

· 地基与基础 ·



水泥土抗压抗剪强度及相关性研究^{*}

陈晓静¹, 王保田^{2,3,4}, 左晋宇², 李文炜²

- (1. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210022;
2. 河海大学, 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学, 疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏 常州 213022;
4. 西藏农牧学院 水利土木工程学院, 西藏 林芝 860000)

摘要: 为探究水泥土抗压、抗剪强度参数之间关系, 配制不同水泥配比的水泥土试样, 对不同龄期下的各试样开展无侧限抗压强度试验和快剪试验, 得到水泥土的抗压、抗剪强度参数, 并分析强度参数随水泥配比变化规律, 确定 16% 水泥掺量、0.50 水灰比为依托工程的水泥配比, 建立水泥土无侧限抗压强度与黏聚力、变形模量的关系。结果表明, 水泥土试样的无侧限抗压强度和黏聚力都会随水泥掺量的增加而增加, 且无侧限抗压强度和黏聚力呈线性关系; 掺入水泥的软弱土, 其无侧限抗压强度和抗剪强度都明显提高; 淤泥质土和淤泥土层的水泥土变形模量小于规范推荐值。

关键词: 软土边坡; 水泥土搅拌桩; 强度相关性; 变形模量

中图分类号: TU 473; U 654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0169-07

Study on compressive and shear strength of cement-mixed soil and correlation

CHEN Xiao-jing¹, WANG Bao-tian^{2,3,4}, ZUO Jin-yu², LI Wen-wei²

(1. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210022, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Engineering Research Center of Ministry of Education for Dredging Technology, Hohai University, Changzhou 213022, China;
4. Department of Water Conservancy and Civil Engineering, Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China)

Abstract: To explore the relationship between the compressive strength and shear strength parameters of cement-mixed soil, we prepare the cement-mixed soil samples with different cement ratios, carry out the unconfined compressive strength test and fast shear test for each sample under different ages, obtain the parameters of compressive strength and shear strength of cement soil, analyze the variation law of strength parameters with cement ratio, determine the cement ratio of 16% and 0.50 water-cement ratio for the project, establish the relationships of unconfined compressive strength and cohesion, and unconfined compressive strength and deformation modulus of cement-mixed soil. The results show that the unconfined compressive strength and cohesion of cement-mixed soil samples increase with the cement ratio, and the unconfined compressive strength and cohesion present a linear relationship. The unconfined compressive strength and shear strength of soft soil mixed with cement obviously improve. The deformation modulus of muddy soil is less than the recommended value of code.

Keyword: soft soil slope; cement-soil mixed pile; correlation of strength parameters; deformation modulus

收稿日期: 2020-11-24

^{*}基金项目: 国家自然科学基金项目(51778211); 江苏省自然科学基金项目(BK20171434)

作者简介: 陈晓静(1968—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水利工程设计与研究。

软弱土边坡在航道工程中分布广泛,由于软土强度低、压缩性高、具有流变性,天然边坡的稳定性往往难以满足工程需求,因此需要采取合适的措施对软土边坡进行加固。本文依托长江下游某河道加固工程,其一期工程采用抗滑桩加固,由于抗滑桩桩体刚度远大于边坡土体,软弱土会绕桩体发生塑性破坏,不能充分发挥抗滑桩性能^[1-2]。因此,二期工程中提出采用水泥搅拌桩加固的方案。水泥搅拌桩施工迅速、操作简便、造价低,边坡中的软弱土体与水泥拌和固化后可以形成复合地基,进而提高整体稳定性和承载力^[3]。

在边坡工程中,水泥搅拌桩主要提供抗剪作用,桩体质量薄弱部位很可能导致边坡的失稳破坏,因此在桩身全长范围内的抗剪强度指标都需要满足设计要求。目前在水泥搅拌桩相关工程的质量检测中存在如下问题:1)相关规范(如《建筑地基处理技术规范》^[4])只要求对搅拌桩的无侧限抗压强度进行检测,忽略了抗剪强度的相关检测,无法保证搅拌桩抗剪强度满足工程需求;2)如若增加抗剪强度的相关检测,会大幅增加质量检测

的工作量和成本^[5-6]。实际上,依据摩尔-库仑破坏准则,水泥土无侧限抗压强度与抗剪强度存在一定相关性,根据这一关系并结合无侧限抗压强度就可快速判断其抗剪强度指标的范围,进而判定搅拌桩能否满足边坡工程需求。

目前大多数研究只针对水泥土的无侧限抗压强度规律,对其抗剪强度规律以及抗压抗剪强度相关性的研究较少^[7-9]。本文依托长江下游某河道工程,对不同水灰比、水泥含量、龄期等条件下的水泥土试样分别开展无侧限抗压试验和快剪试验,探究抗压、抗剪强度的变化关系,并建立抗压强度与抗剪强度的近似关系以及变形模量与抗压强度的关系,为相关工程的变形和稳定分析提供参考。

1 试验内容

1.1 试验材料

试验用土选自长江下游某河道工程中的③₁淤泥质土和③₃淤泥两种土层,其物理力学指标见表1。试验用水泥为P·O 42.5级普通硅酸盐水泥。

表 1 试验用土的物理力学指标

土层	天然含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	土粒相对 密度 G_s	天然孔隙比 e_0	干密度 $\rho'/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	液性指数 I_L	塑性指数 I_P
③ ₁	37.3	1.82	2.73	1.059	1.33	35.5	21.3	1.16	14.0
③ ₃	66.8	1.60	2.75	1.860	0.96	45.5	25.4	1.52	19.6

1.2 试验方案

由于不同工程的现场水文地质条件各异,所使用的水泥品种不同,因此能够满足工程需要的水泥配比也不相同。《建筑地基处理技术规范》指出,作为复合地基增强体时水泥掺量不小于12%,湿法水灰比可选用0.45~0.55。结合相关工程,本文选取水泥掺量为14%、16%、18%,水灰比为0.45、0.50、0.55,分别对这9种配比的水泥土进行7、14、28和90 d共4个龄期下的无侧限抗压试验和快剪试验。无侧限抗压试验采用TZS全自动三轴仪,试样为直径50 mm、高50 mm的圆柱体,加载速率为1 mm/min,并设置3个平行试样。快剪试验采用普通应变控制式直剪仪,试样为直径61.8 mm、高20 mm的圆柱体,竖向压力

分别为50、100、150、200 kPa。

为使试样养护条件尽可能接近工程现场条件,待试样成型后将其脱模并放入装有原状土体的养护箱内^[10],覆上湿润报纸和塑料膜,定期洒水以保持箱内土体的含水率,待到设计龄期时将土样取出进行试验。

2 试验结果与分析

2.1 无侧限抗压强度影响参数分析

水泥土的无侧限抗压强度与水泥掺量、水灰比、龄期有关,为得到适合本工程的水泥配比,需要分别对不同水泥含量、水灰比的水泥土试样强度进行参数分析。③₃淤泥层含水率高、土体强度低,是控制本工程岸坡稳定的关键性层位,

因此本文主要针对③₃ 土层进行分析讨论。无侧限抗压强度随水泥含量和水灰比的变化关系, 侧限抗压试验结果见表 2, 通过整理得到了无侧限抗压强度随水泥含量和水灰比的变化关系, 见图 1、2。

表 2 无侧限抗压强度试验结果

土层	水灰比	水泥 掺量/%	无侧限抗压强度/MPa				变形模量/MPa			
			7 d	14 d	28 d	90 d	7 d	14 d	28 d	90 d
③ ₁	0.45	14	1.12	1.35	2.04	3.15	37.13	46.49	55.30	67.93
		16	1.10	1.19	2.37	4.02	33.14	34.78	69.98	80.85
		18	1.66	1.71	2.99	4.01	57.12	42.05	68.94	85.66
	0.50	14	1.32	1.69	1.94	3.18	35.77	42.57	53.42	68.24
		16	1.71	2.33	2.71	4.25	47.95	67.55	64.52	111.94
		18	1.83	2.36	2.28	4.78	53.69	67.59	77.58	105.06
	0.55	14	1.42	1.75	1.94	4.28	55.17	47.97	51.14	106.30
		16	1.49	2.13	2.30	4.26	45.94	61.10	57.43	105.16
		18	1.53	2.15	2.58	3.21	37.71	47.46	52.64	71.21
③ ₃	0.45	14	0.07	0.09	0.78	1.02	2.12	3.52	33.21	32.08
		16	0.04	0.05	1.39	1.89	1.06	2.39	47.99	56.94
		18	0.09	0.18	1.09	1.18	4.72	7.43	27.23	45.50
	0.50	14	0.08	0.13	1.46	1.14	3.77	4.60	44.54	31.25
		16	0.09	0.16	1.21	2.04	2.80	4.91	35.93	60.52
		18	0.09	0.22	1.52	2.29	3.79	8.46	41.37	66.22
	0.55	14	0.06	0.12	0.86	1.22	3.50	5.62	24.07	41.35
		16	0.07	0.18	1.06	1.77	2.00	5.97	29.37	54.08
		18	0.09	0.20	1.36	1.90	2.88	5.82	30.55	44.36

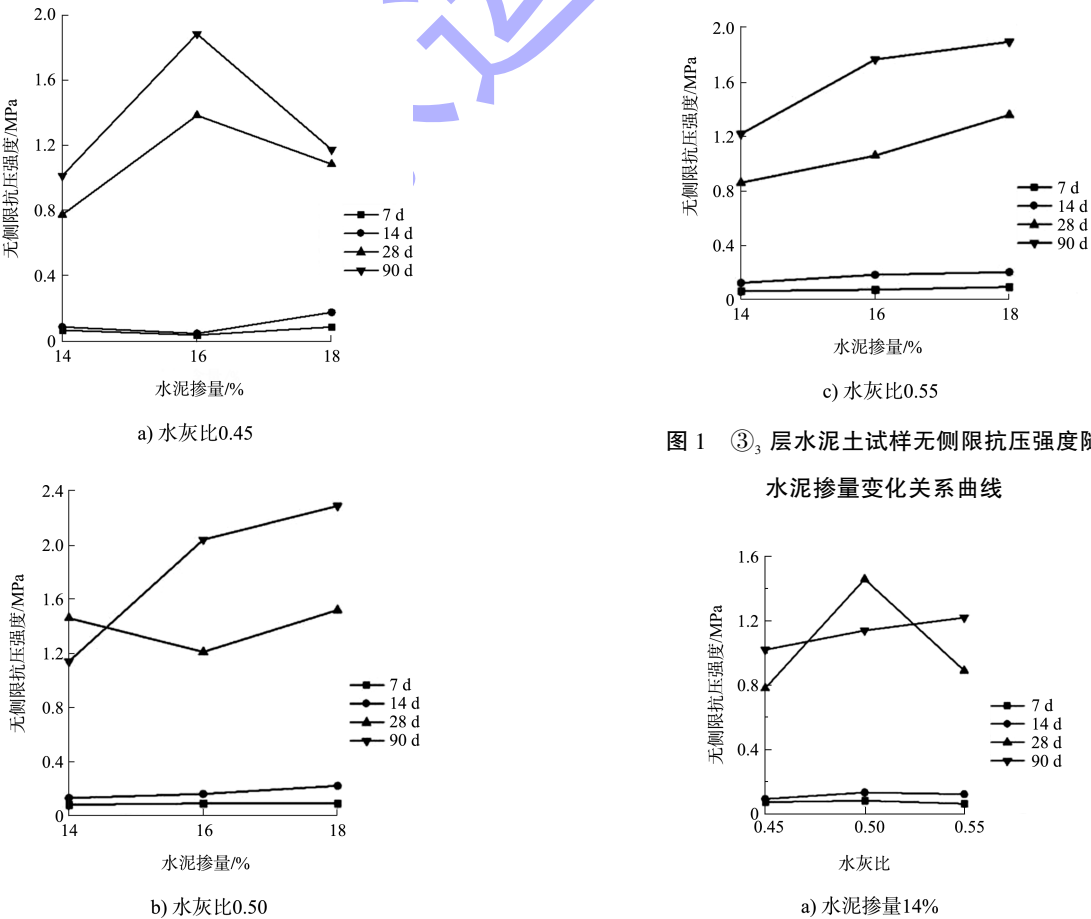


图 1 ③₃ 层水泥土试样无侧限抗压强度随水泥掺量变化关系曲线

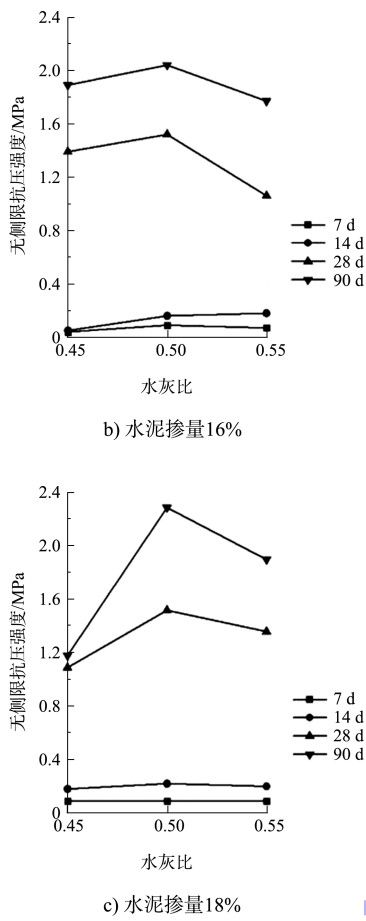


图 2 ③₃ 层水泥土试样无侧限抗压强度随水灰比变化关系曲线

由图 1、2 可以看出，对同一龄期下、相同水灰比的水泥土试样，其无侧限抗压强度基本上随着水泥掺量的增加而增加，这是由于水泥掺量越

大，水泥的水解和水化更丰富，土颗粒与水化产物凝结硬化作用增强^[11]。对同一龄期下相同水泥含量的水泥土试样，水灰比对试样无侧限抗压强度的影响没有明显规律，水灰比 0.50 对应试样的无侧限抗压强度略高于其他两种水灰比^[12]。

工程设计及相关规范要求水泥搅拌桩 28 d 无侧限抗压强度大于 0.8 MPa、90 d 大于 1.2 MPa。试验选取的水泥配比大多都能满足规范要求，但考虑到现场施工中搅拌桩的强度通常难以达到试验时的试样强度，需要保留一定的安全富余，并且考虑到工程成本和施工拌和的难易程度，最终选定水泥掺量 16%、水灰比 0.50 为本工程水泥配比。

2.2 抗剪强度影响参数分析

本工程的水泥搅拌桩用于岸坡加固，软土边坡的加固对桩身水泥土的抗剪强度有较高的要求。现行规范对搅拌桩桩身的抗剪强度并没有明确的规定，因此需要根据设计阶段采用的搅拌桩桩身黏聚力 100 kPa 以及内摩擦角 20°，对水泥土试样的抗剪强度进行分析和验证。快剪试验结果见表 3。抗剪强度由黏聚分量和摩擦分量组成，其表达式为：

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \tag{1}$$

式中： τ 为抗剪强度； c 为黏聚力； σ 为滑动面上的法向应力； φ 为土的内摩擦角。

表 3 快剪试验结果

土层	水灰比	水泥掺量/%	黏聚力 c/kPa				内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$			
			7 d	14 d	28 d	90 d	7 d	14 d	28 d	90 d
③ ₁	0.45	14	190.8	282.3	279.4	455.4	23.9	32.0	59.2	36.5
		16	248.0	336.0	362.1	523.6	30.1	20.9	28.2	33.1
		18	263.7	333.8	424.9	622.1	37.1	46.5	50.1	23.0
	0.50	14	182.9	337.9	244.0	280.5	28.2	20.3	57.5	61.8
		16	249.8	317.9	330.5	365.6	39.5	27.0	40.9	58.1
		18	320.6	427.1	272.3	485.3	28.5	16.2	67.4	57.4
	0.55	14	186.1	301.5	181.4	483.4	32.7	31.3	66.5	49.0
		16	204.8	350.7	235.7	551.6	30.2	44.9	68.1	33.2
		18	263.5	351.8	493.8	351.5	51.6	37.3	31.5	66.4

续表3

土层	水灰比	水泥 掺量/%	黏聚力 c/kPa				内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$			
			7 d	14 d	28 d	90 d	7 d	14 d	28 d	90 d
③ ₃	0.45	14	6.6	23.4	273.9	178.6	21.7	21.2	20.4	36.3
		16	2.8	24.3	213.2	203.0	25.5	23.5	44.4	65.2
		18	3.2	12.2	255.3	173.5	28.8	27.0	23.9	50.6
	0.50	14	11.2	31.8	119.7	149.9	24.9	21.6	35.0	62.1
		16	4.4	13.1	240.3	153.4	18.9	25.8	33.5	52.8
		18	3.8	39.9	250.6	248.2	14.4	17.3	22.4	47.9
	0.55	14	1.4	10.3	116.9	154.3	24.1	25.2	33.6	44.0
		16	9.3	35.5	210.4	117.9	20.7	20.1	30.6	53.1
		18	5.0	26.2	215.0	198.4	30.3	22.7	21.6	39.4

由表 3 可看出, 28 d 龄期时各配比水泥土试样的内摩擦角都大于设计值。因此, 在相同法向应力条件下, 只要保证水泥土的实际黏聚力大于设计黏聚力, 则实际的抗剪强度能够满足设计要求, 同时保证一定的安全富余。

水泥土黏聚力随水泥掺量和水灰比的变化关系见图 4、5。可以看出: 水泥土的黏聚力随着水泥掺量增加有所增加, 与水灰比变化没有特别明显的规律。总体上, 水泥土试样随影响参数的变化趋势与无侧限抗压强度相近, 两者之间存在一定相关性。针对水泥掺量 16%、水灰比 0.5 的配比, 其 28 d 龄期水泥土试样的黏聚力超过 100 kPa, 能够满足工程设计的要求。相较于原状土黏聚力 5.1 kPa, 掺入水泥 28 d 后黏聚力提高了 20~50 倍, 改良效果明显。由表 3 可看出, ③₁ 土层的水泥土试样在 7 d 就能够达到一定的抗剪强度, 而③₃ 土层试样的黏聚力在 0~14 d 内增长较为缓慢, 在 14~28 d 内才有较为明显的提升。因此在搅拌桩施工前期中应当注意和防备过大施工荷载可能引起的边坡失稳; 可以考虑添加早强剂以提高搅拌桩的早期强度。

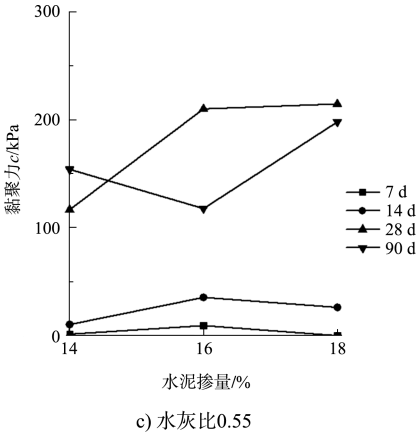
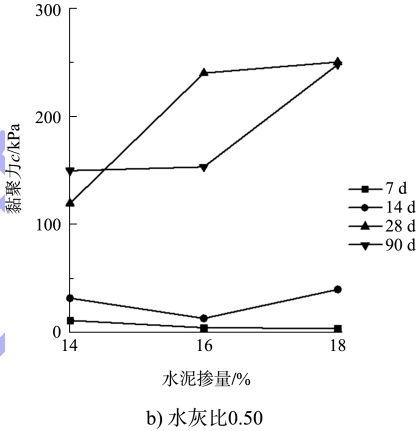
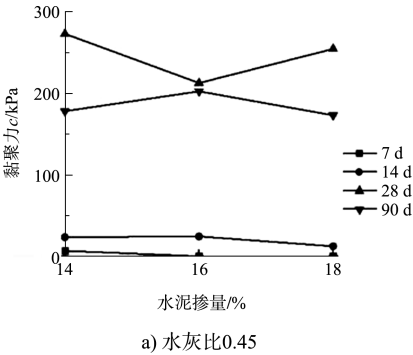
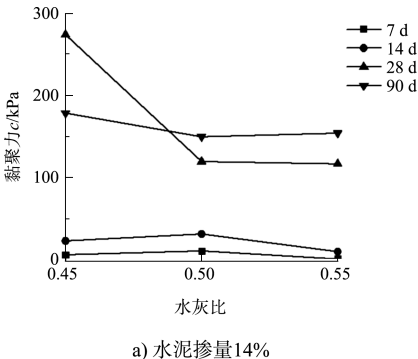
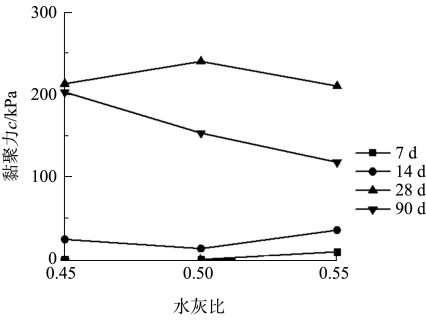
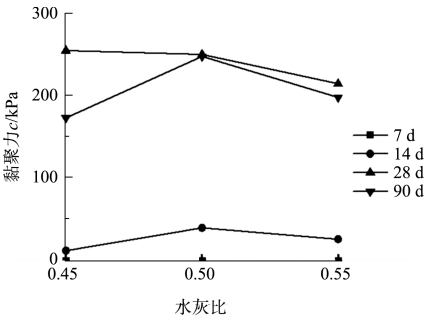


图 3 ③₃ 层水泥土试样黏聚力随水泥掺量变化曲线





b) 水泥掺量16%



c) 水泥掺量18%

图 4 ③₃ 层水泥土试样黏聚力随水灰比变化曲线

2.3 水泥土抗压抗剪强度相关性分析

在工程质量检测中，只进行无侧限抗压强度的检测无法保证搅拌桩桩身黏聚力能够满足边坡工程需求，而再进行抗剪强度检测又会费时费力。本文考虑建立无侧限抗压强度和黏聚力的关系公式，并结合检测得到的无侧限抗压强度，进而可以判定搅拌桩桩身黏聚力能否满足工程需求。无侧限抗压强度 q_u 与黏聚力 c 关系见图 5。可以看出，无侧限抗压强度越高，对应配比水泥土的黏聚力也越高，近似呈现线性关系，其拟合公式为：

$$c=0.114q_u+36.9 \tag{2}$$

当无侧限抗压强度达到规范要求的 0.8 MPa 时，拟合公式得到的黏聚力达到 128.1 kPa。从图 5 中可以看出，当试样的无侧限抗压强度满足规范要求的 0.8 MPa 时，对应黏聚力基本都大于 100 kPa，说明本方法具有较高的可靠性，能够满足工程的检测要求。

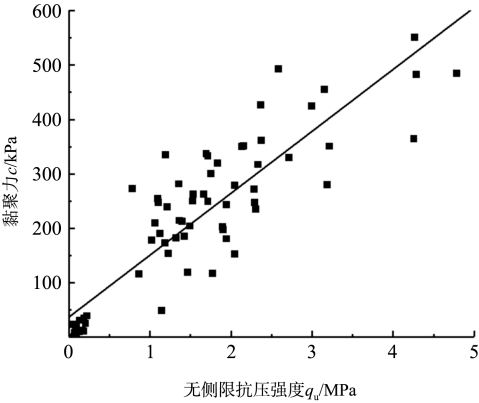


图 5 水泥土无侧限抗压强度与黏聚力关系

2.4 水泥土变形模量与无侧限抗压强度关系

水泥土的变形模量是计算复合地基沉降及边坡变形的力学参数，其大小通常与抗压强度成一定比例关系。工程中常采用平均变形模量 E_{50} ，即 50%抗压强度时对应的应力与应变的比值。依托本工程，得出水泥土的变形模量与抗压强度的关系规律，各组试样的变形模量结果见表 2，并绘制变形模量与无侧限抗压强度关系，见图 6。

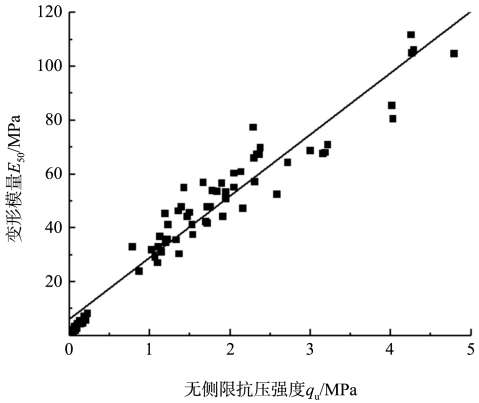


图 6 水泥土试样无侧限抗压强度与变形模量关系

由表 2 可初步看出，随着龄期的增长，各水泥配比试样的变形模量也逐渐增大。由图 6 可看出，水泥土试样的变形模量 E_{50} 与其无侧限抗压强度 q_u 呈线性关系，其拟合公式为：

$$E_{50}=22.9q_u+6.2 \tag{3}$$

本试验中，试样变形模量的取值在 20~40 倍无侧限抗压强度之间，但是与相关研究给出的 100~250 倍^[13] 以及《建筑地基处理技术规范》中给出的 100~120 倍抗压强度存在较大差异。观察相

关研究的应力-应变曲线发现, 其破坏时应变通常集中在 1%~2% 之间, 而本文得到的破坏应变则通常为 2%~4%。这是由于试验用土为高含水率的淤泥质土及淤泥, 导致水泥土试样的应力-应变曲线上缓慢, 得到的变形系数更低^[14-16]。因此在类似工程中, 规范建议的取值会高估水泥土的变形模量, 在相关设计和计算中应当注意。

3 结论

- 1) 水泥土的无侧限抗压强度和黏聚力都会随水泥掺量的增加而增加, 随水灰比的变化规律不显著。得到适合本工程的搅拌桩的水泥掺量为 16%、水灰比为 0.50。
- 2) 掺入水泥改良后的软弱土, 其无侧限抗压强度和抗剪强度都明显提高, 能够满足本工程需求。
- 3) 淤泥质土和淤泥土层的水泥土变形模量通常小于相关规范中的推荐值。
- 4) 水泥土试样的无侧限抗压强度越高, 黏聚力也越高, 呈线性关系。质量检测中, 无侧限抗压强度达到 0.8 MPa 时, 桩身的黏聚力能够满足设计要求。

参考文献:

[1] 陈一冰, 王保田. 长江下游某人工河道软土边坡加固方案对比[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2018, 35(2): 35-38, 48.

[2] TERASHI M, TANAKA H, KITAZUME M. Extrusion failure of the ground improved by the deep mixing method[C]// ARCSMFE. Proceeding of the 7th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Haifa: Israel Institute of Technology, 1983: 313-318.

[3] JONGPRADIST P, YOUWAI S, JATURAPITAKKUL C.

Effective void ratio for assessing the mechanical properties of cement-clay admixtures at high water content[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2011, 137(6): 621-627.

[4] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[5] KANIRAJ S R, HAVANAGI V G. Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures [J]. Cement and concrete research, 1999, 29(5): 673-677.

[6] 梁志荣, 李忠诚, 刘江. 水泥土搅拌桩取芯与取浆两种强度检测分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 435-439.

[7] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554.

[8] 董晓强, 宋志伟, 张少华, 等. 水泥土搅拌桩芯样电阻率特性的应用研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10): 88-94.

[9] 曹智国, 章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3446-3454.

[10] 吴家琦, 侯蕊, 李幻, 等. 水泥改良海相沉积淤泥质软黏土无侧限抗压强度试验研究[J]. 路基工程, 2019(6): 73-77.

[11] 李建, 张松洪, 刘宝举. 水泥土力学性能试验研究[J]. 铁道建筑, 2001(8): 31-33.

[12] 徐福纯, 倪宇光, 沈淑红. 浅谈混凝土强度与水灰比的关系[J]. 水利天地, 2002(6): 47.

[13] 李建军, 梁仁旺. 水泥土抗压强度和变形模量试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 473-477.

[14] 阮庆, 阮波, 曾元, 等. 洞庭湖区淤泥质黏土水泥土力学性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(5): 106-111.

[15] 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.

[16] 朱剑锋, 饶春义, 庾秋水, 等. 硫氧镁水泥复合固化剂加固淤泥质土的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3206-3214. (本文编辑 王璁)

(上接第 162 页)

[4] CHOI J, CHOI J, KIM I. Development of BIM-based evacuation regulation checking system for high-rise and complex buildings[J]. Automation in construction, 2014, 46(10): 38-49.

[5] 孙澄宇, 柯勋. 建筑设计中 BIM 模型的自动规范检查方法研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(4): 140-145.

[6] 周涵. 支持 BIM 模型合规检查的语义方法研究[D]. 大

连: 大连理工大学, 2017.

[7] 何守望. 基于.NET 的 AutoCAD Civil 3D 二次开发技术及应用[J]. 铁路技术创新, 2014(5): 42-44.

[8] Autodesk Asia Pte Ltd. Autodesk Revit 二次开发基础教程[M]. 上海: 同济大学出版社, 2015. (本文编辑 王璁)