

杂填土颗粒挤入软土受力影响研究

Study on the Stress Influence of Miscellaneous Fill Particles Intruding into Soft Soil

张福海^{1,2}, 卢 凯¹, 薛浩宇¹, 刘峥嵘¹, 俞 翔¹

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学 疏浚技术教育部工程研究中心, 常州 213022)

摘 要: 为了研究杂填土颗粒挤入软土过程中的受力规律, 基于流体动力学原理和离散元的试验方法, 考虑杂填土颗粒排列、粒径和边界效应三个因素, 通过室内试验研究杂填土颗粒挤入软土的受力规律。结果表明: 当软土液性指数在 0.8 至 1.0 时, 可以通过引入一个线性函数 A 和一个系数 K 来近似考虑边界效应和颗粒排列方式对杂填土颗粒挤入软土的受力影响; 对于相同孔隙率杂填土颗粒, 颗粒粒径越小导致孔隙通道越小, 其受到的竖向压力就越大。该研究可以为杂填土嵌入软土的沉降计算提供一定的参考, 并且还可以将颗粒与基质作用时的边界影响量化, 从而使得计算更精准。

关键词: 杂填土; 离散元; 边界效应; 颗粒排列; 颗粒大小

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 05-0090-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.017

ZHANG Fuhai^{1,2}, LU Kai¹, XUE Haoyu¹, LIU Zhengrong¹, YU Xiang¹

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

Abstract: To investigate the force patterns governing the compaction of mixed fill particles into soft soil, this study employs a fluid dynamics - based approach combined with a discrete element testing method. Considering three factors - particle arrangement, particle size, and boundary effects - laboratory experiments examine the force dynamics during mixed fill particle compaction into soft soil. Results indicate that when the liquid limit of soft soil ranges from 0.8 to 1.0, boundary effects and particle arrangement patterns can be approximated by introducing a linear function A and a coefficient K to account for their influence on the forces acting on mixed fill particles during penetration. For mixed fill particles with identical porosity, smaller particle size results in narrower pore channels, leading to greater vertical pressure exerted on the particles. This research provides a reference for calculating the settlement of mixed fill embedded in soft soil. Furthermore, it quantifies the boundary effects during particle - matrix interactions, thereby enhancing computational accuracy.

Key words: miscellaneous fill soil; discrete element; boundary effect; particle arrangement; particle size

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51778211)。

作者简介: 张福海 (1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 岩土工程。

收稿日期: 2025-06-07

0 引言

随着国家经济不断发展，土地资源的供需矛盾日益加剧。在城市建设及地下空间开发过程中产生大量的杂填土——建筑垃圾与工程弃土，若以合理的方法将这些杂填土垃圾固体废弃物资源化利用，就可以解决堆放固体废弃物占用土地资源的问题，推进工程建设向节能减排方向发展^[1]。当软土和杂填土共存的情况下，地基沉降会变得更为复杂。因此研究杂填土和软土之间产生互嵌沉降的规律对于建筑工程的安全十分有必要。杂填土和软土之间的互嵌对总沉降影响极大，由杂填土互嵌引发的地基沉降灾害在城市新区建设中频发，如何预防和减少此类问题，已成为我国防灾减灾领域的重要研究课题^[2]。因此杂填土填充于软土而产生的地基对设计和施工提出了更高的要求。

工程界对杂填土与软土的变形特性展开了多方面的研究。大量学者对杂填土和软土的物理力学性质进行了试验研究，发现：杂填土具有不均匀、高压缩、低强度和多空隙等特性^[3-4]；软土具有流变性、含水率高以及刚度低等特点^[5-6]。由于杂填土和软土的这种特性，当杂填土覆盖于软土上并共同承载上部压力时，软土会挤入到杂填土中形成互嵌层，从而产生互嵌沉降。孔郁斐^[7]通过研究土石混合体中块石的不同含量与干密度得出了土石混合体变形和渗透特性的相关影响规律；邱珍峰等^[8]通过试验研究形状系数对土石混合料的力学特性的影响规律，揭示了颗粒形状对土石混合料力学特性的影响机制；肖涌涛等^[9]通过室内试验，分析了杂填土与软土的空间位置、杂填土的含量以及杂填土的粒径对土层沉降量的影响规律；陈宇等^[10]通过室内试验，从基质的角度研究了不同种类基质对杂填土物理力学性质的影响；徐嘉成等^[11]通过室内试验研究了软土粗颗粒含量对杂填土与软土地基互嵌沉降的影响；张剑^[12]依托塔吉克杜尚别-库尔干杰帕公路二标工程，对施工现场进行全面勘察，提出土工格栅复合碎石垫层技术在软土路基施工的实际应用，并研究分析其加固作用来自于碎石的相互嵌挤以及软土路基和碎石垫层互嵌之后软土地基的加速固结。张福海等^[13-14]利用自主研制的互嵌仪进行室内试验，将杂

填土颗粒简化为不同材质的球形颗粒，并综合考虑杂填土、软土及外部荷载对互嵌沉降的影响，同时详细研究各因素下总位移、互嵌位移和固结位移的变化规律。当在某区域内，杂填土受压挤入软土时，边界效应的存在是不可忽视，李颖喆^[15]研究发现边界效应对土体的沉降和受力都有一定的影响。

综上，大多数学者围绕杂填土与软土的物理性质及变形展开研究，而对杂填土颗粒挤入软土过程的受力情况分析尚不充分。将已有的试验仪器改进成颗粒挤入装置，通过设计不同的边界尺寸、颗粒排列和颗粒大小进行试验，分析颗粒挤入软土的受力并找出颗粒排列、大小和边界效应与杂填土颗粒挤入软土过程中受力的关系，最后推导出杂填土颗粒的受力修正公式。将颗粒挤入试验的结果与传统互嵌试验的沉降结果进行对比并验证该修正公式的合理性。

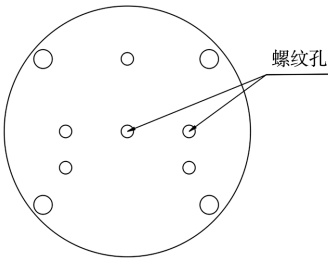
1 研究方案

1.1 试验装置

运用课题组自主研发的颗粒挤入试验设备，装置实物图如图1(a)如示。



(a) 装置实物图



(b) 传压板加工示例图

图1 试验装置图

Fig. 1 Experimental setup diagram

岩土力学

该设备由反力支架、载荷传感器、压力传递板、容器、移动机构以及数据收集系统构成。反力支架两端配有螺母，载荷传感器安装于反力支架底部，与之紧密相连；压力传递板上部与载荷传感器相连，下部与杂填土颗粒相接，压力传递板加工示例如图 1 (b)所示。在压力传递板上钻 4、6 mm 的螺纹孔，其位置依据颗粒大小和排列模式确定，同时为确保压力传递板与载荷传感器的稳固连接，在压力传递板四周分别钻直径 6 mm 的圆孔，借助自锁型尼龙扎带穿过圆孔并固定于载荷传感器上端的反力支架，完成整体固定。容器置于移动平台中央，内装淤泥质软土，借助平台底部的移动机构使容器向上移动。数据收集系统通过计算机与传感器相连，用于收集杂填土颗粒的垂直压力数据。

1.2 试验步骤

对无侧限抗压强度试验仪进行改进，用于开展杂填土颗粒挤入试验。具体试验步骤如下：

- (1) 杂填土颗粒的制备：选用水泥圆球颗粒作为杂填土颗粒。螺杆直径和螺母内径均设定为 4 mm；
- (2) 软土试样制备：按照设定的液性指数配制饱和软土土样，采用刮刀将其分层装入圆柱形试样容器。容器强度经检测能够满足侧压强度的要求。完成装样后将容器放置一旁待后续使用；
- (3) 传压板固定：采用自锁式尼龙扎带，穿过传压板周边的 6 mm 圆孔，将传压板对准荷载传感器，并将其绑扎在荷载传感器上方的反力架上。收紧扎带，使荷载传感器产生一定的垂直向下的压力；
- (4) 杂填土颗粒的连接：将螺杆的一端与杂填土颗粒相连，另一端接入传压板上的 4 mm 螺纹孔。

通过移动框架两侧的螺母，将已固定的荷重传感器向上抬起。将装样完成的容器放置在移动台上，然后反向旋转螺母，使连接在传压板上的颗粒向下移动，直至颗粒中心与容器中心对齐。当颗粒顶端刚好与容器中的土样接触时，停止移动并拧紧两侧螺母；

(5) 数据记录：将荷重传感器的读数归零，随后启动移动台并将其上升速度统一设定为 2 mm/min，并同步开始采集数据。

1.3 试验方案

1.3.1 边界效应对颗粒受力的影响

选取不同直径的圆柱形容器盒开展试验。容器盒的高度均为 15 cm，内径则分别为 5、10、15 cm。经过综合分析，决定使用粒径为 40 mm 的水泥球颗粒来模拟杂填土，并选用软土试样进行试验。软土的塑限和液限分别为 38.3% 和 60.5%，试验方案见表 1。

表 1 边界效应对颗粒受力的影响研究试验方案 Table 1 Research plan for the experimental study on the influence of boundary effects on particle stress		
试验组	液性指数	软土试样盒直径/cm
1	0.8	5
2	0.8	10
3	0.8	15
4	1.0	5
5	1.0	10
6	1.0	15
7	1.2	5
8	1.2	10
9	1.2	15

1.3.2 颗粒排列对颗粒受力的影响

为探究颗粒排列对杂填土颗粒受力的影响，选用排列形式包括单个颗粒、两个颗粒及三个颗粒的横向组合，如图 2 所示。试验所用容器为高 15 cm、直径 10 cm 的圆柱形容器，试验方案见表 2。

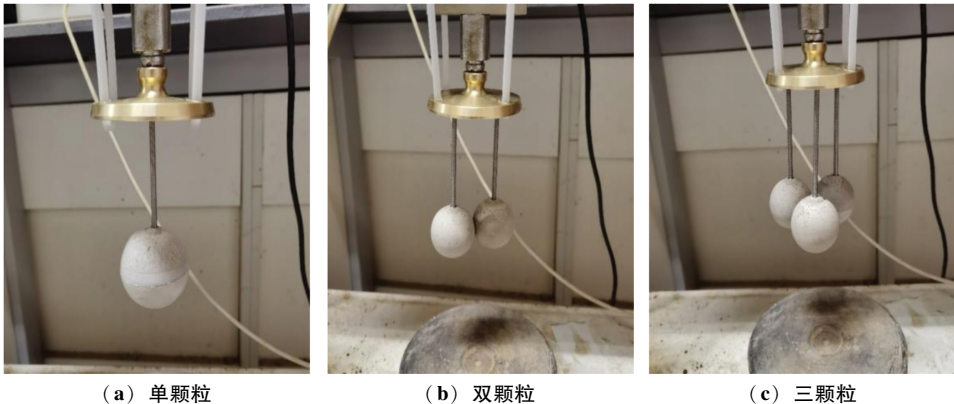


图 2 水泥球颗粒排列方式
Fig. 2 Arrangement patterns of cement spherical particles

表 2 颗粒排列对颗粒受力的影响研究试验方案

Table 2 Effect of particle arrangement patterns on force transmission in granular materials

试验组	液性指数	颗粒排列
1	0.8	单颗粒
2	1.0	单颗粒
3	1.2	单颗粒
4	0.8	双颗粒
5	1.0	双颗粒
6	1.2	双颗粒
7	0.8	三颗粒
8	1.0	三颗粒
9	1.2	三颗粒

1.3.3 颗粒大小对颗粒受力的影响

对于粒径均匀的球形杂填土颗粒，当涉及两种不同粒径的球体时，根据空间体积计算得知其孔隙率、孔隙结构与颗粒排列方式大致相当，唯一变化的是孔隙通道尺寸。

选用8颗粒径为20 mm和1颗粒径为40 mm的水泥球颗粒作为杂填土材料。其中20 mm粒径的水泥球颗粒紧密排列为两排两列。方形盒容器的横截面为正方形，其边长为5 cm。试验共设置6组，试验方案见表3。

表 3 不同粒径颗粒挤入软土的试验方案

Table 3 Test protocol for intrusion of particles with different diameters into soft soil

试验组	液性指数	颗粒粒径/mm	排列
1	0.8	40	单颗粒
2	0.8	20	双排双列
3	1.0	40	单颗粒
4	1.0	20	双排双列
5	1.2	40	单颗粒
6	1.2	20	双排双列

2 试验结果及分析

2.1 边界效应对颗粒受力的影响

图3展示了在不同边界条件下，杂填土颗粒所受竖向压力随嵌入深度变化的情况。当边界范围为5、10、15 cm时，在相同的软土液性指数的情况下颗粒的竖向压力随嵌入深度的变化趋势大致相当。尤其在边界范围为10、15 cm时这种趋势更为明显。初步表明，在软土液性指数相同的情况下，颗粒所受的竖向压力与试验盒内径存在一定的线性关系。为了进一步研究这种线性关系，对不同边界范围在嵌入深度为40 mm时的竖向压力的比值进行了分析，结果如图4所示。

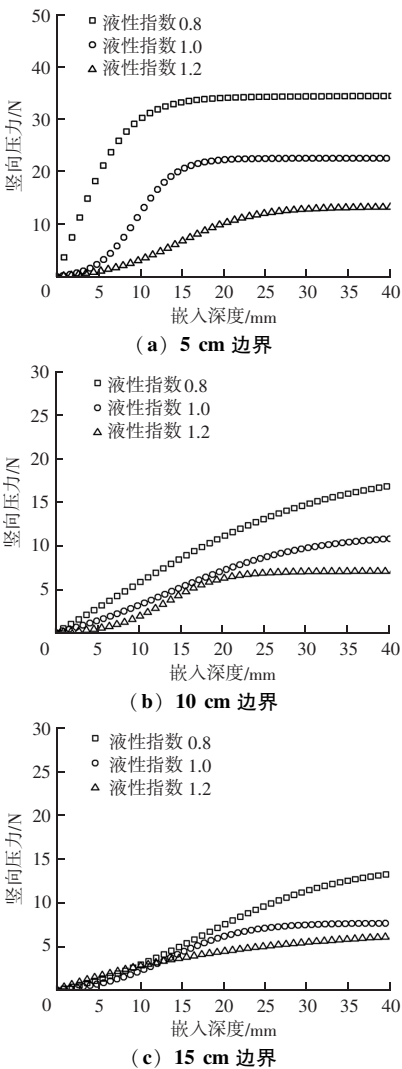


图 3 不同边界范围内杂填土颗粒所受竖向压力随深度变化图
Fig. 3 Graph of vertical pressure variation with depth for miscellaneous fill particles within different boundary ranges

当软土液性指数为0.8和1.0时，杂填土颗粒竖向压力比值（不同边界直径与5 cm边界直径下颗粒竖向压力比）在不同边界范围下的变化趋势基本一致。

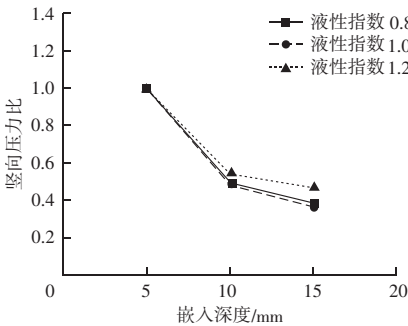


图 4 颗粒竖向压力比随边界直径发展曲线图
Fig. 4 Graph of particle vertical pressure ratio versus boundary diameter development

岩土力学

2.2 颗粒排列对颗粒受力的影响

由图 5 可知，当软土液性指数为 1.0 时，单颗粒、双颗粒和三颗粒情况下颗粒所受的竖向压力随嵌入深度的变化图像大致相同。由此可以初步得知当软土液性指数为 1.0 时，杂填土颗粒所受的竖向压力与颗粒排列之间呈一定的线性关系。为了探究该线性关系，研究对比了在嵌入深度为 40 mm 时，不同颗粒排列方式情况下单一颗粒的竖向压力与单颗粒竖向压力的比，结果如图 6 所示。

单颗粒的竖向压力比为 1.0，多颗粒的竖向压力比则是多颗粒竖向压力均值与单颗粒竖向压力的比值。研究发现，在不同液性指数下，双颗粒和三颗粒的竖向压力比值与单颗粒相比变化较小。

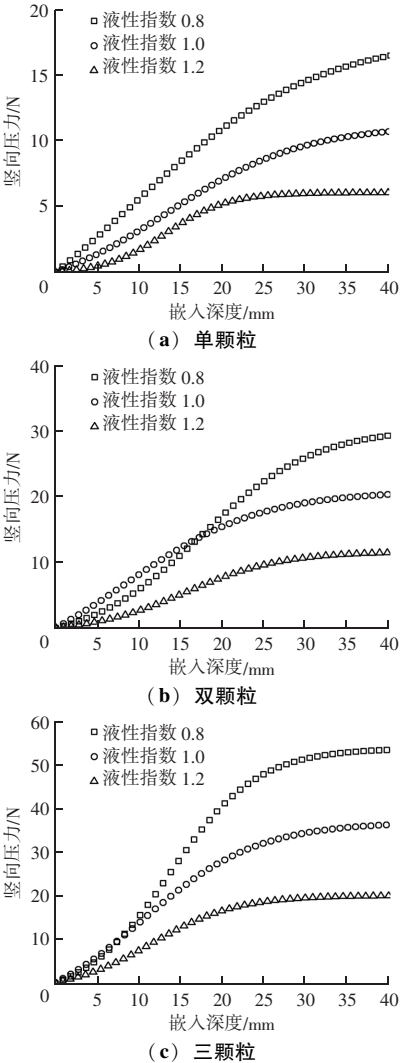


图 5 不同颗粒排列下竖向压力随深度变化图
Fig. 5 Variation of vertical pressure with depth under different particle arrangements

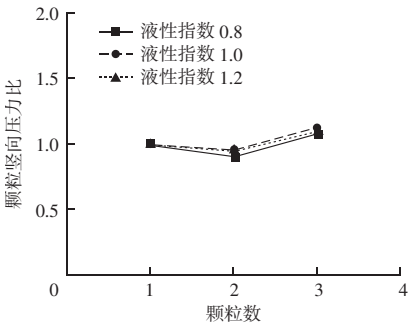
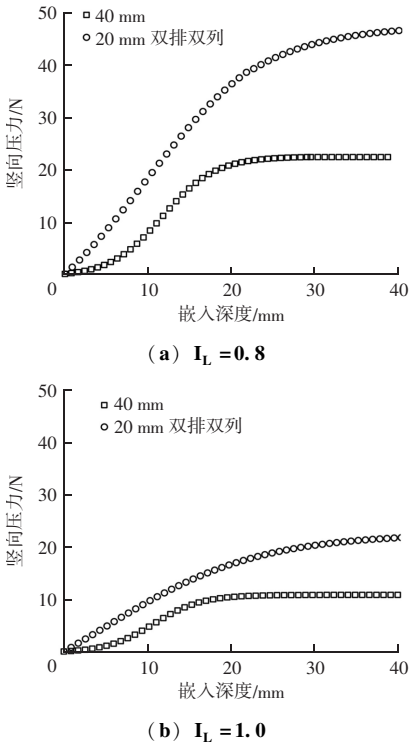


图 6 颗粒竖向压力比与颗粒数的相关发展曲线图
Fig. 6 Developmental relationship curve between particle vertical pressure ratio and particle number

2.3 颗粒大小对颗粒受力的影响

图 7 展示了不同粒径杂填土颗粒的竖向压力随嵌入深度变化的曲线。尽管两种粒径颗粒情况下孔隙率相同，但 20 mm 双排双列颗粒的竖向压力增长速率明显高于 40 mm 单颗粒。当土样液性指数为 0.8、1.0 时，两种粒径颗粒的竖向压力随嵌入深度的变化趋势非常相似。图 7 (a) 中，当嵌入深度为 40 mm 时，两种粒径颗粒的竖向压力分别为 46.39、22.19 N，小粒径颗粒的竖向压力是大粒径颗粒的 2.09 倍。在图 7 (b) 中，当嵌入深度为 40 mm 时，两种粒径颗粒的竖向压力分别为 21.89、10.80 N，20 mm 双排双列颗粒的竖向压力是 40 mm 单颗粒的



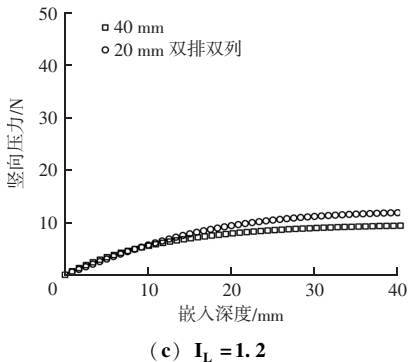


图7 不同液性指数情况下颗粒的竖向压力随深度变化图
Fig. 7 Vertical pressure of particles as a function of depth under different liquid index conditions

2.03 倍。而当土样液性指数为 1.2 时, 两种粒径颗粒的竖向压力接近。在 40 mm 嵌入深度时, 两者的竖向压力分别为 11.87 和 9.37 N, 20 mm 双排双列颗粒的竖向压力仅比 40 mm 单颗粒高出 26.7%。综合分析可知, 当软土液性指数为 0.8 和 1.0 时, 颗粒直径与颗粒所受的竖向压力呈负相关, 且颗粒直径和颗粒所受的竖向压力的乘积近似为某一定值。

3 颗粒挤入试验与室内互嵌试验关联分析

在杂填土地基下分布的淤泥质软土, 其高含水率通常导致土体呈现软塑甚至流塑状态。孔汉军等^[16]在运用 MSD 法分析基坑开挖对土体的影响时指出, 对于这种高塑性黏土, 忽略开挖土体的弹性变形是合理的。在试验中所采用的软土属于上述土体类型, 且土体产生的变形较大, 因此可忽略试验过程中土体的弹性变形, 并将其视为宾汉塑性流体。

由于该试验用粒径相同的水泥球颗粒来模拟杂填土颗粒, 所以杂填土整体所受阻力可以通过单颗粒所受阻力乘以颗粒数量来表示。对于单个杂填土球形颗粒而言, 其在均匀的宾汉流体中受到的绕流阻力可表示为:

$$f = 3\pi\mu Udf(\zeta) + 4\tau_y\pi r^2 \quad (1)$$

式中: 等式右边第一项为黏滞阻力项; τ_y 为宾汉流体屈服应力; r 为球颗粒半径。

在颗粒挤入过程中, 由于杂填土颗粒的挤入速率缓慢 (U 较小), 因此可以忽略黏滞阻力的影响。单个杂填土颗粒受力可简化为:

$$f = 4\tau_y\pi r^2 \quad (2)$$

在实际的工程中, 单个杂填土相较于整个工况

区域而言非常微小, 所以可以将杂填土看成微粒来处理。在杂填土互嵌试验中, 单位体积内所包含的杂填土颗粒数量可根据互嵌试验中杂填土的孔隙率和粒径计算:

$$N = \frac{3(1-n)}{4\pi r^3} \quad (3)$$

式中: N 为单位体积内杂填土颗粒的数量; n 为杂填土颗粒孔隙率; r 为球颗粒半径。

进一步假设在杂填土互嵌试验中, 每个杂填土颗粒所受绕流阻力均可按式 (2) 计算, 则单位体积的杂填土颗粒所受绕流阻力为:

$$F = 3(1-n)\tau_y/r \quad (4)$$

上式表明杂填土颗粒所受渗流力与屈服应力 τ_y 呈正比关系, 而与颗粒半径 r 呈反比关系。

上述推导基于均匀来流的假设条件, 然而与单颗粒挤入试验不同的是, 在杂填土互嵌试验中, 杂填土颗粒周围的宾汉流体流动方向会受到边界效应和颗粒排列的影响。但是在实际的工程当中, 杂填土受力嵌入软土之中时, 一部分区域内的杂填土与软土是没有边界的, 再加上实际工程中杂填土颗粒大小不一且排列多样, 这会导致杂填土与软土互嵌室内试验做出的数据与实际工程中的情况有所偏差。由 2.1 节可知, 当软土液性指数在 0.8 到 1.0 之间时, 杂填土颗粒竖向压力比值随着不同边界范围的变化趋势基本一致, 因此可以引入一个关于边界半径 R 的线性函数 A 来考虑边界效应的影响。由 2.2 节可知, 在不同液性指数下, 双颗粒和三颗粒的竖向压力比值与单颗粒竖向压力相比变化较小, 因此可以引入一个常系数 K 来考虑颗粒排列对杂填土颗粒受力的影响。因此, 为了构建互嵌试验中杂填土整体受力与颗粒挤入试验中单颗粒受力之间的关系, 需要对原公式引入修正参数。采用的修正公式如下:

$$F' = 3AK(1-n)\tau_y/r \quad (5)$$

式中: A 为边界效应修正线性函数, K 为颗粒排列修正系数。

假设互嵌试验中上覆荷载为 P , 互嵌结束后的互嵌沉降为 h , 由式 (5) 可计算得出:

$$P = 3AK(1-n)\tau_y h R^2 / r \quad (6)$$

式中: R 为试验筒的半径。该式表明当颗粒半径相同

岩土力学

时, 荷载 P 与沉降 h 呈线性关系。

试验表明, 函数 A 系数 K 均与软土的初始液性指数无关。张福海等^[18] 采用与该试验相同且液性指数为 1.0 的软土并用球形颗粒来模拟杂填土进行试验, 得出不同荷载下杂填土互嵌沉降发展曲线。将其与前文 20 mm 粒径双排双列杂填土颗粒挤入液性指数为 1.0 的软土过程中的竖向压力发展情况进行对比, 结果如图 8 所示。分析发现, 在 100 和 150 kPa 荷载作用下, 互嵌沉降稳定值所受的竖向压力与试验结果在变化率上基本一致, 这一现象说明了颗粒挤入试验与杂填土互嵌试验的共通性; 然而, 在 50 kPa 荷载作用下, 互嵌沉降值明显小于颗粒挤入试验的结果。进一步通过图 9 观察互嵌试验中孔隙水压力随荷载变化的情况, 发现在 50 kPa 荷载作用下, 孔隙水压力极低。

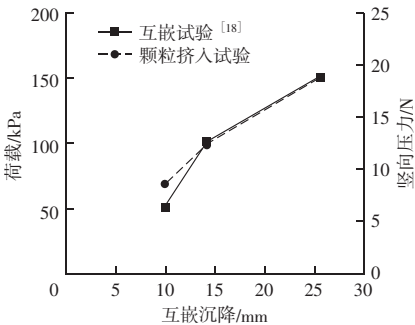


图 8 颗粒挤入软土试验与互嵌试验对比分析图
Fig. 8 Comparative analysis diagram of particle intrusion and mutual embedded tests

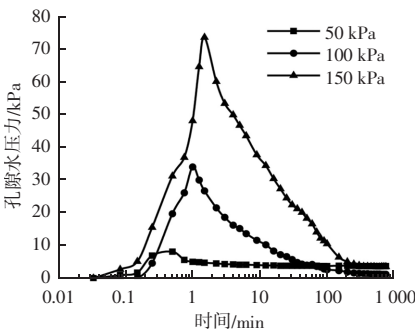


图 9 土样孔隙水压力随荷载变化曲线图
Fig. 9 Variation of pore water pressure with applied load in soil samples

4 结论

基于流体动力学原理, 构建包含边界效应与颗粒排列因素的杂填土颗粒受力修正模型。通过改良无侧限抗压强度测试装置, 进行了杂填土颗粒挤入

试验, 系统研究了颗粒排列方式、边界约束条件及粒径尺寸对杂填土颗粒挤入软土过程中竖向压力演变规律的影响, 得到如下结论:

(1) 当颗粒挤入软土之中时, 边界效应和颗粒的排列方式对颗粒所受的竖向压力的分布存在一定的影响。在软土液性指数在 0.8 到 1.0 的情况下, 可以通过引入一个与边界半径 R 相关的线性函数和一个正常系数 K 来近似反映边界效应和颗粒排列对杂填土颗粒挤入软土过程中受力的影响并得出竖向压力的修正模型。

(2) 在杂填土挤入软土的过程中, 颗粒的尺寸对竖向压力的变化起着关键作用。该试验结果表明球颗粒的半径与颗粒受的竖向压力呈负相关。该结果与推导出的修正公式所揭示的粒径变化对杂填土颗粒受力特性的影响规律相一致。

(3) 将典型的室内互嵌试验与颗粒挤入软土试验的结果进行对比分析。结果显示, 在软土液性指数为 1.0 的条件下, 两者的变化趋势呈现出良好的一致性, 从而进一步说明了修正模型的合理性与有效性。

参 考 文 献

[1] 李佳宝, 阎长虹, 俞良晨, 等. 废弃矿坑生态修复回填建筑垃圾与工程弃土混合料配比优化试验研究 [J]. 工程地质学报, 2025, 33 (1): 387-396.

[2] 张福海, 徐嘉成, 薛浩宇, 等. 级配分布对杂填土地基互嵌沉降影响的试验分析 [J]. 河南科学, 2023, 41 (5): 730-737.

[3] 程远, 杨晔, 时刚. 振杆密实法处理杂填土地基试验 [J]. 中国公路学报, 2023, 36 (5): 99-108.

[4] 杨德生, 张孟喜, 崔振清, 等. 含建筑垃圾土的物理力学特性 [J]. 上海大学学报 (自然科学版), 2011, 17 (6): 792-798.

[5] 王卫东. 软土深基坑变形及环境影响分析方法与控制技术 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (1): 1-25.

[6] 谢晶鹏, 殷德顺, 曹晨曦. 软土在整体振动和局部振动作用下流动特性的试验对比研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (2): 28-35.

[7] 孔郁斐. 机场高填方土石混合料长期变形规律研究 [D]. 北京: 清华大学, 2017.

[8] 邱珍锋, 孙雪蕊, 马爱娟. 颗粒形状影响下土石混合料的强度与变形特性 [J]. 长江科学院院报: 1-7.

[9] 肖涌涛, 侯建国, 王耀存, 等. 杂填土与软土互嵌变形特性试验研究 [J]. 铁道建筑技术, 2025, (5): 10-13.

岩土力学

参 考 文 献

- [1] SAAD A, AIBAN. Compressibility and swelling characteristics of Al-Khobar palygorskite eastern saudi arabia [J]. Engineering Geology, 2006 (87): 205–219.
- [2] C. M. O. NWAIWU, I. NUHU. Evaluation and prediction of the swelling characteristics of nigerian black clays [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006 (24): 45–56.
- [3] PAUL F. Geologic controls on foundation damage in north central Texas [J]. GeoJournal, 1998 (45): 159–164.
- [4] ZEYNAL ABIDDIN ERGULER, RESAT ULUSAY. Engineering characteristics and environmental impacts of the expansive ankara clay, and swelling maps for SW and central parts of the Ankara (Turkey) metropolitan area [J]. Environmental Geology, 2003 (44): 979–992.
- [5] 邹维列, 蔺建国, 韩仲, 等. 膨胀土边坡加固技术研究进展 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53 (1): 126–139.
- [6] 赵辉, 储诚富, 郭坤龙, 等. 铁尾矿砂改良膨胀土基本工程性质试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39 (6): 98–104.
- [7] 陈雷, 张福海, 李治朋. 纤维加筋石灰改良膨胀土工程性质试验研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2014, 46 (增刊 2): 65–69.
- [8] 董柏林, 黄华慧, 裴沛雯, 等. 碎石改良膨胀土膨胀特性实验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14 (5): 1213–1217.
- [9] 吴燕开, 胡锐, 赵位莹, 等. 钢渣粉掺合料改良膨胀土特性试验研究 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2017, 36 (1): 136–143.
- [10] 袁明月, 张福海, 陈翔, 等. 钢渣微粉改良膨胀土室内试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2017 (2): 81–85.
- [11] 白银涌. 生物酶改良机油污染膨胀土压缩特性的试验研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [12] 曾娟娟, 文畅平, 苏伟, 等. 基于生物酶改良膨胀土的试验研究 [J]. 建筑科学, 2017, 33 (5): 69–73.
- [13] 潘兆远. 生物炭改良膨胀土的工程特性研究及边坡稳定性分析 [D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [14] 孙乐乐, 张文慧, 张福海, 等. 粉煤灰改良膨胀土不良工程特性试验研究 [J]. 河南科学, 2019, 37 (4): 588–593.
- [15] 王顺, 李涛涛, 王林. 离子土壤强化剂改性膨胀土的微结构试验研究 [J]. 安全与环境工程, 2011, 18 (4): 26–30.
- [16] 滕琴. 石灰改良膨胀土路基施工技术研究 [J]. 交通建设与管理, 2023 (3): 126–127.
- [17] 刘鸣, 宋建平, 刘军, 等. 膨胀土水泥改性施工均匀性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (增刊 1): 59–63.
- [18] 土工试验方法标准 GB/T 50123–2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [19] 公路土工试验规程 JTG E50—2006 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [10] 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, 52 (7): 119–122, 150.
- [11] 徐嘉成, 张福海, 陈宇, 等. 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 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2023, 40 (2): 27–35.
- [12] 张剑. 公路软土路基土工格栅复合碎石垫层的应用 [J]. 建筑机械化, 2025, 46 (7): 64–67.
- [13] 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.
- [14] 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 (1): 4819605.
- [15] 李颖喆. 黄土湿陷性的边界效应和尺寸效应研究 [D]. 陕西: 长安大学, 2024.
- [16] 孔汉军, 朱聪, 张天赐, 等. 考虑瑞利分布和墙体应变的黏土基坑位移预测 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (34): 14193–14200.
- [17] 褚君达. 宾汉流体的触变性及球体绕流阻力 [J]. 水科学进展, 1995, 6 (1): 36–44.
- [18] 张福海, 崔赞, 薛浩宇, 等. 不同种类软土与杂填土互嵌沉降试验研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2024, 41 (5): 16–26.

(上接第 96 页)