

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.008



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 就地固化表层地基承载特性现场试验研究

王颖<sup>1a,2</sup>, 王朝杰<sup>1a</sup>, 胡振华<sup>1b</sup>, 陈永辉<sup>2</sup>, 肖洪天<sup>1b</sup>

(1. 山东科技大学 a. 交通学院; b. 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 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)

**摘要:**以浙江省31省道北延线绍兴市区路段地基处理为例,研究两种原位固化地基处理方式(ALLu强力搅拌头搅拌法和国产自制设备与ALLu强力搅拌头联合应用)的适用性及其处理效果,针对两种地基处理方式进行现场平板载荷试验、无侧限抗压强度试验、标准贯入试验和静力触探试验。为得到就地固化处理后地基应力和地基变形的规律,在地基处理路段布置土压力盒和沉降板进行现场监测试验。试验结果表明:与传统的换填法相比,就地固化处理后的地基承载力提高至少30%;固化养护龄期28 d时,原位固化土的无侧限抗压强度与室内无侧限抗压强度之比在0.35~0.65之间;标准贯入试验和静力触探试验均表明原位固化处理后地基土的强度提高,且计算的地基承载力与平板载荷试验实测结果相差不大,均可以作为就地浅层固化地基处理技术的检测指标;对两组路段的应力和附加应力系数进行分析发现,经原位固化形成的人工硬壳层具有较好的扩散应力作用。

**关键词:**道路工程;地基处理;就地固化;静载试验;地基承载力

**中图分类号:** TU472.3; U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)03-0009-07

## Field test on bearing characteristics of surface foundation by in-situ stabilization

WANG Ying<sup>1a,2</sup>, WANG Chaojie<sup>1a</sup>, HU Zhenhua<sup>1b</sup>, CHEN Yonghui<sup>2</sup>, XIAO Hongtian<sup>1b</sup>

(1a. College of Transportation; 1b. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, P. R. China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

**Abstract:** Based on the ground treatment of the north extension of No. 31 provincial road in the urban section of Shaoxing in Zhejiang Province, the feasibility and treatment effect of two methods, i.e., ALLu strong stirring head stirring method with homemade equipment and ALLu strong stirring head combined application, by in-situ curing foundation treatment were studied. Plate loading test, unconfined compressive strength (UCS) test,

**收稿日期:** 2021-11-08

**基金项目:** 山东省自然科学基金(ZR2019PEE044、ZR2021ME067);河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放基金(2019001)

**作者简介:** 王颖(1987-),女,博士,副教授,主要从事软基处理研究, E-mail: jiang101215@163.com。

胡振华(通信作者)男,博士, E-mail: huzh0804@163.com。

**Received:** 2021-11-08

**Foundation items:** Natural Science Foundation of Shandong Province (Nos. ZR2019PEE044, ZR2021ME067); Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University (No. 2019001)

**Author brief:** WANG Ying (1987-), PhD, associate professor, main research interest: soft soil foundation treatment, E-mail: jiang101215@163.com.

HU Zhenhua (corresponding author), PhD, E-mail: huzh0804@163.com.

standard penetration test and static cone penetration test were carried out, respectively. Meanwhile, in order to obtain the stress and deformation of the in-situ curing foundation, field monitoring was carried out by arranging the earth pressure box and settlement plate. The test results showed that the bearing capacity of foundation by in-situ curing were increased by at least 30% compared with the traditional replacement method. At 28 days of curing time, the ratio of UCS of curing soil in-situ to that of indoor value was 0.35-0.65. The bearing capacity of foundation was improved by standard penetration test and static cone penetration test, and the calculating bearing capacity were consistent with the measured results of plate loading test. The stress and additional stress coefficient of the two groups of road sections were analyzed, and the artificial crust layer had better effect on the diffusion stress, which can be used for detection of in-situ shallow stabilization in engineering practice.

**Keywords:** road engineering; foundation treatment; in-situ curing foundation; static test; bearing capacity of the foundation

随着公路、市政道路等工程建设的快速发展,东部沿海地区遇到了越来越多的软基加固和处理问题<sup>[1-3]</sup>。一方面,在道路施工时,如清淤、开挖换填等过程中会产生的大量废弃土,通常这些废弃土需采用开挖、运输以及征地堆放等方法处理,造成了土地资源浪费、污染环境等问题;另一方面,路基堤坝等工程又需要大量的优质填料和砂石垫层,这又需要进行开山采石或河道采砂等获取填料。随着对环保生态问题的日益重视和严格控制,这些优质填料日益紧缺、来源困难,造价逐年增加。对废弃土进行就地固化处理、实行土资源的循环利用,可缓解此矛盾。

在道路软基工程中,如果表面硬壳层缺失、河湖浜塘路段或者表层土强度较低时,可采用就地固化设备将表层软土进行就地改良和处理,形成一定厚度和强度硬壳层,这可称为就地固化硬壳层浅层处理方法。此方法形成的硬壳层的处理范围(硬壳层宽度)及强度与未处理前相比均有所不同,所以也可称为人工硬壳层。此技术可代替换填法对浅层软基进行处理,这在砂石垫层材料来源困难或者现场无法提供复合地基施工设备场地条件时具有明显的优势。目前对地基固化处理技术的主要关注点在固化剂的选型和固化处理效果方面<sup>[4-6]</sup>,对新设备的处理效果研究较少。在日本、欧洲等国家和地区,就地浅层固化技术在建筑基础改良、路基固化、软基处理、河道疏浚、堤防地基处理、有害物质封存等方面已经得到了广泛应用,并取得了较好的经济效益<sup>[7-8]</sup>。日本的浅层固化处理工艺主要有STB·SLM工法和STB-MC工法两类。STB·SLM工法施工过程包括:混合、临时碾压和养护、整平和碾压;STB-MC工法是Moist Cement工法的简称,它是将水泥以及水泥系列固化材料置于湿润水泥制造装置里令其保持湿润,是扬尘抑制型固化材料予以利用的地基改良工法。芬兰的ALLu强力搅拌

头系统已在欧洲国家大面积应用,并已经得到比较好的处理效果。ALLu地基稳定系统主要包含ALLuPM强力搅拌头、ALLuPM强力搅拌器和独立动力系统3个主要部分。ALLuPM强力搅拌头是一个多功能附具,安装在挖掘机上,其作用是有效地混合注入的稳定剂和软土地基。独立动力系统其实就是带自行底盘的ALLuPF压力输料罐车,由它将稳定剂(固化剂)注入到稳定区域。中国常用的设备挖机、路拌机、水泥搅拌桩改进的就地搅拌设备<sup>[9-10]</sup>与其他国家的设备相比处理效果较差,且就地固化处理深度方面也存在着一定的局限性;在就地固化形成硬壳层应用技术方面,王颖等<sup>[11]</sup>、陈永辉等<sup>[12-13]</sup>利用河海大学引进的ALLu强力搅拌头,并与中国自主研发的固化剂自动定量系统组合处理高含水率的吹填土,快速形成人工硬壳层,为施工设备提供场地,与真空预压或堆载预压相比较,大大节约了工程时间,具有良好的适用性和应用前景。

笔者采用就地固化处理技术,以浙江省31省道北延线绍兴市深厚软基路段进行就地固化处理为研究对象,结合现场静载试验、无侧限抗压强度试验、标准贯入试验和静力触探试验以及现场监测变形和应力,对两种就地固化处理(ALLu强力搅拌头搅拌法和国产自制设备与ALLu强力搅拌头联合应用)的效果进行了分析研究。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

选在浙江省31省道北延线绍兴市路段进行现场试验。项目为双向6车道,设双向7.0 m辅车道,同时兼顾城市道路功能的一级公路,设计速度80 km/h,道路宽度45.50 m。试验路段为K3+804~K3+854路段。

### 1.2 场地条件和设计

项目地点位于一般道路路段。自上而下的地基土剖面为:1.4 m的淤泥质黏土,17.7 m的泥质黏土,10.5 m的黏土。31省道土质概况见表1。如图1所示,两个断面的路堤厚分别为1.90 m和2.40 m,地基内有17.7 m深的软基。路基坡度为1:1.5(V:H)。采用两种不同的就地固化处理方式对该工程进行了处理。具体的处理方式和固化剂掺量见表2。该工程选用单一的P. O42.5的硅酸盐水泥,水泥的化学成分如表3所示,还有其他杂质。

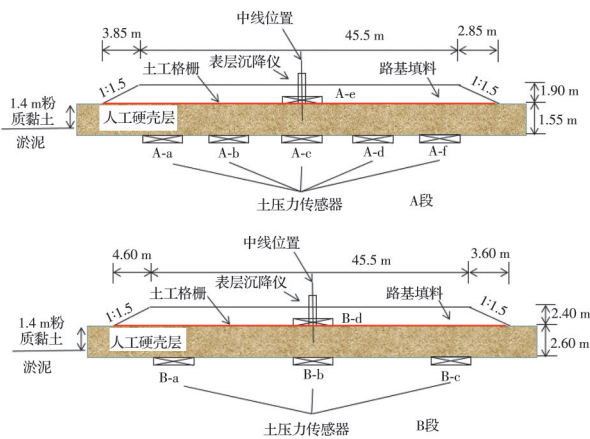


图 1 工程横断面图

Fig. 1 Cross-sectional drawing of the project

### 1.3 就地固化处理技术施工工艺

就地固化处理技术中最关键的施工工艺为将固化剂与原位废弃土就地固化处理形成具有一定强度的人工硬壳层。为了得到适宜且高效的施工工艺,采用两种不同的施工方法,分别为ALLu强力搅拌头搅拌法和国产自制设备与ALLu强力搅拌头联合应用,具体施工方法见表2。

ALLu强力搅拌头搅拌法:由于现场表层强度比较高,当使用ALLu强力搅拌头处理时,施工效率低,为了提高搅拌效率,一般需进行预翻松处理,然后采用上下垂直式固化处理和翻松分层固化处理

两种方式。

国产自制设备与ALLu强力搅拌头联合应用方法:ALLu强力搅拌头设备在处理比较硬的土质时,效率低,通常在单独使用时,需先进行预翻松;而自制设备可以处理比较硬的土质,但搅拌的均匀性有限,为了提高处理效率,提出利用两种方法混合使用的处理方法。以B段固化处理为例,具体方法:先利用国产就地固化搅拌设备以2%含量固化剂进行就地固化处理,达到土体预翻松的目的,完成一个区块后,利用ALLu强力搅拌头再次对该区域以剩余2%固化剂进行处理,并及时用预压设备进行预压,解决国产就地固化搅拌设备的缺点,提高固化土的强度。

## 2 现场试验

### 2.1 仪器类型及布局

土压力盒、沉降板等监测仪器按要求布置在地基中。土压力盒的布置位置如图1所示。在路堤中间放置一个沉降板,以测量地表沉降。

就地固化处理处理后,检测时间为人工硬壳层养护28 d后。经就地固化处理后形成具有一定强度的人工硬壳层,需对人工硬壳层强度及处理后双层地基的承载力和强度进行检测。

### 2.2 现场载荷试验

经就地固化处理后形成具有一定强度的人工硬壳层,使得地基变成上硬下软的双层地基模型。现场试验主要在不同的3种工况下进行试验,分别为传统的换填法:表面换填50 cm的素土;A段就地固化处理:用7%水泥处理1.55 m;B段就地固化处理:用4%水泥处理2.6 m,其中国产设备预先用2%水泥浆预处理,然后ALLu搅拌设备用2%水泥进行处理。

在对31省道北延线绍兴市区路段工程的K3+804~K3+854进行原地平板载荷试验<sup>[14]</sup>。试验装置见图2。

表 1 31省道试验段各层土特性

Table 1 Characteristics of soil layers in No. 31 provincial road test section

土层	厚度/m	含水率/%	重度/(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙率	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	承载力允许值/kPa
粉质黏土	1.4	32.9	1.86	0.95	4.45			120
淤泥	17.7	44.6	1.79	1.20	2.83	13	3.5	50
黏土	10.5	30.5	1.87	0.89	4.98	39	8.2	160

表 2 试验区试验设计

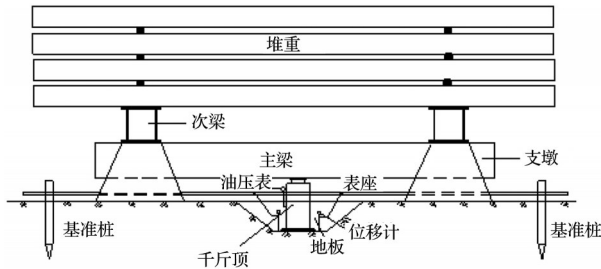
Table 2 Test design of test zone

起止桩号	段落编号	处理方式	固化设备	段落长度/m	掺量剂处理厚度
K3+804~K3+829	A	就地固化处理技术	ALLu 强力搅拌头	25	7%水泥固化剂浅层固化1.55 m
K3+829~K3+854	B	就地固化处理技术	国产就地固化搅拌设备;ALLu 强力搅拌头	25	4%水泥固化剂浅层固化2.60 m

表 3 水泥成分

Table 3 Cement composition %

SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI
21.42	59.68	4.69	5.21	0.19	0.62	2.31	0.92	1.23



(a) 示意图



(b) 现场图

图 2 静载试验装置

Fig. 2 Static load test device

图 3 为现场静载试验的结果。由图 3 可见,素土回填法、ALLu 强力搅拌头搅拌法、国产自制设备与 ALLu 强力搅拌头联合应用 3 种方法处理的地基极限承载力分别为 270、590.4、360 kPa。就地板块固化处理后的地基表面承载力均大于换填 50 cm 的优质土,就地板块固化处理两种情况比换填承载力分别提高了 119% 和 29.6%。对就地固化处理的场

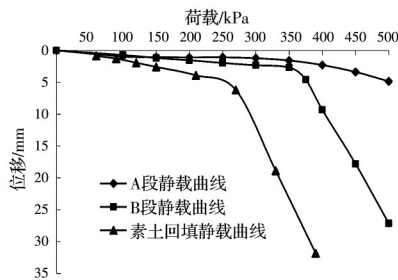


图 3 就地浅层固化静载试验曲线

Fig. 3 Static load test curve of in-situ shallow solidification

地现场钻孔取样进行无侧限抗压强度测定,得到的结果如下:7%水泥处理 1.55 m,28 d 平均无侧限抗压强度为 210 kPa,同配比同龄期下室内试验结果为 600 kPa;4%水泥处理 2.6 m,28 d 无侧限抗压强度为 124.74 kPa,同配比同龄期下室内试验结果为 200 kPa。现场无侧限抗压强度值与同配比同龄期下室内试验值的比值在 0.35~0.65 之间。产生偏差的原因在于:室内用搅拌机对水泥和土进行搅拌时搅拌较均匀,而且外界因素对搅拌过程影响较小,现场过程中用搅拌设备将土与固化剂进行混合搅拌时,由于地下水、温度以及搅拌设备搅拌均匀性的影响,导致现场固化土的无侧限抗压强度偏低。

由于荷载板的尺寸为 1.0 m,经计算可知影响范围并未超过处理区域,地基承载力均由硬壳层承担。可采用太沙基公式<sup>[15]</sup>进行理论计算,得到就地固化处理 1.55 m 的承载力为 647.6 kPa,与实测相差 9.6%;就地固化处理 2.7 m 后理论计算结果为 385 kPa,与实测相差 6.9%。

2.3 就地浅层固化人工硬壳层强度测试

2.3.1 标准贯入试验

图 4 为标准贯入试验现场施工图。表 4 是就地固化处理后不同深度标准贯入 30 cm 的锤击数。选用的测试点为现场随机选取的点,具有随机性。通过数据分析发现,锤击数随深度增大而变小,说明就地固化的处理效果随深度增大而变差,是因为搅拌过程水泥和土不能较好地混合均匀,同时由于地下水的影响,导致水泥的水化作用受到抑制,从而导致地基承载力随着深度增大而变小。

另外,由于表层位置处受外界温度的影响,固化土水分蒸发造成固化土含水量降低;水泥易吸收空气中二氧化碳发生碳化反应,在固化土内部形成碳酸钙填充物,提高了土体的强度;表层位置处喷浆压力较小,水泥与土的搅拌混合较好,水泥的水化反应充分,地基承载力最高。将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比较,两者相差 26.7% 和 8.9%。

表 4 标准贯入值与地基承载力之间的关系

Table 4 The relationship between standard penetration value and bearing capacity of foundation

试验点	贯入深度/m	固化剂含量/%	处理深度/m	龄期/d	标贯击数	地基容许承载力/kPa
A 段	0.50~0.95	7	1.55	28	26	374
	0.95~1.40	7	1.55	28	24	346
B 段	0.50~0.95	4	2.60	28	11	164
	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



图 4 标准贯入试验现场图

Fig. 4 The scene picture of standard penetration test

2.3.2 静力触探试验

图 5 是 28 d 时就地固化处理的平均静力触探比贯入阻力随深度的变化图,选用的测试点为现场随机选取的点,具有随机性,与标准贯入试验点不同。通过数据变化发现平均贯入阻力随深度的增大而变小,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触探比贯入阻力值均大于未处理的结果。

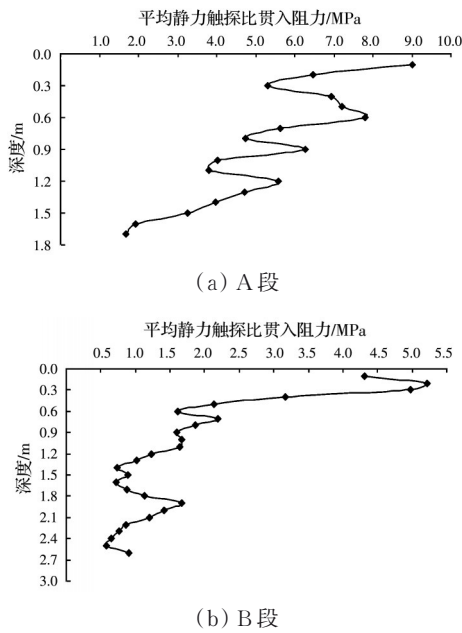


图 5 平均静力触探比贯入阻力随深度的变化图

Fig. 5 Preliminary study on the variation of specific penetration resistance with depth of average static force

根据静力触探结果,表层土位置处的地基承载力可采用《上海市岩土工程勘察规范》(DGJ 08-37—2002)推荐的经验公式

$$f_u = 0.070p_s + 32 \quad (1)$$

式中: $f_u$ 为地基极限承载力基本值,kPa; $p_s$ 为比贯入阻力,kPa。

根据图 5 中 A 段固化土 0.1 m 处的静力触探结

果( $p_s=9\ 020\ \text{kPa}$ )按式(1)进行计算,地基承载力基本值为 663.4 kPa,比布隆和迈耶霍夫<sup>[15]</sup>的地基承载力计算值低 1.6% 左右。根据图 5 中 B 段固化土 0.1 m 处的静力触探结果( $p_s=4\ 319\ \text{kPa}$ )进行计算,地基承载力基本值为 334.3 kPa,比布隆和迈耶霍夫的地基承载力计算值低 23% 左右,比现场试验测量值低 18% 左右。计算结果表明,可以利用此公式进行地基承载力的预估。

根据标准贯入试验和静力触探试验的结果与实测误差的差异可知,二者均可以作为就地浅层固化地基处理技术的检测指标。

2.4 土应力分布

分析就地固化处理后地基内的应力传递规律主要依据土压力随上覆荷载的变化。图 6 分别为在 A 段和 B 段地基土应力随填土高度的变化规律,发现地基土应力随着荷载的增加而增加。对比不同位置处的土压力变化,靠近中间位置处的土压力大于边界位置处的土压力。图 6(b)中 B-d 为地基表面的土压力,B-b 为硬壳层 2.3 m 位置处的路基中心点土压力。图 6(a)中 A-f 为地基表面土压力,A-e 为硬壳层 1 m 位置处的路基中心点土压力。从图 6(b)来看,B-d 和 B-b 的压力相差不大,后期 B-d 处的土压力甚至大于 B-b 处的土压力,之所以出现这种现象是因为人工硬壳层边界有限,硬壳层与黏性土边界接触位置易发生相互作用承担了部分上覆荷载,同时

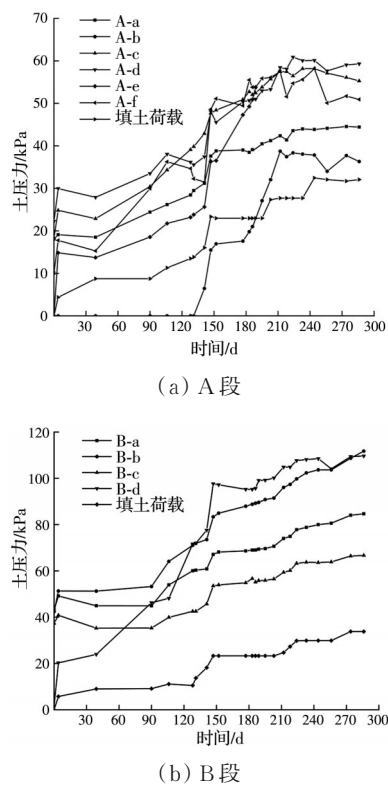


图 6 地基土应力历时曲线

Fig. 6 Stress diachronic curve of foundation soil

人工硬壳层具有较大的刚度将上覆荷载以一定角度向外扩散。同理可解释 A 段的 A-f 和 A-e 两处的现象。

图 7 为 B 段 B-b 土压力减去上覆硬壳层重度与 B-d 土压力的比值,为硬壳层 2.3 m 处的附加应力系数;图 8 为 A 段 A-c 土压力减去上覆硬壳层重度与 A-f 土压力的比值,即为硬壳层 1 m 处的附加应力系数。通过图中规律可以发现,附加应力系数与上覆填土压实度有关,上覆填土压实,附加应力系数降低,所以取最大的附加应力系数研究应力扩散现象。B 段 2.3 m 处的附加应力系数最大为 0.64;而 A 段硬壳层 1 m 厚度处的最大附加应力系数为 0.90。路面宽度为 45 m,根据应力扩散原理,硬壳层厚度越大,扩散效果越好。

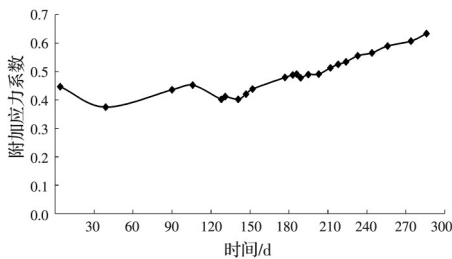


图 7 B 段 2.3 m 硬壳层处附加应力系数历时曲线

Fig. 7 Diachronic curve of additional stress coefficient of 2.3 m hard shell layer at section B

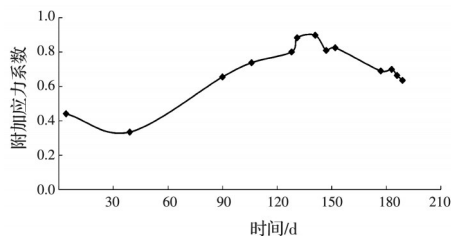


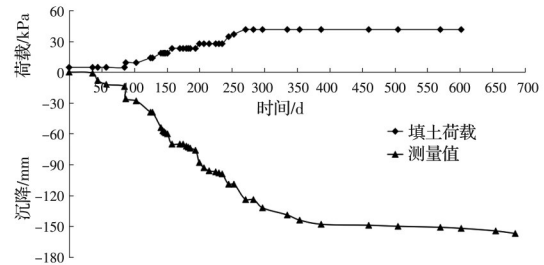
图 8 A 段 1.0 m 硬壳层处附加应力系数历时曲线

Fig. 8 Diachronic curve of additional stress coefficient of 1.0 m hard shell layer at section A

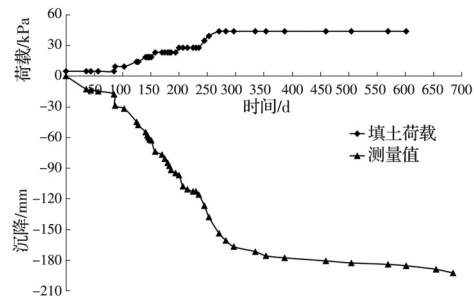
## 2.5 表层沉降

现场施工时,边界因机械设备的来回走动导致沉降板偏斜,主要对中间沉降板的沉降进行监测。公路工程规范要求的指标是工后 15 a 的沉降值,对表层沉降的监测无法持续预测 15 a,所以工后沉降采用的方法为依据部分的监测结果,总结出地基沉降固结的规律,即根据一段时间的实测沉降量,结合位移反分析方法,推算出方程的系数,依据沉降预测软件(河海大学的 SEP98)对工后沉降进行预测。通过图 9 沉降随填土荷载和时间的变化发现,地基沉降主要发生在填筑期,监测结束时,沉降的速率均低于 3 mm/月。监测开始时间为 2014 年 1 月,最近一次测量时间为 2016 年 1 月,路面施工 13

个月。B 段监测结束时的表面沉降为 20.1 cm,经软件预测可知通车 15 a 后的工后沉降为 11.6 cm,A 段监测结束时的表面沉降为 16.7 cm,经软件预测可知通车 15 a 后的工后沉降为 9.4 cm,均满足公路设计规范。



(a) A 段



(b) B 段

图 9 时间-荷载-沉降量关系

Fig. 9 Time-load-settlement relationship

## 3 结论

针对就地固化处理技术形成上硬下软的双层地基,通过开展静载试验、固化土强度试验及就地固化地基变形和应力分布现场监测试验,得到以下结论:

1)就地固化处理后的地基表面承载力均大于换填 50 cm 的优质土,就地固化处理后的地基承载力至少提高 30%;对就地固化处理的场地现场钻孔取样进行无侧限抗压强度测定,得到现场 28 d 无侧限抗压强度是室内 28 d 的无侧限抗压强度的 0.35~0.65 倍。

2)对现场不同深度处的固化土强度测定结果进行分析可知,就地固化形成的人工硬壳层表面强度高,并且将结果反映的表面承载力与实测承载力结果进行对比,误差比较小,可以作为就地浅层固化地基处理技术的检测指标。

3)对就地固化形成的地基进行变形和沉降监测,结果显示,沉降主要发生在填筑期,工后沉降和总沉降均满足公路设计规范。

## 参考文献

- [1] LIU H L, CHU J, DENG A. Use of large-diameter, cast-in situ concrete pipe piles for embankment over soft clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(8): 915-927.
- [2] 董志良, 张功新, 周琦, 等. 天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1073-1080.  
DONG Z L, ZHANG G X, ZHOU Q, et al. Research and application of improvement technology of shallow ultra-soft soil formed by hydraulic reclamation in Tianjin Binhai new area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 1073-1080. (in Chinese)
- [3] 郑俊杰, 张军, 马强, 等. 路桥过渡段桩承式加筋路堤现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 355-362.  
ZHENG J J, ZHANG J, MA Q, et al. Experimental investigation of geogrid-reinforced and pile-supported embankment at bridge approach [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 355-362. (in Chinese)
- [4] 方祥位, 李晶鑫, 李捷, 等. 珊瑚砂微生物固化体单轴损伤本构模型[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1234-1239.  
FANG X W, LI J X, LI J, et al. Damage constitutive model of biocemented coral sand columns under unconfined compression [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1234-1239. (in Chinese)
- [5] 涂兵雄, 胡舜娥, 刘士雨, 等. 水泥固化漳州滨海风积砂液化特征试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 402-408.  
TU B X, HU S E, LIU S Y, et al. Experimental study on liquefaction characteristics of cement solidified Zhangzhou coastal aeolian sands [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 402-408. (in Chinese)
- [6] 丁勇, 王鹏, 董雪花, 等. 水泥加固酸污染土无侧限强度特征[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 918-922.  
DING Y, WANG P, DONG X H, et al. Unconfined compressive strength characteristics of cement solidified acid-contaminated soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 918-922. (in Chinese)
- [7] JELISIC N, LEPPÄNEN M. Mass stabilization of organic soils and soft clay [C]//Third International Conference on Grouting and Ground Treatment. February 10-12, 2003, New Orleans, Louisiana, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2003: 552-561.
- [8] ISHIKURA R, YASUFUKU N, BROWN M J. An estimation method for predicting final consolidation settlement of ground improved by floating soil cement columns [J]. Soils and Foundations, 2016, 56(2): 213-227.
- [9] XIA W Y, DU Y J, LI F S, et al. In-situ solidification/stabilization of heavy metals contaminated site soil using a dry jet mixing method and new hydroxyapatite based binder [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 369: 353-361.
- [10] 丁飞鹏. 钻孔灌注桩泥浆的固化处理及其在路基填筑中的工程应用[J]. 城市道桥与防洪, 2018(5): 75-79, 11.  
DING F P. Solidified treatment of cast-in-situ pile slurry and its engineering application in subgrade filling [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2018(5): 75-79, 11. (in Chinese)
- [11] 王颖, 李斌, 陈永辉, 等. 强力搅拌头就地浅层固化地基承载特性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2016, 33(2): 39-44, 48.  
WANG Y, LI B, CHEN Y H, et al. Study of the characteristic of bearing capacity on mass stabilization of in-situ by using power mixing tool [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2016, 33(2): 39-44, 48. (in Chinese)
- [12] 陈永辉, 王颖, 程潇, 等. 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(Sup1): 64-69.  
CHEN Y H, WANG Y, CHENG X, et al. Experimental study of new technologies using in situ stabilization treating dredger fill of coastal reclamation project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (Sup1): 64-69. (in Chinese)
- [13] 陈永辉, 王颖, 李斌, 等. 表层土就地固化与桩组合承载的地基施工方法: CN105019422A [P]. 2015-11-04.  
CHEN Y H, WANG Y, LI B, et al. Foundation construction method for local solidification of topsoil and composite pile bearing: CN105019422A [P]. 2015-11-04. (in Chinese)
- [14] 岩土工程勘察规范: GB 50021—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
Code for geotechnical engineering survey: GB 50021—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [15] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.  
QIAN J H, YIN Z Z. Geotechnical principle and calculation [M]. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese)