

基于柔性承载板载荷试验的土抗剪强度参数反演研究

许年春^{1,2}, 吴同情^{1,2}, 皮海洋¹, 游磊¹, 吴越^{1,2}

(1. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331; 2. 重庆科技大学 能源工程力学与防灾减灾重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 传统的刚性承载板载荷试验(PLT)主要确定地基的承载力, 不能用来反演土的抗剪强度参数 c 、 φ 。通过刚性承载板下加装气囊, 研制出一种适用于载荷试验的柔性承载板, 两个电感式位移传感器分别布置于板内边缘处, 用于测量该处气囊厚度变化量 $d\delta$ 。用柔性承载板开展载荷试验时板底压力 P 均匀分布, 同时在柔性承载板一侧采用柔性水压板施加恒定的均匀地表荷载, 根据两条 p - $d\delta$ 曲线变化规律得出 2 个临塑荷载, 将临塑荷载与地表荷载值代入理论公式反演出 c 、 φ 。分别采用黏性土和干砂开展室内载荷试验, 证明了该反演方法的可行性, 通过分析认为该反演方法具有适用性和先进性。

关键词: 抗剪强度参数; 柔性承载板; 平板载荷试验; 临塑荷载; 反演

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)增1-0227-08

Inversion of shear strength of soil based on flexible bearing plate loading test

XU Nian-chun^{1,2}, WU Tong-qing^{1,2}, PI Hai-yang¹, YOU Lei¹, WU Yue^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Energy Engineering Mechanics & Disaster Prevention and Mitigation, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: The traditional rigid bearing plate load test (PLT) mainly determines the bearing capacity of foundation, and can not be used to invert the shear strength parameters c , φ . In this study a flexible bearing plate has been invented through the installation of an air bag under the rigid bearing plate. Two self-made inductance displacement sensor are respectively set at the edge of two inner sides of the plate, in order to measure the variation of the thickness of the air bag at this area. When the flexible bearing plate is used to carried out the loading test, the compressive stress p under the plate is in uniform distribution. During the test, a constant uniform surface load q is applied on one side of the bearing plate by a flexible water pressure plate. So that two p - $d\delta$ curves can be got, and two critical edge load values can be judged from the curves' changing feature corresponding to zero surface load and q respectively. Then the c and φ can be inversed if we put the critical edge load values and q into the theoretical formula. The cohesive soil and dry sand have been tested respectively during the laboratory experiments; and the feasibility of the inversion method is proved. The applicability and the progressiveness of the inversion method are also approved through analysis.

Keywords: shear strength parameters; flexible bearing plate; plate loading test; critical edge load; inversion

1 引言

土的抗剪强度参数 c 、 φ 是土的最重要力学参数, 工程上有多种方法测试, 室内试验包括直接剪切试验、三轴压缩试验和无侧限抗压强度试验^[1],

与室内试验相比, 现场原位试验对土体没扰动, 更具有工程优越性, 尤其对于取样困难的土, 现场原位试验更是不可替代。目前测试土抗剪强度参数的原位试验主要包括十字板剪切试验、大型直接剪切试验, 十字板剪切试验用于测定饱和软黏土($\varphi \approx 0$)

收稿日期: 2018-03-23

基金项目: 重庆市基础与前沿研究计划项目(No. cstc2015jcyjA30002, No. cstc2015jcyjA30003, No. cstc2015jcyjA0153); 重庆市城乡建设委员会资助项目(城科字 2011 第(84)号); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1601336)。

This work was supported by the Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology(cstc2015jcyjA30002, cstc2015jcyjA30003, cstc2015jcyjA015), the Chongqing municipal commission of urban-rural development(2011-84), and the Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission(KJ1601336).

第一作者简介: 许年春, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土力学参数现场测试技术研究。E-mail:351601872@qq.com

通讯作者: 吴同情, 男, 1982 年生, 硕士, 讲师, 主要从事岩土力学方面的教学和科研工作。E-mail:wutongq@163.com

的不排水抗剪强度^[2-4],大型直接剪切试验用于测试粗颗粒土的抗剪强度^[5-6],文献[7]考虑到膨胀土内有较大尺寸的裂隙,也用到了大型直接剪切试验,然而大型直接剪切试验与室内直剪试验一样存在固有缺点即剪切面人为限定、剪应力分布不均、剪切面逐渐缩小^[8-10]。

反演在岩土工程分析中经常被用到,文献[11-12]通过滑坡稳定系数,反演出滑面的抗剪强度参数。承载板载荷试验(PLT)是岩土工程最常用的原位测试试验之一,用于测定承载板下应力主要影响范围内岩石的承载力和变形模量^[2]。通过研究基底应力并结合土的强度屈服准则可以得到地基承载力(临塑荷载、临界荷载、极限荷载)与土抗剪强度参数 c 、 φ 的关系式^[8-10, 13-14],传统的将测试出的土抗剪强度参数 c 、 φ 代入公式计算地基承载力属正问题,而根据地基承载力计算土抗剪强度参数 c 、 φ 属反问题,即反演,查阅国内外文献,未见有相关研究成果。

2 反演公式

理论分析表明,在竖向压力作用下,条形基础基底边缘处首先进入塑性状态,土力学教材^[8-10]给出条形基础地基临塑荷载 p_{cr} 公式:

$$p_{cr} = \frac{\pi c \cot \varphi}{\cot \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \frac{q \left(\cot \varphi + \varphi + \frac{\pi}{2} \right)}{\cot \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} \quad (1)$$

式中: q 为基础底面处土体自重引起的竖向应力; p_{cr} 为地基临塑荷载; c 为土的黏聚力; φ 为内摩擦角。 p_{cr} 与 c 、 φ 有直接的对应关系。当采用条形承载板时,根据不同 $q(q_1, q_2)$ 对应的两个 $p_{cr}(p_{cr1}, p_{cr2})$ 值,可即由式(1)反演土的 c 、 φ 值:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{3a - \sqrt{9a^2 - 24}}{4} \\ c &= \frac{p_{cr1}(a - \pi/2) - q_1(a + \pi/2)}{\pi \cot \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $a = \frac{\pi(q_1 - q_2)}{p_{cr1} - p_{cr2} - q_1 + q_2} + \frac{\pi}{2}$ 。

在式(2)的推导过程中用到了 $\cot \varphi \approx \frac{1}{\varphi} - \frac{\varphi}{3}$ 。

3 柔性承载板设计与制作

从理论上讲,利用式(2)进行2次不同埋深处的承载板载荷试验即可得到土的抗剪强度参数 c 、

φ 值,但目前岩土工程测试中未开展过这种试验,主要有(1)需要做2次载荷试验,费时费力,且不能保证试验土体的一致性;(2)有些承载板载荷试验得到的 $p-s$ 曲线没有明显的直线段,无法确定出 p_{cr} ;(3)最主要的原因,因式(1)是根据基底均布压力推导出来的,采用的承载板均为刚性承载板,板底应力分布复杂,同时 $p-s$ 曲线反映的是板底整体变形特征,而不是板底边缘处的局部变形特征,通过 p_{cr} 反演 c 、 φ 值准确度得不到保证。

为了反演出土抗剪强度参数,需对目前承载板载荷试验使用的承载板进行改进,论文作者经过多年的努力,已设计并制作出用于载荷试验的柔性承载板,图1为柔性承载板的设计图。

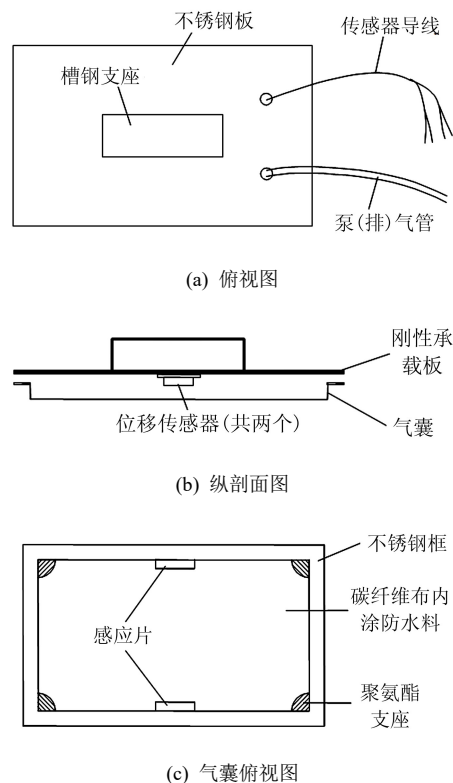


图1 柔性承载板设计图
Fig.1 Design diagram of flexible bearing plate

由图1可见,柔性承载板实质上是在刚性承载板的下部设计了一个气囊,利用囊内气压处处相等的特点来实现板底均匀加载。气囊主体材料为I-200碳纤维布,内侧涂上柔性防水涂料保证气密性,4边粘贴在不锈钢钢框上,气囊的4个角为接缝处,采用聚氨酯浇筑,兼起到密封与支座的作用。

制作出的柔性承载板为矩形,具体尺寸:上部刚性承载板的尺寸为480 mm×300 mm,钢框的宽25 mm,气囊的底部尺寸为430 mm×250 mm。气囊的初始厚度为30 mm。

为测试出试验过程中气囊边缘处厚度的变化，在刚性承载板底布置两个自制的电感式位移传感器^[15]，在其正下方气囊内部分别设计一个感应片，长×宽×厚为 80 mm×15 mm×2.2 mm 的镀锌钢片，见图 1(c)。在上部不锈钢板上钻 2 个小孔，分别作为位移传感器的导线孔和往气囊内泵（排）气孔。

刚性承载板与气囊之间主要采用 G 型夹具联接，局部可采用钻孔螺丝联接。为确保刚性承载板与气囊之间不漏气，在不锈钢钢框上涂一层聚氨酯胶，并在胶干之前用刚性承载板压平，并以 1 mm 厚的硅胶片制作密封圈。图 2 为柔性承载板的内部照片。



图 2 柔性承载板内部照片

Fig.2 Internal picture of flexible bearing plate

4 柔性承载板载荷试验方法

4.1 条形荷载的实现方法

前文的反演公式是针对条形承载板提出的，本次制作出的柔性承载板长宽比为 430:250 = 1.72，并不满足条形承载板的长宽要求。

在条形承载板作用下土体发生的是平面应变，即纵向应变为 0，为实现条形荷载，特制作出一个由 2 块梯形钢板和两根螺杆组成的纵向应变约束架，如图 3 所示。梯形钢板厚 5 mm，上边长 500 mm，下边长 350 mm，两端距上边缘约 15 mm 处开有小孔，2 根 10 mm 螺杆分别对穿两块梯形钢板，钢板间距控制在 440 mm，为减小与土体间的摩擦，两块梯形钢板的内侧面均粘贴有聚四氟乙烯胶带。

载荷试验开始前将纵向应变约束架放在土体表面，然后一边掏挖梯形钢板外侧和正下方的土体，一边适当用力向下锤击梯形钢板，将其埋入土体内，埋入时螺杆下也需要掏两条浅槽，然后对梯形钢板外侧土体进行分层压实回填直至地表，见图 4。

载荷试验开始时将柔性承载板居中放置于约束架内，在板底竖向压力作用下，由于螺杆的拉力作用和梯形钢板外侧土体的支挡作用，浅层土体纵向

应变受到约束，可以认为发生的是平面应变，如此实现了条形荷载作用。



图 3 纵向应变约束架

Fig.3 Frame used to restraint longitudinal strain



(a) 外侧掏槽

(b) 槽内回填

图 4 约束架埋入土体

Fig.4 Imbedding the frame in soil

4.2 板底压力的施加方法

与刚性承载板载荷试验不同的是，柔性承载板载荷试验时，板底压力值由总压力 P (kN) 与囊内气压 p (kPa) 同时控制。总压力 P 可通过测力显示仪来显示（需加上千斤顶、压力传感器、承载板等自重），并通过油泵杆来控制，囊内气压 p 则通过气压表来显示，囊内气压 p 与总压力 P 之间满足关系式：

$$P = p \times \text{囊底面积} \quad (3)$$

当气压表显示数字偏小时，表明气囊 4 角支座处承担了过大的压力，应通过气筒往气囊内泵气来增加气压；当气压表显示数字偏大时，表明囊底没有完全压在地基土上，应通过按钮放气来减小气压，这样可以保证板底对土体表面施加一个矩形分布的均匀压力 P 。

图 5 为柔性承载板载荷试验部分仪器图，其中测力显示仪分辨率为 0.01 kN，气压表分辨率为 0.1 kPa。

4.3 地表荷载的施加方法

利用式 (2) 反演土的抗剪强度参数 c 、 ϕ 值，需要两种不同的板底处土体竖向自重应力，即 q_1 、

q_2 。对于柔性承载板,板底两侧土体可以不同时进入塑性状态,可对一侧施加 q_1 的地表荷载模拟土体竖向自重应力,另一侧施加 q_2 的地表荷载,当 $q_2 > q_1$ 时,则 q_1 侧土体先进入塑性状态,继续增大板底压力,可使 q_2 侧土体进入塑性状态,这样通过一次载荷试验即可确定出 2 个临塑荷载值 p_{cr1} 、 p_{cr2} 。更进一步,可取 $q_1 = 0$,即在柔性承载板的一侧不施加任何地表荷载,而在另一侧施加的 q_2 地表荷载来模拟土体自重应力,如图 6 所示。



图 5 柔性承载板载荷试验部分仪器图
Fig.5 Some instruments used in loading test

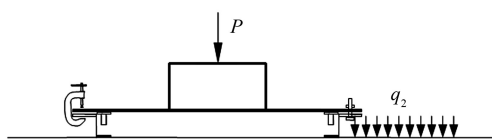


图 6 承载板一侧施加地表荷载示意图
Fig.6 Sketch of surface load applying on one side of bearing plate

q_2 的正确施加对于准确确定临塑荷载 p_{cr2} 很关键,土体竖向自重应力为均匀分布,为了达到此效果,制作出一个小的柔性水压板,如图 7 所示。



图 7 柔性水压板照片
Fig.7 Picture of flexible water pressure plate

柔性水压板面板为 2.5 mm 厚的不锈钢板,长×宽为 20 cm×10 cm,中间开有一小孔,小孔上固定有中空螺丝,螺丝上套 1 根透明有机玻璃管(接头处缠绕生丝,以防漏水),不锈钢板下部用乳胶膜

粘接成一个矩形的薄水囊。先往水囊内灌入适量的水,再在不锈钢板面压放不同重量的不锈钢条(采用不锈钢条是为了防止普通钢条对电感表式位移传感器的读数有影响),在钢条的重力作用下水位沿有机玻璃管上升,可根据水位上升的高度确定出板底的均布压力值,如水位上升至 10 cm 处(从水压板板底起算),均布压力值为 1 kPa。载荷试验时只需将柔性水压板紧挨柔性承载板底放入,根据所需的 q_2 值,压放相应重量的不锈钢条。

4.4 临塑荷载的确定方法

刚性承载板载荷试验时根据 $p-s$ 曲线的直线段确定出整个板底土体的 p_{cr} ,类似的方法可用于确定出柔性承载板底两侧土体的临塑荷载 p_{cr1} 、 p_{cr2} 。

在制作出的柔性承载板气囊内安置有 2 个自制的电感式位移传感器,事先已进行了电感 L 与间隙(传感器与感应片之间的间隙) δ 之间的关系标定,可以根据电感表测得的 L 推算出 δ 。

载荷试验开始后,随着所受压力的增加,聚氨酯支座也要发生压缩,气囊厚度相应会变小,间隙 δ 变小,测得的电感 L 变大。当板底压力 p 达到一侧土体的临塑荷载 p_{cr1} 时该处感应片下的土体进入塑性状态,土体会产生一个较大的向下变形,使 δ 变大,测试出的 L 变小,因此可以根据测试出的 L 推算出 δ ,作出试验过程中的 $p-\delta$ 曲线,根据 $p-\delta$ 曲线变化规律判断出 p'_{cr1} 。同理,可以判断出 p'_{cr2} , (p'_{cr1} 、 p'_{cr2} 为临塑荷载的表观值)。在推导式(1)时 q 被认为是基底、基侧均匀分布,因此临塑荷载的真实值 $p_{cr1} = p'_{cr1} - q_1$, $p_{cr2} = p'_{cr2} - q_2$ 。

为使试验曲线间更具可比较性,以间隙变化量 $d\delta$ 代替 δ , $d\delta$ 等于第一级荷载下的间隙 δ_1 减去各级荷载作用下的间隙 δ_i ,根据 $p-d\delta$ 曲线变化规律得出 p'_{cr1} 、 p'_{cr2} 。很显然,间隙变化量 $d\delta$ 与气囊厚度变化量 $d\delta$ 是一致的。

5 室内柔性承载板载荷试验

5.1 加载装置与试验操作

为开展室内柔性承载板载荷试验,特设计并制作出自平衡加载架,自平衡加载架由下部框架和上部反力架构成,下部框架长宽高分别为 1.4、1.2、1.2 m,由 12 根边长 6 cm 的钢管焊接而成,底部铺满槽钢,四周采用薄壁镀锌 C 型钢板作为挡土板。往框架内分层填土并采用平板振动仪压实,至适当位置后整平土表面,中心处安放柔性承载板,根据文献[16]的研究成果,基底摩擦会使临塑荷载提前出现,为减小基底摩擦力,可在柔性承载板底铺一

张 0.1 mm 厚的聚四氟乙烯。柔性承载板上依次放置千斤顶和压力传感器, 紧挨柔性承载板底安放柔性水压板, 压上不锈钢条, 使有机玻璃管内水位上升至 15 cm 的位置, 表明此时柔性水压板底作用于土表面的荷载为 1.5 kPa。然后套上上部反力架, 加载时反力架承受着千斤顶的向上顶力, 反力架通过 4 根螺栓将该顶力传给下部框架, 下部框架以土体自身重量和承载板的作用荷载作为反力源, 从而实现了竖向作用力的自平衡。

图 8 为柔性承载板载荷试验照片。试验需 3 名实验人员同时操作, 右边的实验人员根据气压表显示数字操作气筒, 中间的实验人员根据测力显示仪上的显示数字操作油泵杆, 左边的实验人员负责观察时间, 并记录各级荷载作用下 2 个电感表的读数。粘性土的完全变形稳定需要较长的时间, 为加快实验进程, 同时结合试验土体的变形特性, 每级荷载保持 2 min 后读数。



图 8 柔性承载板载荷试验照片
Fig.8 Picture of flexible bearing PLT

5.2 黏性土试验结果

以重庆大学城典型的全风化泥岩作为试验土体, 含水率约为 5.0%。多次的试验表明, 由于黏性土的均质性和压实均匀性很难完全保证, 并非每次试验都能根据 p - $d\delta$ 曲线判断出临塑荷载的表观值 p'_{cr1} 。尤其是当下层土体比上层土体松软时, p - $d\delta$ 曲线呈现明显的不规则变化, 分析其中的原因, 此时土体发生的是冲剪破坏, 而不是整体剪切破坏或局部剪切破坏, 试验前填土需保证一定的压实度, 下层土体一定不能比上层土体松软。

图 9 为某次试验得到的较规则 p - $d\delta$ 曲线。图中, $q_1 = 0$ kPa 对应的曲线, 在 $p = 80$ kPa 之前曲线以较大倾角上升, $p = 80$ kPa 后曲线上升倾角变小, $p = 116 \sim 120$ kPa 时为明显的下降段, 之后又有上升, 但上升幅度很缓, 因此判断出 $p'_{cr1} = 116$ kPa,

计算出 $p_{cr1} = 116$ kPa, $q_2 = 1.5$ kPa 对应的曲线, 在 $p = 132$ kPa 之前曲线以较大倾角上升, 其中 $p = 100$ kPa 后曲线上升倾角略有减小, 在 $p = 132 \sim 148$ kPa 区间出现近乎水平段, 据此判断出 $p'_{cr2} = 132$ kPa, 计算出 $p_{cr2} = 132$ kPa。

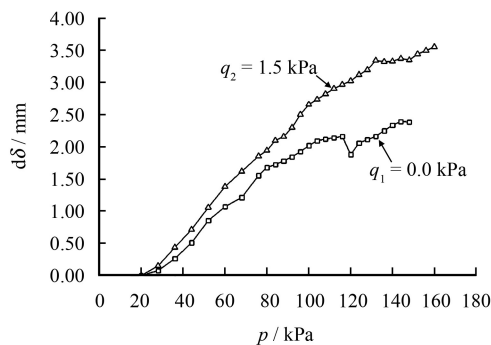


图 9 黏性土载荷试验 p - $d\delta$ 曲线
Fig.9 p - $d\delta$ curves resulted from test for cohesive soil

将 $q_1 = 0$ kPa、 $p_{cr1} = 116$ kPa 和 $q_2 = 1.5$ kPa、 $p_{cr2} = 132$ kPa 代入反演公式, 可以计算出 $c = 10.7$ kPa、 $\varphi = 38.6^\circ$ 。文献[17]对相同含水率与密实度的土体作室内快速直剪试验, 3 次测试的平均值为 $c = 12.7$ kPa、 $\varphi = 34.6^\circ$ 。与直剪试验相比, 载荷试验反演结果 c 偏小, φ 偏大。图 9 中, $q_1 = 0$ kPa 曲线在 $p = 80$ kPa 之后上升倾角变小, 与 $q_2 = 1.5$ kPa 曲线竖向间距加大, 说明此时出现了局部的土体提前屈服, 导致判断出的 p'_{cr1} 偏小, 如果取 $p'_{cr1} = 120$ kPa, 则可反演得 $c = 13.3$ kPa, $\varphi = 33.6^\circ$, 更符合经验判断, 也与室内直剪试验结果较接近。

5.3 干砂的试验结果

干砂的黏聚力 $c = 0$ kPa, 只需根据式 (2) 第一式反演出内摩擦角 φ , 载荷试验时, 同样取 $q_1 = 0$ kPa, 但此时 $p_{cr1} = 0$ kPa, 因此, a 可简化为 $\frac{\pi q_2}{p_{cr2} - q_2} + \frac{\pi}{2}$ 。

采用经 0.25 mm 筛孔的粉细干砂作为试验对象, 载荷试验前, 可采用堆砂实验法确定出干砂的内摩擦角 φ , 图 10 为堆砂试验照片。在相互垂直的两块平整木板角上堆砂, 当最终达到极限稳定状态时测得干砂的水平下滑宽度为 10 cm, 根据其竖向堆高 7 cm, 计算出内摩擦角 $\varphi = \arctan\left(\frac{7}{10}\right) = 35^\circ$ 。

自平衡加载架内直接装粉细干砂很容易从角缝漏出, 为了减少试验装土工作量, 设计采用试验区局部换土的方法。在自平衡框架内填筑的黏性土表面, 挖出一下小土坑, 深度约为 10 cm, 长宽分别

为 16 cm 和 12 cm, 平面位置如图 11 所示。图中, 大的矩形虚线框 (红色) 表柔性承载板的安放位置, 小的矩形虚线框 (绿色) 表柔性水压板的安放位置, 柔性承载板内侧斜线填充的小矩形框 (白色) 表感应片的位置。为与前面的堆砂试验相一致, 向土坑内填粉细干砂时无需用力碾压, 尽量保持天然密实状态, 同时每次试验完都对干砂进行拌合, 再平整表面, 以保证其初始状态不受前一次试验的影响。

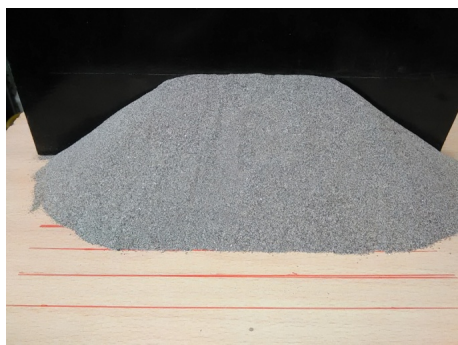


图 10 堆砂试验照片
Fig.10 Picture of piling up dry sand

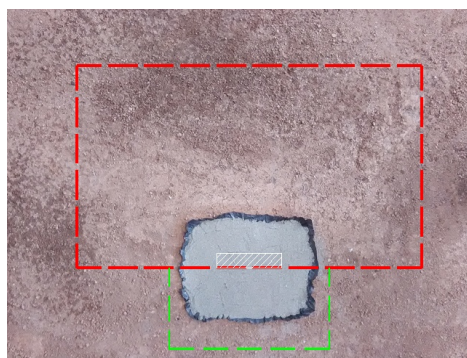


图 11 砂土试验时板的安放位置
Fig.11 Location of plates during dry sand test

分别取 $q_2 = 1.0$ 、 2.0 、 4.0 kPa 开展柔性承载板载荷试验, 柔性承载板底同样需铺一张 0.1 mm 厚的聚四氟乙烯以减小板底摩擦, 因干砂的变形时间很短, 每级加载下可以快速读数。

砂土载荷试验得到的 p - $d\delta$ 曲线如图 12 所示。图中, 当 $q_2 = 1.0$ kPa 时, p - $d\delta$ 曲线从 $p = 4$ kPa 开始近直线上升, $p = 7$ kPa 后有很明显的下降段, 之后有上升有下降, 至加载结束 ($p = 20$ kPa) 时 $d\delta$ 增加很小, 可以很容易判断出 $p'_{cr2} = 7$ kPa, 计算出 $p_{cr2} = 6$ kPa。当 $q_2 = 2.0$ kPa 时, p - $d\delta$ 曲线从 $p = 6$ kPa 开始为折线上升, $p = 16$ kPa 后有明显的下降段, 之后有上升有下降, 至加载结束 ($p = 30$ kPa) 时 $d\delta$ 有较大的增加, 但仍容易判断出 $p'_{cr2} = 16$ kPa,

计算出 $p_{cr2} = 14$ kPa; 当 $q_2 = 4.0$ kPa 时, p - $d\delta$ 曲线从 $p = 6$ kPa 开始为不规则上升, 上升幅度时而较大, 时而较小, 甚至出现近似水平段, $p = 34$ kPa 后, 有一个较明显的下降段, 之后有上升有下降, 至加载结束 ($p = 50$ kPa) 时 $d\delta$ 增加量较小, 可较容易判断出 $p'_{cr2} = 34$ kPa, 计算出 $p_{cr2} = 30$ kPa。

将 $q_2 = 1.0$ 、 2.0 、 4.0 kPa 及对应的 $p_{cr2} = 6$ 、 14 、 30 kPa 分别代入反演公式, 可分别计算出 $\varphi = 31.2^\circ$ 、 33.6° 、 34.7° , 平均值为 33.2° 。与堆砂试验结果相比, 载荷试验反演结果略小, 实际上由于堆砂试验时两块木板表面均存在一定的摩擦力, 堆出的干砂稳定角比真实内摩擦角要大一些, 因此可认为干砂载荷试验反演结果更接近真实值。

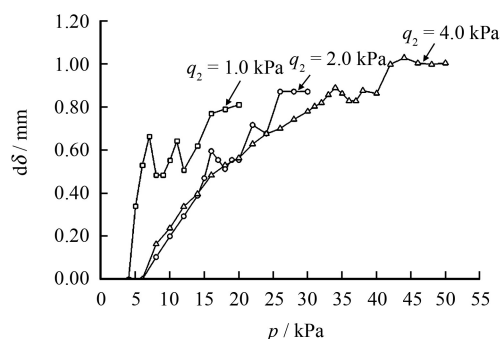


图 12 干砂载荷试验 p - $d\delta$ 曲线
Fig.12 p - $d\delta$ curves resulted from test for dry sand

图 12 表明, 随着地面荷载 q 的增大, p - $d\delta$ 曲线显示的临塑荷载 p_{cr} 变得不明显。因为 q 越大, p_{cr} 越大, 但在板底压力达到 p_{cr} 之前, 在柔性承载板与柔性水压板之间的缝隙处, 不可避免的出现局部的土体屈服, 使一部分临塑荷载变形提前释放, 导致临塑荷载变形不明显, 这种解释的有力佐证是: $q = 4.0$ kPa 时的 p - $d\delta$ 曲线较平缓段主要出现在 $p = 16$ kPa 与 34 kPa 之间。因此, 柔性承载板载荷试验时地面荷载 q 不宜施加过大 (q 太小时, 临塑荷载增大不明显, 同样不利于抗剪强度参数的准确反演), 对于本次试验的粉细干砂, $q_2 = 2.0$ kPa 较为合适。

5.4 试验结论

干砂由于其很好的均质性, 地面荷载不太大的情况下, p - $d\delta$ 曲线在临塑荷载前后呈现明显不同的变化特征, 很容易判断出临塑荷载值。黏性土在室内填压时均质性不易完全保证, 再加上其他因素, 导致有时无法根据 p - $d\delta$ 曲线判断出临塑荷载值, 通过提高填压水平, 确保下层土体比上层土体密实, 综合运用多种判别知识, 还是能较准确判断出临塑荷载值。

6 结 论

(1) 通过两种不同类型土的柔性承载板室内载荷试验, 证明了根据临塑荷载反演土抗剪强度参数的可行性。

(2) 在实际的现场测试中很容易找到一小块较均质的黏性土层作为试验对象, 再加上自重固结的结果, 通常情况下层土要比上层土密实, 除了含水率较高的软黏性土, 采用柔性承载板现场载荷试验测试土的抗剪强度参数能够保证一定适用性。

(3) 在柔性承载板现场载荷试验中试验土体处于三向受压状态, 类似于真三轴试验, 从技术角度看, 比现场直接剪切试验先进, 结合柔性承载板载荷试验还可以测试出地基土的准确变形模量 E_0 ^[18], 基于柔性承载板载荷试验反演土抗剪强度参数具有一定先进性。

基于柔性承载板载荷试验反演土抗剪强度参数还有一些问题需要下一步研究, (1) 根据试验曲线判断出的临塑荷载实际上是感应片下土体整体临近塑性变形时的荷载, 对于细颗粒土, 感应片的宽度越小越合理, 受位移传感器所需感应宽度限制, 无法做得太小, 本次研究采用的宽度是 15 mm, 与承载板宽度相比可认为足够小, 但对于粗颗粒土, 如碎石土, 为测试出土和石整体抗剪性能, 感应片应该要有一定的宽度, 同时承载板的宽度也可能需要增加, 如何确定出经济合理的宽度值? (2) 本次研究对粘性进行室内载荷试验时, 每级荷载下持续时间为 2 min, 实际上加载快慢对测试结果有影响, 尤其是对于含水量较高的黏性土, 如何与现有的直剪试验、三轴试验相对照, 确定出合理的持续时间? 等。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123-1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [2] 建设综合勘察设计院有限公司. GB 50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
GIGIS(China) Ltd., GB 50021-2001 Code for geotechnical engineering investigation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [3] 闫澍旺, 封晓伟, 侯晋芳, 等. 用十字板强度推算软黏土抗剪强度指标的方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1805-1810.
- YAN Shu-wang, FENG Xiao-wei, HOU Jin-fang, et al. Deduction and application of strength parameters of soft clay by use of vane strength[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(12): 1805-1810.
- [4] 闫澍旺, 孙立强, 李伟, 等. 真空加固超软土工艺的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 341-347.
- YAN Shu-wang, SUN Li-qiang, LI Wei, et al. Model test on vacuum preloading technology of super-soft soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(3): 341-347.
- [5] 郭喜峰, 晏鄂川, 刘洋. 三峡库区碎石土滑坡体抗剪强度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 68-71.
- GUO Xi-feng, YAN E'-chuan, LIU Yang. Shear strength of gravel soil landslide in the Three Gorges reservoir zone[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)**, 2015, 34(1): 68-71.
- [6] 李东升, 刘东升. 固结煤矸石抗剪强度特征试验[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(3): 59-66.
- LI Dong-sheng, LIU Dong-sheng. Experimental research on the shear strength of consolidation gangue[J]. **Journal of Chongqing University**, 2015, 38(3): 58-65.
- [7] 吴珺华, 袁俊平. 干湿循环下膨胀土现场大型剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 103-107.
- WU Jun-hua, YUAN Jun-ping. Field tests on expansive soil during wetting-drying cycles using large shear apparatus[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Supp.1): 103-107.
- [8] 陈晓平. 土力学与基础工程[M]. 北京: 水利水电出版社, 2008.
- CHEN Xiao-ping. Soil mechanics and foundation engineering[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 2008.
- [9] 赵明阶. 土力学与地基基础[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- ZHAO Ming-jie. Soil mechanics and foundation[M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [10] 洪毓康. 土质学与土力学(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- HONG Yu-kang. Soil science and soil mechanics(2nd ed)[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [11] ZHANG Ke, CAO Ping, BAO Rui. Rigorous back analysis of shear strength parameters of landslide slip[J].

- Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 2013, 23(5): 1459—1464.
- [12] 石崇, 张玉, 孙怀昆, 等. 争岗滑坡堆积体滑面强度参数反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3728—3734.
- SHI Chong, ZHANG Yu, SUN Huai-kun, et al. Back analysis of strength parameters of sliding surface of Zhenggang landslide deposit body[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.2): 3728—3734.
- [13] 周小平, 黄煜斌, 丁志诚. 考虑中间主应力的太沙地基极限承载力公式[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1554—1556.
- ZHOU Xiao-ping, HUANG Yu-bin, DING Zhi-cheng. Influence of intermediate principal stress on the formula of Terzaghi ultimate bearing capacity of foundations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(10): 1554—1556.
- [14] 谢新宇, 韩冬冬, 黄利, 等. 粗糙条形基础极限承载力系数 N_r 的计算[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 209—214.
- XIE Xin-yu, HAN Dong-dong, HUANG Li, et al. Calculation of ultimate bearing capacity factor N_r for rough strip footings[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 29(Supp.2): 3728—3734.
- [15] 杨小伟, 许年春, 尹一, 等. 电感式位移传感器在柔性承载板载荷试验中的应用[J]. 山西建筑, 2014, 40(16): 56—58.
- YANG Xiao-wei, XU Nian-chun, YIN Yi, et al. The application of inductive displacement sensor in flexible bearing plate load test[J]. **Shanxi Architecture**, 2014, 40(16): 56—58.
- [16] XU Nian-chun, XIA Wen-jing, WU Tong-qing. The effect of friction at the strip footings' underside on the expansion of plastic zones in subgrade[J]. **Advanced Materials Research**, 2014, (1008-1009): 1227—1233.
- [17] 张玉伟. 斜陡边坡前缘挡墙主动土压力计算方法研究[硕士学位论文 D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- ZHANG Yu-wei. The study of the calculation method of active earth pressure on retaining wall of inclined steep slope [M. S. Thesis D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [18] 许年春, 吴同情, 冯桥木, 等. 土变形模量的柔性承载板测试研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 1): 496—450.
- XU Nian-chun, WU Tong-qing, FENG Qiao-mu, et al. The research on the test of soil's deformation modulus using flexible bearing plate[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(Supp.1): 496—450.

结构模型设计制作与分析

著译者: 李俊华 林云 版次: 第一版 出版时间: 2018-02 开本: 小 16 开

出版单位: 中国建筑工业出版社 标准书号: 978-7-112-21576-8

【内容简介】土木工程是一个实践性很强的专业, 为提高学生的创新设计与工程实践能力, 全国高等学校土木工程专业指导委员会和中国土木工程学会自 2007 年以来, 每年主办全国大学生结构设计竞赛, 到 2017 年已成功举办了十一届。该项赛事现已成为教育部确定的全国九大学生学科竞赛之一, 每年吸引大量土木工程及其他相关专业的学生参与。在全国大学生结构设计竞赛的引领和带动下、各省、市、地区以及高校内部的结构设计竞赛也在不断开展。当然, 也有个别省、市的竞赛活动开展时间早于全国赛事, 如浙江省, 其省内一年一度的大学生结构设计竞赛至今已成功举办了十六届。

【读者对象】本书可供建筑结构相关专业高校师生参考学习。

【目 录】第 1 章 吊脚楼模型设计制作与分析 第 2 章 高跷模型设计制作与分析 第 3 章 古建筑模型设计制作与分析 第 4 章 山地桥梁模型设计制作与分析 第 5 章 大跨度屋盖结构模型设计制作与分析 第 6 章 海洋平台模型设计制作与分析 第 7 章 广告版模型设计制作与分析 第 8 章 高架水塔模型设计制作与分析 第 9 章 碰撞冲击下梁式结构模型设计制作与分析 第 10 章 塔式停车楼模型设计制作与分析 第 11 章 不等跨两跨桥梁模型设计制作与分析 参考文献。

(信息来源: 中国建筑书店网站)