

文章编号:1673-9469(2016)02-0039-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2016.02.009

强力搅拌头就地浅层固化地基承载特性研究

王颖^{1,2}, 李斌³, 陈永辉^{1,2}, 徐锴⁴, 季小英³

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 3. 31 省道北延绍兴市市区段工程建设指挥部, 绍兴 312000; 4. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 南京 210029)

摘要:针对某公路低填软基路段,为了满足地基承载力的要求,采用土体就地固化软基处理技术进行浅层处理以代替传统的换填法,并采用 ALLU 强力搅拌头系统进行施工。主要从室内试验、现场试验、理论分析三个方面研究土体就地固化处理技术及处理后的承载特性。通过室内无侧限抗压强度试验得到不同固化剂成分及含量下的抗压强度变化规律,确定固化处理所需的固化剂成分及含量。采用 ALLU 搅拌系统(强力搅拌头)不同的施工方式对土体进行就地固化处理,从结果发现:现场强度与室内强度的比值在 0.37~0.66 之间;并从荷载板试验、标准贯入试验及静力触探试验三个试验结果得到就地浅层固化处理后的承载特性;将就地固化处理的承载结果与三种不同理论承载力结果进行对比和分析,提出设计理论,为后续施工提供依据。

关键词:软基工程;就地固化处理;无侧限抗压强度;强力搅拌系统;地基承载力

中图分类号:U416.1

文献标识码:A

Study of the characteristic of bearing capacity on mass stabilization of in-situ by using power mixing tool

WANG Ying^{1,2}, LI Bin³, CHEN Yonghui^{1,2}, XU Kai⁴, JI Xiaoying³

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 3. Construction Headquarters of Highway 31 north extension section in Shaoxing, Zhejiang Shaoxing 31200, China; 4. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Jiangsu Nanjing 210029, China)

Abstract: The foundation treatment method which was mass stabilization in-situ was proposed in order to instead of the replacement method at the low filling embankment road, as to meet the bearing capacity of road design. The laboratory, theoretical calculation and field tests were applied to research on the mass stabilization and the bearing capacity. The composition and content of the curing agents were determined by the variation of unconfined compressive strength in the laboratory test. The analysis of using different ways of construction of ALLU mixing system in situ shows that the field strength and indoor strength ratio is between 0.37 to 0.66; The bearing capacity of mass stabilization was obtained from the load plate test, standard penetration test and static cone penetration tests using ALLU PMX (power mixing tool) in situ. And bearing capacity of mass stabilization in situ was compared with three different theoretical calculations. Design theory is put forward, providing the basis for the follow-up construction.

Key words: soft foundation engineering; mass stabilization; unconfined compressive strength; ALLU PMX (power mixing tool); bearing capacity

在公路建设中,低填土路基或浅层软土路段换填法存在一定的局限性^[1]。因此,可对表层软土进行就地固化^[2-11]的地基处理方法代替传统的

换填法。ALLU PMX 300HD 强力搅拌头系统于就地固化地基处理工程^[12-13]中可实现快速固化施工,无需分层,可直接对原位土进行固化处理,形

收稿日期:2016-01-13

基金项目:水利部“948”项目(201435);浙江省交通运输厅科技计划项目(2012H29);浙江省交通运输厅科技计划项目(2011H21);山东省土木工程防灾减灾重点实验室开放课题(CDPM2014ZR01)

作者简介:王颖(1987-),女,山东潍坊人,博士,研究方向为软基处理与基础工程。

成就有一定强度的板体结构,用以扩散应力和抑制水平位移。

对多层地基的承载力特性的研究主要从极限平衡法、极限分析法、试验方法及有限元数值分析。针对多层土的地基承载力公式,利用极限平衡法,即假定滑动面形状,通过对滑移体的静力平衡分析推导出地基承载力,徐洋、谢康和^[14]等根据极限平衡理论,推导出了复合双层地基的极限承载力计算方法。秦会来、黄茂松^[15]将一种新的多块体离散模式的上限方法应用于双层地基极限承载力的计算。另一种方法是采用室内试验得到地基承载力经验公式,杨果林^[16]揭示了路堤荷载下上硬下软双层地基的破坏模式为刺入剪切破坏,并给出破坏时的承载力计算公式;最常用和最简易的地基承载力计算方法利用大型有限元软件进行模拟计算,得到地基承载力 Merifield^[17]利用有限元单元方程预测到多层土的地基承载力。张其一^[18]等基于土体极限平衡理论与通用有限元软件 ABAQUS,针对复合加载情况下上硬下软的双层不排水饱和软黏土地基的极限承载力,进行了大量的数值计算。本文将 ALLU PMX 300HD 强力搅拌头系统应用于 31 省道北延线绍兴市区普通路段中,为了研究采用的就地固化处理方法的处理效果,通过室内试验无侧限抗压强度研究不同固化剂针对特定土的固化效果,并将其用于现场试验中,得到适宜的施工工艺,并通过荷载试验、标准贯入试验及静力初探试验研究经就地固化处理后的地基承载力和固化土的强度问题,并与理论和经验公式进行对比,为工程的进一步开展提供依据。

1 室内固化试验

1.1 试验材料

本次试验采用的土样是 31 省道北延线绍兴工地的表层土,取样深度在地表下 2.0 m 以内,所取的土样为深灰色淤泥质粉土,其物理力学性质如表 1。

表 1 淤泥质粉土的物理力学指标

Tab. 1 Physico-mechanical indices of mucky silt

自然 含水 率/%	天然 湿密 度/ g · cm ⁻³	土粒 比重	天然 孔隙 比	液限 /%	塑限 /%	有机 质含 量/%	压缩 模量 /MPa
32.9	1.86	2.72	0.951	34.4	20.2	3.9	4.45

1.2 试验过程

固化剂添加时,为了模拟现场的施工情况,水泥是以水泥浆剂的形式添加至原状土中,水灰比为 1:0.5,并在 1 h 内将固化土制成无侧限土样;石灰和石膏的添加是以粉剂的形式添加到原状土中,为了使石灰的反应充分,闷料一天后进行制无侧限样。

本次试验采用的水泥是 P. O42.5 的水泥;石灰采用的是生石灰,等级为一级。

1.3 试验结果

室内试验主要进行如下方面的研究:

(1) 研究单一水泥系固化剂或石灰系固化剂对固化土的强度影响,试验结果如下所示:

通过图 1 和图 2 结果发现,针对此种淤泥质粉土,添加水泥和石灰后的固化土强度随时间增长,增长线为对数形式。从不同龄期的无侧限抗压强度的数据显示水泥系固化剂的处理效果比石灰系固化剂的处理效果要好。从图 2 的变化率发现,水泥含量增加越多,强度增加率逐渐降低。

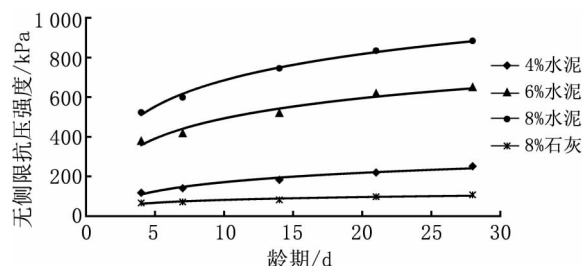


图1 单一固化土的抗压强度随龄期的变化图

Fig. 1 Compressive strength of stabilized soil with a single curing agent under different age

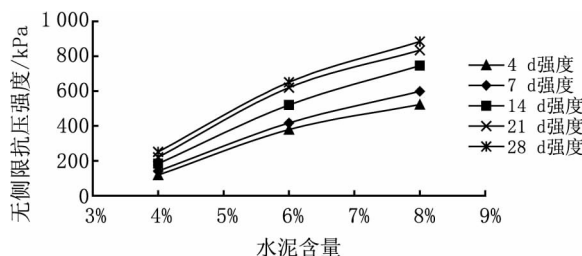


图2 固化土的抗压强度随水泥含量的变化图

Fig. 2 Compressive strength of stabilized soil under different cement content

使用单一水泥处理时,养护 28 d 的水泥固化土的强度约为 4 d 强度的 1.8 倍,是 7 d 强度的 1.5 倍,是 14 d 强度的 1.2 倍,以此为基础,可以估算同一种土的不用时间的固化效果。

(2)水泥系固化剂和石灰系固化剂以不同比例混合对固化剂的强度影响;

对于水泥系固化剂和石灰系固化剂混合下,图3所示的强度增长线为指数形式。并且通过数据对比发现,石膏处理后的效果要高于石灰处理后的效果,同时比较28 d的无侧限抗压强度,6%水泥和2%石膏处理后的后期强度比单一的8%水泥处理强度提高0.8%,固化剂总量不变的情况下,石灰和石膏大量添加反而使强度降低。但是施工中,石膏的存在可增加水泥的初凝时间,并且容易在泥浆池中沉降,所以用石膏处理时,需以干粉单独添加合适。

针对淤泥质粉土,6%水泥和2%石膏与8%水泥固化效果对比发现,6%水泥和2%石膏造价比8%水泥的造价高,超过强度增加幅度,所以选择单一水泥进行处理比较合适。

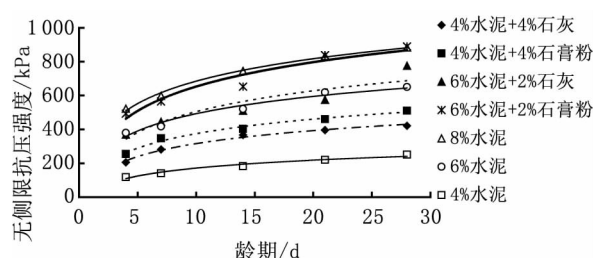


图3 双混固化土的抗压强度随龄期的变化图

Fig.3 Compressive strength of stabilized soil with a double curing agents under different age

本工程为了满足设计的强度要求,选择两组方案进行现场试验,一种取7%水泥,处理厚度为1.5 m;另一种为4%水泥,处理厚度为2.7 m,进

行现场试验,同时水泥以浆液的形式与原位土进行混合,水灰比控制1:0.5。

2 现场试验

2.1 现场施工工艺

在31省道北延线绍兴市区路段中选择50 m进行现场试验研究,本试验采用ALLU PMX 300强力搅拌头系统进行就地固化处理方法进行处理,强力搅拌头系统包括强力搅拌头搅拌系统和浆剂的供料系统,其中强力搅拌系统在于其可有效均匀快速的拌合土体,搅拌点的智能定位可以减少加固盲区,提高拌合效率;浆剂供料系统可以较好的控制水灰比,同时可以控制每区块的固化浆剂的含量。利用ALLU PMX 300强力搅拌头系统进行就地固化处理方法进行处理的具体的施工工艺流程如图4,最关键的工序为就地搅拌固化处理,一般采用垂直上下的搅拌处理方法,但当遇到原状土强度较高,需要对原位土进行预松土,之后采用翻送分层固化处理方法,具体的采用两种不同的施工方法见图5。

2.2 现场试验

在两种工况下进行载荷板试验、标准贯入试验及单桥的静力触探试验,以研究经就地固化处理后的承载特性。

(1) 载荷试验

图6为28 d现场静载荷试验的结果,结合建筑

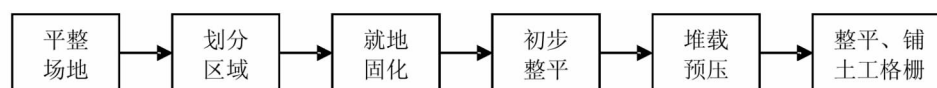
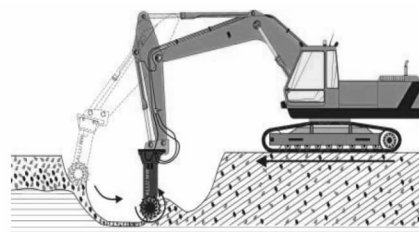


图4 施工流程图

Fig.4 Construction process of mass stabilization



原位垂直上下固化式适用于强度较软的淤泥土



翻松分层固化式适用于表层有硬壳层存在的情况

图5 搅拌固化方式

Fig.5 Mixing ways of mass stabilization

表2 标准贯入值与地基承载力之间的关系

Tab.2 Relationship between standard penetration and the bearing capacity

试验点	贯入深度/m	固化剂含量/%	处理深度/m	龄期/d	锤击数平均数	地基容许承载力/kPa
处理厚度 1.5 m	0.50 ~ 0.95	7	1.50	60	26	374
	0.95 ~ 1.40	7	1.50	60	24	346
	0.50 ~ 0.95	4	2.60	28	11	164
处理厚度 2.7 m	0.95 ~ 1.40	4	2.60	28	10	150
	1.40 ~ 1.85	4	2.60	28	7	108
	1.85 ~ 2.30	4	2.60	28	6.5	101

地基浅层平板载荷试验规范和双曲线拟合的结果,得到经就地板块固化处理后地基表面承载力分别为 590.4 kPa 和 360 kPa。通过比较两种工况发现,地基承载力与持力层的不排水剪切强度及处理厚度均有关,通过比较两种因素的影响,发现持力层的不排水剪切强度所占的比例比较大。

同时对就地固化处理后的场地进行无侧限抗压强度测定,得到的结果如下:用 7% 水泥处理 1.5 m, 28 d 平均的无侧限抗压强度为 279.9 kPa; 用 4% 水泥处理 2.7 m, 28 d 无侧限抗压强度为 166.4 kPa; 原位土的无侧限抗压强度为 42 kPa。将现场取样得到的无侧限抗压强度与室内无侧限抗压强度对比发现,现场无侧限抗压强度与室内无侧限抗压强度的比值在 0.37 ~ 0.66 之间。

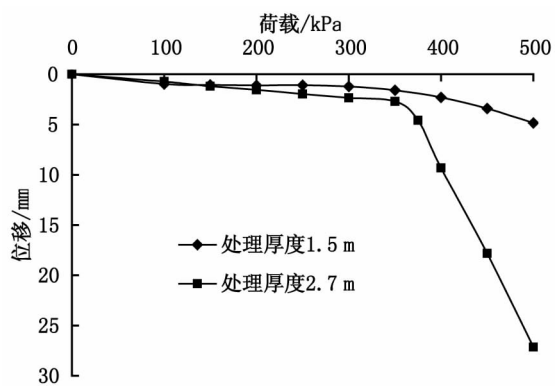


图6 静载荷试验曲线图

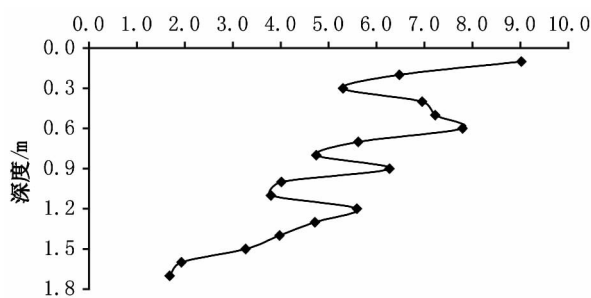
Fig.6 Graph of the static loading test

(2) 标准贯入试验

经就地板块处理 28 d 后,不同深度标准贯入 30 cm 的锤击数见表 2,发现锤击数随深度变小,说明就地固化的承载效果随深度变化而变小。表层位置处由于外界的影响,水分消散较快,水化反应充分,同时由于搅拌均匀度等因素的影响,导致地基承载力在不同深度处不同。而且通过结果发现,表面标准贯入得到的地基承载力结果与静载试验得到的结果相差 26.7% 和 8.9%。

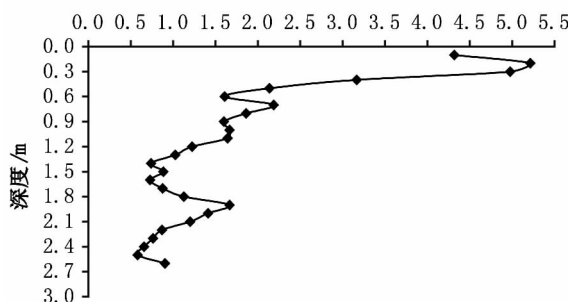
(3) 静力触探试验

从 28 d 就地板块处理的平均静力初探比贯入阻力随深度的变化图发现,平均贯入阻力随深度的变化而变小,两种情况下最大的贯入阻力均发生浅层位置处,而且就地固化处理后的固化土的静力初探比贯入阻力值均大于未处理的结果。静力初探比贯入阻力的结果随深度变小的原因与标准贯入试验贯入值随深度变化的结果相同。



平均静力触探比贯入阻力/MPa

(a) 就地固化处理: 用 7% 水泥处理 1.5 m



平均静力触探比贯入阻力/MPa

(b) 就地固化处理: 用 4% 水泥处理 2.7 m

图7 平均静力初探比贯入阻力随深度的变化图

Fig.7 Average penetration resistance of cone penetration test under different depth

3 地基承载特性分析

为了研究就地固化处理后地基的承载力特性,本文采用计算方法进行分析,并与实测结果进

行对比。经就地固化处理后形成上硬下软的近似双层地基,进行浅层地基承载力计算时,需验算表面承载力和下卧层的地基承载力。下卧层的地基承载力利用扩散原理进行验算。本文取 $\varphi=0^\circ$ 时地基表面承载力简化为公式为:

$$f_u = c_2 N_m + q \tag{1}$$

式中: c_2 为持力层土的不排水剪切强度,kPa; q 为基础两侧的超载,kPa; N_m 为考虑层状土影响的修正承载力系数。

上式中承载力系数是确定地基承载力的关键,国内外学者对此值进行研究,当荷载的影响范围超过持力层厚度时,承载力系数一般与上下土层的不排水剪切强度、持力土层的厚度与基础宽度的关系等有关;当荷载的影响范围未超过持力层厚度时,承载力系数是根据均一地基的承载力系数确定的。首先根据基础宽度确定荷载的影响范围,之后确定承载力系数。布隆和迈耶霍夫^[19]通过模型试验及经验和半经验公式得到四边形的地基承载力系数:

$$N_m = \frac{1}{\beta} + kcN_c s_r \leq N_c s_c$$

式中: $\beta = BL/[2(B+L)H]$, $k_c = c_1/c_2$; c_1 为下卧层的不排水剪切强度,kPa; N_c 、 s_r 分别为太沙基承载力系数和基础形状系数; B 、 L 为基础宽度和长度。

Chen (1975)^[20]假定圆弧形的破坏曲线(如图8),在此破坏曲线下和极限平衡法得到条形定理基础的地基承载力系数与上层厚度和 c_1/c_2 有关系,推导出条形基础下的承载力系数公式为:

$$N_c = 2(r/B)^2 \left\{ \frac{\theta + n\theta_i}{(r/B)\sin\theta - \frac{1}{2}} \right\} \tag{2}$$

式中: $\theta_i = \arccos(\cos\theta + \frac{H}{r})$; $n = \frac{c_1}{c_2} - 1$

同时 Merifield(1999)^[17]利用上下限定理和有限单元法组合,得到条形基础的承载力系数,具体变化如图所示:

现场进行静载荷试验的尺寸为1 m×1 m,条形基础的地基承载力系数可根据太沙基修正系数进行修正得到方形下的承载力。针对以上三种处理情况,不同的 c_2/c_1 下的承载力系数变化对比。

通过不同的 c_2/c_1 下的承载力系数变化对比发现(如图9),承载力系数随着厚度的增加而增加,最后均趋向于恒定的值。三种方法得到的恒定值分别为:6.17、6.62、6.38。将三个系数与太沙基系数比较,结果相差0%、3%和8%。利用理论公式(1)、(2)得到验算,具体的结果见表3。

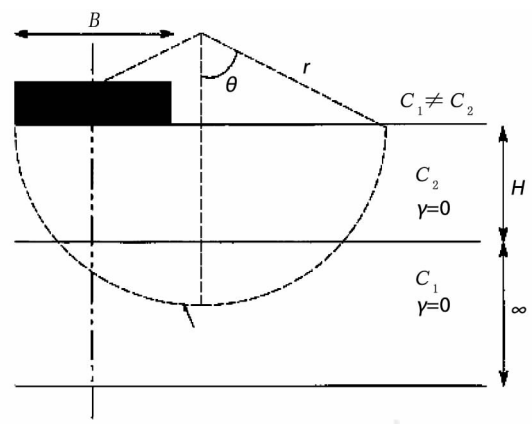
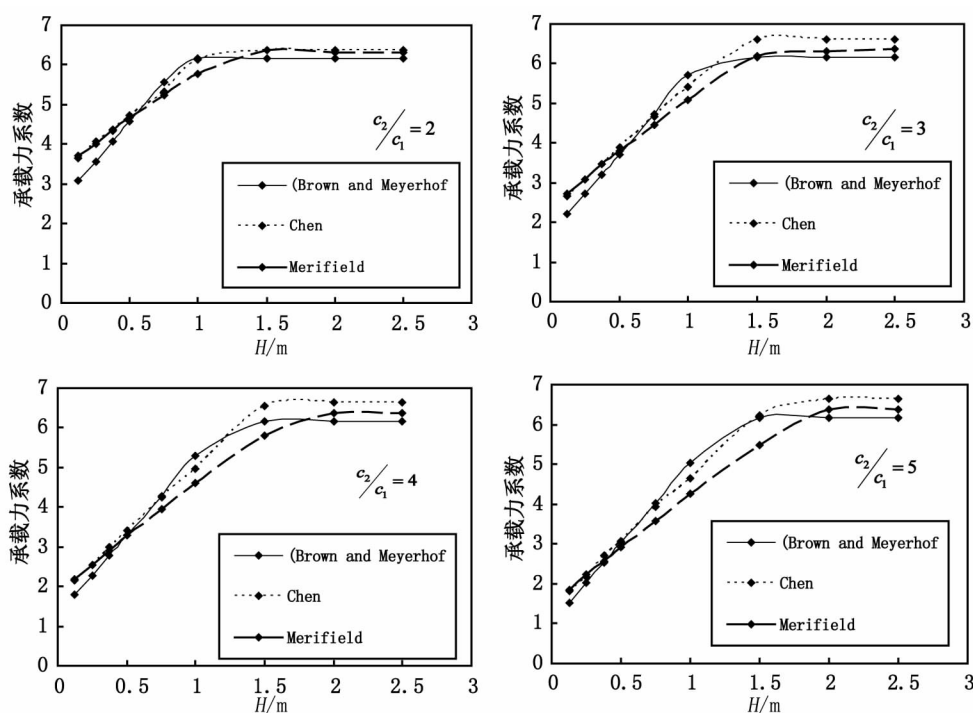


图8 Chen (1975) 假定的圆弧滑动面
Fig.8 Assumed circular failure mechanism of Chen(1975)

表3 理论与实际承载力结果比较
Fig.3 compared the actual bearing capacity with theory

处理方式	上下层 剪切强 度比	理论 计算	承载力 系数	极限承 载力 /kPa	与实测 结果比较
处理 厚度 1.5 m	4.95	布隆和 迈耶霍夫	6.17	647.6	9.6%
		Chen (1975)	6.22	653.1	10.6%
		Merifield (1999)	5.47	574.4	2.7%
处理厚 度 2.7 m	2.97	布隆和 迈耶霍夫	6.17	385.0	6.9%
		Chen (1975)	6.62	413.1	14.7%
		Merifield (1999)	6.37	397.5	10.4%

考虑到地基搅拌过程的不均匀性,持力层的抗剪强度乘以一个折损系数,此系数为0.75。三种理论得到的承载力与现场实测的结果误差均在15%以下,可采用布隆和迈耶霍夫简化的公式进行预测和设计。

图9 C_2/C_1 下的承载力系数Fig. 9 Bearing capacity factor under C_2/C_1

4 结论

1) 针对此种特有的淤泥质粉土, 水泥系固化效果比石灰的处理效果要好。对于水泥系固化剂和石灰系固化剂混合固化时, 强度可按指数形式进行预测。石膏添加时适宜以粉剂的形式进行添加, 以免水泥的初凝过快, 造成水泥管堵塞。

2) 采用 ALLU PMX 300 强力搅拌头系统就地固化处理方法进行处理, 搅拌时遇到较软土质时, 采用原位垂直上下搅拌固化式处理, 当搅拌装置无法直接搅拌时, 采用翻送分层固化式搅拌处理。

3) 就地固化处理后用标准贯入试验和静力触探试验进行预估地基承载力, 与现场试验结果相差 8% ~ 27%, 可用简便的现场试验预估地基的承载力结果。

4) 经就地固化处理形成的双层地基的上硬下软的地基, 取三种地基承载力系数确定的承载力与现场试验的地基承载力比较, 发现三种计算条件下的地基承载力与实测值误差均在 15% 以下。并且得到就地固化。

5) 本文主要将就地固化技术应用于低填土道路的浅层固化处理中, 但当高填土时, 承载力要求高或对工后沉降要求比较高时, 可将就地固化处理与复合地基组合应用处理。

参考文献:

- [1] 李建国. 地基处理换填法研究[J]. 建材世界, 2012, 33(6): 132 - 134.
- [2] 张波, 石名磊, 白世伟. 长江漫滩低路堤基底浅层固化层工作性状数值分析[J]. 岩石力学, 2007, 28(Z): 840 - 843.
- [3] 刘俊, 蒋宏伟. 固化剂 HSC301 应用于天津滨海软土地基浅层处理的探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2011(4): 46 - 51.
- [4] 戴文亭, 陈瑶. BS-100 型土壤固化剂在季冻区的路用性能试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2257 - 2262.
- [5] 丁建文. 水泥-磷石膏双掺加固处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2817 - 2823.
- [6] ROBERT B R. Concentrated liquid stabilizers for railroad applications[C] // Roadbed Stabilization and Ballast Symposium, Missouri; St. Louis, 2000(8-9): 349 - 365.
- [7] Al-RAWAS A A, HAGO A, and Al SARM H. Effect of lime, cement and sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman[J]. Build. Environ, 2005, 40(5): 681 - 687.
- [8] Tang C, Shi B, Gao W, Chen F, et al. Strength and mechanical behaviour of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clay soil[J]. Geotext. Geomembr, 2007, 25(3): 194 - 202.
- [9] 屈阳, 朱伟, 包建平. 衡阳平湖污染淤泥固化/稳定化技术的应用[J]. 环境科学, 2011, 34(6): 137 - 140.
- [10] 朱伟, 冯志超, 张春雷, 等. 疏浚泥固化处理进行填海工程的现场试验研究[J]. 中国港湾 (下转第 48 页)

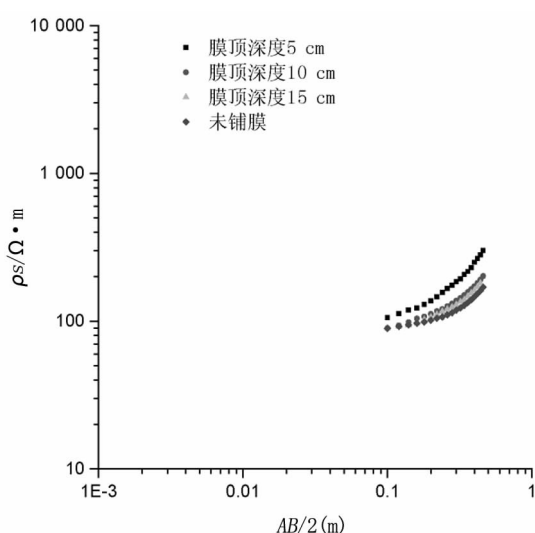


图5 膜顶深度不同工况电测深曲线

Fig.5 Electric sounding curves of models with different top depth of membrane

由不同膜底工况及其对比,可得出以下结论:随着探测深度不断地增加,当探测范围跨过土层分界位置处,视电阻率曲线表现出分层过渡的特性,这一点与水平多地层的常规电测深曲线类似;膜的存在使原本水平地层的电测深曲线的水平段变为具有一定斜率(梯度)直线段,膜底埋深越大,膜顶埋深越小,直线段的斜率越大,即视电阻率梯度越大。

3 结论

1) 直流电阻率法(电剖面法)进行断面扫描时,膜上方测点的视电阻率具有很明显的异常,说明膜的电阻率法检测在水平向上分辨率很高。

2) 由于防渗膜的存在,其正上方测点电测深

视电阻率出现显著异常,电测深曲线同水平层电测深曲线一样受土体分层影响表现出分段的特性,每一层表现为等斜率变化的直线。在采用高密度电法测深时可以根据膜位置处从上往下视电阻率梯度的变化规律分析土层分布,且视电阻率稳定变化带的梯度大小与膜的铺设位置存在对应关系。

参考文献:

- [1] 严斌. 垂直铺膜技术在防渗工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2002(5): 45-46.
- [2] 丁凯. 电场作用下土的粘性试验分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2010, 27(3): 14-17.
- [3] 万小旗, 姜兆起, 章恒. 电法测漏在垂直铺塑工程中的研究现状[J]. 科教文汇: 上旬刊, 2014(10): 104-105.
- [4] 宋克民. 垂直铺塑防渗帷幕之地球物理特性及其施工质量无损检测方法的实现[J]. 水利规划与设计, 2008(5): 26-28.
- [5] 郭秀军, 宋克民, 张晓培, 等. 利用双排列 CP 电阻率测试技术进行垂直铺塑施工质量检测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(18): 3266-3270.
- [6] 冷元宝, 黄建通, 张震夏, 等. 堤坝隐患探测技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003(3): 370-379.
- [7] 王兴泰. 高密度电阻率法及其应用技术研究[J]. 长春地质学院学报, 1991(3): 341-348.
- [8] 孙银行, 盖利亚. 直流电阻率法在水文地质调查中的应用[J]. 矿产勘查, 2014(1): 103-107.
- [9] 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 坑道直流电阻率法超前探测研究[J]. 地球物理学报, 2006(5): 1529-1538.
- [10] 雷宛. 工程环境物探教程[M]. 北京: 地质出版社, 2006.

(责任编辑 王利君)

(上接第44页)

建设, 2005(5): 27-30.

- [11] 吕文斌. 派酶土壤固化剂在道路工程中的应用研究[J]. 上海公路, 2010(1): 49-52.
- [12] 陈永辉, 王颖. 就地固化技术处理围海工程吹填土的试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 61-69.
- [13] NENAD JELISIC, MILLO LEPPNEN. Mass stabilization of organic soils and soft clay[C]//Proceedings, 3th Int. Conf. Grouting and Ground Treatment: 2003(2): 552-561.
- [14] 徐洋, 谢康和. 复合双层地基的极限承载力计算[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 82-86.
- [15] 秦会来, 黄茂松. 双层地基极限承载力的极限分析上限法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 611-616.

- [16] 杨果林. 含软弱下卧层的双层地基工程特性试验研究[J]. 工程勘察, 1998, 1: 1-5.
- [17] MERIFIELD R S, SLOAN S W. Rigorous plasticity solutions for the bearing capacity of two layered clay soils. Geotechnique 2001, 49(4): 471-490.
- [18] 张其一, 栾茂田. 复合加载情况下双层地基极限承载力研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1131-1135.
- [19] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [20] Chen W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. Amsterdam: Elsevier, 1975.

(责任编辑 李军)