DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.01.038

加筋路基动力特性的数值模拟研究

耿 敏[1,2],王德斌[2],李培勇[2],高 超[2]
(1.大连理工大学 岩土工程研究所,辽宁 大连 116024;
2.大连交通大学 土木与安全工程学院,辽宁 大连 116028)

摘 要: 基于前期的室内动三轴试验结果,采用 FLAC^{3D}有限差分软件,通过建立轨道与路基的三维实体模型,探讨列车荷载作用下路基在不同的动应力幅值、格栅埋置深度、加筋层数时的应力、变形规律,为轨道路基的优化设计和力学参数的选取提供参考依据。研究结果显示:随着动应力幅值的增大,路基表面应力呈马鞍形分布的状态愈加明显,最大压应力位于地基深处,且在三种动应力幅值下均没有明显变化,说明动应力沿路基深度的衰减规律受车速的影响较小。路基的竖向应力随格栅埋置深度的增加出现了先减小再增大的趋势,这说明在路基内铺设格栅的位置宜选择在路基顶部或中下部,土工格栅的铺设加速了路基动应力的衰减,具有一定的减振作用,从而改善了路基结构动力响应特征,增强了路基的抗振性能。

关键词: 循环荷载;加筋路基;动力特性;数值模拟;FLAC^{3D}
中图分类号: U211.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672—1144(2018)01—0211—05

Numerical Simulation of Dynamic Behavior of Reinforced Subgrade

GENG Min[1,2], WANG Debin[2], LI Peiyong[2], GAO Chao[2]
(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning* 116024, *China*;
2. *College of Civil and Safety Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning* 116028, *China*)

Abstract: In order to effectively prevent and reduce the damage of reinforced subgrade caused by cyclic loading, it is necessary to study dynamic behavior of reinforced subgrade to ensure the safety and efficient operation of railway. In this paper, the track-subgrade models were constructed by using FLAC^{3D} finite difference software. Based on the cyclic triaxial test results, numerical parametric studies were carried out to investigate the dynamic behavior of reinforced subgrade under cyclic loading. The studied parameters include dynamic stress amplitudes, embedded depths of geogrid, and different layer numbers. The results provide reference for the optimum design of track subgrade and the selection of mechanical parameters. The numerical results indicated that with the increase of dynamic stress amplitudes, the saddle-shaped distribution of dynamic stress of subgrade surface is getting more and more obvious. The maximum compressed stress is located in the depth of foundation. There is no obvious change of dynamic stress of subgrade in three dynamic stress amplitudes. It showed that the attenuation law of dynamic stress along the depth of subgrade rarely affected by the speed. With the increase of embedding depth of geogrid, vertical stress of subgrade first decreases and then increases. This illustrated that the proper locations of laying geogrid are at the top of subgrade or middle-lower part of subgrade. The Laying of the geogrid can accelerate attenuation of dynamic stress of subgrade. It has a certain damping effect and can improve dynamic behavior of subgrade structure, then enhance anti-vibration capability of subgrade.

Keywords: cyclic loading; reinforced subgrade; dynamic behavior; numerical simulation; FLAC^{3D}

高速、重载已成为当今世界铁路发展的两大趋势,列车速度的提高和轴重的增大使列车与铁路线路的动力作用显著增强,由此促进了铁路路基动力学的发展,改变了传统路基结构设计以静态分析为

收稿日期:2017-09-27 **修稿日期:**2017-10-24
基金项目:国家自然科学基金项目(51408093);辽宁省教育厅科学研究项目(JDL201617);辽宁省博士科研启动基金项目(201601255)
作者简介:耿 敏(1982—),女,河北威县人,博士,讲师,主要从事加筋土的静动力分析研究及应用方面的教学与科研工作。
E-mail: gengmin45@163.com

主、按照强度控制进行设计的观念。列车速度的提高和轴重的增大对铁路路基的影响主要表现在两个方面:一是在列车循环动荷载作用下,轨道承受的振动和冲击增大,加速了轨道的破坏。二是铁路路基是由松散的土石材料组成,具有碎散性、三相性及天然性。随着列车轴重的增大,轨道承受的荷载加大,导致路基病害的发生。因此,对循环荷载作用下铁路路基的动力特性及轨道与路基的相互作用问题进行研究十分必要。

目前研究这类问题的方法主要有两种:一种是室内模型试验法,通过动三轴试验、共振柱试验、大型振动台常规模型试验或者土工离心模型试验对加筋土的动力特性进行研究。国内外学者利用模型试验法对循环荷载作用下土体的动应力幅值、破坏形式、累计变形规律等动力响应特性进行研究,取得了一定的成果[1-6]。除此之外,杨果林等[7]通过现场激振设备进行路基的原位动力试验,分析了不同基床在极端服役环境下的动力特性。然而由于试验设备的限制,制备试样困难、试验周期长、试验成本大,利用模型试验对加筋土进行动力特性研究存在一定误差。

另一种是数值模拟的方法。FLAC 可以模拟岩土体在外部或内部荷载作用下的完全非线性响应,适用于土动力学和岩石动力学的计算。一些学者利用 FLAC^{3D}建模,通过计算分析试样的累积塑性变形,并对其分布规律进行研究[8-13]。也有学者采用激振力函数模拟列车竖向动荷载,研究动力荷载作用下路基的动力特性,取得了一定的成果[14-16]。

本文结合室内动三轴试验的分析结果,利用 FLAC^{3D}大型有限差分软件,通过建立轨道与路基的三维实体模型,探讨列车荷载作用下路基在不同的动应力幅值、格栅埋置深度、加筋层数时的应力、变形规律,为轨道路基的优化设计和力学参数的选取提供参考依据。

1 研究方法

1.1 路基动力分析模型建立

以铁路路基断面图为基础,利用 FLAC^{3D}内置的 13 个基本网格单元,进行网格的生成,建立轨道及路基的三维实体模型。列车荷载沿纵向作用,在基床表面上的应力可近似视为均匀的,同时每根轨枕受到相同振动荷载的概率是相等的,线路本身是半无限结构性质,取其中一段线路进行动力分析。道床采用各向同性的线弹性模型,基床底层、基床表层、地基采用弹塑性本构模型。

所建模型尺寸长(x)为 12.45 m,宽(y)为 9.60 m,高(z)为 7.71 m,边坡坡率采用 1∶1.5,模型中共划分 8 800 个单元,12 111 个节点。在列车荷载作用下的内摩擦角 φ 不变,不考虑含水率的变化。轨道及路基三维数值模型图如图 1 所示,轨道及路基模型的主要材料计算参数如表 1 所示。

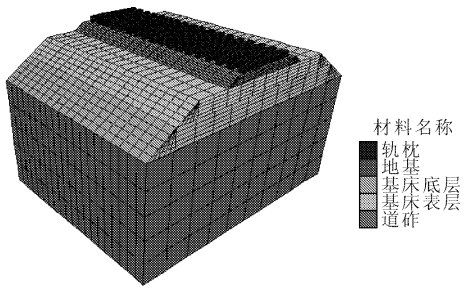


图 1 轨道及路基三维数值模型图

表 1 模型计算参数

材料	厚度 h /m	弹性模量 E/MPa	泊松比 υ	密度 ρ /(kg·m^{-3})	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ/(°)
轨枕	0.26	30000	0.17	2400		
道砟	0.35	200	0.25	2200		
基床表层	0.70	120	0.27	2100	20.0	19.5
基床底层	0.90	100	0.30	2140	15.5	18.0
地基	5.50	80	0.33	2200	10.0	13.5

1.2 动力荷载及边界条件

车速和轴重对路基的动力响应是不同的,为了模拟不同列车对于路基的动力作用,选取不同的振动频率模拟列车车速,选取不同的围压模拟不同深度土层受到的列车动力响应作用。根据铁路路基动应力幅值设计计算公式:

$$\sigma_d = 0.26 \times P \times (1 + \alpha V) \tag{1}$$

式中:σ_d 为动应力幅值;P 为机车车辆静轴重;$(1 + \alpha V)$ 为冲击系数,α 取 0.003;

当轴重为 20 t,时速为 120 km/h 时,计算动应力幅值为 70 kPa;当轴重为 25 t,时速为 100 km/h 时,计算动应力幅值为 80 kPa;当轴重为 30 t,时速为 80 km/h 时,计算动应力幅值为 95 kPa。

FLAC^{3D}的动力荷载形式主要有两种:FISH 函数和 TABLE 命令定义的表。由于列车振动属于周期性的规则运动,因此本文采用表达动力荷载比较规则的 FISH 函数。FLAC^{3D}中提供了静止(黏性)和自由场两种边界来减少模型边界上波的反射。初始应力场按自重应力场考虑。模拟计算时选择静态边界

条件,即模型的 x、y 方向边界和底面边界均施加位移约束条件,上边界为自由边界。动力边界条件,即在模型的法向和切向上分别设置自由的阻尼器,实现吸收入射波的目的,阻尼器提供的法向和切向黏性力分别为:

$$t_{\mathrm{n}} = -\rho C_{\mathrm{p}} v_{\mathrm{n}} \tag{2}$$

$$t_{s} = -\rho C_{\mathrm{s}} v_{s} \tag{3}$$

其中 v_{n}, v_s 分别为模型边界上法向和切向的速度分量;ρ 为介质密度;C_{p}, C_{s} 分别为 p 波和 s 波的波速。计算时将静态边界加在整体坐标系上。

2　动力特性分析

为了研究列车循环荷载作用下路基的动力变形特性,基于作者之前做过的室内中型动三轴试验结果,选取了对加筋土动弹性模量影响较大的因素(动应力幅值、土工格栅埋置深度、加筋层数)对路基轨道模型进行动态加载,研究其动力响应的变化规律。

2.1　动应力幅值

路基的动应力是影响路基稳定性和永久变形的主要因素。采用不同的动应力幅值(70 kPa、80 kPa、95 kPa)对路基进行加载,所得应力场云图如图 2 ~ 图 4 所示。

从图 2 ~ 图 4 可知,当动应力幅值为 70 kPa 时,应力范围是 − 100.70 kPa ~ 22.40 kPa;当动应力幅值为 80 kPa 时,应力范围是 − 100.70 kPa ~ 22.55 kPa;当动应力幅值为 95 kPa 时,应力范围是 − 100.70 kPa ~ 22.69 kPa。可以看出随着动应力幅值的增大,竖向拉应力的最大值出现在轨枕及路基与地基的交界处,且随着动应力幅值的增大而增大,路基表面应力分布呈马鞍形分布状态愈加明显,最大压应力位于地基深处,且在三种动应力幅值下均没有明显变化,说明动应力沿路基深度的衰减规律受车速的影响较小。

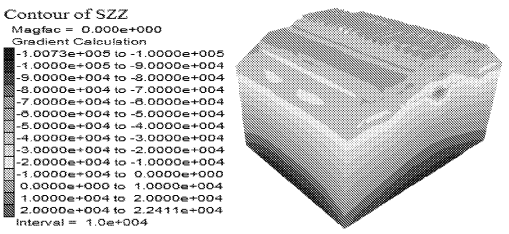


图 2　动应力幅值 70 kPa 时应力场云图

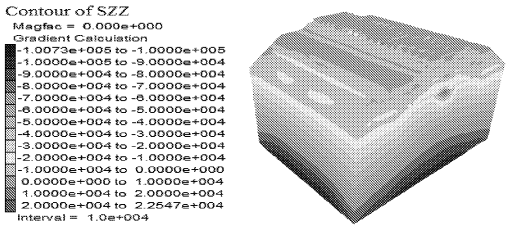


图 3　动应力幅值 80 kPa 时应力场云图

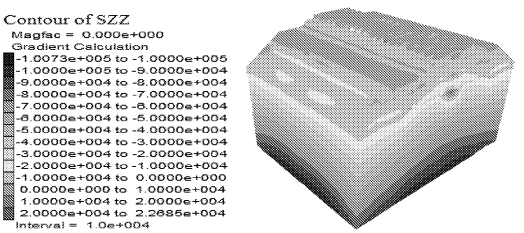


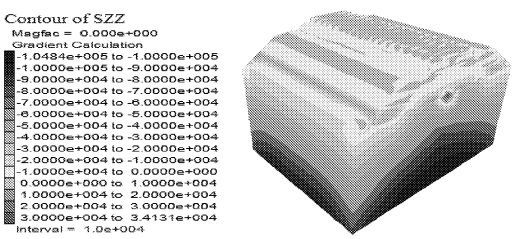
图 4　动应力幅值 95 kPa 时应力场云图

2.2　土工格栅埋置深度

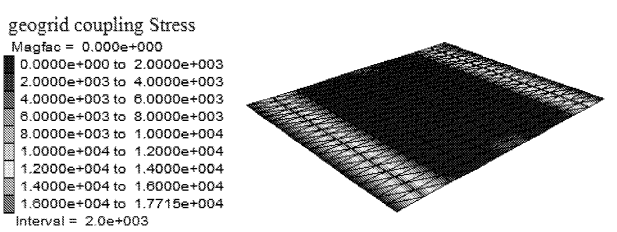
工程实践表明:土工格栅埋设在路基中下部更有利于提高路基强度、减小不均匀沉降。在相同的振动频率(1 Hz)和动应力幅值(70 kPa)下,将土工格栅放置在路基的不同深度处(距路基表面 1.1 m、1.3 m、1.5 m),研究动应力对加筋路堤的动力影响。模型中土工格栅单元采用的参数如表 2 所示,分析得到的竖向应力云图及剪应力云图如图 5 ~ 图 7 所示。

表 2　土工格栅结构单元参数

密度 ρ/(kg·m^{-3})	弹性模量 E/MPa	泊松比 υ	耦合黏聚力/kPa	耦合摩擦角/(°)	耦合切向刚度/kPa	厚度/mm
920	2.6×10^{3}	0.33	0	29.2	2.3×10^{3}	5

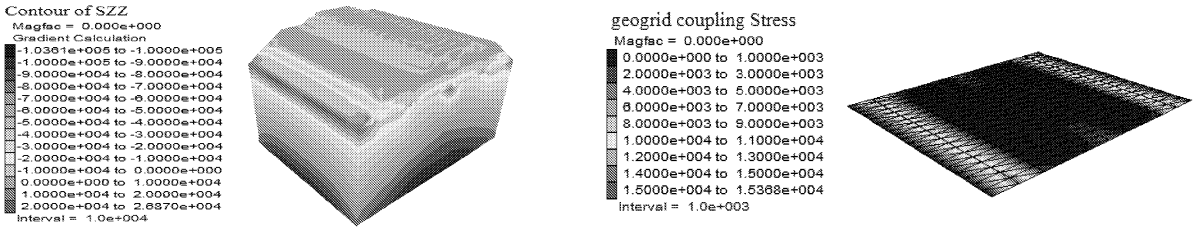


(a) 竖向应力云图



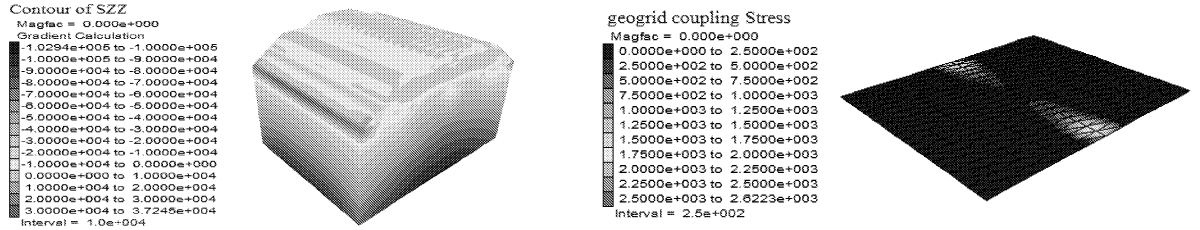
(b) 土工格栅剪应力云图

图 5　土工格栅埋深 1.1 m



(a) 竖向应力云图 (b) 土工格栅剪应力云图

图 6 土工格栅埋深 1.3 m



(a) 竖向应力云图 (b) 土工格栅剪应力云图

图 7 土工格栅埋深 1.5 m

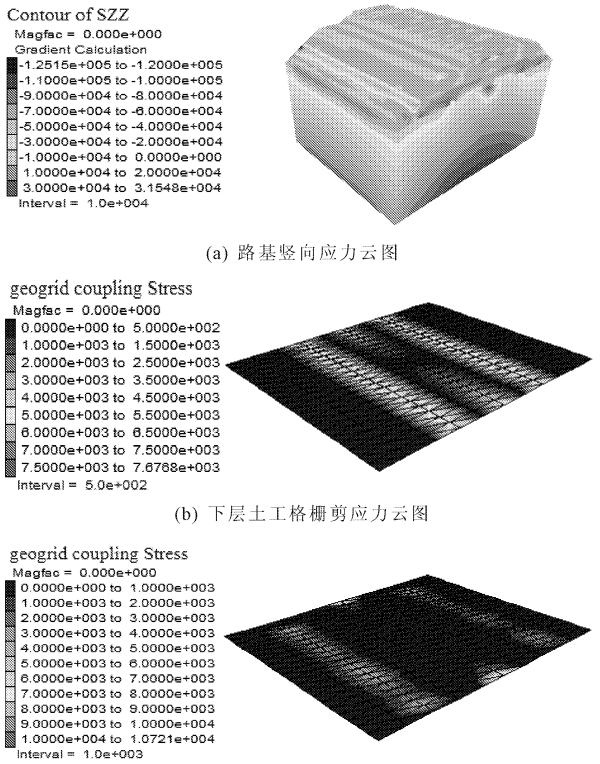
由图 5 ~ 图 7 可知,当土工格栅埋深为 1.1 m 时,竖向应力范围是 - 104.84 kPa ~ 34.13 kPa,土工格栅表面所受应力为 17.71 kPa;当土工格栅埋深 1.3 m 时,竖向应力范围是 - 103.61 kPa ~ 26.87 kPa,土工格栅表面所受应力为 15.36 kPa;当土工格栅埋深 1.5 m 时,竖向应力范围是 - 102.94 kPa ~ 37.24 kPa,土工格栅表面所受应力为 2.62 kPa。模拟结果显示:路基的竖向应力随格栅埋置深度的增加出现了先减小再增大的趋势,这说明在路基内铺设格栅的位置选择在路基顶部或中下部较合适,可确保基床长期的动力稳定。格栅所受应力逐渐减小,说明路基动应力在浅层处较明显。在土工格栅埋置的上部也会出现较大的拉应力,这是由于筋土的摩擦作用改变了基床内部的应力分布,提高了土体的强度。当埋深为 1.3 m 和 1.5 m 时,路基与地基交界处中心位置的拉应力也明显大于四周的拉应力。

2.3 土工格栅埋设层数

土工格栅铺设层数的增加一定程度上会提高土体的强度,增加动力作用下路基的稳定性。数值模拟时在路基内部进行双层和三层加筋模拟,双层土工格栅铺设的位置分别位于道床下 1.1 m 和 1.5 m 处,三层土工格栅铺设的位置位于路基顶面以下1.1 m、1.3 m 和 1.5 m,模拟结果如图 8、图 9 所示。

从图 8 中可以看出路基的竖向应力范围是 - 125.15 kPa ~ 31.55 kPa,上下层土工格栅的应力值分别为 10.72 kPa、7.67 kPa,衰减了 28.5%。上层土工格栅主要是边缘产生较大的应力,下层土工格栅在中间产生较大的应力,这是由于土拱效应的存在,产生了水平附加应力,上层土工格栅受到的拉应力远大于下层土工格栅受到的拉应力。

从图 9 中可知路基的竖向应力范围是 - 106.59 kPa ~ 20.17 kPa,上、中、下层的动应力值依次为 26.00 kPa、17.88 kPa、9.60 kPa,总体衰减了 63.1%,说明路基中铺设土工格栅可加速动应力的衰减,具有一定的减振作用。对比铺设两层和三层土工格栅的工况,可发现铺设三层动应力的衰减更明显,可改善路基结构动力响应特征,增强了路基的抗振性能。

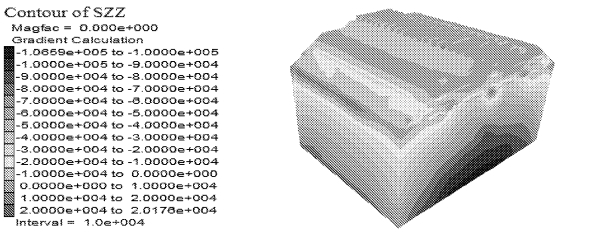


(a) 路基竖向应力云图

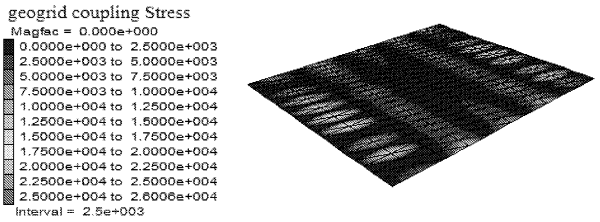
(b) 下层土工格栅剪应力云图

(c) 上层土工格栅剪应力云图

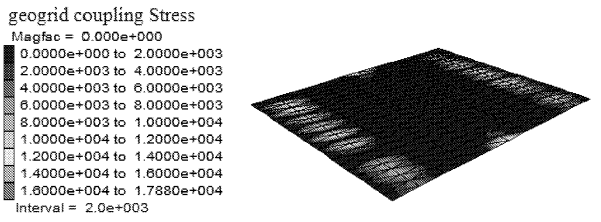
图 8 二层加筋数值模拟



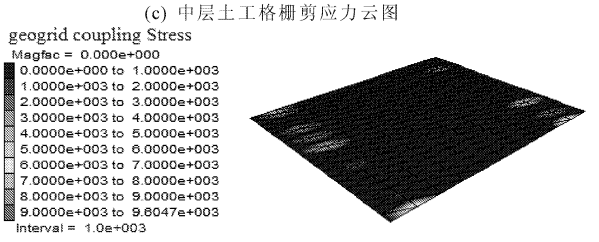
(a) 路基竖向应力云图



(b) 下层土工格栅剪应力云图



(c) 中层土工格栅剪应力云图



(d) 上层土工格栅剪应力云图

图 9　三层加筋数值模拟

3　结　论

通过 FLAC^{3D}建立轨道与路基的三维数值模型,选取合适的材料参数,对路基模型进行了动力数值分析,主要结论如下:

(1) 随着动应力幅值的增大,竖向拉应力的最大值出现在轨枕及路基与地基的交界处,且随着动应力幅值的增大而增大,路基表面应力分布呈马鞍形分布状态愈加明显,最大压应力位于地基深处,且在三种动应力幅值下均没有明显变化,说明动应力沿路基深度的衰减规律受车速的影响较小。

(2) 路基的竖向应力随格栅埋置深度的增加出现了先减小再增大的趋势,建议在路基内铺设格栅的位置选择在路基顶部或中下部较合适,可确保基床长期的动力稳定。土工格栅埋置的上部也会出现较大的拉应力,这是由于土工格栅利用自身强度以及由于摩擦等作用改变了基床内部的应力分布。

(3) 在路基中铺设两层土工格栅,应力衰减了 28.5%,铺设三层土工格栅,应力衰减了 63.1%。说明土工格栅的铺设加速了动应力的衰减,具有一定的减振作用,可改善路基结构动力响应特征,提高路基的抗振性能。

参考文献:

[1] Masoud M S, Farhad H B. Dynamic behavior of reinforced clayey sand under cyclic loading[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014,42(5):564-572.

[2] Wang Changdan, Wang Binglong, Guo Peijun, et al. Experimental analysis on settlement controlling of geogrid-reinforced pile-raft-supported embankments in high-speed railway[J]. Acta Geotechnica, 2015,10(2):231-242.

[3] 刘明亚,王家鼎,谷天峰.循环荷载下压实黄土动力特性的试验研究[J].水文地质工程地质,2015,42(3):108-112.

[4] 周　健,谢鑫波,姜　炯,等.包裹式加筋土挡墙的变形特性及影响因素研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(1):148-154.

[5] 邱明明,杨　啸,杨果林,等.云桂高速铁路新型全封闭路堑基床动响应特性研究[J].岩土力学,2016,37(2):537-544.

[6] 徐　超,贾　斌,罗玉珊.间接加筋作用及加筋土挡墙离心模型试验验证[J].水文地质工程地质,2015,42(2):77-82.

[7] 杨果林,王亮亮,房以河,等.云桂高速公路不同防水层基床动力特性现场试验[J].岩石力学与工程学报,2014,33(8):1672-1678.

[8] 陈建峰,柳军修,石振明.路堤式加筋土挡墙三维数值模拟[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(12):1799-1804.

[9] 滕前良,胡润忠.土拱效应及土工格栅拉膜效应数值分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(3):424-427.

[10] 孙　锴,彭　立,杜勇立,等.基于 FLAC^{3D}的煤矸石路堤沉降与应力分析与现场测试对比研究[J].公路工程,2014,39(1):83-87.

[11] Anjana B, Rajagopal K. Numerical study of basal reinforced embankments supported on floating/end bearing piles considering pile-soil interaction[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015,43(6):1-13.

[12] 耿　敏,赵文忠,王丙兴,等.基于 FLAC^{3D}的加筋土计算方法对比研究[J].河北工业大学学报,2013,42(3):74-78.

[13] 刘　军,贾喜军.基于 FLAC^{3D}的土工格室挡墙工程性状及敏感性因素分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):212-216.

[14] 于丽鹏.基于 FLAC^{3D}模拟的土体弹性模量取值分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(2):162-166.

[15] 孔祥辉,蒋关鲁,李安洪,等.基于三维数值模拟的铁路路基动力特性分析[J].西南交通大学学报,2014,49(3):406-411.

[16] 白　杨,曹　琪.列车荷载作用下对重力式挡墙动响应的影响规律研究[J].南阳理工学院学报,2017,9(2):52-56.