

DOI:10.12170/20191213001

杜旭青, 翁佳兴, 别学清, 等. EHP工法桩强度性状试验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2020(6): 94-100. (DU Xuqing, WENG Jiaying, BIE Xueqing, et al. Experimental study on the strength behavior of EHP[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(6): 94-100. (in Chinese))

EHP工法桩强度性状试验研究

杜旭青¹, 翁佳兴², 别学清², 宋苗苗³, 邱成春³, 李 辉⁴

(1. 淮委治淮工程建设管理局, 安徽 蚌埠 233001; 2. 江苏鸿基水源科技股份有限公司, 江苏 扬州 225002; 3. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051; 4. 江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225000)

摘要: 针对实际工程应用中水泥土搅拌桩出现的桩身强度分布不均匀、成桩质量差等问题, 对传统的边钻进边搅拌施工工艺进行改进。改进的水泥土桩采用钻孔外预先搅拌均匀水泥土浆液, 再边钻孔边浇筑的施工工艺, 从而形成一种性质可调控的新型环保均质塑性桩体 (Environmental Homogeneous Plastic Pile), 即 EHP 工法桩。通过对现场取芯样和室内方法制备水泥土试样开展一系列的无侧限抗压试验, 并结合桩体芯样剖面物质组成分析, 对 EHP 工法桩的强度特性进行了研究。建立了不同形状水泥土试样强度间的定量关系, 通过引入强度折减系数对改进施工工艺现场制备桩体强度的折减幅度进行分析。结果表明: 改进施工工艺制备的水泥土桩桩身均匀性和桩体强度均优于传统施工工艺制备的水泥土桩, 且有效地基加固深度明显增大; 和室内标准养护试样相比, 不同施工工艺制备的水泥土桩, 均出现一定程度的强度折减; 对于 EHP 工法桩, 桩体强度折减系数随水泥掺量的增加而减小, 在 0.55~0.75 范围内变化; 和传统施工工艺制备的水泥土桩相比, EHP 工法桩的强度降低幅度相对较小, 具有更优良的承载能力。

关键词: 水泥土桩; 施工工艺; 无侧限抗压强度; 桩身均匀性; 桩身强度折减

中图分类号: TU43 文献标志码: A 文章编号: 1009-640X(2020)06-0094-07

水泥土搅拌桩是采用特制的搅拌机械将地基土与水泥强制搅拌在一起, 通过发生一系列的理化反应, 生成水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)等胶结材料, 形成具有一定强度、水稳性和整体性的桩体^[1]。由于水泥土搅拌桩加固技术具有施工简单、快速、造价低等优点, 在我国港口、道路、堤防等工程的软土地基处理中得到了广泛应用^[1-2]。随着水泥土搅拌桩在实际工程中的大量应用, 其弊端也逐渐显现, 主要集中在桩身质量难保证、加固深度浅等方面, 不能满足工程建筑的要求。尤其在复杂深厚多层地基土、沿河海等淤泥土质环境中, 这些问题更为严重^[3-6]。针对上述问题, 本文提出一种改进的水泥土桩施工工艺, 并将其应用于淮入海水道五河大桥接长工程地基加固中。对现场取芯样和室内制备试样开展无侧限抗压试验, 基于试验结果对不同施工工艺制备桩体的强度特性进行研究。通过比较不同形状试样和取芯样的无侧限抗压强度 q_u , 引入强度折减系数 R_p 对 EHP 工法桩的强度进行评价。研究结果可为 EHP 工法桩施工工艺的优化及其推广应用提供指导。

1 试验方案

1.1 EHP工法桩施工工艺

采用 EHP 工法制备水泥土桩时, 水泥土拌合物的泵送性能是影响施工效率的重要因素。由于目前国

收稿日期: 2019-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808481, 51978597); 淮水水利委员会治淮工程项目(HGBF-QT-41); 江苏省水利科技项目(2015068)

作者简介: 杜旭青(1962—), 男, 河北唐山人, 正高级工程师, 主要从事水利工程软基加固方面的研究。

E-mail: heartArctic@163.com 通信作者: 宋苗苗(E-mail: songmiaomiao12@126.com)

内尚无关于水泥石拌和物流动性能测试的相关试验规程,故在 EHP 工法桩施工前将参照丁建文等^[7]测定固化疏浚泥流动性的方法,测定不同水泥掺量下现场用水泥石拌合物的流动度,结果如图 1 所示。相同含水率下,不同水泥掺量拌合物的流动度相接近。当水泥石拌合物含水率小于 42% 时,随含水率的增加拌合物的流动度增大较小。当含水率大于 42% 后,水泥石拌合物的流动度随含水率的增加呈近似线性大幅增大。根据流动度试验结果,在现场开展多次水泥石泵送试验,发现当含水率小于 43% 时,水泥石拌合物泵送过程中经常会出现堵管现象。故本研究中 EHP 工法桩施工时,以含水率 43% 作为拌合物流动性能满足泵送要求的标准。此外,由流动度试验结果可知,含水率为 43% 时不同水泥掺量拌和物的流动度约为 13 cm,均小于疏浚泥流动固化施工建议的下限值 16 cm。这表明在 EHP 工法桩施工前,可根据水泥石拌合物流动度随含水率变化曲线上的拐点,确定满足泵送要求的目标流动度和最优含水率。

确定好满足泵送要求的水泥石拌合物目标流动度后,即可进行 EHP 工法桩的制备。具体工艺如下:(1)机械就位;(2)水泥石拌合物的制备。采用质量控制法控制搅拌后的含水率,即事先量测挖土机 1 次挖土的质量,根据该质量计算所需添加的水及水泥的质量。每次投料后,搅拌机搅拌 10 min 以上,确保拌合物搅拌均匀;(3)水泥石拌合物流动性检测。当水泥石拌合物搅拌均匀后,迅速从搅拌桶中取少量水泥石拌合物进行流动度测定。如果测定值偏离目标值超过 10% 时,需进行流动性调整;(4)提钻注浆。在水泥石拌合物搅拌的同时,长螺旋钻机开始钻进取土。钻进过程中,控制钻进速率,尽量保证当长螺旋钻机钻头达到指定土层深度时,水泥石拌合物搅拌均匀且达到泵送要求。在注浆过程中,控制长螺旋钻头的提升速率小于注浆速率。如出现堵管等现象,应立即停止钻头的提升,待堵管问题解决后,再重新提升钻头;(5)弃土清理。当长螺旋钻头提升至地表时,桩体浇筑完成。此时将产生与桩体体积相等的弃土,由于螺旋钻杆带出的地基土含水率较高,需先经晾晒处理,才可继续用于后续施工。

1.2 试样制备及试验方法

为明确 EHP 工法桩的强度性状,本次试验研究所用试样包括三类:①现场取芯样,在淮河干流五河大桥接长工程软土加固区外围,分别采用传统施工工艺和改进施工工艺制备水泥石桩。其中 EHP 工法桩的水泥掺量分别为 8%、10% 和 13%,传统施工工艺制备的水泥石桩(MIP 桩)的水泥掺量为 13%。在成桩 28 d 后,采用内径为 7.6 cm 的水泥石钻芯取样机械钻取芯样。将桩身深度 0、2、4、6、8、10 和 12 m 共 7 个深度的芯样取出,装入密封袋中并采用透明胶带进行包裹,以防止水分蒸发。每个深度取 6 个试样,保证试样高度为 10~20 cm。将包裹好的芯样放入土样箱内,每层都用柔软的土工布铺垫,以防运输过程对试样造成扰动破坏。待芯样运回实验室后,立即拆封并采用切割机制备成高为 7.6 cm 的圆柱体,以用于后续试验;②现场标准养护试样,为研究搅拌均匀性对 EHP 工法桩成桩质量的影响,将现场制备桩体所用原材料分别搅拌不同时间,然后取出制备成尺寸为 7 cm×7 cm×7 cm 的立方体试样,并放入施工现场的养护室内进行标准养护;③室内标准养护试样,将现场取回土样搅拌均匀,测定土样的基本物理力学性质如表 1 所示。由表 1 可知,所用原土为粉质黏土。将搅拌均匀的土样风干后磨碎过 2 mm 筛,根据施工现场土样的含水率和水泥掺量分别计算需加水及水泥的质量。之后,将水泥、干土和水混合物搅拌均匀,并取搅拌均匀后的水泥石拌合物分层填入特制模具中制备试样,待试样成型后放入养护室进行标准养护至规定龄期,其中,现场取样及制备的试样养护龄期均为 28 d,室内制备试样的养护龄期为 3、7、14、28、42、60 和 90 d。开展无侧限抗压试验时,试样两端涂抹一薄层凡士林以降低端阻效应对强度的影响。其中,现场标准养护试样每组试验测定 6 个平行样,室内标准养护制备试样每组试验测定 3 个平行样。

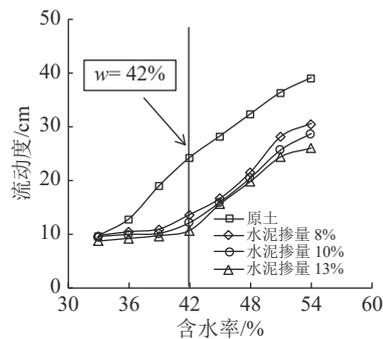


图 1 流动度随含水率变化曲线

Fig. 1 Changing law between the fluidity and water content for soil and cement soil

表 1 原土的基本物理力学指标
Tab. 1 Basic physico-mechanical properties of soil

土颗粒重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	液限/%	塑限/%	塑性指数	砂粒质量 分数/%	粉粒质量 分数/%	黏粒质量 分数/%	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ $^\circ$
26.7	27.0	14.8	12.2	16.2	63.8	20.0	20	7

2 试验结果分析

2.1 应力-应变关系曲线

EHP 工法桩芯样典型的应力-应变关系曲线如图 2 所示。图中图例表示桩体的水泥掺量和取样深度,如 8%-2 m 表示水泥掺量为 8%,桩身深度 2 m 处获得的芯样。由图 2 可见:不同桩身深度试样的应力-应变曲线均为典型的应变软化型,即应力随应变的增加而增大,直至出现峰值,此峰值应力即为试样的无侧限抗压强度。之后,随着应变的进一步增加,应力逐渐降低。这表明 EHP 工法桩中水泥理化反应充分且完全,通过水泥水化反应和火山灰反应生产的胶结物质将土颗粒胶结在一起且填充在土颗粒孔隙中,从而使水泥土表现出显著的脆性破坏特征。同时,所取芯样的应力-应变关系曲线随桩身深度增加变化很小,破坏应变基本都集中在 4.5%~5.5%。由此可推知,EHP 工法桩在全桩长范围内具有良好的均匀性。

2.2 无侧限抗压强度

图 3 为成桩 28 d 的 EHP 工法桩和 MIP 桩取芯样的无侧限抗压强度随桩身深度的变化曲线。其中图例代表水泥土桩的施工工艺和水泥掺量,如 EHP-8% 表示水泥掺量为 8% 的 EHP 工法桩。由图 3 可知,水泥掺量为 8% 和 10% 的 EHP 工法桩芯样无侧限抗压强度分别为 400 kPa 和 600~700 kPa。之后随着水泥掺量进一步增加到 13%,EHP 工法桩芯样的无侧限抗压强度也增大到 850~1050 kPa。可见,水泥掺量的增加将引起桩体强度的显著增大。水泥掺量增加能生成更多的水化产物,促进土颗粒间的胶结且颗粒间的孔隙逐渐被填充,进而提高了水泥土试样的强度。另一方面,采用传统施工工艺制备的桩体芯样强度在 700~1100 kPa 范围变化,低于相同水泥掺量的 EHP 工法桩芯样无侧限抗压强度。

不同施工工艺制备的水泥土桩芯样的 q_u 均表现出随桩身深度增加逐渐减小的变化趋势,这一减小趋势随水泥掺量的降低而减小。造成这一现象是施工工艺、地层温度、地基土性质、地下水情况等诸多因素共同作用的结果。已有研究^[1,2,8]也指出,地层深度越大,搅拌、注浆等施工难度越大。地层温度越高,水泥和地基土间反应越迅速充分,相应的强度增长越快;反之低温环境则会延缓水泥水化反应,引起桩体强度降低和压缩模量的减小。但和 MIP 桩相比,不同水泥掺量 EHP 工法桩芯样的无侧限抗压强度随桩身深度的降低幅度整体是偏小的。此外,还可发现 MIP 桩芯样强度的降低主要出现在桩身深度超过 5 m 以后,这主要是由于随着深度增加,注浆难度以及水泥浆液和地基土搅拌均匀的难度逐渐增大。这进一步表明 EHP 工

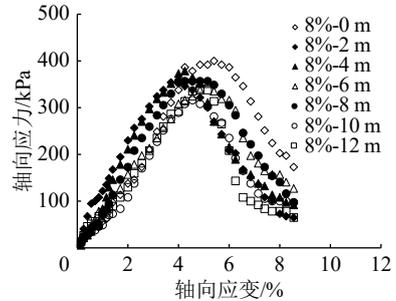


图 2 EHP 工法桩芯样的应力-应变曲线

Fig. 2 Typical stress-strain curves of core samples from EHP

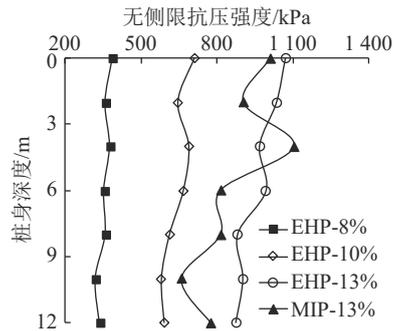


图 3 EHP 工法桩和 MIP 桩芯样无侧限抗压强度随桩身深度变化规律

Fig. 3 Changing law between q_u and drilling depths of samples from MIP and EHP

法桩具有更大的施工深度,适用范围更广。

为进一步分析不同工法制备桩体的质量,对芯样无侧限抗压强度的平均值、方差和变异系数进行计算,结果见表2。由表2可知,采用EHP工法制备水泥土桩芯样 q_u 的变异系数分别为6%、8%和8%,均小于MIP桩芯样的。这表明采用EHP工法制备桩体芯样的无侧限抗压强度随深度增加的离散程度较小,桩体强度更均匀。而相同水泥掺量下,EHP工法制备桩芯样 q_u 的平均值也大于MIP桩,方差和变异系数都小于MIP桩。由此可见,采用改进施工工艺制备的水泥土桩具有更高的桩身强度且桩身质量更好,易满足地基承载力的要求。

2.3 水泥土桩物质分布

为进一步明确EHP工法桩具有较高桩身强度的原因,对EHP工法桩和MIP桩芯样中水泥、土体等物质的分布情况进行分析,结果分别如图4和5所示。由图4可以发现,MIP桩芯样中脉状纯水泥块散乱地分布在试样中,占整个芯样体积近一半。纯水泥块在MIP桩不同桩身深度获取的芯样中均有出现。纯水泥块的形成主要是由于采用传统边钻进边搅拌工艺施工时,容易出现水泥浆液与地基土搅拌不充分的现象。随着地基加固深度的增加、地基土黏粒含量的增多,水泥土浆液搅拌不均匀的情况将会更突出。这也是造成相同水泥掺量下MIP桩强度低于EHP工法桩的主要原因。而水泥土块的出现,也使得荷载作用下含土体多的桩体一侧先破坏。实际工程中,水泥土块的出现将会引起地基承载力不能满足要求,出现不均匀沉降、地基失稳等破坏。

图5为现场取回的EHP工法桩芯样剖面。与MIP桩芯样不同,EHP工法桩芯样颜色均一,未发现纯水泥块的存在,表现出良好的均匀性。这主要是由于改进施工工艺中是预先将水泥、土料和水搅拌均匀,再钻孔注浆制备的水泥土桩,使桩身均匀性得到了较大改善,提高了桩身强度。同时,充分发挥了水泥的固化作用,避免了水泥的浪费。对多个EHP工法桩芯样进行观测,发现少量EHP工法桩芯样中存在零星气孔,气孔直径基本小于1mm。这可能是搅拌及泵送过程中,一些空气进入流态的水泥土浆液造成的。在接下来的研究中,将进一步优化EHP工法桩的施工工艺,避免气泡的出现。但整体而言,这些微小气泡对EHP工法桩的强度影响很小。

3 EHP工法桩强度评价

实际工程中,通常以室内试验结果为依据进行水泥土桩设计。和室内标准养护试样不同,现场施工工艺、搅拌均匀程度、地下水等都将影响成桩质量,进而影响复合地基的承载能力。故明确室内标准养护试样和现场取芯样强度间的区别和联系,对实际工程的设计和施工都是十分重要的。

表2 芯样无侧限抗压强度的平均值、方差和变异系数

Tab. 2 Average, variance and coefficient of variation of unconfined compressive strength for core samples

桩体类型	水泥掺量/%	芯样无侧限抗压强度		
		平均值/kPa	方差/(kPa) ²	变异系数
EHP工法桩	8	355.4	523.31	0.06
	10	641.6	2 538.3	0.08
	13	958.8	5 925.1	0.08
MIP桩	13	869.6	22 466.2	0.17



图4 MIP桩芯样剖面

Fig. 4 Cross-section of drilling core of MIP



图5 EHP工法桩芯样剖面

Fig. 5 Cross-section of drilling core of EHP

3.1 试样形状对水泥土强度的影响

由于现场钻芯获取的通常为圆柱体,而水泥土桩体强度和施工配合比设计时,规范中一般以边长为 7 cm 的立方体试样无侧限抗压强度作为设计标准,故对现场 EHP 工法桩强度进行分析,有必要先明确不同形状试样强度间的关系。

图 6 为标准条件下养护圆柱体与立方体试样的无侧限抗压强度。由图 6 可知:在养护初期,水泥土强度增长迅速。之后,随着养护龄期的增加,强度增长幅度逐渐减缓。但相同养护龄期下,不同形状水泥土试样的强度并不完全相同。当水泥掺量为 8% 时,两种形状试样的无侧限抗压强度均小于 800 kPa,且强度基本相同;当水泥掺量为 10% 时,养护龄期小于 42 d 时,圆柱体试样的无侧限抗压强度低于立方体试样。但当龄期超过 42 d 后,圆柱体试样的无侧限抗压强度则略高于立方体试样;随着水泥掺量继续增加到 13% 时,两种形状试样强度间的差异将显著增加。一些研究者认为,应力集中是导致圆柱体试样与立方体试样无侧限抗压强度差异形成的原因^[9]。

对标准条件下养护圆柱体与立方体试样无侧限抗压强度进行回归分析,结果如图 7 所示。由图 7 可知,标准条件下养护圆柱体与立方体试样无侧限抗压强度之间存在良好的乘幂关系,可用如下计算式进行转化: $q_u^s = 3.05q_u^c^{0.85}$, 其中: q_u^s 和 q_u^c 分别为标准养护条件下立方体和圆柱体试样的无侧限抗压强度。

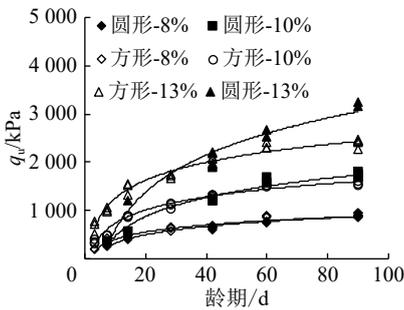


图 6 标准条件下养护圆柱体与立方体试样 q_u 的比较

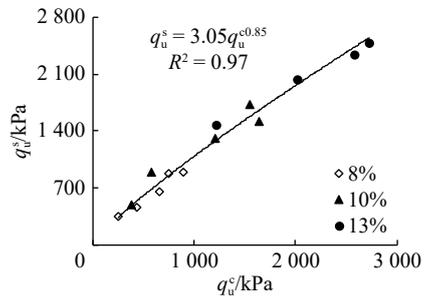


图 7 标准条件下养护圆柱体与立方体试样 q_u 关系

Fig. 6 Comparisons of q_u between cylindrical and cube-shaped specimens cured under standard conditions

Fig. 7 Relationships between q_u of cylindrical and cube-shaped specimens cured under standard conditions

3.2 EHP 工法桩强度影响因素分析

由前文 EHP 工法桩的施工工艺可知,水泥土浆液搅拌与泵送是影响 EHP 工法成桩质量的关键因素。图 8 为浇筑过程中制作的试块及与室内标准养护下试块的无侧限抗压强度。由图 8 可以看出,室内制样标准养护条件下,平行试样无侧限抗压强度的离散性较小,而现场搅拌不同时间制作的试样无侧限抗压强度的离散性相对要大一些。当水泥掺量为 8% 和 10% 时,现场搅拌不同时间制备的试样和室内制备试样的无侧限抗压强度间整体上差别不大,二者间的微小差异可能是室内和现场制样及养护环境的不完全相同造成的;而当水泥掺量为 13% 时,前者的无侧限抗压强度均显著小于后者。由此可见,搅拌均匀程度对水泥土强度的影响随水泥掺量的增加而增大。故在 EHP 工法桩施工过程中,当水泥含量较高时,要合理设计搅拌时间,以保证混合料的均匀性,否则将影响现场浇筑桩体的质量。

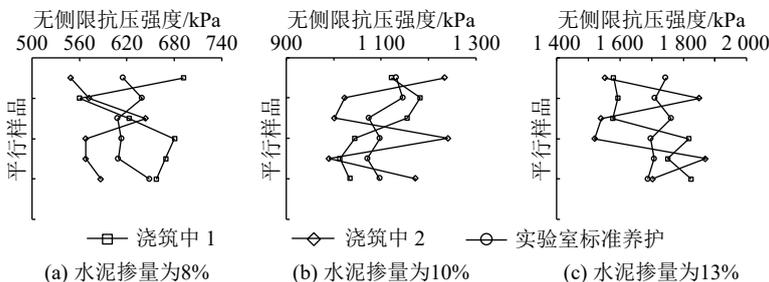


图 8 现场制备试样和室内制备试样无侧限抗压强度的比较

Fig. 8 Comparisons of the unconfined compressive strengths of specimens prepared in the laboratory and field

3.3 强度折减系数

本文引入强度折减系数 R_p 来表征施工工艺、地层环境等因素对现场施工 EHP 工法桩无侧限抗压强度的影响。计算时,首先将 EHP 工法桩圆柱体取芯样的 q_u^e 换算为 q_u^s ,再除以室内标准环境下养护相同龄期的立方体试样无侧限抗压强度即可获得桩体的强度折减系数 R_p 。由强度折减系数 R_p 的定义可知, R_p 越大则成桩强度与室内标准养护试样强度间差异越小,即相同水泥掺量下桩体强度损失越小,相应的施工工艺也越好。

图9为不同水泥掺量下 EHP 工法桩和 MIP 桩芯样的强度折减系数随桩身深度的变化规律。相同水泥掺量下,和成桩工艺无关,芯样的强度折减系数均随桩身深度增加呈减小的变化趋势。对于 EHP 工法桩,相同桩身深度处水泥掺量越高,相应的强度折减系数越小。如 8%、10% 和 13% 水泥掺量的 EHP 工法桩的强度折减系数分别为 0.65~0.75, 0.60~0.70 和 0.55~0.65。和 EHP 工法桩相比, MIP 桩的强度折减系数普遍小于 EHP 桩,为 0.40~0.65。由此可见,相对于传统原位边钻进边搅拌的水泥土桩,采用改进工艺制备的水泥土桩-EHP 工法桩成桩强度更高,相应的施工质量也更好,在实际工程应用中具有明显的优势。

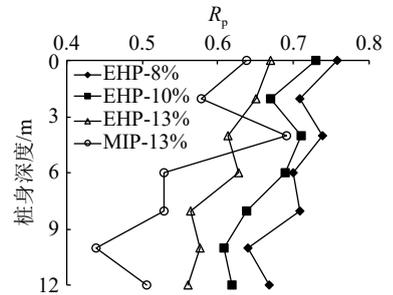


图9 强度折减系数 R_p 随桩身深度变化

Fig. 9 Changing between R_p and drilling depths

4 结 语

对不同深度水泥土桩现场取芯样、现场制备试样和室内制备试样开展无侧限抗压试验,基于试验结果对 EHP 工法桩的成桩质量和强度性状进行了分析,得到以下结论:

(1) EHP 工法桩现场取芯样的应力-应变曲线和无侧限抗压强度沿桩身深度增加变化很小,基本呈均匀分布。相同桩身深度下, EHP 工法桩芯样的无侧限抗压强度随着水泥掺量的增加而增大;相同水泥掺量和桩身深度下, EHP 工法桩芯样的强度普遍高于 MIP 桩。

(2) 与 MIP 桩相比, EHP 工法桩芯样颜色均匀,未出现纯水泥块。但成桩过程中如何避免气泡的出现是需要进一步解决的问题。

(3) 和室内标准养护试样相比,不同施工工艺制备水泥土桩,均出现一定程度的强度折减,且强度折减系数随桩身深度的增加而减小。对于 EHP 工法桩,相同桩身深度处桩体强度折减系数随水泥掺量增加而减小。本工程所制备的 EHP 工法桩强度折减系数普遍高于 MIP 桩,即 EHP 工法桩成桩质量更好。

(4) 改进施工工艺制备的 EHP 工法桩,一定程度上可克服传统施工工艺制备桩体的均匀性差、加固深度浅等不足。该工艺用于加固软土地基,尤其是用于弃置土的处置,将具有明显的经济效益和社会效益。

参 考 文 献:

- [1] 龚晓南. 地基处理技术及发展展望[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (GONG Xiaonan. Foundation treatment technology and its development prospect[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [2] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guobin, WANG Weidong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [3] 刘松玉, 席培胜, 储海岩, 等. 双向水泥土搅拌桩加固软土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 560-564. (LIU Songyu, XI Peisheng, CHU Haiyan, et al. Research on practice of bidirectional deep mixing cement-soil columns for reinforcing soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 560-564. (in Chinese))

- [4] 段继伟, 龚晓南, 曾国熙. 水泥搅拌桩的荷载传递规律[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(4): 1-8. (DUAN Jiwei, GONG Xiaonan, ZENG Guoxi. Load transfer behavior of cement treated soil column[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(4): 1-8. (in Chinese))
- [5] 刘和元, 刘松玉. 超长水泥土搅拌桩复合地基性状研究[J]. *东南大学学报*, 1999, 29(2): 63-39. (LIU Heyuan, LIU Songyu. Properties of the composite ground with super long soil cement columns[J]. *Journal of Southeast University*, 1999, 29(2): 63-39. (in Chinese))
- [6] 李琦. 水泥搅拌桩施工的质量控制要点[J]. *铁道建筑*, 2013(10): 72-74. (LI Qi. Key issues of construction quality control over cement mixing piles[J]. *Railway Engineering*, 2013(10): 72-74. (in Chinese))
- [7] 丁建文, 洪振舜, 刘松玉. 疏浚淤泥流动固化处理与流动性试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增刊1): 280-284. (DING Jianwen, HONG Zhenshun, LIU Songyu. Study of flow-solidification method and fluidity test of dredged clays[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Suppl1): 280-284. (in Chinese))
- [8] 李维, 洪宝宁, 闵紫超. 土层温度变化与湿喷桩荷载沉降关系的模型研究[J]. *勘察科学技术*, 2006(6): 10-13. (LI Wei, HONG Baoning, MIN Zichao. Modeling study of relationship between soil horizon temperature and load-settlement of WJP[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2006(6): 10-13. (in Chinese))
- [9] 陈甦, 彭建忠, 韩静云, 等. 水泥土强度的试件形状和尺寸效应试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(5): 580-583. (CHEN Su, PENG Jianzhong, HAN Jingyun, et al. Experimental research on the shape and size effect of cement-stabilized soil specimen strength[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(5): 580-583. (in Chinese))

Experimental study on the strength behavior of EHP

DU Xuqing¹, WENG Jiaying², BIE Xueqing², SONG Miaomiao³, QIU Chengchun³, LI Hui⁴

(1. *Huaihe Project Construction Administration Bureau of Huaihe River Commission, Bengbu 233001, China*; 2. *Jiangsu Hongji Water Source Technology Co., Ltd., Yangzhou 225002, China*; 3. *Department of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China*; 4. *Jiangsu Province Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, China*)

Abstract: An improved soil-cement mixing pile construction method was developed to solve the issues such as uneven distribution of pile strength and poor pile quality obtained by using the traditional mixing-while-drilling method. Based on the new method, an Environmental-Friendly and Homogeneous Plastic (EHP) pile was formed following the procedure that cement-soil slurry mixture was blended outside the drilling hole before being mixing while drilling, which enables the operation to be controllable and adjustable. In this study, a series of unconfined compression tests were conducted on cement-soil samples prepared in the laboratory and field to evaluate the strength characteristics of EHP piles with various cement contents. The quantitative relationships between the unconfined compressive strength and different shapes were established. The strength reduction coefficient was employed to analyze the reduction in the unconfined compressive strength for in-situ EHP piles. Results indicate that the uniformity and strength of EHP plies are better than those constructed using the traditional construction technology. The improved construction technology can reinforce soft ground within greater depth. Compared with the samples made in laboratory and cured under standard conditions, a reduction in unconfined compressive strength of cement-soil mixing pile was found. The reduction coefficient R_p of strength was introduced to evaluate the reduction in the strength of EHP piles. Results show that the value of R_p decreases with the increasing cement content and R_p is in the range of (0.55, 0.75). Compared with the pile constructed using the traditional method, the reduction in unconfined compressive strength for EHP pile is relatively small, indicating a better bearing capacity.

Key words: soil-cement pile; construction technology; unconfined compressive strength; pile uniformity; reduction in pile strength