

# 高速列车荷载下桩承加筋路堤变形机制数值分析

李西斌<sup>1</sup>, 吴金耀<sup>2</sup>

(1. 浙江农林大学土木工程系, 浙江 杭州 311300; 2. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 桩承加筋路堤是近来发展起来的软土地基处理技术, 具有用桩数量少, 节约工程成本, 加快工程进度的优点。采用有限元方法研究了高速列车荷载下桩承加筋路堤的变形规律, 分析了软土的变形模量、桩弹性模量、格栅弹性模量和桩间距对路堤各部分沉降以及最大侧向位移的影响。分析结果表明, 上述四个因素对桩顶沉降、填土顶面沉降、桩间土沉降、路堤最大侧向位移都有一定的影响。

**关键词:** 桩承式加筋路堤; 高速列车荷载; ABAQUS; 复合地基; 位移

**中图分类号:** U416.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0232-06

**作者简介:** 李西斌(1977-), 男, 山东冠县人, 博士, 副教授, 主要从事软土固结理论、路基处理等方面的研究与教学工作。E-mail: ytulxb@126.com。

## Deformation mechanism of geosynthetic reinforced pile supported embankment under high-speed train loads

LI Xi-bin<sup>1</sup>, WU Jin-yao<sup>2</sup>

(1. Civil Engineering Department, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The geosynthetic reinforced pile supported embankment is a new ground treatment technology developed in recent years. The advantages of this technology include reduction of number of piles, decrease of project costs and increase of construction speed. Finite element method is used to analyze the deformations in geosynthetic reinforced pile supported embankments under high-speed train loads. The influences of soft soil deformation modulus, elastic modulus of piles, elastic modulus of geogrid and the space between piles on the settlement of each part of the embankment and the maximum lateral displacement of the embankment are investigated. The results show that the four factors have effects on the pile settlement, the surface settlement of the filling soil, the displacement of the soil between piles and the maximum lateral displacement of the embankment.

**Key words:** geosynthetic reinforced pile supported embankment; high-speed train load; ABAQUS; composite foundation displacement

## 0 引言

国家统计局公布的“十一五”经济社会发展成就系列报告显示, “十一五”期间, 交通运输业成就卓著, 截止到2010年底, 我国高铁投入运营里程达8358 km, 高速铁路运营里程高居世界第一。目前, 我国高速铁路在建规模超过1万公里。到2012年新建高速铁路总规模将达到1.3万公里, 我国已成为世界上高速铁路发展最快、系统技术最全、集成能力最强、运营里程最长、运营速度最高、在建规模最大的国家。高速铁路路基与普通铁路路基相比有着更高的要求。《高速铁路设计规范(试行)》规定: 无砟轨道路基工后沉降不宜超过15 mm, 路基与桥梁、隧道或横向结构物交界

处的差异沉降不应大于5 mm, 不均匀沉降造成的折角不应大于1/1000; 对于设计时速是250 km/h的有砟轨道铁路路基工后沉降不超过10 cm, 且沉降速率不超过3 cm/a; 设计时速为300, 350 km/h的有砟轨道铁路路基工后沉降不超过5 cm且沉降速率不超过2 cm/a<sup>[1]</sup>。受地理条件的限制, 许多路段不得不建在深厚的软土地基上, 如杭甬、沪宁高速公路以及正在建设中的京沪高速铁路。对软土地基来说, 由于其含水率高、变形大, 在建造前一般先要进行预压处理, 以消除部分主、次固结变形, 常常耗时耗资较大。

基金项目: 浙江农林大学科研启动基金项目(2010FR043)

收稿日期: 2011-08-02

桩承加筋路堤是近年来兴起的一种通过桩和水平加筋体联合处理软基的新型构筑物型式, 由于它能有效地控制地基的总沉降、不均匀沉降和侧向位移, 有效地提高地基承载力和稳定性, 已在高速公路、机场、大型堆料场、储罐等地基处理中得到了广泛的应用, 如杭甬高速公路拓宽工程中的一期工程<sup>[2]</sup>、温州国家储备粮库一期工程<sup>[3]</sup>、巴西某路基处理工程<sup>[4]</sup>。与其他软基上的堤坝处理方法相比, 桩承加筋路堤具有施工工期短、沉降和侧向变形小等优点, 造价和水泥搅拌桩式路堤相当, 很适合于软土地基上快速建造各类堤坝<sup>[5-7]</sup>。Han J 做出一个比较, 即把 Rathmayer (1975) 推荐的路堤桩基础设计标准中关于桩覆盖率和桩承加筋路堤中的桩覆盖率进行比较, 结果显示桩承加筋路堤要求的桩覆盖率远小于传统单一型的桩基础, 且始终低于 20%, 而且桩承加筋路堤不用设置传统桩复合地基中抗侧向位移用的斜桩<sup>[6]</sup>。所以, 桩承加筋路堤能带来非常显著的经济效益。

近年来, 桩承加筋路堤技术由于优势明显在高速铁路建设过程中已经有所应用。因为高速铁路对路堤沉降和侧向变形的要求比普通铁路高, 且其荷载形式、应力扩散路径也和高速公路不一样, 所以其破坏机理和设计计算方法不能照搬现有的应用于高速公路、普通铁路设计的传统计算方法。总体来说, 桩承加筋路堤技术的机理研究、计算分析等相关理论研究严重滞后。本文对高速列车荷载下桩承加筋路堤的变形机制进行了数值分析, 研究了路堤参数对路堤变形的影响规律。

## 1 高速列车荷载的模拟

由于列车荷载的复杂性, 所以很难对其进行精确模拟。李军世等<sup>[8]</sup>利用有限元软件进行分析, 考虑波的可叠加性质, 采用了多组轮对用 Fourier 级数形式表达的列车荷载。由于列车荷载是通过钢轨传递到枕木再传递下去, 因而可以用一个简单的、能够反映其周期特点的类似激振形式的力来描述。本文采用的是丁铭绩等<sup>[9]</sup>提出的用静荷载和一系列正弦函数叠加而成的动荷载来模拟列车荷载, 即

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t \quad (1)$$

式中  $F(t)$  为列车动荷载;  $P_0$  为车轮的静载;  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  分别为高、中、低频率对应的振动荷载, 其表达式为

$$P_i = M_0 a_i \omega_i^2 \quad (2)$$

式中,  $M_0$  表示列车簧下质量,  $a_i$  为钢轨的振幅,  $\omega_i$  为列车振动波长下的圆频率, 其计算式为

$$\omega_i = 2\pi \frac{v}{L_i} \quad (3)$$

由式(1)可知, 列车轮轨冲击力表现为一不规则波形。取  $v=300$  km/h, 则轮轨冲击力前 0.05 s 的情况如图 1 所示, 把图中激振力分为 4 个阶段。

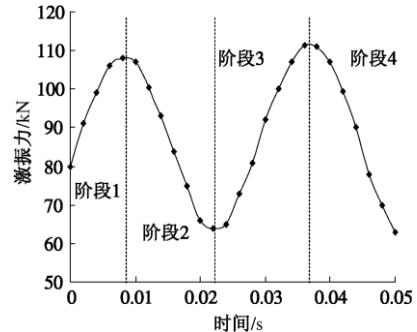


图 1 列车激振力与时间的关系

Fig. 1 Relationship between train vibration force and time

## 2 计算模型的建立和参数选定

模型材料计算参数取值如表 1。由路堤的对称性, 可取一半宽度建模, 路堤高度取 4.5 m, 路堤顶部半宽为 10 m, 底部半宽为 15 m, 路堤边坡坡率为 1:1, 路堤坡脚横向向外延伸 25 m, 纵向为 9 m (纵向布桩的需要), 地基软土层厚度度 20 m。混凝土桩桩径 1 m, 桩长 10 m, 矩形布桩, 桩净距 3 m。土工织物铺在桩顶之上 0.5 m 处。以此建立模型, 如图 2 所示。

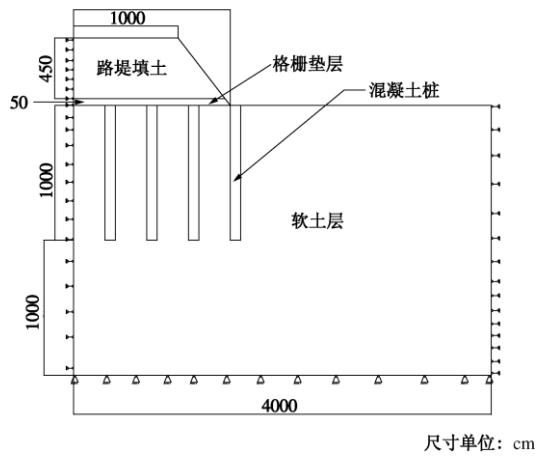


图 2 路堤横向剖面图

Fig. 2 Sketch of transverse profile of embankment

表 1 材料计算参数

Table 1 Material parameters

材料	厚度或长度 /m	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	弹性模量或变形模量 /MPa	泊松比 $\nu$	内摩擦角 $\phi/(^\circ)$	黏聚力 $c/kPa$	膨胀角 $\psi/(^\circ)$
软 土	40.0	17.5	4	0.35	10	20.0	0
路堤填土	4.5	18.0	30	0.3	30	0	0
桩 体	10.0	25	200	0.15	—	—	—

格 棚	0.5	—	80	0.33	—	—	—
-----	-----	---	----	------	---	---	---

### 3 路堤参数对路堤变形的影响分析

桩承加筋路堤由于在桩和填土层中加入了一个相对刚度较大的加筋垫层,使得应力传递和变形机理比较复杂,包括加筋垫层与填土、加筋垫层与桩、桩与桩间土之间的相互作用。现分析软土地基变形模量、桩的弹性模量、格栅弹性模量、桩间距的变化对桩、桩间土和路堤最大侧向位移的影响。

#### 3.1 软土变形模量的影响

图 3~5 分别是软土变形模量对路堤中心部位桩间土沉降、桩顶沉降和路堤最大侧向位移的影响曲线。由图 3~5 可见,随土的变形模量增大,桩和桩间土沉降以及路堤最大侧向位移都减小,且沉降和最大侧向位移随土的变形模量的变化速率越来越小。桩顶沉降和路堤最大侧向位移的变化规律与激振力荷载变化规律一致。在激振力峰值处,桩和桩间土的位移以及路堤的最大侧向位移都达到最大值。

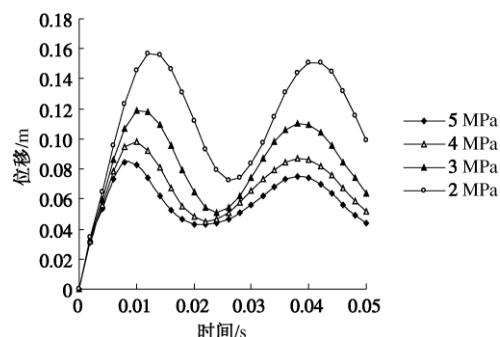


图 3 土的变形模量对填土顶面沉降的影响

Fig. 3 Influence of deformation modulus of soil on surface settlement of filling soil

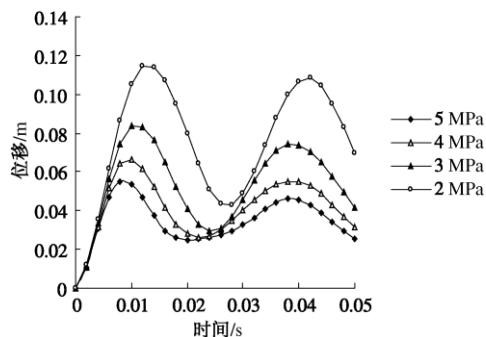


图 4 土的变形模量对桩顶沉降的影响

Fig. 4 Influence of deformation modulus of soil on pile settlement

#### 3.2 桩弹性模量的影响

图 6,7 给出了桩弹性模量对填土及桩顶面沉降的影响曲线。从图 6,7 可以看出,在高速列车荷载作用下,桩和填土层顶面的沉降随桩的弹性模量增大而减小,但影响都不大,比较可见填土顶部沉降减小不明显,而桩的沉降减小较大。因此,提高桩的弹性模量并不是减少路堤沉降的有效方法。桩和填土层顶面的沉降在激振力峰值处达到最大值,且此时受桩的弹性模量的影响也最大。

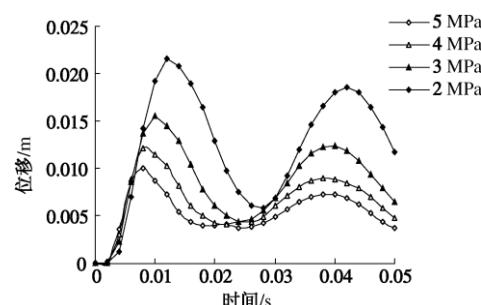


图 5 土的变形模量对路堤最大侧向位移影响

Fig. 5 Influence of deformation modulus of soil on maximum lateral displacement of embankment

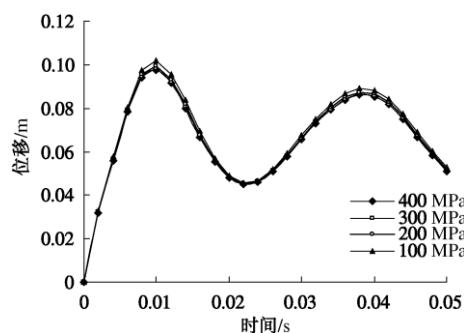


图 6 桩的弹性模量对填土顶面沉降的影响

Fig. 6 Influence of elastic modulus of pile on surface settlement of filling soil

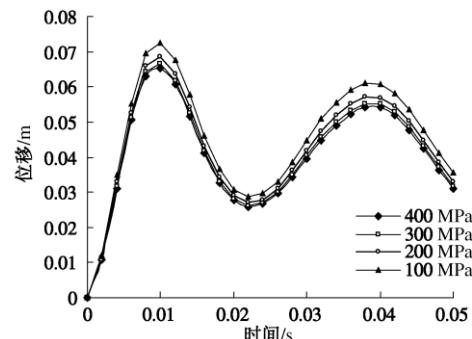


图 7 桩弹性模量对桩顶面沉降的影响

Fig. 7 Influence of elastic modulus of pile on pile settlement

图 8 给出了桩弹性模量对路堤最大侧向位移影响曲线。从图 8 可知,路堤最大侧向位移随着桩弹性模量的增大稍有减小,影响并不明显,这主要是因为桩体作为竖向受力的杆件,其水平向的抗变形刚度不大,起不到显著降低路堤侧向位移的作用,因此不能以提

高桩的弹性模量来提高桩承加筋路堤的抗侧向变形能力。

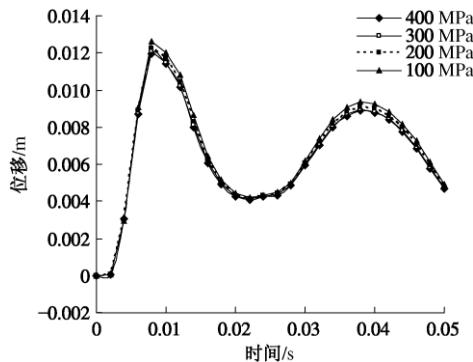


图 8 桩弹性模量对路堤最大侧向位移影响

Fig. 8 Influence of elastic modulus of pile on maximum lateral displacement of embankment

### 3.3 土工格栅弹性模量的影响

图 9~11 是桩承加筋路堤中填土层顶部、桩顶和桩间软土顶面的沉降随格栅弹性模量变化图。由图 9~11 中可以看出, 在高速列车荷载作用下, 随着格栅弹性模量的减小, 路堤中填土层沉降增大, 桩顶沉降减小, 桩间土沉降也是微量增大。其中填土顶部沉降减小不明显, 桩的沉降减小较大。这是由于格栅加筋体起着扩散应力, 避免应力集中, 减小路堤沉降差异和路堤顶面沉降, 提高桩土应力比等作用, 当弹性模量减小, 必导致桩土应力比减小, 路堤沉降增大, 同时桩承受应力减小, 桩的沉降也减小。这与饶为国等<sup>[10-11]</sup>在静荷载下分析格栅拉力变化情况相符合。

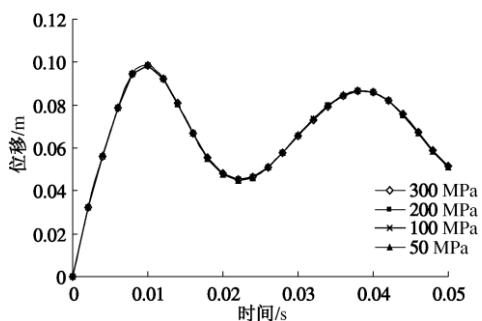


图 9 格栅弹性模量对填土顶面沉降的影响

Fig. 9 Influence of elastic modulus of grid on surface settlement of filling soil

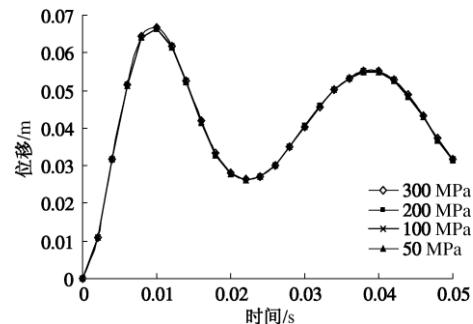


图 10 格栅弹性模量对桩顶面沉降的影响

Fig. 10 Influence of elastic modulus of grid on pile settlement

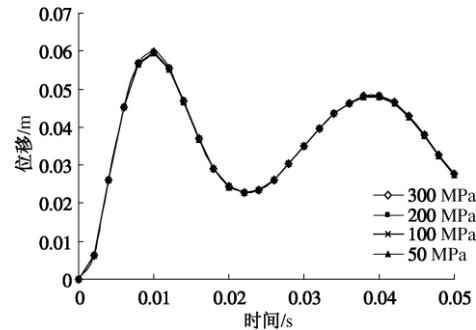


图 11 格栅弹性模量对桩间土沉降的影响

Fig. 11 Influence of elastic modulus of grid on displacement of soil between piles

图 12 是格栅弹性模量对最大侧向位移的影响图。从图 12 中可看出, 在列车荷载作用下, 路堤的侧向位移随土工格栅弹性模量越大而减小, 但是影响并不显著。

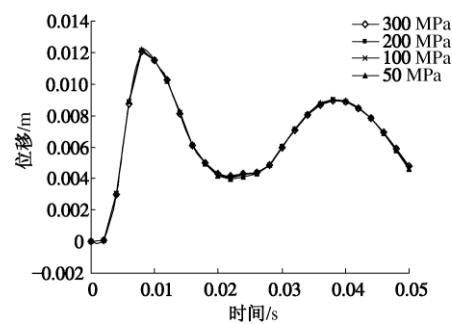


图 12 格栅弹性模量对路堤最大侧向位移影响

Fig. 12 Influence of elastic modulus of grid on maximum lateral displacement of embankment

### 3.4 桩间距的影响

图 13~15 分别给出了桩间距对填土顶面沉降、桩顶沉降及桩间土沉降的影响。从较长 13~15 可以看出, 在高速列车荷载作用下, 随着桩间距的减小, 路堤中填土层顶面的沉降、桩顶沉降和桩间土顶面沉降都减小。这是由于桩间距减小, 总桩数增多, 桩应力减小, 同时土承担应力也减小, 减小了路堤整体沉降。

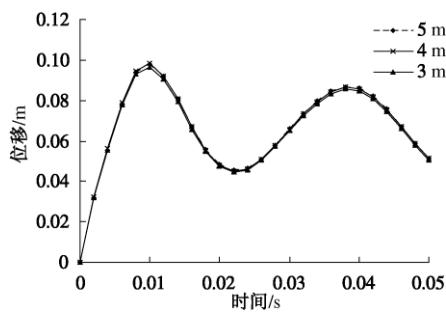


图 13 桩间距对填土顶面沉降的影响

Fig. 13 Influence of space between piles on surface settlement of filling soil

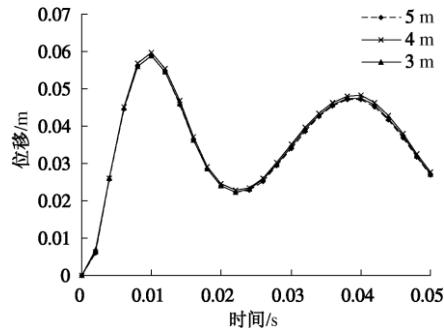


图 16 桩间距对路堤最大侧向位移影响

Fig. 16 Influence of space between piles on maximum lateral displacement of embankment

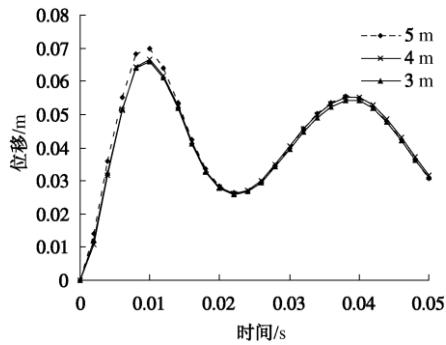


图 14 桩间距对桩顶面沉降的影响

Fig. 14 Influence of space between piles on pile settlement

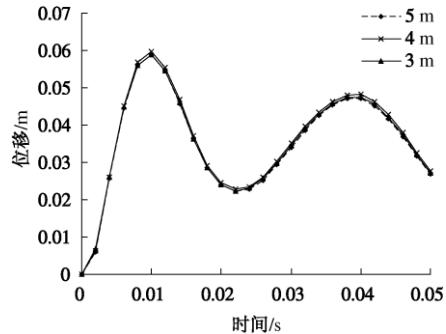


图 15 桩间距对桩间土沉降的影响

Fig. 15 Influence of space between piles on displacement of soil between piles

图 16 是桩间距对最大侧向位移的影响图。由图 16 可知, 随着桩间距的增大, 路堤的最大侧向位移增大。因为桩不仅承担大部分路堤竖向荷载, 而且还与格栅垫层一起组成水平抗侧移体系, 起着限制侧向位移的作用。

## 4 结语

在列车激振力作用下, 桩承加筋路堤各部分的位移变化频率与荷载一致, 激振力峰值处, 桩和桩间土的位移以及路堤的最大侧向位移都达到最大值。随软土的变形模量和桩的弹性模量增大, 桩和桩间土沉降以及路堤最大侧向位移都减小, 但是桩的弹性模量的影响较小; 随着格栅弹性模量的减小, 路堤中填土层和桩间土沉降都增大, 桩顶沉降减小; 随桩间距的减小, 填土层顶面的沉降、桩顶沉降和桩间土顶面沉降都减小。

## 参考文献:

- [1] TB10020—2009 高速铁路设计规范(试行) [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009. (TB10020-2009 Code for design of high speed railway[S]. Beijing: China Railway Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 贾宁, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 杭甬高速公路拓宽工程理论分析及监测[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 755 - 760. (JIA Ning, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Theoretical analysis and measurement for widening project of Hangzhou-Ningbo Expressway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 755 - 760. (in Chinese))
- [3] 谢新宇, 刘开富, 张清华, 等. 温州粮库水泥搅拌桩联合加筋垫层复合地基性状分析. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1468 - 1471. (XIE Xin-yu, LIU Kai-fu, ZHANG Qing-hua, et al. Properties of composite foundation of deep mixing cement piles and geotextile-reinforced cushion at Wenzhou Grain Depot[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1468 - 1471. (in Chinese))
- [4] ALMEIDA M S S, EHRLICH M, SPOTTI A P, et al. Embankment supported on piles with biaxial geogrids[C]// Proceedings of the Institution of Civil Engineers,

- Geotechnical Engineering 160, 2007, Issue GE4: 185 - 192.
- [5] JONES C J F P, LAWSON C R, AYRES D J. Geotextile reinforced piled embankments[C]// HOEDT(ed), Proc 4th Int Conf on Geotextiles: Geomembranes and Related Products, DEN 1990, Rotterdam: Balkema, 155 - 160.
- [6] HAN J, GABR M A. Numerical analysis of Geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 2002, **128**(1): 44 - 53.
- [7] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of Piled embankments[J]. Ground Engineering, 1998, **21**(3): 12 - 18.
- [8] LI Jun-shi, LI Ke-chuan. Finite element analysis for dynamic response of roadbed of highspeed railway[J]. Journal of The China Railway Society, 1995, **17**(1): 66 - 75. (in Chinese))
- [9] 丁铭绩, 王连俊, 高速铁路软土复合地基路基的位移数值计算分析. 铁道勘察, 2007(3): 17 - 20. (DING Ming-ji,
- WANG Lian-jun. Analysis on settlement numerical calculation for soft composite foundation and embankment of high speed railway. Railway Investigation and Surveying, 2007(3): 17 - 20. (in Chinese))
- [10] 饶为国, 赵成刚. 桩 - 网复合地基应力比分析与计算. 土木工程学报, 2002, **35**(2): 74 - 80. (RAO Wei-guo, ZHAO Cheng-gang. The behavior of pile-net composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, **35**(2): 74 - 80. (in Chinese))
- [11] 饶为国, 江辉煌, 侯庆华. 桩 - 网复合地基工后沉降的薄板理论解. 水利学报, 2002(4): 23 - 27. (RAO Wei-guo, JIANG Hui-huang, HOU Qing-hua. Deformation of sheet plate due to residual settlement of pile2net composite foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(4): 23 - 27. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)