

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.016

胶凝砂砾石料剪胀特性试验

蔡新¹, 谢昕卓¹, 杨杰²

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100; 2. 南通大学交通与工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 为探究弹性和塑性对胶凝砂砾石料(CSG)应力应变特性的影响,建立了适用于 CSG 的剪胀方程,参考粗粒土或堆石料剪胀特性的研究方式开展了一系列不同掺量和围压下的三轴压缩试验、三轴等向加卸载试验和三轴轴向加卸载试验,对 CSG 的剪胀特性进行了系统研究。试验结果表明:CSG 加载过程中弹性和塑性应变都不可忽略,CSG 在低围压下具有剪胀性,随着围压的增大逐渐向剪缩性过渡;由试验数据得到 CSG 的弹性体积应变和弹性剪应变,对比分析了考虑和不考虑弹性应变的 CSG 剪胀特性曲线,发现弹性应变对 CSG 剪胀特性影响较大,仅在高掺量、高围压、大应力条件下可以忽略弹性应变的影响;二次函数可以很好地描述 CSG 的剪胀特性。

关键词: 胶凝砂砾石料;三轴压缩试验;等向加卸载试验;剪胀性

中图分类号: TV41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)02-0122-08

Experimental study on shear dilatancy characteristics of CSG

CAI Xin¹, XIE Xinzhuo¹, YANG Jie²

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. School of Transportation, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: In order to investigate the effects of elasticity and plasticity on the stress-strain characteristics of cement sand and gravel (CSG) and to establish the dilatancy equation, a series of triaxial compression tests, isotropic loading and unloading tests, and triaxial loading and unloading tests of CSG materials with different cement contents under different confining pressures were carried out to systematically study the dilatancy characteristics, by means of the research method for the dilatancy characteristics of coarse-grained soil or rockfill. The results show that, both elastic and plastic strains cannot be ignored during the loading of CSG, and the CSG shows the dilatancy under the low confining pressure, while the dilatancy transits to the shrinkage with the increase of confining pressure. The elastomer strain and elastic shear strain of CSG were obtained by test data and dilatancy characteristic curves of CSG materials with and without considering elastic strain were also compared. The study reveals that the elastic strain of CSG has a greater influence on the dilatancy, and only with the high cement content and under the high confining pressure, the influence of elastic strain can be ignored. Finally, the quadratic function can well describe the dilatancy characteristics of CSG.

Key words: CSG; triaxial compression tests; isotropic loading and unloading test; dilatancy

胶凝砂砾石坝是在坝址附近河床或山区就地取材的石料中添加少量的胶凝剂、水,经拌和后倒入施工仓面,摊铺、碾压而成的一种新坝型^[1],其筑坝材料——胶结砂砾石料(CSG)本质是一种超贫碾压混凝土,但跟常规碾压混凝土相比,具有施工工艺简单、造价低廉、加固方案对大坝填筑的正常施工干扰小等优点^[2],因此,胶凝砂砾石坝是一种经济且环保的水工建筑物,在今后的水电工程建设中极具竞争性。

目前,胶凝砂砾石坝或围堰在国内外已建成 50 余座。与国外相比,国内胶凝砂砾石坝的应用与研究起步相对较晚,但该筑坝技术已先后在福建洪口、云南功果桥、贵州沙沱、四川飞仙关等临时性围堰工程,以及山西守口堡大坝、顺江堰溢流坝等永久性工程中得到应用^[1]。然而胶凝砂砾石坝的结构设计主要是依据工程经验、土石坝或碾压混凝土坝等设计规范或标准完成的。为准确把握胶凝砂砾石坝的结构性态,合理设计该坝型,部分学者尝试分析其力学特性,并修正其他岩土材料常用的本构模型,构建胶凝砂砾石料本构模型。

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0406804);国家自然科学基金(51979094);南通市科技计划(JC2020121,MS12020080)

作者简介: 蔡新(1964—),男,教授,博士,主要从事水工结构工程研究。E-mail:xcail@hhu.edu.cn

引用本文: 蔡新,谢昕卓,杨杰. 胶凝砂砾石料剪胀特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):122-129.

CAI Xin, XIE Xinzhuo, YANG Jie. Experimental study on shear dilatancy characteristics of CSG[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 122-129.

曹学兴等^[2-4]对 CSG 进行了抗压、抗折等强度特性试验,给出了该材料的胶凝掺量、含砂率、水胶比、集料级配等材料组分的参考取值。傅华等^[5]开展了不同掺量的胶凝砂砾石料动、静三轴剪切试验,研究了 CSG 的基本力学特征,获得了其力学特性随掺量变化的规律,同时探究了围压、固结应力和动应力对 CSG 动力残余特性的影响。蔡新等^[6]基于掺量 60 kg/m^3 的 CSG 试验数据,获得了应力-应变关系,推导了 CSG 剪切屈服方程和体积屈服方程,建立了适用于 CSG 的弹塑性本构模型。刘俊林等^[7]在 CSG 三轴试验数据的基础上,建立了参数物理意义明确的六参数非线性弹性本构模型,并将模型用于坝高 100 m 的大坝有限元分析,取得了较准确的计算结果。

剪切过程形变是岩土材料的重要特征,剪胀方程是岩土材料本构模型研究的热点和难点。自 Rowe^[8]提出 Rowe 剪胀方程以来,国内外很多学者对剪胀问题进行了大量研究。Nova 等^[9]提出了 Nova 剪胀方程,并从能量角度对其进行分析;贺林林等^[10]以砂土剪切过程位移为参照,标定其抗剪强度;郭万里等^[11-13]对粗粒土的剪胀特性进行了研究;王占军等^[14-16]通过试验对堆石料的剪胀特性进行了研究;姜景山等^[17-18]开展了粗粒土大三轴试验,探究了粗粒土的剪胀特性;魏浩等^[19]通过试验,探究了级配对粗粒料力学特性的综合影响。

目前 CSG 剪胀特性的研究大多参照堆石料剪胀特性的研究方式,直接采用体积应变与剪应变增量比近似塑性体积应变增量与塑性剪应变增量比。但 CSG 是在堆石料基础上拌和胶凝剂,力学特性发生了较大的改变,是否可以沿用堆石料剪胀表达形式尚不清楚,需要进行进一步分析。为此,本文开展系列不同围压下 CSG 的三轴压缩试验、三轴等向加卸载试验和三轴轴向加卸载试验,研究不同试验条件下 CSG 的剪胀特性,并针对剪胀过程中弹性应变的影响进行探究。

1 剪胀方程定义

在土力学理论中,由剪切引起材料体积变化的特性称为剪胀性。剪胀方程定义为剪胀比 d_g 与应力比 η 的函数^[17]:

$$d_g = \frac{d\varepsilon_{v,p}}{d\varepsilon_{s,p}} = \frac{d\varepsilon_v - d\varepsilon_{v,e}}{d\varepsilon_s - d\varepsilon_{s,e}} \tag{1}$$

$$\eta = q/p \tag{2}$$

其中
$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad q = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

式中: $d\varepsilon_{v,p}$ 为塑性体积应变增量; $d\varepsilon_{s,p}$ 为塑性剪应变增量; $d\varepsilon_{v,e}$ 为弹性体积应变增量; $d\varepsilon_{s,e}$ 为弹性剪应变增量; p 为正应力; q 为剪应力; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为3个主应力。

在岩土材料的研究中,多忽略弹性变形的影响,认为剪胀比为总应变比值,即

$$d_g = d\varepsilon_v/d\varepsilon_s \tag{3}$$

式中: $d\varepsilon_v$ 为体积应变增量; $d\varepsilon_s$ 为剪应变增量。

材料弹性体积应变满足以下关系:

$$d\varepsilon_{v,e} = \frac{dp}{K} \tag{4}$$

式中 K 为体积模量。

2 试验方法

试验设备为南京水利科学研究所土工试验室的 TYD-1500 型静、动力三轴试验机。参照 SL237—1999《土工试验规程》,胶凝砂砾石料大型三轴压缩试验、三轴等向加卸载试验以及三轴轴向加卸载试验全部在该试验仪器上完成。

依据 SL678—2014《胶凝颗粒料筑坝技术导则》,CSG 的胶凝剂采用海螺牌 P. C. 32.5 普通硅酸盐水泥,水胶比取 1.0,细骨料为南京市市场出售的中粗砂,粗骨料为南京市郊区的破碎石料。用于三轴试验的胶凝砂砾石料中砂占 20%,石料占 80%,砂砾石料级配如图 1 所示,

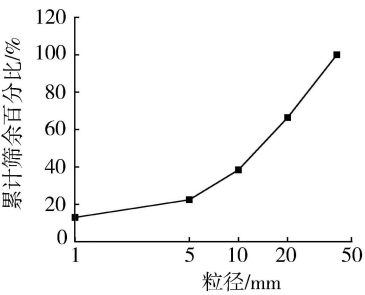


图 1 骨料级配曲线

Fig. 1 Grading curve of aggregates

骨料干密度为 $2\,130\text{ kg/m}^3$ 。

CSG 三轴试验试件采用直径 300 mm 、高 700 mm 的模具制成,制备过程为:①依据骨料级配要求筛选骨料;②按 CSG 的材料组分掺量将胶凝剂、粗细骨料及水等材料混合并拌和均匀(图 2(a));③将 CSG 分 5 层装入圆筒模具,每层分别采用振动碾振实,使试件成形(图 2(b));④成形试件进行 28 d 养护。



图 2 CSG 拌和料与成型试件

Fig.2 Mixing material and formed specimen of the CSG material

CSG 三轴压缩试验将试件分为 4 组,在围压 300 kPa 、 600 kPa 、 900 kPa 与 $1\,200\text{ kPa}$ 下饱和固结,完成后进行三轴固结排水剪切,轴应变到 15% 或试样完全破坏时停止试验。

在三轴轴向卸载-再加载试验过程中,试件用橡皮膜套住并吊装至试验仪器,注水使之充分饱和和后施加围压。首先进行常规三轴固结排水剪切试验,当加载到设定的应力水平后,稳定 2 min ,开始卸载,将轴向应力卸载至 0 kPa ,稳定 2 min ,进行再加载试验。试验中卸载的应力水平分别设定为 0.25 、 0.65 、 0.8 。整个试验过程的应力卸载-再加载速率为 1 mm/min ,整个试验过程中进行 $2\sim 3$ 次加卸载操作。

CSG 三轴等向加卸载试验是试件达到设定的养护时间后,用橡皮膜套住,吊装至三轴试验仪上,采用静水头法对试件进行饱和,饱和后对其各向均施加 100 kPa 进行固结,之后继续各向加载至预定围压值,稳定 2 min ,卸载至 100 kPa ,再稳定 2 min ,继续加载至预定围压值,整个过程循环 3 次。预定围压值分别设定为 300 kPa 、 600 kPa 、 900 kPa 与 $1\,200\text{ kPa}$ 。循环完成后结束试验。

3 试验结果与分析

3.1 三轴压缩试验与三轴轴向加卸载试验

图 3 为 CSG 三轴压缩试验与三轴轴向加卸载试验应力-应变曲线。图 3 说明 CSG 在加卸载过程中同时存在弹性和塑性应变,卸载之后再加载,其应力-应变曲线出现滞回圈。低围压或低掺量条件下,CSG 在加卸载试验和压缩试验中应力-应变曲线差异较大,相同剪应力下,加卸载试验中轴向应变更小。弹性变形在 CSG 加卸载试验中的影响大于弹性变形在其他岩土材料中的影响^[20],这是 CSG 区别于其他岩土材料的重要特征。

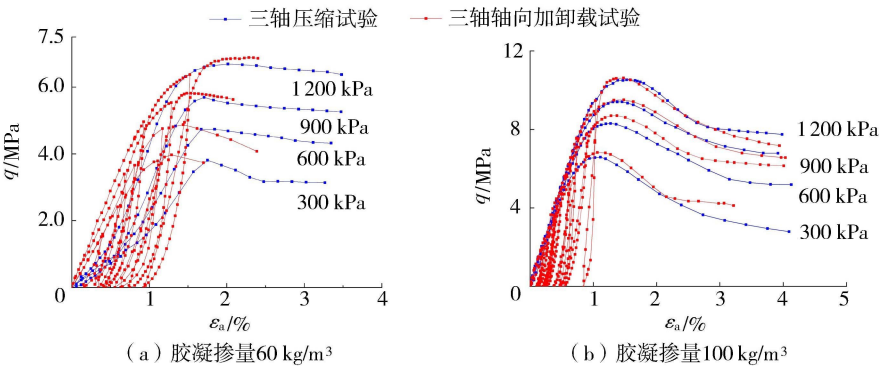


图 3 CSG 三轴试验应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve from triaxial tests of CSG

张伏光等^[21]对与 CSG 有类似性质的胶结砂土开展室内试验、数值模拟及理论分析,结果表明:胶结砂土试样的力学特性主要源于试样内强接触点处颗粒间的相互作用。据此推测,可能是加卸载过程中 CSG 颗

粒接触特征与其他岩土材料不同,使得接触力分布与其他岩土材料有明显差异,导致剪切过程中出现与其他岩土材料不同的性质。

对比可知,加卸载过程中的剪应力变化对 CSG 轴向应变影响较大,Lai 等^[22]提出可以通过三轴轴向加卸载试验求得弹性剪应变。设滞回圈曲线割线斜率为 Γ ,由于同围压下滞回圈的形状相似,可以认为同围压下 CSG 的 Γ 相同,材料弹性剪应变满足以下关系:

$$dq = \Gamma d\varepsilon_{s,e}$$

(5)

两种掺量的 CSG 在不同围压下的弹性剪切模量见表 1。

3.2 三轴等向加卸载试验

图 4 为 CSG 三轴等向加卸载试验曲线。由图 4 可知,与三轴轴向加卸载试验一样,在三轴等向加卸载试验中存在弹性后效,在卸载再加载后形成滞回圈。随着卸载点应力的增加,形成的滞回圈面积逐渐增大而形状相似,说明 CSG 卸载曲线割线斜率与受力状态关系较小。由此可知,CSG 这类弱胶凝材料在剪胀过程中的弹性变形特征不应被忽视,在构建剪胀方程时,应去除弹性变形产生的影响。

表 1 CSG 弹性剪切模量

Table 1 Elastic shear modulus of CSG

围压/kPa	弹性剪切模量/MPa	
	胶凝掺量 60 kg/m ³	胶凝掺量 100 kg/m ³
300	7 63. 206 7	1 932. 466 7
600	9 62. 592 0	2 004. 499 9
900	1 067. 105 0	2 700. 681 1
1 200	1 098. 291 2	4 096. 306 1

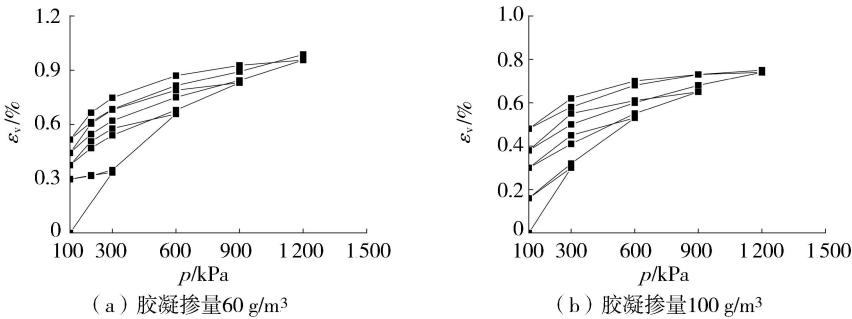


图 4 CSG 三轴等向加卸载试验曲线

Fig. 4 Test curves in isotropic loading and unloading triaxial tests of CSG

图 5 为胶凝掺量 60 kg/m³ 和 100 kg/m³ 的 CSG 体积应变 ε_v 与 $\ln(1+p/P_a)$ 的关系曲线,图中红色虚线为滞回圈曲线对角点连线。弹性体积应变 $\varepsilon_{v,e}$ 为回弹部分的体积应变,与 $\ln(1+p/P_a)$ 的关系可表示为

$$k_t = \frac{d\varepsilon_{v,e}}{d\ln(1 + p/P_a)}$$

(6)

式中: k_t 为滞回圈曲线对角值连线斜率; P_a 为大气压。

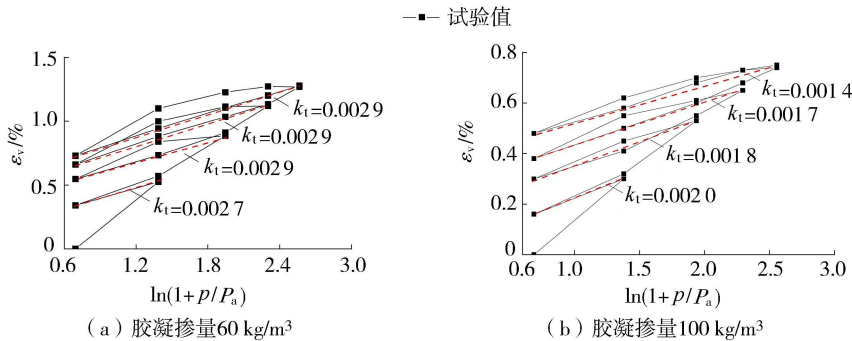


图 5 体积应变与平均应力的关系

Fig. 5 Relationship between volumetric strain and average stress

3.3 弹性应变对胶凝料应变的影响

图 6 和图 7 分别为胶凝掺量 60 kg/m³、100 kg/m³ 时 CSG 在围压 300 kPa、600 kPa、900 kPa 及 1 200 kPa 下的三轴压缩试验 $\varepsilon_{v,p}$ - $\varepsilon_{s,p}$ 、 ε_v - ε_s 关系曲线。

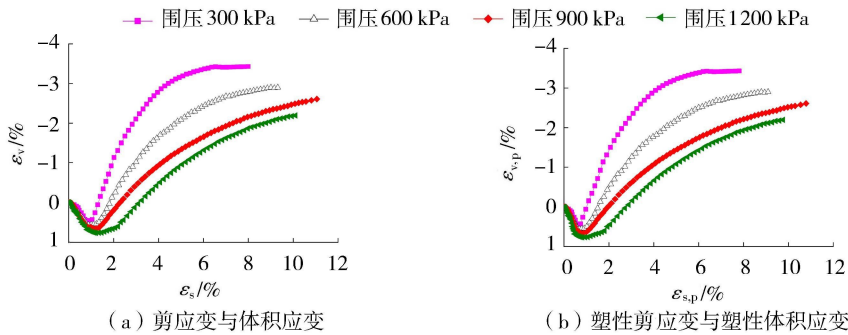


图 6 胶凝掺量 60 kg/m³ 剪应变和体积应变关系

Fig. 6 Relationship between volumetric strain and shear strain of CSG with mixing content of 60 kg/m³

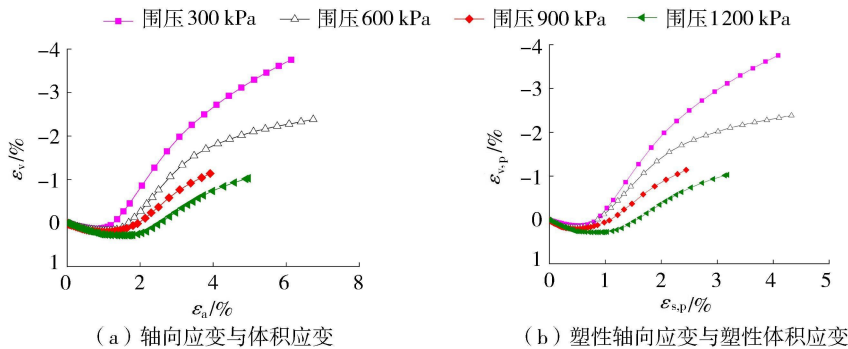


图 7 胶凝掺量 100 kg/m³ 剪应变和体积应变关系

Fig. 7 Relationship between volumetric strain and shear strain of CSG with mixing content of 100 kg/m³

由图 6 和图 7 可知,随着轴向应变量的增加,CSG 有剪缩向剪胀过渡的趋势,两种掺量的 CSG 在各围压下应变变化趋势相似,但塑性体积应变变化范围明显小于 CSG 总体积应变变化范围, $\varepsilon_{v,p}-\varepsilon_{s,p}$ 关系曲线加载阶段斜率大于 $\varepsilon_v-\varepsilon_s$ 关系曲线加载阶段斜率,说明 CSG 在压缩过程中弹性变形特征不应被忽视。

3.4 弹性应变对剪胀特性的影响

定义总体积应变增量与总剪应变增量的比值为 d_{g1} ,塑性体积应变增量与塑性剪应变增量的比值为 d_{g2} ,即

$$d_{g1} = d\varepsilon_v / d\varepsilon_s \tag{7}$$

$$d_{g2} = d\varepsilon_{v,p} / d\varepsilon_{s,p} \tag{8}$$

定义 $\Delta d_g = |d_{g1} - d_{g2}|$ 。根据式(1)~(8)可以做出不同围压下 d_{g1} 和 d_{g2} 与应力比 η 的函数曲线,如图 8、图 9 所示(计算时,舍弃回弹数据点和比值重合数据点)。

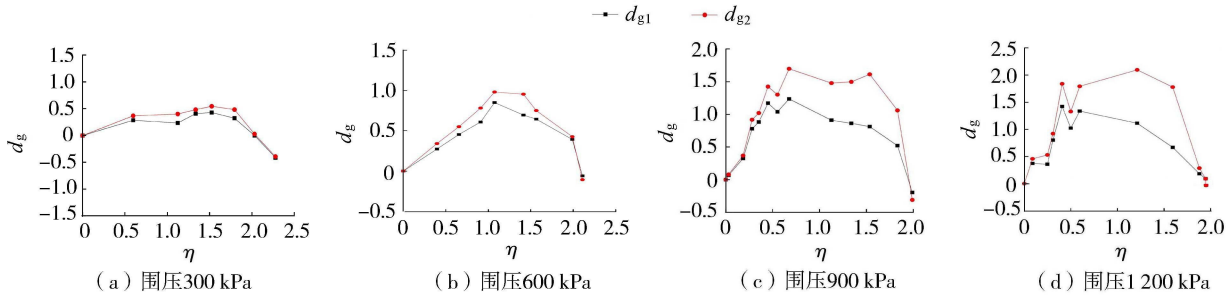


图 8 胶凝掺量 60 kg/m³ 的 CSG 剪胀比

Fig. 8 Dilatancy ratio of CSG with mixing content of 60 kg/m³

由图 8 可知,对于胶凝掺量 60 kg/m³ 的 CSG,弹性应变对体积应变增量与剪应变增量比值的影响十分显著,弹性应变使得 d_{g1} 小于 d_{g2} ,低围压下 Δd_g 较小,总体随围压增大呈增大趋势。这是因为该掺量下围压主要通过影响弹性剪应变来影响 Δd_g ,围压增大相同的数值,弹性剪应变增量比弹性体积应变增量更多,导致

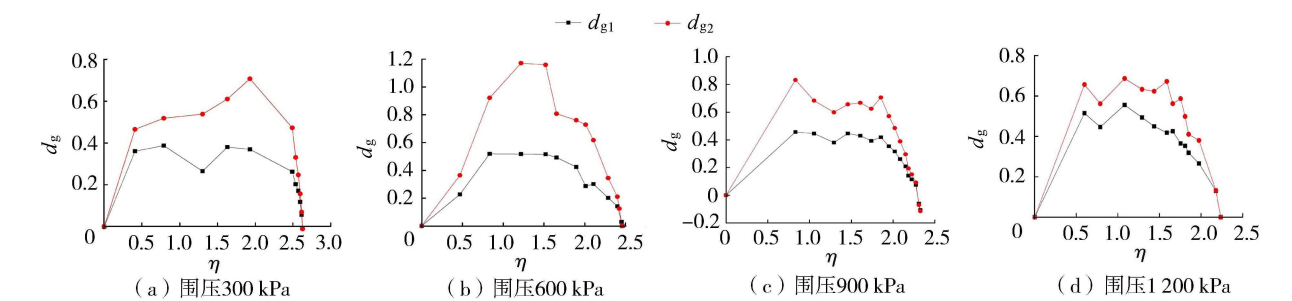


图 9 胶凝掺量 100 kg/m³ 的 CSG 剪胀比

Fig. 9 Dilatancy ratio of CSG with mixing content of 100 kg/m³

Δd_g 分子增大更多,总体增大。同一围压下 Δd_g 随着应力比增大先增大后减小。

由于 d_{g1} 剪缩面积小于 d_{g2} ,构建剪胀公式时按照 d_{g1} 计算可能导致对剪缩的估计小于实际值,从而高估胶凝材料的硬度。围压越大,估计偏差越大。

由图 9 可知,对于胶凝掺量 100 kg/m³ 的 CSG,弹性应变使得 d_{g1} 小于 d_{g2} ,其影响随着围压的增大先增大后减小。在相同的围压下, Δd_g 随着应力比增大呈先增大后减小的趋势。在 100 kg/m³ 掺量、900 kPa 以上围压的高掺量、高围压、大应力条件下,弹性应变对剪胀特性的影响较小。

对于高掺量胶凝材料,围压较低时,估计偏差较大。胶凝掺量分别为 60 kg/m³ 和 100 kg/m³ 时 CSG 的 Δd_g 及其占 d_{g2} 的比例统计见表 2,其中 $(\Delta d_g)_{\max}$ 为 Δd_g 最大值。

表 2 不同胶凝掺量的 CSG 剪胀比差值统计						
Table 2 Statistics of dilatancy ratio difference of CSG with different mixing contents						
围压/kPa	$(\Delta d_g)_{\max}$ 时的应力比		$(\Delta d_g)_{\max}$		$(\Delta d_g)_{\max}$ 占 d_{g2} 比例/%	
	胶凝掺量 60 kg/m³	胶凝掺量 100 kg/m³	胶凝掺量 60 kg/m³	胶凝掺量 100 kg/m³	胶凝掺量 60 kg/m³	胶凝掺量 100 kg/m³
300	1.123 9	2.317	0.166 9	0.379	41.58	57.74
600	1.564	1.218	0.306	0.655	32.24	55.84
900	1.535	1.853	0.800	0.287	49.64	40.64
1200	1.593	1.588	1.110	0.254	62.48	37.78

4 剪胀方程及其物理意义

4.1 剪胀方程

通过对试验数据的观察,采用方程简单、参数物理意义明确的二次函数对 CSG 剪胀方程进行拟合:

$$\frac{d\varepsilon_{v,p}}{d\varepsilon_{s,p}} = a \left(\frac{q}{p} \right)^2 + b \frac{q}{p}$$
(9)

式中 a 、 b 为拟合参数,选取拟合特征点为原点、纵坐标顶点、剪胀剪缩转折点。拟合结果如图 10 和图 11 所示。

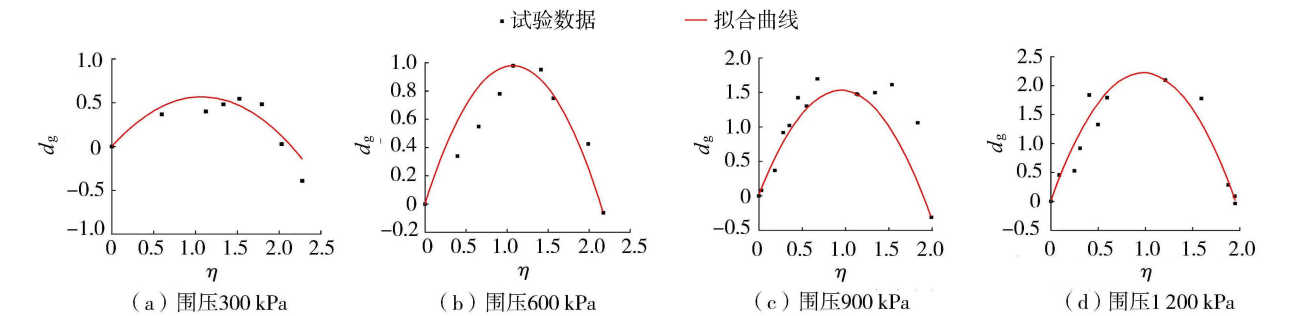


图 10 胶凝掺量 60 kg/m³ 的 CSG 剪胀比拟合

Fig. 10 Fitted curve of dilatancy ratio of CSG with mixing content of 60 kg/m³

由图 10 和图 11 可知,式(9)对掺量 60 kg/m³ 的中掺量、高围压和 100 kg/m³ 的高掺量、高围压工况拟合效

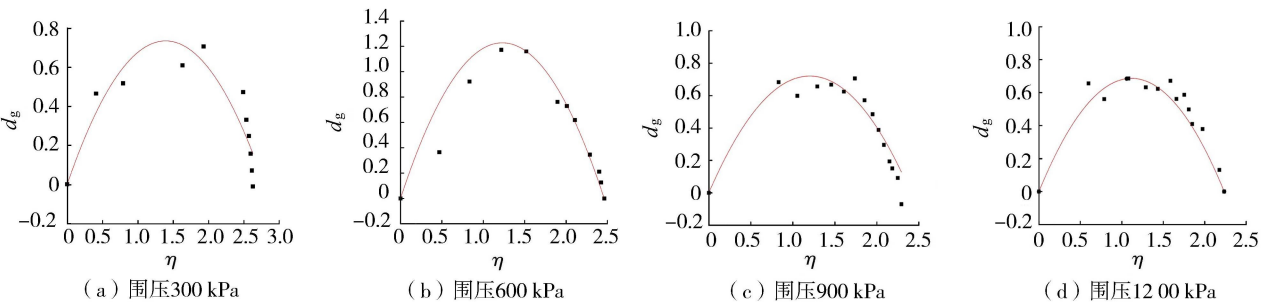


图 11 胶凝掺量 100 kg/m³ 的 CSG 剪胀比拟合

Fig. 11 Fitted curve of dilatancy ratio of CSG with mixing content of 100 kg/m³

果都比较好,中掺量、低围压下拟合效果一般,但拟合优度 R^2 仍可达到 0.9 以上。拟合参数及相关系数见表 3。

4.2 参数的物理意义

由剪胀方程物理意义可知,其曲线非原点零点为剪胀剪缩转折点处的应力比,对称轴横坐标为剪缩体积应变最大处应力比,数学表达式为

$$a(\eta_d)^2 + b\eta_d = 0 \tag{10}$$

$$-\frac{b}{2a} = \eta_f \tag{11}$$

式中: η_d 为剪胀剪缩转折点处应力比; η_f 为剪缩体积增加率最大处应力比。式(10)(11)联立可以求得 a 、 b 。

5 结 论

- a. 掺量 60 kg/m³ 和 100 kg/m³ 的胶凝砂砾石料都表现出软化特征,围压越大,残余应力越大;胶凝砂砾石料在低围压下具有剪胀性,高围压下表现为剪缩性。胶凝砂砾石料为典型弹塑性材料,在等向加卸载试验中应力-应变曲线形成明显滞回圈,其面积随应力增大而增大;滞回圈形状相似,表明胶凝砂砾石料卸载曲线割线斜率与受力状态关系较小,可以用于计算弹性应变影响。
- b. 在构建胶凝砂砾石料剪胀模型时,胶凝砂砾石料的弹性应变和塑性应变都不应被忽视。弹性应变会使得 d_{g1} 剪缩区域面积小于 d_{g2} ,导致计算时高估材料强度。胶凝掺量为 60 kg/m³ 时,弹性应变对剪胀比的影响随围压的增大先减小后增大;胶凝掺量为 100 kg/m³ 时,弹性应变对剪胀特性的影响随围压增大而减小。
- c. 可以用二次函数对胶凝砂砾石料剪胀方程进行拟合,拟合效果较好,所构建剪胀方程参数物理意义明确。

参考文献:

[1] 蔡新,郭兴文,杨杰,等. 胶凝砂砾石坝坝料力学性能与结构设计[M]. 北京:科学出版社,2021:1-2.

[2] 曹学兴,何蕴龙,迟福东,等. 高土石坝 Hardfill 新型抗震加固措施[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):340-346. (CAO Xuexing,HE Yunlong,CHI Fudong,et al. A new type aseismic reinforcement measures of high earth and rockfill dam using Hardfill[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(4):340-346. (in Chinese))

[3] 冯炜. 胶凝砂砾石坝筑坝材料特性研究与工程应用[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2013:49-80.

[4] 杨世锋,柴启辉,孙明权. 胶凝材料对胶凝砂砾石材料抗压强度的影响[J]. 人民黄河,2016,38(7):92-94. (YANG Shifeng,CHAI Qihui,SUN Mingquan. Study on the effect of the amount of cementitious materials on the compressive strength of CSG material[J]. Yellow River,2016,38(7):92-94. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 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))

表 3 不同胶凝掺量的 CSG 剪胀方程拟合参数

Table 3 Fitting parameters of dilatancy equation of CSG with different mixing contents

围压/kPa	胶凝掺量 60 kg/m ³		胶凝掺量 100 kg/m ³	
	a	b	a	b
300	-1.29	2.76	-0.52	1.36
600	-0.85	1.82	-0.81	1.99
900	-1.70	3.23	-0.50	1.20
1200	-2.32	4.55	-0.55	1.23

- [7] 刘俊林,何蕴龙,熊堃,等. Hardfill 材料非线性弹性本构模型研究[J]. 水利学报,2013,44(4):451-461. (LIU Junlin, HE Yunlong, XIONG Kun, et al. Study on nonlinear elasticity constitutive model of Hardfill material[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4):451-461. (in Chinese))
- [8] ROWE P W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1962, 269:500-527.
- [9] NOVA R, WOOD D M. A constitutive model for sand in triaxial compression[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1979, 3(3):255-278.
- [10] 贺林林,冯楚杰,杨柳,等. 颗粒排列角度对砂土剪切特性的影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5):447-454. (HE Linlin, FENG Chujie, YANG Liu, et al. Experimental study of influence of particle arrangement angle on shear properties of sand[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(5):447-454. (in Chinese))
- [11] 郭万里,蔡正银,武颖利,等. 粗粒土的颗粒破碎耗能及剪胀方程研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12):4703-4710. (GUO Wanli, CAI Zhengyin, WU Yingli, et al. Study on the particle breakage energy and dilatancy of coarse-grained soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12):4703-4710. (in Chinese))
- [12] 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 Wanli, ZHU Jungao, PENG Wenming. Dilatancy equation and generalized plastic constitutive model for coarse-grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(6):1103-1110. (in Chinese))
- [13] 何忠明,黄超,刘雅欣,等. 粗粒土路堤填料力学特性及其细观模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(4):1116-1124. (HE Zhongming, HUANG Chao, LIU Yaxin, et al. Study on mechanical properties and mesoscopic simulation of coarse-grained soil subgrade[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2020, 51(4):1116-1124. (in Chinese))
- [14] 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 Zhanjun, CHEN Shengshui, FU Zhongzhi. Dilatancy behaviors and generalized plasticity constitutive model of rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7):1931-1938(in Chinese))
- [15] 刘萌成,高玉峰,刘汉龙. 堆石料剪胀特性大型三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2):205-211. (LIU Mengcheng, GAO Yufeng, LIU Hanlong. Study on shear dilatancy behaviors of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2):205-211. (in Chinese))
- [16] 褚福永,朱俊高,殷建华. 基于大三轴试验的粗粒土剪胀性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8):2249-2254. (CHU Fuyong, ZHU Jungao, YIN Jianhua. Study of dilatancy behaviors of coarse-grained soils in large-scale triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8):2249-2254. (in Chinese))
- [17] 姜景山,程展林,左永振,等. 粗粒土剪胀性大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11):3129-3138. (JIANG Jingshan, CHENG Zhanlin, ZUO Yongzhen, et al. Dilatancy of coarse-grained soil in large-scale triaxial tests study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11):3129-3138. (in Chinese))
- [18] 魏国民,陈生水,李国英,等. 基于状态参数的筑坝粗粒土本构模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4):654-661. (WEI Kuangmin, CHEN Shengshui, LI Guoying, et al. Constitutive model for coarse-grained dam materials considering state parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4):654-661. (in Chinese))
- [19] 魏浩,沈超敏,刘斯宏,等. 考虑级配影响的粗粒料压缩破碎特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2):182-188. (WEI Hao, SHEN Chaomin, LIU Sihong, et al. Experimental study on compression and crushing characteristics of coarse granular materials considering influence of gradations[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(2):182-188. (in Chinese))
- [20] 朱晟,卢知是. 考虑级配空间随机特性的堆石坝变形应力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6):543-549. (ZHU Sheng, LU Zhishi. Deformation and stress analysis of rockfill dams considering spatial randomness of gradation parameter[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(6):543-549. (in Chinese))
- [21] 张伏光,蒋明镜. 胶结砂土强度特性的真三轴试验离散元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6):1530-1539. (ZHANG Fuguang, JIANG Mingjing. Analysis of the strength behaviour of cemented sands in true triaxial test with distinct element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 37(6):1530-1539. (in Chinese))
- [22] LAI Yuanming, XU Xiangtian, YU Wenbing, et al. An experimental investigation of the mechanical behavior and a hyperplastic constitutive model of frozen loess[J]. International Journal of Engineering Science, 2014, 84:29-53.