

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.117



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



颗粒组成对杂填土与软土互嵌沉降的影响试验研究

张福海^{1,2}, 薛浩宇¹, 陈宇¹, 徐嘉成¹, 刘峥嵘¹

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室; 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 南京 210098;

2. 河海大学 疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏 常州 213022)

摘要:在受到上覆荷载作用时,杂填土地基下敷淤泥软土会轻易挤入杂填土颗粒之间的孔隙中,造成互嵌沉降,在传统地基沉降计算中这部分沉降未被考虑。而杂填土级配不均,其孔隙率与粒径组分密切相关。选取 4 种不同粒径颗粒组,以不同粒径的杂填土颗粒组成的二元混合物为研究对象,利用自制互嵌仪进行互嵌试验,揭示二元混合颗粒中不同粒径比、小颗粒含量下杂填土与软土的总沉降与互嵌沉降发展规律。研究结果表明:二元混合颗粒组成中,当小颗粒占主体时,互嵌沉降随着小颗粒粒径的增大而增大;当大小颗粒含量相同时,随着小颗粒粒径的增大,互嵌沉降呈先减小后增大的趋势;当小颗粒含量较少时,互嵌沉降随着小颗粒粒径的增大而减小。而在杂填土大小颗粒含量变化过程中,小颗粒粒径较小时,互嵌沉降随着颗粒含量的增加而减小;小颗粒粒径较大时,颗粒含量的增加对杂填土与软土的互嵌沉降影响不大。

关键词:杂填土;软土;互嵌沉降;颗粒混合;地基沉降

中图分类号:TU447 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)05-0010-08

Experimental study on settlement of intermixing between miscellaneous fill and soft soil influenced by particle composition

ZHANG Fuhai^{1,2}, XUE Haoyu¹, CHEN Yu¹, XU Jiacheng¹, LIU Zhengrong¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering; Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China; 2. Engineering Research Center of Dredging Technology, Ministry of Education, Hohai University, Changzhou 213022, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: The soft soil of silt underneath the miscellaneous fill can be easily squeezed into the pores between the particles of the miscellaneous fill under overlying loads, resulting in mutual embedding settlement, which is failed to be taken into account in traditional foundation settlement calculations. But miscellaneous fill has the property of uneven grading, and its porosity is closely related to its particle size component. This paper selected four different particle size groups, a binary mixture of heterogeneous soil particles of different particle sizes was studied, used self-made embedded instrument to investigate the evolution pattern of total settlement and mutual embedded settlement under the different particle size ratios and small particle content of miscellaneous fill by tests. The results indicate that: under binary mixed granular composition, when small particles occupy the body, mutual embedded settlement increases with increase of small particle size, when the content of large and small particles is the same, the mutual

收稿日期:2022-07-20

基金项目:国家自然科学基金(51778211)

作者简介:张福海(1970-),男,博士,教授,主要从事软土地基处理和岩土工程测试研究,E-mail:fhzhang@hhu.edu.cn。

Received: 2022-07-20

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51778211)

Author brief: ZHANG Fuhai (1970-), PhD, professor, main research interests: soft soil foundation treatment and geotechnical testing technology, E-mail: fhzhang@hhu.edu.cn.

embedded settlement tends to decrease first and then increase with increase of the particle size of small particles, when the content of small particles is less, the mutual embedded settlement decreases with increase of particle size; and in the process of particle content change in miscellaneous fill, when the particle size of the small particle is small, mutual embedded settlement decreases with increasing particle content, when the particle size is large, the increase of particle content does not have much effect on the intermixing settlement between the miscellaneous fill and the soft soil.

Keywords: miscellaneous fill soil; soft soil; mutual embedding settlement; particle mixing; foundation settlement

在水系发达地区,杂填土地基中分布有深厚的淤泥软土层。受到上覆荷载作用,杂填土颗粒与软土之间会产生剪切变形,致使软土挤入杂填土颗粒之间的孔隙中,从而引发地基沉降。如何分析、预测该沉降问题,是目前岩土工程领域研究的热点。

目前,学者们针对杂填土地基的研究主要集中在渗流、强度特性及稳定性等方面。渗流方面主要是通过室内外试验对垃圾填埋体中的渗透特性进行研究^[1-3],并对垃圾填埋体中的饱和-非饱和渗流特性进行分析^[4-5];强度方面则是利用室内试验、现场试验对垃圾土在不同条件下的抗剪强度特性进行测试^[6-8];而在稳定性方面,许多学者通过理论、模型试验和数值分析等方法对影响垃圾填埋场的稳定性因素做了大量研究^[9-12]。

关于杂填土地基的沉降机理,众多学者也根据实际情况,利用不同方法进行了分析。王海英等^[13-14]结合西安一咸北环线建筑垃圾路基试验段的沉降实测数据,建立了三点星野法模型并分析了其在建筑垃圾填埋路基沉降预测中的优势;徐长节等^[15]通过对建筑垃圾堆山和场区现有黏性土堆山进行仿真模拟,分析了不同填料堆山时堆载体的位移和地基差异沉降量;Li等^[16]通过一系列室内试验和现场测量对建筑垃圾填料的长期变形特性进行了研究,并提出 Burgers 模型用于预测建筑垃圾路基的最大沉降;Zhang 等^[17]确定了建筑垃圾填充路基两种不同的永久变形响应以及各种因素的影响,并提出一种具有合理预测精度的路基填料永久变形预测模型;Liu 等^[18]基于 Weibull 分布概率密度函数建立了预测建筑垃圾道路路堤长期沉降的计算模型;Wang 等^[19]则提出了三分双曲线组合模型预测建筑垃圾的沉降。

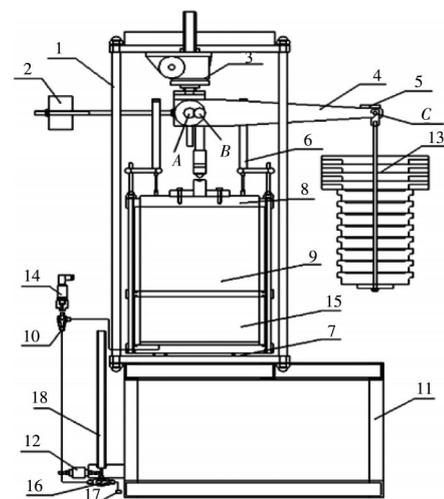
综上,尽管许多学者针对杂填土地基的沉降机理进行了研究,但关于杂填土与软土互嵌而导致的沉降分析却很少见。张福海等^[20]利用自制的互嵌仪,通过室内试验验证了其互嵌沉降的客观存在,但就杂填土的颗粒粒径大小分布特征对互嵌沉降大小及发展规律的影响并未作详细阐述。为此,笔者通过室内对比试验,以不同粒径比、小颗粒含量杂填土颗粒组成的

二元混合物为研究对象,对杂填土与软土互嵌沉降的影响因素进行了分析讨论。

1 试验方案

1.1 试验装置

试验采用自主研制的互嵌试验仪器^[20],主要部件包括容器装置、加载装置和采集装置3部分。容器装置由传压板、容器桶和滤水板组成,其中容器桶分上、下两部分,上容器为粗颗粒填充区,下容器为软土填充区,上、下容器为圆柱形,直径均为300 mm,传压板位于上容器顶部,滤水板位于下容器底部,底部设有排水孔。加载装置采用杠杆加载,由杠杆、手动调平机构、平衡水泡、砝码组成,为保证荷载稳定施加,在试验过程中,每隔一段时间需要通过旋转调平装置调平杠杆,以保证精确度。采集装置包括位移传感器、孔压传感器、压差传感器、量管,传感器另一端连接电脑,自动采集试样的位移量与排水量数据。图1、图2分别为试验装置的设计图和实物图。



注:1. 反力框架;2. 平衡锤;3. 杠杆调平机构;4. 杠杆;5. 平衡水泡;6. 位移传感器;7. 滚珠排;8. 传压板;9. 上容器;10. 量管;11. 支架;12. 孔压传感器;13. 砝码;14. 第2三通阀;15. 下容器;16. 第1三通阀;17. 出水口;18. 压差传感器。A. 支点, B. 受力点, C. 加载点。

图1 试验仪器设计图

Fig. 1 Design drawing of test instruments



图2 试验仪器实物图

Fig. 2 Physical drawing of test instruments

1.2 试验土样

1.2.1 软土试样

试样所用软土取自南京市秦淮河,其天然状态下呈灰褐色,天然含水率高,属于淤泥质土。取土后对天然土中的贝壳等杂质进行过滤并烘干土体,待土体干燥后碾碎过2 mm筛,之后进行室内常规试验,测得该土体的基本物理性质,见表1。

表1 软土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soft soil

天然含水率/%	孔隙比	塑限/%	液限/%	土粒比重	干密度/(g/cm ³)
62.1	1.13	29.6	55.5	2.68	1.27

1.2.2 杂填土试样

鉴于杂填土结构成分复杂,其与软土互嵌时关系会变得难以掌握,故将其材料及外形简化为水泥圆球颗粒,粒径大小与杂填土颗粒的等效粒径相对应。

1.3 试验原理

在上覆荷载作用下,杂填土地基下卧软土挤入杂填土孔隙中,造成互嵌沉降,常规的分层总和法只能将各层土的沉降进行计算累加,而除杂填土层、软土层的固结沉降外,还应包括互嵌沉降。试验中,由于杂填土颗粒由水泥球颗粒制成,相较于互嵌沉降,其沉降可忽略不计,因此,在不考虑杂填土沉降时,互嵌沉降为总沉降与固结沉降之差^[21],如式(1)所示。

$$h_2 = h - h_1 \quad (1)$$

式中: h_2 为软土嵌入杂填土孔隙中的互嵌沉降; h 为总沉降; h_1 为软土固结沉降。

总沉降 h 可通过试验中的位移传感器直接测出。软土固结时,假设土颗粒不发生变形,而软土

变形完全取决于互嵌过程中的排水量。因此,通过量管和压差传感器可测得排水量的体积,再由式(2)换算出软土固结沉降量。

$$h_1 = \frac{V}{S} \quad (2)$$

式中: V 为量管测得的排水量; S 为容器桶的断面面积。已知容器桶直径为300 mm,因此,容器桶的断面面积 S 可由式(3)得出。

$$S = \pi r^2 = 706.86 \times 10^2 \text{ mm}^2 \quad (3)$$

1.4 试验设计

1.4.1 粒径选取

从混合土固相粒度分布的角度,依据试验设备的要求,杂填土的最大颗粒粒径取50 mm。而粒径50 mm颗粒以最密集的方式分布时,其孔隙能穿过的最大颗粒粒径为7.74 mm(见图3),所以,根据小颗粒能否被填充进该孔隙中,分别选取5、10、30 mm作为小颗粒的粒径大小,图4为已经制成的杂填土颗粒实物图。

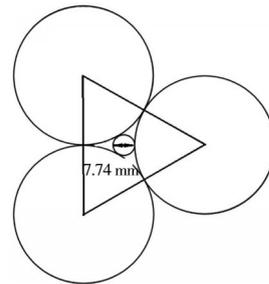


图3 50 mm 颗粒孔隙图

Fig. 3 Porosity graph of 50 mm particle size

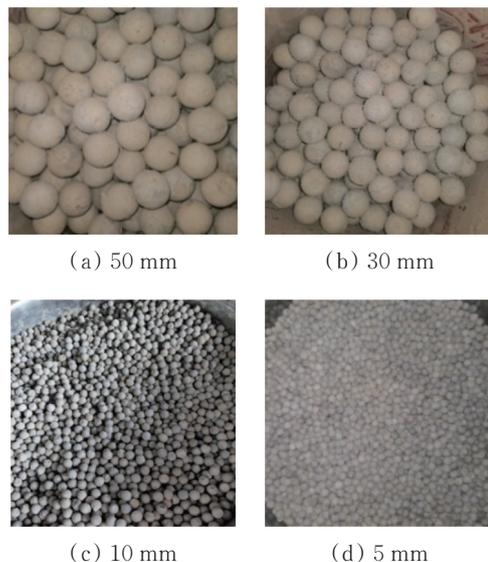


图4 不同粒径杂填土颗粒实物图

Fig. 4 Physical drawing of miscellaneous fill particle with different size

1.4.2 小颗粒含量选取

为探讨杂填土中小颗粒含量对杂填土与软土互嵌沉降的影响,基于主导颗粒骨架的概念,以单一粒径开始,到小颗粒为主导,再到大颗粒为主导的比例为基础,选取小颗粒含量分别为100%、80%、50%、20%。最终,将3种小颗粒粒径按照大小颗粒质量0:1(小颗粒质量占100%)、2:8(大颗粒质量占20%,小颗粒质量占80%)、5:5(大颗粒质量占50%,小颗粒质量占50%)、8:2(大颗粒质量占80%,小颗粒质量占20%)进行配比,配比方案与孔隙比如表2所示(表中空白处表示为0)。

表2 互嵌试验方案

Table 2 Schemes of mutual embedding tests

试验组	杂填土各粒径颗粒含量/%				孔隙比
	5 mm	10 mm	30 mm	50 mm	
1	100			0	0.482 357
2	80			20	0.511 293
3	50			50	0.556 878
4	20			80	0.605 300
5		100		0	0.559 361
6		80		20	0.574 717
7		50		50	0.598 327
8		20		80	0.622 655
9			100	0	0.606 940
10			80	20	0.613 307
11			50	50	0.622 953
12			20	80	0.632 715
13				100	0.639 289

1.5 试验步骤

1)软土配制。试验采用重塑土,由于受试验仪器高度的影响,为防止因软土含水率过高使杂填土与软土互嵌时杂填土颗粒直接嵌入容器底部导致试验失败,故试验土样均采用 $0.8W_L$ (液限)的稠度状态进行配制。为降低软土试样厚度差异对试验结果的影响,每一次试样都选用同等质量的干土与水,干土与水的质量分别为6 500、2 886 g。将水土混合搅拌均匀后密封静置12 h,使土样水分分布均匀,之后取少量土样测得其含水率为44.4%。

2)软土层装样。检查仪器、传感器、排水孔是否正常后,将微微浸湿的土工布铺至容器底部,并在下容器筒壁周围贴上一层滤纸来增大软土层的向下的排水速率,同时减少软土上部排水带来的误差。向量管内加入适量的水,排出排水管内的空气,待量筒内水位不变后,关闭排水阀门,将软土填入下容器中。填土时,应将土样分层填入,并在填

土时进行适当振捣,以保证土样厚度均匀。图5为软土土样填充完成之后的效果图。



图5 软土装样完成

Fig. 5 Soft soil filling is completed

3)杂填土层装样。软土装填完毕后,为减少杂填土颗粒与侧壁间的摩阻力,先在上容器筒壁涂覆一层凡士林,然后填入处理过的杂填土颗粒。不同粒径组合的杂填土颗粒需以不同方式进行填装:单一粒径时,仅需一层一层均匀填满即可;不同粒径组合时,根据各粒径所占百分比,计算出每层50 mm高度各粒径颗粒的质量,以一层50 mm为单位,将不同粒径组合的二元混合颗粒均匀填入上容器内,如图6所示。

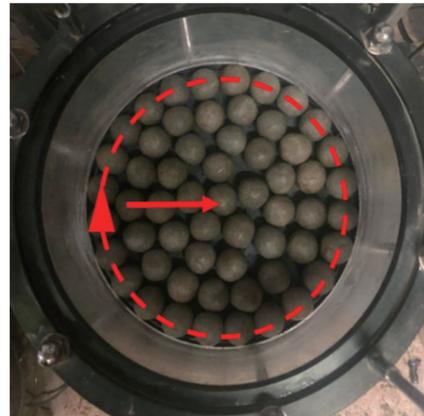


图6 杂填土试样装填

Fig. 6 Miscellaneous soil sample filling

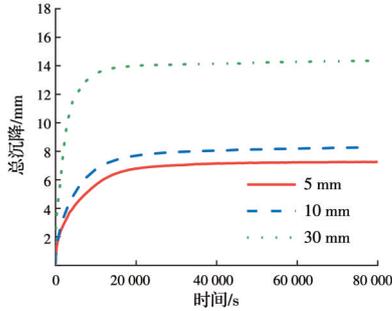
4)试样加载。杂填土颗粒放置完成后,放上传压板并调整至水平,安装位移传感器,打开仪器下方的排水阀,摇动转轮对准杠杆的加压端与传压板的受力端,直至加压杠杆水平。将传感器上的位移与排水量清零后,放置砝码并开始采集试验数据。试验为一次加载试验,试验荷载为50 kPa,由于加载过程中土层沉降,杠杆会缓慢地发生倾斜,因此,在数据开始记录后需及时摇动转轮,将加压杠杆调整至水平位置,避免造成试验误差。

2 试验结果及讨论

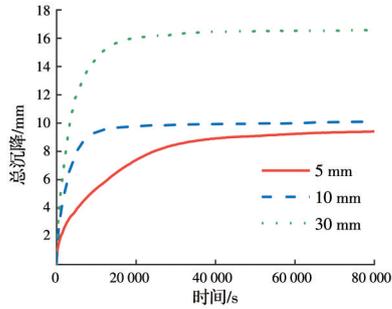
2.1 试验结果

根据杂填土与软土互嵌试验结果,得到了不同小颗粒含量下不同粒径小颗粒的总沉降与互嵌沉降随时间变化曲线,如图7、图8所示。

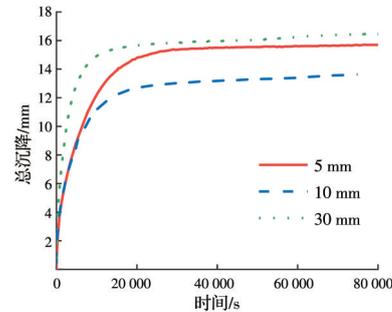
由图7、图8可见,在不同小颗粒含量下,各粒径



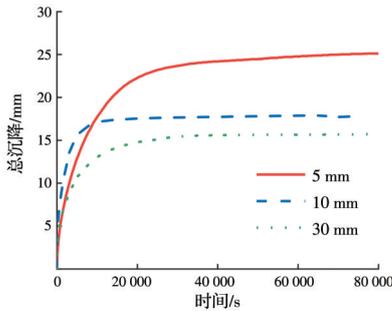
(a) 小颗粒含量 100%



(b) 小颗粒含量 80%

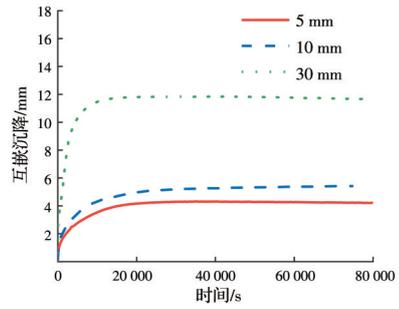


(c) 小颗粒含量 50%

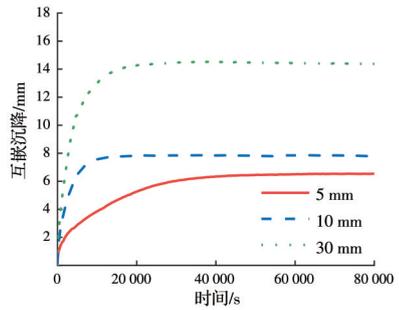


(d) 小颗粒含量 20%

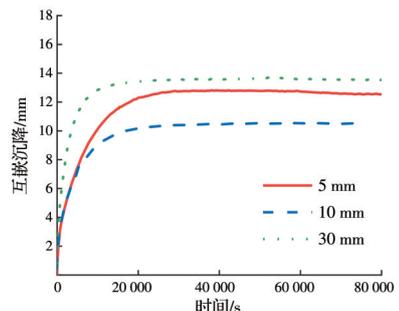
图7 不同小颗粒含量下各粒径小颗粒总沉降随时间变化曲线
Fig. 7 The total settlement curves of each small particle size with temporal variation under different small particle content



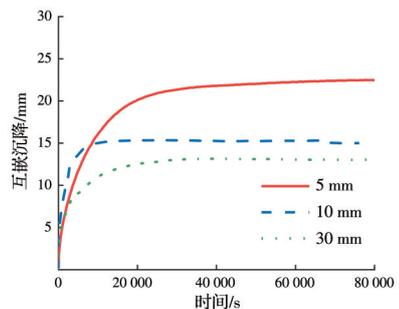
(a) 小颗粒含量 100%



(b) 小颗粒含量 80%



(c) 小颗粒含量 50%



(d) 小颗粒含量 20%

图8 不同小颗粒含量下各粒径小颗粒互嵌沉降随时间变化曲线

Fig. 8 The mutual embedding settlement curves of each small particle size with temporal variation under different small particle content

小颗粒总沉降与互嵌沉降的发展规律具有类似特征,即在开始加载后的初期阶段沉降增加较为迅速,随后逐渐减缓,最终达到稳定状态。由此可知,总沉降与互嵌沉降的发展规律可划分为早期的快速沉降阶段和快速沉降后的稳定阶段两个部分,而

各个总沉降和互嵌沉降的差异主要来源于早期的快速沉降阶段。

取图7、图8中各互嵌试验在稳定阶段的数据作为总沉降与互嵌沉降最终数据,结果表明,在不同小颗粒含量下,不同粒径小颗粒的总沉降与互嵌沉降差异较大。小颗粒含量为100%时,小颗粒粒径为30、10、5 mm的总沉降分别为14.4、8.3、7.2 mm,相应的互嵌沉降分别为11.8、5.4、4.3 mm,可见,小颗粒粒径为30 mm时总沉降与互嵌沉降最大,其次为10 mm,而小颗粒粒径为5 mm最小;当小颗粒含量为80%时,小颗粒粒径为30、10、5 mm的总沉降分别为16.6、10.2、9.5 mm,对应的互嵌沉降为14.3、7.3、6.5 mm,此时依然是小颗粒粒径为30 mm时总沉降与互嵌沉降最大,10 mm次之,5 mm时最小;当小颗粒含量为50%时,小颗粒粒径为30、10、5 mm的总沉降分别为16.6、13.6、15.7 mm,对应的互嵌沉降为13.5、10.5、12.6 mm,此时,小颗粒粒径为30 mm的总沉降与互嵌沉降最大,5 mm次之,而粒径10 mm的总沉降与互嵌沉降最小;在小颗粒含量为20%时,小颗粒粒径为30、10、5 mm的总沉降为15.8、17.9、25.2 mm,对应的互嵌沉降为13.1、15.3、22.5 mm,此时,小颗粒粒径为5 mm的总沉降与互嵌沉降最大,其次为10 mm,而30 mm时总沉降与互嵌沉降最小。

2.2 小颗粒粒径对互嵌沉降的影响

为研究小颗粒粒径对互嵌沉降的影响,将不同小颗粒含量下各粒径小颗粒的互嵌沉降进行对比分析,如图9所示。由图9可见,小颗粒含量为100%、80%时,两者随小颗粒粒径变化的互嵌沉降趋势类似,均随小颗粒粒径的增大而逐渐增大,且增长的趋势较为稳定,但小颗粒占主体时混合颗粒的互嵌沉降略大于单一粒径时,其原因是当小颗粒含量占100%时,颗粒粒径越大,颗粒与颗粒间的孔隙为越大,此时软土更容易嵌入杂填土颗粒中,从而造成更大的互嵌沉降,相反,颗粒粒径越小,颗粒

间排列越紧密,孔隙就越小,使得软土嵌入杂填土颗粒孔隙中变得更加困难,因此,互嵌沉降越小。而小颗粒含量为80%时,小颗粒含量较多,大颗粒含量较少,其承载力主要由小颗粒构成的整体骨架承担,因此,互嵌沉降趋势与单一粒径时相似,但由于大颗粒的加入会改变大颗粒周围小颗粒的分布方式,造成整体的孔隙率增大,从而导致互嵌沉降略大于单一粒径时。

当小颗粒含量为50%时,小颗粒与大颗粒含量相同,此时小颗粒粒径对互嵌沉降的影响作用发生了改变,互嵌沉降随着小颗粒粒径的增大呈先减小后增大的发展趋势,与单一粒径时的互嵌沉降趋势有所不同,且小颗粒粒径为5、10 mm时,与单一粒径相比,混合颗粒组成的杂填土互嵌沉降都有较大的增长,而较单一粒径,30 mm粒径却增长不大。说明随着小颗粒含量的进一步增加,大小颗粒的粒径相差越大,其造成的互嵌沉降就越明显。原因可能是,当大小颗粒含量相同时,由于大小颗粒粒径差异较大,小颗粒能够自由地穿过大颗粒所组成的孔隙,因此,在受到荷载作用时,小颗粒与大颗粒之间会产生相互滑动,使得大部分荷载作用由大颗粒所组成的骨架承担。小颗粒对下部挤入软土的阻碍作用减小,下部软土能够更多地挤入杂填土的孔隙中,从而造成互嵌沉降增长较大。而当大小颗粒的粒径比值较小时,小颗粒无法穿过大颗粒所组成的孔隙,因此,其整体荷载作用由大小颗粒所组成的骨架共同承担,而小颗粒含量增加后,杂填土的孔隙比并没有发生太大变化,所以互嵌沉降的增长便不太明显。

当小颗粒含量为20%时,互嵌沉降的趋势与单一粒径时正好相反,互嵌沉降随着小颗粒粒径的增大而减小。且小颗粒粒径为5、10 mm时,混合颗粒组成的杂填土互嵌沉降增长幅度更大,尤其是5 mm粒径。这可能主要是因为小颗粒含量较少时,小颗粒只是零散分布在大颗粒所组成的孔隙中,此时大颗粒构成了整个土体的骨架并承担绝大部分荷载作用,同时,由于大小颗粒粒径差异较大,在刚受到荷载作用时,小颗粒对下部挤入的软土几乎起不到阻挡作用,需要迁移到更远的距离与其他小颗粒堆积致密才能形成阻碍,因此使得互嵌沉降增长的幅度更大。

值得注意的是,在小颗粒含量为50%、20%时,小颗粒粒径为5 mm的孔隙比比10、30 mm时小,但是其互嵌沉降却比其他粒径颗粒混合时大,尤其是小颗粒含量为20%时。推断其原因为:不同级配组成的杂填土颗粒与软土互嵌时,其沉降除了与杂填

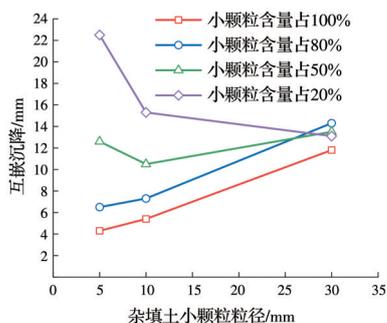


图9 不同含量小颗粒互嵌沉降随粒径变化图

Fig. 9 Variation of inter-embedded sedimentation of small particles of different particle content with particle sizes

土颗粒的孔隙比有关,与颗粒之间的排列方式所组成的孔隙结构也有很大关系。

2.3 小颗粒含量对互嵌沉降的影响

为研究小颗粒含量对互嵌沉降的影响,将不同粒径小颗粒下随含量变化的互嵌沉降数据进行对比分析,如图 10 所示。由图 10 可以发现,当小颗粒粒径为 5 mm 时,随着小颗粒含量的增加,互嵌沉降呈先增大后减小的变化规律,而小颗粒含量为 20%~80% 的时,互嵌沉降随着颗粒含量的增加近似呈线性下降趋势,且下降迅速,说明此时颗粒含量对互嵌沉降的影响较大。

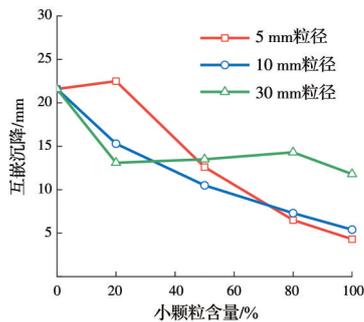


图 10 不同粒径小颗粒互嵌沉降随颗粒含量变化图

Fig. 10 Variation of inter-embedded sedimentation of small particles of different particle sizes with particle content

当小颗粒粒径为 10 mm 时,互嵌沉降随着小颗粒含量的增加而减小,当小颗粒含量在 20%~80% 时,互嵌沉降随小颗粒含量的增加也近似呈线性下降,但其下降速率相较于 5 mm 粒径时较慢。说明此时颗粒含量仍然会对互嵌沉降产生影响,但这种影响已经开始逐渐减弱。

而当小颗粒粒径为 30 mm 时,随着小颗粒含量的增加,互嵌沉降先下降,但当小颗粒含量超过 20% 时,互嵌沉降随小颗粒含量增加而变化的幅度却并不明显,基本上保持在一定范围之内,表明此时颗粒含量对互嵌沉降的影响已经很小。

综上所述,粒径较小的小颗粒与大颗粒组成的二元混合物在杂填土与软土的互嵌沉降中会随着小颗粒含量的增加而减小,此时受颗粒含量的影响较大;但随着小颗粒粒径增大,颗粒含量对杂填土与软土互嵌沉降的影响逐渐减弱,并且在接近大颗粒粒径时,颗粒含量的变化对互嵌沉降的影响已经微乎其微。这可能主要是由于小颗粒粒径较大时,小颗粒无法穿过大颗粒所组成的孔隙,使得大颗粒与小颗粒共同组成整体骨架来承担荷载,在受到荷载作用时,由于大颗粒与小颗粒之间没有产生过多滑动,从而导致互嵌沉降时没有产生过多的变化。

3 结论

以不同粒径杂填土颗粒组成的二元混合物为研究对象,研究了不同小颗粒粒径、含量对杂填土与软土互嵌沉降的影响,得出以下主要结论:

1) 杂填土与软土发生互嵌沉降主要分为两个阶段:快速沉降阶段和稳定阶段,而各个总沉降和互嵌沉降的差异主要来源于早期的快速沉降阶段。

2) 二元混合杂填土颗粒中,当小颗粒占主体时,互嵌沉降随着小颗粒粒径的增大而增大,当大小颗粒含量相同时,互嵌沉降随着小颗粒粒径的增大呈先减小后增大的趋势,当小颗粒含量较少时,互嵌沉降随着小颗粒粒径的增大而减小。

3) 揭示了小颗粒含量对互嵌沉降的影响关系:小颗粒粒径较小时,互嵌沉降随小颗粒含量的增加而减小,受颗粒含量影响较大;但当小颗粒粒径越大且越接近大颗粒粒径时,颗粒含量对杂填土与软土互嵌沉降的影响却逐渐减小。

参考文献

- [1] 詹良通,徐辉,兰吉武,等. 填埋垃圾渗透特性室内外测试研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(3): 478-486.
ZHAN L T, XU H, LAN J W, et al. Field and laboratory study on hydraulic characteristics of MSWs [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(3): 478-486. (in Chinese)
- [2] ZENG G, LIU L, XUE Q, et al. Experimental study of the porosity and permeability of municipal solid waste [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2017, 36(6): 1694-1699.
- [3] KE H, HU J, XU X B, et al. Evolution of saturated hydraulic conductivity with compression and degradation for municipal solid waste [J]. Waste Management, 2017, 65: 63-74.
- [4] 刘学. 降雨条件下某垃圾填埋场饱和-非饱和渗流场特性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
LIU X. Study on saturated and unsaturated seepage field of landfill due to rainfall [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [5] ANDERSON C, SIVAKUMAR V, BLACK J A. Measurement of permeability using a bench-top centrifuge [J]. Géotechnique, 2015, 65(1): 12-22.
- [6] 魏于航. 成都市生活垃圾土力学特性及本构模型研究[D]. 成都: 西华大学, 2016.
WEI Y H. Study on mechanical properties and constitutive model of municipal solid waste in Chengdu City [D]. Chengdu: Xihua University, 2016. (in Chinese)
- [7] REDDY K R, HETTIARACHCHI H,

- PARAKALLA N S, et al. Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA [J]. *Waste Management*, 2009, 29(2): 952-959.
- [8] BRAY J, ZEKOS D, KAVAZANJIAN E, et al. Shear strength of municipal solid waste [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135: 709-722.
- [9] KHOSHAND A, FATHI A, ZOGHI M, et al. Seismic stability analyses of reinforced tapered landfill cover systems considering seepage forces [J]. *Waste Management & Research*, 2018, 36(4): 361-372.
- [10] YIN Y P, LI B, WANG W P, et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization [J]. *Engineering*, 2016, 2(2): 230-249.
- [11] 范鑫萍, 黄茂松, 王浩然. 考虑龄期分层的固体废弃物填埋场边坡稳定分析[J]. *岩土力学*, 2016, 37(6): 1715-1720.
- FAN X P, HUANG M S, WANG H R. Stability analysis of a municipal solid waste slope layered by aging [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(6): 1715-1720. (in Chinese)
- [12] WANG K, ZHANG S J, WEI F Q, et al. A case study of the rapid and long runout landslide at Hong'ao waste disposal site in Shenzhen, China [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(3): 727-739.
- [13] 王海英, 常肖, 阮祺, 等. 建筑垃圾填埋路基沉降预测的三点-星野法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(3): 473-479.
- WANG H Y, CHANG X, RUAN Q, et al. Subsidence prediction of subgrade filled by construction waste based on three point-hoshino algorithm [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(3): 473-479. (in Chinese)
- [14] 王海英, 常肖, 阮祺, 等. 基于三点修正双曲线法的建筑垃圾填筑路基沉降预测[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(2): 1-8.
- WANG H Y, CHANG X, RUAN Q, et al. Subsidence prediction of construction waste subgrade filled based on three-point modified hyperbolic method [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2017, 37(2): 1-8. (in Chinese)
- [15] 徐长节, 孙志浩, 王仲谋, 等. 软土地区建筑垃圾堆山工程的数值模拟研究[J]. *应用力学学报*, 2021, 38(4): 1493-1504.
- XU C J, SUN Z H, WANG Z M, et al. Numerical simulation study on artificial hill with construction waste in soft soil area [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(4): 1493-1504. (in Chinese)
- [16] LI Z, YAN S H, LIU L L, et al. Long-term deformation analysis of recycled construction waste subgrade filler [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 5891759.
- [17] ZHANG J, ZHANG A, LI J, et al. Gray correlation analysis and prediction on permanent deformation of subgrade filled with construction and demolition materials [J]. *Materials*, 2019, 12(18): E3035.
- [18] LIU L L, LI Z, CAI G J, et al. Performance and prediction of long-term settlement in road embankments constructed with recycled construction and demolition waste [J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(9): 4069-4093.
- [19] WANG H Y, SHE H, XU J, et al. A three-point hyperbolic combination model for the settlement prediction of subgrade filled with construction and demolition waste [J]. *Materials*, 2020, 13(8): E1959.
- [20] 张福海, 陈良, 白岩辉, 等. 杂填土与软土互嵌变形特性试验法及适用性分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(Sup1): 354-358, 396.
- ZHANG F H, CHEN L, BAI Y H, et al. Test method for mutually embedded settlement between fill and soft soil and its applicability [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(Sup1): 354-358, 396. (in Chinese)
- [21] ZHANG F H, ZHANG L, ZHOU T B, et al. An experimental study on settlement due to the mutual embedding of miscellaneous fill and soft soil [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 4819605.

(编辑 胡玲)