

含砂量对黏-砂混合土力学特性影响的 试验研究及工程应用*

张 彬¹, 张晓雷¹, 田广宇²

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450045; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京, 100007)

摘要: 广东省汕尾市龟龄岛码头工程采用黏-砂混合土地基。不同含砂量不排水剪切试验结果表明: 1) 随着含砂量增加, 分形维数加速递减; 2) 抗剪强度特性逐渐由硬化型过渡为软化型; 3) 分形维数 2.709 3(含砂量 50%) 为黏-砂混合土力学性能明显变化的界限值, 两侧力学特性表现出较大差异; 4) 内摩擦角增大、黏聚力减少。结合经验公式的地基承载力、实际取材等因素确定含砂量为 30%~40%, 并选取 12 个监测点进行复核。

关键词: 码头项目; 含砂量; 黏-砂混合土; 力学特性; 分形维数; 黏聚力

中图分类号: U 655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0195-07

Experimental study on effect of sand content on mechanical properties of clay sand mixed soil and engineering application

ZHANG Bin¹, ZHANG Xiao-lei¹, TIAN Guang-yu²

(1.School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045; China;

2.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The Guiling Island wharf project in Shanwei City, Guangdong Province adopts clay-sand mixed soil foundation. The results of the undrained shear tests with different sand contents show that: 1) The fractal dimension of mixed soil decreases rapidly with the increase of sand content. 2) The shear strength characteristics gradually change from hardening type to softening type. 3) The fractal dimension of 2.709 3(sand content of 50%) is the limit value for the obvious change of mechanical properties of clay sand mixed soil, and the mechanical properties of two sides show great differences. 4) The angle of internal friction increases and the cohesion decreases. Combined with the foundation bearing capacity of the empirical formula, the actual material and other factors to determine the sand content of 30%~40%. 12 monitoring points are selected to review the results.

Keywords: wharf project; sand content; clay-sand mixed soil; mechanical properties; fractal dimension; cohesion

黏-砂混合土地基在沿海港口、岛屿开发建设中广泛应用^[1-3]。黏-砂混合土地基中, 黏土与砂的比例调整会显著改变混合土的力学性能, 影响混合土地基的承载能力^[4-5], 因此研究不同颗粒级配下的黏-砂混合土力学特性具有重要的价值。

目前关于不同颗粒级配或比例含量下黏-砂混合土力学特性的研究已有部分成果。彭旭等^[6]通过试验分析了粗-细粒混合土强度随 EPS 颗粒含量的变化规律, 发现混合土强度随着 EPS 颗粒含量的增加而递减; 丁一^[7]针对不同黏土和砂比例的

收稿日期: 2021-10-26

*基金项目: 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室开放研究基金项目([2018]KJ06); 华北水利水电大学高层次人才科研启动项目(201909006); 河南省科技攻关项目(222102320195)

作者简介: 张彬(2000—), 男, 本科生, 研究方向为水利水运工程。

通讯作者: 张晓雷(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: zxl1334@163.com

2 混合土制备及试验方案

龟龄岛码头项目采用黏-砂混合土地基,黏土和砂的颗粒级配见图3。

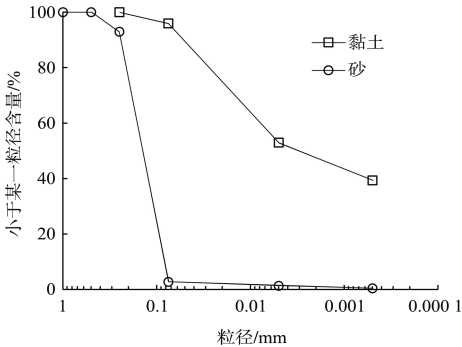


图3 黏土和细砂颗粒级配曲线

由图3可看出,黏土和砂的级配存在明显的差异,制备黏-砂混合土时,不同的黏-砂比例会导致混合土的物理力学特性发生变化。为探究不同黏-砂比例下混合土的力学特性,制备含砂量分别为0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%的混合土。制备试样前,首先将黏土切片烘干并研磨成粉末,过0.25 mm筛,接着将砂烘干后过1 mm筛。当混合土含砂量在0%~80%时,按比例配置黏土和砂后加水均匀搅拌,锥入度控制为8 mm,静置1 d;当混合土含砂量超过80%时,由于混合土黏聚力低,按上述方法制样后,分5层在制样筒击实制样。试样制备后,经饱水、固结后开展围压100、200、300、400 kPa下不同含砂量的不排水剪切试验。不同含砂量的黏-砂混合土级配曲线见图4。

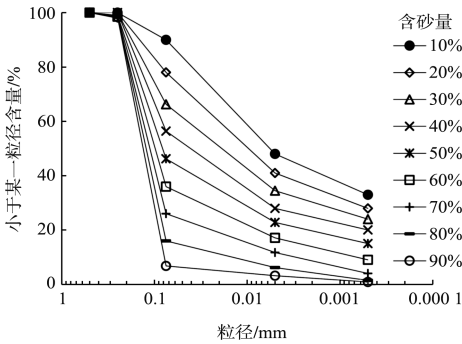


图4 黏-砂混合土颗粒级配曲线

由图3、4可看出,黏-砂混合土级配曲线介于黏土和砂的级配曲线之间,随着含砂量的增加,级配曲线逐渐向砂的级配曲线靠拢。

3 混合土颗粒级配分形特征

文献[10]提出了颗粒体积-粒径分布分形模型:

V(r<R)/V_0 = (R/R_max)^{3-D}

式中: r为颗粒尺度; R为任意粒径; R_max为最大粒径; V(r<R)为粒径小于R的颗粒体积; V_0为总体积; D为体积分形维数。

式(1)两边同时取对数得:

lg(V(r<R)/V_0) = (3-D)lg(R/R_max)

式(2)可看作是lg[V(r<R)/V_0]与lg(R/R_max)线性相关的表达式,lg[V(r<R)/V_0]与lg(R/R_max)的关系见图5,求取斜率从而确定体积分形维数D。

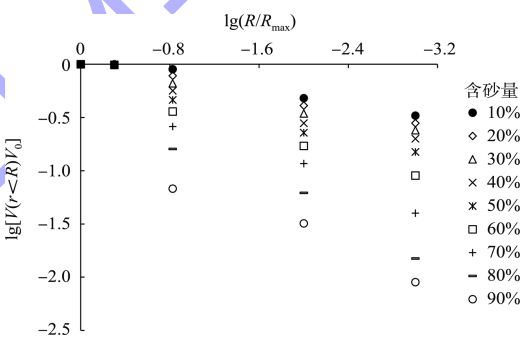


图5 lg[V(r<R)/V_0]与lg(R/R_max)关系

对图5中的数据点进行线性拟合,得到不同含砂量下的混合土分形维数D,见表1。根据表1绘制混合土分形维数D随含砂量的变化曲线,见图6。

表1 分形维数计算结果			
含砂量/%	斜率	D	相关性系数
0	0.147 5	2.852 5	0.957 1
10	0.172 2	2.827 8	0.973 5
20	0.197 6	2.802 4	0.988 1
30	0.221 3	2.778 7	0.984 0
40	0.250 4	2.749 6	0.968 7
50	0.290 7	2.709 3	0.960 1
60	0.361 7	2.638 3	0.959 4
70	0.439 2	2.560 8	0.961 2
80	0.548 6	2.451 4	0.952 3
90	0.720 5	2.279 5	0.890 6
100	0.849 6	2.150 4	0.830 4

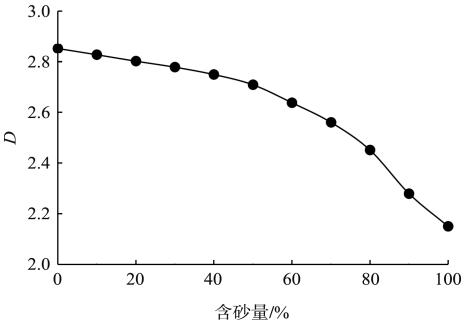


图 6 混合土分形维数 D 随含砂量的变化曲线

从表 1 和图 6 中可看出，黏-砂混合土的分形维数 D 随着含砂量的增大而加速递减。图 6 清晰地反映了不同黏-砂比例下的混合土颗粒级配变化规律。

4 不排水剪切试验成果分析

4.1 不排水剪切试验成果

不同含砂量的黏-砂混合土在围压 100、200、300、400 kPa 下的偏应力-轴向应变曲线见图 7。图 8 为不同工况下弹性模量的变化曲线，图 9 为不同工况下抗剪强度的变化曲线。

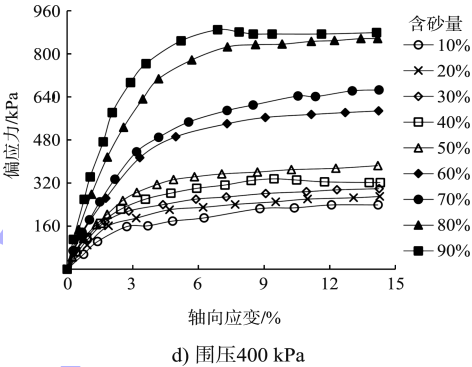
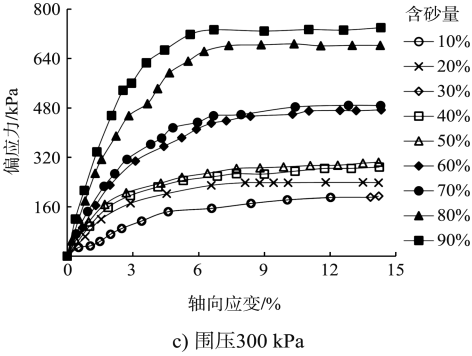
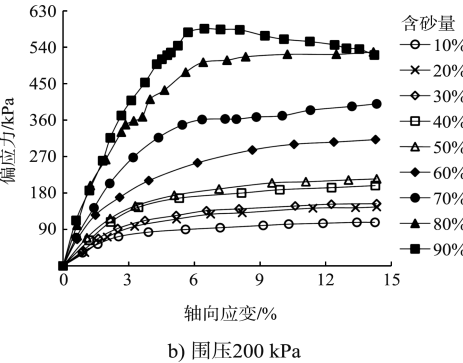
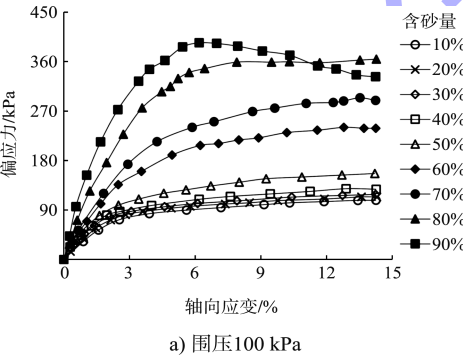


图 7 不同围压下黏-砂混合土偏应力-轴向应变曲线

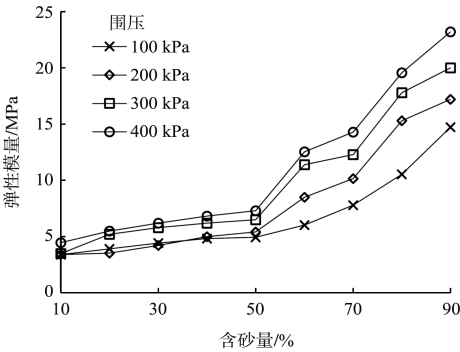


图 8 弹性模量变化曲线

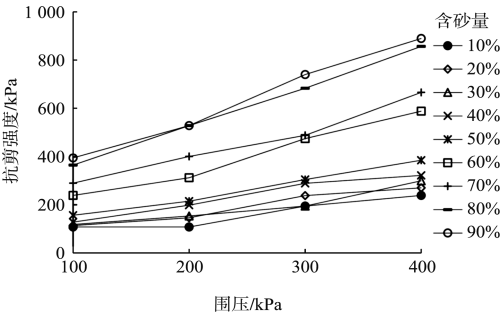


图 9 抗剪强度变化曲线

由图 7 可看出, 混合土偏应力-轴向应变曲线随含砂量的变化呈现一定规律性, 含砂量越高则混合土抗剪强度越高, 抗剪强度特性逐渐由硬化型过渡为软化型。当含砂量小于 50% 时, 混合土应力-应变曲线较为集中, 抗剪强度明显较小; 当含砂量介于 60%~70% 时, 混合土抗剪强度相差不大, 处于中等水准; 当含砂量超过 80% 时, 混合土抗剪强度较高。

由图 8 可知, 在同一围压下, 混合土弹性模量随含砂量的增加而逐渐递增。当含砂量小于 50% 时, 弹性模量随含砂量的增长趋势较缓; 当含砂量超过 50% 时, 弹性模量的增长趋势较快。

由图 9 可看出, 在同一含砂量下, 混合土抗剪强度随着围压的增大呈线性递增趋势。在同一围压下, 抗剪强度随着含砂量增大呈递增趋势。鉴于图 9 中抗剪强度与围压之间具有较好的线性关系, 对图 5 中不同含砂量对应的数据点进行线性拟合后, 通过绘制 Mohr 圆并作公切线的方法, 基于以下公式求解内摩擦角 φ ^[11-12]:

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{m-1}{m+1} \quad (3)$$

式中: m 为线性拟合关系曲线的斜率。并结合试验数据及土力学抗剪强度公式等方法得到黏-砂混合土的内摩擦角 φ 及黏聚力 c , 见表 2。

由表 2 可看出, 黏-砂混合土的内摩擦角随着含砂量的增加而递增。结合图 7~9 和表 2 可以看出, 黏-砂混合土强度特性与含砂量存在明显的变化规律, 当含砂量小于 50% 时, 黏粒骨架主要承担了外界荷载, 此时混合土主要表现出黏土性质; 随着含砂量的增大, 砂粒逐渐形成有效接触, 与黏粒共同承担外界荷载, 混合土由黏性逐渐向砂性过渡; 当含砂量超过 80% 时, 砂粒骨架主要承担外界荷载, 此时混合土表现出砂土性质。

表 2 黏-砂混合土内摩擦角

含砂量/%	m	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa
10	2.04	19.8	18.61
20	2.09	20.2	18.52
30	2.11	20.4	18.15
40	2.12	20.6	16.53
50	2.27	22.3	9.21
60	2.78	27.0	4.95
70	2.95	28.3	3.50
80	3.39	31.2	2.30
90	3.49	31.8	1.34

4.2 混合土力学特性的分形描述

针对表 1 和图 6 的成果, 对黏-砂混合土力学特性进行分形描述, 可以得到弹性模量、抗剪强度、内摩擦角与分形维数 D 的关系曲线, 见图 10。

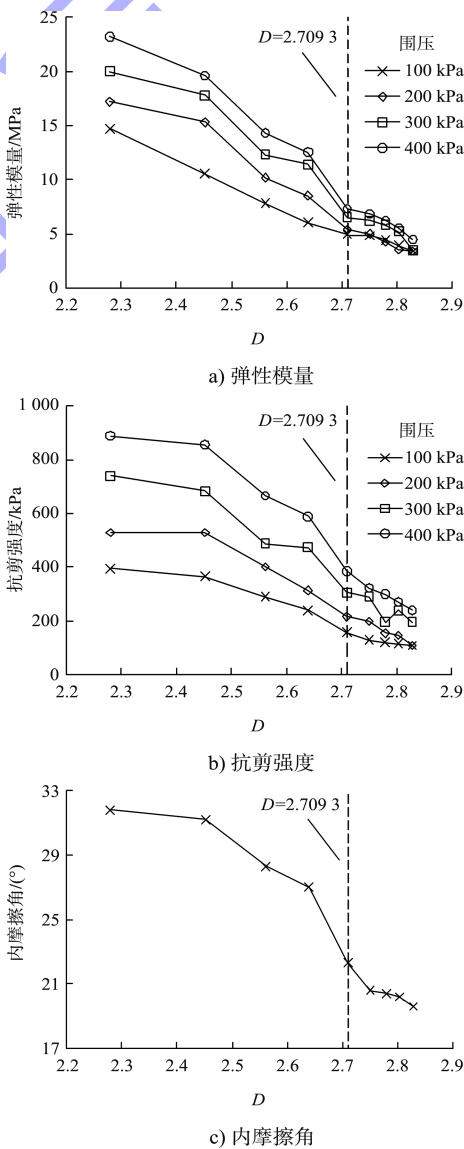


图 10 弹性模量、抗剪强度、内摩擦角与分形维数关系曲线

由图 10 可看出,弹性模量、抗剪强度和内摩擦角均随着分形维数 D 的增大而递减。当 $D \geq 2.709\ 3$ 时(含砂量小于 50%),弹性模量、抗剪强度和内摩擦角的变化较小,量值范围较为集中;当 $D < 2.709\ 3$ 时(含砂量超过 50%),弹性模量、抗剪强度和内摩擦角的变化范围较大。由此认为,以分形维数 2.709 3 为界限值,两侧的力学特性表现明显不同,呈现一定的规律性,图 10 左侧区域力学参数变化幅度较大、右侧区域变化幅度较小,一定程度上体现了黏-砂混合土由黏粒骨架承担荷载逐渐转变为砂粒骨架承担荷载的过程,反映了含砂量改变导致混合土力学性能变化的规律。分形维数既能描述混合土颗粒级配特征,还可表现出土体颗粒的结构、分选特性,通过分形维数研究颗粒级配对混合土力学特性的影响无疑是一种有效的途径。

在本工程中,针对黏-砂混合土地基,应加强理论和试验研究,科学控制混合土中砂和黏土的比例、合理调配混合土颗粒级配,以达到地基承载力要求,确保工程地基的安全和稳定性。

5 地基承载力分析

黏-砂土的力学性质(如内聚力 c 以及内摩擦角 φ)均已得出相关数据,由于龟龄岛码头项目中码头地基承载力(经修正后)不小于 100 kPa,现根据 GB 5007—2002《建筑地基基础设计规范》^[13]“5.2 承载力计算”中的计算公式分析承载力 f_a 、修正承载力 f_{ak} 。

$$f_a = M_b \rho g b + M_d \rho_m g d + M_c C_k \tag{4}$$

式中: f_a 为由土的抗剪强度指标确定的地基承载力特征值(kPa); M_b 、 M_d 、 M_c 为承载力系数; b 为基础底面宽度(m),大于 6 m 按 6 m 取值,对于砂土小于 3 m 按 3 m 取值; C_k 为基底下一部短边宽度的深度范围内土的黏聚力标准值(kPa)。

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \rho g (b - 3) + \eta_d \rho_m g (d - 0.5) \tag{5}$$

式中: f_a 为修正后的地基承载力特征值(kPa); f_{ak} 按地基承载力特征值(kPa)的原则确定; η_b 、 η_d 为基础宽度和埋置深度的地基承载力修正系数; ρ 为基础底面以下土的密度(t/m^3),地下水位以下取浮密度; b 为基础底面宽度(m),当基础底面宽度小于 3 m 时按 3 m 取值,大于 6 m 时按 6 m 取值; ρ_m 为基

础底面以上土的加权平均密度(t/m^3),位于地下水位以下的土层取有效密度; d 为基础埋置深度(m)。

本文暂不考虑深度影响,仅考虑宽度修正,根据黏-砂混合土同含砂量对应的实测 c 、 φ 对地基承载力进行估算,计算结果见表 3、图 11。

表 3 黏-砂混凝土含砂量对应承载力估算

含砂量/ %	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	估算承载力 f_a/kPa	原位承载力 f_{ak}/kPa
10	19.8	18.61	128.78	80.78
20	20.2	18.52	130.49	82.49
30	20.4	18.15	129.55	81.55
40	20.6	16.53	121.36	73.36
50	22.3	9.21	86.84	38.84
60	27.0	4.95	95.39	47.39
70	28.3	3.5	96.99	48.99
80	31.2	2.3	130.47	82.47
90	31.8	1.34	132.82	84.82

注:本数据仅适用于广东省汕尾市龟龄岛码头工程实验室数据分析。

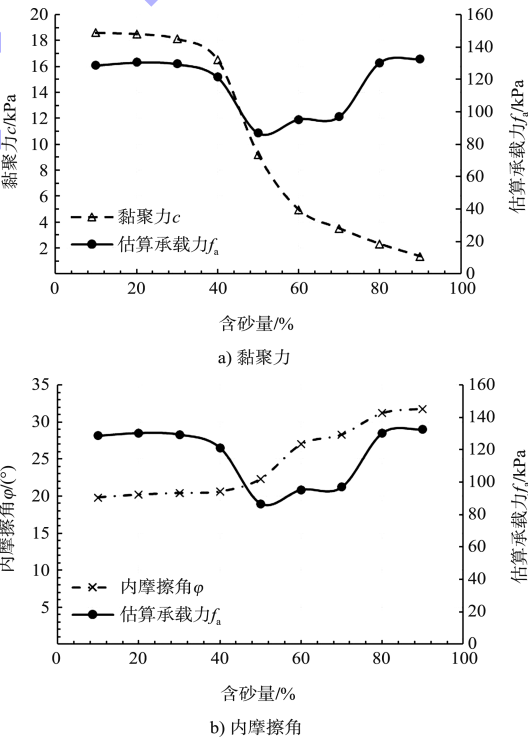


图 11 含砂量、内摩擦角、黏聚力、承载力的变化规律

从以上计算结果分析,含砂量在 10%~40%时承载力变化不大,但超过 40%后会突然衰减,超过 70%后又会持续增加。考虑现场施工离散型、压实度以及地基承载力检测等因素,同时现场开挖过程中砂含量较多,结合所在岛屿实际情况,尽量保证砂的利用率,并掺入周边道路施工中的黏土,本项目黏-砂地基含砂量控制在 30%~40%。

6 现场实施与监测

为保证地基施工在尽可能干燥工况下施工, 现场采用土石围堰、敞口施工。地基在相关规范要求下分层碾压, 保证含水率, 并分层检测。本项目现场面积大、需要检测点多, 现场先进行试验段施工, 最终选取 12 个检测点进行原位试验, 并对其取样验证其含砂量, 见表 4。

表 4 黏-砂混合土内摩擦角及黏聚力

检测点	含砂量/%	原位承载力/kPa		f_{ak}'/f_{ak}
		估算 f_{ak}	实测 f_{ak}'	
JC1	38	75.00	93.75	1.25
JC2	35	77.46	93.72	1.21
JC3	41	69.91	94.38	1.35
JC4	35	77.46	90.62	1.17
JC5	42	66.46	101.02	1.52
JC6	41	69.91	67.12	0.96
JC7	36	76.64	101.93	1.33
JC8	35	77.46	123.16	1.59
JC9	33	79.09	133.67	1.69
JC10	38	75.00	83.25	1.11
JC11	37	75.82	119.79	1.58
JC12	36	76.64	101.93	1.33

从表 4 可以看出, 含砂量能满足原有设计要求, 且原位试验比理论估算值普遍偏高 (JC6 除外) 20%~30%, 部分偏高 69%, 分层碾压后质量得到保证。综上, 本工程中选用含砂量控制在 30%~40% 经济合理, 且能满足工程安全需求。

7 结语

- 1) 通过颗粒体积-粒径分布分形模型, 建立了分形维数与颗粒级配之间关系, 发现黏-砂混合土的分形维数随着含砂量的增大而加速递减。
- 2) 混合土含砂量越高, 其抗剪强度、弹性模量和内摩擦角越高, 抗剪强度特性逐渐由硬化型过渡为软化型。当含砂量小于 50% 时, 抗剪强度、弹性模量和内摩擦角随含砂量的增加趋势较缓慢, 含砂量超过 50% 时, 增长趋势加快。
- 3) 分形维数能较好地反映颗粒级配对混合土力学特性的影响, 分形维数 2.709 3 (含砂量 50%) 为黏-砂混合土力学性能明显变化的界限值。码头项目中, 应加强对混合体颗粒级配和分形特征的研究, 以确保工程地基的安全和稳定性。
- 4) 通过黏-砂混合土不同含砂量相关试验和经

验公式取得内摩擦角、内聚力, 并通过规范经验公式推算出修正后地基承载力, 根据码头结构承载力需求, 确定含砂比例控制在 30%~40%。并根据深宽修正公式求得现场实测理论值。

5) 选取试验段 12 个监测点进行原位承载力测量, 并将实测值和理论值进行比较。结果表明, 实测值普遍高于理论估算值, 即选用含砂量控制在 30%~40% 范围内满足地基承载力要求。

参考文献:

[1] 张宇亭, 董海军. 滨海地区吹填土地基加固处理差异性分析[J]. 岩土工程技术, 2010, 24(6): 312-314.

[2] 付佳佳, 王炼, 尤苏南, 等. 黏-砂混合土压缩特性与微观结构特征关系研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(5): 115-122.

[3] 胡雪梅, 吕玉梅. 土力学地基与基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[4] ANANTANASAKUL P, YAMAMUROY A, KALIAKIN V N. Stress-strain and strength characteristics of silt-clay transition soils[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2012, 138(10): 1257-1265.

[5] 邓通发, 艾志伟, 罗嗣海, 等. 黏质土-砂混合物剪切特性试验研究[J]. 人民长江, 2014, 45(9): 95-101.

[6] 彭旭, 张玉云, 刘恩龙, 等. EPS 颗粒含量对粗-细粒混合土的力学性质的影响[J]. 科技传播, 2014, 6(1): 132-133.

[7] 丁一. 不同颗粒级配混合土力学特性试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2016.

[8] 张晶洁. 黏土-炉渣混合土力学性能研究及其在路堤工程中的应用[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.

[9] 郭志杰. 细粒含量对粗-细粒混合土物理力学特性的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.

[10] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550.

[11] 张旷成, 朱杰兵, 陈明. 花岗岩强风化岩块和残积土岩土混合料填土强夯后的抗剪强度[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(1): 20-23, 45.

[12] 崔凯, 苏磊. 粗颗粒含量对川西混合土抗剪强度的影响[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(4): 778-785.

[13] 中国建筑科学研究院. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.