

水泥砂浆固化土物理力学特性试验研究

范晓秋^{1,2}, 洪宝宁^{1,2}, 胡 昕^{1,2}, 蒋敏敏³

(1. 河海大学岩土工程水利部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;

3. 南京水利科学研究所岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 为了解水泥砂浆固化土的掺砂量与强度之间的关系, 找出具有工程应用前景的配比, 在不同掺砂量不同龄期条件下对水泥砂浆固化土进行了无侧限抗压强度试验, 研究了水泥砂浆固化土的强度和变形特性, 分析了掺砂量和龄期对水泥砂浆固化土的强度和变形特性的影响。研究表明: 在水泥土中掺入一定量的砂, 可有效提高水泥土强度; 一定水泥掺入比下, 存在一个最佳掺砂量, 使水泥砂浆固化土强度(q_u)最高, 变形系数(E_{50})最大; 水泥砂浆固化土与水泥土的应力应变曲线均有明显的峰值, 应力应变关系属加工软化型, 其残余强度随着掺砂量的增加而增加; 采用水泥砂浆搅拌桩加固软弱地基时, 即使采用较高的掺砂量和置换率, 加固体本身重量增加有限, 下卧层附加应力增加也很小。

关键词: 复合地基; 水泥砂浆固化土; 强度变形特性; 掺砂量

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)04-0605-06

作者简介: 范晓秋(1980-), 男, 江苏靖江人, 博士研究生, 从事软基处理与基础工程研究。E-mail: fannicolas@hhu.edu.cn。

Physico-mechanical properties of soils stabilized by cement mortar

FAN Xiao-qi^{1,2}, HONG Bao-ning^{1,2}, HU Xin^{1,2}, JIANG Min-min³

(1. Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to perceive the relationship between strength and sand content of soils stabilized by cement mortar and find out the useful formula for engineering applications, the characteristics of strength and deformation of soils stabilized by cement mortar and the influences of sand content and age were studied through unconfined compression tests. It was indicated that the strength of cement-treated soils was greatly improved through mixing of some sands; there was a best sand content when the cement content was fixed, and the deformation coefficient (E_{50}) and the unconfined compressive strength (q_u) were the greatest under the best sand content; there was a peak value in the stress-strain curves of soils stabilized by cement mortar, and the type of stress-strain curves was strain softening, the residual strength increased with the increase of sand content; when the cement mortar mixed-in-place piles were used to improve soft soils, the geostatic stress in composite ground and additional stress in underlying layers increased a little even though the sand content and displacement ratio were considerable.

Key words: composite foundation; soils stabilized by cement mortar; strength and deformation property; sand content

0 引 言

水泥土材料来源广泛, 价格低廉, 物理力学性能远优于原状土, 目前广泛应用于截渗工程、基坑支护及软土路基的改良和加固建筑工程的复合地基等各类工程中, 取得了良好的技术经济效益。然而, 由于水泥土强度不够高, 因而所形成的复合地基常存在承载力不足, 后期变形较大等诸多问题^[1], 造成水泥土在应用上受到极大限制。因此, 开展如何提高水泥土强度的研究具有重要意义。

目前国内应用水泥土的水泥掺量一般为 7%~25%, 水泥土标准强度一般为 1.5~2.0 MPa。国际上的水泥土, 以日本为例, 水泥掺量为 8%~10%时水泥土强度能达到 2.5 MPa 以上, 其主要措施是针对不同土体掺用相应的外加剂和掺合料。考虑到合适的外加剂和掺合料能够有效地提高水泥土强度, 近年来国内

基金项目: 江苏省交通科学研究计划项目(04Y01); 广东省交通厅科技项目(200206)

收稿日期: 2007-07-10

表 1 土的主要物理力学性质

Table 1 Physico-mechanical indexes of the soft soil

项目	天然密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	孔隙比	塑性指数 /%	液性指数	压缩系数 /MPa ⁻¹	压缩模量 /MPa	有机质 /%	pH 值
指标	1.64	66	1.76	18.0	2.00	0.66	2.07	1.59	6.2

众多学者开展了水泥土的改良方面的研究，如梁仁旺和刘红军^[2-3]对加筋水泥土的力学性能进行了试验，表明随着配筋率及水泥掺入比的提高，加筋水泥土的力学性能都获得显著提高；叶观宝和童小东^[4-5]对水泥土添加剂做了深入的研究，同样得出了选择恰当的添加剂，能有效提高水泥土的早期强度和标准强度；朱向荣和王立峰^[6]研究发现，当水泥土掺入适当配比的纳米材料时可获得细观上十分致密的纳米材料水泥土，形成纳米矿粉-水泥-土的复合增强体，从而获得较高强度的水泥土；兰凯、廖建春和印长俊^[7-9]在软土中掺入一定量的砂作为改良骨料时，发现水泥土强度得到显著提高。上述方法均能有效地改善水泥土的强度特性和变形特性，但所需添加剂或掺合料的价格相差很大，为控制水泥土的改良成本，需选用价格低廉的添加剂或掺合料对水泥土进行改良。

相对其它添加剂和掺合料，砂具有价格低廉和来源广泛的优点。因此，本文通过对水泥砂浆固化土进行一系列无侧限抗压强度试验，研究了掺砂对水泥土强度的影响，验证了以砂作为掺合剂改善水泥土强度特性和变形特性的可行性，为水泥土改良提供了一条新的思路。

1 试样研究的方法

1.1 材料选取

水泥砂浆固化土是一种多相复合材料，其主要成分为土、水泥、砂和水。本试验原料土取自江苏宁淮高速公路某标段地基深处的淤泥质土，其基本物理力学性质见表 1；水泥采用 P.O325 普通硅酸盐水泥；砂采用中国 ISO 标准砂；所用拌和水为自来水。

1.2 试验方案

目前，对水泥砂浆固化土物理力学性能的研究尚少^[7-9]。因此，本文通过对在不同掺砂量条件下各龄期的试样进行无侧限抗压强度试验，研究水泥砂浆固化土强度和变形的变化规律。试样的掺砂量 S 为 0%，15%，45% 和 75%，这里掺砂量 S 指的是掺入砂的质量与原料土的质量之比；养护龄期为 7 d，14 d，28 d 和 90 d。具体试样制备步骤如下：

(1) 将原料土风干碾碎，过 2 mm 筛后加入适量的水，采用 B10 型搅拌机搅拌均匀，将含水率调至 47.5%；

(2) 往原料土中加入指定比例的砂和水泥进行

混合，并搅拌成均匀，设定水泥掺入比 10%，水灰比为 0.5，掺砂量分别按 0%，15%，45% 和 75% 掺入。

(3) 将搅拌均匀的混合料按密度、分层压实成型的方法，压入 $\Phi 39.1$ mm、 $H 80$ mm 的三开模内，养护 1 d 后脱模，放入标准养护箱内养护至指定龄期。需要说明的是，为了后续研究工作的开展，试样制作采用标准三轴试样，而未采用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的标准立方体，因此，试样试验强度与水泥土标准强度存在差异。

试样养护到规定龄期之后，进行无侧限抗压试验，记录应力应变曲线。试验采用微机控制的电子式万能试验机，试验以应变控制，加荷速率为 0.8 mm·min⁻¹，在室温条件下进行单轴压缩试验，对于同一配合比试样的压缩试验分别做 5 次，对试验结果进行比较优化，以尽量减少试验误差。在不同掺砂量条件下各龄期试样的无侧限抗压强度如表 2 所示；不同掺砂量下试样的密度如表 3 所示。在表 2 和表 3 中， T 为龄期 (d)， S 为掺砂量 (%), ρ 为密度 (g·cm⁻³)， q_u 为无侧限抗压强度 (MPa)。

表 2 水泥砂浆固化土的无侧限抗压强度均值

Table 2 Average value of q_u of soils stabilized by cement mortar under different sand contents

$S/\%$	T/d			
	7	14	28	90
0%	0.0836	0.2866	0.3328	0.5047
15%	0.2118	0.2445	0.4556	0.6629
45%	0.1610	0.2640	0.4000	0.6183
75%	0.2119	0.2613	0.3789	0.5738

表 3 不同掺砂量下试样密度

Table 3 Densities of soils stabilized by cement mortar under different sand contents

$S/\%$	0%	15%	15%	75%
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1.84	1.88	1.96	2.02

2 试样结果分析

2.1 掺砂量与水泥砂浆固化土重度、附加应力的关系

为减小加固材料引起的复合地基自重应力增加，必须力求加固体的重度增量较小。采用水泥作为固化剂，掺入比为 25% 时，重度仅比原状土增加 4.5%，因此采用水泥搅拌桩处理的复合地基自重应力增加有限^[10]。图 1 给出了水泥砂浆固化土重度与掺砂量的关系；图 2 给出了加固区自重应力增量与掺砂量的关系。

从图1和图2可以看出:对于水泥砂浆固化土(水泥掺入比10%,水灰比0.5),当掺砂量从0%增加至75%时,水泥砂浆固化土重力密度由 $18.04(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ 增至 $19.76(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$,即掺砂量每增加15%,重度约增加2%。也就是说,如果对表1所述软土采用水泥砂浆搅拌加固,水灰比取0.5,置换率为15%时,加固区自重应力增量不足1.5%;置换率为30%时,加固区自重应力增加不足4.2%。可见,即使掺砂量较高,置换率较大,加固区自重应力增加有限,在加固区下卧层中引起附加应力也较小。

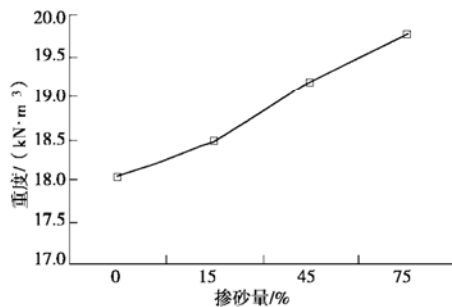


图1 水泥砂浆固化土重力与掺砂量的关系

Fig. 1 Relationship between gravity density and sand content of soils stabilized by cement mortar

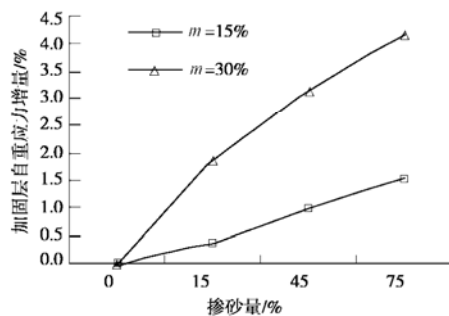


图2 加固区自重应力增量与掺砂量的关系

Fig. 2 Relationship between geostatic stress of composite ground and sand content

因此,采用水泥砂浆搅拌软土加固地基时,不会因为加固区自重应力的增加,在下卧层产生较大的附加应力而导致过大的沉降。

2.2 水泥砂浆固化土强度特性分析

(1) 掺砂量对抗压强度的影响

图3给出了不同龄期的水泥砂浆固化土无侧限抗压强度和掺砂量之间的关系。从图3可以看出:在不同的龄期下,水泥砂浆固化土强度与掺砂量的增加并非呈线性增长关系。为分析需要,定义不同掺砂量的水泥砂浆固化土强度增长量 Δs 为

$$\Delta s = \frac{(q_{us} - q_{u0})}{q_{u0}} \cdot 100\% \quad (1)$$

式中, q_{us} 为不同掺砂量下试样的无侧限抗压强度,其

中 $S=15\%, 45\%, 75\%$; q_{u0} 为掺砂量为0%下试样的无侧限抗压强度。

图4给出了不同龄期的水泥砂浆固化土无侧限抗压强度增长量和掺砂量之间的关系。从图4可以看出:

砂的掺入,试样强度均获得了一定程度的提高。但是,在不同龄期下,随着掺砂量的增加,抗压强度变化差异较大。水泥掺入比为10%时,存在一个最佳掺砂量,在该掺砂量下,水泥砂浆固化土的抗压强度提高最大,当掺砂量低于该值时,随着掺砂量的增加,抗压强度随之增加,且强度提高较为显著,当掺砂量超过该值时,抗压强度有所降低。在本文试验条件下,最佳掺砂量为15%。

另外,7d龄期时,掺砂量为0%时试样抗压强度为0.08 MPa,掺砂量为15%,45%,75%时,水泥砂浆固化土的抗压强度分别为0.21,0.16,0.21 MPa,较前者分别提高了153%,93%,153%。因此,在水泥土中掺入适量的砂,可以显著提高早期强度。

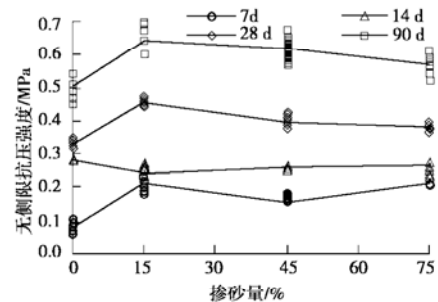


图3 无侧限抗压强度与掺砂量的关系

Fig. 3 Relationship between q_u and sand content

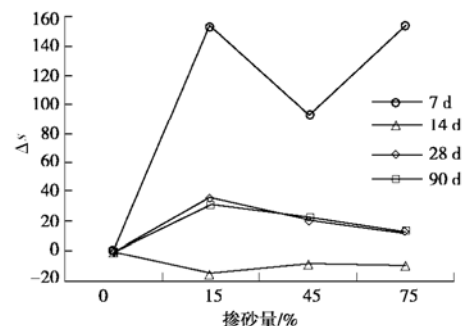


图4 掺砂量与强度增长率的关系

Fig. 4 Relationship between ratio of strength increase and sand content

(2) 龄期对抗压强度的影响

图5给出了不同掺砂量下水泥砂浆固化土无侧限抗压强度与龄期的关系。从图5可以看出:

当龄期小于28d时,各掺砂量下试样无侧限抗压强度增加较为明显,龄期超过28d时,强度仍有较大的增长,但增长的幅度随着龄期的增加而渐渐减弱。无侧限抗压强度与龄期呈对数增长关系,可用关系式

$q_u = a \ln T + c$ 进行拟合, 各掺砂量下抗压强度 q_u 与龄期 T 的拟合关系式依次为: $S=0\%$, $q_u = 0.1535 \ln(T) - 0.1755$ ($R^2 = 0.9347$); $S=15\%$, $q_u = 0.1822 \ln(T) - 0.1704$ ($R^2 = 0.9338$); $S=45\%$, $q_u = 0.1812 \ln(T) - 0.2017$ ($R^2 = 0.9976$); $S=75\%$, $q_u = 0.1535 \ln(T) - 0.1755$ ($R^2 = 0.9347$)。《建筑地基处理技术规范》建议以 90 d 龄期的无侧限抗压强度值作为水泥土的强度标准值, 本文同样将水泥砂浆固化土的 90 d 龄期抗压强度作为标准值, 在不同掺砂量下, 采用 2 式表示龄期对水泥砂浆固化土的抗压强度的影响关系。

$$\Delta d = \frac{q_{u,T}}{q_{u,90}} \cdot 100\% \quad (2)$$

式中 $q_{u,90}$ 为某掺砂量下 90 d 龄期时试样的无侧限抗压强度; $q_{u,T}$ 为某掺砂量下不同龄期时试样的无侧限抗压强度, 其中 $T=7 \text{ d}, 14 \text{ d}, 28 \text{ d}$ 。

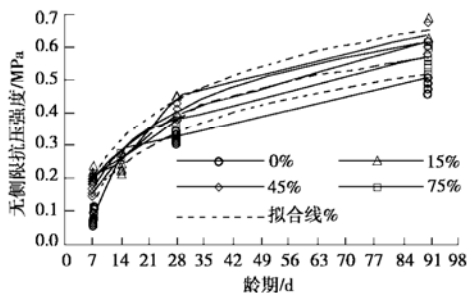


图 5 无侧限抗压强度与龄期的关系

Fig. 5 Relationship between q_u and age

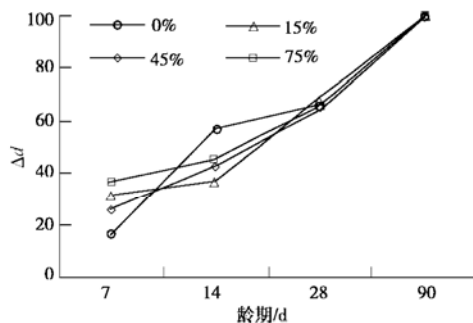


图 6 龄期与强度增长率的关系

Fig. 6 Relationship between ratio of strength increase and age

掺砂将显著提高水泥土的强度, 这是因为砂颗粒的置换作用 (大模量置换小模量) 以及水泥水化物的胶结作用, 形成的以砂颗粒为中心, 土颗粒通过水化物联结包裹其外的团聚结构具有较高的强度所致, 即随着水泥水化作用的进行, 水泥水化物不断填充空隙, 并将土颗粒与土颗粒以及砂颗粒与土颗粒胶结。7 d 龄期时, 胶结较差, 联结力较弱, 砂粒的置换作用明显, 使得掺砂量越高水泥砂浆固化土强度越高。14 d 龄期时, 在没有砂掺入的条件下, 试样反而具有更高的强度; 掺入砂后, 随着掺砂量的增加, 试样强度不

断提高, 这可能是由于大模量散体材料的掺入, 在水泥水化不完全、胶结作用没有完全发挥的情况下, 试样整体性受到一定影响造成, 具体原因作者正在进行深入研究。28 d 龄期时, 水泥水化物基本将土颗粒和砂颗粒胶结成整体, 此刻, 水泥砂浆固化土已基本具有较好的整体性和密实性, 具有较高的强度, 不论掺砂量如何, 试样强度均可达到强度标准值的 67% 左右, 依据 28 d 龄期的无侧限抗压强度试验, 可通过下式对水泥砂浆固化土抗压强度与标准值进行换算:

$$q_{u,90} \approx (1.514 \sim 1.546) q_{u,28} \quad (3)$$

2.3 水泥砂浆固化土变形特性分析

(1) 应力应变曲线分析

图 7 给出了 28 d 龄期水泥砂浆固化土的单轴全应力应变曲线。从图 7 可以看出: 水泥砂浆固化土的单轴全应力应变曲线与岩石较为相似, 具有明显的峰值, 属加工软化型曲线。水泥砂浆固化土的全应力应变曲线也可分为压密、弹性变形、塑性变形和软化直到破坏四个阶段。掺砂量对应力应变曲线形态有显著影响, 当掺砂量 $S=15\%$ 时, 水泥砂浆固化土具有最大的弹性模量, 最小的破坏应变和最大的峰值强度, 说明 $S=15\%$ 的水泥砂浆固化土强度较高, 且表现出显著的脆性破坏特征。

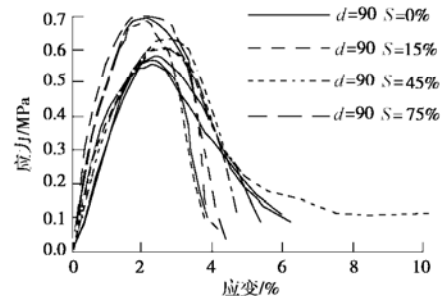


图 7 28 d 龄期水泥砂浆固化土的单轴全应力应变曲线

Fig. 7 Complete uniaxial stress-strain curves of typical test at the age of 28 d

(2) 破坏应变与掺砂量的关系

破坏应变 ε_f 是衡量桩土变形特征的重要指标之一。破坏应变大, 材料可视为韧性较好, 破坏变形小, 则材料韧性差, 具有一定的脆性。图 8 给出了不同龄期下水泥砂浆固化土破坏应变与掺砂量的关系曲线。

不同龄期时, 随着掺砂量的变化, 试样的破坏应变变化规律有一定的差异。龄期较短时 ($\leq 14 \text{ d}$), 破坏应变随着掺砂量的增加先增大后减少, 破坏应变分布在 2.1%~3.6% 之间, 这是因为早期水泥水化作用不完全, 胶结较弱, 试样含水量相对较高, 可塑性较大, 随着砂的掺入, 压缩过程中胶结物被剪坏后, 由于砂颗粒与土颗粒之间存在较大的摩擦力, 使得砂颗粒在

水泥土胶结体表面滑移较大的距离, 在克服较大的摩擦力后才产生滑移破坏。但是, 当掺砂量超过一定量级后, 置换作用明显, 试样压缩过程中, 砂颗粒之间相互胶结概率增加, 咬合力增大, 在骨架受压剪破后直接产生滑移破坏, 在此过程中同时剪坏水泥土胶结体, 导致试样迅速剪切破坏, 使得破坏应变较小。

龄期较长时(≥ 28 d), 破坏应变分布在 2.0%~3.1% 之间。掺砂量小于 15% 时, 随着掺砂量的增加破坏应变不断降低, 大于 15% 时, 破坏应变有所上升, 但幅度很小。据此进一步证明了最佳掺砂量的存在, 在超过最佳掺砂量后, 砂料的掺入对水泥砂浆固化土变形特性不再具有显著的改善作用。对于破坏应变减小的原因, 可能是因为在龄期较大的情况下, 水泥、砂、土胶结作用持续增强, 水泥水化消耗了绝大部分的试样中的水份, 砂颗粒的置换作用更趋明显, 在试样压缩过程中, 除需克服砂、土颗粒之间、砂颗粒之间以及土颗粒之间的胶结力外, 还需要克服砂颗粒与土颗粒之间的咬合力以及砂颗粒之间的咬合力, 且这种咬合力随着掺砂量的增加而渐渐占据主要地位, 当一旦克服这种咬合力后, 试样迅速剪切破坏, 从而造成随着掺砂量的增加, 试样破坏应变不断变小。

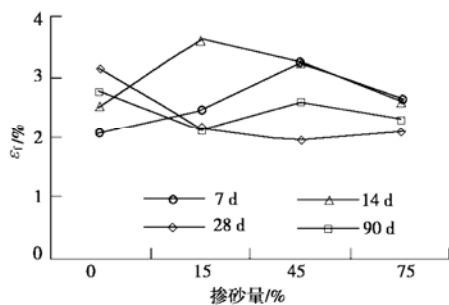


图8 破坏应变与掺砂量的关系

Fig. 8 Relationship between failure strain and sand content

(3) 变形系数与掺砂量的关系

变形模量是无侧限条件下压应力与相应压缩应变的比值, 反映材料抵抗弹塑性变形的能力, 可用于弹塑性问题的分析计算。混合材料常常呈非线性变形, 变形模量不是一个确定的数, 因此常常使用变形系数 E_{50} 作为表征混合材料变形特性的一个参数, 变形系数定义为

$$E_{50} = \frac{\sigma_{1/2}}{1/2\varepsilon_f} \quad (4)$$

式中 $\sigma_{1/2}$ 为一半破坏应变所对应的应力; E_{50} 可视为此时的割线模量。变形系数由无侧限抗压强度试验得出, 它与无侧限抗压强度一样, 受掺砂量、水泥掺入比、密度和龄期等的影响。图9给出了水泥砂浆固化土变形系数 E_{50} 与掺砂量的关系。

随着砂的掺入, 水泥砂浆固化土的变形系数显著增大。特别需要说明的是, 在 14 d 龄期时, 砂的掺入, 反而导致变形系数的降低, 这可能与水泥砂浆固化土的强度形成有关, 因为水泥砂浆固化土的早期强度主要来源于水泥水化后产生水泥、砂、土的胶结, 由于胶结作用较弱, 试样整体性较差, 使得砂颗粒的置换作用占次要地位。当龄期达 90 d 时, 不同掺砂量下试样的变形系数均大大提高, 其中以掺砂量为 15% 时, 变形系数提高最大, 约比掺砂量为 0% 时提高了 67%, 需要特别说明的是, 在 7 d 龄期时提高 135%, 这进一步证明, 在水泥土中, 掺入适量的砂, 可显著提高早期强度。寺师昌明^[11]研究发现, 水泥土的变形系数 E_{50} 与无侧限抗压强度之间基本呈正比关系。本文通过对不同掺砂量下水泥砂浆固化土的 E_{50} 和无侧限抗压强度 q_u 进行拟合, 如图 10 所示, 二者也基本呈线性增长关系 ($S=0\%$: $E_{50}=12.287q_u+0.8811$, $R^2=0.8988$; $S=15\%$: $E_{50}=19.579q_u-0.7887$, $R^2=0.9379$; $S=45\%$: $E_{50}=15.476q_u+0.2899$, $R^2=0.7102$; $S=75\%$: $E_{50}=17.805q_u+0.0507$, $R^2=0.898$)。

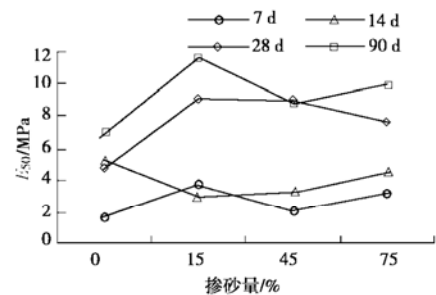


图9 变形系数与掺砂量的关系

Fig. 9 Relation between E_{50} and sand content

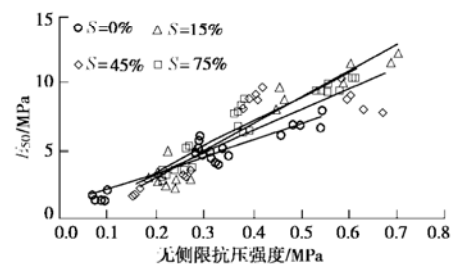


图10 变形系数与抗压强度的相互关系

Fig. 10 Relation between E_{50} and q_u

3 结 语

水泥砂浆固化土是多种材料的混合体, 其材料特性复杂, 取决于水泥掺入比、掺砂量、原料土质、含水量、龄期等, 影响其物理力学特性的因素多且复杂, 除土体本身的强度外, 水泥砂浆固化土的抗压强度主要由两个方面构成, 一是水泥水化物的胶结作用和填

充作用,二是大模量物质砂替换小模量物质土颗粒的置换作用,随着龄期、掺砂量的变化,二者主导着水泥砂浆固化土的强度变形特性。本文通过对水泥砂浆固化土的无侧限抗压强度试验,研究了掺砂量及龄期变化对水泥砂浆固化土的强度和变形特性的影响,主要得到以下几点认识:

(1) 在水泥土中掺入一定量的砂,可有效提高水泥土的强度。

(2) 一定水泥掺入比下,存在一个最佳掺砂量,使水泥砂浆固化土强度最高和变形系数最大。

(3) 水泥砂浆固化土与水泥土的应力应变曲线均有明显的峰值,应力应变关系属加工软化型曲线,其残余强度随着掺砂量的增加而增加。

(4) 采用水泥砂浆搅拌桩加固软弱地基时,即使采用较高的掺砂量和置换率,加固体本身重量的增加有限,下卧层附加应力增幅也很小。

参考文献:

- [1] 何开胜. 水泥土搅拌桩的施工质量问题 and 解决办法[J]. 岩土力学, 2002, **23**(6): 778 - 781. (HE Kai-sheng. Present construction quality problem of deep mixing cement-soil piles and solving measures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(6): 778 - 781. (in Chinese))
- [2] 梁仁旺, 于 宁. 加筋水泥土梁力学性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2000, **21**(3): 267 - 270. (LIANG Ren-wang, YU Ning. An experimental study of mechanical properties of reinforced cemented soil beams[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(3): 267 - 270. (in Chinese))
- [3] 刘红军, 陈友媛, 孙 涛, 等. 深层搅拌桩加筋施工技术及其工程应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增 1): 1730 - 1733. (LIU Hong-jun, CHEN You-yuan, SUN Tao, et al. Reinforcement construction technology of deep soil-mixing piles and its engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S1): 1730 - 1733. (in Chinese))
- [4] 叶观宝, 陈望春, 徐 超, 等. 水泥土添加剂的室内试验[J]. 中国公路学报, 2006, **19**(5): 12 - 17. (YE Guan-bao, CHEN Wang-chun, XU Chao, et al. Test on additive of cement-soil in laboratory[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, **19**(5): 12 - 17. (in Chinese))
- [5] 童小东, 徐 敏, 戴国亮, 等. 某添加剂在水泥土搅拌法中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, **37**(2): 345 - 349. (TONG Xiao-dong, XU Min, DAI Guo-liang, et al. Application of an additive in cement deep mixing method[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, **37**(2): 345 - 349. (in Chinese))
- [6] 王文军, 朱向荣, 方鹏飞. 纳米硅粉水泥土固化机理研究. 浙江大学学报(工学版), 2005, **39**(1): 148 - 153. (WANG Wen-jun, ZHU Xiang-rong, FANG Peng-fei. Analysis on reinforcement mechanism of nanometer silica fume reinforced cemented clay[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, **39**(1): 148 - 153. (in Chinese))
- [7] 兰 凯, 黄汉盛, 鄢泰宁. 软土型水泥掺砂试样研究[J]. 水文地质工程地质, 2006(5): 113 - 116. (LAN Kai, HUANG Han-sheng, YAN Tai-ning. Laboratory test for cement-stabilized soft soil added with sand[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006(5): 113 - 116. (in Chinese))
- [8] 廖建春, 曾庆军. 含砂量对水泥土强度的影响[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2005, **4**(2): 1 - 3. (LIAO Jian-chun, ZENG Qing-jun. The impact of sand content on cement-stabilized soil strength[J]. Journal of Guangdong Communications Polytechnic, 2005, **4**(2): 1 - 3. (in Chinese))
- [9] 印长俊, 马石城, 王星华. 浸水条件下水泥砂浆固化土力学性能的试验研究[J]. 建筑技术, 2007, **38**(2): 137 - 140. (YIN Chang-jun, MA Shi-cheng, WANG Xing-hua. Analysis of laboratory test on mechanics behavior of sand soil cement on condition of soaking[J]. Architecture Technology, 2007, **38**(2): 137 - 140. (in Chinese))
- [10] 龚晓南. 复合地基理论及工程运用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 43 - 44. (GONG Xiao-nan. Theory of composite foundation and engineering application [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [11] 寺师昌明, 奥村树郎, 光本司. 石灰安定处理土の基本特性に関する研究[M]. 第 1 报. 港湾技术研究所报告, 1977, **16**(1): 3 - 28. (TERASHI masaaki, OKUMURA shigerou, MITSUMOTO tsukashi. Study on the basic characteristics of the improved Lime-soil[M]. Volume I. Harbor Institute of Technology Report, 1977, **16**(1): 3 - 28. (in Chinese))