

DOI: 10.11779/CJGE202212002

粗颗粒土三轴试样橡皮膜嵌入量试验研究

朱俊高¹, 朱材峰^{*1}, 王思睿²

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 镇江电力设计院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 粗颗粒土三轴排水剪试验过程中, 尤其是在等向压缩和等应力比等加载条件下, 橡皮膜嵌入颗粒间隙影响试样体积变形测量的准确性。针对此问题, 使用刚性壁的新型静止侧压力系数试验仪及柔性壁的常规三轴试验仪对双江口土石坝的坝壳粗粒料进行了 K_0 固结试验, 研究了有效净压力 p 、初始孔隙比 e_0 及平均粒径 d_{50} 对单位面积橡皮膜嵌入量的影响, 提出一种可以较精确测量橡皮膜嵌入量的新方法。试验结果表明: 单位面积橡皮膜嵌入量与有效净压力 p/p_a 呈较好的双曲线型关系; 有效净压力 p 、初始孔隙比 e_0 及平均粒径 d_{50} 对橡皮膜嵌入量均有较大影响。基于试验结果, 提出了一个可预测粗颗粒土三轴试验时单位面积橡皮膜嵌入量的经验公式, 并进行了验证。与前人试验结果对比表明, 经验公式可较好预测粗颗粒土三轴试验中的橡皮膜嵌入量。

关键词: 粗颗粒土; K_0 试验; 橡皮膜; 嵌入量; 有效净压力

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)12-2160-07

作者简介: 朱俊高(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土的基本性质、本构关系、土石坝工程等方向的研究。

E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn。

Experimental study on embedding amount of rubber film of triaxial specimens of coarse-grained soil

ZHU Jun-gao¹, ZHU Cai-feng¹, WANG Si-rui²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Zhenjiang Electric Power Design Institute, Zhengjiang 212000, China)

Abstract: During the triaxial drainage shear tests on coarse-grained soil, the rubber film embedded in the particle gap affects the accuracy of measuring the volume deformation of specimens, especially under loading conditions such as isotropic compression and equal stress ratio. In response to this problem, the K_0 consolidation tests are carried out on the coarse-grained shell material of the Shuangjiangkou earth-rock dam using the new static lateral pressure coefficient tester for rigid walls and the conventional triaxial tester for flexible walls. The effects of the effective net pressure p , the initial void ratio e_0 and the average particle size d_{50} on the amount of rubber film embedded per unit area are studied. A new method can be used to accurately measure the embedding amount of rubber film. The test results show that the embedding amount of rubber film per unit area has a good hyperbolic relationship with the effective net pressure p/p_a , and the effective net pressure p , the initial void ratio e_0 and the average particle size d_{50} all have a greater impact on the embedding amount of rubber film. Based on the test results, an empirical formula for predicting the amount of rubber film embedded per unit area in the triaxial tests on coarse-grained soil is proposed and verified. Compared with the previous test results, the proposed empirical formula can better predict the amount of rubber film embedded in the triaxial tests on coarse-grained soil.

Key words: coarse-grained soil; K_0 test; rubber film; embedded amount; effective net pressure

0 引言

粗颗粒土(堆石料)作为天然的建筑材料, 已经广泛地运用于土石坝、大规模填海造地、山区机场等工程中。大量的实测数据表明, 土石坝等堆石体在填筑期处于或接近等应力比的状态; 而土石坝在蓄水期, 其应力路径会发生偏转, 呈现较为复杂的应力路径^[1]。为了反映土石坝等堆石体的复杂应力路径下的应力应

变特性, 进行粗颗粒土三轴试验是最基本最常用的试验, 然而, 在进行等应力比和等向压缩等三轴排水试

基金项目: 国家自然科学基金委员会雅砻江联合基金项目(U1865104); 长江水科学研究联合基金重点支持项目(U2040221); 河海大学大型仪器设备共享基金项目(GX202205B, GX202204B); 华能集团总部科技项目

收稿日期: 2021-10-11

***通信作者** (E-mail: caifeng@hhu.edu.cn)

验中, 由于围压作用导致试样周围橡皮膜嵌入粗颗粒土试样表面孔隙 (简称橡皮膜嵌入)。

在三轴试验中, 试样周围的橡皮膜起着隔离试样、传递压力的作用。排水试验时, 橡皮膜在围压的作用下极易嵌入到试样的粗颗粒土骨架孔隙中 (简称橡皮膜嵌入)。橡皮膜嵌入使得试验中测得的试样排水量并不等于试样的体积变形。对常规三轴固结排水剪试验, 由于剪切过程中围压不变, 目前的方法基本都是将试样排水量当作试样的体积变形, 即不考虑橡皮膜嵌入, 或者说认为剪切过程中橡皮膜嵌入量不变; 直观上看, 这种假定是基本合理的。但是, 对复杂试验路径, 如试验过程中围压变化, 则橡皮膜的嵌入势必会导致试样排水量的变化, 此时试验测得的试样排水量就不能当作其体积变形 (简称体变)。因此, 如果还是按照常规三轴固结排水试验结果处理方法, 即将试样排水量当作试样的体积变形, 无疑会产生较大的误差。已有研究表明, 橡皮膜嵌入量占排水总量的百分比可达到 30%~50%^[2]。因此, 探讨粗颗粒土橡皮膜嵌入量的影响因素, 以及如何较准确得出粗颗粒土试验中橡皮膜的嵌入量是十分必要的。

Newland 等^[3]基于各向同性的假定, 认为在等向固结状态下土体的体变等于三倍的轴变, 通过等向固结试验得出橡皮膜的嵌入量。该方法原理简单, 便于运用, 但国内外诸多学者对其假设持怀疑态度。Selig 等^[4]认为土体的体变为三倍轴变的关系仅在弹性变形即回弹阶段时才成立; Banerjee 等^[5]则认为只有当围压高于 800 kPa, 体变才近似等于三倍的轴变。张丙印等^[2]通过粗粒料大型三轴等向固结试验, 最先提出了橡皮膜嵌入量大小与围压之间的双曲线型经验公式, 该公式实用性较强, 得到广泛的应用。事实上, 这种方法的基础是试样必须是各向同性的, 而土体的各向异性是不用怀疑的, 因此, 此方法必然有不同程度的误差。

Roscoe 等^[6]提出了铜棒法, 即在土体之中埋置与试样高度相等但直径各不相同的铜棒来改变土体的体积, 并测得在不同围压下的排水体积, 将各试验点拟合后求出橡皮膜的嵌入量; Etris 等^[7]考虑到铜棒法存在的缺陷, 提出用空心圆柱试样来调整土样的体积, 并以试样表面积作为变量来研究橡皮膜的嵌入量; Seed 等^[8]提出了与空心圆柱法思路相似的双尺寸方法用来测得橡皮膜单位面积嵌入量; 吉恩跃等^[9]指出, 当铜棒长度与试样高度一致时, 铜棒可能会限制土体的轴向变形, 且由于三轴试验的试样帽为刚性, 施加应力时铜棒上可能会产生应力集中现象, 其对铜棒方法加以改进, 采用非等高度铜棒, 从而避免了高度一致所带来的施加的垂直应力大于土体所受的径向应力

的问题。

Kieckbusch 等^[10]通过研究发现橡皮膜厚度对橡皮膜嵌入量大小影响不大; 刘荟达等^[11]研究宽级配砾性土发现当试样的径厚比 (平均粒径 d_{20} 与橡皮膜厚度 t_m 之比) >2.5 时, 橡皮膜厚度影响可忽略; 当径厚比 <2.5 时, 橡皮膜厚度的影响较为复杂; Etris 等^[7]认为在任何压力作用下, 影响橡皮膜嵌入量的主要因素是颗粒大小, 颗粒越大影响越大; 孙益振等^[12]基于数字图像测量系统提出对于含有细颗粒较多的级配砂, 应该考虑颗粒级配的不均匀系数的影响; Raju^[13]研究发现有效侧限压力和试样周边的孔隙特性等在一定程度上影响着橡皮膜的嵌入; 前人也另外探究了土颗粒形状^[14]、试样表面光滑程度^[15]等对嵌入量的影响。但是针对不同因素的影响, 不同学者未能达成共识。

本文以双江口土石坝坝壳粗粒料为研究对象, 提出一种测量橡皮膜嵌入量的新方法, 对橡皮膜嵌入的影响因素进行分析研究, 总结得出预测橡皮膜嵌入量的经验公式, 并对经验公式进行验证, 为粗颗粒土试验过程中修正橡皮膜嵌入, 保证试验体变测量的准确性提供重要支撑。

1 橡皮膜嵌入量测量新方法

1.1 基本原理

本文基于朱俊高等^[16]研制的新型静止侧压力系数试验仪 (简称新型 K_0 试验仪), 提出一种测量橡皮膜嵌入量的新方法。

首先采用刚性壁的新型 K_0 试验仪进行 K_0 固结试验, 测得土体的 K_0 值及对应的应力条件下体积应变, 其值等于竖向应变 ε_1 。然后以测得的 K_0 值进行三轴 K_0 固结试验, 对三轴试样施加同样应力条件, 同时保证两种试验的试样制样方法、孔隙比、级配等条件相同。这样, 测得三轴 K_0 固结试验中试样的排水量 ΔV 包含试样真实的体积变形 ΔV_s 及橡皮膜嵌入量 ΔV_m 。

假定三轴试样体积 V , 则其体积应变 ε_v 可表示为

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_s}{V} + \frac{\Delta V_m}{V} = \varepsilon_{vs} + \varepsilon_{vm}, \quad (1)$$

式中, ε_v 为表观体积应变, 其大小比试样实际体积应变要大。

刚性壁新型 K_0 仪的 K_0 试验和柔性壁的三轴 K_0 试验的试样材料及应力条件相同, 由于位移边界条件不同, 刚性壁的 K_0 试验测得的试样体积应变与柔性壁三轴 K_0 试验中试样的真实应变可能略有差异, 但在本论文试验中该差异对结果影响较小, 在此假设两者相等, 即 $\varepsilon_{vs} = \varepsilon_1$ 。因此,

$$\varepsilon_{vm} = \frac{\Delta V_m}{V} = \varepsilon_v - \varepsilon_1. \quad (2)$$

橡皮膜嵌入量（体积）为

$$\Delta V_m = (\varepsilon_v - \varepsilon_1) V \quad (3)$$

由于三轴试验中橡皮膜嵌入只发生在试样侧表面，故本文使用单位面积橡皮膜嵌入量进行分析。依据式（3），单位面积橡皮膜嵌入量为

$$\delta_m = (\varepsilon_v - \varepsilon_1) \frac{D}{4} \quad (4)$$

式中， D 为三轴试样的直径， ε_v 为三轴 K_0 固结试验中表观体变， ε_1 为刚性壁 K_0 固结试验测得的试样体积应变。

1.2 试验仪器

本文所采用的刚性壁 K_0 试验仪是基于文献[16]基本原理研制的新型 K_0 试验仪。该试验仪主要由加载系统、压力室与量测系统构成，结构示意图如图 1 所示。试验仪的主体部分（压力室）由两块半圆形的钢环组合成一个圆柱空心的试样筒，圆柱空心高 12 cm，直径 10 cm，此即为试样的高度和直径。两半圆形钢环外侧各有一个豁口用来安装一对拉力传感器。试样的上下各放置两块半圆形钢板（传力板），上传力板的上面和下传力板的下面放置若干钢珠，因为试验时试样侧向挤压压力室，钢珠的设置使得试样端面几乎无摩擦力。

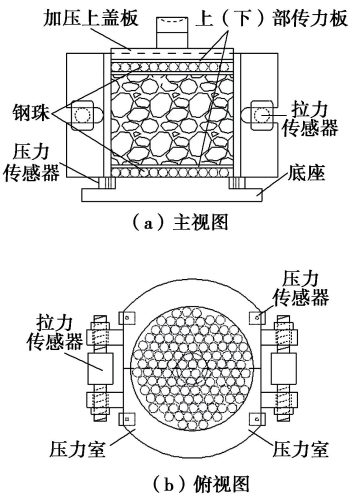


图 1 新型 K_0 试验仪压力室示意图

Fig. 1 Schematic diagram of new K_0 tester

在压力室四角底部安装 4 个压力传感器，用于测定试验时试样所受的向下的侧壁摩擦力。认为试样上实际的竖向应力 σ_z 等于加压盖板上的压力减去该侧壁摩擦力。

由两个拉力传感器的测力 F 可计算试样侧向应力 $\sigma_z = F / (D_0 H)$ ，其中， D_0 为试样直径， H 为试样高度。因此，静止侧压力系数 K_0 为

$$K_0 = \frac{\sigma_z}{\sigma_x} \quad (5)$$

三轴 K_0 试验采用常规应力控制式三轴剪切仪进行。试样直径为 101 mm，高度为 200 mm。

1.3 试验方案

试验土样采用双江口土石坝的坝壳粗粒料。该材料为花岗岩材质，灰白色。采用单粒组土料来进行橡皮膜嵌入量的研究。具体分为 3 组：粒径为 10~20 mm 的粗颗粒土料为一组，粒径为 5~10 mm 的为一组，粒径为 2~5 mm 的为一组。各粒组土料如图 2 所示。

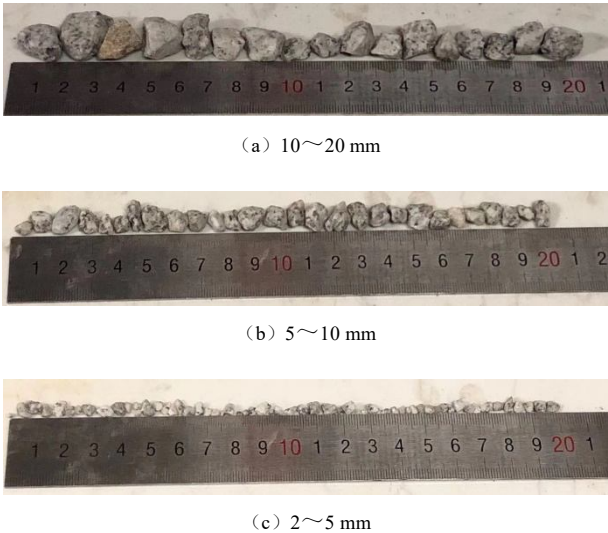


图 2 单颗粒组土料

Fig. 2 Soil materials of single particle group

运用新型 K_0 试验仪对双江口堆石坝粗颗粒土进行了 K_0 固结试验。试验土料为 3 种单粒组粗粒土，分别为 2~5，5~10，10~20 mm。采用干装法装样，用击实锤将试样分 4 层逐层击实，并对试样进行饱和。对 3 种粒径的单粒组料进行孔隙比为 0.6，0.7，0.8，0.9 的 K_0 试验，共计 12 个试样，依次编号为 A1~A12，同时测得相应试样试验时的 K_0 值和试验竖向应变（即为体积应变）。

运用应力控制式三轴剪切仪对上述单粒组料进行粗颗粒土的三轴 K_0 固结试验时，选用厚度为 1.5 mm 的橡皮膜。采用击实法制样并水头饱和。同样，对 3 种粒径的单粒组料进行孔隙比为 0.6，0.7，0.8，0.9 的试验，共计 12 个试样，依次编号为 B1~B12。试验加载过程中，控制试样的 K_0 值等于相应新型 K_0 试验仪测得的 K_0 值，同时测得试样排水量，可计算表观体积应变。

2 试验结果分析

2.1 有效净压力对橡皮膜嵌入量的影响

依据新型 K_0 仪的 K_0 固结试验，三轴仪 K_0 固结试验及式（4），将 A1~A12 和 B1~B12 试样的结果进

行整理得到单位面积橡皮膜嵌入量 δ_m 。4 种不同初始孔隙比试样的 δ_m 与有效净压力 p/p_a 的关系如图 3 (a)~3 (d) 所示 (p_a 为标准大气压, 取为 0.1 MPa)。图 3 中, “点” 为试验实测值, “曲线” 为本文第 3 节提出的经验公式的预测值。需要说明的是, 这里的 p 实际就是试样的有效平均正应力。

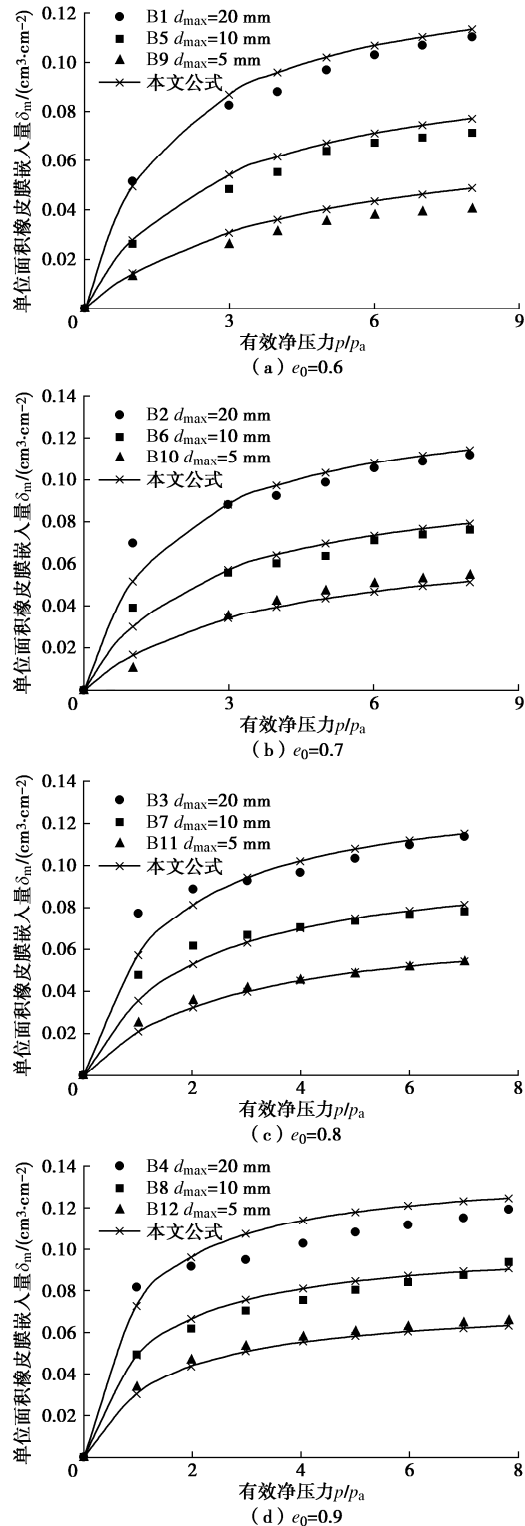


图 3 单位面积橡皮膜嵌入量 $\delta_m - p/p_a$ 的关系曲线

Fig. 3 Relation curves of δ_m and p/p_a

从图 3 可以看出, 有效净压力 p 对橡皮膜嵌入量影响显著。孔隙比较小时, 随 p 的增大, δ_m 缓慢增加; 孔隙比较大情况下, 在有效净压力较小, 如 $p < 100$ kPa 时, δ_m 随 p 增大的速率较大, 即初始段很陡, 嵌入量大部分在低有效净压力下完成, 其后, 曲线斜率逐渐减小, 即 δ_m 的变化率逐步减小。

2.2 初始孔隙比对橡皮膜嵌入量的影响

土体在松散状态下, 其表面存在较大的孔隙。在相同的压力下, 橡皮膜更易嵌入到较大的孔隙之中。因此, 土体的密实度越小, 其橡皮膜嵌入量越大。目前为止, 关于密实度这一影响因素的研究极少。

描述土体密实度的方式有很多, 如密度、相对密实度和孔隙比等。本文采用初始孔隙比 e_0 来描述试样的密实度。为分析初始孔隙比对橡皮膜嵌入量的影响, 基于前文试验结果, 将同一围压、同一最大粒径试样的试验结果汇总, 绘出 $\delta_m - e_0$ 关系曲线, 如图 4 所示。

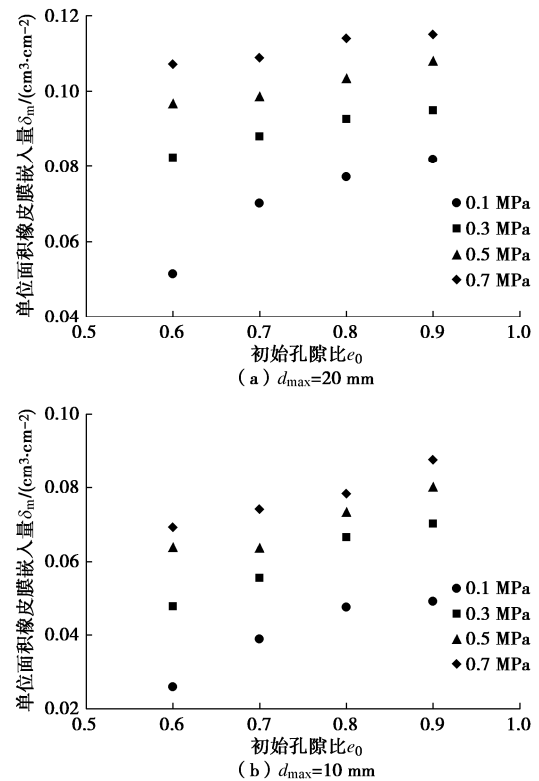


图 4 单位面积橡皮膜嵌入量 $\delta_m - e_0$ 的关系曲线

Fig. 4 Relation curves of δ_m and e_0

从图 4 可以看出, 同一有效净压力 p 下, 随着初始孔隙比 e_0 的增大, 单位面积橡皮膜嵌入量 δ_m 呈现出增大的趋势。不同有效净压力下, e_0 对嵌入量的影响差异也很大。比如, p 较低情况下, 随着初始孔隙比 e_0 从 0.6 增大到 0.9 时, 嵌入量 δ_m 的增幅较大, 最大增幅达到了 90%。但当 p 增大后, 随着 e_0 的增大, δ_m 的增幅逐渐减小。如 p 为 0.7 MPa 下, $e_0 = 0.9$ 的 $d_{\max} = 10$ mm 试样的嵌入量仅比 $e_0 = 0.6$ 同粒径的试样

增大 25%左右。

2.3 级配条件对橡皮膜嵌入量的影响

关于级配条件对橡皮膜嵌入量的影响,国内外学者取得了较多的研究成果。但在表征级配条件方面仍然缺乏共识,如孙益振等^[12]、Tokimatsu 等^[17]、Baldi 等^[18]多数学者选择采用平均粒径 d_{50} 来表征级配条件,而 Nicholson 等^[14]、Seed 等^[8]则认为 d_{20} 更为合理一些。本文采用平均粒径 d_{50} 来表征土体的级配条件。试验所采用单粒组试样的粒径区间分别为 10~20, 5~10, 2~5 mm, 其平均粒径 d_{50} 分别为 15, 7.5, 3.5 mm。

根据图 3 所示的关系曲线可知,相同有效净压力 p 下,不同 d_{\max} (对应不同的 d_{50}) 试样的 $\delta_m - p/p_a$ 的关系曲线存在较大的差异,级配条件对橡皮膜嵌入量有十分显著的影响。从图 3 可以看出,随着 d_{50} 的增大,单位面积橡皮膜嵌入量呈明显增大的趋势。如对应相同 p , $d_{50}=15$ mm 时试样的嵌入量约为 $d_{50}=3.5$ mm 试样的 (2~3) 倍。因此,本文用平均粒径 d_{50} 来反映级配对橡皮膜嵌入量的影响。

3 橡皮膜嵌入量经验公式

上节的分析表明,有效净压力、级配(以 d_{50} 表述)和初始孔隙比对橡皮膜嵌入量影响显著,因此,本节在建立橡皮膜嵌入量计算公式时,考虑这 3 方面的因素。

进一步研究 $\delta_m - p/p_a$ 的关系曲线,发现单位面积橡皮膜嵌入量 δ_m 与有效净压力 p/p_a 之间呈现较为良好的双曲线型关系。因此,单位面积橡皮膜嵌入量 δ_m 与 p/p_a 之间的关系可表示为

$$\delta_m = \frac{p/p_a}{\alpha + \beta \cdot p/p_a}, \tag{6}$$

式中, p 为有效净压力, α , β 为拟合参数。本文 3 种料的试验结果拟合得到的参数 α , β 见表 1。

表 1 $\delta_m - p/p_a$ 之间关系的拟合参数 α , β 数值表

Table 1 Numerical table of fitting parameter α and β for

relationship between δ_m and p/p_a

参数	孔隙比	$d_{50}=3.5$ mm	$d_{50}=7.5$ mm	$d_{50}=15$ mm
α	0.6	58.19	29.47	13.56
	0.7	67.55	19.00	8.87
	0.8	32.12	12.59	8.46
	0.9	20.34	15.23	7.24
β	0.6	16.49	9.88	7.07
	0.7	12.21	9.90	7.34
	0.8	12.71	10.61	7.15
	0.9	11.95	8.58	7.23

根据 2.2 节和 2.3 节的分析,初始孔隙比 e_0 和平均粒径 d_{50} 也对橡皮膜嵌入量有较大影响,容易推知参数 α , β 应该是 e_0 和 d_{50} 的函数。首先,笔者对表 1

的数据进行了深入分析,发现 d_{50} 与参数之间有良好的幂函数关系,而其两个拟合系数与 e_0 之间存在较好的线性关系,因此,参数 α 与 e_0 和 d_{50} 的关系为

$$\alpha = (a_1 e_0 + b_1) d_{50}^{(a_2 e_0 + b_2)}, \tag{7}$$

式中, a_1 , b_1 , a_2 , b_2 为拟合参数,具体的取值分别为 -526.18, 522.25, 0.90, -1.56。

分析表 2 参数 β 的数值发现,同一平均粒径 d_{50} 下不同初始孔隙比 e_0 时,参数 β 相差不大,只有 $d_{50}=3.5$ mm, $e_0=0.6$ 时的参数 β 稍大,达到了 16.49。遂对同一 d_{50} 下的参数 β 取平均值,并发现 β 平均值与 d_{50} 之间有良好的幂函数关系:

$$\beta = a_3 d_{50}^{b_3}, \tag{8}$$

式中, a_3 , b_3 为拟合参数,具体的取值分别为 22.75, -0.42。

综上,综合有效净压力 p , 平均粒径 d_{50} 和初始孔隙比 e_0 的影响因素,可以得出单位面积橡皮膜嵌入量经验公式为

$$\delta_m = \frac{p}{(a_1 e_0 + b_1) d_{50}^{(a_2 e_0 + b_2)} p_a + a_3 d_{50}^{b_3} p}, \tag{9}$$

式中,参数 a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , a_3 , b_3 的取值如前所述。

4 经验公式的验证

将式 (9) 拟合的曲线绘制于图 3,从图 3 中可以看出,拟合曲线与试验点的吻合程度较高,相关系数在 0.950 以上,并且绝大部分在 0.994 以上。与对应的试验点相比,式 (9) 所预测数据的误差绝大部分在 5% 以下,只有个别数据点达到 10% 以上且最大不超过 19%。

由于本文单位面积橡皮膜嵌入量经验公式是基于单粒组料试验的结果得到,为了进一步验证该公式的普遍适用性,本节引用已有文献的多粒组级配土料的试验结果对公式进行验证。由于已有的关于橡皮膜嵌入的研究较少,能找到的具有 d_{50} 和 e_0 的橡皮膜嵌入试验研究更少,这里只能引用文献[19, 23]的试验结果进行初步验证。

首先引用文献[19]中某心墙堆石坝堆石料的试验数据,其中,试验土料参数为 $d_{50}=4.42$ mm, $e_0=0.53$ 。采用式 (9) 进行拟合,并与文献[18, 20~21]所推导解析解得出的嵌入量结果进行对比,如图 5 所示。

从图 5 可以看出,除了 Molenkamp 等^[22]的解析解,本文经验公式 (9) 较其它公式有更好的拟合效果。在 1.2 MPa 前,根据本文经验公式计算得到的单位面积橡皮膜嵌入量值基本与试验值重合,而在 1.2 MPa 后,式 (9) 计算值略微低于试验值,但是整体仍然随着有效净压力 p 的增大呈增大趋势。

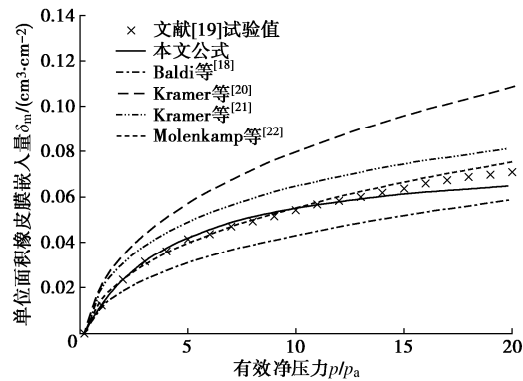


图 5 本文公式与其他公式及文献[19]试验结果对比

Fig. 5 Comparison among formula in this paper, other formulas and experimental results of Reference [19]

为进一步验证式(9)的普遍适用性,笔者这里再采用文献[23]中某土石坝坝壳粗颗粒土的试验结果进行验证。文献[23]试验土料参数为 $d_{50} = 7.5\text{mm}$, $e_0 = 0.6$ 。按式(9)计算出 δ_m , 并与文献[18, 20~22]所推导解析解结果进行对比, 如图 6 所示。

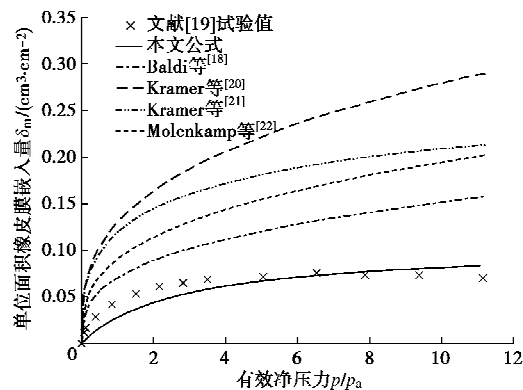


图 6 本文公式与其他公式及文献[23]试验结果对比

Fig. 6 Comparison among formula in this paper, other formulas and experimental results of Reference [23]

由图 6 可以得出, 在初始阶段, 公式计算值虽然略低于试验值, 但是相较于其它解析解精度更高; 整体上, 本文提出经验公式(9)的计算值与试验值最贴合, 能够较好预测该级配料的橡皮膜嵌入量, 这可能与该级配料粒径分布较均匀有关。

5 结 论

本文提出一种新的粗粒土橡皮膜嵌入量测量方法。使用新型静止侧压力系数试验仪及应力控制式三轴试验仪对双江口堆石料进行了 K_0 试验, 并基于试验结果提出了能够较好预测单位面积橡皮膜嵌入量的经验公式, 同时验证了该经验公式的适用性, 得到 4 点结论。

(1) 通过刚性壁的新型 K_0 试验仪及柔性壁的三轴试验仪进行 K_0 试验, 基于本文提出的方法可方便的

得出粗颗粒土橡皮膜嵌入量。

(2) 有效净压力 p 、平均粒径 d_{50} 和初始孔隙比 e_0 均对橡皮膜嵌入量有较大影响, 某单一因素的改变, 都会引起橡皮膜嵌入量的明显变化。例如, 有效净压力 p 较低时, 初始孔隙比 e_0 从 0.6 增大到 0.9 时, 嵌入量的增幅达到 90% 左右。

(3) 根据试验结果总结出了一个能考虑多因素的单位面积橡皮膜嵌入量经验公式; 与前人的解析解及所能找到的已有试验结果进行了对比, 验证了本文经验公式的合理性与准确性, 可为复杂路径三轴试验时进行体变修正使用。

(4) 只找到两种试验结果对本文经验公式进行验证, 该公式的普遍适用性有待更多试验资料的验证。

参考文献:

- [1] 柏树田, 周晓光, 晁华怡. 应力路径对堆石变形特性的影响[J]. 水力发电学报, 1999, 18(4): 76 - 80. (BAI Shu-tian, ZHOU Xiao-guang, CHAO Hua-yi. Effects of stress path on the deformation of rockfill materials[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1999, 18(4): 76 - 80. (in Chinese))
- [2] 张丙印, 吕明治, 高莲士. 粗粒料大型三轴试验中橡皮膜嵌入量对体变的影响及校正[J]. 水利水电技术, 2003, 34(2): 30 - 33, 67. (ZHANG Bing-yin, LÜ Ming-zhi, GAO Lian-shi. Correction of membrane penetration in large-scale triaxial tests for granular materials[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(2): 30 - 33, 67. (in Chinese))
- [3] NEWLAND P L, ALLELY B H. Volume changes during undrained triaxial tests on saturated dilatant granular materials[J]. Géotechnique, 1959, 9(4): 174 - 182.
- [4] SELIG E T, VAID Y P, NEGUSSEY D. A critical assessment of membrane penetration in the triaxial test[J]. Geotechnical Testing Journal, 1984, 7(2): 70.
- [5] BANERJEE N G. Cyclic behavior of dense coarse-grained materials in relation to the seismic stability of dams[J]. UCB/EERC-79/13, 1979.
- [6] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, THURAIRAJAH A. An evaluation of test data for selecting a yield criterion for soils[M]. West Conshohocken: ASTM International, 1964.
- [7] ETRIS S F, LIEB K C, SISCA V K, et al. The membrane effect in triaxial testing of granular soils[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1973, 1(1): 37.
- [8] SEED R B, ANWAR H. Development of a Laboratory Technique for Correcting Results of Undrained Triaxial Shear

- Tests on Soils Containing Coarse Particles for Effects of Membrane Compliance[R]. Palo Alto: Tanford Univ Calif Dept of Civil Engineering, 1987.
- [9] 吉恩跃, 朱俊高, 王青龙, 等. 粗颗粒土橡皮膜嵌入试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(2): 346 - 352. (JI En-yue, ZHU Jun-gao, WANG Qing-long, et al. Experiment of membrane penetration on coarse grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(2): 346 - 352. (in Chinese))
- [10] KIEKBUSCH M, SCHUPPENER B. Membrane penetration and its effect on pore pressures[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, **103**(11): 1267 - 1279.
- [11] 刘荟达, 袁晓铭, 王 鸾, 等. 宽级配砾性土橡皮膜嵌入量计算新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(4): 804 - 816. (LIU Hui-da, YUAN Xiao-ming, WANG Luan, et al. A new calculation method for membrane penetration in wide-graded gravelly soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(4): 804 - 816. (in Chinese))
- [12] 孙益振, 邵龙潭, 王助贫, 等. 基于数字图像测量系统的砂砾土试样膜嵌入问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(3): 618 - 622. (SUN Yi-zhen, SHAO Long-tan, WANG Zhu-pin, et al. Study on membrane penetration in sandy soil specimens based on digital image measurement system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(3): 618 - 622. (in Chinese))
- [13] RAJU V S. Undrained triaxial tests to assess liquefaction potential of sands-Effect of membrane penetration[C]//Proc International Symposium on Soil under Cyclic and Transient Loading. Swansea, 1980: 483 - 494.
- [14] NICHOLSON P G, SEED R B, ANWAR H A. Elimination of membrane compliance in undrained triaxial testing: I measurement and evaluation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, **30**(5): 727 - 738.
- [15] TANAKA Y, KOKUSHO T, YOSHIDA Y, et al. A method for evaluating membrane compliance and system compliance in undrained cyclic shear tests[J]. Soils and Foundations, 1991, **31**(3): 30 - 42.
- [16] 朱俊高, 陆阳洋, 蒋明杰, 等. 新型静止侧压力系数试验仪的研制与应用[J]. 岩土力学, 2018, **39**(8): 3071 - 3076. (ZHU Jun-gao, LU Yang-yang, JIANG Ming-jie, et al. Development and application of new apparatus for K_0 test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(8): 3071 - 3076. (in Chinese))
- [17] TOKIMATSU K, NAKAMURA K. A simplified correction for membrane compliance in liquefaction tests[J]. Soils and Foundations, 1987, **27**(4): 111 - 122.
- [18] BALDI G, NOVA R. Membrane penetration effects in triaxial testing[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, **110**(3): 403 - 420.
- [19] 吉恩跃, 朱俊高, 余 挺, 等. 橡皮膜嵌入解析解及试验验证[J]. 岩土力学, 2018, **39**(8): 2780 - 2786. (JI En-yue, ZHU Jun-gao, YU Ting, et al. Analytic solution and test validation of membrane penetration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(8): 2780 - 2786. (in Chinese))
- [20] KRAMER S, SIVANESWARAN N. A nondestructive, specimen-specific method for measurement of membrane penetration in the triaxial test[J]. Geotechnical Testing Journal, 1989, **12**: 50 - 59.
- [21] KRAMER S L, SIVANESWARAN N, DAVIS R O. Analysis of membrane penetration in triaxial test[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, **116**(4): 773 - 789.
- [22] MOLENKAMP F, LUGER H J. Modelling and minimization of membrane penetration effects in tests on granular soils[J]. Géotechnique, 1981, **31**(4): 471 - 486.
- [23] 王思睿. 粗颗粒土三轴试验橡皮膜嵌入量研究[D]. 南京: 河海大学, 2020. (WANG Si-rui. Research on Rubber Film Embedding Amount in Triaxial Test of Coarse-Grained Soil [D]. Nanjing: Hohai University, 2020. (in Chinese))