



碎石桩软土复合地基整体抗剪强度研究

陈健¹, 苏岩松¹, 张杰², 刘诗净¹

(1. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027; 2. 河海大学, 江苏南京 210098)

摘要: 振冲碎石桩作为散体材料桩与周围的软土形成的复合地基, 同钢筋混凝土桩、钢管桩等刚性桩形成的复合地基在工作原理、承载力分析等方面存在着本质的不同。与刚性桩相比, 碎石桩作为垂直排水通道, 能够加快周围软土的排水固结, 提高桩间土的整体强度。同时碎石桩自身的承载力发挥又取决于周围土体的侧向支撑作用。如何确定碎石桩复合地基的整体抗剪强度对于发挥碎石桩的作用至关重要。以港珠澳大桥香港口岸人工岛项目碎石桩的工程应用为例, 对比碎石桩软土复合地基整体抗剪强度计算的异同, 通过数值模拟和现场监测等手段对参数取值进行分析, 对今后类似工况条件下碎石桩复合地基的抗剪强度计算具有指导意义。

关键词: 振冲碎石桩; 软土复合地基; 抗剪强度

中图分类号: TU 472.99; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0146-03

Overall shear strength of stone column-soil composite ground

CHEN Jian¹, SU Yan-song¹, ZHANG Jie², LIU Shi-jing¹

(1. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: There are essential differences between the composite grounds improved by stone columns and by rigid piles, such as reinforced concrete piles, steel-pipe piles and other rigid piles. The voids of the stone columns can act as vertical drainage channels and accelerate the consolidation of the surrounding soft soil resulting in the improvement of the ground strength. Meanwhile, the improvement effect of the stone column depends directly on the lateral support of the surrounding soil. How to accurately determine the overall shear strength of stone column-soil composite ground is the key task to make full use of stone columns. Taking Hong Kong boundary crossing facilities-reclamation works for example, we compare different calculating methods for the overall shear strength of the composite ground, and carry out some analyses of the parameters using the finite element analysis and in-situ monitoring. This study has significant effect for the calculation of overall shear strength of the composite foundation under similar conditions.

Keywords: vibro-stone column; composite ground; shear strength

1 研究背景

碎石桩复合地基整体抗剪, 主要考虑把碎石桩和桩间土作为改良土体, 得到整体改良土体摩擦角和粘聚力, 进行强度和稳定性分析。目前, 国内外碎石桩复合地基整体抗剪强度计算的区别主要集中在摩擦角和粘聚力的计算上。国内JTJ 246—2004《港口工程碎石桩复合地基设计与

施工规程》主要依据桩土应力比和面积置换率进行复合地基摩擦角和粘聚力的计算:

$$\tan\varphi_{sp} = m\mu_p \tan\varphi_p + (1 - m\mu_p) \tan\varphi_s \quad (1)$$

$$C_{sp} = (1 - m) C_s \quad (2)$$

$$\mu_p = \frac{n}{1 + (n - 1)m} \quad (3)$$

式中: φ_{sp} 为复合土层内摩擦角标准值; m 为面积

收稿日期: 2015-11-18

作者简介: 陈健 (1977—), 男, 高级工程师, 从事岩土设计、勘察以及水运工程科技管理工作。

置换率; μ_p 为应力集中系数; φ_p 为桩体材料内摩擦角标准值, 砂土或粉土取试验值, 较软的黏性土地基适当降低; φ_s 为桩间土内摩擦角标准值; C_{sp} 为复合土层粘聚力标准值; C_s 为桩间土粘聚力标准值; n 为桩土应力比。

根据公式可知, 碎石桩复合地基的粘聚力完全根据碎石桩的面积置换率对原土层的粘聚力进行折减, 而碎石桩复合地基的摩擦角则主要由面积置换率和桩土应力比决定。特别地, 桩土应力比在土坡和地基稳定计算时取 1.0; 地基承载力计算时取 2.0~4.0, 桩间土强度低时取大值, 桩间土强度高时取小值。

国外主要依据 Priebe^[1] 给出的公式计算复合地基的摩擦角和粘聚力。

$$\tan\varphi_{sp} = K' \tan\varphi_p + (1 - K') \tan\varphi_s \quad (4)$$

$$C_{sp} = (1 - m) C_s \quad (5)$$

$$K' = (\beta - 1) / \beta \quad (6)$$

$$\beta = 1 + m \left[\frac{\frac{1}{2} + f(\mu_s, m)}{K_{ac} f(\mu_s, m)} - 1 \right] \quad (7)$$

$$f(\mu_s, m) = \frac{(1 - \mu_s)(1 - m)}{1 - 2\mu_s + m} \quad (8)$$

$$K_{ac} = \tan^2(45^\circ - \varphi_s) \quad (9)$$

$$m = (n - 1 + A_c / A) / n \quad (10)$$

式中: β 为增强系数; μ_s 为桩周土的泊松比; K' 为碎石桩的分荷比; n 为改善系数。

国内外碎石桩复合地基摩擦角和粘聚力的计算公式中, 关于粘聚力的计算与国内是一致的; 关于摩擦角的计算虽然公式的形式比较接近, 但是采用的参数却明显不同。主要根据改善系数 n 来确定应力集中系数, 进而得到增强系数 β , 从而计算得到复合地基摩擦角。

国内《规程》中最核心的参数是桩土应力比。但其作为评价碎石桩起到加固地基作用最直观的参数, 目前还没有一个较为完善的求取方式, 尚且主要依靠现场的试桩试验。马立仁等^[2] 提出用实测的土与桩的弹性模量比代替桩土应力比, 但是这种方法只能作为估算, 误差较大, 其选择对最终结果的影响较大; 贺会团等^[3] 通过使

用当前先进的瑞雷面波测试技术建立新型的桩土应力比模型。在理论研究方面, 黄炳权等^[4] 采用双折线荷载传递函数的方法, 针对桩土应力比计算方法进行推导, 讨论了相关影响因素; 数值模拟方面, 韩杰等^[5] 依据 Biot 固结理论, 采用有限单元法对二维的碎石桩地基进行计算, 借此分析应力分布、桩土应力比以及固结度等问题。但是在土坡和地基稳定计算时, 《规程》规定桩土应力比的取值为 1, 即不考虑碎石桩承受剪切力的应力集中。

Priebe 主要依据与面积置换率和碎石桩骨料摩擦角有关的改良系数 β 来计算复合地基摩擦角和粘聚力。具体取值见图 1。

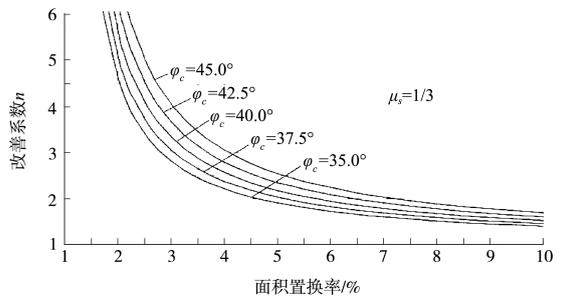


图 1 改善系数取值

根据图 1 改善系数的取值以及中外关于碎石桩复合地基摩擦角的计算公式可知, 当改善系数取最低值时, 对应国内规范的桩土应力比都大于 1。这说明, 国外方法考虑了复合地基在整体抗剪条件下, 碎石桩由于周围土体的约束作用承担的剪切力的影响, 即考虑了碎石桩承受剪切力的应力集中。同国内规范相比, 在同等条件下, 设计更为经济。

2 碎石桩复合地基整体抗剪强度计算

2.1 项目介绍

香港口岸填海工程项目 (图 2) 是港珠澳大桥项目的核心组成部分, 形成海堤全长 6 296 m, 筑岛面积 $149.68 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。岛壁地基加固技术采用海上底部出料振冲碎石桩施工工艺, 上部采用格型钢板桩、抛石斜坡堤形成岛壁。碎石桩的面积置换率在 8.7%~18%, 最大有效桩长达到 36.5 m。



图2 香港口岸填海工程项目施工现场

2.2 土体参数

现场海床高程从-2.5 m到-10 m不等(香港高程基准面),海水深度普遍在4~12 m,水下是11~28 m非常软的海相淤泥层,淤泥层下才是较

好的冲积土层(冲积黏土层和冲积砂土层)。具体的土层强度指标见表1。

2.3 计算分析

本项目采用有限元软件 PLAXIS 进行整体稳定性分析,计算断面见图3。其中碎石桩复合地基的整体抗剪强度采用 Priebe 的方法进行计算,增强系数取值为1.6。

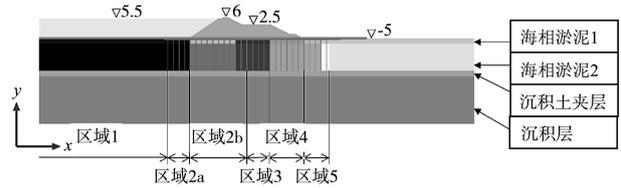


图3 PLAXIS 模拟整体稳定性分析断面(单位:m)

表1 施工范围内土体指标

密度/(g/cm ³)			排水剪切强度参数				不排水剪切强度 C _u /kPa		土体压缩模量 E/kPa
海相淤泥	冲积土	风化岩	海相淤泥	冲积土(黏土)	冲积土(粉土)	冲积土(砂)	海相淤泥	冲积土(黏土)	冲积土
1.50	1.90	1.90	C' = 4 kPa φ' = 24°	C' = 7 kPa φ' = 26°	C' = 3 kPa φ' = 30°	C' = 0 kPa φ' = 35°	1+1.1z	2+1.3z	0.9z-1

注: z为厚度。

在图3的 PLAXIS 三维有限元建模过程中,根据不同性质土层、排水板施工区域、不同碎石桩参数,把断面划分为不同区块,输入不同的物理力学指标。表2给出了不同区域的排水板以及碎石桩参数情况。

形为200 mm左右,满足设计要求。变形基本发生在陆域后方堆载预压的中前期,在后方陆域堆场卸载后变形基本保持稳定。

表2 PLAXIS 模拟断面各区域基本情况

区域	加固方法	地基处理参数	海床高程/m	桩长/m
1	排水板	间距1 m	-6	25
2a	碎石桩	面积置换率8.7%	-6	25
2b	加密碎石桩	面积置换率17.5%	-8	25
3	碎石桩	面积置换率8.7%	-8	25
4	碎石桩	面积置换率8.7%	-6	25
5	无		-6	25

区域1属于后方陆域形成区域,排水板间距1 m,正方形布置。为提高碎石桩的整体抗剪强度,区域2b的碎石桩置换率为临近区域的2倍,达到了17.5%。碎石桩桩长为25 m,穿过了海相淤泥层,进入了冲积土层1~2 m的深度范围。

图4给出碎石桩复合地基在施工期的侧向变形监测情况,根据数据可知,复合地基的侧向变

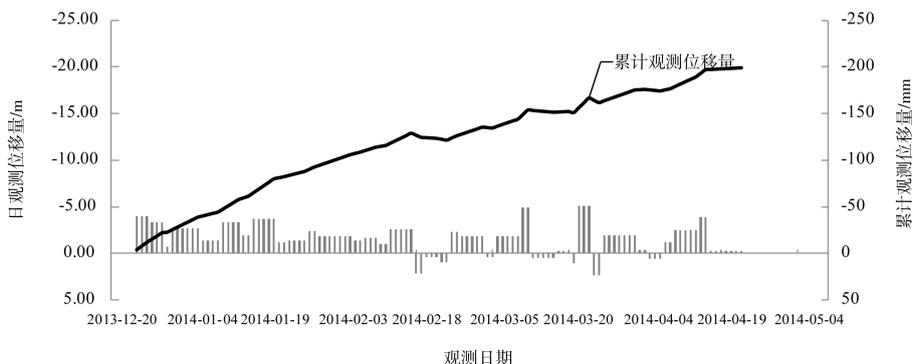


图4 施工期碎石桩复合地基的侧向变形(向海侧为负)