

地聚合物土搅拌桩技术工程应用研究^{*}林天干¹, 许东风¹, 尹万辉¹, 姚佳良², 姚丁²

(1.温州市交通规划设计研究院, 浙江 温州 325000; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 通过对不同掺量地聚合物和不同龄期下地聚合物加固软土的抗压强度和抗剪强度试验, 定量、定性地分析了地聚合物土力学特性的变化规律; 结合工程实例, 对地聚合物土搅拌桩进行设计应用, 为地聚合物土搅拌桩的应用提供示范。

关键词: 公路; 地聚合物; 软土; 搅拌桩

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)01-0094-04

地聚合物(Geopolymer)是一种以硅、铝元素为主的硅铝质材料在强碱激发作用下生成的由硅氧四面体和铝氧四面体构成的三维网络结构的聚合胶凝材料, 具有水泥所不具备的一些优良特性, 如能克服碱-集料反应、收缩性大、水化热高、耐腐蚀性能差等。它是一种环保型材料, 与水泥相比, 生产地聚合物可减少 CO₂ 排放 70%~80%, 这对减缓温室效应可起到很大的作用; 其能耗是水泥的 1/6~1/4。地聚合物在低温环境下就能配制出来, 且制作工艺简单, 生产成本低, 原料也特别丰富。地聚合物和软土拌和后会产生一系列物理、化学反应, 改变原状土的结构, 使之硬结成具有整体性、水稳性和一定强度且耐久性好的固结体。用地聚合物处理软土地基在力学性能方面的表现比用硅酸盐水泥更优异, 原材料供应也更广泛, 且更环保。因此, 有必要研究地聚合物代替水泥处理软土地基技术。

1 室内试验

1.1 试验材料

以浙江省 104 国道温州西过境瓯海桐岭至瑞安仙降段改建工程软土为试验对象, 其属于典型的海相软黏土。挖除地表面以下杂填土后取样, 经烘干粉碎后测试其基本物理参数, 结果见表 1。

表 1 温州软土的物理指标

检测项目	检测结果	检测项目	检测结果
采样深度/m	9.0	塑性指数	28.5
天然含水率/%	52.0	压缩系数/MPa	1.41
湿密度/(g·cm ⁻³)	1.60	有机质含量/%	2.11
孔隙比	1.463		

固化剂采用 DW 型地聚合物, 其由钢渣、矿渣、高钙粉煤灰、偏高岭土及碱激发剂等按一定比例混合而成。鉴于目前还没有地聚合物性能指标标准, 参照普通硅酸盐水泥标准检测其性能, 结果见表 2。

表 2 DW 型地聚合物的物理力学性能指标

检测项目	水泥标准要求	检测结果
泌水率/%	≤3	0.5
凝结时间/min	初凝时间 ≥45	165
	终凝时间 ≤600	243
28 d 抗折强度/MPa	≥5.5	8.7
28 d 抗压强度/MPa	≥32.5	52

1.2 试验方案

聚土比(地聚合物掺量, 为地聚合物质量与温州软土湿土质量之比)分别取 10%、12% 和 14%, 在天然含水率 52%(水的质量与干土质量之比)条件下检测试件在 7、28、60 d 龄期的无侧限抗压强度和抗剪强度。

1.3 试验过程

1.3.1 试样制备和养护

根据上述试验方案, 将取来的软土置于烘箱烘干, 并将烘干的土样击碎, 过 5 mm 筛, 将筛余的土置于密封桶中保存备用。

无侧限抗压强度试验试样由 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 立方体试模制备。称取一定量的干土、地聚合物置于搅拌锅中, 按照相应的含水量及 0.5 的水灰比所需水量取适量水倒入搅拌均匀。每种比例的试块均制作 3 个平行试样。将试模内壁涂

^{*} 基金项目: 浙江省交通科技项目(2015J17)

好机油,将搅拌好的土样分 3 次填充到试模内,每层振动 2 min 排除试块内气泡,直至填充完毕后用刮刀刮平,随后用塑料薄膜密封防止水分蒸发过快。48 h 后,将成型试件拆模后置于标准养护箱(20℃±2℃,湿度保持在 75%左右)中养护至 7、28 和 60 d 等设定龄期。

直剪试验试样由直径 61.8 mm、高 20 mm 的环刀制备,制样过程与上述类似。

1.3.2 无侧限抗压强度试验与抗剪强度试验

当试件养护至规定龄期后,将试件取出置于水中浸泡 24 h。抗压强度试验设备采用龙威 LM-02 型数字式液压测力仪。将浸泡过的试件依次置于下压力板,将上压力板缓慢旋转下移接触试件的上表面,开动压力机,将回油阀门关闭、送油阀门打开,待试件被压开裂,读取最大压力值,然后计算试件最大

抗压强度值。试验 3 次,取平均值作为试验结果。

快剪试验设备采用应变控制式直剪仪。先对准剪切容器上下盒插入固定销,在下盒内放透水石和滤纸,然后将达到相应龄期的环刀试样刀刃向上对准剪切盒口推入剪切盒内。移动转动装置使上盒前端钢珠刚好与测力计接触,依次加上传压板、加压框架,安装垂直位移测量装置,记录初始读数。垂直压力分为 100、200、300、400 kPa。因为试样为非饱和试样,在加压板周围包湿棉花。随后拔出固定销以 0.8 mm/min 的剪切速度进行剪切,当测力计百分表读数不变或后退时,继续剪切位移至 4 mm 时停止,记录破坏值。

1.4 试验结果及分析

地聚合物加固土样的抗压强度试验和直剪试验结果见表 3。

表 3 地聚合物加固土样室内试验结果

聚土比/%	各龄期(d)的无侧限抗压强度 f_{cu} /kPa			各龄期(d)的内摩擦角/(°)			各龄期(d)的粘聚力 c /kPa			各龄期(d)的 $c/f_{cu}/\%$		
	7	28	60	7	28	60	7	28	60	7	28	60
10	500	1 310	4 235	14.05	16.27	17.35	83.47	109.35	221.57	16.7	8.3	5.2
12	580	1 440	4 390	15.43	16.92	18.77	114.34	147.90	299.12	19.7	10.3	6.8
14	780	1 670	4 730	17.52	18.84	20.73	187.60	239.57	421.76	24.0	14.3	8.9

由表 3 可知:1) 在同一龄期下,加固土样的强度随着聚土比的增加而增大;在同等掺量下,加固土样的强度随龄期的延长而增大(见图 1、图 2)。2) 地聚合物掺量相同时,养护龄期 7~28 d 时的强度增长速度远大于养护龄期 28~60 d 时;试件龄期相同时,地聚合物掺量为 12%~14%时的强度增长速度远大于掺量为 10%~12%时。在地聚合物掺量为 14%的情况下,如果具有足够长的龄期,则能最大程度地发挥地聚合物的加固作用。3) 地聚合物土的抗剪强度随着无侧限抗压强度的提高而提高,两者呈线性相关关系。无侧限抗压强度 $f_{cu}=0\sim 4\,730$ kPa 时,粘聚力 $c=83.47\sim 421.76$ kPa,内摩擦角为 $14.05^\circ\sim 20.73^\circ$,抗剪强度约为无侧向抗压强度的 $1/10\sim 1/4$,并且随着 f_{cu} 的增加,无侧限抗压强度与抗剪强度的比值呈现逐渐变小的趋势,考虑到强度的离散性,取抗剪强度为 $0.25f_{cu}$ 。

2 工程实例

温州 104 国道温州西过境瓯海桐岭至瑞安仙降段改建工程起讫桩号为 K22+765—K39+884.5,

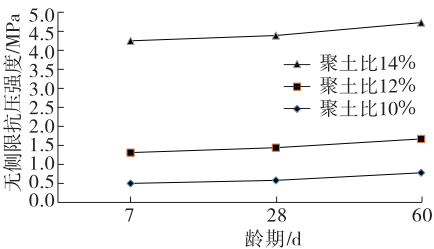


图 1 不同聚土比下地聚合物土抗压强度随养护龄期的变化

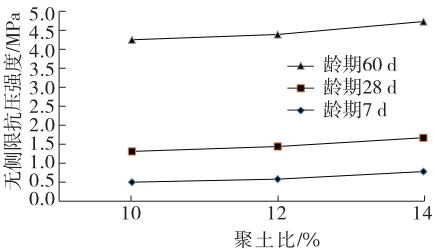


图 2 地聚合物土无侧限抗压强度与聚土比的关系

全长 17.118 km。其中部分路段的路基表部为厚 1.1~2.9 m 黏土(硬壳层),下部为较厚的淤泥、淤泥质土,饱和,流塑,具有孔隙比、含水量、压缩性高和承载力低等特点,属于典型的软土。对部分软基路段

采用地聚合物湿喷桩的形式进行加固,地聚合物搅拌桩试验段位于 K28+299—319。

2.1 工程地质条件

该工程线路跨越海积平原单一地貌单元,地层

岩性、水文地质条件差异不大,根据路基土地层结构、岩性特征及对路基稳定性的影响程度划分为软土路段。K28+299—319 段工程地质层组特征见表 4,土层分布及物理力学特征见表 5。

表 4 K28+299—319 段的工程地质层组特征

桩长范围 土层编号	成因 时代	岩土 名称	岩性特征	厚度/ m	地基承载力基 本容许值/kPa	钻孔桩桩侧土摩 阻力标准值/kPa
1	Q_4^{me}	填土	杂色,稍密~中密,主要由碎石、卵石及黏性土回填而成,各成分分布极不均匀,大小混杂,多为人工杂乱堆填,结构松散,多未经压实;分布于田间小路的填土主要为黏性土,含植物根系,极松散;靠近村镇的填土含砖瓦碎块	0~3.4	110	30
2	Q_4^{1m}	淤泥	灰色,流塑,饱和,含少量腐殖质、有机质和贝壳碎屑	3.4~7.4	40~45	8
3	Q_4^{1m}	淤泥	灰色,流塑,饱和,鳞片状,含少量腐殖质、有机质和贝壳碎屑	1.0~2.1	50	10
4	Q_2^{pl+dl}	含黏性土卵石	灰色,中密~密实,卵石占 50%~60%,粒径以 2~8 cm 为主,呈圆状;另含少量圆砾,砂占 5%~10%,其余为少量粉质黏土	2.5~3.5	220~280	80
5	Q^{cl+dl}	粉质黏土	灰黄色,可塑~硬塑,饱和,含少量铁锰质氧化斑点,局部含少量碎石	3.2~5.4	130~160	40

表 5 土层分布及物理力学特征

土层 名称	层厚/ m	天然密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水率/ %	天然 孔隙比	饱和度/ %	塑限 指数	液限 指数	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	压缩模 量/kPa
黄黏土	1.5~4.2	1.73	42.0	1.138	93.0	17.5	1.02	19.0	6.5	2.55
黏土	1.2~4.5	1.67	51.3	1.501	94.4	22.9	1.05	20.0	3.0	2.05
淤泥	8.0~16.0	1.60	58.4	1.801	95.6	21.7	1.65	11.0	2.0	1.46
粉质砂土	1.0~3.0	1.56	64.8	1.916	93.4	24.4	1.50	12.0	3.0	1.36

2.2 地聚合物搅拌桩的设计与计算

参照 JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》,选用 DW 型地聚合物作为胶凝材料,采用湿法进行处理,处理面积约 200 m^2 ,地聚合物浆水灰比为

0.5。搅拌桩的设计主要是确定桩长和置换率,其中桩长根据上部结构对其承载力及变形的要求确定,宜穿过软土层达到承载力相对较高的持力层。搅拌桩设计基本参数见表 6,平面布置见图 3。

表 6 地聚合物搅拌桩设计基本参数

项目	设计取值	桩长范围 土层编号	土层厚 l_i/m	桩侧土摩擦阻力 特征值 q_{si}/kPa	桩端土阻力 q_p/kPa
直径 d/m	0.7	1	3.4	30	280
有效桩长 L/m	16	2	7.0	8	
桩截面面积 A_p/m^2	0.384 65	3	2.1	10	
桩周长 μ_p/m	2.198	4	2.5	80	
桩间距 s/m	1.7	5	1.0	40	
布桩形式	等边三角形				

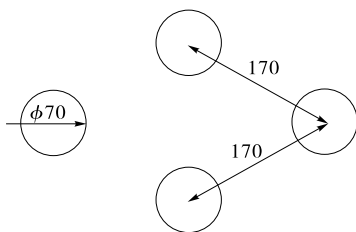


图 3 搅拌桩的布置形式(单位:cm)

桩身强度折减系数 η ,干法取 0.2~0.25,湿法取 0.25;桩端天然土承载力折减系数 α 的取值为 0.4~0.6,这里取 $\alpha=0.5$;桩间土承载力折减系数 β 一般取 0.1~0.8,这里取 $\beta=0.4$;桩间天然土承载力特征值 $f_{sk}=100$ kPa;面积置换率 m 为 0.12~0.3;桩身地聚合物土无侧限抗压强度标准值 $f_{cu}=0.3\sim 3$ MPa,室内试验确定的桩身地聚合物土 90 d 无侧限抗压强度

为 2.0 MPa;加固区面积 $A=25$ m²。单桩竖向承载力特征值 $R_a=\mu_p \sum q_{si} l_i + \alpha A_p q_p = 975$ kN, $R_a = \eta f_{cu} A_p = 231$ kN,取两者中的小值,即 231 kN。

复合地基承载力标准值 $f_{spk}=mR_a/A_p + \beta(1-m)f_{sk}=127$ kPa,桩间天然地基承载力特征值 $f_{sk}=100$ kPa,得到最小面积置换率 $m=15.38\%$ 。地聚合物搅拌桩布桩数 $n=mA/A_p=10$ 根。天然地基压缩模量 $E_s=1.80$ MPa,模量提高系数 $\zeta=1.083$,复合地基压缩模量 $E_p=1.95$ MPa。

2.3 地聚合物搅拌桩的应用效果

采用地聚合物搅拌桩处治 K28+299—319 段软基后,进行静荷载试验和无侧限抗压强度试验,结果见表 7 和表 8。试验结果满足设计要求,地聚合物搅拌桩可用于软基处理。

表 7 处治后软基静荷载试验结果

试验 编号	检测日期	最大试验 荷载/kN	最大试验荷载 对应沉降量/mm	残余 沉降量/mm	单桩承载力 极限值/kN	是否符合 设计要求
1	2017-06-21	120	24.17	16.47	≥ 120	符合
2	2017-06-22	120	19.41	12.38	≥ 120	符合
3	2017-06-22	120	17.96	14.10	≥ 120	符合

表 8 28 d 无侧限抗压强度试验结果

试验 编号	检测日期	加荷速率/ (MPa · s ⁻¹)	28 d 无侧限抗压强度/MPa		是否符合 设计要求
			试验结果	设计值	
1	2017-07-06	0.5~1.0	2.1	≥ 0.6	符合
2	2017-07-06	0.5~1.0	2.0	≥ 0.6	符合
3	2017-07-06	0.5~1.0	2.5	≥ 0.6	符合

3 结论

在同一龄期下,地聚合物加固土样的强度随地聚合物掺量的增加而增大;在同等掺量下,加固土样的强度随着龄期的延长而增大,地聚合物掺量为 14% 时,在保证养护龄期的条件下,地聚合物土强度能达到软基处理要求。

参考文献:

- [1] 约瑟夫·戴维德维斯.地聚合物化学及应用[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [2] 张书政,龚克成.地聚合物[J].材料科学与工程学报,2003,7(1).
- [3] GB 175—2007,通用硅酸盐水泥[S].
- [4] JGJ/T 233—2011,水泥土配合比设计规程[S].

- [5] JTG E40—2007,公路土工试验规程[S].
- [6] 徐醒华,杨涛,黄锦荣,等.土壤有机质含量对深层搅拌桩成桩质量的影响[J].广东土木与建筑,2004(10).
- [7] 曹名葆.水泥土搅拌法处理地基[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [8] 王燕.水泥土搅拌桩复合地基的分析与工程应用研究[D].天津:天津大学,2008.
- [9] GB 50007—2011,建筑地基基础设计规范[S].
- [10] 彭振宇.水泥搅拌桩法在处治新旧路基差异沉降中的应用[J].公路与汽运,2016(5).
- [11] 袁耀波.佛山地区公路软土路基水泥搅拌桩检测及验收问题探讨[J].公路与汽运,2016(5).
- [12] 顾长存,刘胜松.堤防水泥土搅拌桩复合地基稳定分析及应用研究[J].防灾减灾工程学报,2005,25(3).

收稿日期:2017-06-17