

EHP桩抗剪强度试验研究

王南江¹, 刘建龙², 邱成春^{3*}, 张玉婷⁴, 陶小玉⁴

(1.安徽省水利水电勘测设计研究总院有限公司,安徽 合肥 230088;2.江苏省水利工程建设局,江苏 南京 210029;
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:新型环保均质塑性桩(Environmental Homogeneous Plastic Pile, EHP桩)改进了传统水泥土搅拌桩的施工工艺,预先搅拌均匀水泥土浆液,再边成孔边浇筑,从而形成物理性质可调控的桩体。为了检验EHP桩的强度性能,对现场取芯样、现场搅拌制样、试验室内制样进行了直接剪切试验,探讨桩的深度、水泥掺量、龄期和养护条件对抗剪强度的影响规律。试验结果表明:现场取芯样剪应力-位移曲线呈应变软化特征,抗剪强度沿桩的深度分布均匀并随着垂直压力的增加而增大,黏聚力基于一定的数值浮动,而内摩擦角受水泥掺量影响较小;试验室内标准养护试样抗剪强度在14 d龄期时趋于稳定,具有较高的早期强度,拌和均匀性、养护条件对抗剪强度影响较大;原位养护的现场取芯样抗剪强度低于试验室内标准养护试样,总平均剪切强度折减系数随着水泥掺量的增加而减小,即两者强度差异增大。

关键词:EHP桩;直剪试验;抗剪强度;水泥掺量

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

软土地基的天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、渗透性差、强度低,在工程实际中会引起承载力不足、沉降过大、沉降不均匀等问题。水泥土搅拌桩是一种用于软土地基的处理技术,它利用水泥等材料作固化剂,在原位土体内将软土强制搅拌,使软土硬结形成具有一定强度、水稳定性、整体性的桩体,与桩间土形成复合地基,共同承担上部荷载^[1]。水泥搅拌桩在技术、经济上独特的优势,使其应用相当广泛^[2-3]。然而,近年来有关水泥搅拌桩的质量问题也屡见不鲜,如桩体搅拌不均匀、不可控,冒浆现象严重,完整性差,成桩历时长等^[4-6]。

针对上述水泥搅拌桩质量问题,改进施工工艺,提出了一种新型环保均质塑性桩(Environmental Homogeneous Plastic Pile, EHP桩)的施工方法^[7]。它预先采用搅拌机械将土料与固化剂进行强制拌和,随后一边成孔一边全置换浇筑充填成桩,施工方式简单、现场作业污染小、桩体均匀性高,极大地提升了桩体的均质性和完整性,进一步提高了桩身工程质量。为了验证EHP桩的桩身质量,桩体力学性能检

验尤为重要。作为反映桩体强度和稳定性的特殊指标,抗剪强度及相应参数对复合地基设计和路基稳定性分析具有重要作用^[8]。相关学者对水泥土抗剪强度、黏聚力和内摩擦角进行了研究,如阮波等^[9]采用三轴不固结不排水试验研究了不同水泥掺入比水泥土在不同龄期下的抗剪强度,并分析了龄期和水水泥掺入比对黏聚力和内摩擦角的影响;王珊珊等^[10]利用静三轴不固结不排水试验,模拟水泥土在工程中的应力状态,得到水泥土的抗剪强度随水泥掺入比增长而增大的结论。EHP桩的工艺基础始于水泥土搅拌桩,然而施工中改变了桩体的形成条件,所形成的水泥土养护条件也与上述室内试验的理想环境条件不同,因此有必要开展EHP桩体试样的抗剪强度及其相关参数研究。

本文依托淮河干流蚌埠—浮山段行洪区调整和建设工程施工XXIX标——五河大桥接长工程,对EHP桩进行现场取芯样、现场搅拌制样和试验室内制样,开展直接剪切试验,分析抗剪强度沿桩体深度的分布特征,探讨龄期、水泥掺量、养护条件等因素

收稿日期:2022-06-06(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51808481);江苏省自然科学基金资助项目(编号:BK20170477);淮河水利委员会治淮工程项目(编号:HGBF-QT-41);江苏省水利科技项目(编号:2015068)

作者简介:王南江,男,大学本科,高级工程师.E-mail:wnj2002988@126.com

*通信作者:邱成春,男,博士,副教授.E-mail:craigqiu@163.com

对抗剪强度及其参数的影响规律,为 EHP 桩工程设计和施工工艺的优化进一步提供试验支撑。

1 试验方案

五河大桥接长工程桥坡段勘察资料表明:工程范围内地层中广泛分布承载力偏低的淤泥质重、中粉质壤土。传统水泥搅拌桩成桩效果较差,桩身强度偏低,故采用 EHP 桩复合地基处理方案,共布置搅拌桩 1 672 根,桩径 600 mm,正三角形布设,平均间距 1.2 m。为进行桩体抗剪强度及影响因素研究,直剪试验试样共分 3 类:第一类为桩体取芯样,从桩顶位置沿深度 0、2 m、4 m、6 m、8 m、10 m、12 m 依次取芯样;第二类为现场浇筑过程中,取不同时间搅拌筒内的混合料进行制样并标准养护;第三类为工地试验

室内搅拌制样并标准养护,将土样风干磨碎后过 2 mm 筛,根据所需含水率、干土质量和水泥掺量分别计算需加水 and 水泥质量,再将水泥、土和水混合物搅拌均匀。含水率设定为 43%,根据不同水泥掺量下水泥土拌和物的流动度试验结果和泵送要求所确定。具体试验工况见表 1, EHP 桩浇筑料所用原土的物理-力学指标见表 2。

表 1 直剪试验工况

试样类型	水泥掺量/%	养护方式	养护龄期/d
桩体取芯样	8、10、13	原位养护	28
现场搅拌制样	8、10、13	标准养护	28
试验室内制样	8、10、13	标准养护	7、14、28、42、60

注:原位养护是在土中成桩 28 d 后,直接采用钻芯取样机械在不同深度处钻取芯样;标准养护指试块在标准养护室养护,标准养护室温度维持 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度不小于 95%。

表 2 原土物理-力学指标

液限/ %	塑限/ %	塑性指数	各类土壤颗粒比例/%			黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
			砂粒	粉粒	黏粒		
27	14.8	12.2	16.2	63.8	20	20	7

试验所用仪器为直接剪力试验仪,试样高度 20 mm,直径 70 mm,制样过程严格按照 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》规定操作,每个工况平行试验取 3 组。施加 4 级垂直压力:100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa。施加垂直压力后,每 1 h 测读垂直变形一次,直至试样固结变形稳定。以 0.02 mm/min 的剪切速度进行剪切,试样每产生剪切位移 0.2~0.4 mm,测记量力计和位移读数,直至量力计读数出现峰值,最后继续剪切至位移为 6 mm。

2 试验结果分析

2.1 应力-应变曲线分析

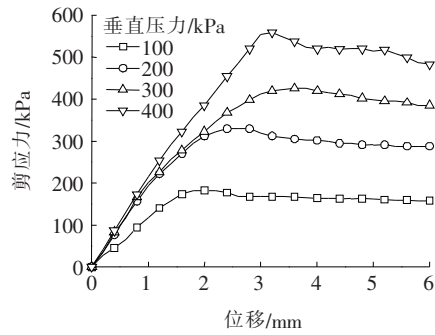
图 1 为不同水泥掺量、不同深度 EHP 桩芯样的典型剪应力-位移关系曲线。由图 1 可知:随着剪切位移的增加,剪应力出现对数式的增长;剪切前期,剪应力增长很快,剪切后期,剪应力增长减小,试样应力-应变曲线表现为应变软化型。试样出现剪切破坏后,剪应力停止增长并略微下降,试样产生较大的塑性变形,说明当试样破坏后,存在残余应变和残余应力,仍可以承受一定的压力^[11]。垂直压力越高,

试样破坏时接触面的剪应力越大,相应达到破坏时的剪切位移也越大。对比各试样不同垂直压力下的抗剪强度值,可知峰值抗剪强度和残余强度均随垂直压力的增大而增加。

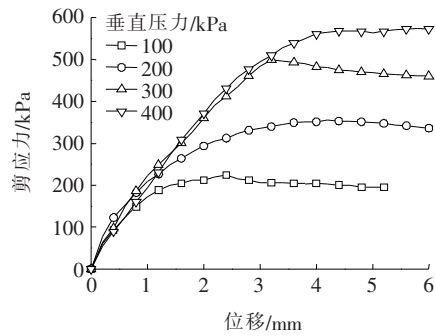
2.2 抗剪强度沿深度分布规律

传统水泥土搅拌桩的物理力学特性常随深度变化呈现较大的差异,而桩体力学性状不均匀会严重影响桩身的工程质量,并造成资源未有效利用,额外增加施工成本^[12-14]。图 2 为不同水泥掺量桩体芯样抗剪强度沿桩体深度变化曲线。由图 2 可知:3 种水泥掺量的桩体芯样抗剪强度随桩体深度变化幅度均比较小。以 8% 水泥掺量为例,垂直压力分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 时,不同深度的抗剪强度基本维持在 215 kPa、320 kPa、427 kPa、570 kPa。说明 EHP 桩成桩质量较好,胶结料沿桩体分布均匀,不同深度处的桩体抗剪强度波动较小,并始终稳定在较高的数值。对比 3 种不同水泥掺量桩体抗剪强度可知,随着水泥掺量的增加,抗剪强度沿深度的离散性增大。

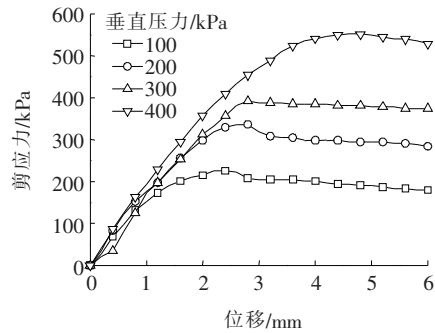
对不同水泥掺量下 EHP 桩芯样抗剪强度和垂直压力间的关系进行拟合分析。由于抗剪强度和垂直



(a) 水泥掺量 8%—取样深度 2 m



(b) 水泥掺量 10%—取样深度 6 m



(c) 水泥掺量 13%—取样深度 8 m

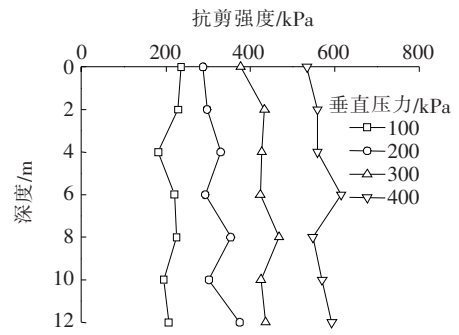
图1 不同水泥掺量、不同取样深度芯样典型剪应力与剪切位移关系曲线

压力间可近似进行线性拟合,故可取拟合直线与横轴的夹角为内摩擦角 φ ,纵轴上的截距为黏聚力 c 。图3为不同水泥掺量EHP桩芯样的 c 、 φ 值沿桩身深度的变化曲线。

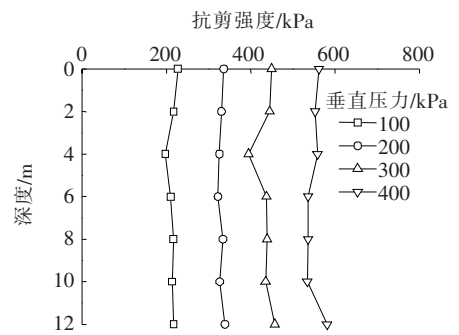
由图3可知:随着桩体深度的增加,黏聚力 c 围绕一定数值上下浮动,8%、10%、13%水泥掺量下 c 值的平均值分别为88.83 kPa、104.03 kPa、82.69 kPa。不同水泥掺量下内摩擦角的变化较小,其数值基本维持在 49° ,说明水泥掺量对内摩擦角的影响很小^[15-16]。

2.3 养护条件对抗剪强度的影响

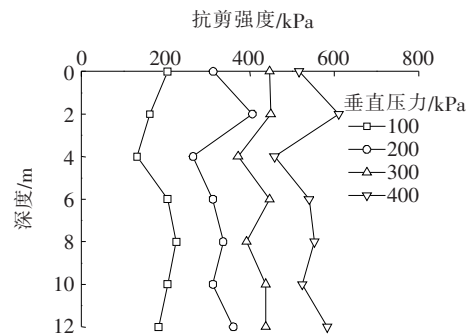
不同深度、制样和养护条件下的垂直压力—抗剪强度关系曲线如图4所示。其中,现场搅拌制样1和现场搅拌制样2是同一根桩浇筑开始前在现场搅拌



(a) 8%水泥掺量



(b) 10%水泥掺量

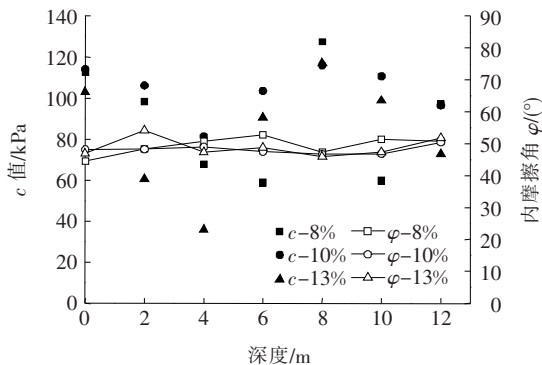
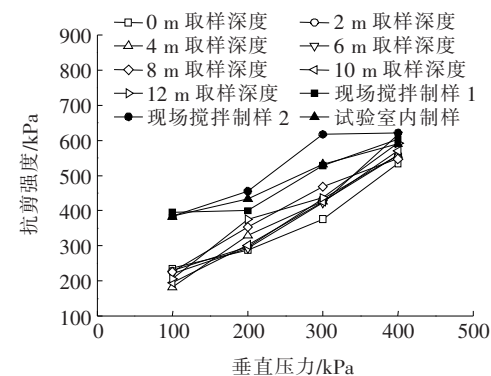


(c) 13%水泥掺量

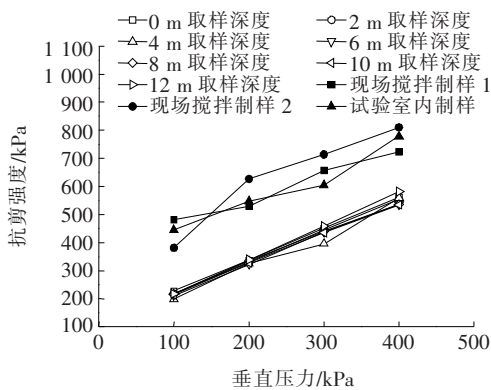
图2 桩体芯样抗剪强度沿桩体深度的变化

仓取样制作的试样和浇筑结束后在现场搅拌仓取制作的试样并标准养护28 d,采用相同配合比,时间控制在40 min左右。由于时间较短,现场温度、湿度等差别较小,且制样后均进行标准养护28 d,可认为两种现场搅拌试样之间的差异主要在于搅拌均匀性。试验室内制样是指在工地试验室按照8%、10%、13%的水泥掺量配比搅拌后制样并标准养护28 d。

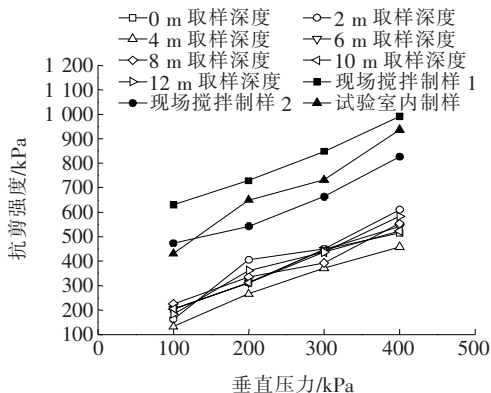
由图4可以看出:随着垂直压力增大,桩体芯样抗剪强度有很大的提升,比如8%水泥掺量下,400 kPa垂直压力下芯样的抗剪强度约为100 kPa垂直压力下芯样抗剪强度的3倍;不同深度处EHP桩体抗剪强度存在一定的离散性,但强度值较为接近,波动性较小;现场搅拌制样1、现场搅拌制样2和试验室内

图 3 c 、 φ 值沿深度变化

(a) 8%水泥掺量



(b) 10%水泥掺量



(c) 13%水泥掺量

图 4 不同制样和养护条件下的垂直压力-剪切强度关系

制样均为室内标准养护,其抗剪强度均大于现场原位养护的 EHP 芯样不同深度处的抗剪强度,说明养护条件对水泥土抗剪强度有重要影响。对于 8% 和 10% 水泥掺量的 EHP 桩体,垂直压力大于 100 kPa 时,现场搅拌制样 1 的抗剪强度与试验室内制样的抗剪强度数值接近,小于现场搅拌制样 2 的抗剪强度;对于 13% 水泥掺量的 EHP 桩体,现场搅拌制样 1 的抗剪强度大于试验室内制样和现场搅拌制样 2 的抗剪强度;总体上,试验室内制样抗剪强度介于现场搅拌制样 1 和现场搅拌制样 2 的抗剪强度之间,说明 EHP 桩体混合料的拌和均匀性是影响水泥土桩体抗剪强度的一个重要因素,施工现场一定要确保混合料充分搅拌,以免影响其抗剪强度的发挥。

2.4 龄期对抗剪强度的影响

随着水泥土龄期的增长,水泥的水化程度更加充分,强度也在不断增长^[17-19],一般水泥搅拌桩选取成桩 28 d 的强度为标准强度。对不同龄期下试验室内制样 EHP 桩体抗剪强度进行研究,结果如图 5 所示。

由图 5 可知:低垂直压力(100 kPa)下,试样抗剪强度在养护 14~28 d 内仍快速增长,28 d 后曲线变缓,趋于稳定;高垂直压力下,水泥土的抗剪强度在 14 d 后增长较缓慢,趋向稳定,此时试样的抗剪强度平均可达到养护 60 d 时抗剪强度的 84.7% 以上($\tau_{(60d)} \approx 1.18\tau_{(14d)}$)。由此可见:相同养护条件下,EHP 桩具有较高的早期强度,一定程度上可以缩短施工工期。13% 水泥掺量的水泥土试样抗剪强度大于 10% 水泥掺量的试样,并明显高于 8% 水泥掺量下的试样。

图 6 以 8% 水泥掺量为例给出了不同龄期的抗剪强度与垂直压力关系曲线。

由图 6 可知:14 d、28 d、42 d 和 60 d 龄期下抗剪强度线性拟合公式为: $\tau_f = 1.116\sigma + 73.05$,离散性较小,说明 14 d 龄期后,水泥土试样的 c 、 φ 值变化较小,抗剪强度基本趋于稳定。

2.5 抗剪强度评价

EHP 桩是在传统水泥搅拌桩基础上发展而成的一种新型施工工艺,其本质上仍是一种基于水泥固化系的拌和物。一般情况下,水泥混凝土成型后,必须在一定的时间内保持适当的温度和足够的湿度,以保证水泥水化充分进行,促进其强度的发展^[20-21]。因此,EHP 成桩后的养护条件尤为重要。为了比较现场原位养护 EHP 桩体和室内标准养护桩体的抗剪

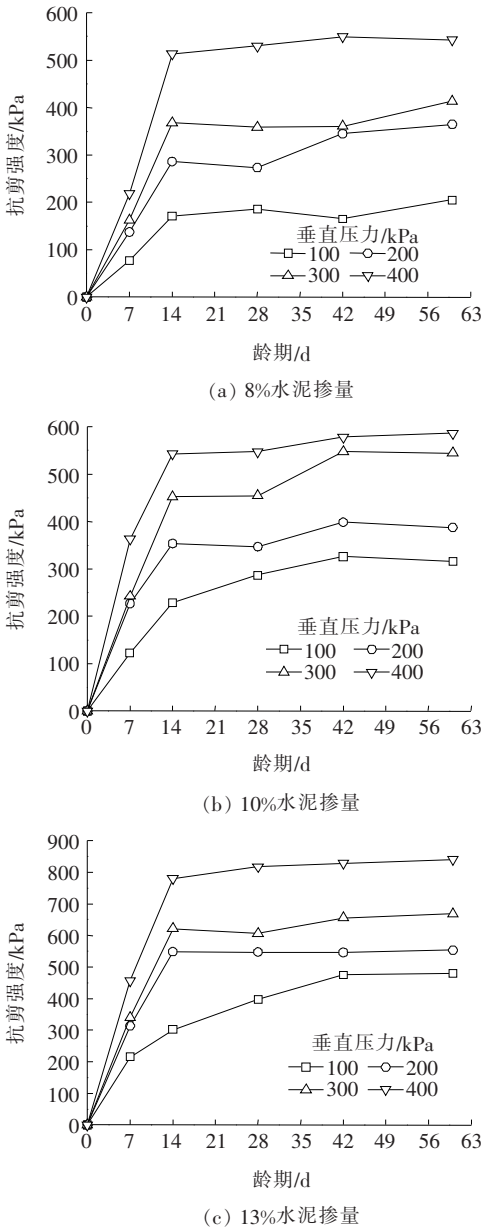


图5 不同水泥掺量下龄期-抗剪强度关系曲线

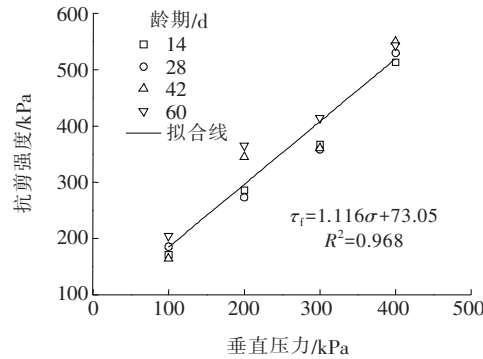


图6 不同龄期下垂直荷载与抗剪强度关系曲线

强度,引入了剪切强度折减系数。

剪切强度折减系数为现场原位养护条件下桩体芯样的抗剪强度与试验室内标准养护条件下试样抗

剪强度之比。图7为不同水泥掺量下桩体芯样剪切强度折减系数随深度的变化曲线。

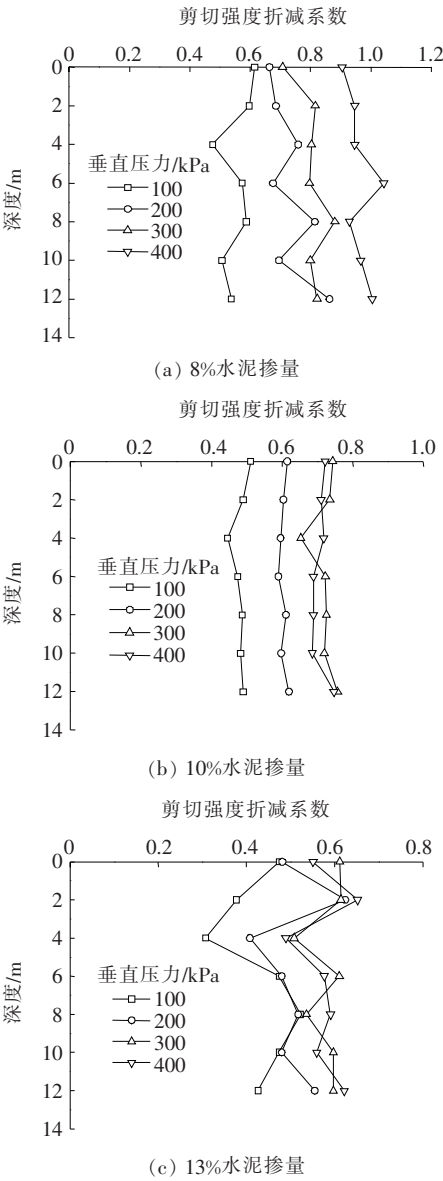


图7 桩芯样剪切强度折减系数随深度变化

由图7可知:垂直压力较小时,剪切强度折减系数较低,试样的抗剪强度折减幅度较大;垂直压力较大时,剪切强度折减系数较高,试样的剪切强度折减相对较小。8%水泥掺量中,随着桩体深度的增大,试样的剪切强度折减系数整体变化较小。但随着水泥掺量的增大,试样剪切强度折减系数沿着桩体深度表现出不稳定的波动现象,不同垂直压力下的剪切强度折减系数甚至出现交叉。此外,剪切强度折减系数大致随垂直压力的增加而增加,且同一压力下,水泥掺量越多,其剪切强度折减系数越小,表明水泥掺量越多,现场原位养护和试验室内标准养护两种情况

下水泥土样的抗剪强度差异越大。EHP 桩芯样不同垂直压力下的平均剪切强度折减系数如表 3 所示。

表 3 不同水泥掺量下桩芯剪切强度折减系数

水泥 掺量/ %	不同垂直压力(kPa)下平均 剪切强度折减系数				总平均剪 切强度折 减系数
	100	200	300	400	
8	0.56	0.74	0.80	0.96	0.77
10	0.48	0.60	0.72	0.71	0.63
13	0.44	0.50	0.58	0.57	0.52

由表 3 可知:① 水泥掺量越高,养护条件对试样抗剪强度的影响越明显;② 桩体的总平均剪切强度系数随水泥掺量的增加而逐渐减小,且减幅值是逐渐降低的。这可能是因为原位养护现场温度、湿度与试验室内标准养护差异很大,尤其是桩深越大,温度越低,水化反应越弱。水泥掺量越大,水化反应对温度、湿度、均匀性等要求越高,试验室内试样的制样和养护条件均容易满足,使得水泥掺量越大的标准养护试样强度越高,而原位养护的现场取芯样强度与试验室内标准养护试样的强度差异越大,导致总平均剪切强度折减系数随着水泥掺量的增加而减小。

3 结论

(1) EHP 桩现场芯样的剪切位移-剪应力关系曲线表现为应变软化型。剪切前期,剪应力增长很快,后期剪应力增长逐渐减小,抗剪强度随垂直压力的增加而增大。

(2) EHP 桩现场芯样抗剪强度沿桩的深度分布均匀,黏聚力值基于一定数值浮动;内摩擦角变化较小,维持在 49° ,不受水泥掺量影响。

(3) 试验室内标准养护试样抗剪强度 14 d 龄期时趋于稳定,强度可达到 60 d 龄期强度的 84.7% 以上,具有较高的早期强度;拌和均匀性、养护条件对抗剪强度影响较大。

(4) 随着水泥掺量的增加,EHP 桩现场取芯样的总平均剪切强度折减系数减小,即与试验室内试样之间的抗剪强度差异变大,实际工程中可通过改善养护条件来实现 EHP 桩抗剪强度的提高。

参考文献:

- [1] 刘松玉,钱国超,章定文.粉喷桩复合地基理论与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [2] 秦世伟,陆小锋,张国军.水泥土搅拌法加固淤泥质黏土

- 的试验研究[J].中外公路,2019,39(5):256-260.
- [3] 曹支才,王光辉.不同因素对水泥搅拌桩强度影响的试验研究[J].中外公路,2020,40(3):283-287.
- [4] 刘宏伟,郑建璐,刘爱民.某三轴水泥搅拌桩深层短桩质量控制及治理措施[J].中国港湾建设,2019,39(9):42-45.
- [5] 陈富,李海涛.黄骅港地区深层水泥土搅拌桩施工工艺研究[J].岩土工程学报,2015,37(S1):156-160.
- [6] 胡新民.粉喷和浆喷水泥桩加固软土地基的力学特性[J].筑路机械与施工机械化,2010,27(6):42-44.
- [7] JI F, QIU C C, YAO D, et al. Analysis of construction technology and technical advantages of a kind of environmental homogeneous plastic pile[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020,768:032009.
- [8] 田莉,陈艺宁,向伟明,等.路堤下水泥土室内试验抗剪强度指标研究[J].工程抗震与加固改造,2018,40(4):137-141.
- [9] 阮波,彭学先,邓林飞.水泥土抗剪强度参数试验研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(4):662-668.
- [10] 王珊珊,卢成原,孟凡丽.水泥土抗剪强度试验研究[J].浙江工业大学学报,2008,36(4):456-459.
- [11] 吴王意,应乘风,李娜,等.纤维改性滨海水泥土的直剪和无侧限特性试验研究[J].绍兴文理学院学报(自然科学版),2018,38(2):45-50.
- [12] 于涛.基于不同环境条件下水泥土的力学特性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2013.
- [13] VATSALA A, NOVA R, SRINIVASA MURTHY B R. Elasto-plastic model for cemented soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(8):679-687.
- [14] 陈四利,史建军,于涛,等.冻融循环对水泥土力学特性的影响[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(2):343-349.
- [15] 张陈,李娜,王伟,等.纳米 MgO 改性滨海水泥土的直剪试验及微观机理[J].长江科学院院报,2019,36(4):135-139.
- [16] KONG D Y, DU X F, WEI S, et al. Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37:707-715.
- [17] 伍宛生,郑继,顾洪,等.加固软土地基的水泥土力学特性试验研究[J].水利水电技术,1998,29(5):42-44.
- [18] 高亚成,郑建青.水泥土的室内试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),1999,27(5):103-106.
- [19] GAO L, REN Z, YU X J. Experimental study of nanometer magnesium oxide-modified clay[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2015, 52(4):218-224.
- [20] 薛慧君,申向东,邹春霞,等.水泥土早期力学性能影响因素分析[J].硅酸盐通报,2014,33(8):2056-2062.
- [21] 艾志伟,邓通发.水泥土强度的影响因素研究进展[J].公路,2014,59(1):195-199.