

高速公路碎石桩复合地基加固数值模拟

蒋敏敏¹, 肖昭然¹, 蔡正银^{2,1}

(1. 河南工业大学土木建筑学院, 河南 郑州 450001; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要: 通过数值模拟分析了高速公路碎石桩复合地基在桩体施工、路堤填筑、运行期全过程问题和地震动荷载作用等问题。计算结果表明: 碎石桩在路堤的填筑和运行期起到明显的排水固结作用, 当桩长大于 6 m 后复合地基中的孔压最大值变化较缓慢; 在桩长大于 10 m 后路堤底面的沉降量和坡脚的水平位移量变化均较小。地震荷载作用下路堤顶部的水平向加速度峰值较底面大; 在碎石桩加固范围内, 复合地基的水平刚度大于天然地基, 而在整个地基内, 复合地基的竖向刚度均大于天然地基, 在地基刚度较大的情况下位移最大值较大; 天然地基在路堤坡脚下、路堤边坡等位置较易发生液化, 经过碎石桩加固后降低了地基液化的可能性。

关键词: 高速公路; 碎石桩复合地基; 数值模拟; 静力分析; 地震动力分析

中图分类号: TU472.32 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0475-05

作者简介: 蒋敏敏(1981-), 男, 江苏人, 博士, 讲师, 研究方向为岩土工程。E-mail: jiang_mm@hotmail.com。

Numerical simulation of composite ground of expressway reinforced by stone columns

JIANG Min-min¹, XIAO Zhao-ran¹, CAI Zheng-yin^{2,1}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: A numerical analysis is studied on the construction, runtime and earthquake condition of composite ground reinforced by stone columns. The calculated results indicate that the stone columns have significant effect on drainage of the excess pore pressure under construction and runtime; when the pile length is larger than 6 m, the maximum pore pressure changes slowly; when it is larger than 10 m, the settlement under embankment and horizontal displacement under slope toe change slowly. Under earthquakes the maximum acceleration at the top of the pave is larger than that at the bottom of the model; in reinforced scope, the horizontal stiffness of composite ground is larger than that of natural foundation; in the whole ground, the vertical stiffness of composite ground is larger than that of natural foundation, and the maximum displacement is larger in large stiffness ground; the toe position and slope of embankment are easy to be liquefied under earthquakes, but stone column composite ground can reduce the possibility of liquefaction.

Key words: expressway; composite ground reinforced by stone columns; numerical simulation; static analysis; earthquake analysis

0 前 言

碎石桩复合地基是一种开发较早、使用较普遍的地基处理方法, 目前已被广泛应用于加固易液化无黏性土和软弱土层, 加固效果主要表现在挤密、排水、置换等方面。目前对碎石桩复合地基的研究主要集中于承载力、沉降等的分析^[1]。Han 等对碎石桩复合地基的固结进行了理论分析^[2]。赵明华等基于最小势能原理, 分析了路堤荷载下碎石桩复合地基桩土应力比计算解析表达式, 并结合大型室内模型试验, 对桩土应力比计算解析式进行了验证^[3]; 以及分析了复合模

量的极限值^[4]。Adalier 等通过振动离心模型试验研究了地震荷载下碎石桩的加固原理^[5], 分析了碎石桩复合地基降低液化的机理和地面上的变形等问题^[6]。刘义怀等通过对路基延长方向的桩土单元进行均质化处理, 而横截面方向仍按桩、土分别处理, 计算了静荷载作用下碎石桩复合地基的沉降等问题^[7]。

从文献分析可见, 研究者主要针对碎石桩复合地基的承载力、应力、变形等的理论方面, 以及模型试

验、抗液化机理、静力数值模拟等方面进行了研究。本文通过 ABAQUS 有限元数值模拟, 分析了碎石桩的施工、路堤路面填筑、交通荷载的全过程响应以及地震荷载作用下碎石桩复合地基的响应等问题。

1 碎石桩复合地基计算模型

1.1 静力计算模型

静力计算采用渗流/应力耦合分析, 分析碎石桩复合地基在桩体施工、路堤分层填筑、路面分层铺设以及交通荷载作用下碎石桩复合地基全过程的应力、位移、孔压等响应。

模型中自上而下为 0.69 m 厚的路面层、4 m 高的路堤、0.5 m 厚的砂垫层、碎石桩复合地基和粉土层等。路面层和砂垫层采用线弹性模型模拟, 根据路堤、碎石桩体、粉土等材料的受力变形特点分别采用了 Drucker-Prager、Mohr-Coulomb 和修正剑桥弹塑性模型模拟, 模型参数见文献[8]。地下水位位于砂垫层底面, 砂垫层顶面为加载过程中孔压为 0 的边界, 模型的两侧为侧限的位移边界, 底部为固定的位移边界。计算中采用等刚度原理将碎石桩复合地基等效为碎石桩墙, 碎石桩墙的模量

$$E' = E \frac{nA}{DL} \quad , \quad (1)$$

式中, E 为碎石桩的模量, n 为纵向碎石桩数目, A 为碎石桩的横截面面积, D 和 L 分别为板状的厚度和纵向长度。碎石桩墙的问题可采用平面应变模型来分析, 碎石桩复合地基计算模型如图 1 所示。碎石桩的桩径为 0.5 m、桩间距为 1.5 m, 静力分析中计算了天然地基以及桩长为 6, 8, 10, 12, 14 m 等情况。

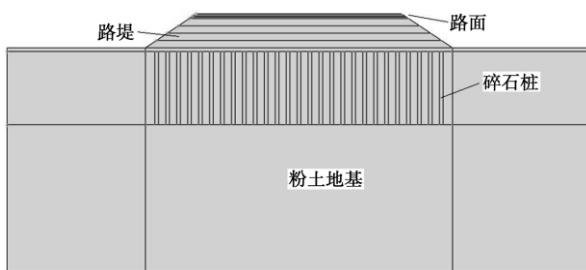


图 1 碎石桩复合地基计算模型

Fig. 1 Numerical model of composite ground reinforced by stone columns

静力模拟的过程包括: 先是碎石桩的施工; 其次是路堤的填筑, 分 8 次填筑完成, 每次填筑期和填筑间隔期均为 30 d, 路面基层和面层的铺设期和铺设间隔期均为 10 d; 最后是路面交通荷载的施加, 将交通荷载等效为 20 kPa 的均布静荷载, 分析高速公路在运行 15 年后碎石桩复合地基的工作性状。静力计算模型的加载时程如图 2 所示。

1.2 地震动力计算模型

在地震荷载计算中土体的动力应力应变关系采用

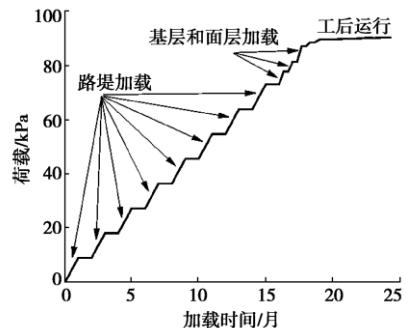


图 2 静力计算模型的加载时程

Fig. 2 Loading process in static computation model

沈珠江等效线性动力模型^[9], 在动应变和加速度相对较小的情况下具有较好的精度, 且计算效率较高。等效线性动力模型的动剪应力动应变关系为

$$\tau = G\gamma + \eta_G \dot{\gamma} \quad , \quad (2)$$

式中, η_G 为剪切黏滞系数,

$$\eta_G = 2G\lambda/\omega \quad , \quad (3)$$

式中, λ 为阻尼比, ω 为圆频率, 动剪切模量比值 G/G_{\max} 表示为

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} \quad , \quad (4)$$

$\bar{\gamma}_d$ 为归一化的动剪应变,

$$\bar{\gamma}_d = 0.65 \gamma_{\max} \left(\frac{\sigma'_3}{p_a} \right)^{n-1} \quad , \quad (5)$$

最大剪切模量

$$G_{\max} = k_2 p_a \left(\frac{\sigma'_3}{p_a} \right)^n \quad , \quad (6)$$

式中, γ_{\max} 为最大剪应变, p_a 为大气压, k_1 、 k_2 为材料参数, 阻尼比的比值表示为

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\max}} = \frac{k_1 \bar{\gamma}_d}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} \quad . \quad (7)$$

计算中动力材料参数包括 k_2 、 n 、泊松比 ν 、圆频率 ω 等, 模型参数同文献[8]。根据等效线性动力模型编制 UMAT 用户材料子程序, 用于 ABAQUS 的分析计算中。

地震动力计算主要包括以下几个程序: 首先通过静力分析计算出地震荷载施加前各单元的围压 σ'_3 ; 再通过线性摄动分析提取模型的基频; 将模型的基频作为材料的圆频率参数, 利用隐式动力分析通过迭代计算各单元的 G/G_{\max} 、 λ/λ_{\max} 和 γ_{\max} , 每次迭代计算后, 通过式(4)和(7)分别计算 G/G_{\max} 和 λ/λ_{\max} 作为下次迭代的输入新参数, 直至迭代计算的动应变基本稳定。则迭代计算后 G/G_{\max} 、 λ/λ_{\max} 和 γ_{\max} 参数可作为

地震计算的基本参数, 计算地震动力响应问题。计算模型底部输入的地震加速度时程如图 3 所示。地震动力计算中主要分析了天然地基, 桩长 6 m 桩间距 1.5 m 的复合地基, 桩长 10 m 桩间距为 1 m、1.5 m 的复合地基等几种情况。

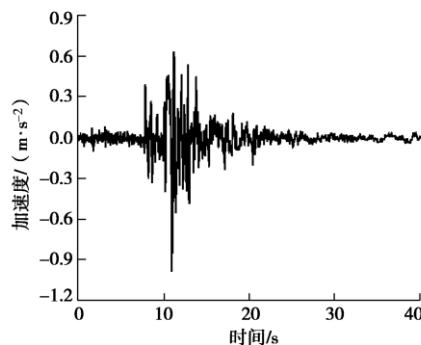


图 3 输入加速度时程曲线

Fig. 3 Inputting curve of acceleration along time

2 计算结果分析

2.1 静力计算结果

为了验证数值计算模型, 选取河南省濮范高速的典型碎石桩复合地基路段, 将数值计算结果与现场沉降观测数据进行分析对比, 如图 4 所示。数值计算沉降量最大为 114 mm, 观测值最大为 107 mm, 从数值计算与测量值的对比可见, 数值计算模型较好地模拟了碎石桩复合地基的问题。

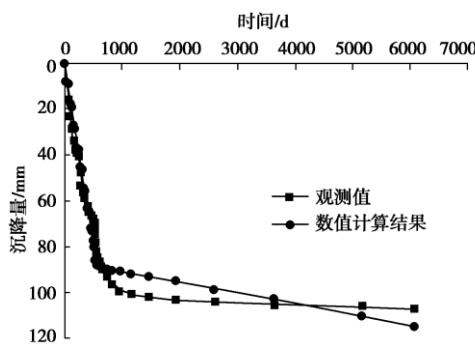


图 4 观测值与数值计算结果的对比

Fig. 4 Comparison between observed and numerical simulation values

在路堤填筑完成后, 路堤中心位置孔压沿深度的变化如图 5 所示, 从计算结果可见碎石桩加固范围内超静孔压有较大的消散, 而碎石桩复合地基的下卧土层中的孔压随着深度逐渐上升。桩长对复合地基中的孔压最大值的影响如图 6 所示, 从分析计算结果可见, 碎石桩在路堤的填筑和运行期起到了明显的排水固结作用, 在桩长大于 6 m 后碎石桩复合地基中的孔压最大值变化较缓慢。

在 15 a 运行期后桩长对路堤底面中心沉降量的影响如图 7 所示, 从计算结果可见, 在桩长大于 10 m 后对路堤底面的沉降量影响较小。桩长对坡脚位置地基中水平位移量的影响如图 8 所示, 从计算结果可见, 在坡脚位置的深层水平位移量有两个极值点, 一个位于地面以下约 1 m 的位置, 另一个位于碎石桩的桩底附近。当桩长大于 10 m 后, 坡脚的水平位移量变化较小。

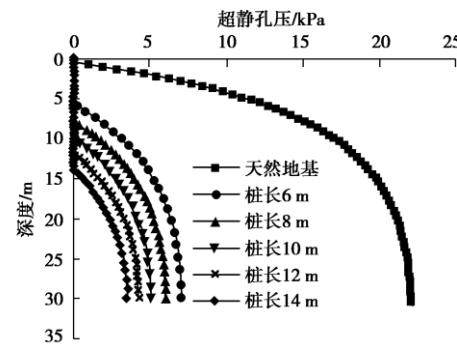


图 5 路堤中心在填筑完成后的孔压分布

Fig. 5 Distribution of pore water pressure at central bottom of embankment after construction

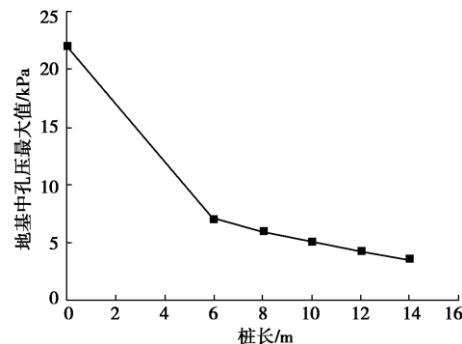


图 6 桩长对碎石桩复合地基中的孔压最大值的影响

Fig. 6 Effect of pile length on maximum pore water pressure in composite ground reinforced by stone columns

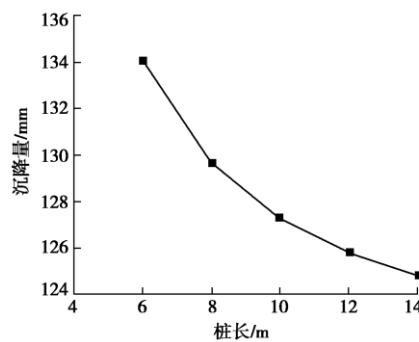


图 7 桩长对路堤底面中心沉降量的影响

Fig. 7 Effect of pile length on settlement at central bottom of embankment

2.2 地震动力计算结果

通过对模型施加如图 3 所示的地震加速度, 得到

模型底部和路堤顶面的加速度时程曲线如图 9 所示, 可见路堤顶部的水平向加速度峰值较底面大。

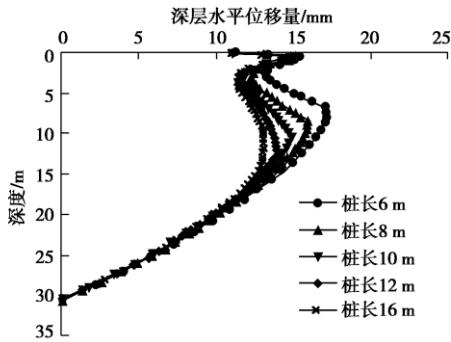


图 8 桩长对坡脚水平位移量的影响

Fig. 8 Effect of pile length on deep horizontal displacement of slope toe

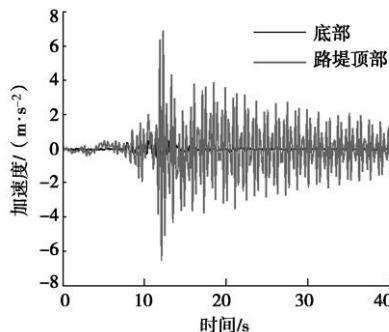


图 9 不同位置水平向加速度时程曲线

Fig. 9 Horizontal acceleration along time at different positions of ground

路堤中心线下, 各单元在地震荷载过程中水平位移量最大值和竖向位移量的最大值, 分别如图 10 和图 11 所示。从路堤中心水平位移最大值分布可见: 在复合地基加固范围内, 天然地基的水平向位移最大值较小, 而桩长 10 m 间距 1 m 碎石桩复合地基的水平向位移最大值较大, 这是由于在加固范围内天然地基的水平刚度较小而碎石桩复合地基的水平刚度较大。对于竖向位移最大值, 在整个地基中, 均为天然地基较小, 碎石桩复合地基较大, 这是由于天然地基的竖向整体刚度较小, 而复合地基的竖向整体刚度较大。

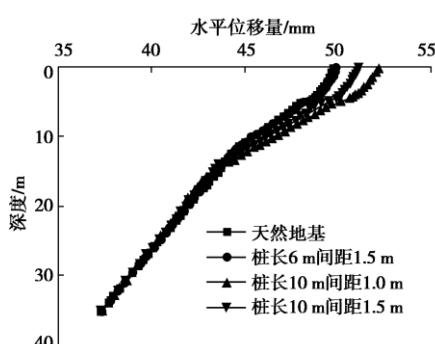


图 10 路堤中心水平位移最大值分布

Fig. 10 Distribution of maximum horizontal displacement at center of embankment

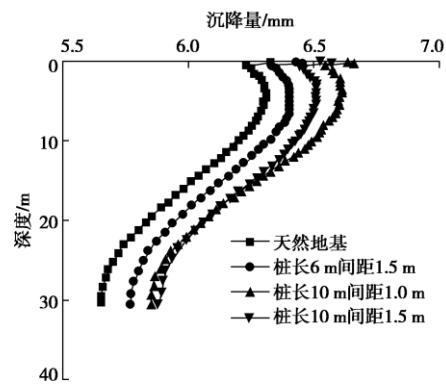
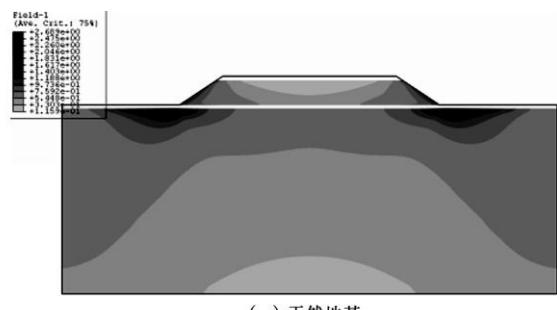
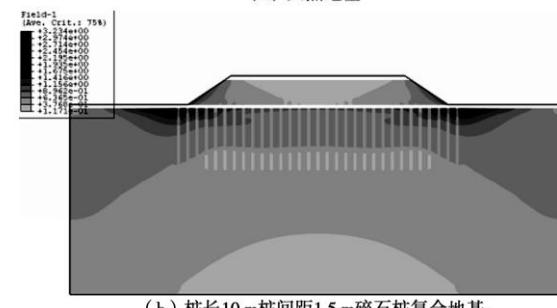


图 11 路堤中心竖向位移最大值分布

Fig. 11 Distribution of maximum vertical displacement at center of embankment



(a) 天然地基



(b) 桩长10m间距1.5m碎石桩复合地基

图 12 动剪应力比 τ/σ'_0 的分布

Fig. 12 Distribution of dynamic shear stress ratio τ/σ'_0

根据数值计算结果绘制动剪应力比 τ/σ'_0 的分布图如图 12 所示, 其中 τ 为地震中各单元的循环剪应力最大值。Seed 等通过试验发现当地基中的动剪应力比大于某一值时会发生液化, 本文通过数值计算发现天然地基在路堤坡脚下、路堤边坡等位置的动剪应力比较大, 因此最易发生液化, 需要通过一定的处理措施来消除可能存在的液化影响。而碎石桩复合地基在加固区域, 动剪应力比有一定的降低, 因此能从一定程度上降低地震液化的影响。

3 结 论

通过数值计算, 分析了碎石桩复合地基在桩体施

工、路堤路面分层填筑以及交通荷载作用下碎石桩复合地基全过程的静力分析和地震动力荷载作用下的问题分析, 得到以下主要结论:

(1) 数值计算模型能较好地模拟碎石桩复合地基问题。在路堤的填筑和运行期碎石桩起到了明显的排水固结作用, 当桩长大于 6 m 后碎石桩复合地基中的孔压最大值变化较缓慢。在桩长大于 10 m 后路堤底面的沉降量和坡脚的水平位移量变化均会较小。

(2) 地震荷载作用下路堤顶部的水平向加速度峰值较底面大。在碎石桩加固范围内, 复合地基的水平刚度大于天然地基, 因此复合地基水平位移最大值大于天然地基情况; 在整个地基内, 复合地基的竖向刚度均大于天然地基, 因此整个地基内复合地基竖向位移最大值大于天然地基情况。天然地基在路堤坡脚下、路堤边坡等位置较易发生液化, 经过碎石桩加固后降低了地基液化可能性。

参考文献:

- [1] PRIEBE H J. The design of vibro replacement[J]. *Ground Engineering*, 1995: 31 - 37.
- [2] HAN J, YE S L. Simplified method for consolidation rate of stone column reinforced foundations[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2001, **127**(7): 597 - 603.
- [3] 赵明华, 邓岳保, 杨明辉. 路堤荷载作用下碎石桩复合地基桩土应力比计算及试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(9): 2623 - 2628. (ZHAO M H, DENG Y B, YANG M H. Calculation and model test for pile-soil stress ratio of gravel pile composite foundation under embankment load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(9): 2623 - 2628. (in Chinese))
- [4] 赵明华, 孙建兵, 张永杰, 等. 碎石桩复合地基复合模量极限分析[J]. *中南大学学报*, 2009, **40**(6): 1718 - 1723. (ZHAO M H, SUN J B, ZHANG Y J, et al. Limit value of composite modulus of gravel pile composite foundation[J]. *Journal of Central South University*, 2009, **40**(6): 1718 - 1723. (in Chinese))
- [5] ADALIER K, ELGAMAL A, MENESSES J, et al. Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, **23**: 571 - 584.
- [6] ADALIER K, ELGAMAL A. Mitigation of liquefaction and associated ground deformation by stone columns[J]. *Engineering Geology*, 2004, **72**: 275 - 291.
- [7] 刘义怀, 朱志铎, 刘松玉. 路堤荷载下碎石桩复合地基的有限元分析[J]. *公路交通科技*, 2002, **19**(5): 11 - 13. (LIU Yi-huai, ZHU Zhi-duo, LIU Song-yu. Finite element method for composite foundation with stone columns[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2002, **19**(2): 11 - 13. (in Chinese))
- [8] 河南工业大学. 高速公路粉土地基碎石桩复合地基加固机理数值模拟及应用研究[R]. 郑州: 河南工业大学, 2011. (Henan University of Technology. Numerical Simulation of Stone Column Reinforced Expressway Foundation and its Application[R]. Zhenzhou: Henan University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [9] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. *水利水运科学研究*, 1996(2): 143 - 150. (SHEN Zhu-jiang, XU Gang. Deformation of rock materials under cyclic loading[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 1996(2): 143 - 150. (in Chinese))

(本文责编 明经平)