

高铁堑坡粉质黏土原位强度特性与应力历史效应

李晶晶^{1,2} 孔令伟^{†1} 凌贤长³

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 湖北 武汉 430071 ;

2.湖北理工学院 土木建筑工程学院 湖北 黄石 435003 ;

3.哈尔滨工业大学 土木工程学院 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要 :针对高速铁路堑坡防护工程不同施工工序中坡体强度参数选取问题 ,基于原位孔内剪切试验 ,依托哈佳高速铁路工程 ,通过成孔后施加不同法向应力水平的固结剪切和先施加较高法向应力(这里称为预加荷载 p_c)后卸载至某一应力水平再固结剪切等工况下的现场试验 ,获取堑坡粉质黏土强度特性随荷载施加方式的演化规律 .结果表明 :粉质黏土原位应力-位移曲线总体上呈弱硬化变形特征 ;应力历史对粉质黏土的抗剪强度影响显著 ,主要体现在黏聚力上 ,预加荷载由 0 kPa 增加到 400 kPa 时 ,土体黏聚力显著增加 ,增幅在 18.7~51.8 kPa 之间 ;内摩擦角降幅甚微 .粉质黏土的黏聚力和施加预加荷载后的黏聚力增量均与含水率呈线性负相关 ,但随着含水率的增加 ,支护荷载存在临界值 .黏聚力与预加荷载呈线性正相关 ,在实际工程中 ,可根据工程要求达到的安全系数 ,通过黏聚力和预加荷载的关系反推出所需预加荷载大小 ,从而为实际工程设计与施工提供借鉴参考 .

关键词 :孔内剪切试验 粉质黏土 高铁堑坡 应力历史

中图分类号 :TU43

文献标志码 :A

In-situ Strength Characteristics and Stress History Effect of Silty Soil on High-speed Railway Cut Slope

LI Jingjing^{1,2} KONG Lingwei^{†1} LING Xianchang³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering ,Institute of Rock and Soil Mechanics ,
Chinese Academy of Sciences ,Wuhan 430071 ,China ;

2. School of Civil Engineering and Architecture ,Hubei Polytechnic University ,Huangshi 435003 ,China ;

3. School of Civil Engineering ,Harbin Institute of Technology ,Harbin 150090 ,China)

Abstract :Considering the issue of reasonably selecting the strength index in different construction procedures of high-speed railway cut slope, borehole shear test (BST) was carried out on silty soil. The influence of loading addition way on in situ strength characteristics of silty soil was studied by adding different normal stress levels and unloading to a certain stress after adding a higher normal stress (herein called preloading), taking Hajia high speed railway as engineering background. The results show that in-situ stress-strain curves of silty soil generally present the variation characteristic of weak hardening. Preloading greatly contributes to the shear strength, mainly in cohesion. With the increase of preloading from 0 kPa to 400 kPa, cohesion increases distinctly in the increment of 18.7~51.8 kPa, while internal friction angle rarely varies. Both cohesion and its increment after the preloading are nearly

* 收稿日期 2018-02-18

基金项目 国家自然科学基金重点项目(41430634) Key Program of National Natural Science Foundation of China(41430634)

作者简介 李晶晶(1989—)女 浙江丽水人 中国科学院武汉岩土力学研究所博士研究生

† 通讯联系人 E-mail lwkong@whrsm.ac.cn

negatively linear to the water content of silty soil, but a critical preloading may occur when water content reaches to a certain value. The cohesion is positively linear to preloading, which should be fully used to back calculate the required preloading according to the safety factor that the project should satisfy. It provides a reference to engineering design and construction.

Key words borehole shear test; silty soil; high-speed railway cut slope; stress history

随着我国“三纵两横”城市化战略格局逐渐建立,高速铁路等现代化交通体系网已延伸至我国的各个城区,甚至是气候环境条件复杂多变的东北高寒地区也已经享受到了福祉。2012年12月哈大高速铁路客运专线的开通运营意味着我国东北三省进入了“高铁时代”,人们在享受高速铁路带来的舒适便捷和区域经济发展机遇的同时,最关心的就是安全问题,列车自身的安全性、高铁路基变形稳定性、以及与之密切相关的高铁路堑边坡稳定性问题。哈(尔滨)-佳(木斯)高速铁路宾县段路基最大开挖深度达到24.93 m,意味着路堑边坡最大坡高为24.93 m,近地表地层主要为粉质黏土,为土质高边坡。高边坡工程失稳频发,加上复杂多样的环境条件和地质条件,设计和施工过程如若处理不当,极易造成工程事故,延误施工工期的同时,严重威胁着人民的生命财产安全。

准确获取土体强度指标是坡体稳定性分析的关键,然而至今,分析所用的强度指标多来自室内试验^[1-3](如直剪试验或三轴剪切试验),室内试验能很好控制边界条件,同时也能获取不同应力路径下土体强度参数演化规律,用于不同工况下坡体或基坑的稳定性分析。如陈善雄等^[4]研究不同卸荷应力路径下原状粉质黏土变形特性,以模拟基坑开挖过程中土体经历的不同应力路径。但是,钻探取样以及室内制样的过程势必对土样产生一定的扰动,且由于室内试验采用的试样尺寸局限性导致代表性差,以及经验准则的人为性,往往会导致获得的土体剪切强度指标离散性大^[2,5];再者,室内应力路径试验只能大概模拟土体可能经历的应力历史。而原位试验方法可以基本保持土体的天然结构,天然含水量以及天然应力状态,测定其工程力学性质指标,可避免取样过程中应力释放的影响,获得试验结果更符合实际情况。目前,原位测试技术已经在岩土工程勘察领域广泛应用^[6-10],沈珠江院士认为:要取得可靠的土质参数,只有通过原位测试。但原位测试不同于室内简单应力条件下的试验,大多原位测试不能从试验结果直接求出某一参数,而是通过反馈分析的办法间接求出参数^[11],如扁铲侧胀试验、静力触探试

验等。显然,这种间接地获取力学指标的方法存在一定的局限性。而以往直接获取土体原位强度指标的试验为现场大型直剪试验^[5],其仪器体积庞大、操作繁琐,且大多只能对浅层土体进行试验,不便于应用于工程实际中。

孔内剪切试验(borehole shear test,简称BST)是一种在现场条件下获取土体强度力学指标,且可用于研究应力历史对土体原位力学性状影响的原位试验方法。它的原理是通过测定不同法向应力下土体抗剪强度,利用库仑理论直接得到土体抗剪强度指标(黏聚力 c 和内摩擦角 φ),试验结果不需要经验公式拟合修正,其加载方式分为逐级加载剪切和单级加载剪切,由于逐级加载剪切是对同一土体进行试验,不存在试验对象之间的差异性,与此同时,其固结时间为累计时间,能节约大量的试验时间,试验结果可靠^[12-13],从而受到了研究人员的青睐。BST具有操作便捷、可重复性高、试验时间短、准确性高的优点,广泛适用于黏性土、砂土、软岩等地层,尤其适用于不易取得原状样和地层性质变化较大的坡体的稳定性分析^[12]。Lu等^[14]、Ashlock等^[15]将BST用于原位非饱和土研究,分析强度指标与基质吸力关系,Yang^[13]对超固结裂土滑坡进行BST,试验结果成功应用于滑坡分析和治理中。然而,BST在我国岩土工程中的应用研究较少。

本文依托哈佳高速铁路堑坡工程背景,开展不同法向荷载施加模式下的原位孔内剪切试验,研究应力历史对该堑坡粉质黏土抗剪强度指标的影响,为边坡工程土体力学参数的选取和施工工序的确定提供参考。

1 试验方案与试验方法

堑坡防护工程实际施工过程中存在开挖滞后支护(下文简称为滞后支护)、及时支护与超前支护方式,根据BST需预先成孔的特点分别模拟滞后支护和及时支护两种施工工序。滞后支护即成孔后直接施加不同法向应力水平进行固结剪切,得到不同法向应力对应的抗剪强度,获取土体抗剪强度指标;

及时支护则通过成孔后先施加较高法向应力(这里称为预加荷载 p_r) 固结后卸载至某一应力水平再进行固结剪切,得到由 p_r 卸载至不同应力水平对应的抗剪强度试验来模拟,获取土体抗剪强度指标.因此 $p_r=0$ 表示滞后支护 $p_r>0$ 即为及时支护.

原位试验场地位于黑龙江省哈尔滨市宾西镇哈佳高速铁路旁(图 1),高速铁路边坡设计开挖深度为 24.93 m,已开挖至 12.0 m,确定试验深度与现有坡高一致,试验点距高速铁路边坡 4.0~10.0 m,选取有代表性的地层进行钻探和取样,取样点距试验点 2.0 m.

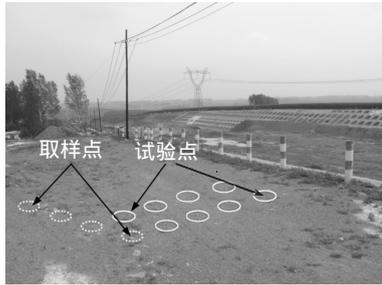
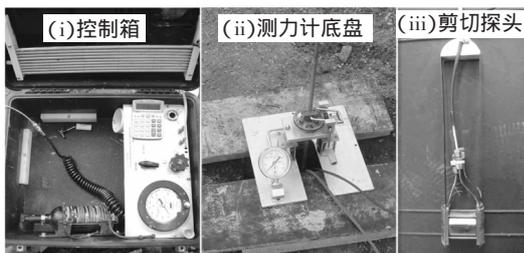


图 1 原位试验场地
Fig.1 In situ test site

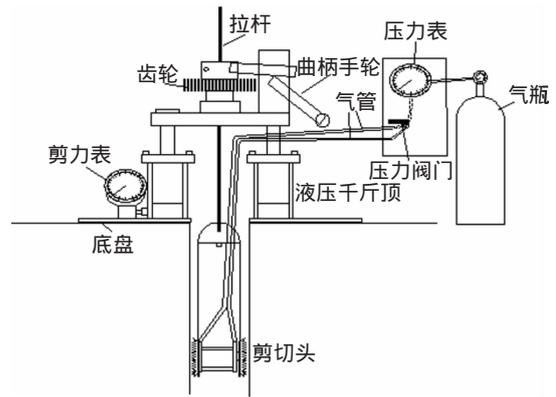
由勘察资料可知,该处地层由上到下依次为粉质黏土层、粉砂层、细砂层,地下水为第四系孔隙潜水,地下水埋深 2.0~31.5 m,地下水对混凝土有侵蚀性,最大冻结土深度为 2.05 m.根据《公路土工试验规程》对试验深度内土样进行基本物性试验,得到相应的物理指标为:密度 $\rho=1.87\sim 2.05\text{ g/cm}^3$,含水率 $w=18.9\%\sim 30.9\%$,相对密度 $G_s=2.62\sim 2.73$,塑限 $w_p=19.1\%\sim 22.7\%$,液限 $w_L=31.2\%\sim 39.2\%$,塑性指数 $I_p=10.9\%\sim 16.6\%$,液性指数 $I_L=-0.13\sim 0.89$,可以看出试验范围内土层为粉质黏土.

在试验场地内共进行了 8 组孔内剪切试验,图 2 为 BST 试验设备及其测试系统示意图,试验具体步骤如下:

1)成孔后,将剪切头置于孔内预设试验深度,通过外接气源对土体施加垂直孔壁方向的法向应力 σ .



(a) 孔内剪切试验设备



(b) 孔内剪切试验测试系统示意图

图 2 孔内剪切试验设备及测试系统示意图

Fig.2 Device of borehole shear test and the sketch of its testing system

2)经过充分的固结时间^[12,16](20 min)后转动曲柄手轮使拉杆带动剪切头向上运动,对土体施加平行于孔壁方向向上的剪应力 q ,记录此过程中土体位移 s 与相应的 q 值,直到土体破坏.

3)将剪切头置于原试验深度,重复步骤 1)和 2),不同的是此时增加 σ 且固结时间减为 10 min.得到不同 σ 下的抗剪强度 τ ,通过库仑理论得到土体的抗剪强度指标.

4) $p_r>0$ 的试验过程为成孔后立即对试验深度土体施加 p_r ,固结 20 min 后卸载到一定值,重复步骤 2)和 3). $p_r>0$ 包括 $p_r=200,300,400\text{ kPa}$ 这 3 个预加荷载,以期得到粉质黏土原位强度指标随预加荷载大小演化规律.具体试验方案见表 1.试验剪切速率采用 0.05 mm/s ^[17].

表 1 孔内剪切试验方案

Table 1 Schemes of borehole shear test		kPa
工况	预加荷载	法向应力
滞后支护	0	25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400
	200	25, 50, 100, 200
及时支护	300	38, 75, 150, 300
	400	50, 100, 200, 400

2 试验结果与分析

根据钻探揭露与基本物性试验结果,将试验深度内的土体按含水率 w 划分为 4 组: $w<20\%$ 、 $20\%<w<22\%$ 、 $22\%<w<25\%$ 和 $w>25\%$,现场孔内剪切试验的 $q-s$ 曲线整理如图 3 所示.

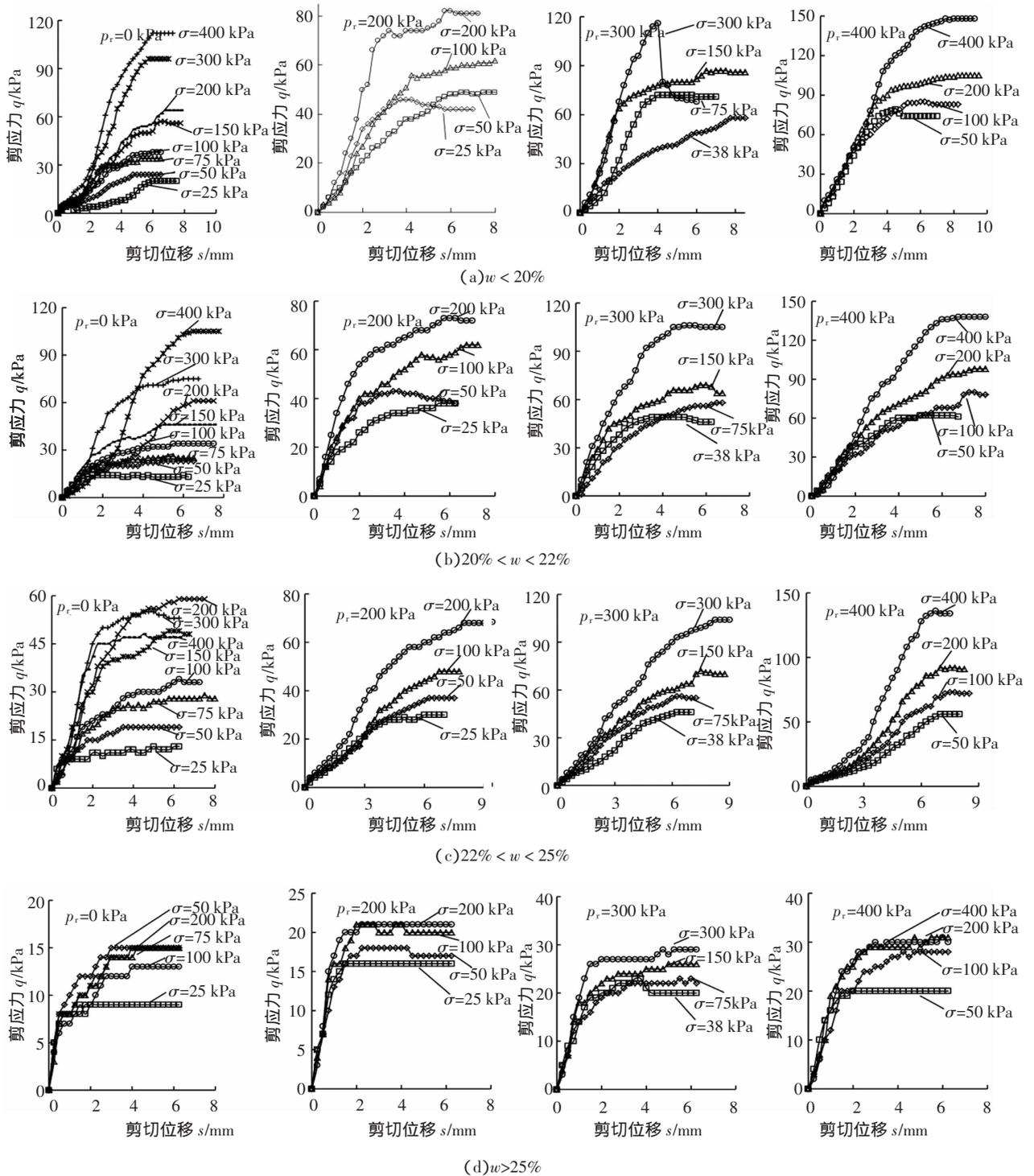


图3 不同预加荷载水平下粉质黏土剪应力-位移关系曲线

Fig.3 Relationship between stress and displacement under different preloadings of the silty soil

由图3可以看出该区粉质黏土在不同预加荷载水平下的 $q-s$ 曲线总体上呈弱硬化变形特征。个别工况下,土体的 $q-s$ 曲线呈现软化变形特征,如 $w < 20\%$ 土体在 $p_r = 200 \text{ kPa}$ 、 $\sigma = 25 \text{ kPa}$ 时的 $q-s$ 曲线,但其峰值强度和峰后强度相差不大。而 $w < 20\%$ 土体在 $p_r = 300 \text{ kPa}$ 、 $\sigma = 300 \text{ kPa}$ 时的 $q-s$ 曲线,在位

移约为 4 mm 时剪应力发生了陡降,这可能是由于试验土层的上方一定距离的土体强度相对较小,剪切过程中,剪切头不断上升,经过一定位移后,进入两层土的交界处并向强度较小土层移动,从而使位移达到一定值后,测得的强度突然变小(由现场钻探揭露,存在软硬互层)。

图 4 为不同 p_r 影响下的 τ - σ 关系曲线, 可以看到 τ 与 σ 总体上呈较好的线性关系. 对比分析图 4 (a)~(c) 可以发现, 相同 σ 作用下, 土体的 τ 值随着 p_r 的增大而增大, 这是由于土体经历了较大的预加荷载 ($p_r > 0$ 时) 的压密作用后, 颗粒间更加紧密, 使抗剪强度增强. 然而 $w > 25\%$ 土体 $p_r = 200, 300$ 和 400 kPa 的 τ - σ 曲线几乎为水平线, 这可能是由于该土层较软, 土体呈可塑~软塑状态 (I_L 为 $0.38 \sim 0.89$), 在

较高的预加荷载作用后卸载, 土体塑性变形很大, 使得剪切头完全膨胀时施加在土体上的有效压力几乎恒定, 因此出现了 τ 值随着 σ 的增加几乎不变的现象. 因此, 由于该剪切头膨胀程度的限制, 不适合在较软土体进行施加预加荷载再卸载的试验; 同时, 也说明了在土质较软地层施加预加荷载要充分考虑到土体的塑性变形, 避免因沉降过大或不均匀沉降而引发工程灾害.

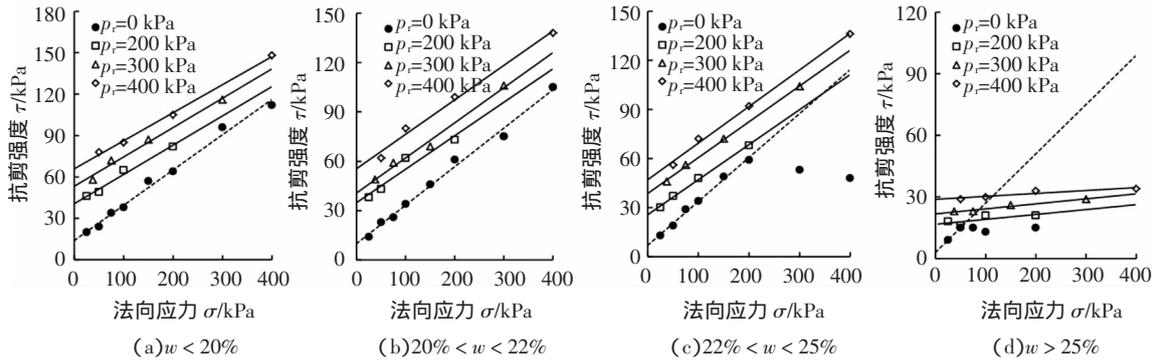


图 4 预加荷载影响下粉质黏土抗剪强度与法向应力关系曲线

Fig.4 Relationship between shear strength and normal stress under different preloadings of the silty soil

由 BST 得到哈佳高速铁路堑坡的粉质黏土在不同工况下的抗剪强度指标 (c 和 φ) 如表 2 和图 5 所示. 预加荷载对强度指标影响显著, 随着 p_r 的增加, 土体 c 值增加显著, φ 值总体上呈减小趋势; c 值增幅在 $18.7 \sim 51.8$ kPa 之间, 而 φ 值变化幅值总体上较小, 在 $1.13^\circ \sim 2.94^\circ$ 之间. 从图 5(a) 可以发现, 该处粉质黏土的黏聚力 c 随预加荷载 p_r 变化关系可用线性关系表示, 即

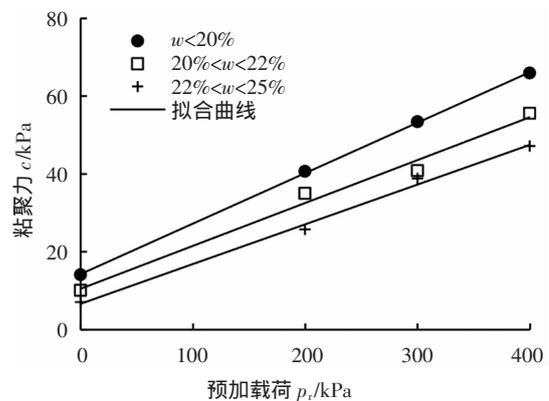
$$c = Ap_r + B \quad (1)$$

式中 A, B 为拟合参数.

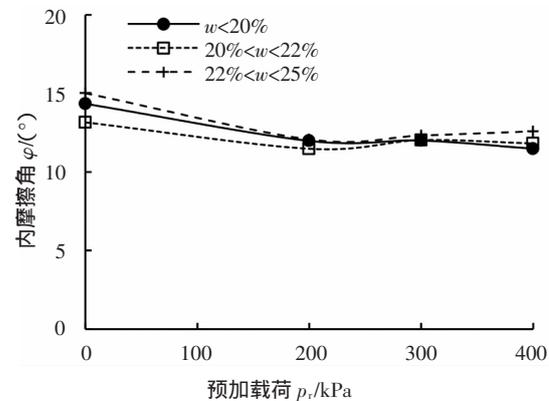
表 2 孔内剪切试验抗剪强度指标

Tab.2 Shear strength index from BST

组别	p_r /kPa	c /kPa	φ ($^\circ$)
$w < 20\%$	0	14.1	14.34
	200	40.6	11.98
	300	53.3	12.00
	400	65.9	11.48
$20\% < w < 22\%$	0	10.0	13.16
	200	35.0	11.48
	300	40.8	12.03
	400	55.5	11.82
$22\% < w < 25\%$	0	12.3	15.01
	200	25.7	12.07
	300	38.8	12.32
	400	47.1	12.59
$w > 25\%$	0	3.0	13.50



(a) 黏聚力随预加荷载变化曲线



(b) 内摩擦角随预加荷载变化曲线

图 5 粉质黏土抗剪强度指标随预加荷载变化曲线

Fig.5 Relationship between shear strength index and preloading of the silty soil

不同深度土体 c 与 p_r 关系拟合曲线参数如表 3 所示,可以看到其线性相关系数达到 0.98 以上.

表 3 黏聚力 c 与预加荷载 P_r 关系拟合参数

Tab.3 Fitting parameters between cohesion and preloading

组别	A	B/kPa	线性相关系数 R^2
$w < 20\%$	0.129 8	14.283	0.999 8
$20\% < w < 22\%$	0.110 3	10.513	0.986 4
$22\% < w < 25\%$	0.102 1	6.682	0.995 1

从图 5(a)还可以看出 p_r 相同时 c 值随着 w 的增加而呈现减小趋势,取含水率区间的平均值($w < 20\%$ 组仅含 w 为 18.94%的土层,故取 18.94%为该区间的平均值),整理得到不同 p_r 下 c 值随 w 变化曲线如图 6 所示,发现 c 与 w 呈较好的线性负相关,含水率从 18.94%增加到 23.5%,不同 p_r 的黏聚力最大降幅为 7.0~18.8 kPa.施加预加荷载后,土体的黏聚力增量(即 $p_r > 0$ kPa 与 $p_r = 0$ kPa 间黏聚力的差值)与含水率也近似地呈线性负相关(见图 7),

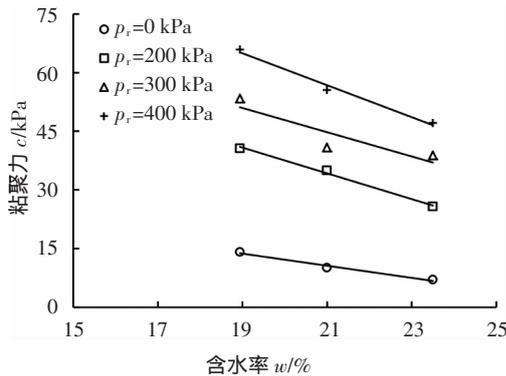


图 6 粉质黏土黏聚力随含水率变化曲线
Fig.6 Relationship between cohesion and water content of the silty soil

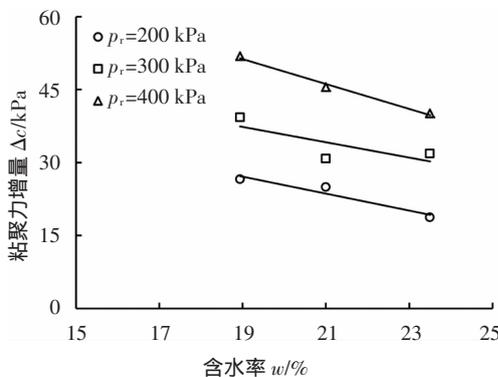


图 7 粉质黏土黏聚力增量随含水率变化曲线
Fig.7 Relationship between cohesion increment and water content of the silty soil

说明欲达到相同的支护效果,如要求坡体的安全系数相同,含水率越高的粉质黏土堑坡所需要的支护荷载越大.但从表 3 可以看出,随着含水率的增加, A 值逐渐减小,即 c 与 p_r 关系曲线逐渐变缓,说明可能存在临界荷载,当荷载达到该值后,土体的强度不再随荷载值的增加而增大.

3 预加载荷作用机制探讨与工程意义

粉质黏土的抗剪强度随着预加荷载的增加而增大,究其原因是经历较大外荷载压密作用后,土体被压得越密实,颗粒之间的接触点越多,因而结构的接触连结强度也有所增强,仅从物理压密的角度来看,已固化的结构连结强度不会被破坏^[18],即使是短暂的应力状态也会在峰值荷载卸除后在一定程度上保留.从不同应力历史作用下土体孔隙比随外荷载变化曲线(图 8)可以看出,当经历了较大外荷载作用后卸载,土体所处状态位于曲线中的卸载段(如图 8 中的 A_1, A_2, A_3 点),经历的外荷载越大(如 $p_4 > p_3 > p_2$),卸载至相同压力后,孔隙比越小(如 $e_{A3} < e_{A2} < e_{A1}$),因此,土体越密实,抗剪强度越大.

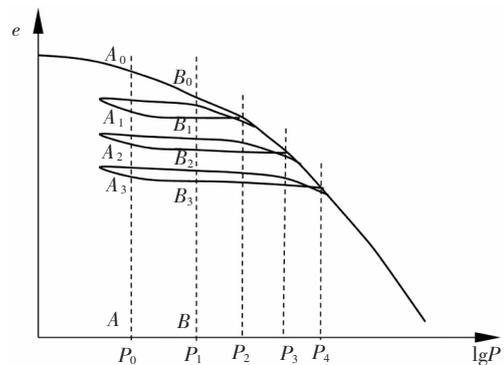


图 8 应力历史影响下的孔隙比随外荷载变化曲线
Fig.8 Void ratio varies with pressure under different stress history

应力历史(施加预加荷载与否和施加预加荷载的大小)对粉质黏土抗剪强度指标影响较大,尤其是对黏聚力的影响显著,说明施工工序和支护荷载影响着堑坡的稳定. $p_r = 0$ kPa 相当于开挖滞后支护(或不支护)的施工工序, $p_r > 0$ kPa 相当于开挖后及时支护的施工工序,如对路堑边坡的开挖部分立即采用土钉墙、锚杆框架梁^[19]等支护结构进行支护.从试验结果来看,采取及时支护坡体将更稳定,支护荷载随含水率的增加可能存在某一临界值,应根据含水率大小,同时,综合考虑工程造价和施工工艺

来确定支护荷载水平。粉质黏土的黏聚力与预加荷载呈线性正相关,在实际工程堑坡稳定性分析中,可以根据工程所需要满足的安全系数计算出对应的土体抗剪强度指标,利用式(1)和表3反推出所需的预加荷载大小,从而为实际工程设计与施工提供借鉴参考。

4 结论与建议

1)粉质黏土应力-位移关系曲线总体上呈现弱硬化变形特征;应力历史效应对粉质黏土的抗剪强度影响较大,施加预加荷载后,粉质黏土强度显著提高。

2)预加荷载由0 kPa增加到400 kPa时,粉质黏土的黏聚力明显增加,增幅在18.7~51.8 kPa之间;内摩擦角总体上呈减小趋势,且变化幅值较小,在 1.13° ~ 2.94° 之间。

3)粉质黏土的黏聚力和施加预加荷载后的黏聚力增量均与含水率呈线性负相关,说明欲达到相同的支护效果,含水率较高的堑坡需要较大的支护荷载,然而随着含水率的增加,支护荷载存在临界值。

4)黏聚力与预加荷载近似地呈线性关系,实际工程坡体稳定性分析中,可以根据工程要求达到的安全系数计算出所需的土体抗剪强度指标,通过黏聚力和预加荷载关系反推出所需的预加荷载大小,从而指导实际工程设计与施工。

参考文献

- [1] 廖红建,李涛,彭建兵.高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究[J].岩土力学,2011,32(7):1939—1944.
LIAO H J, LI T, PENG J B. Study of strength characteristics of high and steep slope landslide mass loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7):1939—1944. (In Chinese)
- [2] 张玉成,杨光华,苏卜坤,等.土质边坡土体抗剪强度室内外试验研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2007,22(3):45—49.
ZHANG Y C, YANG G H, SU B K *et al.* Laboratory and field testing study on shear strength of soil slopes[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2007, 22(3):45—49. (In Chinese)
- [3] 张永杰,曹文贵,赵明华.岩土抗剪强度参数确定的模糊拟合法[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(6):6—10.
ZHANG Y J, CAO W G, ZHAO M H. Fuzzy fitting method to determine the shear strength parameters of geomaterial [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35(6):6—10. (In Chinese)
- [4] 陈善雄,凌平平,何世秀,等.粉质黏土卸荷变形特性试验研究[J].岩土力学,2007,28(12):2534—2538.
CHEN S X, LING P P, HE S X *et al.* Experimental study on deformation behavior of silty clay under unloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12):2534—2538. (In Chinese)
- [5] 杨果林,滕珂,谢兰芳.膨胀土强度的室内直剪和原位推剪对比试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(6):1952—1959.
YANG G L, TENG K, XIE L F. Experimental study of direct shear and in situ clipper on strength of expansive soil[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(6):1952—1959. (In Chinese)
- [6] ZHANG H, ZHANG J, SU K *et al.* In-situ pressuremeter test in warm and ice-rich permafrost[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 83:115—121.
- [7] CARROLL R, LONG M, WARD D. Use of CPTU and SDMT to characterise silty soil[C]//Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4. London: Taylor & Francis Group, 2013:241—249.
- [8] YU H S, COLLINS I F. Analysis of self-boring pressuremeter tests in overconsolidated clays [J]. Geotechnique, 1998, 48(5):689—693.
- [9] RATNAM S, SOGA K, MAIR R J *et al.* Self-boring pressuremeter permeability measurements in bothkennar clay[J]. Geotechnique, 2002, 52(1):55—60.
- [10] HOULSBY G T, SCHNAID F. Interpretation of shear moduli from cone pressuremeter tests in sand [J]. Geotechnique, 1994, 44(1):147—164.
- [11] 沈珠江.原状取土还是原位测试——土质参数测试技术发展方向刍议[J].岩土工程学报,1996,18(5):90—91.
SHEN Z J. Sampling in situ or in situ test—a rustic opinion of development in testing technique of soil parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5):90—91. (In Chinese)
- [12] BECHTUM T. Automation and further development of the borehole shear test[D]. Ames: College of Civil Engineering, Iowa State University, 2012:1—8.
- [13] YANG J F J. Role of lateral stress in slope stability of stiff overconsolidated clays and clayshales [D]. Ames: College of Civil Engineering, Iowa State University, 1987:117—142.
- [14] LU N, LIKOS W J. Unsaturated soil mechanics[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004:415—461.
- [15] ASHLOCK J C, LU N. Interpretation of borehole shear strength tests of unsaturated loess by suction stress characteristic curves[J]. Geotechnical Special Publication, 2012, 225:2562—2571.
- [16] DRNEVICH V P. Suggested method for performing the borehole shear test[J]. Geotechnical Testing Journal, 1987, 10(1):19—25.
- [17] WINELAND J D. Borehole shear device[C]//Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties. Raleigh: American Society of Civil Engineers, 1975:511—522.
- [18] 高国瑞.近代土质学[M].北京:科学出版社,2013:205.
GAO G R. Neoteric soil geotechnology[M]. Beijing: Science Press, 2013:205. (In Chinese)
- [19] 易伟建,夏玲琼.考虑反演及桩土相互作用的拟动力试验方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(5):1—7.
YI W J, XIA L Q. Inverse analysis method for pseudo-dynamic test with pile-soil interaction[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(5):1—7. (In Chinese)