

三轴试验中橡皮膜顺变性对体积变化和 孔隙水压力的影响

王 洪 瑾

(清华大学, 北京)

自六十年代以来, 随着对土的本构性质的深入研究, 量测系统的顺变性 (Compliance) 对三轴试验中体积变化和孔隙水压力的影响问题, 越来越受到重视, 其中尤以橡皮膜顺变性问题最值得重视。本文将搜集到的国外学者在该问题上的研究成果予以综述介绍。

一、研究 的 意 义

在使用三轴仪对砂土进行试验时, 周压力通过橡皮膜传递到试样上。由于颗粒间有孔隙, 试样表面实际凹凸不平, 施加周压力后橡皮膜会楔入试样表面颗粒的空隙中去。其楔入深度随有效周压力 σ'_3 变化而变化, 称这种现象为橡皮膜的顺变性。其楔入量称为膜顺变量或膜楔入量。

砂的一个基本特性是剪切时发生体积变化。当用普通三轴仪对饱和砂进行应力-应变特性研究时, 排水试验需要精确量测试验过程中体积变化, 不排水试验则需要精确量测孔隙水压力(简称孔压)的变化。在饱和土的排水试验中, 通常根据试样中排出或吸入的水量来确定试样的体积变化。但是由于存在膜顺变性, 使得这种量测方法出现了很大误差。如果以 ΔV 表示某一周压力下测得的总体积变化(简称总体变), ΔV_s 表示真正的砂骨架体积变化(简称砂骨架体变), ΔV_m 表示膜楔入引起的体积变化, 则 $\Delta V = \Delta V_m + \Delta V_s$ 。显然, 当周压力增加时, 量测到的体变值 ΔV 将大于砂的真正结构变形所引起的体变 ΔV_s 值。试验资料表明^[1-4]: 对于中、粗砂, 膜楔入引起的体变量测误差可达30—50%。

在三轴不排水试验中, 原假定试样的体积在试验过程中保持不变, 即 $\Delta V = 0$ (忽略孔压增加时液相体积的微量缩小)。但是由于膜楔入使得这一假定不再成立。试验开始时, 试样在周压力 σ'_3 下固结, 有效周压力使橡皮膜楔入试件表面的孔隙中, 见图1(a)。剪切时孔压上升, 有效周压力减少, 膜楔入深度随之减少, 见图1(b)。膜楔入所引起的体变必然要由土骨架的膨胀来抵消, 因而不排水试验实际上就不是“常体积”试验。对于剪缩性的土, 三轴试验中量测出的孔压要比没有膜楔入条件下(如现场试验)量测出的孔压低; 剪胀性土则相反。孔压的偏低会导致破坏时的偏差应力偏高, 从而得到过高的不排水强度。

同样的结果也会发生在周期三轴试验中。膜楔入会引起初始液化周数的增加, 得出比实际高的动强度, 这是偏于不安全的。例如, 拉德(Lade)等^[5] 1977年对蒙太利砂所作的周期三轴加载试验表明, 对于直径为3.56cm和7.11cm形状相似的试样来说, 破坏周数一定时, 动强度随试样直径的增加而降低, 见图2。分析其原因是小试件的比面积大, 膜顺变性影响大。又如德奥尔巴(DeAlba)等1975年用单向振动大型单剪仪对一种中砂进行抗液化试验,

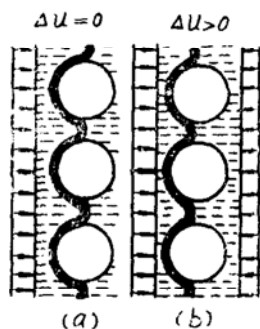


图1 孔压变化引起的膜楔入变化

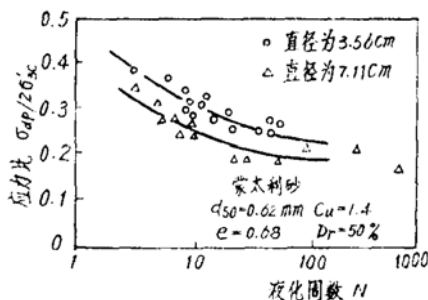


图2 直径对同型蒙太利砂试样的周期荷载试验影响

认为必须将室内测得的液化应力比值减少20—30%，以校正橡皮膜楔入效应。

除了膜的顺变性外，量测系统的顺变性、由于试样非完全饱和所引起的顺变性也会对孔压量测有影响。试验过程中量测系统(包括系统中的水)的体积会随压力变化而发生变化，称之为量测系统的顺变性。由于系统有顺变性，试件孔隙中的水与系统中的水就会发生交换，因而不能保证真正的不排水条件。饱和度小于100%的试样，因孔隙中含有气泡，水的容模量降低，在不排水条件下受周压力也要产生体积变化，这就是非饱和土的顺变性。马丁(Martin)^[4]等证明只要饱和度略低于100%，就可以使周期液化试验中的液化应力比有相当大的增加，见图3。

上述三种顺变性的影响因素中，除膜楔入因素外，其它两种因素均可以采取的措施将其影响减至最小，如增加量测系统的刚度或用加反压的方法确保试样饱和。因而橡皮膜的顺变性影响是三轴试验中最需要校正的。

二、国外对膜楔入影响的研究

(一)影响膜楔入的因素

拉族(Raju)^[10]和拉德认为有下列因素影响膜的楔入特性：

1.有效侧限压力 σ'_3 。膜楔入量随 σ'_3 增大而增加。拉德认为当 $\sigma'_3 > 2000 \text{ kPa}$ 后，膜顺变性影响可忽略。

2.试样周边的孔隙特性。包括颗粒大小(以 d_{50} 代表)、形状、级配和孔隙率。

3.橡皮膜与试样表面接触的面积 A_m 。膜楔入量与 A_m 成正比。

4.橡皮膜特性。如膜的厚度和拉伸模量。

弗里曼(Frydman)^[3]根据前人和他自己的研究成果认为，在任何 σ'_3 作用下，影响膜楔入量的主要因素是颗粒大小，颗粒越大影响越大。斯坦巴克(Steinbach)对18种不同级配的砂所作的膜楔入试验指出，级配材料对膜的影响相当于直径为该级配材料的 d_{50} 的均匀材料影响。马丁等用厚度为0.51—0.051mm的橡皮膜对渥太华砂($d_{50} = 0.4 \text{ mm}$)所作的试验表明，膜的楔入特性基本上与这个范围内的膜厚度 t 无关。用 d_{50}/t 的无量纲比值表示时，上述范围相当于0.8—8。罗斯科(Roscoe)^[12]认为只要 $d_{50} > 0.06 \text{ mm}$ 就要考虑膜楔入影响。拉德曾认为

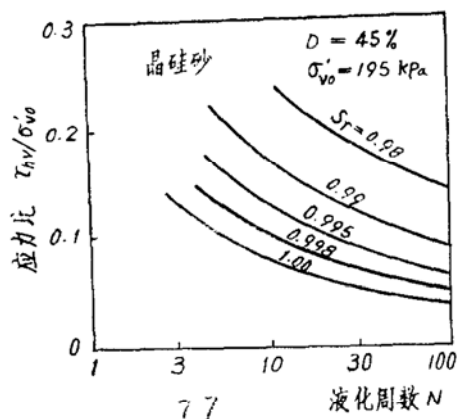


图3 单剪试验中饱和度对液化应力比的影响

$d_{50} < 0.1-0.2\text{mm}$ 时膜的影响可忽略。但基克布什(Kieckbusch)和舒普纳(Schuppener)^[7]对细砂($d_{50} = 0.09\text{mm}$)和粉土($d_{50} = 0.02-0.05\text{mm}$)所作的试验表明, 粉质粘土的膜楔入与砂相比大为减少, 但值得注意的是仍然有一个可以量测得到的膜楔入量。

(二) 膜楔入对体积变化的影响

在对粒状材料特性的研究中, 纽兰(Newland)和阿勒里(Allely)^[11]在1959年首先认识到膜楔入影响的重要性。为了用试验确定膜楔入量, 他们假定砂试样是各向同性的。在此基础上作了一系列三轴等向压缩排水试验。认为, 量测出的体积应变 $\Delta V/V_0$ 和三倍轴向应变之差就是单位体积膜楔入量。 V_0 为试样总体积。图4为纽兰等测得的 $\sigma'_3 - \Delta V$ 关系线。该方法简便, 但由于轴向应变不易测准, 且试样并不是各向同性的, 因而精度不高。

1963年罗斯科等又提出了在试样中心埋置与试样同高但直径各异的铜棒的方法来确定膜楔入量。他们在三轴室内对含有不同直径(从0.64—3.49cm)铜棒的试样, 作等向压缩排水试验, 测出不同 σ'_3 下相应的总体变 ΔV 。由于橡皮膜与试样的接触面积 A_m 保持不变, 故膜楔入引起的体变 ΔV_m 对一定的 σ'_3 恒定不变。砂骨架体变 ΔV_s 却应随净砂体积减少而减少。

画出相应各种 σ'_3 下的总体变 ΔV 与棒直径 D 之间的关系线(假定是直线), 外延此线至砂骨架体变 $\Delta V_s = 0$ 处, 即 $D_{\text{棒}} = D_{\text{试样}}$ 处, 则此时相应的总体变 ΔV 就是膜楔入量 ΔV_m 。图5为罗斯科等的试验结果。1974年拉族等指出罗斯科方法存在二个问题: 一是试样总体变与棒直径之间不是线性关系而是抛物线关系, 所以线性外推法是不正确的; 二是罗斯科试验中采用刚性平板顶帽, 应力集中于铜棒上, 使得四周土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。为此他作了两点修正: ①用总体变 ΔV 和砂试样体积的关系代替 ΔV 与棒直径关系, 证明前者才是直线关系。②将试样顶帽改为柔性环状顶板。

第三种确定膜楔入量的方法是弗里曼等在1975年用不同壁厚的空心柱试样对不同粒径的材料作等向加荷排水试验。通过测定体积应变 $\Delta V/V_0$ 与 A_m/V_0 比值之间的关系来确定膜楔入量。弗里曼用两个不同内径的空心柱和一个实体圆柱进行试验。他假定用相同方法制备的同种材料的试样具有相同密度, 在外力作用下砂的体积应变应该相同。但是由于每个试样与膜接触的面积不同, 量测出的体积应变则必然不同。对圆柱形试样来说 $A_m/V_0 = 2/R$, 即膜楔入影响与直径成反比。由此可推出公式: $\frac{\Delta V}{V_0} = v + \Delta v_m \frac{A_m}{V_0}$ 。其中 $v = \frac{\Delta V_s}{V_0}$ 为砂骨架真正体积应变, $\Delta v_m = \frac{\Delta V_m}{A_m}$ 为单位面积膜楔入量。可以看出该表达式为一直线方程。如果以不同的 A_m/V_0 值进行试验, 测出任意 σ'_3 下的 $\Delta V/V_0$, 画出 $\Delta V/V_0 - A_m/V_0$ 关系线, 则 $\Delta V/V_0$ 的纵轴上的截距就是 v , 直线斜率就是 Δv_m 。图6、7为弗里曼得出的相应的试验结果。如果把 $\Delta v_m - \sigma'_3$

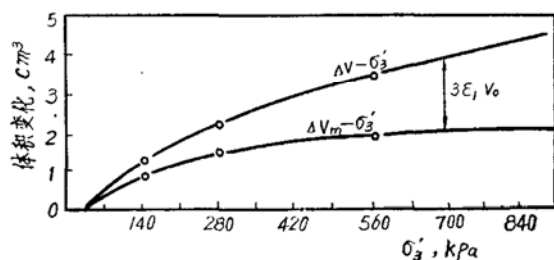


图4 室压力变化引起的总体变

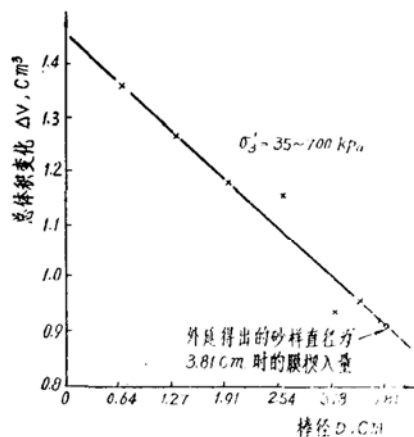


图5 中心含有铜棒的三轴砂样排出的水体积

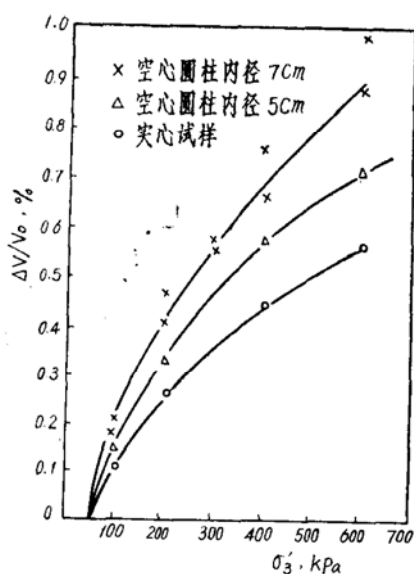


图6 等向加荷材料A($d_{50} = 0.18\text{mm}$)
紧密试样的 $\Delta V/V_0 - \sigma'_3$ 关系

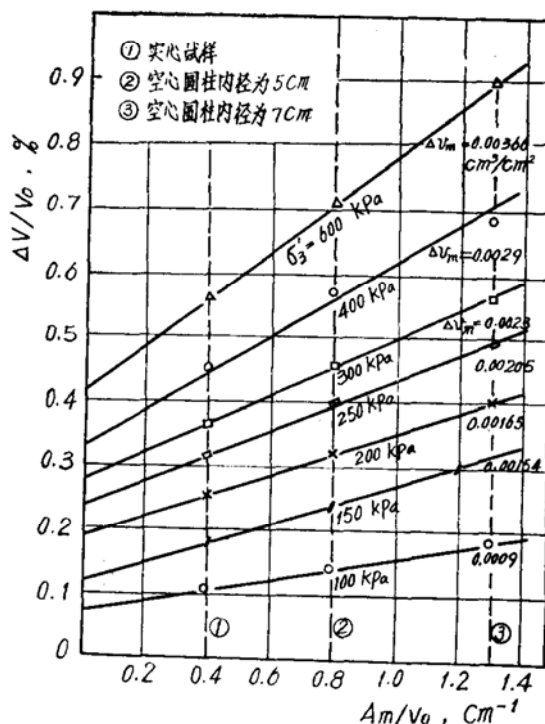


图7 紧密材料A的 $\Delta V/V_0 - A_m/V_0$ 关系

关系线用 $\Delta v_m - \lg \sigma'_3$ 来表达, 则也可近似看成直线, 见图8。弗里曼对三种不同粒径、两种密度的均匀材料进行试验, 最后得出不同粒径 d 与正则膜楔入 S 的关系式(当材料不是均匀粒径时可用 d_{50} 代替 d)。见图9。

$$S = 0.014 \lg d + 0.0128 \text{ ①} \quad (1)$$

$$S = \frac{\Delta v_m}{\lg(\frac{\sigma'_3}{\sigma'_{30}})} \quad (2)$$

式中 σ'_{30} 为起始周压力。

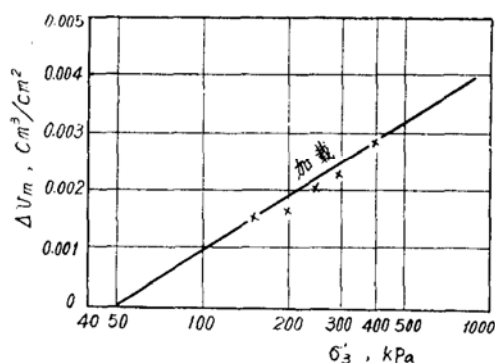


图8 紧密材料A的 $\Delta v_m - \lg \sigma'_3$ 关系

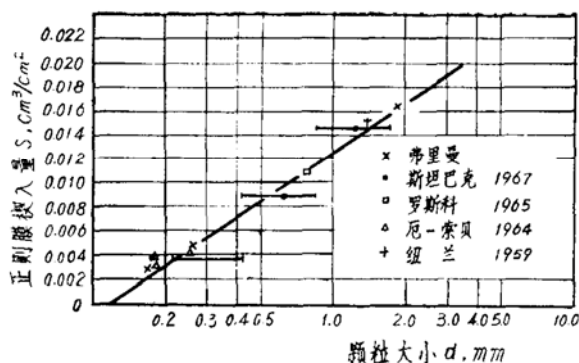


图9 粒径和膜楔入曲线坡度关系

①原文为 $S = 0.014 \lg d - 0.001$, 可能有误。

近年来,一些人试图找到一种尽量减少或消除膜楔入的试验方法。如拉德和赫南德兹(Hernandez)^[6]采用把0.015mm厚、25mm见方的铜片贴在膜内的方法,可以减少2/3的膜楔入影响。基克布什等采用在膜上涂液体橡胶的方法可以减少85%的膜楔入量。图10是基克布什等对不同粒径的砂和粉土试验得出的 S 和 d_{50} 关系线。从图中可看出涂胶对膜楔入的改善效果。1980年拉族^[8]为了研究膜楔入对砂液化势影响,采用①正常膜;②在膜内放0.1mm厚的乙烯条;③在膜上涂粘液状的聚氨酯三种不同方法进行试验,得出的膜楔入校正曲线如图11。经比较,膜内放乙烯条的方法可以减少65%膜楔入量,涂聚氨酯的膜则可减少85%的膜楔入量。1982年拉曼(Ramana)和拉族^[9]将他们自己的和其它已发表的全部有关不同粒径砂的膜楔入资料进行了归纳整理,给出了 C_n - d_{50} 双对数关系线,如图12。

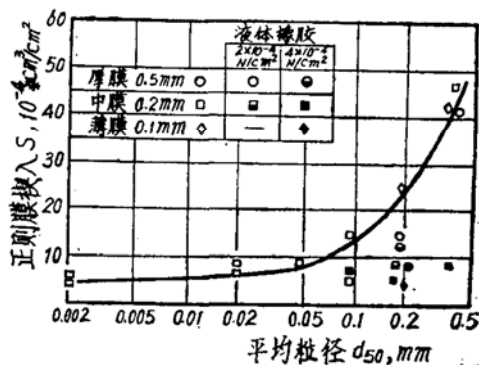


图10 正则膜楔入 S -平均粒径 d_{50} 关系

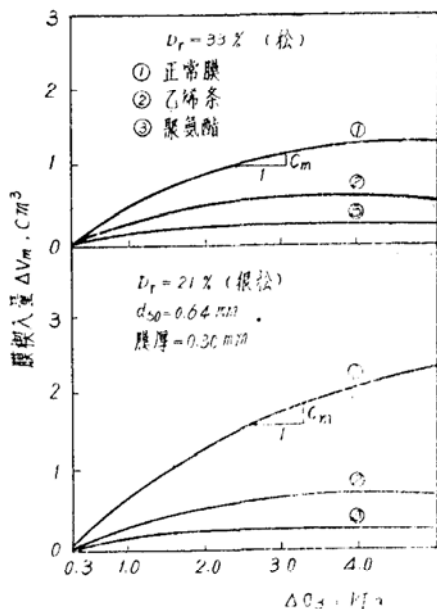


图11 三种不同方法的膜楔入校正曲线

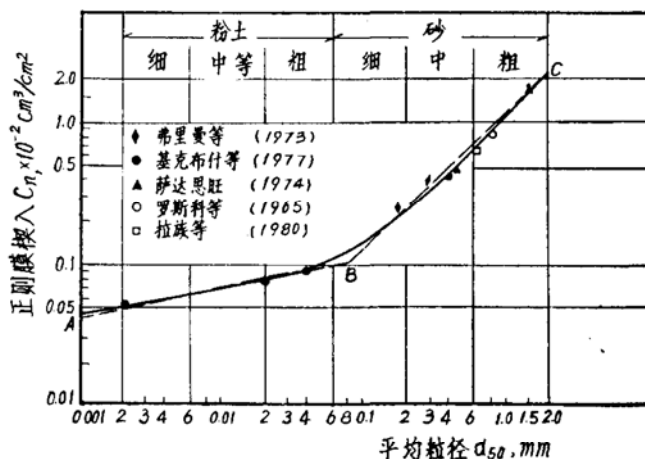


图12 平均粒径 d_{50} 与正则膜楔入 C_n 的关系

其中 C_n 为正则膜楔入(相当式(1)中的 S)。发现曲线关系可用二段直线简化逼近,其表达式分别为:

$$\lg C_n = 0.21 \lg d_{50} - 2.77 \quad (3)$$

$$\lg C_n = \lg d_{50} - 1.90 \quad (4)$$

转折点为 B (相当于 $d_{50} = 0.08\text{mm}$)。上述两公式可用来分别估算 d_{50} 在 $0.001-0.08\text{mm}$ 和 $0.08-2.00\text{mm}$ 范围内的膜楔入量。

(三)膜楔入对孔隙水压力的影响

估算膜楔入对孔压的影响要比估算对体变的影响复杂和困难得多。这是因为在不排水剪

切试验中膜楔入会影响孔压的变化速率,从而使有效应力路径、应力-应变关系和不排水强度都发生相应的改变。到目前为止,还未见到一个比较满意的类似体变那样的校正方法。但近几年来不少人正在寻找一种合适的试验方法或解析方法来进行对孔压的校正。

1977年拉德等在理论研究和实验基础上推导出包含膜和量测系统顺变性在内的孔压参数 B 和 $\bar{A}$ 的表达式,

$$B = \frac{1 + \frac{f_m}{V_0 m_v}}{1 + n \frac{C_w}{m_v} + \frac{f_s}{V_0 m_v} + \frac{f_m}{V_0 m_v}} \quad (5)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{3 \left(1 + n \frac{C_w}{m_v} + \frac{f_s}{V_0 m_v} + \frac{f_m}{V_0 m_v} \right)} \quad (6)$$

式中 $f_m = \frac{\Delta V_m}{\Delta \sigma'_3}$, 代表膜的顺变性;

$f_s = \frac{\Delta V_{sy}}{\Delta \sigma'_3}$, 代表系统总顺变性 (ΔV_{sy} ——系统顺变性引起的体积变化);

C_w ——水的体积压缩系数;

m_v ——土骨架的体积压缩系数;

V_0 ——试样总体积;

n ——土的孔隙率。

拉德指出式(6)并不能直接用来计算三轴试验在剪切阶段的孔隙水压力,而只能表明膜楔入对孔压影响的变化趋势。当土部分饱和时,拉德给出的 B 值表达式如下:

$$B = \frac{1 + \frac{f_m}{V_0 m_v}}{1 + n S_r \frac{C_w}{m_v} + \frac{n}{m_v} \cdot \frac{1 - S_r}{u_2} + \frac{f_s}{V_0 m_v} + \frac{f_m}{V_0 m_v}} \quad (7)$$

式中 S_r ——饱和度;

u_2 ——施加室压力增量后孔隙液体的绝对压力。

其它符号同式(5)

为了研究膜楔入对应力-应变、孔压和应力路径的影响,拉德作了两组不排水试验。一组用正常膜,一组用前述的膜内加铜片的方法,得到的成果见图13。可以看出,当用铜片的方法减少了 $2/3$ 的膜顺变量后,在破坏包线下产生的孔压 Δu 比用正常膜的孔压高出约一倍。还可看出,膜顺变性的存在使有效应力路径和不排水强度也发生了变化,但有效应力路径包线并不受膜楔入影响。

图14为基克布什等(1977)用自己研制的环形剪切仪对细砂和中砂进行的两种膜的不排水试验结果。同样证明了用那些膜上涂了液体橡胶所获得的孔压要比用正常膜试验获得的孔压高。

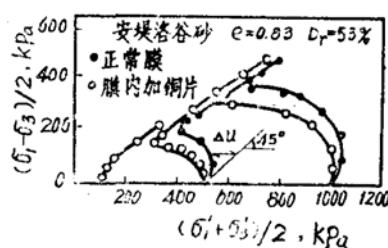


图13 不排水三轴试验的应力路径

拉族(1980)采用一种补偿不排水试验来估算当膜楔入完全被消除时所应发生的孔压值。其作法是：试验过程中，孔压 Δu 升高后，有效应力 σ_3 就会下降，从而使膜楔入 ΔV_m 也要减少，其数值可从已获得的校正曲线(图11)中查出；然后，将同等数量的水注入试样内进行“补偿”，经此补偿又会进一步提高孔压和减少膜楔入量；重复此过程直到获得一个恒定的孔压值，该孔压即可认为是没有体变条件下所产生的孔压值。此方法从理论上说是完善的，但实践上有不少困难。图15为拉族用四种方法对松砂所作的一组应力-应变和孔压特性曲线。可以看到在那些减少了膜楔入的试验中，峰值前面的孔压增长率和峰值后的减少率都比用正常膜试验表现出的速率快。

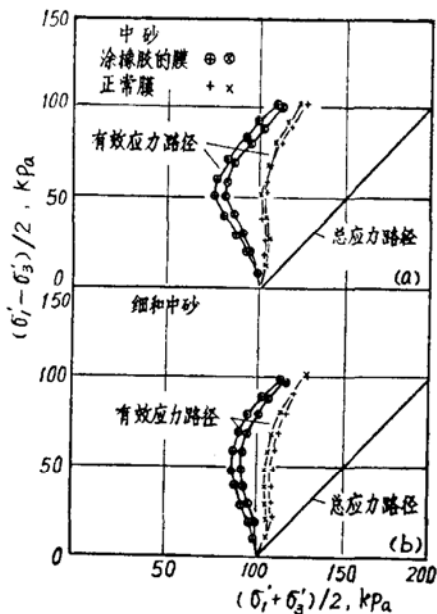


图14 液体橡胶对固结不排水三轴压缩试验的影响

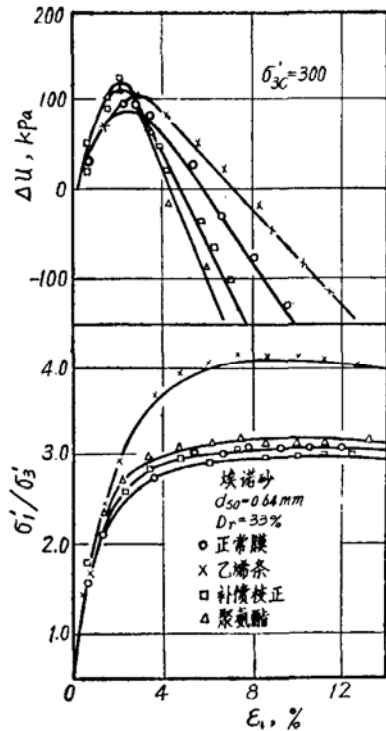


图15 对松的试样得出的不排水应力-应变和孔压关系

马丁等(1978)介绍了一种分析系统顺变性(包括膜顺变性)对于砂周期液化试验影响的方法。建议用下式来估算系统顺变性对单剪试验中产生的孔压的影响。

$$\Delta u = \frac{E_r \Delta e_{vd}}{1 + C_R} \quad (8)$$

式中 E_r ——砂的回弹模量；
 Δe_{vd} ——体积应变增量；

$$C_R = \frac{E_r}{K_c}, \text{ 称系统顺变性比；}$$

K_c ——系统单位体积增量所需要的压力。

图16为他们计算出的不同 C_R 值可能引起的液化应力比误差。在三轴试验中他们建议用膜顺变性比 C_{RM} 来评价。 $C_{RM} = E_r/K_m$ ，其中 $K_m = \Delta V_m/\Delta \sigma'_3$ 。马丁等用拉族和厄-索贝 (E1_Sohby)^[10]所发表的试验资料计算出 C_{RM} ，并将其点绘成 d_{50} 值的函数，如图17所示。

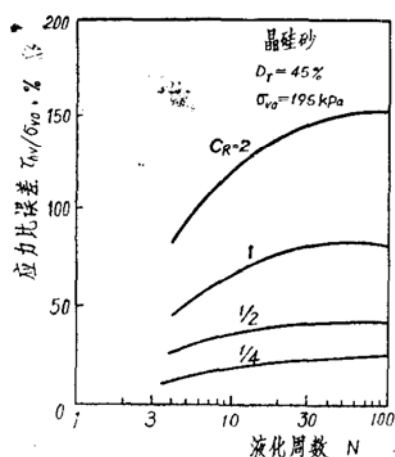


图16 周期单剪试验中系统顺变性引起的液化应力比误差

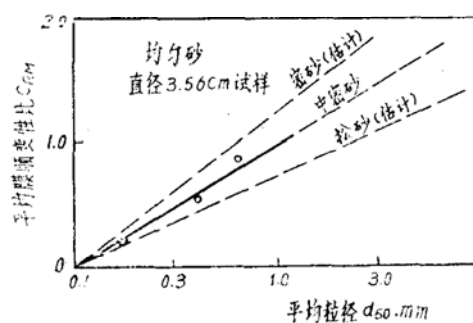


图17 三轴试验中平均粒径对膜顺变性比的影响

三、结 语

1.从已有的试验研究证明，橡皮膜顺变性对砂性土三轴排水试验测体变和不排水试验测孔压都具有不可忽视的影响，必须予以考虑和校正。

2.到目前为止有两种途径研究膜楔入量影响：①通过各种试验手段将膜顺变性减至最小以至消除，不同试验方法减少膜楔入量的效果见表1；②用分析方法校正膜楔入对体变和孔压的影响。

表1 减少膜楔入效果

作 者	方 法	效 果		备 注
		减少膜楔入量	对孔压影响	
拉德和赫南德兹	膜内放正方形铜片	2/3	低于破坏应力处孔压可大一倍	需校正铜片摩擦力影响
基克布什和舒普纳	膜内涂液体橡胶	85%	可提高孔压60%	应变大时液体橡胶与砂的混合层影响需进一步研究
拉 族	膜内放乙烯塑料片	65%	峰值孔压可提高20—25%	
	膜内涂液态聚氨酯	85%	峰值孔压可提高40—45%	
	补偿试验	100%(理论上)	获得最高孔压	存在着试验上的困难

3.校正膜楔入对孔压的影响比校正对体变的影响困难更大，有待进一步探索和研究。

参 考 文 献

- [1] Newland, P.L. and Allely, B.H., Volume Changes during Undrained Triaxial Tests on Saturated Dilatant Granular Materials, *Geotechnique*, Vol. 9, No. 4, 1959.
- [2] Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A., An Evaluation of Test Data for Selecting a Yield Criterion for Soils, *Laboratory Shear Testing of Soils*, ASTM, STP 361, American Society for Testing and Materials, 1963, pp. 111—128.
- [3] Frydman, S., Zeitlen, J.G. and Alpan, I., The Membrane Effect in Triaxial Testing of Granular Soils, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 1, No. 1, 1973.
- [4] Martin, G.R., Finn, W.D. and Seed, H.B., The Influence of System Compliance on Soil Liquefaction Tests, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 104, No. GT 4, 1978, pp. 463—479.
- [5] Lade, P.V. and Hernandez, S.B., Membrane Penetration Effects in Undrained Tests, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT2, 1977.
- [6] Raju, V.S. and Sadasivon, S. K., Membrane Penetration in Triaxial Tests on Sands, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 100, No. GT 4, 1974.
- [7] Kiekbusch Manfred and Schuppener Bernd, Membrane Penetration and Its Effect on Pore Pressures, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT11, 1977.
- [8] Raju, V.S., Undrained Triaxial Tests to Assess Liquefaction potential of Sands Effect of Membrane Penetration, *Soils under Cyclic and Transient Loading*, Vol. 2, A.A. Balkema, Rotterdam, 1980.
- [9] Ramana, K.V. and Raju, S., Membrane Penetration in Triaxial Tests, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 108, No. GT 2, 1982.
- [10] El-Sohby, M. A., Elastic Behaviour of Sand, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 95, No. SM6, 1969.