

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.04.013

桩土复合路基浅层垫层内摩擦角测试研究

姚云龙,刘鑫,邵志伟,黄松,洪宝宁

(河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098)

摘要:为更好地测试桩土复合路基中的浅层垫层内摩擦角,基于孔扩张理论和静力触探试验分析了砂垫层内摩擦角与比贯入阻力的关系,结合 Bolton 应力旋转理论并采用优化直径的探头开展室内标定试验,建立了碎石垫层内摩擦角与相对变形之间的标定关系,并通过现场试验给出了不同类型桩土复合路基浅层垫层内摩擦角的变化范围。研究表明:比贯入阻力随着砂垫层的内摩擦角增大而逐渐增大,室内标定试验中砂垫层内摩擦角的平均值范围为 $28.3^{\circ}\sim 35.1^{\circ}$,碎石垫层内摩擦角的平均值范围为 $33.1^{\circ}\sim 42.6^{\circ}$;柔性桩复合路基砂垫层内摩擦角变化范围一般在 $33.5^{\circ}\sim 36.0^{\circ}$ 之间,半刚性和刚性桩复合路基碎石垫层内摩擦角变化范围分别在 $37.0^{\circ}\sim 39.0^{\circ}$ 和 $38.5^{\circ}\sim 40.5^{\circ}$ 之间。

关键词:桩土复合路基;垫层;内摩擦角;静力触探

中图分类号: TU416

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)04-0108-08

Test on internal friction angle of shallow cushion layers in pile-soil composite subgrade

YAO Yunlong, LIU Xin, SHAO Zhiwei, HUANG Song, HONG Baoning

(College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To better evaluate the internal friction angle of shallow cushion layers in pile-soil composite subgrades, the relationship between the internal friction angle of sand cushion layers and the specific penetration resistance was analyzed based on cavity expansion theory and static cone penetration tests. Laboratory calibration tests were conducted using a probe with an optimized diameter, incorporating Bolton's stress-dilatancy theory, so as to establish a calibration relationship between the internal friction angle and relative deformation in gravel cushion layers. Field tests were carried out to determine the variation ranges of internal friction angles of shallow cushion layers in different types of composite subgrades. The results show that the specific penetration resistance increases with the increase in the internal friction angle of the sand cushion layer. In the laboratory calibration test, the internal friction angle ranges from 28.3° to 35.1° for sand cushion layers and from 33.1° to 42.6° for gravel cushion layers. Moreover, the average value of the internal friction angle of sand cushion layers in flexible pile composite subgrades generally ranges from 33.5° to 36.0° , while for gravel cushion layers in semi-rigid and rigid pile composite subgrades, the internal friction angle is between $37.0^{\circ}\sim 39.0^{\circ}$ and $38.5^{\circ}\sim 40.5^{\circ}$, respectively.

Key words: pile-soil composite subgrade; cushion layer; internal friction angle; static cone penetration

桩土复合路基处理方法是高等级公路软土地基处理中最常用的方法,具有承载力高、处理工期短、稳定性高、工后不均匀沉降小、应用范围广等优点^[1-3],能够满足高速公路对于稳定性和安全性的严格要求,这对于保证路面平整度和减少对交通运行的干扰极为有利。目前许多学者采用理论分析^[4]、室内模型试验^[5]、数值计算、现场试验^[6-7]等方法对桩土复合路基的性能进行了研究。垫层在桩土复合路基中起着调节桩体和桩间土承载力的作用,影响着复合路基的承载力发挥与破坏模式^[8]。由于桩体刚度显著高于桩间土及垫层,荷载作用会导致垫层压缩时将更多荷载传递至桩体,引发桩顶应力集中;同时,垫层受挤压向桩间土侧向移动,以协调路基整体变形与应力分布。此外,不同厚度的垫层也会影响桩土应力比以及路基的沉降^[3,9]。由此可见,垫层在调节复合路基承载性能方面具有重要作用,其设计与施工质量不容忽视。TBJ 37—93《静

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278400,51609071);河海大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200202087,B200204032)

作者简介: 姚云龙(1998—),男,博士研究生,主要从事复合地基处理研究。E-mail: yaoyunlong6@hhu.edu.cn

通信作者: 洪宝宁(1960—),男,教授,博士,主要从事微细结构试验及岩土工程研究。E-mail: 19990006@hhu.edu.cn

引用本文: 姚云龙,刘鑫,邵志伟,等. 桩土复合路基浅层垫层内摩擦角测试研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(4):108-115.

YAO Yunlong, LIU Xin, SHAO Zhiwei, et al. Test on internal friction angle of shallow cushion layers in pile-soil composite subgrade[J].

Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(4): 108-115.

力触探技术规则》中的垫层普遍选用粗砂或中砂,以及级配良好的砂石等材料作为垫层材料。内摩擦角是决定垫层材料抗剪强度的重要参数,也是工程设计中的重要参数,内摩擦角越大,其土颗粒间的嵌入、表面摩擦力和连锁作用产生的咬合力也越大,桩体也不易刺入垫层,使桩土应力比的调节能力增强,但当内摩擦角达到一定值后其影响也会趋于稳定^[3,9]。

现有的土体内摩擦角测试评价方法主要为室内土工试验,如直剪试验、三轴压缩试验、压剪试验等。然而,土体取样过程中不可避免会引起试样扰动和破坏,导致内摩擦角测试的精度下降,而原位测试因无需取样、试样扰动小等优点,得到了广泛应用。常见的原位测试方法包括静力触探试验、扁铲侧胀试验、标准贯入试验、原位直剪试验等^[10-11]。其中,静力触探试验基于探头与土体相互作用的机理,可以反演出土体的物理力学参数^[12-13]。已有研究还建立了探头阻力或比贯入阻力与土体相对密度及内摩擦角之间的关系^[14],为开展基于原位测试的强度指标反演提供了理论依据。由于静力触探使用最为广泛,其测得的探头阻力与土体工程物理性质指标的关系尤为重要。通过引入孔穴扩张理论,可对静力触探试验作出解释,使得原位测试试验的结果不仅能提供定性或半定量的强度指标,还具备实现定量评估的可能。

然而,现有研究多集中于天然土或深层土体的强度参数反演,对于浅层砂石垫层内摩擦角的测试研究相对较少。在均质砂土中,比贯入阻力随深度增加而增大,直到达到临界深度(D_{cr})后趋于稳定。在探头贯入深度小于 D_{cr} 时,周围砂土主要受到剪切作用,而在深度大于 D_{cr} 时,主要受压缩作用。若下层土体为高压缩性土层,探头距下层土体顶面某一深度范围内,比贯入阻力会逐渐减小,直到进入下层土体后达到稳定值^[15]。由于砂垫层较薄,其厚度通常小于 D_{cr} 和下层土体影响深度 h_p 之和,因此将厚度小于 $D_{cr}+h_p$ 的垫层定义为浅层垫层。传统方法往往假定土体在深度方向上均质,未能充分考虑浅层土体的非均质性和复杂的应力条件。此外,浅层垫层较薄,往往会受到下层土体影响,导致现有规范难以准确反映其真实的内摩擦角变化。本文通过理论分析、室内标定试验与现场试验研究,给出了各类桩土复合路基中浅层垫层内摩擦角的变化范围,以期在现场施工中垫层性能评价标准的建立提供参考。

1 试验方法

1.1 垫层内摩擦角测试原理

1.1.1 砂垫层静力触探测试

已有研究表明,静力触探过程与土体中孔穴扩张过程之间具有相似性^[16],即在均匀弹塑性介质中形成一个深孔所需的压力与在探头贯入过程中形成一个圆孔所需的压力相似。基于目前的孔扩张理论^[17-19]研究,可进一步推导出砂土内摩擦角与比贯入阻力的表达式。在探头贯入土体过程中,锥尖阻力与侧壁摩阻力的变化曲线为向上发展的抛物线,在贯入曲线呈抛物线的深度内,探头周围砂土因剪胀效应发生局部破坏并导致土体呈圆柱形抬起,这部分土体与周围土体间的摩擦力导致探头底部水平面上的铅直应力增大。此时探头的比贯入阻力 p_s 为

$$p_s = 1.1\gamma DN_q(1 + KD\sin\varphi/L)$$
 (1)

式中: γ 为砂土容重; D 为单桥探头贯入土体的深度; N_q 为砂土的探头阻力系数; K 为塑性区域土体中的压力系数; φ 为砂土的内摩擦角; L 为探头贯入土体中得到的圆柱形土体的直径。

在砂垫层中,可通过测定式(1)所需参数来确定其内摩擦角。

1.1.2 碎石垫层内摩擦角计算方法

根据 Bolton 应力旋转理论,在已有研究^[20-21]的基础上,建立碎石垫层贯入试验中探头阻力与内摩擦角二者之间的关系。探头径向应力 σ_r 和探头表面竖向应力 σ_v 表达式分别为

$$\sigma_r = p_L \left[1 + \frac{E_1}{\tan\theta_c} \left(1 - \frac{r_0}{r_c} \right) \right]^{-(\alpha-1)/\alpha}$$
 (2)

$$\sigma_v = p_L E_2 \left[1 + \frac{E_1}{\tan\varphi} \left(1 - \frac{r_0}{r_c} \right) \right]^{-(\alpha-1)/\alpha}$$
 (3)

其中 $E_1 = \exp\left(\frac{\pi}{2}\tan\psi_T\right)$ $E_2 = \exp(\pi\tan\varphi_T)$

式中: p_L 为柱孔扩张的极限压力; r_0 为柱孔扩张的初始半径; r_c 为探头半径; α 为塑性区各单元的平均值,可由相关公式^[22] 计算得到; θ_c 为探头顶角大小的一半,标准探头取为 30° ; ψ_T 为剪胀角; φ_T 为过渡区的摩擦角。

当 $r_0=r_c$ 时, σ_v 取得最大值,即 $\sigma_v=p_L E_2$;当 $r_0=0$ 时, σ_v 取最小值,即 $\sigma_v=P_L E_2\left(1+\frac{E_1}{\tan \varphi}\right)^{-(\alpha-1)/\alpha}$ 。将 σ_v 对探头截面进行积分,即 $\int_S \sigma_v dA=q_c$,面积元 $dA=2\pi r_0 dr_0$,可得到探头阻力 q_c 为

$$q_c=2 p_L E_2\left[\left(1+\frac{E_1}{\tan \varphi}\right)^{(\alpha+1) / \alpha}-\frac{\alpha+1}{\alpha} \frac{E_1}{\tan \varphi}-1\right] /\left[\frac{\alpha+1}{\alpha^2}\left(\frac{E_1}{\tan \varphi}\right)^2\right] \quad (4)$$

1.2 垫层内摩擦角室内标定试验

1.2.1 砂垫层室内标定试验

砂垫层室内标定试验采用单桥探头静力触探方法,先求探头的率定系数,然后通过数字测力仪测得静力触探试验中的应变变量并由式(5) 计算得到静力触探比贯入阻力,最后由式(1) 计算砂垫层的内摩擦角。

$$p_s=K_p\left(\varepsilon_p-\varepsilon_0\right) \quad (5)$$

式中: K_p 为单桥探头的率定系数; ε_p 为比贯入阻力应变变量; ε_0 为探头的初始读数或零读数应变变量。

试验所用砂垫层材料取自江苏省某高速公路施工现场,垫层内摩擦角范围为 $28^\circ \sim 35^\circ$,压实系数为 $0.94 \sim 0.97$ 。将模型箱置于 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 坑内并回填少量土将其固定,用锚定杆将静力触探仪固定在地面上,为探头贯入砂垫层中提供反力;然后将连接探头的探杆用“山”形压板以及“U”形卡块固定在静力触探仪链条上。使用 $30 \sim 50 \text{ kN}$ 的标准测力计对探头传感器进行率定,每个传感器需率定 3 次或 4 次。得到率定系数后,将静力触探仪器安装在模型箱上,使用静力触探仪手摇式加力装置缓慢将探头贯入砂垫层中,保持探头贯入速度在 2 mm/s 范围内,并每隔 10 cm 测记一次读数。当模型箱中砂垫层厚度在 $30 \sim 40 \text{ cm}$ 之间时,对垫层表面进行平顺处理。探头贯入过程中采用 CL200 数字测力仪采集数据,先读取触探仪的初始读数或零读数应变变量,然后在贯入过程中每隔 10 cm 读数,采用测力仪的稳定值作为探头贯入过程的应变值。

根据 TBJ 37—93《静力触探技术规则》表 6.4.5 确定砂垫层的内摩擦角初始值:若比贯入阻力随深度的变化曲线出现峰值,则取该峰值对应的内摩擦角;若没有明显峰值,本文按经验选取距垫层底部 $2/3$ 处的比贯入阻力对应的内摩擦角,以减小垫层非均匀性和下层土体影响带来的误差。

1.2.2 碎石垫层室内标定试验

碎石垫层所用碎石粒径范围一般在 $5.0 \sim 31.5 \text{ mm}$ 之间,考虑到碎石垫层的刚度以及颗粒相对较大,在室内标定试验中,需采用改进探头尺寸后的内摩擦角测试仪来获取碎石垫层的内摩擦角。本文试验探讨 3 种探头直径(6、8、10 cm),垫层厚度未严格按给出的相似条件取值,主要原因是垫层过薄,难以反映碎石之间的挤压效应,从而增加垫层内摩擦角的测试难度。试验用料取自现场集料场,保证集料场碎石粒径范围为 $5.0 \sim 31.5 \text{ mm}$ 。采用碎石振筛机结合标准检验筛,筛分出 $5.0 \sim 9.5$ 、 $9.5 \sim 16.0$ 、 $16.0 \sim 26.5$ 、 $26.5 \sim 31.5 \text{ mm}$ 粒径范围的碎石各 100 kg 。筛分后用沙袋封存,将不同粒径碎石进行分批试验。

试验采用电子式万能试验机,将 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 木质模型箱放置于装置平台上,并把同一粒径范围的碎石倒入模型箱中,当碎石厚度在 $40 \sim 50 \text{ cm}$ 之间时对碎石表面进行平顺。将探头与万能试验机的加载装置绑扎完好,加载过程中模拟路堤均布荷载,实际路堤荷载为 $20 \text{ kN/m}^3 \times 6 \text{ m}=120 \text{ kPa}$,荷载施加面积为自制探头面积 100 cm^2 ,求得最终加载大小为 1.2 kN 。根据曹子君等^[22-24] 基于 Tresca 破坏准则、Randolph 法、应变路径 SPM 及圆孔扩孔理论等的研究,桩体或探头贯入土体的位移影响范围为其半径的 $4.5 \sim 7.0$ 倍,结合模型箱的尺寸,选用探头的最大位移影响范围为 35 cm ,可满足模型边界的限制条件,保证材料整体的均匀变形。实际试验中为了得到垫层完整的变形过程,荷载可加载到 $2 \sim 5 \text{ kN}$,按照试验方案等速率加载,最终生成碎石垫层的荷载-位移曲线。观测时间从万能试验机施加压力开始,加载大小由加载装置自动设定,垫层下沉位移由万能试验机操作界面读取,变形由 CCD 连续跟踪测量。标定系统还应实时采集加载过程中应力应变的变化。对于同一组碎石,由荷载-位移曲线导出碎石加载试验的最大位移值,从而可得到该组碎石的相

对变形。将计算得到的碎石垫层探头阻力代入式(4),可得到碎石垫层的内摩擦角标定值。

1.3 垫层内摩擦角现场标定试验

1.3.1 试验方案

在复合路基现场施工中,柔性桩(水泥搅拌桩、砂桩、碎石桩等)垫层材料主要为砂粒、石粉等,半刚性桩(CFG 桩等)和刚性桩(预制管桩等)垫层材料主要为碎石。现场试验选择复合路基路段中的粗砂垫层和 2~4 级配的碎石垫层作为试验段,不考虑其他影响因素。具体试验方案如下:

- a. 通过收集相关资料掌握垫层各种材料内摩擦角信息,并在室内利用改进的探头对垫层材料进行验证性和标定性试验。
- b. 试验路段的选择:砂垫层厚度为 30、40 cm,各选择 24 个路段;碎石垫层厚度为 40、50、60 cm,各选择 16 个路段。
- c. 每个试验路段取 3 个试验断面,间距 10 m 左右;每个试验断面取 4 个位置(路中 1 个、两路肩各 1 个、路中与路肩之间取 1 个)。
- d. 每个位置做 3 组试验(沿试验路段方向取 3 个点,间隔需小于 50 cm),试验深度为垫层厚度,取 3 组试验平均值为该点的初始值。若各组试验值之间相对误差超过 10%,则增加试验组数来剔除奇异值。

1.3.2 砂垫层现场试验

砂垫层采用单桥静力触探试验,通过测得的比贯入阻力随深度变化的曲线,得到不同组的比贯入阻力,从而根据式(1)得到垫层内摩擦角。确定现场情况、试验触探断面和点位分布情况,触探孔布置在距桩体 0.4 m 之外。试验触探设备就位后调平设备底座并采用水平尺校准,使之与反力装置衔接、锁定。贯入速率设为(20±5)mm/s,测点间距宜控制为 5 cm,测量和记录贯入阻力数据,并记录贯入过程中发生的各种异常或影响正常贯入的情况。

1.3.3 碎石垫层现场试验

碎石垫层采用圆柱形探头进行现场静压试验,根据室内试验的标定结果,通过测得的荷载-位移曲线,计算碎石垫层的内摩擦角。试验操作流程与砂垫层试验流程类似。总加载荷载按 2 000 N 控制,每次匀速加载 200 N 并间隔 1 min。加载方式类似于平板载荷试验中的分级荷载施加方法,下一级荷载加载前读取位移数据,并记录试验过程中各种异常或影响正常贯入的情况。沉降稳定(即 30 s 沉降量小于 0.1 mm 或累计沉降量大于垫层厚度的 0.10%)后终止试验。在原位测试中,静力触探所用探头较小,如直接使用在粒径较大的碎石垫层中测试荷载-位移曲线,曲线的离散性较大,无法获得一致的变化规律。为了确保荷载均匀分布、减少应力集中现象,采用改进后的圆柱形探头进行现场静压试验,通过现场贯入试验可得到碎石垫层荷载-位移曲线,从而可计算出碎石垫层相对变形值(垫层的压缩变形与垫层厚度的比值)。加载完成后,当垫层累计沉降量小于垫层厚度的 0.10%时,试验累计沉降量为最后一级荷载加载后对应的沉降量;当垫层累计沉降量大于垫层厚度的 0.10%时,选择最后一级荷载的上一级荷载对应的沉降量为试验累计沉降量。每组现场试验完成后绘制垫层所受荷载与相对变形曲线。

2 试验结果与分析

2.1 室内标定试验

2.1.1 砂垫层标定试验

通过不同组的室内标定试验,可得到不同的比贯入阻力与内摩擦角的标定关系,结果如图 1 所示。由图 1 可知,当砂垫层贯入过程中的比贯入阻力逐渐增大时,砂垫层的内摩擦角也逐渐增大,且增长趋势逐渐减小。根据砂垫层的原始比贯入阻力数据,砂垫层的初始内摩擦角范围为 29.0°~36.0°。在砂垫层室内标定试验中,根据式(1)可计算得到砂垫层的内摩擦角标定值范围为 27.6°~34.2°,初始值与标定值之间的平均误差为 3.95%。考虑到室内试验的标定值与初始值均存在一定的误差,故选择二者平均值作为常规误差来平衡标定值与初始值之

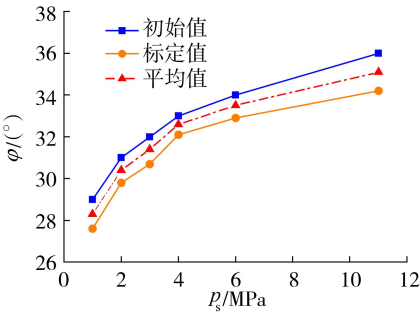


图 1 砂垫层比贯入阻力与内摩擦角标定关系
Fig.1 Calibration relationship between specific penetration resistance and internal friction angle for sand cushion layer

间的差异,从而确保试验标定结果的稳健性和一致性。因此,以图 1 中的平均值(28.3°~35.1°)作为内摩擦角的优化值。

2.1.2 碎石垫层标定试验

先根据试验数据的离散性来确定测试过程中适宜的探头直径,在获得最佳探头直径的基础上,通过万能试验机加载试验得到碎石垫层的相对变形量,并据此建立其与内摩擦角之间的标定关系。

2.1.2.1 探头直径

按照试验步骤,选择粒径范围为 9.5~16 mm 的碎石,分别采用直径为 6、8、10 cm 的探头在加载速率 0.5 mm/min 下进行室内标定试验,得到碎石垫层在不同探头直径下的荷载(p)-位移(s)曲线以及相关关系曲线如图 2 所示。

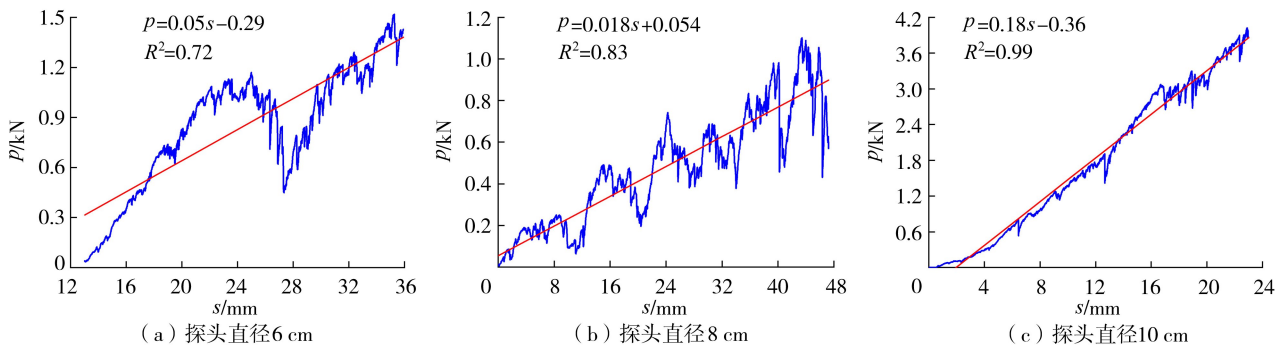


图 2 不同探头直径下的荷载-位移曲线

Fig. 2 Load and displacement curves under different probe diameters

由图 2 可知,不同直径探头标定试验得到的荷载-位移曲线离散性不完全相同,加载曲线所呈现的规律也不同。由曲线拟合公式可得,探头的荷载随着位移的增大而增大,两者近似线性关系。由图 2(a)可知,因探头直径与碎石直径的比值较小,试验所得曲线波动性较大,碎石垫层与探头之间挤压较明显。由图 2(a)(b)可知,两种直径探头测得的内摩擦角离散性较大,无法定量测出碎石垫层的相对变形,同时也无法获得碎石垫层内摩擦角的范围。相比之下,在碎石加载试验中,当探头直径为 10 cm 时(图 2(c)),由于探头直径较碎石粒径大一个量级,用该探头进行加载试验得到的荷载-位移曲线离散性较小,且根据该荷载-位移曲线可得到任一荷载作用下碎石垫层的沉降量,因此碎石垫层室内标定试验中探头直径选为 10 cm 较为适宜。为进一步验证 10 cm 探头在不同粒径范围内的适用性,对 5.0~9.5 mm 和 26.5~31.5 mm 粒径范围的碎石进行了试验,结果如图 3 所示,可见较小和较大粒径的碎石垫层同样获得了稳定的测试数据。在 5.0~9.5 mm 的碎石粒径范围内,荷载-位移曲线同样表现出较小的离散性;而在 26.5~31.5 mm 的大粒径碎石中,尽管颗粒较大,10 cm 探头依然能够保证受力均匀性,测得的荷载-位移曲线与小粒径碎石的曲线形态保持一致,未出现显著的离散性和不稳定性。这也表明探头直径选择为 10 cm 是合理的,得到的数据稳定,适用于多种粒径范围内的内摩擦角测定。

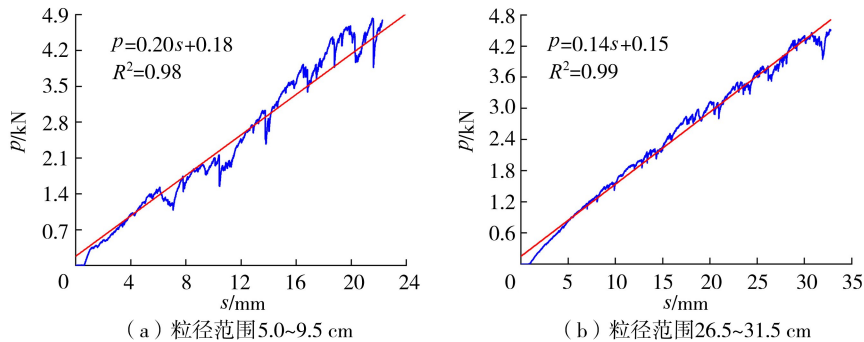


图 3 不同粒径范围下的荷载-位移曲线

Fig. 3 Load and displacement curves under different particle size ranges

2.1.2.2 垫层相对变形与内摩擦角的对应关系

通过多组试验测得内摩擦角的初始值,得到不同粒径碎石初始内摩擦角 φ_0 的范围为 $34.0^{\circ}\sim43.0^{\circ}$ 。此外,在碎石垫层标定试验中,采用改进后的直径 10 cm 圆柱形探头进行静力加载试验,得到碎石垫层的荷载-位移曲线。根据室内试验的标定结果,将碎石垫层的探头阻力代入式(4)计算得到碎石垫层内摩擦角的标定值,结果如图 4 所示。根据室内标定试验绘制碎石垫层相对变形与内摩擦角的关系曲线,现场检测时通过加载试验获取变形值,再利用插值法反推对应的内摩擦角。实际检测时可随机取 8 个测点,控制试验值相对误差小于 10%,并取其平均值作为该区的代表值。碎石垫层的相对变形随着内摩擦角的增大而减小,这也充分说明垫层的内摩擦角与自身变形的关系。当垫层内摩擦角较小时,碎石颗粒之间的咬合摩擦力较小,垫层易被破坏;当垫层内摩擦角较大时,随着内摩擦角的增大,其对垫层相对变形的影响逐渐降低,即碎石垫层存在调节效果最佳的内摩擦角值。室内标定试验中碎石垫层的内摩擦角范围为 $32.2^{\circ}\sim42.2^{\circ}$,与初始值的误差仅为 3.52%,说明本文试验方法是可行的。最终以图 4 中的平均值 ($33.1^{\circ}\sim42.6^{\circ}$)作为内摩擦角的优化值。

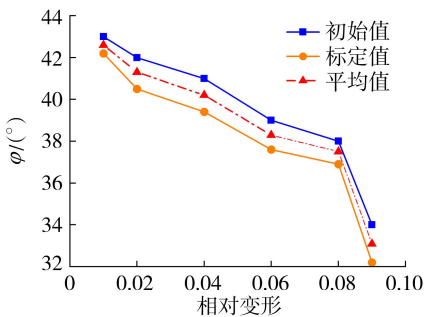


图 4 碎石垫层相对变形与内摩擦角标定关系
Fig. 4 Calibration relationship between relative deformation of gravel cushion layer and internal friction angle

2.2 现场试验

2.2.1 砂垫层现场试验

砂垫层现场静力触探试验中,厚度为 30、40 cm 的砂垫层各选择 12 组代表性试验数据进行分析,每组试验在选择断面中取 3 个贯入点。通过静力触探试验测得的比贯入阻力,可计算得到室内试验中每一组的砂垫层内摩擦角,结果如图 5 所示。

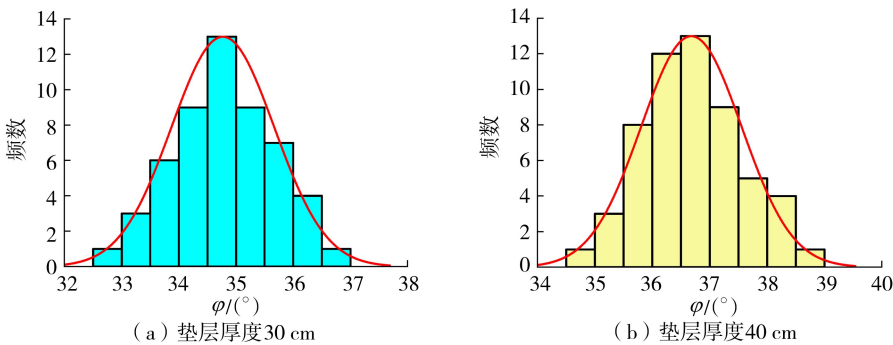


图 5 不同垫层厚度的砂垫层内摩擦角分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of internal friction angle of sand cushion layer with different thicknesses

由图 5 可知,砂垫层内摩擦角呈正态分布,30 cm 砂垫层内摩擦角普遍低于 40 cm 砂垫层的内摩擦角,且两种厚度砂垫层内摩擦角差值一般在 $1^{\circ}\sim3^{\circ}$ 之间。30 cm 砂垫层的内摩擦角主要集中在 $33.5^{\circ}\sim36.0^{\circ}$ 之间,而且各断面、各点的离散不大,一般在 8% 左右。40 cm 砂垫层的内摩擦角主要集中在 $35.5^{\circ}\sim37.5^{\circ}$ 之间,各断面、各点的离散较 30 cm 砂垫层大,最大的超过 12%。相比室内标定试验砂垫层内摩擦角范围 $28.3^{\circ}\sim35.1^{\circ}$,现场试验砂垫层的内摩擦角误差范围在 10.4%~15.1% 之间,主要是受现场施工工艺和环境条件的影响,但总体上数据波动仍在合理范围内,进一步验证了本文方法在实际工程中的适用性和可靠性。

柔性桩多采用砂垫层作为荷载传递介质,桩间土在复合路基中承担着重要的承载作用。根据垫层内摩擦角现场试验以及相关资料统计分析,达到设计要求的柔性桩复合路基砂垫层的内摩擦角变化范围在 $33.5^{\circ}\sim36.0^{\circ}$ 之间,垫层厚度一般设计为 30 cm。

2.2.2 碎石垫层现场试验

取垫层厚度分别为 40、50、60 cm 的碎石垫层,每组厚度碎石垫层各选择 3 个断面,每个断面选择 4 个贯入点,共选择 12 组数据进行碎石垫层的内摩擦角分析,结果如图 6 所示。

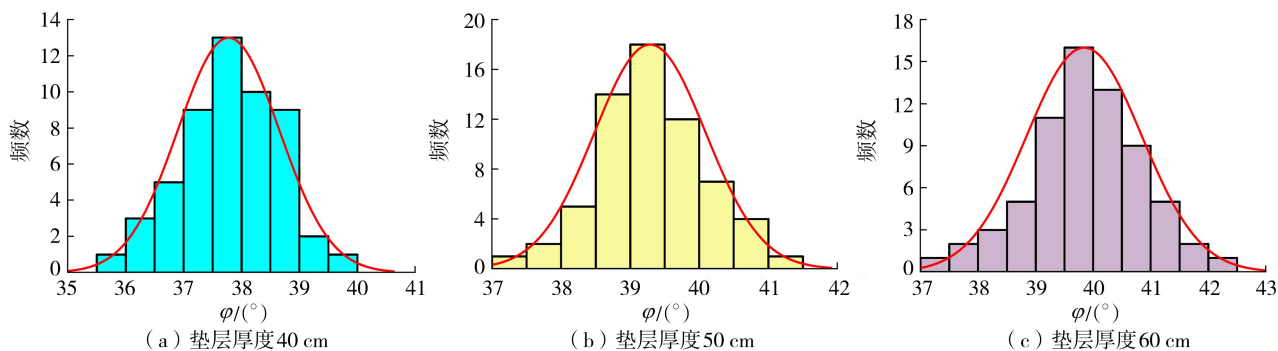


图 6 不同垫层厚度的碎石垫层内摩擦角分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of internal friction angle of gravel cushion layer with different thicknesses

由图 6 可知,40 cm 砂垫层的内摩擦角主要集中在 37.0°~39.0°之间,各断面、各点的离散较大,一般在 10%左右,最大的超过 15%。50 cm 砂垫层的内摩擦角主要集中在 38.5°~40.5°之间,各断面、各点的离散性相比于 40 cm 砂垫层的内摩擦角较小,一般在 8%左右,最大的小于 12%。60 cm 砂垫层的内摩擦角主要集中在 39.0°~41.0°之间,各断面、各点的离散性相对不大,一般小于 8%,最大的小于 10%。相比室内标定试验碎石垫层内摩擦角范围 33.1°~42.6°,现场试验碎石垫层的内摩擦角误差范围在 4.4%~5.7%之间。相较于砂垫层,碎石垫层的误差较小,表明本文采用的试验方法在碎石垫层的内摩擦角测量中表现出较高的可靠性。不同垫层厚度的内摩擦角相差在 1°~3°之间,复合路基碎石垫层试验路段的内摩擦角试验值基本没有差别,但碎石垫层内摩擦角受其内部杂质含量影响较大。当碎石垫层中级配不良、杂质含量超过 5%时,其内摩擦角下降的幅度较大,一般下降超过 3°,最大的超过 7°。根据垫层内摩擦角现场试验及对收集资料的统计分析,达到设计要求的半刚性桩复合路基碎石垫层内摩擦角变化范围一般在 37.0°~39.0°之间,垫层厚度一般设计为 40 cm;刚性桩复合路基碎石垫层内摩擦角变化范围一般在 38.5°~40.5°之间,垫层厚度一般设计为 50 cm。

3 结 论

- a. 孔扩张理论分析与静力触探试验研究表明,垫层厚度为 30、40 cm 的砂垫层内摩擦角随比贯入阻力的增大而增大,当探头的比贯入阻力为 1~11 MPa 时,室内标定试验中砂垫层的内摩擦角平均值范围为 28.3°~35.1°。
- b. 基于 Bolton 应力旋转理论,并采用适宜探头直径(10 cm)的自制探头进行室内贯入试验,结果表明 40、50 cm 厚度碎石垫层内摩擦角随相对变形的增大而逐渐减小,相对变形量在 0.01~0.09 之间,室内标定试验中碎石垫层的内摩擦角平均值范围为 33.1°~42.6°。
- c. 现场试验得到 30、40 cm 厚度砂垫层的内摩擦角分别集中在 33.5°~36.0°、35.5°~37.5°,40、50、60 cm 厚度碎石垫层的内摩擦角分别为 37.0°~39.0°、38.5°~40.5°和 39.0°~41.0°,与砂垫层和碎石垫层室内试验的误差范围为 10.4%~15.1%和 4.4%~5.7%,表明试验方法具有较高的可靠性。
- d. 根据不同分类桩的现场试验,柔性桩复合路基砂垫层内摩擦角变化范围一般在 33.5°~36.0°之间,半刚性桩复合路基碎石垫层内摩擦角变化范围一般在 37.0°~39.0°之间,刚性桩复合路基碎石垫层内摩擦角变化范围一般在 38.5°~40.5°之间。

参考文献:

[1] 邓友生,李龙,刘俊聪,等. 波纹塑料套管煤矸石 CFG 桩复合路基承载试验[J]. 中国公路学报,2023,36(4):48-57. (DENG Yousheng,LI Long,LIU Juncong,et al. Load-bearing test on composite subgrade of coal gangue CFG pile with corrugated plastic[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(4):48-57. (in Chinese))

[2] 张秀勇,王海龙,李杰. 碎石桩复合地基在大丽高速公路软土地基处理中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):455-459. (ZHANG Xiuyong,WANG Hailong,LI Jie. Application of gravel pile composite foundation in improving soft subgrade of Da-Li Highway[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(5):455-459. (in Chinese))

[3] 姚云龙,刘鑫,洪宝宁,等. 在役 PHC 管桩复合路基滑塌事故的处治效果分析[J]. 公路,2023,68(8):12-21. (YAO

Yunlong,LIU Xin,HONG Baoning,et al. Analysis of treatment effect of PHC pipe pile composite subgrade slide accident in service[J]. Highway,2023,68(8):12-21. (in Chinese))

[4] 李继才,丛建,郇能惠,等. 基于沉降控制的储罐 CFG 桩复合地基设计方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):321-328. (LI Jicai,CONG Jian,LI Nenghui,et al. Study on the design method of CFG pile composite foundation for storage tanks based on the settlement controlling[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(4):321-328. (in Chinese))

[5] 杜广印,蔡俊,孙长申,等. 透水混凝土桩复合地基的承载特性模型试验[J]. 东南大学学报(自然科学版),2020,50(5):814-821. (DU Guangyin,CAI Jun,SUN Changshen,et al. Model test of bearing characteristics on pervious concrete pile composite foundation[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition),2020,50(5):814-821. (in Chinese))

[6] 单浩,洪宝宁,刘鑫,等. 复合路基工后沉降早期检测评价方法研究[J]. 工程科学与技术,2020,52(4):194-202. (SHAN Hao,HONG Baoning,LIU Xin,et al. Study on the early detection and evaluation method of post-construction settlement of composite subgrade[J]. Advanced Engineering Sciences,2020,52(4):194-202. (in Chinese))

[7] 张智慧,朱文文,马天,等. 静压沉桩后黏土中超孔压时空分布规律研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):88-96. (ZHANG Zhihui,ZHU Wenwen,MA Tian,et al. Study on spatiotemporal distribution of excess pore water pressure in clay after static pile sinking[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):88-96. (in Chinese))

[8] 芮瑞,郑晓敏,郑筱彦,等. 复合地基褥垫层工作性能的混合试验研究[J]. 建筑结构,2023,53(9):128-132. (RUI Rui,ZHENG Xiaomin,ZHENG Xiaoyan,et al. Hybrid test study of working performance of composite foundation cushion[J]. Building Structure,2023,53(9):128-132. (in Chinese))

[9] 蒲斯琦. 厚褥垫层刚性桩复合地基的加固特性和机理研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2023

[10] 刘宁,刘杰. 国内外标准中砂性土内摩擦角确定方法对比[J]. 水运工程,2021(1):42-47. (LIU Ning,LIU Jie. Comparison of methods for determining internal friction angle of sand by domestic and foreign standards[J]. Port & Waterway Engineering,2021(1):42-47. (in Chinese))

[11] 王虎刚,贾巍. 孔压静力触探在确定砂土内摩擦角中的应用[J]. 海岸工程,2020,39(2):124-129. (WANG Hugang,JIA Wei. Application of PCPT data to the determination of internal friction angle of sandy soil[J]. Coastal Engineering,2020,39(2):124-129. (in Chinese))

[12] AYALA J,FOURIE A,REID D. Improved cone penetration test predictions of the state parameter of loose mine tailings[J]. Canadian Geotechnical Journal,2022,59(11):1969-1980.

[13] MIR M,BOUAFIA A. Fast lagrangian analysis of the short-term bearing capacity of shallow foundations in clays on the basis of the cone penetration test[J]. Journal of Geomechanics and Geoengineering,2024,2:15-28.

[14] 林之恒,冯涛,孟少伟,等. 砂土内摩擦角与静探锥尖阻力的相关性研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(增刊2):639-644. (LIN Zhiheng,FENG Tao,MENG Shaowei,et al. Study on the relevance between angle of internal friction and cone resistance[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2018,14(Sup2):639-644. (in Chinese))

[15] BIAREZ J,GRESILLON J M. Essais et suggestions pour le calcul de la force portante des pieux en milieu pulvérulent[J]. Géotechnique,1972,22(3):433-450.

[16] 李波. 孔扩张理论研究及其在静力触探技术中的应用[D]. 大连:大连理工大学,2007.

[17] 王延斌,范文,徐栓强. 基于统一强度理论的柱形孔扩张问题研究[J]. 岩土力学,2003(增刊2):125-132. (WANG Yanbin,FAN Wen,XU Shuanqiang. Solution to expansion of cylindrical cavity based on the unified strength theory[J]. Rock and Soil Mechanics,2003(Sup2):125-132. (in Chinese))

[18] 肖亮. 基于扩孔理论的砂土静力触探贯入阻力的分析研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2019.

[19] 杜瀚洋. 软土中静力触探贯入机理及土体参数变化对触探影响研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2020.

[20] BOLTON M. A guide to soil mechanics[M]. London:Macmillan Press,1979.

[21] 蒋敏敏. 砂土原位测试理论研究和试验[D]. 南京:河海大学,2007.

[22] 曹子君,郑硕,李典庆,等. 基于静力触探的土层自动划分方法与不确定性表征[J]. 岩土工程学报,2018,40(2):336-345. (CAO Zijun,ZHENG Shuo,LI Dianqing,et al. Probabilistic characterization of underground stratigraphy and its uncertainty based on cone penetration test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(2):336-345. (in Chinese))

[23] ZHOU Hang,LIU Hanlong,ZHA Yahui,et al. A general semi-analytical solution for consolidation around an expanded cylindrical and spherical cavity in modified Cam Clay[J]. Computers and Geotechnics,2017,91:71-81.

[24] 周航,孔纲强,刘汉龙. 饱和土体中椭圆孔扩张弹塑性解[J]. 岩土工程学报,2014,36(5):983-988. (ZHOU Hang,KONG Gangqiang,LIU Hanlong. Elasto-plastic solution for elliptical cavity expansion in saturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(5):983-988. (in Chinese))