

DOI: 10.11779/CJGE20220136

基于精细化数值模拟的 EPS 轻质土宏细观变形机理研究

申志福, 沈光明, 王志华, 高洪梅*

(南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要: EPS 轻质土是双固相组分(水泥土与 EPS 颗粒)、具有特殊细观结构的混合土。当前对其宏观力学特性研究较多, 而对细观力学响应规律研究甚少。为此, 分别在 Mohr-Coulomb 模型和 Drucker-Prager 模型框架内, 基于水泥土和 EPS 材料试验结果规律总结, 发展了二者的简单实用本构模型; 基于水泥土和 EPS 材料界面剪切试验, 总结了界面剪切硬化/软化规律; 对 EPS 轻质土三轴剪切试验进行精细化数值模拟, 再现了 EPS 轻质土宏观应力-应变响应规律和试样变形模式。基于精细化模拟分析发现, EPS 轻质土的整体剪切、局部鼓胀、整体均匀 3 种宏观变形模式是细观力学响应的结果, EPS 颗粒与水泥土两种材料力学特性的差异引起试样内部应力、应变的非均匀分布, EPS 颗粒的非均匀排列强化应力、应变非均匀分布程度, 两种因素共同决定试样宏观变形的非均匀性。

关键词: EPS 轻质土; 宏细观机理; 三轴剪切试验; 变形模式; 精细化数值模拟

中图分类号: TU34 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)05-0931-09

作者简介: 申志福(1988—), 男, 四川绵阳人, 博士, 副教授, 主要从事宏微观土力学方面研究。E-mail: zhifushen@njtech.edu.cn。

Macro- and meso-scopic deformation mechanisms of EPS-mixed soils based on refined numerical simulation

SHEN Zhifu, SHEN Guangming, WANG Zhihua, GAO Hongmei

(School of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: The EPS-mixed soils are composed of two solid phases (cemented soils and EPS beads) with the unique mesoscopic structure. The macroscopic behaviour of the EPS-mixed soils has been widely investigated so far, but the focus has seldom been put on the mesoscopic behaviour. In this study, following the frameworks of Mohr-Coulomb model and Drucker-Prager model respectively, the constitutive descriptions of the cemented soils and the EPS materials are developed based on their mechanical test results. Besides, the strain hardening/softening laws of the cemented soil-EPS material interface are summarized based on the interface shear tests. The refined numerical simulations of triaxial shear tests on the EPS-mixed soils are carried out, with which the macroscopic stress-strain behavior and deformation modes of the EPS-mixed soil specimens are replicated. The refined numerical simulations reveal that the three types of deformation modes of the specimens (shear banding, local lateral expansion, overall uniform deformation) can be attributed to the non-uniform mesoscopic mechanical responses. The distinct mechanical behavior of the cemented soils and the EPS materials is the origin of non-uniform stress and strain distributions, and such non-uniformity is enhanced by the non-uniform spatial distribution of the EPS beads. The two factors collaboratively determine the non-uniformity of the macroscopic deformation observed for the EPS-mixed soil specimen.

Key words: EPS mixed soil; macro- and meso-scopic mechanism; triaxial shear test; deformation mode; refined numerical simulation

0 引言

聚苯乙烯(EPS)颗粒轻质混合土(以下简称 EPS 轻质土)是一种轻质土工合成材料, 由原料土、EPS 颗粒、胶结材料和水按一定比例混合而成, 具有高强质比、绿色环保、施工方便等优点。将 EPS 轻质土与纤维结合提高土体韧性^[1]、减轻膨胀土病害^[2]则进一步拓展其应用范围。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51908284); 国家自然科学基金面上项目(52178336); 江苏省科技厅自然科学基金青年基金项目(BK20190667); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB560015); 江苏省高等学校自然科学研究重点项目(18KJA560002); 江苏高校“青蓝工程”中青年学术带头人项目资助项目

收稿日期: 2022-02-08

*通信作者 (E-mail: hongmei54@163.com)

早期对 EPS 轻质土力学特性的研究多采用一维压缩、三轴剪切等方法。近年来针对 EPS 轻质土的蠕变特性^[3-4]、循环加载响应^[5-8]和侧向土压力系数^[9]等问题也有一定程度研究。基于已有试验结果, 侯天顺等^[10]采用 DUCAN-Chang 双曲线模型与 Prevost 软化模型拟合了 EPS 轻质土的三轴剪切结果; 肖杨等^[11]基于椭圆-抛物双屈服面发展了 EPS 轻质土的本构模型。

EPS 轻质土宏观力学特性取决于其独特的微细观结构。朱伟等^[12]、姬凤玲等^[13]将疏浚淤泥 EPS 轻质土的宏观力学响应与微观结构观察相关联, 定性分析了试样的渐进性 3 阶段特征, 即线弹性变形阶段(细观裂纹产生)、弹塑性阶段(细观裂纹稳定扩展)、软化阶段(细观裂纹整体贯通)。王庶懋等^[14]采用 CT 扫描结果探讨了砂土、EPS 颗粒、水泥混合轻质土在不同水泥含量下的微观结构, 强调了该轻质土局部孔隙比分布差异较大的细观结构特征。EPS 轻质土的微细观结构对其力学特性的影响非常显著, 主要有 3 方面的试验证据: ①原料土为砂土^[7, 14-16]或细粒土^[10, 12, 17-18]时 EPS 轻质土的力学特性有明显差异, EPS 颗粒与砂砾石颗粒之间的相对大小关系对侧向土压力系数及内部荷载传递机理有明显影响^[9]; ②马时冬^[19]试验发现, EPS 颗粒形态对 EPS 轻质土的力学影响一般规律为球状优于碎粒状、优于片状; ③对基于等体积比^[15]或等质量比^[20-21]掺入不同尺寸(范围) EPS 颗粒的轻质土的剪切试验表明, EPS 颗粒粒径越小, EPS 轻质土的抗剪强度和初始切线(或割线)模量越大。

因此, 从 EPS 轻质土本身的特有的微细观结构特征出发研究其力学特性具有重要理论意义。兰鑫等^[22]尝试采用离散元法模拟 EPS 轻质土的力学特性。OMINE 等^[23]、顾欢达等^[16]基于 EPS 颗粒和胶结土各自的本构模型, 采用体积加权方法推导了 EPS 轻质土的本构模型, 但其中关于 EPS 颗粒和胶结土应变能增量一致、EPS 颗粒和胶结土各应力分量同比例分担等关键假设均需进一步论证。EPS 轻质土的固相是由较刚较强的水泥土和较软较弱的 EPS 颗粒复合而成, 有其独特的微细观结构, 且这种结构对其宏观力学特性的影响已广泛为试验结果证实, 但对这种影响的机理认识还不充分。故而有必要从微细观角度研究 EPS 轻质土宏观力学特性的微细观机制。为此, 本研究基于 EPS 轻质土三轴剪切试验结果, 借助精细化数值模拟手段, 研究剪切变形过程中试样的宏细观变形机理。首先介绍水泥土、EPS 材料以及两者界面的本构模型与参数, 随后介绍 EPS 轻质土的精细化数值模型构建, 最后分析讨论 EPS 轻质土内部应力、应变的非均匀分布特征, 揭示宏观变形模式的细观机理。

1 水泥土的本构模型与参数

1.1 水泥土的典型力学特性

本研究中 EPS 轻质土的原料土为南京地区淤泥质粉质黏土, 其含水率为 48.1%, 饱和密度为 1.68 g/cm³, 土粒相对质量密度为 2.74, 液限为 39.2%, 塑限为 22.6%。胶结材料为 P·C32.5R 复合硅酸盐水泥, 拌合采用纯净水。水泥土试样为实心圆柱样, 直径为 39.1 mm, 高为 80 mm, 水泥掺入比 m_c/m_s (水泥掺入质量 m_c 与原料干土质量 m_s 之比) 取 6%, 8%, 10%。以 8% 水泥掺入比为例, 不同围压 σ_3 (取 25, 50, 75, 100 kPa) 下的水泥土三轴剪切力学特性如图 1 所示。其力学特性有以下规律: ①应力-应变曲线形态为软化型、体变为剪胀型, 围压增大减缓剪胀和软化特性; ②水泥掺入增加提高试样强度, 软化与剪胀愈加明显。本研究采用适合岩土材料的 Mohr-Coulomb 模型描述水泥土的力学特性, 以下从弹性模型、屈服函数与应变硬化/软化规律和塑性流动准则 3 方面介绍该模型。

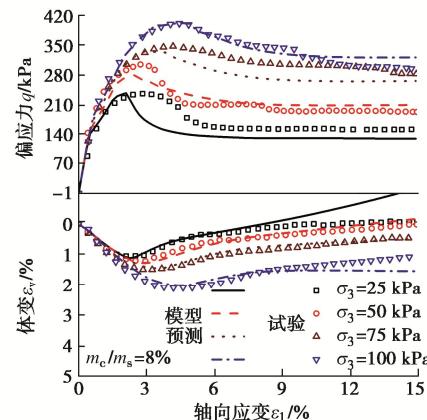


图 1 水泥土的三轴剪切力学特性 ($m_c/m_s = 8\%$)

Fig. 1 Mechanical behaviors of cemented soils under triaxial loading ($m_c/m_s = 8\%$)

1.2 弹性模型

采用各向同性弹性模型描述水泥土的弹性变形特性。由图 1 可知, 围压对水泥土的初始弹性参数影响较小; 为简化模型, 不考虑围压对弹性参数的影响。通过三轴剪切试验曲线初始段可推得水泥土弹性参数: 水泥掺入比 6%, 8%, 10% 对应的弹性模量分别为 15, 30, 39 MPa, 泊松比均取 0.25。

1.3 屈服函数与应变硬化/软化规律

采用 Mohr-Coulomb 屈服函数描述水泥土的剪切屈服特性, 屈服函数为

$$f_{MC}^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi - 2c\sqrt{N_\varphi} \quad . \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为大、小主应力(应力、应变均以

压为正, 下同); $N_\varphi = (1+\sin\varphi)/(1-\sin\varphi)$, φ 为发挥内摩擦角; c 为发挥黏聚力。 φ , c 的变化规律即为应变硬化/软化规律, 一般表达为等效塑性剪应变的函数以反映屈服面随塑性变形的扩大或缩小。本研究中等效塑性剪应变定义为

$$\varepsilon_s^p = \frac{2\sqrt{3}}{3} \int \sqrt{0.5 \delta e_{ij}^p \delta e_{ij}^p} \quad (2)$$

式中: δe_{ij}^p 为塑性应变偏张量增量。

在特定等效塑性剪应变 ε_s^p 下, 不同围压的各水泥土试样在 $p-q$ 空间中的应力状态点可拟合为一条直线, 其截距和斜率分别用 μ , M 表示, 其中球应力 $p = \sigma_{ii}/3$, 偏应力 $q = \sqrt{3J_2}$, J_2 为应力偏张量第二不变量。某等效塑性剪应变下的 φ , c 分别由换算得:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \sin^{-1}[3M/(6+M)], \\ c &= (3-\sin\varphi)\mu/(6\cos\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

发挥强度指标随等效塑性剪应变 ε_s^p 的变化规律如图 2 所示。可以看到, 随 ε_s^p 增加, 发挥内摩擦角从约 10° 的初始值开始逐渐增长, 在 ε_s^p 超过 4% 后略有降低并趋近于某一稳定值; 发挥黏聚力初期随 ε_s^p 增大而增大, 在 ε_s^p 约 2% 时达到峰值, 随后快速衰减并在 ε_s^p 超过 4% 后转为缓慢衰减, 逐渐趋近于某一稳定值。在 ε_s^p 趋近零时, 水泥土的发挥强度不为零, 对应初始屈服状态。

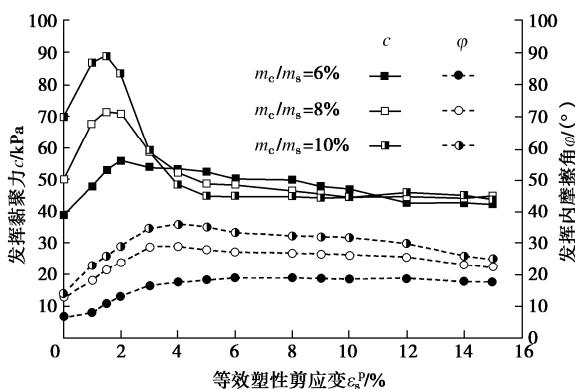


图 2 水泥土发挥强度指标随等效塑性剪应变的变化

Fig. 2 Variation of mobilized strength indices with equivalent plastic shear strain for cemented soils

为使水泥土不至产生不合理的拉应力, 增加拉伸屈服面:

$$f_{MC}^t = \sigma_3 + \sigma_{C-soil}^t \quad (4)$$

式中: σ_{C-soil}^t 为水泥土抗拉强度。

直接测定 σ_{C-soil}^t 较为困难, 一般可取 $\sigma_{C-soil}^t = \alpha c / \tan \varphi$, α 为小于 1 的常数。考虑到水泥土拉伸的弹脆性响应特点, 在拉伸方向不考虑硬化/软化过程, 一旦应力状态达到拉伸屈服, 材料将永久失去抗拉能

力(即令 $\sigma_{C-soil}^t = 0$)。

1.4 塑性流动准则

在拉伸方向简单采用关联流动法则。在剪切方向, 采用非关联流动准则描述水泥土的剪切塑性流动规律。剪切塑性势面为

$$g_{MC}^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (5)$$

式中: $N_\psi = (1+\sin\psi)/(1-\sin\psi)$, ψ 为发挥剪胀角。

根据水泥土三轴剪切体变曲线整理得到剪胀角 ψ 随等效塑性剪应变 ε_s^p 、应力比 η 和平均应力 p 的变化关系可拟合为

$$\psi = \left(\frac{a_1 \varepsilon_s^p}{1 + a_2 \varepsilon_s^p} \right) \left(\frac{\eta}{\eta_{cr}} \right)^{a_3} \left(a_4 \frac{p}{p_a} + 1 \right) + a_5 \quad (6)$$

式中: a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 均为拟合参数, 如表 1 所示。

表 1 不同水泥掺入比下水泥土发挥剪胀角公式的拟合参数

Table 1 Fitting parameters for mobilized dilation angle of cemented soils under different cement contents

水泥掺入比/%	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
6	398	7.0	0.40	-0.020	-56
8	177	3.2	0.72	-0.030	-53
10	70.0	1.3	0.75	-0.008	-57

1.5 模型能力检验

利用 FLAC3D 软件提供的应变软化型 Mohr-Coulomb 模型框架, 自编 FISH 函数植入上述总结的规律, 采用一个立方体单元模拟的三轴剪切加载结果与试验对比如图 1 所示, 可见上述模型能很好反映水泥土的典型力学特性。当剪胀角 $<-10^\circ$ (此时等效塑性剪应变小于 2%, $\eta/\eta_{cr} \leqslant 0.8$), 剪胀角拟合误差较大; 相应在图 1 中剪切初期, 由于试样体积应变中弹性分量占比较大, 塑性部分占比较小, 剪胀角拟合误差导致的塑性体变误差表现不明显。可以认为剪胀角 $>-10^\circ$ 是拟合的剪胀方程适用的范围。

2 EPS 材料的本构模型与参数

2.1 EPS 材料的典型力学特性

总结文献试验资料^[24-30], EPS 材料在三轴剪切下的典型力学特性如图 3 所示, 表现出以下特点: ①初始弹性段斜率受围压影响很小, 初始屈服点(线性段终点)受围压影响, 围压越大初始屈服应力越低; ②剪切屈服后, 剪应力随轴向应变增大而继续增长, 增长斜率逐渐降低并最终稳定在某一定值, 该稳定斜率受围压影响较小; ③在常见试验围压范围内(100 kPa 以内), 抗剪强度随围压增大而减小(与土体等摩擦性材料显著不同), 内摩擦角为负; ④围压越大, 塑性体变越大, 塑性体变与轴向应变的比值在加载过程中基本

不变;⑤真三轴加载获得的 π 平面上屈服面为圆形^[29];⑥力学特性明显受 EPS 材料密度影响。值得注意的是,上述试验现象是基于 EPS 颗粒黏聚形成的 EPS 块体试验得到的。当前尚无文献报道 EPS 材料本身力学特性(因其以颗粒形态存在,难以进行力学试验)。故本研究采用 EPS 块体力学特性近似反映 EPS 材料的力学特性。

由于 EPS 材料在 π 平面上屈服面为圆形,适合选用 Drucker-Prager 模型描述其塑性力学特性,并有必要引入应变硬化规律。以下从弹性模型、屈服函数与应变硬化规律和塑性流动准则 3 方面介绍该模型。

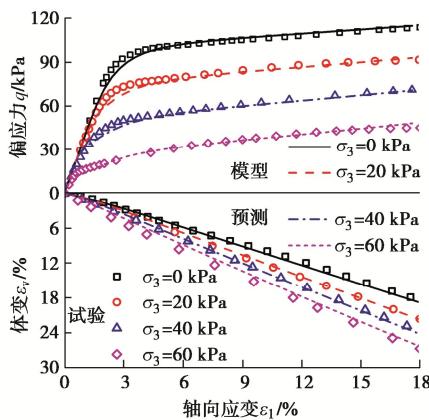


图 3 EPS 材料的典型三轴剪切力学响应 ($\rho=20 \text{ kg/m}^3$)^[30]

Fig. 3 Typical mechanical behaviors of EPS materials under triaxial shear loading

2.2 弹性模型

采用各向同性弹性模型描述 EPS 材料的弹性变形特性。EDO^[31]给出的 EPS 材料泊松比 ν 与密度的经验关系为

$$\nu = 0.0056\rho + 0.0024 \quad . \quad (7)$$

式中: ρ 为密度, 单位取 kg/m^3 。

HORVATH^[32]总结的 EPS 材料弹性模量与密度的经验关系为

$$E = 0.0097\rho^2 - 0.014\rho + 1.8 \quad . \quad (8)$$

式中: E 为弹性模量, 单位取 MPa ; ρ 为密度, 单位取 kg/m^3 。

2.3 屈服函数与应变硬化规律

采用 Drucker-Prager 屈服函数描述 EPS 材料的剪切屈服特性, 屈服函数为

$$f_{DP}^s = q - q_\phi p - k_\phi \quad . \quad (9)$$

式中: q_ϕ , k_ϕ 为与发挥强度参数 ϕ , c 有关变量。

为规避内摩擦角为负导致的数值计算问题, 此处令内摩擦角 ϕ 为 0, 并根据球应力 p 调整等效黏聚力 \bar{c} 来反映“围压增大剪切强度减小”的特性, 此时有 $q_\phi=0$ 、 $k_\phi=2\bar{c}/\sqrt{3}$ 。对常规三轴剪切路径, 等效发挥黏聚力 $\bar{c}=(\sigma_1-\sigma_3)/2$, 初始屈服时的等效黏聚力 \bar{c}_0

取为应力-应变曲线上开始偏离初始直线段的点, \bar{c}_0 与初始屈服时的球应力 p 近似成线性关系, 当密度为 30 kg/m^3 时有 $\bar{c}_0(p)=71.4-0.266p$ (p 的单位为 kPa)。

剪切应变硬化过程可表示为 $\bar{c}-\bar{c}_0(p)$ 随等效塑性剪应变 ε_s^p 的变化过程。不同等效塑性剪应变水平下 $\bar{c}-\bar{c}_0(p)$ 随球应力 p 近似线性变化, 其线性拟合的斜率 b_1 和截距 b_2 都随等效塑性剪应变而变化, 如图 4 所示。则 EPS 块体的应变硬化规律可表达为

$$\bar{c} - \bar{c}_0(p) = b_1(\varepsilon_s^p)p + b_2(\varepsilon_s^p) \quad . \quad (10)$$

图 4 以密度 30 kg/m^3 的 EPS 材料为例(其他密度 EPS 材料也服从相同规律, 此处不再赘述), 基于试验数据拟合得 $b_1(\varepsilon_s^p)$, $b_2(\varepsilon_s^p)$, $\bar{c}_0(p)$ 的具体表达式, EPS 材料的压剪应变硬化规律表达为等效发挥黏聚力的变化规律:

$$\begin{aligned} \bar{c} = & \frac{-0.085\varepsilon_s^p}{0.077+\varepsilon_s^p} p - 14.2e^{-\frac{\varepsilon_s^p}{0.105}} - 22.8e^{-\frac{\varepsilon_s^p}{7.97}} - \\ & 0.266p + 108.4 \quad . \end{aligned} \quad (11)$$

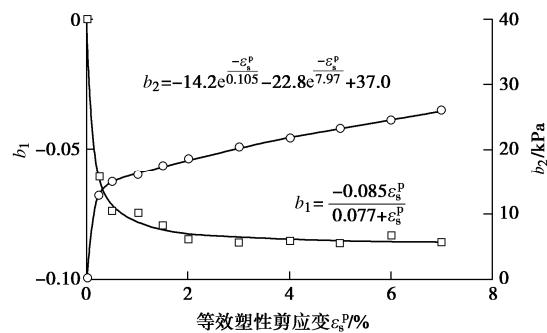


图 4 EPS 材料的剪切硬化拟合参数 b_1 , b_2 的变化 ($\rho=30 \text{ kg/m}^3$, 数据源自文献[27])

Fig. 4 Variation of b_1 and b_2 in shear hardening law of EPS materials ($\rho=30 \text{ kg/m}^3$, data adapted from Reference [27])

EPS 材料抗拉强度远大于其抗压屈服强度, 为描述其受拉变形特性, 考虑拉伸屈服面:

$$f_{DP}^t = p + \frac{\sigma_{EPS}^t}{3} \quad . \quad (12)$$

式中: σ_{EPS}^t 为 EPS 材料单向拉伸强度。

根据 KANG 等^[33]、HORVATH^[34]的研究, EPS 块体抗拉强度与密度近似成线性关系:

$$\sigma_{EPS}^t = 114.4\rho - 40.1 \quad . \quad (13)$$

式中: σ_{EPS}^t 单位取 kPa , ρ 单位取 kg/m^3 。

KANG 等^[33]的试验结果表明, EPS 材料拉伸破坏表现出弹脆性特点, 故在拉伸方向不考虑硬化/软化过程, 一旦应力状态达到拉伸屈服, 材料将永久失去抗拉能力(即令 $\sigma_{EPS}^t=0$)。

2.4 塑性流动准则

在拉伸方向简单采用关联流动法则。在剪切方向, 采用非关联流动准则描述 EPS 材料的剪切塑性流动规

律。剪切塑性势面为

$$g_{DP}^s = q - q_\psi p \quad . \quad (14)$$

式中: q_ψ 为塑性体变参数, 在三轴剪切中 $q_\psi = -\varepsilon_v / (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$ 。根据 CHUN 等^[35]和 ATMATZIDIS 等^[24]的试验数据, q_ψ 在塑性变形阶段几乎保持定值; EPS 材料的密度对 q_ψ 影响较小, 而围压对 q_ψ 影响较大。在图 5 中, 忽略 EPS 材料密度对 q_ψ 的影响, 拟合得 q_ψ 随小主应力(围压)的变化关系为

$$q_\psi = c_1 e^{\sigma_3/c_2} + c_3 \quad . \quad (15)$$

式中: c_1 , c_2 , c_3 为拟合参数, σ_3 单位取 kPa。因所用 EPS 块体来源不同, 图 5 中各组数据可按照式(15)拟合出三组参数。模拟表明, 图 5 中 3 组拟合公式对 EPS 轻质土的体变影响很小(由于轻质土的体变主要受水泥土控制)。本文后续模拟采用基于 ATMATZIDIS 等^[24]、WONG 等^[30]两个团队的试验数据拟合的参数 $c_1 = 1.97$, $c_2 = -106.4$, $c_3 = -2.95$ 。

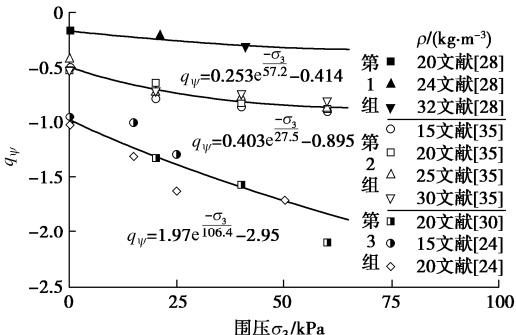


图 5 剪切塑性势参数 q_ψ 随围压的变化

Fig. 5 Variation of parameter q_ψ in shear plastic potential function with confining pressure

2.5 模型能力检验

利用 FLAC3D 软件提供的 Drucker-Prager 模型框架, 自编 FISH 函数植入上述总结的规律, 采用一个立方体单元模拟的三轴剪切加载结果与试验对比如图 3(a) 所示, 可见上述模型能很好反映 EPS 材料的典型力学特性。

3 EPS-水泥土界面的本构模型与参数

采用 Mohr-Coulomb 模型描述界面的抗剪强度:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad . \quad (16)$$

式中: τ_f 为发挥抗剪强度, σ_n 为法向应力, c , φ 分别为界面的发挥摩擦角和发挥黏聚力。

为探究 c , φ 的变化规律, 开展了 EPS 块体-水泥土界面直剪试验。试验中, 水泥土与 EPS 块体均为圆饼形, 直径 61.8 mm, EPS 密度为 30 kg/m³, 水泥土配比同 1.1 节。当剪切位移小于 0.8 mm 时, 剪应力与剪切位移呈线性关系, 界面处于弹性状态; 当剪切位移超过 0.8 mm 后, 剪应力-剪切位移曲线呈现非线性特征。简化起见, 超过 0.8 mm 的剪切位移都认为

是塑性剪切位移。基于不同法向应力下的界面剪切试验, 界面硬化/软化规律可拟合为

$$\varphi = \begin{cases} \frac{2.30 + 1.56S^p}{1 - 0.21S^p + 0.03(S^p)^2} & (0 \leq S^p \leq 5.2) \\ 14.75 & (S^p > 5.2) \end{cases}, \quad (17)$$

$$c/c^* = \begin{cases} 0.6 + 0.27S^p & (0 \leq S^p \leq 1.5) \\ 0.14 + 0.87e^{\frac{-S^p+1.5}{1.88}} & (S^p > 1.5) \end{cases}. \quad (18)$$

式中: S^p 为塑性剪切位移 (mm)。发挥黏聚力用与水泥掺入比有关的参数 c^* 归一化, 水泥掺量分别为 6%, 8%, 10% 时 c^* 为 18.38, 25.52, 27.52 kPa。

EPS 材料与水泥土界面有一定抗拉强度, 但难以直接测量, 一般可取界面抗拉强度为 $\beta c / \tan \varphi$, β 为小于 1 的常数。由于 EPS 材料较软, 剪切过程中法向位移不明显, 故不考虑界面剪胀或剪缩, 即取剪胀角为 0。接触面的法向刚度 k_n 和剪切刚度 k_s 按照数值模拟经验, 一般取接触面周围“最硬”单元等效刚度的 10 倍。

4 EPS 轻质土的精细化数值模拟

EPS 轻质土的数值模型由 EPS 颗粒、水泥土及二者接触界面 3 部分构成。数值模型几何尺寸为室内三轴试验试样尺寸一半(试算表明取一半尺寸不影响整体力学特性和宏细观变形特征, 且节省大量计算时间), EPS 颗粒材料密度 30 kg/m³、堆积密度 15.9 kg/m³、颗粒直径 3.2 mm(与试验相同)。首先根据 EPS 含量计算颗粒数量, 在圆柱形试样空间中随机生成球体代表 EPS 颗粒, 各球体不重叠且尽可能分散。试样空间中排除 EPS 后的部分代表水泥土。采用 FLAC3D 软件模拟, 以 EPS 颗粒含量为 25% (EPS 颗粒掺入体积 V_E 与原料干土体积 V_S 之比) 的轻质土为例, 网格剖分如图 6 所示。实体采用四面体剖分, 界面采用三角面片划分。

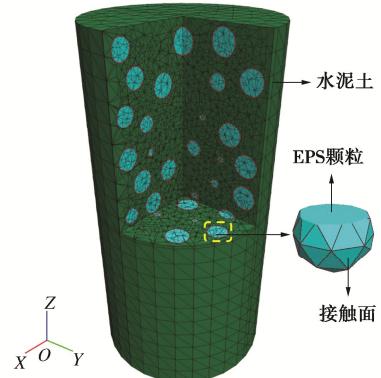


图 6 EPS 轻质土的三轴剪切数值模型

Fig. 6 Numerical model for EPS-mixed soils under triaxial shear loading

轻质土中的水泥掺入比、EPS 材料密度、接触面

力学特性对轻质土力学特性的影响均通过前述本构模型参数反映, 水泥土、接触面抗拉强度参数 $\alpha = \beta = 0.3$, EPS 颗粒含量通过几何模型反映。为模拟三轴剪切, 在圆柱形试样的侧面施加恒定面力(围压), 对上下端面施加恒定速度模拟加载, 端部仅约束中心点的水平向位移, 相当于端部无侧向约束的理想情形。

图 7 为不同工况下, EPS 轻质土的数值模拟与室内试验的应力-应变和体变曲线对比。如图 7(a) 所示, 在相同的水泥含量及围压条件下, 数值模拟与室内试验得到的 EPS 含量对试样力学特性的影响规律相同: 随 EPS 含量提高, 试样的偏应力水平降低, 减缩体变减小。如图 7(b), 7(c) 所示, 数值模拟能很好反映水泥含量、围压对 EPS 轻质土三轴剪切力学响应的影响规律。

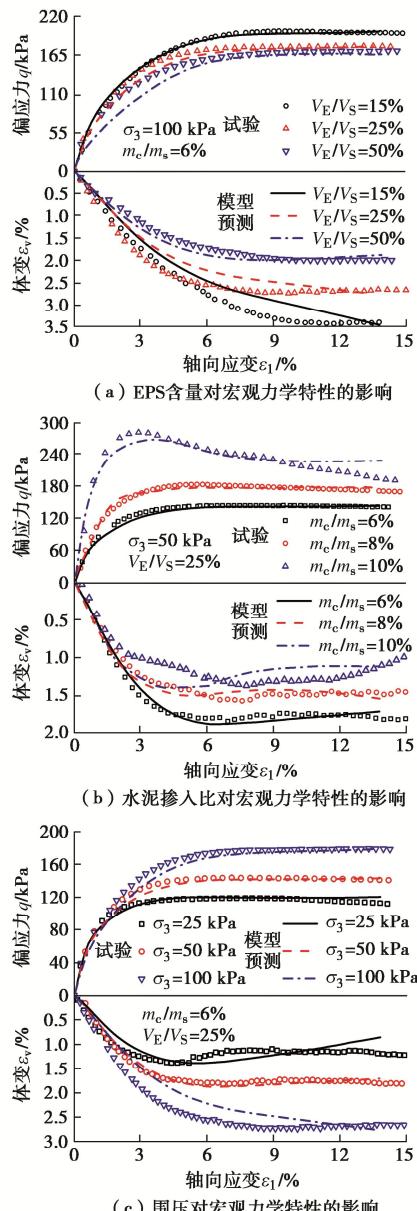


图 7 各因素对 EPS 轻质土力学特性的影响

Fig. 7 Effects of various factors on mechanical behavior of EPS-mixed soils

图 8 对比了 EPS 轻质土试样的典型变形与破坏模式, 数值模拟基本能再现试验观察到的整体剪切带、局部鼓胀和整体均匀 3 种变形模式。整体而言, 数值模拟得到的偏应力较为准确, 体变误差稍大但在可接受范围, 能再现 EPS 轻质土试样变形模式。

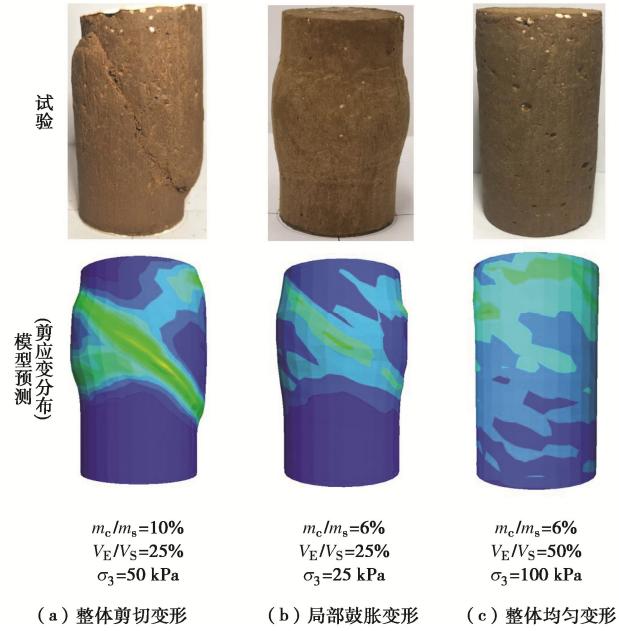


Fig. 8 Simulated and tested deformations of EPS-mixed soils

5 EPS 轻质土的宏观观变形机理

利用图 9, 10 所示试样内部的剪应力、剪应变分布揭示 EPS 轻质土宏观观变形特征与机理, 图中剪应力、剪应变分别用各轴向应变下试样整体的剪应力、剪应变无量纲化。

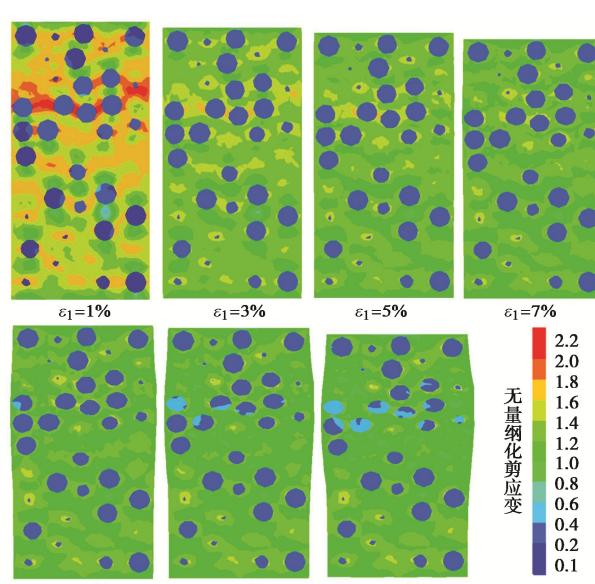


图 9 EPS 轻质土内部的剪应力分布($m_c/m_s=6\%$, $V_E/V_S=25\%$, $\sigma_3=50$ kPa)

Fig. 9 Distribution of deviator stress in EPS-mixed soils ($m_c/m_s=6\%$, $V_E/V_S=25\%$, $\sigma_3=50$ kPa)

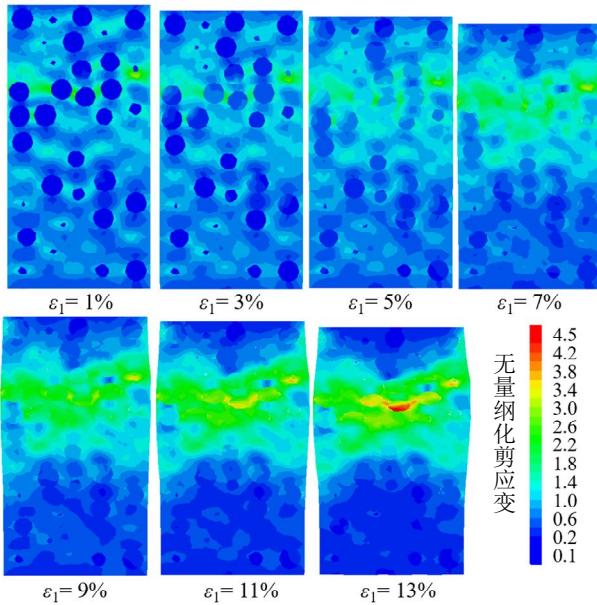


图10 EPS轻质土内部的剪应变分布($m_c/m_s=6\%$, $V_E/V_s=25\%$, $\sigma_3=50$ kPa)

Fig. 10 Distribution of deviator strain in EPS-mixed soils ($m_c/m_s=6\%$, $V_E/V_s=25\%$, $\sigma_3=50$ kPa)

对图9所示的剪应力分布, 在加载初期($\varepsilon_1<1\%$), 试样内剪应力分布极不均匀, 这是由于EPS颗粒较“软”导致其应力分担比例小, 在EPS颗粒周围形成空间拱形传力路径, EPS颗粒之间的水泥土区域为拱脚位置, 剪应力相对集中; 拱脚重叠区域整体呈水平带状分布; 试样上部因EPS颗粒在局部间距较小, “拱脚”应力集中更为明显, 因而试样上部剪应力明显高于中下部。随着加载进行(ε_1 为3%~7%), 水泥土发生应变软化使得其剪应力有所降低, 而EPS颗粒发生应变硬化使得其剪应力有所提高, 二者共同作用降低了试样内应力分布不均匀程度。当轴向应变超过7%后, 试样上部由于应力集中程度高导致应变局部化发生, 该区域剪应变较其他区域发展更充分, 水泥土应变软化和EPS颗粒应变硬化导致应力不均匀程度有所降低; 而其他区域因无剪应变的进一步发展而仍保持较高的应力不均匀性; 上部区域的应力集中使得试样整体发生局部(上部)鼓胀变形。

相对应地, 对图10所示的剪应变分布, 在加载初期($\varepsilon_1<1\%$)剪应变也表现出明显的不均匀分布特征, EPS颗粒与周围水泥土之间有明显的变形不协调性, 试样上部EPS颗粒间距较小处的水泥土剪应变比其他位置更大。随着加载进行, 水泥土胶结作用尚失(软化), 软化区开始贯通, 逐渐形成薄弱区, EPS颗粒与水泥土之间的应变不协调程度有所减缓, 但试样整体的剪应变集中于上部的应变局部化区域。

6 结 论

(1) 分别在Mohr-Coulomb模型和Drucker-Prager模型框架下, 基于水泥土和EPS材料力学特性试验结果, 总结了两种材料的本构模型方程与经验公式; 基于水泥土和EPS材料界面剪切试验, 提炼了界面剪切硬化/软化本构模型。

(2) 对EPS轻质土单元试验进行了精细化数值建模, 很好预测了EPS轻质土宏观力学特性, 再现了EPS含量、水泥土掺入比和围压对宏观力学的影响规律和整体剪切、局部鼓胀、整体均匀3种变形模式。

(3) EPS轻质土的宏观变形模式由EPS颗粒与水泥土两种材料的力学特性差异和EPS颗粒非均匀排列共同决定, 材料力学特性差异引起应力、应变分布的非均匀性, EPS颗粒排列非均匀性将强化应力、应变非均匀程度, 进而引起试样宏观变形的非均匀性。

参考文献:

- [1] 梅利芳, 徐光黎. 纤维聚苯乙烯泡沫颗粒轻质土的制备及力学性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(10): 2355-2362. (MEI Lifang, XU Guangli. Preparation and mechanical properties of fiber expanded polystyrene particle lightweight soil[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(10): 2355-2362. (in Chinese))
- [2] TIWARI N, SATYAM N, KUMAR SHUKLA S. An experimental study on micro-structural and geotechnical characteristics of expansive clay mixed with EPS granules[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(3): 705-713.
- [3] GAO H M, CHEN Y M, LIU H L, et al. Creep behavior of EPS composite soil[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(11): 3070-3080.
- [4] HOU T S, MA W G, YANG K X. One-dimensional compression creep characteristics of light weight soil mixed with Weihe River mud and EPS particles[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(6): 4341-4353.
- [5] GAO H M, BU C Y, WANG Z H, et al. Dynamic characteristics of expanded polystyrene composite soil under traffic loadings considering initial consolidation state[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 102: 86-98.
- [6] GAO Y, WANG S, CHEN C. A unified deformation-strength framework for Lightweight Sand - EPS Beads Soil (LSES) under cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(8): 1144-1153.
- [7] 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. (LI Mingdong, TIAN Anguo. Mechanical properties of EPS beads mixed lightweight soil under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(11): 1806-1810. (in Chinese))
- [8] 庄心善, 周睦凯, 陶高梁, 等. 循环荷载下发泡聚苯乙烯改良膨胀土动弹性模量与阻尼比试验研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(9): 2427-2436. (ZHUANG Xinshan, ZHOU Mukai, TAO Gaoliang, et al. Experimental study of dynamic elastic modulus and damping ratio of improved expansive soil under cyclic loading by expanded polystyrene[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(9): 2427-2436. (in Chinese))
- [9] KAZEMPOUR S, CHENARI R J, AHMADI H, et al. Assessment of the compression characteristics and coefficient of lateral earth pressure of aggregate- expanded polystyrene beads composite fill-backfill using large oedometer experiments[J]. Construction and Building Materials, 2021, **302**: 124145.
- [10] 侯天顺, 徐光黎. 发泡颗粒混合轻量土三轴应力-应变-孔压特性试验[J]. 中国公路学报, 2009, **22**(6): 10-17. (HOU Tianshun, XU Guangli. Experiment on triaxial pore water pressure-stress-strain characteristics of foamed particle light weight soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, **22**(6): 10-17. (in Chinese))
- [11] 肖杨, 邓安. 基于椭圆-抛物双屈服面模型的砂-聚苯乙烯颗粒轻质填料应力应变分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(9): 1467-1471. (XIAO Yang, DENG An. Stress-strain analyses of sand-EPS lightweight-bead fills based on elliptic-parabolic yield surfaces model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(9): 1467-1471. (in Chinese))
- [12] 朱伟, 姬凤玲, 马殿光, 等. 疏浚淤泥泡沫塑料颗粒轻质混合土的抗剪强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(增刊 2): 5721-5726. (ZHU Wei, JI Fengling, MA Dianguang, et al. Shear strength properties of lightweight bead-treated soil made from dredged silt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(S2): 5721-5726. (in Chinese))
- [13] 姬凤玲, 董卫国, 李强. 淤泥 EPS 颗粒轻质土单向压缩下渐进性破坏研究[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(9): 45-49. (JI Fengling, DONG Weiguo, LI Qiang. Study on the progressive failure of lightweight EPS-bead treated soil made from dredging silt under uniaxial compression[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(9): 45-49. (in Chinese))
- [14] 王庶懋, 高玉峰. 砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LSES)细观结构的 CT 研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(12): 2137-2142. (WANG Shumao, GAO Yufeng. Research on meso-structure of lightweight sand-EPS beads soil (LSES) using CT[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(12): 2137-2142. (in Chinese))
- [15] YAGHOOBZADEH S, AZIZKANDI A S, SALEHZADEH H, et al. Effect of EPS beads on the behavior of sand-EPS and slope stability using triaxial and centrifuge tests[J]. International Journal of Civil Engineering, 2021, **19**(11): 1269-1282.
- [16] 顾欢达, 顾熙. 两相体模型在评价发泡颗粒轻质土应力-应变特性中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(8): 994-997. (GU Huanda, GU Xi. Application of double-phase model to evaluate stress-strain of foamed beads light soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(8): 994-997. (in Chinese))
- [17] 刘汉龙, 董金梅, 周云东, 等. 聚苯乙烯轻质混合土应力-应变特性分析[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(5): 579-583. (LIU Hanlong, DONG Jinmei, ZHOU Yundong, et al. Study on the stress-strain characteristics of light heterogeneous soil mixed with expanded polystyrene[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(5): 579-583. (in Chinese))
- [18] 侯天顺. 特征含水率对轻量土基本性质的影响规律[J]. 岩土力学, 2012, **33**(9): 2581-2587. (HOU Tianshun. Influence law of characteristic water content on basic properties of light weight soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(9): 2581-2587. (in Chinese))
- [19] 马时冬. 聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土(SLS)的特性[J]. 岩土力学, 2001, **22**(3): 245-248, 314. (MA Shidong. The properties of stabilized light soil (SLS) with expanded polystyrene[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(3): 245-248, 314. (in Chinese))
- [20] ASHNA K N, CHANDRAKARAN S. Experimental Study on stress-strain behaviour of EPS beads sand mixture[C]// International Conference on Geotechniques for Infrastructure Projects 27th & 28th February. Thiruvananthapuram, 2017.
- [21] NAWGHARE S M, MANDAL J N. Effectiveness of expanded polystyrene (EPS) beads size on fly ash properties[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2020, **6**(1): 1-11.
- [22] 兰鑫, 侯天顺, 杨艳, 等. EPS 颗粒混合轻量土动力变

- 形特性离散元分析[J]. 土木工程与管理学报, 2020, **37**(3): 147-154. (LAN Xin, HOU Tianshun, YANG Yan, et al. Discrete element analysis on dynamic deformation characteristics of light weight soil mixed with EPS particles[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, **37**(3): 147-154. (in Chinese))
- [23] OMINE K, OCHIAI H, YASUFUKU N. Evaluation of strength-deformation properties of light-weight soils based on two-phase mixture model[C]// Twelfth Southeast Asian Geotechnical Conference. Kulua, 1996.
- [24] ATMATZIDIS D K, MISSIRLIS E G, CHRYSIKOS D A. An investigation of EPS Geofoam behaviour in compression[C]// EPS Geofoam 2001—Third International Conference. Salt Lake City, 2001.
- [25] DUSKOV M. Materials research on EPS20 and EPS15 under representative conditions in pavement structures[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1997, **15**(1/2/3): 147-181.
- [26] HAZARIKA H. Stress-strain modeling of EPS geofoam for large-strain applications[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, **24**(2): 79-90.
- [27] OSSA A, ROMO M P. Micro- and macro-mechanical study of compressive behavior of expanded polystyrene geofoam[J]. Geosynthetics International, 2009, **16**(5): 327-338.
- [28] PREBER T, BANG S, CHUNG Y, et al. Behavior of expanded polystyrene blocks[J]. Transportation Research Record, 1994(1462): 36-46.
- [29] LEO C J, KUMRUZZAMAN M, WONG H, et al. Behavior of EPS geofoam in true triaxial compression tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, **26**(2): 175-180.
- [30] WONG H, LEO C J. A simple elastoplastic hardening constitutive model for EPS geofoam[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, **24**(5): 299-310.
- [31] EDO. Expanded Polystyrene Construction Method[M]. Tokyo: Riko Tosho Publishers , 1992.
- [32] HORVATH J S. Geofoam Geosynthetic[M]. New York: Horvath Engineering, 1995.
- [33] KANG Y, LI X, Tan J. Uniaxial tension and tensile creep behaviors of EPS[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, **15**(1): 202-205.
- [34] HORVATH J S. Expanded polystyrene (EPS) geofoam: an introduction to material behavior[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1994, **13**(4): 263-280.
- [35] CHUN B S, LIM H, SAGONG M, et al. Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2004, **22**(4): 223-237.

国际地下空间大会和第二届地下空间探测大会会议通知

ACUUS 2023-EUUS-2（国际地下空间大会和第二届地下空间探测大会）将于 2023 年 11 月 1 日—4 日在新加坡召开。为了能够服务于更多学者，本次大会将在新加坡设置主会场，中国（徐州）设置分会场，通过虚拟平台实现国内外线上线下交流。大会网址为 <https://www.acuus2023.com/>。

本届会议将围绕地下空间研究方向征集论文，包括地下建筑、地下空间实例研究、资源开发与空间利用等 15 个主题。组委会将遴选优秀论文，在 *Tunnelling and Underground Space Technology*、*Underground Space Journal* 和 *Deep Underground*

Science and Engineering

组建特刊。投稿链接 <https://www.acuus2023.com/submission-form>。组委会将举办青年论坛或青年学者全体会议，组委会将根据科学委员会的建议，挑选数名青年学者在青年学者全体会议上进行发言并颁发荣誉证书。

摘要提交截止日期 2023 年 3 月 1 日，摘要提交结果通知 2023 年 5 月 1 日，全文提交截止日期 2023 年 6 月 15 日，早鸟注册截止日期 2023 年 9 月 1 日。

（大会组委会 供稿）