

文章编号: 1674—8247(2024)06—0015—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.06.003

三轴加卸载下西南某红层堆积体粗粒土力学性质

陈志辉¹ 肖世国²

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘 要:为研究红层堆积体粗粒土在三轴加卸载条件下的力学性质,对四川地区某边坡红层堆积体的 2 种粗粒土样进行了加载-卸载-再加载的三轴压缩试验,得到了试样在不同加卸载条件下的强度与变形特性,揭示了卸载回弹模量特征及其与围压、卸载应力水平之间的关系。试验结果表明:(1)所采用的红层堆积体粗粒土样,在三轴压缩条件下,呈现 Duncan-Chang 本构模型特征;(2)基于标准大气压的归一化卸载回弹模量与归一化围压之间呈现线性正相关性;(3)卸载阶段表征回弹模量的无量纲系数 n_{ur} 与加载阶段表征初始切线模量的无量纲系数 n 并不相等;(4)对卸载回弹模量的影响而言,围压与卸载应力水平之间不存在共线性,且围压影响较大;(5)试样粗粒土的回弹模量约为初始切线模量的 3.5~4 倍,明显大于既有的黏土相应值。研究结果可对红层堆积体粗粒土力学性质的认识提供重要参考。

关键词:红层堆积体;粗粒土;三轴压缩试验;Duncan-Chang 模型;加卸载过程

中图分类号:TU411

文献标志码:A

15

Mechanical Properties of Coarse-grained Soils in Red-bed Deposits under Triaxial Loading and Unloading Conditions in Southwest China

CHEN Zhihui¹ XIAO Shiguo²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To investigate the mechanical properties of coarse-grained soil in red-bed deposits under triaxial loading and unloading conditions, triaxial compression tests involving loading-unloading-reloading cycles were conducted on two types of coarse-grained soil samples from a slope featuring red-bed deposits in Sichuan Province. The tests yielded strength and deformation characteristics of the specimens under various loading and unloading scenarios, revealing the features of unload recovery modulus and its relationship with confining pressure and stress levels during unloading. The results indicate that: (1) The coarse-grained soil samples from the studied red bed deposits exhibit characteristics consistent with the Duncan-Chang constitutive model under triaxial compression. (2) The normalized unload recovery modulus, based on standard atmospheric pressure, exhibits a positive linear correlation with the normalized confining pressure. (3) The dimensionless coefficient n_{ur} representing the unloading rebound modulus during the unloading phase is not equal to the dimensionless coefficient n characterizing the initial tangent modulus during the loading phase. (4) With regard to the influence on the unloading rebound modulus, there is no collinearity between the confining pressure and the

收稿日期:2023-03-25

作者简介:陈志辉(1998-),男,硕士研究生。

基金项目:四川省交通运输科技项目(2020-A-01)

引文格式:陈志辉,肖世国.三轴加卸载下西南某红层堆积体粗粒土力学性质[J].高速铁路技术,2024,15(6):15-20.

CHEN Zhihui, XIAO Shiguo. Mechanical Properties of Coarse-grained Soils in Red-bed Deposits under Triaxial Loading and Unloading Conditions in Southwest China[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(6):15-20.

stress level during unloading, with the confining pressure having a more significant effect. (5) The rebound modulus of the tested coarse-grained soil samples is approximately 3.5 to 4 times that of the initial tangent modulus, significantly greater than the corresponding values for clays. These findings provide valuable insights into the understanding of the mechanical properties of coarse-grained soils in red-bed deposits.

Key words: red-bed deposits; coarse-grained soil; triaxial compression test; Duncan-Chang model; loading-unloading process

粗粒土通常包括碎石土和砂土,一般是指粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量超过总质量 50% 的土或是黏性土中含有大量粗颗粒的混合土^[1]。粗粒土具有压实密度大、透水性良好、抗剪强度高、沉降变形小、不易产生地震液化等良好的工程特性,被广泛应用于土石坝与路基填筑、软弱地基换填处理、堆积体边坡开挖等实际工程中。

粗粒土的力学性质是相关工程设计中的基本要素。以往采用常规三轴压缩试验^[2-4]对粗粒土的强度与变形特性进行研究,石振明^[5]等总结了国内外在大三轴试验技术与粗粒料静力特性方面的研究进展。综合来看,相对于加载过程中粗粒土力学性质试验,以往对粗粒土卸载回弹性质的研究较少,而后者对粗粒土开挖变形问题的合理分析有重要意义。

目前,在粗粒土变形相关的计算分析中,其回弹模量常按经验取值,如:Duncan 等在砂土和黏土试验的基础上^[6],认为卸载与加载模量指数 n_{ur} 、 n 基本一致,卸载与加载模量系数 K_{ur} 、 K 之间近似满足 $K_{ur} = 1.2 \sim 3.0 K$,对于松砂和软土 $K_{ur} = 3.0 K$,对于密砂 $K_{ur} = 1.2 K$,其余土介于其间。然而,这些基于试验得到的经验关系是否适于所有土体,尚需进一步研究。褚福永^[7-8]等进行了 3 种不同粗粒土的常规三轴加载-卸载-再加载的剪切试验,得出回弹模量随应力水平增大呈现驼峰状曲线,且回弹模量 E_{ur} 与单调加载初始切线模量 E_t 的比值随着围压的降低呈幂函数关系下降。朱俊高^[9]对 2 种粗粒土 4 种级配料进行了卸载-再加载的三轴固结排水剪试验,分析其强度变形特性与单调加载三轴试验条件下特性的差异,给出了粗粒土回弹模量的合理取值与影响因素。

除了变形参数外,强度参数也是 Duncan-Chang 模型中的重要参数。实际上,因土性的差异性,对于不同的粗粒土,适用的 Duncan-Chang 模型参数取值亦有所差异。周建方^[10]等对双江口心墙堆石坝粗粒土进行了三轴固结排水剪试验,分析了粗粒土的应力-应变及强度特性,重点探讨了 Duncan-Chang 模型的差异性以及模型参数的合理取值范围。张嘎^[11]等利用大型三轴试验研究了粗粒土的应力应变特性及 Duncan-Chang 模型的适用性,提出了 Duncan-Chang 模型的改进模型。徐晗^[12]进行了堆石坝的离心模型与三

维数值模拟,得出 Duncan-Chang 模型能较好地描述堆石坝的加载应力路径,但需要改进该模型中卸载模量的确定方法。

总体而言,以往对粗粒土的相关试验研究对于反映其力学性质具有参考意义。然而,不同地区的粗粒土物理性质往往存在明显差异,特别是四川地区的红层堆积体粗粒土,其物理特性与以往试验土样有较大不同。此外,以往关于红层堆积体粗粒土的加卸载力学性质试验研究也颇少。鉴于此,本文依托某堆积体路堑边坡工程,对所涉及的 2 种不同粗粒土取样,进行基于常规三轴压缩试验仪的加载-卸载-再加载试验。根据试验结果,采用 Mohr-Coulomb 强度理论,求得土样的抗剪强度参数 c 、 φ 值;同时,采取 Duncan-Chang 模型描述试样的力学性质,在分析此模型合理可行的基础上,综合确定出土样加卸载过程相关的全部 8 个独立参数(加载阶段 6 个与卸载阶段 2 个)。

1 工程地质条件与土样特征

取样边坡处于青藏高原东南边缘的高山区,属构造侵蚀剥蚀高山峡谷地貌,河流侵蚀堆积地形,仅沿杂谷脑河谷底呈带状展布。河谷两侧斜坡近直线状,横坡变化在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 间。该边坡属于陡斜坡地貌,斜坡表面覆盖厚层崩坡积碎石土、块石土及角砾土。经工程地质勘察揭露,边坡变形体土质不均,主要物质成分为块石、碎石和角砾,结构松散,以中密状为主,灰褐色,透水性好。

现场所取典型土样共有 2 种,土样 A 与土样 B 分别为灰黑色和黄灰色,最大粒径为 70 mm,块石、碎石与角砾结构较为松散,以中密状为主,为土样主要组成物质。

2 试验方法

2.1 试样基本属性

根据相关规范^[13],对现场取回的堆积体粗粒土样 A、土样 B 进行筛分试验,土样的颗粒级配曲线如图 1 所示。

对两种粗粒土样,在三轴压缩试验前需进行试样制备。根据现场实际情况,土样 A 和土样 B 分别按照密度为 2 g/cm^3 、 1.96 g/cm^3 与 6% 的含水率计算所需

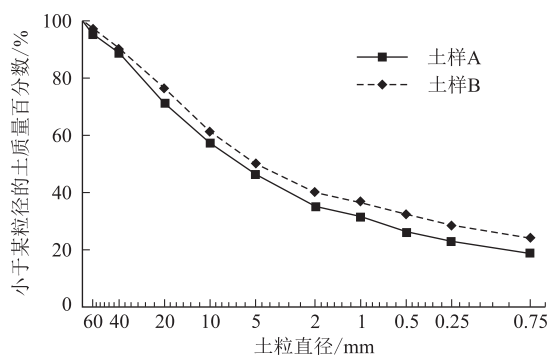


图1 土样A、土样B的颗粒级配曲线图

的土样与加水量。考虑试验仪器尺寸条件,两种土样均过2 mm的土壤筛,以过筛后的颗粒制作试样。同时,对制作完成的试样进行普通直剪试验(剪切速率为0.8 mm/min),得到土样A和土样B的黏聚力与内摩擦角分别为31.53 kPa、23.83°和18.99 kPa、33.59°。

2.2 试验仪器与测试方法

对制作完成的粗粒土圆柱体试样($\phi 150$ mm、高300 mm)进行三轴压缩试验^[14]。试验仪器为四川大学华西岩土仪器研究所DJSZ-150大型动静三轴试验机,剪切速率为0.002~5 mm/min,无级调速,附属设备包括击实器、饱和器、承膜筒、对开圆模等。由于试样为粗粒土,本试验采用不固结不排水模式。

2.3 试验操作步骤

试验包括制样、安装、加卸载等多个环节,主要操作步骤如下:

(1)根据试件体积和密度要求,计算每个试件需要土体的干质量。按试样组成要求分层计算所需的土颗粒,分层配置。

(2)对试样按照预定的密度与含水率计算所需的土颗粒与加水量,把水加到粒径大于0.5 mm的料粒中,然后掺入细粒继续拌和,直至拌匀为止。

(3)在仪器压力室的试样底座上加光滑盖板,用皮筋将橡皮膜与底座扎好,安装成型筒。将橡皮膜外翻套在成型筒上,将土工布套在橡皮膜内部。

(4)逐层装填土样。试样分5层装填,每层密实度保持一致。每装一层,先用细钢钎捣实,再用击实锤使土样达到要求的密实度,用卷尺测量击实高度以保证各层高度相同,然后将表面刨毛。

(5)整平试件顶面,加上盖板与试件帽,卸除对开成型筒,量测试件的实际高度,测量误差不得大于 ± 2 mm。再套上完好的橡皮膜,并将两头扎紧。

(6)利用行吊安装压力室,置压力室于三轴试验机座上,分别将围压进气管、孔隙管和反压管与对应

阀门连接。

(7)打开气泵开关,检查围压冲气、反压冲油、轴压冲油是否完成,控制底座自动上升至压力室刚好与三轴试验仪顶部接触,设置围压分别为50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa和400 kPa。

(8)轴压采取等应变加载控制方式,其中围压为50 kPa时设置剪切速率为0.7 mm/min,其余围压时为1 mm/min;在进行加载-卸载-再加载的压缩试验中,轴压采取稳压加载控制方式,设置多级逐渐递增与递减的轴向压力,卸载至轴向应变接近0后,进行再加载试验至预定轴向压力。

(9)此围压下试验结束,卸载围压,断开围压进气管与进气阀、孔隙管与孔隙阀、反压管与反压阀门,拆除试样。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

围压为50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa和400 kPa时,土样A、土样B常规三轴压缩试验的轴压-轴向应变关系曲线如图2所示。根据试验结果绘制的莫尔圆与库仑强度^[15]包络线如图3所示,可算得土样A的黏聚力 $c = 25.53$ kPa,内摩擦角 $\varphi = 42.6^\circ$;土样B的黏聚力 $c = 15.4$ kPa,内摩擦角 $\varphi = 43.5^\circ$ 。

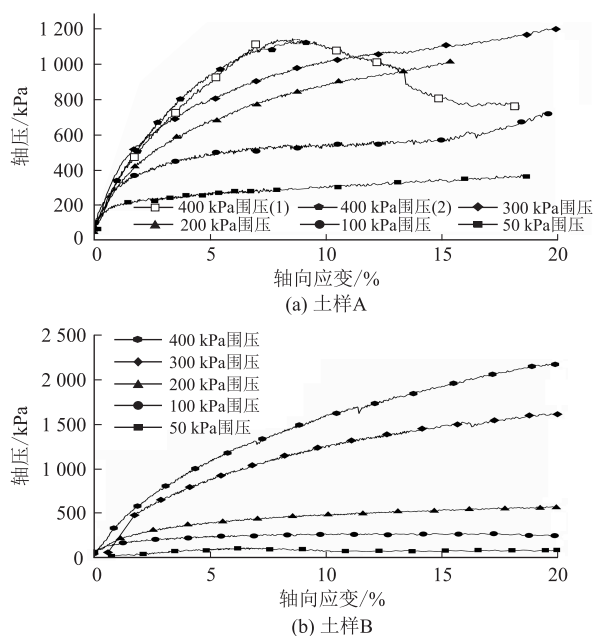


图2 常规三轴压缩试验的轴压-轴向应变关系曲线图

在围压为100 kPa、200 kPa、300 kPa和400 kPa时,土样A、土样B在加载-卸载-再加载条件下的轴压-轴向应变关系曲线如图4所示。可见,卸载曲线与再加载曲线虽然较为接近,但并不完全重合,两者之间仍存在回滞环。这说明对于试验土样,卸载回弹并

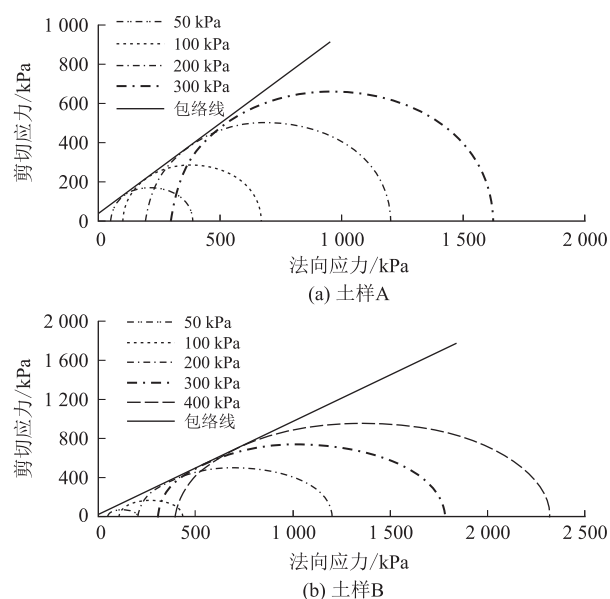


图3 试验得到的莫尔圆与库仑抗剪强度包络线图

不是完全弹性变形,再加载也会产生新的塑性变形。

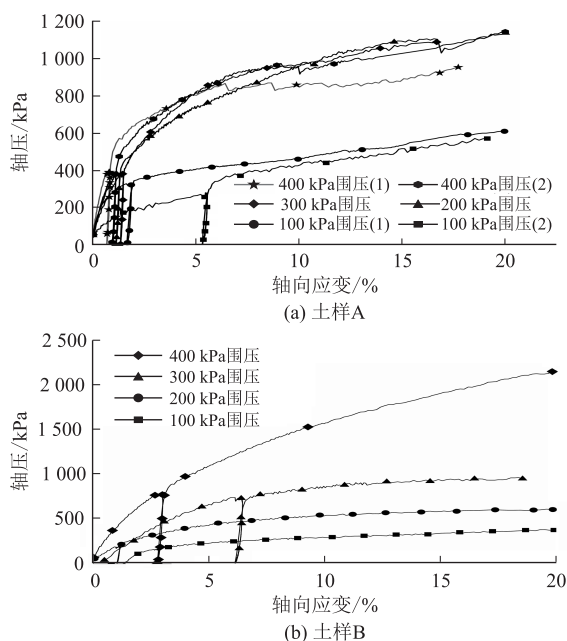


图4 加载-卸载-再加载条件下的轴压-轴向应变关系曲线图

当试样的轴向应变达到20%时,未出现明显的破裂面。从侧面观察,试样横向变形是中间大、两端小,呈径向鼓状变形特征,且其沿高度渐变。这是由于试样的两端与加载装置之间存在摩擦力,两端受到一定的约束作用,试样中间部位受到此约束作用较小,因而鼓胀变形呈现中间大、两端小的渐变特征。

3.2 试验结果的 Duncan-Chang 模型分析

Duncan-Chang 模型假设应力-应变关系为双曲线^[16],基本表达式为:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (1)$$

式中: σ_1 ——试样的大主应力(kPa);

σ_3 ——试样的小主应力(kPa);

ε_1 ——试样的轴向应变,即主应变。

参数 a 、 b 的表达式分别为:

$$\frac{1}{a} = E_i = kP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (2)$$

$$b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = \frac{R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (3)$$

式中: E_i ——初始切线模量(MPa);

P_a ——标准大气压(kPa);

k ——无因次基数;

R_f ——破坏比;

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ——土体的破坏主应力差(kPa);

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ ——土体的理论极限主应力差(kPa)。

根据 Mohr-Coulomb 强度准则,破坏主应力差的表达式为:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

Duncan-Chang 模型中涉及独立参数有8个,即:加载阶段6个,包括 c 、 φ 、 E_i 、 K 、 n 和破坏比 R_f ;卸载阶段2个,包括表征卸载回弹模量的无量纲参数 K_{ur} 和 n_{ur} 。 c 、 φ 在前文已经给出,下面根据本试验数据,进一步给出其余6个独立参数的确定结果。

(1) 参数 a 、 b 、 R_f 、 K 和 n

不同围压下土样 A 和土样 B 的 $\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} \sim \varepsilon_1$ 关系曲线如图5所示。可见,二者之间的关系均近似呈线性,说明本试样的力学特性可以采用 Duncan-Chang 模型描述。

根据曲线拟合得到的土样 A 与土样 B 的 Duncan-Chang 模型参数 a 、 b 、 E_i 、 R_f 如表1、表2所示。土样 A 与土样 B 的初始切线模量随围压增加呈非线性增大变化,在围压为400 kPa时,二者分别约为40 MPa、36 MPa;在不同围压条件下二者的破坏比分别介于0.78~0.97和0.76~0.85。土样 A 与土样 B 在不同围压下 $\lg\left(\frac{E_i}{P_a}\right)$ 与 $\lg\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)$ 关系如图6所示,可见,两者之间近似呈线性关系,其一般表达式为 $\lg\left(\frac{E_i}{P_a}\right) = \lg K + n \lg\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)$ 。由此,可算得土样 A 的两个系数 $K = 251.19$ 、 $n = 0.33$,土样 B 的两个系数 $K = 145.84$ 、 $n = 0.65$ 。

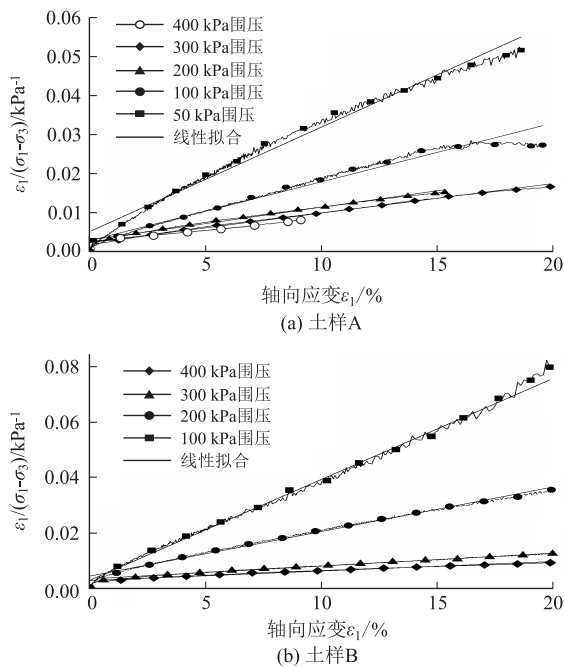


图5 不同围压下试样的 $\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} \sim \epsilon_1$ 关系图

表1 土样A的 Duncan-Chang 模型参数表					
σ_3/kPa	a/MPa^{-1}	b/MPa^{-1}	$(\sigma_3 - \sigma_1)_f/kPa$	E_i/MPa	R_f
50	4.99	2.680	325.80	20.04	0.87
100	3.91	1.660	535.28	25.57	0.89
200	3.08	0.822	954.23	32.47	0.78
300	2.80	0.707	1 373.19	35.73	0.97
400	2.51	0.540	1 792.15	39.84	0.97

表2 土样B的 Duncan-Chang 模型参数表					
σ_3/kPa	a/MPa^{-1}	b/MPa^{-1}	$(\sigma_3 - \sigma_1)_f/kPa$	E_i/MPa	R_f
100	2.74	1.640	513.44	18.50	0.84
200	4.34	0.890	955.20	23.04	0.85
300	3.34	0.568	1 396.95	29.94	0.79
400	2.76	0.413	1 838.71	36.23	0.76

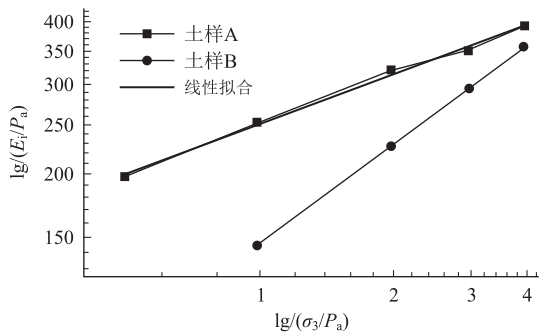


图6 试样的 $\lg\left(\frac{E_i}{P_a}\right)$ 与 $\lg\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)$ 关系图

(2) 卸载回弹模量系数 K_{ur} 和 n_{ur}

由于卸载-再加载过程中出现回滞环,故采用回滞环两交点连线的斜率作为卸载回弹模量。试验显

示,在同一围压下不同应力水平时卸载回弹模量差异较小,取其平均值作为试验值,如表3所示。

表3 土样A与土样B的卸载回弹模量表

σ_3/kPa	土样A E_{ur}/MPa	土样B E_{ur}/MPa
100	87.80	57.00
200	178.03	130.50
300	257.49	187.67
400	297.18	281.66

对于卸载-再加载阶段,土样A与土样B在不同围压下 $\lg\left(\frac{E_{ur}}{P_a}\right)$ 与 $\lg\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)$ 关系如图7所示。可见,两者之间仍近似呈线性关系,类似地,其一般表达式可写为 $\lg\left(\frac{E_{ur}}{P_a}\right) = \lg K_{ur} + n_{ur} \lg\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)$ 。于是,可算得土样A的卸载回弹两系数 $K_{ur} = 891.25$ 、 $n_{ur} = 0.90$,且 $K_{ur} = 3.55 K$ 、 $n_{ur} = 2.7 n$;土样B的卸载回弹两系数 $K_{ur} = 572.796$ 、 $n_{ur} = 1.132$,且 $K_{ur} = 3.9 K$ 、 $n_{ur} = 1.74 n$ 。因此,本粗粒土试样的卸载回弹模量约为初始切线模量的3.5~4倍,明显大于既有对黏土得到的1.2~3.0倍^[17]。

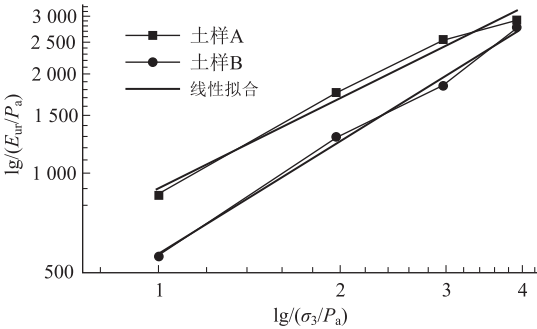


图7 试样的 $\lg\left(\frac{E_{ur}}{P_a}\right)$ 与 $\lg\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)$ 关系图

由上述结果可见, n_{ur} 与 n 并不相等。若近似取二者相等^[18],即卸载阶段的 n_{ur} 值取为加载阶段的 n 值,则可根据不同围压下的 E_{ur} ,计算得到 K_{ur} 后取其平均值,以此作为确定 K_{ur} 的一种近似方法,所得相应计算结果如表4所示。可见,土样A、土样B的 K_{ur} 平均值分别为1 477.91、862.54,二者分别比严格算法得到的结果高出约66%、51%。因此,这种近似估算方法并不适合本试验土样,即不宜近似取 $n_{ur} = n$ 。

表4 K_{ur} 的近似计算结果表

σ_3/kPa	土样A的 K_{ur}		土样B的 K_{ur}	
	计算值	平均值	计算值	平均值
100	869.86	1 477.91	567.65	862.54
200	1 403.16		828.23	
300	1 775.27		915.11	
400	1 863.35		1 139.18	

4 结论

(1)对于试验采用的红层堆积体粗粒土样,在三轴压缩试验条件下,试样呈现 Duncan-Chang 本构模型特征,即:大小主应力差随轴向应变呈逐渐收敛的双曲线特征;基于标准大气压的归一化初始切线模量与归一化围压之间呈线性正相关性。

(2)基于标准大气压的归一化卸载回弹模量与归一化围压之间呈现线性正相关性,说明对于试验土样,在 Duncan-Chang 模型中用两个无量纲独立变量 K_{ur} 和 n_{ur} 表征卸载回弹模量具有合理可行性。

(3)卸载阶段表征回弹模量的无量纲系数 n_{ur} 与加载阶段表征初始切线模量的无量纲系数 n 并不相等。试验结果显示,通过近似取二者相等的方法估算 K_{ur} 值,比严格算法得到的结果高出约 51% ~ 66%。因此,实际不宜近似取 $n_{ur} = n$ 。

参考文献:

- [1] 李晓云,赵宝平. 某粗粒土大型三轴剪切试验研究[J]. 西北水电, 2011(3): 86-88.
LI Xiaoyun, ZHAO Baoping. Research on a Certain Coarse Soil by Large Tri-axial Shear Test[J]. Northwest Hydropower, 2011(3): 86-88.
- [2] HJELMSTAD K D, TACIROGLU E. A Coupled Hyperelastic Constitutive Model for Resilient Response of Granular Materials[J]. ASCE, 1997: 178-189.
- [3] MARSAL R J. Large Scale Testing of Rockfill Materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(2): 27-43.
- [4] 张启岳,司洪洋. 粗颗粒土大型三轴压缩试验的强度与应力~应变特性[J]. 水利学报, 1982, 13(9): 22-31.
ZHANG Qiyue, SI Hongyang. Shear Strength and Stress-strain Properties of Coarse Grain Soil Determined by Large Scale Triaxial Compression Tests[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982, 13(9): 22-31.
- [5] 石振明,赵晓伟,彭铭. 粗粒土大三轴试验研究综述[J]. 工程地质学报, 2014, 22(5): 792-796.
SHI Zhenming, ZHAO Xiaowei, PENG Ming. Review of Studies on Large Scale Triaxial Tests of Coarse-grained Soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(5): 792-796.
- [6] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [7] 褚福永,朱俊高,贾华,等. 粗粒土卸载-再加载力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1061-1066.
CHU Fuyong, ZHU Jungao, JIA Hua, et al. Experimental Study of Mechanical Behaviour of Coarse-grained Soil in Unloading and Reloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1061-1066.
- [8] 褚福永,朱俊高,王观琪,等. 粗粒土变形与强度特性大三轴试验研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2011, 42(4): 572-578.
CHU Fuyong, ZHU Jungao, WANG Guanqi, et al. Large-scale Triaxial Test Study on Deformation and Strength Characteristics of Coarse-grained Material[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2011, 42(4): 572-578.
- [9] 朱俊高,王元龙,贾华,等. 粗粒土回弹特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 950-954.
ZHU Jungao, WANG Yuanlong, JIA Hua, et al. Experimental Study on Resilience Behaviour of Coarse-grained Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 950-954.
- [10] 周建方. 粗粒土三轴试验及邓肯模型参数研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
ZHOU Jianfang. Triaxial Test of Coarse-grained Soil and Study on Duncan Model Parameters[D]. Nanjing: Hohai University, 2008.
- [11] 张嘎,张建民. 粗颗粒土的应力应变特性及其数学描述研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1587-1591.
ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Study on Behavior of Coarse-grained Soil and Its Modeling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1587-1591.
- [12] 徐晗,程展林,泰培,等. 粗粒土的离心模型试验与数值模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1322-1327.
XU Han, CHENG Zhanlin, TAI Pei, et al. Centrifuge Model Test and Numerical Simulation of Coarse-grained Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1322-1327.
- [13] JTG 3430-2020 公路土工试验规程[S].
JTG 3430-2020 Test Methods of Soil for Highway Engineering[S].
- [14] 张廉旺,宋嘉杰. 含水率及填充土含量对松散岩堆体抗剪强度的影响规律[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(5): 34-39.
ZHANG Gengwang, SONG Jiajie. Impact of Moisture Content and Filling Soil Content on Shear Strength of Loose Rock Mass[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5): 34-39.
- [15] 王安东. 水平层状岩地区隧道围岩荷载计算方法[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(1): 32-37.
WANG Andong. Calculation Method for Rock Load of Tunnels in the Horizontal Stratified Rock Area[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(1): 32-37.
- [16] 孔德志,朱俊高. 邓肯-张模型几种改进方法的比较[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 971-974.
KONG Dezhi, ZHU Jungao. Comparison of Several Methods for Improving Duncan-Chang Model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 971-974.
- [17] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
YIN Zongze. Geotechnical Principle[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [18] 李广信. 高等土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2016.
LI Guangxin. Advanced Soil Mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.