文章编号:1672-3961(2025)05-0140-14 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.186

酸性及碱性环境下土工格室加筋土结构力学性质

孙传迪[1,2,3],宋飞[1,2,3*]

(1.长安大学公路学院,陕西 西安 710064;2.民航机场智慧建造与维养重点实验室(长安大学),陕西 西安 710064;3.西安市绿色智慧交通岩土工程重点实验室(长安大学),陕西 西安 710064)

摘要:通过对酸、碱溶液浸泡后格室加筋土进行常规三轴试验,对试样破坏形态、土体填料基本物理参数进行测定分析。结合三轴试验取得的应力-应变曲线对格室加筋体的应力-应变响应模型进行验证,后采用固结排水三轴试验对酸碱环境下等效直径为 0.34、0.45 m 的格室加筋土应力-应变响应、表观黏聚力的变化进行研究分析。研究结果表明:经三轴试验取得格室加筋土邓肯-张模型参数应用于偏应力-轴向应变、体应变-轴向应变关系曲线与试验曲线几乎吻合,即推导公式计算结果符合试验测得的数据;应力-应变响应分析中,PET(polyethylene terephthalate)比 PP(polypropylene)格室加筋土酸碱环境影响大,且 PET 材料两种尺寸格室加筋土结构对酸性环境较碱性敏感,等效直径为 0.45 m 较 0.34 m 对酸碱反应大,易产生剪切破坏;两种直径 PET 格室加筋土在酸环境下表观黏聚力分别减小 9.2%和 7.8%,碱环境下受影响较小。而 PP 材料直径为 0.34 m 时不受酸、碱影响,只有直径为 0.45 m 时在碱环境下减小 13.3%,且不受酸环境影响。

关键词:格室加筋土;酸、碱环境;格室加筋土理论模型;力学性质

中图分类号:U417.115 **文献标志码**:A

引用格式:孙传迪,宋飞. 酸性及碱性环境下土工格室加筋土结构力学性质[J]. 山东大学学报(工学版),2025,55(5):140-153.

SUN Chuandi, SONG Fei. Structural-mechanical properties of geocell-reinforced soils in acidic and alkaline environments[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(5):140-153.

Structural-mechanical properties of geocell-reinforced soils in acidic and alkaline environments

SUN Chuandi[1,2,3], SONG Fei[1,2,3*]

(1. School of Highway, Chang′an University, Xi′an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Construction and Maintenance of Civil Aviation Airport (Chang′an University), Xi′an 710064, Shaanxi, China; 3. Xi′an Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Green and Intelligent Transport (Chang′an University), Xi′an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The damage pattern of the specimen and the basic physical parameters of the soil fill were determined and analyzed through the conventional triaxial test on the compartment reinforced soil after soaking in acid and alkali solutions. Combined with the stress-strain curve obtained from the triaxial test, the stress-strain response model of the compartment reinforced body was verified, and then the changes in stress-strain response and apparent cohesion of the compartment reinforced soil with equivalent diameters of 0.34 m and 0.45 m under acid and alkali environments were investigated and analyzed by using the solidification and drainage triaxial test. The research results showed that triaxial test obtained compartment reinforced soil Duncan-Zhang model parameters applied to the bias stress-axial strain, body strain-axial strain relationship curve with the test curve almost match, that was, the derivation of the formula calculations in line with the test data; stress-strain response analysis, PET than PP compartment reinforced soil acid and alkaline environment, and the PET material two sizes of the compartment reinforced soil structure of the acidic environment more sensitive to alkaline, equivalent diameter of 0.45 m than 0.34 m to acid and alkali response, easy to produce shear damage; two diameters of PET compartments reinforced soil in the acid environment, the apparent cohesion decreased by 9.2% and 7.8%, respectively, and the alkali environment was less affected. While the PP material diameter of 0.34 m was not affected by acid and alkali, only the diameter of 0.45 m was reduced by 13.3% in the alkali environment, and was not affected by the acid environment.

Keywords: compartment reinforced soils; acid and alkaline environments; theoretical modelling of compartment reinforced soils; mechanical properties

收稿日期:2024-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278328)

第一作者简介:孙传迪(1999—),男,山东菏泽人,博士研究生,主要研究方向为岩土工程。E-mail:515291541@qq.com

*通信作者简介:宋飞(1980—),男,陕西汉中人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为岩土力学与岩土工程。

E-mail: songf1980@163.com

0　引言

土工格室由于其质量轻、韧性强、耐腐蚀等优点,土工格室加固技术已大规模使用在交通、岩土、道路、水利等领域,并在护坡、加固软土路基、稳固堤岸以及修复生态等领域做出了巨大贡献,成功解决了大量工程问题。其三维立体网状结构较土工格栅、土工织物等仅靠自身抗拉强度和与土的接触面产生的摩擦力、咬合力来发挥加筋作用的平面结构材料相比,除了格室片增加了与土体的接触面积,进而增加筋材-土的互相摩擦作用,立体结构还对填料提供了较强的侧向约束力,形成了加筋土挡墙结构,加筋性能进一步优化,对软土地基、路基边坡等的修建和加固提供了新的施工方案和方向[1]。随着工程技术发展,人们对结构工程的使用寿命提出了更高要求,同样土工格室加筋土结构的抗腐蚀性能和耐久性能也面临严峻挑战。酸碱环境会影响格室加筋土结构填料的微观结构、宏观受力变形特性和格室条带刚度、节点强度等,进而影响加筋土结构的整体安全稳定性。针对填料酸碱性探究,文献[2]利用不同 pH 值硫酸对砂-膨润土混合料进行固结不排水三轴试验,分析出酸性污染物使砂-土混合料抗剪强度、弹性模量降低;文献[3-4]对不同浓度和种类的酸污染液浸泡后的土进行直接拉伸破坏试验和直剪试验,并初步利用土体电阻率对受酸污染程度进行评价,分析了酸溶液种类、浓度对土体抗拉强度、抗剪强度演化规律的影响;文献[5]发现分别浸泡醋酸、碳酸和碳酸氢盐溶液的土体,在 pH 值较高或较低时,土体无侧限抗压强度、抗剪强度、液限均有显著增长;文献[6]通过酸、碱性溶液与蒸馏水进行对比,分析出随着 pH 值的增大,细粒土的无侧限抗压强度、弹性模量、最大偏差应力、黏聚力和内摩擦角增大的现象;文献[7]通过标准固结试验对酸碱污染后的黄土压缩变形进行分析,表明酸污染土压缩变形量、压缩系数增大,而碱污染土压缩变形量、压缩系数均减小;文献[8]提出土工合成材料在实际工程中易受温度、湿度、光照、酸碱度等影响产生老化现象,从而影响材料的物理力学性能,影响工程质量;文献[9]发现水和金属离子的存在会降低聚丙烯土工布的使用寿命,其中金属离子对其影响最大,酸碱、水和铜离子的作用将分别导致纤维的耐用期降 13%、20%和 54%;文献[10]利用 3 年时间对不同 pH 值酸性溶液浸泡的高密度聚乙烯土工膜和抗氧化剂进行氧化诱导时间损耗分析,研究发现高压氧化诱导时间法检测的抗氧化剂在较低 pH 消耗最慢,高密度聚乙烯土工膜残留值最高;文献[11]以聚乙烯复合土工膜作为试验材料,对酸碱浸泡后的拉伸性能、梯形撕裂、CBR(California bearing ratio)顶破性能等方面进行研究,研究表明,经过酸碱溶液浸泡后,复合土工膜拉伸强度有下 10%左右且横向下降率大于纵向,变异系数有所减小,离散性变小,但变形率提高;文献[12]通过加速老化试验,研究了极低 pH 溶液对高密度聚乙烯土工膜的影响,结晶度、熔体流动指数和拉伸试验结果表明,极高的酸性环境会使土工膜材料产生物理老化。

综上所述,在前人研究的基础上,未发现针对 PET 和 PP 土工格室酸碱老化前后的物理力学性能对比以及针对土工格室受酸碱腐蚀老化后的加筋边坡计算和破坏模式分析,土工格室加筋土酸碱老化的理论基础以及对实际工程的适用性研究还不完善。

本研究基于土工格室酸碱腐蚀后的条带拉伸强度和节点强度试验,通过常规三轴试验测定酸性土和碱性土的基本物理性质参数,并将土工格室、填料应力-应变关系结合建立格室邓肯-张模型,并利用 Mathematica 语言编程对其参数复核修正,同时运用格室加筋土理论模型计算格室酸、碱腐蚀后加固酸性土和碱性土力学性质。

1　格室试验概况

本研究试验结果表明,pH 值范围为 1.3~12.6,相对于 PET(polyethylene terephthalate)、PP(polypropylene)而言,HDPE(high density polyethylene)力学性质受酸碱腐蚀影响较小,强度和刚度衰减较少,稳定性较好,故只针对 PET 和 PP 格室加筋土展开研究。

土工格室材料力学性能测试主要包括条带拉伸强度测定和节点强度测定两个部分[13],其中节点强度测定包括节点对拉强度、剪切强度、剥离强度。土工格室酸碱试样:将土工格室试样在不受任何机械应力的情况下,分别放在盛硫酸溶液(0.025 mol/L)和氢氧化钙溶液(2.5 g/L)的容器中,然后将容器放进温度为 60 ℃的水浴箱,保持温度恒定,试样分别在两种溶液中浸渍 3 d。此次每组试验样品为 5 个,作为平行试验,原样、酸性、碱性中检测条带拉伸强度、节点强度(对拉强度、剪切强度、剥离强度)各材

料共 12 组,两种材料共 24 组。其中,条带拉伸试验中各个材料条带宽度为 10 cm,节点强度中采用 PP 包胶注塑与 PET 卯榫格室规格。按照文献[14]规定,采用 CMT55504 微机电子万能试验机对格室试样进行条带拉伸试验和节点强度试验。

1.1 格室节点强度

基于格室节点强度试验数据,PP 包胶注塑与 PET 卯榫格室节点剥离强度、剪切强度和对拉强度均会损伤。其中节点对拉强度损伤最大,较剪切强度与剥离强度损伤程度可大 2%~20%,具体损伤情况如表 1 所示。

表 1 酸碱侵蚀后格室节点强度变化

Table 1 Changes in strength of lattice nodes after acid and alkali erosion

格室材料	强度	酸性损伤程度/%	碱性损伤程度/%
PET	对拉强度	16.67	17.54
	剪切强度	13.42	14.69
	剥离强度	9.28	4.86
PP	对拉强度	20.87	31.69
	剪切强度	17.03	2.84
	剥离强度	8.26	13.91

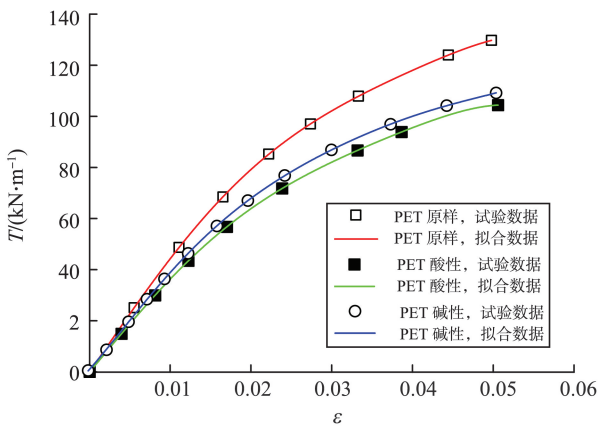
1.2 格室条带刚度

在酸、碱环境下,PET 条带拉伸强度降低量降低了 18.30% 和 14.78%,PP 材料降低了 16.57% 和 10.79%。为研究土工格室条带刚度模量,取条带拉伸应变前 5% 试验数据点(试验数据点为条带拉伸时不同应变对应的不同荷载)。并在 DataFit 中做多项式拟合,由于材料浸泡后不一定能保持均匀,会发生一定程度的离散,故取 5 个试样的平均值绘制出均线进行多项式拟合。经测试,所有条带 6 次多项式拟合效果最佳。条带拉伸荷载(T)与拉伸应变(ε)之间的关系为

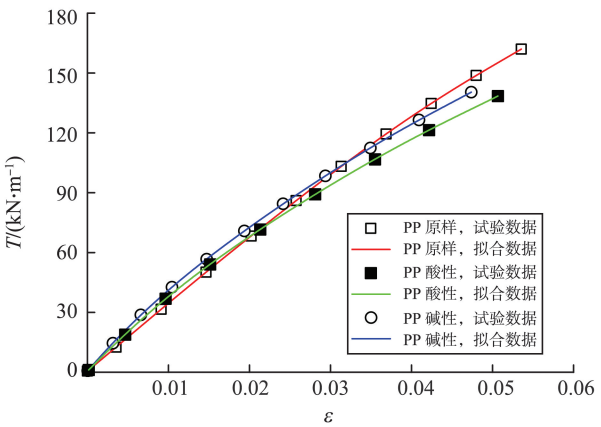
$$\frac{T}{T_{\mathrm{ref}}}=A_0\varepsilon_{\mathrm{c}}^6+A_1\varepsilon_{\mathrm{c}}^5+A_2\varepsilon_{\mathrm{c}}^4+A_3\varepsilon_{\mathrm{c}}^3+A_4\varepsilon_{\mathrm{c}}^2+A_5\varepsilon_{\mathrm{c}}^1+A_6, \tag{1}$$

式中:A_0、A_1、A_2、A_3、A_4、A_5、A_6 为拟合拉伸试验曲线确定系数;ε_{c} 为拉伸应变,取归一化后的值;T_{ref} 为参考拉力,取1 kN/m。

将 PET 和 PP 材料在不同 pH 值溶液浸泡下的 1~5 号试验试样的刚度分别拟合,并且拟合结果与试验结果相吻合,PET 和 PP 不同环境下最终的条带刚度对比如图 1 所示。拟合系数如表 2、3 所示。由式(1)对拉伸应变 ε_{c} 求一阶导数可以得到不同拉伸应变对应的格室条带的切线模量 M_{t}。



(a) PET 格室条带



(b) PP 格室条带

图 1 原样、酸、碱浸泡后条带刚度对比

Fig.1 Comparison of strip stiffness after as-is, acid and alkali immersion

表 2 多项式拟合 PET 土工格室原样、酸、碱环境下的拟合系数

Table 2 Polynomial fitting coefficients for PET geocells in situ, acid and alkaline environments

拟合系数	取值		
	原样	酸性	碱性
A_0	−7 747 658 180.31	−3 183 400 348.84	26 289 111 553.39
A_1	400 609 508.92	−350 902 006.98	−4 635 492 532.54
A_2	41 244 685.05	77 441 078.67	316 338 750.41
A_3	−3 206 241.38	−3 569 833.01	−9 999 053.25
A_4	16 687.16	14 890.33	96 501.93
A_5	4 543.42	3 773.53	3 553.84
A_6	−0.000 852 4	0.001 979	−0.111 4

表 3 多项式拟合 PP 土工格室原样、酸、碱环境下的拟合系数

Table 3 Polynomial fitting coefficients for PP geocells in situ, acid and alkaline environments

拟合系数	取值		
	原样	酸性	碱性
A_0	6 864 338 695.89	10 930 248 339.85	12 294 416 372.23
A_1	−1 046 967 344.24	−1 603 420 668.55	−1 512 701 106.19
A_2	59 225 833.27	82 180 823.82	54 352 018.85
A_3	−1 660 806.69	−1 384 081.85	249 585.21
A_4	17 255.95	−32 103.85	−72 098.01
A_5	3 343.96	4 124.42	4 712.77
A_6	0.609 9	−0.017 1	−0.033

经分析,PP、PET 土工格室条带受酸碱环境影响后,随着拉伸应变增大,屈服强度和割线刚度降低越明显。PP 酸、碱性环境下都降低了约 13%。PET 酸性环境下降低了约 20%,碱性环境下降低了约 17%。由图 1 可知,PET 土工格室条带刚度受酸、碱环境影响较 PP 材料严重。

2　常规三轴试验及基本性质试验

2.1　试样制备

土样:酸性土的制样干密度为 1.70 g/cm^3,制样含水率为 14%;碱性土的制样干密度为1.80 g/cm^3,制样含水率为 13%。依据文献[15]标准,经 PHS-25 酸碱测量仪检测出酸性土的 pH 为5.36,碱性土的 pH 为 8.92。土工格室试样采用与第 2 章节格室酸碱力学性质试验试样制备方式一致。

2.2　试验方案

三轴试验可以完整地反映试样受力变形直至破坏的全过程,其应力状态明确、排水条件可控,能清晰反映应力-应变关系,是土力学中最广泛的试验方法[1],按文献[16]中“19.6 固结排水试验”方法,依步骤进行试样的安装、固结、剪切,分别对酸性及碱性饱和性土样进行固结排水三轴试验,如图 2 所示。



图 2　三轴试验
Fig.2　Triaxial test

针对土工格室加固酸性及碱性土的应力-应变响应规律,除常规三轴试验外,还对不同地区采取到的酸性及碱性土分别做了相对体积质量试验、液、塑限试验、缩限试验和击实试验,以得到酸、碱土的基本物理性质指标。按照文献[16]对土样测定:(1)对粒径 5 mm 以下的土样采用相对体积质量瓶法试验,取 3 组平行试验求平均值测定试样土相对体积质量;(2)采用 LP-100D 数显式土壤液塑限测定仪利用液塑限联合测定法以及采用“9.5 缩限试验”法测定试样土液、塑限和缩限,如图 3 所示;(3)利用“13 击实试验”方法进行酸碱土样击实试验,绘制酸、碱土样击实曲线。



图 3　LP-100D 数显式土壤液塑限测定仪
Fig.3　LP-100D digital display soil liquid-plastic limit tester

3　试验材料力学性能

3.1　酸、碱土基本性质与常规三轴试验

3.1.1　基本性质试验

根据上述试验方法测定的土样基本性质如表 4 所示,击实曲线如图 4 所示,图 4 中 ω 为含水率,%;ρ_d 为干密度,g/cm^3。

表 4　酸、碱土参数
Table 4　Acid and alkaline soil parameters

土样	相对体积质量	塑限(2 mm)/%	液限(10 mm)/%	液限(17 mm)/%	塑限指数 I_P	缩限/%	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
酸土	2.69	17.2	25.9	29.6	8.7	3.72	15.27	28
碱土	2.67	14.5	25.2	30.3	10.8	2.49	29.25	30

3.1.2　常规三轴试验

通过分析试验过程和数据,主要从以下 3 个方面对比酸性及碱性素土试样的三轴试验结果:(1)试样破坏形态;(2)抗剪强度参数;(3)偏应力-轴向应变关系以及体应变-轴向应变关系。

(1)试样破坏形态

在不同围压下,对酸、碱土试样进行常规三轴试验,剪切后未拆样形态如图 5(a)所示,酸、碱土剪切后破坏形态如图 5(b)、图 5(c)所示。从图 5 中可看出,试样发生了剪切破坏和明显的中部鼓胀破坏,其鼓胀破坏原因主要是在制样过程中分层夯击土样导致细粒土沿孔隙掉落,各层土密度不均匀,导致密度大的土层强度大,密度小的土层强度小。同理,由于试样内部各部分密度不均一或颗粒结构不同,软弱点的剪应变随变形增大而变得更加集中,进而试样会产生剪切破坏。

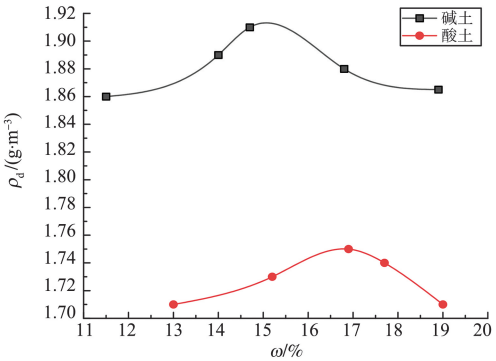


图 4 酸、碱土击实曲线

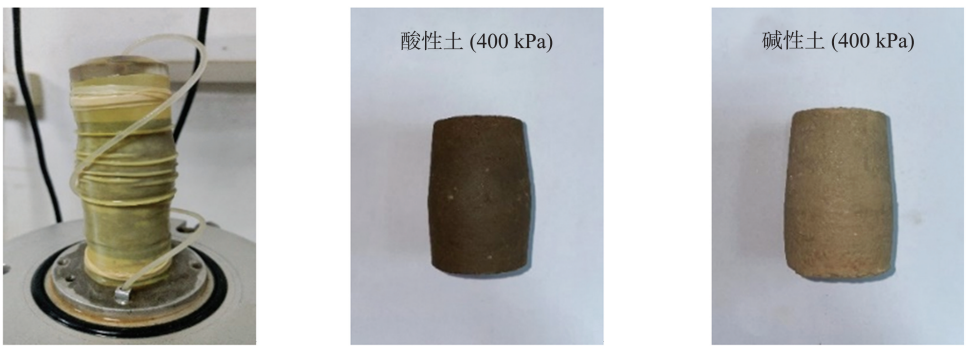
Fig.4 Compaction curves for acid and alkaline soils

(2)抗剪强度参数

为充分描述三轴试验获得的酸性和碱性土的抗剪强度,引用库伦公式并结合摩尔-库伦强度准则

$$\tau_f = c+\sigma\tan\varphi。 \tag{2}$$

分别将酸性和碱性土在围压 100、200、300、400 kPa时的大、小主应力绘制成莫尔圆,得到它们的抗剪强度参数:酸土的黏聚力 c 为 15.27 kPa,内摩擦角 φ 为 28°;碱土的黏聚力 c 为 29.25 kPa,内摩擦角 φ 为 30°。



(a) 三轴试验过程 (b) 酸土试样破坏后 (c) 碱土试样破坏后

图 5 试验试样形态

Fig.5 Test specimen morphology

根据 3.1 节试验结果,由表 4 可知,酸、碱环境主要对土体黏聚力产生较大影响,其次是内摩擦角 φ。通过图 4 土体击实曲线,发现碱性土最大干密度较酸性土大,最优含水率较酸性土小。这主要因为在微观结构上,酸性环境会使土体颗粒在形态上发生破坏,内部胶结物溶解,颗粒间的空隙变大,不利于土体结构稳定,而碱性环境黏土颗粒的孔径减小但含量增加,且减小了骨架颗粒间的孔隙含量和尺寸,使土体结构内聚力增加,抗剪强度增加[17]。

3.2 邓肯-张模型参数

3.2.1 格室加筋结构 $d\sigma_1-d\sigma_3$ 关系

根据文献[18]提出的土体非线性模型,常规三轴试验的切线模量

$$E_t = Kp_a\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^n\left[1-\frac{R_f(\sigma_1-\sigma_3)(1-\sin\varphi)}{2c\cos\varphi+2\sigma_3\sin\varphi}\right]^2, \tag{3}$$

式中:K、n 为模数和模指数,是决定于土质的试验常数,分别为 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 直线的截距和斜率;c、φ 为土体的黏聚力和内摩擦角;σ_3 为小主应力,三轴试验围压;p_a 为大气压,取 101.4 kPa;$(\sigma_1-\sigma_3)$为主应力差;ε_1 为相应于$(\sigma_1-\sigma_3)$的轴向应变,由试验测定。其中定义破坏比

$$R_f = \frac{(\sigma_1-\sigma_3)_f}{(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}}, \tag{4}$$

式中:$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 为破坏应力差,即土样破坏时的应力;$(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$ 为应力差极限,即应力-应变曲线峰值。

可见切线模量的公式中共包括 5 个材料常数:K、n、R_f、K_b、m_b,三轴应力状态时水平应变量与应力变化量间的关系式为

$$d\varepsilon_3 = \frac{(1-v_t-2v_t^2)d\sigma_3}{E_t}-v_t d\varepsilon_1, \tag{5}$$

式中 v_t 为非线性双曲线模型[18]中的泊松比,其表达式为

$$v_t = \frac{1}{2}-\frac{E_t}{6B} = \frac{1}{2}-\frac{E_t}{6K_b p_a(\sigma_3/p_a)^{m_b}}, \tag{6}$$

式中,K_b 和 m_b 为表征体变的材料参数,体变模量 B 为描述体应变 ε_v 随轴向应变 ε_1 变化的关系而引入的参数,通过式(7)计算。

$$B = \frac{(\sigma_1-\sigma_3)_{70\%}}{3(\varepsilon_v)_{70\%}}, \tag{7}$$

式中,$(\sigma_1-\sigma_3)_{70\%}$ 为常规三轴试验中偏应力$(\sigma_1-\sigma_3)$达到 $70\%(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 大小时的试验值,$(\varepsilon_v)_{70\%}$ 为与 $70\%(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 对应的体应变试验值。因此对于每一个试验围压 σ_3,B 都是一个确定的常数。

3.2.2 切线体积模量

切线泊松比 μ_t 可在一定程度上描述土体体积

变化，但效果并不理想，继而采用切线体积模量 B 作为计算参数，在三轴试验中表示为

$$B=K_{\mathrm{b}}p_{\mathrm{a}}\left(\frac{\sigma_3}{p_{\mathrm{a}}}\right)^{m_{\mathrm{b}}},\tag{8}$$

式中 K_{b}、m_{b} 为表征体变的材料参数，分别为 $(\lg(B/p_{\mathrm{a}})\text{-}\lg(\sigma_3/p_{\mathrm{a}}))$ 双对数坐标中直线的截距、斜率。

所提上述理论计算方法适用于正常固结黏土，其特征是偏差应力随轴向应变变化表现为应变硬化趋势，体应变随轴向应变变化表现为剪缩趋势。根据三轴试验结果经修正后最终确定的酸碱土的邓肯-张参数值如表 5 所示。经参数分析，K、n、R_{f}、K_{b}、m_{b} 均为无量纲。其中，K、n、R_{f} 等 3 个参数控制偏应力，而 K_{b}、m_{b} 两个参数控制体应变。

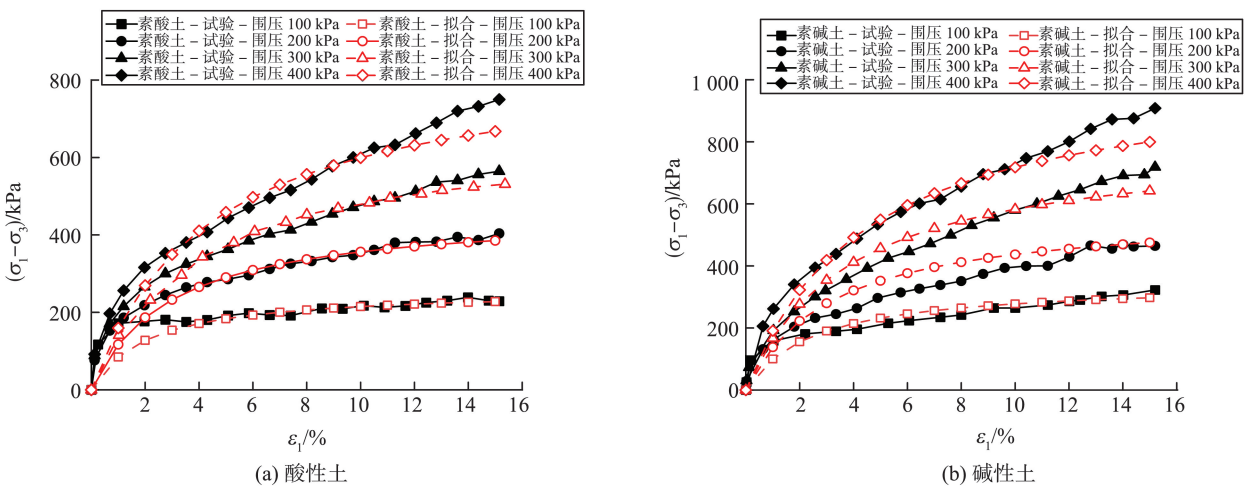
表 5　酸碱土的邓肯-张参数值

Table 5　Duncan-Zhang parameter values for acid-base soils

土样	c/kPa	φ/(°)	K	n	R_{f}	K_{b}	m_{b}
酸土	15.267 6	28	122.743 9	0.322 5	0.876 8	45.225 4	0.277 8
碱土	29.250 0	30	137.530 8	0.370 7	0.869 5	64.500 0	0.228 5

3.2.3　邓肯-张模型参数验证

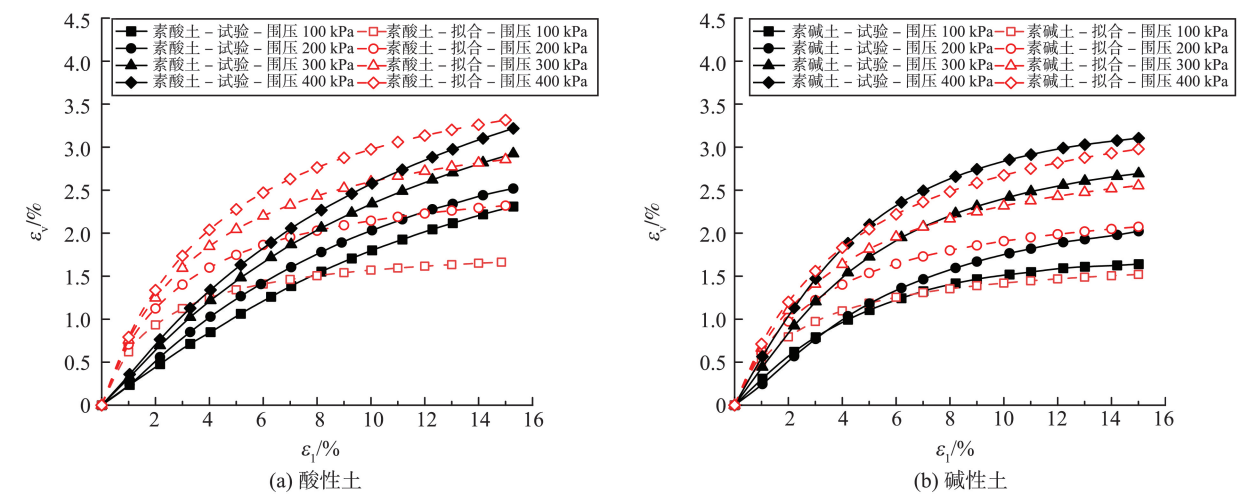
根据上述计算公式采用 Mathematica 语言编制相应的计算程序，并将表 5 试验邓肯-张模型参数结果带入该程序，得到 100、200、300、400 kPa 围压下酸、碱与素土的偏应力-轴向应变($(\sigma_1-\sigma_3)$-ε_1)关系曲线、体应变-轴向应变(ε_{v}-ε_1)关系曲线，并与试验数据拟合曲线对比分析，如图 6、7 所示。



(a) 酸性土　　(b) 碱性土

图 6　偏应力-轴向应变关系曲线

Fig.6　Deviatoric stress-axial strain relationship curve



(a) 酸性土　　(b) 碱性土

图 7　体应变-轴向应变关系曲线

Fig.7　Volumetric strain-axial strain relationship curve

通过对比试验数据和拟合数据的关系曲线，发现二者几乎吻合，良好的吻合关系验证了上述中邓肯-张模型理论推导以及参数取值的准确性。

4 酸碱腐蚀后格室加筋土力学性质

以往土工格室约束围压和加筋土表观黏聚力计算公式是在假定试样在剪切过程中体应变 ε_v 为0的基础上进行推导，但实际情况中，填料在剪切过程中会发生剪胀和剪缩[1]。文献[19-21]基于邓肯-张双曲线模型和摩尔-库伦准则提出的土工格室加筋土破坏轴向应变确定方法，在此基础上，接下来对两种不同材质（PET、PP）的土工格室加固酸性及碱性土进行应力-应变响应研究、对比。

4.1 应力-应变响应模型

对于正常固结黏土，其体变为剪缩，根据三轴试验可知，黏土在剪切过程中具有剪缩趋势并伴随应变硬化特征。在非线弹性模型中，三轴应力状态下广义胡克定律表达式为

$$\mathrm{d}\varepsilon_1=\frac{\mathrm{d}\sigma_1-2v_t\mathrm{d}\sigma_3}{E_t}。\tag{9}$$

基于式(9)，竖向应力 σ_1 和竖向应变 ε_1 及水平向应力 σ_3 的增量关系式[22-23]

$$\mathrm{d}\sigma_1=E_t\mathrm{d}\varepsilon_1+2v_t\mathrm{d}\sigma_3,\tag{10}$$

式中，E_t 由式(3)确定，$\mathrm{d}\sigma_3=\mathrm{d}\sigma_c+\mathrm{d}\sigma_g$，$\sigma_c$ 为土工格室加筋土小主应力，σ_g 为土工格室约束围压，v_t 为式(6)。

格室约束围压 σ_g 的增量形式[22-23]可写为

$$\mathrm{d}\sigma_g=\frac{2M_t}{D_\varepsilon(1-\varepsilon_1)}\left[\frac{AE_tv_t\mathrm{d}\varepsilon_1}{(1-v_t-2v_t^2)}-A\mathrm{d}\sigma_c\right],\tag{11}$$

$$A=\frac{D_\varepsilon(1-\varepsilon_1)(1-v_t-2v_t^2)}{E_tD_\varepsilon(1-\varepsilon_1)+2M_t(1-v_t-2v_t^2)},\tag{12}$$

式中，D_ε 为土工格室加筋土轴向应变达到 ε_1 时格室的等效圆直径，M_t 为土工格室的切线模量由图1格室拉伸曲线试验数据确定。D_ε 的表达式为

$$D_\varepsilon=D_0\sqrt{\frac{1-\varepsilon_v}{1-\varepsilon_1}},\tag{13}$$

式中 D_0 为土工格室网格尺寸的等效圆直径。土工格室的圆周向应变 ε_c 表达式为

$$\varepsilon_c=\sqrt{\frac{1-\varepsilon_v}{1-\varepsilon_1}}-1。\tag{14}$$

基于广义胡克定律，式(13)中变形后等效圆直径 D_ε 的体应变可表示为

$$\mathrm{d}\varepsilon_v=2A\mathrm{d}\sigma_c+\frac{1-2AE_tv_t-v_t-2v_t^2}{1-v_t-2v_t^2}\mathrm{d}\varepsilon_1,\tag{15}$$

将式(11)带入式(10)可得到土工格室加筋土的切线模量和泊松比计算式为

$$\mathrm{d}\sigma_1=E_{tc}\mathrm{d}\varepsilon_1+2v_{tc}\mathrm{d}\sigma_c,\tag{16}$$

$$E_{tc}=E_t\left[1+\frac{4v_t^2M_tA}{D_\varepsilon(1-\varepsilon_1)(1-v_t-2v_t^2)}\right],\tag{17}$$

$$v_{tc}=v_t\left[1-\frac{2M_tA}{D_\varepsilon(1-\varepsilon_1)}\right],\tag{18}$$

式中，E_{tc} 和 v_{tc} 分别为土工格室加筋土复合体的切线模量和泊松比。

4.2 应力-应变响应分析

为探究不同尺寸土工格室、不同材质土工格室、受酸碱污染后土工格室对加筋土应力-应变响应、表观黏聚力的变化程度。主要试样为长30 cm、宽30 cm和长40 cm、宽40 cm两种规格的土工格室；PET、PP格室加固酸性土各6组，PET、PP格室加固碱性土各6组，以及素酸土、素碱土各3组。基于3.2.3节利用试验对邓肯-张模型计算结果验证的准确性，对原样、酸性和碱性环境下PET、PP加筋土在50、100、150 kPa围压中进行计算分析，如表6所示。

表6 计算分析工况

Table 6 Calculating and analyzing working conditions

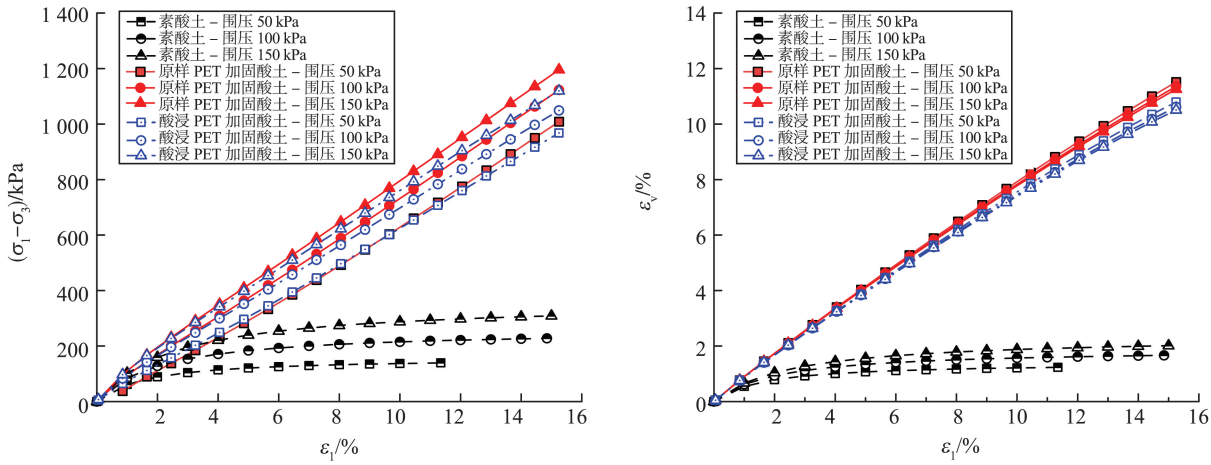
试样	规格/cm	围压/kPa
原样PET格室加固酸性土	30×30 40×40	50/100/150
原样PP格室加固酸性土	30×30 40×40	50/100/150
酸性浸泡PET格室加固酸性土	30×30 40×40	50/100/150
酸性浸泡PP格室加固酸性土	30×30 40×40	50/100/150
原样PET格室加固碱性土	30×30 40×40	50/100/150
原样PP格室加固碱性土	30×30 40×40	50/100/150
碱性浸泡PET格室加固碱性土	30×30 40×40	50/100/150
碱性浸泡PP格室加固碱性土	30×30 40×40	50/100/150

根据面积相等原则可以轻易求解出正方形或菱形土工格室格子的等效圆直径，经计算，30 cm×30 cm规格土工格室的等效圆直径 D_0 为0.34 m，40 cm×40 cm规格土工格室的等效圆直径 D_0 为0.45 m。

4.2.1　PET 格室加筋土

（1）格室加固酸性土

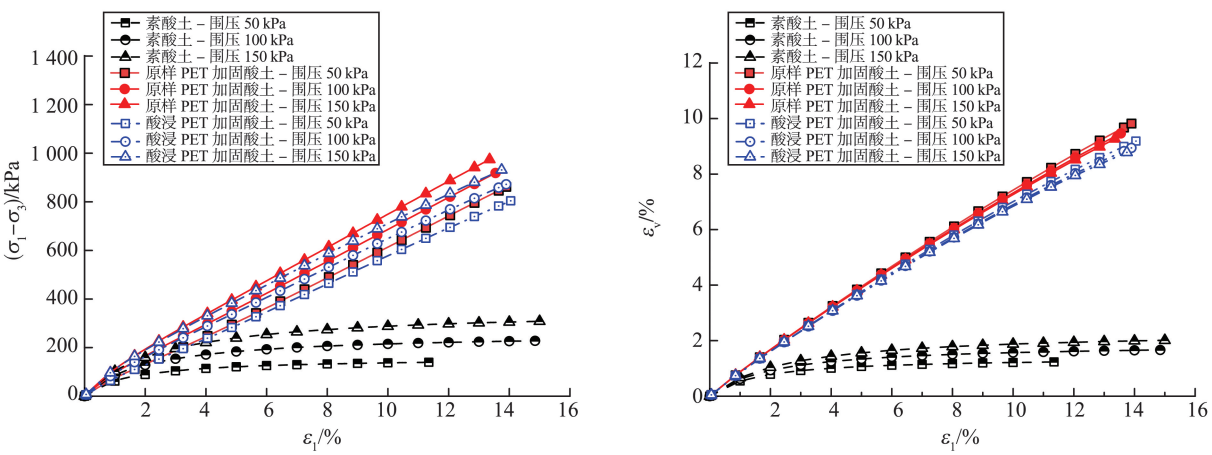
等效直径 D_0 为 0.34 m 与 D_0 为 0.45 m 规格的 PET 卵棒土工格室受酸污染前后的加筋性能对比如图 8、9 所示。在达到 15%轴向应变前就停止计算是因为在试样剪切破坏前，大尺寸格室的节点强度已经达到最大剥离强度而发生破坏。由图 8、9 可知，通过分析素土与格式加筋下的偏应力-轴向应变、体应变-轴向应变曲线，三维格室在加固填料时提供了强大的侧向约束力，使得填料受到更大的围压，增加了填料的主应力，进而提高了填料的强度。侧向约束力可以有效防止填料的侧向位移和变形，使填料在受外部荷载作用时可更好地保持稳定性和强度。因此，三维格室在加固填料方面具有卓越的效果。



(a) 偏应力－轴向应变曲线　　(b) 体应变－轴向应变曲线

图 8　PET（D_0 = 0.34 m、酸性）格室加筋土

Fig.8　Reinforced soil with PET（D_0 = 0.34 m acidic）cells



(a) 偏应力－轴向应变曲线　　(b) 体应变－轴向应变曲线

图 9　PET（D_0 = 0.45 m、酸性）格室加筋土

Fig.9　Reinforced soil with PET（D_0 = 0.45 m acidic）cells

由图 8(a)可知，酸侵蚀后土工格室较原样格室性能降低，且对比轴向应变 ε_1 为 15%时偏应力的数值，围压 50 kPa 下酸污染 PET 格室比原样偏应力减小了 41 kPa，100 kPa 围压下减小了 74 kPa，150 kPa 围压下减小了 76 kPa，随围压增大偏应力差值增大，但都未达到峰值偏差应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$。由图 8(b)可知，在相同围压和轴向应变水平下，酸污染后的格室体应变明显减小。在不同围压下，加筋酸土之间的体应变差值远小于素酸土之间的差值，且随着围压差值增大，体应变差值也增大。

总体来说，通过对比加筋土较小围压下的应力-应变响应，可以看出酸性溶液对 PET 土工格室的污染是比较明显的，这表明酸性溶液会导致 PET 土工格室的强度和稳定性下降。因此，在实际工程中，需要注意酸性溶液对土工格室材料的影响，并采取相应措施来减轻或避免这种影响。

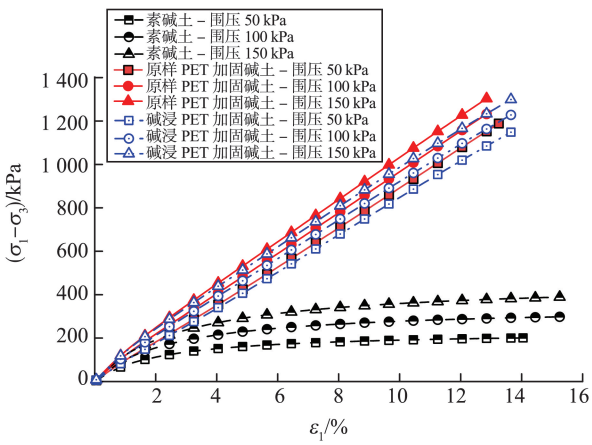
经过上述试验，得出偏应力-轴向应变曲线及应变-轴向应变曲线如图 8、9 所示，可知酸环境下，与小尺寸格室相比，较大尺寸格室加筋土受污染影响更小。由图 9(a)可知，50 kPa 围压下酸污染 PET

格室比未污染时的偏应力减小了 58 kPa，100 kPa 围压下减小了 47 kPa，150 kPa 围压下减小了 43 kPa，即随围压增大偏应力差值减小，与上述较小尺寸格室反应规律相反。可分析出，格室尺寸增大，单个格子内填料增多，格室提供约束能力减弱，则在围压增大的情况下，格室侧向压力占总围压的比例会进一步减小，对强度提高的贡献就会减小，因此偏差应力差值减小。

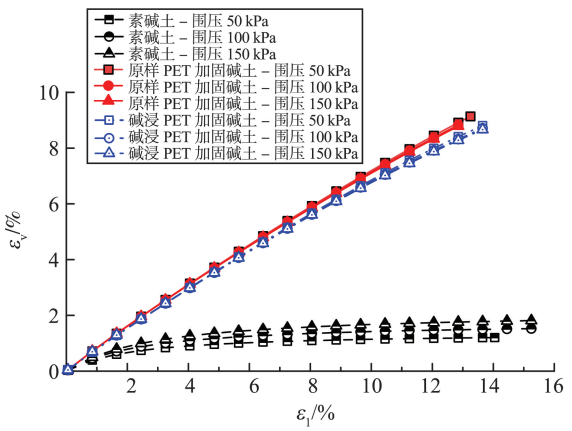
比较两种不同尺寸土工格室偏应力-轴向应变曲线、体应变-轴向应变曲线，格室尺寸越大，偏应力和体应变的增长速率随轴向应变的增加而减小，表明在一定范围内，网格尺寸越小、格室越密，填料的侧向约束越大，加筋土整体的加固效果越好、强度越高。

（2）格室加固碱性土

等效直径 D_0 为 0.34 m 与 D_0 为 0.45 m 规格的 PET 卯榫土工格室受碱污染前后的加筋性能对比图如图 10、11 所示。由图 11（a）可知，碱侵蚀后土工格室较原样格室性能降低，且对比轴向应变 ε_1 为 12.85%时偏应力的数值，围压 50 kPa 下碱污染 PET 格室比原样偏应力减小了 68 kPa，100 kPa 围压下减小了 69 kPa，150 kPa 围压下减小了 69 kPa。可见，碱污染前后的 PET 格室加筋土应力-应变响应差值稳定。



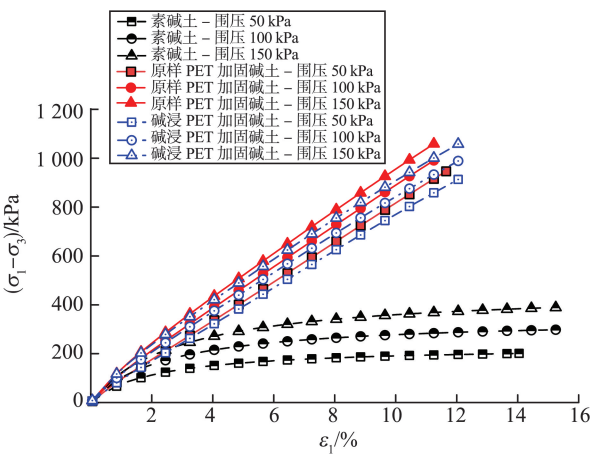
(a) 偏应力－轴向应变曲线



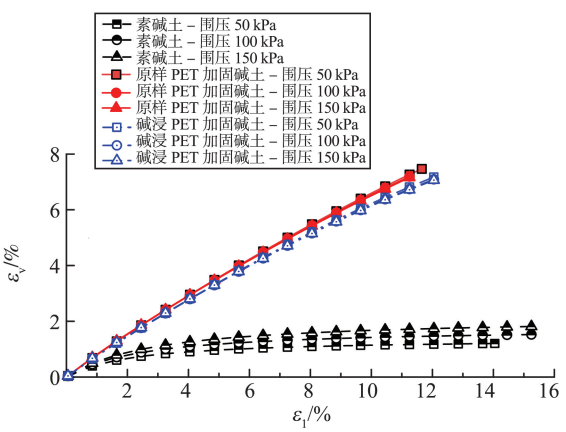
(b) 体应变－轴向应变曲线

图 10　PET（D_0 = 0.34 m、碱性）格室加筋土

Fig.10　Reinforced soil with PET（D_0 = 0.34 m alkaline）cells



(a) 偏应力－轴向应变曲线



(b) 体应变－轴向应变曲线

图 11　PET（D_0 = 0.45 m、碱性）格室加筋土

Fig.11　Reinforced soil with PET（D_0 = 0.45 m alkaline）cells

同一围压下，碱污染前后 PET 格室偏应力最大值几乎相同，这是由于 PET 条带在碱性溶液浸泡后的节点剥离强度仅稍低于原试样，而相同条件下酸性浸泡后节点剥离强度减小较大，这也符合第 3 节的试验结果，即酸性溶液更容易使 PET 这类屈服强度更大的材料节点强度明显降低。

将图 8（a）与图 10（a）对比，无论是素酸土还是加筋酸土，整体处于酸性环境中的土的强度明显低于碱性环境中的土，说明在实际工程中，酸土对土工格室节点强度、刚度等性质的腐蚀更大，对 pH 值较低的土层加筋时更要注意材料的选择和

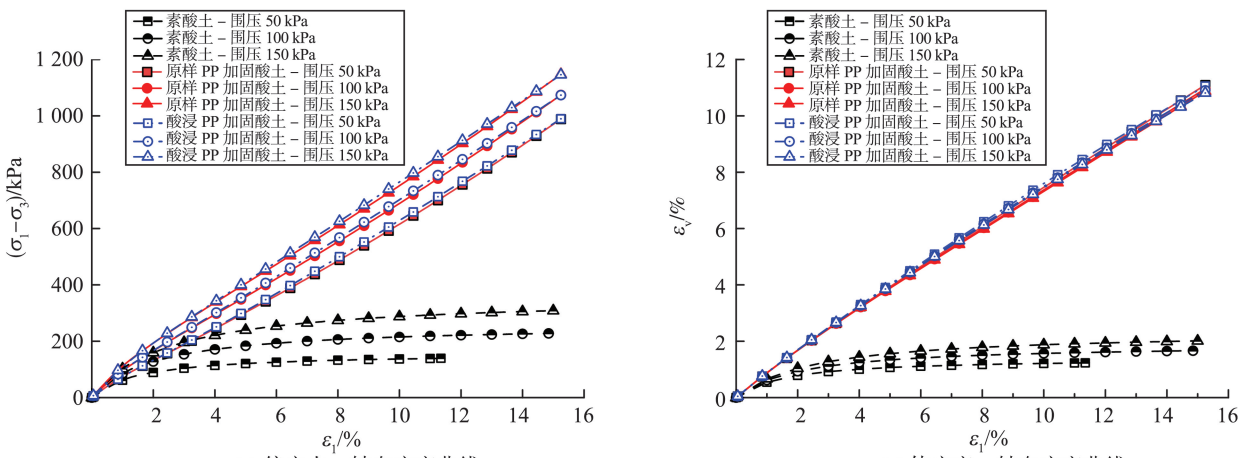
保护。

对比分析图 10(a)、图 11(a)，通过 11.25%轴向应变所对应的偏应力数值可知，50 kPa 围压下碱污染 PET 格室比未污染时的偏应力减小了57 kPa，100 kPa 围压下减小了 58 kPa，150 kPa 围压下减小了 58 kPa。并于上述酸性环境下分析结果对比，说明大尺寸格室在相同条件下偏应力减小明显，仅与网格尺寸有关，而与酸碱性无关。由图 10(b)、11(b)可知，碱性污染后体应变变化较小，对土工格室性能的影响主要体现在偏应力的减小方面。

4.2.2　PP 格室加筋土

(1)格室加固酸性土

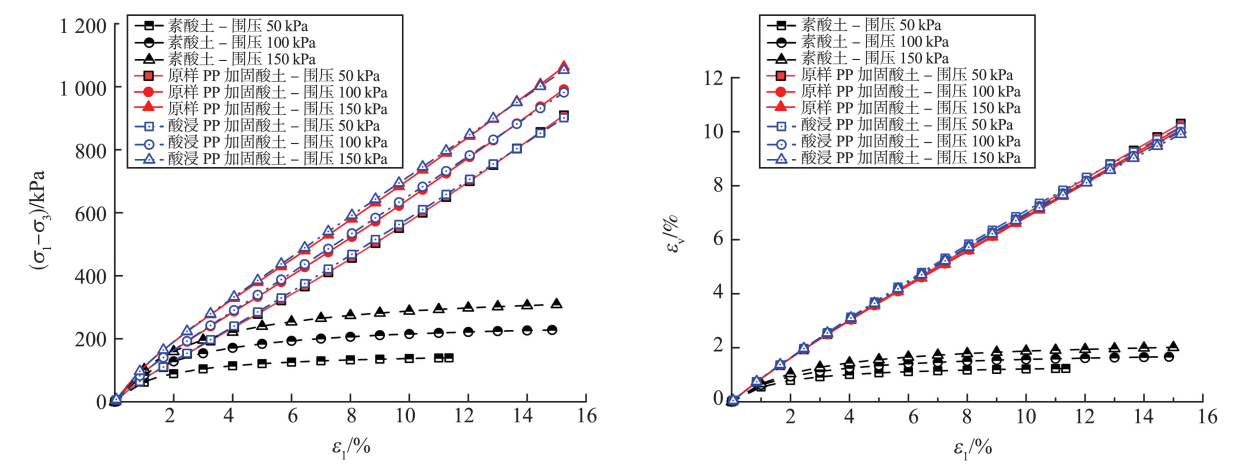
等效直径 D_0 为 0.34 m 与 D_0 为 0.45 m 规格的 PP 卯榫土工格室受酸污染前后的加筋性能对比如图 12、13 所示。由图 12、13 可知，酸污染前后 PP 土工格室性能几乎没有发生改变，且不受网格尺寸影响，这表明 PP 材料具有优越的抗酸腐蚀性能，其强度和刚度不受酸液影响。因此，PP 土工格室这种能在酸性环境下保持稳定的性能，适用于酸土地区需要加筋的场合，在一些特殊环境下具有较好的工程应用价值。



(a) 偏应力 – 轴向应变曲线　　(b) 体应变 – 轴向应变曲线

图 12　PP(D_0 = 0.34 m、酸性)格室加筋土

Fig.12　Reinforced soil with PP (D_0 = 0.34 m acidic) cells



(a) 偏应力 – 轴向应变曲线　　(b) 体应变 – 轴向应变曲线

图 13　PP(D_0 = 0.45 m、酸性)格室加筋土

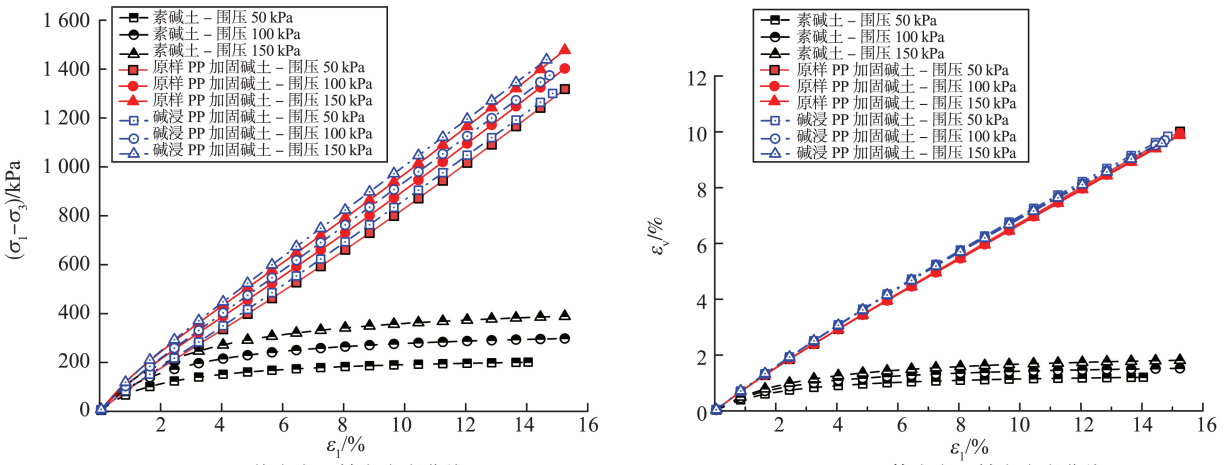
Fig.13　Reinforced soil with PP (D_0 = 0.45 m acidic) cells

(2)格室加固碱性土

等效直径 D_0 为 0.34 m 与 D_0 为 0.45 m 规格的 PP 卯榫土工格室受碱污染前后的加筋性能对比如图 14、15 所示。由图 14、15 可知，碱浸泡能略微提升两种尺寸 PP 格室加筋碱土性能，同一应变下提升幅度大约在 20 kPa 左右。相较于酸污染 PP 格室，碱污染后的 PP 格室在 15%轴向应变之前就已破坏，这是由于碱浸泡后的格室剥离强度降低更多，导致其在较低应变下就失去了稳定性。此外，格室尺寸越大，节点破坏越早，这表明大尺寸 PP 格室加筋土在受到碱污染后会更快失去稳定性。

综上，对酸、碱环境对格室加筋土性质影响进行一系列试验分析，发现酸碱污染后的格室加筋土整体性能降低。通过偏应力–轴向应变曲线及应变–轴向应变曲线图发现，酸碱环境下固结排水三轴试验中偏应力受不同围压影响较体应变明显，且对

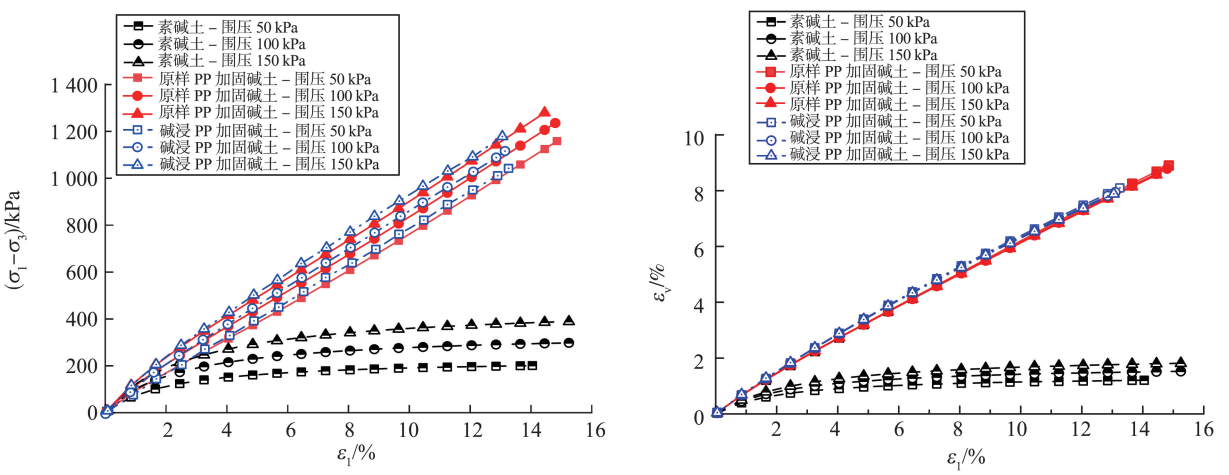
比分析 PP 包胶注塑与 PET 卯榫格室加筋，PET 卯榫格室加筋土受酸碱环境影响较大，主要是因为 PET 条带酸、碱污染后拉伸强度降低量可达到 18.30% 和 14.78%，较 PP 材料降低了 16.57% 和 10.79%，高 1.73～3.01%。其次酸碱环境可使相同轴向应变下偏应力与体应变变化增大，这主要是因为在 4.1 节试验中体现出的酸、碱环境主要对土体黏聚力 c、内摩擦角 φ 产生较大影响。



(a) 偏应力－轴向应变曲线　　(b) 体应变－轴向应变曲线

图 14　PP(D_0=0.34 m、碱性)格室加筋土

Fig.14　Reinforced soil with PP(D_0=0.34 m alkaline) cells



(a) 偏应力－轴向应变曲线　　(b) 体应变－轴向应变曲线

图 15　PP(D_0=0.45 m、碱性)格室加筋土

Fig.15　Reinforced soil with PP (D_0=0.45 m alkaline) cells

4.3　表观黏聚力

将土工格室和内部填土视为一种复合材料，则复合材料与素土的内摩擦角相同，由于土工格室对土的侧向约束力增大了填料围压，使得复合材料的黏聚力提高，这部分增加的黏聚力叫做表观黏聚力[1]。

若将土工格室对填料的约束作用等效为围压 σ_g，则根据摩尔-库伦准则对于黏性土有

$$\sigma_1=(\sigma_c+\sigma_g)K_p+2c\sqrt{K_p}\ , \tag{19}$$

式中：σ_c 为土工格室加筋土的周围压力；K_p 为被动土压力系数，$K_p=\tan^2(45°+\frac{\varphi}{2})$。

而对于土工格室加筋土复合材料有

$$\sigma_1=\sigma_cK_p+2(c+c_r)\sqrt{K_p}\ , \tag{20}$$

式中，c_r 为格室约束围压引起的表观黏聚力。

令式(19)等于式(20)，则

$$c_r=\frac{\sigma_g}{2}\tan(45°+\frac{\varphi}{2})\ , \tag{21}$$

式中 σ_g 可根据薄壁圆筒张拉理论，由式(22)确定。

$$\sigma_g=\frac{2M_s}{D_\varepsilon}\frac{\varepsilon_c}{(1-\varepsilon_1)}\ , \tag{22}$$

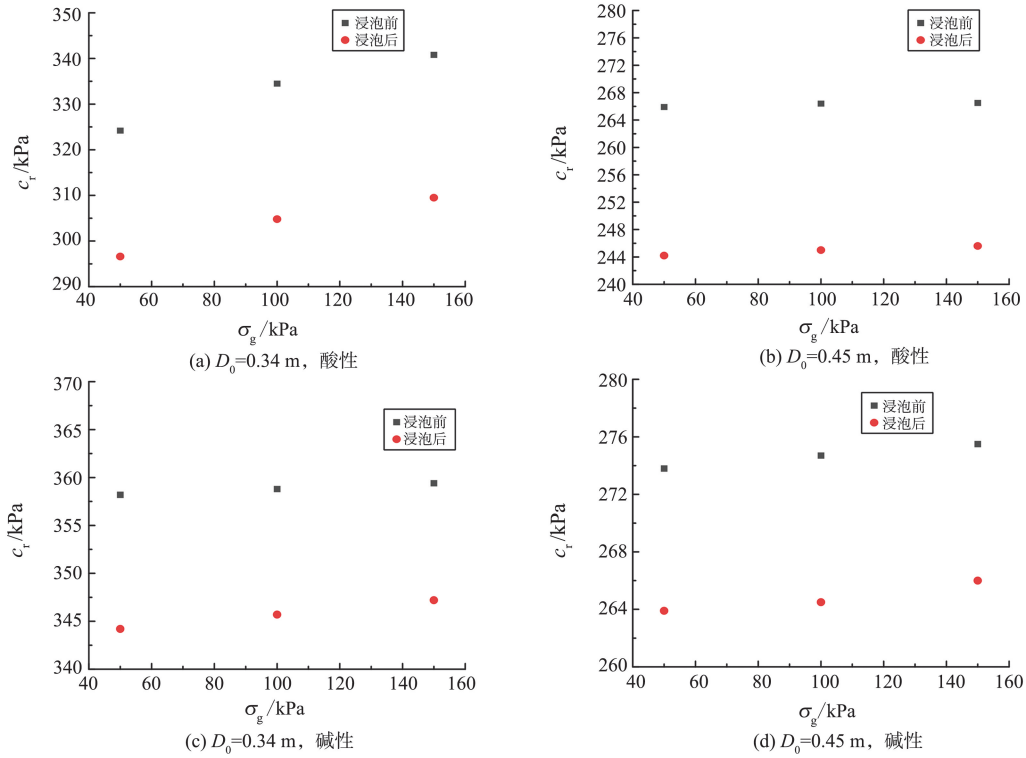
式中，M_s 为格室片拉伸应变达到 ε_c 时，对应的割线模量。

若土工格室节点强度较低，在未达到填料峰值强度前发生断裂，那么需采用加筋体破坏时对应的起动摩擦角 φ_{mob} 代替式(21)中内摩擦角 φ，得出表观黏聚力[24] c_r：

$$c_r=\frac{\sigma_g}{2}\tan(45°+\frac{\varphi_{mob}}{2})\ , \tag{23}$$

$$\varphi_{\text{mob}}=2\arctan\left(\frac{\sqrt{\sigma_1\sigma_3+c^2}-c}{\sigma_3}\right)-90°。\quad(24)$$

根据以上公式和图 8～11、图 12～15 计算可得到不同规格 PET、PP 材质土工格室在酸碱污染前后格室加筋土复合材料的表观黏聚力，为直观性表现出酸碱污染前后表观黏聚力变化，绘制出围压为 50、100、150 kPa 时表观黏聚力散点图，如图 16、17 所示。

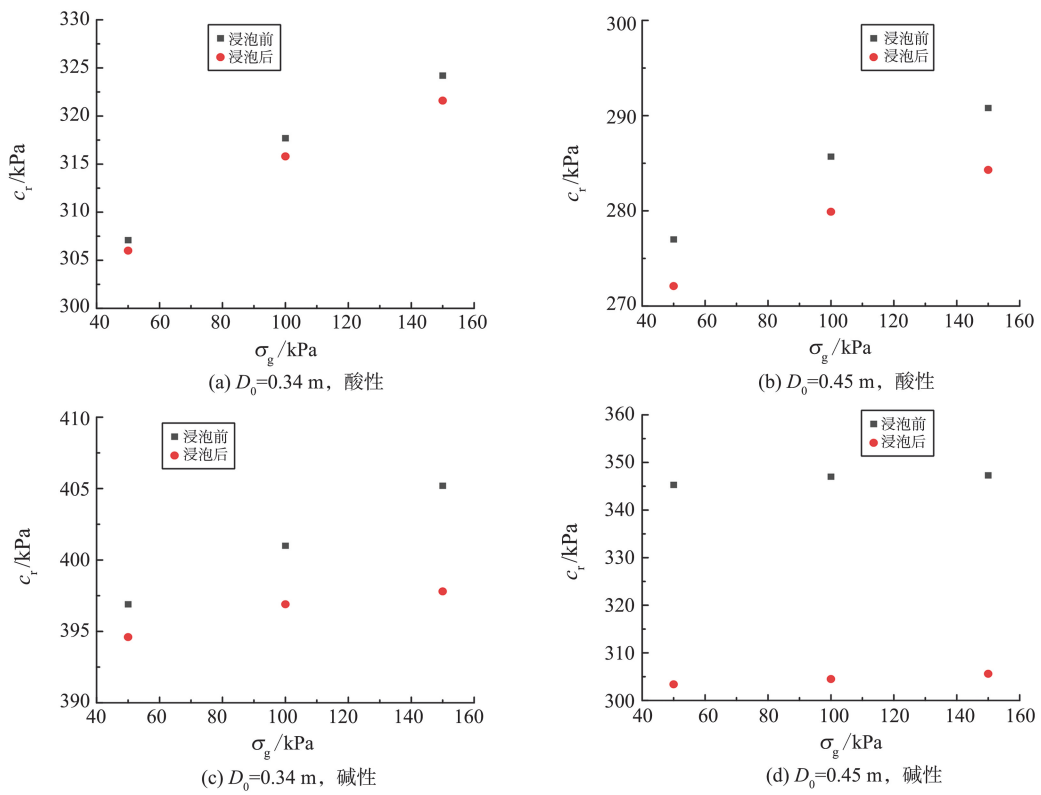


(a) D_0=0.34 m，酸性　(b) D_0=0.45 m，酸性

(c) D_0=0.34 m，碱性　(d) D_0=0.45 m，碱性

图 16　PET 格室加筋土表观黏聚力

Fig.16　Apparent cohesion of PET cell reinforced soil



(a) D_0=0.34 m，酸性　(b) D_0=0.45 m，酸性

(c) D_0=0.34 m，碱性　(d) D_0=0.45 m，碱性

图 17　PP 格室加筋土表观黏聚力

Fig.17　Apparent cohesion of PP cell reinforced soil

由图 16、17 可知,格式加筋土复合材料的表观黏聚力与围压成正比关系,与网格尺寸成反比关系。对比图 16、17,可直观分析出:酸液浸泡对 PET 格室加筋土的表观黏聚力影响显著,浸泡前后表观黏聚力平均减小约 25 kPa,对等效直径 0.45 m 的 PP 格室加筋土表观黏聚力影响范围为 5~10 kPa,而等效直径 0.34 m 的 PP 格室加筋土几乎没受影响;碱浸泡对 PET 格室加筋土的影响相对较小,浸泡前后表观黏聚力平均减小了约 12 kPa,对等效直径 0.34 m 的 PP 格室也并未造成太大影响,但等效直径 0.45 m 的 PP 格室表观黏聚力却减小了约 42 kPa。通过以上分析,表明:(1)PET 格室加筋土对碱腐蚀的抵抗能力比酸腐蚀强;(2)格室在碱性条件下的强度损失大部分发生在初始阶段,随着时间延长,强度趋于稳定,但 PP 格室尺寸过大以及格室过于稀疏会导致加固的碱土在达到稳定前就已发生破坏,即表现出加筋效果欠佳,进一步表明网格尺寸会影响加筋土内部的应力分布和变形特性,对于这种碱污染后的 PP 加筋土,等效直径 0.45 m 的格室并非合适的尺寸。

5 结论

本研究针对酸、碱腐蚀后格室加筋土力学性能,同时推导出酸、碱环境下格室邓肯-张模型参数,并通过推导其应力-应变响应模型,对不同等效直径格室酸、碱环境偏应力-轴向应变及体应变-轴向应变进行分析,得出以下结论。

(1)酸碱浸泡均会降低 PP、PET 土工格室条带刚度,主要是因为土工格室材料受酸碱影响会发生一定程度离散,致使材料不均匀,其刚度随应变增长的速率受酸碱浸泡影响会大幅降低,且降幅较接近。

(2)由于条带刚度是取拉伸曲线前 5%的直线段来确定,故酸碱对条带刚度与条带拉伸的影响程度相当,其中 PET 条带刚度降低最多,其次是 PP 降低 13%左右。

(3)PET 土工格室加筋土在酸污染后强度和稳定性下降明显,而在碱污染后只是稍有下降。小尺寸 PP 土工格室加筋土几乎不受酸碱污染影响,但格室尺寸增大后受碱污染容易使加筋土整体剪切破坏。

(4)在低应变水平下,酸液浸泡对格室加筋土刚度影响较小,但随着轴向应变增大,偏差应力差值也会增大。网格尺寸越大,偏应力和体应变的增长速率随轴向应变的增加而减小。

(5)土工格室的约束作用基本不会改变填土内摩擦角,而会使加筋土的黏聚力大幅提高,但在酸碱污染后,格室约束引起的表观黏聚力又会减小,使得格室加筋土复合材料强度降低。其中,PET 格室加筋土表观黏聚力在酸污染后降低较多,在碱污染后也有较小幅度的降低;PP 格室加筋土表观黏聚力在酸碱污染前后小尺寸格室受影响较小,对大尺寸格室影响较大,同时还需注意网格不宜过大、过稀。

参考文献:

[1] 宋飞, 刘杰. 土工格室加筋土等效强度与等效刚度计算方法[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2020:1-5.
SONG Fei, LIU Jie. Calculation method of equivalent strength and equivalent stiffness of geocell reinforced soil [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2020:1-5.

[2] HASSANLOURAD M, KHATAMI M H, AHMADI M M. Effects of sulphuric acid pollutant on the shear behaviour and strength of sandy soil and sand mixed with bentonite clay [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2016: 1-6.

[3] 刘华, 胡鹏飞, 王松鹤, 等. 酸溶液对原状黄土抗拉强度的影响试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(5): 109-117.
LIU Hua, HU Pengfei, WANG Songhe, et al. Experimental study on the influence of acid solutions to the tensile strength characteristics of undisturbed loess[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 109-117.

[4] 刘华, 胡文乐, 胡鹏飞, 等. 酸污染黄土强度指标及电阻率评价研究[J].地下空间与工程学报, 2022, 18(2): 662-672.
LIU Hua, HU Wenle, HU Pengfei, et al. Evaluation of strength index and resistivity of acid-contaminated loess [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(2): 662-672.

[5] ABEDI KOUPAI J, FATAHIZADEH M, MOSADDEGHI M R. Effect of pore water pH on mechanical properties of clay soil [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(3): 1461-1469.

[6] ALIBEIKI Y, HASSANLOURAD M, GHASEMIPANAH A. Effect of acidic and alkaline pore fluid on the mechanical properties of fine-grained soil[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(12): 512.

[7] 刘华, 张硕成, 牛富俊, 等. 酸碱污染 Q3 黄土的一维压缩特征试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 210-216.
LIU Hua, ZHANG Shuocheng, NIU Fujun, et al. Experimental study on one-dimensional compression

characteristics of Q3 loess contaminated by acid or alkali solutions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Suppl. 1): 210-216.

[8] 陈玉英. 土工合成材料的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2004(2): 25-25.

[9] 朱庆松, 魏晓丽, 孙玉山, 等. 影响丙纶土工布老化的主要环境因素[J]. 纺织科学研究, 2003, 14(4): 37-42.
ZHU Qingsong, WEI Xiaoli, SUN Yushan, et al. Main environmental factors affecting the aging of polypropylene geotextile[J]. Textile Science Research, 2003, 14(4): 37-42.

[10] ROWE R K, ABDELAAL F B. Antioxidant depletion in high-density polyethylene (HDPE) geomembrane with hindered amine light stabilizers (HALS) in low-pH heap leach environment[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(10): 1612-1627.

[11] 苏有文, 杨婷惠, 杨凯, 等. 复合土工膜耐酸碱性能试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2016, 44(4): 456-460.
SU Youwen, YANG Tinghui, YANG Kai, et al. Experimental study on corrosion resistance of composite geomembranes[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2016, 44(4): 456-460.

[12] ZHANG L, BOUAZZA A, ROWE R K, et al. Effects of a very low pH solution on the properties of an HDPE geomembrane[J]. Geosynthetics International, 2018, 25(2): 118-131.

[13] 侯娟, 张孟喜, 韩晓, 等. 单个高强土工格室作用机理的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊1): 26-30.
HOU Juan, ZHANG Mengxi, HAN Xiao, et al. Finite element analysis of the action mechanism of a single high-strength geocell [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Suppl.1): 26-30.

[14] 交通部公路科学研究所,重庆交通学院,重庆百天塑料建材有限公司. 公路工程土工合成材料 土工格:JT/T 516—2004[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.

[15] 中华人民共和国农业部.土壤检测第 2 部分:土壤 pH 的测定:NY/T 1121.2—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

[16] 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.

[17] 刘宽, 叶万军, 高海军, 等. 酸碱污染黄土抗剪强度演化规律及微观机制[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊1): 1-12.
LIU Kuan, YE Wanjun, GAO Haijun, et al. Evolution law and micro-mechanism of shear strength of acid-base polluted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(Suppl.1): 1-12.

[18] DUNCAN J M.Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses[J]. Journal of Consulting & Clinical Psychology, 1980, 49(4):554-567.

[19] 马健玮. 屈服函数和弹性变形对格室加筋土等效强度和等效刚度计算方法的影响研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
MA Jianwei. Research on the effect of yield function and elastic deformation on the calculation method of equivalent strength and equivalent stiffness of lattice-cell reinforced soil[D]. Xi′an: Chang′an University, 2020.

[20] 孟亚会.土工格室加筋土等效强度与等效刚度确定方法研究[D]. 西安:长安大学, 2019.
MENG Yahui. Research on the method of determining equivalent strength and equivalent stiffness of geocell reinforced soil[D]. Xi′an:Chang′an University, 2019.

[21] ZHANG B, SONG F, LI W G. Stability analysis of retaining walls with geocell-reinforced road milling materials[J]. Sustainability, 2023, 15(5): 4297.

[22] SONG F, JIN Y T, LIU H B, et al. Analyzing the deformation and failure of geosynthetic-encased granular soil in the triaxial stress condition[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(6): 886-896.

[23] SONG F, CHEN W, NIE Y, et al. Evaluation of required stiffness and strength of cellular geosynthetics [J]. Geosynthetics International, 2022, 29(3): 217-228.

[24] 宋飞, 石磊, 樊明尊. 土工格室加筋正常固结粉质黏土应力应变响应[J]. 地质科技通报, 2024, 43(1): 184-193.
SONG Fei, SHI Lei, FAN Mingzun. Stress-strain response of normal consolidated silty clay reinforced in geocell [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(1): 184-193.

(编辑:宋艳)