

DOI: 10.11779/CJGE20231104

胶结砂砾石料剪切二元强度准则与本构模型研究

武颖利¹, 任红磊^{*1,2}, 郭万里¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 南京水利科学研究院材料与结构研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 为探究胶结砂砾石料复杂的力学特性, 开展不同围压、不同掺量的胶结砂砾石料大型三轴剪切试验, 并建立了适用于胶结砂砾石料的二元剪切强度准则和双屈服面本构模型。结果表明: ①胶结砂砾石料具有一定的胶结力和结构性, 宏观上表现出显著的软化、强剪胀等力学特性; ②基于二元介质理论建立了剪切强度准则, 该准则可描述不同胶凝掺量下的胶结砂砾石料的强度演化规律; ③将剪切强度准则合理转化为本构模型中的剪切屈服面, 并在修正剑桥模型基础上考虑材料的抗拉特性得到体积屈服面, 同时本构模型重点描述了胶结砂砾石料的应变软化及强剪胀性; ④推导了本构模型在一般应力状态下的刚度矩阵, 并证明了其对胶结砂砾石料三轴剪切试验具有良好的拟合效果。该研究结果可为胶结砂砾石坝的应力变形计算提供更好的理论指导。

关键词: 胶结砂砾石料; 强度准则; 应变软化; 剪胀性; 双屈服面模型

中图分类号: TV641; TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)03-0516-09

作者简介: 武颖利(1980—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事岩土本构模型的研究工作。E-mail: wuyingli@nhri.cn。

Bimodal strength criterion and constitutive model for cemented sand and gravel

WU Yingli¹, REN Honglei^{1,2}, GUO Wanli¹

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Materials and Structural

Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to explore the intricate mechanical properties of the cemented sand and gravel (CSG), large-scale triaxial shear tests are conducted on the specimens with varying confining pressures and gel contents. A bimodal shear strength criterion and a double-yield surface constitutive model applicable to the CSG are established. The main conclusions are as follows: (1) The CSG exhibits a certain level of cohesive strength and structural integrity, demonstrating notable mechanical characteristics such as softening and pronounced shear dilatancy at the macroscopic scale. (2) The shear strength criterion, based on the binary medium theory, is developed to describe the evolution of strength in the CSG under varying gel contents. (3) The shear strength criterion is appropriately transformed into the shear yield surface within the constitutive model, and by considering the tensile resistance of materials a volumetric yield surface is established based on the modified Cam-clay model. Additionally, the constitutive model emphasizes to describe the strain softening and strong dilatancy of the CSG. (4) The stiffness matrix of the constitutive model is derived for the general stress states, and its excellent fitting with the triaxial shear tests on the CSG is demonstrated. The findings of this study can provide better theoretical guidance for stress-deformation calculations in CSG dams.

Key words: cemented sand and gravel; strength criterion; strain softening; dilatancy; double-yield surface model

0 引言

胶结砂砾石料通过在砂砾石中添加水泥和粉煤灰等固化剂并经过拌合而成, 固化剂的水化物在砂砾之间形成具有排列和结构的聚合物, 因此胶结砂砾石料具备了一定的黏聚力^[1]。胶结砂砾石坝是介于刚性体坝和散粒体坝之间的一种新坝型, 具有环境友好、便于施工及抗震性能好等优势, 被认为是具有广阔发展前景的坝型^[2]。

中国已建成或在建的胶结砂砾石坝工程已有多

座, 实践表明, 胶结砂砾石兼具混凝土和砂砾石的性质, 应力变形特性更为复杂, 且在强度准则与本构模型研究方面尚不成熟。目前, 胶凝砂砾石坝应力变形分析多参照传统的砂砾石料和混凝土材料的线弹性模型、理想弹塑性模型以及邓肯-张非线性模型等, 预测

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2024-01); 中国科协青年人才托举工程资助项目(YESS20200361)

收稿日期: 2023-11-15

通信作者: (E-mail: renhl_1201@163.com)

精度有限, 这也成为了胶凝砂砾石坝性态分析的一个瓶颈问题^[2]。

一方面, 胶结砂砾石料(或具有胶结特性的岩土材料)具有一定的胶结力和结构性^[3], 宏观表现为应变软化特性和强剪胀性^[4], 而关于此类材料的强度准则研究很不充分。二元介质理论^[5]将岩土材料抽象成胶结元和摩擦元, 诸多适用于结构性岩土材料的强度准则均在此模型基础上建立, 包括冻土^[6]、胶结黏土^[7]及结构土^[8]等。然而, 直接将原状土的强度准则应用于人工拌合的胶结砂砾石料, 恐难以有效预测其强度发展规律。

另一方面, 胶结砂砾石料的应力软化和剪胀特性与砂砾石料相比更为显著, 加大了其本构模型的构建难度。目前, 针对胶结砂砾石料, 孙明权等^[9]、蔡新等^[10]、吴梦喜等^[11]、魏匡民等^[12]分别提出了本构模型。总体而言, 这些模型的预测效果在反映胶结砂砾石料的应变软化与强剪胀性方面, 与传统土体本构模型相比有了显著的提高。胶结砂砾石在受荷过程中, 胶结力不断丧失、摩擦力不断增强, 到极限状态时, 完全由摩擦力抵抗外荷载。总体来看, 现有模型的建模思路基本是在传统土体弹塑性本构模型上的修正, 没有考虑胶结砂砾石的强度发挥机理。

本文在二元介质理论基础上建立适用于胶结砂砾石料的二元强度准则。再根据胶结砂砾石料的强度准则和宏观力学特性, 建立胶结砂砾石料的双屈服面本构模型, 并推导出弹塑性矩阵, 重新计算了切线模量和切线体积比。最后将模型汇编为程序, 通过对比三轴剪切试验数据验证本构模型的有效性。

1 胶结砂砾石料的强度准则

1.1 强度准则推导

胶结砂砾石料的力学特性较为复杂, 既有堆石体的摩擦特性, 又有混凝土的胶结特性。已有成果表明, 胶结性岩土材料的强度特性可由二元介质理论描述, 该理论认为在材料在外力荷载作用下由胶结元和摩擦元共同承担外力荷载, 加载过程中, 胶结元退化失效, 摩擦元抵抗外力的作用逐渐增强。二元介质理论具体表达式如下:

$$\{\sigma\} = (1-D)\{\sigma_b\} + D\{\sigma_f\} \quad (1)$$

式中: $\{\sigma\}$ 为单元内的平均应力; $\{\sigma_b\}$ 为单元内胶结元所承担的平均应力; $\{\sigma_f\}$ 为单元内摩擦元所承担的平均应力; D 为剪切破坏率, 取值在 0 到 1 之间。本文假定剪切破坏率 D 满足以下演化规律^[13]:

$$D = 1 - \exp(-(p/\sigma_s)^t) \quad (2)$$

式中: σ_s 为结构屈服强度; t 为指数参数。

考虑到胶结砂砾石料的强度发挥机理, 结合二元介质理论, 建立强度准则如下:

$$q = MpD + c_i(1-D) \quad (3)$$

式中: q 为剪切应力; p 为平均正应力; M 为临界状态应力比; c_i 为未发生破坏时的初始黏聚力。胶结砂砾石料强度曲线如图 1 所示, 当 $q < q_\delta$ 时, 表示外力荷载对胶结元的弱化作用, 当 $q > q_\delta$ 时, 表示外力荷载对摩擦元的强化作用。外力荷载持续增加时, 强度曲线的斜率无限接近于 M 。

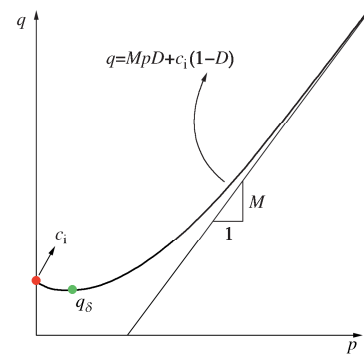


图1 子午面上的强度准则

Fig. 1 Strength criterion on p - q plane

在 π 平面上, 依然采用二元介质理论的假定, 认为胶结元的破坏包线为各向同性^[14], 即

$$g_c(\theta) = 1 \quad (4)$$

根据 Wang 等^[15]的研究成果, 假定摩擦元部分的形状函数满足统一非线性强度 (UNS) 准则:

$$g_f(\theta) = \frac{\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\left(-\frac{3\sqrt{3}L_3}{2L_2^{3/2}}\right)\right]}{\cos\left[\frac{1}{3}\arccos\left(-\frac{3\sqrt{3}L_3\cos(3\theta)}{2L_2^{3/2}}\right)\right]} \quad (5)$$

式中: L_2 和 L_3 为

$$L_2 = \frac{(3 - \sin\varphi)^3}{3(3 - \sin\varphi)^3 - 81(1 - \sin\varphi - \sin^2\varphi + \sin^3\varphi)} \quad (6)$$

$$L_3 = \frac{2(3 - \sin\varphi)^3}{27(3 - \sin\varphi)^3 - 729(1 - \sin\varphi - \sin^2\varphi + \sin^3\varphi)} \quad (7)$$

式中: θ 为应力 lode 角; φ 为内摩擦角。根据式 (1), π 平面上的强度包线表达式为

$$g(\theta) = (1-D)g_c(\theta) + Dg_f(\theta) \quad (8)$$

研究表明, Mohr-Coulomb 强度准则对岩土类材料具有较好的适用性, 但由于未考虑中主应力的影响, 计算结果偏于安全, UNS 准则对这一点做了改进。本文强度准则在 π 平面内介于 UNS 和各向同性 (Drucker-Prager) 准则之间 (图 2)。

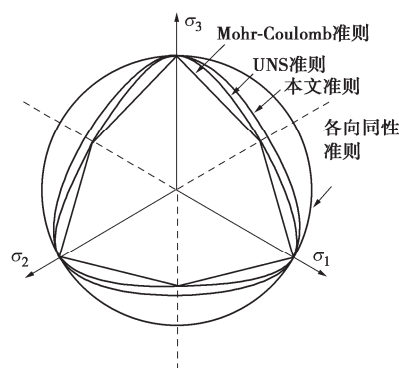


图 2 π 平面上的强度准则

Fig. 2 Strength criterion on π plane

在主应力空间中，静水压力轴穿过原点，且与三个坐标轴夹角相等，如图 3 所示， π 平面垂直于静水压力轴，主应力空间的强度准则表达式为^[16]

$$F = F_1(p) + F_2(q, \theta) \quad (9)$$

式中： F_1 和 F_2 分别为子午面和 π 平面上的强度准则，联立式 (2) ~ (9) 可得

$$F = \frac{q}{g(\theta)} - MpD - c_i(1 - D) \quad (10)$$

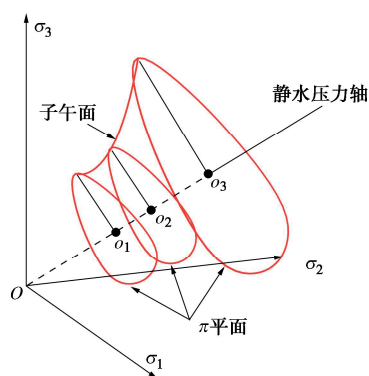
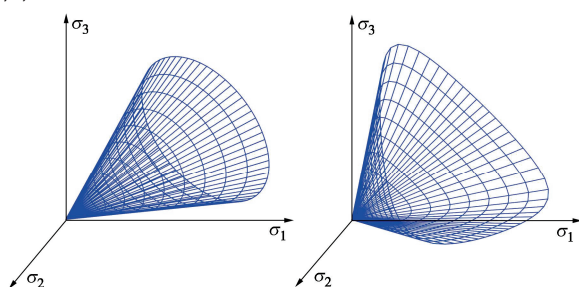


图 3 主应力空间与 π 平面

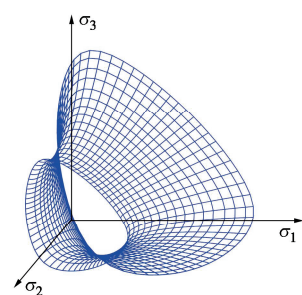
Fig. 3 Principal stress space and π plane

图 4 为在主应力空间上的不同强度准则，图 4(a) 和图 4(b) 分别代表各向同性材料（岩石、混凝土等）和散粒料（砂砾石、堆石等）的强度准则，均为单开口型曲面。由图 4(c) 可知，胶结强度的存在使得在加载初期具有一定的弹性空间，但随胶结元破损而不断收缩，因此本文的强度准则在空间上为两端开口型曲面。



(a) 各向同性强度准则

(b) 各向异性强度准则



(c) 本文强度准则

图 4 主应力空间上的强度准则

Fig. 4 Strength criterion on principal stress space

1.2 强度准则验证

为验证二元强度准则的适用性，开展胶结砂砾石料三轴剪切试验进行验证。胶凝剂为 P.O.32.5 普通硅酸盐水泥与 II 级粉煤灰等比例配置，水胶比取 1.0，细骨料为中粗砂，粗骨料为破碎石料。砂砾石料级配如图 5 所示，骨料的干密度为 2130 kg/m³，对于不同胶凝掺量的试样，其骨架（砂砾石）的密度保持一致，胶凝掺量变化导致的试样密度很小，故本文在研究中，未特意考虑不同胶凝掺量下密度及孔隙比的变化。

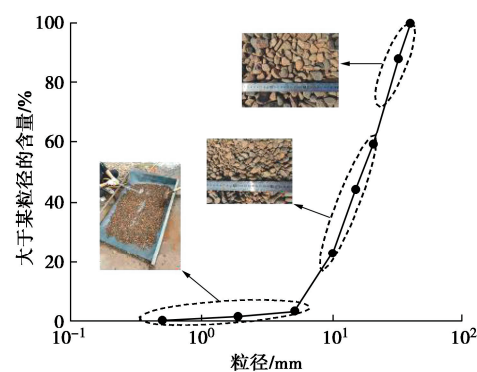
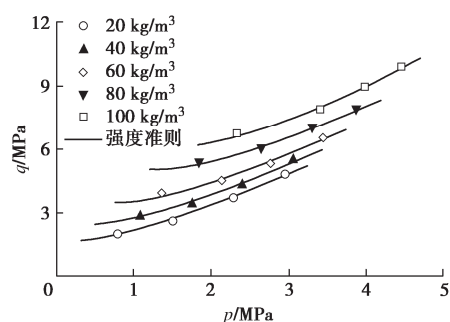


图 5 砂砾石级配曲线

Fig. 5 Grain-size distribution curves ravel

制备了胶凝掺量为 20, 40, 60, 80, 100 kg/m³ 5 组试样，围压设定为 300, 600, 900, 1200 kPa。图 6 分别为子午面和 π 平面上胶结砂砾石的试验数据与强度准则对比，可以发现不同胶凝掺量下，试验与预测结果较为一致，因此，本文所提的强度准则是合理的。



(a) 子午面

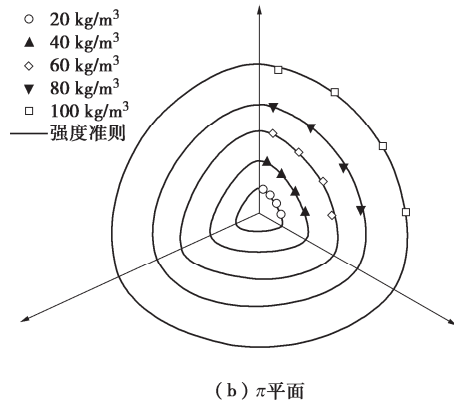


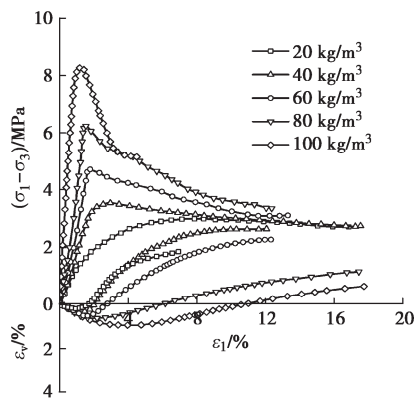
图6 强度准则验证

Fig. 6 Verification of strength criterion

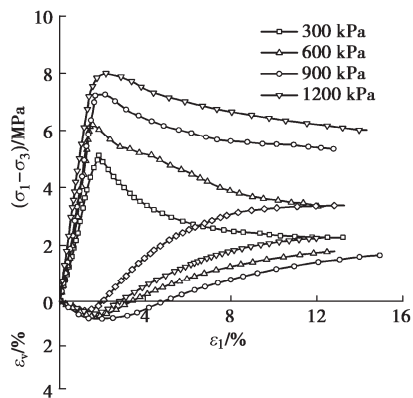
2 胶结砂砾石料弹塑性本构模型

2.1 胶结砂砾石料的力学特性

图7为不同工况下胶结砂砾石料的三轴试验曲线, 可以看到胶结砂砾石料具有明显的峰值强度, 且应力曲线在峰值后存在明显的跌落, 即应变软化现象, 体变曲线在应变很小时达到峰值, 后迅速下降, 剪胀特性明显。



(a) 相同围压不同胶凝掺量



(b) 相同胶凝掺量不同围压

图7 胶结砂砾石料三轴剪切试验结果

Fig. 7 Triaxial test results of CSG

综合来看, 胶结砂砾石料的应变软化特性和剪胀

特性明显强于堆石料等散粒体。为进一步了解胶结砂砾石峰后应变软化和强剪胀性, 引入跌落指标的概念进行探讨, 该指标代表了曲线的跌落程度, 可从侧面反映胶结砂砾石的应变软化和剪胀程度。应变软化和剪胀性的跌落指标分别由式(11), (12)表示:

$$B_1 = \frac{(\sigma_p - \sigma_r)}{(\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{p1})} + \frac{(\sigma_p - \sigma_r)(\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{p1})}{\sigma_p \varepsilon_{p1}}, \quad (11)$$

$$B_2 = \frac{(\varepsilon_{vp} - \varepsilon_{vr})}{(\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{p2})} + \frac{(\varepsilon_{vp} - \varepsilon_{vr})(\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{p2})}{\varepsilon_{vp} \varepsilon_{p2}}. \quad (12)$$

式中: B_1 和 B_2 分别代表了应力-应变曲线和体变-应变曲线的跌落指标, 如图8所示, σ_p 和 σ_r 分别为峰值应力和残余应力, ε_{p1} 和 ε_{r1} 则为对应的应变; ε_{vp} 和 ε_{vr} 为峰值体变和残余体变, ε_{p2} 和 ε_{r2} 为对应的应变。

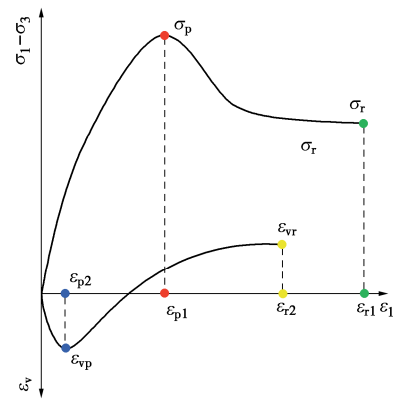


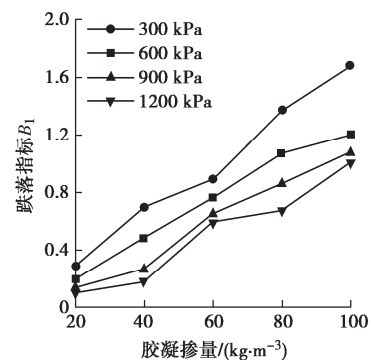
图8 跌落指标计算中的参数定义

Fig. 8 Parameter definition in the computation of decline index

图9所示为跌落指标 B_1 和 B_2 的变化规律。可以得到如下结论: ①胶结砂砾石的应变软化程度随着胶凝掺量的增加而增大; ②从体变-应变曲线来看, 胶凝掺量的增加明显提高了材料的剪胀性; ③胶结砂砾石的应变软化和剪胀性随着围压的增大而减弱。

2.2 本构模型的提出

胶结特性对胶结砂砾石的影响主要体现在应力应变关系、强度及剪胀性等方面, 因此胶结砂砾石料的力学特性有别于堆石料等散粒体和土体, 所以传统本构模型并不适用于胶结砂砾石料。

(a) B_1

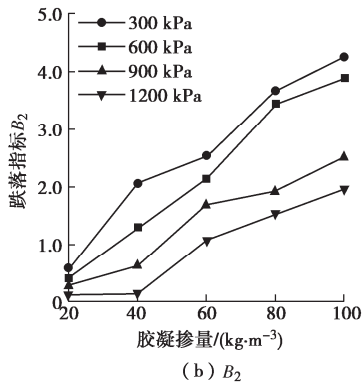


图9 应变软化和剪胀的规律性

Fig. 9 Rules of strain softening and dilatancy

当材料进入无限塑性状态时称作破坏, 所以理想塑性的初始屈服面即为破坏面。岩土材料从初始屈服起经过屈服的阶段才能达到破坏, 故一般假定破坏面与屈服面相似, 区别在于常数项数值有所不同。因此 2.1 节所述的破坏条件, 可合理转化为剪切屈服条件。剪切屈服面可确定为

$$f_1 = q - MpD - c_i(1 - D) \quad (13)$$

体积屈服特性可用修正剑桥模型描述, 而胶结砂砾石料具有一定的抗拉强度, 在不考虑屈服面形状变化的情况下, 体积屈服面的表达式为

$$f_2 = q^2 + M^2(p + p_t)(p - p_x) \quad (14)$$

式中: p_x 为屈服面与 p 轴正向的焦点, 代表抗压强度; p_t 为屈服面与 p 轴负向的焦点, 代表抗拉强度。

本文提出的双屈服面模型, 将屈服面看作弹性区域的边界, 并用塑性系数代替硬化参数, 类似于南水模型^[18]。屈服面的形态如图 10 所示。

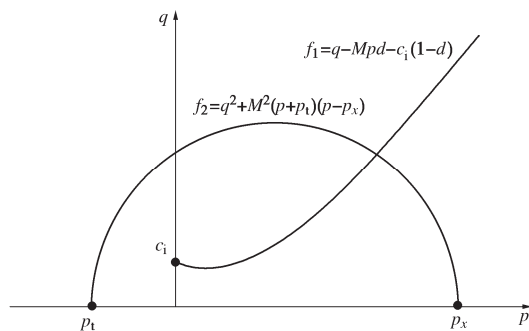


图10 双屈服面模型

Fig. 10 Double-yield surface model

2.3 弹塑性矩阵的求解

应变增量可表示为

$$\Delta \varepsilon_v = \Delta \varepsilon_v^e + \Delta \varepsilon_v^p = \frac{\Delta p}{K} + A_1 \frac{\partial f_1}{\partial p} \Delta f_1 + A_2 \frac{\partial f_2}{\partial p} \Delta f_2 \quad (15)$$

$$\Delta \varepsilon_q = \Delta \varepsilon_q^e + \Delta \varepsilon_q^p = \frac{\Delta p}{K} + A_1 \frac{\partial f_1}{\partial p} \Delta f_1 + A_2 \frac{\partial f_2}{\partial p} \Delta f_2 \quad (16)$$

式中: A_1 和 A_2 分别为 f_1 和 f_2 的塑性系数, $\Delta \varepsilon_v$ 和 $\Delta \varepsilon_q$

分别为体积应变增量和剪切应变增量, K 和 G 分别为弹性体积模量和弹性剪切模量。

下面推导一般应力状态下的刚度矩阵。首先, 任意双屈服面表达式的微分形式为

$$\Delta f_1 = a \Delta p + b \Delta q \quad (17)$$

$$\Delta f_2 = c \Delta p + d \Delta q \quad (18)$$

对式 (13), (14) 求微分可得 $a = -MD + Mp\Delta D - c_i\Delta D$, $b = 1$, $c = M^2(2p + p_t + p_x)$, $d = 2q$, $\Delta D = \exp(-(p/\sigma_s))/\sigma_s$ 。联立式 (15) ~ (18), 并在 π 平面上采用 Prandtl-Reuss 法则, 可推求应力应变关系:

$$\left. \begin{aligned} \Delta p &= B_p \Delta \varepsilon_v - P \frac{\Delta e_{hk}}{\sigma_s} \Delta e_{hk} \\ \Delta s_{ij} &= 2G \Delta e_{ij} - P \frac{\Delta s_{ij}}{\sigma_s} \Delta \varepsilon_v - Q \frac{s_{ij}s_{hk}}{\sigma_s} \Delta e_{hk} \\ \Delta \sigma_{ij} &= \Delta p + \Delta s_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: B_p , P 和 Q 均为构成弹塑性矩阵的系数, $\Delta e_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij(hk)} - \Delta \varepsilon_v I/3$, $s_{ij(hk)} = \sigma_{ij(hk)} - pI$ 分别为应变增量和应力的偏分量, I 为单位张量。对于平面应变问题, 将式 (19) 展开后即可得到相应的弹塑性矩阵^[18]。

2.4 切线模量 E_t 和切线体积比 μ_t

沈珠江院士将双曲线模型推广为以下形式:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{p_a} = \frac{\varepsilon_a(x + l\varepsilon_a)}{(x + s\varepsilon_a)^2} \quad (20)$$

式 (20) 也被称为驼峰曲线, 其中, x , s 和 l 为驼峰曲线系数, p_a 为大气压强。如图 11 所示, 该曲线也可描述岩土材料的剪胀特性。

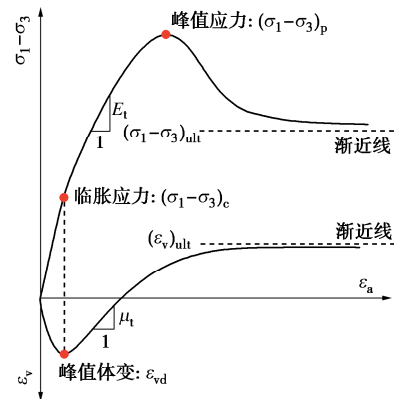


图11 驼峰曲线示意图

Fig. 11 Hump curves of triaxial tests in new double-yield constitutive model

对式 (20) 求导, 可得切线模量 E_t :

$$E_t = \frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \varepsilon_a} = p_a \cdot \frac{x(x + (2l - s)\varepsilon_a)}{(x + s\varepsilon_a)^3} \quad (21)$$

在试验起始点处, $\varepsilon_a = 0$, 因此可求得初始切线模量 E_i :

$$E_i = \frac{p_a}{x} \quad (22)$$

胶结砂砾石料的初始切线模量 E_i 与围压 σ_3 之间有^[10]

$$E_i = k p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3 + p_a}{p_a} \right)^n \quad (23)$$

式中: k 和 n 为无量纲的模型参数。

参数 s 和 l 可通过下式求得

$$s = p_a \frac{1 - \sqrt{1 - (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} / (\sigma_1 - \sigma_3)_p}}{2(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (24)$$

$$l = (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \cdot b^2 \quad (25)$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 分别为峰值强度和残余强度。可分别由下式计算:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_p = \frac{(1 + \sin \varphi) \sigma_3 + 2c_p \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (26)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \frac{(1 + \sin \varphi) \sigma_3 + 2c_r \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (27)$$

式中: c_p 和 c_r 分别为峰值黏聚力和残余黏聚力, 从笔者之前的研究结果来看^[17], 峰值—残余阶段的摩擦角 φ 可认为保持不变。可用下式描述:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \lg(\sigma_3 / p_a) \quad (28)$$

式中: φ_0 和 $\Delta \varphi$ 为反映峰值摩擦角变化的参数。可由三轴剪切试验求得。

将式 (22) ~ (28) 带入到式 (21) 中即可得到 E_t 。

已有的研究表明, Rowe 剪胀方程可很好地描述岩土材料的剪胀特性, 但并不适用于胶结砂砾石料(强剪胀性), 因此需对 Rowe 剪胀方程做出必要改进, 具体表达式为

$$\mu_t = 1 - (\eta / \eta_c)^\chi \quad (29)$$

式中: η 为应力比, χ 为修正系数, 当 $\chi=1$ 时, 式 (29) 退化为 Rowe 剪胀方程, η_c 为临胀应力比, 可由下式确定:

$$\eta_c = \frac{6 \sin \varphi_c}{3 - \sin \varphi_c} \quad (30)$$

式中: φ_c 为临胀摩擦角, 可由下式计算:

$$\varphi_c = \varphi_{c0} - \Delta \varphi_c \lg(\sigma_3 / p_a) \quad (31)$$

式中: φ_{c0} 和 $\Delta \varphi_c$ 为反应临胀摩擦角变化的参数。

2.5 弹性模量求解

弹性体积模量 K 和弹性剪切模量 G , 通过卸荷—再加荷模量 E_{ur} 算出, 本模型中, E_{ur} 的表达式为

$$E_{ur} = a_{ur} E_t \quad (32)$$

式中: a_{ur} 为切线模量 E_t 与卸荷模量 E_{ur} 之间的比例系

数, 通常取 2。 K 和 G 可由下式计算:

$$\left. \begin{aligned} K &= E_{ur} / [3(1 - 2\nu)] \\ G &= 2E_{ur} / [3(1 + \nu)] \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

堆石料、混凝土类材料的泊松比 ν 通常取 0.3。

综上, 本文建立的基于强度特性的胶结砂砾石料本构模型共有 10 个材料常数。其中, c_i , c_p , c_r 三个不同加载阶段的黏聚力, 可根据文献[17]方法求得, 参数 k 和 n 通过点绘 σ_3 与 E_i 关系确定(式 23); φ_0 和 $\Delta \varphi$ 通过不同围压下峰值摩擦角拟合得到(式 (28)), φ_{c0} 和 $\Delta \varphi_c$ 则通过不同围压下临胀摩擦角拟合得到(式 (31)), 该处偏应力对应的是 $\mu_t=0$ 时的临界剪胀点(图 10), χ 则是 Rowe 剪胀方程的修正系数(式(29))。

3 弹塑性本构模型验证

为验证本文所构建的本构模型, 利用 Fortran 语言对本构模型开发并嵌入有限元程序。模拟了胶结砂砾石料的三轴剪切试验, 并分别对比本文所开展的试验, 以及孙明权等^[9]、吴梦喜等^[12]和魏匡民等^[13]的试验数据, 探究本构模型针对不同围压、不同胶凝掺量下的胶结砂砾石料的适用性, 表 1 所示为构建屈服面所需要的参数, 表 2 为模型参数。

表 1 构建屈服面相关参数

Table 1 Relevant parameters of yield surface

掺量/(kg·m ⁻³)	σ_s /MPa	t	M	p_t /MPa	p_x /MPa
20	18.56	0.34	1.87	0.124	1.479
40	15.36	0.32	1.77	0.181	2.262
60	11.22	0.29	1.52	0.247	5.698
80	8.21	0.25	1.24	0.321	7.732
100	5.13	0.21	1.18	0.466	9.627

3.1 相同胶凝掺量、不同围压下的适用性

图 12~14 分别为文献[9]、[11]和[12]中的试验数据, 以及他们各自提出的本构模型与本文模型的预测结果对比。

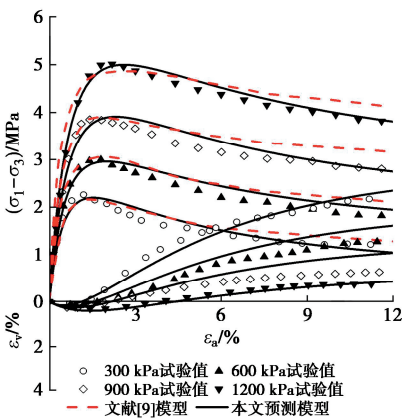


图 12 文献[9]试验结果与模拟结果对比

Fig. 12 Test results in Reference [9] and simulated results

表 2 胶结砂砾石料弹塑性相关参数
Table 2 Elastoplastic parameters of CSG

类型	掺量/(kg·m ⁻³)	c _i /kPa	c _p /kPa	c _v /kPa	φ ₀ /(°)	Δφ/(°)	φ _c /(°)	Δφ _c /(°)	k	n	χ
本文	20	352.23	218.21	153.33	41.22	5.35	36.77	3.27	1632.65	0.25	0.52
本文	40	742.46	301.58	272.21	39.37	4.37	37.02	3.83	1954.43	0.27	0.61
本文	60	1085.51	632.67	384.57	36.83	3.93	34.21	3.68	2721.78	0.27	0.67
本文	80	1687.67	958.36	427.61	31.45	3.28	32.14	3.45	4652.64	0.28	0.77
文献[9]	60	1021.36	621.57	361.35	35.21	3.43	34.28	3.23	3832.25	0.29	0.66
文献[11]	50	973.54	473.49	373.28	37.78	3.84	35.67	3.58	3132.45	0.26	0.63
文献[12]	100	2068.21	1225.24	488.67	30.64	3.25	31.35	3.234	5872.19	0.37	0.85

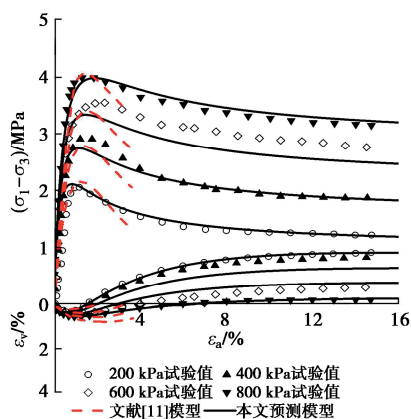


图 13 文献[11]试验结果与模拟结果对比
Fig.13 Test results in Reference [11] and simulated results

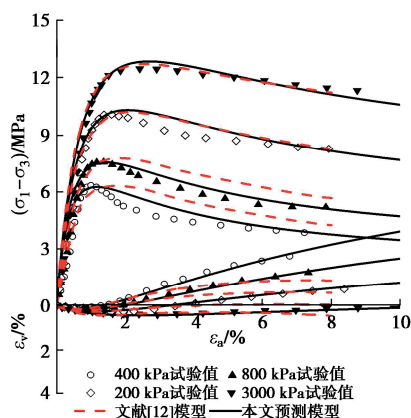


图 14 文献[12]试验结果与模拟结果对比
Fig. 14 Test results in Reference [12] and simulated results

整体上看，在相同的胶凝掺量下，围压较低时，应变软化程度剧烈且剪胀性强，当围压升高时两种特性则有所减弱。3 种本构模型均可在一定程度上反映出胶结砂砾石料应变软化特性，但对剪胀性的预估有所偏差（文献[9]模型未描述体变-应变曲线，文献[11]只模拟到应变为 4%）。本文的预测模型考虑到了胶结砂砾石料的强度作用机理，且重新定义了切线模量 E_t 和切线体积比 μ_t ，因此预测的结果更加贴近于试验数据。

3.2 不同胶凝掺量、相同围压下的适用性

图 15 比较的是在相同围压,不同胶凝掺量下模型的预测结果。可以看出在相同围压下，胶凝掺量的加入会明显提高胶结砂砾石料的强度和刚度，同时也会增强应变软化和剪胀特性。总体上看，本构模型能较好的描述胶结砂砾石料的力学特性，证明了其具备较强的合理有效性。

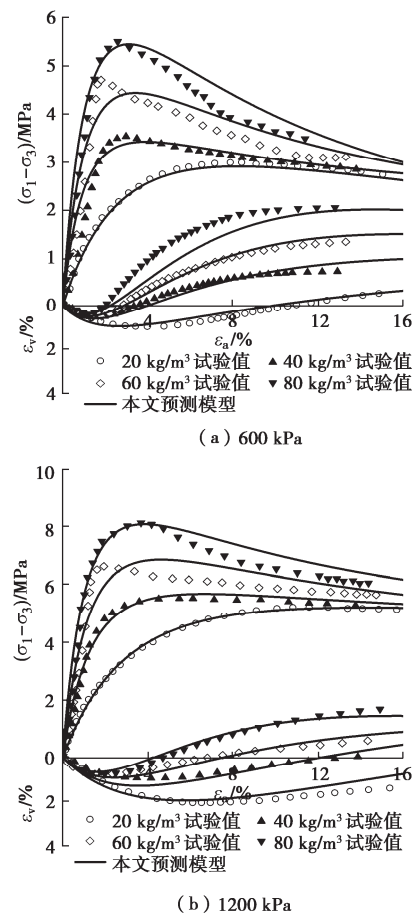


图 15 本文试验结果与模拟结果对比
Fig. 15 Test results in this study and simulated results

4 结 论

本文开展了一系列胶结砂砾石料三轴剪切试验，

建立了胶结砂砾石料的二元强度准则和本构模型并验证, 主要得到以下4点结论。

(1) 与堆石料相比, 胶结砂砾石料具有明显的应变软化特性和强剪胀性, 胶凝掺量越高, 则这两种特性越强。

(2) 建立了适用于胶结砂砾石料的二元剪切强度准则, 在子午面和 π 平面上, 该准则均能较好地描述胶结砂砾石料的强度演化规律。

(3) 本构模型方面, 将剪切强度准则合理转化为剪切屈服面, 同时根据胶结砂砾石料的拉压特性建立了体积屈服面, 并重点描述了胶结砂砾石料在三轴剪切应力路径下的应力软化与体变剪胀的发展趋势。

(4) 模拟三轴试验并与多组胶结砂砾石料的试验结果进行对比, 结果表明本构模型可很好地描述胶结砂砾石料的复杂力学特性, 证明了本构模型的合理性。

参考文献:

- [1] 贾金生, 刘 宁, 郑瑾莹, 等. 胶结颗粒料坝研究进展与工程应用[J]. 水利学报, 2016, **47**(3): 315-323. (JIA Jinsheng, LIU Ning, ZHENG Cuiying, et al. Studies on cemented material dams and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(3): 315-323. (in Chinese))
- [2] 蔡 新, 杨 杰, 郭兴文. 胶凝砂砾石坝研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, **43**(5): 431-441. (CAI Xin, YANG Jie, GUO Xingwen. Review of cement sand and gravel dams[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, **43**(5): 431-441. (in Chinese))
- [3] 傅 华, 陈生水, 韩华强, 等. 胶凝砂砾石料静、动力三轴剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(2): 357-362. (FU Hua, CHEN Shengshui, HAN Huaqiang, et al. Experimental study on static and dynamic properties of cemented sand and gravel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(2): 357-362. (in Chinese))
- [4] HAERI S M, HOSSEINI S M, TOLL D G, et al. The behaviour of an artificially cemented sandy gravel[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2005, **23**(5): 537-560.
- [5] 沈珠江. 岩土破坏力学: 理想脆弹塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(3): 253-257. (SHEN Zhujiang. Breakage mechanics for geological materials: an ideal brittle-elastoplastic model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(3): 253-257. (in Chinese))
- [6] 张 革, 刘恩龙. 基于CT动态扫描的冻土细观二元介质本构模型[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(9): 1888-1896. (ZHANG Ge, LIU Enlong. Binary-medium constitutive model for frozen soils based on CT dynamic scanning[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(9): 1888-1896. (in Chinese))
- [7] 邓 刚, 沈珠江. 结构性黏土的二元介质渗流模型[J]. 水利学报, 2005, **36**(12): 1414-1419. (DENG Gang, SHEN Zhujiang. Binary medium seepage model for structured clays[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, **36**(12): 1414-1419. (in Chinese))
- [8] 李杭州, 熊光东, 郭 彤, 等. 考虑统一强度理论的黄土二元介质模型研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊 1): 53-57. (LI Hangzhou, XIONG Guangdong, GUO Tong, et al. Binary-medium model for loess considering unified strength theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S1): 53-57. (in Chinese))
- [9] 孙明权, 刘运红, 陈姣姣, 等. 胶凝砂砾石材料本构模型研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2012, **33**(5): 13-15, 20. (SUN Mingquan, LIU Yunhong, CHEN Jiaojiao, et al. Study on constitutive model of cemented sand and gravel material[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2012, **33**(5): 13-15, 20. (in Chinese))
- [10] 蔡 新, 杨 杰, 郭兴文, 等. 胶凝砂砾石料弹塑性本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(9): 1569-1577. (CAI Xin, YANG Jie, GUO Xingwen, et al. Elastoplastic constitutive model for cement-sand-gravel material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(9): 1569-1577. (in Chinese))
- [11] 吴梦喜, 杜 斌, 姚元成, 等. 筑坝硬填料三轴试验及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(8): 2241-2250. (WU Mengxi, DU Bin, YAO Yuancheng, et al. Triaxial tests and a new constitutive model of hardfill material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(8): 2241-2250. (in Chinese))
- [12] 魏匡民, 陈生水, 李国英, 等. 胶凝粗粒料的弹塑性模型与应用研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(5): 797-805. (WEI Kuangmin, CHEN Shengshui, LI Guoying, et al. Elastoplastic model for cemented coarse-grained materials and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(5): 797-805. (in Chinese))
- [13] 刘恩龙, 沈珠江. 结构性土的强度准则[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(10): 1248-1252. (LIU Enlong, SHEN Zhujiang. Strength criterion for structured soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(10): 1248-1252. (in Chinese))

Chinese))

[14] 张 德, 刘恩龙, 刘星炎, 等. 冻土二元介质模型探讨: 以-6℃冻结粉土为例[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 82-90. (ZHANG De, LIU Enlong, LIU Xingyan, et al. Investigation on binary medium model taking frozen silt soils under -6℃ for example[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 82-90. (in Chinese))

[15] WANG S, ZHONG Z L, FAN Y F, et al. Developing a unified nonlinear strength (UNS) criterion for geomaterials[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(6): 187.

[16] YANG Y G, LAI Y M, LI J B. Laboratory investigation on the strength characteristic of frozen sand considering effect of confining pressure[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(3): 245-250.

[17] REN H L, CAI X, WU Y L, et al. A study of strength parameter evolution and a statistical damage constitutive model of cemented sand and gravel[J]. Materials, 2023, 16(2): 542.

[18] 张丙印, 贾延安, 张宗亮. 堆石体修正 Rowe 剪胀方程与南水模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1443-1448. (ZHANG Bingyin, JIA Yan'an, ZHANG Zongliang. Modified Rowe's dilatancy law of rockfill and Shen Zhujiang's double yield surfaces elastoplastic model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1443-1448. (in Chinese))

第五届全国冻土工程与寒区环境学术会议(一号通知)
北京 2025 年 5 月 9~11 日

会议简介: 全国冻土工程与寒区环境学术会议是在中国地理学会冰川冻土分会指导下, 由冻土工程国家重点实验室于 2019 年发起, 专注于冻土工程与寒区环境理论和实践的全国性学术交流活动, 已先后在兰州(2019)、南昌(2021)、南京(2023)、兰州(2024)成功举办。结合前四届大会的成功经验, 由中国地理学会、中国冰冻圈科学学会(筹)、中国科学院西北生态环境资源研究院主办, 北京建筑大学、北京交通大学、重庆交通大学、冰冻圈科学与冻土工程全国重点实验室、中国地理学会冻土与寒区工程专业委员会承办的“第五届全国冻土工程与寒区环境学术会议”, 将于 2025 年 5 月 9~11 日在北京召开。本届会议以“智能冻土工程, 绿色寒区环境”为主题, 对冻土工程和寒区环境相关基础理论、技术创新、设计施工、安全保障等前沿问题的最新研究成果进行广泛深入的学术交流, 服务“一带一路”、交通强国、生态文明、极地安全等国家重大科技需求。

会议主题: 智能冻土工程, 绿色寒区环境

会议专题: ①AI 赋能冻土力学与工程; ②冻土力学与冻土物理学; ③冻土多物理场耦合理论与数值方法; ④冻土工程安全保障理论与韧性提升技术; ⑤寒区基础设施与环境相互作用; ⑥寒区工程绿色韧性材料; ⑦人工冻结新理论与新技术; ⑧冻土变化及寒区灾害与水文效应; ⑨冻土生态环境效应与碳循环; ⑩极地工程与环境; ⑪冰冻圈与区域发展; ⑫冻土测试与监测新技术; ⑬寒区重大工程实践。

主办单位: 中国地理学会; 中国冰冻圈科学学会(筹); 中国科学院西北生态环境资源研究院。

会议秘书处秘书长: 王冬勇(18813125998), 李晓康(18330106533), 秘书: (按汉语拼音排序) 陈佩佩, 黄建, 孔令明, 梁靖宇, 王剑辉, 王盟, 王番, 张佩, 会议电子邮箱: buceafrozen2025@126.com, 具体报名注册及缴费等其他事项详见后续二号通知。