

含水量对水泥加固含黏粒砂土的强度影响

魏 晓^{1*}, KU Taeseo^{2,3}, 杨仲轩¹

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 新加坡国立大学 土木与环境工程系, 新加坡 119077;

3. 建国大学 土木与环境工程系, 韩国 首尔 05029)

摘 要: 水泥加固是有效且常用的土体加固方法之一。工程上采用无侧限抗压强度衡量土体加固效果, 但是由于土体加固后的强度受多种因素的复杂影响, 目前尚无统一的方法可以合理表征和预测土体经水泥加固后的强度。本研究利用土单元体试验方法, 研究了含水量对于水泥加固含细粒砂土强度的影响, 建议采用“水胶比”用于水泥加固含黏粒砂土的配合比设计; 还研究了含水量对加固后砂土的剪切波与超声波速的影响, 利用剪切波和超声波速表征加固后土体的无侧限抗压强度, 且该经验关联基本不受含水量、水灰比、水泥掺入比和养护龄期的影响, 可以用于现场强度检测和监测。最后, 对含水量影响水泥加固土体强度的机理进行了探讨。

关键词: 水泥加固; 含黏粒砂土; 强度; 波速; 含水量; 细粒含量

中图分类号: TU472.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0006-08

Effects of water content on the strength of cement-stabilized sand with clayey fines

WEI Xiao^{1*}, KU Taeseo^{2,3}, YANG Zhong-xuan¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, 119077, Singapore;

3. Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, South Korea)

Abstract: Cement stabilization is a useful and widely adopted method for ground improvement. However, there is no commonly accepted method to characterize and predict the unconfined compressive strength, which is a primary design parameter, due to complicated interactions of various factors. This study investigated the effects of water content on the unconfined compressive strength of cement-stabilized clayey sands, and suggested a concept of “water-to-bonding ratio” for the dosage design of cement stabilization of clayey sands. This study also investigated the effects of water content on the ultrasonic wave velocity and shear wave velocity of cemented clayey sands. The unconfined compressive strength can be correlated with shear wave velocity and ultrasonic wave velocity regardless of water content, water-to-cement ratio, cement content, and curing time. These correlations would be useful for in-situ prediction and monitoring of strength development. The mechanism of the effects of water on the unconfined compressive strength is also discussed.

Key words: cement stabilization; clayey sand; strength; wave velocity; water content; fines content

0 引 言

利用水泥加固软弱土地基可以有效提高土体的抗剪强度以及其他工程特性^[1-2]。实践中一般采用无侧限抗压强度 (q_u) 作为衡量水泥加固效果的指标。已有研究表明, 无侧限抗压强度与加固后土体的工程性质存在相关性^[3-5]。然而, 无侧限抗压强度受到包括水泥掺量、含水量、养护条件、土体密实度、矿物成分等因素的复杂影响^[6-9]。

在上述因素中, 水泥掺量、密实度、含水量、水灰比和养护时间是影响水泥加固砂土强度的主要因素。经水泥加固的砂土无侧限抗压强度随水泥掺量、密实度和养护时间增加而增加^[6,10-11]。然而, 已有文献中关于含水量和水灰比对砂土加固后强度的影响存在不一致的结论。WEI 等^[10] 和 STRACKE 等^[12] 发现相同孔隙比和相同水泥掺量条件下, 经水泥加固的砂土无侧限抗压强度随制样

收稿日期: 2022-03-15

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LQ22E080012); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2021QNA4021)。

作者简介: 魏晓 (1990—), 男, 重庆人, 博士, 特聘副研究员, 从事岩土工程领域的试验与理论研究。E-mail: weixiao@zju.edu.cn。

时的含水量增加而减小。与这两组研究所观察到的现象不同, CONSOLI 等^[6]、CARDOSO 等^[13] 和 FERNANDES 等^[14] 则发现在水泥掺量相同条件下, 存在一个最优水灰比或最优含水量使水泥与砂土混合料固化后的强度达到最大。需要注意的是, WEI 等^[10] 和 STRACKE 等^[12] 采用了净砂(细粒含量 $<5\%$), 而 CONSOLI 等^[6]、CARDOSO 等^[13] 和 FERNANDES 等^[14] 采用的砂土分别含有约 40%、12%和 20%的细颗粒(粒径 $<0.075\text{ mm}$), 表明有细颗粒的情况下, 水泥加固需要考虑最优水灰比或最优含水量。由于 CARDOSO 等^[13] 和 FERNANDES 等^[14] 并未控制试样的干密度, 不同的干密度在一定程度上影响水泥土的强度, 因而难以对水泥加固含细粒砂土的强度进行量化表征, 也无法揭示最优含水量和最优水灰比出现的机理。WEI 等^[15-16] 则通过控制水泥土击实后的孔隙比, 消除了土体密度对强度的影响, 研究了含水量和细粒含量对水泥加固砂土的无侧限抗压强度的影响, 并基于微观分析提出了表征含水量和细粒含量影响强度的经验公式。

本研究基于 WEI 等^[15] 的研究成果, 进一步完善试验数据, 揭示含水量对含黏粒砂土经水泥加固后强度以及弹性波速的影响。基于试验结果探讨了配合比设计思路, 并利用弹性波速表征土体强度, 用于现场强度检测和监测。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

本研究采用石英砂与高岭土, 按不同比例混合形成细粒含量(FC, 即细粒质量与土体总质量之比)为 0%、5%、10%和 15%的含黏粒砂土。石英砂的级配曲线以及电镜扫描图见图 1。石英砂比重为 2.65, 中值粒径 D_{50} 为 0.71 mm, 不均匀系数为 1.78, 颗粒形状较为饱满并具有一定棱角。所用高岭土的塑限为 40%、液限为 87%, 其电镜扫描图见图 1。采用 I 型波特兰水泥^[10] 对砂土进行加固。水泥掺入比(cc)为水泥质量与干土(石英砂与高岭土混合物)质量之比。

1.2 试样制备与养护

采用湿夯法^[10,15] 制备试样。将石英砂、高岭土和水泥按预定比例混合并充分搅拌均匀, 加入预设质量的去离子水后再次搅拌 15 min 形成均匀混合物。含水量(w_{soil})为去离子水质量与干土质量之比。根据水泥掺入比与含水量, 可以换算得到水灰比

(w/c), 即 $w/c=w_{\text{soil}}/cc$ 。称取一定质量的混合物放入内径 50 mm、高度 100 mm 的模具中, 用击实锤击实至预定高度; 重复此过程 3 次, 填满模具。上述制样方法可以较好地控制土体的孔隙比(e)。制样完成后, 用塑料膜密封模具两端, 静置 24 h, 待土样初步固化后放入恒温水中养护至规定龄期。

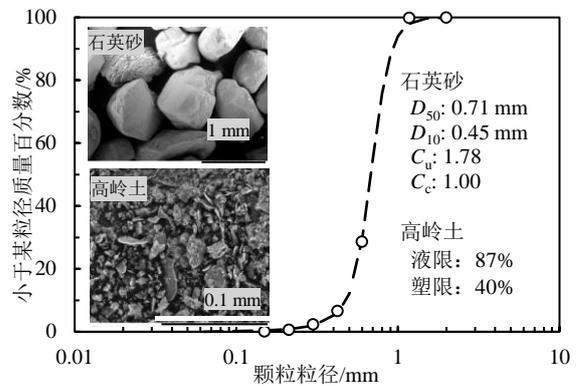


图 1 石英砂粒径分布与土样的扫描电镜图

Fig. 1 Particle size distribution curve of the silica sand and SEM images of the tested soils

1.3 测试步骤

由于土样属于砂性土, 经水泥加固后仍然存在较大孔隙。将试样从养护水中取出后, 孔隙水很快流失。用湿毛巾吸去试样表面多余水分后, 对试样称重, 并结合制样时的干密度估算得到水泥土试样的饱和度在 60%~80%之间。根据 CONSOLI 等^[6] 的测试结果, 经水泥加固后的粉质砂土虽然处于不饱和状态(饱和度平均值约 87%), 但是其基质吸力仅有 41~124 kPa, 相比于加固后土样的强度, 可以忽略不计。

先用超声脉冲测试仪 PUNDIT7 (CNS Farnell) 测试土样的超声波速。该设备可直接测量得到超声脉冲在土样中的传播时间, 并通过试样长度计算土样的超声波速(V_p)。随后利用弯曲元测试土样的剪切波速。弯曲元从试样一端发射一个周期正弦波, 结合另一端弯曲元接收到的信号可以估算剪切波在土样内的传播时间; 通过一对弯曲元端头间距离, 可以计算试样的剪切波速(V_s)。最后, 将试样置于压力机进行无侧限抗压试验。由于水泥土强度具有一定离散性, 同一组试验测试 3 个试样, 当单个结果与平均值偏差小于 15%时保留结果。

2 试验结果与分析

2.1 含水量和水灰比对无侧限抗压强度的影响

由图 2 (a) 可以看出净砂加固后的无侧限抗压强度受含水量和水泥掺入比的共同影响, 即 q_u 随含

水量增加而单调降低，并随水泥掺量增加而升高。图 2 (b) 表明净砂加固后的 q_u 随水灰比增加而单调降低。当水灰比小于 2 时， q_u 还受到水泥掺入比的显著影响；当水灰比大于 2 时，不同水泥掺入比的 q_u - w/c 关系似乎逐渐趋于统一。对于水泥掺量为 10% 的试样，更高的水灰比 ($w/c > 2$) 需要加入更多的水，导致拌合物容易固液分离，无法得到均匀试样。

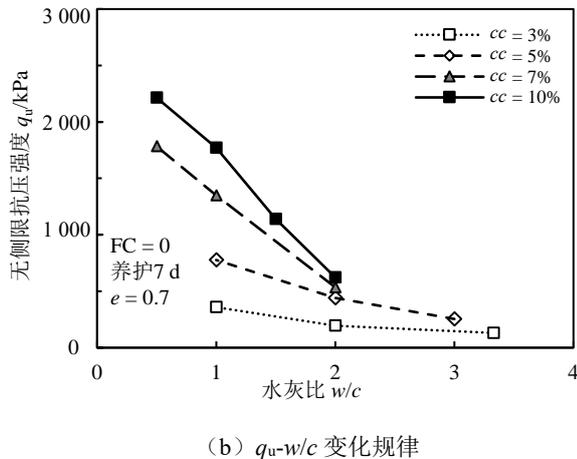
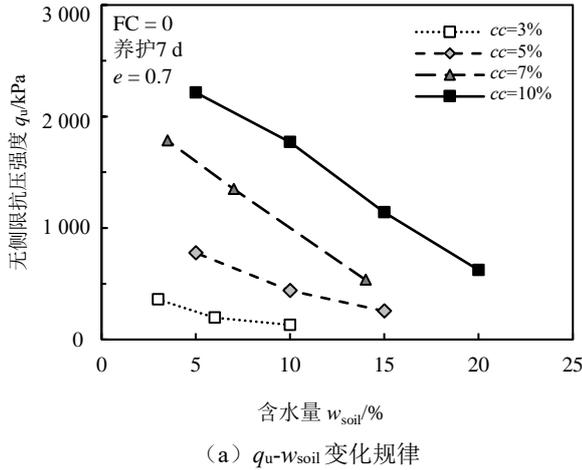


图 2 FC=0 砂土加固后无侧限抗压强度随含水量和水灰比的变化规律 (孔隙比 0.7, 养护 7 d)

Fig. 2 Effects of w_{soil} and w/c on q_u of cemented sand with FC=0 ($e=0.7$ and 7-day curing)

图 3 为选取细粒含量为 10% 的砂土掺入 5% 和 10% 水泥后的试验结果。与图 2 所示的净砂不同，含黏粒砂土加固后的强度随含水量 (图 3 (a)) 和水灰比 (图 3 (b)) 的增加而先增后减，在“最优含水量”和“最优水灰比”条件下出现最大值。当细粒含量相同时，不同的水泥掺入比会影响最优含水量和最优水灰比：当 $cc=10\%$ 时，最优含水量约为 12%，最优水灰比约为 1.2； $cc=5\%$ 时，最优含水量约为 10%，最优水灰比约为 2。

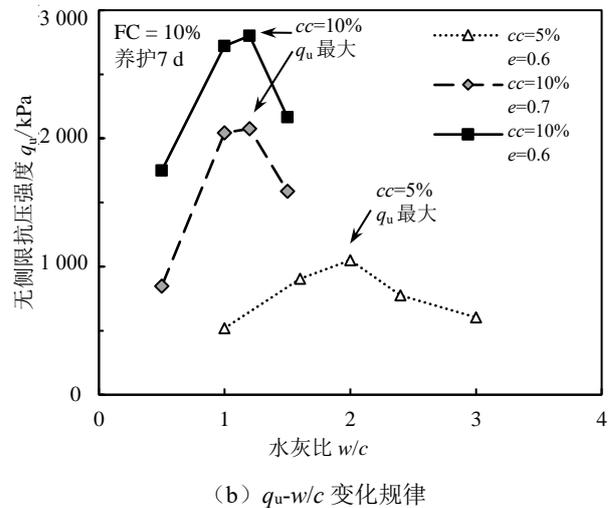
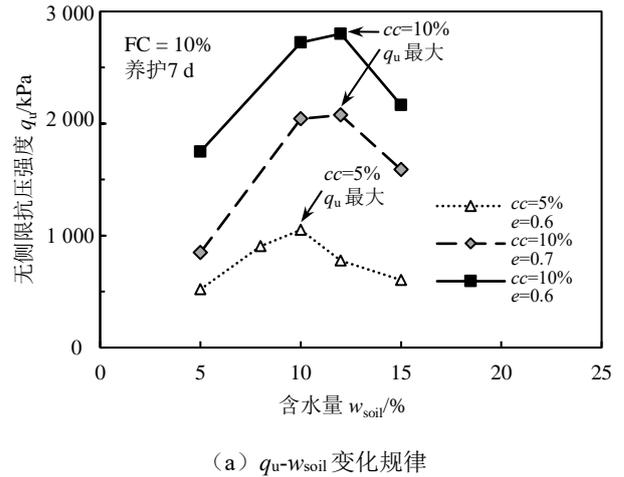
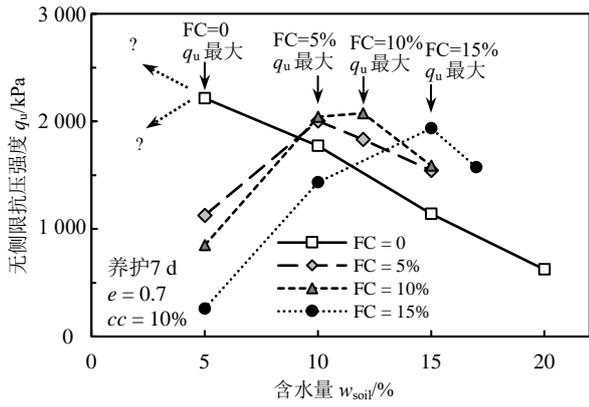


图 3 FC=10% 砂土加固后无侧限抗压强度随含水量和水灰比的变化规律 (孔隙比 0.7, 养护 7 d)

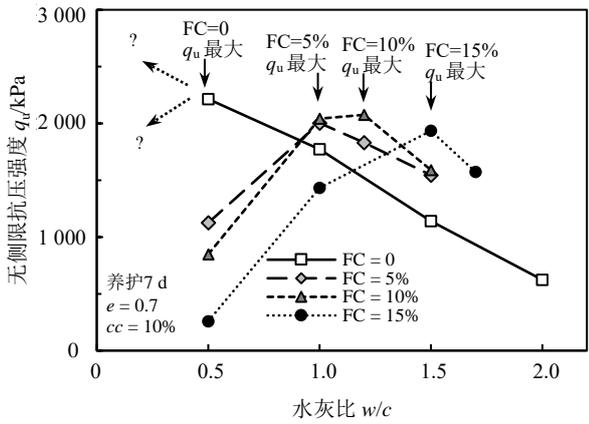
Fig. 3 Effects of w_{soil} and w/c on q_u of cemented sand with FC=10% ($e=0.7$ and 7-day curing)

细粒含量不同的砂土经 10% 水泥加固后的 q_u 随含水量变化规律见图 4 (a)。当细粒含量为 0 时，加固后的试样强度随含水量增加而几乎线性下降；当细粒含量为 5%、10% 和 15% 时，加固后的试样强度先随含水量增加而升高，而后随含水量增加而下降。强度最大值所对应的最优含水量随细粒含量增加而增加。 q_u 随水灰比的变化规律 (图 4 (b)) 也呈现出先增后减的趋势，强度最大值所对应的最优水灰比随细粒含量增加而增加。

图 2~4 的试验均通过控制土体孔隙比 (干密度) 而排除了孔隙比对加固后土体强度的影响，可以认为在所测试的含水量范围内 ($w_{soil}=5\% \sim 20\%$) 细粒的存在是导致非单调 q_u - w_{soil} 和 q_u - w/c 变化规律的原因。上述结果还表明水泥加固含细粒砂土的机制较为复杂，单纯使用含水量或水灰比并不能对加固后的强度特征进行合理表征。



(a) q_u - w_{soil} 变化规律



(b) q_u - w/c 变化规律

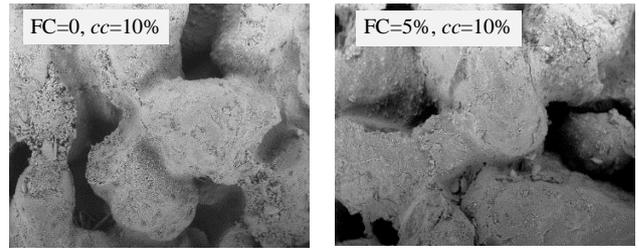
图4 对比不同细粒含量的无侧限抗压强度随含水量和水灰比变化规律 (孔隙比 0.7, 水泥掺入比 10%, 养护 7 d)

Fig. 4 Comparing the effects of w_{soil} and w/c on q_u of cemented sands with different fines contents ($e=0.7$, $cc=10\%$, and 7-day curing)

2.2 最优水胶比

由于当砂土细粒含量和水泥掺入比给定时, 存在最优含水量和最优水灰比使加固后土体的抗压强度达到最大, 因此预测最优含水量和最优水灰比有助于优化配合比设计方案。

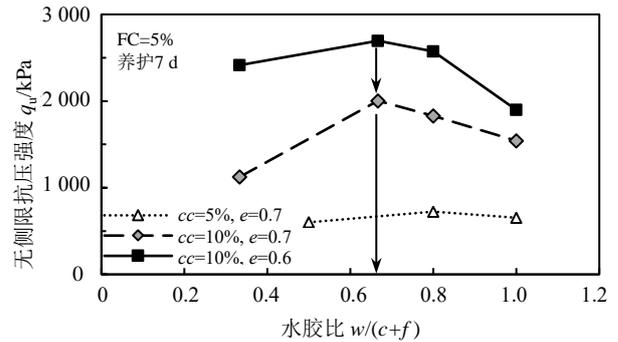
砂土经水泥加固后的强度主要来源于水泥形成的胶结物质, 见图 5 (a)。当存在细颗粒时, 水泥与细颗粒共同形成胶结物质附着于砂粒表面并黏结邻近的砂粒, 见图 5 (b)。当含水量不同时, 胶结物在砂粒间形成形态不同的复杂“网络结构”。定义“水胶比, $w/(c+f)$ ”为水与“水泥+细粒”的质量比, 并将无侧限抗压强度与水胶比绘于图 6。对于 $FC=5\% \sim 15\%$ 的砂土, 加固后强度随水胶比增加先增后减。最大强度对应的最优水胶比约 0.6, 且受水泥掺入比、细粒含量和密实度的影响不大。因此, 可利用最优水胶比确定含细粒砂土的水泥加固配合比。



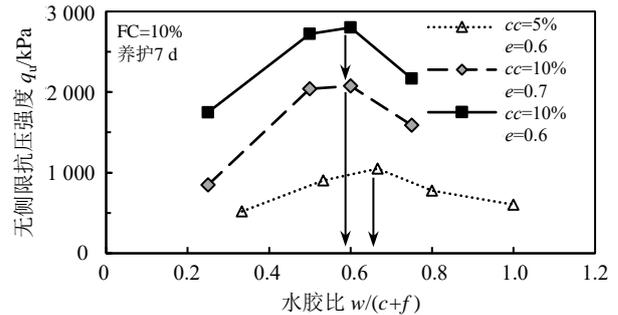
(a) 细粒含量为 0 (b) 细粒含量为 5%

图5 砂土经水泥加固后电镜扫描图

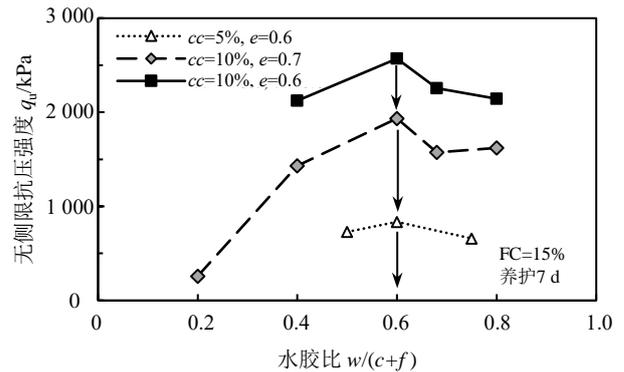
Fig. 5 SEM images of cemented sands



(a) $FC=5\%$



(b) $FC=10\%$



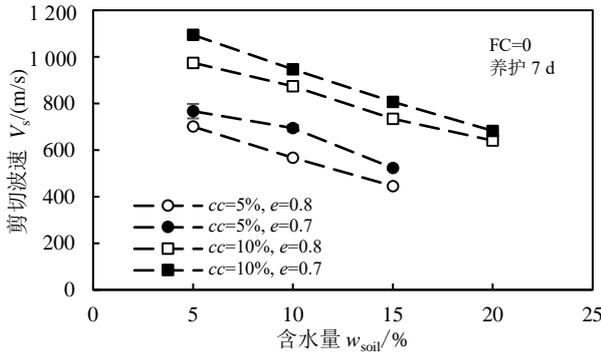
(c) $FC=15\%$

图6 含细粒砂土加固后无侧限抗压强度随水胶比的变化
Fig. 6 Effects of water-to-bonding ratio on q_u of cemented sand with fines

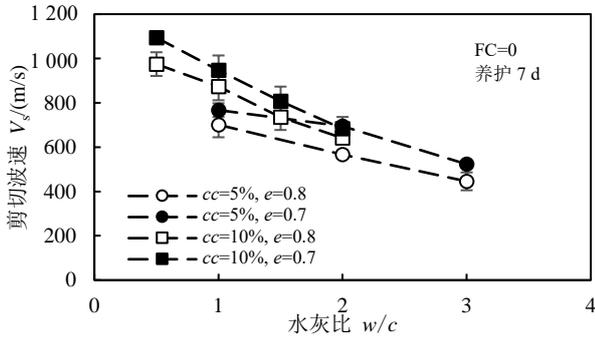
值得注意的是, 本研究建议的最优水胶比为 0.6, 其对应的含水量使土样与水泥容易被搅拌均匀并击实, 且不产生“离析”导致土样不均匀。对于不含细粒的净砂, 水胶比为 0.6, 即相当于水灰比为 0.6, 其对土体加固效果较好。

2.3 弹性波速

土体的超声波和剪切波速也受到水泥掺量、孔隙比、含水量和水灰比等的影响。在其他条件相同时，加固后砂土的超声波和剪切波速随水泥掺量增加而增加，随孔隙比减小而增加。净砂经水泥加固后的剪切波速随含水量增加而减小，见图 7 (a)；剪切波速随水灰比增加而减小，且不同水泥掺入比的 V_s - w/c 数据点较为接近，见图 7 (b)。加固后净砂的超声波速呈现出与图 7 相似的关系，即超声波速随含水量和水灰比的增加而降低，为简洁起见未画出。



(a) V_s - w_{soil} 变化规律

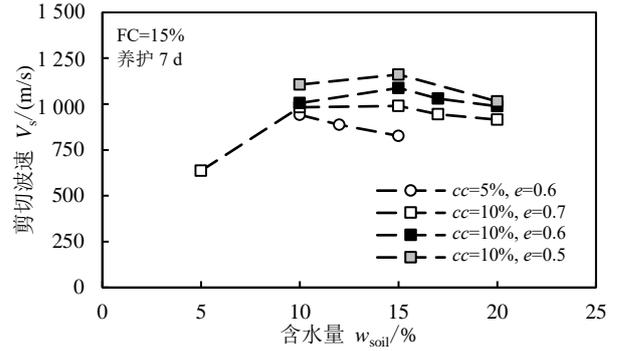


(b) V_s - w/c 变化规律

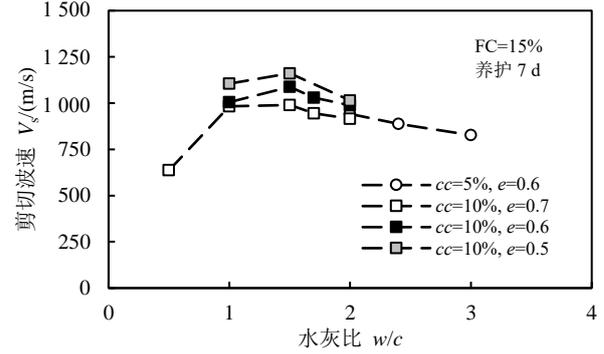
图 7 FC=0 砂土加固后剪切波速随含水量和水灰比的变化规律 (养护 7 d)

Fig. 7 Effects of w_{soil} and w/c on V_s of cemented sand with FC=0 (7-day curing)

当砂土含有细粒时，超声波和剪切波速随含水量和水灰比的增加也呈现出先增后减的趋势。图 8 是细粒含量为 15% 的砂土加固后的剪切波速随含水量和水灰比的变化规律。当水泥掺入比为 10% 时，剪切波速在 $w_{soil}=15\%$ 和 $w/c=1.5$ 时最大。剪切波速的最优含水量和最优水灰比与无侧限抗压强度的基本相同。图 9 是细粒含量为 15% 的砂土加固后的超声波速随含水量和水灰比变化规律。与图 8 规律略有不同的是，超声波速最大值出现在 $w_{soil}=10\% \sim 15\%$ 和 $w/c=1 \sim 1.5$ 范围内。图 10 则是剪切波和超声波速随水胶比变化规律，最优水胶比约为 0.6。



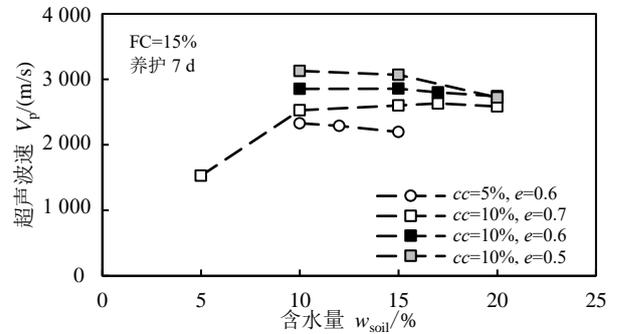
(a) V_s - w_{soil} 变化规律



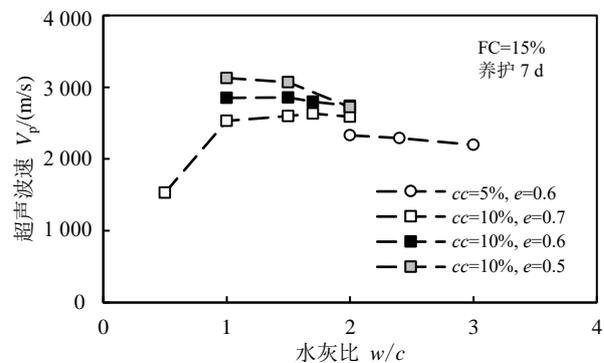
(b) V_s - w/c 变化规律

图 8 FC=15% 砂土加固后剪切波速随含水量和水灰比的变化规律 (养护 7 d)

Fig. 8 Effects of w_{soil} and w/c on V_s of cemented sand with FC=15% (7-day curing)



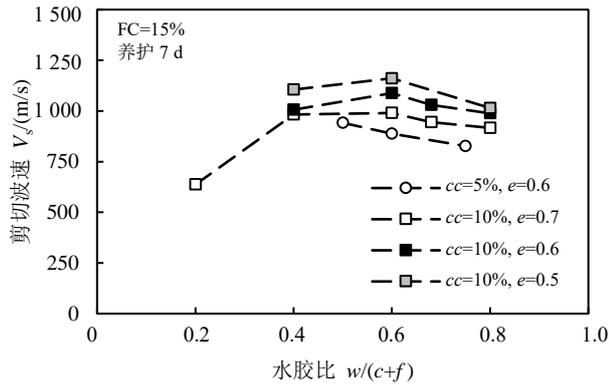
(a) V_p - w_{soil} 变化规律



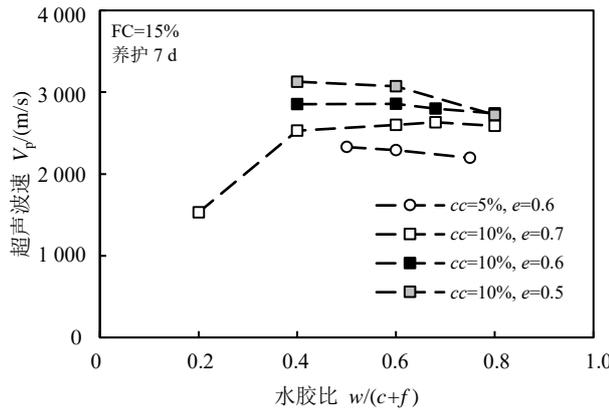
(b) V_p - w/c 变化规律

图 9 FC=15% 砂土加固后超声波速随含水量和水灰比的变化规律 (养护 7 d)

Fig. 9 Effects of w_{soil} and w/c on V_p of cemented sand with FC = 15% (7-day curing)



(a) V_s - $w/(c+f)$ 变化规律



(b) V_p - $w/(c+f)$ 变化规律

图 10 FC=15%砂土加固后剪切波与超声波速随水胶比的变化规律 (养护 7 d)

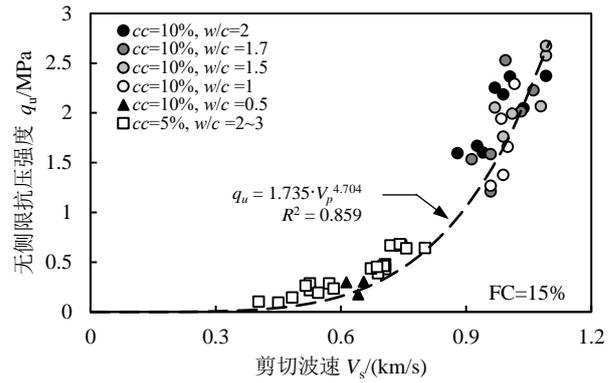
Fig. 10 Effects of water-to-bonding ratio on V_s and V_p of cemented sand with FC = 15% (7-day curing)

土体的弹性波速可以用于表征土体的无侧限抗压强度, 进而用于对加固强度进行现场无损检测和监测。图 11 是加固后的各试样无侧限抗压强度随剪切波速和超声波速的变化规律 (强度和波速采用实测值而非平均值), 为了清晰显示水灰比和水泥掺入比的影响, 选择 FC=15% 的砂土加固后的 V_s - q_u 关联, 见图 11 (a) 和 FC=0 的砂土加固后的 V_p - q_u 关联, 见图 11 (b)。尽管数据呈现一定离散性, 但无侧限抗压强度随波速增加而增加的趋势显著。对于细粒含量相同的砂土, 水灰比和水泥掺量对强度与波速的关联几乎没有影响。可以采用幂函数对其进行拟合:

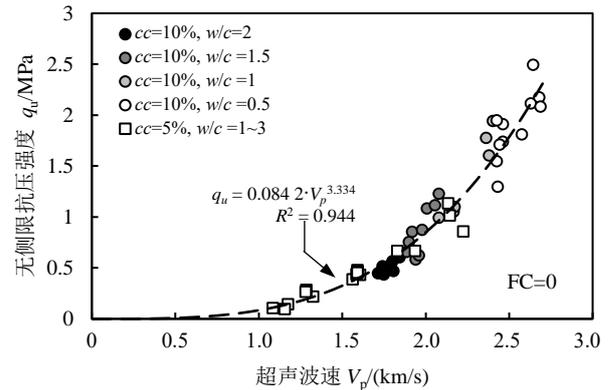
$$q_u = a_s \cdot V_s^{b_s} \quad (1)$$

$$q_u = a_p \cdot V_p^{b_p} \quad (2)$$

式中: a_s 、 b_s 、 a_p 和 b_p 为拟合参数。拟合参数受到细粒含量的轻微影响^[16], 总体上仍可以采用统一的趋势线表征不同细粒含量土体加固后的无侧限抗压强度与波速的关联 (图 12)。



(a) FC=15%砂土加固后 V_s 与 q_u 关联



(b) FC=0%砂土加固后 V_p 与 q_u 关联

图 11 砂土加固后剪切波、超声波速与无侧限抗压强度的关联 (养护 7 d)

Fig. 11 Correlations between q_u and elastic wave velocities V_s , V_p of cemented sands (7-day curing)

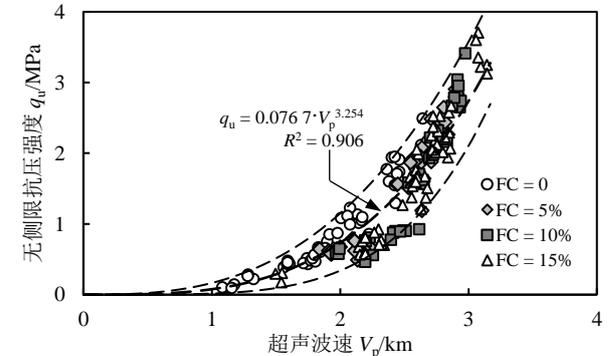
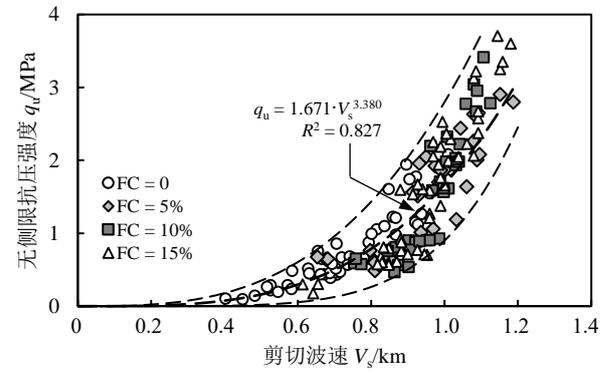


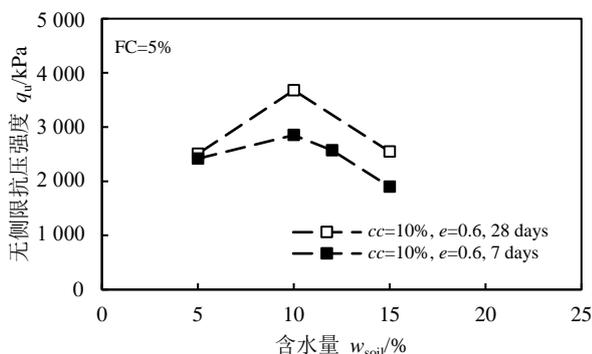
图 12 细粒含量不同的砂土加固后剪切波、超声波速与无侧限抗压强度的关联

Fig. 12 Correlations between q_u and elastic wave velocities V_s , V_p of all cemented sands

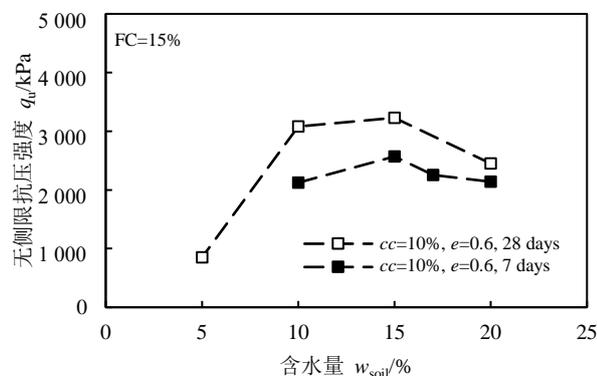
3 讨论

本文在控制孔隙比、干密度的条件下研究含水量对水泥加固土体强度的影响,发现相同的孔隙比或干密度条件下,加固后的含细粒砂土强度随含水量增加而先增后减,这表明含水量可以通过改变砂粒间的胶结物(水泥,或水泥与细粒混合物)的分布或强度特征来改变加固效果。WEI 等^[15]认为水泥加固后的含细粒砂土强度取决于砂粒间的胶结物形成的“黏结键”截面积和胶结物强度的共同作用:随着含水量增加,位于砂粒胶结处的截面积增加,对加固效果起正面作用;同时胶结物的强度随含水量增加而减小,对加固效果起负面作用。在这两类作用下,可能导致加固后的土体强度随含水量增加而呈现出先增后减的情况。

前文呈现的试验结果主要以养护 7 d 的试样为主。当采用恒温水下养护时,土样的强度随养护龄期增加而增加。养护龄期并不改变强度随含水量变化的规律(图 13),且对于强度与弹性波速的关联也可忽略不计。



(a) FC=5%



(b) FC=15%

图 13 不同养护龄期下,砂土加固后无侧限抗压强度随含水量变化规律 ($e=0.6$)

Fig. 13 Effects of water content on q_u for cemented sands curing for 7 and 28 days ($e=0.6$)

WEI 等^[17]认为当水泥土的细观结构呈现出“颗粒+胶结”形态时,无侧限抗压强度与波速的幂函数关联(公式 1 和 2)的指数参数可以取 $b_s=b_p=4$ 。当 b_s 与 b_p 取常数值时,可以在一些特定情况下提高预测的准确性。例如,当测试数据仅含低强度区间时,采取常数指数 b_s 和 b_p 可以提高对高强度区间的预测准确性。这一特性对于利用低养护龄期数据(通常低养护龄期的强度较小)预测高养护龄期强度时具有优势。当测试数据包含了需要预测的区间时,本文采用的趋势线和 WEI 等^[17]建议的预测公式效果相近。

4 结论

本研究通过室内单元体试验研究了含水量对硅酸盐水泥加固不同砂土的无侧限抗压强度和弹性波速的影响,并建立了加固后土体的弹性波速与无侧限抗压强度的关联。主要结论包括:

(1) 在相同的水泥掺入比和孔隙比条件下,净砂经水泥加固后的无侧限抗压强度、弹性波速随含水量和水灰比的增加而减小,含有细粒的砂土经水泥加固后的无侧限抗压强度、弹性波速随含水量和水灰比的增加而先增后减;

(2) 最优含水量和最优水灰比受到土体细粒含量和水泥掺入比的影响,可以采用水胶比概念并取水胶比为 0.6 用以确定不同细粒含量和水泥掺量条件下的最优含水量;

(3) 可以采用剪切波和超声波速预测不同含水量、水泥掺量、细粒含量和养护龄期的加固后土体强度,并用于现场强度检测和监测。

参考文献

- [1] 童小东, 蒋永生, 龚维明, 等. 石灰在水泥系深层搅拌法中的应用[J]. 工业建筑, 2000, 30(1): 21–25, 30.
TONG Xiao-dong, JIANG Yong-sheng, GONG Wei-ming, et al. Application of lime in cement deep mixing method[J]. Industrial Construction, 2000, 30(1): 21–25, 30.
- [2] 刘莹, 王清. 水泥加固吹填土试验研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(6): 45–48.
LIU Ying, WANG Qing. Consolidation test and study on the treatment of dredger fill with cement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(6): 45–48.

- [3] CLOUGH G W, IWABUCHI J, RAD N S, et al. Influence of cementation on liquefaction of sands[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(8): 1102–1117.
- [4] CONSOLI N C, DALLA ROSA F, FONINI A. Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(12): 1846–1856.
- [5] TOWHATA I. Developments of soil improvement technologies for mitigation of liquefaction risk[C]//*Proceedings of Earthquake Geotechnical Engineering: 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering-Invited Lectures*. Thessaloniki, Greece, 2007: 355–383.
- [6] CONSOLI N C, FOPPA D, FESTUGATO L, et al. Key parameters for strength control of artificially cemented soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(2): 197–205.
- [7] MOON S W, VINOTH G, SUBRAMANIAN S, et al. Effect of fine particles on strength and stiffness of cement treated sand[J]. *Granular Matter*, 2020, 22(1): 9.
- [8] SUBRAMANIAN S, MOON S W, MOON J, et al. CSA-treated sand for geotechnical application: microstructure analysis and rapid strength development[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(12): 4018313.
- [9] XIAO Y, YUAN Z, LIN J, et al. Effect of particle shape of glass beads on the strength and deformation of cemented sands[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(6): 2123–2131.
- [10] WEI X, KU T. New design chart for geotechnical ground improvement: Characterizing cement-stabilized sand[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(4): 999–1011.
- [11] VINOTH G, MOON S W, MOON J, et al. Early strength development in cement-treated sand using low-carbon rapid-hardening cements[J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(5): 1200–1211.
- [12] STRACKE F, JUNG J G, KORF E P, et al. The influence of moisture content on tensile and compressive strength of artificially cemented sand[J]. *Soils and Rocks*, 2012, 35(3): 303–308.
- [13] CARDOSO R, RIBEIRO D, NÉRI R. Bonding effect on the evolution with curing time of compressive and tensile strength of sand-cement mixtures[J]. *Soils and Foundations*, 2017, 57(4): 655–668.
- [14] FERNANDES V A, PURNELL P, STILL G T, et al. The effect of clay content in sands used for cementitious materials in developing countries[J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(5): 751–758.
- [15] WEI X, LIU H, KU T. Microscale analysis to characterize effects of water content on the strength of cement-stabilized sand-clay mixtures[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(10): 2905–2923.
- [16] WEI X, LIU H, KU T. Effects of plastic fines content on the engineering properties of cement-stabilized sands[J]. *Granular Matter*, 2021, 23(2): 46.
- [17] WEI X, LIU H, CHOO H, et al. Correlating failure strength with wave velocities for cemented sands from the particle-level analysis[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 152: 107062.