

18%时, 泥浆的渗透系数达到 1×10^{-7} cm/s 以下; Philip^[10]对现场取回的水泥—膨润土试样进行了扩散试验和渗透试验, 结果表明随着取样深度的增加, 试样的渗透系数逐渐减小, 随水力梯度的变化, 渗透系数有微弱的变化, 但没有明显的规律性, 但是随着围压的增大, 所测渗透系数变小。这些研究表明适量的掺入膨润土对提高水泥土的抗渗性能有积极的影响。

鉴于此, 以海南岛某基坑开挖止水工程中水泥土搅拌桩的抗渗性能为研究对象, 通过原状土室内渗透试验和现场取芯渗透试验, 探索了珊瑚礁地质条件下, 膨润土外加剂水泥土的抗渗变化规律, 对珊瑚礁特殊地质条件下水泥土搅拌桩的止水性能进行了研究。研究成果对珊瑚礁地质中工程止水具有一定的借鉴意义。

1 工程地质概况

该工程位于海南省文昌市, 场区毗邻南海, 高程 5.06~6.40 m, 属于海成 I 级阶地地貌, 周边地形基本平坦。深度范围内, 上部地层属于第四纪海相沉积物, 以砂土及含砂生物碎屑为主, 局部为珊瑚礁。具体岩性特征见表 1。

表 1 岩性特征表

Table 1 Lithologic characteristics

编号	名称	湿度 密度	其它
①	填土	稍湿 松散	浅褐黄色; 以粉细砂为主, 含少量细粒土及植物根系, 局部为虾塘底部灰色回填土
②	细砂	很湿 松散— 稍密	褐黄色; 以粉细砂为主, 矿物成分主要为石英、长石, 颗粒均匀, 磨圆度一般, 该层底部含有大量生物碎屑
③	含砂生 物碎屑	很湿 松散— 稍密	灰色; 以生物碎屑及珊瑚碎屑为主, 含粉细砂, 含量约 30%~40%左右, 砂粒成分主要为石英、长石等, 局部以珊瑚礁为主

该地区地质状况以砂土及含砂生物碎屑为主, 局部为珊瑚礁地质, 与我国内陆地区相比, 存在 3 个水文地质特点:

(1) 地表、地下水量非常丰富。本工程场区距南海直线距离最小为 800 m, 与南海海水存在地下水联系。

(2) 雨季周期长。场区地处热带北缘沿海地区, 属热带季风岛屿气候, 全年降水量大, 近 3~5 年场区地下水的最高水位接近地表。

(3) 地质结构复杂。珊瑚礁地质层经过漫长的成岩、变异, 内部富含微裂纹, 孔隙以及节理等各种缺陷, 为地下水提供了存储和运输的场所。如果不对其进行有效的止水, 势必造成砂涌, 甚至突水和坍塌。

场地含水层为主要赋存于第②层细砂及第③层含

砂珊瑚碎屑的孔隙潜水, 大气降水及地下径流补给地下水。根据钻孔地层资料, 结合本地区工程经验, 该层属于强透水层, 水量大, 局部地段由于珊瑚碎屑及珊瑚礁含量大, 钻进时漏浆严重。因此在基坑开挖时需要进行止水, 深层搅拌法对场区内的砂屑土等地质基本适用, 但对于本工程中砂屑土和珊瑚礁结构互层等较复杂地质条件, 需要进一步通过试验论证。本工程采用三轴水泥土搅拌桩, 直径 850 mm, 间距 600 mm, 桩长 12.5 m, 28 d 桩体无侧限抗压强度 $q_u > 1.5$ MPa。结合工程实际情况, 水泥土搅拌桩设计抗渗系数为 5×10^{-6} cm/s。

2 原状土室内渗透试验

室内试验分变水头和常水头试验。渗透性较小一般采取变水头法, 渗透性较大一般采取常水头法。本工程对渗透性要求比较高, 设计式样的渗透系数较低, 所以用变水头法。具体做法: 进行水泥土配合比强度试验。将施工使用的水泥按一定百分比(一般 15%~20%)与原土均匀拌和制成水泥土试件, 进行各龄期无侧限抗压强度试验, 分析该配合比能否满足设计强度要求, 确定其能否作为现场施工的配比依据。采集样土时尽量做到保持完整性, 不要有较大扰动。

2.1 渗透试验材料

根据海南地区工程经验, 采用普通硅酸盐水泥, 标号不低于 42.5 级, 水灰比 1.5~2.0, 水泥掺入量为 20%。

(1) 水泥: 42.5 级普通硅酸盐水泥。

(2) 膨润土。

(3) 土样: 现场原状土。

根据规范要求, 筛析了原状土, 结果见表 2。

表 2 原状土筛分结果

Table 2 Screening results of undisturbed soils

粒径 /mm	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005
百分比	1.1%	1.5%	92.5%	4.9%	—

试验之前通过土样筛分和相关试验分别测定被取土质的含水率、湿密度、干密度、土粒比重、孔隙比、饱和度等基本参数, 结果见表 3。

表 3 原状土的基本物理性质

Table 3 Basic physical properties of undisturbed soils

含水率 $w/\%$	湿密度 $\rho_0 /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	干密度 $\rho_d /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	土粒比 重 G_s	孔隙 比 e	饱和度 $S_r/\%$
28.6	1.79	1.45	2.77	0.83	93.5

2.2 试样制备

按照配合比称取水泥、原状土、膨润土和水, 将水泥、原状土、膨润土混合拌均, 加水搅拌 3~5 min; 渗透试验采用南 55 型渗透装置, 试模采用 $\phi 61.8$

mm×40 mm 环刀。为了保证密封性,在环刀内壁涂上薄层凡士林后,再将水泥土样装入环刀中,在自重作用下压实成型。按表 4 配比制作试样,各配比按龄期(7 d、28 d、60 d、90 d)分别制备 3 个试样,以备进行平行试验。室内放置 1 d 后,刮平试样表面,将环刀与样本一起置于养护室(湿度 95±5%,温度 20±2℃)至预定龄期。

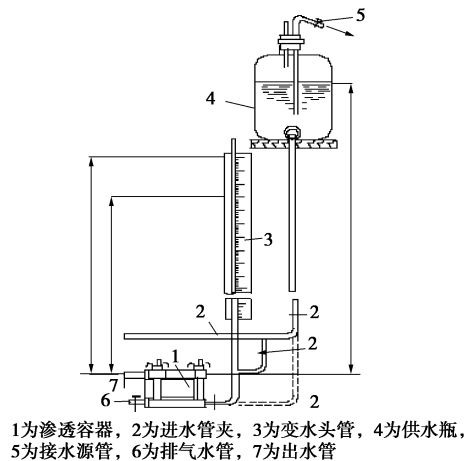
表 4 水泥土试样配合比

Table 4 Mixing proportions of soil-cement specimens

编号	配比		
	水泥掺入比/%	膨润土掺入比/%	水灰比
SC ₂₀	20	0	1.5
SC ₂₀ P ₅	20	5	1.5
SC ₂₀ P ₇	20	7	1.5
SC ₂₀ P ₁₀	20	10	1.5
SC ₂₀ P ₁₅	20	15	1.5

2.3 变水头渗透试验

室内渗透试验采用南 55 型变水头渗透试验装置,如图 1 所示。



1为渗透容器,2为进水管夹,3为变水头管,4为供水瓶,5为接水源管,6为排气管,7为出水管

图 1 变水头渗透试验装置

Fig. 1 Variable head permeability test device

渗透试验的具体步骤如下:

(1) 抽气饱和:用抽真空装置对达到预设龄期的试样进行抽气饱和。

(2) 准备渗透试样:将凡士林涂于容器套筒内壁,推入试样,将周边剩余凡士林刮净,压入止水垫圈,用螺母旋紧,密封过程要求不漏水不漏气。

(3) 调试渗透容器:连接变水头管和进水口,将管内注满水;排除空气至容器内无气泡冒出;关闭排水阀,放平渗透容器,关进水管夹。

(4) 导水渗透测记数据:向变水头管注纯水,当水稳定至预定高度,即可关闭水源;开进水管夹,水通过试样;测量记录水头高度、起始时间,每隔固定一段时间记录高度、温度情况。

(5) 变更水头重复试验:取多组水位高度进行试验,水位稳定时记录下高度与时间,反复进行 4~5 次。

为了消除温度对渗透系数的影响,所有渗透系数根据当时测定的水温换算成 20℃ 标准温度下的渗透系数,换算公式如下:

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (1)$$

式中 k_{20} 为标准温度时试样的渗透系数 (cm/s); η_T 为 T℃ 时水的动力黏滞系数 (kPa·s); η_{20} 为 20℃ 时水的动力黏滞系数 (kPa·s)。

黏滞系数比 η_T/η_{20} 查《土工试验方法标准》GB/T 50123—1999。渗透系数 k 均已换算为标准温度 (20℃) 下的渗透系数 k_{20} 。

2.4 试验结果及分析

表 5 列出了不同配比水泥土试样的变水头渗透试验结果。

表 5 室内水泥土试样的渗透系数 k

Table 5 Permeability coefficient of soil-cement specimens

(10⁻⁷ cm/s)

龄期 T	试样编号				
	SC ₂₀	SC ₂₀ P ₅	SC ₂₀ P ₇	SC ₂₀ P ₁₀	SC ₂₀ P ₁₅
7 d	654	1620	1149.6	993.6	1128
	762	2352	1243.2	1124.4	962.4
	819.6	1932	2239.2	1170	1107.6
7 d 平均	745.2	1968	1543.2	1095.6	1065.6
28 d	21.6	55.92	59.76	53.88	35.52
	25.8	77.52	54.36	49.08	38.52
	29.4	54.96	60.36	46.32	20.4
28 d 平均	25.56	62.76	58.2	49.8	31.44
60 d	10.944	28.2	20.4	12.36	8.676
	9.744	20.52	19.8	14.4	11.364
	11.844	25.56	27.6	11.16	13.2
60 d 平均	10.848	24.72	22.56	12.6	11.076
90 d	7.056	5.64	4.8	3.6	2.556
	8.028	3.78	2.64	2.64	1.308
	7.104	6.216	4.428	2.364	3.228
90 d 平均	7.404	5.208	3.96	2.868	2.364

由试验结果可以看出:

(1) 渗透系数随着时间增加而降低;7 d 到 28 d,各配比水泥土渗透系数均快速下降;60 d 到 90 d,掺膨润土水泥土渗透系数降幅比不掺膨润土水泥土要大。

(2) 掺膨润土水泥土,随着掺入量的增大,渗透系数减小,抗渗能力增强。

(3) $T=28$ d 时,SC₂₀、SC₂₀P₅、SC₂₀P₇、SC₂₀P₁₀ 及 SC₂₀P₁₅ 5 种配比水泥土的渗透系数除 SC₂₀P₅、SC₂₀P₇ 的渗透系数略大于 5×10^{-6} cm/s 外,其余 4 种配比水泥土的渗透系数都小于 5×10^{-6} cm/s,满足工程要求。

(4) 同一龄期, $T < 60$ d,不掺膨润土水泥土 SC₂₀ 渗透系数比掺膨润土的 4 种水泥土的渗透系数都小。 $T > 90$ d 时,掺入膨润土的 4 种配比水泥土渗透系数都比 SC₂₀ 水泥土渗透系数小,说明早期水泥对水泥土渗

透性的影响比膨润土要大, 后期由于膨润土的密实效应, 使得膨润土对水泥土的渗透性影响大于水泥 (图 2, 3)。

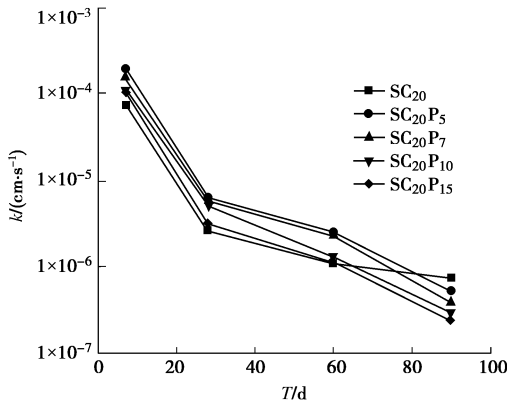


图 2 室内水泥土试样渗透系数与龄期的关系

Fig. 2 Curves of relationship between permeability coefficient of soil-cement specimens and age

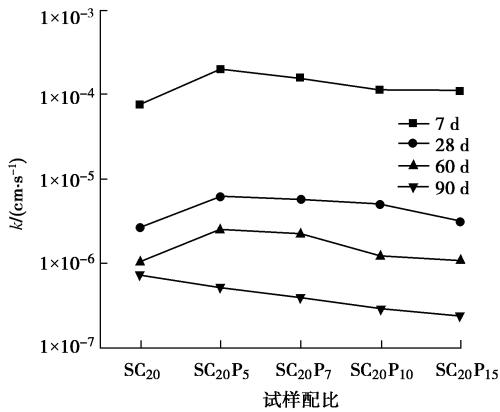


图 3 室内不同配比水泥土渗透系数的关系

Fig. 3 Permeability coefficient of different mixing proportions of soil-cement

3 现场取芯渗透试验

对于复杂、特殊地质条件的止水工程, 土体结构对成桩渗透性影响较大。由于环境温度、土壤扰动、干湿变化等因素, 室内试验难以取得原状土样, 现场测定渗透系数与室内试验测定渗透系数常常存在较大差距, 有时甚至相差几个数量级。因此, 进行现场取芯试验测定的渗透系数, 将所得数据与室内试验进行比较、分析。

3.1 试样加工

经养护的现场芯样强度较大, 不能采用削刀法或环刀法直接取样。为最大限度保留芯样原状性能, 必须对芯样进行打磨、加工。试样尺寸为 $\phi 61.8 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 略小于环刀。为保证密封, 先将试样周围密闭, 后压入环刀。本工程中水泥土搅拌桩桩长为 12.5

m, 对 SC₂₀ 和 SC₂₀P₅ 配比喷浆、气孔处搅拌桩上、中、下部取样。SC₂₀P₁₅ 配比搅拌桩上部成型较好, 对 SC₂₀P₁₅ 配比喷浆孔和喷气孔处搅拌桩上部取样试验。

3.2 试验结果及分析

表 6 为 T=60 d 现场取芯试样变水头渗透试验结果。

表 6 现场取芯试样的渗透系数 (T=60 d)

Table 6 Permeability coefficient of in-situ core tests

试样编号	深度 /m	k / (10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)	试样编号	深度 /m	k / (10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)
SC ₂₀ 浆	2.0	10.35	SC ₂₀ 气	2.0	10.10
	6.0	7.203		6.0	4.80
	10.0	3.591		10.0	2.42
SC ₂₀ P ₅ 浆	2.0	8.79	SC ₂₀ P ₅ 气	2.0	4.70
	6.0	6.33		6.0	5.61
	10.0	5.12		10.0	7.66
SC ₂₀ P ₁₅ 浆	2.0	9.16	SC ₂₀ P ₁₅ 气	2.0	6.69

由图 4 可以看出, SC₂₀ 配比式样喷浆孔处水泥土的渗透系数大于喷气孔处水泥土。深度增大时, 两者渗透系数均减小。说明喷气孔产生的气体将喷浆孔产生的浆液带到了喷气孔, 在气体的搅拌作用下, 防渗墙的抗渗性能得到加强。图 5 表明, 等量掺入膨润土的水泥土, 喷浆孔上部水泥土的渗透系数大于喷气孔上部水泥土, 抗渗能力较差。随着深度加大, 喷浆孔水泥土渗透系数减小, 喷气孔水泥土渗透系数增加。这是因为膨润土的重度小于水泥, 喷气孔中膨润土被气体带动上浮, 导致喷气孔下部膨润土的掺量降低而上部掺量增加, 上部水泥土抗渗性提高, 甚至超过喷浆孔处, 下部水泥土抗渗性能低于喷浆孔处。图 6 可以看出, 喷浆孔处两种配比水泥土渗透系数均随着深度的增加而减小; SC₂₀P₅ 水泥土上部渗透系数小于 SC₂₀ 上部渗透系数, 抗渗性能较好。原因与膨润土重度有关, 从而使上部的渗透系数降低、抗渗性能增强。图 7 表明, 喷气孔与喷浆孔情况类似。SC₂₀P₅ 水泥上部的渗透系数大大小于 SC₂₀ 上部的渗透系数, 进一步说明喷气孔喷出气体对膨润土带动作用比较明显, 增大了上部膨润土掺量, 提高了抗渗性能。

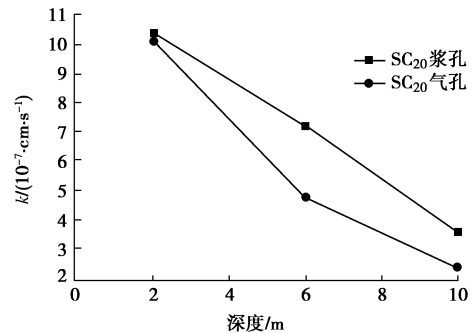


图 4 SC₂₀ 水泥土渗透系数与深度的关系

Fig. 4 Curves of relationship between permeability coefficient of SC₂₀ soil-cement and depth

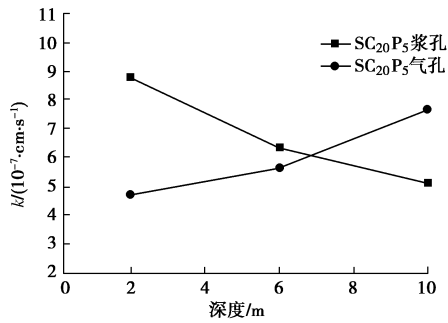
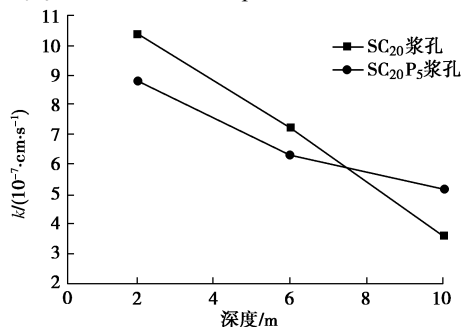
图5 SC₂₀P₅水泥土渗透系数与深度的关系Fig. 5 Curves of relationship between permeability coefficient of SC₂₀P₅ soil-cement and depth

图6 喷浆孔水泥土渗透系数与深度的关系

Fig. 6 Curves of relationship between permeability coefficient of spray hole soil-cement and depth

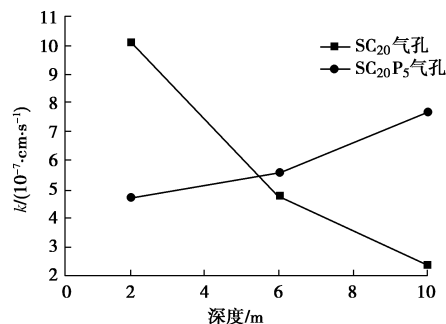


图7 喷气孔水泥土渗透系数与深度的关系

Fig. 7 Curves of relationship between permeability coefficient of jet hole soil-cement and depth

4 结 论

通过原状土室内渗透试验和现场取芯渗透试验,探索了珊瑚礁地质条件下,膨润土外加剂水泥土的防渗变化规律,对珊瑚礁特殊地质条件下水泥土搅拌桩的止水性能进行了研究,主要结论如下:

(1) 通过室内渗透试验和现场取芯试验,发现水泥土搅拌桩的抗渗性能满足工程设计要求,水泥土搅拌桩在珊瑚礁特殊地质条件下的止水工程中具有良好的适用性。

(2) 不同配比水泥土的渗透系数随着时间增加而降低,7 d到28 d,渗透系数均快速下降;60 d到90 d,掺膨润土水泥土渗透系数降幅比不掺膨润土水泥土要大。试验结果表明早期水泥对水泥土渗透性影响大于膨润土,后期由于膨润土的密实效应,膨润土

对渗透性影响大于水泥,且随着膨润土掺入量的增加,水泥土渗透系数减小,抗渗能力增强。

(3) 膨润土重度小于水泥,在气体的带动下容易上浮,导致喷气孔上部膨润土掺量增加,下部掺量降低,从而使搅拌桩上部水泥土抗渗性能提高,甚至超过喷浆孔处水泥土,下部水泥土的抗渗性能低于喷浆孔处水泥土。

参考文献:

- [1] OLSEN W H. An investigation into the near-surface structure of coral reefs using dynamic penetration techniques[M]. Townsville: Thesis James Cook University, 1980.
- [2] POULOS H G, VESUGI Mand, YOUNG G S. Strength and deformation properties of bass strait carbonate sands[J]. Geot Eng, 1982, **13**(2): 189 - 211.
- [3] TAKASHI Tsuchida, MASAKI Kobayashi. Engineering properties of coral soils in Japanese southwestern islands[C]// International Conference on Calcareous Sediments. Perth, 1988.
- [4] 刘崇权, 汪 稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 1998, **19**(1): 32 - 37. (LIU Cong-quan, WANG Ren. Preliminary research on physical and mechanical properties of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, **19**(1): 32 - 37. (in Chinese))
- [5] 吴京平, 褚 瑶, 楼志刚. 颗粒破碎对钙质砂变形及强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(5): 49 - 55. (WU Jing-ping, CHU Yao, LOU Zhi-gang. Influence of particle breakage on deformation and strength properties of calcareous sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(5): 49 - 55. (in Chinese))
- [6] JAZDANIAN A D, REDDY K R, GONZALEZ J V, et al. Evaluation of different slurry materials for containment wall construction at a dense nonaqueous phase liquid-contaminated site[J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2004, **8**(3): 173 - 180.
- [7] JEFFERIS S A. Bentonite-cement slurries for hydraulic cut-offs[C]// Proc 10th Int Conf International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm, 1981.
- [8] OPDYKE SHANA M, EVANS JEFFREY C. Slag-cement-bentonite slurry walls[J]. Journal of Geotechnical and Geoenviron-Mental Engineering, 2005, **131**(6): 673 - 681.
- [9] KHERA RAJ P. Calcium bentonite, cement, slag, and fly ash as slurry wall materials[J]. Geotechnical Special Publication, 1995, **46**(2): 1237 - 1249.
- [10] PHILIP L K. An investigation into contaminant transport processes through single-phase cement-bentonite slurry walls[J]. Engineering Geology, 2001, **60**(1): 209 - 221.

