



吹填流泥地基真空预压浅层加固需求研究

刘吉福¹, 蒋永春²

(1. 中国铁建港航局集团勘察设计院有限公司, 广东 广州 510442; 2. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 吹填流泥地基采用真空预压浅层加固的主要目的是为深层地基处理提供稳定的工作面, 因此真空预压浅层加固后应避免深层地基处理时可能出现的垫层前沿滑动破坏、浅层加固区地基承载力破坏及由浅层加固区向下卧流泥的冲剪破坏等。根据深层地基处理时浅层加固区地基承载力破坏、由浅层加固区向下卧流泥抗冲剪破坏两种破坏模式推导得到真空预压浅层加固区不排水抗剪强度需求公式; 深层地基处理垫层施工时前沿稳定需求的真空预压浅层加固区不排水抗剪强度应根据整体稳定性分析确定。分析表明, 深层地基处理时浅层加固区地基承载力、抗冲剪需求的浅层加固区不排水抗剪强度与垫层厚度、深层处理施工机械、浅层加固厚度等有关; 当深层处理垫层厚度超过1 m后, 垫层前沿稳定需求的浅层加固区不排水抗剪强度急剧增大, 且下卧流泥越厚, 需要的抗剪强度越大。

关键词: 吹填流泥; 真空浅层加固; 冲剪破坏; 承载力破坏; 滑动; 不排水抗剪强度

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0191-06

Requirement of shallow improvement of foundation with dredged slurry by vacuum preloading

LIU Ji-fu¹, JIANG Yong-chun²

(1. CRCC Harbor & Channel Engineering Group Survey & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510442, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Since a stable platform for construction of improvement of deep soft strata is the principal aim of shallow improvement of foundation with dredged slurry by vacuum preloading, slide in front of cushion advance, bearing capacity failure, punching failure should be avoided during construction of improvement of deep soft strata. Equations of the undrained shear strength of shallow improvement of foundation with dredged slurry are derived accounting for the bearing capacity failure and punching failure during improvement of deep soft strata. The undrained shear strength of shallow improvement of foundation with dredged slurry required by the stability of cushion advance should be gotten through overall stability analysis. It is shown by analysis that the undrained shear strength of shallow improvement of foundation with dredged slurry accounting for the bearing capacity failure and punching failure relates to the thickness of cushion, construction equipments for treatment of deep soft strata and thickness of shallow improvement, etc. The undrained shear strength of shallow improvement of foundation with dredged slurry required by overall stability of cushion advance increases sharply along with the increase of thickness of cushion when the cushion thickness is more than 1 m. The underlying slurry is thicker, and the undrained shear strength of shallow improvement required by overall stability of cushion advance is greater.

Keywords: dredged slurry; shallow improvement by vacuum preloading; punching failure; bearing capacity failure; slide; undrained shear strength

随着我国沿海地区经济的快速发展, 土地资源日益紧缺, 天津、连云港、温州、厦门、深圳、

广州、珠海等地已经实施大量的围海造陆工程。我国沿海多是淤泥质海床, 围海造陆通常就近吹

收稿日期: 2014-07-27

作者简介: 刘吉福 (1971—), 男, 博士, 教授级工程师, 从事港口与航道工程勘察设计等工作。

填淤泥或黏性土形成陆地，即使取泥区夹有砂层，也都沉淀到吹填区底部，吹填区上部含水率通常为110%~130%，属于流泥。围海形成的吹填流泥地基经常需要采用二次地基处理，先采用真空预压浅层加固形成硬壳层，再进行深层地基处理^[1-4]。真空预压浅层加固是为深层地基处理施工机械提供稳定的工作面。真空预压浅层加固技术一些问题没有得到很好解决，较突出的是真空预压浅层加固承载力需求或黏土不排水抗剪强度需求。

真空预压浅层加固通常要求地基承载力特征值达到40~55 kPa，也有要求80 kPa的^[2-5]。这些承载力多是根据经验或建设单位要求提出的，缺乏技术依据，按照现行规范普遍采用的压力扩散角法验算真空预压浅层加固区下卧流泥的承载力无法满足规范要求。部分真空预压浅层加固工程因承载力不足导致工程事故（图1）；部分工程因承载力要求过高而需要长时间的真空预压，导致严重的浪费。因此，有必要研究真空预压浅层加固地基的承载力或黏土抗剪强度的需求。



图1 垫层前沿波浪形隆起

针对上述问题，根据深层地基处理施工机械情况，考虑各种破坏模式，分析真空预压浅层加固需要达到的黏土抗剪强度或地基承载力。

1 深层地基处理施工机械情况

深层地基处理通常采用真空预压，其施工工序包括垫层铺设、插排水板、真空预压等，其中垫层铺设包括垫层材料运输和推平两部分。为降低对浅层加固的要求，通常采用汽车将垫层材料堆放在已铺设垫层的部位，然后利用推土机将垫层材料推到未铺设垫层的部位，以避免汽车直接作用在未铺设垫层的部位。由于汽车对浅层加固要求很高，不少工程采用人工、翻斗车等转运垫层材料，或者采用吹填的方式施工砂垫层。

插板机经常采用履带式液压挖掘机改装，也有采用履带式塔架振动插板机、轨道式门架振动式插板机，轨道式门架振动式插板机需铺设枕木或钢板。

本文主要分析深层地基处理较重的施工机械（汽车、推土机、挖掘机改装的插板机）对浅层加固的要求，其他施工机械可以参考分析。工程中常用的推土机、改装插板机的挖掘机、汽车的主要参数见表1、表2和图2^[6]。

表1 推土机、挖掘机主要参数

施工机械	型号	工作质量/kg	履带接地长度 l/m	履带宽度 B/mm	履带板宽度 b/mm
挖掘机	PC200	19 900	3 275	2 800	600
	PC300	31 200	3 700	3 190	600
推土机	SD16	17 000	2 430	2 390	510

表2 汽车主要参数

重力 /kN	前轴重力 /kN	中轴重力 /kN	后轴重力 /kN	轴距 /m	轮距 /m	前轮着地宽和长/m	中轮着地宽和长/m	后轮着地宽和长/m	车辆外形长和宽/m
200	70		1×120	4	1.8	0.3×0.2		0.6×0.2	7×2.5
300	60		2×120	4+1.4	1.8	0.3×0.2		0.6×0.2	8×2.5
550	30	2×120	2×140	3+1.4+7+1.4	1.8	0.3×0.2	0.6×0.2	0.6×0.2	15×2.5

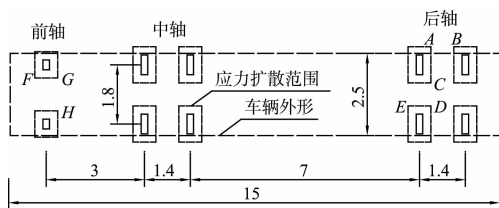


图2 550 kN 轮轴平面分布 (单位: m)

2 深层地基处理时的典型地层结构

真空预压浅层加固均采用人工插板，处理深度小于6 m，通常为4 m左右。当流泥地层厚度较大时，经真空预压浅层加固后地基土层分为真空

预压浅层加固区、流泥区、原状土区, 其中真空预压浅层加固区流泥变为淤泥或淤泥质土, 厚度为2~3 m。相对下卧流泥区而言, 真空预压浅层加固区成为硬壳层。为扩散施工机械的压力, 真空预压浅层加固区顶面铺设0.5~0.8 m厚的垫层。因此, 深层地基处理时典型地层结构见图3。

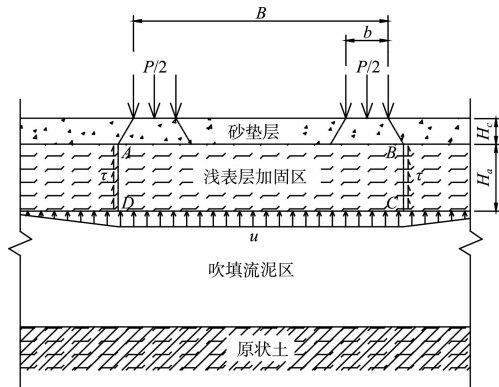


图3 深层软基处理施工时典型地层结构

3 深层地基处理时可能的破坏类型

3.1 垫层前沿稳定性不足

当深层地基处理垫层一次铺设过厚时, 垫层铺设前沿可能因稳定性不足发生圆弧滑动等破坏, 真空预压浅层加固区出现破浪形隆起(图1)。

3.2 真空预压浅层加固区承载力不足

施工机械履带或轮胎压力经垫层扩散后, 真空预压浅层加固区承载力仍然不满足要求时, 会发生圆弧滑动等破坏, 导致施工机械倾斜。

3.3 真空预压浅层加固区冲剪破坏

研究表明, 在局部荷载作用下, 存在硬壳层的软基会发生冲剪破坏^[7-8], 吹填流泥地基经真空预压浅层加固后静载试验时发生冲剪破坏^[2], Meyerhof对硬壳层软基进行冲剪破坏验算^[9]。因此, 真空预压浅层加固区下卧流泥的工程, 在施工机械履带或轮胎作用下可能向下卧流泥区发生冲剪破坏。

4 真空预压浅层加固区抗剪强度需求

真空预压浅层加固铺设了多层土工布等土工合成材料, 但是由于其强度低、延伸率高、状态松弛, 且受插板等施工损伤严重, 对加固区地基

承载力、冲剪破坏、垫层稳定作用都不大, 仅将其作为安全储备。

吹填时粗颗粒沉淀到底部, 真空预压浅层加固的流泥中以粒径小于0.075 mm的细颗粒为主; 另一方面, 深层地基处理施工机械对某处地基的作用时间很短, 因此采用不排水剪切强度 C_u , 内摩擦角取0。

4.1 垫层前沿整体稳定性对抗剪强度的需求

根据拟定的垫层厚度等参数以及真空预压浅层加固厚度, 利用稳定分析软件分析垫层前沿整体稳定性对真空预压浅层加固区抗剪强度的需求。对于工程常用的垫层厚度, 垫层前沿整体稳定性通常不是抗剪强度的控制因素。如果垫层厚度较大, 对抗剪强度要求较大, 应分层施工, 并根据分层施工的受力特点分析垫层前沿整体稳定性对真空预压浅层加固区抗剪强度的需求。

4.2 真空预压浅层加固区承载力对抗剪强度的需求

真空预压浅层加固区厚度通常小于3 m, 加固荷载以真空荷载为主, 可以近似认为真空预压浅层加固区不同深度处抗剪强度一致。均质饱和软黏土地基承载力与不排水抗剪强度之间的关系为^[10]:

$$f_u = 5.14C_u \quad (1)$$

式中: f_u 为真空预压浅表层加固区地基极限承载力; C_u 为不排水抗剪强度。

分析地基承载力对真空预压浅层加固区抗剪强度的需求时, 应首先分析垫层底面处施工机械的履带或轮胎压力扩散范围是否重叠, 然后根据不同情况确定相应的真空预压浅层加固区抗剪强度需求。

1) 推土机、插板机。

多数工程垫层厚0.5~0.8 m, 由表1可知, 推土机、插板机的两条履带的压力扩散范围不会重叠(图3、4), 结合式(1)可得垫层前沿稳定性不足:

$$C_u = \frac{KP}{10.28(b + 2H_c \tan\theta)(l + 2H_c \tan\theta)} \quad (2)$$

式中: K 为安全系数; P 为推土机或插板机工作重力; b 为履带板宽度; H_c 为垫层厚度; θ 为垫层压力扩散角; l 为履带接地长度。

由于施工机械作用时间较短、容许沉降较大,

K 宜取 1.4 ~ 1.6^[11]，其与按照修正 $p_{1/4}$ 确定承载力特征值的规范安全系数基本一致^[12]。

由于 H_c/b 大于 0.5，且垫层压缩模量通常大于 10 MPa，而真空预压浅层加固区黏土压缩模量一般小于 2 MPa，因此 θ 可取 25°^[13]。

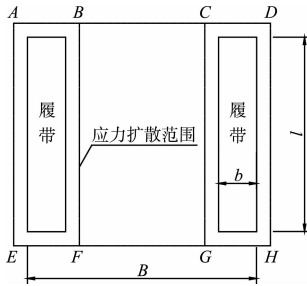


图 4 浅层加固区顶面推土机、挖掘机履带应力扩散范围

2) 汽车。

由表 2 可知，按照 25° 的压力扩散角，垫层厚度大于 1.29 m 时汽车相邻车轮压力扩散范围才会重叠，多数工程只需分析单轴单侧车轮的承载力，因此

$$C_u = \frac{KP_a}{10.28(c + 2H_c \tan\theta)(d + 2H_c \tan\theta)} \quad (3)$$

式中： P_a 为轴重； c 为车轮着地宽度； d 为车轮着地长度。

4.3 真空预压浅层加固区抗冲剪对抗剪强度的需求

真空预压浅层加固区下卧流泥抗剪强度通常小于 1 kPa^[14]，可假定流泥地层承载力为零。

Meyerhof 对下卧软土的砂层冲剪破坏面采用竖直面，地基极限承载力采用下式^[9]：

$$f_u = f_b + \frac{2ch + 2P_p \tan\delta}{w} - \rho gh \quad (4)$$

式中： f_b 为下卧层承载力； c 为砂层粘聚力； h 为砂层厚度； P_p 为被动土压力； δ 为界面摩擦角； w 为基础宽度； ρ 为砂层密度。

参考 Meyerhof 作法，冲剪面采用竖直面（图 3）；考虑真空预压浅表层加固区均为细颗粒土， δ 取 0，即不考虑被动土压力的影响。

真空预压浅层加固区下卧流泥具有流体性质，而真空预压浅层加固区是个大面积的硬壳层，其重力在下卧流泥区产生流体压力并被下卧流体支撑，类似于水上的冰层，冲剪破坏体 ABCD 的自

重被上述流体压力所平衡，因此冲剪验算时不用考虑 ABCD 自重的影响。

冲剪破坏时，冲剪破坏体及其附近一定范围内的真空预压浅层加固区发生一定沉降，下卧流泥对下沉部分产生浮力 u （见图 3，图中 u 的分布形状也代表沉降曲线形状）。浮力 u 大小为：

$$u = \rho_m g S \quad (5)$$

式中： u 为浮力； ρ_m 为流泥密度； S 为加固区沉降。

根据桩侧摩阻力研究成果^[15]、真空预压浅层加固地基静载试验结果表明^[2-3]，图 3 中 AD、BC 面上抗剪强度发挥需要的沉降小于 5 cm， ρ_m 通常小于 1.4 t/m³，因此 u 很小，可忽略不计 u 对冲剪的作用，作为安全储备。

分析抗冲剪对真空预压浅层加固区抗剪强度的要求时，应首先根据垫层底面履带或车轮压力扩散情况判断冲剪破坏范围，然后根据具体情况确定抗剪强度。

1) 推土机、插板机。

由表 1 可知， $B - 2b < l$ ，图 4 中 $BC < BF$ ，沿 ADHE 冲剪破坏的阻力小于分别沿 ABFE 和 CDHG 冲剪破坏的阻力，冲剪破坏时的受力状态见图 2， $\tau = C_u$ ，因此

$$C_u = \frac{KP}{2(B + l + 4H_c \tan\theta)H_a} \quad (6)$$

式中： B 为履带宽度； H_a 为卸载前浅层加固区厚度。

H_a 等于插板深度与已完成沉降之差，可以根据卸载前实测沉降得到。设计阶段可偏保守地取插板深度与浅层加固最终沉降之差。浅层加固最终沉降可按式(7)计算：

$$S_m = \frac{e_b - e_f}{1 + e_b} \cdot H_b \quad (7)$$

式中： S_m 为真空预压浅层加固最终沉降； e_b 为加固前孔隙比； e_f 为加固荷载对应的孔隙比； H_b 为插板深度。

e_b 可取吹填土测试得到，吹填前利用取土区土样可根据落淤试验（沉降柱试验）得到。 e_f 根据真空、有效自重等加固荷载从压缩曲线上查取。流泥难以制样进行压缩试验时，可取风干、粉碎后再加水饱和获得含水率较小的土样，然后进行压缩试

验。吹填前可在取土区取土筛除粒径大于 0.075 mm 的颗粒后加水饱和, 然后进行压缩试验。

2) 汽车。

由表 2 可知, 对于前轴, 按照 25° 的压力扩散角, 当垫层厚度小于 0.70 m 时, 图 2 中 $FG < GH$, 单侧车轮冲剪破坏阻力较小, 因此

$$C_u = \frac{KP_a}{4(c + d + 4H_c \tan\theta)H_a} \quad (8)$$

当垫层厚度大于 0.70 m 时, 图 2 中 $FG > GH$, 双侧车轮同时冲剪破坏阻力较小, 因此

$$C_u = \frac{KP_a}{2(1.8 + c + d + 4H_c \tan\theta)H_a} \quad (9)$$

由表 2 可知, 中、后轴几何参数相同, 但中轴重力大于后轴, 因此只需分析后轴。按照 25° 的应力扩散角, 当垫层厚度小于 0.32 m 时, 图 2 中 $AB > AC$ 且 $CD > ED$, 单轴单侧车轮冲剪破坏阻力较小, 因此

$$C_u = \frac{KP_a}{4(c + d + 4H_c \tan\theta)H_a} \quad (10)$$

当垫层厚度处于 0.32 ~ 0.54 m 范围时, 图 2 中 $AB < AC$ 且 $CD > ED$, 双轴单侧车轮同时冲剪破坏的阻力较小, 因此

$$C_u = \frac{KP_a}{2(1.4 + c + d + 4H_c \tan\theta)H_a} \quad (11)$$

当垫层厚度大于 0.54 m 时, 图 2 中 $AB < AC$ 且 $CD < ED$, 双轴双侧车轮同时冲剪破坏的阻力较小, 因此

$$C_u = \frac{KP_a}{(1.8 + 1.4 + c + d + 4H_c \tan\theta)H_a} \quad (12)$$

真空预压浅层加固区不排水抗剪强度 C_u 应取上述分析的大值, 并据此确定真空预压浅层加固区的极限承载力 f_u 。

5 工程算例

5.1 真空预压浅层加固需求算例

1) 地基承载力、抗冲剪对真空预压浅层加固的要求。

取 $K = 1.5$, $H_c = 0.5$ m, $H_a = 2.0$ m, 插板架质量为 5 000 kg, 根据表 1 和表 2 中参数, 按照上

述公式计算得到各种施工机械需要的软黏土不排水抗剪强度、地基承载力见表 3、4。

表 3 插板机、推土机对真空预压浅层加固的要求

施工机械	型号	承载力需求 C_u /kPa	抗冲剪需求 C_u /kPa	f_u /kPa
插板机	PC200	9.1	13.3	68.4
	PC300	11.9	17.4	89.4
推土机	SD16	8.8	11.1	57.1

表 4 汽车对真空预压浅层加固的要求

汽车重力/kN	承载力需求 C_u /kPa		抗冲剪需求 C_u /kPa		f_u /kPa
	前轴	后轴	前轴	后轴	
200	20.0	24.6	9.2	14.4	126.4
300	17.1	24.6	7.9	14.4	126.4
550	8.6	28.8	3.9	16.8	148.0

由上述公式和表 3、4 可知, 真空预压浅层加固要求与垫层厚度、深层处理施工机械、浅层加固厚度等有关; 汽车对真空预压浅表层加固的要求很高, 应设法采用轻便设备施工垫层。

2) 垫层前沿整体稳定对浅层加固的要求。

垫层密度为 1.8 t/m³, 内摩擦角为 28°, 坡率为 1:1; 真空预压浅层加固区密度为 1.68 t/m³; 下卧流泥密度为 1.2 t/m³, 不排水抗剪强度为 0; 原状土密度为 1.78 t/m³, 不排水抗剪强度为 20 kPa。垫层前沿整体稳定分析采用理正岩土软件, 通过调整垫层粘聚力避免垫层自身滑动。针对不同的下卧流泥厚度 H_s , 垫层前沿整体稳定安全系数大于 1.2 对于真空预压浅层加固区不排水抗剪强度的需求与垫层厚度的关系见图 5。

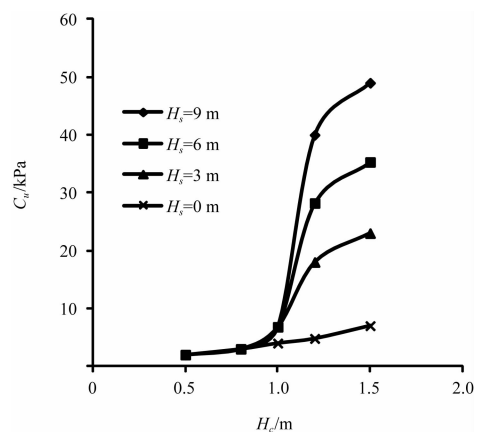


图 5 垫层前沿整体稳定对浅层加固不排水抗剪强度的需求

可见,当垫层厚度超过1 m后,垫层前沿整体稳定性对真空预压浅层加固区不排水抗剪强度的要求急剧提高,且下卧流泥越厚,要求越高。

5.2 真空预压浅层加固能获得的最大抗剪强度

如果不考虑流泥有效自重的作用,采用真空预压加固时,能获得的最大软黏土不排水抗剪强度为^[16]:

$$C_u = p_v \tan \varphi_{cu} \quad (13)$$

对于整个真空预压浅层加固深度范围,有把握的 p_v 为80 kPa。取 $p_v = 80$ kPa, $\varphi_{cu} = 13^\circ$,则 $C_u = 18.5$ kPa,对应的极限承载力为95 kPa。如果深层地基处理施工要求超过该承载力,则需要加大垫层厚度。但是,存在下卧流泥时,垫层厚度不能过大。一方面5.1节表明,垫层前沿整体稳定性对真空预压浅层加固要求很高;另一方面,深层地基处理时插板在真空预压浅层加固区形成大量孔洞,上覆荷载不大时,流泥通过插板孔洞涌出的趋势会被排水板周围的泥皮、土工织物、垫层、流泥与孔壁的黏力等作用抑制,但是上覆荷载过大时,流泥克服上述阻力而不断涌出,不但污染垫层,而且真空预压浅层加固区的封闭效应会丧失,冲剪验算时需要考虑冲剪破坏体自重的影响,可能发生冲剪破坏。

因此,应合理确定真空预压浅层加固区地基承载力或不排水抗剪强度要求。

6 结语

1) 吹填流泥地基经浅层加固后,深层地基处理时可能发生垫层前沿滑动、地基承载力破坏、冲剪破坏等,浅层加固的主要控制指标是地基承载力和不排水抗剪强度。

2) 真空预压浅层加固地基承载力、抗冲剪破坏对浅层加固区不排水抗剪强度的需求与垫层厚度、深层处理施工机械、浅层加固厚度等有关。

3) 当深层处理垫层厚度超过1 m后,垫层前

沿稳定需求的浅层加固区不排水抗剪强度急剧增大,且下卧流泥越厚,需要的抗剪强度越大。

参考文献:

- [1] 曹永华,李卫,刘天韵.浅层快速超软基处理技术[C]//全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集.天津:港口岩土工程技术交通行业重点实验室,2010:49-56.
- [2] 丁明武,陈平山,林涌潮.浅层加固技术在新吹填淤泥地基处理中的应用[J].水运工程,2011(10):120-124.
- [3] 林涌潮.浅层加固技术处理新吹填淤泥的施工质量控制[J].水运工程,2010(10):105-108.
- [4] 张文彬,许忠发,苏波,等.无砂垫层真空预压法加固大面积软土地基的实例研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(3):52-57.
- [5] 周连有.某工程软基加固未达设计要求的原因分析及建议[J].港工技术,2011,48(1):44-47.
- [6] JTG B01—2003 公路工程技术标准[S].
- [7] 蔚晓明,郑甲佳,吴立坚.软土硬壳层地基的破坏模式[J].公路交通科技,2012,29(8):31-35.
- [8] 刘文白,魏晓添,赵玉同.软黏土上覆硬土层极限承载力室内模型试验研究[J].水运工程,2011(5):119-123.
- [9] Meyerhof G G. Ultimate bearing capacity of footing on sand layer overlying clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11(2): 223-229.
- [10] 龚晓南.土塑性力学[M].杭州:浙江大学出版社,1990:47-300.
- [11] TB 10002.5—2005, J464—2005 铁路桥涵地基和基础设计规范[S].
- [12] 高大钊.土力学与岩土工程师[M].北京:人民交通出版社,2011:180-184.
- [13] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].
- [14] 于志强,熊明.深圳前海湾新吹填超软淤泥土地基加固[C]//全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集.天津:港口岩土工程技术交通行业重点实验室,2010:79-85.
- [15] 张耀年,龚一鸣,柳春.福州大直径灌注桩的荷载传递性能[J].岩土工程学报,1990,12(5):84-90.
- [16] JTS 147-2—2009 真空预压加固软土地基技术规程[S].

(本文编辑 武亚庆)