

# 建筑垃圾碎末和石灰粉对上海黏土抗压强度的影响

朱墨沙, 璩继立

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 上海地区黏土普遍具有强度低、易变形的特点,为了改良这种特性,将建筑垃圾碎末和石灰粉以不同的质量加筋率加入到上海黏土中,并在不同的养护龄期下对各试样进行无侧限抗压试验,对试验结果进行分析和讨论,研究建筑垃圾碎末和石灰粉对上海黏土抗压强度的影响。研究表明:建筑垃圾碎末对土的抗压强度影响不明显,但能有效地提高土体的延性;石灰粉能够有效地提高土体的抗压强度,但土体的脆性增加明显;在同时添加建筑垃圾碎末和石灰粉的情况下,土体的抗压强度和延性均有明显提高。其中,当加筋率为4%石灰粉和20%建筑垃圾碎末时,土体的抗压强度提高达到最适宜值。

**关键词:** 黏性土; 加筋土; 建筑垃圾碎末; 石灰粉; 抗压强度; 延性

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0229-07

## Influence of construction waste fines and lime powder on compressive strength of clay in Shanghai

ZHU Mosha, QU Jili

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In order to overcome the low strength and high deformation characteristics of Shanghai clay, this paper studied that mixed construction waste fines and lime powder into Shanghai clay with different weight reinforcement ratios, and cured the clay with different amounts of time. Through unconfined compressive strength testing, we investigated the impact of construction waste fines and lime powder on the compressive strength of Shanghai clay. The results indicated that construction waste fines had no obvious impact on soil compressive strength, but improved the ductility of soil. The lime powder can effectively improve the compressive strength of Shanghai clay as well as soil residual strength. The compressive strength and ductility of the soil is enhanced and its brittleness is reduced when construction waste fines and lime powder are mixed into the clay. The most suitable reinforcement ratio for compressive strength of soil is 20% of construction waste fines and 4% of lime powder.

**Key words:** clay; reinforced soil; construction waste fines; lime powder; compressive strength; ductility

## 1 研究背景

在实际的工程实施中,常常会遇到工地的土体并不能满足实际工程中所要求的土体强度,特别是工程选址在一些冲积平原地形或东南沿海地带时,土体强度往往较弱。上海地区地处东南沿海,为长江三角洲的中心,是由长江流域河水在出海口处,长时间的冲刷堆积形成的大范围平原,其土体以软黏土为主。严学新等<sup>[1]</sup>和李晓<sup>[2]</sup>在研究中发现:上海地区的土地在埋深大约75 m内,多为黏性土体,

其物理力学性能均不完全满足实际施工要求。所以,本研究致力于找出一种合适的方法,用于改良此类土体的物理力学性能,使其满足实际施工要求。

总结了当前许多学者如张娇等<sup>[3]</sup>、Czyz等<sup>[4]</sup>、Miroslaw等<sup>[5]</sup>的研究结论,黏土是含沙粒很少,且有黏性的土壤,水分不容易从中通过,所以具有较好的可塑性。但黏土的物理力学性能较弱,受到压力时容易发生变形或破坏。特别是在实际工程中,黏土往往不能满足工程建设的要求<sup>[6]</sup>。针对这种特性,除了孔内深层强夯法、换填垫层法、强夯法、砂石桩

收稿日期:2018-04-16; 修回日期:2018-05-29

作者简介:朱墨沙(1994-),男,浙江龙泉人,硕士研究生,主要从事加筋土研究。

通讯作者:璩继立(1964-),男,河南孟州人,博士后,副教授,硕士生导师,主要从事岩土工程、水文地质等方面研究。

法、振冲法等<sup>[7]</sup>这类附加承载力的方法,通过在原土体中添加外加剂来提高土体力学性能的加筋法也是常用方法。本研究对土体性能的改良就选用的是加筋法,并且将会针对黏土强度低、易变形的特点来选取加筋材料。陆叶<sup>[8]</sup>、璩继立等<sup>[9]</sup>的研究表明:当土体加入适当添加剂后,能有效地提高土体的抗压强度和延性,并且对其抗剪强度也会有一定的提高。所以探索适宜的加筋材料及其配合比的研究具有可行性,且有一定的工程意义。

建筑垃圾<sup>[10]</sup>是建筑实践和城市化的必然产物,少数建筑工地会以将建筑垃圾进行回填的方法处理建筑垃圾,但仍有大部分的建筑垃圾面临无法处理的境地,这对环境的影响十分巨大。当前,一些学者如 Lachimpadi 等<sup>[11]</sup>正致力于研究如何能够从施工手段上减少建筑垃圾的产生,还有其他一些学者也在呼吁能够从立法的角度来限制建筑垃圾的肆意产生<sup>[12]</sup>。所以处理建筑垃圾是目前建筑行业的一个难点,也是对其再利用进行研究的热点。本文选取建筑垃圾作为加筋材料,一方面提出了对建筑垃圾再利用的一个新方向,另一方面也为加筋土的研究开拓了新方向。在研究方面,Wojciech 等<sup>[13]</sup>发现,软质土如沙质黏土在使用了水泥进行稳定处理后,其地面改善效果对工程建设产生了实质影响;Hasan 等<sup>[14]</sup>在研究中表明,在膨润土中添加一定比例的建筑垃圾碎末,虽然无法明显地提高土体的抗压强度,但能起到很好的稳定效果,即提高了土体的延性。目前,虽然没有直接结论证明,在上海黏土中添加建筑垃圾碎末后能够改善土体物理力学性能,但综合以上相关结论,在上海黏土中选择建筑垃圾碎末作为加筋材料,还是具有研究价值的。针对上海黏土的抗压性能差的特点,本文还选择了石灰粉作为另一种加筋材料。石灰粉是以碳酸钙为主要成分的白色粉末状物质,是建筑行业中一种常见的材料,应用范围非常广泛。孙中明等<sup>[15]</sup>、Chen 等<sup>[16]</sup>、Jha 等<sup>[17]</sup>等在研究中发现,在土体中添加适量的石灰粉,能够有效地提高土体的抗压强度,但同时也提高了土体的脆性<sup>[18]</sup>。所以,石灰粉作为单加筋材料加入上海黏土中,显然不合适,土体脆性提高,意味着土体更加容易发生脆性破坏。所以,为了在不降低土体某一方面性能的同时,提高上海黏土的物理力学性能,本研究选取建筑垃圾碎末和石灰粉作为加筋材料,通过不同的加筋配比,对素土、建筑垃圾碎末加筋土、石灰粉加筋土、建筑垃圾和石灰粉加筋土进行无侧限抗压试验,通过试验结果的对比分析,得到较为

合理的加筋配比,用于提高上海黏土的力学性能<sup>[19]</sup>。

## 2 试验与材料选取

### 2.1 材料选取

本次试验所选用的土样采集于上海市崇明岛地区长江农场的较深处土体,试验土体取回后,进行了烘干过筛处理,其物理力学性能如表1;本次试验所添加的建筑垃圾碎末取自于上海市杨浦区某建筑工地的建筑废料,取回后进行粉碎烘干,并选取通过4.75 mm 筛保留在2.36 mm 筛上的颗粒,其具体物理性质和组成见表2;本试验所添加的石灰粉选购于某品牌碳酸钙,并在使用前过2 mm 筛,其具体物理性质见表3。

表1 试验黏土的物理力学性能

比重	液限 $W_L / \%$	塑性指 数 $I_p$	最优含水 率 $W_{opt} / \%$	最大干密度 $\rho_d /$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	塑限/ %
2.72	45.93	21.1	21	1.65	24.83

表2 建筑垃圾碎末的物理性质

成分配比/%			粒径分 布/mm	最大干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$
水泥	砖粒	瓦砾		
59	28	13	2.36 ~ 4.75	2.49

表3 石灰粉的物理性质

氧化钙	氧化镁	氢氧化钙	配料	白度	活性氧化钙	粒径
70.27	3.64	>65	1	90	>30	<2

### 2.2 试验仪器与样品制备

本次无侧限抗压试验仪器均采用南京水利电力仪器工程有限责任公司生产的PY-3型应变控制式无侧限压缩仪,控制加载速率为2.5 mm/min,位移测量范围为0~30 mm。试验样品制作时,均使用同一三瓣膜,并分3次加土,锤击27次制成。得到的试验样品高80 mm,直径39 mm。样品制成后,均包入保鲜袋密封养护,养护时间分别为7、14、21、28 d<sup>[20]</sup>。样品的所有制作过程和养护方法均按照《公路土工试验规程》JTGE40-2007<sup>[21]</sup>严格执行。由于本次试验所采用的建筑垃圾粒径为2.36~4.75 mm的颗粒,如果在土中添加过多的此种加筋材料,会破坏土体原有的内部结构且完全改变其受力机理,导致试验得出的结论有悖于改良土体性能的初衷,故建筑垃圾碎末的加筋率控制在20%以下,分

别为 10%、15%、20%。其次,石灰粉的添加会降低土体的塑性指数,为了在不降低土体其他性能的前提下改良土体,石灰粉的添加量选定为 3%、4%、5%。本次试验样品共分为 4 大组:素土、建筑垃圾碎末加筋土、石灰粉加筋土、建筑垃圾碎末和石灰粉加筋土。其中建筑垃圾碎末加筋土分别按 10%、15%、20% 的质量加筋率制得;石灰粉加筋土,分别按 3%、4%、5% 的质量加筋率制得;建筑垃圾碎末和石灰粉加筋土,分别按 10%、15%、20% 和 3%、4%、5% 的质量加筋率两两混合制得。单加筋分组中的 6 个试样和双加筋分组中的 9 个试样的研究结果,已经可以反映出土体在该加筋范围内的力学性能改变情况,但为降低试验中的偶发情况,试验中每组试样均做 3 份,4 组试验一共 192 个样本。将以上 4 组样品通过如上的过程进行试验,试验均在样品破坏后终止,并记录每组测得的无侧限抗压强度 (UCS)<sup>[22]</sup>。图 1 为终止试验后的样本代表性破坏状态。



图 1 样本代表性破坏状态

### 3 试验结果分析和讨论

经过对以上 4 组样品的试验,得到相应的试验结果,将试验结果进行整合,得到试样的无侧限抗压强度,如表 4。

#### 3.1 建筑垃圾碎末对土强度的影响

经过 7 d 养护后,对添加不同建筑垃圾碎末加筋率的试样进行试验,试验所测得的应力应变曲线如图 2,由图 2 可见:素土和建筑垃圾碎末加筋土的轴向应力均随着轴向应变的升高先增大后减小。素土与建筑垃圾碎末加筋土的轴向应力峰值相差不多,其中素土的轴向应力峰值相对最低,在添加建筑垃圾碎末后,土的轴向应力峰值有所提高,加筋率为 15% 的建筑垃圾碎末加筋土的轴向应力峰值最高,当建筑垃圾碎末的加筋率提高到 20% 的时候,土的轴向应力峰值虽然略高于素土,但要比加筋率为

15% 的小。说明添加建筑垃圾碎末使土的轴向应力仅略有增大,且在配筋率为 15% 的时候较为适宜。另外,在加载前半段,建筑垃圾加筋土的轴向应力均小于素土,但在试验后半段,在素土达到极限轴向应力后,建筑垃圾加筋土轴向应力仍然缓慢上升,最后的峰值要大于素土,且建筑垃圾碎末的加筋率越高,土样到达极限轴向应力时的轴向应变也越大。在回落阶段,素土的轴向应力回落速度最大,20% 加筋率的建筑垃圾加筋土的轴向应力回落速度最慢。这说明在添加建筑垃圾碎末后,提高了土的延性,降低了其脆性。在破坏状态方面,建筑垃圾碎末的加筋率越高,构件在破坏时的结构越完整,也说明了在添加建筑垃圾碎末后,土的延性提高。

表 4 试样无侧限抗压强度表 % , MPa

试样分组	建筑垃圾碎末含量	石灰粉含量	养护 7d 强度	养护 14d 强度	养护 21d 强度	养护 28d 强度
素土	0	0	1.71	1.82	1.91	1.95
建筑垃圾碎末加筋土	10	0	1.76	1.88	1.95	1.98
15	0	1.78	1.89	1.96	2.00	
20	0	1.73	1.83	1.95	1.97	
石灰粉加筋土	0	3	1.83	1.97	2.15	2.29
0	4	1.93	2.08	2.25	2.38	
0	5	2.10	2.19	2.36	2.49	
10	3	1.85	1.99	2.14	2.26	
10	4	1.96	2.15	2.25	2.32	
10	5	2.13	2.22	2.32	2.39	
建筑垃圾碎末和石灰粉加筋土	15	3	1.98	2.12	2.26	2.35
15	4	2.12	2.23	2.31	2.43	
15	5	2.17	2.30	2.39	2.52	
20	3	2.05	2.21	2.37	2.51	
20	4	2.27	2.38	2.50	2.63	
20	5	2.13	2.30	2.44	2.58	

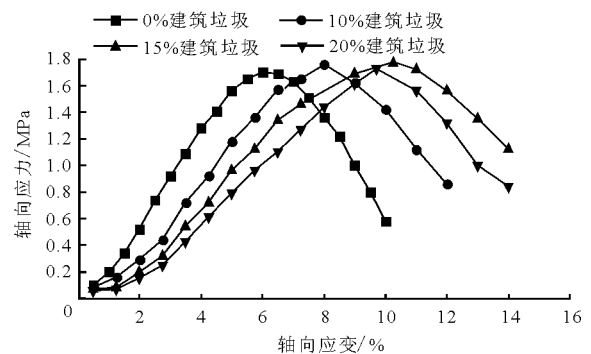


图 2 7 d 龄期时不同建筑垃圾碎末配比土应力应变曲线

图3为养护龄期对建筑垃圾碎末加筋土无侧限抗压强度的影响曲线图,由图3可见:所有样土无侧限抗压强度均随着养护龄期的增长而增大。与素土相比,龄期为7、14、21、28 d的10%建筑垃圾碎末加筋土的无侧限抗压强度分别是素土的1.029、1.033、1.021、1.015倍,平均为1.025倍;15%建筑垃圾碎末加筋土分别是素土的1.040、1.038、1.026、1.025倍,平均为1.032倍;20%建筑垃圾碎末加筋土分别是素土的1.012、1.005、1.021、1.010倍,平均为1.012倍。可见当建筑垃圾碎末加筋率为15%时,对土的抗压强度提升最多,但也不十分明显。

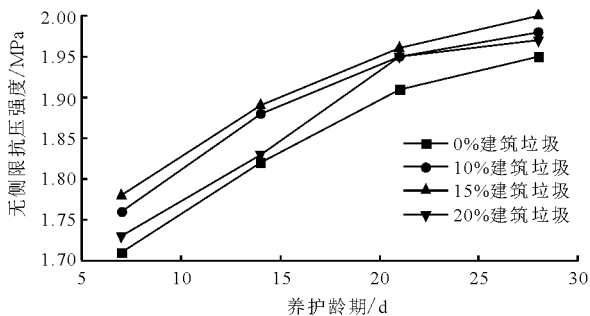


图3 养护龄期对垃圾土无侧限抗压强度的影响

综上所述:在土中添加建筑垃圾碎末对土的无侧限抗压强度只有略微提升;但在土中添加建筑垃圾碎末后,土体的延性明显上升,脆性降低。从添加的材料来看,建筑垃圾碎末主要包含有水泥碎末、砖粒和陶粒,这些颗粒的表面均有孔隙和空腔,在添加到素土中后,土颗粒会占据这些孔隙和空腔,形成了较为稳定的组织,产生了一定的黏结力和摩擦力,限制了土体的形变,从而提高了土体的延性,一定程度上减缓了脆性破坏的发生<sup>[23]</sup>。

### 3.2 石灰粉对土强度的影响

经过7 d养护后,对添加不同石灰粉加筋率的试样进行试验,试验所测得的应力应变曲线如图4所示。

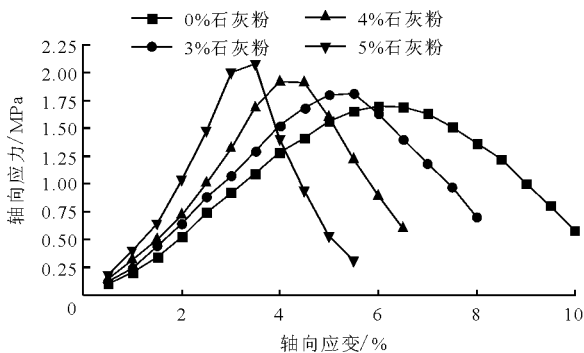


图4 7 d龄期时不同石灰粉配比土应力应变曲线

由图4可见:素土和石灰粉加筋土的轴向应力均随着轴向应变的升高先增大后减小。添加了石灰粉后的土样轴向应力峰值均大于素土,其中添加了3%石灰粉的加筋土轴向应力峰值较素土增加量不大,添加了4%和5%石灰粉的加筋土较素土的轴向应力峰值增加十分显著,其中添加了5%石灰粉的加筋土轴向应力增加最为显著。另外,石灰粉加筋土的轴向应力随着应变的增加而增加尤为明显,相较于素土可更快地达到轴向应力峰值,且加筋土的石灰粉含量越高,到达极限应力的时间也越快,曲线在下降阶段也越快。这说明添加了石灰粉后,确实能提高土体的极限轴向应力,但同时也使土体延性降低,脆性破坏明显,并随着石灰粉含量增加愈加明显。在破坏状态方面,石灰粉的加筋率越高,构件在终止试验时的破坏越严重,这也说明了石灰粉的添加使土的脆性提高。

图5为养护龄期对石灰粉加筋土无侧限抗压强度的影响曲线图。

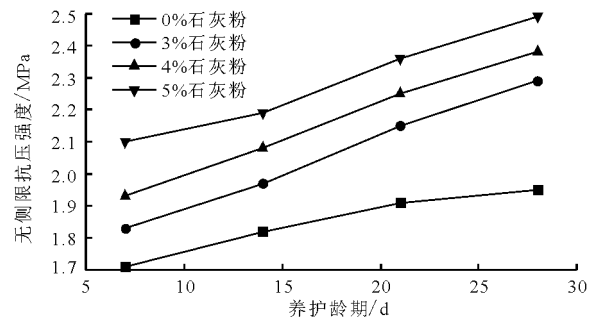


图5 养护龄期对石灰土无侧限抗压强度的影响

由图5可见:所有土样的无侧限抗压强度都随着养护龄期的增长而增大。石灰粉加筋土的无侧限抗压强度均大于素土,与素土相比,龄期为7、14、21、28 d的3%石灰粉加筋土的无侧限抗压强度分别是素土的1.070、1.082、1.126、1.174倍,平均为1.113倍;4%石灰粉加筋土分别是素土的1.129、1.143、1.178、1.221倍,平均为1.168倍;5%石灰粉加筋土分别是素土的1.228、1.203、1.236、1.277倍,平均为1.236倍。可见在土中添加石灰粉后,对土的无侧限抗压强度均有明显提升,其中石灰粉加筋率为5%时,对土的抗压强度提升最多。

综上所述:在土体中添加石灰粉,能够有效提升土体的无侧限抗压强度,当石灰粉加筋率为5%时,提升效果最为显著。同时,添加了石灰粉的土体延性下降,脆性上升,石灰粉加筋率为5%时,脆性提升最为明显。从微观层面分析,石灰粉的颗粒较土

颗粒更加均匀,且粒径较小,其添加到土体中后,可填补土颗粒之间的空隙,使土样内颗粒排列更加紧密,土体密实性增强,从而提高了土体的抗压强度,但添加石灰粉后,土体的塑性指数降低,土体延性减弱,使得土体更容易发生脆性破坏<sup>[24]</sup>。

### 3.3 建筑垃圾碎末和石灰粉对土强度的综合影响

图 6 为 7 d 养护龄期时不同建筑垃圾碎末和石灰粉加筋率土样的应力应变曲线,综合图 6 可知:在 7 d 养护龄期时,建筑垃圾碎末和石灰粉加筋土的轴向应力均大于素土。当建筑垃圾碎末加筋率为 10% 时,添加 5% 石灰粉,土的轴向应力极限值最大;当建筑垃圾碎末加筋率为 15% 时,添加 5% 石灰粉,土的轴向应力极限值最大;当建筑垃圾碎末加筋率为

20% 时,添加 4% 石灰粉,土的轴向应力极限值最大,且上述三者相比,加筋率为 20% 建筑垃圾碎末和 4% 石灰粉的加筋土极限轴向应力为最大。另外,相对素土,当建筑垃圾碎末的加筋率为 10%,无论石灰粉的加筋率为 3%、4%、5%,其达到轴向应力的峰值均比素土要快,下降趋势也更加急剧,且在石灰粉加筋率为 5% 时表现最为明显;当建筑垃圾碎末加筋率为 15% 时,无论石灰粉的加筋率为 3%、4%、5%,其达到轴向应力峰值的速度略优于素土,但效果并不明显;当建筑垃圾碎末的加筋率为 20% 时,土样达到轴向应力极限值的时间随着石灰粉的加筋率增大而变短,但总体来说达到轴向应力极限值的时间都明显长于素土,当石灰粉加筋率为 3% 时效果最为明显。

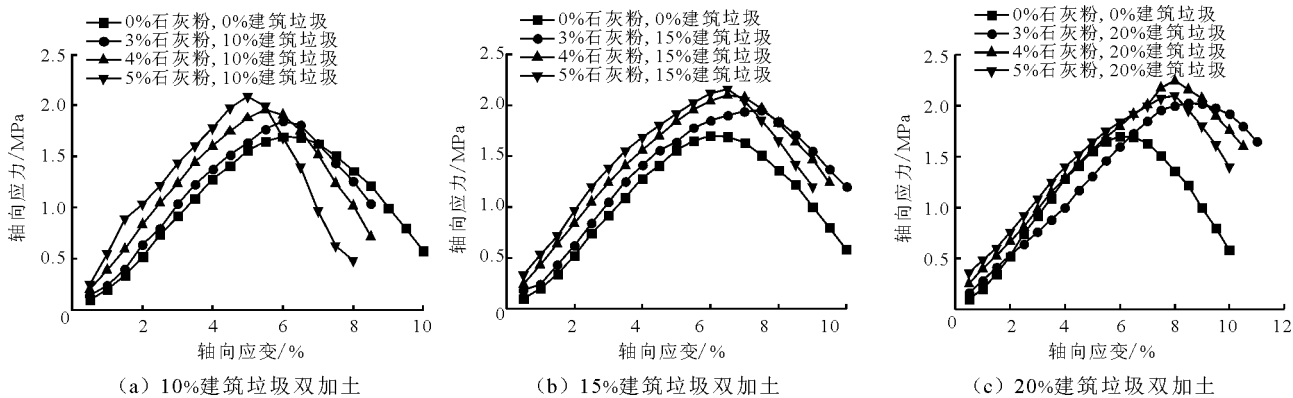


图 6 7 d 养护龄期时不同建筑垃圾碎末和石灰粉加筋率土样的应力应变曲线

图 7 为养护龄期对不同建筑垃圾碎末和石灰粉加筋率土样的影响图,由图 7 可知:土样的无侧限抗压强度均随着养护龄期的增加而变大,且建筑垃圾碎末和石灰粉加筋土的无侧限抗压强度均高于素土。具体来说:(1)10% 建筑垃圾碎末 3% 石灰粉加筋土在龄期为 7、14、21、28 d 的无侧限抗压强度分别是素土的 1.082、1.093、1.120、1.159 倍,平均为 1.114 倍;10% 建筑垃圾碎末 4% 石灰粉加筋土分别是素土的 1.146、1.181、1.178、1.190 倍,平均为 1.174 倍;10% 建筑垃圾碎末 5% 石灰粉加筋土分别是素土的 1.246、1.220、1.215、1.226 倍,平均为 1.227 倍;(2)15% 建筑垃圾碎末 3% 石灰粉加筋土分别是素土的 1.158、1.165、1.183、1.205 倍,平均为 1.178 倍;15% 建筑垃圾碎末 4% 石灰粉加筋土分别是素土的 1.240、1.225、1.210、1.246 倍,平均为 1.230 倍;15% 建筑垃圾碎末 5% 石灰粉加筋土分别是素土的 1.270、1.264、1.251、1.292 倍,平均为 1.270 倍;(3)20% 建筑垃圾碎末 3% 石灰粉加筋土分别是素土的 1.200、1.214、1.241、1.287 倍,平

均为 1.236 倍;20% 建筑垃圾碎末 4% 石灰粉加筋土分别是素土的 1.327、1.308、1.309、1.349 倍,平均为 1.323 倍;20% 建筑垃圾碎末 5% 石灰粉加筋土分别是素土的 1.246、1.264、1.277、1.323 倍,平均为 1.278 倍。在破坏模式方面,对于龄期相同的试件来说,双加的土体均优于单加石灰粉的土体,但略逊于单加建筑垃圾碎末的土体,这说明在土体中同时加入石灰粉和建筑垃圾碎末,这两者可以在土体中同时产生各自单加时的作用,可以起到互补的功效。对于同加筋率不同龄期的试件来说,龄期越长,试件在破坏时的状态越好。虽然养护的时间可以一定程度上提高土体的物理力学性能,但加筋材料的添加后,如建筑垃圾碎末,在养护期间必定会产生一定的水泥固化效果,使得土体的延性提升更多,力学性能也上升更加明显。相比之下,当加筋率为建筑垃圾碎末 20% 石灰 4% 时,土样的无侧限抗压强度提升幅度最大,且此时土体的延性相较于素土也有明显提高。因此,最优的加筋方案是 20% 建筑垃圾碎末和 4% 石灰粉。

综上所述:在土体中同时添加建筑垃圾碎末和石灰粉,均在一定程度上提高了土体的无侧限抗压能力,并且在建筑垃圾碎末的加筋率提高到20%时,土体的韧性有明显提高,减缓了脆性破坏。从综合角度看,在土体中添加建筑垃圾碎末和石灰粉后,

两者都在其中发挥了相应的作用,首先在加入石灰粉后,提高了土体的无侧限抗压强度,而同时加入的建筑垃圾碎末能有效地弥补加入石灰粉后土体的韧性降低,使得土体能够在提高抗压强度的同时,脆性降低,残余强度增加。

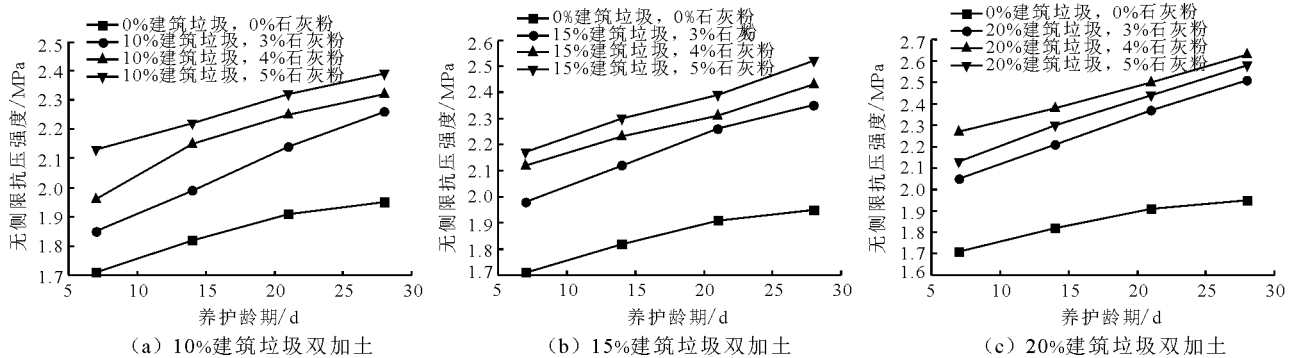


图7 养护龄期对不同建筑垃圾碎末和石灰粉加筋率土样的无侧限抗压强度影响

## 4 结论

(1) 建筑垃圾碎末作为加筋材料加入上海黏土,对土体的无侧限抗压强度提升并不明显,但能够明显提高土体的延性。

(2) 石灰粉作为加筋材料加入上海黏土,能够有效提高土体的抗压强度,并随着养护龄期的延长而增加,但同时提高了土体的脆性。

(3) 建筑垃圾碎末和石灰粉共同作为加筋材料加入上海黏土后,两种材料能够充分发挥各自的优势,显著的提高了土体的抗压强度,并随着养护龄期的延长而增加,同时也有效降低了土体的脆性。与建筑垃圾碎末土相比提高了抗压强度,与石灰土相比提高了延性。

(4) 当土体的加筋率为20%建筑垃圾碎末、4%石灰粉时,土体的抗压强度最大,并在养护龄期为28 d时达到最高值。另外延性也有明显提高,故为最适宜的加筋率。

以上结论可以看出,用建筑垃圾碎末和石灰粉作为加筋材料,能够有效改良上海黏土的物理力学性能,并且为建筑垃圾再利用和加筋土的研究提供了新的方向。但是在实际工程中,其具体的可行性还涉及到施工工艺、施工地点、工程造价等,本文仅提供一种有效的改良方法,希望可以在实际工程中起到参考作用。

### 参考文献:

[1] 严学新,史玉金. 上海市工程地质结构特征[J]. 上海

地质,2006(4): 19-24.

[2] 李晓. 上海地区晚新生代地层划分与沉积环境演化[J]. 上海地质,2009(1): 1-7.

[3] 张娇,王卫东,徐中华,等. 上海典型黏土小应变特性的试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(12): 3590-3596.

[4] CZYŻE A, DEXTER A R. Mechanical dispersion of clay from soil into water: readily-dispersed and spontaneously-dispersed clay[J]. International Agrophysics, 2015, 29(1): 31-37.

[5] MIROŚLAW L, MAŁGORZATA W. Saturation criteria for heavy overconsolidated cohesive soils[J]. Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Land Reclamation, 2010, 42(2): 295-302.

[6] ROY T K. Influence of sand on strength characteristics of cohesive soil for using as subgrade of road[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013, 104(3): 218-224.

[7] 郑刚,龚晓南,谢永利,等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(2): 127-146.

[8] 陆叶. 纤维加筋石灰固化非饱和黏性土的力学特性试验研究[D]. 南京:南京大学,2014: 27-34.

[9] 璩继立,赵冬雪,李贝贝. 加筋条件对棕榈加筋土强度的影响[J]. 工业建筑,2015,45(3): 115-119+129.

[10] NAGAPAN S, RAHMAN I A, ASMI A, et al. Study of site's construction waste in Batu Pahat, Johor[J]. Procedia Engineering, 2013, 53: 99-103.

[11] LACHIMPADI S K, PEREIRA J J, TAHA M R, et al. Construction waste minimisation comparing conventional and pre-cast construction (Mixed System and IBS) methods in high-rise buildings: A Malaysia case study[J]. Resources Conservation & Recycling, 2012, 68(4): 96-103.

[12] WAHI N, JOSEPH C, TAWIE R, et al. Critical review

- on construction waste control practices: Legislative and waste management perspective [J]. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2016, 224: 276 - 283.
- [13] WOJCIECH S, GLUCHOWSKI A. Effects of stabilization with cement on mechanical properties of cohesive soil - sandy - silty clay [J]. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Land Reclamation*, 2013, 45 (2): 193 - 205.
- [14] HASAN U, CHEGENIZADEH A, BUDIHardjo M A, et al. Experimental evaluation of construction waste and ground granulated blast furnace slag as alternative soil stabilisers [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2016, 34(6): 1707 - 1722.
- [15] 孙中明, 璩继立. 纤维素纤维和石灰粉对上海黏土抗压强度的影响 [J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27 (2): 211 - 215.
- [16] CHEN Aijun, ZHANG Jiasheng, PENG Liying, et al. Indoor experimental research on the unconfined compressive strength of lime improving expansive clay [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 250 - 253: 2296 - 2301.
- [17] JHA A K, SIVAPULLAIAH P V. Susceptibility of strength development by lime in gypsiferous soil - A micro mechanistic study [J]. *Applied Clay Science*, 2015, 115: 39 - 50.
- [18] MUBEEN M M. Stabilization of soft clay in irrigation projects [J]. *Irrigation & Drainage*, 2010, 54(2): 175 - 187.
- [19] YU H S, SLOAN S. Finite element limit analysis of reinforced soils [J]. *Computers and Structures*, 1997, 63 (3): 567 - 577.
- [20] CONSOLI N C, ROCHA C G D, SILVANI C. Effect of curing temperature on the strength of sand, coal fly ash, and lime blends [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(8): 6014015 - 6014011.
- [21] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTGE40 - 2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [22] 徐宝龙. 建筑垃圾土性能及其作为路基填料的施工 [J]. *中国市政工程*, 2011, 152(2): 67 - 69 + 93 - 94.
- [23] 花丽君, 吴相豪, 袁潘. 掺粉煤灰和石灰粉影响再生混凝土自收缩变形的试验研究 [J]. *粉煤灰*, 2013, 25 (1): 37 - 39.

(上接第 228 页)

(2) 当存在套管支护时, 水平向应力分布较为平稳, 波动性并不明显; 当没有套管支护时, 在既有桩基一侧处将发生较剧烈波动, 在拔桩施工结束后, 附加应力均趋于稳定。

(3) 随着桩的拔出, 桩基周围土体应力释放发生松动, 当存在套管支护时, 竖直向地表沉降分布平稳; 拔桩时桩周土体分别向两边松弛, 产生向外扩张的水平位移, 且最大位移产生位置位于既有桩基桩端位置处。

#### 参考文献:

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [2] 孙钧, 汪炳建. 地下结构有限元法解析 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.
- [3] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [4] 冯嵩, 郑颖人, 孔亮, 等. 广义塑性力学多重屈服面模型隐式积分算法及其 ABAQUS 二次开发 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(10): 2019 - 2025.
- [5] 贺嘉, 陈国兴. 基于 ABAQUS 软件的大直径桩承载力-变形分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(2): 306 - 310.
- [6] 司海宝, 蔡正银. 基于 ABAQUS 建立土体本构模型库的研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(2): 599 - 603.
- [7] HIBBIT K. ABAQUS/Standard User's Manual [M]. USA: HKS Co., Ltd, 2002.
- [8] 曹玉忠, 刘建国, 徐东. 套管法拔桩施工对邻近箱涵的影响分析 [J]. *城市轨道交通研究*, 2007(8): 70 - 71.
- [9] 钱建固, 贾鹏, 程明进, 等. 注浆桩土接触面试验研究及后注浆抗拔桩承载特性数值分析 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(S1): 662 - 668.
- [10] 丁红岩, 刘建辉. 钻井船拔桩对筒基平台稳定性影响的敏感分析 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(6): 1205 - 1211.
- [11] 周长东, 张蝶. 预应力 FRP 片材约束混凝土方柱应力-应变模型 [J]. *结构工程师*, 2010, 26(2): 18 - 23.
- [12] HARAJLI M H. Axial stress-strain relationship for FRP confined circular and rectangular concrete columns [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28(10): 938 - 948.
- [13] 刘其园, 张利荣. 钢板桩静压施工技术及其在螺河特大桥的应用 [J]. *水利水电技术*, 2013, 44(3): 37 - 38.
- [14] 徐壮涛, 张静. 旋挖扩底抗拔桩受力机理及扩底段作用机制研究 [J]. *建筑结构*, 2016, 46(8): 65 - 69.
- [15] 王建营. 全回转钻机拔桩施工技术 [J]. *建筑施工*, 2010, 32(2): 143 - 144.