

文章编号:1673-9469(2023)02-0027-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.02.005

软土粗颗粒含量对杂填土与软土地基互嵌 沉降影响的试验分析

徐嘉成^{1,2},张福海^{1,2,3*},陈宇^{1,2},薛浩宇^{1,2},刘峥嵘^{1,2}

(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.河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心,江苏南京210098;3.河海大学疏浚技术教育部工程研究中心,江苏常州213022)

摘要:为实现对杂填土与软土地基互嵌过程的实时沉降分析,探究软土粗颗粒含量变化对互嵌沉降和软土固结沉降的作用,借助自主研发的杂填土与软土互嵌试验仪,通过室内试验定量区分互嵌沉降和软土固结沉降,设计正交试验组对照分析2种粒径杂填土颗粒(5、10 mm)与5种粗颗粒含量软土(0、3%、6%、9%、12%)在一定荷载下的沉降发展规律,总结总沉降、互嵌沉降、软土固结沉降的最终沉降量和瞬时沉降量的差异。试验结果表明:软土中存在粗颗粒时,总沉降和互嵌沉降在各阶段均较无粗颗粒情况下增长量更大且发展更快,在粗颗粒含量6%时总沉降和互嵌沉降有极大值,粗颗粒含量对软土固结沉降的影响并不明显。

关键词:杂填土;软土地基;软土粗颗粒含量;多相介质;沉降分析

中图分类号:TU411

文献标识码:A

Experimental Analysis of the Influence of Coarse Particle Content of Soft Soil on the Interbedded Settlement of Miscellaneous Fill and Soft Soil Foundation

XU Jiacheng^{1,2}, ZHANG Fuhai^{1,2,3*}, CHEN Yu^{1,2}, XUE Haoyu^{1,2}, LIU Zhengrong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Engineering Research Center of Dredging Technology, Ministry of Education, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China)

Abstract: In order to realize the real-time settlement analysis of interlaction process between miscellaneous fill and soft soil foundation and explore the effect of coarse particle content of soft soil on the interbedded settlement and the consolidation settlement of soft soil, with the help of self-developed interbedded test instrument of miscellaneous fill and soft soil, the interbedded settlement and consolidation settlement of soft soil were quantitatively distinguished through laboratory tests. Orthogonal experimental groups were designed to analyze the settlement development rule of two kinds of miscellaneous fill particles (5 mm, 10 mm) and five kinds of coarse particle content soft soil (0, 3%, 6%, 9%, 12%) under a certain load, and to summarize the differences of final settlement and instantaneous settlement of total settlement, interbedded settlement, and consolidation settlement of soft soil. The experimental results show that when coarse particles exist in soft soil, the total settlement and interbedded settlement increases more and develops faster than that those without coarse particles in each stage, and the total settlement and interbedded settlement reach a maximum value when coarse particles content is 6%. Besides, the influence of the coarse particles content on consolidation settlement of soft soil is not obvious.

收稿日期:2022-10-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51778211)

作者简介:徐嘉成(1997-),男,江苏镇江人,硕士研究生,主要从事软土地基方面研究。

* 通讯作者:张福海(1970-),男,山东沂源人,博士,教授,主要从事软土地基方面研究。

Key words: miscellaneous fill soil; soft soil foundation; coarse particle content of soft soil; multiphase medium; settlement analysis

杂填土多由城市建筑废弃物及生活垃圾堆积而成,是一种非连续、非均质的多相孔隙介质^[1]。我国软土分布广泛,杂填土地基下常伴有深厚的淤泥软土层^[2-3]。在上覆荷载作用下,软土很容易挤入并充填杂填土孔隙,引起互嵌沉降^[4],导致继发的工程地质灾害。自然条件下堆积的杂填土层往往结构松散,部分砂、砾等粗颗粒在振动、渗流等作用下进入下部软土层中,致使发生互嵌的软土层中常含有一定量的粗颗粒。粗颗粒的存在不仅会改变软土的性质^[5],也对互嵌过程中的颗粒运动产生影响^[6]。研究不同粗颗粒含量时的互嵌沉降的发展过程对预测和防范杂填土地基沉降灾害具有重要的工程和社会意义。

针对软土中含砂等粗颗粒组分对软土物理力学性质的影响,包括压缩性、抗剪强度、流变特性等,国内外学者^[7-10]也开展了较为系统的研究,并取得了一些成果。在砂-粘土混合物中,随含砂量的增加,土体骨架的结构形式也逐渐发生转变,由砂颗粒悬浮于粘土基质中的形式转变为粘土颗粒充填于砂颗粒骨架结构孔隙之中的形式^[11-12],进而影响不同荷载下混合物整体的压缩特性^[13],因此其固结变形有别于一般的纯粘土。而在互嵌过程中总沉降由互嵌沉降和软土固结沉降两部分共同构成,互嵌沉降的发展速度和沉降稳定值又远大于固结沉降,基于此,开展不同粗颗粒含量的软土与杂填土互嵌模型试验是揭示砂等粗颗粒含量对互嵌沉降及固结沉降影响的必要手段。借助自主研制的互嵌沉降试验仪,根据前期现场勘查资料,重点分析了不同粗颗粒体分比(0%,3%,6%,9%,12%)杂填土与软土的互嵌沉降随时间变化规律及占总沉降比例,总结了粗颗粒含量对互嵌沉降发展的影响。

1 试验方案

为了探究不同软土粗颗粒含量下互嵌沉降的变化情况,揭示粗颗粒对互嵌沉降的影响机理,如表1所示,进行了10组不同粗颗粒体分比(0%、3%、6%、9%、12%)软土与杂填土(粒径5、10 mm)的互嵌试验。

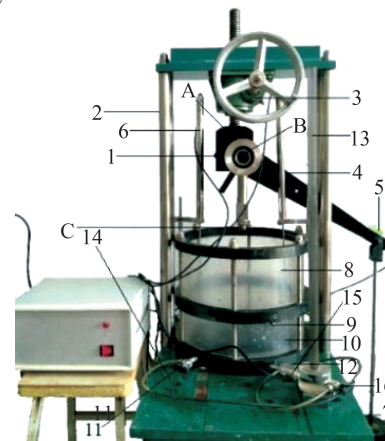
表1 试验方案

Tab. 1 Test plan

组号	粗颗粒体分比/%	杂填土颗粒粒径/mm
1	0	5
2	3	5
3	6	5
4	9	5
5	12	5
6	0	10
7	3	10
8	6	10
9	9	10
10	12	10

1.1 试验装置

杂填土与软土的互嵌过程与一般的土体压缩有较大区别,普通的固结仪和三轴压缩仪难以直观准确地反映出互嵌沉降的大小,因此基于课题组自主研发的杂填土互嵌试验仪进行室内杂填土地基互嵌试验。整个装置由沉降发生装置和数据采集系统两部分组成。图1是试验装置示意图。



注:1—平衡锤;2—反力框架;3—杠杆调平机构;4—杠杆;
5—平衡水泡;6—位移传感器;7—砝码;8—上容器;
9—孔压传感器;10—下容器;11—第一个三通阀;12—滚珠排;
13—量管;14—机架;15—压差传感器;16—第二个三通阀;
A—支点;B—受力点;C—加载点。

图1 杂填土互嵌沉降装置

Fig. 1 Miscellaneous fill interlock settlement device

沉降发生装置由试样桶和加载装置两部分组成,试样桶直径30 cm,分为上下两桶,下容器桶装软土试样,上容器桶装杂填土试样。桶底部设置有滤水板,以保证软土在沉降过程中顺利排水,水

经设置在容器底部的排水孔流进量管,通过传感器实时记录排水量。通过右侧杠杆施加荷载。

数据采集系统主要包括沉降量采集装置和排水量采集装置两部分,沉降量采集装置由对称布置在容器桶侧壁的两个位移传感器组成,由二者平均值确定总沉降;排水量采集通过设置在量管下部的压差传感器实现。

1.2 试验原理

由于互嵌深度分布的不均匀性,杂填土与软土互嵌层的范围难以准确界定,互嵌沉降难以直接测量,因此采用间接测定的方法。杂填土地基的沉降应包括杂填土层沉降、软土固结沉降及互嵌沉降三部分。室内试验时观察到,杂填土层构成的土骨架颗粒不破坏时几乎不压缩,与互嵌沉降相比,其变形量可以忽略不计,故本文不考虑杂填土层沉降,重点关注互嵌沉降以及软土固结沉降。

不考虑杂填土层沉降时,互嵌沉降表示为总沉降与软土固结沉降之差,如公式(1)所示:

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

式中: h 为总沉降,可由试验直接测得; h_2 为软土固结沉降; h_1 为互嵌沉降。

假设土颗粒不变形,则软土的固结变形可由互嵌过程中的排水量确定。因此通过量管以及压差传感器,得到排水量的体积,进而换算得到软土固结沉降,如公式(2)所示:

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

式中: V 为量管测得的排水量; S 为容器桶的断面面积; $S = \pi r^2 = 7.059 \times 10^4 \text{ mm}^2$ 。

1.3 试验材料

1.3.1 杂填土层材料

杂填土成分复杂,含有大量不规则、粒径不均的混凝土以及砖块,室内试验时,完全还原现场的复杂情况较为困难,为了控制影响因素,对杂填土颗粒粒径进行了适当的简化,采用模具制作的粒径为10和5mm的单一粒径杂填土颗粒进行室内试验。制备好的水泥球颗粒见图2。

1.3.2 软土层材料

试验用软土取自南京秦淮河,属淤泥质土。颗粒分析结果见图3。

并进行室内试验确定了软土的基本物理性质。试验结果见表2。



图2 杂填土试样

Fig. 2 Miscellaneous fill sample

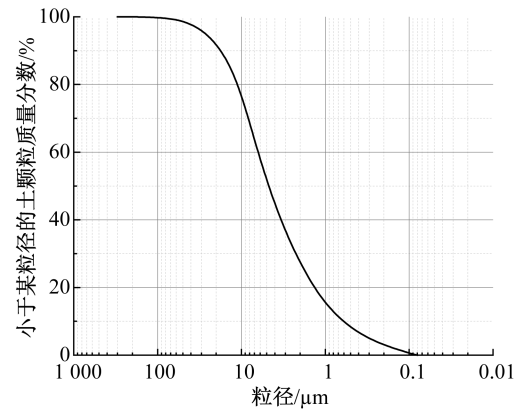


图3 试验用软土粒径分布图

Fig. 3 Particle size distribution of experimental soft soil

表2 试验用软土基本物理性质指标

Tab. 2 Basic physical properties of experimental soft soil

塑限/ %	液限/ %	黏粒 含量/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	天然容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	土粒 比重
29.6	55.5	33.64	1.27	17.9	2.68

本文选取液性指数 $I_L = 1.0$ 的软土土样进行室内互嵌试验,含水率为55.5%。试验桶直径为30cm,采用常规抽真空法进行土样饱和效果不理想,因此采用配饱和的方式制备土样。

1.3.3 粗颗粒材料

以10mm粒径的水泥球颗粒为例,当颗粒在空间中完全紧密排列时,杂填土孔隙所能通过的粗颗粒直径最大约为1.55mm。考虑到实际并非所有颗粒均紧密接触,采用比重为2.65,粒径在0.5~2mm的石英砂作为粗颗粒材料。

为保持掺入粗颗粒后软土样体积分数不变,将软土中粗颗粒的体积与土颗粒的体积之比定义为软土粗颗粒体分比。具体关系可由下式推出:

$$\frac{V_c}{V_{s1}} = A \quad (3)$$

$$V_c + V_{s1} = V_s = \frac{m_s}{G_s} \quad (4)$$

$$m_{s1} = V_{s1} G_s \quad (5)$$

$$m_{s2} = V_c G_c \quad (6)$$

式中: A 为软土粗颗粒体分比, 即软土中粗颗粒体积与土颗粒体积之比; V_c 为粗颗粒体积; V_{s1} 为土颗粒体积; G_s 为土粒比重; G_c 为石英砂比重。

由上式可推得, 不同粗颗粒体分比情况下, 一次试验所需土颗粒、石英砂的质量分别为:

$$m_{s1} = \frac{m_s}{1 + A} \quad (7)$$

$$m_{s2} = \frac{m_s A G_c}{(1 + A) G_s} \quad (8)$$

式中: m_{s1} 为粗颗粒体分比为 A 时所需的土颗粒质量; m_{s2} 为粗颗粒体分比为 A 时所需的石英砂质量。

1.4 试验步骤

1.4.1 制样

准备好过筛的土样, 按照 1.3 节的公式, 配制不同粗颗粒体分比的土样。配制的软土含水率为 55.5%, 软土粗颗粒体分比分别为 0、3%、6%、9%、12%。配置好的土样首先密封静置 12 h 以上, 使得土样水分分布均匀。

1.4.2 软土层装样

在装样前, 先在试样桶底部铺一层浸润过的土工布, 防止装样以及加载时, 土颗粒堵住桶底的多孔排水板; 再在试样桶的四周贴上一层湿润过的滤纸, 使下层软土在固结过程中充分排水。上述准备工作完成后, 分四层将制备好的不同粗颗粒体分比的软土样装入下试样桶中, 并在装土时进行适当振捣, 排出软土层中的空气, 共装高度 8 cm 的软土层试样。

1.4.3 杂填土层装样

软土层装样完成后, 进行杂填土层的装样。用土工布或毛巾擦除筒壁上多余的软土, 并在筒壁上抹一层凡士林, 以减小杂填土和加载板在加载过程中与筒壁的摩擦, 减小加荷损失导致的误差。同时为了控制软土含水率一致, 装样时注意擦除水泥球表面多余的水分, 提高排水量的测量精度。将水泥球分层填入试样桶中, 每层小球填入时遵循从两边到中间的顺序, 紧密排列。最后, 将传压板放置在颗粒的顶部, 调整平衡水泡居中, 以减小因受力不均导致的沉降测量误差。装样完成图见图 4。

1.4.4 自重平衡与加载

装样完成后传压板和水泥球颗粒的自重也会引起互嵌沉降, 为了保证在装样过程中不产生误差, 需要在上述装样完成后, 静置 12 h 进行自重平



图 4 装样完成示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sample loading completion

衡。自重平衡后, 可进行加载。总沉降取两侧传感器的平均值, 可以有效减小测量误差。

采用一次加载方式, 荷载大小为 100 kPa。试验过程中, 随着土样沉降的增大, 杠杆逐渐向下倾斜, 此时传递到加载板的荷载会有所减小, 应及时地旋转手柄, 使水平气泡居中。

2 试验结果分析

2.1 总沉降发展规律

不同软土粗颗粒体分比与两种杂填土颗粒粒径下, 总沉降随时间的变化曲线如图 5 和图 6 所示。由于试验中试样总沉降在 600 min 后基本不发生变化, 因此仅列出 600 min 以内的沉降变化情况。其中, 图 5 为两种杂填土颗粒粒径下, 加载 600 min 总沉降随时间的变化情况, 图 6 为两种杂填土颗粒粒径下, 加载 10 min 内总沉降的变化情况。由图 5 可知, 两种粒径下, 总沉降的变化趋势相似, 总沉降的变化曲线均可划分为三个阶段: 第一阶段为线性增加阶段; 第二阶段为缓慢上升阶段; 第三阶段为沉降稳定阶段。由图 6 可知, 5 组试验总沉降曲线的线性增加阶段均处于加载初期 1 min 时间内。

不同的是, 当软土粗颗粒体分比在 6% 及以下时, 其线性增加阶段基本都结束于加载后 1 min; 而当软土粗颗粒体分比为 12% 时, 其总沉降曲线的线性阶段结束的更早, 沉降在加载后 30 s 左右即转入缓慢增加阶段, 表明当软土粗颗粒体分比逐渐增大时, 在相同荷载的作用下, 其沉降发展的更快, 也更快地达到稳定。

将施加荷载后 1 min 内产生的沉降定义为瞬时沉降, 其占最终沉降量的很大一部分。结合图 5 及图 6 可以看出, 在软土中加入粗颗粒后, 两种颗

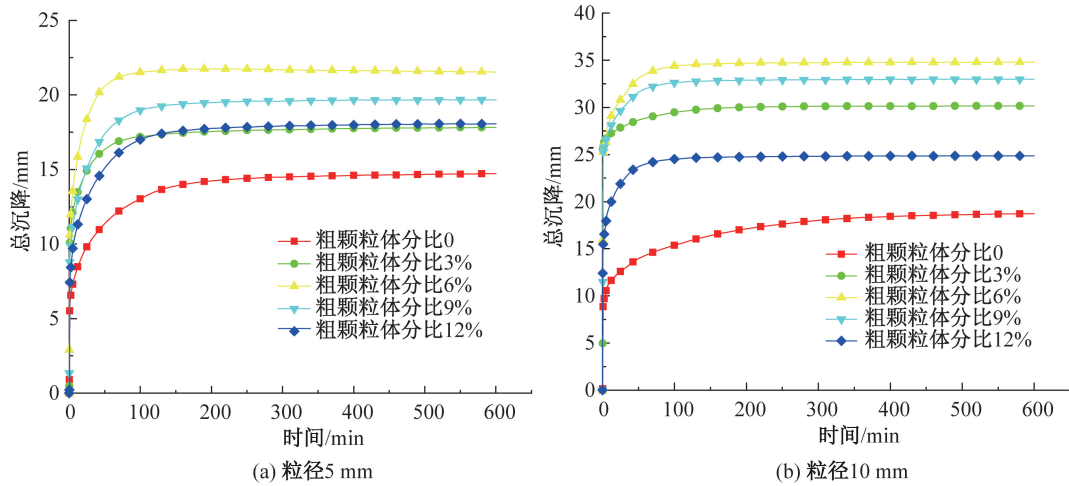


图 5 不同软土粗颗粒体分比下总沉降随时间变化情况

Fig. 5 Variation of total settlement with time under different coarse-particle ratios of soft soil

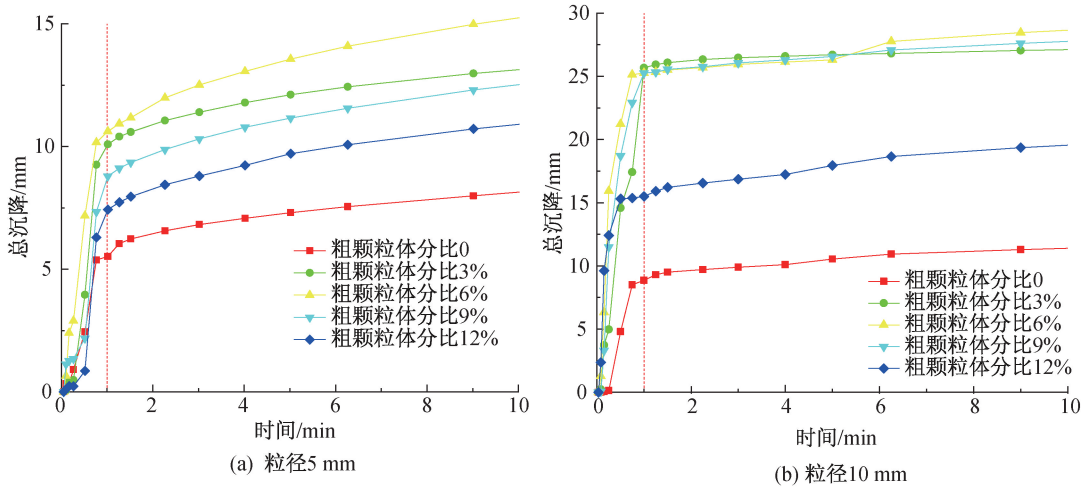


图 6 不同软土粗颗粒体分比下加载初期总沉降随时间变化情况

Fig. 6 Variation of total settlement with time at the initial loading stage under different coarse-particle ratios of soft soil

粒粒径下的最终总沉降以及瞬时总沉降,均得到不同程度的增大。其中当软土粗颗粒体分比为 3%~9%时,两种粒径下,瞬时总沉降和最终总沉降的增长的幅度都较大,瞬时总沉降分别增大了 83%和 184%以上,最终总沉降分别增大了 21%和 61%以上。当软土粗颗粒体分比进一步增大,达到 12%时,其瞬时沉降和最终总沉降的变化幅度反而有所减小。

此外,如图 7 所示,粗颗粒体分比从 0 至 12%,两种粒径的瞬时沉降比(瞬时总沉降与最终总沉降的比值)分别为 37%、57%、49%、47%、41%和 47%、85%、73%、73%、63%。对各组瞬时沉降比进行了关于粗颗粒体分比的单因素三次多项式拟合,结果表明,软土中加入粗颗粒后,瞬时沉降比均有不同程度的增大,即杂填土地基的初期沉降会相应增加,同时,当粗颗粒含量进一步增大时,

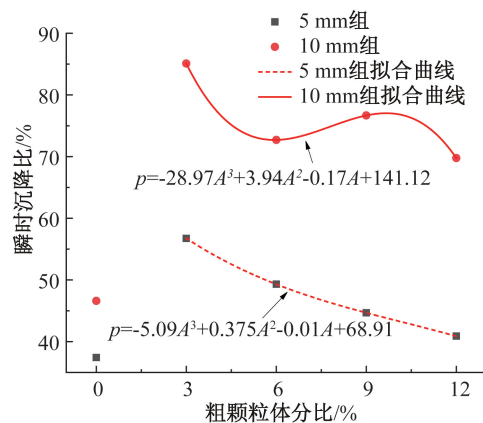


图 7 不同软土粗颗粒体分比下总沉降瞬时沉降比变化情况

Fig. 7 Variation of instantaneous total settlement under different soft soil coarse-particle ratios

瞬时沉降比会逐渐减小,这两种现象在杂填土颗粒粒径为 10 mm 时更明显。

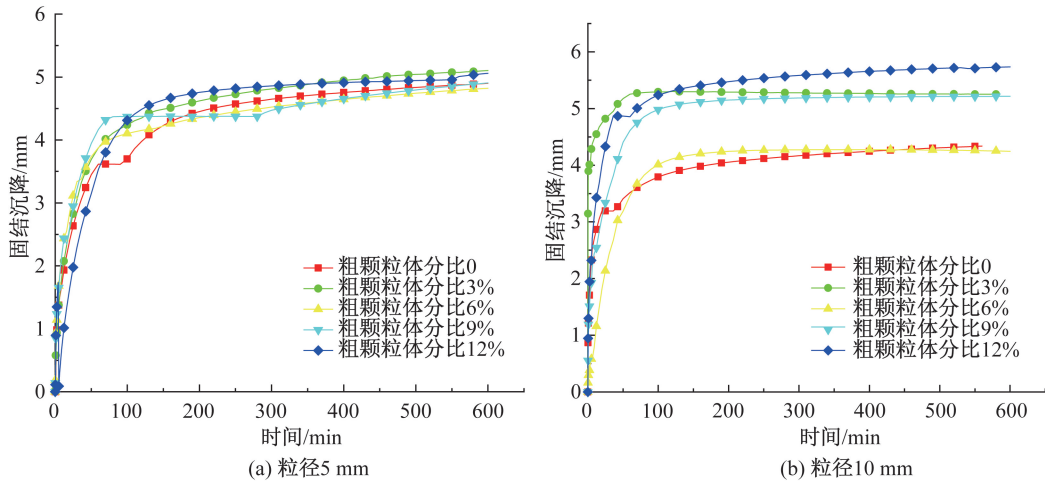


图8 不同软土粗颗粒体分比下固结沉降随时间变化情况

Fig. 8 Variation of consolidation settlement with time under different coarse-particle ratios of soft soil

2.2 软土固结沉降发展规律

图8描述了不同软土粗颗粒体分比情况下软土固结沉降随时间的变化情况。从沉降曲线的发展看,5组试验的固结沉降曲线变化趋势大致相同,在加载的初期,软土的固结沉降变化较大,之后趋于稳定。不同之处在于,当软土中不含粗颗粒时,其达到固结稳定的时间较长,需约400 min,而加入粗颗粒的4组试验中软土固结沉降在100 min内均已基本稳定,这与总沉降的变化趋势是一致的。

从最终固结沉降量大小看,粗颗粒体分比为0时,两组杂填土颗粒粒径对应的软土最终固结沉降分别为4.8、4.3 mm,当软土粗颗粒体分比为3%~12%时,软土固结沉降分别为5.1、4.8、4.9、5.05、5.3、4.2、5.2、5.7 mm。可以看出,当粗颗粒体分比为3%、9%、12%时,软土固结沉降均大于粗颗粒体分比为0时的软土固结沉降。

此外,当软土中粗颗粒含量为6%时,两种粒径的软土最终固结沉降均为各粗颗粒含量对照组中最小。粗颗粒对软土固结沉降的影响存在两种效果,一是随着软土中粗颗粒含量的增大,粗颗粒破坏了部分软土中原有的封闭孔隙,使得排水路径增多,从而在荷载作用下,排水量会增大,固结沉降也会相应增大。二是由互嵌沉降的不同导致的,图9为杂填土与软土互嵌示意图,如图所示,互嵌沉降产生后,软土嵌入进杂填土的孔隙中形成了土石混合的互嵌层。当互嵌层承受上部杂填土传递来的荷载时,杂填土颗粒起到“骨架”作用,绝大部分荷载都被杂填土颗粒承担,而软土基本不受力,故这部分软土几乎不排

水固结。这导致下层产生固结沉降的软土由于互嵌沉降的增大而减少,测得的软土固结沉降随之减小。

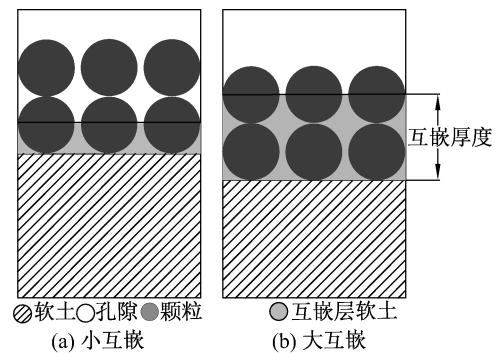


图9 杂填土与软土互嵌示意图

Fig. 9 Interbedded progress of miscellaneous fill soil and soft soil

综上所述,粗颗粒体分比为6%时,软土固结沉降的减小是由此组试样的互嵌沉降较大造成的。而其余粗颗粒体分不为0组的软土固结沉降较大的原因是其互嵌沉降导致的软土层厚度减小不明显,此时粗颗粒导致排水的增加对软土固结沉降的影响占主导作用。

2.3 互嵌沉降发展规律

不同软土粗颗粒体分比情况下互嵌沉降随时间的变化情况如图10和图11所示,其中图10为加载后600 min的沉降曲线,图11为加载后10 min的沉降曲线。由图10可知两种杂填土颗粒粒径下,互嵌沉降曲线的变化趋势与总沉降曲线一致,均可分为3个阶段:即线性增加阶段、缓慢上升阶段以及沉降稳定阶段。对于粗颗粒体分不为0的试验组,互嵌沉降曲线达到稳定阶段所需

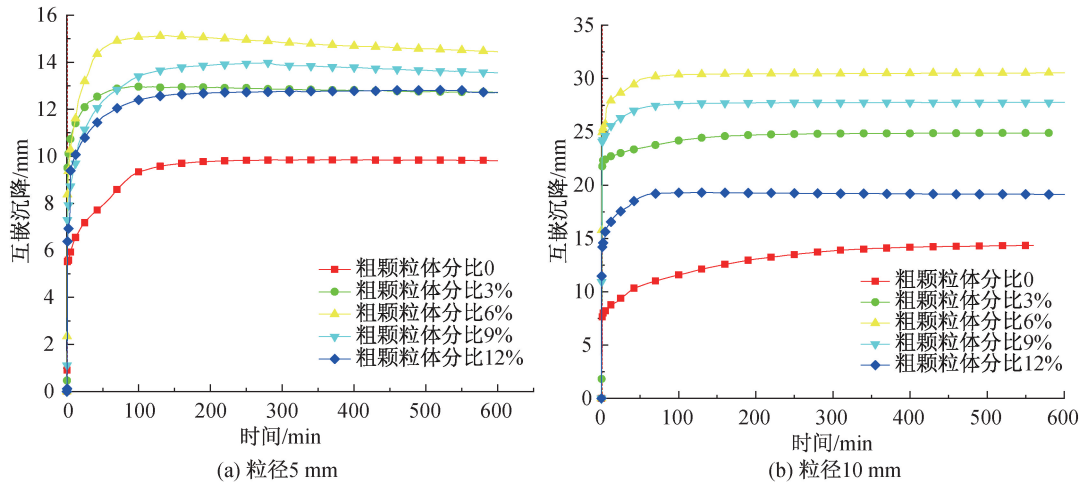


图 10 不同软土粗颗粒体分比下互嵌沉降随时间变化情况

Fig. 10 Variation of interbedded settlement with time under different ratios of coarse particles in soft soil

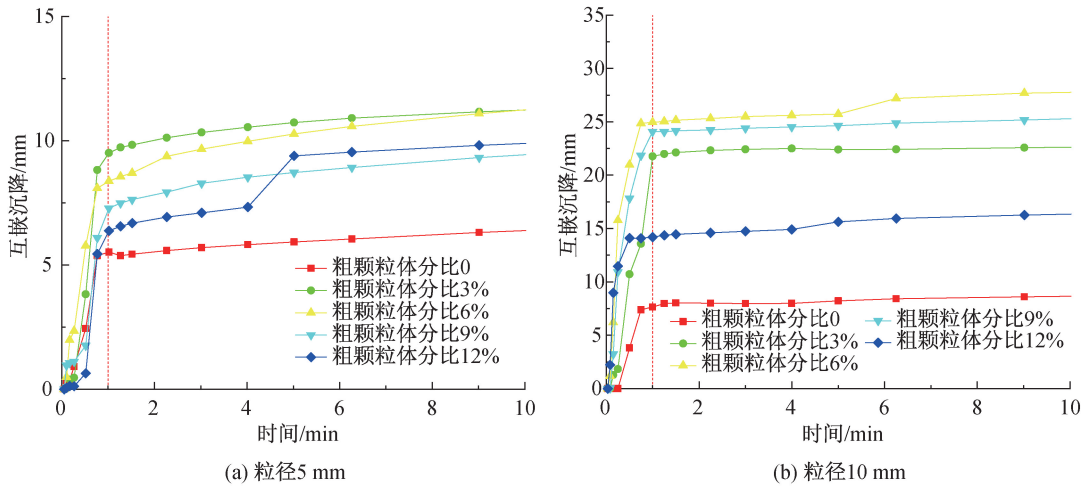


图 11 不同软土粗颗粒体分比下加载初期互嵌沉降随时间变化情况

Fig. 11 Variation of interbedded settlement with time at the initial stage of loading under different coarse-particle ratios of soft soil

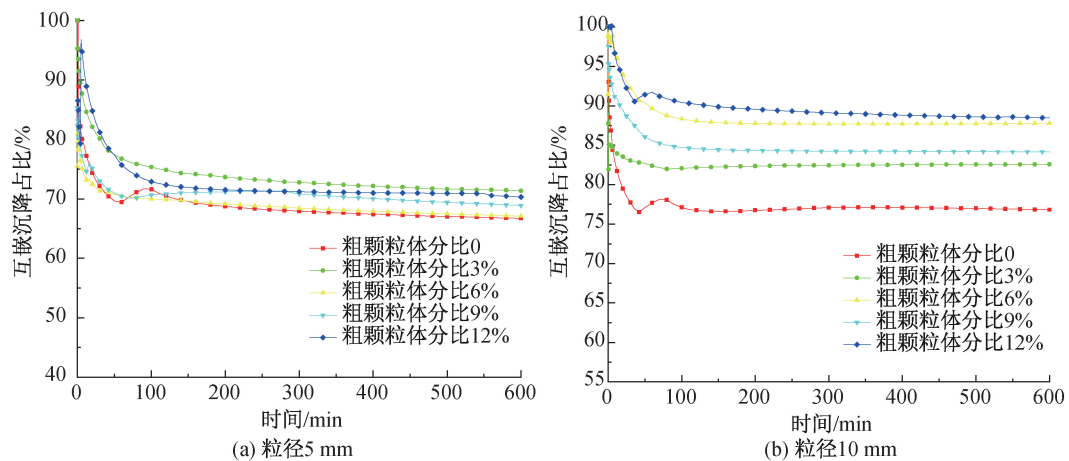


图 12 不同软土粗颗粒体分比下互嵌沉降占比变化情况

Fig. 12 Changes in the proportion of interbedded settlement under different soft soil coarse-particle ratios

的时间更短,在加载 50 min 后即基本达到稳定,而总沉降曲线则是在加载后 100 min 左右达到稳定;

对于粗颗粒体分比为 0 的试验组,互嵌沉降曲线达到稳定的时间在加载后 400 min 左右,总沉降则有

所滞后,在加载后 500 min 左右达到稳定。对于总沉降来讲,上述 10 组试验的互嵌沉降均提前得到稳定,因此后期总沉降的变化主要取决于软土层的固结沉降。

由图 10 亦可看出,互嵌沉降前期的变化与总沉降曲线的变化相似度极高。图 12 汇总了试验过程中各组的互嵌沉降占比(互嵌沉降占总沉降比值)变化情况,可以发现,互嵌沉降占比在初期很大,之后逐渐降低,表明加载初期软土固结沉降发展缓慢,杂填土地基所产生的沉降基本全部为互嵌沉降。同时,含粗颗粒组的互嵌沉降占比几乎全程高于不含粗颗粒组,且在杂填土颗粒粒径为 10 mm 粒径时表现更显著。

同样,可将互嵌沉降的瞬时沉降占最终互嵌沉降的比例定义为互嵌沉降的瞬时沉降比,分别为 56%、75%、57%、53%、50% 和 57%、88%、82%、87%、81%。如图 13 所示,与总沉降类似,在软土中加入粗颗粒后,互嵌沉降的瞬时沉降比均得到了不同程度的增大,但在粗颗粒含量继续增加后,瞬时沉降比逐渐减小,且 10 mm 组比 5 mm 组更明显。

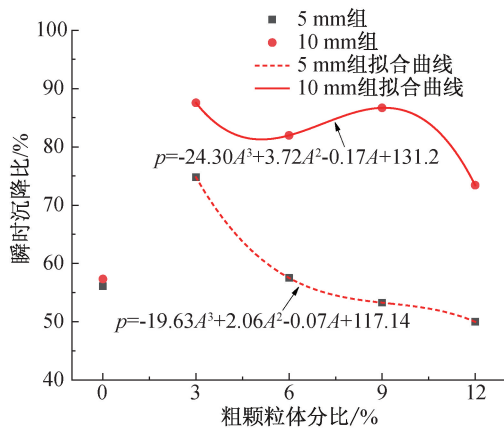


图 13 不同软土粗颗粒体分比下互嵌沉降瞬时沉降比变化情况

Fig. 13 Variation of instantaneous settlement ratio of interbedded settlement under different coarse-particle ratios of soft soil

出现此现象的原因为,当杂填土孔隙较大时,由于软土的粘聚力变小,软土的流动性增强,引起软土与杂填土的界面摩擦减小,使得互嵌的发生变得更加容易。因此,除了互嵌沉降量增长外,发展的速度也得到大大地提高,从而达到稳定状态所需的时间也进一步缩短。当杂填土孔隙较小和粗颗粒含量较低时,由于上述原因,互嵌沉降比有所增大;但当粗颗粒含量增加时,大量的粗颗粒会在互嵌过程中逐渐堆积在孔隙中,进而影响了互

嵌的发展,导致前期互嵌速度减缓,以及互嵌沉降的瞬时沉降比的减小。

2.4 粗颗粒体分比与沉降量的讨论

为了更直观地了解软土粗颗粒含量和杂填土颗粒粒径变化对杂填土地基总沉降、互嵌沉降、软土沉降的影响,图 14 汇总了两种颗粒粒径下,总沉降、固结沉降以及互嵌沉降的最终沉降量及瞬时沉降量与软土粗颗粒体分比的关系曲线。

整体来看,两种杂填土粒径下,无论是最终沉降量还是瞬时沉降量,软土固结沉降的变化幅度均较小,受粗颗粒含量变化的影响有限。10 组试验均建立在软土体积和含水率不变的基础上,在分析沉降过程中,固结沉降变化主要由软土排水以及孔隙的减少引起,由于试验采用的粗颗粒体分比较低且互嵌层厚度变化不大,上述提到的粗颗粒导致的排水路径增加以及互嵌层厚度的影响作用有限。同时由于上述原因,图中总沉降的变化趋势与互嵌沉降的趋势也基本相同,总沉降的变化主要取决于互嵌沉降。

而总沉降和互嵌沉降受粗颗粒含量变化的影响较大,且在杂填土颗粒粒径为 10 mm 时表现更明显。当软土中粗颗粒含量增大时,互嵌沉降的增幅并不是一直增大的,此现象在两种杂填土颗粒粒径下均存在。当粗颗粒体分比较小时,互嵌沉降逐渐增大,在软土粗颗粒体分比在 6% 左右时有极大值,而当软土粗颗粒体分比继续增大时,互嵌沉降反而有所减小。出现此种现象的原因可能为,当软土中粗颗粒含量较低时,在杂填土与软土接触界面处,软土中的粗颗粒会发生一定的滑移、转动,将原本存在于界面处的软土与杂填土颗粒的平面摩擦在一定程度上转变为粗颗粒与杂填土颗粒间的滚动摩擦,导致介质界面摩擦力减小,进而引起了互嵌沉降的增大和发展速度的增快;随着软土中粗颗粒含量的继续增大(>6%),嵌入杂填土孔隙中的粗颗粒含量同样会增大,对于部分难以同时通过大量的粗颗粒的小孔隙,粗颗粒的运动滞后于软土,并逐渐聚集在互嵌通道中,进而影响软土的继续嵌入,最终造成了互嵌沉降的逐渐减小。

综上,当软土中含有一定量粗颗粒时,互嵌沉降可能产生较大增长,尤其是含有大量粗颗粒砂砾石的杂填土地基中,最大可达无粗颗粒情况的 2 倍左右,因此在进行杂填土地基沉降预测时对于

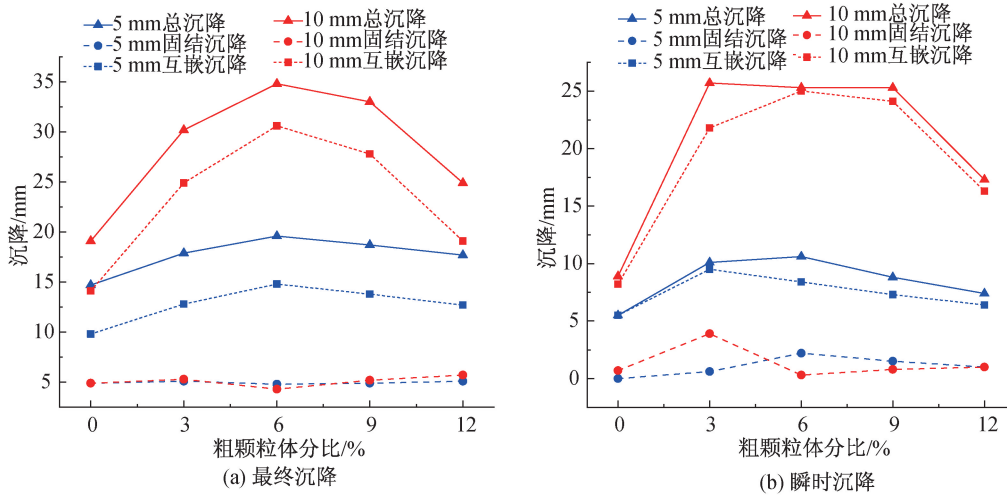


图 14 不同软土粗颗粒体分比下最终沉降和瞬时沉降图

Fig. 14 Diagram of final and instantaneous settlement of soft soil with different coarse-particle ratios

软土中砂砾较多的情况下,应充分考虑此类因素对互嵌沉降的影响。

3 结论

1) 从总沉降来看,软土中加入粗颗粒(0~12%)后,两种杂填土粒径(5、10 mm)下无论是总沉降的瞬时沉降量还是最终沉降量均得到不同幅度的增大。

2) 从互嵌沉降看,其是总沉降的主要组成部分。各试验组中互嵌沉降占总沉降比例均较高,尤其是瞬时沉降部分。

3) 随粗颗粒体分比增大,互嵌沉降呈现先增大后减小的现象,在本试验中于粗颗粒体分比6%时互嵌沉降达到极大值。此现象可能与粗颗粒在互嵌通道中的受力和运动情况有关,需要进一步的试验和理论探究来验证。

参考文献:

- [1] LIU B, XI P S. Construction Technology of One Unsymmetrical Loaded Deep Foundation Pit Adjacent to Expressway Subgrade[C]. Stafa-Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2014:1411-1415.
- [2] 戴韶生,刘志明. 城市杂填土土工特性的研究及常用地基处理方法[J]. 探矿工程:岩土钻掘工程, 2002(5):20-21.
- [3] 王国强,李瑛霞,吴道祥,等. 厚层含淤泥新杂填土地基强夯法处理效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(12):1868-1872.
- [4] 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(1):1-10.

- [5] WANG J, MO H H, LIU S Z, et al. Effect of Mineral Composition on Macroscopic and Microscopic Consolidation Properties of Soft Soil[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2014(50):232-237.
- [6] 陈宇,张福海,刘峥嵘,等. 基质对杂填土力学性质的影响[J]. 工业建筑, 2022(8):1-6.
- [7] ALSHAMERI B, BAKAR I, MADUN A L, et al. Effect of Coarse Materials Percentage in the Shear Strength[C]. Bristol: Iop Publishing Ltd, 2016.
- [8] 贾卫兵,郭飞,杨爱武. 考虑含砂量影响的砂-黏混合土应力-应变关系特性研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6):1102-1108.
- [9] 王炼,王旭东,尤苏南. 黏砂混合土孔隙特性的试验研究[J]. 南京工业大学学报:自然科学版, 2018, 40(4):91-95+124.
- [10] 吴子龙,朱向阳,江舜武,等. 纯黏土与砂-黏土混合物渗透特性差异及机理分析[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2015, 45(2):376-381.
- [11] 吴子龙,朱向阳,邓永锋,等. 砂-黏土混合物的压缩性状及其粗颗粒骨架形成机制[J]. 土木工程学报, 2016, 49(2):121-128.
- [12] KRIM A, ARAB A, CHEMAM M, et al. Experimental Study on the Liquefaction Resistance of Sand-Clay Mixtures; Effect of Clay Content and Grading Characteristics[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019(37):129-141.
- [13] NGUYEN V B Q, KANG H S, KIM Y T. Effect of Clay Fraction and Water Content on Rheological Properties of Sand-Clay Mixtures[J]. Environmental Earth Sciences, 2018(77):9.

(责任编辑 周雪梅)