

土工织物散体桩加固粉土路基机理研究^①

张京京^{1,2}, 孙立强^{1,2}, 闫澍旺^{1,2}

(1.天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072; 2.天津大学建筑工程学院,天津 300072)

摘要:泗许高速公路地处淮北平原,该地区以粉土或粉细砂为主,在地震荷载作用下易于液化,公路建设应考虑抗液化措施。本文对土工织物散体桩的抗液化性能、复合地基承载力等进行研究,提出采用土工织物散体桩复合地基加固粉土路基的方法并对其加固机理进行分析。通过有限差分数值计算和现场试验两种方法,从超孔隙水压消散、承载力、桩土应力比、桩身应力等角度分析了土工织物散体桩加固粉土路基的加固机理,并提出土工织物散体桩优化设计的建议。

关键词: 粉土; 土工织物散体桩; 加固机理; 孔隙水压; 桩土应力比

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0892-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0892

Research on Reinforcement Mechanism of Silt Embankment Using Geotextile Discrete Material Pile

ZHANG Jing-jing^{1,2}, SUN Li-qiang^{1,2}, YAN Shu-wang^{1,2}

(1.MOE Key Laboratory of Simulation of Water Conservancy Projects and Security, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2.Institute of Architecture & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Sixu expressway is located in the Huaibei Plain, which is covered by silt or silty sand. However, because this type of soil is prone to liquefaction under seismic loading, liquefaction resistance measures should be considered when engineering projects are planned for this region. The liquefaction resistance of a geotextile discrete material pile and the bearing capacity of a composite foundation are examined in this study. In addition, the reinforcement mechanism of the geotextile discrete material pile with a silt subgrade is determined. The pore water pressure dissipation, bearing capacity of the composite foundation, pile-soil stress ratio, and pile body stress were researched by using the finite difference method and field testing, which is beneficial for obtaining the reinforcement mechanism of the composite foundation. Moreover, this paper presents design proposals of a geotextile discrete material pile. The results indicate that under seismic loading, a geotextile discrete material pile can effectively drain and successfully achieve anti-liquefaction. The excess pore pressure ratio increases with distance from the pile axis, and the silt becomes more inclined to liquefaction. An engineering example is used with numerical calculation to determine that effective pile spacing is 2 m, or approximately 3.3 times the pile diameter. Further, in the silt foundation, the bearing capacity of the single geotextile discrete material pile is 50% larger than that of gravel pile under the same conditions, and the composite foundation bearing capacity of the geotextile discrete material pile is 25% more than that of gravel pile. In static load testing of the com-

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(13JCZDJC35300); 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助课题(20130032120053)

作者简介: 张京京(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事软土地基处理方面的研究. E-mail: zhangjj0305@163.com

通讯作者: 孙立强(1979—), 男, 山东青岛人, 副教授, 从事软土地基处理及海洋土力学研究. E-mail: slq0532@126.com

posite foundation, soil pressure boxes are respectively buried at the top of the pile, at the bearing plate, and at the contact surface of the pile and soil to determine the bearing capacity of the pile and soil under the action of static load. In the two types of composite foundations, the pile-soil stress ratio increases with an increase in the upper load. This change in the geotextile discrete material pile is more prominent because geotextiles have additional lateral restraint effects on pile bodies. When the composite foundation is under a large load, the deformation of the pile is less than that of the soil; thus, a change occurs in the pile-soil stress ratio. Moreover, geotextiles have obvious reinforcement effects for the gravel pile, although damage is possible when excessive tension is placed on the ring. When the soil cannot provide adequate lateral pressure, lateral displacement of pile body is easily produced, and damage by ballooning can occur. The pile body stress test shows that maximum stress appears at four times the pile diameter range, which proves that the design of geotextile discrete material pile based on ballooning damage is reasonable. Hence in order to avoid damage on the top of the pile, it is necessary to reasonably select the geotextile material in consideration of the pile bearing conditions or to assume reinforcement measure in the area of pile body stress concentration.

Key words: silt; geotextile discrete material pile; reinforcement mechanism; pore water pressure; pile-soil stress ratio

0 引言

泗许高速公路地处淮北平原,安徽段全长 123 km,其东西向横贯苏、皖、豫三省,串联多条南北向国家高速公路,对区域路网起着加密、补充和完善的作用。该工程沿线地质以粉土或粉细砂为主,粉土厚度较大、塑性指数较小、渗透系数高、粒径均匀、毛细管发育、水稳性差、压实度难控制且地下水位较高,在地震荷载作用下容易发生液化,拟采用桩基础来解决地基承载力和液化问题。由于公路行业《公路工程抗震设计规范》(JTJ044—89)未明确给出粉土液化深度的鉴别方法,而且该项目粉土土层很厚,使桩的设计和地基处理方案的选取具有较大的盲目性。本文对土工织物散体桩的抗液化性能、加固承载力进行研究,提出土工织物散体桩加固粉土路基的机理,证明采用土工织物散体桩作为泗许高速公路路基处理方案的可行性,并对桩体的设计提出优化建议。

1 土工织物散体桩施工工艺

土工织物散体桩施工见图 1,施工工艺流程见图 2。为准确控制桩孔深度,桩机就位须保持平衡、不发生倾斜和位移,沉管与地面保持垂直,垂直度偏差 不大于 1%。

套内筒和土工织物时,先把内筒套入土工织物中,土工织物开口的一端用细铁丝捆绑在内筒的喇叭口下部,在拔掉内筒时土工织物可以脱落。



图 1 土工织物散体桩施工
Fig.1 Construction of the discrete material pile

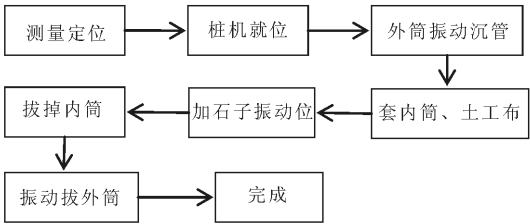


图 2 施工工艺流程
Fig.2 Construction technology process

石子方量的计算:根据放样的原地面标高和施工图设计的桩顶标高以及打桩深度、外筒直径计算出所需方量,按照方量加入石子。另加入石子高度应比桩顶标高高出 20~30 cm。

桩基底标高原则上是以桩尖设计标高进行控制,但在沉桩的过程中,当钢套管在连续振动锤击 30 分钟下沉量合计小于 5 cm 时即可停锤。当施工结束后,应检查桩顶标高、桩位、桩体质量和地基承载力。

2 抗震液化排水机理

2.1 孔隙水压消散的解析解

1985 年徐志英采用数学方法,求得了只考虑碎石桩径向排水作用下孔隙水压力在地震期的解析解。后期研究表明,排水桩不仅具有径向排水的作用,其竖向排水作用也不容忽视^[1]。1992 年在原来研究的基础上,他进行了更加深入的分析,考虑地震期孔隙水压扩散和消散过程,排水桩的径向和竖向同时排水作用下地震期孔隙水压力的一般解析解^[2]。2011 年王武刚认为碎石桩的排水作用需要一定的时间才能完成,因此地震引起的超孔隙水压力不可能立刻排出,故在现有理论的基础上考虑碎石桩等排水系统的排水能力,推导出孔隙水压力的解析解公式^[3]。文中王武刚对其解析解进行了量化,表明碎石桩渗透性和桩间土渗透性之间的关系不容忽视,其比值越大,消散地震引起超孔隙水压力的能力就越大。由于土工织物散体桩的渗透性较好,在地震荷载作用下有利于超孔隙水压力的消散。

2.2 孔隙水压消散的数值解

何剑平用有限差分软件验证了碎石桩的抗液化能力,并提出桩间距在 3 倍桩径左右抑制桩间土液化的作用最大,并指出碎石桩复合地基不仅具有排水作用,还兼备减震功能^[4]。

本文基于泗许高速公路地质条件建立有限差分模型,分析单桩在八级地震荷载作用下的孔隙水压力消散情况,并以此确定合理的桩间距。在 XYZ 方向分别建立 40 m×20 m×15 m 的模型,桩径 0.6 m,并将圆形桩简化为边长 0.5 m 的正方形桩。本构模型采用 Mohr-Coulomb,土性参数见表 1,土工织物散体桩参数见表 2。

表 1 粉土物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical index of silty soil					
$\omega/\%$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	G_s	e	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
16	18.04	2.68	0.89	8.267	38.65

表 2 土工织物散体桩模型计算参数

Table 2 Numerical calculation parameters of the pile model

G/MPa	K/MPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\kappa/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	n	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
75.8	227.4	2 100	3.0e-1	0.4	1	35

本文用超孔压比判别粉土的液化,当超孔压比达到 1 时认为粉土完全液化。用于液化分析监测点位置见图 3,具体坐标见表 3。由图 4 监测点超孔压比可知,距离桩轴心越远,超孔压比越大,越接近液化。超孔压比在距离桩轴 2 m 范围内小于 0.3,距离桩轴 4 m 时达到 0.8,接近液化。按数值计算结果将桩间距确定为 2 m,约为 3.3 倍桩径,并以此作为试桩间距。

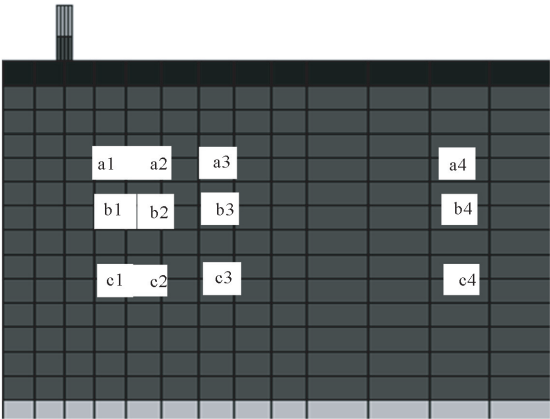


图 3 监测点位置示意图

Fig.3 Monitoring points location

表 3 监测点坐标

Table 3 Monitoring points coordinates

监测点名称	监测点坐标(x, y, z)/m	监测编号
a1	(1,0.1,-3)	639
a2	(2,0.1,-3)	643
a3	(4,0.1,-3)	651
a4	(12,0.1,-3)	663
b1	(1,0.1,-5)	1 639
b2	(2,0.1,-5)	1 643
b3	(4,0.1,-5)	1 651
b4	(12,0.1,-5)	1 663
c1	(1,0.1,-8)	2 639
c2	(2,0.1,-8)	2 643
c3	(4,0.1,-8)	2 651
c4	(12,0.1,-8)	2 663

3 复合地基加固机理

3.1 实验方案

为研究土工织物在碎石桩中的作用以及桩身强度,在施工现场进行碎石桩与土工织物散体桩的试桩试验。试验桩布置见图 5。其中 1#~10#为土工织物散体桩,11#~20#为碎石桩。试验方案见表 4。

在 6#、15# 桩的侧、顶部均埋放土压力盒，检测基桩承载力时的应力分布状态。单桩破坏静载试验的终止加载条件为沉降达到桩直径的 0.06 倍，单桩

复合地基静载试验的终止加载条件为沉降达到承载板边长的 0.06 倍。

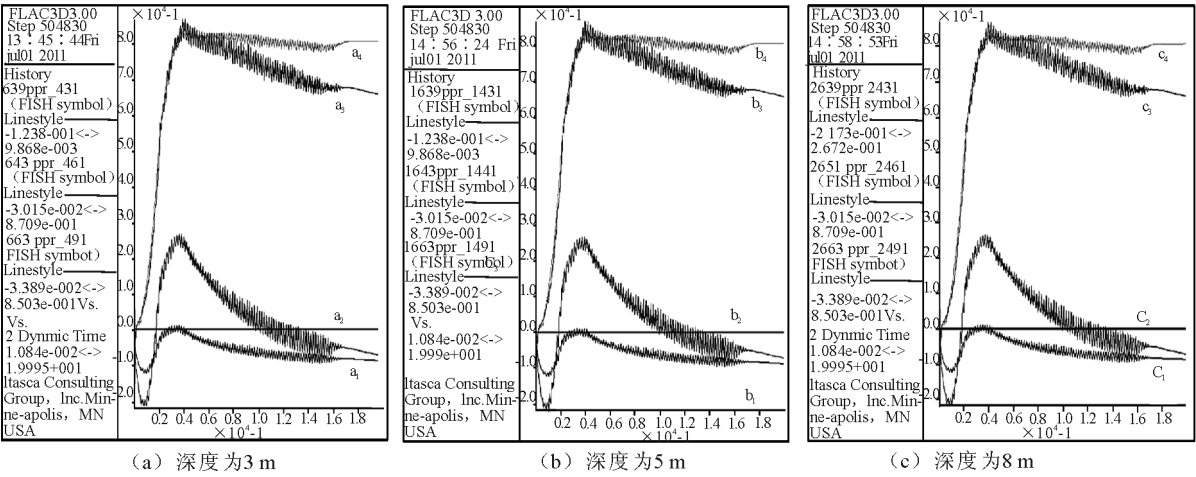


图 4 监测点超孔压比

Fig.4 Excess pore pressure ratio of the monitoring points

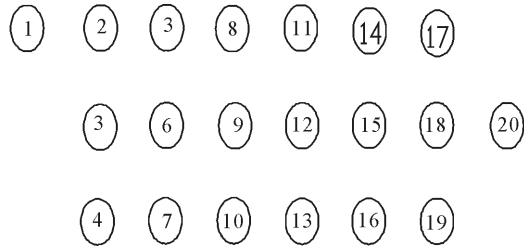


图 5 试验桩布置图

Fig.5 Arrangement test piles

表 4 试验方案

Table 4 Testing program	
试验方案	试桩编号
单桩破坏静载试验	1#, 20#
单桩复合地基静载试验	6#, 15#

3.2 试验结果

3.2.1 单桩破坏静载试验分析

表 5 为单桩静载试验结果，当碎石桩加载到 150 kN 时沉降超过终止加载条件 $600 \times 0.06 = 36$ mm，停止加压。取上一级荷载 100 kN 确定碎石桩单桩破坏承载力，为 353.9 kPa。

土工织物散体桩加载到 200 kN 时，沉降超过终止加载条件 36 mm，停止加压。取上一级荷载 150 kN 确定土工织物散体桩单桩破坏承载力，为 530.8 kPa。

由单桩静载试验可知，在相同条件下土工织物散体桩的单桩破坏承载力高于碎石桩，在本文工程背景下土工织物使碎石桩的单桩承载力增加 50%。

表 5 碎石桩和土工织物散体桩单桩破坏静载试验

Table 5 Static load test of single pile damage of gravel pile and geotextile discrete material pile							
单桩类型	序号	油压表 读数	荷载/kN	历时/min		沉降/mm	
				本级	累计	本级	累计
碎石桩	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	1	3	100	90	90	10.8	10.8
	2	4.5	150	90	180	36.2	47
土工织 物散 体桩	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	1	3	100	90	90	4.9	4.9
	2	4.5	150	90	180	13.47	18.37
	3	5.4	200	90	270	23.05	41.42

表 6 碎石桩和土工织物散体桩单桩复合地基静载试验

Table 6 The static load test of composite foundation of gravel pile and geotextile discrete material pile						
单桩类型	序号	荷载/kN	历时/min		沉降/mm	
			本级	累计	本级	累计
碎石桩	0	0	0	0	0.00	0.00
	1	200	90	90	7.16	7.16
	2	300	90	180	12.51	19.67
	3	400	90	270	19.53	39.20
	4	500	90	360	38.46	77.66
土工织物散体桩	0	0	0	0	0.00	0.00
	1	200	90	90	5.89	5.89
	2	300	90	180	8.41	14.30
	3	400	90	270	20.73	35.03
	4	500	90	360	26.48	61.51
	5	600	90	450	16.57	78.08

3.2.2 单桩复合地基静载试验分析

图 6 和表 6 为单桩复合地基承载力静载试验结果，当碎石桩单桩加载到 500 kN 时沉降超过承载

板边长 0.06 倍即 77.66 mm,取上一级 400 kN 为该复合地基的极限承载力,碎石桩复合地基极限承载力 277.8 kPa。

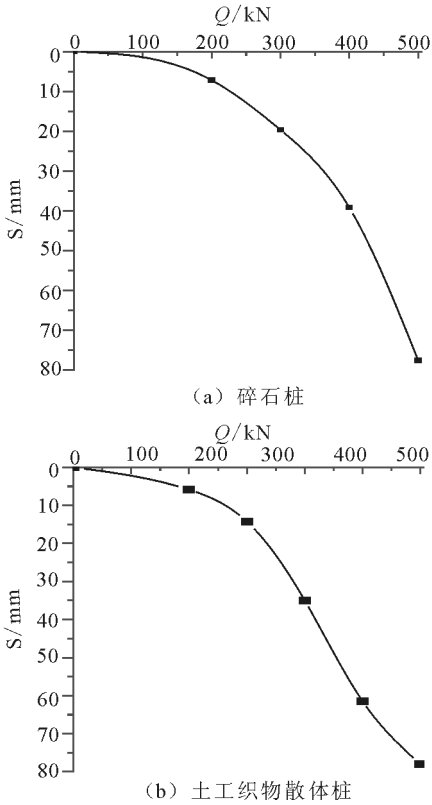


图 6 单桩复合地基沉降曲线

Fig.6 Composite foundation settlement curve of gravel pile and geotextile discrete material pile

图 7 和表 7 为单桩复合地基承载力静载试验结果,当土工织物散体桩单桩加载到 600 kN 时沉降超过承载板边长 0.06 倍即 72 mm,取上一级 500 kN 为该复合地基的极限承载力,即土工织物散体桩复合地基的极限承载力 347.2 kPa。

表 7 碎石桩和土工织物散体桩土压力盒测试数据
Table 7 Soil pressure box test data of gravel pile and geotextile discrete material pile

单桩类型	静荷载/kN	桩顶/kPa	桩边/kPa	桩土应力比
碎石桩	200	472.5	73.9	6.39
	300	621.5	95.0	6.54
	400	841.5	128.1	6.57
	500	1 041.5	148.9	7.00
土工织物散体桩	200	369.5	70.7	5.23
	300	7.56	79.1	7.65
	400	956.9	94.2	10.16
	500	1 131.9	96.8	11.69
	600	1 388.9	96.9	14.33

本文试验表明,土工织物散体桩复合地基极限承载力高于碎石桩复合地基,土工织物使复合地基

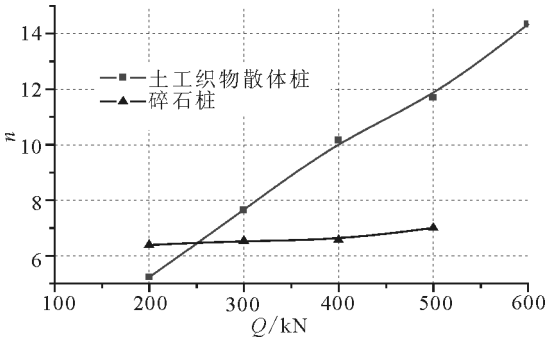


Fig.7 Pile-soil stress ratio

承载力提高 25%。单桩破坏静载试验和单桩复合地基静载试验表明,在某一确定地质条件下土工织物对碎石桩有明显的加筋作用,可以显著提高单桩以及复合地基的承载力。

3.2.3 复合地基桩土应力比分析

进行单桩复合地基静载试验时,分别在桩顶、承载板与地基土的接触面放置土压力盒,以测定在静载作用下桩与土的承载情况,数据记录见表 7。桩土应力比是复合地基中桩所承担的应力与土所承担应力的比值,是用于衡量桩土相互作用的参数之一。由图 7 桩土应力比可知,在两种复合地基形式下桩土应力比均随着上部荷载的增加增大,但是增长幅值差异较大。在碎石桩复合地基中,上部荷载由 200 kN 增加到 500 kN 时桩土应力比变化较小,由 6.39 增至 7.0;而在土工织物散体桩复合地基中,桩土应力比由 5.23 增加到 11.69。

两种复合地基下桩土应力比的分布差异显著,随着荷载的增大,土工织物散体桩复合地基的桩土应力比显著增大,说明该桩比碎石桩的刚度大。这也说明土工织物对桩身有侧向约束作用,当复合地基承受较大荷载时桩的变形小于土的变形量,从而引起桩土应力比的变化。

3.2.4 土工织物散体桩桩身应力分析

复合地基的破坏形式主要分为鼓胀破坏、刺入破坏、剪切破坏、整体滑动破坏。而现有的理论主要是基于鼓胀破坏展开的^[5-7],认为桩周土体不能提供足够的侧向围压,使得桩身易产生较大的侧向变形,产生鼓胀破坏。为了研究桩的破坏形式,提出桩的优化设计方案,本文监测了土工织物散体桩在静应力作用下的桩身应力分布情况。

由图 8 土工织物散体桩桩身应力曲线及表 8 可知,土工织物散体桩随着静荷载的增大,桩身应力自桩顶向下延伸,桩身应力最大值出现在 4 倍桩径深

度处。为避免桩身破坏,在土工织物散体桩设计时可适当考虑桩顶的加固方案,提高地基加固效果。本文桩身应力的研究也证明了以鼓胀破坏形式作为土工织物散体桩设计的合理性。

表 8 土工织物散体桩桩身应力/kPa

Table 8 Pile body stress of geotextile discrete material pile / kPa

H/m	静荷载		
	100 kN	200 kN	300 kN
0.4	68	80.4	146.5
1.1	127.5	155	260
1.8	22.5	168	367
2.3	12.5	62.5	88.5
5.0	10.0	38.5	50.5
15.0	9.0	11.0	26.0

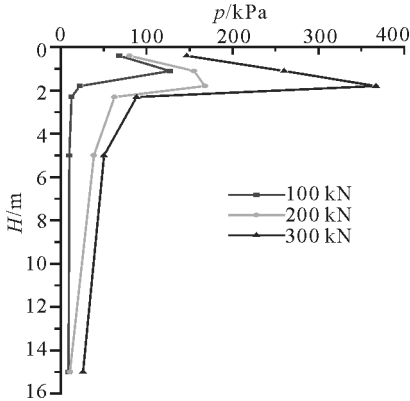


图 8 土工织物散体桩桩身应力曲线

Fig.8 Pile body stress curves of geotextile discrete material pile

4 结论与建议

通过分析地震荷载作用下桩周孔隙水压力的变化规律,揭示了土工织物散体桩的抗液化机理;现场试桩试验则表明土工织物散体桩提高承载力的机理。本文研究结果表明:

(1) 在地震荷载作用下土工织物散体桩能够有效排水,起到抗液化的目的。距离桩轴心越远,超孔压比越大,越接近液化。由数值计算结果,将工程实例土工织物散体桩桩间距确定为 2 m,约为 3.3 倍桩径。

(2) 在粉土软基处理时,土工织物散体桩的单桩承载力比相同条件下的碎石桩承载力提高 50%,土工织物散体桩复合地基承载力比相同条件下的碎石桩复合地基承载力提高 25%。

(3) 土工织物对碎石桩身强度有加筋作用,但是当土工织物承受的环向拉力过大时亦可能产生破坏。桩身应力试验表明,最大应力出现在 4 倍桩径范围内,因此为了避免桩顶的破坏,有必要结合桩身的承载情况合理选择土工织物的材质,或在桩身应力集中区采取一定的加固措施。

参考文献(References)

[1] XU Zhi-ying.Selected Works of Geotechnical Engineering [C]. Beijing:China Building Industry Press,1985.

[2] 徐志英.用砾石排水桩抗地震液化的砂基孔压计算[J].地震工程与工程振动,1992,12(4):88-92.

XU Zhi-ying.Pore Pressure Calculation of Anti-liquefaction of Sand Foundation by Gravel Pile[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,1992,12(4):88-92.(in Chinese)

[3] 王武刚,闫澍旺,刘润,等.考虑碎石桩排水能力复合地基中孔压长消解析解[J].西北地震学报,2011,33(增刊):89-93.

WANG Wu-gang, YAN Shu-wang, LIU Run, et al. Analytic Solution of Pore Pressure of Liquefiable Composite Foundation Considering Drainage Capacity of Gravel Drains [J].North-western Seismological Journal,2011,(S1):89-93.(in Chinese)

[4] 何剑平,陈卫忠.桩-土复合地基抗液化数值试验分析[J].工程力学,2012,29(11):175-182,190.

HE Jian-ping, CHEN Wei-zhong. The Numerical Experiments and Analysis on Anti-liquefaction Effect of Pile-soil Composite Foundation [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (11): 175-182,190.(in Chinese)

[5] 赵明华,张玲,刘敦平.散体材料桩复合地基桩土应力比分析[J].中南大学学报:自然科学版,2007,38(3):555-560.

ZHAO Ming-hua, ZHANG Ling, LIU Dun-ping. Bearing Capacity Calculating Method of Discrete Material Pile Composite Foundation[J].J Cent South Univ: Science and Technology, 2007,38(3):555-560.(in Chinese)

[6] 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 Min-hua, DENG Yue-bao, YANG Ming-hui. Calculation and Model Test for Pile-soil Stress Ratio of Gravel Pile Composite[J].Foundation Under Embankment Load,2009,30(9):2623-2628.(in Chinese)

[7] 马海龙,陈云敏.水泥土桩桩土应力分担及曲线形式研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2):4112-4119.

MA Hai-long, CHEN Yun-min. Study on Stress Distribution and Curve Styles of Cement-soil Piles Composite Ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25 (S2):4112-4119.(in Chinese)