

剪切速率对 EPS 颗粒混合轻量土 抗剪强度的影响规律研究

杨凯旋^{1,2}, 侯天顺^{1,2}, 王琪³, 骆亚生²

(1. 西安科技大学 西安市岩土与地下工程重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710011)

摘要: 为了确定剪切速率对 EPS 颗粒混合轻量土抗剪强度的影响,通过直剪试验研究了素土和不同配比较轻量土在剪切速率为 0.02, 0.1, 0.2, 0.8, 2.4 mm/min 时的抗剪强度特性。试验结果表明:轻量土的剪应力-剪切位移关系曲线中存在硬化型和软化型两种形态,主要受 EPS 颗粒掺入比、水泥掺入比、法向应力的控制,素土的剪应力-剪切位移关系曲线形态为硬化型。剪切速率越大,试样达到破坏或稳定阶段历时越短。不同剪切速率下,轻量土的抗剪强度包线多为折线型,与传统结构性土体包线类似。作为一种结构性土体,配比对轻量土抗剪强度的影响是决定性的,抗剪强度、黏聚力和内摩擦角随水泥掺入比的增大、EPS 颗粒掺入比的减小而增大。剪切速率对轻量土抗剪强度、黏聚力和内摩擦角影响较小,对素土影响较大。随着剪切速率增大,轻量土抗剪强度、黏聚力和内摩擦角变化幅度较小,无显著变化规律,素土抗剪强度、黏聚力和内摩擦角逐渐减小。

关键词: EPS 颗粒轻量土; 抗剪强度; 剪切速率; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号:TV16

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)05-0200-08

Influence laws of shear rate on shear strength of EPS beads light weight soil

YANG Kaixuan^{1,2}, HOU Tianshun^{1,2}, WANG Qi³, LUO Yasheng²

(1. Xi'an Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Hanjiang to Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an 710011, China)

Abstract: In order to clarify the influence of shear rate on shear strength of expanded polystyrene (EPS) beads light weight soil, the shear strength characteristics of remolded soil and light weight soil with different mixing ratios at shear rates of 0.02, 0.1, 0.2, 0.8 and 2.4 mm/min are studied by direct shear tests. The results show that there are two types of relation curves between shear stress and shear displacement for light weight soil, which are strain hardening and strain softening, and they are subject to EPS beads mixing ratio, cement mixing ratio and normal stress. The type of shear stress - shear displacement relation curves of remolded soil is strain hardening. The higher the shear rate, the less time it takes for the samples to reach shear failure or plastic flow stage. Under different shear rates, the shear strength envelopes of light weight soil are mostly broken line type, which are similar to those of the conventional structural soil. Mixing ratio has a decisive influence on the shear strength of EPS beads light weight soil, because it is also a kind of structural soil. Its shear strength, cohesion and internal friction angle increase with the increase of cement mixing ratio and the decrease of EPS beads mixing ratio. The shear rate has little effect on the shear strength, cohesion and internal friction angle of the light weight soil, but has a

收稿日期:2022-01-19; 修回日期:2022-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51509211);中国博士后基金项目(2016M602863);陕西省留学人员科技活动择优资助项目(2018031);陕西省自然科学基金基础研究计划引汉济渭联合基金项目(2021JLM-51);西安市岩土与地下工程重点实验室开放基金项目(XKLGUEKF21-02)

作者简介:杨凯旋(1994-),男,陕西商洛人,硕士研究生,主要从事轻量土研究工作。

通讯作者:侯天顺(1981-),男,湖北郧西人,博士,副教授,主要从事岩土力学、地基基础工程与地质灾害防治方面的教学与科研工作。

great influence on the remolded soil. With the increase of shear rate, the shear strength, cohesion and internal friction angle of the light weight soil only change slightly, and there are no significant change laws; whereas those of the remolded soil decrease gradually.

Key words: EPS beads light weight soil; shear strength; shear rate; cohesion; internal friction angle

1 研究背景

科学技术的进步和社会的发展在给人类生活带来巨大便利的同时也制造了诸多环境问题,由塑料制品造成的白色污染便是其中之一^[1],塑料垃圾的分类和回收利用受到人们广泛的关注。发泡聚苯乙烯(expanded polystyrene, EPS)颗粒混合轻质土(以下简称轻质土)是由原料土、EPS颗粒、水泥和水拌和而成的。因为轻质土有保温隔热和轻质高强的特点,还具备自立性、易施工等优点,所以被广泛地应用于墙背回填、管道填埋、软土地基不均匀沉降处理、旧路扩建、人造漂浮景观等工程中。这些都属于塑料废弃物回收利用在土木工程领域的成功实践^[2-3]。

20世纪70年代,挪威、荷兰等国家已经开始了对轻质填土材料的研究工作^[4-6]。由于轻质土具有优良的工程特性,自21世纪初从日本引入中国起,在中国便掀起了对轻质土研究的热潮。在强度特性研究方面,沙玲等^[7]通过不固结不排水三轴试验对影响淤泥再生混合轻质土强度特性的因素进行分析,发现EPS颗粒体积分数、水泥掺入比、养护龄期及围压等因素对轻质土强度特性均产生影响。李明东等^[8]研究了循环荷载下泡沫塑料混合轻质土的力学性质,发现其应力-应变关系有稳定型和破坏型两种,出于安全考虑,建议循环荷载下的强度宜取为无侧限抗压强度的0.75倍,即临界加载比宜取0.75。在变形特性研究方面,Hou^[9]通过室内固结试验研究了轻质土的压缩特性,试验结果显示轻质土的侧限应力-应变关系曲线形态主要呈S型,研究还发现轻质土90%的沉降量在1min之内完成,并且沉降量与时间的关系为双曲线关系,这是因为轻质土的沉降主要是瞬时沉降和主固结沉降。黎冰^[10]通过室内动三轴试验研究了在动荷载作用下的EPS颗粒混合轻质土(lightweight clay EPS beads soil, LCES)的动变形特性,发现LCES的动应力-应变关系呈双曲线关系,保持动应力不变,轻质土的应变随着水泥含量和围压的增大而减小,EPS颗粒掺入比对LCES的动力变形特性的影响相对较小。在渗透特性研究方面,刘汉龙等^[11]通过室内渗透试验和三轴试验研究了不同固结压力下发泡聚苯乙烯轻质混合土的渗透特性,发现轻质土渗透系数随EPS颗粒含量的降低而降低,并随着水泥掺入比、固结压力、龄期的增大而降低,

渗透系数与固结压力近似呈幂函数关系。在击实特性研究方面,朱伟等^[12]、李明东等^[13]发现对于轻质土这种新型土工材料,在击实过程中,击实次数、击实能量、击实含水率对其密度和强度有很大影响,存在最优的击实含水率和最大干密度。Hou^[14]、侯天顺等^[15]在前人研究的基础上,通过理论推导建立了轻质土击实密度模型和最优含水率模型,并设计试验对模型进行检验,发现模型预测值与实测值基本一致,证明了该模型可应用于指导轻质土的配方设计与压实施工。

抗剪强度是评价地基稳定性、计算地基承载力的重要指标。Li等^[16]通过固结排水三轴试验研究了轻质土的抗剪强度特性,发现随着水泥掺量的增加和EPS颗粒掺量的减小,轻质土抗剪强度、黏聚力、内摩擦角逐渐增大。侯天顺等^[17]开展三轴试验发现轻质土应力-应变关系曲线有软化型和硬化型两种,提出软化与硬化是剪胀、剪缩的外在表现,建议软化型曲线宜采用峰值主应力差标准,硬化型曲线宜采用轴向应变15%标准,抗剪强度破坏包线形态受配比与围压控制。EPS颗粒的粒径对轻质土的工程性质和工程造价有较大的影响,为了研究EPS粒径对轻质土抗剪强度的影响规律,侯天顺等^[18]对EPS颗粒体积比为40%的3种EPS粒径轻质土开展了直剪试验,发现随着EPS粒径的增大,轻质土抗剪强度、黏聚力逐渐减小,内摩擦角无显著变化规律。提出了固化土、EPS颗粒3界面接触抗剪强度模型,从理论上阐明了抗剪强度随粒径增大而衰减的原因,建议在实际生产中优先选择3~5mm粒径的EPS颗粒。沙玲等^[7]对比了三轴试验和直剪试验的结果,发现淤泥再生混合轻质土的抗剪强度发展机理与一般黏性土类似,其强度为黏聚分量、剪胀分量和摩擦分量之和。

上述成果从多角度研究了轻质土的物理力学性质及其影响因素,如:轻质材料的类别、原料土的类别、水泥掺量、EPS颗粒掺量、含水率、围压、击实功等^[19-20],也有学者从击实特性与土压力特性方面对轻质土进行研究^[21-22]。然而,有关剪切速率对轻质土抗剪强度的影响目前鲜有报道。在不同的施工条件和施工周期下,往往产生不同的剪切速率^[23-24]。不同剪切速率下,由于剪切面上土骨架的应变率不同以及土体渗透性和排水效果的差异,导致岩土体

抗剪强度不尽相同^[25-26]。当轻量土作为临河路基填筑材料和软土地基处理材料时,研究饱和和轻量土在不同剪切速率时的抗剪强度特性具有重要意义。基于此,本文采用直剪仪对不同配比的 EPS 颗粒混合轻量土在剪切速率分别为 0.02,0.1,0.2,0.8,2.4 mm/min 时开展直剪试验,对比不同配比轻量土在 5 种剪切速率下抗剪强度的异同,阐明剪切特性产生差异的原因,以期为轻量土在相关岩土工程领域的应用提供理论参考。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验原料土为陕西省杨凌地区的黄土,取土深度为 4~6 m,土质为低液限粉质黏土。经过标准轻型击实试验测得原料土的最大干密度为 1.70 g/cm³,最优含水率为 20.60%,其他基本参数见表 1。固化剂为复合硅酸盐水泥,型号为 P·C32.5R;轻质材料采用 EPS 球型颗粒,球粒的直径为 3~5 mm,经过测量其纯颗粒密度为 0.010 6 g/cm³,堆积

密度为 0.006 5 g/cm³;试验中使用的水均为普通自来水。

2.2 试样制备

将原料土碾碎、过 2 mm 筛后放入 105 ℃ 烘箱中烘 24 h,以烘干备用。根据试验方案的配比按如下步骤进行制样:(1)将干土与水泥混合,用调土刀拌和均匀。(2)将称好的水均匀地喷洒入水泥土中,并充分搅拌。(3)加入 EPS 颗粒,再次搅拌均匀。(4)采用质量控制,称量预定重量的轻量土加入到高 20 mm,直径 61.8 mm 的环刀中,用千斤顶进行压样法制样。(5)试样养护。将带环刀的样品放入标准养护箱(温度为 20±2 ℃,湿度为 95%)内养护 28 d,为了避免对试样造成破损,养护期间不脱模。(6)试样饱和。由于抽气饱和后,EPS 颗粒发生明显的干瘪收缩,高泡沫掺量的试样损坏明显,所以本文对所有养护成型的试样均采用浸水 24 h 的方式进行饱和^[18]。

2.3 试验方案

试验方案如表 2 所示。

表 1 原料土的基本物理性质参数

天然密度 ρ / (g · cm ⁻³)	比重 G_s	天然含水 率 w /%	容重 γ / (kN · m ⁻³)	塑限 w_p /%	液限 w_L /%	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	孔隙比 e
1.75	2.72	19.83	17.51	21.30	37.44	16.14	-0.09	0.86

表 2 直剪试验方案

项目	方案 1	方案 2	方案 3(素土)
水泥掺量 a_c /%	15	10,15,20	0
EPS 颗粒掺量 a_e /%	0.32,0.81,1.90	0.81	0
龄期 T /d	28	28	0
含水率 w /%	最优含水率 w_{op}	w_{op}	w_{op}
压实度 D_r /%	90	90	90
法向应力 σ /kPa	50,100,150,200	50,100,150,200	50,100,150,200
剪切速率 v / (mm · min ⁻¹)	0.02,0.1,0.2,0.8,2.4	0.02,0.1,0.2,0.8,2.4	0.02,0.1,0.2,0.8,2.4

表 2 中 EPS 颗粒掺量 a_e 、水泥掺量 a_c 、含水率 w 均以干土的质量 m_s 为标准。现定义 EPS 颗粒掺量为 $a_e = m_e/m_s \times 100\%$,其中 m_e 为 EPS 颗粒的质量;水泥掺量 $a_c = m_c/m_s \times 100\%$,其中 m_c 为水泥的质量;含水率 $w = m_w/m_s \times 100\%$,其中 m_w 为水的质量,定义 EPS 颗粒体积比为 $b_e = v_e/v \times 100\%$ ^[9],其中 v 为试样体积, v_e 为 EPS 纯颗粒体积。表中 EPS 颗粒 3 种掺量 0.32%、0.81%、1.90% 所对应的 EPS 颗粒体积比 b_e 分别为 30%、50%、70%。本试验着重研究各配比较轻量土在最优含水率 w_{op} 、压实度为 90% 时的剪切特性。

根据文献[12]~[14]的研究结果,当固化剂水泥掺量为 15%、轻量土的 EPS 颗粒掺量分别为 0.32%、0.81%、1.90% 时,采用的最优含水率分别为 30.74%、34.87%、38.84%;EPS 颗粒掺量为 0.81% 时,水泥掺量为 10%、20% 的轻量土对应的最优含水率分别为 33.57%、36.07%。设置素土样进行对照试验。为保证试验结果具有一般性,每个配比的样品制备 2 组,每组 4 个,取平均值作为试验结果。

将养护、饱和完成的试样,在法向应力分别为 50、100、150、200 kPa 下,使用南京宁曦土壤仪器有

限公司生产的DSJ-3型电动四联等应变直剪仪按照规范^[27]进行快剪试验,剪切速率分别为0.02、0.1、0.2、0.8、2.4 mm/min,其中剪切速率0.2 mm/min通过手动控制。若剪应力-剪切位移关系曲线无峰值时,取剪切位移为4 mm时对应的剪应力为抗剪强度;若有峰值时,取峰值为抗剪强度。

3 试验结果与分析

3.1 剪切速率对土体剪应力-剪切位移关系曲线的影响

土体的剪切面在剪切过程中的变形特征可以由剪应力-剪切位移关系曲线反映出来。轻量土的剪应力-剪切位移关系曲线有硬化型和软化型两种,素土的剪应力-剪切位移关系曲线为硬化型。选取典型配比 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.81\%$ 的轻量土试样和素土样,在不同法向应力下进行5种剪切速率试验,得出的轻量土和素土剪应力-剪切位移关系曲线如图1所示。

由图1可知:(1)不同剪切速率下,配比 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.81\%$ 的轻量土试样和素土样的剪应力-剪切位移关系曲线呈现出的形态基本相同,为应变硬化型。(2)配比 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.81\%$ 的轻量土和素土试样的剪应力随剪切位移的增长主要历经3个阶段,即线性增长阶段、屈服阶段、稳定阶段。剪切速率越大,屈服阶段历时越短,剪切达到稳定阶段所需的时间越少,在曲线上表现为剪应力达到稳定值时,对应的剪切位移越小。

对于轻量土而言,出现以上现象的原因为:(1)在剪切初期,随着剪切位移增大,主要是试样中的黏聚力发挥作用,固化土和EPS颗粒产生变形协调作用,水泥水解水化产生的胶结物质使得轻量土具有较大的黏聚力,所以剪切初期曲线增速较快,为线性增长阶段。(2)剪切中期,随着剪切位移继续增大,剪切界面出现裂缝,当水泥掺量较高或者EPS颗粒掺量较少时,固化土骨架可以包裹EPS颗粒,EPS颗粒被剪断,试样出现贯穿的剪切面,强度出现峰值(如配比 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.32\%$ 和 $a_c = 20\%$ 、 $a_e = 0.81\%$ 的轻量土),则剪应力-剪切位移关系曲线为软化型。反之,EPS颗粒被压缩但并未被剪断,无贯通的剪切面出现,试样进入屈服阶段(如配比 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.81\%$; $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 1.90\%$; $a_c = 10\%$ 、 $a_e = 0.81\%$ 的轻量土),则剪应力-剪切位移关系曲线为硬化型。(3)剪切后期,剪切位移继续增大,对于中部出现贯穿剪切面的试样,剪应力

相比峰值明显减小,后期强度主要来源于上下剪切面上的纯摩擦,在法向应力一定时,纯摩擦的性能是一定的,残余强度趋于某一定值,曲线出现近似水平段。对于中部未出现贯穿剪切面的试样,其一直处于屈服阶段,剪应力随剪切位移的增大继续缓慢增加。剪切速率的大小只影响各阶段持续时间的长短,并未影响曲线形状。对于素土而言,在不同的剪切速率下,由于剪切面上的应变率不同和排水效果的差异,只是线性增长阶段、屈服阶段、稳定阶段持续时间不同,剪应力-剪切位移曲线仍均为硬化型。

3.2 剪切速率对土体抗剪强度包线的影响

在不同试验方案下,轻量土及素土在不同剪切速率下的抗剪强度包线如图2所示。由图2可知:(1)不同剪切速率下,各配比重量土的抗剪强度包线形态基本相同,近似为折线型包线。折线型包线形态说明了轻量土与超固结黏性土和密砂类似,是一种结构性土体,转折点反映了土体正从超固结状态向正常固结状态转换,土体内部正由黏聚力起主导作用向内摩擦角起主导作用转换^[16-18]。(2)水泥掺入比、EPS颗粒掺入比、法向应力对轻量土抗剪强度的影响明显。法向应力越大,则轻量土的抗剪强度越大;水泥掺入比越大、EPS颗粒掺入比越小,则轻量土的抗剪强度越大。(3)值得注意的是,配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 1.90\%$ 的轻量土试样,即EPS颗粒体积比为70%时,其抗剪强度包线与素土基本接近,说明当EPS颗粒体积掺入比达到70%时,水泥对原料土的固化效果不明显。

3.3 剪切速率对土体抗剪强度的影响

抗剪强度是分析边坡稳定性,评价地基承载力的重要参数。不同法向应力下各配比重量土及素土的抗剪强度-剪切速率关系曲线如图3所示。由图3可知:(1)对于轻量土而言,剪切速率对土体抗剪强度的影响较小。如以轻量土试样在剪切速率为0.02 mm/min时的抗剪强度为基准,在50、100、150、200 kPa法向应力下,剪切速率为0.1、0.2、0.8、2.4 mm/min时抗剪强度的绝对增长量变化范围为-11.40~13.90 kPa,相对增长量变化范围为-13.89%~13.04%。(2)对于素土而言,随着剪切速率的增大,抗剪强度逐渐减小。如以素土样在剪切速率为0.02 mm/min时的抗剪强度为基准,在50、100、150、200 kPa法向应力下,剪切速率为0.1、0.2、0.8、2.4 mm/min时抗剪强度的绝对增长量变化范围为-23.90~-0.60 kPa,相对增长量变化范围为-30.04%~-1.10%。(3)轻量土抗剪强度

变化特征在剪切速率为 0.2 mm/min 前后出现差异,当剪切速率 $v < 0.2 \text{ mm/min}$ 时,轻量土抗剪强度随剪切速率的增大一般为先减小后增大;当剪切

速率 $v > 0.2 \text{ mm/min}$ 时,抗剪强度随剪切速率的增大先增加后减小。(4) 剪切速率相同时,不同配比轻量土抗剪强度差异较大。

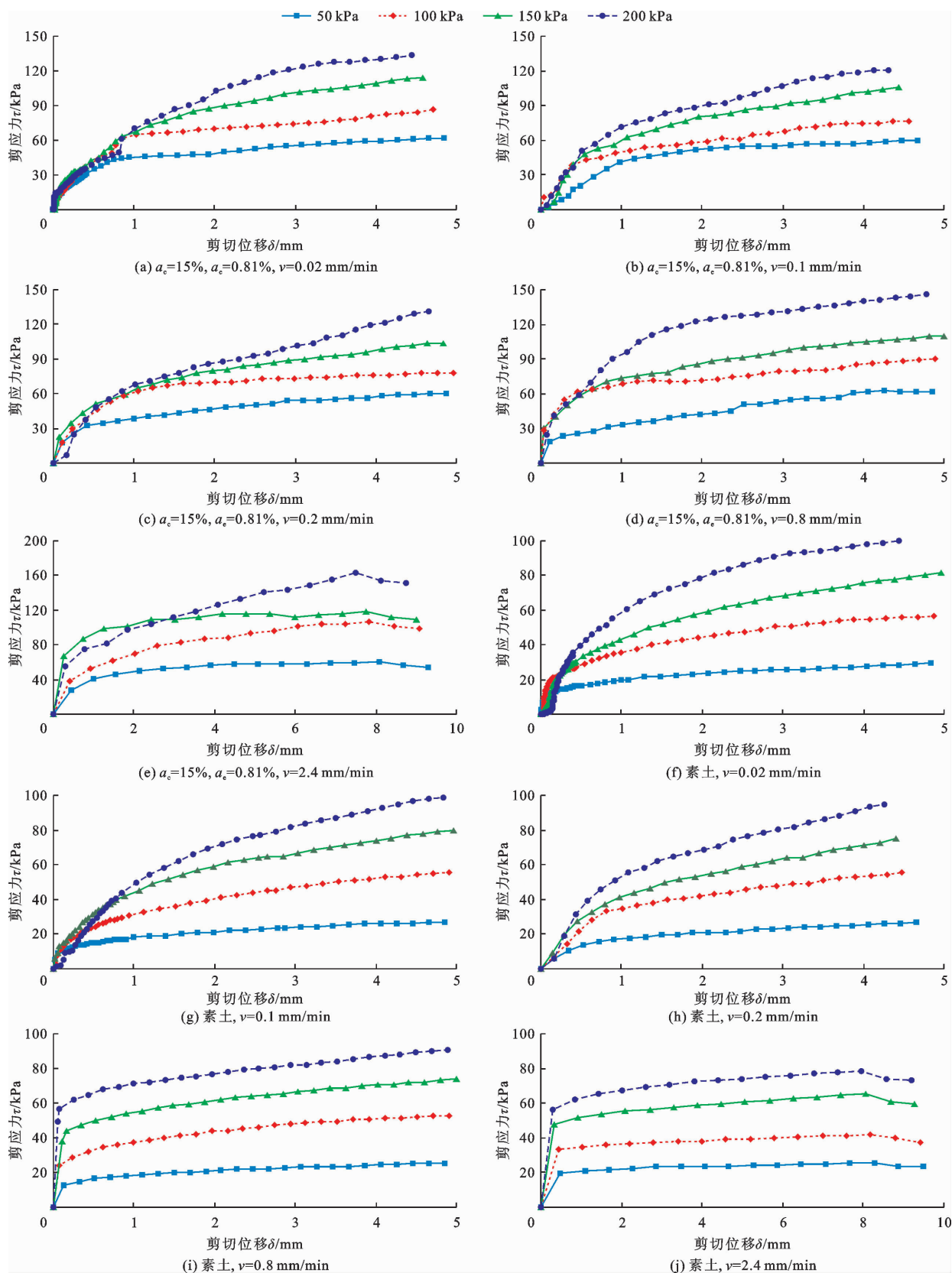


图1 不同法向应力下各配比轻量土及素土不同剪切速率的剪应力-剪切位移关系曲线

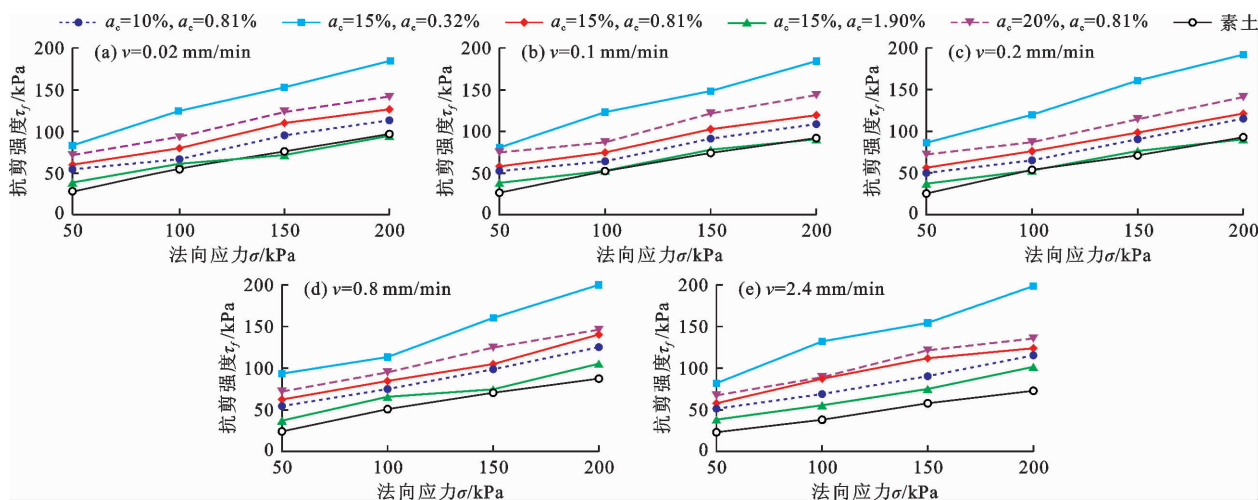


图2 各配比轻土及素土在不同剪切速率下的抗剪强度包线

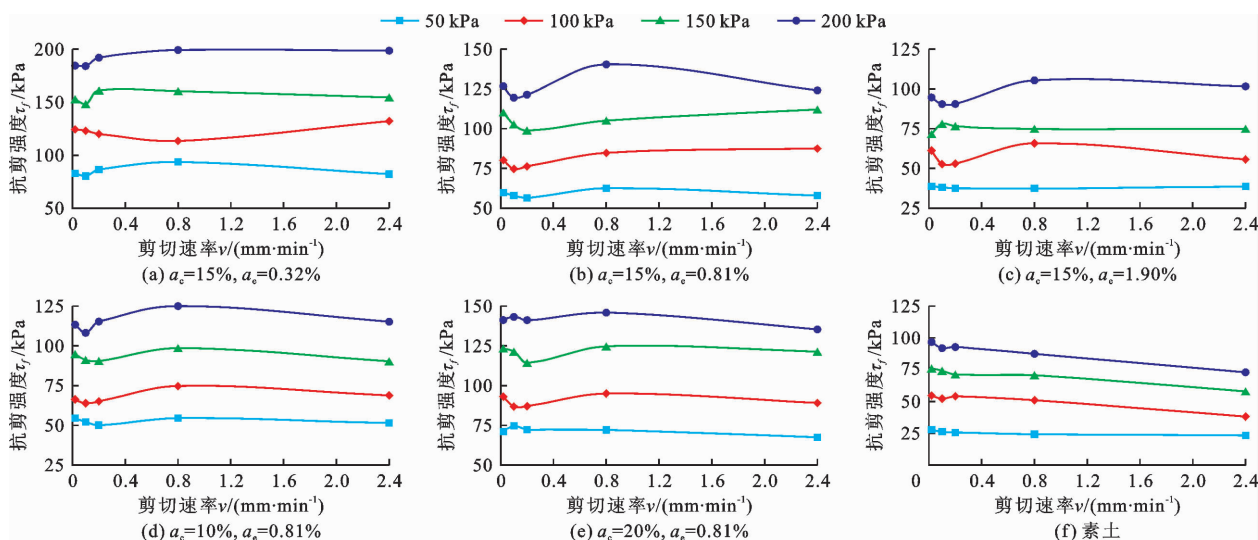


图3 不同法向应力下各配比轻土及素土的抗剪强度-剪切速率关系曲线

出现以上现象的原因是:对于素土,虽然快剪试验限制试样排水,但土颗粒之间仍存在缝隙。剪切速率越小,则试样排水的时间越充分,超静孔隙水压力消散越彻底,这有利于土体黏聚力和内摩擦角的增加,进而提高土体的抗剪强度,所以素土的抗剪强度随着剪切速率的增大而减小^[24]。而轻土作为一种结构性土体^[9-10],主要由原料土、EPS颗粒和固化剂三者组成,坚固的网状土骨架主要是通过固化剂的结点固化效应形成的,而EPS颗粒主要是起到减重作用,并且是作为软夹杂物存在于孔隙之中。对比对轻土抗剪强度的影响是决定性的,不同剪切速率引起的排水效果和超静孔隙水压力消散快慢的差异对轻土影响较小,所以导致剪切速率对轻土抗剪强度的影响较小。试验结果中剪切速率在0.2 mm/min前后轻土抗剪强度出现差异的原因可能为试验误差所致。

3.4 剪切速率对土体抗剪强度指标的影响

土体的抗剪强度指标通常包括黏聚力和内摩擦角。黏聚力可以用来表示同种物质内部相邻各部分之间的相互吸引力;内摩擦角可以用来表征土体内部各颗粒之间内摩擦力的大小,包括滑动摩擦和咬合摩擦。不同配比的轻土拥有不同的结构强度,在宏观上表现为拥有不同的黏聚力和内摩擦角。不同剪切速率对结构的破坏程度通常不同,研究剪切速率对黏聚力和内摩擦角的影响很有必要。

3.4.1 剪切速率对土体黏聚力的影响 图4为不同配比的轻土及素土的黏聚力-剪切速率关系曲线。由图4可知:(1)同配比轻土试样,其黏聚力随剪切速率的增大变化幅度较小。如配比为 $a_e = 15\%$, $a_c = 0.81\%$ 的轻土试样,剪切速率为0.02、0.1、0.2、0.8、2.4 mm/min时所对应的黏聚力分别为36.34、35.40、33.90、34.70、39.75 kPa。以轻量

土试样在剪切速率为 0.02 mm/min 时的黏聚力为基准, 0.1、0.2、0.8、2.4 mm/min 时黏聚力的绝对增长量变化范围为 -6.45 ~ 3.40 kPa, 相对增长量变化范围为 -19.38% ~ 9.35%。(2) 素土的黏聚力虽然随着剪切速率的增大而逐渐减小, 但是减小幅度较小。例如, 以素土在剪切速率为 0.02 mm/min 时的黏聚力为基准, 剪切速率为 0.1、0.2、0.8、2.4 mm/min 时黏聚力的绝对增长量变化范围为 -0.75 ~ -0.35 kPa, 相对增长量变化范围为 -11.19% ~ -5.22%。(3) 剪切速率一定时, 不同配比重土试样, 其黏聚力差异明显。随着 EPS 颗粒掺入比的增大, 黏聚力逐渐减小; 随着水泥掺入比的增大, 黏聚力逐渐增大。

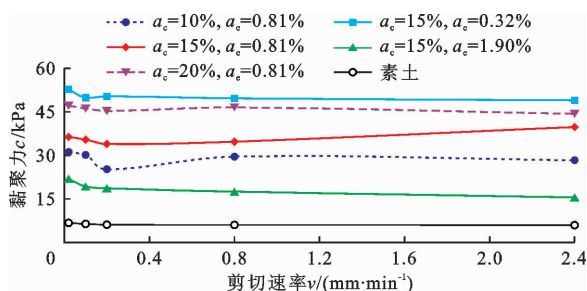


图4 不同配比的轻土及素土的黏聚力-剪切速率关系曲线

究其原因, 轻土土的黏聚力主要来源于水泥中所含有的硅酸二钙、硅酸三钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙与水发生水解、水化反应产生的胶凝状物质, 胶凝状物质通过包裹土与 EPS 颗粒形成致密的网状结构, 经硬化后形成混合土的黏聚力。水泥掺量越多, EPS 颗粒掺量越少, 胶结结构越强, 轻土土黏聚力越大。剪切速率的不同仅导致混合土结构破坏的快慢不同, 并不影响黏聚力的发挥, 所以剪切速率对黏聚力影响较小。对于素土而言, 剪切速率越小, 则超静孔隙水压力消散越彻底, 黏聚力越大。

3.4.2 剪切速率对土体内摩擦角的影响 图5为不同配比的轻土及素土的内摩擦角-剪切速率关系曲线。由图5可知:(1) 素土的内摩擦角随剪切速率的增大逐渐减小, 但配比一定时, 轻土的内摩擦角随剪切速率变化幅度较小。以轻土和素土试样在剪切速率为 0.02 mm/min 时的内摩擦角为基准, 0.1、0.2、0.8、2.4 mm/min 时内摩擦角的绝对增长量变化范围为 -1.72° ~ 3.48° 和 -0.88° ~ -5.92°, 相对增长量变化范围为 -6.95% ~ 17.75% 和 -24.11% ~ -3.58%。(2) 剪切速率一定时, 轻土的内摩擦角随水泥掺入比的增大, EPS 颗粒掺入比的减小而增大, 但增幅较小。(3) 轻土

土内摩擦角在 EPS 颗粒掺量为 0.81%, 即体积比为 50% 前后, 内摩擦角差异明显。比如: 配比为 $a_c = 15\%$, $a_s = 0.32\%$ (体积比为 30%) 的轻土试样, 在各剪切速率下, 内摩擦角介于 33.70° ~ 36.60° 之间。而其他各配比重土的内摩擦角均介于 19.61° ~ 26.76° 之间, 与素土内摩擦角接近。

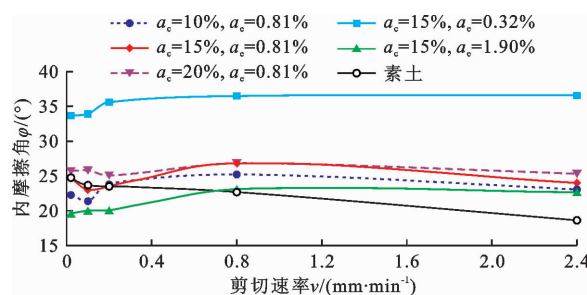


图5 不同配比的轻土及素土的内摩擦角-剪切速率关系曲线

以上现象出现的原因是: 轻土作为一种结构性土体, 内摩擦角的大小主要与混合土的配比和各组分内部镶嵌、排列结构形式有关, 与剪切速率的快慢关系较小。将轻土中的固化土、EPS 颗粒分别定义为 3 界面接触: 固化土-EPS, EPS-EPS, 固化土-固化土^[18]。当土颗粒含量相对较多时, EPS 颗粒则相对较少, 水泥水解水化形成的胶凝状物质能充分填充 EPS 和土产生的孔隙, 将土和 EPS 颗粒牢牢包裹, 形成密实的结构, 此时混合土内部多为固化土-EPS、固化土-固化土形成的强接触, 接触效果良好, 内摩擦角较大。反之, 当 EPS 掺量较多时, 胶结物质所占体积减小, 混合土内部多为 EPS-EPS 的弱接触, 试样出现较多肉眼可见的孔隙, 在剪切作用下, 内摩擦角较小, 结构容易破坏。

4 结 论

(1) 轻土的剪应力-剪切位移关系曲线有应变硬化型和应变软化型两种形态, 主要受 EPS 颗粒掺入比、水泥掺入比和法向应力的影响。素土的剪应力-剪切位移关系曲线形态为硬化型。硬化型曲线主要包括线性增长阶段、屈服阶段、稳定阶段 3 部分。剪切速率越大, 屈服阶段历时越短, 剪切达到稳定阶段所用时间越少。

(2) 不同剪切速率下, 轻土抗剪强度包线多为折线型, 法向应力和配比对其抗剪强度的影响是决定性的。法向应力越大, 抗剪强度越大; 水泥掺入比越大, EPS 颗粒掺入比越小, 抗剪强度越大。EPS 颗粒体积掺入比达到 70% 时, 水泥固化效果较差。

(3) 剪切速率对轻土抗剪强度的影响较小, 对

素土抗剪强度影响较大。随着剪切速率的增大,素土抗剪强度逐渐减小。以剪切速率为0.02 mm/min时的抗剪强度为基准,轻土和素土剪切速率为0.1、0.2、0.8、2.4 mm/min时抗剪强度的绝对增长量范围分别为-11.40~13.90 kPa和-23.90~-0.60 kPa,相对增长量范围分别为-13.89%~13.04%和-30.04%~-1.10%。

(4)轻土的黏聚力和内摩擦角主要由其配比决定,水泥掺入比越大,EPS颗粒掺入比越小,则黏聚力和内摩擦角越大。剪切速率对轻土黏聚力和内摩擦角影响较小,对素土影响较大,素土的黏聚力和内摩擦角随剪切速率的增大而逐渐减小。以试样在剪切速率为0.02 mm/min时的黏聚力和内摩擦角为基准,当剪切速率为0.1、0.2、0.8、2.4 mm/min时,轻土黏聚力和内摩擦角的绝对增长量范围分别为-6.45~3.40 kPa和-1.72°~3.48°,相对增长量范围分别为-19.38%~9.35%和-6.95%~17.75%;素土黏聚力和内摩擦角的绝对增长量范围分别为-0.75~-0.35 kPa和-0.88°~-5.92°,相对增长量范围分别为-11.19%~-5.22%和-24.11%~-3.58%。

参考文献:

- [1] 叶文,黄林冲. EPS颗粒含量对混合土渗透性的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版),2021,60(6):15-23.
- [2] 侯天顺,杨凯旋. 挡土墙后EPS颗粒混合轻土填料静止土压力特性模型试验研究[J]. 岩土力学,2021,42(12):3249-3259+3270.
- [3] 冯永,张盼盼,原子然,等. 循环荷载下淤泥轻土土的细观变形机理研究[J]. 力学与实践,2019,41(1):23-29.
- [4] 侯天顺,崔奕翔. EPS颗粒混合轻土的动变形特性及修正Hardin-Drnevich模型研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(9):1602-1611.
- [5] HORIUCHI S, UCHIYAMA N, ODAWARA T, et al. Flash-setting lightweight material—A first step to floating island construction[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1996, 8(3): 138-146.
- [6] 山田純男,長坂勇二,西田登. 発生土スチロール片と砂を混合した軽土[J]. 土と基礎,1989,37(2):25-30.
- [7] 沙玲,王国才,金菲力,等. 淤泥再生混合轻质土强度特性试验研究[J]. 南京理工大学学报,2013,37(3):441-446.
- [8] 李明东,田安国. 泡沫塑料混合轻质土在循环荷载下的力学性质[J]. 岩土工程学报,2010,32(11):1806-1810.
- [9] HOU Tianshun. Influence of expanded polystyrene size on deformation characteristic of light weight soil[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(11): 3320-3328.
- [10] 黎冰. 动荷载下粘土与EPS颗粒混合轻质土的变形和强度特性试验研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [11] 刘汉龙,朱云华,董金梅. 不同固结压力下聚苯乙烯轻质混合土渗透特性试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(11):2333-2336+2358.
- [12] 朱伟,李明东,张春雷,等. 砂土EPS颗粒混合轻质土的最优击实含水率[J]. 岩土工程学报,2009,31(1):21-25.
- [13] 李明东,朱伟,张春雷. 软夹杂土体的击实模型[J]. 土木工程学报,2009,42(12):149-153.
- [14] HOU Tianshun. Model for compaction density and engineering properties of light weight soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2127-2135.
- [15] 侯天顺,徐光黎. 轻土最优含水率模型与检验[J]. 岩土工程学报,2011,33(7):1129-1134.
- [16] LI Mingdong, WEN Kejun, LI Lin, et al. Mechanical properties of expanded polystyrene beads stabilized light-weight soil[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 13(3): 459-474.
- [17] 侯天顺,徐光黎. 发泡颗粒混合轻土抗剪强度特性试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(4):534-540.
- [18] 侯天顺,徐光黎. EPS粒径对轻土抗剪强度的影响规律[J]. 岩土工程学报,2011,33(10):1634-1641.
- [19] GAO Hongmei, LI Xue, WANG Zhihua, et al. Dynamic shear modulus and damping of expanded polystyrene composite soils at low strains[J]. Geosynthetics International, 2019, 26(4): 436-450.
- [20] 赵文辉,苏谦,李婷,等. 高速铁路基床底层泡沫轻质土填料试验研究[J]. 振动与冲击,2019,38(6):179-186.
- [21] 杨凯旋. EPS颗粒混合轻土静止土压力特性试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [22] 侯天顺,郭鹏斐,杨凯旋,等. 发泡颗粒混合轻土静止土压力特性及计算方法研究[J]. 岩土工程学报,2022. (2022-05-26) [2022-07-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20220525.1517.002.html>.
- [23] 徐肖峰,魏厚振,孟庆山,等. 直剪剪切速率对粗粒土强度与变形特性的影响[J]. 岩土工程学报,2013,35(4):728-733.
- [24] 史卜涛,张云,王哲成,等. 不同固结状态下黏土抗剪强度与剪切速率的关系[J]. 水文地质工程地质,2015,42(6):59-64.
- [25] MARTINEZ A, STUTZ H H. Rate effects on the interface shear behaviour of normally and overconsolidated clay[J]. Geotechnique, 2019, 69(9): 801-815.
- [26] BARR A D, CLARKE S D, PETKOVSKI M. High-pressure compressibility and shear strength data for soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(7): 1042-1048.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.