

DOI: 10.11779/CJGE201802016

# 粗颗粒土橡皮膜嵌入试验研究

吉恩跃<sup>1, 2</sup>, 朱俊高<sup>1, 2</sup>, 王青龙<sup>3</sup>, 蒋明杰<sup>1, 2</sup>

(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 210098; 2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098;  
3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:** 对于粗颗粒土三轴固结排水剪试验, 橡皮膜嵌入是影响试验体变测量的最重要因素。通过在中三轴试样中埋置不同直径铁棒的方法进行等向固结试验来推求橡皮膜嵌入量。试验表明, 试样土体体积与排水量呈较好的线性关系, 基此给出了各个围压下的膜嵌入量。指出随着围压的增大, 膜嵌入量逐渐增大, 约 0.8 MPa 后, 嵌入量的增速变缓, 嵌入量占实时总排水量的比例可达 31.0%~40.7%。由于粗颗粒土的各向异性, 目前所用最多的 Newland 和 Alley 所提出的方法总体略高估了膜嵌入的大小, 随着围压的增大, 各向异性减弱, 围压为 2 MPa 时嵌入量差异仅有 0.22% 的体变。最后, 对比 4 种解析解发现 Molenkamp 和 Luger 的解析解最为接近试验值。针对粗颗粒土, 需要进行更多的试验来建立颗粒破碎率和相对密度等与系数  $\eta$  的关系来修正解析解。

**关键词:** 粗颗粒土; 橡皮膜嵌入; 等向固结; 各向异性; 解析解

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)02-0346-07

作者简介: 吉恩跃(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事土石坝工程及粗颗粒土本构方面研究。E-mail: music4388@126.com。

## Experiment of membrane penetration on coarse grained soil

JI En-yue<sup>1, 2</sup>, ZHU Jun-gao<sup>1, 2</sup>, WANG Qing-long<sup>3</sup>, JIANG Ming-jie<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Power China Chengdu  
Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** The membrane penetration is the most important factor influencing the measurement of volume change for triaxial consolidated-drained shear tests on coarse grained soil. The volume changes of membrane penetration are deduced from the consolidation tests by the method that iron rods with different diameters are embedded in the triaxial samples. The test results indicate the linear relationship between the sample volume and the displacement. Based on the test results, the penetration volumes are given under each confining pressure. The volume of membrane penetration increases by the increase of confining pressure, however, the increasing speed becomes slow down after 0.8 MPa. The proportion of penetration volume in total displacement can be 31.0%~40.7%. The most used method proposed by Newland and Alley overestimates the penetration volume. Anisotropy of the triaxial sample decreases with the increase of confining pressure. The difference of penetration volume is only 0.22% of volume change when the confining pressure reaches 2 MPa. The analytic solution deduced by Molenkamp and Luger agrees well with the test results among the four analytic solutions. For the coarse grained soil, more tests should be done to establish the relation among the particle breakage rate, the relative density and the coefficient  $\eta$  to correct the analytical solution.

**Key words:** coarse grained soil; membrane penetration; isotropic consolidation; anisotropy; analytic solution

## 0 引言

近年来, 越来越多的高土石坝已在设计或建设中, 准确预测其沉降及内部应力情况显得尤为重要。计算所需的本构模型参数依赖于三轴试验的结果<sup>[1]</sup>, 所以试验结果的准确性需要得到保证。目前, 研究较多的影响三轴试验结果的因素大多是端部约束<sup>[2]</sup>、成样方

法、橡皮膜约束<sup>[3]</sup>等, 国内学者对于橡皮膜嵌入的研究少之又少。对粗颗粒土, 试样表面凹凸不平, 围压

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479052); 国家重点研发计划项目(2017YFC0404800); 教育部“创新团队发展计划”项目(IRT\_15R17); 研究生科研与实践创新计划项目(20141B1605313)  
收稿日期: 2016-11-14

的施加会使橡皮膜嵌入到试样表面颗粒的孔隙中, 此种现象称为橡皮膜嵌入。排水试验需要精确量测试验过程中试样体积变化; 不排水试验则需要精确量测孔隙水压力的变化。由于孔隙水应力的存在, 不排水试验中的膜嵌入问题比排水试验复杂的多, 而且对于粗颗粒土, 一般只做排水试验, 本文仅研究排水试验的膜嵌入对体变量测的影响。

目前, 对于橡皮膜嵌入的研究思路, 大体上可以分为两种: ①基于一些假定通过理论或者试验的手段推出或测出橡皮膜的嵌入量, 然后对试验结果进行修正; ②在试验过程中采取某些措施直接减小以至于消除橡皮膜的嵌入的影响, 两者各有优缺点。

Newlan 等<sup>[4]</sup>在假定三轴试样为各向同性的前提下, 基于等向固结试验得出膜嵌入量。同样, 张丙印等<sup>[5]</sup>据此假设进行了粗粒料大型三轴等向固结试验, 发现膜嵌入量大小与围压的关系可以用双曲函数来表示。Roscore 等<sup>[6]</sup>提出了在砂土试样中心埋置与试样同高但直径各异 (0.64~3.49 cm) 铜棒的方法来确定膜嵌入量。Frydman 等<sup>[7]</sup>用不同壁厚的空心圆柱试样对不同粒径 (0.18, 0.3, 1.85 mm) 的玻璃球做了等向固结排水试验。通过测得的体变与试样表面积之间的关系来确定橡皮膜嵌入量。Kiekbusch 等<sup>[8]</sup>采用了在制备好的圆柱形试样表面孔隙中涂满液体橡胶的方法减小橡皮膜嵌入的影响, 结果表明此方法可以减小 85% 的嵌入影响。Raju 等<sup>[9]</sup>研究了橡皮膜嵌入对砂土液化的影响, 进行了 3 种不同的试验: 使用正常的橡皮膜、在橡皮膜内放置 0.1 mm 厚的乙烯条、在橡皮膜和试样之间涂抹黏性的液态聚氨酯。Lin 等<sup>[10]</sup>假定在相同应力状态下加载和卸载时嵌入量是相同的, 用双曲线拟合了相同密度和围压下平均粒径和嵌入量的关系。Bohac 等<sup>[11]</sup>基于  $K_0$  应力路径试验研究了膜嵌入对体变的影响, 用对数和双曲线函数对试验结果进行了解析分析, 指出试验的可靠性比理论推导大。Ali 等<sup>[12]</sup>利用水泥将试样胶结起来, 假设胶结的试样有足够的刚度抵抗变形, 则测出的排水量就等于膜嵌入量。Raghunandan 等<sup>[13]</sup>用黏合剂将平均粒径为 0.31 mm 的砂黏在直径为 100 mm 圆柱形混凝土芯表层, 认为低围压下混凝土不发生体积变形, 测出不同围压下的排水量即为膜嵌入量。

上述确定橡皮膜嵌入量的试验方法主要是针对砂, 针对粗颗粒土橡皮膜嵌入的研究少之甚少, 而且上述试验的围压较低 (200 kPa 以内)。对于在试样表层涂液体胶或贴薄铜片等直接减小以达到消除橡皮膜的嵌入的方法, 一方面会增大试样的径向刚度, 另一方面粗颗粒土粒径较大, 对于高围压下试样, 还会有部分嵌入, 因此, 此方法不再适用。所以只能通过

试验手段间接得出嵌入量的大小, 如上文提到的在试样中心埋置铜棒的方法。由于采用和试样同高度的铜棒会增大试样的端部约束, 限制其轴向变形, 此方法还需进一步改进。此外, 对于大围压下的粗颗粒土, Roscore 等<sup>[6]</sup>得出的排水量与棒直径之间呈线性关系的结论还需试验进一步验证。

本文通过在中三轴试样中心埋置等高度不同直径铁棒的方法进行等向固结试验来研究粗颗粒土橡皮膜嵌入的影响, 提出相应推求橡皮膜嵌入量的方法, 对比常用修正方法的差异, 分析理论解的误差, 为研究粗颗粒土橡皮膜嵌入的影响特别是高围压下的橡皮膜嵌入提供了必要的测量和分析方法, 同时指出了后续研究的思路。

## 1 试验原理

本文研究中, 三轴试验的试样高度为 20 cm, 直径为 10.1 cm, 如图 1 所示。通过在三轴试样中心埋置不同直径铁棒的方法进行等向固结试验来研究粗颗粒土橡皮膜嵌入的影响, 其原理如下。

从图 1 知, 本文中的试样是指包含土体及铁棒的圆柱体, 其中试样土体体积指试样的总体积减去铁棒体积。当然, 如果铁棒直径为 0, 意味着试样全部为土体。

对于本文所用的三轴等向固结排水试验, 在不考虑铁棒体积变形的情况下, 排水量应等于试样土体体积变形加上橡皮膜的嵌入量, 即

$$\Delta V = \Delta V_s + \Delta V_m, \quad (1)$$

式中,  $\Delta V$  为排水量,  $\Delta V_s$  为试样土体体积变形,  $\Delta V_m$  为橡皮膜嵌入量。排水量  $\Delta V$  可以直接测得,  $\Delta V_s$  和  $\Delta V_m$  的大小不能通过试验直接测得。

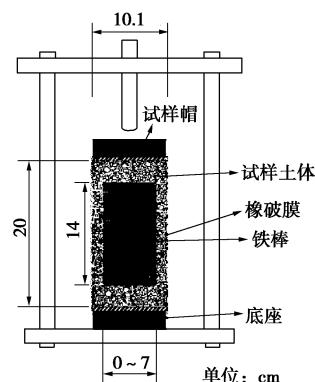


图 1 三轴等向固结试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of triaxial isotropic consolidation tests

根据式 (1), 如果试样土体体积等于 0 时, 则测得的排水量应为膜嵌入量, 但实际上试验不能做到土体体积等于 0, 因此不能直接测得膜嵌入量大小。但

是, 如果能够假定含不同直径铁棒的试样在相同围压下  $\Delta V_m$  保持不变, 则试样土体体积不同, 对应土体体积变形  $\Delta V_s$  不同, 从而可建立不同  $\Delta V_s$  和  $\Delta V$  的关系, 进一步推得土体体积等于 0 时的排水量。

三轴试验橡皮膜嵌入示意图如图 2 所示。可以看出, 橡皮膜的嵌入是指在一定侧压力下膜嵌入到表层的土颗粒间, 基本不会嵌入到内部土体孔隙中。那么假设在相同规格的橡皮膜、相同的表层土体颗粒大小、颗粒排列和相同的侧压力下, 试样内部土体体积不同的试样得到的膜的嵌入量应相同。即试样内部土体体积的大小不影响最终膜嵌入量的大小。也就是说依据此假设, 可认为含不同直径铁棒的试样在相同围压下  $\Delta V_m$  能保持不变。这样, 上文所述推求土体体积等于 0 时排水量的思路即可成立。

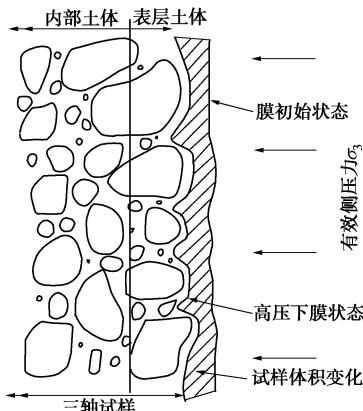


图 2 三轴试验橡皮膜嵌入示意图

Fig. 2 Schematic diagram of membrane penetration in triaxial tests

基于上述试验原理及假设, 本文通过在三轴试样中心埋置等高度不同直径铁棒的方法来改变试样土体体积  $\Delta V_s$ 。通过等向固结试验, 测得各围压下含不同直径铁棒试样的排水量  $\Delta V$ 。分别建立  $\Delta V_s$  与  $\Delta V$  的关系推得土体体积等于 0 时各个围压下排水量, 即为膜嵌入量。

## 2 试验方案与试验用料

### 2.1 试验方案

分别对 4 种方案 (不同直径铁棒) 的试样进行等向固结试验, 即试样中心铁棒直径为 0 (不放置铁棒), 2.5, 4.5, 7.0 cm, 铁棒长度均为 14 cm, 具体的尺寸见图 1。每种方案进行了 3 个平行试验, 共计 12 个试样。

上文提到 Roscore 等<sup>[6]</sup>在砂土试样中心埋置和试样等高但直径各异的铜棒来研究膜嵌入的影响。其缺点是使用和试样高度相同的铜棒必然会限制试样轴向变形的发展; 再者, 由于采用刚性试样帽, 会使应力集中于铜棒上, 使得铜棒四周土体所受的垂直应力小

于相应的径向应力, 试样不再是等向固结状态, 所以是不合理的。本文试验中, 中间埋置的铁棒比试样短, 即上下各预留 3 cm 的高度为土体, 使试样有一定的压缩空间, 减轻了对试样轴向变形的限制。

试样采用水头饱和, 饱和完成后施加围压到 100 kPa 得到排水量和轴向位移, 后逐步增加围压到 2 MPa, 每级增量为 100 kPa, 得到每一级下的排水量和轴向位移。

### 2.2 试验用料

试验所用土料为某心墙堆石坝堆石料, 母岩为花岗岩。由于铁棒的最大直径为 7 cm, 试样直径为 10.1 cm, 为了尽量减小试样的尺寸效应, 取用最大粒径为 10 mm, 最小粒径为 0.1 mm, 级配曲线见图 3。试验土料的  $C_u=5.4$ ,  $C_c=3.3$ , 特征粒径  $d_{30}=2.67$  mm,  $d_{50}=4.42$  mm,  $d_{60}=5.37$  mm。

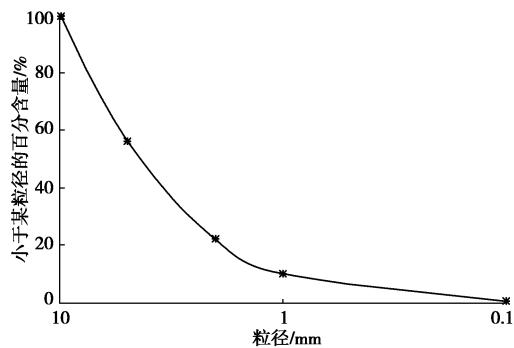


图 3 试验粗颗粒土级配曲线

Fig. 3 Grading curves of coarse grained soil in tests

为了方便制样, 本试验选用土料的相对密度较小, 试样不是很紧密, 土料基本参数见表 1。更大的密度需要制作不同规格的击实锤底板, 有待后续研究。考虑到高围压下粗颗粒土较砂更易刺破橡皮膜, 所用橡皮膜总厚度为 2.2 mm, 内层 0.2 mm, 外层 2 mm。假设两层膜协调变形, 不考虑膜和膜之间力的作用, 依据单向拉伸试验<sup>[14]</sup>测得总的弹性模量为 1.608 MPa。

表 1 试验所用土料基本参数

Table 1 Parameters of coarse grained soil in tests

天然孔隙比	最大干密度 / (g·cm⁻³)	最小干密度 / (g·cm⁻³)	试验干密度 / (g·cm⁻³)	相对密实度 / %
0.7	2.03	1.56	1.76	50

## 3 橡皮膜嵌入量分析与验证

### 3.1 试验结果与橡皮膜嵌入量分析

图 4 给出了围压从 0.1 MPa 到 2 MPa 变化过程中排水量和试样土体的体积之间的关系曲线。这里需要说明的是, 为了尽量降低试样表层土颗粒排列的随机性, 减小同一方案嵌入量的误差, 图 4 中各围压下的

试验均做了3组平行试验, 排水量取相应的平均值。另外, 由于每级围压增量为100 kPa, 共计20条曲线, 较密集, 不易区分, 图4给出了从0.1 MPa到2 MPa区间内9条关系曲线。

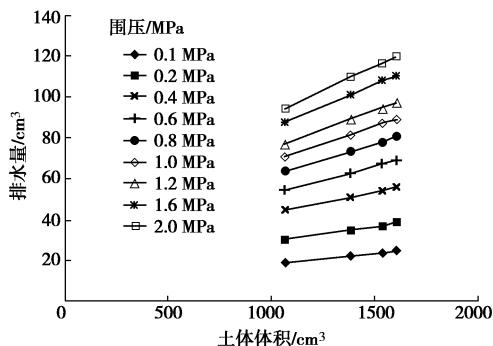


图4 土体体积与排水量关系曲线

Fig. 4 Relation curves of measured volume change versus volume of soil

从图4可以看出排水量和土体体积的线性关系非常明显, 相关系数 $R^2$ 最低的也有0.989。对各围压下的试验点进行线性拟合可得到土体体积等于0时(曲线与y轴交点)的排水量, 即为各个围压下的膜嵌入量。

Roscoe等<sup>[6]</sup>在研究橡皮膜对砂嵌入的试验中得出试样排水量和埋置在试样中的铜棒直径是线性关系的结论。为了验证此关系, 图5给出了本文试验排水量和铁棒直径的关系曲线, 可以看出其关系并不完全是线性的。当围压增大到某一值, 曲线由线性变为非线性, 围压较大时的曲线非线性更明显。笔者认为在较低的围压下( $\leq 0.3$  MPa), 线性关系还是比较理想的, Roscoe等<sup>[6]</sup>的试验也仅是在围压35~600 kPa之间。因此, 其试验结论可能仅适用于低围压, 高围压下将不再适用。

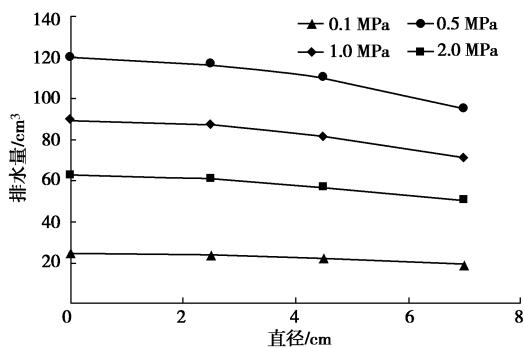


图5 铁棒直径与排水量关系曲线

Fig. 5 Relation curves of measured volume change versus diameter of iron bars

表2给出了排水量和膜嵌入量以及嵌入量占排水量百分比的具体数值大小。随着围压的增大, 嵌入量

逐渐增大, 试验初期, 嵌入量增加很快, 大约0.8 MPa后, 嵌入量的增速显著变缓。从试验的全程来看, 嵌入量占实时排水量的比例可达到31.0%~40.7%, 张丙印等<sup>[5]</sup>在其研究中也提到膜嵌入量占排水量约30%~50%。如果不对排水量进行修正, 试样体积变形会出现非常大的误差。

表2 各试验围压下膜嵌入量大小

Table 2 Volumes of membrane penetration under each confining pressure in tests

围压/MPa	排水量/cm <sup>3</sup>	嵌入量/cm <sup>3</sup>	嵌入占比/%
0.1	25.2	7.8	31.0
0.2	39.2	15.0	38.3
0.4	56.3	22.9	40.7
0.6	69.5	27.6	39.7
0.8	80.9	31.3	38.7
1.0	89.5	34.4	38.4
1.2	97.6	37.0	37.9
1.6	110.6	41.8	37.8
2.0	120.1	45.0	37.5

上文提到, 目前, 国内对粗颗粒土橡皮膜的修正大多是采用Newland等<sup>[4]</sup>提出的方法和张丙印等<sup>[5]</sup>拓展的方法。大致的步骤是, 针对不同的密度做多组等向固结试验, 取平均值, 假定试样是各向同性的, 得到嵌入体变为总体变减去3倍轴变:

$$\varepsilon_{vm} = \varepsilon_v - 3\varepsilon_a \quad (2)$$

认为嵌入量只与围压有关, 不同应力路径下的嵌入量大致相同, 再假定嵌入量与围压为双曲线关系, 拟合得到嵌入量与围压关系进行体变修正。此方法简单易实现, 不需要额外繁琐的试验方法。但是, 由于粗颗粒土在一定应力条件下各向异性性质显著<sup>[15]</sup>, 假设试样为各向同性会带来一定的误差。再者, 其后的修正方法要假定嵌入量只与围压有关, 而大量研究表明影响嵌入量的主要因素是有效侧压力 $\sigma_3$ 、特征粒径 $d_g$ (大多采用平均粒径 $d_{50}$ 来代替特征粒径 $d_g$ )、橡皮膜厚度 $t_m$ 、膜弹性模量 $E_m$ 。

为了对比本文试验方法与Newland等<sup>[4]</sup>所提出方法求得的膜嵌入体变的差异, 图6给出了本文试验方法求得的膜嵌入体变 $\varepsilon_{vm} = \Delta V_m / V_0$ 与式(2)求得的膜嵌入体变的对比曲线示意图。其中 $\Delta V_m$ 为表2中所列出的嵌入量,  $V_0$ 为试样体积。

总体来看, 式(2)求得的膜嵌入体变要大于本文试验得到的膜嵌入体变, 特别是围压较小时。笔者认为, 由于粗颗粒土的各向异性, 试样的轴向刚度要大于径向刚度, 则径向应变就大于轴向应变, 导致式(2)得到的结果偏大。如图5所示, 两者最大差异可达到0.72%的体变, 有11.5 cm<sup>3</sup>。但是, 随着围压的

增大, 其差异慢慢减小, 到 2 MPa 时, 差异仅仅有 0.22% 的体变, 即  $3.5 \text{ cm}^3$ , 而且曲线还有减小的趋势, 预计围压再增大, 其差异可能会进一步减小。原因可能是, 高应力状态下粗颗粒土比较接近于各向同性, 则在高压下式(2)求得的膜嵌入体变比较接近于本文试验值。

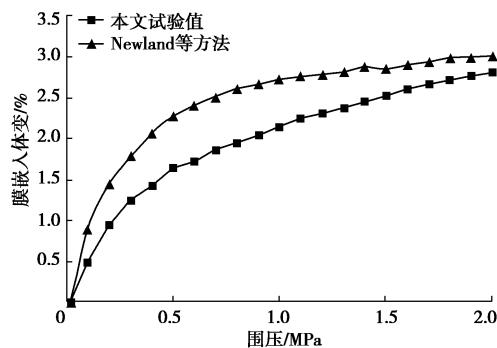


图 6 试验围压与膜嵌入体变关系曲线

Fig. 6 Relation curves of confining pressure and volumetric strain of membrane penetration

为了进一步阐述膜嵌入对试验结果的影响及不同围压下粗颗粒土各向异性的变化, 整理了等向固结试验体变修正前后轴向应变与体变关系曲线, 如图 7 所示。其中修正后的体变是指用总体变减去膜嵌入体变。可以看出, 修正前后的差异比较大, 修正前, 斜率最大达到 7.8, 不太符合实际情况, 暂且不讨论。修正后曲线斜率是随着围压逐渐减小的 (4.93~3.15), 大致可分为两个阶段, 第一阶段在约 0.9 MPa 之前, 平均斜率  $k_1$  可达 4.07, 第二阶段在约 0.9 MPa 之后, 平均斜率  $k_2$  为 3.32。在围压达到 2 MPa 时, 斜率降低到 3.15, 而理论上来讲, 轴向应变与体变曲线的斜率  $k_0$  应等于 3 (忽略橡皮膜嵌入和各向异性的影响), 也就说明此时试样已经非常接近于各向同性了。

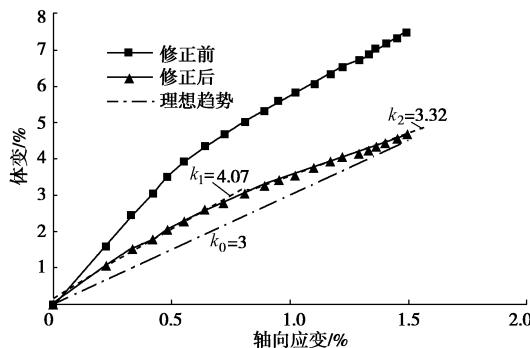


图 7 修正前后轴向应变与体变曲线

Fig. 7 Relation curves of axial strain and volumetric strain

依据上述分析结合图 6 可以总结得出, 对于本文所研究的粗颗粒土, 围压大于 2 MPa 后如若采用前文所述假设试样为各向同性的修正方法(式(2)), 误差

可能并不大, 而围压小于 0.9 MPa 用此方法则会产生一定的误差。而埋置铁棒的方法尽管比较繁琐, 但是没有依赖性的假设, 试验结果相对而言更接近真实值。

### 3.2 解析解与试验结果比较分析

上文介绍的各种试验的方法虽能一定程度上减小或者直接测得橡皮膜嵌入, 但是必须要指定的试验仪器或试验方法。从普遍应用的角度来看, 为了能方便的对常规试验进行橡皮膜嵌入修正, 在保证一定精度的前提下, 研究解析解不失为一种有效的途径。

影响膜嵌入的因素较多, 上文也提到过起决定性的因素有效侧压力、平均粒径、膜厚度、膜弹性模量, 诸如相对密度(针对砂)、颗粒形状、颗粒强度的影响很小<sup>[7, 17]</sup>。现有的解析解也都是依据这 4 个影响因素推导得到, 4 种解析解如下:

Molenkamp 等<sup>[16]</sup>,

$$\varepsilon_m = 0.16d_g \left( \frac{pd_g}{E_m t_m} \right)^{\frac{1}{3}} ; \quad (3)$$

Baldi 等<sup>[17]</sup>,

$$\varepsilon_m = 0.125d_g \left( \frac{pd_g}{E_m t_m} \right)^{\frac{1}{3}} ; \quad (4)$$

Kramer 等<sup>[18]</sup>,

$$\varepsilon_m = 0.231d_g \left( \frac{pd_g}{E_m t_m} \right)^{\frac{1}{3}} ; \quad (5)$$

Kramer 等<sup>[19]</sup>,

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_m &= 0.395d_g \left( \frac{1-\alpha}{5+64\alpha^2+80\alpha^4} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{pd_g}{E_m t_m} \right)^{\frac{1}{3}}, \\ \alpha &= 0.15 \left( \frac{pd_g}{E_m t_m} \right)^{0.34}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中  $\varepsilon_m$  为膜单位面积嵌入量;  $d_g$  为特征粒径, 上述公式均用平均粒径  $d_{50}$  来代替<sup>[8]</sup>;  $p$  为分布在橡皮膜表面的净压力;  $t_m$  为橡皮膜厚度;  $E_m$  为橡皮膜弹性模量,  $\alpha$  是根据橡皮膜变形程度确定的一个经验系数。

式(4)~(6)具体的推导过程比较相似, 即假设不同的变形模式, 基于变形方程, 用橡皮膜储存的应变能等于外力做功联立求得膜单位嵌入量。式(3)是基于板壳理论中四点支撑的均质厚度板受均布压力的大挠度计算方法<sup>[20]</sup>推得。尽管所用变形模式都不同, 推导方法也各异, 可以看出上述解析解形式完全相同, 可以归纳为

$$\varepsilon_m = \eta d_g \left( \frac{pd_{50}}{E_m t_m} \right)^{\frac{1}{3}} . \quad (7)$$

这样, 上述解析解也就是系数  $\eta$  值的大小不同, 图 8 给出了上文列出的 4 种解析解与本文试验得出嵌入量

的对比曲线示意图。总体来看, Molenkamp 和 Luger 的解和试验值更为接近, 特别是试验围压低于 0.8 MPa。但随着试验围压的增大, 其解析解慢慢偏离试验值, 到 2 MPa 时两者膜嵌入量相差了约  $2.85 \text{ cm}^3$ , 占总嵌入量的 6.3%。

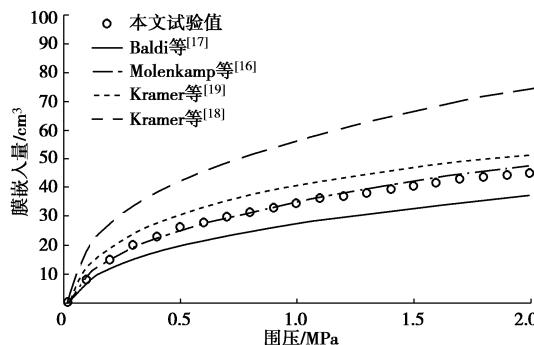


图 8 解析解与本文试验值对比关系曲线

Fig. 8 Relation curves of analytic solutions versus test data

Ali 等<sup>[12]</sup>利用水泥将砂土试样胶结起来, 假设胶结试样本身不产生体积变形, 测得的排水量即为嵌入量。试验围压从 35 kPa 增加到 235 kPa 后再降到 35 kPa。图 9 给出了其试验结果与上述 4 种解析解对比曲线示意图。可以看出 Molenkamp 和 Luger 的解和其试验值较为接近。但约 180 kPa 后, 解析解逐渐偏离试验值。

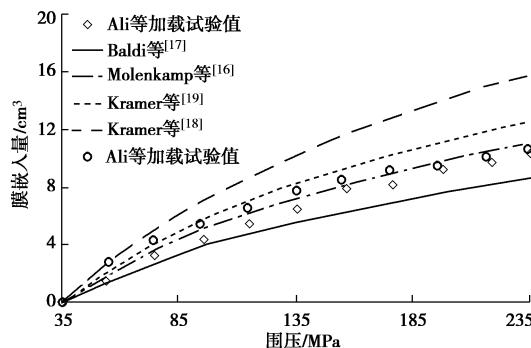


图 9 解析解与 Ali 等<sup>[12]</sup>试验值对比关系曲线

Fig. 9 Relation curves of analytic solutions versus test data of Ali et al.<sup>[12]</sup>

笔者认为, 达到一定围压时 Molenkamp 和 Luger 的解与试验结果产生差异的原因主要是由于试验过程中颗粒的重新排列和颗粒破碎。围压达到一定值后, 表层颗粒势必会发生错动, 部分细颗粒会充填到较粗颗粒的孔隙中。解析解没有考虑这个因素, 则一定围压后其计算值会偏大。另一方面, 随着围压增大, 破碎量会显著增加<sup>[21]</sup>。颗粒破碎发生时, 细粒增加, 其表层土颗粒特征粒径会减小。根据式 (3),  $d_{50}$  和  $\varepsilon_m$  是三次方比例增加的关系, 这样按照  $d_{50}$  不变计算得到的解析解结果就会大于试验值。因此 Molenkamp 和

Luger 的解析解还需进一步修正。

对于粗颗粒土的橡皮膜嵌入解析解, 后续的研究需考虑颗粒破碎等因素的影响。但由于本试验没有筛分试验完成后的土料, 无法给出定量的数值来确定破碎率和围压的关系来修正  $\eta$  值。另外, 有学者指出粗颗粒土的膜嵌入量随着相对密度的增大而减小<sup>[22]</sup>。上文提到本文的相对密度只有 50%, 更大密度的试样制备相对较难, 需要不同规格的制样器, 因此不同密度下的膜嵌入试验有待进一步开展。

综上所述, 尽管解析解的建立和推导需要基于部分假设, 要推导出包含所有影响因素的解析解比较困难。但是结合相关试验来修正解析解也是一种途径。针对粗颗粒土, 为了修正解析解, 即式 (7), 需要进行更多的试验来建立颗粒破碎率和相对密度与  $\eta$  值的关系。

## 4 结 论

本文通过在中三轴试样中埋置不同直径铁棒的方法进行等向固结试验来研究粗颗粒土橡皮膜嵌入的影响, 得到以下 5 点结论。

(1) 对于本文试验所施加的围压范围 (0~2 MPa), 试样土体体积与排水量呈较好的线性关系。

(2) 随着围压的增大, 膜嵌入量逐渐增大, 试验初期, 嵌入量增加比较快, 大部分的嵌入发生在前期, 约 0.8 MPa 后, 嵌入量的增速变缓。从试验的全程来看, 嵌入量占实时总排水量的比例可达到 31.0%~40.7%。

(3) 由于粗颗粒土的各向异性, Newland 和 Alley 所提出方法总体高估了膜嵌入的大小。随着围压的增大各向异性减弱, 围压为 2 MPa 时嵌入量差异仅有 0.22% 的体变, 因此试验围压接近 2 MPa 时采用此方法进行修正产生的误差较小。

(4) 总体来看, Molenkamp 和 Luger 的解析解最为接近试验值。

(5) 针对粗颗粒土, 需要进行更多的试验来建立颗粒破碎率和相对密度等与系数  $\eta$  的关系来修正解析解。

## 参考文献:

- [1] 何昌荣, 杨桂芳. 邓肯-张模型参数变化对计算结果的影响 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 170~174. (HE Chang-rong, YANG Gui-fang. Effects of parameters of Duncan-Chang model on calculated results[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 170~174. (in Chinese))

- [2] 王助贫, 邵龙潭. 三轴试验土样的端部影响问题研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(3): 363 - 368. (WANG Zhu-ping, SHAO Long-tan. Research on influence of end effect of soil specimens in triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(3): 363 - 368. (in Chinese))
- [3] 郭爱国, 茜平一. 三轴压缩试验中橡皮膜约束影响的校正[J]. 岩土力学, 2002, **23**(4): 442 - 445. (GUO Ai-guo, QIAN Ping-yi. Corrections for influence of membrane restraint in triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(4): 442 - 445. (in Chinese))
- [4] NEWLAND P L, ALLEY B H. Volume changes in drained triaxial tests on granular materials[J]. Géotechnique, 1957, **7**(1): 17 - 34.
- [5] 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. (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. (in Chinese))
- [6] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, THURAIRAJAH A. An evaluation of test data for selecting a yield criterion for soils[M]// Laboratory Shear Testing of Soils. ASTM International, Philadelphia, 1964.
- [7] FRYDMAN S, ZEITLEN J G, ALPAN I. The membrane effect in triaxial testing of granular soils[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1973, **1**(1): 37 - 41.
- [8] KIEKBUSCH M, SCHUPPENER B. Membrane penetration and its effect on pore pressures[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1977, **103**(11): 1267 - 1279.
- [9] RAJU V S, VENKATARAMANA K. Undrained triaxial tests to assess liquefaction potential of sands: effect of membrane penetration[C]// Proceedings of the International Symposium on Soils under Cyclic Transient loading. Rotterdam, 1980: 483 - 494.
- [10] LIN H, SELIG E T. An alternative method for determining the membrane penetration correction curve[J]. Geotechnical Testing Journal, 1987, **10**(3): 151 - 155.
- [11] BOHAC J, FEDA J. Membrane penetration in triaxial tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 1992, **15**(3): 288 - 294.
- [12] ALI S R, PYRAH I C, ANDERSON W F. A novel technique for evaluation of membrane penetration[J]. Géotechnique, 1995, **45**(3): 545 - 548.
- [13] RAGHUNANDAN M, JUNEJA A, HSIUNG B. Preparation of reconstituted sand samples in the laboratory[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **6**(1): 125 - 131.
- [14] 龚选. 粗粒土强度特性及三轴试验橡皮膜影响的研究[D]. 南京: 河海大学, 2014. (GONG Xuan. Test Study on effects of rubber membrane constraint in triaxial test and strength characteristics of coarse-grained soil[D]. Nanjing: Hohai University, 2014. (in Chinese))
- [15] 施维成, 刘汉龙, 朱俊高, 等. 粗粒土应力诱导各向异性真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **32**(5): 810 - 814. (SHI Wei-cheng, LIU Han-long, ZHU Jun-gao, et al. Stress-induced anisotropy of coarse-grained soil by true triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **32**(5): 810 - 814. (in Chinese))
- [16] MOLENKAMP F, LUGER H J. Modelling and minimization of membrane penetration effects in tests on granular soils[J]. Géotechnique, 1981, **31**(4): 471 - 486.
- [17] BALDI G, NOVA R. Membrane penetration effects in triaxial testing[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, **110**(3): 403 - 420.
- [18] KRAMER S L, SIVANESWARAN N. A nondestructive, specimen-specific method for measurement of membrane penetration in the triaxial tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 1989, **12**(1): 50 - 59.
- [19] 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.
- [20] TIMOSHENKO S P, WOINOWSKY, KRIEGER S. Theory of plates and shells[M]. Amsterdam: McGraw-hill, 1959.
- [21] 贾宇峰, 迟世春, 杨峻, 等. 粗粒土的破碎耗能计算及影响因素[J]. 岩土力学, 2009, **30**(7): 1960 - 1966. (JIA Yu-feng, CHI Shi-chun, YANG Jun, et al. Measurement of breakage energy of coarse granular aggregates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(7): 1960 - 1966. (in Chinese))
- [22] NOOR M J M, NYUIN J D, DERAHMAN A. A graphical method for membrane penetration in triaxial tests on granular soils[J]. J Inst Eng, Malaysia, 2012, **73**(1): 23 - 30.