2]开展了室内直剪试验及离散元数值模拟和细观变形机制的研究。对于淤泥质土层,文献[3]进行了三轴室内试验及离散元模拟研究,并对其参数进行了标定。

本文建立的隧道模型中,轨枕尺寸为 2.50 m(长)×0.25 m(宽),采用高强度、高刚度的材料进行模拟;钢轨以 2 个粒径较大、刚度高、无黏结力、无摩擦力的颗粒进行模拟,钢轨颗粒参数设置时忽略了施加地铁行车荷载时引起的变形;管片材料赋予混凝土 C60 的特性,其固有频率为 70~100 Hz^[4]。模型中的淤泥质土层、粉细砂土层、轨枕、钢轨及管片等土层及结构的参数如表 1 所示。

表 1 越江公铁两用隧道离散元模型土层及结构主要参数

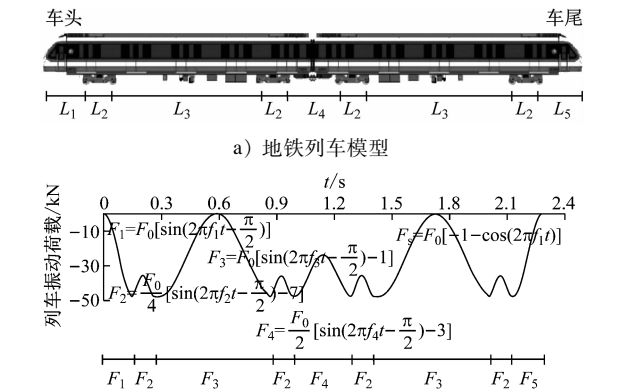
Tab. 1 Main parameters of strata and structure in the discrete element model of rail-cum-road cross-river tunnel												
土层/结构	R/m	$\rho/$ (kg/m ³)	$K_n/$ (N/m)	$K_s/$ (N/m)	μ	$C_{on}/$ Pa	$C_{os}/$ Pa	$P_{on}/$ Pa	$P_{os}/$ Pa	$P_{kn}/$ (N/m)	$P_{ks}/$ (N/m)	P_r
淤泥质土	0.060~0.100	1 700	2.17×10^6	2.17×10^6	0.185	1.40×10^6	1.40×10^6					
粉细砂	0.060~0.100	2 000	2.19×10^7	2.19×10^7	0.620	2.17×10^6	2.17×10^6					
轨枕	0.012	2 180	1.00×10^7	1.00×10^7	0.500			5.0×10^9	5.0×10^9	5.0×10^9	5.0×10^9	1
钢轨	0.100	2 630	5.20×10^{10}	5.20×10^{10}	0							
管片	0.009	2 180	9.00×10^8	9.00×10^8	1.980			7.1×10^9	7.1×10^9	9.0×10^8	9.0×10^8	1

注:R——颗粒粒径; ρ ——密度; K_n ——颗粒法向刚度; K_s ——颗粒切向刚度; μ ——摩擦系数; C_{on} ——接触黏结法向强度; C_{os} ——接触黏结切向强度; P_{on} ——平行黏结法向强度; P_{os} ——平行黏结切向强度; P_{kn} ——平行黏结法向刚度; P_{ks} ——平行黏结切向刚度; P_r ——平行黏结半径系数。

1.2 地铁不规则行车荷载模型

由于地铁隧道纵向沿线较长,可看作无限延伸的等截面结构,因此可以将地铁隧道受力状态简化为平面应变问题进行研究。文献[5]在考虑列车行车荷载时,基于三维列车荷载的计算方程提出了 2.5 维的计算方程式。

文献[3]从文献[5]的方法中得到了启发,提出了列车行车荷载二维模型表达式。地铁列车每节车厢的质量为 38.00 t,因共有 8 个车轮,则每个车轮的荷载为 4.75 t。以 6 节编组地铁列车(A 型车)为研究对象,该列车包含 1 节车头、4 节中间车厢及 1 节车尾。假设土层沿隧道纵截面方向保持不变。文献[3]研究得到的地铁列车模型如图 1 a)所示(省略了 4 节中间车厢),列车行车荷载模型如图 1 b)所示。图 1 b)中,设 t 为列车运行时间, v 为列车运行速度, L_i ($i=1,2,3,4,5$) 为相邻 2 个车轮的间距, f_i 为 L_i 对应三角函数的频率(由 $f_i=v/L_i$ 计算而得)。



注: F_0 ——每个车轮的荷载; F_1 —— L_1 区段的荷载函数; F_2 —— L_2 区段的荷载函数; F_3 —— L_3 区段的荷载函数; F_4 —— L_4 区段的荷载函数; F_5 —— L_5 区段的荷载函数。

b) 地铁列车行车荷载曲线

图 1 地铁列车行车荷载模型

Fig. 1 Model of metro train traffic load

图 1 b)中, $F_0=23\,750\text{ N}$, $L_1=2.5\text{ m}$, $L_2=2.0\text{ m}$, $L_3=10.0\text{ m}$, $L_4=5.0\text{ m}$, $L_5=2.5\text{ m}$ 。 t 由 v 与 L_i

计算决定,本文取 $v = 60 \text{ km/h}$ 。

2 越江公铁两用隧道离散元模型

以选取的隧道截面作为研究背景,基于上述土层参数的标定及隧道内各部分的模拟,得到该隧道的离散元模型,如图2所示。该模型的尺寸为 31.5 m (宽) $\times 40.0 \text{ m}$ (高),模型内土层共两层,上层为淤泥质土,下层为粉细砂。隧道结构共分上、中、下3个层次,其中:上层为公路隧道排烟道;中间层为公路行车道;下层为地铁行车道、逃生通道、电缆廊道及排烟道。模型顶部的水压力设为 0.25 MPa ,侧向水土压力取模型左、右两侧所受水土压力值的平均值。根据表1设定模型内土层及结构的参数。

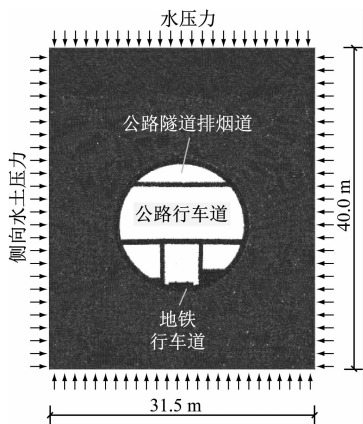


图2 7号线越江公铁两用隧道离散元模型

Fig.2 Discrete element model of the rail-cum-road cross-river tunnel of Line 7

3 结构动力响应结果分析

本文对隧道内排烟道与管片连接处(测点a和测点c)、排烟道的中心位置(测点b)、公路路面与管片连接处(测点d和测点h)、公路路面与地铁行车道两侧隔离板连接处(测点e和测点g)、公路路面中心(测点f)及隔离板与管片连接处(测点i和测点j)、管片两侧(测点 LC_1 和 LC_3)、管片顶部(测点 LC_2)及管片底部(测点 LC_4)共14处进行了动力响应分析,图3为14处测点的具体位置。

3.1 隧道内各层混凝土板的局部动力响应

首先对隧道内各层混凝土板测点处(测点a—测点j)的振动加速度及局部受力特性进行分析,探究地铁行车荷载对隧道内混凝土板的影响。

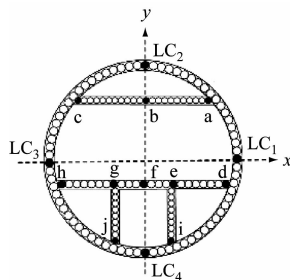


图3 隧道截面内14处测点位置

Fig.3 Location of the 14 measuring points in tunnel section

3.1.1 横向振动加速度

测点a—测点j的颗粒横向振动加速度如图4所示。由图4可知,随着地铁行车荷载的施加,隧道内各测点处均产生一定的横向振动。以隧道中心线为对称轴的管片结构,以及各混凝土板对称位置处的测点,其颗粒横向振动加速度峰值大体相近。测点h和测点d的颗粒横向振动加速度峰值之比为11.3,测点j与测点i的颗粒横向振动加速度峰值之比为22.7,这是由于随着地铁行车荷载引起的横向振动波在管片内各混凝土板中的传递,其耗散程度不同,同时隧道结构局部模态与轮轨荷载的共振也导致了管片结构对称位置处的振动特性有所不同^[6]。此外,各测点的颗粒横向加速度均有突变值,这是由于在地铁行车荷载作用下,管片内的颗粒体发生了微小移动,并与周边的颗粒体发生碰撞,因此产生了较大的颗粒振动加速度。

3.1.2 竖向振动加速度

随着地铁行车荷载的施加,测点a—测点j处的颗粒竖向振动加速度分布规律如图5所示。由图5可知:随着振动时间的增大,各测点的颗粒竖向振动加速度变化趋势大致相同,即除测点a和测点c外,其余测点处的竖向振动加速度在地铁行车荷载开始施加(即地铁车头开始通过该隧道截面)时最大,后逐渐减小,并逐渐趋近于0,且在管片结构及各混凝土板对称点处的颗粒竖向振动加速度呈对称分布。在排烟道与管片两侧连接处(测点a和测点c)的颗粒竖向振动加速度有较大的突变值,而其他测点的颗粒竖向振动加速度变化较为稳定,呈减小趋势。

3.1.3 局部受力特性

本文对隧道内测点a—测点j的局部受力特性进行分析,除测点i和测点j外其余各测点的轴向应力结果如图6所示。由图6a)可知,排烟道各测点

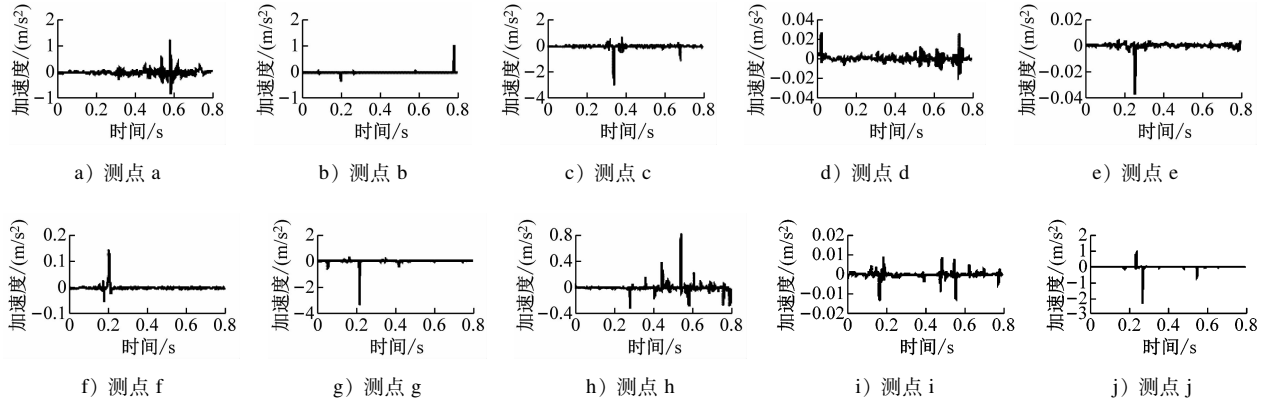


图4 隧道内各层混凝土板测点a—测点j处的颗粒横向振动加速度

Fig. 4 Particle horizontal vibration accelerations at the measuring points a to j of concrete slab of each layer in the tunnel

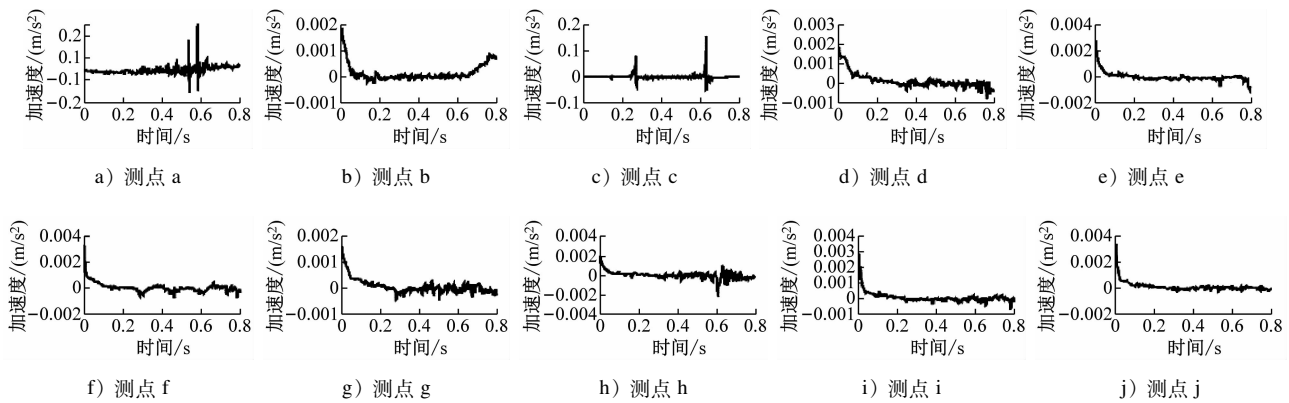


图5 隧道内各层混凝土板测点a—测点j处的颗粒竖向振动加速度

Fig. 5 Particle vertical vibration accelerations at the measuring points a to j of concrete slab of each layer in the tunnel

(测点a、测点b及测点c)均受压,排烟道与管片右侧连接处(测点a)的轴向应力随着列车行驶时间的增加先增大后减小,而排烟道与管片左侧连接处(测点c)的轴向应力一直在增大,排烟道中心位置(测点b)处的轴向应力则几乎不变。这是由于排烟道轴向应力的变化情况与管片受到的周边土体压力有关,而列车行驶产生的振动荷载会使隧道顶部区域周边土体发生较大的变形^[3],从而导致管片所受压力增大,并对排烟道板施加轴向压力。从图6b)可知,公路路面受地铁振动荷载影响较大,其混凝土板各位置处(测点d—测点h)的轴向应力均呈先增大后减小的趋势。测点e和测点h的轴向应力均为负值,表明这2个测点一直处于受压状态;该板中心区域(测点e、测点f及测点g)则出现了先受压、后受拉的现象。因此,在地铁列车长期运行时,需要对公路路面中心区域进行长期监测,以防止路面裂隙产生。

排烟道板及公路路面各测点处的剪应力如

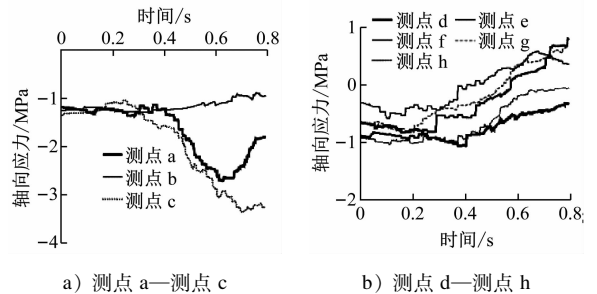
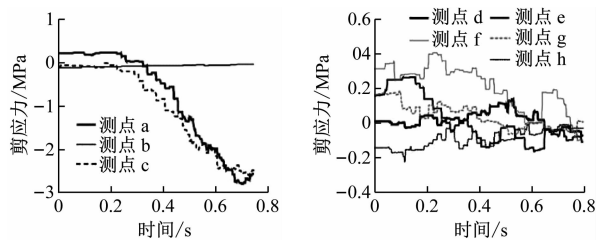


图6 隧道内各层混凝土板测点a—测点j的局部轴向应力

Fig. 6 Local axial stress at the measuring points a to j of concrete slab of each layer in tunnel

图7所示。由图7可知,排烟道中心位置(测点b)不受剪应力的作用,公路路面各位置处(测点d—测点h)的剪应力随着地铁行车荷载的施加均发生了较小的波动。排烟道两侧(测点a和测点c)所受剪应力较大,并且随着列车行驶时间的增加逐渐增大,公路路面中心处(测点e—测点g)的剪应力随着列车行驶时间的增大而逐渐减小。因此,在地铁长期运营过程中,需要对排烟道与管片两侧连接

处进行监测和维护,防止路面裂隙产生。



a) 测点 a、b、c 处的剪应力 b) 测点 d、e、f、g、h 处的剪应力

图7 隧道内各层混凝土板多个测点的局部剪应力仿真结果

Fig. 7 Simulation results of local shear stress at the measuring points of concrete slab of each layer in the tunnel

3.2 管片的动力响应

本文对环形管片结构不同位置(测点 LC_1 、 LC_2 、 LC_3 、 LC_4)处的颗粒振动加速度进行了分析,如图8所示。由图8可知,地铁行车荷载在管片内

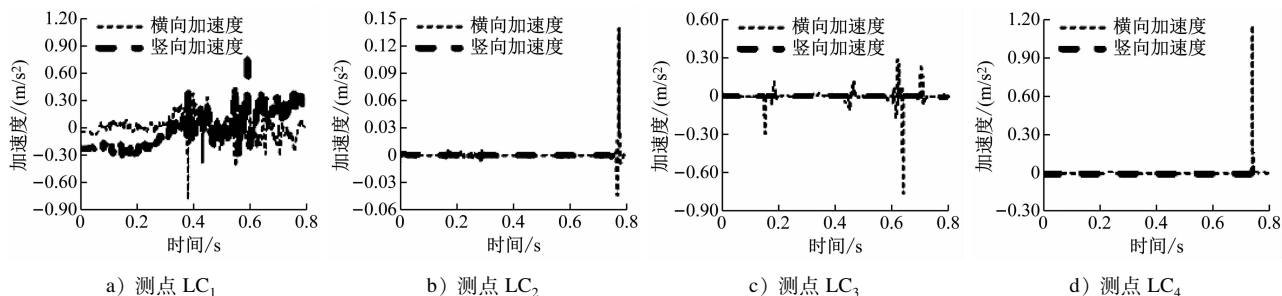


图8 管片内测点 LC_1 — LC_4 的颗粒振动加速度

Fig. 8 Particle vibration acceleration at the measuring points LC_1 to LC_4 in segment

4 结语

管片结构及各层混凝土板对称点处的颗粒振动加速度呈对称分布。随着地铁行车荷载的施加,隧道内各层混凝土板测点处的颗粒横向振动加速度有突变值,排烟道两侧与管片连接处及公路路面板中心区域的剪应力逐渐增大,路面易出现裂隙破坏。

地铁行车荷载引起的振动波在管片内的传递以横向振动波和竖向振动波为主,其中:管片内颗粒体的横向振动加速度有突变值,竖向振动加速度均较小。管片内颗粒竖向振动加速度存在较大的初始值,且随着地铁列车运行时间的增加,颗粒竖向振动加速度逐渐减小。进一步分析地铁行车荷载不同时间段内的颗粒振动加速度值发现,地铁列车开始通过隧道截面时对隧道管片的影响最大。

引起的横向加速度有突变值,而竖向加速度均较小。地铁行车荷载主要为竖向荷载,造成管片内各测点的颗粒横向加速度发生突变的主要原因是:①地铁行车荷载引起的振动波在管片内传递,逐步演变为横向振动波和竖向振动波,这两种振动波的传递均受模型内结构材料强度和均质性的影响^[3];②隧道模型顶部有较高的水压力,竖向振动波在管片内的传递较为均匀,具体表现为管片结构内的颗粒竖向振动加速度无较大突变值,而模型两侧的水土压力较小,横向振动波在传递过程中因颗粒体的微小移动碰撞,产生了较大的颗粒竖向振动加速度突变。另外,由图8 a)还可以发现,在管片右侧区域(测点 LC_1)颗粒振动加速度较大,这表明管片右侧受地铁振动荷载的影响较大,其原因可能是测点 LC_1 区域为离散介质混凝土管片,管片的颗粒密实度不均匀^[7]。

参考文献

- [1] 刘鹏,李克先,田洪肖. 青岛地铁1号线过海区间隧道大断面优化设计[J]. 人民长江, 2020, 51(增刊1): 142.
LIU Peng, LI Kexian, TIAN Hongxiao. Optimal design of cross-sea tunnel of large section in Qingdao Subway project[J]. Yangtze River, 2020, 51(S1): 142.
- [2] 李爽,刘洋,吴可嘉. 砂土直剪试验离散元数值模拟与细观变形机理研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(4): 104.
LI Shuang, LIU Yang, WU Kejia. Exploring mesoscopic deformation mechanism of sand in direct shear test by numerical simulation using discrete element method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(4): 104.
- [3] ZHANG Z H, ZHANG X D, TANG Y, et al. Discrete element analysis of a cross-river tunnel under random vibration levels induced by trains operating during the flood season[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2018, 19(5): 346.

(下转第29页)