

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.092



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



土工格栅加筋粗粒料的弹塑性本构模型

庞锐^{1a,1b}, 吴财星^{1a}, 王星亮^{1a,2}, 徐斌^{1a,1b}

(1. 大连理工大学 a. 建设工程学院; b. 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 土工格栅对粗粒料的强度、变形特性有一定影响, 准确地描述土工格栅加筋粗粒料在加载过程中的宏观力学行为具有重要意义。为研究能够合理描述其强度、变形特性的本构模型, 以土工格栅加筋粗粒料室内三轴试验成果为基础, 根据不同类型土工格栅加筋粗粒料的剪胀特性, 以剑桥模型剪胀方程为基础, 提出能够合理描述土工格栅加筋粗粒料剪胀、剪缩特性的非线性剪胀方程, 通过与 Rowe 剪胀方程、剑桥模型剪胀方程进行比较, 证明该方程在预测土工格栅加筋粗粒料剪胀特性方面具有优势。在此基础上, 结合广义塑性模型理论, 构造能够反映土工格栅加筋粗粒料变形和强度特性的弹塑性本构模型。模型共有 6 个参数, 每个参数物理意义明确, 均可通过室内三轴试验确定。最后, 通过模拟多组不同围压下土工格栅加筋粗粒料室内三轴试验, 验证了模型的合理性。结果表明, 建立的模型总体上能够合理地描述不同类型土工格栅加筋粗粒料的复杂软化、硬化和剪胀、剪缩行为, 可为相应工程提供有效的本构工具。

关键词: 土工格栅; 粗粒料; 剪胀方程; 广义塑性理论; 本构模型

中图分类号: TV641.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)02-0062-08

Elastoplastic constitutive model of geogrid-reinforced coarse-grained materials

PANG Rui^{1a,1b}, WU Caixing^{1a}, WANG Xingliang^{1a,2}, XU Bin^{1a,1b}

(1a. Faculty of Infrastructure Engineering; 1b. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China; 2. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, P. R. China)

Abstract: Geogrid has a certain influence on the strength and deformation characteristics of coarse-grained materials, and accurately describing the macroscopic mechanical behavior of geogrid-reinforced coarse-grained materials during loading is of great significance. In order to investigate the constitutive model which can reasonably describe its strength and deformation characteristics, based on the conventional triaxial test results of geogrid-reinforced coarse-grained materials, a nonlinear dilatancy equation is proposed in this study to

收稿日期: 2024-07-21

基金项目: 国家重点研发项目(2023YFC3011400); 国家自然科学基金(52479094, 52379117, 52279096, 52279125)

作者简介: 庞锐(1991-), 男, 博士后, 副教授, 主要从事岩土工程抗震风险评价研究, E-mail: pangrui@dlut.edu.cn。

徐斌(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xubin@mail.dlut.edu.cn。

Received: 2024-07-21

Foundation items: National Key R & D Program of China (No. 2023YFC3011400); National Natural Science Foundation of China (Nos. 52479094, 52379117, 52279096, 52279125)

Author brief: PANG Rui (1991-), postdoc, associate professor, main research interest: seismic risk assessment of geotechnical engineering, E-mail: pangrui@dlut.edu.cn.

XU Bin (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xubin@mail.dlut.edu.cn.

reasonably describe the dilatancy and shrinkage characteristics of geogrid-reinforced coarse-grained materials. Compared with the Rowe and Cambridge model shear dilatancy equations, it is proved that this equation has advantages in predicting the shear dilatancy characteristics of geogrid-reinforced coarse-grained materials. Combined with the theory of generalized plasticity model, an elastoplastic constitutive model that can reflect the deformation and strength characteristics of geogrid-reinforced coarse-grained materials is proposed. There are totally 6 parameters in the model, all of which have clear physical meanings and can be determined by conventional triaxial tests. Finally, the accuracy of this model is fully proved by simulating the static tests under different confining pressures. The results show that the established model can reasonably describe the complex softening, hardening, and dilatancy and shrinkage behaviors of different types of geogrid-reinforced coarse-grained materials, providing an effective constitutive tool for corresponding engineering applications.

Keywords: geogrid; coarse-grained materials; dilatancy equation; generalized plastic theory; constitutive model

高土石坝遭遇强震而发生破坏时,破坏一般先从坝顶部开始,因此,应格外重视坝体顶部的稳定性。孔宪京等^[1]提出,在坝高4/5以上,综合运用堆石料中加筋并加盖护面板,以提高抗震性能。近年来,土工格栅加筋土技术不断应用于如美、冶勒、两河口等大坝的抗震设计中^[2]。但目前有关土工格栅加筋粗粒料的相关特性及本构模型的研究较少,很难为高土石坝抗震措施的制定提供理论指导。因此,研究准确预测土工格栅加筋粗粒料的应力、应变特性的本构模型极具意义。

近年来,不少学者对土工格栅加筋料进行了相关研究,保华富等^[3-4]采用大型三轴仪对土工格栅加筋前后的碎石土应力特性进行研究,提出加筋后的碎石土相当于提高了围压,可用等效围压概念来描述。赵川等^[5]、Chen等^[6]分别对加筋前后的碎石土和珊瑚砂进行了固结排水剪试验,分析得出土工格栅加固后可以通过提高黏聚力来提高土体的强度,并且可以减少土体的侧向变形。邹德高等^[7]应用中大型动三轴仪对土工格栅加筋筑坝砂砾料进行了静、动力三轴试验,研究了其残余变形特性。于荣萍等^[8]采用邓肯张E-B模型对面板坝格栅加固区域进行模拟,分析了其加固效果。王志杰等^[9]、石熊等^[10]根据室内静力试验结果改进了Duncan双曲线模型,模拟了土工格栅加筋粗粒料室内试验曲线,且模拟结果与试验结果吻合较好。上述研究多是对加筋粗粒料的静力应力-应变试验曲线的预测,鲜有对加筋粗粒料剪胀、剪缩变形特性的预测。

在Zienkiewicz^[11]提出的广义塑性力学概念基础上,Pastor等^[12-13]提出了基于广义塑性理论的P-Z模型(Pastor-Zienkiewicz本构模型),并且成功描述了砂土的静、动力应力-应变关系。与经典弹塑性模型相比,广义塑性模型不需要复杂的屈服函数、塑性势函数的推导,仅需给出塑性流动方向、加载方向和塑性模量的表达式即可建模。由于其建模灵活、框架清晰,许多学者以该模型为基础进行了拓展研

究。Wang等^[14]在广义塑性理论框架下建立了新的砂砾土弹塑性本构模型。宁志远等^[15]对广义塑性模型的卸载模量进行改进,合理描述了粗粒料的变形性态。通过改进剪胀方程,结合广义塑性理论,Guo等^[16]、郭万里等^[17]、王占军等^[18]建立了粗粒土的本构模型,并且对固结排水剪试验结果进行了预测。在堆石料循环加载的不同阶段构造切线模量及剪胀方程中,Fu等^[19]引入老化函数,成功描述了堆石料在循环剪切过程中的硬化行为。刘华北^[20-21]采用广义塑性模型模拟土体特性,用边界面弹塑性模型模拟土工格栅,进行加筋土挡土墙的有限元分析。综合来看,目前对于粗粒料本构模型的研究比较全面,而对于加筋粗粒料本构模型的研究则相对较少,尤其缺少可以表征加筋粗粒料在三轴试验中复杂的软化、硬化和剪胀、剪缩行为的本构模型。

基于已有的土工格栅加筋粗粒料试验成果,根据其剪胀特性,提出适用于加筋粗粒料的剪胀方程。基于广义塑性理论框架,建立土工格栅加筋粗粒料的弹塑性本构模型,并采用相关文献中的试验结果对模型的有效性进行验证。

1 土工格栅加筋粗粒料剪胀方程

剪胀性常用剪胀比 d_g 来描述, d_g 为塑性体应变增量 $d\epsilon_v^p$ 和塑性剪应变增量 $d\epsilon_s^p$ 的比值。剪缩时 $d_g > 0$,剪胀时 $d_g < 0$ 。构造剪胀方程(剪胀比与应力比之间的关系)是构造广义塑性模型的关键内容。针对粗粒料剪胀特性以及剪胀方程的研究比较成熟,其中常用的剪胀方程有剑桥模型剪胀方程、Rowe剪胀方程及其修正方程^[17-18]。

Rowe剪胀方程^[22]为

$$d_g = \frac{9(M_d - \eta)}{9 + 3M_d - 2M_d\eta} \quad (1)$$

式中: M_d 为相变应力比,即土体由剪缩向剪胀转变时的应力比,此时土体的剪胀比 $d_g = 0$ 。 η 为应力

比,即 $\eta = q/p$ (广义剪应力 q 与平均应力 p 的比值)。

剑桥模型的剪胀方程^[23]为

$$d_g = M - \eta \quad (2)$$

式中: M 为土体达到临界状态时的应力比。

为研究剑桥模型剪胀方程(式(2))对土工格栅加筋粗粒料的适用性,对由三轴试验资料整理出的 d_g - η 曲线进行拟合。 d_g - η 曲线分为两种:对于临界状态应力比 M 不等于相变应力比 M_d 的加筋土,使用式(2)进行描述会高估加筋粗粒料的剪胀性,并且不能合理描述剪胀区间的曲线特征,如图 1 所示(图 1 为围压为 200 kPa 时双向经编纤维土工格栅加筋砂砾料^[7]三轴 CD 试验得出的 d_g - η 曲线);临界状态应力比 M 等于相变应力 M_d 时,仅考虑加筋粗粒料发生体缩,即 $d_g > 0$,如图 2 所示(图 2 为围压为 400 kPa 时土工格栅加筋粗粒料^[10]三轴 CD 试验得出的 d_g - η 曲线),此时式(2)不能描述其非线性,并且会低估加筋粗粒料的剪胀性。

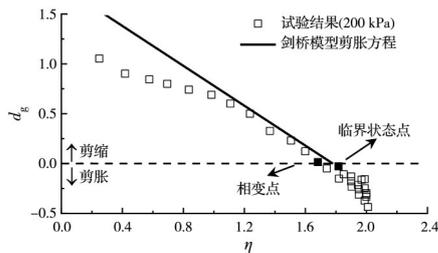


图 1 土工格栅加筋砂砾料剪胀规律

Fig. 1 Dilatancy behaviors of geogrid-reinforced sand-gravel materials

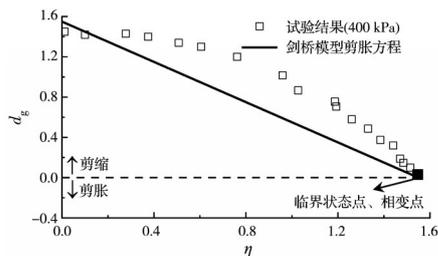


图 2 土工格栅加筋粗粒料剪胀规律

Fig. 2 Dilatancy behaviors of geogrid-reinforced coarse-grained materials

根据上述不足,在已有土工格栅加筋粗粒料三轴试验成果^[10]基础上,将剑桥模型剪胀方程中临界状态应力比 M 换成相变应力比 M_d ,用以描述体胀^[17];引入塑性剪应变 ϵ_s^p ,用以描述剪胀区的非线性变化;加入合理的数学式,用以描述曲线的非线性。最终,构造的剪胀方程表达式为

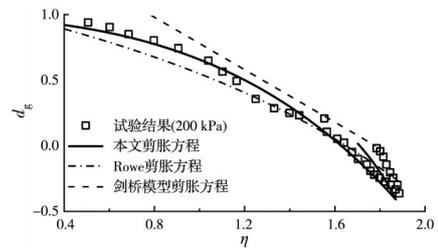
$$d_g = d_0(M_d - \eta) \exp(\eta/M) \quad (3)$$

$$M_d = M \exp[-\gamma_g / (1 + \epsilon_d)] \quad (4)$$

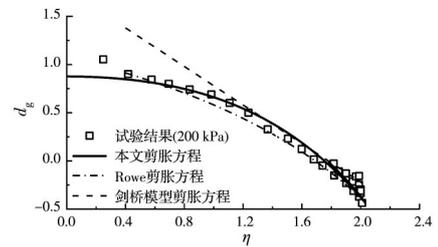
式中: d_0 为塑性流动方向参数; $\epsilon_d = \int |d\epsilon_s^p|$, 定义为累

积塑性剪应变; γ_g 为剪胀参数,由式(4)求得 $\gamma_g = -\ln(M_d/M)(1 + \epsilon_d)$,此时 ϵ_d 为从试验开始到相变点处的累积塑性剪应变。由式(3)可知, $\eta < M_d$ 时 $d_g > 0$,土体处于剪缩状态; $\eta > M_d$ 时 $d_g < 0$,土体处于剪胀状态; $\eta = M_d$ 时 $d_g = 0$,土体处于相变点;数学式 $\exp(\eta/M)$ 用于描述非线性特性。

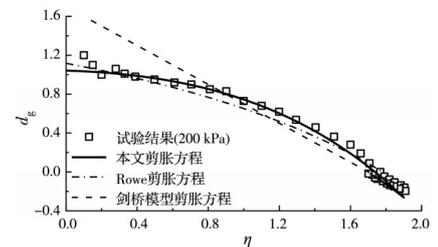
为验证新构建剪胀方程(式(3))的适用性,将该方程与 Rowe 剪胀方程(式(1))及剑桥模型剪胀方程(式(2))进行对比分析。选取以下三组三轴 CD 试验数据作为比较依据:双向经编土工格栅加筋前后的筑坝砂砾料(围压 200 kPa,即试验中作用于试样侧向的恒定压力)^[7]、加筋堆石料(围压 200 kPa)^[24]以及加筋粗粒料(围压 400 kPa)^[10]。通过对比分析各方程对上述试验 d_g - η 曲线的模拟效果(图 3),系统评



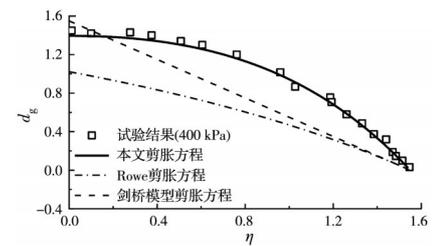
(a) 砂砾料



(b) 土工格栅加筋砂砾料



(c) 土工格栅加筋堆石料



(d) 土工格栅加筋粗粒料

图 3 不同剪胀方程拟合结果对比

Fig. 3 Comparison of fitting results of different dilatancy equations

估各方程在描述加筋粗粒料剪胀特性方面的表现,拟合参数见表 1。

表 1 剪胀方程模型参数

Table 1 Parameters of dilatancy equations

材料	d_0	M	γ_g
筑坝砂砾料 ^[7]	0.60	1.80	0.100
加筋砂砾料 ^[7]	0.50	1.78	0.015
加筋堆石料 ^[24]	0.65	1.70	0.500
加筋粗粒料 ^[10]	0.90	1.55	0

从图 3 可以看出,Rowe 剪胀方程可以描述土工格栅加筋粗粒料剪胀特性的非线性,但不能描述相变点到极限状态点的变化规律;本文剪胀方程与加筋前后粗粒料的应力剪胀曲线吻合较好,可以合理描述土工格栅加筋粗粒料的剪胀特性。

2 弹塑性本构模型

2.1 广义塑性模型框架

在广义塑性模型框架中,弹塑性刚度矩阵表示为

$$D^{ep} = D^e - \frac{D^e : n_g \otimes n_f : D^e}{H + n_f : D^e : n_g} \quad (5)$$

式中: D^e 为弹性刚度矩阵; n_g 为塑性流动方向向量; n_f 为加载方向向量; H 为塑性模量。

应变增量 $d\epsilon$ 视为弹性应变增量和塑性应变增量之和,以体积应变 ϵ_v 和剪切应变 ϵ_s 为例

$$d\epsilon = \begin{Bmatrix} d\epsilon_v \\ d\epsilon_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d\epsilon_v \\ d\epsilon_s \end{Bmatrix}^e + \begin{Bmatrix} d\epsilon_v \\ d\epsilon_s \end{Bmatrix}^p \quad (6)$$

相应地,应力增量 $d\sigma$ 采用广义剪应力 q 与平均应力 p 表示为

$$d\sigma = \begin{Bmatrix} dp \\ dq \end{Bmatrix} = D^{ep} \begin{Bmatrix} d\epsilon_v \\ d\epsilon_s \end{Bmatrix} \quad (7)$$

加卸载准则表示为

$$\begin{aligned} n_f : d\sigma^e &> 0, \text{加载} \\ n_f : d\sigma^e &< 0, \text{卸载} \\ n_f : d\sigma^e &= 0, \text{中性变载} \end{aligned} \quad (8)$$

2.2 弹性刚度矩阵

弹性刚度矩阵表示为

$$D^e = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: K 为体积模量; G 为剪切模量。采用Lade等^[25]提出的各向同性弹性模量,表达式为

$$G = G_0 p_a F(e) \left[\left(\frac{p'}{p_a} \right)^2 + \frac{K_0 J_2}{G_0 p_a^2} \right]^{0.25} \quad (10)$$

$$K = \frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)} \quad (11)$$

$$K_0 = \frac{2G_0(1+\nu)}{3(1-2\nu)} \quad (12)$$

式中: G_0 为剪切弹性参数; ν 为泊松比,一般取值为 0.3; K_0 为体积模量参数; p_a 为标准大气压,根据Richart等^[26]的研究成果,颗粒浑圆材料 $F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$,颗粒棱角分明材料 $F(e) = (2.97 - e)^2 / (1 + e)$, e 为当前孔隙比; J_2 为第二偏应力不变量,表示为

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (13)$$

2.3 塑性流动方向

广义模型框架中,塑性流动方向 n_g 由剪胀比 d_g 来确定,其表达式为

$$n_g = \left[\frac{d_g}{\sqrt{1+d_g^2}}, \frac{1}{\sqrt{1+d_g^2}} \right]^T \quad (14)$$

式中:剪胀比 d_g 由剪胀方程式(3)来表示。

2.4 加载方向

根据不相关联流动法则,加载方向 n_f 表达式与塑性流动方向相似,用峰值应力比代替相变应力比,具体表达式为

$$n_f = \left[\frac{d_f}{\sqrt{1+d_f^2}}, \frac{1}{\sqrt{1+d_f^2}} \right]^T \quad (15)$$

$$d_f = d_0 (M_f - \eta) \exp(\eta/M) \quad (16)$$

$$M_f = M \exp[-\gamma_f / (1 + \epsilon_d)] \quad (17)$$

式中: M_f 为峰值应力比; γ_f 为加载方向参数,由式(17)求得 $\gamma_f = -\ln(M_f/M)(1 + \epsilon_d)$,此时 ϵ_d 为由试验开始到峰值应力比处的累积塑性剪应变。

2.5 塑性模量

塑性模量 H 应满足在峰值应力点处等于 0 的要求^[17-18],因此,构造的塑性模量 H 为

$$H = H_0 G (M_f - \eta) \quad (18)$$

式中: H_0 为塑性模量参数。可以看出,应力比 η 达到峰值应力比 M_f 时, $H = 0$ 。引入弹性模量 G 后,塑性模量 H 为围压、孔隙比相关函数。

2.6 模型参数及确定方法

构建的模型共有 8 个参数,其中初始孔隙比 e_0 和泊松比 ν 均可视为已知常数,进而,实际模型需要确定的参数有 6 个,各参数物理意义明确,确定方法简单。可分为:弹性参数 G_0 ,由剪应力-剪应变曲线 ($q-\epsilon_s$) 初始段斜率求得;临界状态应力比 M ,由应力比-轴向应变曲线 ($\eta-\epsilon_1$) 确定,即应力比 η 不再随位移而变化时的应力比;塑性流动方向参数 d_0 ,通过

拟合剪胀比-应力比曲线($d_g-\eta$)确定,取各围压下的平均值;剪胀参数 γ_g ,由相变点剪应变和相变应力比之间的关系确定;加载方向参数 γ_l ,由峰值点剪应变与峰值应力比之间的关系确定;塑性模量参数 H_0 ,根据常规三轴试验结果,拟合 $H-G(M_r-\eta)$ 曲线来确定。

3 模型验证

为了验证构造的本构模型,对文献[24]中的一系列三轴试验结果进行模拟。文献[24]分别对泸定水电站的筑坝堆石料、经编纤维土工格栅(50 kN)加筋堆石料、经编纤维土工格栅(80 kN)加筋堆石料以及某水电站筑坝砂砾料、经编纤维土工格栅(50 kN)加筋砂砾料进行了大型三轴试验。部分材料的模型参数如表 2 所示,试验结果及模型预测结果如图 4 所示。

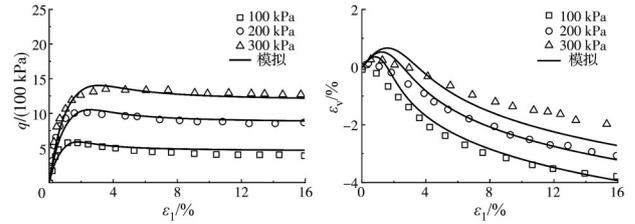
表 2 文献[24]中三轴试验本构模型参数

Table 2 Constitutive model parameters of triaxial tests in Reference[24]

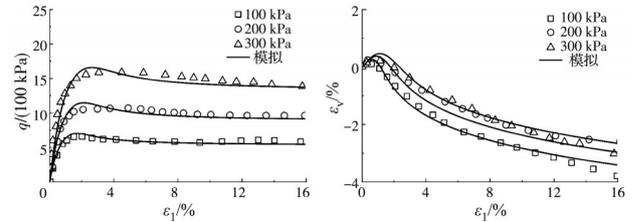
试验材料	e_0	ν	G_0	M	d_0	γ_g	γ_l	H_0
砂砾料	0.22	0.3	290	1.80	0.80	0.100	-0.27	0.45
经编 50 格 栅砂砾料	0.22	0.3	350	1.78	0.75	0.015	-0.32	0.50
经编 50 格 栅堆石料	0.58	0.3	470	1.70	0.55	1.100	-0.20	0.30
经编 80 格 栅堆石料	0.58	0.3	230	1.70	0.65	0.500	-0.21	0.55

对比图 4 中试验数据与模拟得出的 $q-\epsilon_1$ 曲线与 $\epsilon_v-\epsilon_1$ 曲线可以看出,模型可以较为准确地描述加筋粗粒料的应力-应变-体变关系。图 4 中的试验材料在不同围压下均有剪缩后剪胀的特性,本文的本构模型也可以准确地描述这一特点,模拟出的 $\epsilon_v-\epsilon_1$ 曲线上均可以清晰地看到由剪缩转变到剪胀的相变点。另外,图 4(a)中不同围压下本构模型对于砂砾料的预测结果均高估了砂砾料的剪缩变形,而对于图 4(b)中土工格栅加筋砂砾料的力学和变形特性具有较好的适用性。对于土工格栅加筋堆石料,模型稍微高估了在围压 200、300 kPa 时的剪胀变形。

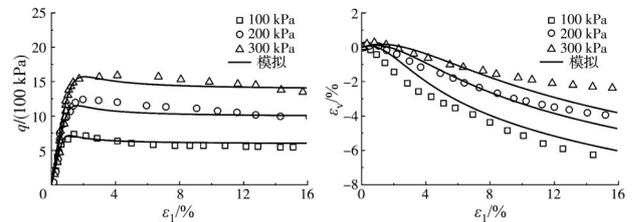
为进一步验证模型对加筋粗粒料的适用性,分别对文献[6, 10, 27]中的试验结果进行模拟。其中,Chen 等^[6]对聚丙烯土工格栅加筋珊瑚砂进行了室内大型三轴试验;石熊等^[10]对土工格栅加筋粗粒料进行了室内大型三轴试验;杨利等^[27]对高密度聚乙烯土工格室加筋粗粒料进行了室内大型三轴试验。



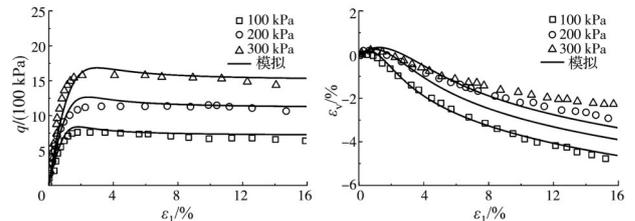
(a) 砂砾料



(b) 经编纤维土工格栅(50 kN)加筋砂砾料



(c) 经编纤维土工格栅(50 kN)加筋堆石料



(d) 经编纤维土工格栅(80 kN)加筋堆石料

图 4 文献[24]中三轴试验模拟结果

Fig. 4 Simulations results of triaxial tests in Reference [24]

各文献中试验材料参数如表 3 所示,试验结果及模拟结果如图 5 所示。

表 3 文献[6,10,27]中三轴试验本构模型参数

Table 3 Constitutive model parameters of triaxial tests in References [6,10,27]

数据来源	e_0	ν	G_0	M	d_0	γ_g	γ_l	H_0
Chen 等 ^[6]	1.20	0.3	350	1.72	0.55	0.05	-1.6	0.45
石熊等 ^[10]	0.45	0.3	300	1.55	0.90	0	0.25	0.30
杨利等 ^[27]	0.48	0.3	200	1.70	0.50	1.00	-0.2	0.21

如图 5(a)所示,模型可以合理描述出土工格栅加筋珊瑚砂在低围压时发生剪胀、高围压时发生剪缩的特性,虽然稍微高估了在高围压下发生的剪缩变形,但说明构建的本构模型能够合理地描述较大围压范围粗粒料的剪胀变化趋势;如图 5(c)所示,模型可以较为准确模拟出土工格室加筋粗粒料的 $\epsilon_v-\epsilon_1$ 曲线和 $\epsilon_3-\epsilon_1$ 曲线。图 4 和图 5 中的模拟结果说

明,模型可以较为准确地预测不同粗粒料以及格栅材料强度对加筋效果的影响。由此可见,模型可以较好地模拟出加筋粗粒料三轴试验结果。

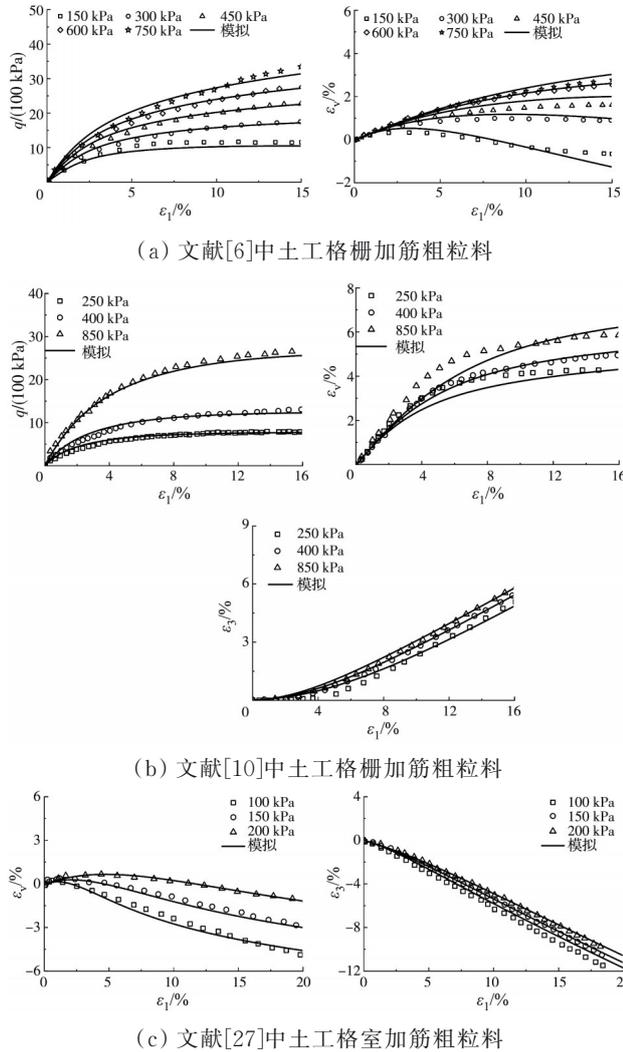


图 5 文献[6,10,27]中三轴试验模拟结果
Fig. 5 Simulations results of triaxial tests in References [6,10,27]

4 参数敏感性分析

为探究提出的本构模型中各参数变化对土工格栅加筋砂砾料应力-应变的影响,开展参数敏感性分析,围压设置为 100 kPa。考虑到参数较多,仅选取部分重要参数 M 、 γ_g 、 γ_f 、 H_0 进行敏感性分析,图 6 为参数敏感性分析结果。由图 6(a)可知,随着临界状态参数 M 的增加,应力峰值不断增大,应力软化阶段最终稳定应力也在增大,但对剪胀剪缩变形的影响较小;由图 6(b)可知,剪胀参数 γ_g 对应力的影响较小,对应变的影响较大。随着参数值的增加,剪缩阶段的剪缩变形几乎不变,剪胀阶段的剪胀变形增大;由图 6(c)可知,本构模型对加载方向参数 γ_f 的变化比较敏感。随着参数值的增加,应力峰值不

断减小,应力软化阶段最终稳定值也有小幅的变小趋势。当 γ_f 由负变正时,曲线的剪胀阶段逐渐消失,当 γ_f 大于等于 0 时,体应变的预测结果仅呈现出剪缩变形;由图 6(d)可知,随着塑性模量 H_0 的增加,应力峰值不断增大,应力软化阶段最终稳定应力几乎不变,同时,剪缩变形减少,剪胀变形增大。

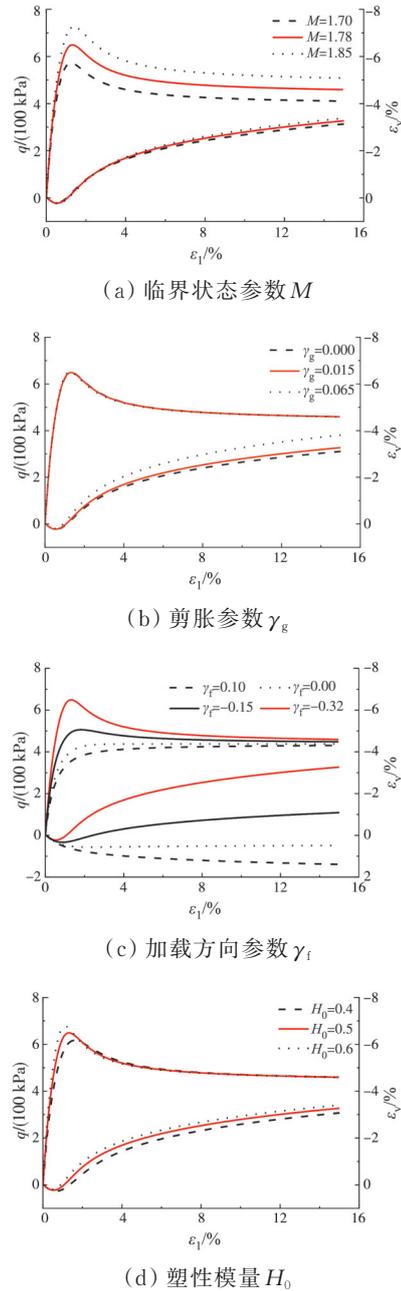


图 6 参数敏感性分析
Fig. 6 Parametric sensitivity analysis

5 结论

在广义塑性模型框架中引入可考虑土工格栅加筋粗粒料剪胀特性的非线性剪胀方程,建立可以描述土工格栅加筋粗粒料强度、变形特性的弹塑性本构模型,并通过三轴试验数据资料,验证了模型

的合理性。主要结论如下:

1) 根据土工格栅加筋粗粒料的剪胀特性, 提出一种新的非线性剪胀方程, 通过与 Rowe 剪胀方程、剑桥模型剪胀方程进行比较, 证明该方程在预测土工格栅加筋粗粒料剪胀特性方面具有优势。

2) 构造的模型共包含 6 个参数, 每个参数物理意义明确, 确定方法简单, 均可通过常规室内试验确定。

3) 对一系列土工格栅加筋粗粒料室内三轴试验数据的模拟结果表明, 建立的模型可以较好地描述不同类型土工格栅加筋粗粒料的复杂软化、硬化和剪胀、剪缩行为。

4) 由参数敏感性分析发现, 加载方向参数 γ_l 对模拟曲线形状的影响最大; 临界状态参数 M 对应力影响较大, 应变影响较小; 剪胀参数 γ_g 对应力影响较小, 应变影响较大; 塑性模量 H_0 对应力和应变的模拟结果均有一定影响。

参考文献

- [1] 孔宪京, 邹德高, 邓学晶, 等. 高土石坝综合抗震措施及其效果的验算[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1489-1495.
KONG X J, ZOU D G, DENG X J, et al. Comprehensive earthquake resistant measure of high earth-rockfill dams and effectiveness verification [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1489-1495. (in Chinese)
- [2] 张雪东, 李纲, 魏迎奇, 等. 心墙堆石坝坝顶加筋措施的动力离心模型试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(6): 591-597.
ZHANG X D, LI G, WEI Y Q, et al. Examining the performance of geo-grid reinforcement using dynamic centrifuge tests [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(6): 591-597. (in Chinese)
- [3] 保华富, 龚涛. 土工格栅加筋碎石土的强度和变形特性[J]. 水利学报, 2001, 32(6): 76-79, 85.
BAO H F, GONG T. The effects of reinforcement on strength and deformation of soil-gravel material [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(6): 76-79, 85. (in Chinese)
- [4] 保华富, 周亦唐, 赵川, 等. 聚合物土工格栅加筋碎石土试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 217-221.
BAO H F, ZHOU Y T, ZHAO C, et al. Study on geogrid reinforced stone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 217-221. (in Chinese)
- [5] 赵川, 周亦唐. 土工格栅加筋碎石土大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 419-422.
ZHAO C, ZHOU Y T. Experimental study on polymer geogrid reinforced crushed gravel by large-scale triaxial test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(4): 419-422. (in Chinese)
- [6] CHEN J F, AKOSAH S, MA C, et al. Large-scale triaxial tests of reinforced coral sand with different grain size distributions [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2023, 41(5): 544-554.
- [7] 邹德高, 毕静, 徐斌, 等. 加筋砂砾料残余变形特性研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 158-162.
ZOU D G, BI J, XU B, et al. Research on the residual deformation behavior of sand-gravel composites reinforced with geogrid [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 158-162. (in Chinese)
- [8] 于荣萍, 朱凯斌, 杨正权, 等. 高面板坝土工格栅加固机制及抗震加固效果分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(3): 245-253.
YU R P, ZHU K B, YANG Z Q, et al. Reinforcement mechanism and seismic evaluation of reinforced high CFRD with geogrid [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(3): 245-253. (in Chinese)
- [9] 王志杰, 蔡永明, 齐逸飞, 等. 土工格栅加筋橡胶碎石混合料大型三轴试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(7): 2509-2520.
WANG Z J, CAI Y M, QI Y F, et al. Large-scale triaxial tests of geogrid reinforced rubber gravel mixtures [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(7): 2509-2520. (in Chinese)
- [10] 石熊, 张家生, 孟飞, 等. 加筋粗粒土大型三轴试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(2): 52-58.
SHI X, ZHANG J S, MENG F, et al. Large-scale triaxial test of reinforced coarse-grained soils [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(2): 52-58. (in Chinese)
- [11] ZIENKIEWICZ O C. Generalized plasticity and some models for geomechanics [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1982, 3(3): 303-318.
- [12] PASTOR M. A generalized plasticity model for anisotropic behavior of sand [J]. Computer Methods and Advances in Geomechanics, 1991(1): 661-668.
- [13] PASTOR M, ZIENKIEWICZ O C, CHAN A H C. Generalized plasticity and the modelling of soil behaviour [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1990, 14(3): 151-190.
- [14] WANG X L, XU B, TANG C, et al. Elastoplastic constitutive model of sand-gravel composites considering the whole shearing process [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2022, 148(9): 04022056.
- [15] 宁志远, 王樱峻, 徐建军, 等. 一个改进的筑坝粗粒料统一广义塑性模型[J]. 中国农村水利水电, 2023(4): 294-301.

- NING Z Y, WANG Y J, XU J J, et al. A modified generalized plasticity model for coarse-grained dam materials [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(4): 294-301. (in Chinese)
- [16] GUO W L, CAI Z Y, WU Y L, et al. Dilatancy behaviour of rockfill materials and its description [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, 26(5): 1883-1896.
- [17] 郭万里, 朱俊高, 彭文明. 粗粒土的剪胀方程及广义塑性本构模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(6): 1103-1110.
- GUO W L, ZHU J G, PENG W M. Dilatancy equation and generalized plastic constitutive model for coarse-grained soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(6): 1103-1110. (in Chinese)
- [18] 王占军, 陈生水, 傅中志. 堆石料的剪胀特性与广义塑性本构模型[J]. *岩土力学*, 2015, 36(7): 1931-1938.
- WANG Z J, CHEN S S, FU Z Z. Dilatancy behaviors and generalized plasticity constitutive model of rockfill materials [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(7): 1931-1938. (in Chinese)
- [19] FU Z Z, CHEN S S, PENG C. Modeling cyclic behavior of rockfill materials in a framework of generalized plasticity [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2014, 14(2): 191-204.
- [20] 刘华北. 水平与竖向地震作用下土工格栅加筋土挡墙动力分析[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(5): 594-599.
- LIU H B. Analysis on seismic behavior of geogrid-reinforced retaining wall subjected to horizontal and vertical excitations [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(5): 594-599. (in Chinese)
- [21] 刘华北. 横向地震作用下土工合成材料加筋土挡墙筋材拉力分析[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(2): 288-294.
- LIU H B. Reinforcement loads of geosynthetic-reinforced soil retaining walls under horizontal earthquake loading [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(2): 288-294. (in Chinese)
- [22] 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 B Y, JIA Y A, ZHANG Z L. 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)
- [23] 朱翠民, 武颖利, 皇甫泽华, 等. 粗粒土的剪胀方程研究[J]. *人民黄河*, 2018, 40(10): 114-117, 122.
- ZHU C M, WU Y L, HUANGFU Z H, et al. Study on dilatancy equation of coarse-grained soil [J]. *Yellow River*, 2018, 40(10): 114-117, 122. (in Chinese)
- [24] 毕静. 加筋粗粒土变形和强度特性的研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2009.
- BI J. Study on deformation and strength characteristics of reinforced coarse-grained soil [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [25] LADE P V, NELSON R B. Modelling the elastic behaviour of granular materials [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1987, 11(5): 521-542.
- [26] RICHART F E, HALL J R, WOODS R. *Vibrations of soils and foundations* [J]. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1970.
- [27] 杨利, 张树茂, 杨青坡, 等. 土工格室加筋粗粒土加筋效果分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2013, 11(6): 125-128.
- YANG L, ZHANG S M, YANG Q P, et al. Analysis on reinforcing effect of geocell-reinforced coarse-grained soil [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2013, 11(6): 125-128. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)