

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.017

## 钢渣型复合基材在浅层软土固化中的应用\*

刘青云<sup>1</sup>, 李华安<sup>2</sup>, 孙信誉<sup>2</sup>, 丛松岩<sup>1</sup>, 朱健<sup>1</sup>, 邓永锋<sup>1</sup>

(1. 东南大学交通学院, 江苏南京 211189; 2. 浙江明仲建设工程技术有限公司, 浙江杭州 310015)

**摘要:** 浅层就地固化是软土地基处理的一项重要方向, 近年来在工程建设中得到较为广泛的应用。传统就地固化主要以水泥为主, 为了验证基于工业废料钢渣的复合系基材对不同软土地区浅层固化的效果, 通过改变钢渣、偏高岭土、生石灰等成分的配比, 在室内以无侧限抗压强度为指标, 探讨不同成分配比的基材对不同地区软土固化强度随含水率、复合基材掺量和龄期变化的影响; 此外, 将室内试验最优配比应用于现场试验, 在现场通过取芯测强度以及轻便动探评价承载力来验证复合基材对于浅层软土就地固化的效果, 并对室内和现场所造成的强度差异进行了对比分析。研究表明: ①基于钢渣的复合系基材能有效提高软土强度; ②固化后强度与基材掺量、龄期成正相关关系, 与含水率成负相关; ③在浙江湖州现场就地固化中, 复合基材掺量大于3%, 改性水泥与钢渣掺量比为1.2:1.8时, 可满足固化土强度和地基浅层承载力的要求; ④现场搅拌均匀性是影响室内与现场强度差异的主要原因。

**关键词:** 钢渣型复合基材; 浅层软土; 就地固化; 无侧限抗压强度

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0811-07

## Application of Steel Slag Composite in In-situ Solidification of Shallow Soft Soil

LIU Qingyun<sup>1</sup>, LI Huaan<sup>2</sup>, SUN Xinyu<sup>2</sup>, CONG Songyan<sup>1</sup>, ZHU Jian<sup>1</sup>, DENG Yongfeng<sup>1</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. Zhejiang Mingzhong Construction Engineering Technology Co. LTD, Hangzhou 310015, China)

**Abstract:** The in-situ shallow solidification of soft soil is an important issue of ground improvement, which has been widely used in engineering construction in recent years. For in-situ solidification, cement is the main agent. To recycle industrial wastes and control the project costs, the steel-slag, a kind of byproducts, was modified by cement, quick lime and metakaolin to form a new composite aiming to solidify the soft clay. The relationship between the unconfined compression strength of the improved soils and their water contents, binder component and contents, and curing periods was discussed. Furthermore, the optimal proportion was adopted in the field. In the field application, the strength of in-situ samples and dynamic cone penetration were used to evaluate the quality, the intensity difference between lab and in-situ experiments is compared and analyzed. The results show that: (1) The steel slag-based composite can effectively improve the strength of soft soil; (2) The strength was positively related with binder content and curing periods, whilst negatively related with water con-

\* 收稿日期: 2018-10-26; 修回日期: 2018-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572280)资助

作者简介: 刘青云(1994-), 女, 硕士研究生。主要从事地基处理方面的研究。Email: lqyseu@seu.edu.cn

通讯作者: 邓永锋(1978-), 男, 教授, 博士, 博导。主要从事土体基本性质与地基处理原理的研究。Email: noden@seu.edu.cn

tent; (3) In this case, when composite content is more than 3% and the ratio of MK-cement to steel slag is 1.2:1.8, the strength of solidified soils and bearing capability can both meet the design requirements; (4) The mixing uniformity is the main reason for the difference between lab and in-situ strength.

**Keywords:** steel slag-based composite; shallow soft soil; in-situ solidification; unconfined compression strength

## 引言

浙江湖州地区广泛存在着淤泥、淤泥质黏土等软土层,其含水量高、孔隙比大、压缩性高、强度低,在工程中易发生过度沉降、不均匀沉降、路堤整体失稳和桥头跳车等现象,安全系数低。在浅层换填或硬壳层形成时,软基处理厚度为2 m左右。为了满足工程需要,同时降低复杂性和成本,浅层就地固化是软土路基处理的可选方案。在浅层换填或形成硬壳层的工程实践中,将固化剂和软土进行就地搅拌,碾压形成硬壳层。固化剂中,粉煤灰、石膏、石灰等是重要的辅助材料<sup>[1-6]</sup>。

钢渣是炼钢过程中的一种工业副产品,经过1 350 °C转炉炼钢工艺形成,在浙江嘉湖地区产量丰富但利用率低,占场地且污染环境<sup>[7]</sup>。吴子龙等<sup>[8]</sup>研究发现钢渣的氧化物成分主要由CaO、SiO<sub>2</sub>等组成,并大多以硅酸二钙(C<sub>2</sub>S)和硅酸三钙(C<sub>3</sub>S)的形态存在,是一种类水泥基材料。钢渣在激发剂作用下具有良好的潜在胶凝特性,可取代水泥作为路基土的改性材料。在高性能混凝土行业中,偏高岭土(MK)常作为添加剂,其主要成分为活性Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,可与水泥的水化产物反应形成C-S-H等物质。将偏高岭土掺入到钢渣后,复合材料的胶凝性能显著提高<sup>[8]</sup>。另外,水泥的水解和水化新生成的化合物CAH可以在空气中逐渐硬化,提高软土的强度。赵余<sup>[9]</sup>和刘倩雯<sup>[10]</sup>的研究发现,MK与水泥在1:3.3时复合改性效果最好。为此本研究中MK与水泥比例参照赵余等<sup>[9-10]</sup>的结果进行确定,形成的材料简称改性水泥。此外,在软黏土中加入生石灰,能有效降低软土含水量和亲水性<sup>[11-13]</sup>。钢渣就地取材,不仅可以降低水泥固化的成本,同时还能实现钢渣的废物高效利用,满足经济、环保和工程的三重需求。因此,开展钢渣型复合材料在浅层固化应用实践具有重要的工程价值和意义。

基于上述考虑,本文首先开展室内研究,探讨

钢渣、偏高岭土、生石灰以及水泥对软土改性的效果,明确关键影响因素,以室内无侧限抗压强度为检测指标确定各固化基材的最优配比<sup>[14-15]</sup>,然后将该配比应用于湖州工程现场。现场实施后,通过UCS无侧限抗压强度(取芯)以及轻便动探击数两种指标评价钢渣型复合材料对于浙江湖州地区软土就地固化的效果。最后,对比分析室内与现场强度的差异,总结折减系数,分析差异的原因。

## 1 试验材料与方案

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 软土

本研究所取三种土样位于G25长深高速德清至富阳扩容湖州段及G25德清至G60桐乡高速联络线湖州段。该软土具有含水量高、孔隙比大、压缩性高、强度低、固结慢等特点,路基填筑前需进行浅层固化处理。本研究固化深度为1.8 m,要求地基承载力为100 kPa、现场固化土样无侧限抗压强度要求为80 kPa。三种土样的基本物理力学性质指标见表1。

表1 土样的基本物理性质指标  
Table 1 Basic physical properties of soils

土样	天然含水率/%	天然密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	液限/%	塑限/%
湖州淤泥	56.0	1.66	45.8	25.3
德清淤泥1	73.5	1.60	52.7	29.1
德清淤泥2	31.7	1.87	37.6	21.6

注:表中物理性质指标取平均值

#### 1.1.2 钢渣

试验所用钢渣来自嘉兴东方特钢,天然含水率为24.6%,比重为3.3,自然晒干之后过0.25 mm筛。对钢渣进行X射线荧光光谱试验,化学成分见表2。

表2 试验用嘉兴钢渣化学成分

Table 2 Chemical composition of the steel slag from Jiaxing

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	其他
含量/%	48.8	27.9	2.1	1.7	8.3	3.3	6.3

备注:其中有1.6%烧失

### 1.1.3 水泥

传统的软土固化中,水泥是一种重要的胶凝材料,用于提高软土的强度。本试验用水泥为海螺牌P.O42.5#水泥,研究中将水泥用量控制在2%~4%,以实现强度时减小工程造价。X射线荧光试验确定的水泥化学成分见表3。

表3 试验用水泥化学成分

Table 3 Chemical composition of cement used in the test

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	其他
含量/%	58.3	22.8	6.9	3.1	2.7	1.8	2.4

备注:其中有2%烧失

### 1.1.4 偏高岭土(MK)

本研究用偏高岭土为3 000目,购于德国巴斯夫。偏高岭土(简称MK)具有丰富的活性铝相,可起到弥补钢渣中铝相成分较少这一现象,进而提升钢渣活性,其化学成分见表4。

表4 试验用偏高岭土化学成分

Table 4 Chemical composition of MK used in the test

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	其他
含量/%	52	40	1.0	2.5	0.8	3.4

根据赵余<sup>[9]</sup>研究,偏高岭土与水泥掺量比在1:3.3时,固化软土效果最佳,因此本实验中将水泥与MK比例固定在3.3:1,并将其称为改性水泥。

### 1.1.5 生石灰

生石灰主要成分为CaO,在空气中可吸收水和二氧化碳。由于软土地区含水率较高,加入少量生石灰,可以实现降低软土含水率和亲水性的效果,进而提高固化效果。参照以往经验,本研究中生石灰掺量固定为湿土的0.3%。

## 1.2 试样制备和养护

由于三种软土的含水率和液塑限不同,本研究采用了静压法和振捣法两种制样方法。含水率低的淤泥通过静压法制件,当含水率过大超过土样的液限,土将处于流动状态,则采用振捣法制件<sup>[15]</sup>。

静压法是采用预定的干密度利用反力框架和液压千斤顶将混合土样压入试模中,其中加入混合土料的数量,按预定的干密度和容积计算。

$$m = \rho V(1 + 0.01w) \quad (1)$$

式中, $m$ 为每个试样的质量; $\rho$ 为土样预定湿密度; $w$ 为土样含水率; $V$ 为试模的容积,由于试件为 $\Phi 50 \times 50$  mm, $V$ 为98.125 cm<sup>3</sup>。本实验中湖州淤泥土(A组)与粉质黏土(C组)均采用了静压法制样,制样密度统一按1.85 g/cm<sup>3</sup>控制。

振捣法(锤击法)与静压法不同的是运用人工PVC聚乙烯管材振捣法制样。将称好的每个试样装入 $\Phi 50 \times 100$  mm的PVC管中,将试样高度控制在50 mm,由此得到的试件尺寸与静压法一样,均为 $\Phi 50 \times 50$  mm。振捣法制成的试样在标准养护室养护1~2 d可脱模,拆模后装入密封袋中,继续标准养护至设计龄期。本研究中由于德清淤泥2采用振捣法制样。养护结束后进行无侧限抗压强度试验,实验设备采用南京土壤仪器厂生产的无侧限抗压强度试验仪,控制加载速度为1 mm/min。

## 1.3 试验设计

为了考察复合基材对浅层软土就地固化的效果,采用无侧限抗压强度试验对不同龄期、不同掺量固化剂的土样进行了试验<sup>[16-17]</sup>。试验方案如下:以湖州土和德清土的天然含水率为基础,直接向土中加入钢渣复合基材。其中,复合基材占湿土的3%和12%,其中,水泥与MK的比例控制在3:1,生石灰占湿土的0.3%。三种土样设置的配比见表5。为了进一步明确固化土强度与初始含水率的关系,加水使C组含水率达到56%(即与A组相同)。

## 2 试验结果及分析

对软土含水率、复合基材及其掺量和龄期对固化土强度规律的影响进行分析。

### 2.1 含水率的影响

德清淤泥2天然含水率为31.7%,为了明确含水率对固化土强度的影响,加水使初始含水率为56%(与湖州淤泥相同),经固化养护后(龄期为3 d, 7 d, 14 d, 28 d),开展无侧限抗压试验,试验结果如图1所示。结果表明:当含水率大于液限时,土呈现流动状态,试样制备由静压法变成振捣法,强度也

表5 各组试验配比

Table 5 Proportion of solidified soils in the tests

土样	组别	含水率/%	复合基材含量/%	改性水泥: 钢渣
湖州淤泥	A	56.0	3	1.0:2.0
				1.2:1.8
				1.4:1.6
				3.3:8.7
德清淤泥1	B	73.5	12	4.2:7.8
				4.5:7.5
				4.6:7.4
				5.0:7.0
德清淤泥2	C	31.7	3	0.8:2.2
				1.0:2.0
				1.2:1.8
德清淤泥2	D	56.0	3	0.8:2.2
				1.0:2.0
				1.2:1.8

没有较大增长<sup>[18-19]</sup>。对于同一种软土,加入固化剂掺量均为3%时,C组31.7%含水率的德清淤泥2固化后的28 d无侧限抗压强度最高达214 kPa;初始含水率为56%时,同等掺量下的28 d无侧限抗压强度仅为45 kPa。含水率的增加直接导致土的强度降低;当含水率超过液限,强度急剧下降。

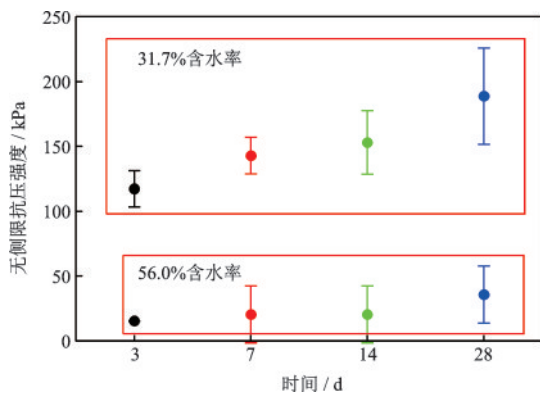


图1 不同含水量软土固化强度对比(3%掺量)

Fig.1 Comparison of solidification strength of soft soil at different water contents

### 2.2 复合基材掺量的影响

参照德清淤泥2,在未掺入复合基材固化之前,场地取样进行室内试验,测得无侧限平均抗压强度为30 kPa,加入以钢渣为主的复合基材后,水泥土的28 d无侧限平均抗压强度达到190 kPa。

以固化土28 d强度为例,不同配比的基材掺量对强度影响较大,且强度与水泥掺量成线性关系,如图2所示。在总的复合基材掺量相同时,改性水泥含量越多,强度越高,固化效果越好。从工程经济角度出发,为了节约水泥,充分利用工业废料钢渣,综合强度结果,当土:改性水泥:钢渣:生石灰的配比为1:0.012:0.018:0.003时,28 d强度可达到150~220 kPa,完全满足设计强度要求的80 kPa。

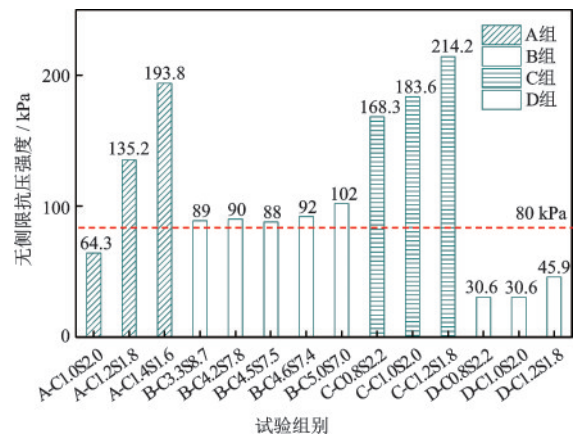


图2 不同改性水泥与钢渣掺量28 d强度

Fig.2 28 day's strength of soil samples with different composite components

### 2.3 龄期的影响

以湖州淤泥、德清淤泥1和德清淤泥2为对象,测得3 d、7 d、14 d和28 d的强度,如图3~4所示。强度在0~3 d增长迅速,3 d时基本达到28 d强度的50~60%,3~7 d阶段强度增长10%左右,基本在

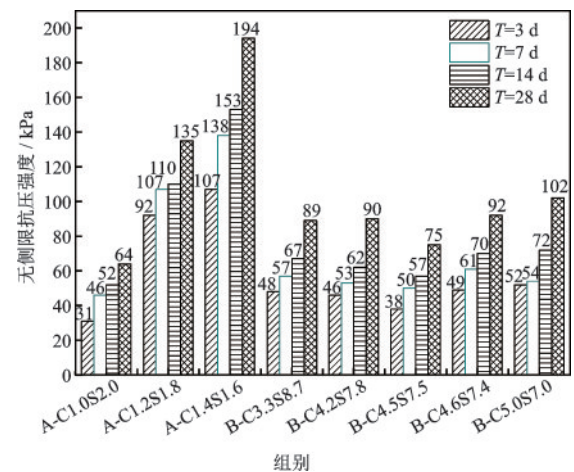


图3 A/B组不同配比下不同龄期强度

Fig.3 Strength of A/B group with different composite contents

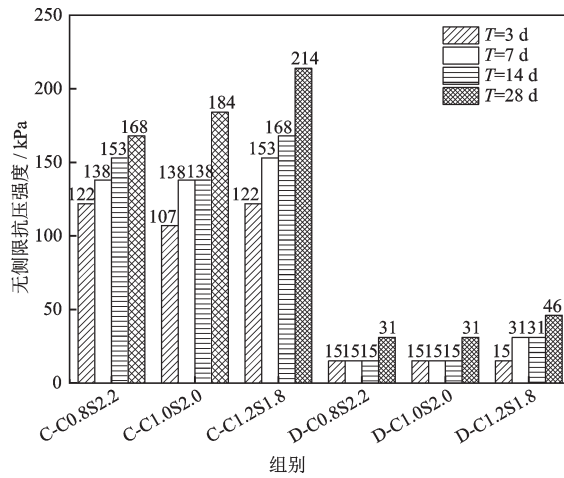


图4 C/D组不同配比下不同龄期强度

Fig.4 Strength of C/D group with different composite contents

7 d时强度能达到28 d强度的70%。

### 3 现场应用

#### 3.1 现场就地固化施工流程

将室内试验最优配比的基材(改性水泥:钢渣为1.2%:1.8%)应用于现场,进行浅层软土就地固化。固化土施工的基本流程:松土转土—掺入固化剂—挖机搅拌(专用原位搅拌设备搅拌)—打堆闷料—覆膜养护—回填碾压—整型养护。

#### 3.2 取芯测 UCS 强度

将室内试验最优配比应用于现场中,并在现场取芯做无侧限抗压强度试验。根据现场条件,在现场共选出8个点位进行取芯。考虑现场取芯深度的不同,按照深度分为上层土、中层土、下层土,每层土均取一块土样,因此共取土样24块,各点位深度平面如图5所示。

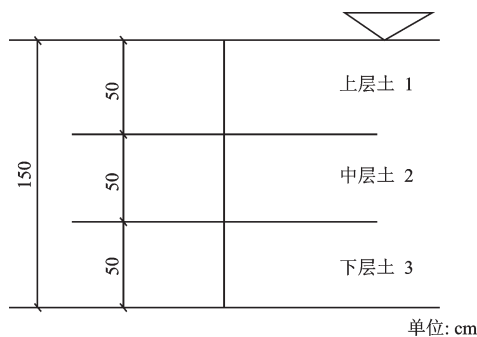


图5 各点位深度平面

Fig.5 Depth of sampling points

取芯完成后,在室内进行切样成直径为50 mm、高为50 mm的圆柱形试样,如图6所示。



图6 室内切样

Fig.6 Sample cutting

8个点位取出的24个土样实测无侧限抗压强度如图7所示。现场取芯,室内测无侧限抗压强度的土样平均强度达到91 kPa。根据取芯层位不同,现场0~50 cm内,土样经固化后强度的平均值为109 kPa;50~100 cm内,土样强度平均值为86 kPa;100~150 cm内,土样强度平均值为80 kPa。此值与之前室内试验结果有一定差距,主要原因为现场搅拌均匀性、养护条件差别以及现场块状取样的扰动。

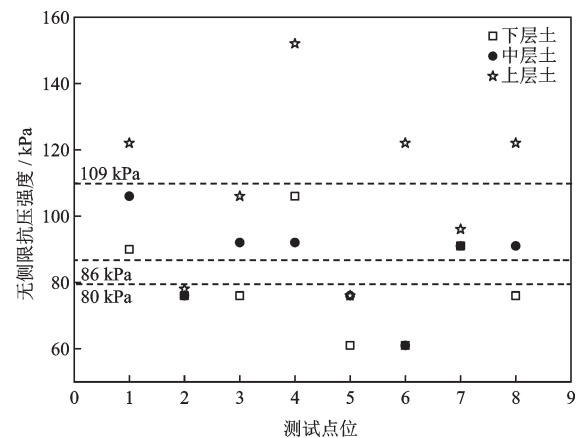


图7 现场芯样无侧限抗压强度

Fig.7 UCS of in-situ samples

#### 3.3 轻便动探承载力评价

圆锥动力贯入仪是一种轻便的地基土原位测试触探仪。根据圆锥动力触探试验规程(YS5219—2019)<sup>[19]</sup>,轻型动力圆锥贯入仪锤重为10 kg,落距为500 mm,探头直径为40 mm,锥角为60°,探杆直径为25 mm,适用于一般的黏性土和素填土地基评价,贯入深度不大于4.0 m。根据《铁路工程地质原

位测试规程》(TB10018—2018)<sup>[20]</sup>, 轻型动力触探仪的地基承载力计算有以下公式:

$$N_{ak} = 8N - 20$$

式中,  $N_{ak}$  为地基承载力(kPa);  $N$  为 300 mm 贯入击数(次)。

在湖州现场部分试验段进行轻便动探测试, 其中试验段长度为 23 m, 宽度为 21 m。由于场地固化深度为 1.5 m, 选取了 15 个点检验固化效果, 每点间隔长为 4.6 m、宽为 4.2 m, 均匀分布。测点位平面布置如图 8 所示。

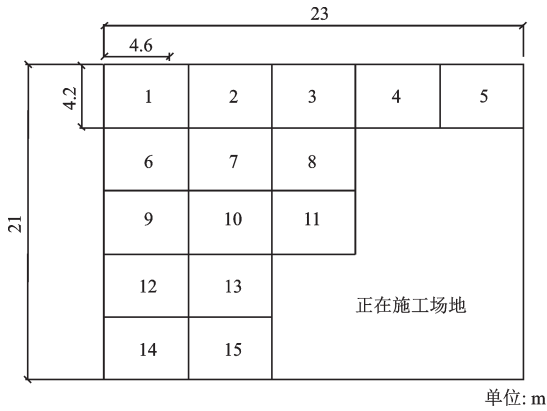


图 8 DCP 测点平面位置分布  
Fig.8 Distribution of DCP points

在现场轻便动探测试的 15 个点位中, 场地平均承载力为 174 kPa, 其中 0~30 cm 层平均承载力为 183 kPa, 30~60 cm 层平均承载力为 178 kPa, 60~90 cm 层平均承载力为 168 kPa, 90~120 cm 层平均承载力为 171 kPa, 120~150 cm 层平均承载力为 168 kPa。如图 9 所示, 轻便触探预估承载力 80% 分布在 150~210 kPa, 12% 的点位承载力低于 150 kPa, 8% 的点位承载力高于 210 kPa。其中现场最低承载力为 116 kPa, 最高承载力为 244 kPa。

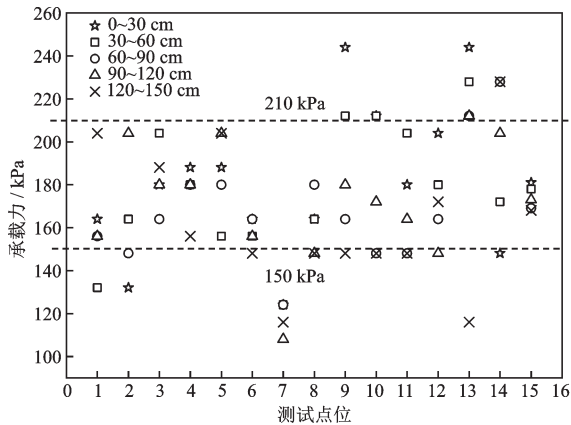


图 9 动力触探预估承载力  
Fig.9 Evaluation of bearing capacity by DCP

### 3.4 室内外强度差异分析与改进

室内试验无侧限抗压强度平均值为 190 kPa, 现场取芯实测无侧限抗压强度平均值为 91 kPa, 轻便动探预估场地平均承载力为 174 kPa; 两种条件下三种测试方法的强度存在较大的差异, 尤其是现场取芯与室内试验强度差异明显。分析此现象的原因主要有:

(1) 养护条件不同。室内制样在养护期间按照规范要求严格控制温度、湿度等指标, 而在现场养护条件不均等引起的问题均会造成强度差异。

(2) 取样扰动影响。在现场取芯装入取样箱并用泡沫板密封, 但仍然会存在运输距离长导致土样扰动, 结构性被不同程度的破坏, 从而降低土样强度。

(3) 搅拌均匀性差异。现场取芯所测无侧限抗压强度最高值为 152 kPa, 最低 63 kPa, 且无侧限抗压强度随着固化深度的增加而降低, 离散性大, 说明现场搅拌均匀性差异较大, 导致现场不同位置处固化剂掺量不一致, 这是引起室内与现场强度差异的主要原因<sup>[20]</sup>。

(4) 鉴于搅拌均匀性对强度差异影响较大, 在现场施工过程中可采用优良的施工机械设备, 增加软土与固化剂的接触和扩散; 严格控制施工工艺, 注重工后养护以及防水措施; 采用有效的检测手段减少由于搅拌不均匀所造成的强度差异, 及时检测并优化施工。

## 4 结 论

根据浙江湖州地区现场就地浅层固化这一工程, 因地制宜, 提出采用钢渣型复合基材进行固化改性这一思路, 开展了一系列室内试验, 并进行了现场应用和评价。主要结论如下:

(1) 根据当地具有潜在胶凝特性的材料进行成分调控, 能有效用作浅层固化土的改性固化材料。

(2) 固化土强度与软土性质、水泥掺量、含水率和龄期  $T$  等均有关。其中, 水泥掺量和龄期与固化软土性质成正相关的关系; 含水率与强度成负相关关系。浅层固化中, 强度迅速增长阶段主要在 0~7 d, 完成了 28 d 龄期内增长值的 70% 左右。

(3) 对比室内和现场固化土强度, 现场强度约为室内强度的 0.6~0.8 倍, 这与搅拌均匀性、养护条

件以及现场取样扰动等因素相关。

(4)轻便动力触探DCP能够快速评价现场浅层固化土的强度和承载力特征。

## 参考文献:

- [1] 徐日庆,李俊虎,蔡承晟,等.用固化剂GX08加固杭州海湖相软土的强度特性研究[J].岩土力学,2014,35(6):1 528-1 533,1 554.  
Xu R Q, Li J H, Cai Ch Sh, et al. Study of strength characteristics of stabilized soil by using stabilizing agent GX08 treating marine and lacustrine soft soil in Hangzhou[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(6):1 528-1 533, 1 554. (in Chinese)
- [2] 张凯,黄煜镔,王润泽,等.淤泥质软土固化理论研究与进展[J].路基工程,2012(6):1-6.  
Zhang K, Huang Y B, Wang R Z, et al. Theoretical research and progress on solidification of silty soft soil[J]. Subgrade Engineering, 2012(6):1-6. (in Chinese)
- [3] 郭印.淤泥质土的固化及力学特性的研究[D].杭州:浙江大学,2007.  
Guo Y. Study on the solidification and mechanical properties of silty soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [4] 匡志平,胡坚慰.人造硬壳层软土地基处理法的试验研究和理论分析[J].防灾减灾工程学报,2007,27(2):147-152.  
Kuang Zh P, Hu J W. Theoretical analysis and experimental investigation of artificial hard crust reinforcement[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007,27(2):147-152. (in Chinese)
- [5] 王颖,陈永辉,程潇,等.就地固化技术处理道路浅层软基的试验研究[J].上海建设科技,2016(2):29-32.  
Wang Y, Chen Y H, Cheng X, et al. Experimental study on the treatment of road shallow soft foundation by local solidification technology [J]. Shanghai Construction Technology, 2016(2):29-32. (in Chinese)
- [6] 丁泉.软土地基浅层固化在低路堤公路中的应用研究[D].南京:东南大学,2011.  
Ding Q. Application of soft soil subgrade solidification in low embankment highway [D]. Nanjing: Southeast University, 2011. (in Chinese)
- [7] 高本恒,郝以党,张淑苓,等.钢渣综合利用现状及发展趋势[J].环境工程,2016(增1):776-779.  
Gao B H, Hao Y D, Zhang Sh L, et al. Current situation and development trend of comprehensive utilization of steel slag [J]. Environmental Engineering, 2016 (Sup1):776-779. (in Chinese)
- [8] 吴子龙,朱向阳,邓永锋,等.掺入钢渣与偏高岭土水泥改性土的性能与微观机制[J].中国公路学报,2017,30(9):18-26.  
Wu Z L, Zhu X Y, Deng Y F, et al. Behavior and micro-mechanism of cement-based modified compaction soil composed of steel slag and metakaolin [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017,30(9):18-26. (in Chinese)
- [9] 赵余.废弃钢渣的硅系与复合系激发及其在固化土中的应用[D].南京:东南大学,2017.  
Zhao Y. Excitation of silicon system and composite system of abandoned steel slag and its application in solidified soft soil [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [10] 刘倩雯.钢渣的成分增补和激发与再生利用效能提升[D].南京:东南大学,2016.  
Liu Q W. The addition and enhancement of excitation and regeneration efficiency of steel slag [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [11] 陈玉香,李璐.复掺偏高岭土-钢渣对再生混凝土性能的影响[J].混凝土,2017(1):82-85.  
Chen Y X, Li L. Effect of metakaolin mixed with steel slag on properties of recycled concrete [J]. Concrete, 2017(1):82-85. (in Chinese)
- [12] 张卫姗,王忠杰,宋信才.生石灰在处理软土地基的应用[J].科技与企业,2011(14):176.  
Zhang W Sh, Wang Zh J, Song X C. Application of quicklime in treatment of soft soil foundation [J]. Science Technology and Enterprise, 2011(14):176. (in Chinese)
- [13] 林彤,刘祖德.粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J].岩土力学,2003,24(6):1 049-1 052.  
Lin T, Liu Z D. Study on indoor tests of fly ash and quick lime improving soft soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(6):1 049-1 052. (in Chinese)
- [14] 李琴,蒋卓吟,张春红.固化泥炭土无侧限抗压强度试验研究[J].硅酸盐通报,2017,36(2):686-691.  
Li Q, Jiang Zh Y, Zhang Ch H. Curing peat soil unconfined compressive strength tests [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2017,36(2):686-691. (in Chinese)
- [15] 公路土工试验规程:JTG E40—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.  
Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG E40—2007[S]. Beijing: China Communication Press, 2007. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)

(下转第827页)