

固有和诱发各向异性对击实粘性土 强度和变形特性的影响*

王洪瑾 张国平 周克骥

(清华大学水电工程系, 北京, 100084)

文 摘 应用内外室压力不等的空心圆柱扭剪仪, 对击实粘性土进行了固有和诱发各向异性的试验研究。结果表明, 击实粘性土具有明显的固有各向异性, 它对土的应力应变关系、强度和变形特性都有不可忽视的影响; 不同主应力方向的破坏强度最大差别可达 30%。试样的初始含水量和应力水平会影响固有各向异性程度。诱发各向异性可由卸载和主应力方向旋转产生, 它对排水剪强度影响不大, 但对应力应变关系和变形特性有较大影响。

关键词 各向异性, 空心圆柱扭剪仪, 击实粘性土, 强度及变形特性。

1 前 言

各向异性是土的重要物理力学特性之一, 它在很大程度上影响着土体的性状。一般认为, 土的各向异性分为固有各向异性(inherent anisotropy)和诱发各向异性(induced anisotropy)两种。Casagrande 和 Carillo(1994)最早指出了这两者的区别。固有各向异性是指由土颗粒本身特性和土颗粒在形成集合体过程中所产生的特定结构决定的各向异性, 它是土体本身的物理属性; 诱发各向异性则是指由于应力或应变作用导致土结构发生变形而引起的各向异性。在岩土工程现场, 由于工程建造和运用, 将引起主应力大小和方向的变化, 这种变化会在本来具有固有各向异性的土体中产生出诱发各向异性, 这时土体所表现出来的性状是一种固有和诱发各向异性的叠加效应。

天然沉积土具有各向异性早为人知, 但在岩土界深入地对土的各向异性进行研究则是近 20 年的事, 特别是近 10 多年来, 随着对土进行复杂应力状态下强度和变形特性研究的需要, 以及室内试验仪器的发展和完善, 对各向异性问题的研究越来越受到重视, 英、美、日等国已取得了较大进展。我国虽然也作了不少工作, 但尚缺乏比较系统的研究。

早期对土的固有各向异性的研究, 大多数是采用在现场切取试样或室内制备大块土样, 然后切取与沉积方向成不同倾角的圆柱或立方体试样的方法, 在常规三轴仪或平面应变仪中进行试验的。1970 年 Saada 首次指出了这种方法存在的缺点^[1], 并且建议采用能使主应力方向偏转的仪器来进行各向异性的研究。80 年代以来, 英、美等国研制出的方向剪切盒(DSC)和空心圆柱扭剪仪(TSHC)就是目前公认的能较好地研究土的各向异性的设备。一些学者如

* 国家自然科学基金资助项目。

到稿日期: 1994-07-18.

Arthur 等人^[2](1981)和 Sture 等人^[3](1984,1992)利用 DSC 仪器; Symes^[4]等人(1984,1988)和 Miura^[5]等人(1986)利用 TSHC 仪器,先后对砂土材料的固有或诱发各向异性进行了深入研究。但总的看来,利用上述仪器开展对粘性土各向异性的研究还比较少,特别是缺乏对岩土工程中应用较广的击实粘性土的研究。笔者应用所研制的内外室压力不等的 TSHC 仪器^[6],较系统地研究了击实粘性土的固有各向异性以及固有和诱发两者叠加效应对变形和强度的影响。

2 固有各向异性和叠加效应的试验方法

2.1 试验土料及试样制备

试验采用山西曲峪低塑性粘性土,其物理力学指标见表 1,粒径组成见表 2,击实试验得出的含水量与相应干密度见表 3。本文采用两种含水量($w = 14.9\%$ 和 16.9%)及相应密度制备试样,以比较不同含水量及密度对各向异性的影响。试样采用静压法制备,分 10 层压实,制成的试样高 160mm,外径 90mm,内径 54mm。试验采用抽真空充水法使试样饱和,经测定 B 值均在 0.95 以上。

表 1 试验用土物理力学指标

G_s	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	k (cm/s)	有效强度指标	
					c'	φ'
2.7	25.8	19.2	6.6	4.0×10^{-6}	0	37°

表 2 土料颗粒组成

粒径(mm)	>0.05	$0.05 \sim 0.005$	<0.005
含量(%)	40.5	49.0	10.5

表 3 含水量与干密度

含水量(%)	干密度(g/cm^3)
$w_{op} = 14.9$	$\rho_{dmax} = 1.74$
16.9	1.72
12.9	1.71

2.2 扭剪空心圆柱试样中的应力应变分析及试验参数选取

用 TSHC 进行试验是将试样做成一个空心圆柱,在其上施加垂直轴向荷载 W ,扭矩 M_T ,内压 p_i 和外压 p_0 (图 1(a))。从柱壁上任取一土单元,其上作用有 4 个独立的应力分量(图 1(b)),

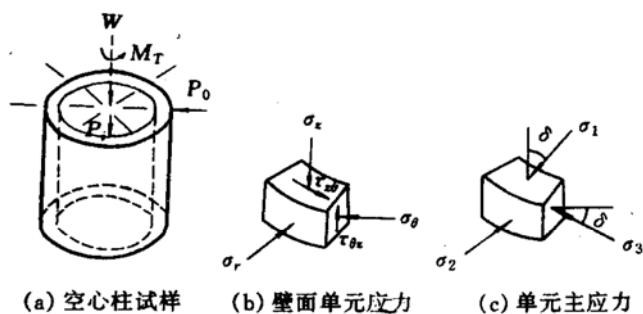


图 1 空心柱试样的理想应力状态

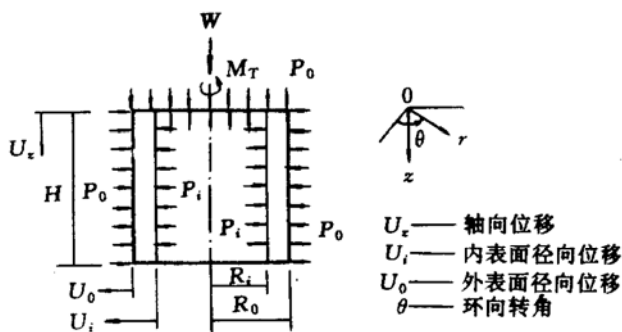


图 2 试样所受荷载及相应位移

即由 W 产生的轴向应力 σ_z , M_T 产生的剪应力 $\tau_{z\theta} (= \tau_{\theta z})$ 以及 p_i, p_0 引起的径向应力 σ_r 和环向应力 σ_θ 。一般 σ_r 总是一个主应力即 $\sigma_r = \sigma_2$ 。图 1(c) 表示该单元的主应力, 也只有四个独立变量: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 的大小和大主应力方向角 δ 。独立控制四个荷载 W, M_T, p_i, p_0 , 使其大小发生变化, 就可使 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 和 δ 角发生变化, 当然还能使反映中主应力 σ_2 影响的 $b (= \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3})$ 值保持定值或随着改变。因此用 TSHC 可以进行固定 b 值改变 δ 值的各向异性研究。

在用扭剪空心柱进行试验时, 一般都是将整个试样作为一个单元来考虑的, 应力、应变按平均值计算(式(1), 式(2))。图 2 表示试样所受的荷载及位移。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_z &= \frac{W}{\pi(R_0^2 - R_i^2)} + \frac{p_0 R_0^2 - p_i R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \\ \bar{\sigma}_r &= \frac{p_0 R_0 + p_i R_i}{R_0 + R_i} \\ \bar{\sigma}_\theta &= \frac{P_0 R_0 - p_i R_i}{R_0 - R_i} \\ \bar{\tau}_{z\theta} &= \frac{3M_T}{2\pi(R_0^3 - R_i^3)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\epsilon}_z &= \frac{U_z}{H} \\ \bar{\epsilon}_r &= -\frac{U_0 - U_i}{R_0 - R_i} \\ \bar{\epsilon}_\theta &= -\frac{U_0 + U_i}{R_0 + R_i} \\ \bar{\gamma}_{\theta z} &= \frac{2\theta(R_0^3 - R_i^3)}{3H(R_0^2 - R_i^2)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

要指出的是, 本文的 $\bar{\epsilon}_\theta, \bar{\epsilon}_r$ 是通过量测试样体积变化 ΔV 和试样内室体积变化 ΔV_{in} 的方法, 计算出试样内、外径的平均径向位移而得出的。

为准确得到各向异性对强度和变形的影响, 试验是在 b 值固定条件下, 改变主应力方向角 δ 能在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化而又不致引起试样中过大的应力不均匀性, 在全部试验中选取 $b = 0.5$ 。另外, 在每组试验中还保持平均主应力 $p (= \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3})$ 为常数。根据所选参数, 可推导出试样中应力状态关系式如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= p + q \cos 2\delta \\ \sigma_\theta &= p - q \cos 2\delta \\ \sigma_r &= \sigma_2 = p \\ \tau_{\theta z} &= q \sin 2\delta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 。根据式(3)及式(1), (2)即可计算出试验中直接控制的 W, M_T, p_0, p_i

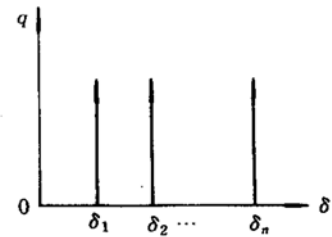


图3 固有各向异性试验应力路径

值。试验中 p_0, p_i 由手动控制, W 和 M_T 由计算机自动控制。

2.3 固有各向异性试验方法和内容

在 $b=0.5$, p 分别为 100kPa 和 150kPa 并保持常数条件下, 将大主应力 σ_1 固定在所规定的 δ 角方向, 然后在排水条件下单调增加 q 值至试样破坏, 这期间记录下不同 q 值时的轴向位移 U_z , 扭转角 θ , 体变量 ΔV 和 ΔV_{in} 。变化不同的 δ 角, 再进行相同的试验过程。试验的应力路径如图 3 所示, 试验编号和参数见表 4。

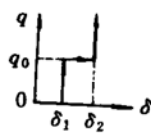
表 4 固有各向异性试验分组

编号	p (kPa)	含水量(%)	干密度(g/cm^3)	$\delta(^{\circ})$
$I_{nh}1$	100	14.9	1.74	0, 30, 45, 60, 75, 90
$I_{nh}2$	150	14.9	1.74	0, 30, 60, 75
$I_{nh}3$	100	16.9	1.72	0, 30, 60, 75

2.4 叠加效应的试验方法和内容

为研究诱发各向异性对土特性的影响, 进行了如下两种不同应力路径的叠加效应试验。应力路径 1: 先沿着 σ_1 的一个方向 δ_1 加载至一定 q_0 后, 卸载至初始状态, 使试样产生预应变, 然后再改变主应力方向, 在 σ_1 的另一个方向 δ_2 上加载至试样破坏。应力路径 2: 先沿着 σ_1 的一个方向 δ_1 加载至 q_0 , 然后在保持 q_0 不变的条件下, 旋转主应力方向至 δ_2 , 再在 δ_2 方向上加载至破坏。选取 $q_0=50\text{kPa}$ 。表 5 为两种应力路径的叠加效应试验编号和相应参数。

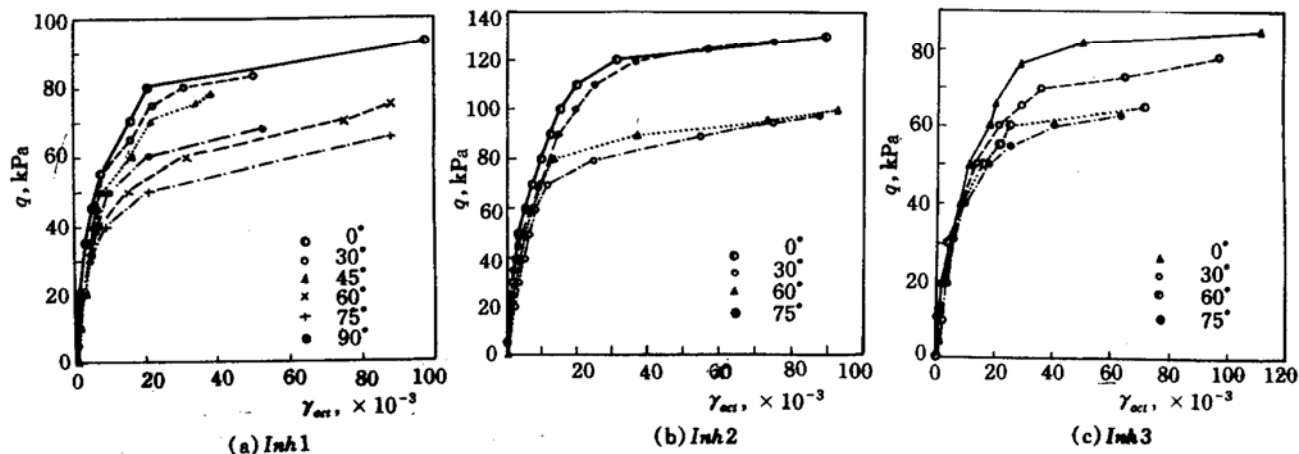
表 5 叠加效应的试验分组及参数

编号	p (kPa)	含水量(%)	干密度(g/cm^3)	$\delta(^{\circ})$	应力路径
$I_{nd}1$	100	14.9	1.74	0~30, 45~60, 45~70	
$I_{nd}2$	100	14.9	1.74	0~30, 45~60, 45~70	

3 固有各向异性的试验成果及分析

3.1 固有各向异性对应力应变关系的影响

图 4 为 $I_{nh}1, I_{nh}2, I_{nh}3$ 三组试验的剪应力 q 与八面体剪应变 γ_{oct} 关系曲线。图中显示不同主应力方向下的应力应变关系曲线差别很大, 并具有如下特点: 在低剪应力阶段, 其应力应变关系基本上不受固有各向异性影响, 表现在不同的 δ 角下具有大致相同的初始剪切模量; 当 q 增大至某一定值 q_c 后(该 q_c 即为下文分析的特征剪应力值), 其应力应变关系的固有各向异性表现得极为明显, 割线剪切模量随 δ 角的增加而降低, 但当 δ 角从 75° 增至 90° 时又有回升。上述特点可作如下分析: 击实粘性土样由于击实作用处于超固结状态, 并形成了具有较弱水平

图4 $q-\gamma_{oct}$ 关系曲线

层面的正交各向异性初始结构,正是这种初始结构决定着土体的各向异性并赋予它具有保持和记忆以前状态的能力。当剪应力很低时,尽管主应力方向角的改变要求土颗粒在不同的大主应力方向下重新排列,但毕竟难以克服击实作用形成的初始定向排列,土颗粒排列发生的调整非常小,在宏观上即表现为剪应变变化不大,不同 δ 角下的初始模量基本相同。当剪应力超过 q_c 后,为响应较大的剪应力,土颗粒将发生滑动和转动,并在新的大主应力方向下达到平衡状态。显然,当 δ 角增大,潜在破裂面与水平层面的夹角就减小,而水平层面上的滑动阻力最小,故破裂面越接近层面方向,土颗粒就越容易发生错动,其宏观表现为变形或应变增加。当 $\delta = 90^\circ$ 时,由于破裂面与层面的夹角又开始增大,颗粒发生错动的条件比 $\delta = 75^\circ$ 时相对较难,故变形量反而减小。

3.2 固有各向异性对强度特性的影响

图5为试样破坏时的剪应力 q_f 与 δ 角的关系曲线。从三组试验中均可明显看出,随 δ 角的增大, q_f 逐渐降低,在 $65^\circ \sim 75^\circ$ 时达到最小值。以 $I_{nh}1$ 曲线为例, q_f 可从 93kPa 降至 65kPa,两者相差达 30%。以后随 δ 角的增大, q_f 又有所回升。这种破坏强度对主应力方向的强烈依赖关系,其机理仍可按水平层面上抵抗剪应力阻力最小来解释。根据摩尔-库伦破坏准则,土体剪破面与 σ_1 方向的夹角 $\theta_f = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$,现假定以正常固结曲峪土的 $\varphi' (=37^\circ)$ 作为

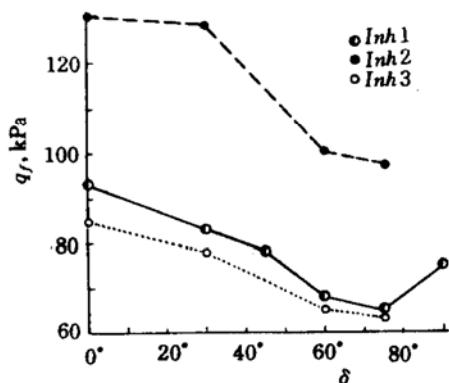
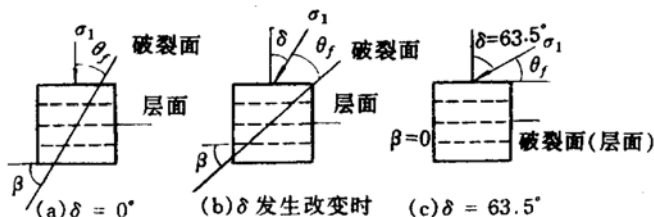
图5 $q_f-\delta$ 关系曲线

图6 破裂面方向的变化

击实土的 φ' 近似值,则 $\theta_f = 26.5^\circ$,该值与本试验中在 $\delta = 0^\circ$ 时所观测到的破裂面与 σ_1 方向的

夹角相接近。此时破裂面与水平面夹角 $\beta = 90^\circ - \theta_f = 63.5^\circ$ (图 6(a))。当 σ_1 方向改变时,破裂面方向也随之改变(图 6(b)), β 角减小,土体强度降低,当 σ_1 偏转至 $\delta = 63.5^\circ$ 时(图 6(c)), $\beta = 0$,破裂面与层面平行,土体强度降至最小值。继续改变 σ_1 方向, β 又从 0 增大,破坏强度回升。从图 6 中还可以看到,对于各向异性土,当 $\delta \neq 0^\circ$ 和 $\delta \neq 90^\circ$ 时,实际产生的破裂面只能有一组,即只有与层面夹角较小的那一组才会产生,这与试验中观察到的现象一致。

若将每组试验中 $\delta = 0^\circ$ 时的 q_f 值定义为 q_{fmax} ,可整理出归一化的 $q_f/q_{fmax}-\delta$ 关系示于图 7。比较图中 I_{nh1} 与 I_{nh2} 曲线可以看出, I_{nh2} 曲线总在 I_{nh1} 曲线的上方,说明平均主应力 p' 的增加,减弱了同一种初始组构试样的固有各向异性程度。 I_{nh1} 与 I_{nh3} 曲线的比较则说明,初始含水量超过最优含水量后,各向异性程度也有所减弱。

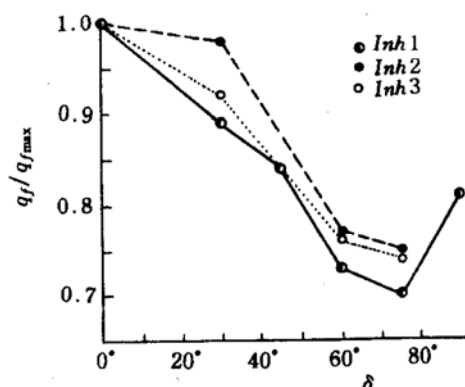


图 7 归一化的 $q_f/q_{fmax}-\delta$ 关系曲线

3.3 固有各向异对变形特性的影响

(1) $q-\epsilon_z$ 关系曲线

图 8 为 I_{nh1} 组试验中不同 δ 角下的 $q-\epsilon_z$ 关系曲线。曲线表明,随着 δ 角增大,轴向应变 ϵ_z 由压缩状态的正值逐渐过渡到伸长状态的负值。从试验结果看,大约在 $\delta = 45^\circ$ 左右发生上述变化。 $\delta = 45^\circ$ 时,在土体破坏前相当大的 q 范围内 ϵ_z 趋近于零。这是由于 $\delta = 45^\circ$ 时,整个加载过程中 $d\sigma_z = 0, d\sigma_\theta = 0$, 只有剪应力 $\tau_{\theta z}$ 发生变化。击实土是一种正交各向异性体,按照增量虎克定律,独立的弹性常数只有 5 个, ϵ_z 只能由正应力引起,由于 $p = \text{常数}$, 故对于 $d\sigma_z = 0, d\sigma_\theta = 0$, 有 $d\epsilon_z = 0$ 。事实上由于试样不是完全弹性体,因而 $d\epsilon_z$ 并不完全等于零,但很小。

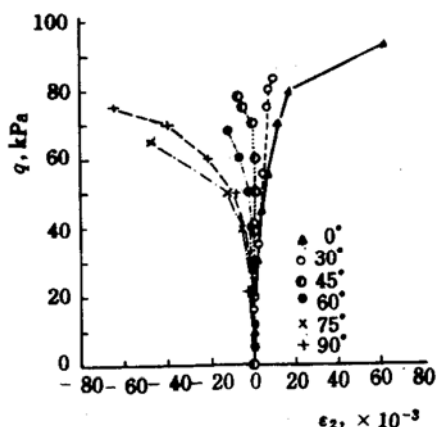


图 8 $q-\epsilon_z$ 关系线(I_{nh1})

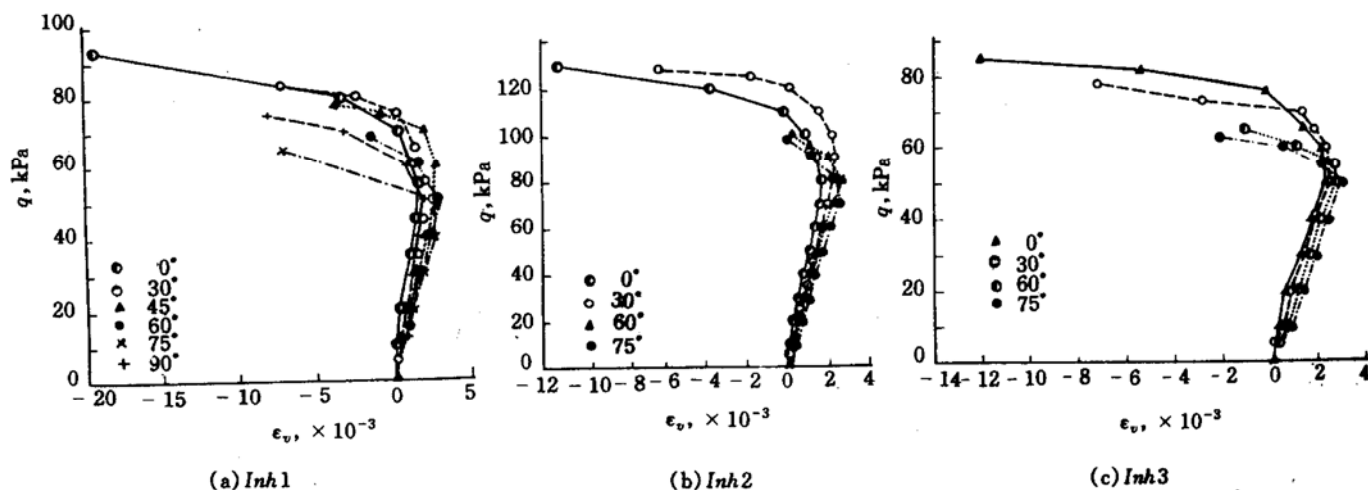


图 9 $q-\epsilon_v$ 关系曲线

(2) q - ϵ_v 关系曲线

根据三组试验结果整理出的 q - ϵ_v 关系曲线示于图 9。从中可见:随着 δ 角在 $0^\circ \sim 75^\circ$ 范围内的增大,试样的最大体积收缩量逐渐增加,至 90° 时出现相反趋势。经资料分析发现,在每组试验中都存在一个相同的 q 值,在该 q 值时,对不同 δ 角试样都从体缩转变为体胀,即 $d\epsilon_v/dq = 0$ 。该 q 值在不同组试验中分别接近一个常数:在 $I_{nh}1$ 组中 $q \approx 55\text{kPa}$ (图 9(a)),在 $I_{nh}2$ 组中 $q \approx 80\text{kPa}$ (图 9(b)),在 $I_{nh}3$ 组中 $q \approx 50\text{kPa}$ (图 9(c)),说明在相同试验条件下,该 q 值是一个与固有各向异性无关的常量,可称之为固有各向异性的特征剪应力 q_c 。从前述的 q - γ_{oct} 曲线已知,当达到 q_c 值附近时,固有各向异性表现得最为强烈。 q_c 与试样的初始状态(含水量、密度)和试验中的应力水平 p 有关。

3.4 固有各向异性对主应变增量方向的影响

对于各向异性土,主应力及其增量方向 $\alpha_{d\sigma}$ 与主应变增量方向 $\alpha_{d\epsilon}$ 不一致,从图 10 所示的 $I_{nh}1$ 和 $I_{nh}3$ 两组试验中 δ 为 30° 和 60° 时 $\alpha_{d\sigma}$ 与 $\alpha_{d\epsilon}$ 的比较可明显看出这一点,且两者之间的差别在刚开始剪切时较大,随着 q 的增加两者逐渐靠近;至破坏时几乎完全一致。

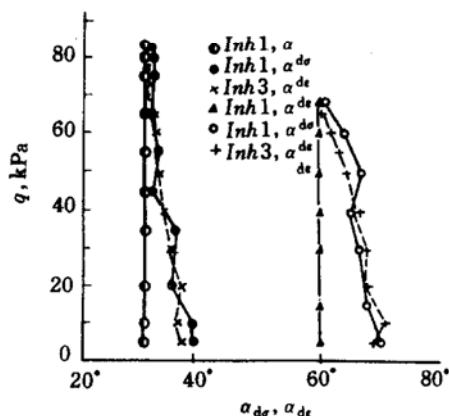


图 10 q - α 关系曲线

4 叠加效应试验成果分析

为分析两种不同应力路径所产生的诱发各向异性对土的强度和变形特性的影响,分别将其叠加效应试验成果与固有各向异性试验成果进行了对比。

4.1 应力路径 1 的试验成果分析

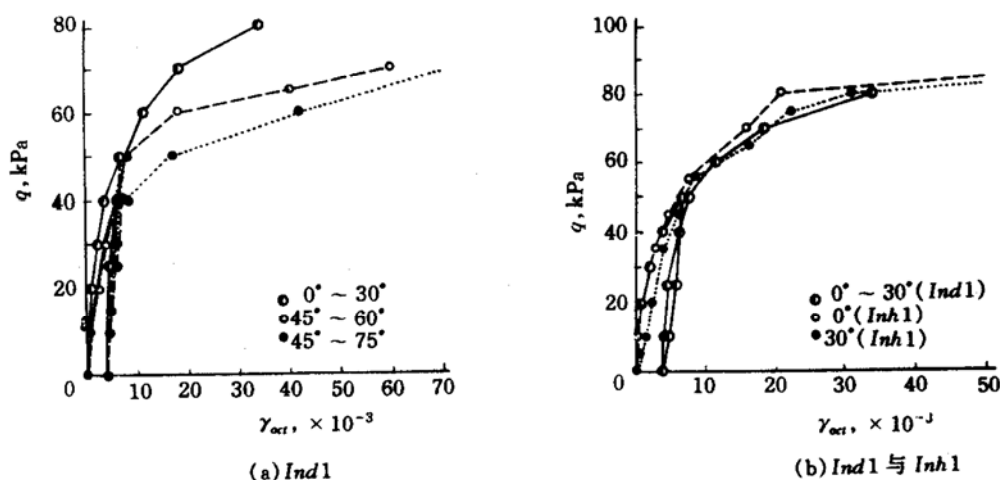


图 11 q - γ_{oct} 关系曲线

图 11(a)是 $I_{nd}1$ 组试验的 q - γ_{oct} 关系曲线,三条曲线在 $q_0 = 50\text{kPa}$ 处卸载至 $q = 0$ 时均产生了 0.4% 的残余剪应变,说明土体产生了塑性变形,该塑性变形是初始组构已发生改变的表现,也是导致产生诱发各向异性的原因。图 11(b)是 $I_{nd}1$ 试验与 $I_{nh}1$ 试验的 q - γ_{oct} 关系曲线

在一组相同 δ 角下的比较。比较表明, $I_{nd}1$ 试验中的 $\delta_2 = 30^\circ$ 的重加载曲线的割线模量,在 $q < 60\text{kPa}$ 时比 $I_{nh}1$ 试验中的 $\delta = 30^\circ$ 时的单调加载曲线的割线模量大;而当 $q > 60\text{kPa}$ 后,二者趋于重合,说明预剪应变产生的诱发各向异性对应力、应变关系的影响只有在卸载剪应力 q_0 附近,以及低于 q_0 范围内明显,当剪应力超过 q_0 以后,随着 q 的增加,诱发各向异性将趋于消失,这时试样所表现出的叠加效应与固有各向异性基本相同。其它 δ 角的比较也得出了相同结论。

表 6 破坏强度 $q_f(\text{kPa})$ 比较

$\delta(^{\circ})$	$I_{nd}1$ (含 $I_{nd}2$)	$I_{nh}1$
30	80	83
60	70	68
75	65	65

表 6 是 $I_{nh}1$ 和 $I_{nd}1$ (含 $I_{nd}2$) 试验在相同 δ 角下破坏强度的比较。可以看出 $I_{nd}1$ (含 $I_{nd}2$) 试验的破坏强度与 $I_{nh}1$ 试验的破坏强度在试验误差范围内是相同的,说明诱发各向异性对排水剪强度影响不大,控制土体破坏强度的仍是固有各向异性。

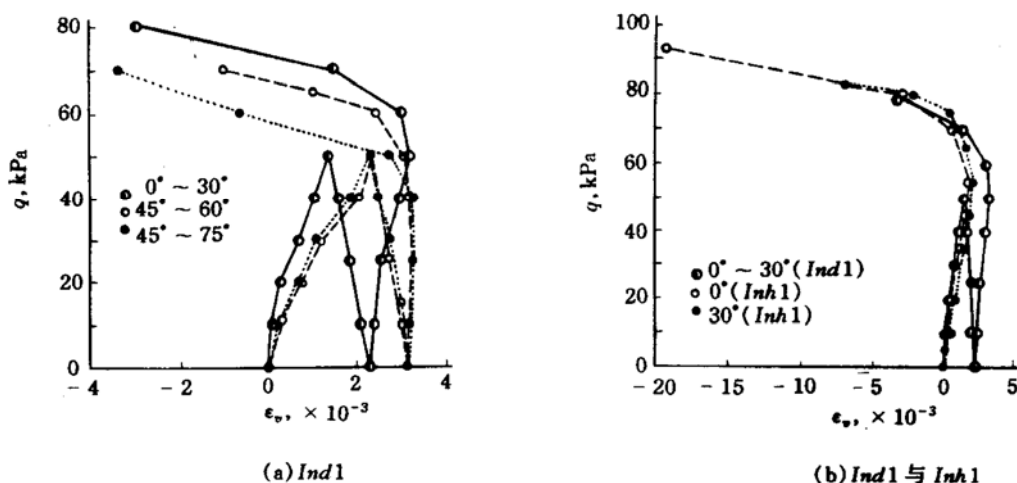


图 12 $q-\epsilon_v$ 关系曲线

$I_{nd}1$ 试验的 $q-\epsilon_v$ 关系曲线示于图 12(a), 其最大特点是在 $\delta_1 = 0^\circ$ 和 $\delta_1 = 45^\circ$ 时卸载均产生了明显的体积收缩。图 12(b) 是一组 $I_{nd}1$ 与 $I_{nh}1$ 试验的 $q-\epsilon_v$ 曲线比较, 比较表明, 在相同 δ 角下, 预剪应变产生的诱发各向异性使得最大体缩量要比原固有各向异性时的大, 增大的原因主要是由卸荷体缩引起的。

4.2 应力路径 2 的试验成果分析

图 13 是 $I_{nd}2$ 试验的 $q-\gamma_{act}$ 关系曲线, 从图中可明显看到, 在保持 $q_0 = 50\text{kPa}$ 时, 由主应力旋转引起的累积剪应变 $\Delta\gamma_{act}$ 不能忽略, 其大小不仅与旋转前的主应力方向角 δ_1 有关, 还与旋转角度 $\Delta\delta (= \delta_2 - \delta_1)$ 大小有关。本试验中 $\delta = 0^\circ \sim 30^\circ$ 旋转所产生的 $\Delta\gamma_{act}$ 为 0.25%; $\delta = 45^\circ \sim 60^\circ$ 时为 0.3%; $\delta = 45^\circ \sim 75^\circ$ 时为 0.85%, 由此推算出 δ 从 60° 旋转至 75° 时产生的 $\Delta\gamma_{act}$ 为 0.55%。尽管 $\delta = 45^\circ \sim 60^\circ$ 和 $\delta = 60^\circ \sim 75^\circ$ 的旋转角均为 15° , 但后者却几乎产生了两倍于前者的剪应变, 说明在 $60^\circ \sim 75^\circ$ 之间旋转主应力时剪应变发展最迅速。另外, $\delta = 0^\circ \sim 30^\circ$ 与 $\delta = 45^\circ \sim 75^\circ$ 的旋转角

虽均为 30° , 但由于 δ_1 不同, 也使后者产生的剪应变三倍于前者。

图 14(a) 为 I_{nd2} 试验的 $q-\epsilon_v$ 关系曲线, 显示出在 $q = q_0$ 时旋转主应力均引起了体积变化, 其中 $\delta = 0^\circ \sim 30^\circ$ 和 $\delta = 45^\circ \sim 60^\circ$ 时旋转引起了体缩; 而 $\delta = 45^\circ \sim 75^\circ$ 时旋转却引起了体胀。体胀主要发生在 $\delta = 60^\circ \sim 75^\circ$ 的旋转过程中, 这可能是由于当 $\delta = 60^\circ \sim 75^\circ$ 时, 试样的伸长应变 ϵ_z 要比 $\delta = 45^\circ \sim 60^\circ$ 时的伸长应变 ϵ_z 大很多所造成的 (见图 8)。图 14 (b) 为一组 I_{nd2} 试验与 I_{nh1} 试验有关 $q-\epsilon_v$ 关系的比较, 同样可得出由主应力旋转所引起的诱发各向异性的影响在大应变时趋于消失的结论。

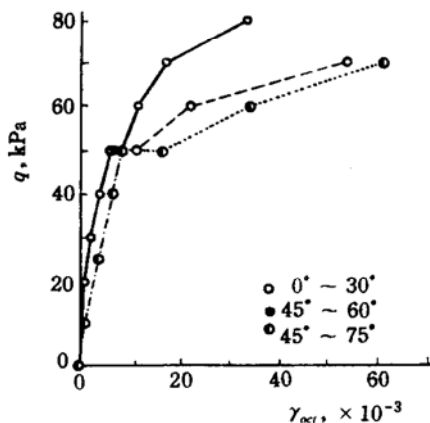


图 13 $q-\gamma_{oct}$ 关系曲线 (I_{nd2})

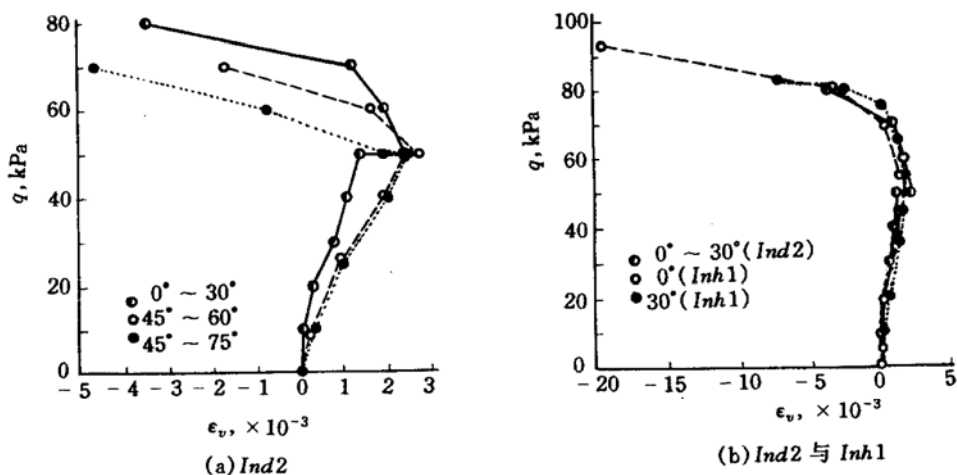


图 14 $q-\epsilon_v$ 关系曲线

5 结 语

(1) 击实粘性土具有显著的强度和变形的固有各向异性, 表现在其排水剪强度和最大体积收缩量均对主应力方向存在着很强的依赖关系, 对所研究的土而言, 当大主应力轴定向在 $\delta = 65^\circ \sim 75^\circ$ 之间时, 破坏强度达最小值, 与 $\delta = 0^\circ$ 时的最大值相比, 可相差 30%。其机理可归因于击实粘性土中的水平层理面具有最小剪切阻力和变形模量。

(2) 击实粘性土的固有各向异性对其应力、应变关系曲线影响的特点是: 小应变时各向异性不明显; 当剪应力增加至与方向无关的“特征剪应力”附近时, 固有各向异性对应力、应变关系影响最大。

(3) 在试验条件下, 击实粘性土的固有各向异性程度, 有随填筑含水量和平均主应力增加而减弱的趋势。

(4) 若外加的应力大于最大历史应力, 则历史应力所引起的诱发各向异性对应力、应变关系影响不大; 若小于最大历史应力则影响大。

(5) 诱发各向异性对击实粘性土的排水剪强度影响不大, 但对体积变化有很大影响, 表现在主应力方向旋转和卸载均引起了不可忽视的体缩。

参 考 文 献

- 1 Saada A S. Testing of Anisotropic clay soils. Jour of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1970, **96**(5).
- 2 Jamiolkowski M et al. New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils. Proc of 11th Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Eng, 1985(1).
- 3 Budiman J S, Sture S, Ko H Y. Constitutive Behavior of Stress-Induced Anisotropic Cohesive Soil. Jour of Geotech Eng Div, ASCE, 1992, **118**(9).
- 4 Symes M J et al. Drained Principal Stress Rotation in Saturated Sand. Jour of Geotech Eng Div, ASCE, 1988, **38**(1).
- 5 Miura K et al. Deformation Behavior of Anisotropic Dense Sand under Principal Stress Axes Rotation. Soils and Foundation, 1986, **26**(1).
- 6 张国平等. 内外室压力不等的空心圆柱扭剪仪的研制. 见: 第七层全国土力学及基础工程会议论文集, 1994.

Effects of Inherent and Induced Anisotropy on Strength and Deformation Characteristics of Compacted Cohesive Soil

Wang Hong-jin Zhang Guo-ping Zhou Ke-ji

(Tsinghua University, Beijing)

Abstract A systematical experiment on a compacted cohesive soil has been carried out to investigate the effects of inherent and induced anisotropy. In the tests, a Torsional Shear Hollow Cylinder apparatus with different internal and external pressure to the specimen was used. The results show that the behaviors of stress-strain relation, shear strength and deformation of the compacted cohesive soil depend significantly on the principal stress direction. The maximum difference of failure strength among various principal stress direction is up to 30%. The initial moisture content of the specimen and stress level can influence the degree of inherent anisotropy. The induced anisotropy is developed by unloading or by continuously rotating the principal stress direction. It does not affect the drained shear strength, but influences the behaviors of stress-strain and deformation significantly.

key words anisotropy, torsional shear hollow cylinder apparatus, compacted cohesive soil, strength and deformation characteristics.