

文章编号: 1000-7598-(2012)09-2863-06

飞机荷载作用下粉砂土路基动力响应研究

蔡迎春¹, 郑元勋¹, 刘忠玉², 张春霞²

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450002; 2. 郑州大学 土木学院, 郑州 450002)

摘要: 随着公路跑道建设的快速发展和粉砂土路基的广泛应用, 飞机荷载作用下粉砂土路基稳定性还有待进一步研究。采用拉格朗日差分方法, 利用 Byrne 模型描述饱和粉砂土孔压变化, 分析了飞机荷载作用下粉砂土路基孔隙水压力、位移以及瞬时屈服区的变化规律, 并通过室内模型试验验证了结果的合理性。研究表明: 在飞机荷载作用下, 粉砂土路基超孔隙水压力、位移分布以及应力状态受加载频率、加载时间及荷载峰值影响较大, 其中加载频率 5 Hz 是一个关键控制指标, 在设计中应给予重点考虑。

关键词: 粉砂土; 高速公路跑道; 飞机荷载; 路基; 动力响应

中图分类号: TU 416.2

文献标识码: A

Study of dynamic response of silty sand subgrade loaded by airplane

CAI Ying-chun¹, ZHENG Yuan-xun¹, LIU Zhong-yu², ZHANG Chun-xia²

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: With the rapid development of highway and runway construction and the widely application of silty sand subgrade, the stability of silty sand subgrade under aircraft loads should be further studied. Based on Byrne model describing the variation of pore pressure in saturated silty sand, the Lagrange difference method was introduced to analyze the effect of aircraft loading on silty sand subgrade pore pressure, displacement and instantaneous destroyed areas. The laboratory model tests were carried out to validate its rationality. Results show that the excess pore water pressure, displacement distribution and stress state in silt sand subgrade are influenced significantly by loading frequency, loading time and load peak, especially, loading frequency 5 Hz is a key control indicator and should be given consideration in the design.

Key words: silty sand; highway runway; airplane load; subgrade; dynamic response

1 引言

粉砂土主要由介于细砂和粉土之间的颗粒组成, 与细粒黏土填料相比, 黏聚力偏低, 是一种不太理想的路基填筑材料。但考虑建设成本及就地取材的方便, 粉砂土路基已经大量应用于公路甚至是高等级公路建设。近年来, 随着我国国防战略储备的需要, 公路跑道的建设逐渐得到重视。飞机荷载作用下粉砂土路基的稳定性及耐久性, 是保证公路跑道使用性能和使用寿命的关键因素。因此, 有必要对粉砂土路基稳定性及行车荷载作用下的动力响应等进行研究与分析。目前, 国内外针对粉砂土的研究多集中在粉砂土路基施工技术及检测方法^[1-5]、

粉砂土路基累积变形及变形指标研究^[6-8]、粉砂土路基冻胀性能研究^[9]及粉砂土路基稳定性研究^[10-12]中, 而针对粉砂土路基动力响应的文献相对较少, 且多为考虑汽车荷载作用下粉砂土作为路基的动力响应问题, 几乎没有涉及到机场跑道粉砂土路基在飞机荷载作用下的动力响应问题。本文就此开展了相关研究。

2 粉砂土路基动力特性模型

动力荷载作用下孔隙水压力的变化是影响土体变形及强度的重要因素, 也是用有效应力法分析土体动力稳定性的关键。现已有多种考虑不同因素的孔隙水压力计算模型, 如应力模型、应变模型、

收稿日期: 2012-05-11

基金项目: 交通部科技攻关项目 (No. 2010353341220)。

第一作者简介: 蔡迎春, 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程检测及稳定性分析等方面的研究工作。Email: yccai@zzu.edu.cn

能量模型、内时模型、有效应力路径模型和瞬态模型等。本文采用应变模型对机场跑道粉砂土路基地震液化及稳定性进行研究分析。

应变模型将孔压与某种应变结合起来,过去常用排水时的体应变作为变化量,目前多采用剪应变。Martin 等^[13]认为,不排水条件下的动孔压等于排水时永久体积变形与回弹模量的乘积,即

$$\Delta u_g = \bar{E}_r \Delta \varepsilon_{vd} \quad (1)$$

$$\bar{E}_r = \frac{(\sigma'_v)^{1-m}}{mk_0(\sigma'_{v0})^{n-m}} \quad (2)$$

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + \frac{C_3(\varepsilon_{vd})^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{vd}} \quad (3)$$

式中: $\Delta \varepsilon_{vd}$ 为一个应力循环所引起的塑性体积应变,仅与累计永久压缩体积应变 ε_{vd} 有关; $\bar{E}_r$ 为有效应力为 σ'_v 时的回弹模量; σ'_{v0} 为初始有效应力; k_0 、 m 、 n 均为系数,可由一组卸荷曲线根据不同的初始垂直应力 σ'_{v0} 求得; 系数 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 可由试验确定。

式(3)是根据 Seed^[14]干砂的动三轴试验结果整理出来的。Byrne^[15]同样整理得到如下公式:

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1 \gamma \exp\left(-C_2 \frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma}\right) \quad (4)$$

Byrne 利用 Martin^[13]和 Tokimatsu^[16]等的试验资料,得到由砂土的相对密度 D_r 或修正标准贯入锤击数 N_1 表示的系数 C_1 和 C_2 的经验表达式:

$$C_1 = 0.076 D_r^{-2.5} \quad (5)$$

$$C_1 = 8.7 N_1^{-1.25} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \quad (7)$$

3 数值模拟研究

采用基于拉格朗日差分法的方法进行数值分析。

3.1 粉砂土路基数值模型的建立

针对某实际工程,计算时取半幅路宽为 14 m,路堤高为 3 m,坡度为 1:3。计算域水平方向从路堤坡脚向外取 6 m,向下取路基土 6 m。

根据勘察报告和试验结果,同时依据经验材料参数取值如表 1 所示。取泊松比 $\mu = 0.35$,根据勘察得到的剪切波速反算得到路基土剪切模量和体积模量亦列入表 1。

为了考虑飞机荷载对地下水的影响,计算时将路基土假定为 Byrne 液化模型。计算时间取为 10 s,网格划分如图 1 所示。

表 1 数值模型材料参数

Table 1 Material parameters for numerical model

材料名称	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	干密度 ρ_d / (g/cm ³)	孔隙率 n / %	剪切模量 G / MPa	体积模量 B / MPa
路基土	10	23	1.56	40~43	30.38	91.14
路堤土	20	28	1.82	33	35.67	107.02
路面结构	170	62	2.30		520.00	866.67

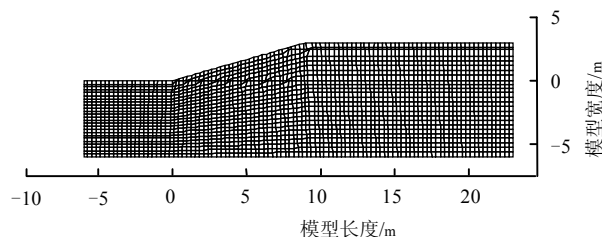


图 1 网格划分

Fig.1 Meshing

3.2 数值计算结果

采用某机型的标准轴载,两主轮压力为 1.25 MPa,主轮间距为 3.74 m。考虑最不利工况,将外侧主轮压力作用在靠路肩 0.75 m 处。同时,假定飞机动荷载作用形式为半正弦波,作用时间取为 0.025 s。分别考虑了加载频率为 0.5、1.0、2.0 Hz 进行动力响应计算,重点研究了主轮下距离地面 3.8 m 和 7.3 m 处的超孔压变化情况。计算结果如图 2~9 所示。

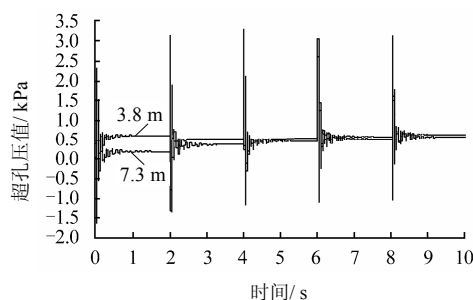


图 2 飞机轮下不同深度处的超孔压变化规律 (0.5 Hz)

Fig.2 Excess pore pressure changes with different depths under plane wheel (0.5 Hz)

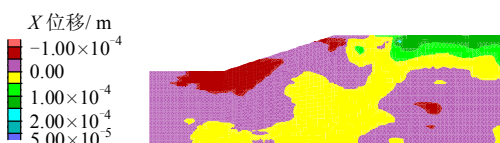


图 3 计算结束时的水平位移云图 (0.5 Hz)

Fig.3 Nephogram of horizontal displacement at the end of calculation (0.5 Hz)

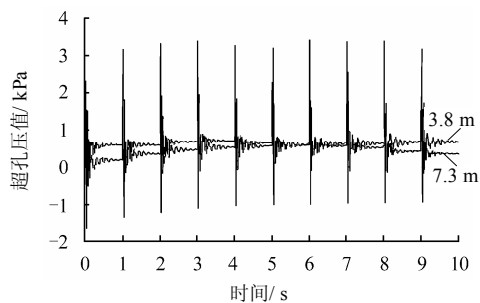


图4 飞机轮下不同深度处的超孔压变化规律 (1 Hz)

Fig.4 Excess pore pressure changes with different depths under plane wheel (1 Hz)

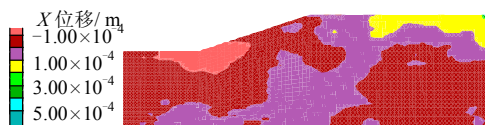


图5 计算结束时的水平位移云图 (1 Hz)

Fig.5 Nephogram of horizontal displacement at the end of calculation (1 Hz)

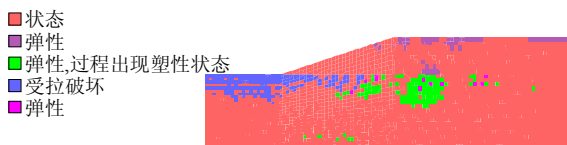


图6 10 s 时的应力状态 (1 Hz)

Fig.6 Stress condition at 10 s (1 Hz)

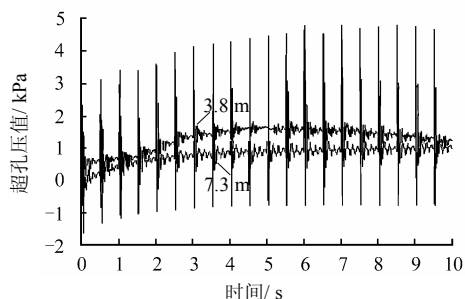


图7 飞机轮下不同深度处的超孔压变化规律 (2 Hz)

Fig.7 Pore pressure changes with different depths under plane wheel (2 Hz)

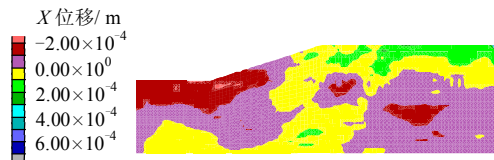


图8 10 s 时的水平位移云图 (2 Hz)

Fig.8 Nephogram of horizontal displacement at 10 s (2 Hz)

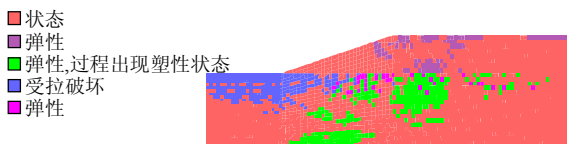


图9 10 s 时的应力状态 (2 Hz)

Fig.9 Stress condition at 10 s (2 Hz)

对比图 2~9 可以发现,飞机荷载作用下孔隙水压和位移随加载频率的增大而增大,且边坡顶部产生向坡内的水平位移;另外,边坡内的瞬时屈服区随加载频率的增大而扩大。

4 试验研究

4.1 试验准备

(1) 模型箱制作

制作模型箱如图 10 所示,里面应铺上塑料布隔水,注意下面排水水龙头连接。然后四角竖放 4 根 L 型 PVC 管(下端平放部分 0.5 m 长,做成花管,孔径为 0.5 cm,间距为 5 cm,端部用网状物堵口),如图 11 所示。

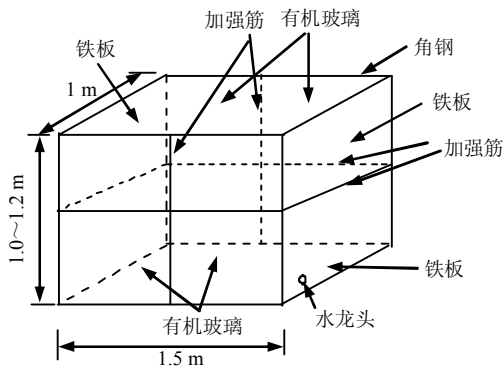


图10 模型箱

Fig.10 Model box

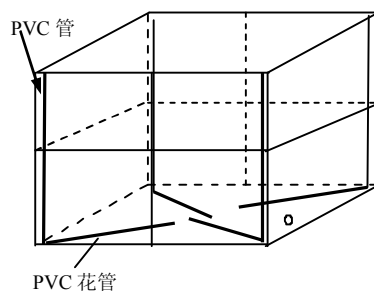


图11 PVC 及其花管

Fig.11 PVC and floral tube

(2) 装土

采用干密度控制填土质量。路基土干密度为 $1.56 \sim 1.59 \text{ g/cm}^3$, 路堤填土干密度为 $1.82 \sim 1.85 \text{ g/cm}^3$, 按此指标换算填土重量。几何相似比取 1:10, 如图 12 所示。路面用竹夹板代替。

(3) 仪器埋设

在填土过程中,同时埋设沉降仪、土压力计和孔压计以记录试验过程中坡体内部竖向位移、竖向应力和孔隙水压变化情况,坡面设置位移传感器以观测坡面水平位移(图 13、14)。

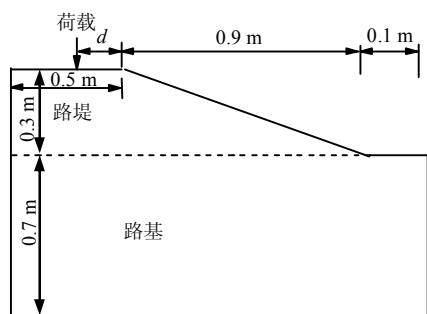


图 12 路堤模型示意图

Fig.12 Model of embankment

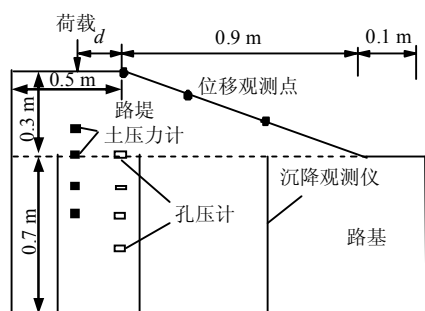


图 13 路基内仪器埋设

Fig.13 Instrument embedded in roadbed



图 14 路基安装的位移传感器

Fig.14 Displacement instrument embedded in roadbed

(4) 加载

用疲劳试验机进行加载, 按飞机荷载设计加载峰值, 即轮压为 1.25 MPa, 加载频率选用 1~5 Hz。取加载板直径为 17 cm, 按 1:10 的相似度, 取加载峰值为 3 kN 和 5 kN, 换算为轮压分别为 1.32 MPa 和 2.2 MPa。



图 15 加载装置

Fig.15 Loading equipment

4.2 试验过程

(1) 饱和 关闭排水水龙头, 从四角 PVC 管灌水至预定水位高度。

(2) 仪器初始化。

(3) 加载 从 1 Hz 开始, 观察变形和孔压。试验中, 如变形和孔压等指标读数稳定, 则停止本级循环; 如坡面破坏或内部液化, 也停止试验。然后重新修整坡面, 并静止一段时间, 等孔压消散后, 施加频率为 2 Hz, 依次类推。

(4) 结束 打开水龙头, 排除水, 清理现场。

4.3 试验结果

试验结果示于图 16~28 (图中水平位移为正时, 表示指向坡内)。从图 16、17 可以看出, 当加载频率为 1 Hz 和 3 Hz 时, 几乎所有的试验都进行了 1 d, 坡面位移值随时间增长而增长, 且坡面没有观测到明显的变形或出现裂缝。试验布置了 3 个测点, 分别位于坡顶、1/3 坡面处和 2/3 坡面处, 在 3 个观测点中坡顶位移最大, 但其位移方向是指向坡内; 2/3 高度处的位移值居中, 但其方向在加载峰值为 3 kN 时基本上指向坡外, 而在加载峰值为 5 kN 时则指向坡内, 1/3 高度处的位移值最小。这与数值分析的结果吻合。鉴于篇幅所限, 仅分析坡顶处水平位移在不同加载频率及加载荷载作用下变形情况。

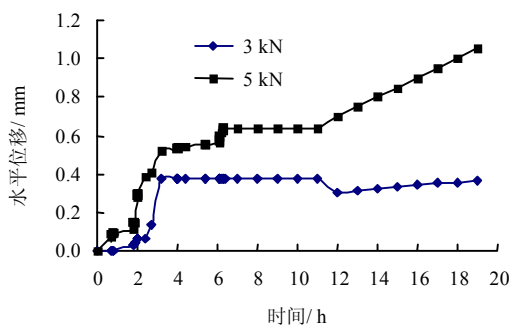


图 16 坡顶水平位移 (加载频率为 1 Hz)

Fig.16 Horizontal displacement of slope crest (loading frequency is 1 Hz)

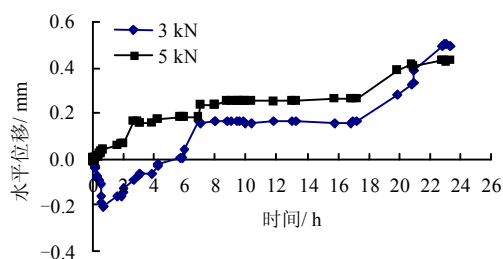


图 17 坡顶水平位移 (加载频率为 3 Hz)

Fig.17 Horizontal displacement of slope crest (loading frequency is 3 Hz)

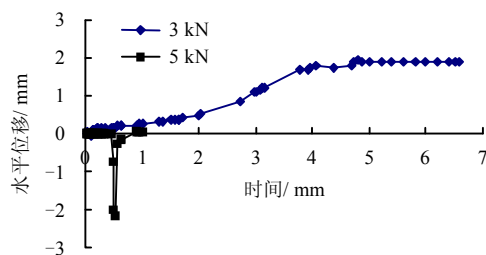


图 18 坡顶水平位移 (加载频率为 5 Hz)

Fig.18 Horizontal displacement of slope crest (loading frequency is 5 Hz)

从图 18 可以看出,当加载频率为 5 Hz 时,坡面位移随时间增长迅速。对于加载峰值为 3 kN 的试验,当试验进行到 5 h 时,坡面中间开始出现垂直于路堤走向的横向裂缝,并随时间而增长(图 19),当试验进行到约 6 h 时,靠近坡顶出现纵向裂缝(图 20),约 6.5 h 后试验终止。对于加载峰值为 5 kN 的试验,在试验进行到不足 30 min 时,坡面开始出现横向裂缝,且其长度增长迅速,随后纵向裂缝开始出现,45 min 后试验终止。这说明加载频率 5 Hz 是一个关键值,加载频率过高路基极易破坏。这也验证了前一节的数值分析结果的合理性。



图 19 横向裂缝

Fig.19 Horizontal crack



图 20 纵向裂缝

Fig.20 Longitudinal crack

为考虑加载频率的影响,按同一测点同一加载峰值来整理数据如图 21、22 所示。由图可知,基本上加载频率越大,位移就越大。

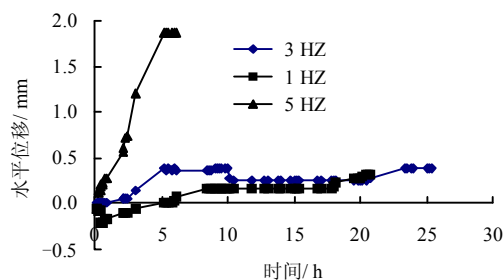


图 21 坡顶水平位移 (荷载为 3 kN)

Fig.21 Horizontal displacements of slope crest (load for 3 kN)

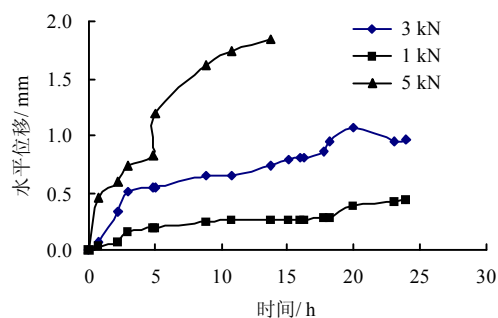


图 22 坡顶水平位移 (荷载为 5 kN)

Fig.22 Horizontal displacements of slope crest (load for 5 kN)

5 结 论

(1) 数值分析和模型试验结果表明,在飞机荷载作用下,加载频率、加载时间和荷载峰值对粉砂土路堤超孔隙水压力、位移分布以及应力状态都有较大影响。

(2) 一般地,增大加载频率和荷载峰值,或增加加载时间,都会造成车轮下坡体内的孔压累积,使得有效应力减小,路基屈服区增大,坡面水平位移增大。

(3) 特别是当轴载作用在路基外侧时,路基水平位移指向坡内;加载频率 5 Hz 是一个关键指标,大于该频率时,不管作用荷载峰值大小,路基均容易破坏,应该在设计中给予考虑。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. JTJ E60—2008 公路路基路面现场测试规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [2] 王峰. 粉砂土路基的成型工艺与现场检测技术的研究[D]. 沈阳: 东北林业大学, 2010.
- [3] 李强. 路基路面检测技术与质量控制[D]. 西安: 长安大学交通学院, 2002.
- [4] 申爱琴, 郑南翔, 苏毅, 等. 含砂低液限粉土填筑路基压实机理及施工技术研究[J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 12—15.

- SHEN Ai-qin, ZHENG Nan-xiang, SU Yi, et al. Study of compacting mechanism and construction technology of filling roadbed with bearing sand silt of low liquid limit[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2000, 13(4): 12—15.
- [5] 林龙. 粉砂土的压实特性与路堤沉降预测方法研究[D]. 长沙: 湖南大学土木学院, 2008.
- [6] 张宏博, 黄茂松, 宋修广. 循环荷载作用下粉砂土路基累积变形试验研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(9): 22—25.
- ZHANG Hong-bo, HUANG Mao-song, SONG Xiu-guang. Experimental study on cumulative deformation of silty sand roadbed under repeated loading[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2009, 26(9): 22—25.
- [7] 严战友, 赵国芳, 张永满. 砂性土高速公路路基力学与变形指标的分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2009, (3): 90—93.
- [8] 肖军华, 周顺华, 韦凯. 列车振动荷载下铁路粉土路基的长期沉降[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1913—1918.
- XIAO Jun-hua, ZHOU Shun-hua, WEI Kai. Long term settlement of railroad silt subgrade induced by train loading[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2010, 44(10): 1913—1918.
- [9] 程培峰, 宇德忠, 徐云哲. 季冻区粉砂土冻胀试验及路基冻胀模型[J]. 中外公路, 2011, 31(2): 20—22.
- [10] ZHENG Yuan-xun, KANG Hai-gui, CAI Ying-chun, et al. Effects of Temperature on the Dynamic Properties of Asphalt Mixtures [J]. **Journal of Wuhan University of Technology (Material Science Edition)**, 2010, 25(3): 534—537.
- [11] 程培峰, 徐云哲. 基于 ABAQUS 的包边粉砂土路堤边坡稳定性分析[J]. 公路, 2011, (11): 21—24.
- [12] 蒋鑫, 凌建明, 谭炜, 等. 高速公路填砂路基边坡稳定性分析[J]. 铁道工程学报, 2008, (9): 1—5.
- JIANG Xin, LING Jian-ming, TAN Wei, et al. Slope stability analysis of sand embankment for expressway engineering[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2008, (9): 1—5.
- [13] MARTIN G B, FIM W D L, SEED H B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1975, 101(5): 423—438.
- [14] SEED H B, MARTIN G R, LYSMER J. Pore water pressure changes during soil liquefaction[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1976, 102(4): 323—346.
- [15] BYRNE P M. A cyclic shear-volume coupling and pore-pressure model for sand[C]//Proceedings of Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. St. Louis: Geotechnical Special Publication, 1991: 47—55.
- [16] TOKIMATSU K, SEED H B. Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1987, 113(8): 861—878.
- [8] KAVETSKI D. Temporal integration in numerical models of unsaturated fluid flow: automatic time-stepping for Richards equation[R]. Newcastle: The University of Newcastle, 2002.
- [9] THOMAS R M, GLADWELL I. Variable-order variable-step algorithms for second-order systems (Part I): The methods[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1988, 26(1): 39—53.
- [10] KIRKLAND M R, HILLS R G, WIERENGA P J. Algorithms for solving Richards' equation for variably saturated soils[J]. **Water Resources Research**, 1992, 28(8): 2049—2058.
- [11] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society of America**, 1980, 44(5): 892—898.
- [12] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. **Water Resources Research**, 1976, 12(3): 513—522.
- [13] FORSYTH P A, WU Y S, PRUESS K. Robust numerical methods for saturated-unsaturated flow with dry initial conditions in heterogeneous media[J]. **Advances in Water Resources**, 1995, 18(1): 25—38.
- [14] DIERSCH H J G, PERROCHET P. On the primary variable switching technique for simulating unsaturated-saturated flows[J]. **Advances in Water Resources**, 1999, 23(3): 271—301.

上接第 2862 页