

文章编号: 1000-5013(2011)02-0203-04

闽南海相沉积土水泥土的强度特性分析

常方强, 涂帆

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 根据闽南地区海相沉积土水泥搅拌桩工程的室内配方试验成果,分析水泥土的龄期、水泥掺量、土样含水量和土样种类对水泥土无侧限抗压强度的影响. 研究表明,水泥土强度与龄期有关,28 d 内强度增长较快,28~60 d 的强度增长速率趋缓;水泥土的强度随着水泥掺量的增大而增大,两者基本呈线性关系;随着土样含水量的增加,粉喷桩水泥土强度明显降低;土的种类对水泥土强度的影响很大. 最后,根据试验数据拟合出淤泥浆喷水泥土 28 d 和 60 d 强度的预测公式,并进一步估算其 90 d 强度.

关键词: 水泥土; 强度; 沉积土; 预测公式; 闽南地区

中图分类号: TU 411.6; TU 447(257)

文献标志码: A

水泥搅拌桩是利用水泥粉(浆)作为固化剂,通过特制的深层搅拌机械,在加固深度范围内将土和水泥粉(浆)就地强制拌和,使之成为具有水稳性和足够强度的柔性桩体. 水泥搅拌桩与地基土形成整体,形成复合地基,其实质是考虑桩、土共同分担作用,因而比仅仅认为荷载由桩体承担要经济^[1]. 水泥搅拌桩的加固效果,不仅与水泥类别、掺入数量、加固时间和外掺剂等因素有关,还与被加固土的自身性质有关^[2],如土体类型和含水量. 如果某地区同一类型的土体具有相似性,那么研究该地区土体和水泥土的物理力学指标,可以为该地区搅拌桩的设计提供依据. 文献[3-4]测试了我国一些地区水泥土的物理力学性质. 本文根据大量实际工程的水泥土室内配方试验数据,分析了闽南地区海相沉积软土的无侧限抗压强度特性.

1 闽南地区海相沉积软土的工程特性

闽南沿海地区的淤泥,广泛分布于河流的下游平原和沿海港湾地带,由海相和海陆过渡相组成,埋深一般很浅,大都在 3 m 以内,有的甚至暴露地表,属浅埋型. 其淤泥厚度约为 2~20 m,某些上覆粘土、粉质粘土或泥砂层,有的淤泥夹有砂及粉细砂薄层等. 水泥搅拌桩是闽南常用的地基处理方法.

为了解水泥土的工程特性,有必要先了解形成水泥土的原状土的一些物理力学参数. 福建泉州大坪山隧道连接线道路工程软基试验段淤泥的物理力学指标,如表 1 所示^[5]. 表 1 中: w_{H_2O} 为含水量, γ 为重度, e 为孔隙比, ω_L 为液限, ω_P 为塑限, I_P 为塑性指数, I_L 为液性指数, C 为粘聚力, φ 为内摩擦角, a_{1-2} 为压缩系数, E_s 为压缩模量, w_o 为有机质质量分数. 由表 1 可以看出,该地区的软土具有高压缩性、高孔隙比和低强度的特性.

表 1 闽南地区淤泥的物理力学性质指标

Tab. 1 Mechanical properties of silt in south Fujian

指标	$w_{H_2O}/\%$	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	e	$\omega_L/\%$	$\omega_P/\%$	I_P	I_L	直剪试验(快剪)		压缩试验		$w_o/\%$
								C/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	a_{1-2}/MPa^{-1}	E_s/MPa	
平均值	62.1	15.9	1.69	48.2	30.3	18.2	1.76	13.4	1.9	1.71	1.62	3.2
范围值	37.7~81.4	14.6~17.4	1.08~2.23	31.1~62.4	23.5~39.1	11.0~25.3	1.21~2.39	8.0~19.2	0.9~2.3	0.54~2.69	0.23~2.78	2.1~6.6

收稿日期: 2010-06-13

通信作者: 常方强(1980-),男,讲师,主要从事环境岩土灾害的研究. E-mail:changfq@hqu.edu.cn.

基金项目: 华侨大学高层次人才科研启动项目(09BS621)

2 水泥土的室内试验与分析

2.1 试验准备

水泥土的强度是通过水泥土无侧限抗压强度反映的. 进行无侧限抗压试验前, 需制备试样, 将现场取来的土体按一定比例掺入水泥和水, 制备浆喷试样; 然后, 掺入一定掺量的水泥粉, 制备粉喷试样. 试样均经搅拌装入模子, 模子直径为 4.5 cm, 高为 9.0 cm. 第 2 天脱模, 测其密度后, 将试样放进塑料袋, 扎紧袋口置入水中, 放在养护室内养护, 养护龄期分别为 7, 15, 28, 60 d. 至一定龄期时, 采用万能试验机对试样进行抗压试验, 测试其极限抗压强度(q_u).

2.2 水泥土的密度

据统计, 该地区水泥土的密度一般为 $1.51\sim 1.83\text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 随着水泥掺量的增加, 密度略有增加. 水泥土的水泥掺量(α)一般为加固土体质量的 $10\%\sim 18\%$, 又往往还要加水, 所以比天然软土的密度仅增加 $0.8\%\sim 3.1\%$. 实际工程中, 水泥土固化过程还会产生侧向挤出和隆起. 因此, 加固后的土体与天然土的密度相差不大, 不会对软弱下卧层产生大的附加应力.

2.3 龄期对水泥土强度的影响

龄期(t)是影响水泥土早期强度的重要因素. 福建泉州洛江万安开发区某工程的地基土为淤泥, 含水量为 56.2% . 采用水泥搅拌桩进行地基处理, 室内配方试验采用浆喷和粉喷两种, 水泥掺量分别为 18% 和 15% , 浆喷水泥土水灰比为 0.42 . 根据试验成果, 绘制水泥土无侧限抗压强度与龄期的关系曲线, 如图 1 所示. 从图 1 可看出, 随着龄期的增长, 在 28 d 内的水泥土强度增长较快, 28 d 后的水泥土强度增长速率趋缓. 对于浆喷, 60 d 和 28 d 的水泥土强度关系为 $q_{u,60}\approx(1.32\sim 1.36)q_{u,28}$; 对于粉喷则为 $q_{u,60}\approx(1.06\sim 1.11)q_{u,28}$. 工程的成果基本上在文献[6]的统计范围($q_{u,60}=(1.15\sim 1.46)q_{u,28}$)内. 此外, 对于浆喷, 60 d 与 28 d 水泥土强度之比接近文献[6]的统计上限; 对于粉喷, 则接近下限.

文献[7]通过试验得出, 水泥土的固化反映约需 3 个月才能完成. 工程中, 为了尽快提高水泥土强度, 常采用早强水泥, 必要时, 还可适量添加外掺剂, 如粉煤灰、石膏等. 在相同龄期 and 水泥掺量的情况下, 粉喷水泥土的强度比浆喷的大, 幅度为 $15\%\sim 50\%$. 粉喷水泥土除了与浆喷的一样有水泥与土的反应外, 水泥粉还吸收土体中的水分, 减少土的含水量, 提高水泥土强度.

2.4 水泥掺量对水泥土强度的影响

水泥掺量(α)越大, 土与水泥的水化反应越充分, 形成的胶结体强度越高. 根据福建泉州市赤峰路市政工程的 水泥土室内配方试验结果, 得到水泥土强度与水泥掺量的关系, 如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 水泥土的强度与水泥掺量基本呈线性关系, 其连线斜率约为 $0.09\sim 0.10$.

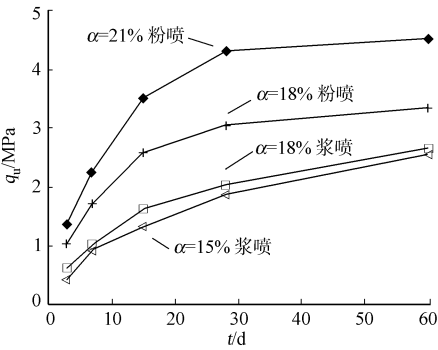


图 1 水泥土强度与龄期的关系图
Fig. 1 Relationship between soil cement strength and age

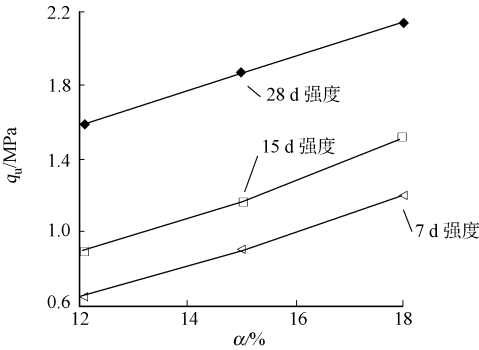


图 2 水泥土强度与水泥掺量的关系
Fig. 2 Relationship between soil cement strength and cement content

对于采用水泥搅拌桩的复合地基而言, 并不是水泥掺量越大越好. 水泥掺量增大, 桩的压缩模量提高, 荷载作用下桩的变形减小, 桩土应力比过大, 起不到复合地基的作用. 当然, 水泥掺量也不能过小, 文献[8]指出, 当水泥掺量小于 5% 时, 土与水泥的反应弱, 水泥土固化程度低, 强度离散性大. JGJ 79—2002《建筑地基处理技术规范》(以下简称《规范》)规定^[9], 水泥掺量除块状加固时可用被加固湿土质量的 $7\%\sim 12\%$ 外, 其余宜为 $12\%\sim 20\%$.

2.5 土样含水量对水泥土强度的影响

选取水泥掺量为 15% 的不同粉喷桩工程的室内试验结果，其水泥土强度与土体含水量的关系，如图 3 所示。从图 3 可看出，水泥土强度随着土样含水量的增加而降低，且降低幅度还与龄期有关，龄期越短，降低幅度越小。龄期短，水泥与水的水化反应尚不充分，土中含水量的影响还没有充分表现出来。

从图 3 可知，对于 28 d 的水泥土强度，其含水量由 38.1% 增至 69.0%，强度则降低为原来的 1/3，即含水量每增加 10%，强度降低约 28%，可见，土体含水量对水泥土强度的影响较大^[10]。福建泉州晋江市某工程的淤泥含水量超过 80%，水泥掺量为 16% 的水泥土 60 d 强度仍低于 1.0 MPa；当水泥掺量提高到 18% 时，其 60 d 强度才达到 1.0 MPa。因此，对于含水量高的软土，采用水泥搅拌桩应当慎重。

2.6 土的种类对水泥土强度的影响

土的种类不同，由该土制成的水泥土的强度亦不同。福建泉州晋江市某搅拌桩工程的地基中有粉质粘土、淤泥夹砂和淤泥，其含水量分别为 55.6%，56.3% 和 78.5%。对这 3 种土分别进行水泥土室内配方试验，结果如图 4 所示。图 4 中：水泥掺量均为 15%，强度差别较大。

从图 4 可以看出，粉质粘土的水泥土强度最高，大约是淤泥水泥土强度的 3 倍；粉质粘土和淤泥夹砂的含水量相近，但前者水泥土的强度约为后者的 1.5 倍；淤泥夹砂和淤泥的水泥土强度随龄期的增长速率与粉质粘土的相比，较为平缓。

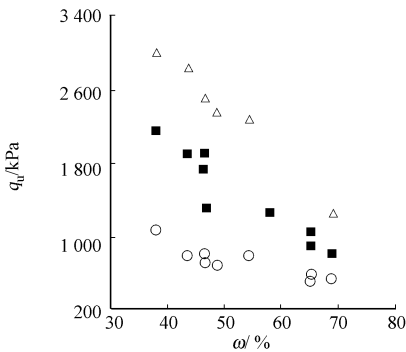


图 3 水泥土强度与土样含水量的关系
Fig. 3 Relationship between soil cement strength and water content

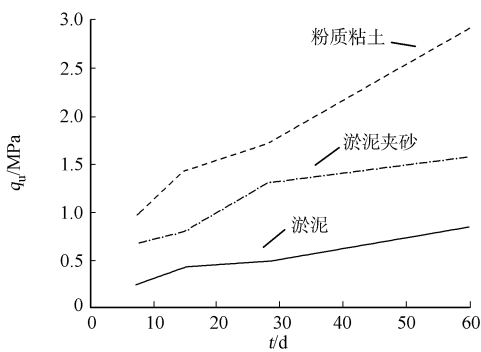


图 4 土的种类对水泥土强度的影响
Fig. 4 Influence of soil type to soil cement strength

土的种类对水泥土强度的影响较大，这与混凝土的强度与所加骨料的直径有关是一个道理，即骨料粒径越大，混凝土强度越大。对于该工程的 3 种地基土，粉质粘土的土颗粒粒径最大，淤泥夹砂比淤泥多了一些粗颗粒的砂，因此 3 者的水泥土强度不同。

3 浆喷水泥土强度的预测

《规范》规定，对承受竖向和水平向荷载的水泥土，其设计强度应分别取 90 d 和 28 d 龄期立方体试件的强度。但是，在实际工程中，由于工期的原因，往往等不到 90 d 或 28 d 的水泥土强度出来便要进行下一步的设计。因此，根据室内配方试验的水泥土早期强度，推算 90 d 或 28 d 的水泥土强度有其现实意义。需要说明的是，试验所做的试件均为圆柱体，而圆柱体试件的强度值比立方体试件的强度值高^[11]，因此将圆柱体试件的强度值乘以折减系数便得立方体试件的强度值。

浆喷水泥土的水灰比一般为 0.45~0.55^[9]，而在此范围内，水灰比的变化对水泥土强度影响不大，可忽略。根据 13 组淤泥水泥土的室内试验结果，拟合浆喷水泥土 28 d 和 60 d 的强度预测公式为

$$q_{u,28} = \frac{0.68q_{u,7} + 6.11\alpha}{1.84w}, \quad q_{u,60} = \frac{1.91q_{u,7} + 6.01\alpha}{2.56w}.$$

式中： $q_{u,7}$ 、 $q_{u,28}$ 、 $q_{u,60}$ 分别为水泥土 7, 28, 60 d 龄期的无侧限抗压强度； w 为土的含水量； α 为水泥掺量。

分别根据 28 d 和 60 d 的强度预测公式，预测福建泉州市两个工程的水泥土 28 d 强度和 60 d 强度，如表 2 所示。从表 2 可看出，工程 1, 2 的水泥土强度预测值与实测值较为接近。说明，28 d 和 60 d 的强度预测公式对实际工程有参考价值。由于引用的工程试验数据均未有 90 d 强度值，因此，参考文献[3]

的经验式可得

$$q_{u,90} = (1.33 \sim 1.79)q_{u,28},$$

或
$$q_{u,90} = (1.16 \sim 1.23)q_{u,60}.$$

对于浆喷水泥土,可以采用 28 d 和 60 d 的强度预测公式计算 28 d 或 60 d 强度,再由上式估算出其 90 d 强度.

值得指出的是,以上的强度预测式是根据闽南地区海相沉积淤泥水泥土强度的试验结果拟合得到的,对于其他地区和其他种类土体,其适用性尚未得到验证.

4 结 束 语

根据实际工程的水泥土室内配方试验数据,分析闽南地区软土形成的水泥土强度特性.同时,拟合出淤泥浆喷水泥土 28 d 和 60 d 强度的预测公式,并根据统计数据进一步估算 90 d 强度,可为承受水平和竖向荷载的水泥土强度的设计值提供参考.

参考文献:

[1] 张荣堂. 复合地基技术在高速公路软基处理中的应用[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2004,25(2):165-168.
[2] 徐至钧. 水泥土搅拌法处理地基[M]. 北京:机械工业出版社,2004:19.
[3] 朱大字. 水泥土力学性能的试验分析[J]. 建筑材料学报,2006,9(3):291-296.
[4] 曹云,徐奋强. 水泥土无侧限抗压强度室内试验研究与分析[J]. 岩土工程界,2009,12(9):76-79.
[5] 马时冬,涂帆. 大坪山隧道连接线道路工程软基处理试验段现场测试研究总报告[R]. 泉州:华侨大学,2004.
[6] 牛志荣. 复合地基处理及其工程实例[M]. 北京:中国建材工业出版社,2000:442.
[7] 李治平. 水泥搅拌土(软土)的室内强度试验研究[J]. 岩土工程界,2004,7(2):74-75.
[8] 叶书麟. 地基处理与托换技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994:372.
[9] 中国建筑科学研究院. JGJ 79-2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:45.
[10] 涂帆,常方强. 水泥土无侧限抗压强度影响因素的室内试验研究[J]. 工程勘察,2004(3):8-10.
[11] 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.

Study on Marine Deposit Soft Soil Cement in South Fujian

CHANG Fang-qiang, TU Fan

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Based on the laboratory results of cement soil of mixing pile in the marine deposited soils south Fujian, the influence of the age, cement content, water content and type of soil to the unconfined compression strength is studied. The results show that the cement soil strength is related with the age, the strength increases fast in the first 28 days, the increase rate slows down in 28 d to 60 d; the strength of cement soil is linearly related approximately to the cement content; with increase of soil water content, strength of cement soil of dry jet mixing pile (DJMP) decreases; soil type influences significantly the strength of cement soil. The prediction formulas of cement soil strength at 28 d and 60 d are fitted according to the tested data, which would estimate further the strength at 90 d.

Keywords: cement soil; strength; deposited soil; prediction formula; south of Fujian

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)

表 2 水泥土强度的实测和预测结果

Tab. 2 Prediction and test results
of soil cement strength

工程	试件	$q_{u,7}/\text{MPa}$	$w/\%$	$\alpha/\%$	$q_{u,28}/\text{MPa}$	
					实测值	预测值
工程 1	试件 1	0.81	57.0	15	1.23	1.40
	试件 2	0.96	57.0	18	1.94	1.67
	试件 3	0.79	60.1	15	1.49	1.32
	试件 4	1.02	60.1	18	1.73	1.62
工程 2	试件 1	1.1	56.0	15	2.2	2.09
	试件 2	0.42	85.1	18	1.06	0.86
	试件 3	1.36	46.2	15	2.51	2.97
	试件 4	1.09	42.0	18	2.97	2.94