文章编号:1673-9469(2023)04-0018-07 DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.04.003

加载方式对杂填土与软土互嵌沉降的影响

张福海[1,2],黄振清[1],宋永平[1],陈 宇[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 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:杂填土地基下覆的淤泥质软土在受到上覆荷载作用时,会被轻易地挤入杂填土颗粒之间的孔隙中而引起互嵌沉降,在传统地基沉降的计算方法中该部分沉降未被考虑。采用自主研发的土体互嵌实验仪,对南京秦淮河地区的软土与杂填土进行一次加载、常规分级加载和复合多级加载试验,揭示互嵌沉降在不同加载方式下的发展规律。结果表明:不同加载方式下总沉降与互嵌沉降均呈现出阶梯式增长的趋势,在加载瞬间沉降骤增,然后逐渐减缓并趋于稳定,总沉降、互嵌沉降的差异主要来源于荷载施加瞬间的沉降变化。多级加载情况下,互嵌沉降与加载级数负相关,与荷载占比正相关,且通过曲线拟合发现互嵌沉降与加载级数呈现对数相关性,与荷载占比呈现出指数相关性。互嵌沉降比重与加载级数负相关,与荷载占比正相关,且当粒径较大时,互嵌沉降比重对加载方式敏感度降低。

关键词:杂填土;互嵌沉降;加载级数;荷载占比;互嵌沉降比重

中图分类号:TU447 **文献标识码**:A

Effect of Loading Method on Mutually Embedded Settlement of Miscellaneous Fill and Soft Soil

ZHANG Fuhai[1,2], HUANG Zhenqing[1], SONG Yongping[1], CHEN Yu[1]

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

Abstract: The muddy soft soil under the miscellaneous fill foundation can easily be squeezed into the pores between the miscellaneous fill particles under the action of the overlying load, causing mutual settlement. This part of the settlement is not considered in traditional foundation settlement calculation methods. Using a self-developed soil intercalation experimental instrument, one-time loading, conventional graded loading, and composite multi-stage loading tests were conducted on soft soil and miscellaneous fill in the Qinhuai River area of Nanjing, revealing the development law of intercalation settlement under different loading methods. The results show that under different loading methods, the total settlement and embedded settlement show a stepwise growth trend, with a sudden increase in settlement at the moment of loading, then gradually slowing down and stabilizing. The difference in the total settlement and embedded settlement mainly comes from the settlement changes at the moment of load application. In the case of multi-level loading, the embedded settlement is negatively correlated with the loading order and positively correlated with the load proportion. Through curve fitting, it was found that the embedded settlement is logarithmically correlated with the loading order and exponentially correlated with the load proportion. The proportion of embedded settlement is negatively correlated with the loading order and positively correlated with the proportion of load. Moreo-

收稿日期:2023-03-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778211)
作者简介:张福海(1970-),男,山东沂源人,博士,教授,从事软土地基处理方面的研究。

ver, when the particle size is large, the sensitivity of the embedded settlement proportion to the loading method decreases.

Key words: miscellaneous fill; embedded settlement; loading method; load proportion; special gravity of miscellaneous settlement

随着城市发展,新的城市功能区逐渐在杂填土地基上兴起。城市杂填土结构复杂,级配不均,天然密度大,结构疏松,是一种多相土[1]。当软土层上覆杂填土层时,在上覆荷载作用下下层软土会轻易挤入杂填土颗粒中,发生互嵌现象,从而引发额外的地基沉降。传统的地基沉降计算方法主要采用分层总和法,分别计算杂填土层和软土层的压缩变形之后累加,未考虑由于互嵌造成的这部分沉降。而互嵌引发的地基沉降与压缩变形产生的沉降有着本质的区别,如何对该互嵌现象引起的沉降进行分析和预测,对地基沉降的准确预测具有重要意义。

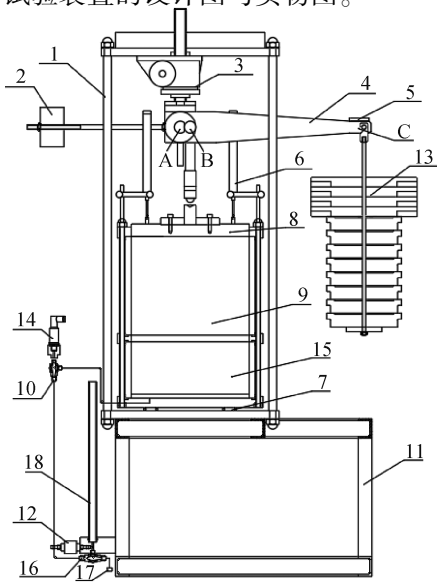
目前地基沉降计算方法主要分为两类。一类是以分层总和法为代表的工程实用计算方法[2-5],但是此类方法往往与实际沉降有较大差异;另一类是考虑复杂本构模型的有限元法、差分法等数值方法[6-8],此类方法参数难以确定,且难以考虑所有因素。国内外许多学者从多个角度对地基沉降进行了研究[9-21]。张诚厚等[9]证实了软粘土的结构性对其物理力学特性以及地基沉降具有较大影响。蒋鑫等[10]对顶面宽度、路基高度及边坡坡比等断面几何参数对软基沉降特性的影响进行较深入的模拟分析。Feng 等[14-16]、对分级加载情况下地基沉降进行了分析,提出了新的固结蠕变计算模型,并对地基沉降进行了预测。Huang 等[17]对动荷载作用下地基在列车不同运行速度下的位移响应沉降进行了数值模拟,同时利用室内缩尺模型进行对比分析。Wang 等[18]对冻土地基沉降进行了室内试验,并对其进行水热力三相耦合模拟研究。

尽管许多学者对地基沉降进行了详细的研究,但当前对杂填土与软土互嵌沉降方面的研究相对较少。张福海[19-21]证实了杂填土与软土互嵌沉降的存在,并对杂填土颗粒光滑程度、颗粒大小及组成以及上覆荷载等分析,但加载方式对互嵌沉降的影响并未作过多阐述。因此笔者利用课题组自研仪器进行室内杂填土和软土互嵌沉降试验,研究不同加载方式下杂填土和软土地基的互嵌沉降的影响。

1　试验方案

1.1　试验装置

本试验采用自行研制的互嵌实验仪[17],包括加载装置、容器装置、测量装置。加载装置由杠杆、杠杆调平机构、水平气泡以及砝码组成。荷载通过杠杆形式施加,杠杆比为 17.662 5∶1。为保持荷载稳定施加,在试验过程中每隔一段时间需要手动旋转杠杆调平机构使气泡水平。容器装置由传压板、上容器和下容器组成。上下容器直径均为 30 cm,上容器为杂填土颗粒填充区,下容器为软土填充区。传压板位于上容器顶部,滤水板位于下容器底部,且滤水板上设有排水口,通过三通阀排水。测量装置包括位移传感器、孔压传感器和压差传感器,传感器均与电脑相连,自动采集实验过程中的位移、排水量以及孔压。两个位移传感器用于测量传压板的位移,求二者平均值以减小实验误差。孔压传感器固定在下容器筒壁,压差传感器与量管连接,用于试验过程中的排水量。图 1、图 2 分别为试验装置的设计图与实物图。



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、第二、三通阀;15、下容器;16、第一通阀;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 Actual drawing of test instruments

1.2 试验材料

1.2.1 杂填土材料

由于杂填土结构复杂,进行实验时沉降发展规律难以掌握,文献[19-21]采用统一粒径的水泥球颗粒代替杂填土研究杂填土颗粒粒径、颗粒材料、上覆荷载等对互嵌沉降的影响,因此本文仍采用统一粒径的球形水泥球颗粒代替杂填土。由于颗粒粒径大于25 mm时,颗粒粒径变化对互嵌沉降会产生显著影响,因此本文采用粒径为5 mm和10 mm的颗粒进行试验,减小因粒径变化带来的误差,同时进行对比试验,使试验结果更加准确。

为保证每个颗粒的密度相同,采用模具制备时,使用震动台震动,排出球内空气,使水泥球颗粒密实。制样成功后,空气中静置12 h,然后放入水中养护至少7 d。制备粒径为5 mm和10 mm的水泥球,如图3所示。

图3 杂填土颗粒

Fig. 3 Miscellaneous fill particles

1.2.2 软土材料

试验所用软土取自南京市秦淮河,其天然状态下呈灰褐色,含水率高。试验时采用重塑土。其各项物理指标如表1所示。

表1 软土基本物理指标

Tab. 1 Basic physical properties of soft soil

天然容重/(kN·m^{-3})	塑限/%	液限/%	风干含水率/%	干密度/(g·cm^{-3})	土粒比重
17.9	29.6	55.5	5.42	1.27	2.68

1.3 试验原理

常规地基进行沉降预测时,一般采用分层总和法,将各层地基沉降累加;而杂填土地基的沉降不仅包括杂填土层沉降和软土固结沉降,还包括互嵌沉降[19]。本文进行的室内试验采用球形水泥球颗粒来模拟杂填土层,杂填土颗粒沉降相对较小,可以忽略不计。图4为杂填土与软土互嵌示意图。在不考虑杂填土层沉降情况下,互嵌沉降(互嵌位移)为总沉降与软土固结沉降之差,即

$$h_2 = h - h_1 \tag{1}$$

式中,h—为总沉降,mm;h_1—软土固结沉降,mm;h_2—互嵌沉降,mm。

假设试验过程中软土颗粒不变形,试验所配置软土试样为抽气饱和样,软土层的沉降完全取决于排水量。通过量管以及压差传感器测得排水量,根据式(2)计算得出软土固结沉降。

$$h_1 = \frac{V}{S} \tag{2}$$

式中,V—为排水量,mL;S—下容器断面面积,cm^2。

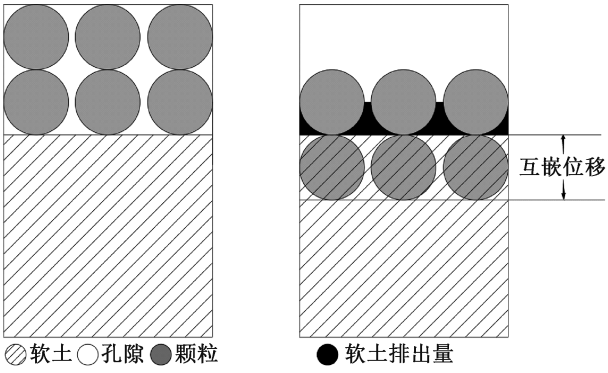


图4 软土与杂填土互嵌示意图

Fig. 4 Schematic diagram of soft soil and miscellaneous filling

1.4 试验方法

试验总荷载为100 kPa,采用一次加载、常规分级加载以及复合多级加载方式施加。为了使试验结果更加准确,将每级荷载作用下的最后一小时沉降量变化不超过0.01 mm视为沉降达到稳定。本文采用两种粒径(5、10 mm)的杂填土颗粒进行试验,具体方案如下:

(1)一次加载:将 100 kPa 荷载一次性施加。

(2)常规分级加载:将荷载分 3 级施加,第一级 25 kPa,第二级 50 kPa,第三级 100 kPa。

(3)复合多级加载:在常规分级加载的基础上再将每一级荷载分为两小级(共 6 级),然后按照不同比例施加每一小级荷载。在每一大级荷载中,定义其中第一小级荷载与这一大级荷载的比值为荷载占比,具体施加顺序如下:

表 2　加载方案

Tab. 2　Testing programs

加载类型		荷载顺序/kPa
一次加载		100
常规分级加载		25-50-100
复合多级加载	多级 25%~75%	6. 25-25-31. 25-50-61. 25-100
	多级 50%~50%	12. 5-25-37. 5-50-75-100
	多级 75%~25%	18. 75-25-43. 75-50-87. 5-100

2　试验结果及分析

2. 1　试验结果

图 5 为沉降结束后的互嵌层实物图,可以发现在杂填土与软土地基沉降中,互嵌沉降是不可忽略的一部分,这与文献[20]中得到的结论一致。根据杂填土与软土试验结果,绘制不同加载方式下总沉降与互嵌沉降随时间变化曲线,分别如图 6、图 7 所示。

图 5　互嵌层实物图

Fig. 5　Physical image of interbedded layers

由图 6、图 7 可以看出,不同加载方式下互嵌沉降与总沉降均呈现出相同的阶梯型增长趋势,即在加载瞬间沉降骤增,然后逐渐减缓并趋于稳定。因此,不同加载方式下总沉降、互嵌沉降的差异主要来源于加载瞬间产生的沉降。

此外,在整个加载过程中,总沉降与互嵌沉降的变化规律基本类似,均为一次加载最大,常规分级次之,复合多级加载最小。而在整个复合多级加载过程中,其总沉降与互嵌沉降大小基本为多级 75%~25%最大,多级 50%~50%次之,多级 25%~75%最小。取不同加载方式下总沉降与互

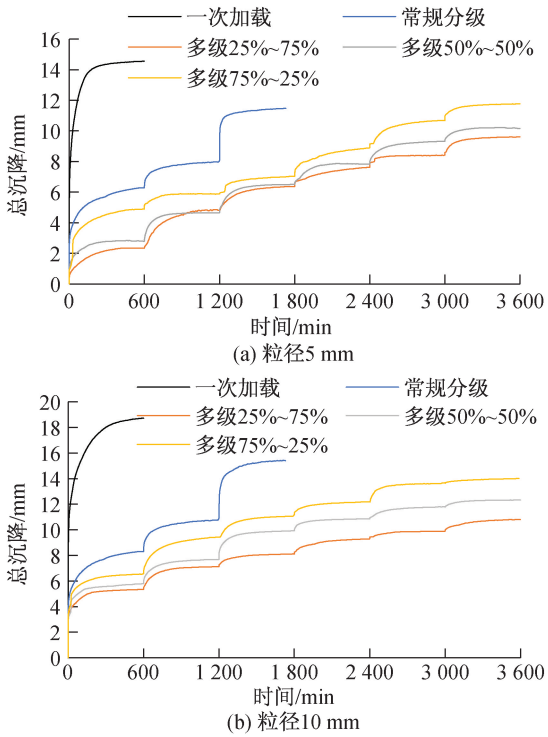


图 6　不同加载方式下总沉降的变化情况

Fig. 6　Variable condition of settlement under different loading methods

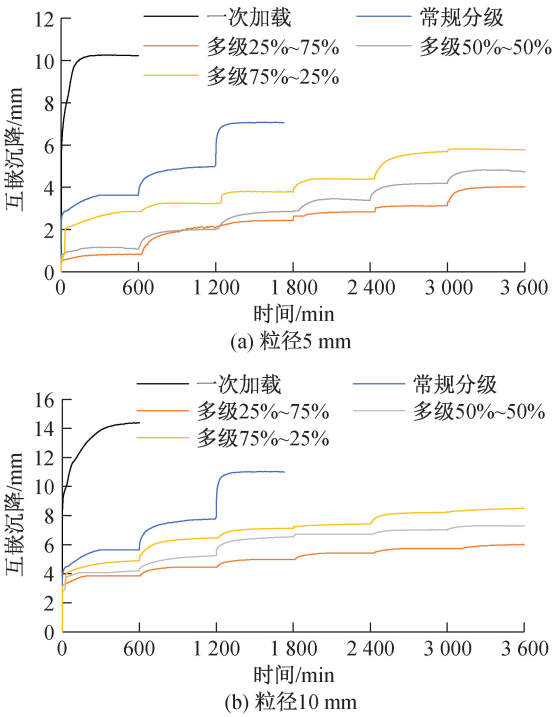


图 7　不同加载方式下互嵌沉降的变化情况

Fig. 7　Variable condition of embedded settlement under different loading methods

嵌沉降最终稳定值为最终总沉降与最终互嵌沉降,其大小见表3。根据表3可知,互嵌沉降与总沉降比值分别在42%(粒径5 mm)和56%(粒径10 mm)以上。

表3 不同加载方式下总沉降与互嵌沉降(单位:mm)

Tab. 3 Total settlement and embedded settlement under different loading methods (unit:mm)

加载类型	粒径5 mm		粒径10 mm	
	总沉降	互嵌沉降	总沉降	互嵌沉降
一次加载	14.6	10.2	18.7	14.4
常规分级	11.5	7.1	15.4	11.0
多级25%~75%	9.6	4.0	10.8	6.0
多级50%~50%	10.2	4.7	12.3	7.3
多级75%~25%	11.8	5.8	14.0	8.5

2.2 加载级数对互嵌沉降的影响

取图7中一次加载、常规分级加载、复合多级加载(多级50%~50%)的最终稳定互嵌沉降数据,对加载级数和互嵌沉降的关系进行分析并对关系曲线进行拟合处理,结果如图8所示。其中一次加载、常规分级加载、复合多级加载(多级50%~50%)的加载级数分别为1、3、6。在相同的最终荷载作用下,随着加载级数的增大,最终互嵌沉降逐渐减小,其原因可能是在加载级数较小的情况下,软土较松散,孔隙较大,互嵌层也尚未完全形成;当施加荷载,杂填土颗粒迅速挤入软土中,软土与杂填土颗粒接触的区域迅速发展成为互嵌层,互嵌层强度迅速提高,且承载力主要由互嵌层承担,当施加下一级荷载时,此时互嵌层已经部分发展,剪切强度提高,进一步发展较困难,因此互嵌沉降减小。

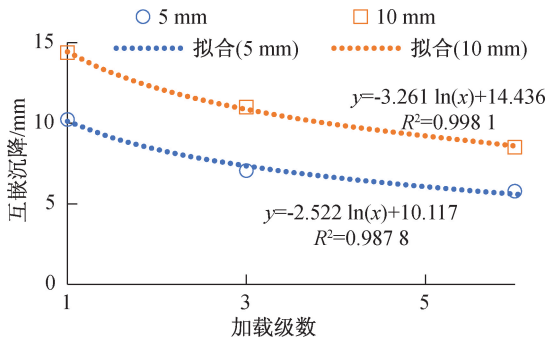


图8 不同加载级数下互嵌沉降

Fig. 8 Embedding settlement under different loading stages

从图8中可以明显地发现,粒径5 mm组始终小于粒径10 mm组。由于杂填土与软土的互嵌实际上是杂填土与软土的剪切变形过程,互嵌的发展是上覆荷载与杂填土和软土颗粒间的界面摩擦的平衡过程,而颗粒粒径对孔隙比影响不大,均在0.43~0.45之间[20],但当杂填土颗粒粒径较小时,其比表面积较大,在加载过程中与土接触的面积相对较大,界面摩擦较大,从而使得互嵌沉降较小。

根据以上试验结果及分析可知,互嵌沉降随着加载级数的增大而逐渐减小。因此,本文采用对数曲线对不同加载级数下互嵌沉降进行拟合,两条曲线R^2分别为0.987 8(粒径5 mm)和0.998 1(粒径10 mm),均大于0.98。且根据工程实际,总荷载不变,加载级数越大,沉降增长速度越小,两条拟合曲线$y=2.522\ln(x)+10.117$(粒径5 mm)与$y=-3.261\ln(x)+14.436$(粒径10 mm)均满足上述规律。因此,采用对数曲线拟合具有一定的合理性。

2.3 荷载占比对互嵌沉降的影响

图9为复合多级加载方式和一次加载方式下荷载占比与互嵌沉降的关系曲线。根据前述荷载占比的定义可知,多级25%~75%加载方式下荷载占比为25%;多级50%~50%加载方式下荷载占比为50%;多级75%~25%加载方式荷载占比为75%;由于常规分级加载可以看作荷载占比为100%的复合多级加载(将每一级荷载分为两小级,第一级占这一大级的比例为100%,第二级占0%),因此将其与复合多级加载进行对比分析。

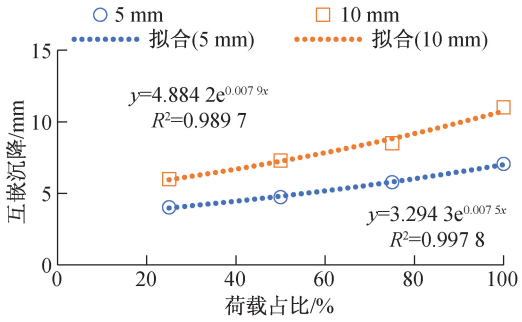


图9 不同荷载占比下互嵌沉降

Fig. 9 Embedded settlement under different load proportions

互嵌沉降从大到小的顺序依次为:常规分级加载、多级75%~25%、多级50%~50%、多级25%~75%。其原因可能是在荷载占比较小的情况下,每一大级荷载中第一小级荷载较小,互嵌层发展较小,而当第二小级荷载作用时,此时互嵌层已有一定程度的发展,互嵌层想要继续发展较为困难,需克服互嵌层内杂填土颗粒与软土层间的剪切强

度,因此互嵌沉降更大程度上取决于每一大级中第一小级荷载,即荷载占比越小,互嵌沉降越小,随着荷载占比的增大,前期荷载增大,互嵌沉降逐渐增大。

根据以上分析,互嵌沉降随荷载占比增大而增大,因此采用指数曲线进行拟合。拟合方程分别为 $y = 3.3e^{0.0075x}$(粒径 5 mm)和 $y = 4.9e^{0.0079x}$(粒径 10 mm),R^2 分别为 0.998 3 和 0.987 9,均大于 0.98。因此,采用指数曲线对荷载占比与互嵌沉降的发展规律进行拟合有一定的合理性。

2.4　互嵌沉降分析

为分析初期互嵌沉降的发展过程,引入初期互嵌沉降占比的概念,定义初期互嵌沉降与最终互嵌沉降的比值为初期互嵌沉降占比,分别取一次加载情况下加载 20 min 时的互嵌沉降、常规分级加载下第一级荷载稳定时(加载 600 min)的互嵌沉降、多级加载下第二级荷载稳定时(加载 1 200 min)的互嵌沉降作为初期互嵌沉降。表 4 为不同加载方式下的初期互嵌沉降占比。从表中可以发现初期互嵌沉降占比为 43%~76%,说明互嵌沉降主要发生在加载初期,这与文献[19]中得出的结论一致。

表 4　不同加载方式下初期互嵌沉降占比

Tab. 4　The proportion of initial embedded settlement under different loading modes

加载类型	初期互嵌沉降占比/%	
	粒径 5 mm	粒径 10 mm
一次加载	71	69
常规分级加载	51	51
多级 25%~75%	52	74
多级 50%~50%	43	71
多级 75%~50%	56	76

将某一时刻下互嵌沉降与总沉降的比值定义为互嵌沉降比重,不同加载方式下互嵌沉降比重的发展趋势如图 10 所示。由图可得,对于两种粒径的杂填土颗粒,加载方式为一次加载的最终互嵌沉降比重最大,其次是常规分级,最后是复合多级加载;而在复合多级加载中,最终互嵌沉降占比最大为多级 75%~25%,其次是多级 50%~50%,最后是多级 25%~75%。说明在加载过程中互嵌沉降比重会受到加载级数的影响。从图 10 中可以发现粒径较大的杂填土颗粒在不同加载方式下的互嵌沉降比重随加载时间的变化曲线更为集中,说明粒径越大,互嵌沉降比重对于加载方式的敏感性更低,其原因是粒径 10 mm 的杂填土颗粒比表面积较小,单位互嵌厚度内杂填土与软土颗粒间的界面摩擦相对较小,有利于互嵌的进一步发展,导致互嵌沉降比重对于不同的加载方式变化不明显。

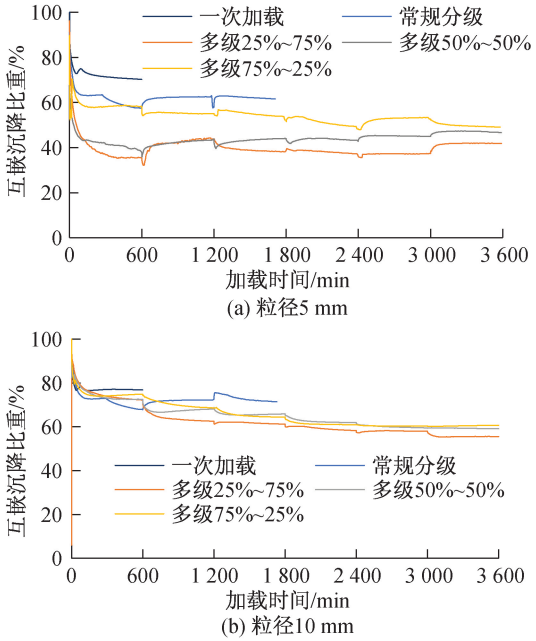


图 10　不同加载方式下互嵌沉降比重随时间变化情况

Fig. 10　Variation of interlocking sedimentation proportion with time under different loading modes

3　总结

1)不同加载方式下总沉降与互嵌沉降呈现出阶梯式增长的趋势,在加载瞬间沉降骤增,然后逐渐减缓并趋于稳定,总沉降、互嵌沉降差异主要来源于荷载施加瞬间的沉降变化。

2)多级加载情况下,互嵌沉降与加载级数负相关,与荷载占比正相关,且通过曲线拟合发现互嵌沉降与加载级数呈现对数曲线的关系,与荷载占比呈现出指数曲线的关系。

3)互嵌沉降比重与加载级数负相关,与荷载占比正相关,且当粒径较大时,互嵌沉降比重对加载方式敏感度降低。

参考文献:

[1] 李 腾. 建筑垃圾杂填土强度特性的试验研究和数值分析[D]. 天津:天津大学,2014.

[2] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[3] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程学报,2008(04):679-686.

[4] 曹文贵,唐旖旎,王江营. 基于孔隙介质模型的散体材料桩复合地基沉降分层总和分析方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2014,41(11):87-95.
[5] 朱 婧,洪宝宁,刘 鑫,等. GM(1,1)-星野法沉降预测模型研究与应用[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2018,35(01):62-65.
[6] 李 军,张 勤,王利东. 基于 ADINA 的路堤软土地基沉降非线性有限元分析[J]. 中外公路,2006(02):14-16.
[7] LIU W T, LIN C Y. Settlement Analysis of Piled-Raft Foundation Using Numerical Method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 204: 1276-1281.
[8] 赵 蕾,陈 筠,邬忠虎,等. 基于 ABAQUS 的红黏土地基排水固结沉降分析[J]. 长江科学院院报,2015,32(02):103-107.
[9] 张诚厚,袁文明,戴济群. 软粘土的结构性及其对路基沉降的影响[J]. 岩土工程学报,1995(05):25-32.
[10] 蒋 鑫,邱延峻,周 成. 路堤荷载作用下软基沉降特性研究[J]. 水文地质工程地质,2006(01):111-114.
[11] WANG W S, YU J Q. Analysis on the Influence of the Primary Consolidation Settlement of the e-p Curves and the Soil Bulk Density of the Soft Soil Foundation[J]. Advanced Materials Research, 2014, 919: 645-648.
[12] 余 雷,朱志辉,秦 宇,等. 高速铁路箱式路基沉降限值研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(09):3203-3216.
[13] SIVAKUMAR V, SOLAN B, MOORHEAD C, et al. Comparative Settlement Response of Soft Clays Reinforced with Granular Columns under Widespread Loads[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2022: 1-15.
[14] FENG W Q, YIN J H, CHEN W B, et al. A New Simplified Method for Calculating Consolidation Settlement of Multi-layer Soft Soils with Creep under Multi-stage Ramp Loading[J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105322.
[15] 魏焕卫,刘奔奔. 堆载作用下层状地基固结半解析解[J]. 山东大学学报(工学版),2023,53(01):68-75.
[16] 应宏伟,黄兆江,葛红斌,等. 基于分级加载工况的沉降曲线拟合法及工程运用[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(02):300-305.
[17] HUANG H, CHRISMER S. Discrete Element Modeling of Ballast Settlement under Trains Moving at "Critical Speeds"[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 994-1000.
[18] WANG F, PANG W, LI Z, et al. Experimental Study on Consolidation-Creep Behavior of Subgrade Modified Soil in Seasonally Frozen Areas[J]. Materials, 2021, 14(18): 5138.
[19] 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(S1):354-358+396.
[20] ZHANG F H, ZHANG L, ZHOU T, 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: 1-10.
[21] 张福海,薛浩宇,陈 宇,等. 颗粒组成对杂填土与软土互嵌沉降的影响试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2023,45(05):10-17.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第8页)

[11] 汪嘉钰, 刘 润, 陈广思,等. 海上风电宽浅式筒型基础竖向极限承载力上限解[J]. 太阳能学报, 2022, 43(03): 294-300.
[12] CHEN W, RANDOLPH M. External Radial Stress Changes and Axial Capacity for Suction Caissons in Soft Clay[J]. Géotechnique, 2007, 57(6): 499-511.
[13] 张其一, 栾茂田. 复合加载情况下双层地基极限承载力研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1131-1136.
[14] YU L, LIU J, KONG X, et al. Three-dimensional Large Deformation FE Analysis of Square Footings in Two-layered Clays[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering. 2011, 137(1): 52-58.
[15] PARK J, PARK D. Vertical Bearing Capacity of Bucket Foundation in Sand Overlying Clay[J]. Ocean Engineering, 2017, 134(Apr. 1): 62-76.
[16] 张钦喜, 李继红. 地基承载力的新计算方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 37-41.
[17] 秦会来, 黄茂松. 双层地基极限承载力的极限分析上限法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 611-616.
[18] 宋二祥, 付 浩, 李贤杰. 地基承载力机理及新计算方法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(01): 37-44.
[19] 袁凡凡, 闫澍旺, 孙万禾. 关于成层土地基极限承载力的计算方法[J]. 中国港湾建设, 2001(02): 26-29.
[20] 肖大平, 陈 环, 孙万禾. 浅基础下破坏面深度的确定[J]. 港口工程, 1995(06): 12-16.

(责任编辑 周雪梅)