

# 粘土中孔隙水压力-圆锥触探试验结果的解释及分析

吴京平 王淑云 (中国科学院力学研究所)

**提要** 本文介绍了粘土中孔隙水压力-圆锥触探试验(CPTU)结果的解释方法,结合一实例做了分析比较,并就CPTU资料解释及应用中可能遇到的一些问题进行了讨论。

## 一、CPTU 结果的解释方法

### (一) 不排水抗剪强度 $S_u$

利用CPTU评估粘土的不排水抗剪强度,单凭理论分析往往得不到满意的结果,多数场合下仍应用经验或半经验的方法。目前常用的方法见表1。 $q_c$ 为锥头阻力的量测值, $q_t$ 是经孔隙水压力修正后的锥头阻力, $\sigma_{v0}$ 为原位上覆应力, $u$ 为动孔隙水压力, $\Delta u = u - u_0$  ( $u_0$ 为静态孔隙水压力)。上述各法中的圆锥系数 $N$ 取决于土的应力历史、灵敏度及刚度等因素,通常是利用现场十字板的 $S_u$ 来确定 $N$ 值。

$S_u$ 评估方法汇总 表1

方法	$S_u$
$N_{KT}$ 法	$S_u = (q_c - \sigma_{v0}) / N_{KT}$
$N_{KE}$ 法	$S_u = (q_t - \sigma_{v0}) / N_{KE}$
$N_c$ 法	$S_u = q_t / N_c$
$N_{\Delta u}$ 法	$S_u = \Delta u / N_{\Delta u}$

### (二) 灵敏度 $S_t$

$S_t$ 可用下式估算: $S_t = N_s / FR$ ,其中 $FR$ 为摩阻比, $N_s$ 为经验系数。

### (三) 超固结比 OCR

OCR是依Schmertmann<sup>[1]</sup>的关系

$$(S_u / \sigma_{v0}')_{OC} = (S_u / \sigma_{v0}')_{NC} \cdot OCR^m$$

评估的,式中 $(S_u / \sigma_{v0}')_{NC}$ 和 $(S_u / \sigma_{v0}')_{OC}$ 分别为正常固结及超固结粘土不排水强度与有效上覆应力比, $m$ 为经验系数。

### (四) 固结系数

通过量测孔隙水压力的消散过程,并利用Levadoux<sup>[2]</sup>的方法,可对土的固结和渗透系数有大致的评估。对某给定的孔隙水压力消散度,水平向固结系数 $C_h$ 由下式计算:

$$C_h = R^2 T / t$$

$R$ 为圆锥仪直径; $t$ 为达到某孔隙水压力消散度所需时间; $T$ 为时间系数,与圆锥几何尺寸和孔隙水压力量测位置有关。

### (五) 渗透系数

固结系数确定之后,可由下式对土的渗透系数的大小进行评估:

$$k_v = C_v m_v \gamma_w \quad k_h = C_h m_h \gamma_w$$

式中 $k_v$ 和 $k_h$ 分别为竖向和水平向的渗透系数, $m_v$ 和 $m_h$ 分别为竖向和水平向的体积压缩系数, $m_v$ 依下式推算: $m_v = 1 / \alpha q_c$ , $\alpha$ 为随土性而变化的经验系数。

## 二、实例分析

### (一) 场地及试验简介

试验地点位于加拿大温哥华市区南部的 Fraser 河三角洲北端, 该场址地表平缓, 地下水位约 1m, 地表至 5m 为较硬的粉质粘土, 5~20m 为中细砂, 20~60m 主要为软到较硬的正常固结灰色海相粉质粘土, 并夹有少量细砂薄层。场地土层的剖面图见图 1。

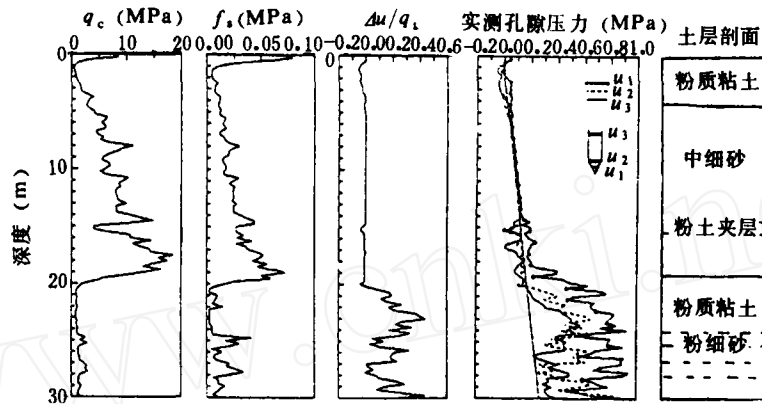


图 1 试验结果及土层剖面图

试验先后采用了两个圆锥探头, 其几何尺寸均为圆锥截面积  $10\text{cm}^2$ , 圆锥角  $60^\circ$ , 摩擦筒面积  $150\text{cm}^2$ , 只是孔隙水压力的量测位置不同, 其一是仅量测  $u_2$ , 另一为同时量测  $u_1$  和  $u_3$  (如图 1 所示)。贯入速率为  $2\text{m/s}$ 。在若干深度处分别进行了  $u_1$  和  $u_2$  孔隙水压力的消散试验。试验深度为  $0\sim 30\text{m}$ 。

### (二) 试验结果及其解释分析

图 1 各图分别为实测圆锥锥头阻力  $q_c$ 、侧壁摩阻力  $F_s$ 、差动孔隙水压力比  $\Delta u/q_c$  及动孔隙水压力随深度的变化情况。本文将对  $20\sim 30\text{m}$  的粘性土进行分析。

#### (1) 不排水抗剪强度 $S_u$

图 2 是利用表 1 各方法对  $S_u$  的评估结果。为便于比较, 也将该场地现场十字板剪切试验 (FVST) 结果绘于图上。从  $S_u$  随深度的变化来看, 由于是从砂层过渡到粘土层, 故在  $20\sim 23\text{m}$  间  $S_u$  略呈递减状, 这之后便随深度而增大, 十字板和 CPTU 的解释结果 (除图 2e 外) 均有这一趋势。另外, 薄砂层的存在对圆锥触探试验的影响较大, 而对十字板的  $S_u$  没有太大的影响。

图 2b 为利用  $N_{kT}$  法,  $N_{kT}=12$  时的评估结果。就变化趋势和整体而言, 该结果与十字板的  $S_u$  是比较吻合的, 但由于  $24.5\sim 25.5\text{m}$  和  $26.5\sim 28\text{m}$  处薄砂层的存在, 使 CPTU 的  $S_u$  在这些深度处明显偏大。图 2a 为  $N_k$  法所得结果, 同样采用  $N_k=12$ , 从中便可看到因不作孔隙水压力修正本身给  $S_u$  评估带来的误差。由于薄砂层的存在, 使得动孔隙水压力变化幅度较大, 这给直接或间接利用孔隙水压力来评估  $S_u$  带来了困难, 比如图 2c 和图 2e 中的  $S_u$  数值的变化在整个深度范围内都呈相反的趋势。图 2e 中  $20\text{m}$  处的负值是因该处的具剪胀

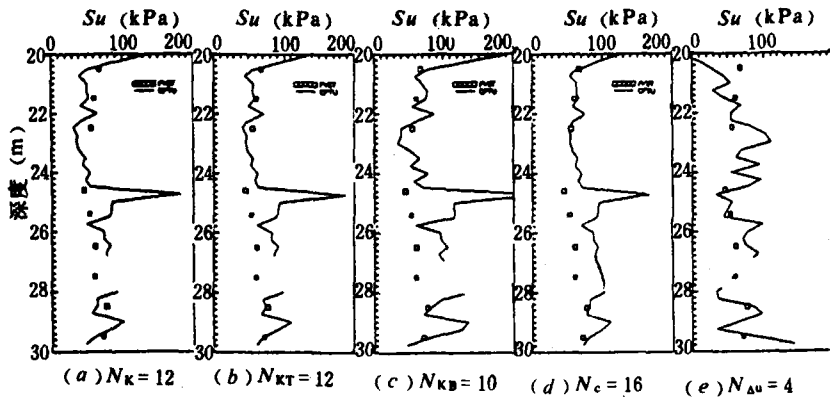


图 2 不排水抗剪强度解释结果及比较

性粉土在贯入时出现负孔隙水压力所致。图 2d 显示了采用  $N_c$  法 ( $N_c=16$ ) 所得解释结果的情况。

从以上的比较分析笔者认为,对该层粘性土,采用  $N_{kr}$  法和  $N_c$  法是比较适宜的。

### (2) 灵敏度 $S_t$

图 3 为  $N_c=10$  时对粘土灵敏度  $S_t$  的评估结果,结果表明,与  $FVST$  的  $S_t$  相比,因若干处砂粒含量的增加,使  $CPTU$  的  $S_t$  在这些位置处有偏小的趋势。

### (3) 超固结比 $OCR$

一般来讲,正常固结粘土的锥头阻力与深度成正比,其延线与锥头阻力-深度坐标原点相交。从  $q_c$  分布可推断 20~30m 为正常固结粘土。根据该地区的经验,这里选用  $(S_u/\sigma'_{v0})=0.25$ ,  $m=0.8$ 。图 4 表明,除局部砂层处与  $FVST$  的  $OCR$  偏离较大外,大部分土的  $OCR$  约为 1。这一结果与上述推测和该地区已有的勘探结果是相吻合的。

### (4) 固结系数及渗透系数

从某一深度的实测孔隙水压力消散曲线上求得达 50% 孔隙水压力消散度所需时间  $t_{50}$ , 并对  $u_1$  和  $u_2$  消散分别选用时间系数  $T=0.88$  和  $T=4.8$ , 即可评估  $C_h$ 。根据该场地的土质情况和<sup>[2]</sup>建议,认为  $C_v=C_h/3$ 。对渗透系数的评估结果表明,该粉质粘土渗透系数的大小为  $10^{-5}$ cm/s 量级。

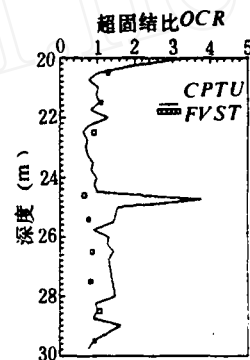


图 3 灵敏度的解释结果

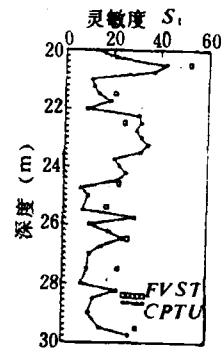


图 4 超固结比的解释结果

## 三、讨 论

### 1. 关于孔隙水压力的修正。由于孔隙水压力—圆锥触探仪结构上的原因,需要对实测

锥头阻力  $q_c$  就孔隙水压力的影响作如下的修正:

$$q_t = q_c + u(1-a)$$

式中  $a$  为圆锥的净面积比。从图 2a、2b 来看, 由于该场地土的孔隙水压力  $u$  与  $q_c$  相比不是很大, 因而这一校正与否对评估  $S_u$  的影响不明显。但对于象港湾及近海土工调查中可能遇到的饱和软粘土,  $u$  值往往很高, 而  $q_c$  却很小, 这一校正就显得尤为必要。另外, 当圆锥仪摩擦筒两端截面积不等时, 也应考虑对摩阻力  $f_s$  的校正。

2. 关于孔隙水压力量测位置 已有的资料表明, 动孔隙水压力的大小与传感器在圆锥仪上所处位置有关, 而且, 这种不同位置处的孔隙水压力的相对变化取决于土的应力历史和密实程度。图 5 是在不同类型饱和土中, 不同位置处动孔隙水压力的分布示意图。由于正应力的作用, 任何情况下  $u_1$  值都最大, 正常固结粘土的  $u_2$ 、 $u_3$  与  $u_1$  相差不大, 而随着粘土 OCR 或粉土密实程度的增大, 这种相差不大会加大,  $u_2$  或  $u_3$  甚至出现负孔隙水压力。将本文实例中  $u_1$ 、 $u_2$  和  $u_3$  随

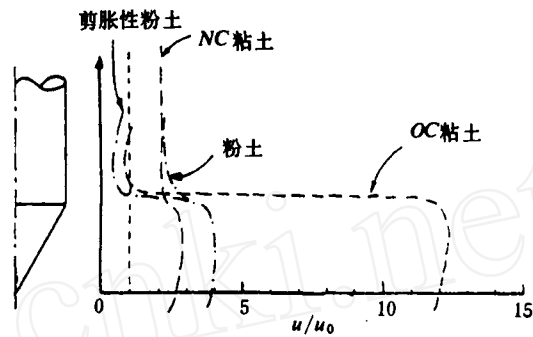


图 5 孔隙水压力分布示意图

深度的变化情况与图 5 比较后可发现, 就 20~30m 整个范围而言, 土大致处于正常固结粘土或较松状态的粉质粘土之间。但在 25.5~27.0m 之间,  $u_1$  和  $u_2$  数值较小, 表明该深度范围的土与具有剪胀特性的粉土有相似的性质, 这可能是因上下两薄砂层的存在为该层土的排水固结提供了良好的边界条件, 致使量测的动孔隙水压力  $u_1$ 、 $u_2$  偏小。笔者认为, 若圆锥仪可同时量测  $u_1$ 、 $u_2$  和  $u_3$ , 将了解粘土的 OCR 和粉土的体变特性提供更多的资料。另外, 由于  $u_1$  和  $u_2$  的消散边界条件不同 ( $u_1$  接近于点消散,  $u_2$  为径向消散), 故消散试验中的消散速率也不同。

3. 排水条件的影响。一般认为, 在 2cm/s 的贯入速率下, 粘土处于不排水状态, 但实际上因局部粉颗粒的增加或过渡层的存在, 粘土的塑性降低, 透水性能增强, 致使圆锥贯入过程中部分动孔隙水压力及时消散, 即土处于部分排水状态, 这将引起  $q_c$  的上升。这时若仍按不排水条件来处理将给  $S_u$  的评估带来误差。在本文实例中, 当粉粒或细砂含量增多时 (如 24~28m 间),  $S_u$  明显增大, 这正是由于低塑 ( $PI=8$ ) 的、中等透水性土的存在引起部分排水所致。因此, 在试验和资料解释过程中, 应对土的排水条件、塑性及透水性的大小有基本的了解和判断。这对各种类型的粉质土尤为重要, 因为某些高塑性粉质土具有粘土的特性, 而某些低塑性粉质土又常常具有砂土的特性。

4. 各种  $S_u$  评估方法的比较。  $N_{kr}$  法是 CPTU 最常用的方法。但应注意的是, 对诸如海洋工程等需涉及较大埋深的土应考虑不断增加的上覆应力对  $q_c$  的影响。另外, 严重超固结粘土中裂隙的存在及渐进性破坏可能影响土的排水条件, 从而影响  $q_c$  的大小。  $N_k$  法和  $N_c$  法多用来对 CPT 资料进行解释。对于饱和的软粘土, 孔隙水压力的量测精度比  $q_c$  的要高, 因此  $N_{\Delta u}$  法更适合用来评估饱和软粘土的  $S_u$ 。不过, 对埋深较大、处于超固结状态或其他局部粉粒含量较高的粘性土, 所测孔隙水压力很小, 甚至为负值, 这时  $N_{\Delta u}$  法不是适用的。

## 致 谢

本文实例中的现场试验是作者在加拿大英属哥伦比亚大学土木系进修期间，在 Dr R. G. Campanella 指导下，与该系学生共同完成的，对此深表感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Schmertmann, J. H, 1987a, Guidelines for cone penetration test performance and design. Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78-209, Washington.
- [2] Levadoux, J. N. , Consolidation after undrained piezocone penetration. J. of Geo. Div. ASCE VOL. 112, No. 7, 1986