

钉型水泥土搅拌桩加固软土路堤的数值分析

曹 洋¹, 郑林达²

(1. 浙江浙能天然气管网有限公司, 浙江 杭州 310051;

2. 浙江省能源集团有限公司, 浙江 杭州 310013)

摘 要: 为了研究路堤荷载下不同位置的钉型水泥土搅拌桩的工作机理, 采用有限元软件建立了群桩和单桩条件下的数值分析模型, 对钉型桩的桩身受荷模式, 桩体加固机理及稳定性贡献做了相关研究。结果表明: 路堤大部分的竖向荷载主要由路面下的钉型水泥土搅拌桩承担, 且由于桩体的扩大头结构, 能显著减小下部桩身所受轴力; 同时, 坡肩范围内的搅拌桩身剪力值和弯矩值显著大于其它位置桩, 桩身所受剪力及弯矩值随桩号增加, 大体上呈先增大后减小的趋势; 路堤荷载下, 单根搅拌桩通过减少桩身前后的土体位移, 改变路堤的塑性区分布及土体的位移模式, 起到一定的阻滑作用, 进而提高路堤的稳定性, 且当桩体位于 7#、8#、9# 位置时, 阻滑效果较好, 稳定性贡献最为显著。

关键词: 钉型桩; 复合地基; 数值分析; 受荷模式; 稳定性

中图分类号: U416.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)04-0217-06

Numerical Analysis of Soft Soil Embankment Strengthened by Cement Mixing Piles

CAO Yang¹, ZHENG Linda²

(1. Zhejiang Energy Natural Gas Pipeline Network Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310051, China;

2. Zhejiang Energy Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310013, China)

Abstract: At present, cement mixing piles have been widely used in soft foundation treatment of embankments. In order to investigate the working mechanism of nailed cement mixing piles at different locations under embankment load, the numerical analysis model under the condition of pile group and single pile is established by using finite element software, the related research on the pile body loading mode, pile reinforcement mechanism and stability contribution of the nail form pile has been made. The results show that most of the vertical load of the embankment is mainly carried by the nail-type cement mixing pile under the road surface, and the axial force of the lower pile body can be significantly reduced due to the enlarged head structure of the pile body. At the same time, the shearing force value and bending moment value of the mixing pile in the shoulder range are significantly larger than those in other positions. The shearing force and bending moment value of the pile body generally increase first and then decrease with the increase of the pile number. Under the embankment load, a single mixing pile can reduce the plastic zone distribution before and after the pile body, and change the plastic zone distribution of the embankment and the displacement mode of the soil, which can play a certain role in resisting slip, thus improve the stability of the embankment, and when the pile is located at 7#, 8#, and 9#, the slip resistance is better and the stability contribution is most significant.

Keywords: nail form pile; composite foundation; numerical analysis; load mode; stability

伴随着山区铁路建设如火如荼地进行, 产生了大量的软弱地基上的填方工程。由于软土抗剪强度

低、压缩性高、渗透性差等工程特性,在其上方填筑路堤时,不得不考虑路堤的工后沉降及路堤的稳定性问题^[1-2]。目前,处理软弱地基的主要方式是从中加入竖向加固体,与土体形成复合地基共同承担路堤荷载。而水泥土搅拌桩复合地基作为软基处理的一种有效形式,已在铁路、公路软弱地基加固中广泛使用^[3-5]。但是,到目前为止,设计人员对路堤荷载下水泥土搅拌桩复合地基的失稳破坏机理普遍认识不深,现行规范对其也没有较全面的把握,对路堤稳定性及桩体失稳破坏模式的研究仍严重滞后于工程实践^[6-8]。对此,国内外学者通过模型试验^[9-12]、数值分析^[13-14]、现场试验^[15-16]等手段对其做了大量研究。

Miyake 等^[9]通过离心机模型试验,得出了路堤荷载下水泥土搅拌桩桩体可能发生诸如弯曲破坏、整体滑动破坏、整体倾倒破坏和受压破坏多种破坏模式。Kitazume 等^[10-11]指出,水泥土搅拌桩桩体的强度以及外部荷载大小直接影响路堤的失稳破坏模式,当桩体强度较高时,桩体较易发生整体倾倒破坏,当桩体强度较低时,桩体更可能发生弯曲破坏。聂文峰等^[12]采用数值分析方法,发现路堤荷载下水泥土搅拌桩所受剪力值远小于其自身强度,桩体的剪切破坏较不容易发生,采用传统的极限平衡法将高估路堤稳定性。张振等^[13]通过水泥土搅拌桩桩承路堤缩尺模型试验,发现桩体的破坏模式与桩所在位置有较大关系,路面下的搅拌桩主要发生压剪破坏,而坡面下方的桩体更倾向于弯曲破坏模式。综上所述,目前对水泥土搅拌桩复合地基研究主要集中在桩体破坏模式及失稳机理的研究上,对单桩条件下水泥土搅拌桩的工作机理及其稳定性贡献尚缺乏较更深入的研究。

为此,本文以某高速路钉型水泥土搅拌桩复合地基支承的路堤为研究对象,采用 ABAQUS 数值分析软件建立了基于群桩及单桩条件下的三维路堤数值分析模型,探讨了路堤荷载下不同位置的钉型水泥土搅拌桩的工作机理,以期弄清各桩的稳定性贡献值大小以及找出复合地基的关键位置桩。

1 数值分析模型及参数

1.1 几何模型及边界条件

根据某高速路钉型水泥土搅拌桩试验段,借助 ABAQUS 软件建立了路堤的有限元模型,因路堤对称,为简化模型,仅取路堤右半部进行分析,路堤的计算剖面图如图 1 所示。其中钉型水泥土搅拌桩扩

大头桩径为 1 m,长为 4 m,下部桩桩径 0.5 m,长为 12.5 m,总桩长为 16.5 m,桩间距为 1.85 m,该断面上总共布置 14 根搅拌桩。设计路面宽度为 35 m,边坡比为 1: 1.5,路堤填筑高度为 4 m,通过生死单元来模拟其堆载过程。采用接触单元来模拟搅拌桩与土体之间的相互作用,且遵循库仑定律,其中钉型水泥土搅拌桩与淤泥质黏土的摩擦系数按当地经验取为 0.2。

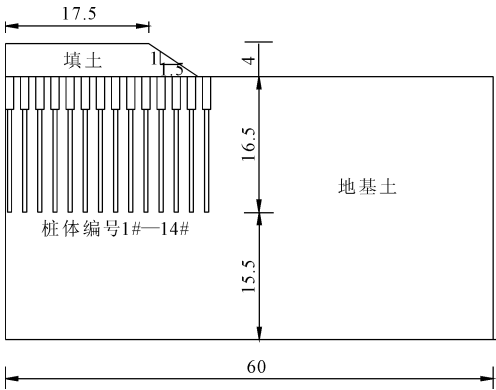


图 1 钉型水泥土搅拌桩路堤加固剖面图(单位:m)

1.2 计算模型及参数

地基土、填土采用摩尔-库仑弹塑性模型,典型的土层剖面如图 2 所示。同时为反映钉型水泥土搅拌桩的屈服破坏,亦采用摩尔库仑屈服准则。钉型桩、填土以及地基土的材料参数可根据该高速公路试验段的勘察报告或当地经验确定,相应的计算参数如表 1 所示。

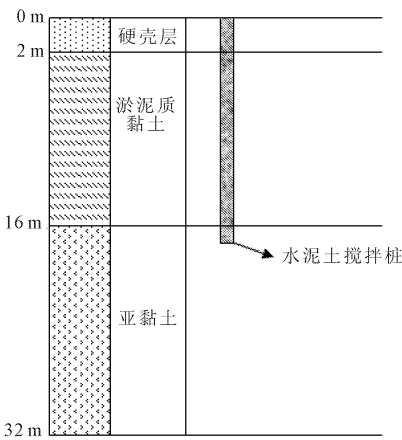
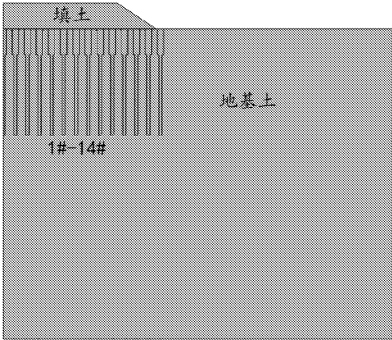


图 2 土层剖面图

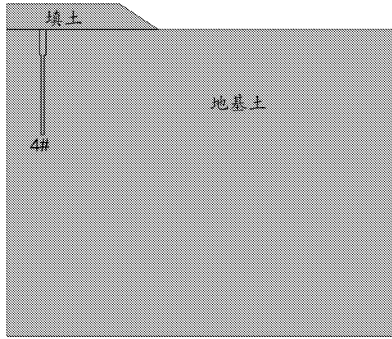
图 3 即为对应的有限元计算模型,同时,为进一步分析单桩条件下钉型水泥土搅拌桩的工作机理及稳定性贡献。在本文群桩路堤模型的基础上,取其其中的单根搅拌桩建立了 14 个单桩路堤模型,其具体计算参数,模型边界条件,接触模型等均与群桩条件下相同,其中部分有限元计算模型如图 3 所示。

表 1 模型计算参数

土层名称	层厚/m	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/kPa	摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	泊松比
填土	4	2.00	22700	30.0	15	0.30
硬壳层	2	1.94	4000	10.8	22	0.30
淤泥质黏土	14	1.75	1500	3.9	8	0.35
亚黏土	16	2.00	20000	25.0	78	0.28
钉型桩	—	2.10	150000	35.0	208	0.20



(a) 群桩条件下



(b) 单桩条件下4#桩

图 3 有限元计算模型

2 计算结果分析

2.1 群桩条件下桩身轴力分析

图 4 为路堤荷载下典型桩桩身轴力曲线图,其中 2#、6#、10#桩位于路面正下位置,12#桩位于路堤边坡位置。由图 4 可知,路面下的 2#、6#、10#桩桩身轴力分布规律相似,轴力值相差不大,其中位于路堤正中位置的 2#桩轴力值最大,6#桩次之,较靠近路堤坡肩的 10#桩轴力值最小。而路堤边坡位置的 12#桩,桩身轴力值明显小于路面下的 2#、6#、10#桩,轴力值约为 2#桩二分之一。表明钉型水泥土搅拌桩复合地基,其路堤的大部分竖向荷载主要由路面范围内的桩体承担。

同时,由曲线可知,4 根钉型水泥土搅拌桩在扩大头与下部桩交界位置即桩身 4 m 处轴力值产生突变,为更好地揭示钉型水泥土搅拌桩桩土作用规律,

特绘制出 2#、12#桩的桩身轴力增量图如图 5 所示。由图 5 可知,2#、12#桩桩身轴力变化规律基本相似,在两桩的扩大头部分,均产生正的轴力增量,表明此时桩间土的沉降量大于桩的沉降量,产生向下的摩阻力,桩身轴力值增大;而在桩体扩大头与下部桩交界处,轴力值急剧变化,主要原因为扩大头下部的桩周土对桩体的支撑作用,使该处桩身轴力值迅速减小。另外,由于该处土体的支承作用,引起下部桩的土体相对桩体下沉,从而对桩产生向下的摩阻力,致使桩身轴力值增大,但变化幅度较小。最后,两桩在桩身 13 m 位置时,此时桩体压缩量大于桩周土,产生向上的摩阻力,桩身轴力值缓缓减小。可见,由于钉型水泥土搅拌桩的扩大头结构,使二者交界处桩身轴力急剧变化,有效地减小了下部桩的桩身轴力值。一定程度上减少了下卧层土体的压缩沉降,同时也降低了下部桩压坏的可能性。

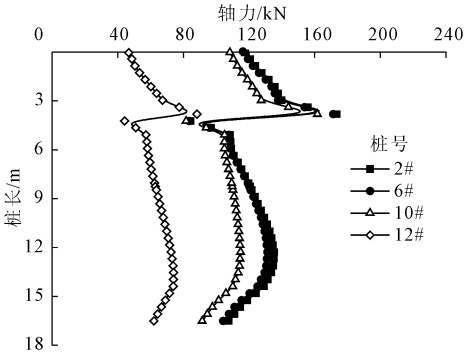


图 4 典型桩桩身轴力曲线

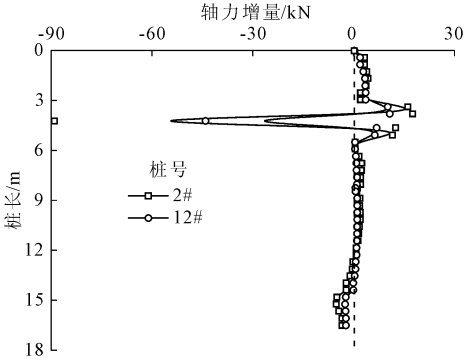


图 5 典型桩桩身轴力增量曲线

2.2 群桩条件下桩身弯矩剪力分析

图 6 为路堤堆载结束后典型桩对应的剪力曲线

图。由图 6 可知,位于坡肩附近 10#、12#桩的剪力值最大,在桩顶产生最大剪力值 9 kN,坡脚处的 14#桩身剪力值相比略有降低,总体上,桩身剪力值随桩号增加呈现先增大后减小的趋势。另外,在桩身扩大头范围内,桩身剪力值均较大,而在扩大头与下部桩的交界位置,桩身剪力值急剧减小,下部桩的桩身剪力值基本为零。表明钉型水泥土搅拌桩复合地基,坡肩及外侧的桩体承担了较大的水平荷载,桩身扩大头部分通过发挥较大的抗剪作用来增加路堤的稳定性。

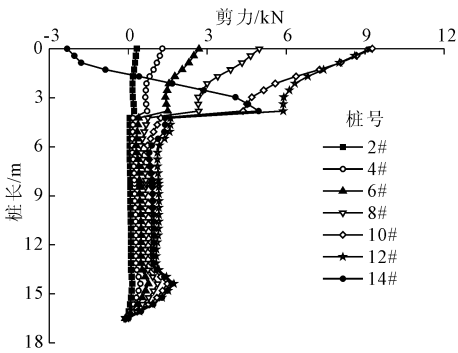


图 6 典型桩桩身剪力

图 7 为路堤堆载结束后各桩的桩身弯矩曲线图。由图 7 可知,最大弯矩值出现在坡肩附近的 10#桩,其在桩顶位置产生最大弯矩值 16 kN · m,该桩附近的 8#、12#桩弯矩值也较大,坡脚位置的 14#桩桩身弯矩较 12#桩明显降低。而位于路堤内部的 2#、4#、6#桩身弯矩值总体上较低,除在桩身扩大头

与下部桩交界处产生较大的弯矩值外,桩身基本不受弯。可见,路堤荷载下钉型水泥土搅拌桩随着桩号增加,桩身弯矩值亦呈先增大后减小的趋势,同时在坡肩范围内桩身弯矩达到最大值。另外,从曲线的整体分布规律来看,钉型水泥土搅拌桩主要在扩大头部分承担较大的弯矩,下部桩的桩身基本不受弯。表明坡肩处的钉型搅拌桩扩大头部分通过发挥较大的抗弯作用来起到较好的阻滑效果,另外桩身承担弯矩较大,可能最先达到搅拌桩的抗弯强度而发生弯曲破坏。

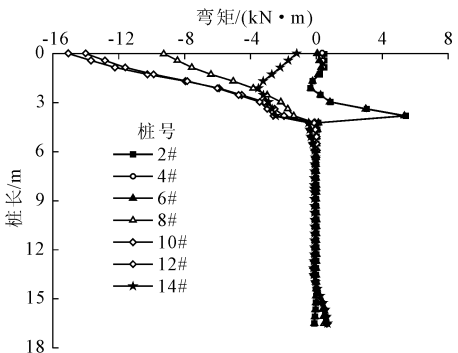


图 7 典型桩桩身弯矩

2.3 单桩工作机理分析

为进一步弄清不同位置的钉型搅拌桩的工作机理,准确评价单桩的加固效果,图 8 给出了路堤无桩条件下、典型桩加固下的路堤等效塑性应变等值云图。

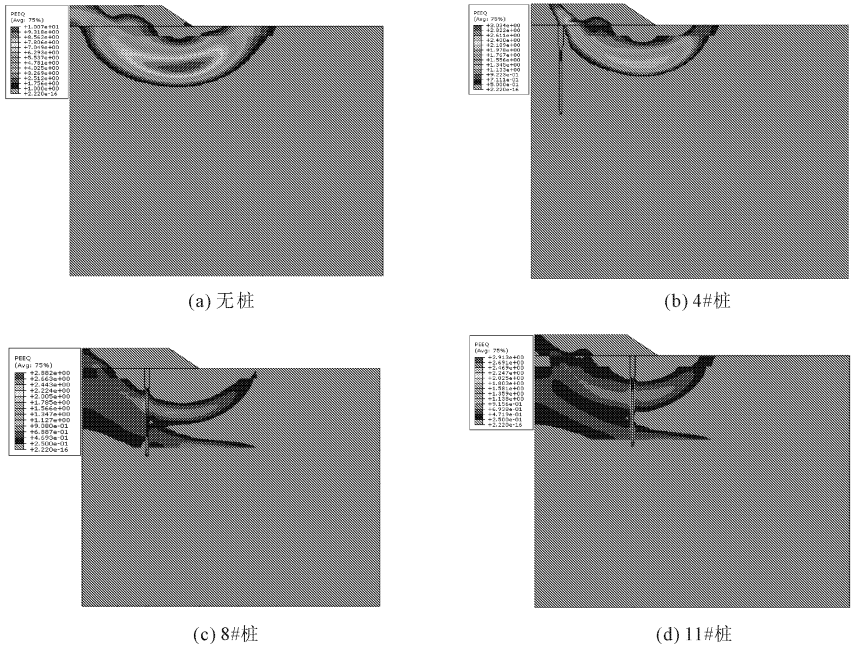


图 8 路堤等效塑性应变等值云图

由图 8(a)可知,在天然路堤条件下,路堤沿路面中心位置及较深的软土层中形成一贯通的滑裂

面,并在路堤的坡脚出露。并且软土层中较大范围土体进入塑性屈服状态。图 8(b)、图 8(c)、图 8

(d)为桩体分别在4#、8#、11#位置时对路堤进行加固后的路堤等效塑性应变等值云图。从图8(b)可知,地基经4#桩加固后,其潜在的滑裂面规模明显减小,原天然地基条件下潜在滑裂面交于路堤中心,经其加固后,滑裂面往路堤外侧发展,且下覆土体塑性区域明显缩小。图8(c)为8#桩加固后路堤等效塑性应变等值云图,由图可知,由于8#桩的存在,使其加固处土体的塑性区域向四周分散,不似图8(a)在天然地基条件下出现塑性区集中,同时也有效地阻断了滑裂面的形成,使其向更深处的土层发展。当钉型搅拌桩位于11#桩位置,其与8#桩类似,亦使加固处集中的土体塑性区向四周分散,所不同的是,其桩前与桩后仍有较大范围的土体塑性区,加固效果略弱于8#桩。

图9分别为路堤经4#、8#、11#桩加固后的桩土位移矢量图。由图9可知,当桩体位于4#位置时,其对桩后土体起到了一定的阻挡作用,土体水平位移减小,但对桩前的土体作用效果并不好,土体产生较大的滑移并从路堤的坡脚隆起。当桩在8#位置时,此时由于桩对土体的阻挡作用,显著减小了桩后及桩前土体的水平位移,并使土体的滑移方向向更深的土层发展,起到了较好的阻滑效果。而当桩体在11#位置时,由于桩体的加固位置过于靠后,此时桩后土体已产生较大的滑移,桩体虽对滑动土体起到抗滑作用,但效果甚微,路堤仍产生明显的滑移趋势。

2.4 路堤关键位置桩

由上文可知,桩体的加固位置影响着路堤塑性区发展模式、改变地基土体的滑移规律进而提高路堤的稳定性。对此,根据有限元强度折减法,求得了桩位于不同位置加固下的路堤安全系数值如图10所示。由图10可知,单桩条件下,桩体位于7#、8#、9#位置时,对路堤的安全性提升最为明显,加固效果最为显著。其余桩对路堤稳定贡献值差别不大,其安全系数值在1.45左右波动。可见7#、8#、9#位置桩为路堤的关键位置桩,在工程中可通过对该位置桩体的加强,提高钉型水泥土搅拌桩复合地基的整体抗滑效果,进而提高路堤稳定性。

3 结 论

(1) 路面范围内的钉型搅拌桩承担主要的路堤竖向荷载,由于钉型桩的扩大头结构,使桩土间的相互作用变得较为复杂,扩大头下部的桩周土能提供一个较大的支持力显著减小下部桩身轴力,从而一定程度降低下卧持力层的沉降量。

(2) 路堤荷载下,桩身剪力值和弯矩值随桩号

增加大体上呈先增大后减小的趋势,其中以坡肩范围内的搅拌桩桩身剪力值和弯矩值最大,且其主要是通过桩身扩大头部分发挥抗剪、抗弯作用来起到抗滑效果。

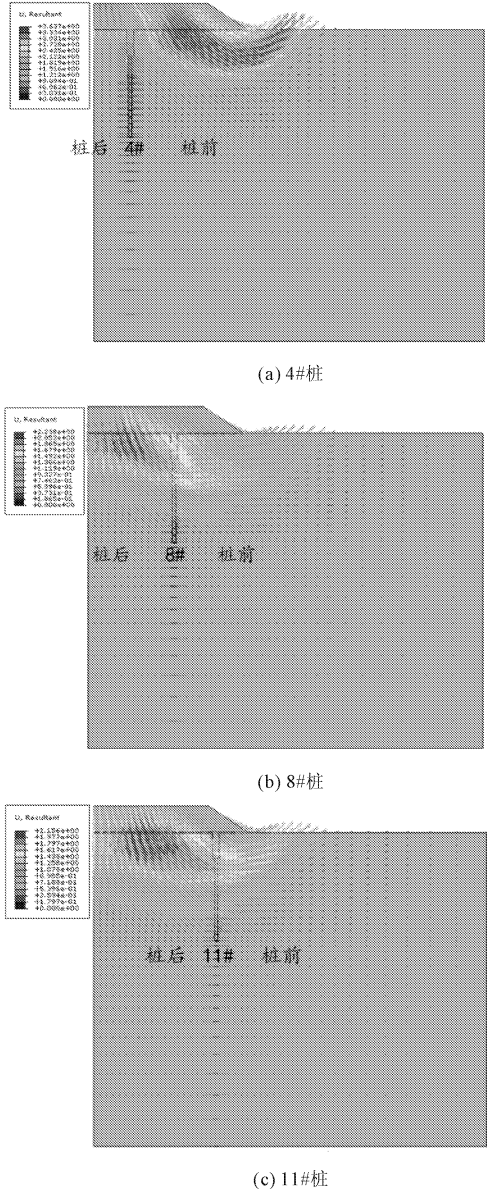


图9 单桩加固后桩土位移矢量图

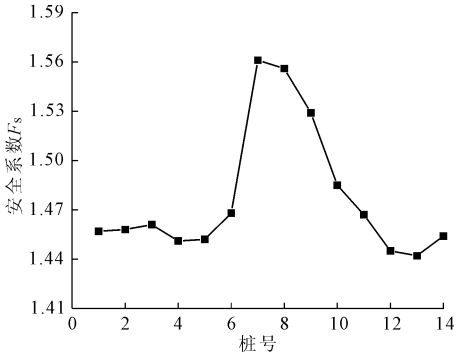


图10 单桩加固后路堤安全系数值

(3) 路堤荷载下,桩体是通过减少桩前及桩后的土体位移,改变路堤的等效塑性区分布,一定程度上阻断了潜在滑裂面的形成及贯通,进而提高路堤稳定性。

参考文献:

[1] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用[J]. 岩土工程学报,2007,29(1):1-13.

[2] 郑刚,龚晓南,谢永利,等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(2):127-146.

[3] 韦应彬,周彬,崇天阳,等. 水泥土搅拌桩复合地基在软基处理中的应用[J]. 施工技术,2017,46(S1):40-43.

[4] 崔新壮,龚晓南,李术才,等. 盐水环境下水泥土桩劣化效应及其对道路复合地基沉降的影响[J]. 中国公路学报,2015,28(5):66-76,86.

[5] 阮剑锋. 水泥搅拌桩在软基处理中的应用[J]. 公路,2015,60(6):55-56.

[6] 王勇,蔡智,屈洋,等. CFG 桩复合地基加筋褥垫层作用机理数值分析[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(1):96-100.

[7] 陈刚,洪宝宁,徐奋强. 软土路堤柔性桩复合地基工作机理研究[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(6):45-49.

[8] 杨才,丰土根,杨景森. 高填路堤稳定性影响因素研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(3):23-27.

[9] Miyake M, Akamoto H, Wada M. Deformation characteristics of ground improved by a group of treated soil[R]. Centrifuge 91. Rotterdam;Balkema,1991:295-302.

[10] Kitazume M, Maruyama K. Collapse failure of group column type deep mixing improved ground under embankment[C]//Procceing of the International Conference on Deep Mixing,ASCE,2005:245-254.

[11] Kitazume M, Okano K, Miyajima S. Centrifuge model tests on failure envelope of column type deep mixing method improved ground[J]. Soils and Foundations, 2000,40(4):43-55.

[12] 聂文峰,邱邵富,张蕊,等. 路堤荷载下水泥土搅拌桩复合地基失稳机理及其稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(4):47-51.

[13] 张振. 水泥搅拌桩承载路堤失稳破坏模型试验和三维数值分析[C]//中国地质学会. 2018 年全国工程地质学术年会论文集. 中国地质学会:《工程地质学报》编辑部,2018:6.

[14] 陈页开,艾建文,周捡平,等. 土工格栅和水泥搅拌桩加固软基数值分析研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2017,42(4):1422-1430.

[15] 杨华. 公路路堤下水泥搅拌桩桩土应力比的研究[J]. 建材与装饰,2018(32):282.

[16] 王驰,徐永福,庞建国,等. 路堤荷载下砂芯水泥土搅拌桩复合地基现场试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(5):974-979.