

新港路水泥土最佳配比以及水泥土强度变化特征研究

万 乾

中国葛洲坝集团市政工程有限公司 湖北 宜昌 443000

【摘 要】：以新港路水泥土搅拌桩为研究对象，通过现场平板载荷试验确定了最优水泥配比。基于该配比制备试样，分别对5种不同龄期及浸水饱和状态下的水泥土开展了单轴压缩试验。现场与室内试验结果表明，水泥掺量为 75 kg/m^3 和 80 kg/m^3 的桩体均能满足设计承载力要求；从经济性角度综合考虑，最终选定 75 kg/m^3 作为工程应用的水泥掺量。随着养护龄期增长，试样的破坏形态趋于脆性，28 d后强度增长趋于平缓。浸水饱和状态下试样的单轴抗压强度峰值约为干燥状态下的48.5%，表明水分浸入对水泥土强度具有显著影响。对28 d龄期水泥土试样在单轴压缩破坏后的微观结构进行观察，发现多条近似平行、倾角为 $75^\circ\sim 90^\circ$ 的细微裂缝，与宏观破坏形态一致，反映出宏观裂纹扩展受微观结构特征控制。

【关键词】：搅拌桩；水泥土；浸水饱和；SEM

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.021

1 引言

珠三角地区作为典型的软土发育区域，长期受河流冲刷作用影响，广泛分布有深厚的第四系软土层，主要包括流塑状淤泥、淤泥质土、松散状粉细砂以及软塑状粘性土等。该类土层具有高含水率、高压缩性、低渗透性、低强度以及显著流变性等不良工程特性^[1-2]。加之该地区降雨充沛，不仅对路基边坡产生冲刷作用，还会因地下水位波动引起地层局部不均匀变形，尤其易引发路基结构的工后沉降，威胁行车安全，并对市政道路路基的长期稳定性与可持续发展带来严峻挑战^[3-4]。

新港路项目道路全长697m，规划宽度50m，属城市主干道，采用双向8车道设计。场区普遍分布一层抗剪强度较低的淤泥层，针对该软土地基，设计采用深层水泥搅拌桩进行加固处理。本文以该水泥搅拌桩为研究对象，通过现场试验确定了最优水泥土配比，借助室内试验探讨浸水条件对水泥土强度的影响，最后采用扫描电镜（SEM）对水泥土的微观结构特征变化进行分析。

2 最优水泥土配比试验研究

结合现场工程实际要求以及经济性考虑（单向水泥搅拌桩总造价2406.05万元（单价71.6元/m），双向水泥搅拌桩总造价3350.32万元（单价99.7元/m），最终选取单向水泥土搅拌桩。

水泥搅拌桩采用单向和浆喷法，其参数为：桩径0.5m、桩间距1.2m，呈正方形布置，桩长根据进入持力层0.5m控制，最大桩长不大于14m。桩体所用水泥为42.5 R级普通硅酸盐水泥。水灰比为0.5，水泥掺合量为20%。水泥搅拌桩施工中

采用“四喷四搅”工艺，施工中应使钻头反向边旋转、边喷浆、边提升，提升速度宜控制在 $0.5\sim 0.8\text{ m/min}$ ，当钻头提升至距离地面1m时，宜慢速提升，当喷浆口即将出地面时，应停止提升，搅拌数秒，保证钻头搅拌均匀。当发现喷浆量不足时，应整桩复打。施工中因故停浆时，应使搅拌头下沉至停浆面以下0.5m，待恢复供浆后再喷浆提升。当停机超过3h后，应拆卸输浆管路，清洗后方可继续施工，防止浆液硬结堵管。

鱼塘固化工程施工前期，就地固化联合水泥搅拌桩处理后，检测时间为养护28d后。经处理的软基，形成一定强度的人工硬壳层和深厚桩基，需要对复合地基承载力和强度进行检测。

结合实际工程需求，此试验只拟考虑水泥掺量开展现场试验，分别考虑每延米水泥用量为70、75和 80 kg/m 的三种工况。养护完成后，进行复合地基平板荷载试验和钻芯法检测。按照广东省标准《建筑地基基础检测规范》（DBJ/T15-60-2019）^[5]的相关要求，共对5根桩进行了现场检测。

现场试验分别考虑每延米水泥用量为70、75和 80 kg/m 的三种工况。养护完成后，进行平板荷载试验。根据搅拌桩桩间距，因此选用边长为1.20m的方形多层加肋厚钢板作为承压板。最大试验荷载为160kPa。结果显示水泥含量为 70 kg/m 的2个桩的极限荷载均为140kPa，满足不了160kPa的设计承载力要求，而水泥含量为75和 80 kg/m 的3个桩均满足设计承载力的要求。整体上看，随着水泥用量的增加，复合地基承载力特征值也随之增加，而所产生的累计沉降量、残余沉降量、以及承载力特征值对应的沉降量均随之减小。最终从经济性角度最终选用 75 kg/m 作为本项目水泥土搅拌桩的水泥用量。

3 浸水对水泥土强度影响特征

基于现场试验得到的水泥土配比进行室内试验,制备的试样水泥质量为天然淤泥土的 22.84%,水灰比 0.5。试样尺寸为直径 61.8 mm,高 125 mm 的圆柱体。将试样连同试模筒一起装入塑料密封袋中置于室内养护 24 小时。拆模后再将其用塑料薄膜多层包裹密封,放入标准的恒温恒湿养护箱养护。首先对 5 个不同龄期 (3d、7d、14d、28d 和 60d) 下的试样进行单轴压缩试验,试验结果如图 4 所示。

可以看出,各个试样的应力-应变曲线形态有所区别,随着龄期的增加,试样在达到峰值强度的应力跌落越来越明显,表明试样的脆性在不断增加,28 d 和 60 d 的两个试样应力跌落则较为相似。在峰值应力方面,其随着养护龄期的增加而不断增加,且在前 28d 试样强度的增加非常明显;而 60 d 试样的强度 (3.5 MPa) 较 28 d 的强度 (3.4 MPa) 仅增加了 2.9%。无论是曲线形态,还是强度特征都显示,28 d 后试样的变化趋于平缓。

为进一步分析浸水饱和对试样的强度的影响,将养护 28 d 的试样浸水饱和再进行单轴压缩试验。可以看出,其单轴抗压强度峰值为 1.65 MPa,仅为干燥条件下试样的 48.5%左右,表明浸水作用对水泥土的强度存在较大影响。

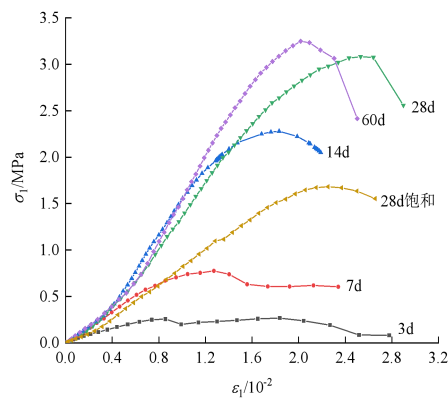
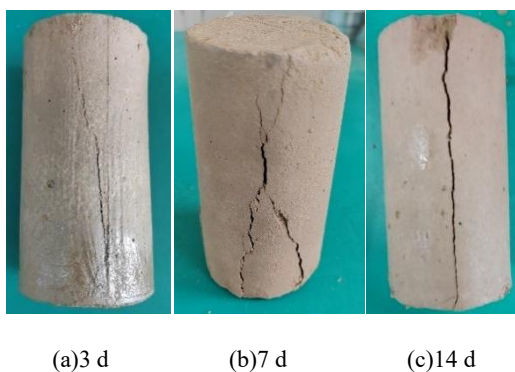


图 1 应力-应变曲线图



(a)3 d (b)7 d (c)14 d



(d)28 d (e)60 d (f)28 d 饱和

图 2 各试样破坏图

4 微观结构变化特征

采用扫描电镜 SEM 对淤泥原状土、养护 28 d 水泥土、以及单轴压缩破坏后试样的微观结构进行了分析,结果如图 3-5 所示。可以看出,原状软土由叠聚体、黏土颗粒和黏土絮凝体等组成。大量片状体排列成实体式基质结构,另外少量粒状体相对独立且互相接触并不紧密,悬浮在土样横截面上,多以“边—边”和“边—面”的结合方式连接,构成“黏土基质结构”。这种结构体系的性质取决于片状基质的性质。低强度叠聚体松散地排列在一起,颗粒彼此间呈堆积接触状态,接触面微小,在外力的作用下容易发生变形与错动。养护 28 d 的水泥土试样中片状的黏土矿物被絮(网)状和簇状物质粘结起来,絮(网)状和簇状物质是水泥与软土混合后发生水解和水化反应生成的水化硅酸钙 (C-S-H) 和水化铝酸钙 (C-A-H) 凝胶。此外,在 28 d 龄期时试块表面有少量针棒状的钙矾石生成,零星地分布于颗粒表面和粒间孔隙中。这些微晶物质含量的增多使土颗粒之间的联结类型从接触联结转变为胶结联结,水泥土的孔隙变少,水泥土变密实,处理后的软土强度会有较大的提升。对于 28d 水泥土单轴压缩破坏的试样,其破坏微观结构出现多条平行倾斜细缝,并呈现为 75°~90°,与试样整体宏观结构破坏表现出一致的特点,说明了宏观破坏裂纹是由微观决定的。

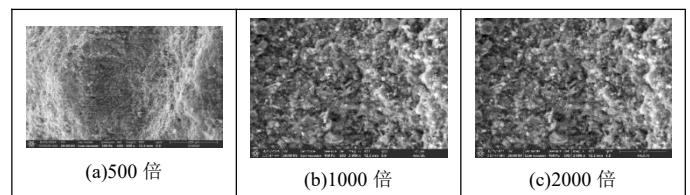


图 3 淤泥原状土 SEM 微观结构图

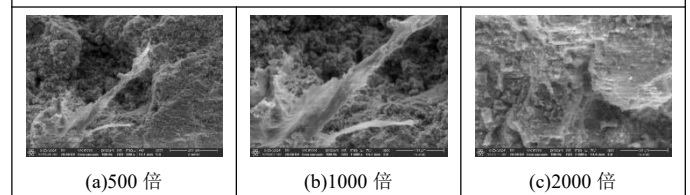


图 4 28 d 水泥土 SEM 微观结构图

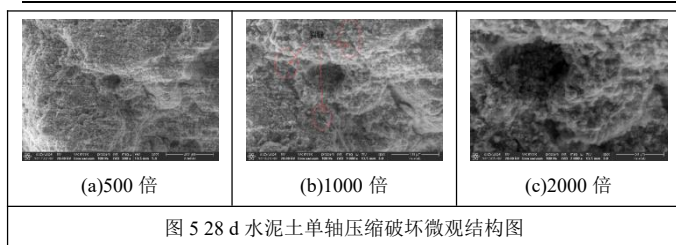


图 5 28 d 水泥土单轴压缩破坏微观结构图

5 结论

(1)现场试验结果显示水泥含量为 70 kg/m 的 2 个桩的极限载荷满足不了设计承载力要求,而含量为 75 和 80 kg/m 的 3 个桩均满足设计承载力的要求。最终从经济性角度最终选用 75

kg/m 作为本项目水泥土搅拌桩的水泥用量。

(2)随着养护龄期的增加,试样的强度不断增加,且表现出越来越强的脆性。无论是曲线形态,还是强度特征都显示,28 d 后试样的变化趋于平缓。而浸水饱和试样强度仅为干燥试样的 48.5%左右,表明浸水作用对水泥土的强度存在较大影响。

(3)养护 28d 后发生单轴压缩破坏的水泥土试样 SEM 结果显示,其内部形成多条近似平行、倾角介于 75°~90°之间的微细裂缝。该微观裂缝的扩展方向与宏观破坏形态具有一致性,表明水泥土的宏观破坏行为本质上由微观裂隙的发育与演化所主导。

参考文献:

- [1] 唐福来.淤泥质土条件下深层搅拌法软基处理适应性分析[J].广东水利水电,2022,(11):55-59.
- [2] 赵朋辉.佛山市深厚淤泥、粉砂场地大型复杂基坑支护设计[J].广东土木与建筑,2021,28(06):47-49+52.
- [3] 张洪毓,李乾威,姚孟龙,等.PHC 管桩在淤泥质土道路地基处理中的沉降分析[J].建筑施工,2021,43(01):159-161+165.
- [4] 高铭.广东佛山君耀广场地基岩土工程特性研究[D].长安大学,2019.
- [5] 广东省住房和城乡建设厅.《建筑地基基础检测规范》(DBJ/T15-60-2019)[S].中国城市出版社,2019.