

数值模拟在高速公路软弱地基处理中的应用

武志德^{1,2}, 张鑫³, 杜荣军⁴, 易海洋²

1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊 065007
2. 中国矿业大学(北京)岩石力学与分形研究所, 北京 100083
3. 黄河勘测规划设计有限公司, 郑州 450003
4. 西安科技大学地质与环境学院, 西安 710054

摘要 尹中高速公路的地基土稳定性不能满足公路工程的要求, 为了掌握该公路在施工过程中变形特征, 采用有限元软件 NCAP-2D 对尹中高速公路施工过程进行了模拟, 分析了不同桩间距、断桩两种情况下的破坏、位移特征。结果表明, 旋喷桩桩顶处于塑性状态, 旋喷桩桩顶侧向位移大于桩底, 增加了基础的稳定性; 当桩间距变化时, 桩顶土和桩间土的塑形区范围、位移量呈正相关变化, 桩顶附近发生塑性破坏的敏感区域; 有断桩时, 塑形区在断桩处分布范围明显较大, 影响地基加固效果。所得结果对于此类公路的建设施工具有一定的借鉴意义。

关键词 高压旋喷桩; 地基处理; 尹中高速公路; 有限元分析

中图分类号 TU47

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.32.009

Numerical Simulation of Highway Soft Foundation Treatment

WU Zhide^{1,2}, ZHANG Xin³, DU Rongjun⁴, YI Haiyang²

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. Institute of Rock Mechanics and Fractals, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China
3. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China
4. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract The stability of Yinzhong highway fails to satisfy the requirements of the highway engineering. In order to know the deformation features of this highway during its construction, the FEM analysis software of NCAP-2D is used. The geotechnical material's nonlinear features, such as elastic-plastic relations, nonlinear joints, non-tensile characteristics, and orthotropic properties of the layered rock mass, are considered in the software. The Drucker-Prager yield criterion is applied in the numerical models, and the construction process of pile forming and soil filling are simulated with an element-free method. The basic data of displacement and stress after excavation are obtained when compared with those before excavation. Piles with different gaps and broken piles are simulated, and the plastic zone and displacement characteristics are analyzed. The results show that the top of jet grouting pile is in relatively obvious plastic state, because some loads on the soil between piles are transmitted to the piles. At the same time, the top of the piles experiences larger lateral displacement than the bottom, which could enhance the basement stability. The plastic zone and the displacement have a positive correlation when the gap between piles is changed, and the same for the soil and piles. But the area around the pile's top is where breakage would occur with whatever change of pile's gap. The plastic zone would obviously be concentrated around the broken piles, which would influence the foundation reinforcement effect. According to the field load test, after the treatment by high pressure jet grouting, the bearing capability of the foundation is, respectively, 2.08 times and 2.97 times of that of the untreated recently deposited

收稿日期: 2011-04-06; 修回日期: 2011-10-30

作者简介: 武志德, 博士研究生, 研究方向为岩土工程、地质工程, 电子信箱: wuzhide2004@163.com

loess and soft loess. And the actual monitoring settlement is only about 0.17 times of the calculated value. So, the treatment in this paper's situation has a good strengthening effects. The conclusion in this paper provides some guidance for highway's construction in the similar situations.

Keywords high pressure jet grouting pile; foundation treatment; Yinzong highway; finite element method analysis

0 引言

随着中国高速公路的迅猛发展,在公路修建过程中,遇到的软弱地基越来越多^[1-2],旋喷桩复合地基作为一种地基处理方式,常用于加固地基土以提高承载力和减少基础沉降。高压喷射注浆技术在1972年由铁道部科学研究院率先开展研究^[3],目前该技术广泛应用于地铁竖井施工^[4]、浅埋暗挖隧道加固^[5]、铁路路基加固^[6]、建筑物基坑加固^[7]等方面。不同的地基处理方法,将对加固效果、破坏方式产生影响,在对天津地铁一号线改造工程的数值模拟表明,采用高压旋喷抽条加固的方法能够严格有效地控制差异性沉降^[8];尹中高速公路典型断面的实测表明,在相同荷载水平下,支承式复合地基中桩体与桩间土体所承受的压力均大于悬浮式复合地基中的数值,柔性基础下复合地基的破坏模式为桩间土体先

破坏,继而引起整个复合地基的破坏^[9]。对门型双排桩支护结构在武汉时代广场深基坑工程中的应用表明,桩径增加时桩顶位移增加;前排桩桩长增大而后排桩桩长不变时,桩顶位移减小且趋于平缓^[10]。但目前对于不同桩间距、存在断桩等情况下的路基变形特点缺少相关的研究。因此,本文以尹中高速公路为研究对象,对此进行研究,为此类路基的施工效果判别提供一定的科学依据。

1 工程地质概况

尹中高速公路位于陕西黄土高原西北部,地层岩性自下而上主要有泥岩层、角砾和砂层、软弱黄土层和新近堆积黄土层^[11]。软弱黄土中粉粒组含量为68%,黏粒组含量为27%,砾砂组含量为5%。黄土的物理力学性质见表1。

表1 黄土物理力学性质指标统计表

Table 1 Loess indicators of physical and mechanical properties

| 指标 | 含水量 $W/\%$ | 比重 $G/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 液限 $W_L/\%$ | 塑限 $W_p/\%$ | 限指数 I_p | 液限指数 I_L |
|----|---|--|--------------|-------------|-------------|------------|
| 量值 | 极大值 | 35.1 | 2.73 | 33.08 | 22.91 | 15.43 |
| | 极小值 | 24.5 | 2.67 | 21.81 | 13.12 | 4.88 |
| | 平均值 | 29.8 | 2.70 | 27.13 | 18.48 | 8.65 |
| 指标 | 天然容重 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 干容重 γ_d $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 饱和度 $S_r/\%$ | 孔隙率 $n/\%$ | 天然孔隙比 e_0 | 含水比 μ |
| 量值 | 极大值 | 21.3 | 16.8 | 100 | 60.16 | 1.31 |
| | 极小值 | 14 | 10.7 | 63.5 | 31.97 | 0.68 |
| | 平均值 | 17.31 | 15.40 | 81.75 | 49.49 | 0.99 |

由于地势低洼,地下水位高,地下水位以下新近堆积黄土经长期浸泡,多呈软塑—流塑状;上部为新近堆积黄土,大孔隙发育^[9]。以K36+060路段为例,当填土高度为7.95m时,路中心的沉降量为815.5mm,路基坡脚处的沉降量为344.9mm。天然地基承载力新近堆积黄土为100kPa,软弱黄土为70kPa。

以K36+060-160作为研究路段,复合地基采用如下设计:三角形布桩,桩间距2.0m,排距1.8m,置换率0.1306,旋喷体直径0.6m,桩长15m;采用单管法施工,水灰比为1:1。按照此设计,地基处理后桩间地基土承载力折减系数为0.9,桩身强度折减系数为0.5。

2 高压旋喷桩数值模型建立及结果分析

采用基于有限单元法的NCAP-2D程序进行模拟研究,

分析不同桩间距、断桩存在情况下的应力、位移特点。有限单元法放入基本思想是,把连续体离散化为一系列的连接单元,每个单元内可任意指定各种不同的受力状态,从而可以在一定程度上更好地模拟岩土体的实际情况。

2.1 NCAP-2D程序简介

NCAP-2D是西安科技大学刘怀恒、王芝银教授等开发的有限元程序,特别适用于求解岩土力学及工程中的岩土体稳定性分析,其非线性分析考虑了岩土材料的弹-塑性、节理(及夹层)的非线性、岩土不抗拉(或较低抗拉强度)特性和层状岩土体的正交异性等非线性问题。程序中设置了线弹性模型、弹塑性模型、横观各向同性模型和节理(断层、软夹层等)模型,可以模拟岩层开挖,以及岩土体与支护结构等工序,考虑岩土体与支护结构(如锚固支护)的相互作用,并给出每一施工步骤(开挖或支护)的应力或位移值,可以十分方便地分

析施工过程中围岩动态变化及比较不同施工方案的利弊。

2.2 有限元分析模型的建立

采用 Drucker-Prager 屈服准则,模型采用位移边界条件,只考虑重力的影响。在 NCAP-2D 中,采用空单元法模拟成桩及填筑土的施工过程模拟。过程简述如下。

首先解方程

$$[K_0] \cdot \{\delta_0\} = \{W\} \quad (1)$$

据式(1)得到开挖前的位移场和应力场。令即将挖去的岩土体的自重及力学参数为零,求解式(2):

$$[K_2] \cdot \{\delta_2\} = \{W_2\} \quad (2)$$

其中, $[K_0]$ 、 $[K_2]$ 分别为开挖前、开挖后刚度矩阵; $\{W\}$ 为包括即将挖去的岩土体自重在内的荷载; $\{W_2\}$ 为未开挖部分的岩土体荷载; $\{\delta_0\}$ 、 $\{\delta_2\}$ 分别为开挖前、开挖后的位移。

求解式(2),得到开挖完成后的应力 σ 和位移 δ 为

$$\{\sigma\} = \{W_2\} \quad (3)$$

$$\{\delta\} = \{\Delta\delta\} = \{\delta_2\} - \{\delta_0\} \quad (4)$$

根据上述原理,可以得到高压旋喷桩形成和路堤填筑后状态下的位移场和应力场。

土体的物理力学参数见表 2。数值模型长 100m。桩体参数采用实际施工相关数值,在考虑不同桩间距的影响时其数值是指桩体边缘的距离。路堤填筑总高度 7.95m,依据实际施工填筑步骤,分 5 步完成,填筑高度依次为 0.5, 1.9, 2.2, 2.2 和 1.15m。

表 2 数值模型岩体力学参数表

Table 2 Rock mechanical parameters of the numerical model

| 岩土类型 | 弹性模量/MPa | 泊松比 μ | 黏聚力 /MPa | 内摩擦角 $\Phi/(^\circ)$ | 容重 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$ |
|--------|----------|-----------|----------|----------------------|-------------------------------|
| 桩体 | 5000 | 0.20 | 0.8 | 25 | 15 |
| 新近堆积黄土 | 0.5 | 0.25 | 0.025 | 30 | 20 |
| 软弱黄土 | 0.35 | 0.30 | 0.015 | 18 | 18 |
| 填筑土 | 0.6 | 0.25 | 0.035 | 25 | 19 |

2.3 模拟结果分析

(1) 不同桩间距的模拟结果分析。

桩间距 1.4m 填筑完成后的位移情况如图 1 所示,其中垂直方向即为 y 方向,以旋喷桩底部为坐标零点,总高度即为 15m 的桩长和 7.95m 的填筑高度的总和。可见,在路基中心位置上桩和桩间土的最大沉降量为 11.17, 11.94cm;在坡脚部位则为 10.35, 10.67cm。当桩间距加大一倍时(图 2),在路基中心部位,桩和桩间土的最大沉降量为 13.98, 14.67cm;在路基坡脚部位则分别为 12.83, 13.52cm。当桩间距缩小一半时(图 3),在路基中心部位,桩和桩间土的最大沉降量为 9.82, 10.63cm;在路基坡脚部位则分别为 9.08, 9.76cm。

当桩间距为 1.4m 时(图 4),在桩顶的位置产生塑性区,桩间土的塑形区范围很小,下层地基则比较稳定;路基两侧

坡脚桩体的塑形区范围明显大于中央桩体的范围。当桩间距扩大 1 倍至 2.8m 时(图 5),桩顶、桩间土塑性区的分布范围向上扩大;在路基坡脚处塑形区的范围相对较小。当桩间距减小一半为 0.7m 时(图 6),仅在桩顶下方出现塑形区;路基两侧坡脚桩体的塑形区范围较大。

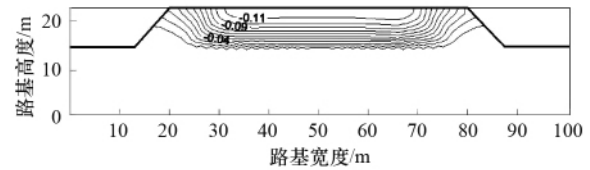


图 1 桩间距 1.4m 时 y 方向位移等值线图

Fig. 1 Displacement contours in y direction of filling distance 1.4m

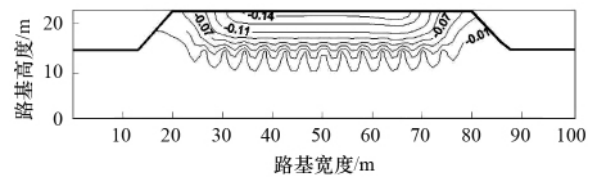


图 2 桩间距 2.8m 时 y 方向位移等值线图

Fig. 2 Displacement contours in y direction of filling distance 2.8m

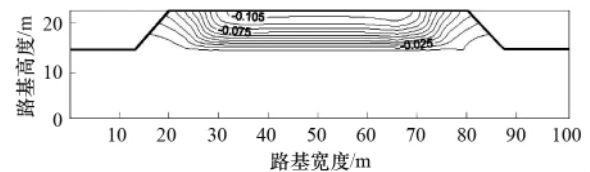


图 3 桩间距 0.7m 时 y 方向位移等值线图

Fig. 3 Displacement contours in y direction of filling distance 0.7m

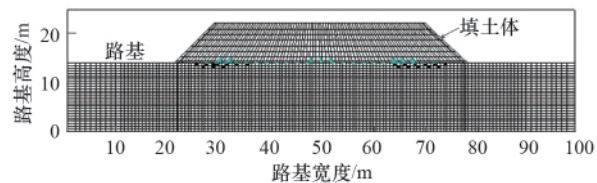


图 4 桩间距 1.4m 塑性区图

Fig. 4 Plastic zones of filling distance 1.4m

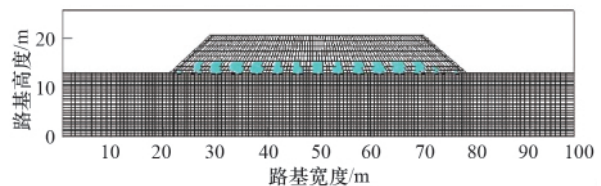


图 5 桩间距 2.8m 塑性区图

Fig. 5 Plastic zones of filling distance 2.8m

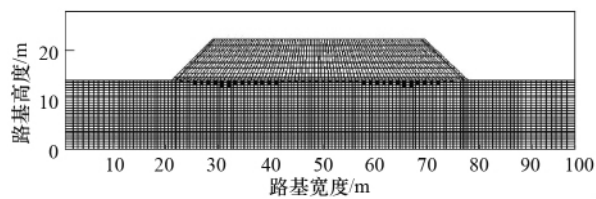


图 6 桩间距 0.7m 塑性区图

Fig. 6 Plastic zones of filling distance 0.7m

桩顶是填土体与路基直接接触的部位,是主要的受力面。在填土施工完成后的模拟过程,可以看作是施工的间歇期,此时随着土体固结的发生,由于土体和桩体刚度不同,土的下沉量大于桩的下沉量,土会将在施工初期共同分担的上部荷载通过变形协调逐步给桩转移一部分,从而造成桩顶土压力增加而桩间土压力减小。

随着桩间距的增加,土体转移的荷载将增加,使得桩顶的压力增加愈加显著,从而扩大了桩顶塑性区的分布范围。而当桩间距减小时,情况则相反。

从图 4—图 6 可以看出,路基坡脚的破坏明显是强烈于路基中心区域的情况,这是由于在桩和土体间荷载转移时,坡脚所承受的荷载相对而言较中心区域小,坡脚附近的桩体接受的转移荷载是不等值的,故此出现以上的现象。

(2) 断桩存在时模拟结果分析。

桩间距为 1.4m 的情况下,对断桩数量对加固效果的影响进行分析。参数选取如前所述,仅在断桩部位把桩单元的力学参数改为土体单元的力学参数。

对于位移而言,断桩数量的多少对位移的影响也较大。断 1 根桩时,在断桩部位 y 方向位移量为 8.93cm(图 7)。而断 2 根桩时, y 方向位移量为 9.32cm(图 8)。

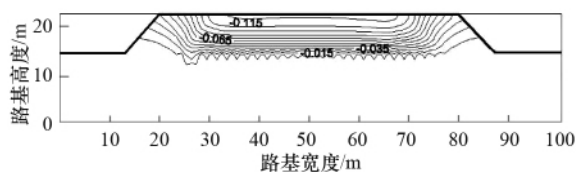


图 7 断 1 根桩时 y 方向位移等值线图

Fig. 7 Displacement contours in y direction for one broken pile

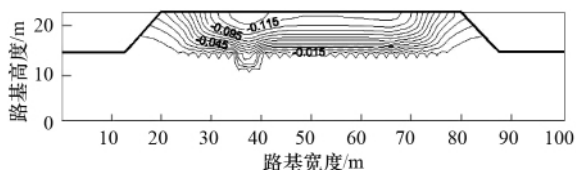


图 8 断 2 根桩时 y 方向位移等值线图

Fig. 8 Displacement contours in y direction for two broken piles

对比图 9 和图 10 可见,当断桩的数量增多时,在填筑土

中和桩基土中的塑性区分布范围均明显扩大。

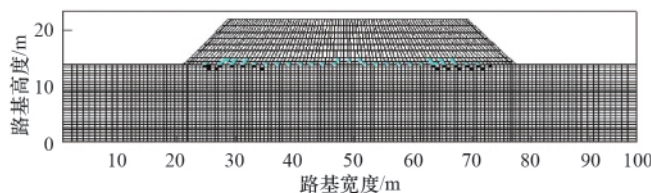


图 9 断 1 根桩时塑性区图

Fig. 9 Plastic zones for one broken pile

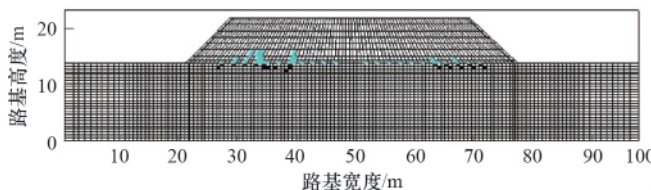


图 10 断 2 根桩时塑性区图

Fig. 10 Plastic zones for two broken piles

可见,当断桩的出现时,断桩处的位移量要大于同埋深处的桩体和桩间土的量值,且断桩位置将成为塑性区集中分布的地方。随着断桩数量的增加,位移的差异性和塑性区集中分布特征愈加明显。这主要是由于,有断桩时,桩间土侧向变形更加趋向于向不受限一侧的变形,导致位移和塑性区的变化趋势。

3 地基加固效果分析

根据现场载荷试验,未经处理的天然地基的承载力标准值新近堆积黄土为 100kPa,软弱黄土为 70kPa,而经高压旋喷桩处理的地基承载力达到 208kPa;理论计算天然地基路中心最终沉降量 815.5mm,而处理后的地基沉降量实际监测值为 135mm。无论是地基承载力还是地基沉降量均达到设计要求,加固效果良好,地基稳定性较好。

可见,高压旋喷桩复合地基的桩与桩间土分别承担上部荷载,能大幅度提高复合地基承载力,改变桩传递轴向应力的特征,减小基础底面的压力,阻止土层侧向变形作用,不但改善路基沉降,同时增加了基础的稳定性。

4 结论

根据以上的分析可见,软弱地基经处理后在控制沉降方面效果明显。本文主要结论如下。

(1) 由于桩体、桩间土是上部荷载的主要承载体,且桩间土会向桩体转移一部分荷载,导致旋喷桩桩顶是复合地基中塑形变形较明显的区域。同时,旋喷桩桩顶侧向位移大于桩底,在阻止土层侧向变形的情况下增加了基础的稳定性。

(2) 当桩间距增大时,桩顶、桩间土的塑性区范围将向上扩大,相对位移最大增加 26.7%;当桩间距减小时,塑性区主要集中在桩顶下方,相对位移最大减小 12.3%。

(3) 当有断桩存在时,断桩处位移量增大,塑形区范围扩大,影响地基加固效果,应避免此类情况的发生。

参考文献 (References)

- [1] 罗文柯. 不同气候条件下膨胀土路堤特征参数的室内模拟实验[J]. 科技导报, 2011, 29(6): 48-53.
Luo Wenke. *Science and Technology Review*, 2011, 29(6): 48-53.
- [2] 刘铁雄, 徐松山, 彭文祥. 采用强度折减法确定含软弱夹层岩质边坡安全系数[J]. 科技导报, 2010, 28(8): 65-68.
Liu Tiexiong, Xu Songshan, Peng Wenxiang. *Science and Technology Review*, 2010, 28(8): 65-68.
- [3] 杨凤灵, 付进省, 张全记, 等. 高压旋喷桩复合地基在高层住宅楼中的应用[J]. 地质科技情报, 2005, 24(S): 77-80.
Yang Fengling, Fu Jinsheng, Zhang Quanji, et al. *Geological Science and Technology Information*, 2005, 24(S): 77-80.
- [4] 汪小超, 齐卫国. 水泥旋喷桩在地铁工程中的应用 [J]. 浙江工业大学学报, 2009, 37(5): 572-575.
Wang Xiaochao, Qi Weiguo. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2009, 37(5): 572-575.
- [5] 沈忠武. 定向旋喷桩在浅埋暗挖隧道工程中的应用技术[J]. 铁道工程学报, 2009(7): 72-76.
Shen Zhongwu. *Journal of Railway Engineering Society*, 2009(7): 72-76.

- [6] 陈晓文. 高压旋喷桩在武广客运专线路基加固中的应用[J]. 铁道建筑, 2007(12): 83-84.
Chen Xiaowen. *Railway Engineering*, 2007(12): 83-84.
- [7] 付艳斌, 谢永健. 基坑旋喷桩施工对周边环境的影响及改进措施[J]. 建筑技术, 2007, 38(12): 915-917.
Fu Yanbin, Xie Yongjian. *Architecture Technology*, 2007, 38 (12): 915-917.
- [8] 郑刚, 裴颖洁. 天津地铁既有有线改造工程中的控制差异沉降研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 728-732.
Zheng Gang, Pei Yingjie. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28 (4): 728-732.
- [9] 冯瑞玲, 谢永利, 杨晓华. 尹中高速公路粉喷桩复合地基桩土应力比现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4190-4196.
Feng Ruiling, Xie Yongli, Yang Xiaohua. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(22): 4190-4196.
- [10] 王昱衡, 董必昌, 冯晓腊, 等. 双排桩支护结构受力参数影响分析[J]. 科技导报, 2009, 27(14): 64-68.
Wang Yuheng, Dong Bichang, Feng Xiaola, et al. *Science and Technology Review*, 2009, 27(14): 64-68.
- [11] 魏永学. 粉体搅拌桩在处理饱和黄土软基中的应用效果分析 [J]. 甘肃水利水电技术, 2005, 41(4): 390-392.
Wei Yongxue. *Gansu Water Conservancy And Hydropower Technology*, 2005, 41(4): 390-392.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·



“中华医学会第十四次全国心血管病学术会议”征文

由中华医学会、中华医学会心血管病学分会主办,2012年6月1日在武汉市召开“中华医学会第十四次全国心血管病学术会议”。

征文范围:冠心病及动脉粥样硬化的研究;高血压的研究;心律失常及心脏起搏电生理的研究;心肌病、心肌炎的研究;血管病流行病学研究;心力衰竭的研究;心血管病学相关基础研究及新技术研究;肺血管病研究;心血管病影像学研究;女性健康有关研究;血脂有关研究及临床;介入心脏病学研究;病例讨论及其他。

论文截止日期:2012年3月1日。

联系电话:010-85158515。

通信地址:中国北京东四西大街42号中华医学会。

大会网站:<http://www.cma.org.cn>。