

大功率振冲碎石桩在复合地基中的应用与分析

张启^{1*}, 杨天春², 彭占良¹, 冯科明¹

(1.北京城建勘测设计研究院有限责任公司,北京 100101;
2.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:介绍了振冲碎石桩的原理和施工工艺并结合工程实例,设定合理的桩长、桩径、桩距,通过试验桩成果确定主要施工参数,并对设计进行优化.最后通过复合地基载荷试验和标准贯入试验分析可知,该方法能有效处理地基液化,并提高地基承载力,具有一定的应用价值.

关键词:碎石桩;载荷试验;标准贯入;液化

中图分类号:TU745.3

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2018)02-0061-07

Application and Analysis of Composite Foundation High-Power Vibro-Replacement Gravel Plie Composite Foundation

Zhang Qi¹, Yang Tianchun², Peng Zhanliang¹, Feng Keming¹

(1. Beijing Urban Exploration & Surveying Design Institute Co. Ltd., Beijing 100101, China;

2. College of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: This paper briefly introduces the principle and construction technology of vibro-replacement gravel pile. Based on the actual example in the project, it sets some reasonable pile length, diameter pile, and pile spacing. The main construction parameters are determined by the test pile. it also optimizes the design. Finally, based on the composite foundation load test and standard penetration test analysis, it finds that the method can deal with the liquefaction of the foundation effectively, and improve the bearing capacity of the foundation, which has certain application value.

Keywords: gravel pile; load test; standard penetration; liquidation

近年来,我国经济快速发展,基础建设飞速提升,而与建设工程密切相关的地质体呈现多样性,遇到的实际问题极其复杂,地基液化是建筑物在地震荷载作用下安全度降低的重要威胁之一^[1].1936年,德国学者 S.Steerman 首次提出振动和水冲加固土体的方法,后来演变成振冲密实和振冲置换 2 个分支^[2].20 世纪 50 年代,该方法在技术和经济上已经走向成熟,实用性很强.直到 20 世纪 70 年代,我国引入该方法,并在众多大型工程中得以应用.

目前,国内外许多学者对碎石桩复合地基的设计、施工进行研究,有助于振冲碎石桩的推广应用^[3-6].韩冉冉等^[7]对振冲碎石桩进行现场试验研究,分析探讨其参数取值,总结这些参数的最佳组合;刘洋^[8]通过建立数学模型,利用有限差分研究复合地基加固机理,分析其加固效果;张晓光等^[9]研究了不同土质情况下,振冲碎石桩的地基加固机理,通过实例验证了振冲碎石桩法加固软黏土地基的可行性;黄宝龙^[10]以实际工程为依托,对运用振冲碎石桩法处理过的复合地基进行承载力试验,试验表明该方法能有效地减少

砂土地基的液化现象,满足施工要求.

1 振冲碎石桩

振冲碎石桩是提高抗震液化能力,增加地基稳定性的好方法^[11,12].具有技术先进、经济合理、施工安全可行、质量可靠等优点,能满足一般工程要求.

其施工工艺如下:用挖掘机清理现场,压路机与之配合使得工作面平整,根据设计孔位坐标进行测量放样.振冲器对准孔位,对振冲器定位后,在振动器高频振动下,启动水泵和振冲器,待各工艺参数达到要求,开始贯入造孔.成孔完成后,要及时验孔和清孔,确保孔达到设计深度和保证桩孔通畅性.清孔后,填入碎石等填料,在振动作用下挤密,使之达到要求密实度.

2 工程实例

本项目依据勘察报告得知,钻孔揭露地层最大深度为 44 m,按地层沉积年代、成因类型,将土层划分为人工堆积层(Q^m)、新近沉积层(Q₄^{2+3al+pl})、第四纪全新世冲洪积层(Q₄^{al+pl})、第四纪晚更新世冲洪积层(Q₃^{al+pl})四大层.场地 20 m 深度范围内的饱和粉土和砂土自上至下依次为砂质粉土粘质粉土②₂层、粉细砂②₃层、中粗砂②₄层、粉细砂②₅层、中粗砂③₄层、粉土④₂层、粉细砂④₃层.根据《建筑抗震设计规范》计算判定,地震烈度为 8 度,地面下 20 m 深度范围内的未进行地基处理区域的饱和粉细砂②₅层会产生液化,液化指数为 0.7~14.4,液化等级为轻微-中等,其余饱和砂土、粉土均不液化.车辆段局部地层剖面如图 1 所示,其液化计算判别表见表 1.

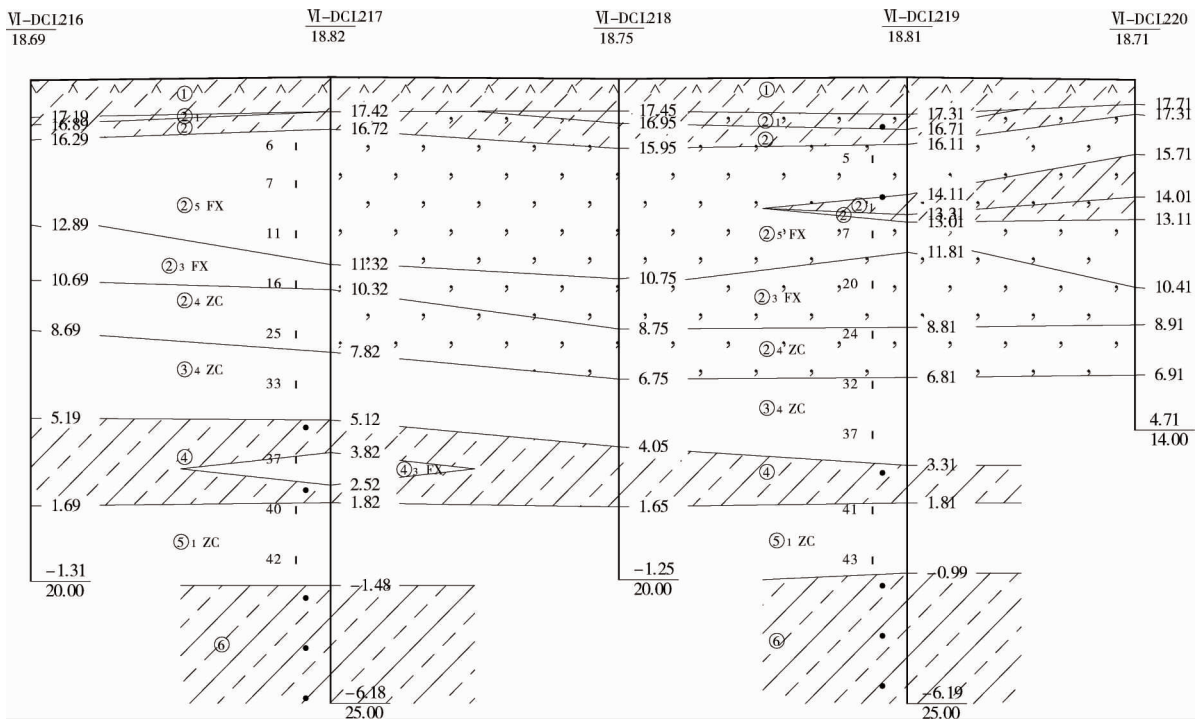


图 1 施工现场地层剖面(局部)

表 1 液化计算判别(部分)

| 钻孔编号 | 土层 | 地下水位深度/m | 饱和土标准贯入点深度/m | 粘粒含量/% | 液化判别标准贯入锤击数基准值 | 液化判别标准贯入锤击数临界值 | 标准贯入试验锤击数 | 结论 | 液化指数 | 液化等级 |
|-----------|---------------------|----------|--------------|--------|----------------|----------------|-----------|----|------|------|
| VI-DCL217 | 粉细砂② ₅ 层 | 0 | 2.65 | 3.0 | 12 | 10.8 | 6 | 液化 | 17.3 | 中等 |
| | | 0 | 4.15 | 3.0 | 12 | 13.3 | 7 | 液化 | | |
| | | 0 | 6.15 | 3.0 | 12 | 15.8 | 11 | 液化 | | |
| VI-DCL219 | 粉细砂② ₅ 层 | 0 | 3.15 | 3.0 | 12 | 11.7 | 5 | 液化 | 21.6 | 严重 |
| | | 0 | 6.15 | 3.0 | 12 | 15.8 | 7 | 液化 | | |

综上所述,粉细砂②₅层为液化地层,液化等级为轻微-中等(局部为严重液化),对于场区内建筑地基基础设计有一定影响,设计要求根据建筑的具体情况采取相应的抗液化措施,达到完全消除液化.鉴于篇幅有限,本文仅对场区液化最严重区域联合检修库进行阐述.

3 振冲碎石桩试验方案

碎石桩的桩长、桩距和桩径直接影响加固效果和经济效益.根据具体地质情况,要求处理区地基承载力不小于 340 kPa.在联合检修库选择最不利地段——严重液化区(钻孔编号 VI-DCL81 附近)作为 I 区进行现场试验,该区域粉细砂②₅层最大厚度约为 3.2 m,且在填土①层下夹杂约 0.6 m 厚的粉细砂②₅层.I 区设计振冲碎石桩有效桩长 9.5 m,桩顶位于填土①层,桩端进入中砂③₄层(见图 2).试验 I 区碎石桩采用等腰三角形布置,要求完全消除液化,试验桩设计参数见表 2.

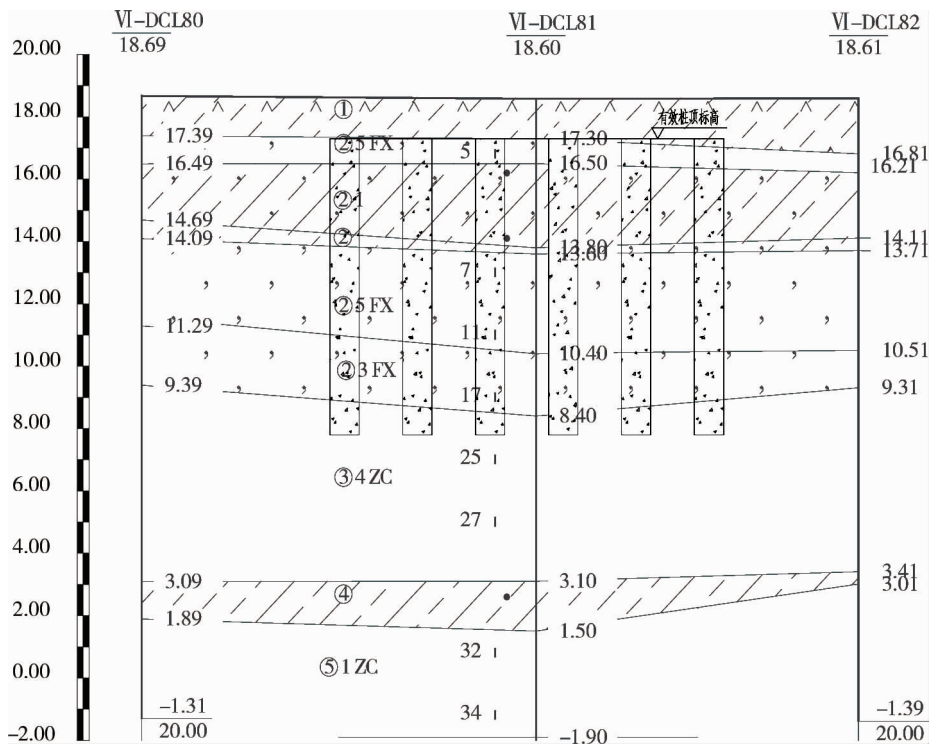


图 2 I 区振冲碎石桩剖面

本次地基处理采用等腰三角形布置,以 I₁ 为例描述了试验桩的平面布置情况(见图 3).

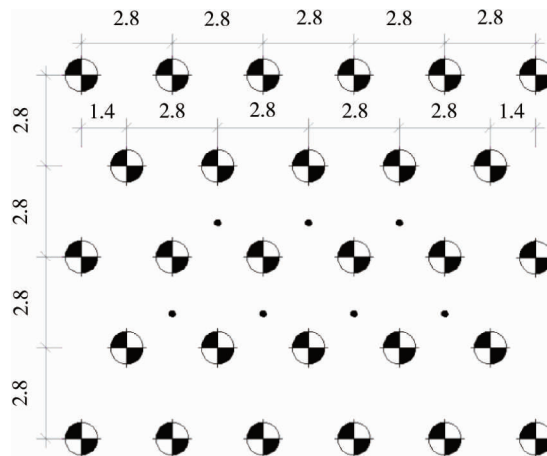


图 3 I₁ 区振冲碎石桩平面布置

桩间距一定情况下,振密电流和留振时间对碎石桩成桩是否均匀起关键作用^[6].通过试桩试验成果确定以下主要施工参数:水压为 400~600 kPa,水量为 250~300 L/min,振密电流为 100 A,造孔速度 0.5~

2 m/min,留振时间 6~8 s.

表 2 试验桩设计参数

| 试桩区域 | 有效桩长/m | 桩间距/m | 桩径/mm | 桩数 | 振冲器功率/kW |
|----------------|--------|-------|-------|----|----------|
| I ₁ | 9.5 | 2.8 | 1 000 | 28 | 100 |
| I ₂ | 9.5 | 2.5 | 1 000 | 27 | 100 |
| I ₃ | 9.5 | 2.0 | 800 | 35 | 75 |

4 试验结果与分析

根据设计与规范要求,碎石桩复合地基载荷试验 3 组,布置桩间土标准贯入试验点 6 孔.

4.1 单桩复合地基载荷试验

对碎石桩进行复合地基载荷试验,检测单桩复合地基承载力特征值是否满足设计要求.本次静载荷试验使用全堆载反力系统(如图 4).试验前,先将受检桩的桩顶找平,然后再承压板下铺设褥垫层,并找平夯实,把千斤顶置于桩顶的正上方(如图 5).

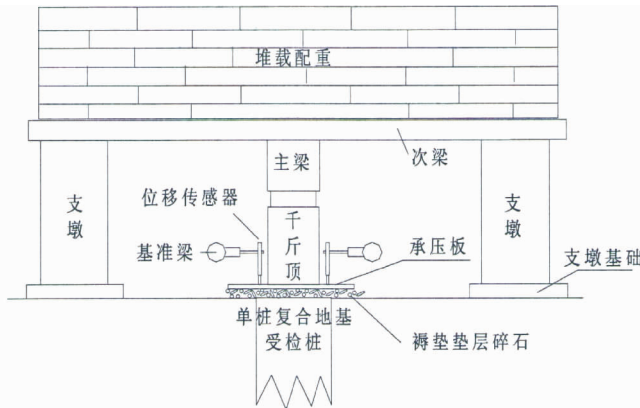


图 4 承载力检测



图 5 现场检测

试验采用慢速维持荷载法,加载共分 8 级,采用逐级等量加载,每级加载值为预估加载值的 1/8,卸载级数为加载级数的一半,等量进行,荷载分级见表 3.

表 3 地基载荷试验加荷级率

| 荷载级别 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 加载/kPa | 0 | 85 | 170 | 255 | 340 | 425 | 510 | 595 | 680 |
| 卸载/kPa | 0 | | 170 | | 340 | | 510 | | |

根据试验记录,绘制荷载随沉降的关系曲线及沉降与时间的关系曲线,每级荷载作用下的累计沉降量和累计沉降量见表 4.

1[#],2[#],3[#]试验点的加载值达到 680 kPa 时,累计沉降达到 20.06,21.65,17.12 mm,均未达到终止条件,根据荷载沉降 p-s 曲线与 s-lgt 曲线图 6~图 11,可取最大加载值的一半 340 kPa 作为复合地基承载力的特征值.

4.2 标准贯入试验

通过对碎石桩桩间土进行标准贯入试验,来判定地基处理后消除液化情况,检测深度范围内的地基土主要为粉土、细砂.标准贯入试验,每 1 m 贯入 1 次.当钻机钻至试验标高上方 15 cm 处,提出钻具,下标贯器至孔底,将穿心锤提起,使其自由下落,落距 76 cm,将标贯器打入土中 15 cm 后,开始记录每打入 10 cm 的锤击数,累计打入 30 cm 的锤击数为标准贯入试验锤击数 N.

液化判别,自基地向下,在原液化土层,即碎石桩处理深度内,每隔 1 m 进行 1 组标准贯入试验.将累计打入 30 cm 的锤击数为标准贯入试验锤击数 N 与液化判别标准贯入锤击数临界值 N_{cr}进行对比,当饱和土标准贯入基数 N ≥ N_{cr}时,可判定处理后的液化土层液化已消除.

表 4 地基载荷试验数

| 试验点 | 荷载/kPa | 本级沉降/mm | 累计沉降/mm |
|-----|--------|---------|---------|
| 1# | 0 | 0.00 | 0.00 |
| | 85 | 1.57 | 1.57 |
| | 170 | 1.6 | 3.17 |
| | 255 | 2.67 | 5.84 |
| | 340 | 2.55 | 8.39 |
| | 425 | 2.64 | 11.03 |
| | 510 | 1.63 | 12.66 |
| | 595 | 3.49 | 16.15 |
| | 680 | 3.91 | 20.06 |
| 2# | 0 | 0.00 | 0.00 |
| | 85 | 2.00 | 2.00 |
| | 170 | 1.96 | 3.96 |
| | 255 | 2.18 | 6.14 |
| | 340 | 2.31 | 8.45 |
| | 425 | 2.74 | 11.19 |
| | 510 | 2.77 | 13.96 |
| | 595 | 3.88 | 17.84 |
| | 680 | 3.81 | 21.65 |
| 3# | 0 | 0.00 | 0.00 |
| | 85 | 1.51 | 1.51 |
| | 170 | 1.68 | 3.19 |
| | 255 | 1.71 | 4.90 |
| | 340 | 2.62 | 7.52 |
| | 425 | 1.61 | 9.13 |
| | 510 | 1.86 | 10.99 |
| | 595 | 1.52 | 12.51 |
| | 680 | 4.61 | 17.12 |

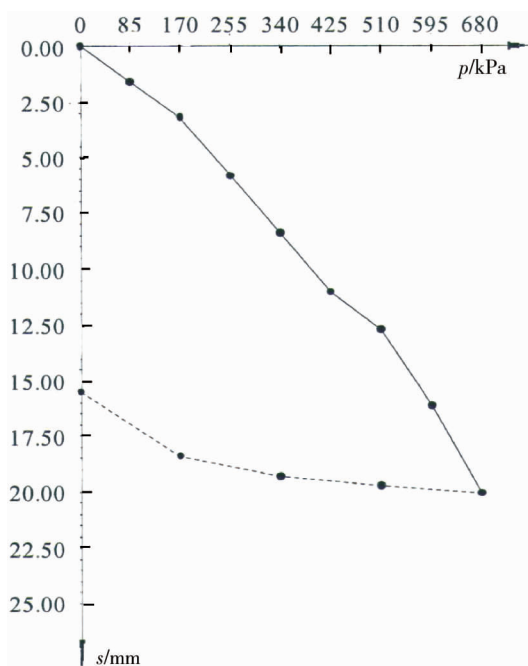


图 6 1# 试验点荷载沉降 $p-s$ 曲线

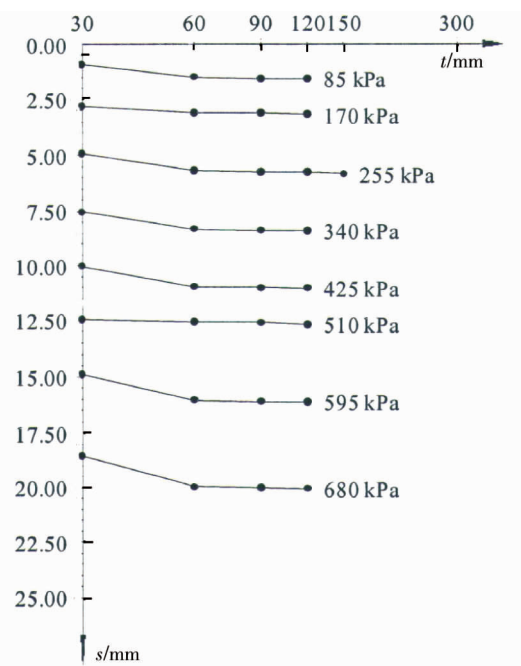


图 7 1# 试验点 $s-lgt$ 曲线

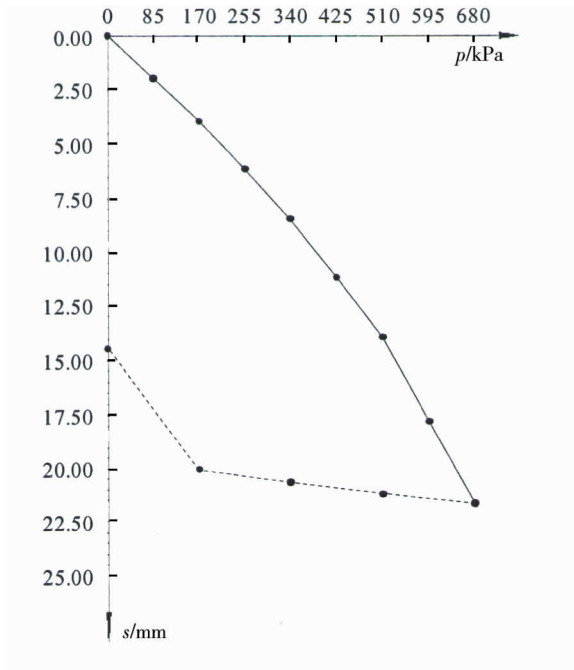


图8 2#试验点荷载沉降p-s曲线

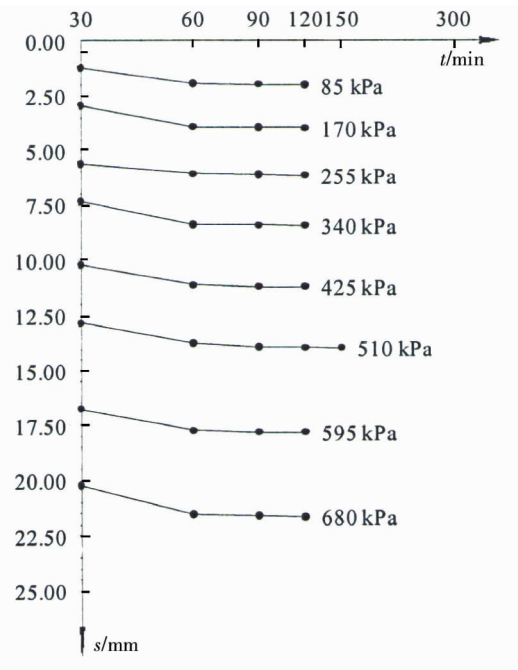


图9 2#试验点s-lgt曲线

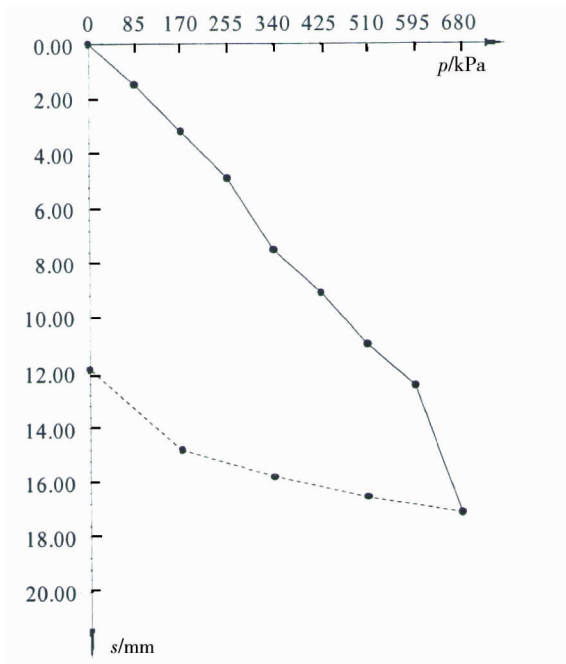


图10 3#试验点荷载沉降p-s曲线

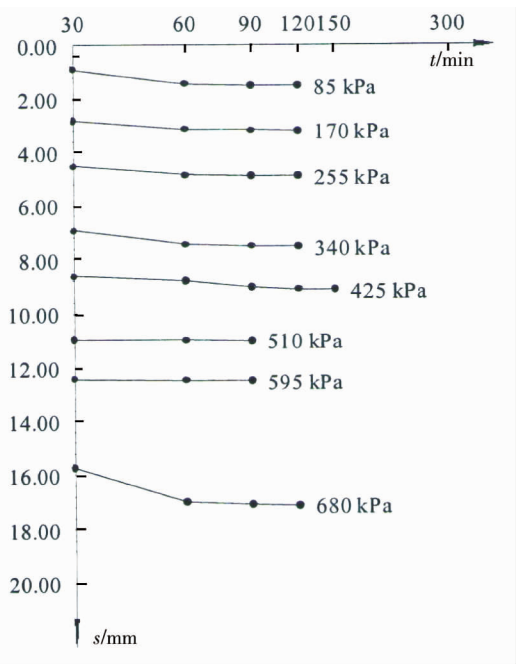


图11 3#试验点s-lgt曲线

试验区振冲碎石桩处理后的单孔贯入深度 10.5 m,单孔贯入次数为 20 次,大于液化判别标准贯入锤击数临界值.由结果可知:振冲碎石桩试验 I 区完全消除液化.

5 结论

- 1) 根据单桩复合地基试验结果,处理区复合地基承载力特征值为 340 kPa,满足设计要求.
- 2) 随着科技水平的提高,各学科的相互交叉使得地基检测领域获得了更大的发展.振冲碎石桩检测的方法较多,各种方法都有其适用性和限制性,实际工程检测中,必须结合工程重要程度、现场地质条件、检测费用及工期等因素,采取多种检测手段进行综合评价.同时,应努力掌握新技术,在其它形式的复合地基

检测中推广应用.

3) 碎石桩处理液化地基时具有施工效果好、质量可靠、经济合理等特点,该方法在处理软弱地基中也提供了一定的推广价值.

参考文献:

- [1] 庄海洋,龙慧,陈国兴,等.可液化地基中地铁车站周围场地地震反应分析[J].岩土工程学报,2012,34(1):81-88.
- [2] 李进元.振冲碎石桩法地基处理在阴坪水电站中的应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(s1):2968-2976.
- [3] 周杰.振冲碎石桩复合地基在复杂临海填海地层中的应用研究[D].北京:中国地质大学,2011.
- [4] 谷海娇.振冲碎石桩在软土地基加固中的应用[J].路基工程,2010(2):189-191.
- [5] Han J,Gabr M A.Numerical analysis of geosynthetic reinforced and pile supported earth platforms over soft soil[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,ASCE,2002,128(1):44-53.
- [6] 谢新宇,应宏伟,夏建中.振冲碎石桩加固高层建筑粉砂土地基实例分析[J].建筑结构学报,2001,22(1):88-92.
- [7] 韩冉冉,徐满意,乔小利,等.水下超软土地基振冲碎石桩试验及参数控制[J].岩石工程学报,2013,35(s2):612-616.
- [8] 刘洋,闫鸿伟,汪成林.复合振冲碎石桩加固机理及施工过程数值模拟[J].工程科学学报,2015,37(3):390-397.
- [9] 张晓光,曹永华.振冲碎石桩法在高液限软黏土地基处理中的应用[J].中国港湾建设,2007(3):36-37.
- [10] 黄宝龙,刘冶,李波.某工程振冲碎石桩处理效果试验研究[J].施工技术,2005(s1):28-31.
- [11] 何秀文.振冲碎石桩复合地基承载力检测成果分析[J].水利技术监督,2017,25(3):123-126.
- [12] 何广讷.振冲碎石桩复合地基[M].北京:人民交通出版社,2001.

(上接第 55 页)

- [5] 王绍君,刘耀凯,凌贤长,等.软土深基坑施工过程对地表沉降影响力学行为分析[J].土木工程学报,2012,45(s2):226-230.
- [6] 尹盛斌,丁红岩.软土基坑开挖引起的坑外地表沉降预测数值分析[J].岩土力学,2012,33(4):1210-1216.
- [7] 孟丹,臧晓光,于广明,等.地铁车站开挖引起地表沉降分析方法的对比研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(6):1169-1177.
- [8] Peck R B.Deep excavation and tunneling in soft ground, State of the art report[C].Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,Mexico City,1969:225-290.
- [9] 唐孟雄,陈如桂,陈伟.深基坑工程变形控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2006:1-7.
- [10] 张尚根,陈志龙,曹继勇.深基坑周围地表沉降分析[J].岩土工程技术,1999,13(4):7-9.
- [11] 王翠.天津地区地铁深基坑变形及地表沉降研究[D].天津:天津大学,2005.
- [12] 聂宗泉,张尚根,孟少平.软土深基坑开挖地表沉降评估方法研究[J].岩土工程学报,2008,30(8):1218-1223.
- [13] 张尚根,袁正如.软土深基坑开挖地表沉降分析[J].地下空间与工程学报,2013,9(s1):1754-1757.
- [14] 刘小丽,周贺,张占民.软土深基坑开挖地表沉降估算方法的分析[J].岩土力学,2011,32(s1):90-94.
- [15] 储小宇,周殿铭.土岩组合区基坑地表沉降公式关键参数分析[J].科学技术与工程,2014,14(13):263-266.
- [16] 庄海洋,张艳书,薛栩超,等.深软场地地铁狭长深基坑变形特征实测与已有统计结果的对比分析[J].岩土力学,2016,37(s2):561-570.
- [17] 梅源,胡长明,王雪艳,等.西安地区湿陷性黄土地铁车站深基坑开挖引起的地表及基坑支护桩变形特性[J].中国铁道科学,2016,37(1):9-16.