

宋 杨,孙宏渊,王清洲,等. 间断级配土石混合料力学特性试验和本构模型[J]. 长安大学学报(自然科学版),2023,43(2):35-44.

SONG Yang,SUN Hong-yuan,WANG Qing-zhou,et al. Mechanical properties test and constitutive model of discontinuous graded soil-rock mixture[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2023,43(2):35-44.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.02.004

间断级配土石混合料力学特性试验和本构模型

宋 杨^{1,2,3},孙宏渊¹,王清洲⁴,孙文君^{2,3},王 磊²,张志彬²

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院,河北 张家口 075031; 2. 河北水利电力学院 交通工程系,河北 沧州 061001;

3. 河北水利电力学院 河北省岩土工程安全与变形控制重点实验室,河北 沧州 061001;

4. 河北工业大学 土木与交通学院,天津 300401)

摘 要:为研究山区筑路填料中常见的间断级配土石混合料的力学特性,采用 SZ30-40DA 大型三轴试验仪对间断级配土石混合料进行三轴剪切试验,分析了不同含石量和围压对间断级配土石混合料的应力-应变关系、抗剪强度参数、刚度、孔压、内摩擦角以及黏聚力的影响,并结合邓肯-张模型和幂律模型对间断级配土石混合料的适用性进行分析。结果表明:不同含石量下土石混合料的应力-应变曲线均呈现出应变硬化特征,无应变软化特征;当含石量较低时,应力-应变呈现出一条平滑的曲线,随着含石量增加,应力-应变曲线呈现出明显的“跳跃”现象;土石混合料的抗剪强度随含石量和围压的增加而增大;不同含石量混和料在剪切过程中,粗颗粒表现出不同的破碎程度,含石量增加破碎率增大;内摩擦角随含石量的增加而增大,而黏聚力随含石量的增加而减小,含石量(质量分数,下同)为 70% 时,内摩擦角达到最大,黏聚力最小;刚度在前期软化现象明显,随着含石量的增加,土体表现出一定的骨架作用,抵抗变形的能力增强;孔压受轴向应变和围压影响较大,随轴向应变的增大先增大后减小,随围压的增大而增大;邓肯-张模型在应用于间断级配土石混合料时存在一定的差距,而幂律模型的拟合度较邓肯-张模型更优,能更好反映间断级配下土石混合料的应变硬化特征。

关键词:道路工程;土石混合料;大型三轴试验;含石量;抗剪强度;本构模型

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2023)02-0035-10

Mechanical properties test and constitutive model of discontinuous graded soil-rock mixture

SONG Yang^{1,2,3}, SUN Hong-yuan¹, WANG Qing-zhou⁴, SUN Wen-jun^{2,3},

WANG Lei², ZHANG Zhi-bin²

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075031, Hebei, China;

2. College of Traffic Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, Hebei, China; 3. Hebei Key Laboratory of Geotechnical Engineering Safety and Deformation Control,

Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, Hebei, China;

4. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

收稿日期:2022-09-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51978237);河北省自然科学基金项目(E2018412002);河北省人才工程项目(A202101027);

河北省高等学校科研项目(ZD2021068);河北省大学生科技创新能力培育专项项目

作者简介:宋 杨(1982-),男,河北沧州人,教授,工学博士,E-mail:songyang@hbwe.edu.cn.

通讯作者:王清洲(1979-),男,河北沧州人,副教授,工学博士,E-mail:2006126@hebut.edu.cn.

Abstract: In order to study the mechanical properties of discontinuous graded soil-rock mixture commonly used in mountain road construction, the triaxial shear test of discontinuous graded soil-rock mixture was carried out by using SZ30-40DA large triaxial tester, the effects of different stone contents and confining pressure on the stress-strain relationship, shear strength parameters, stiffness, pore pressure, internal friction angle and cohesion of discontinuous graded soil-rock mixture were analyzed, and the applicability of discontinuous graded soil-rock mixture was analyzed by combining Duncan-Chang model and power law model. The results show that the stress-strain curves of soil-rock mixture show strain hardening characteristics and no strain softening characteristics under different stone contents. When the stone content is low, the stress-strain curve presents a smooth curve, and with the increase of the stone content, the stress-strain curve presents an obvious jump phenomenon. The shear strength of soil-rock mixture increases with the increase of stone content and confining pressure. In the shear process with different stone contents, coarse particles show different crushing degree, and the crushing rate increases with the increase of stone content. The internal friction angle increases with the increase of stone content, while the cohesion decreases with the increase of stone content. When the stone content is 70%, the internal friction angle reaches the maximum and the cohesion is the minimum. The stiffness softening phenomenon is obvious in the early stage. With the increase of stone content, the soil shows a certain skeletonization effect and the ability to resist deformation is enhanced. The pore pressure is greatly affected by axial strain and confining pressure, and increases first and then decreases with the increase of axial strain, and increases with the increase of confining pressure. Duncan-Chang model has a certain gap in the application of discontinuous gradation of soil-rock mixture, while the fitting degree of power law model is better than Duncan-Chang model, which can better reflect the strain hardening characteristics of soil-rock mixture under discontinuous gradation. 3 tabs, 11 figs, 26 refs.

Key words: road engineering; soil-rock mixture; large-scale triaxial test; stone content; shear strength; constitutive model

0 引言

土石混合料广泛分布于自然界中,具有较高强度和抵抗变形的能力,因此被广泛应用于公路、铁路和水利工程建设中^[1]。在山区公路工程建设过程中,经常会遇到间断级配土石混合料,将其用于路基填筑可以达到就地取材和节能环保的目的,也符合中国对“绿色交通”和“双碳”的要求。但是间断级配土石混合料结构成分复杂、力学特性变异大,在用于路基填筑时,土石混填路基强度和变形特性是影响工程稳定性的关键问题。因此,开展间断级配土石混合料力学特性试验研究,并分析本构模型适用性对工程具有实际意义。

由于粗颗粒的存在,土石混合料的力学特性与细粒土和无黏性的堆石料有本质上的差异,国内外

学者从不同角度对土石混合料展开了大量的试验研究,并取得了一定的成果。含石量是影响土石混填路基的重要因素,不同的含石量配比会使土体产生不同的强度特性。徐俊等对砂泥岩类填料的力学性质进行研究,结果发现当粗颗粒含量增大到 60% 时,粗颗粒开始表现出一定的骨架作用,形成骨架空隙结构^[2]。周志军等对土石混合料的路用特性进行研究发现,当粗颗粒含量小于 70% 时,随着粗颗粒含量的增加,土石混合料的无侧限抗压强度和回弹模量增加^[3-4]。Indraratna 等采用大型三轴试验对土石混合体的剪切特性进行研究,认为剪切强度和内摩擦角的大小是颗粒尺寸分布的函数^[5]。刘龙旗等对坡积体路基填料进行了直剪试验,发现低含水率时试样的剪切“跳跃”现象发生在前期,高含水率时则发生在后期^[6]。Liu 等对高围压条件下土石混

合体进行大型三轴剪切试验时,分析了剪切强度及颗粒破碎程度与围压的关系,认为在高围压下,剪胀现象不再出现^[7]。然而,上述试验研究所制备的试样均未考虑间断级配土石混合料的结构性特征,间断级配与连续级配土石混合料的力学特性可能存在一定的差异。

间断级配土石混合料是级配中缺少一个或多个粒径而形成的一种特殊散体材料,其易离析和稳定性差的特点往往导致工程质量无法保证。一些学者对间断级配土石混合料的渗透性开展了研究^[8-9],而对间断级配土石混合料的强度特性研究较少。黄鑫等分析级配对粗粒土抗剪强度和变形的影响,研究发现有效粒径、中值粒径和限制粒径相差不大时,结构性好、抗剪强度高^[10]。陈爱军研究了颗粒级配对粗粒土强度和变形特性的影响,结果表明级配合理的土石混合料相较于细粒土具有更好的路用性能^[11]。薛亚东等对间断级配砂砾混合物进行了直剪试验,发现砂砾混合物的应变硬化程度随砾石含量的增加而增加,且应力-应变曲线随含石量的增加出现不同程度的跳跃现象^[12]。Xiao等亦从不同角度探讨了间断级配砂土的力学特性^[13-14]。徐刚敏等研究了间断级配珊瑚砂砾混合料力学特性,并分析珊瑚砂砾混合料颗粒破碎的演化规律,发现了剪切过程中不同含砾量条件下珊瑚砂砾混合料的塑性功与相对破碎指数的关联性^[15]。上述研究成果虽然具有一定的借鉴意义,但仍需深入探究影响间断级配土石混合料力学特性的因素,为其在路基中的合理利用提供理论依据。

本构模型是岩土工程领域关注的焦点之一,邓肯-张模型因简单实用,参数可直接从三轴试验中读取,而被广泛应用于工程实际中,部分学者基于粗粒土力学特性变化规律对邓肯-张模型进行了研究。石熊等对素土和复合砾开展了三轴剪切试验,结果表明应用邓肯-张模型不能很好反映粗粒土填料的变形特性,修正后的邓肯-张模型能更合理地描述粗粒土填料的体积应变特性^[16]。刘江波等针对邓肯-张模型不能反映压实土在低围压下的应力-应变曲线问题,对模型进行了改进,发现改进模型显著提高了模型预测精度,适用于压实填料^[17]。何忠明等研究动力及含水率变化对路堤粗粒土填料力学特性的影响,证明了改进模型能有效预测粗粒土路堤填料在不同动力及湿化条件下的应力-应变曲线^[18]。一些学者从粗粒土颗粒破碎的角度出发,对其模型进行修正,李雪梅等发现邓肯-张模型无法适用堆石

料在剪切中软化和剪胀特性,通过引入破损指标,将颗粒破碎程度与材料强度和变形联系起来,证明了修正邓肯-张模型适用于堆石料颗粒破碎特性^[19]。Kong等研究了粗粒土初始特性,提出了考虑颗粒破碎的双曲面弹塑性模型^[20]。郭万里等建立了一个可以反映粗粒土在剪切过程中颗粒破碎的数学模型,该模型能很好预测破碎指标,还能预测土体级配曲线的演化^[21]。侯伟亚等用4种堆石料的三轴试验结果分析了邓肯-张模型的适用性,研究发现邓肯-张模型的两点法可使模型预测结果与试验结果之间的误差减小^[22]。土石混合料由于其复杂的结构组成,尚无统一的本构模型能完整反映其应力-应变特性,而对间断级配下土石混合料本构模型的研究十分重要。

土石混填路基的级配范围分布极为广泛,受天然地质条件影响,很多山区公路工程会遇到间断级配土石混合料。在以往的研究中,大多基于连续级配下土石混合料力学特性随含石量、含水率、岩性及颗粒形状的变化规律,但对间断级配条件下的强度、变形和剪胀特性研究较少。本文针对间断级配土石混合料,开展不同含石量和围压条件下的大型三轴不排水剪切试验,分析了间断级配土石混合料的应力-应变特性、抗剪强度参数、刚度及孔压的变化规律和影响因素,并结合邓肯-张模型和幂律模型对间断级配土石混合料的适用性进行分析。

1 试验仪器和材料

1.1 试验仪器

本次试验采用SZ30-4DA大型静三轴试验机,试验机主要由油源泵站系统、轴向加载系统、围压控制系统、反压控制系统、孔隙压力和体积变化测量系统等组成,最大荷载1500 kN,最大围压4 MPa,试件尺寸300 mm(直径)×600 mm(高度),如图1所示。所有的数据都是由试验机采集系统自动采集,直接通过电脑显示器读取。

1.2 试验材料

试样中的细集料采用某基坑工程开挖后的黄黏土,粗集料为玄武岩,棱角分明,岩质较硬,选取10~20 mm和20~40 mm两种粒径,按照4:1进行混合。土与石分别按照3:7、5:5、7:3进行配比形成土石混合料,如图2所示。根据土石混合料的粒径界限划分标准,一般多采用5 mm进行划分。为了与已有的试验结果形成对比,本文采用5 mm粒



图 1 大型三轴试验

Fig. 1 Large triaxial test

径界限阈值,得出 3 种含石量土石混合料的级配曲线如图 3 所示。

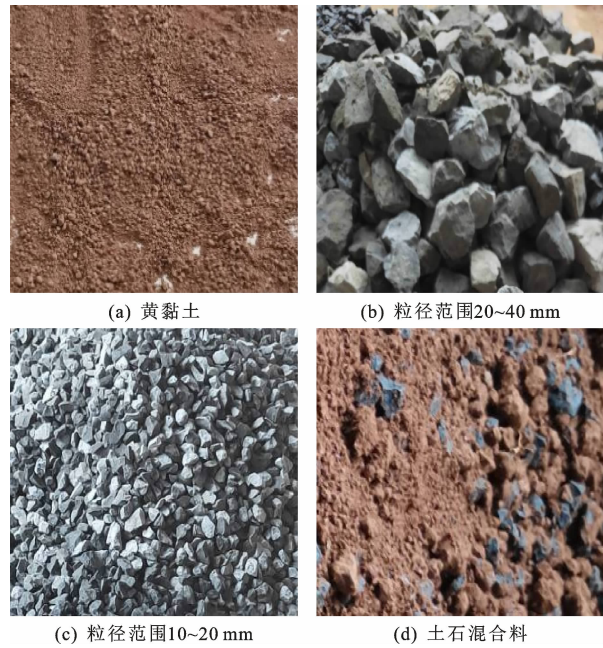


图 2 土石混合料的组成材料

Fig. 2 Composition materials of soil-rock mixture

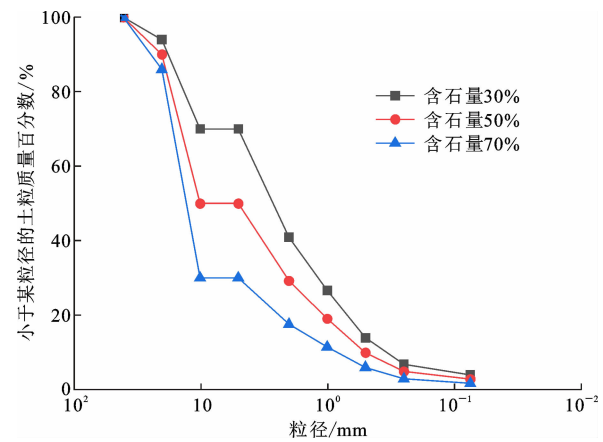


图 3 不同含石量下土石混合料的级配曲线

Fig. 3 Gradation curves of soil-rock mixture with different stone contents

对 3 种含石量的土石混合料进行击实,得出最优含水率和最大干密度,如表 1 所示,根据图 3 中的级配曲线分别算出不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c ,结果如表 1 所示,根据 $C_u > 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件,发现 C_u 值较大, C_c 值较小,说明粗颗粒与细颗粒之间粒径相差较大,中间粒径较少,试验用料多不均匀且不连续,粗颗粒与细颗粒之间的空隙很难由中间粒径颗粒填充。

表 1 不同含石量下土石混合料的粒径分布特征指标

Tab. 1 Particle size distribution characteristics of soil-rock mixture under different stone contents

含石量/%	曲率系数 C_c	不均匀 系数 C_u	最优含水 率/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
30	1.06	11.03	12.00	1.92
50	0.71	25.00	10.20	2.03
70	1.87	17.66	6.50	2.07

2 试验过程

2.1 试样制备

试样制作严格按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)的规定进行制样,将土和石按图 3 级配曲线配置好,进行充分的搅拌后开始装样,分 5 层装填试样,采用击实制样,并将压实度控制在 95%。为避免在制样过程中带有棱角的大颗粒砾石将橡胶膜刺破,在橡胶膜的内侧加一层厚度约 2 mm 的 PVC 膜。

2.2 试验方案

本文共开展了 9 组土石混合料的大型三轴试验,分析了含石量 30%、50%、70%和围压 100、150、200 kPa 条件下土石混合料的力学特性。

考虑到暴雨极端天气和车辆荷载的瞬时特性,本文采取饱和试样和固结不排水(CU)试验方案。其中,饱和试样模拟路基填料因暴雨而浸水饱和的状态,CU 试验模拟车辆荷载快速通过路基时孔隙水压力无法及时排出的状态。此方案得到的试验参数对于工程实际更偏保守,有利于安全控制。

试验开始时,先给定试样一个初始围压,保证试样直立在压力室底座上,而且不会扰动或破坏试样。采用水头饱和法使试样饱和,控制饱和度达到 95%以上。开始固结不排水剪切试验,先将试样施加周围压力,并打开排水阀门,试样在围压作用下充分排水固结,当孔隙水压力接近于 0 且排水量趋于稳定时,视为固结已经完成。关闭排水阀门,控制剪切速

率为 1 mm/min,施加轴向力,使试样在不排水的条件下受剪破坏。

3 试验结果及分析

3.1 应力-应变曲线特征分析

3 组试样的应力-应变曲线如图 4 所示。可见,3 种含石量的应力-应变曲线均呈应变硬化特征,无明显的软化趋势,且均在轴向应变达到 15% 时达到峰值状态。在含石量相同时,围压越大,土石混合料的

抗剪强度越高,应力-应变曲线的硬化特征越明显,峰值强度也越大。这是因为围压越大,颗粒移动产生的约束力越大,达到应变破坏值时需要的轴向应力越大。反之,围压越小,颗粒移动产生的约束力越小,达到应变破坏值时需要的轴向应力越小。在围压相同条件下,随着含石量的增加,土石混合料的峰值强度也增大,抗剪强度也越大。这是因为含石量的增加,粗颗粒之间的接触变得更加密切,使颗粒之间的咬合力和摩阻力增加。

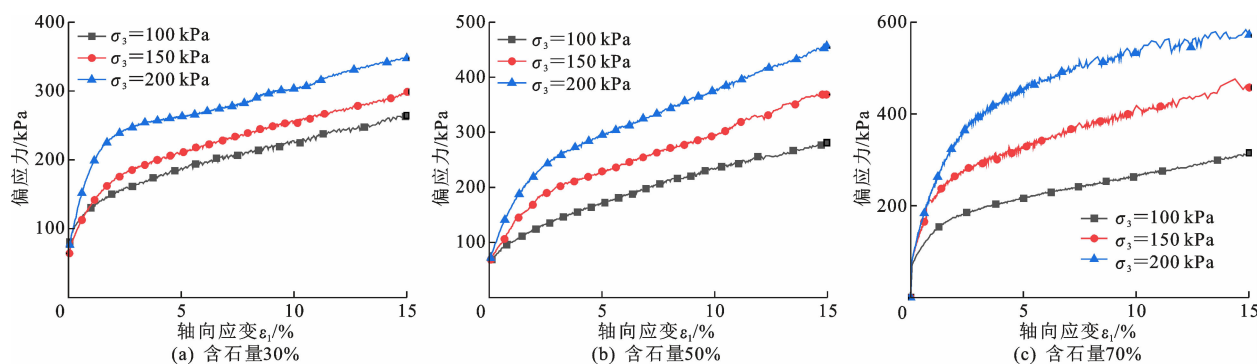


图 4 三种不同含石量下土石混合料的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of soil-rock mixture under three different stone contents

由图 4(c)发现,应力-应变曲线出现了“跳跃”现象,且围压 150 和 200 kPa 的 2 条曲线较为明显。当围压 150 kPa 时,“跳跃”现象出现在轴向应变达到 10% 时,在轴向应变后期发展过程中,内部粗颗粒因形状不规则发生应力集中,当局部集中应力超过块石的破坏强度时,产生颗粒破碎现象。粗颗粒发生破碎后,局部应力得到释放,总应力出现降低趋势,试样内部结构重新调整,形成新的结构体系,总应力上升,因此轴向应变后期出现“跳跃”现象。当围压 200 kPa 时,轴向应变从 7% 时开始出现明显的“跳跃”,说明粗颗粒在围压较大的情况下破碎的概率增加,且跳跃幅度更大。出现这种现象的主要原因是随着围压的增加,粗颗粒之间接触更加紧密,在轴向应变不断增加的情况下,粗颗粒之间很难发生翻转,导致颗粒破碎增加,该结论与文献[23]结论一致。图 4(a)、图 4(b)中应力-应变曲线较为平滑,无明显的“跳跃”现象,说明在含石量较低时,粗颗粒的含量较少,土石混合料表现为悬浮密实结构,大多数的粗颗粒被土颗粒所包围,使得粗颗粒之间的接触较少,颗粒之间在发生剪切时主要以挤密、翻转和填充为主,不易发生破碎。

对于间断级配土石混合料,由于缺少 5~10 mm 小粒径粗颗粒,导致在制样的过程中试样不利于压实,粗、细颗粒之间存在较多的空隙,当含石量

为 30% 时,绝大部分粗颗粒被细颗粒包裹,细颗粒主导混合料的骨架结构,粗颗粒之间难以形成有效的接触,当应力累计达到一定值时,部分颗粒仅产生小幅度的滑移,颗粒之间在咬合作用下产生的应变能迅速释放,嵌挤压力迅速消失,导致粗颗粒发生破碎的概率较小,甚至不发生破碎。在含石量达到 50% 时,土石混合料的骨架逐渐形成,粗颗粒之间的接触面积逐渐增大,咬合作用增加,但由于小粒径级配的缺失,其骨架架空作用相较于连续级配增加,孔隙率变得更大,粗颗粒棱角接触密切,当轴向力达到一定程度时,粗颗粒在产生一定的滑移后被迅速挤密,嵌挤压力无法快速消散,此时粗颗粒的棱角处无法抵御足够大的剪切强度,部分粗颗粒仅发生小范围的研磨破碎。在含石量达到 70% 时,骨架结构形成,压力主要由粗颗粒承担,粗颗粒彼此接触的机会增多,在外部荷载的作用下,粗颗粒迅速调整位置,局部很快形成较为稳定的支撑骨架结构,由于粒径缺失和骨架的支撑作用,内部空隙变得压密困难,伴随着轴向力的逐渐增大,粗颗粒之间发生较为强烈的应力集中,局部应力集中程度超过粗颗粒自身的强度,部分颗粒会被压碎成小颗粒。

图 5 为 3 种含石量下土石混合料的峰值强度随围压的变化曲线。可见,3 种含石量下土石混合料的峰值强度变化趋势相似,均随含石量的增加而增

加。当含石量为 30% 和 50% 时,峰值强度增加缓慢,此时的土石混合料由于粗颗粒被土颗粒所包裹,无法形成骨架密实结构,抗剪强度主要由土颗粒决定。而含石量达到 70% 时,峰值强度上升迅速,斜率增至最大,此时形成了骨架密实结构,抗剪强度主要由粗颗粒承担,当发生破坏时,粗颗粒起主导作用。

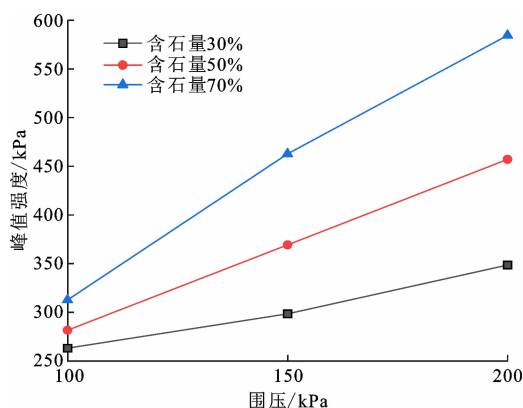


图 5 不同含石量下峰值强度随围压的变化

Fig. 5 Variations of shear strength with confining pressure under different stone contents

3.2 抗剪强度参数

根据前述应力-应变曲线分析,发现 3 种土石混合料均未出现明显的应力峰值,为持续的硬化型曲线。对于该种应力-应变关系,一般认为在轴向应变达到 15% 时试样发生了破坏,因此选取轴向应变 15% 时对应的偏应力作为破坏点来绘制摩尔圆和抗剪强度包线,以得到内摩擦角和黏聚力。如图 6 所示,以含石量为 70% 的土石混合料为例,分析了试样在达到峰值时的摩尔圆和抗剪强度包线,其中内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$,黏聚力 $c = 11.52$ kPa。

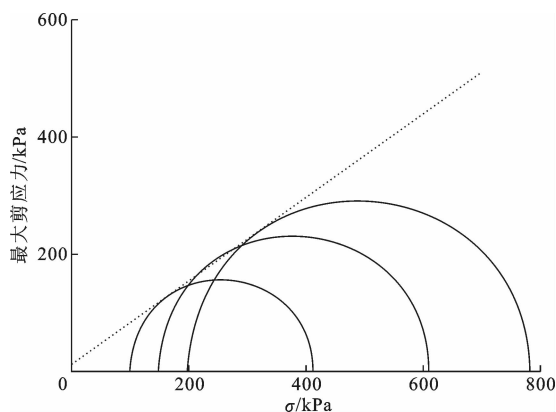


图 6 含石量 70% 的摩尔圆及抗剪强度包线

Fig. 6 Molar circles with 70% stone content and shear strength envelopes

同理,可以得到含石量 30% 和 50% 的抗剪强度

参数,内摩擦角和黏聚力随含石量变化的关系曲线如图 7 所示。

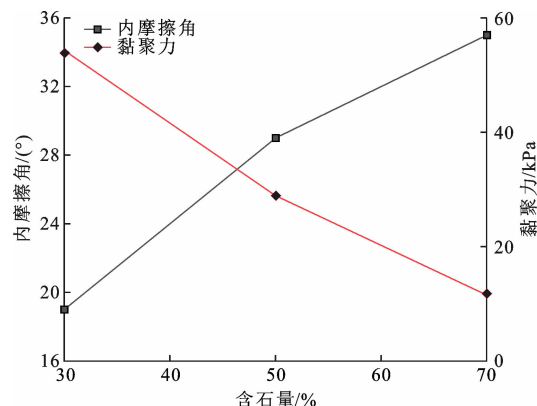


图 7 不同含石量下的抗剪强度参数

Fig. 7 Shear strength parameters under different stone contents

含石量是影响内摩擦角的主要因素^[24],对 3 种含石量下土石混合料抗剪强度参数的分析可得,内摩擦角随含石量的增加呈近似线性增长的趋势,而黏聚力随含石量的增加呈近似线性降低趋势。在土石混合料中,粗颗粒之间的黏聚力比较低,但当与土颗粒混合后,其抗剪强度会发生较大的变化。从图 7 中可以发现,土石混合料的内摩擦角随着含石量的增加而增加,这是因为土石混合料中含石量较高时,不同粒径颗粒之间的相互嵌入、咬合及摩擦会使颗粒与颗粒之间的接触面积变大,导致颗粒之间的摩擦增大,内摩擦角增加。反之,在内摩擦角增大的同时,其黏聚力会随含石量的增加而减小,当含石量由 50% 增加至 70% 时,土石混合料则由骨架密实结构转变为骨架空隙架构,此时由于细颗粒的逐渐减少,无法更好填充孔隙,使得孔隙率逐渐增大,土石混合料之间更多的是粗颗粒与粗颗粒之间的接触,使土石混合料的黏聚力迅速减小。

3.3 应变-刚度曲线特征分析

图 8 为不同含石量土石混合料应变-刚度的关系,可见 3 种曲线均表现出明显的刚度软化特征。由于曲线后部分基本维持恒定,故主要对轴向应变小于 5% 时的应变-刚度曲线展开研究。对比王军等利用静三轴对水泥土的力学特性分析^[25],发现在土中掺入不同比例的粗颗粒也可以得到类似的变形特征。

从图 8 可知,在加载初期,特别是轴向应变在 0%~1% 之间时,割线模量迅速衰减,刚度软化现象显著。随着轴向应变继续增加,应变-刚度曲线逐渐趋于平缓,且随着含石量增大,割线模量峰值增大,抗变形能力增强,其主要原因是在含石量增加的同

时,土颗粒的含量减少,仅能起到填充作用,而粗颗粒之间的接触更密切,表现出一定的骨架作用,能够

更好抵抗变形,土石混填路基在轴向荷载的作用下产生较小的变形。

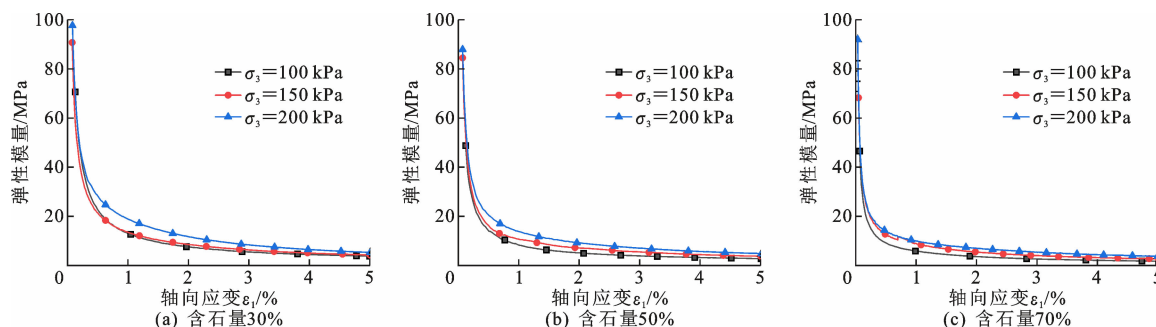


图8 三种不同含石量下土石混合料的应变-刚度曲线

Fig. 8 Strain stiffness curves of soil-rock mixture under three different stone contents

3.4 应变-孔压曲线特征分析

根据土的有效应力原理,土石混合料中的总应力可分为由土骨架承受的有效应力和由孔隙水承受的孔隙水压力之和,即

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1)$$

式中: σ 为总应力(kPa); σ' 为有效应力(kPa); u 为孔隙水压力(kPa)。

本文采用固结不排水的试验,因此试样孔隙中的水无法排出。对于饱和试样,剪切过程中,试样体积不发生变化,不产生剪胀或剪缩。根据有效应力原理,当试样受剪切时,体积会有减小的趋势,产生正的孔隙水压力。

本文选取含石量 70% 土石混合料的应变-孔压关系曲线进行分析,如图 9 所示。从图 9 可知,当轴向应变为 4% 时,100 和 150 kPa 试样的孔压达到最大值,当围压达到 200 kPa 时,试样周围约束增强,试样在剪切初期伴随粗颗粒的错动和破碎,部分孔压会被消散,导致前期孔压增长缓慢、后期孔压值较低。随着轴向应变的逐渐增加,孔隙水压力的变化趋势为先增加后缓慢降低,由于试样完全饱和且在不排水的条件下,轴力不断增加的过程中会产生正的孔隙水压力,孔压增加,试样呈现出剪缩的变化趋势。当轴向应变继续增加,试样逐渐发生剪切破坏,颗粒之间发生破碎和错动的概率增加,会消散部分孔隙水压力,孔隙水压力逐渐减小。从图 9 还可以看出,随着围压的增大,孔压也逐渐增大,主要因为围压增大对试样产生的约束增强,使试样的整体强度增加,不易发生破坏,孔压也不易消散。

4 本构模型适用性分析

4.1 邓肯-张模型的适用性分析

根据上述试验数据,3 种含石量土石混合料的

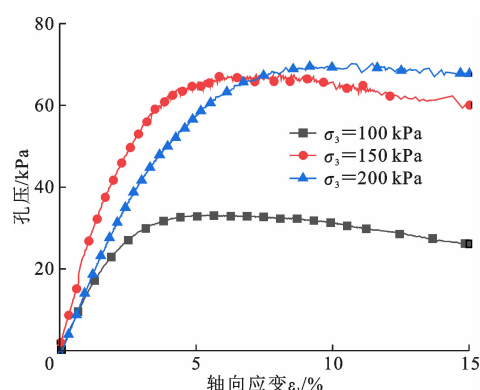


图9 含石量 70% 土石混合料的应变-孔压曲线

Fig. 9 Strain pore pressure curves of soil-rock mixture with 70% stone content

应力-应变曲线均为应变硬化型。本文首先采用应用最为广泛的邓肯-张模型对其进行拟合分析,分别得到 3 种含石量土石混合料的邓肯-张模型参数和拟合曲线。邓肯-张模型函数关系如下

$$\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_1 \quad (2)$$

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

$$R_f = \frac{\sigma_f}{\sigma_{ult}} \quad (4)$$

式中: a 、 b 分别为初始变形模量 E_i 和极限主应力差 σ_{ult} 的倒数; σ_1 为轴向压力, σ_3 为围压; $\sigma_1 - \sigma_3$ 为偏应力, K 、 n 为常数; p_a 为大气压; R_f 为破坏应力比; σ_f 为土样破坏时的偏应力。

以含石量为 70% 土石混合料的应力-应变曲线为例,如图 10 所示。可见,3 种含石量的土石混合料应力-应变曲线与邓肯-张模型拟合曲线有一定差距,出现较低的拟合度且拟合优度 R^2 没有达到理想拟合效果。在轴向应变达到 10% 之前,拟合值较试验值偏高,在轴向应变达到 10% 之后,拟合值较

试验值偏低,说明邓肯-张模型在应用于间断级配土石混合料上存在一定的误差。主要原因是间断级配土石混合料细颗粒和粗颗粒之间的粒径相差较大,在含石量较高的情况下,初期加载到一定程度后,会发生应力集中现象,导致粗颗粒之间发生破碎,抗剪强度降低,前期拟合曲线较实际曲线偏高。在颗粒破碎发生后,会产生粒组迁移,级配演化朝着小粒径方向转移,细小的粒径颗粒再次填充孔隙,大小颗粒之间的咬合作用变得更强,级配更良好,颗粒破碎进一步增强土石混合料的抗剪强度,因此拟合曲线较实际曲线偏低。间断级配土石混合料复杂的结构特性使得其应力-应变关系曲线比较复杂,导致邓肯-张模型对间断级配土石混合料拟合度较低。

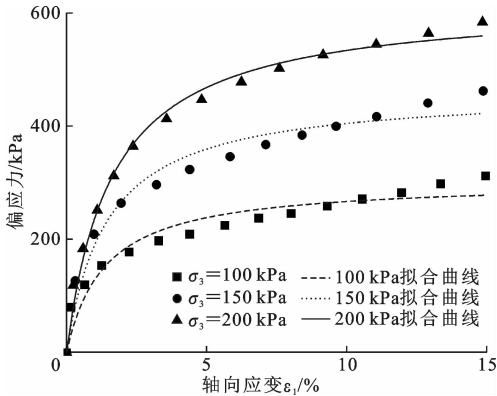


图 10 含石量 70% 时邓肯-张模型拟合结果
Fig. 10 Fitting results of Duncan-Chang model with 70% stone contents

表 2 不同含石量下土石混合料的 Duncan-Chang 模型参数
Tab. 2 Parameters of Duncan-Chang model for soil-rock mixture with different stone contents

含石量/%	σ_3/kPa	a	b	E_i	R_f	k	n
30	100	0.004 7	0.003 8	212.766 0	0.998 8	558.727 4	0.747 2
	150	0.004 7	0.003 3	212.766 0			
	200	0.002 7	0.002 9	370.370 4			
50	100	0.008 5	0.003 3	117.647 1	0.949 9	1 094.46	1.039 2
	150	0.006 0	0.002 6	166.666 7			
	200	0.004 1	0.002 1	243.902 4			
70	100	0.004 5	0.003 2	222.222 2	0.969 4	1 085.925	1.035 8
	150	0.002 9	0.002 1	344.827 6			
	200	0.002 2	0.001 6	454.545 5			

4.2 幂律模型的适用性分析

幂律模型能很好地反映应变硬化特性,所以对间断级配土石混合料的应力-应变曲线进行拟合,见图 11,拟合结果如表 3 所示。幂律模型表示为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = c\varepsilon_1(\varepsilon_1 + d)^e p_a \tag{5}$$

式中: c 、 d 、 e 为常数。

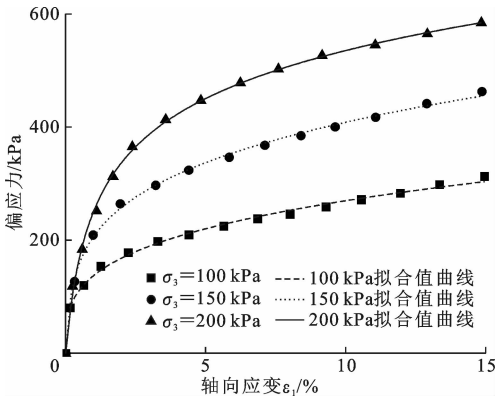


图 11 含石量 70% 时幂律模型拟合结果
Fig. 11 Fitting results of power law model with 70% stone content

表 3 不同含石量下土石混合料的应力-应变模型参数
Tab. 3 Stress-strain model parameters of soil-rock mixture with different stone contents

含石量/%	σ_3/kPa	c	d	e	R^2
30	100	1.17	-0.72	-0.050	0.998
	150	1.33	-0.72	0.005	0.998
	200	2.02	-0.81	0.140	0.994
50	100	0.83	-0.56	-0.170	0.999
	150	1.18	-0.59	-0.075	0.997
	200	1.64	-0.64	0.002	0.997
70	100	1.36	-0.71	-0.003	0.995
	150	2.20	-0.73	0.110	0.999
	200	3.61	-0.81	0.580	0.999

从图 11 可以发现,拟合曲线与试验数据点基本一致,幂律模型能更好反映间断级配土石混合料的应力-应变情况。分析原因,级配间断土石混合料缺失中间粒径,粗骨料之间更易形成骨架结构,在压力作用下颗粒破碎现象显著。颗粒破碎后的小颗粒石料填充于骨架之中,混合料抗剪强度增大,应力-应变曲线在后期表现为继续增长趋势,故幂律模型更能反映该类型散体材料的应力-应变曲线。根据文献[26]所得结论,幂律模型中当 $-1 \leq d \leq 0$ 时,曲线属于应变硬化型。本文表 3 中 d 值均满足该区间条件,也验证了幂律模型对间断级配土石混合料更适用。

5 结 语

(1)间断级配土石混合料的应力-应变曲线呈应变硬化型,且无明显的峰值。在含石量较低时,应力-应变呈一条平滑的曲线,但随着含石量的增加,应力-应变曲线后期呈现出“跳跃”的现象,粗颗粒出现破碎情况,3 种含石量的偏应力峰值均随含石量

的增加而增加,含石量达到70%时,偏应力峰值达到最大。

(2)间断级配土石混合料的刚度变化主要在加载初期,刚度软化明显。含石量越大,割线模量所达到的峰值越大,抵抗变形能力越强,后期变形越不明显。孔隙水压力随着轴向应变的逐渐增加,变化趋势为先增加后缓慢降低;随着围压的增大,孔压也逐渐增大。

(3)对比分析邓肯-张模型与幂律模型,发现邓肯-张模型在应用于间断级配土石混合料时有较大的误差,而幂律模型拟合效果不受颗粒破碎的影响,能更好反映后期的应变硬化特征。

(4)由于试验条件限制,本文试验方案中含石量和围压组数较少,后续研究将加大试验方案的维度,丰富试验数据,将幂律应力-应变模型应用于其他试验条件予以验证。

参考文献:

References:

- [1] 徐文杰,张海洋. 土石混合体研究现状及发展趋势[J]. 水利水电科技进展,2013,33(1):80-88.
XU Wen-jie, ZHANG Hai-yang. Research status and development trend of soil-rock mixture[J]. Advances in Water Resources and Hydropower Science and Technology, 2013, 33(1): 80-88.
- [2] 徐 俊,韩文喜,吴亚东,等. 粗粒含量对砂泥岩类填料力学性质的影响研究[J]. 水力发电,2020,46(12):117-123.
XU Jun, HAN Wen-xi, WU Ya-dong, et al. Effect of coarse particle content on mechanical properties of sand-mudstone filler[J]. Hydroelectric Power, 2020, 46(12): 117-123.
- [3] 周志军,南浩林,张 熠. 土石混合料路用工程力学性质试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2007,27(5):11-15.
ZHOU Zhi-jun, NAN Hao-lin, ZHANG Yi. Earth-rock mixture road engineering mechanics properties test[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2007, 27(5): 11-15.
- [4] 刘树堂,夏建平,高雪池,等. 压实土体试件动力学参数室内测试[J]. 长安大学学报(自然科学版),2022,42(4):1-9.
LIU Shu-tang, XIA Jian-ping, GAO Xue-chi, et al. Laboratory test of kinetic parameters of compacted soil specimen[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2022, 42(4): 1-9.
- [5] INDRARATNA B, WIJEWARDENA L S, BALASUBRAMANIAM A S. Large-scale triaxial testing of grey wacke rockfill[J]. Geotechnique, 1993, 43(1): 37-51.
- [6] 刘龙旗,毛雪松,肖亚军,等. 含水率对坡积体路基填料剪切特性影响试验研究[J]. 中国公路学报,2020,33(9):126-135.
LIU Long-qi, MAO Xue-song, XIAO Ya-jun, et al. Experimental study on shear characteristics of slope subgrade filling with water content[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 126-135.
- [7] LIU H L, DENG A, SHEN Y. Shear behavior of coarse aggregates for dam construction under varied stress paths [J]. Water Science and Engineering, 2008, 1(1): 63-77.
- [8] SLANGEN P, FANNIN R J. The role of particle type on suffusion and suffosion[J]. Géotechnique Letters, 2017, 7(1): 6-10.
- [9] LE V T, MAROT D, ROCHIM A, et al. Suffusion susceptibility investigation by energy based method and statistical analysis [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(1): 57-68.
- [10] 黄 鑫,魏玉峰,魏 婕. 级配对粗粒土直剪过程中抗剪强度与变形的影响研究[J]. 中外公路,2022,42(1):249-254.
HUANG Xin, WEI Yu-feng, WEI Jie. Effect of grading on shear strength and deformation of coarse-grained soil in direct shear process[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2022, 42(1): 249-254.
- [11] 陈爱军. 颗粒级配对粗粒土强度和变形特性的影响[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版),2017,27(3):75-82.
CHEN Ai-jun. Effect of particle size on strength and deformation characteristics of coarse-grained soil[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2017, 27(3): 75-82.
- [12] 薛亚东,刘忠强,黄宏伟. 砂砾石混合物抗剪强度特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(6):75-79.
XUE Ya-dong, LIU Zhong-qiang, HUANG Hong-wei. Experimental study on shear strength of sand-gravel mixture[J]. Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2012, 34(6): 75-79.
- [13] XIAO Y, LIU H L, CHEN Y M, et al. Strength and dilatancy of silty sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(7): 06014007.
- [14] RAHMAN M M, LO S R, BAKI M A L. Equivalent granular state parameter and undrained behaviour of

- sandfines mixtures[J]. *Acta Geotechnica*, 2011, 6(4): 183-194.
- [15] 徐刚敏, 吴 杨, 吴毅航, 等. 间断级配吹填珊瑚砂剪切和颗粒破碎特性[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023; 1-9 [2023-02-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210818.1724.004.html>.
- XU Gang-min, WU Yang, WU Yi-hang, et al. Shear and particle breakage characteristics of discontinuous graded reclamation coral sand[J/OL]. *Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese and English)*, 2023; 1-9 [2023-02-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210818.1724.004.html>.
- [16] 石 熊, 张家生, 孟 飞, 等. 改良粗粒土填料大型三轴试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(2): 645-652.
- SHI Xiong, ZHANG Jia-sheng, MENG Fei, et al. Large-scale triaxial test on modified coarse-grained fillers[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(2): 645-652.
- [17] 刘江波, 刘 凯, 田 军, 等. 改进邓肯-张模型及其在软岩填料中的应用[J]. *中外公路*, 2021, 41(4): 6-11.
- LIU Jiang-bo, LIU Kai, TIAN Jun, et al. Improved Duncan-Chang model and its application in soft rock filling[J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2021, 41(4): 6-11.
- [18] 何忠明, 刘正夫, 向 达. 基于路堤粗粒土填料力学特性的改进邓肯-张模型[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(1): 37-46.
- HE Zhong-ming, LIU Zheng-fu, XIANG Da. Improved Duncan-Chang model based on mechanical properties of coarse-grained soil fill in embankment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(1): 37-46.
- [19] 李雪梅, 李红文, 郑敏生, 等. 基于修正邓肯-张模型的堆石料颗粒破碎研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增 1): 2695-2701.
- LI Xue-mei, LI Hong-wen, ZHENG Min-sheng, et al. Research on particle breakage of rockfill material based on modified Duncan-Chang model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S1): 2695-2701.
- [20] KONG Y, XU M, SONG E X. An elastic-viscoplastic double-yield-surface model for coarse-grained soils considering particle breakage [J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 85: 59-70.
- [21] 郭万里, 朱俊高, 钱 彬, 等. 粗粒土的颗粒破碎演化模型及其试验验证[J]. *岩土力学*, 2019, 40(3): 1023-1029.
- GUO Wan-li, ZHU Jun-gao, QIAN Bin, et al. Evolution model of particle breakage in coarse grained soil and its experimental verification[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(3): 1023-1029.
- [22] 侯伟亚, 张兆省, 张幸幸, 等. 几种堆石料双曲线模型参数整理方法的比较[J]. *水力发电*, 2018, 44(12): 52-58.
- HOU Wei-ya, ZHANG Zhao-sheng, ZHANG Xing-xing, et al. Comparison of several parameter determination methods for hyperbolic models of rockfill materials[J]. *Hydroelectric Power*, 2018, 44(12): 52-58.
- [23] 江强强, 徐杨青, 王 浩. 不同含石量条件下土石混合体剪切变形特征的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 951-958.
- JIANG Qiang-qiang, XU Yang-qing, WANG Hao. Research on shear deformation characteristics of soil rock mixtures under different stone contents[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(5): 951-958.
- [24] 曹文贵, 黄文健, 王江营, 等. 土石混填体变形力学特性大型三轴试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(3): 142-148.
- CAO Wen-gui, HUANG Wen-jian, WANG Jiang-ying, et al. Large-scale triaxial test study on deformation and intensity characteristics of soil-rock aggregate mixture[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(3): 142-148.
- [25] 王 军, 丁光亚, 潘林有, 等. 静三轴试验中水泥土力学特性及本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1407-1412.
- WANG Jun, DING Guang-ya, PAN Lin-you, et al. Study of mechanics behavior and constitutive model of cemented soil under static triaxial tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1407-1412.
- [26] 姜景山. 粗粒料幂律模型研究[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(12): 2853-2857.
- JIANG Jing-shan. Power law model for coarse-grained materials[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(12): 2853-2857.