

中华人民共和国行业标准

# 静力触探技术规则

**TBJ 37 — 93**

**1993 北 京**

# 关于发布《铁路工程地质软土勘测规则》 等两个铁路工程建设标准规范的通知

铁建函〔1993〕86号

《铁路工程地质软土勘测规则》(TBJ38—93)和《静力触探技术规则》(TBJ37—93),经审查批准,现予发布,自1993年7月1日起施行。

本规范由部建设司负责解释。

铁 道 部

一九九三年二月十二日

# 编 制 说 明

本规则是根据铁道部铁基〔1986〕1316号文件的通知,由我院负责主编,铁道部科学研究院,铁道部第一、二、三勘测设计院,长沙铁道学院和北京铁路局参加编制的。

在编制过程中,开展了较大规模的试验和专题研究;吸取了铁道部原基建总局和科技局 1980 年发布的《静力触探使用技术暂行规定》实施中积累的经验;在设备、器材方面较大程度地采用国际标准。在广泛征求路内外有关单位意见的基础上完成了送审稿,经铁道部组织审查后定稿。

本规则共分六章,另有四个附录。主要包括:总则、设备、探头的标定及计算、现场作业、资料整理、成果分析等。

在执行过程中,希各单位结合工程实践和科学研究,认真总结经验,注意积累资料,如发现需要修改和补充之处,请将意见及有关资料寄送铁道部第四勘测设计院(武昌杨园,邮编 430063),并抄送铁道部建设司标准科情所(北京朝阳门外大街 227 号,邮编 100020),供今后修订时参考。

铁道部第四勘测设计院

一九九一年九月

# 目 录

第一章 总 则 .....	1
第二章 设 备 .....	2
第一节 一般规定 .....	2
第二节 贯入系统 .....	2
第三节 测量系统 .....	3
第四节 标定设备 .....	5
第三章 探头的标定及计算 .....	6
第一节 一般规定 .....	6
第二节 探头标定 .....	6
第三节 探头标定结果计算 .....	8
第四章 现场作业 .....	11
第一节 一般规定 .....	11
第二节 准备工作 .....	11
第三节 贯入及起拔要点 .....	12
第五章 资料整理 .....	15
第一节 一般规定 .....	15
第二节 原始数据的修正及触探参数计算 .....	15
第三节 静力触探成果图和归一化超孔压消散曲线绘制 .....	18
第六章 成果分析 .....	20
第一节 一般规定 .....	20
第二节 土层划分及触探参数计算 .....	20
第三节 土类划分与触探参数换算 .....	22
第四节 土的物理力学指标的测定 .....	23
第五节 地基基本承载力及变形参数的取值 .....	26
第六节 单桩容许承载力的计算 .....	31
第七节 地基土液化判别 .....	34
附录一 本规则名词解释 .....	37

附录二	探头规格、各部加工公差及更新标准 .....	39
附录三	静力触探图表格式 .....	42
附录四	本规则用词说明 .....	48
附加说明	.....	49
《静力触探技术规则》条文说明	.....	51

# 主 要 符 号

- $\alpha$ ——探头的锥尖有效面积比；
- $A_t$ ——土体破坏时的孔隙水压力系数(简称孔压系数)；
- $B_q$ ——超孔隙压力比(简称孔压比)；
- $C_h$ ——水平固结系数；
- $C_v$ ——垂直固结系数；
- $C_c$ ——压缩指数；
- $C_e$ ——回弹(再压缩)指数；
- $D_r$ ——相对密度；
- $E_0$ ——变形模量；
- $E_s$ ——压缩模量；
- $E_u$ ——不排水杨氏模量；
- $e$ ——土的孔隙比；
- $FS$ ——在额定荷载下仪表和探头的满量程输出值；
- $F_a$ ——锥尖有效截面积；
- $f_s$ ——探头侧壁摩擦阻力(简称侧阻)；
- $G$ ——地基土剪切模量；
- $H_c$ ——软土地基路堤的极限高度；
- $I_L$ ——液性指数；
- $I_p$ ——塑性指数；
- $I_c$ ——刚度指数；
- $OCR$ ——超固结比；
- $[P]$ ——单桩容许承载力；
- $p_s$ ——单桥探头比贯入阻力；
- $p'_s$ ——由单桥探头确定的液化临界贯入阻力；
- $q_c$ ——双桥探头及孔压探头的锥尖阻力(简称端阻)；
- $q_T$ ——探头总锥尖阻力；

- $q'_c$ ——用双桥探头确定的液化临界贯入阻力；  
 $R_f$ ——摩阻比( )；  
 $U$ ——以孔隙水压为定义的固结度；  
 $\bar{U}$ ——归一化超孔压比；  
 $u_d$ ——探头贯入时于锥面上测得的孔隙水压力；  
 $u_T$ ——探头贯入时于锥底圆柱面处测得的孔隙水压力。 $u_T$  与  $u_d$  统称为贯入孔压；  
 $u_t$ ——探头停止贯入后某时刻  $t$  的孔隙水压力；  
 $u_w$ ——土的静止孔隙水压力或均衡孔隙水压力；  
 $\Delta u$ ——探头贯入时土的超孔隙水压力；  
 $\Delta u_t$ ——探头停止贯入后某时刻  $t$  土的超孔隙水压力；  
 $\gamma$ ——土的重力密度(简称重度)；  
 $\sigma_0$ ——地基基本承载力；  
 $\tau_u$ ——土的不排水抗剪强度。

中华人民共和国行业标准

静力触探技术规则

**TBJ 37 — 93**

主编单位：铁道部第四勘测设计院  
批准部门：铁 道 部  
施行日期：1993年7月1日

1993 北 京



# 第一章 总 则

**第 1.0.1 条** 为适应铁路工程地质勘探工作采用原位测试技术的要求,以提高工作质量,降低勘探费用,制定本规则。

**第 1.0.2 条** 本规则适用于在碎石含量小于 20%的粘性土层和砂类土层中,使用静力触探进行原位测试。

**第 1.0.3 条** 在重要工程场地或缺乏静力触探使用经验的地区,静力触探必须与钻探采样试验或其它测试手段配合使用;在地质情况清楚或有使用静力触探经验的地区,静力触探可单独使用。

**第 1.0.4 条** 静力触探技术工作,除应符合本规则外,尚应符合铁道部现行有关标准规范的规定。

## 第二章 设 备

### 第一节 一 般 规 定

**第 2.1.1 条** 静力触探设备应包括触探设备和标定设备。

触探设备由贯入系统、测量系统、反力装置\* 三部分组成。

标定设备包括测力(压)计或力传感器和加、卸荷用的装置(标定架或压力罐)及辅助设备。

**第 2.1.2 条** 静力触探设备的技术性能应符合本规则要求,并应定期进行检修、保养;对其中的易损件应经常进行检查,及时更换。

### 第二节 贯 入 系 统

**第 2.2.1 条** 贯入系统应包括触探主机、探杆和附属工具。

**第 2.2.2 条** 触探主机应符合下列技术条件:

一、能匀速贯入,贯入速率为  $20 \pm 5 \text{mm/s}$ ;当使用孔压探头触探时,宜有实施标准贯入速率( $20 \text{mm/s}$ )的调节、控制装置。

二、能保证贯入和起拔时,施力作用线垂直机座基准面,其垂直度公差为  $30'$ 。

三、额定起拔力不小于额定贯入力的  $120\%$ 。

**第 2.2.3 条** 静力触探探杆应采用高强度无缝管材,其屈服强度不宜小于  $600 \text{MPa}$ ,工作截面尺寸(包括接头)必须与触探主机的额定贯入力相匹配。

**第 2.2.4 条** 探杆应符合下列技术要求:

一、使用于同一台触探主机的探杆长度(包括一个接头)应相同,其长度误差不得大于  $0.3\%$ 。

---

\* 对反力装置本规则不作具体规定,但应与触探主机的额定贯入能力相适应。

二、用于前 5m 的探杆,其弯曲度不得大于 0.05%;后续探杆的弯曲度,当触探孔设计深度不大于 10m 时,探杆弯曲度不得大于 0.2%;触探孔设计深度大于 10m 时,探杆弯曲度不得大于 0.1%。

三、探杆两端螺纹轴线的同轴度公差为  $\phi 1$ 。

四、探杆与接头的连接要有良好的互换性。

五、以锥形螺纹连接的探杆,连接后不得有旷动现象;以圆柱形螺纹连接的探杆,丝扣之根、肩彼此应能拧紧密贴。

六、探杆不得有裂纹和损伤。

### 第三节 测量系统

**第 2.3.1 条** 测量系统应包括记录仪器、探头和传输信号的电缆。

**第 2.3.2 条** 记录仪器应符合下列技术条件:

一、仪器显示的有效最小分度值小于  $0.06\%FS$ 。

二、自动记录仪的记录笔,其满量程划线时间不大于 5s;记深(走纸长度)误差小于 1%。

三、仪器按要求预热后,其时漂应小于  $0.1\%FS/h$ ,温漂小于  $0.01\%FS/^{\circ}C$ 。

四、能在  $-10\sim 45^{\circ}C$  的环境温度中正常工作。

**第 2.3.3 条** 当记录仪器用于多功用探头时,应保证各传输信号互不干扰。

**第 2.3.4 条** 当采用读数方式测记各贯入深度的触探参数时,由标尺和位移指针组成的计深装置应符合下列要求:

一、标尺刻度为 10cm,刻度误差小于  $\pm 5mm$ ,但其累积误差不得大于标尺全长的 0.2%。

二、标尺应垂直固定于触探孔旁的地面不动点处;位移指针应置于向下贯入的工作探杆上,随探杆一道下移。当探杆在贯入状态下,不得移动标尺。

**第 2.3.5 条** 使用自记式仪器时,其计深误差不得大于触探

深度的1%。

**第2.3.6条** 静力触探探头,可分为单桥探头、双桥探头和孔隙水压探头(简称孔压探头)三种。

**第2.3.7条** 探头规格、各部加工公差和更新标准应符合本规则附录二的规定。

**第2.3.8条** 探头的技术性能应符合下列要求:

一、测力传感器的检测总误差不应大于  $3\%FS$ ,其中非线性误差、重复性误差、滞后误差、归零误差均应小于  $1\%FS$ 。

二、探头在工作状态下,其各部传感器的互扰值应小于其本身测试值的  $0.3\%$ 。

三、探头的绝缘性能,应符合下列规定:

1. 探头出厂时的绝缘电阻应大于  $500M\Omega$ ,并且在  $500kPa$  水压下,恒压  $2h$  后,其绝缘电阻仍不小于  $500M\Omega$ 。

2. 用于现场测试的探头,其绝缘电阻不得小于  $20M\Omega$ 。

四、探头应能在  $-10\sim 45^{\circ}C$  的环境温度中正常工作;标定时与工作时的温度变化不宜大于  $20^{\circ}C$ 。

五、孔压探头的透水元件(过滤片)的设置位置,应符合下列规定:

1. 当过滤片置于探头锥面上时,过滤片中心或中位线距锥顶的距离为  $(1/2\sim 4/5)c$  ( $c$  为圆锥母线长度);

2. 当过滤片置于锥底以上圆柱面处时,过滤片的上表面距锥底面的高度应小于  $10mm$ 。

透水元件的几种设计形式见附图2.2。

六、过滤片的渗透系数宜为  $1\times 10^{-5}\sim 5\times 10^{-5}cm/s$ ;在组装好的孔压探头中,过滤片与相邻部件的接触面应具有  $110\pm 5kPa$  的抗渗压能力;过滤片应有足够的刚度和耐磨性。

七、在满负荷水压条件下,孔压传感器的应变腔的体(容)积变化不大于  $2mm^3$ ,体变率宜小于  $0.2\%$ 。

**第2.3.9条** 探头的加工应符合下列要求:

一、套筒和摩擦筒表面的纵向粗糙度应小于  $3.2\mu m$ ;

二、探头的表面硬度为  $HRC45\sim 50$ ;

三、锥头、摩擦筒与探头管之间的滑动间隙不宜大于  $150\mu m$ ;

四、锥头、摩擦筒与探头管的同轴度公差为  $\phi 0.2$ 。

**第 2.3.10 条** 对于各种探头,自锥底起算,在  $1000mm$  长度范围内,任何与其连接的杆件的直径不得大于探头直径;为降低探杆与土的摩擦阻力而需加设减摩阻器时,亦只能在此规定范围以外(上)的位置设置。

**第 2.3.11 条** 探头贮存应配备防潮、防震的专用探头箱(盒),并存放于干燥、阴凉的处所;带透水元件的探头锥尖,应贮存于盛有脱气液体(水或硅油)的专用密封容器内,使透水元件始终处于饱和状态。

## 第四节 标定设备

**第 2.4.1 条** 标定探头所用的测力(压)计或力传感器,其精度不得低于Ⅲ等标准测力计的精度。

**第 2.4.2 条** 测力(压)计或力传感器的公称量程不宜大于探头额定荷载的两倍。

**第 2.4.3 条** 探头的标定装置应符合下列要求:

一、探头标定达到满量程时,标定架的各部杆件稳定;为孔压传感器标定用的压力罐,压力检测装置密封性能良好。

二、标定装置作为力的传递机构,其力的传递误差应小于  $0.5\%$ 。

三、在工作状态下,标定架的压力作用线应与被标定的探头同轴,其同轴度公差为  $\phi 0.5$ 。

## 第三章 探头的标定及计算

### 第一节 一般规定

**第 3.1.1 条** 未经标定的探头,严禁在生产中使用,亦不得事后补做标定。

**第 3.1.2 条** 探头标定系数的有效期不得大于 3 个月。使用过程中发现触探数据异常,应及时重新标定。在重要工程使用过程中,尚应进行检验性标定。

**第 3.1.3 条** 探头标定时,应连同实际使用的仪器、电缆一道参加标定。同型号的仪器、电缆经检验确认互换后不致引起探头标定参数的改变量大于 1% 时,可以调换使用。

**第 3.1.4 条** 探头标定时的最大加载量应根据探头的额定荷载确定。新组装的探头,在正式标定前,应进行 3~5 次满负荷加载和卸载。

### 第二节 探头标定

**第 3.2.1 条** 探头的标定方法应按供桥电压对仪表、探头的输入和输出关系,分为下列两种:

一、固定桥压法;固定仪器的供桥电压,标定施加于探头的荷载与仪表输出值之间的对应关系。此法适用于电阻应变仪、数字显示器及带电压表的自记式仪器。

二、固定系数法;根据仪器性能和使用要求,先令定探头的标定系数为某一整数值(称令定系数),标定探头在该令定系数时对应于所施加的荷载,仪器所需要的供桥电压值。此法适用于桥压连续可调的自记式仪器。

**第 3.2.2 条** 用固定桥压法标定探头时,应符合下列要求:

一、在固定的供桥电压下,对探头加荷和卸荷应逐级进行。每级荷载增量可取探头最大加载量的  $1/10 \sim 1/7$ ;但在第一级荷载区间内,宜进一步细分成三级。

二、每级加荷或卸荷均应记录仪表输出值。探头标定记录格式可参照本规则附表 3.1 制作。

三、每次标定,其加、卸荷不得少于 3 个循环。

对于顶柱式传感器或传感器与传力垫可以相对转动的探头,每加、卸荷一个循环后,应转动顶柱或传力垫  $90^\circ \sim 120^\circ$ ,再进入下一个加、卸荷循环过程。

**第 3.2.3 条** 用固定系数法标定探头,应按下列步骤进行:

一、按下式计算记录纸中点荷载:

$$P_m = \frac{1}{2} K \cdot A \cdot L \quad (3.2.3)$$

式中  $P_m$ ——笔尖自记录纸零位线到中位线所需的荷载(即中点荷载),kN;

$K$ ——探头的令定系数;

$A$ ——探头的工作面积,  $\text{cm}^2$ , 见本规则附录二;

$L$ ——记录纸的有效宽度。

二、在  $2 \sim 8V$  范围内先输入一个假定桥压,施加荷载为  $P_m$ ,调整桥压使笔尖对准中位线,然后卸荷,转动调零旋钮使笔尖对准零位线。复加  $P_m$ ,重复上述操作过程,直至探头在空载和中点荷载两种状态下,笔尖能一道指零和对中为止。此时的供桥电压值,即为在该令定系数下的标定桥压。

三、在标定桥压下,以  $P_m/5$  为一级,逐级对探头加荷,直至纸带满幅荷载( $2P_m$ )。然后逐级卸荷回零,完成一个加、卸荷循环过程。与此同时,启动走纸机构,使标定曲线成梯状,以便读取数据。

**第 3.2.4 条** 在分级加荷(或卸荷)过程中,当出现加荷(或卸荷)过量时,应将荷载回复到预定荷载的前一级荷载,再加(或卸)至预定荷载。

**第 3.2.5 条** 对一批检测精度合格的探头,应抽出其总数的





一、以过原点的公式(3.3.1)所确定的直线,定为“最佳直线”。

二、探头的检测误差统一采用极差值,以满量程输出值的百分数表示。见图 3.3.2。

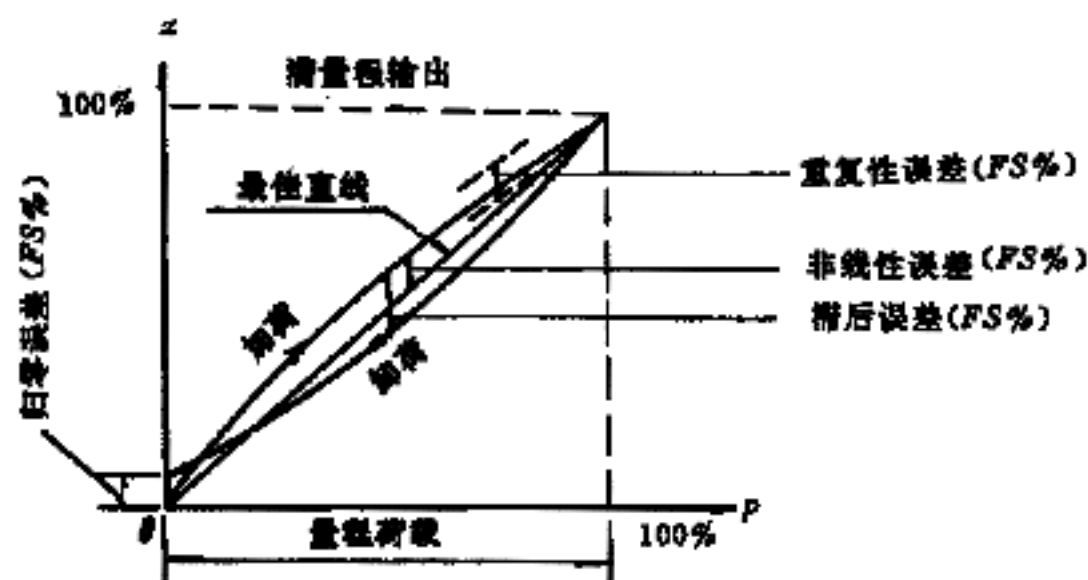


图 3.3.2 探头标定曲线及其误差

三、按公式(3.3.1—1~4)计算探头的各项误差:

$$\text{非线性误差} \quad \delta_1 = \frac{|x_i^{\pm} - \bar{x}_i|_{\max}}{FS} \times 100\% \quad (3.3.2-1)$$

$$\text{重复性误差} \quad \delta_r = \frac{(\Delta x_i^{\pm})_{\max}}{FS} \times 100\% \quad (3.3.2-2)$$

$$\text{滞后误差} \quad \delta_s = \frac{|x_i^{+} - x_i^{-}|_{\max}}{FS} \times 100\% \quad (3.3.2-3)$$

$$\text{归零误差} \quad \delta_0 = \frac{|x_0|}{FS} \times 100\% \quad (3.3.2-4)$$

式中  $x_i^{\pm}$  ——加荷(或卸荷)至第  $i$  级荷载时仪表的平均输出值;

$\Delta x_i^{\pm}$  ——重复加荷(或卸荷)至第  $i$  级荷载时仪表输出值的极差;

$x_0$  ——卸荷归零时仪表的平均不归零值;

$FS$  ——在额定荷载下仪表的满量程输出值;

其它符号同前。

四、当上列计算的检测误差及总误差均未超过本规则第 2.3.8 条第一款规定的容许值时,该探头即符合精度要求。

**第 3.3.3 条** 探头的灵敏度可根据起始感量( $Y_0$ )按表 3.3.3 规定标准分级;工作中应视场地地层情况和勘察要求,合理使用探头。

探头灵敏度分级

表 3.3.3

起始感量 $Y_0$ (kPa) 触探参数	灵敏度 分级	I	Ⅰ	Ⅱ
$p_s \setminus q_c$		$\leq 20$	$20 < Y_0 \leq 50$	$50 < Y_0 \leq 100$
$f_s$		$\leq 1$	$1 < Y_0 \leq 3$	$3 < Y_0 \leq 5$
$u_d \setminus u_T$		$\leq 2$	$2 < Y_0 \leq 5$	$5 < Y_0 \leq 10$

**第 3.3.4 条** 起始感量应按公式(3.3.4)计算

$$Y_0 = K \cdot \Delta x \quad (3.3.4)$$

式中  $Y_0$ ——起始感量;

$K$ ——探头的标定系数,按公式(3.3.1)计算;

$\Delta x$ ——仪表的有效(最小)分度值。

当计算出的  $Y_0$  值超过表 3.3.3 规定数值时,应提高供桥电压或换用薄壁传感器探头,重新标定、计算。

## 第四章 现场作业

### 第一节 一般规定

**第 4.1.1 条** 触探设备的贯入能力必须满足触探设计深度的需要。触探过程中,在确认上道工序操作无误后,方可进行下道工序的作业。

**第 4.1.2 条** 布置静力触探孔位,必须避开一切地下设施,清除有碍触探的杂填物。

**第 4.1.3 条** 进行水上静力触探时,应有保证孔位不致发生移动的的稳定措施。在水底以上的部分,宜加设防止探杆挠曲的约束装置。

**第 4.1.4 条** 当触探孔位附近已有其它勘探孔时,应将触探孔布置在距原勘探孔 25 倍孔径以外的范围;当进行平行试验时,要求两孔间距(中—中)不宜大于 3m,并应先行触探而后进行其它勘探、试验。

### 第二节 准备工作

**第 4.2.1 条** 现场作业前应了解以下情况:

- 一、工程类型、名称、孔位分布和孔深要求。
- 二、作业区地形和交通情况。
- 三、场地地层概况及勘探史(原有勘探孔位置及孔深、孔径。)
- 四、作业区地表有无杂物及地下设施(人防工程、地下电缆、管道等)以及它们的确切位置。
- 五、作业区有无高压电线、强磁场源以及其它可能干扰测试的因素。
- 六、使用外接电源工作时,了解其供电情况。

**第 4.2.2 条** 测试用电缆应将探杆按连接顺序一次穿齐,其

长度不小于公式(4.2.2)的计算值;

$$L > n(l + 0.15) + 7 \quad (4.2.2)$$

式中  $L$ ——电缆长度,m;

$l$ ——每根探杆长度,m;

$n$ ——探杆根数。

**第 4.2.3 条** 孔位安放触探机的地面应加以平整。使用的反力措施应保证静力触探达到预定深度。

**第 4.2.4 条** 检查拟使用的静力触探探头是否符合规定。核对探头标定记录,调零试压。孔压探头在贯入前应用特制抽气泵向孔压传感器的应变腔抽气并注入脱气液体(水、硅油或甘油),至应变腔无气泡出现为止。

### 第三节 贯入及起拔要点

**第 4.3.1 条** 将触探机就位后,应调平机座并使用水平尺校准,使之与反力装置衔接、锁定。当触探机不能按指定孔位安装时,应将移动后的孔位和地面高程记录清楚。

**第 4.3.2 条** 探头、电缆、记录仪器的接插与调试必须按有关说明书要求办理。

**第 4.3.3 条** 触探机的贯入速率应符合本规则第 2.2.2 条的规定;使用手摇式触探机时,手把转速应力求均匀。

**第 4.3.4 条** 在地下水埋藏较深的地区使用孔压探头触探时,应先使用外径不小于孔压探头的单桥或双桥探头开孔至地下水位以下,而后向孔内注水至与地面平,再换用孔压探头触探。

**第 4.3.5 条** 探头的归零检查应按下列要求进行;

一、使用单桥或双桥探头时,当其贯入地面下 0.5~1.0m 后,上提 5~10cm,待读数漂移稳定后,将仪表调零即可正式贯入。在地面下 1~6m 内,每贯入 1~2m 提升探头 5~10cm,记录探头不归零读数,随即将仪器调零。孔深超过 6m 后,可根据不归零读数之大小,放宽归零检查的深度间隔。终孔起拔时和探头拔出地面后,亦应记录不归零读数。

二、使用孔压探头时,在整个贯入过程中不得提升探头。终孔后待探头刚一提出地面时,应立即卸下过滤器,记录不归零读数。

**第 4.3.6 条** 使用记读式仪器时,每贯入 0.1m 或 0.2m 应记录一次读数;使用自记式仪器时,应随时注意桥压、走纸和划线情况,做好深度和归零检查的标注工作。

**第 4.3.7 条** 若计深标尺设置在触探主机上,则贯入深度应以探头、探杆入土的实际长度为准,每贯入 3~4m 校核一次。当记录深度与实际贯入长度不符时,应在记录表上标注清楚,作为深度修正的依据。

**第 4.3.8 条** 当于预定深度进行孔压消散试验时,应从探头停止贯入之时起,用秒表计时,记录不同时刻的孔压值和端阻值。其计时间隔由密而疏,合理控制。在此试验过程中,不得松动、碰撞探杆,也不得施加使探杆产生上、下位移的力。

**第 4.3.9 条** 对于需要作孔压消散试验的土层,若场区的地下水位未知或不确,则至少应有一孔对这些土层做到孔压消散达稳定值为止。以连续 2h 内孔压值不变为稳定标准。

其它各孔、各试验点的孔压消散程度,可视地层情况和设计要求而定,一般以固结度达 60%~70%时,即可终止消散试验。

**第 4.3.10 条** 遇下列情况之一者,应停止贯入,并应在记录表上注明:

- 一、触探主机负荷达到其额定荷载的 120%时;
- 二、贯入时探杆出现明显弯曲;
- 三、反力装置失效;
- 四、探头负荷达到额定荷载时;
- 五、记录仪器显示异常。

**第 4.3.11 条** 起拔最初几根探杆时,应注意观察、丈量探杆表面干、湿分界线距地面的深度,填入记录表的备注栏内或标注于记录纸上。并且应于收工前在触探孔内丈量地下水埋藏深度;有条件时,宜于次日核查地下水位。

**第 4.3.12 条** 探头拔出地面后,应对探头进行检查、清理。当

移位于第二孔触探时,孔压探头的应变腔和过滤器应重新进行脱气处理。

**第 4.3.13 条** 记录人员必须按记录表要求用铅笔逐项填记清楚。记录表格式可按本规则附表 3.3 和附表 3.4 制作。

## 第五章 资料整理

### 第一节 一般规定

**第 5.1.1 条** 本章所规定的资料整理内容与范围,仅限于单孔触探资料。

**第 5.1.2 条** 单孔触探成果图件应包括以下几项基本内容:

- 一、各触探参数随深度的分布曲线;
- 二、土层名称及潮湿程度(或稠度状态)级别;
- 三、各层土的触探参数值和地基参数值;

四、对于孔压触探,如果进行了孔压消散试验,尚应附上孔压随时间而变化的过程曲线;必要时可附端阻随时间而改变的过程曲线;

五、单孔触探图图幅尺寸与格式可按本规则附表 3.5~附表 3.7 制作。

### 第二节 原始数据的修正及触探参数计算

**第 5.2.1 条** 用读数方式取得的原始数据,应按下列步骤修正:

一、当记录深度与实际贯入深度有出入时,应根据记录表所标注的数值和深度误差出现的深度范围,按等距修正法予以调整;多余的读数记录应根据实际贯入情况予以删除。

二、当零漂值在该深度测试值的 10% 以内时,可将此零漂值依归零检查的深度间隔,按线性内插法对测试值予以平差。当零漂值大于该深度测试值的 10% 时,宜在相邻两次归零检查的时间间隔内,按贯入行程所占时间段落依比例进行线性平差。

三、各深度的测试值按公式(5.2.1)修正:

$$x'_d = x_d - \Delta x_d \quad (5.2.1)$$

式中  $x'_d$ ——某深度  $d$  读数的修正值；

$x_d$ ——该深度  $d$  的测试值(读数)；

$\Delta x_d$ ——相应该深度  $d$  的零漂修正量(平差值),分正、负。

**第 5.2.2 条** 用读数方式取得原始数据时,各深度的触探参数应按下列诸式计算；

$$X_d = K \cdot x'_d \quad (5.2.2-1)$$

$$R_f(\quad) = (f_s/q_c) \times 100 \quad (5.2.2-2)$$

$$q_T = q_c + (1-\alpha)u_T = q_c + \beta(1-\alpha)u_d \quad (5.2.2-3)$$

$$B_q = \Delta u / (q_T - \alpha_{v0}) \quad (5.2.2-4)$$

式中  $X_d$ ——某深度  $d$  的触探参数( $p_s$ 、 $q_c$ 、 $f_s$ 、 $u_d$ 或 $u_T$ )代号；

$K$ ——对应于各触探参数的标定系数；

$\beta$ ——贯入孔压换算系数,  $\beta = u_T/u_d$ , 参照表 5.2.2 取值；

$\alpha_{v0}$ ——土的总自重压力,  $\alpha_{v0} = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i$ ；

$\gamma_i$ ——第  $i$  层土的平均天然重度,可按本规则第 6.2.1 条规定取值；

$h_i$ ——第  $i$  层土的厚度或测试点与上层面的深度差；

其它符号见本规则主要符号说明。

与土质状态有关的  $\beta$  值

表 5.2.2

土质 状态	中砂、 粗砂	粉、细砂		正常固结和轻 度超固结粘土	重超固结粘土
		松散~中密	密实		
$\beta$ 值	1	0.7~0.3	0.1	0.8~0.7	0.1~0

**第 5.2.3 条** 用自动记录仪取得的原始记录曲线,应按下列要求修正；



## 一、深度修正

### 1. 实际贯入深度按公式(5.2.3)计算;

$$D = nl + h - \Delta l \quad (5.2.3)$$

式中  $D$ ——探头实际贯入深度;

$l$ ——每根探杆长度;

$n$ ——贯入土中的探杆根数;

$h$ ——从锥底全断面处起算的探头长度;

$\Delta l$ ——未入土的探杆余长。

2. 以孔口地面为深度零点,以停止贯入(加接探杆)时由锥尖应力松弛所形成的似归零线为依据,根据在记录纸上所标注的深度误差记录,按公式(5.2.3)校正记录曲线深度。曲线长度不足处,应据曲线发展趋势补入。

3. 对于双笔或三笔记录曲线,尚应标明深度零点。

## 二、曲线幅值修正

1. 以归零检查的标注为依据,直线连接两相邻归零点。根据此连线与记录纸上零线的偏差值,反号调整记录曲线的幅值。

2. 当因加接探杆造成记录曲线脱节或出现喇叭口曲线形态时,应以平顺曲线予以补齐。

根据探头的标定系数,对各条经过修正的触探曲线绘制纵横坐标比例尺,并注明单位和标出各触探曲线所代表的参数符号。

### 第 5.2.4 条 孔压消散值应按下列程序修正;

一、以经过修正的贯入孔压值( $u_d$ 或 $u_T$ )为消散试验的孔压初始值,以零漂修正量等量修正在该试验深度各个时刻测定的孔压消散值( $u_t$ )。

二、以孔压消散值( $u_t$ )为纵轴、时间对数值( $\lg t$ )为横轴,绘制孔压消散曲线( $u_t \sim \lg t$ )。

三、当孔压消散曲线初始段出现陡降现象时,可用云形板拟合其后段曲线并让其通过陡降段终点而与纵轴相交,以此修正孔压消散曲线的初始段。

四、当孔压消散曲线初始段出现上升现象时,宜略去其上升

段,以曲线峰值点作为该孔压消散曲线的计量起点,并在同一张  $u_t \sim \lg t$  坐标图中,重新绘制孔压消散曲线。

### 第三节 静力触探成果图和归一化超孔压消散曲线绘制

**第 5.3.1 条** 静力触探成果图可按下列方式绘制:

一、以深度为纵轴,其比例尺一般用 1:100 或 1:200,当图幅尺寸不够时,可缩小深度比例尺。

二、以触探参数为横轴,其中  $f_s$ 、 $u_d$ (或  $u_T$ )、 $q_c$  三者的数值比例关系,以取 1:10:100 为宜。

三、 $q_c$  或  $p$ ,用粗实线、 $u_d$  或  $u_T$  用细实线、 $f_s$  用虚线绘制触探曲线,再用点链线绘制静水压力  $u_w$  线。此四条曲线可同绘于一个座标图中,也可将  $u_d$ (或  $u_T$ ) 和  $u_w$  曲线绘制于该坐标图的对称侧。对自动记录曲线,经修正处理后,亦应透绘于同一张成果图中。

四、在与之并排的另一坐标图中,分别用细实线和虚线绘制  $B_q$  和  $R_f$  曲线,其横轴数值比例关系宜取 10:1。

五、对上述诸曲线应分别用参数符号标注清楚或示出图例。然后按本章第四节要求进行分层,计算各分层触探参数值和地基参数值,并填入成果图上的表格中。

**第 5.3.2 条** 归一化超孔压消散曲线应按下列要求绘制:

一、静止孔隙水压力及均衡孔隙水压力取值

1. 地基中的静止孔隙水压力( $u_w$ )按静水压力计值。静水压力由(5.3.2—1)式确定:

$$u_w = \gamma_w \cdot D_w \quad (5.3.2-1)$$

式中  $u_w$ ——静水压力,KN/m<sup>2</sup>;

$\gamma_w$ ——水的重度,kN/m<sup>3</sup>;

$D_w$ ——试验点在实测地下水位以下的深度,m。

2. 均衡孔隙水压力( $u'_w$ )取孔压消散达稳定时的孔压值,取值标准应符合本规则第 4.3.9 条规定。

3. 地基中试验点处的残余超孔压( $\Delta u_r$ )按(5.3.2—2)式计

算；

$$\Delta u_c = u'_w - \gamma_w D_w \quad (5.3.2-2)$$

二、各时刻的归一化超孔压比按(5.3.2—3)式计算；

$$\bar{U} = (u_t - u_w) / (u_{t=0} - u_w) \quad (5.3.2-3)$$

式中  $\bar{U}$ ——归一化超孔压比；

$u_t$ ——消散至某时刻( $t$ )的孔压值，可在经修正的孔压消散曲线上查取；

$u_{t=0}$ ——经修正了的孔压消散试验的初始值；

其余符号同前。

三、以  $\bar{U}$  为纵轴、时间  $t(s)$  的对数  $\lg t$  为横轴，绘制归一化超孔压消散曲线( $\bar{U} \sim \lg t$ )。

## 第六章 成果分析

### 第一节 一般规定

**第 6.1.1 条** 静力触探资料分析,应根据场地地质情况及当地建筑经验,针对建筑物类型和工程设计需要,进行成果分析并作出结论。

**第 6.1.2 条** 使用静力触探资料划分土层,可分为力学分层和工程分层,并应符合下列要求:

一、单独以触探参数值大小确定土层界面者,为力学分层。单桥探头触探成果,只能用于力学分层。

二、工程分层是在力学分层基础上,结合钻探资料或当地触探经验,确定土层名称、状态、潮湿程度及其它土质特性。

### 第二节 土层划分及触探参数计算

**第 6.2.1 条** 土层分层的详细程度应以满足工程需要为度;对主要持力层要详细划分;对工程有影响的软弱下卧层应单独划出。

**第 6.2.2 条** 土层界面位置的确定,应符合下列要求:

一、使用孔压探头触探时,以  $u_d$  (或  $u_T$ ) 和  $B_q$  值的突变点所在深度处为土层界面;

二、使用单桥或双桥探头触探时,应根据超前深度和滞后深度\* 划分土层。土层界面的确定方法如下:

1. 一般情况下,可取超前、滞后总深度中点偏向低阻力值土层(软层)10cm 处为分层界面;

---

\* 下卧土层对上覆土层贯入阻力( $q_c$ 或 $p_s$ )的影响高度称为超前深度,上覆土层对下卧土层贯入阻力的影响深度称为滞后深度。

2. 当上、下土层的  $q_c$  (或  $p_s$ ) 值相差一倍以上, 且其中软层的平均贯入阻力  $q_c$  (或  $p_s$ )  $< 2000 \text{ kPa}$  时, 取软层的最后一个 (或第一个)  $q_c$  (或  $p_s$ ) 小值偏向硬层  $10 \text{ cm}$  处为分层界面;

3. 当上、下土层的  $q_c$  (或  $p_s$ ) 值差别不明显, 则应结合  $f_s$ 、 $R_f$  值确定分层界面。

**第 6.2.3 条** 分层后各层土的触探参数值应按下列公式与要求取值:

一、当分层厚度大于  $1 \text{ m}$  且土质比较均匀时, 应扣除其上部滞后深度和下部超前深度范围的触探参数值, 然后按公式 (6.2.3—1~8) 计算土层的触探参数:

$$\bar{p}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{si} \quad (6.2.3-1)$$

$$\bar{q}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{ci} \quad (6.2.3-2)$$

$$\bar{f}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{si} \quad (6.2.3-3)$$

$$\bar{u}_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{di} \quad (6.2.3-4)$$

$$\bar{u}_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{Ti} \quad (6.2.3-5)$$

$$\bar{B}_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_{qi} \quad (6.2.3-6)$$

$$\bar{q}_T = \bar{q}_c + \beta(1-\alpha)\bar{u}_d = \bar{q}_c + (1-\alpha)\bar{u}_T \quad (6.2.3-7)$$

$$\bar{R}_f = \bar{f}_s / \bar{q}_c \quad (6.2.3-8)$$

式中符号代表触探参数的层平均值; 下角标  $i=1, 2, 3, \dots, n$ , 为触探参数数据编号。

二、对于分层厚度不足  $1 \text{ m}$  的均质土层, 如为软层, 应取其最小值为层平均值; 如为硬层, 则应取其较大值\* 为层平均值。

\* 较大值是指该层土的最大触探参数值所在深度上、下各  $20 \text{ cm}$  范围内的大值平均值。

三、若仅有经修正成图的记录曲线时,可根据各分层的曲线幅值变化情况,将其划分成若干小层,对每一小层按等积原则绘成直方图,再按公式(6.2.3—9)计算该分层土的触探参数值;

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \cdot h_i) / \sum_{i=1}^n h_i \quad (6.2.3-9)$$

式中  $\bar{X}$ ——各触探参数层平均值代号;

$h_i$ ——第  $i$  小层厚度;

$\bar{x}_i$ ——第  $i$  小层触探参数平均值代号。

四、分层曲线中,如遇特殊大值,应予剔除,不参与平均计算。

五、对由单层厚度在 30cm 以内的粉砂(或粘砂土)与砂粘土(或粘土)交互沉积的组合式土层,应分别计算出该组合土层中各触探参数的大值平均值和小值平均值。

### 第三节 土类划分与触探参数换算

**第 6.3.1 条** 单桥、双桥及孔压探头的贯入阻力可按下列公式换算;

$$q_T = p_s \quad (6.3.1-1)$$

$$p_s = 1.1 q_c \quad (6.3.1-2)$$

**第 6.3.2 条** 使用双桥探头时,可按图 6.3.2 划分土类。

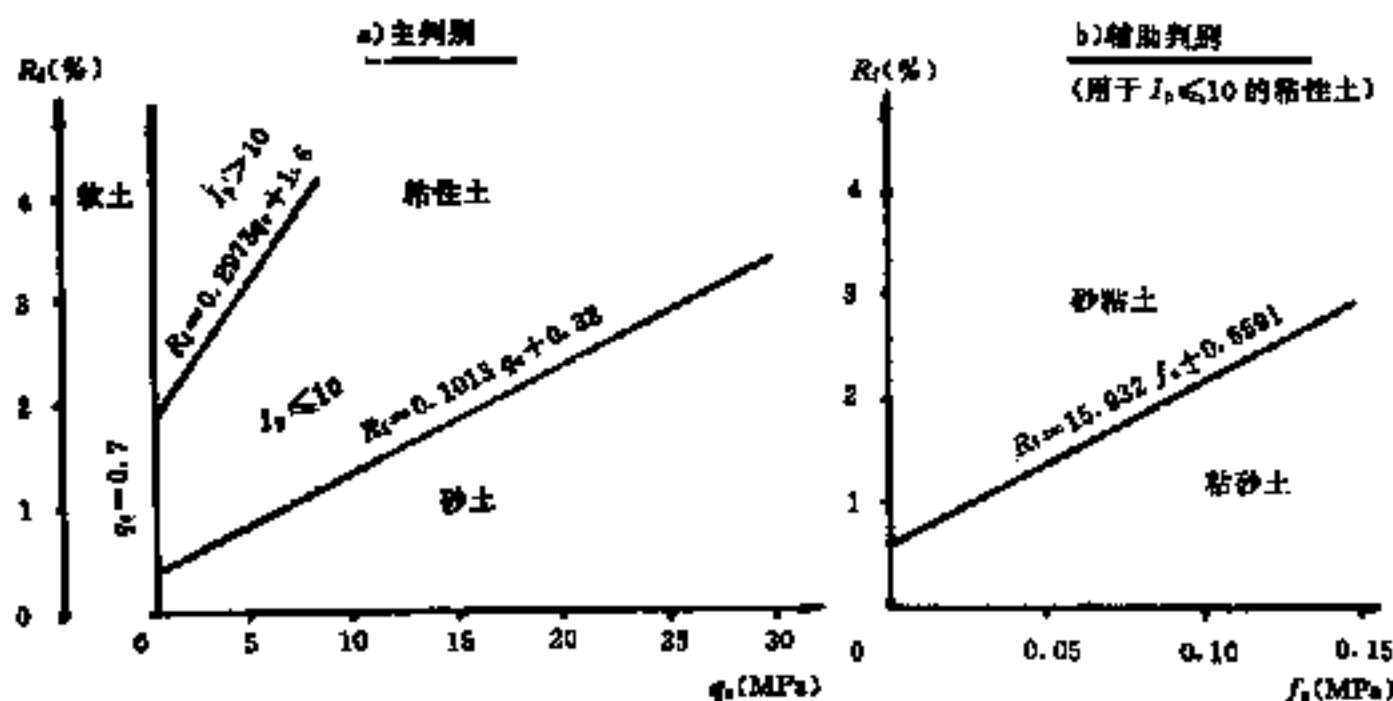


图 6.3.2 用双桥探头触探参数划分土类

**第 6.3.3 条** 使用透水元件置于锥面的孔压探头时,可按图 6.3.3 划分土类;

当透水元件置于锥底以上圆柱面部位时,可参照本规则表 5.2.2 的  $\beta$  值,将其数据  $u_T$  转换为  $u_d$ ,计算出  $B_q$  后,再按本分类图 6.3.3 判定土类。

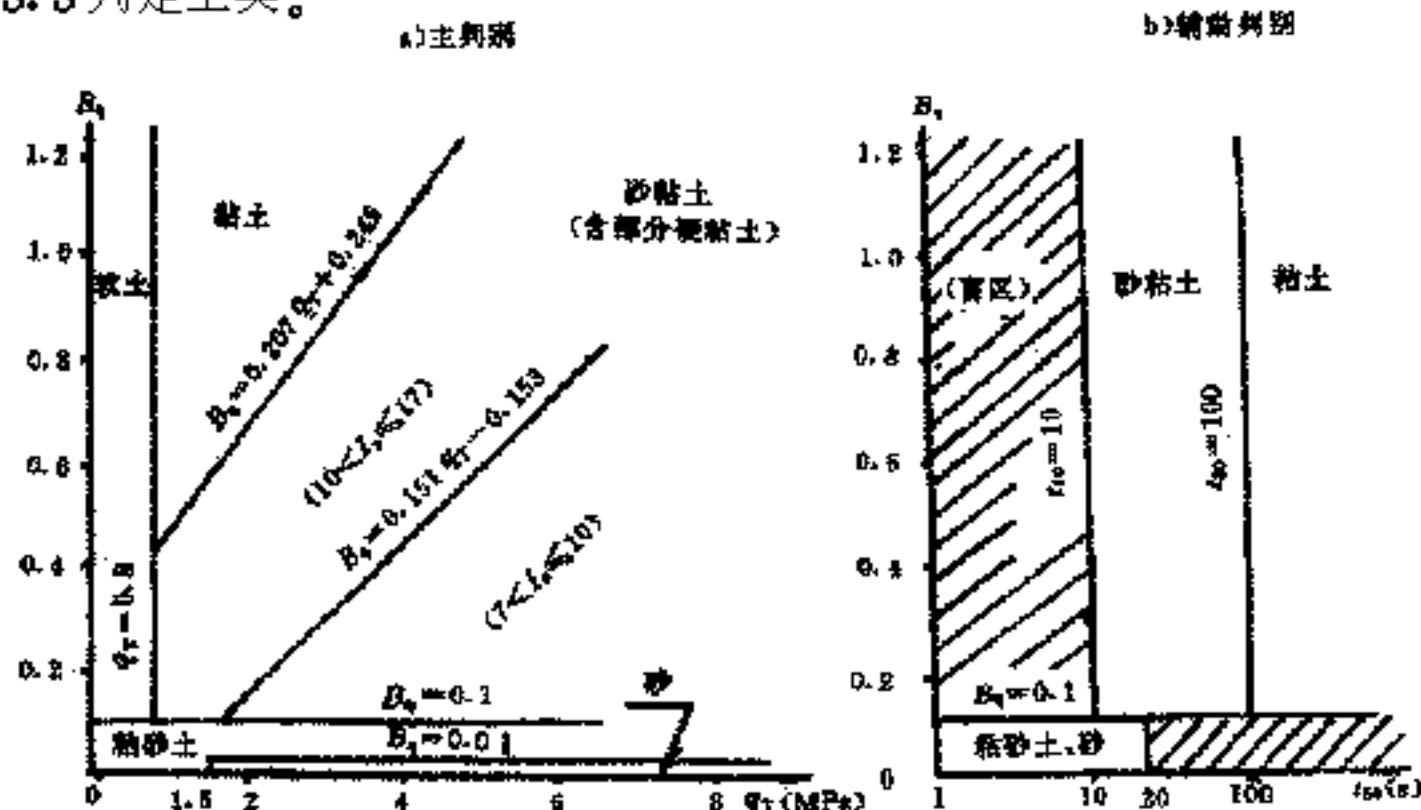


图 6.3.3 用孔压探头触探参数划分土类

#### 第四节 土的物理力学指标的测定

**第 6.4.1 条** 饱和粘性土的重度( $\gamma$ )应根据钻探取样试验确定。当缺乏土样试验数据时,可结合场地或场区土质情况(状态、含有物性质)按下列公式估算;

$$p_s < 400 \text{ kPa 时, } \gamma = 8.23 p_s^{0.12}, (\text{kN/m}^3) \quad (6.4.1-1)$$

$$400 \text{ kPa} \leq p_s < 4500 \text{ kPa 时, } \gamma = 9.556 p_s^{0.095}, (\text{kN/m}^3) \quad (6.4.1-2)$$

$$p_s \geq 4500 \text{ kPa 时, 恒取 } \gamma = 21.2, (\text{kN/m}^3)$$

**第 6.4.2 条** 塑性指数大于 10 的粘性土潮湿程度(稠度状态)可用透水元件置于锥面上的孔压探头按表 6.4.2—1 划分;当使用单桥静力触探参数判别时,可结合地区土质特性参照表

## 6.4.2—2 判定。

用孔压探头划分饱和粘性土的潮湿程度 表 0.4.2—1

分 级		液性指数 $I_L$	主 判 别	副 判 别
半干硬状态		$I_L < 0$	$\langle q_T \rangle > 5$	$\langle B_q \rangle < 0.2$
可塑状态	硬塑	$0 \leq I_L < 0.5$	$3.12B_q - 2.77q_T < -2.21$	$B_q < 0.3$
	软塑	$0.5 \leq I_L < 1$	$3.12B_q - 2.77q_T > -2.21$ $11.2B_q - 21.3q_T < -2.56$	$B_q > 0.2$
流塑状态		$I_L \geq 1$	$11.2B_q - 21.3q_T > -2.56$	$B_q \geq 0.42$

注:① $q_T$ 单位用 MPa;

②本表仅适用于透水元件置于锥面上的孔压探头;

③半干硬土已非饱和土,括号内数值为参考值。

用单桥探头判别饱和粘性土的潮湿程度 表 0.4.2—2

液性指数 $I_L$	0	0.25	0.50	0.75	1
$p_s$ (MPa)	$\langle 5.0 \sim 6.0 \rangle$	$\langle 2.7 \sim 3.3 \rangle$	1.2~1.5	0.7~0.9	$< 0.5$

注:括号内数值为参考值。

**第 6.4.3 条** 对于灵敏度  $S_t = 2 \sim 7$ 、塑性指数  $I_p = 12 \sim 40$  的软土,其不排水抗剪强度( $\tau_u$ )可按下式取值;

$$\tau_u = 0.04p_s + 2 \quad (6.4.3)$$

式中  $p_s$  单位用 kPa。

**第 6.4.4 条** 对于超固结比  $OCR \leq 2$  的正常固结和轻度超固结的均质软土,当贯入阻力( $p_s, q_c$ )随深度呈线性递增时,其固结快剪内摩擦角( $\phi_{ku}$ )可用下式估算;

$$\tan \phi_{ku} = 1.4 \cdot \Delta \tau_u / \Delta \sigma'_{v0} \quad (6.4.4)$$

式中  $\Delta \sigma'_{v0}$ ——土层由深度  $D_1$  至  $D_2$  的有效自重压力增量,

$$\Delta \sigma'_{v0} = \Delta \sigma_{v0} - \gamma_w \cdot \Delta D;$$

其中  $\Delta \sigma_{v0}$ ——相应于上述深度的总自重压力增量,

$$\Delta \sigma_{v0} = \gamma \cdot \Delta D;$$

$\Delta D$ ——深度增量,  $\Delta D = D_2 - D_1$ ;

$\gamma$ ——计算深度范围内土层的平均天然重度,可按公式(6.4.1)取值;



$\Delta\tau_a$ ——对应于  $\Delta D$  的不排水抗剪强度增量,

$\Delta\tau_a = \tau_{a2} - \tau_{a1}$ ,  $\tau_a$  可据式(6.4.3)计算;

其它符号同前。

**第 6.4.5 条** 砂土的内摩擦角( $\phi$ )可参考表 6.4.5 取值。

砂土的内摩擦角( $\phi$ )

表 6.4.5

$p_s(\text{MPa})$	1	2	3	4	6	11	15	30
$\phi(\text{度})$	29	31	32	33	34	36	37	39

**第 6.4.6** 石英质砂土的相对密度( $D_r$ )可按表 6.4.6 估计。

石英质砂土的相对密度( $D_r$ )

表 6.4.6

分 级		$p_s(\text{MPa})$	$D_r$
密 实		$p_s \geq 14$	$D_r \geq 0.67$
中 密		$14 > p_s > 4$	$0.67 > D_r > 0.33$
松 散	稍 松	$4 \geq p_s \geq 2$	$0.33 \geq D_r \geq 0.2$
	极 松	$p_s < 2$	$D_r < 0.2$

**第 6.4.7 条** 饱和粘性土水平固结系数可使用透水元件置于锥底圆柱面处的孔压探头消散试验结果,按下式计算:

$$C_h = N \cdot \frac{r_0^2 T_{50}}{t_{50}} \quad (6.4.7)$$

式中  $N$ ——土的再压比,  $N = C_e / C_c$ , 对于软土及一般粘性土,可取  $N = 0.25 \sim 0.10$ ;

$r_0$ ——探头半径;

$T_{50}$ ——触探引起的超孔压消散达 50% 时的时间因数,可据表 6.4.7—1 取值;当取得地区性经验值( $\alpha$ )时,则可按表 6.4.7—2 取值;

$t_{50}$ ——相应于  $T_{50}$  的孔压消散历时,在绘制的归一化超孔压曲线上查取。

对于透水元件置于锥面上的孔压探头试验数据,经按本规则

第 5.2.4 条规定修正后,也可用公式(6.4.7)估算饱和粘性土的水平固结系数。

与土质性状有关的时间因数( $T_{60}$ ) 表 8.4.7—1

$T_{60}$ $A_r$ $I_r$	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	1	$\frac{4}{3}$
10	1.145	1.593	2.095	2.622
50	2.487	3.346	4.504	5.931
100	3.524	4.761	6.447	8.629
200	5.025	6.838	9.292	12.790

注:  $A_r$ ——土体破坏时的孔隙水压力系数,对于软土,一般在 0.7~1.3 间;

$I_r$ ——土的刚度指数, $I_r=E_u/[2(1+\mu)\tau_u]$ ;

其中  $\mu$  ——土的不排水泊松比,对于饱和软粘性土,可取  $\mu=0.5$ ,

$E_u$ ——土的不排水杨氏模量,可按公式(6.5.4)估算,

$\tau_u$ ——土的不排水抗剪强度,按公式(6.4.3)取值。

与土性有关的经验指数  $\alpha$  表 8.4.7—2

$\alpha$	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
$T_{60}$	10.863	6.720	4.804	3.746	3.063	2.665

第五节 地基基本承载力及变形参数的取值

第 6.5.1 条 使用静力触探确定地基承载力,应综合考虑地基土的工程性质及建筑物特点。对于天然地基可据土的类别和贯入阻力平均值按表 6.5.1 确定,贯入阻力取值应符合下列规定:

一、厚层均质地基贯入阻力的计值深度

1. 对于扩大基础,取基础底面下  $2B$  ( $B$  为基础短边宽度或直径)深度范围内的贯入阻力平均值。

2. 对于堤、坝等构筑物,当地基为饱和软粘土时,贯入阻力的计值深度按(6.5.1—1)式确定:

$$D=\frac{1}{3}(B+MH_c) \qquad (6.5.1-1)$$

式中  $D$ ——从天然地面起算的计值深度；

$B$ ——堤、坝的顶面宽度；

$M$ ——堤、坝的边坡坡率， $M = \operatorname{tg}\theta$ ， $\theta$  为单一直线形边坡面与水平地面的夹角；

$H_c$ ——堤、坝的极限高度，按下式估计；

$$H_c = 5.5\tau_a/\gamma_t;$$

其中  $\tau_a$ ——地基土的不排水抗剪强度，

$\gamma_t$ ——堤、坝填土的重度。

3. 当堤、坝有反压护道时，贯入阻力的计值深度应根据稳定性分析的具体要求确定。

二、层状地基的贯入阻力取值应符合本规则第 6.2.3 条规定；对于由粉砂（或粘砂土）与砂粘土（或粘土）组成的组合式土层，应根据其大值平均值和小值平均值，在表 6.5.1 中分别按它们所属土质类别查取地基基本承载力，然后根据建筑物特点和重要程度，酌取这两者中的小值或中小值或中值，确定为该组合土层的基本承载力。

天然地基基本承载力( $\sigma_0$ )

表 8.5.1

$\sigma_0$ (kPa) 土类		平均贯入阻力 $\bar{p}_s$ (kPa)														
		100	500	800	1000	1500	2000	3000	4000	5000	5500	6000	6500	10000	16000	24000
粘性土 ( $Q_1 \sim Q_3$ )		—	—	—	—	—	—	300	400	500	550	600	—	—	—	—
$I_p > 10$ 的 粘性土( $Q_4$ )		—	—	115	135	180	210	270	320	360	370	380	—	—	—	—
$I_p \leq 10$ 的 粘性土( $Q_4$ )、 饱和砂		—	50	70	80	100	120	150	180	200	210	220	230	300	410	520
软 土		20	60	95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
新 黄 土 ( $Q_4$ 、 $Q_3$ )	东南带	—	90	105	115	140	165	215	265	315	—	—	—	—	—	—
	西北带	—	—	—	85	110	135	185	235	285	310	—	—	—	—	—
	北 部 边缘带	—	—	—	80	100	120	160	200	240	260	280	300	—	—	—

注:①表内数值可以线性内插,不可外延。

②新黄土分带,各包括以下几个工程地质分区:东南带含Ⅱ、Ⅳ<sub>2</sub>、Ⅴ、Ⅵ区;西北带含Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ<sub>1</sub>区;北部边缘带含Ⅶ<sub>1</sub>、Ⅶ<sub>2</sub>区。

新黄土工程地质分区采用《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ25—90)中“中国湿陷性黄土工程地质分区略图”的划分。

③在湖、塘、沟、谷与河漫滩地段新近沉积的土体,应根据当地实践经验取值。在无实践经验、又无荷载试验为依据的情况下,对于次要工程可参照如下办法取值:

$I_p \leq 10$  的新近沉积土,按本表所列  $I_p \leq 10$  的粘性土、饱和砂的  $\sigma_0$  取值;

$I_p > 10$  的新近沉积土,按表列  $I_p > 10$  的粘性土  $\sigma_0$  值的 70% 取用。

**第 6.5.2 条** 基本承载力( $\sigma_0$ )用于设计时,应进行基础宽度及埋置深度的修正。修正公式见《铁路桥涵设计规范》(TBJ2—85)中的有关规定,但该规范公式中的修正系数可据地基土的  $p_s$  值按表 6.5.2 确定。

$\alpha_0$ 的宽度修正系数( $K_1$ )和深度修正系数( $K_2$ ) 表 8.5.2

修正系数	土 类	平均贯入阻力 $\bar{p}_s$ (kPa)							
		<800	800~2000	2000~3000	3000~5000	5000~10000	10000~14000	14000~20000	>20000
$K_1$	粘性土、砂土	0				1	2	3	4
	新黄土 ( $Q_4, Q_3$ )	0							
$K_2$	粘性土	0	1	2	3	4	—	—	—
	砂 土	0	1	1.5	2	3	4	5	6
	新黄土 ( $Q_4, Q_3$ )	0	0	1	1.5	2	—	—	—

**第 6.5.3 条** 均质土层的压缩模量( $E_s$ )及变形模量( $E_0$ )可参照表 6.5.3—1 和表 6.5.3—2 取值。

 地基土的压缩模量  $E_s$  (MPa) 表 8.5.3—1

$E_s$ 土 类 $p_s$		平均贯入阻力 $\bar{p}_s$ (kPa)						
		100	300	500	700	1000	1500	2000
粘土、砂粘土( $Q_4$ )		0.9	1.8	2.6	3.2	4.1	5.4	6.5
砂 土		—	—	2.6~5.0	3.2~5.4	4.1~6.0	5.1~7.5	6.0~9.0
新黄土( $Q_4, Q_3$ )		—	—	—	—	1.7	3.5	5.3
$E_s$ 土 类 $p_s$		平均贯入阻力 $\bar{p}_s$ (kPa)						
		2500	3000	4000	5000	6000	7000	8000
粘土、砂粘土( $Q_4$ )		7.5	8.6	10.7	12.9	15.0	17.2	19.3
砂 土		7.5~10.2	9.0~11.5	11.5~13.0	13.0~15.0	15.0~16.5	16.5~18.5	18.5~20.0
新黄土( $Q_4, Q_3$ )		7.2	9.0	12.6	16.3	20.0	23.6	—

续表 6.5.3—1

$E_s$  土类		$p_s$	平均贯入阻力 $\bar{p}_s$ (kPa)						
			9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000
砂	土		20.0~	22.0~	24.0~	26.0~	28.0~	30.0~	35.0
		22.5	25.0	27.0	29.0	31.0	33.8		

注:① $E_s = (1 + e_1) / a_{0.1 \sim 0.2}$ ,  $a_{0.1 \sim 0.2} = (e_1 - e_2) / (p_2 - p_1)$ ,  $e_1$ 和  $e_2$ 分别为固结压力  $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $p_2 = 0.2 \text{ MPa}$ 时的孔隙比。

②软土、粘砂土可分别比照表列粘土、砂土的  $E_s$ 取值。

③ $Q_3$ 及其以前的粘性土及新近沉积土应根据当地实践经验取值,必要时应取样作压缩试验。

④表内数值可线性内插,不可外延。

地基土的变形模量( $E_0$ )

表 6.5.3—2

$E_0$ (MPa)	$p_s$	平均贯入阻力 $\bar{p}_s$ (kPa)							
		100	300	500	700	1000	1500	2000	3000
土类									
粘性土 ( $Q_1 \sim Q_3$ )		—	—	—	—	—	—	—	30.6
软土、 $I_p > 10$ 的粘性土( $Q_4$ )		1.0	1.9	3.0	4.4	6.8	11.6	17.0	26.8
粉、细砂		—	—	—	—	3.6	4.7	5.7	7.6
新黄土 $Q_4$ 、 $Q_3$	东南带	—	—	8.4	10.4	13.1	17.0	20.4	26.4
	西北带	—	—	—	—	7.4	10.3	13.3	19.3
	北部边缘带	—	—	—	—	5.0	7.5	10.0	15.0
$E_0$ (MPa)	$p_s$	平均贯入阻力 $\bar{p}_s$ (kPa)							
		4000	5000	6000	7000	8000	10000	15000	20000
土类									
粘性土 ( $Q_1 \sim Q_3$ )		42.4	54.1	65.9	—	—	—	—	—
粉、细砂		9.2	10.7	12.2	13.5	14.8	17.2	22.7	27.7
新黄土 $Q_4$ 、 $Q_3$	东南带	31.8	36.7	—	—	—	—	—	—
	西北带	25.2	31.2	37.1	—	—	—	—	—
	北部边缘带	20.0	25.0	30.0	—	—	—	—	—

注:①新近沉积土的  $E_0$  应根据当地实践经验取用,必要时应作荷载试验加以确定。  
 对于一般工程,可按下列办法取值: $I_p \leq 10$  的新近沉积土比照表列粉、细砂的  $E_0$  值取用; $I_p > 10$  的新近沉积土,按表列  $I_p > 10$  的粘性土的  $E_0$  值乘 0.9~0.4 的折减系数取用。折减系数随  $\bar{p}_s$  值增加而降低。

②表内数值可线性内插,不可外延。

**第 6.5.4 条** 对于  $p_s \leq 1\text{MPa}$  的饱和粘性土,其不排水杨氏模量( $E_u$ )可按式(6.5.4)估算;

$$E_u = 11.4p_s, \quad (6.5.4)$$

式中的  $E_u$  为剪应力水平达 50% 时的割线模量。

## 第六节 单桩容许承载力的计算

**第 6.6.1 条** 打入混凝土预制桩的容许承载力,可根据双桥探头触探参数按公式(6.6.1—1)计算;

$$[P] = \frac{1}{K} \left( u \cdot \sum_{i=1}^n d_i \cdot \beta_i \cdot \bar{f}_{si} + \alpha \cdot A \cdot \bar{q}_{cp} \right) \quad (6.6.1-1)$$

式中  $[P]$ ——单桩容许承载力, kN;

$K$ ——安全系数,一般取  $K=2$ ;

$u$ ——桩的周长, m;

$n$ ——桩身穿过的土层数;

$d_i$ ——第  $i$  层土的厚度, m;

$A$ ——桩的横截面积,  $\text{m}^2$ ;

$\bar{f}_{si}$ ——第  $i$  层土的平均触探侧阻, kPa;

当  $\bar{f}_{si} < 5\text{kPa}$  时,可取  $\bar{f}_{si} = 5\text{kPa}$ ;

$\bar{q}_{cp}$ ——设桩底(不包括桩靴)高程以上及以下各  $4\phi$  ( $\phi$  为桩径或边长)范围内平均触探端阻分别为  $\bar{q}_{cp}^t$  及  $\bar{q}_{cp}^b$ , 若  $\bar{q}_{cp}^t \leq \bar{q}_{cp}^b$ , 取  $\bar{q}_{cp} = (\bar{q}_{cp}^t + \bar{q}_{cp}^b)/2$ ; 反之则取  $\bar{q}_{cp} = \bar{q}_{cp}^b$ , kPa;

$\beta_i, \alpha$ ——分别为第  $i$  层土的侧摩阻力和桩尖土的端承阻力综合修正系数,根据该层土的类型,可按公式

6.6.1—2~6.6.1—5 计算取得,或查表6.6.1—1~6.6.1—4。

(1)当土层  $\bar{q}_c > 2000 \text{ kPa}$  ( $\bar{q}_c$  为桩侧土的平均触探端阻)且  $\bar{f}_s/\bar{q}_c \leq 0.014$  时,

$$\beta = 5.067(\bar{f}_s)^{-0.45} \quad (6.6.1-2)$$

如  $\bar{q}_c$  及  $\bar{f}_s/\bar{q}_c$  不同时满足上述条件,则

$$\beta = 10.045(\bar{f}_s)^{-0.55} \quad (6.6.1-3)$$

(2)当  $\bar{q}_{cp}^b > 2000 \text{ kPa}$ , 且  $\bar{f}_s^b/\bar{q}_{cp}^b \leq 0.014$  ( $\bar{f}_s^b$  为与  $\bar{q}_{cp}^b$  值相对应的桩尖以下持力层土的平均触探侧阻)时,

$$\alpha = 3.975(\bar{q}_c)^{-0.25} \quad (6.6.1-4)$$

如  $\bar{q}_{cp}^b$  及  $\bar{f}_s^b/\bar{q}_{cp}^b$  不同时满足上述条件,则

$$\alpha = 12.064(\bar{q}_c)^{-0.35} \quad (6.6.1-5)$$

$$\beta = 5.087(\bar{f}_s)^{-0.45} \quad \text{表 8.8.1—1}$$

$\bar{f}_s(\text{kPa})$	8	10	12	14	16	18	20	24
$\beta$	1.99	1.80	1.66	1.55	1.45	1.38	1.32	1.21
$\bar{f}_s(\text{kPa})$	28	32	36	40	50	60	70	80
$\beta$	1.13	1.07	1.01	0.96	0.87	0.80	0.75	0.71
$\bar{f}_s(\text{kPa})$	90	100	120	140	160	180	200	$\geq 230$
$\beta$	0.67	0.64	0.59	0.55	0.52	0.49	0.47	0.44

$$\beta = 10.045(\bar{f}_s)^{-0.55} \quad \text{表 8.8.1—2}$$

$\bar{f}_s(\text{kPa})$	5	6	8	10	12	14	16	18	20
$\beta$	4.15	3.75	3.20	2.83	2.56	2.35	2.19	2.05	1.93
$\bar{f}_s(\text{kPa})$	22	24	26	28	30	34	40	50	60
$\beta$	1.83	1.75	1.67	1.61	1.55	1.44	1.32	1.17	1.06
$\bar{f}_s(\text{kPa})$	70	80	90	100	120	140	170	200	260
$\beta$	0.97	0.90	0.85	0.80	0.72	0.66	0.59	0.55	0.47



$$\alpha = 3.875(\bar{q}_c)^{-0.28}$$

表 0.0.1—3

$\bar{q}_c(\text{kPa})$	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
$\alpha$	0.594	0.562	0.537	0.517	0.500	0.485	0.473
$\bar{q}_c(\text{kPa})$	6000	7000	8000	9000	10000	12000	14000
$\alpha$	0.452	0.434	0.420	0.408	0.397	0.380	0.365
$\bar{q}_c(\text{kPa})$	16000	18000	20000	22000	24000	27000	30000
$\alpha$	0.353	0.343	0.334	0.326	0.319	0.310	0.302

$$\alpha = 12.084(\bar{q}_c)^{-0.48}$$

表 0.0.1—4

$\bar{q}_c(\text{kPa})$	1000	1500	2000	2500	3000
$\alpha$	1.075	0.933	0.844	0.780	0.732
$\bar{q}_c(\text{kPa})$	3500	4000	4500	5000	6000
$\alpha$	0.694	0.662	0.635	0.612	0.574
$\bar{q}_c(\text{kPa})$	7000	8000	10000	12000	15000
$\alpha$	0.544	0.519	0.480	0.451	0.417

**第 6.6.2 条** 混凝土钻孔灌注桩的容许承载力可用公式(6.6.1)估算,但式中的综合修正系数  $\beta$  和  $\alpha$  需根据桩径( $\phi$ )和触探参数查表 6.6.2—1~表 6.6.2—4。

**第 6.6.3 条** 对于黄土地基,在使用公式(6.6.1)估算桩承载力时,应做试桩校核。

 桩径  $\phi < 850\text{mm}$  时的  $\beta$  值

表 0.0.2—1

$\bar{f}_s(\text{kPa})$	5	10	15	20	25	30	35
$\beta$	6.35	3.77	2.78	2.24	1.90	1.66	1.47
$\bar{f}_s(\text{kPa})$	40	45	50	60	70	80	100
$\beta$	1.33	1.22	1.13	0.98	0.88	0.79	0.67
$\bar{f}_s(\text{kPa})$	120	140	160	180	200	230	260
$\beta$	0.59	0.52	0.47	0.43	0.40	0.36	0.33

桩径  $\phi < 850\text{mm}$  时的  $\alpha$  值

表 0.0.2—2

$\bar{q}_c(\text{kPa})$	1000	1500	2000	2500	3000	3500
$\alpha$	0.93	0.63	0.49	0.39	0.33	0.29
$\bar{q}_c(\text{kPa})$	4000	5000	6000	7000	8000	10000
$\alpha$	0.25	0.21	0.17	0.15	0.13	0.11
$\bar{q}_c(\text{kPa})$	12000	14000	17000	20000	23000	28000
$\alpha$	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04

桩径  $\phi \geq 850\text{mm}$  时的  $\beta$  值

表 0.0.2—3

$\bar{f}_s(\text{kPa})$	5	10	15	20	25	30
$\beta$	1.83	1.39	1.18	1.05	0.96	0.90
$\bar{f}_s(\text{kPa})$	35	40	50	60	70	80
$\beta$	0.84	0.80	0.73	0.68	0.64	0.61
$\bar{f}_s(\text{kPa})$	100	120	140	160	200	260
$\beta$	0.55	0.51	0.48	0.46	0.42	0.38

桩径  $\phi \geq 850\text{mm}$  时的  $\alpha$  值

表 0.0.2—4

$\bar{q}_c(\text{kPa})$	1000	1500	2000	2500	3000	4000
$\alpha$	0.46	0.37	0.31	0.28	0.25	0.21
$\bar{q}_c(\text{kPa})$	5000	6000	7000	8000	10000	12000
$\alpha$	0.19	0.17	0.16	0.15	0.13	0.12
$\bar{q}_c(\text{kPa})$	14000	16000	18000	20000	24000	28000
$\alpha$	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07

## 第七节 地基土液化判别

**第 6.7.1 条** 对有可能液化的地基土(包括砂土、粘砂土和  $I_p \leq 10$  的砂粘土)进行判别,当静力触探实测计算的贯入阻力  $p_{sm}$  或  $q_{sm}$  小于液化临界贯入阻力  $p'_l$  或  $q'_l$ ,可判为液化土,否则为非液化土。

**第 6.7.2 条** 液化临界贯入阻力可按下列公式计算:

$$p'_s = p_{s0} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \quad (6.7.2-1)$$

$$q'_c = q_{c0} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \quad (6.7.2-2)$$

式中  $p_{s0}$ 、 $q_{c0}$ ——当  $d_w=2m$ 、 $d_n=2m$ 、 $\alpha_4=1$  时,可液化土层的临界贯入阻力,按表 6.7.2—1 确定;

$\alpha_1$ ——地下水埋深  $d_w(m)$  的修正系数,按下式计算  $\alpha_1=1-0.065(d_w-2)$ ,当地面常年有水且与地下水有水力联系时,  $d_w=0$ ;

$\alpha_3$ ——上覆非液化土层厚度  $d_n(m)$  的修正系数,按下式计算  $\alpha_3=1-0.05(d_n-2)$ ,对于深基础,取  $\alpha_3=1$ ;

$\alpha_4$ ——土性综合修正系数,可按表 6.7.2—2 或表 6.7.2—3 确定。

可液化土层的临界贯入阻力(基本值) 表 6.7.2—1

设计烈度	7	8	9
$p_{s0}(kPa)$	5000~6000	11500~13000	18000~20000
$q_{c0}(kPa)$	4550~5460	10460~11830	16380~18200

土性综合修正系数 表 6.7.2—2

土 性	砂 土	粘 砂 土	$I_p \leq 10$ 的砂粘土
$\alpha_4$	1	0.6	0.45

由摩阻比确定的土性综合修正系数 表 6.7.2—3

土 性	砂 土	$I_p \leq 10$ 的粘性土	
摩阻比 $R_f(\%)$	$\leq 0.4$	$0.4 < R_f \leq 0.9$	$> 0.9$
$\alpha_4$	1.0	0.6	0.45

**第 6.7.3 条** 实测计算的贯入阻力  $p_{sca}$  或  $q_{ca}$  应按下列规定取值;

一、当土层厚度大于 1m 时,应取该层贯入阻力  $p_s$  或  $q_c$  的平均

值作为该层的  $p_{sca}$  或  $q_{cca}$  值。当土层厚度小于 1m, 且上、下层的贯入阻力较小时, 应取该层的较大值作为  $p_{sca}$  或  $q_{cca}$  值。

二、当土层厚度较大, 力学性质和  $p_s$  或  $q_c$  值可明显分层时, 应分别计算分层的  $p_{sca}$  或  $q_{cca}$  值。

三、采用双桥探头时, 按上述相应规定确定各分层的计算侧阻值  $f_{sca}$ , 并计算分层的摩阻比  $R_{fca}$ , 即  $R_{fca} = f_{sca} / q_{cca}$ 。

# 附录一 本规则名词解释

本规则名词解释

附表 1

名 词	解 释
静力触探	工程勘察的一种原位测试技术,是将具有一定功用的探头以规定的速率贯入土中,量测贯入过程中探头受到的阻力(端阻、侧阻、比贯入阻力)乃至孔隙水压力(简称孔压),当探头停止贯入时,还可测定孔压和端阻随时间而变化的过程值。以此探查地基土的工程性质
探 杆	用以推进探头的杆件
探 头	装于一组探杆底部的终端装置,带有可测定比贯入阻力( $p_s$ )或锥尖阻力( $q_c$ )、侧壁摩擦阻力( $f_s$ )以及贯入时探头与土的界面处产生的孔隙水压力的灵敏元件
单桥探头	一次贯入中仅能测定比贯入阻力( $p_s$ )一个参数的探头,其灵敏元件系以电阻应变计为桥路的力传感器
双桥探头	一次贯入中能同时测得锥尖阻力( $q_c$ )和侧壁摩擦阻力( $f_s$ )(简称端阻和侧阻)的探头,其灵敏元件由两个独立的桥路构成
孔压探头	在圆锥的锥面或锥底以上圆柱面部位嵌有过滤片(透水元件)的探头,藉孔隙水压力传感器量测贯入过程中在土中产生的孔隙水压力( $u_T$ 或 $u_d$ )及在贯入停止后孔隙水压力随时间而变化的过程值( $u_t$ )。一次贯入可同时获得 $u_T$ (或 $u_d$ )、 $q_c$ 、 $f_s$ 诸参数
套 筒	在单桥探头圆锥底以上延伸的一段固定长度的圆柱形护套,其直径与锥底同径,所得触探参数称为比贯入阻力( $p_s$ )
摩 擦 筒	双桥探头或孔压探头的—个组成部件,其直径不小于锥头直径,接受地基土作用于它表面上的侧壁摩擦力,所得触探参数称为侧阻( $f_s$ )
锥 头	探头的终端,包括套筒在内的圆锥体部分
探 头 管	探头的—个构件,位于锥头或摩擦筒以上的圆筒形杆件
减摩阻器	在离锥底 1000mm 以上的探杆连接处附设的扩孔装置,其直径较探杆为大,以减少土对探杆的总摩擦阻力

续附表 1

名 词	解 释
触探参数	探头在贯入和试验时直接测得的参数( $p_s$ 、 $q_c$ 、 $f_s$ 、 $u_T$ 、 $u_d$ 、 $u_t$ )及依据这些直接参数算得的间接参数(摩阻比 $R_f$ 、超孔隙压力比 $B_q$ 等)的统称
温 漂	探头在空载状态下,由于环境温度的改变而造成探头对仪表的零输出值的漂移
时 漂	探头在空载状态和恒温条件下,由于时间的延续,造成探头对仪表的零输出值的漂移
零 漂	探头温漂和时漂的合称
归零检查	在探头工作过程中,对其零漂值进行检查,以便对测试数据进行修正,得到符合实际情况的触探参数
起始感量	仪表最小分辨值所对应的荷载值
触探曲线	触探参数随深度的分布曲线
均衡孔隙水压力	由孔压探头测得的与地基土中的孔隙水压力相平衡的水压力,其值依压力稳定标准而定

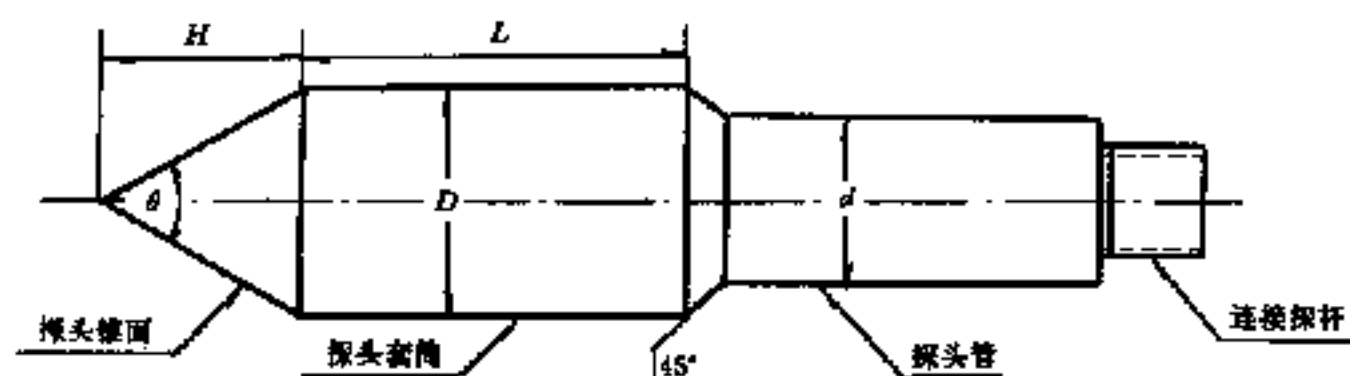
# 附录二 探头规格、各部加工 公差及更新标准

## 一、单桥探头

单桥探头规格

附表 2.1

探 头 断面积 $A$ ( $\text{cm}^2$ )	锥角 $\theta$ ( $^\circ$ )	探头直径		有效侧壁长		探头管 直 径 $d$ (mm)	更新标准		
		公称 直径 $D$ (mm)	公差 (mm)	公称 长度 $L$ (mm)	公差 (mm)		锥头直径 $D$ (mm)	锥高 $H$ (mm)	外 形
10	60 $\pm$ 1	35.7	$+0.18$ 0	57	$\pm 0.28$	$D > d \geq 30$	$< 34.8$	$< 25$	1. 锥面及 套筒变形 明显,出现 刻痕,尖压 损; 2. 锥尖压 损; 3. 套筒活 动不便
15		43.7	$+0.22$ 0	70	$\pm 0.35$	$D > d \geq 36$	$< 42.6$	$< 31$	
20		50.4	$+0.25$ 0	81	$\pm 0.40$	$D > d \geq 42$	$< 49.2$	$< 37$	



附图 2.1 单桥探头外形图

## 二、双桥探头及孔压探头

双桥探头及孔压探头规格

附表 2.2

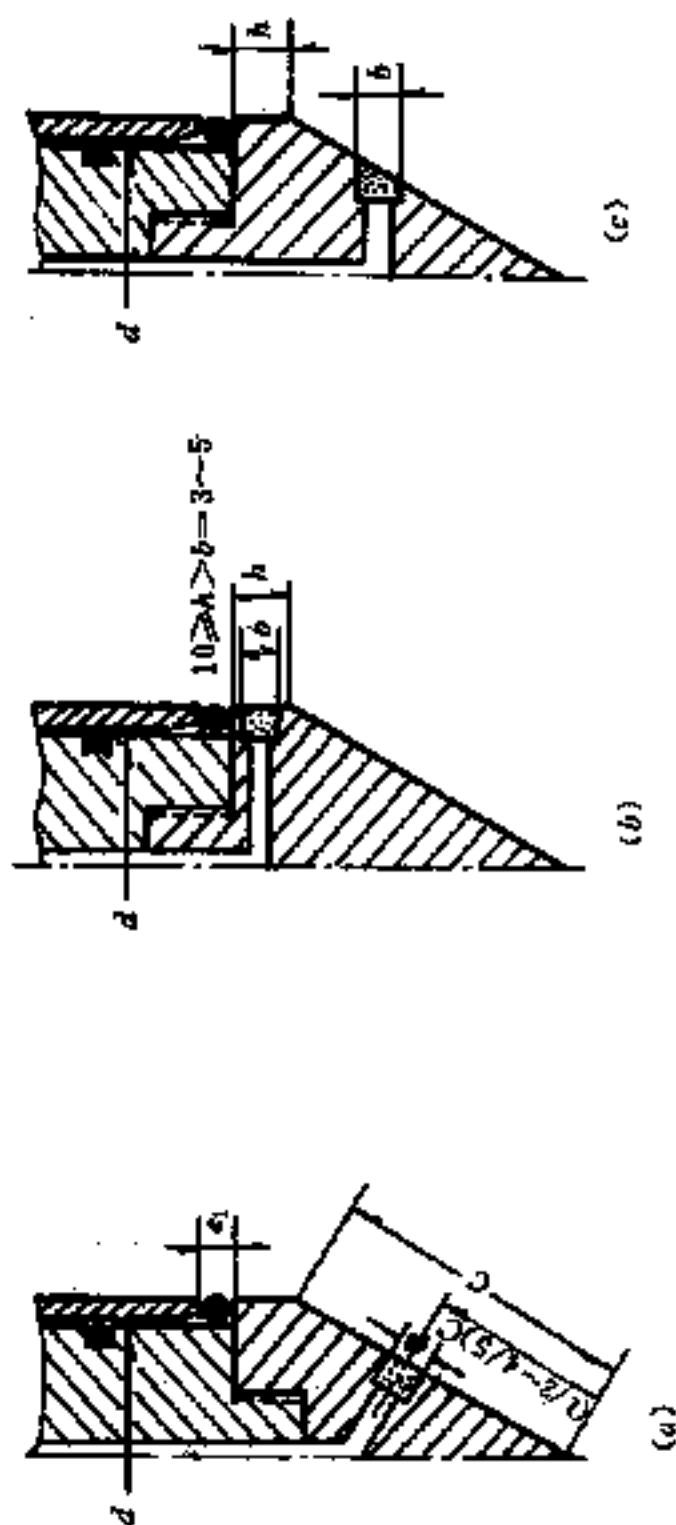
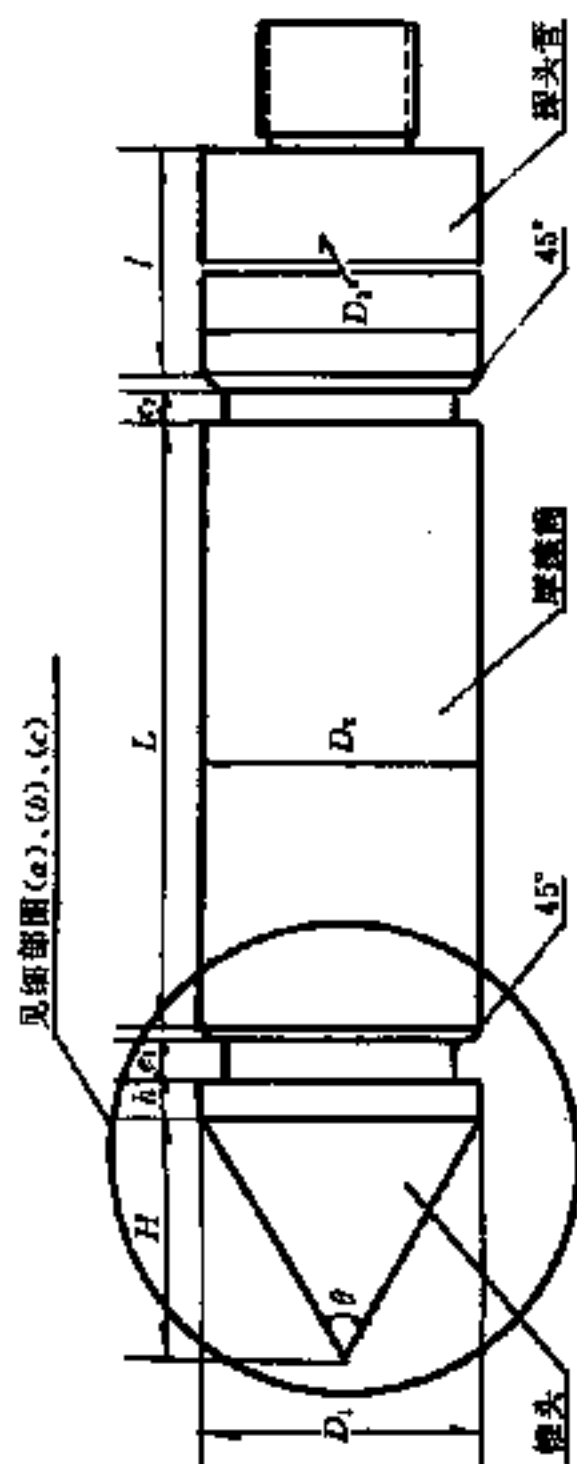
锥底面积		( $\text{cm}^2$ )	10	15	20
锥 头	锥角	$\theta$ ( $^\circ$ )	$60 \pm 1$		
	公称直径	$D_1$ (mm)	35.7	43.7	50.4
	直径公差	(mm)	$+0.18$ 0	$+0.22$ 0	$+0.25$ 0
	圆柱高度	$h$ (mm)	$\leq 10$		
	有效面积比 <sup>①</sup>	$a$	$0.4 \pm 0.05$		
	过滤片与土接触面积	$e_1$ ( $\text{cm}^2$ )	$\geq 1.7$		
摩 擦 筒	公称直径	$D_2$ (mm)	35.7	43.7	50.4
	直径公差	(mm)	$+0.35$ $+0.20$	$+0.43$ $+0.24$	$+0.50$ $+0.27$
	公称长度	$L$ (mm)	133.7	218.5	189.5
	长度公差	(mm)	$+0.60$ $-0.90$	$+0.90$ $-1.10$	$+0.80$ $-0.95$
	有效表面积	$s$ ( $\text{cm}^2$ )	150	300	300
锥头与摩擦筒间距 <sup>②</sup>		$e_1$ (mm)	$\leq 5$		
摩擦筒与探头管间距		$e_2$ (mm)	$\leq 3$		
孔压探头全长		(mm)	$h + e_1 + L + e_2 + t \geq 1000$		
探头管直径		$D_3$ (mm)	$(D_1 - 1.1) \leq D_3 \leq (D_1 - 0.3)$		
更 新 标 准	$D_1$	(mm)	$< 34.8$	$< 42.6$	$< 49.2$
	$D_2$ <sup>③</sup>	(mm)	$\leq 34.8$	$\leq 42.6$	$\leq 49.2$
	锥高	$H$ (mm)	$< 25$	$< 31$	$< 37$
	外形	1. 锥面、套筒出现明显变形或刻痕多处, 2. 摩擦筒活动不便, 3. $D_2 < D_1$ 时, 4. 锥尖压损, 5. 过滤片与土接触面凹于锥头表面或透水失效			

注: ①  $a = F_A / A$ ,  $F_A = 1/4 \pi d^2$ , 对孔压探头  $a$  值不受限制。

②  $e_1$ 、 $e_2$  为工作状态下的间距。

③ 对同一枚探头,  $D_2$  必须大于  $D_1$ 。





附图 2.2 双桥探头及孔压探头形状图

## 附录三 静力触探图表格式

### 一、探头技术卡片和探头标定记录表

**探 头 技 术 卡 片**

**附表 3.1**

探头型号：			探头质量：		
工作面积： <span style="float: right;">(cm<sup>2</sup>)</span>			使用电缆：		
标定系数		仪器型号	供桥电压	灵敏系数	起始感量
锥尖 $K_q(K_p)$					
侧壁 $K_f$					
孔压 $K_u$					
零漂值： <span style="float: right;"><math>\%FS/h</math>, <math>\%FS/^{\circ}C</math></span>			锥尖额定荷载：		
备注：					

填表：

核对：

# 探头标定记录表

附表 3.2

探头号	标称内径 (cm)	工作面积 (cm <sup>2</sup> )	电缆规格	电缆长 (m)	应变计灵敏系数	仪器型号	标定系数	桥阻 (V)	仪器示值	偏差值			质量评定
仪器读数 $x$ (mV)					读数平均			运算		重复性	非线性	滞后	
加载 $x_1$					卸荷 $x_2$	卸荷 $x_1$	卸荷 $x_2$	卸荷 $x_1$	卸荷 $x_2$	$\Delta x_1$	$\Delta x_2$	$ x_1 - x_2 $	
各级 $P_i$													
0													
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
$K = \sum (G_i P_i) / A \sum (G_i)^{2.0}$					$\Sigma$								
$\delta_1 = (\Delta x_1 \pm)_{max} / FS =$													
$\delta_1$ 以 $ x_1 \pm - x_1 _{max} / FS =$													
$\delta_2$ 以 $ x_1 + \dots x_1 _{max} / FS =$													
$\delta_3$ 以 $ x_1 + \dots x_1 _{max} / FS =$													
$\delta_4$ 以 $ x_1  / FS =$													
$\delta_5 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^2 - \bar{x})^2}$													
起始感量： $\gamma_{G=0} K \cdot \Delta x$													
评定意见：													
其它说明：													

审定者： 计算者： 复核者： 审定日期：

## 二、静力触探记录表和孔隙水压消散记录表表头格式

### 静力触探记录表

### 附表 3.3

工程名称		探孔位置草图								
勘探点编号										
里 程										
孔口标高										
仪器类型及编号										
探头类型及编号										
率定系数										
日 期										
深度 (m)	读 数	校正后 读 数	阻 力 (kPa)	初读数及 备 注	深 度 (m)	读 数	校正后 读 数	阻 力 (kPa)	初读数及 备 注	
1					6					
2					7					
3					8					
4					9					
5					0					
6					1					
7					2					
8					3					
9					4					
0					5					

### 孔隙水压消散记录表

### 附表 3.4

工程名称		记录比例						
勘探点编号		记录类型						
里 程		气 温						
孔口标高		记 录						
地下水位		复 核						
探头编号		日 期						
深 度 (m)	时 间	读 数	深 度 (m)	时 间	读 数	深 度 (m)	时 间	读 数

### 三、触探成果图件格式

### 聽力聽探測試成果圖

编号	
位置	
高度	

孔隙水压消散试验成果图

附表 3.7

## 附录四 本规则用词说明

执行本规则条文时,对于要求严格程度的用词说明如下,以便在执行中区别对待。

**1.** 表示很严格,非这样作不可的用词;

正面词采用“必须”;

反面词采用“严禁”。

**2.** 表示严格,在正常情况下均应这样作的用词;

正面词采用“应”;

反面词采用“不应”或“不得”。

**3.** 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样作的用词;

正面词采用“宜”或“可”;

反面词采用“不宜”。



## 附加说明:

### 本规则主编单位、参加单位和 主要起草人名单

**主 编 单 位:** 铁道部第四勘测设计院

**参 加 单 位:** 铁道部科学研究院(铁建所、西北所)  
铁道部第三勘测设计院  
铁道部第一勘测设计院  
长沙铁道学院  
北京铁路局  
铁道部第二勘测设计院  
西南交通大学

<b>主要起草人:</b>	谢树彬	殷怀庆	叶启民
	谢 瑛	罗梅云	庞瑞珂
	蔡守璋	陈映南	郑成章
	唐贤强	江文善	李克钊



# 《静力触探技术规则》

## 条文说明

本条文说明系对重点条文的编制依据、存在的问题,以及在执行中应注意的事项等予以说明。为了减少篇幅,只列条文号,未抄录原条文。

**第 1.0.1 条** 任何一项技术均有一定内涵,以目前技术现状而言,本规则“静力触探”专指三种型式的探头(单桥探头、双桥探头、孔压探头)具有一定的技术规格并按规定的操作要求进行试验,以取得符合本规则技术要求的触探参数(锥尖阻力  $q_c$ 、侧壁摩擦阻力  $f_s$ 、孔隙水压力  $u_d$  或  $u_T$  等)。这些触探参数,可用于:

1. 划分土层,确定土层名称和潮湿程度(稠度状态);
2. 确定天然地基承载力,评估地基土的物理力学性质和饱和土的固结特性;
3. 选择桩尖持力层,预估单桩承载力,估计沉桩可能性;
4. 判别砂土、粘砂土和塑性指数  $I_p \leq 10$  的砂粘土液化可能性;
5. 探查场地土层的均匀性和土质洞室的埋藏深度,检验人工素填土密实程度和地基改良效果。

在不同的技术发展阶段,将会赋予静力触探以不尽相同的内涵,故其定义仅具有相对意义,从发展的角度着眼,并在不增加工作量的前提下,在附录一“静力触探”一词的解释中,将端阻(锥尖阻力)特别加入到末尾一句的文字中,在测定孔隙水压力消散过程的同时,对锥尖阻力的松弛过程加以测定,这对今后深化静力触探在饱和土中的贯入机理的认识,会有所裨益。

本规则“静力触探”一词代表了曾一度流传的“荷兰式触探试验”(Dutch sounding Test)、“准静力触探试验”(Quasi-Static Penetration Test)、“静力触探试验”(Static Penetration Test)及“圆锥贯入试验”(Cone Penetration Test)等种种术语的含义,并用后者的

词头“CPT”作为“静力触探”的代号,以便与国际通用符号相一致。

**第 1.0.2 条** 静力触探系以准静态贯入为其特点,它不适用于致密土和大颗粒土。苏联建设委员会(1973)在《关于在建设中的触探试验的指示》中明确规定:不允许在岩石类土、冻土以及大颗粒含量超过 25% 的大块碎石类土中使用静力触探。铁四院在湖北应城寻找第四系含水层时,曾使用了静力触探贯入到含卵砾石的砂层中约 5m,后经钻探证实,大颗粒土含量不足 25%。本条文将 20% 作为大颗粒土含量的上限以限制静力触探的使用;而冻土是致密的,静力触探也是不适宜的。

对于泥炭、红土和膨胀土,静力触探是适宜的,但因工程实践经验积累不多,希望各生产单位在实践中积累经验,推广应用,为下一次修订本规则创造条件。

**第 1.0.3 条** 静力触探贯入阻力与土的强度特性、变形特性乃至物质组成诸因素有关,这些特性又因土质状态之不同而异,且往往具有地区性特点,故静力触探的使用经验常常带有明显的地区性。所谓土质的“地区性”,是由土(地)层的成因类型、沉积环境、地质历史、物质组成所决定的;如果这些生成条件相同,那么地区特点无异。我国幅员辽阔,不同地区的土质特点不可能全然一样,本规则又未能将全国各类土质特性按地区进行划分。因此,本条文特别强调了地区性经验的可贵;兼因静力触探并非全能手段,很多土质参数必须借助于钻探取样试验。故对于重要工程的地基勘察,静力触探必须与钻探或其它测试手段配合使用,通过综合勘察方法取得更符合实际的地基参数。

**第 2.1.2 条** 设备标准化是静力触探技术的基础。为使本规则向国际通用标准靠拢,达到保证勘察成果质量和资料通用的目的,本条对设备标准化作了强调。设备的保养与检修,实属专业性守性工作,下列有关注意事项,供工作参考。

#### 一、记录仪的保养与检修

##### 1. 基本要求

(1)各种记录仪在保管和使用中均应注意防潮和防尘。

(2)仪器在运送和使用过程中应防止震动与摔、碰。

(3)使用时,应注意防止电流过载而毁坏仪器;工作环境温度应控制在仪器的容许范围之内。

2. 电阻应变仪和自动记录仪的一般检修方法见说明表 2.1.2—1和说明表 2.1.2—2。

## 二、贯入设备的保养与检查

1. 汽油机的养护与维修应按该机使用说明书认真执行,并经常进行下列各项技术保养;

(1)清除油污及灰尘;检查有无漏油、漏气和不正常音响现象,一经发现,应及时排除。

(2)检查各紧固件及电线接头有否松脱,机油油面是否保持在油标刻线范围之内。

(3)清除火花塞积炭,检查火花塞间隙是否在  $0.4\sim 0.5\text{mm}$  范围内。

(4)检查气门间隙,应在  $0.20\sim 0.25\text{mm}$  范围内。

(5)每运转  $50\text{h}$  后应更换机油一次;每运转  $500\text{h}$  需进行大修,同时更换空气滤清器芯。

(6)在使用汽油机时,更换机油要趁汽油机热机时进行;汽油机加油时,必须停车。

(7)拆卸缸头要在冷机时进行,防止双头螺栓从曲轴箱上脱出。

2. 变速箱应进行如下经常性保养;

(1)检查齿轮箱中润滑油液面是否保持在标尺刻度附近。

(2)输入轴橡胶密封垫发生漏油时,应及时更换。

(3)在运转过程中,如发觉有异声,应即刻停机检查。

3. 油泵的使用要点和注意事项如下;

(1)新机初次使用时,应将油灌满泵体,然后检查转动方向与进油、出油管路是否对接正确。

(2)严格检查吸油管是否漏气。

(3)开泵前必须打开油箱出油口阀门,防止烧泵。

(4)油温在  $10^{\circ}\text{C}$  以下启动时,油泵应先在空载状态下运转数分钟后再进入正常运转。

(5)油泵工作温度应按不同油泵要求,采用  $50\sim 50\pm 5^{\circ}\text{C}$ ,若工作温度偏高,应停机冷却后再启动。

(6)因气温变化,当空气中的水分在油箱内壁上凝聚成水珠并混入油中时,应及时将水排除。

(7)管道内部应始终保持清洁,发现锈蚀和沉淀物,必须及时清除,防止损坏油泵。

(8)工作油应每年更换一次;在连续作业、高温潮湿及多尘地区工作,宜缩短更油期。

(9)油泵、液压阀均应在额定压力范围内使用;当液压阀失灵时,应立即停机检修或更换。

4. 油缸应经常进行以下检查与保养工作;

(1)检查活塞杆防尘罩,保持油缸清洁;

(2)油缸在开始工作时,如出现颤动现象,应使活塞多次往复升降至上、下死点,排除缸内空气,直至运动平稳后,方可使用;

(3)检查油缸两端防尘圈是否完好,并应定期更换,防止泥污进入缸体;

(4)当发现上、下油腔窜油时,应更换活塞上的密封圈;当发现活塞杆上部渗油时,应更换活塞杆与油缸筒之间的密封圈;

(5)当油缸的工作压力超过其额定压力的  $120\%$  时,应停止工作;

(6)工作完毕后和运送、安放时,活塞杆应收回缸体内。

电阻应变仪检修方法

说明表 2.1.2—1

现 象	可能原因	检查方法	处理措施
接上电源不能工作	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 多线插头接触不良</li> <li>2. 插头线脱焊</li> <li>3. 插头线断线</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 用手捻动插头各线, 观察电表是否跳动</li> <li>2. 用万用表直接量测输出端电压</li> <li>3. 用万用表量测两端电压</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 更换插头或拆下调整</li> <li>2. 重新焊接</li> <li>3. 换用新线</li> </ol>
表头无指示	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 转换开关接触不良</li> <li>2. 电流计断线</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 重复试旋数次</li> <li>2. 试以 <math>1\text{mA}</math> 电流计代用</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 清理接点</li> <li>2. 送修或换用新表</li> </ol>
预调指示失灵	预调指示无偏转	氧化铜损坏	换新
仪器不能调平	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 应变计断线</li> <li>2. 应变计阻值彼此相差过大</li> <li>3. 应变计引线短路</li> <li>4. 引线分布电容相差太大</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 先将 <math>B</math>、<math>D</math> 短路, 检查仪器是否出现故障, 如无故障则用电阻计检测两应变计电阻值是否在允许范围之内</li> <li>2. 试用 <math>500\text{pF}</math> 电容在 <math>A</math>、<math>B</math> 或 <math>B</math>、<math>C</math> 间并联, 观察有否改进</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 更换应变计</li> <li>2. 加接临时性电容补偿</li> </ol>
漂移明显或指针摆动	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 应变计粘贴不好</li> <li>2. 电源电压过低或振荡管失效</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 先将 <math>B</math>、<math>D</math> 短路, 看其是否消除, 如消除, 即属应变计粘贴不好</li> <li>2. 如 <math>B</math>、<math>D</math> 短路无效, 则应检查电源电压或振荡电子管是否失效</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 撕去不良应变计重贴</li> <li>2. 更换电源或更换 <math>2P_2</math> 电子管</li> </ol>
相敏电路不平衡	电位计 $R_{23}$ 松动	短路 $R_{23}1\text{m}\Omega$ 观察指示电表能否平衡	调准后旋紧电位计保护螺帽

**自动记录仪故障的排除**      **说明表 2.1.2—2**

现 象	可能原因	排除方法
指示灯不亮,仪表不工作	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 保险丝烧坏</li> <li>2. 电源开关损坏</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查烧坏原因后,换上 0.5A 的保险丝。</li> <li>2. 用万用表检查电源开关,如损坏则更换。</li> </ol>
指示灯虽亮,仪表不工作	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 放大器、可逆电机损坏或其插座接触不良</li> <li>2. 滑线电阻接触不良</li> <li>3. 接插件接触不良</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查放大器、可逆电机,插紧插座。</li> <li>2. 用酒精清洗滑线电阻。</li> <li>3. 检查并插好接插件</li> </ol>
指示灯不亮,但仪表工作正常	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 指示灯损坏或接触不良</li> <li>2. 指示灯串联电阻烧坏</li> <li>3. 指示灯供电导线断路</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查指示灯线路或更换灯泡</li> <li>2. 更换串联电阻</li> <li>3. 查出断路部位,接通修复</li> </ol>
指针在平衡位置左右作有规则摆动	放大器灵敏度过高	调整放大器的灵敏度电位器,使其满足阻尼次数为 2 次半周摆动
指针在平衡位置摆动无规则	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 滑线电阻接触不良</li> <li>2. 振动变流器失调</li> <li>3. 仪表接地有干扰</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 清洗滑线电阻</li> <li>2. 调整振动变流器</li> <li>3. 使仪表良好接地,并采取抗干扰措施</li> </ol>
指针正反向运转过慢	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 放大器灵敏度过低</li> <li>2. 振动变流器严重失调</li> <li>3. 仪表有干扰</li> <li>4. P、E、G 三者绝缘不良</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 调整放大器的灵敏度电位器</li> <li>2. 调整振动变流器或予更新</li> <li>3. 适当采取抗干扰措施</li> <li>4. 查找原因,修复排除</li> </ol>
指针正反向运转速度不等	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 振动变流器在正反两向的接触率不等</li> <li>2. 功率放大级不对称</li> <li>3. 可逆电动机有故障</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 调整振动变流器的接触率</li> <li>2. 检查功率放大级线路及元件</li> <li>3. 检查可逆电动机或予更新</li> </ol>
输入信号正常,但指针向起点或终点极限运行	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 振动变流器极性不对</li> <li>2. 可逆电机绕组接反</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 互换振动变流器激磁绕组的两根引线</li> <li>2. 互换可逆电机的控制绕组引线</li> </ol>



续说明表 2.1.1—2

现 象	可能原因	排除方法
输入信号 很小,指 针便向终 点偏转	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 稳压电源单元无电流输出或过小</li> <li>2. RM 有短路现象</li> <li>3. 滑线电阻短路</li> <li>4. 滑线电阻终端断路</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 更换稳压电源或予以修复</li> <li>2. 修复 RM</li> <li>3. 找出短路处,加以修复</li> <li>4. 查找断路处并修复</li> </ol>
指示误差 过大	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 滑线电阻磨损</li> <li>2. 补偿导线极性接反</li> <li>3. 指针座松动</li> <li>4. 滑线电阻滑臂与指针的相对位置发生变化</li> <li>5. 放大器灵敏度调得太低</li> <li>6. 测量桥路有关电阻有故障</li> <li>7. 稳压电源电压输出不正确</li> <li>8. 仪表有干扰</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 更换滑线电阻</li> <li>2. 重新连接极性</li> <li>3. 紧固指针座</li> <li>4. 重新调整它们之间的相对位置</li> <li>5. 调高放大器灵敏度,但不超过规定阻尼</li> <li>6. 检查并排除桥路故障</li> <li>7. 修理或更换稳压电源</li> <li>8. 采取相应的抗干扰措施</li> </ol>

**第 2.2.2 条** 国内外大量试验资料业已表明,贯入速率每改变一个量级,锥尖阻力( $q_c$ )和侧壁摩擦阻力( $f_s$ )将改变 10%左右(以 20mm/s 的标准贯入速率为基准),而对孔隙水压力( $u_d$ 或  $u_T$ )的改变量有资料表明将大于这个值。因此,本规则将现行的国内外通用的标准速率肯定下来,并对孔隙水压力触探速率提出了更为严格的要求。

本规则未考虑对触探设备加设测斜装置,因而对触探主机的施力作用线的垂直度提出控制标准,在按操作规程作业条件下,可望贯入深度误差被控制在 1%以内(见第 2.2.4 条说明)且能减免探杆折断。

以往试桩资料表明,桩的抗拔力有时会大于贯入力。铁四院在杭甬高速公路勘察中,曾出现过触探杆拔不起来的现象。因此,要求触探主机的额定起拔力不小于额定贯入力的 120%的规定是必要的。

**第 2.2.4 条** 使用于同一台触探主机的探杆长度相同,便于在贯入过程中核查贯入深度。

前 5m 探杆,在贯入过程中起重要的导向作用。当前 5m 探杆连接后,若挠曲产生在同一方位,而 5m 以后的探杆循前 5m 探杆的路径贯入,如果探杆弯曲度达到 0.05%,则触探孔所形成的弧形弯曲,其曲率半径约 250m。当孔深 60m 时,贯入长度为 60.59m,即误差近似为 1%;要求探杆两端螺纹轴线的同轴度误差不超过 1mm,也是为了防止探杆接长后轴线度偏差过大。当孔深超过 60m 时,特别是今后发展海底深层触探,测斜装置的加设是不可或缺的。

**第 2.3.2 条** 仪器所能显示的最小确定读数,称为有效分度值,本规则要求小于  $0.06\%FS$ ,对数字显示仪而言,不应小于  $3\frac{1}{2}$  位;对刻度式仪器,满量程不应小于 2000 个刻度。

在贯入速度为 20mm/s、自记仪满量程划线时间为 5s 时,能分辨厚度 10cm 的地层,对工程勘察而言,可以满足精度要求。

一般单、双桥触探,每孔贯入历时不长,即使存在零漂(温漂与时漂),还可在贯入过程中通过归零检查予以消除。但若进行孔压触探,在一孔中进行多点孔压消散试验,则仪器连续工作时间较长,兼之在贯入过程中,不许可作归零检查。因此,对仪器的温漂和时漂给予限制是必要的,也应该作为一项性能参数列入该类仪器的技术指标之中。

**第 2.3.4 条** 对贯入行程为 1m 的触探主机而言,标尺长度为 1m,即标尺长度与贯入行程一般是相等的。标尺长度范围内,刻度的精确度可以放宽,因为它不影响贯入深度的准确性;标尺全长的准确性则直接与深度的准确性相关联。要求 1m 长度的标尺其误差不超过 2mm,可满足在 50m 累积长度范围内,贯入深度误差不超过 0.1m(假定触探孔不歪斜)。

目前国内触探仪的计深标尺大都刻划在触探主机上,常因地锚松动或杆件变形等原因,在贯入过程中触探主机随贯入行程之往返而上、下浮动,致记录深度与实际深度不符,且深度总误差有时十分可观。只有将计深标尺垂直固定在地面不动处,方可从根本

上保证触探深度的准确性。

**第 2.3.5 条** 自动记录仪计深用的滚动摩擦轮,在保证与探杆的摩擦不产生打滑、丢转的同时,也应设法置于地面不动点处,才能保证记录贯入深度的准确性。

**第 2.3.6 条** 本规则所指单桥探头仅限于在国内广泛使用的综合型探头,在锥底以上部位尚有一段圆柱形套筒,其所测得的比贯入阻力( $p_s$ )包含了端阻( $q_c$ )和侧阻( $f_s$ )两种阻力;双桥探头的生产厂家在国内甚多,探头的外形多与国外流行的 **Fugro** 型探头相同或相近,但内部结构各异。它们的结构差别主要表现在锥底有效面积比( $\alpha$ )不同,致彼此在同一均质土层中贯入所得端阻( $q_c$ )及侧阻( $f_s$ )值时有差异。孔压探头尚可测取贯入时饱和土的孔隙压力( $u_d$ 或  $u_T$ )值及探头停止贯入时孔隙压力随时间而变化的数据。

**第 2.3.7 条** 探头的加工公差和更新标准是在参考了中国工程建设标准化委员会推荐的《静力触探技术标准》(CECS04:88)和国际参考试验规程的基础上,结合铁科院有关探头标准化的研究成果而编制出来的,考虑了以下两个基本原则:

一、保证加工精度,延长使用寿命

1. 探头各部直径( $D_1$ 、 $D_2$ )均按其工作面积上偏差分别为 1%、和 2%加以控制;加工时宜盈,可延长使用寿命。

2. 探头锥尖在使用过程中容易磨损,故将锥高( $H$ )标准放得很宽,以降低勘察成本。

二、从实际出发,尽可能向国际标准靠拢

1. 国际标准要求双桥和孔压探头全长不得小于 1000mm。本规则附表 2·2 只规定孔压探头长度,对双桥探头长度未提出明确要求,就是因为迄今为止,国内使用的双桥探头长度均不到 1m,而本规则推荐的经验公式又是用这种探头取得的数据建立起来的。今后,应进一步开展这两种不同长度的双桥探头的对比试验研究,为下一次修订本规则作好准备。

2. 为保证测试数据的高重现性,达到测试成果的通用和技术资料有统一解释依据的目的,附表 2—2 将对测试数据有重大影响

(在软土地基触探中特别突出)的锥底有效面积比( $\alpha$ )作为双桥探头的一项基本技术参数,明确规定下来是必要的(详第 5.2.2 条说明);但为照顾国内双桥探头的使用现状,对  $\alpha$  值规定了上、下偏差值,使之具有一定的宽容度。由这种偏差所造成的锥尖阻力( $q_c$ )测试值误差,一般不大;但在正常固结的软粘土中贯入,则仍然可达 8% 左右,对此,特别提请注意。

3. 附图 2—2 给出了过滤片的三种形式、两种设置位置,均适用于本规则。这是参考了日本 OYO 公司和荷兰 Fugro 公司产品而定出的。到目前为止,有关孔压触探的认识与经验仍相当有限,但本规则所提出的一些轮廓性认识及其标准,即是基本的,也是有一定实践基础的。

**第 2.3.8 条** 探头的技术性能是静力触探仪的组成核心,对一些重要的技术指标应给出明确规定。

一、探头检测总误差如能控制在 3% 以下,则可望整个测试误差(包括仪器的检测误差及探头工作面积误差在内)被控制在 8% 以内。此标准与国际标准相比是不低的。

二、根据武汉冶金勘察研究院(以下简称武汉冶勘院)对探头的绝缘电阻对测试误差的影响分析及室内外试验结果所得出的结论认为,探头应变测量误差在绝缘电阻为  $1\text{M}\Omega$  级时,可远小于 1%。铁四院在南方若干工点工作,也曾发现同一探头在  $5\text{M}\Omega$  和  $>200\text{M}\Omega$  时,于同一工点触探,其测试值的重复性甚好。但当探头的绝缘电阻降到  $5\text{M}\Omega$  以下时,由于气候潮湿,兼因野外环境恶劣,也许在一夜之间便降为零。为此,本规则将探头绝缘电阻的使用下限定为  $20\text{M}\Omega$ ,以保证外业工作不受探头故障影响。

三、目前国内所使用的探头一般能适应  $-10\sim 45^\circ\text{C}$  的环境温度,但由于粘贴材料和粘贴工艺及粘贴质量等原因,温漂量可能超限( $0.05\%FS/^\circ\text{C}$ ),在  $20^\circ\text{C}$  温差条件下,探头的测试误差便大于或等于  $1\%FS$ 。因此,既要限制探头的温漂误差,又要求探头在标定时与使用时的温差不宜大于  $20^\circ\text{C}$ ,因为探头标定系数在不同的温度条件下,可能不同。

四、各类土的渗透系数值概如说明表 2.3.8 所列。过滤片渗透系数推荐值为  $10^{-5}\text{cm/s}$  级,相当于均质砂粘土的渗透系数。期望这一数值在粉土至粘土这类细粒土范围内具有普遍的代表性。此外,孔压触探的主要对象是具中~高压缩性的饱和粘性土,过滤片渗透系数过大,土对它的涂抹作用,也会使其渗透系数降低;过滤片的渗透系数过小,则又给制造上增加困难。故本规则在参考了日本 OYO 公司的产品技术指标之后,提出了这一推荐值。

要求过滤片与相邻部件的接触面具有大于一个大气压的抗渗能力,是为了防止孔压传感器应变腔中的水,在触探前便从接触缝隙中漏出,使得应变腔不饱和而达不到测试目的。

土的渗透系数约值 说明表 2.3.8

土 类	渗透系数 (cm/s)
洁净砾	$1\sim10^2$
洁净砂,砂砾	$10^{-3}\sim1$
粘砂土,粉砂,砂粒、粉粒与粘粒混合物,层状粘土,粉质粘土	$10^{-6}\sim10^{-3}$
均质粘土	$<10^{-6}$

五、孔压传感器应变腔体(容)积改变量( $\Delta V$ )反映了土中水进出于孔压探头的多少,这个数值过大,将不利于对探头周围土的固结特性作出正确解释。因此,从土工计算上看, $\Delta V$  值愈小愈好。但考虑到孔压弹性元件加工的某些难度以及目前大多数传感器仍采用箔式或丝式应变计作测量桥臂的现状,故将  $\Delta V$  的上限定为  $2\text{mm}^3$ ;如果改用半导体应变计,这个上限值可以定得更小。而上限值  $2\text{mm}^3$ 能满足按达西定律所计算的流量。

静力触探以  $2\text{cm/s}$  的标准速度贯入,过滤片表面在纵向的投影长度为  $L(\text{cm})$ ,则土中某一点在过滤片  $L$  范围内历时  $t=\frac{1}{2}L$  (s),在时间  $t$  内通过探头过滤片的水流量  $Q$  为

$$Q=kAit \tag{S2.3.8}$$

式中  $k$ ——过滤片渗透系数,定为  $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ;

$A$ ——过滤片与土接触的表面积,以 OYO 探头为例,每个探头有 6 片,每片直径  $\phi=6\text{mm}$ ,厚度  $l=5\text{mm}$ ;

$i$ ——水力坡度,  $i=\Delta h/l$ ,

其中  $\Delta h$ ——压力水头,据实践经验,土在探头贯入时的孔压值  $u_d$  一般在  $100 \sim 2000 \text{kPa}$  间,故  $\Delta h$  在  $1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4 \text{cm}$  间,

$l$ ——渗流路程,取过滤片厚度  $l=0.5\text{cm}$ 。

于是,据上式可计得  $Q \geq 8.8 \text{mm}^3 > 2 \text{mm}^3$ 。考虑到土对过滤片毛孔的涂抹与填塞以及在浅层饱和砂土中触探的需要与可能,将应变腔的体变量上限定为  $2 \text{mm}^3$ 。此数值与目前常用的电阻式传感器的能力也相适应。

将应变腔的体变率加以限制的目的,是使得应变腔有足够的容积,当探头瞬间暴露于空气中时,微量的蒸发失水,不致造成明显的测试误差。

**第 2.3.9 条** 套筒和摩擦筒与土(特别是与粘土)摩擦所产生的粗糙度大致为  $1\mu\text{m}$ ,将套筒和摩擦筒表面纵向粗糙度控制在  $3.2\mu\text{m}$  以下,使得探头向下贯入时不致因带动周围的土向下移动造成应力扩散,而影响测试结果,并可简化金加工条件;将锥头、摩擦筒与探头管之间的滑动间隙加以限制,以保证它们的同心度,并可防止某些粗颗粒土进入间隙中对测试带来影响。

**第 2.3.10 条** 以往的试验、研究表明,在锥尖或桩尖全断面上下各 8 倍于探头或桩直径范围内的土层性质对贯入阻力有影响,如将摩擦套筒长度考虑进去,则对锥尖全断面以上的范围便达  $0.5 \sim 0.6\text{m}$ 。因此,直径大于探头的杆件宜置于离锥底  $1\text{m}$  以上的位置。

**第 2.4.1 条** 要求探头各项力学指标的检测误差不大于  $1\%$ ,则必须用允许误差为  $\pm(0.3 \sim 0.5)\%$  的 I 等标准测力计予以标定。

**第 3.1.2 条** 对于新出厂的探头,其标定参数(标定系数、标

定桥压)随时间常有所改变,主要是弹性元件残余应力和应变计胶膜及粘贴材料性能变化所致。本条规定当探头标定满3个月后,不论是否使用,均应重新标定。在使用过程中,当遇有接近探头满负荷的硬地层或每触探200m累积深度后,也应检查探头的标定参数是否产生影响测试质量的变动。

**第3.1.3条** 探头的标定参数与使用的仪器、电缆有关。探头标定应与实际使用的仪器、电缆一道进行,以保证标定参数的稳定性。当备有多台同型号、规格的仪器,且存在调换使用可能性时,应对它们进行对比性检测,以确定它们之间的相对误差,便于对测试结果进行修正或互换使用;对同型号、规格的电缆,其长度改变量不大于100%时,由此引起的测试误差一般不超过1%。

**第3.1.4条** 新探头在标定前反复多次进行满幅加、卸荷,是为了消除传感器弹性元件的残余应力。反复加荷与卸荷的次数愈多,愈有利于探头性能的稳定。

地层的贯入阻力( $p_s$ 或 $q_c$ ),有时可达40MPa以上,但常见值在30MPa以内。火恩杰曾论证过,电阻应变式静力触探测试,实质上是一个非线性系统,要保证传感器的高线性,在设计传感器时或在使用探头时,应控制弹性元件的应变量,以便与应变计的灵敏度系数相适应。

探头标定时,要求加荷到传感器的额定荷载,就是为了检验探头的非线性误差是否超限,以便限制探头的适用范围。

**第3.2.1条** 用桥压不变的记录仪器标定探头时,只能使用固定桥压法,按附表3.1用计算出探头的标定系数供现场工作人员使用;对于桥压连续可调的记录仪器,使用固定系数法标定探头,既方便现场操作,又便于资料整理,是目前自动记录仪最为常用的方法。

**第3.2.2条** 对探头加、卸荷的级数过少,不利于对探头的检测精度作出可靠评定;要求标定时其加、卸荷不得少于3个循环,是因为每个循环过程值可能不同,特别是顶柱式传感器或传感器与传力垫可以相对转动的探头,各个过程值互异的可能性更大,其

差值(%)的小与大,可直接反映出探头性能的好坏。

**第 3.2.4 条** 探头传感器所用的应变计粘贴材料、粘贴工艺和探头的标定设备,都具有不同程度的滞后特性。为减少这种滞后性对探头检测精度的影响,除改善材料弹性、改进粘贴工艺、提高标定设备性能等之外,在标定操作上作出相应规定,有利消除滞后性的影响。

**第 3.2.5 条** 探头和记录仪器均存在程度不同的零漂(温漂和时漂),本规则第 2.3.8 条对探头的零漂检验已作出具体规定。对批量生产的探头,这种检验性标定对探头质量的控制是有益的。

**第 3.3.1 条** 探头标定与现场测试在触探参数计算上是两个互逆的过程。本条规定用过原点的最小二乘公式(3.3.1)确定探头的标定系数  $K$ ,前提是认为在额定荷载范围内,探头受力变形是服从虎克定律的,而应变计的变形量与信号输出的关系也是成正比的。

**第 3.3.3、3.3.4 条** 探头的灵敏度或起始感量与所使用的仪器及供桥电压大小有关,对于同一个探头在同一荷载作用下,仪器采用不同的供桥电压便有不同的输出值。当探头、仪器及其供桥电压一定时,探头的起始感量便可用仪表的最小(有效)分辨值作为计量标准,按式(3.3.4)计算。

**第 4.1.1 条** 静力触探操作属多岗位联合作业性质,其成果质量与现场操作者的技术素质和工作质量有关,有必要对操作人员进行职业性培训。

**第 4.1.4 条** 现场试桩和模型试验证明,在 25 倍桩径(或探头直径)以外的边界条件,对测试成果无甚影响;土的非均质性总会影响平行试验结果,故孔间距又不宜过大。

**第 4.2.4 条** 孔压探头自过滤片表面至应变腔内部应充满无气流体(水或硅油);若含有气体,必影响孔压测试结果。因此必须反复抽气并注入无气液体,直至彻底除气为止。为便于观察有无气泡出现,使用的特制抽气泵应有透明的外壁。在抽气时,可用手拍击以振荡应变腔,有利于气体从腔中逸出。



**第 4.3.1 条** 触探主机与反力装置的安装与定位,必须事先用水平尺校准机座基准面,当其为水平状态后方可触探贯入,以保证探头、探杆对水平面的垂直度。对于深孔触探,在贯入过程中仍应随时用水平尺检查机座是否保持水平,防止探孔偏斜造成深度误差及测试误差,并避免探杆弯曲或折断。

**第 4.3.4 条** 为避免孔压探头在到达地下水位之前应变腔中的无气液体逸失,在地下水位埋深较浅时,可用铁铲于孔位处挖掘一小坑,坑底接近地下水位,坑内注满水,再开始贯入;当地下水埋藏较深,挖坑困难时,可采用预先开孔的办法,注水贯入。以保证测试成果的可靠性。

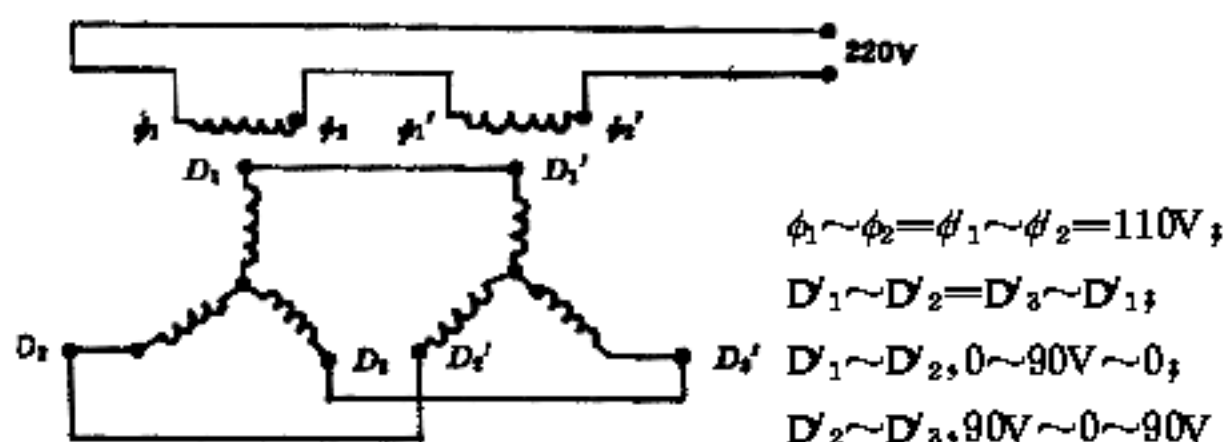
**第 4.3.5 条** 零漂检查是保证测试数据质量的基本环节,不论探头零漂性能如何,均应遵守此规定。机电部第三勘察分院(以下简称一机部三勘院)的试验研究表明,地表 6m 以下,地温一般不受季节影响,此结论已被实践所证实。本条文将这一结论予以具体化。

探头提升时,孔底处于负压状态,对孔压探头而言,常会造成应变腔中的液体逸失,致孔压测试值失真。因此,规定孔压探头的零漂检查只在终孔起拔探头露出地面时,进行一次性检查。

**第 4.3.6 条** 自动记录仪当使用自整角机带动走纸机构时,常会出现打滑丢转问题,造成记录深度与实际贯入深度不符。因此应随时注意核对(一般每隔 3~4m 核对一次)贯入的探杆长度与记录的贯入深度是否相符,并作好标注工作。

触探前对自整角机进行如下检查:

将自整角机与仪器接插好通电预热后,转动发信机,若收信机随之转动,表明机构运转正常;否则,应用电表检查各绕组电压,正常状态下,各绕组电压关系应符合说明图 4.3.6 所示。:



说明图 4.3.6 绕组关系示意

目前,铁道科学研究所和交通部第一航务工程勘察设计院(以下简称一航院)已使用光电脉冲技术于静力触探,但因该技术尚未普及,故本规则未作具体规定。

**第 4.3.8 条** 进行孔压消散试验,自停止贯入之时起,以每隔 1s 或 2s 测记一次孔压值,一般情况下(对粘性土)累积 30s 后,孔压值变化渐缓,可加大时间间隔为 0.5min 或 1min,以后的时间间隔可改为 2min 或 5min,直至仪表数字每改变一个值,记录一次相应的累积时间。

与此同时,锥尖阻力在停止贯入后的前期也发生明显的应力松弛现象,它表明孔压消散的前期阶段是与土体的卸荷过程相伴随的。因此,在消散试验中,同时测记锥尖阻力随时间的改变值是必要的。

消散试验中,探杆只能卡住不动。任何松动、碰撞探杆或使探头发生升降的力,都会影响测试结果。

**第 4.3.9 条** 孔压消散试验的消散程度(固结度)是以稳定的孔压值为计算依据的。在天然地基中,试验土层的孔压稳定值即土层在该试验深度处的静止孔隙水压值,可用以测定地下水位,并可判明地下水是承压的还是无压的;地基在荷载作用下尚未完全固结时,孔压消散试验由于受时间所限,只能求得与地基中该点的孔隙水压力相平衡的均衡孔压值,此时若场区的地下水位已知,可以计算出地基在该点的固结度。

为使试验时间不致过长,本条文规定,以连续 2h 内孔压值不变为稳定标准,作为对天然地基的静水压力或欠固结地基的孔隙压力的近似估计值。

**第 4.3.10 条** 记录仪器显示异常,包括仪器指针颤动、数字不正常跳动以及由于套筒或摩擦筒被卡住而不能正常归零等情况。

**第 4.3.11 条** 起拔最初几根探杆时,注意丈量、记录探杆表面干、湿界线所处地下的深度,是对地下水位埋深数据的补充与参考,尤其有益于对地下水初见水位的判断。

**第 5.1.1 条** 静力触探是工程勘察的一种技术手段,它不仅适用于铁道工程勘察,也同样适用于其它类型的工程勘察。但作为一项专业技术,其本身有一定的独立性,不宜更多地涉及岩土工程及工程地质方面的工作内容。故本规则仅将单孔触探资料整理作为静力触探全过程之终结,其它工作内容则可按国家或铁道部现行规范要求执行。

**第 5.1.2 条** 静力触探的直接结果,就是获得一系列触探参数。这是确定地基设计参数的基础性数据。为方便使用和判读,应该通过各种形式的图表将它们充分地表达出来。要求:

一、绘制各触探曲线,包括:

1. 单桥探头比贯入阻力与深度的关系曲线;
2. 双桥探头端阻、侧阻、摩阻比与深度的关系曲线;
3. 孔压探头端阻、孔压、侧阻、孔压比、摩阻比与深度的关系曲线。

这些曲线能直观而形象地给出一个连续的土层工程特性沿深度而变化的剖面,这对设计人员选择地基持力层有很大帮助。

二、根据触探曲线及孔压消散过程线,给出各土层的地基设计参数值。

在《铁路工程地质技术规范》(TBJ12—85)和《铁路桥涵设计规范》(TBJ2—85)中,已将粘性土的稠度和砂土的饱和程度统一称为潮湿程度,为兼顾《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)及有

关勘察规范的需要,在本条文第二款之后补入了“(稠度状态)”一词。

**第 5.2.1 条** 数据修正一般包括深度修正和读数修正两方面。

### 一、深度修正

导致深度出现误差的原因,不外是:

1. 使用地锚作反力装置,探头贯入时地锚上拔,引起地锚与机座联接装置松动,操作时又未能及时紧定联接装置;

2. 以卡瓦作为夹持器,由于有时握裹力不够,当贯入到高阻层时,出现卡瓦打滑;

3. 触探孔在开孔时就发生明显歪斜;或在成层土中贯入,土层软硬相间,差别颇大,且硬层中夹含粗大颗粒土时,容易出现探孔偏斜。

本规则第 2.3.4 条要求记录贯入深度用的标尺应置于地面不动点处,而位移指针应置于向下贯入的工作探杆上,其目的就是为了从根本上消除由于上述 1、2 两项原因所造成的深度误差。而第 2.2.2、第 2.2.4 及第 4.3.1 各条的规定,则是从设备器材的加工和操作方面,提出一些限制性要求,以控制上列原因所带来的深度误差。

我国目前大多数触探仪使用的深度标尺,一般多固着在触探主机上,随主机之起落而上、下浮动,常造成记录深度大于贯入实际深度。这时,应根据操作过程中在记录表中所作的标注,将地锚联接松动和卡瓦打滑造成的虚贯入从探杆入土的累计长度(深度)中逐段修正扣除;而对应于虚贯入的读数,则作为伪值予以剔除。

由于本规则未考虑测斜装置的使用,对由探孔偏斜造成的深度误差,一般可根据整个场区的钻探分层资料对触探深度予以校准;对无钻探资料可考且孔斜现象在地表又察觉不出的情况,本规则未作更具体规定,这是今后应予考虑的技术问题。

### 二、读数修正

由于同一桥路的应变计,彼此的阻值总会存在一定差异,兼之

地表与地下的温差以及探头与土摩擦产生的热传导等,都可能使探头传感器产生温漂。若仪器、探头性能不够稳定,则还会随工作时间的加长而产生时漂。从而导致探头空载时仪表示值出现零漂。

读数修正,就是对零漂的平差。零漂修正量是与零漂值同号的。一般情况下,当零漂值在测试值的 $\pm 10\%$ 以内时,可根据相邻两次归零检查的深度间隔,简单地按线性平差办法分配零漂修正量,即按公式(5.2.1)修正读数;当零漂值超过测试值的 $\pm 10\%$ 时,若单一按深度进行平差,恐与实际出入较大,特别是在软土地基中贯入,有时会使触探曲线出现“台阶”,误为地层变层。此时,宜在两次归零检查的时间间隔内,根据贯入行程所占时间段落,依比例进行零漂修正量分配,再对贯入行程中的读数按深度进行线性平差。其中,因操作不紧凑或因某些原因而耽误的时间,诚然不是本规则所能考虑的。

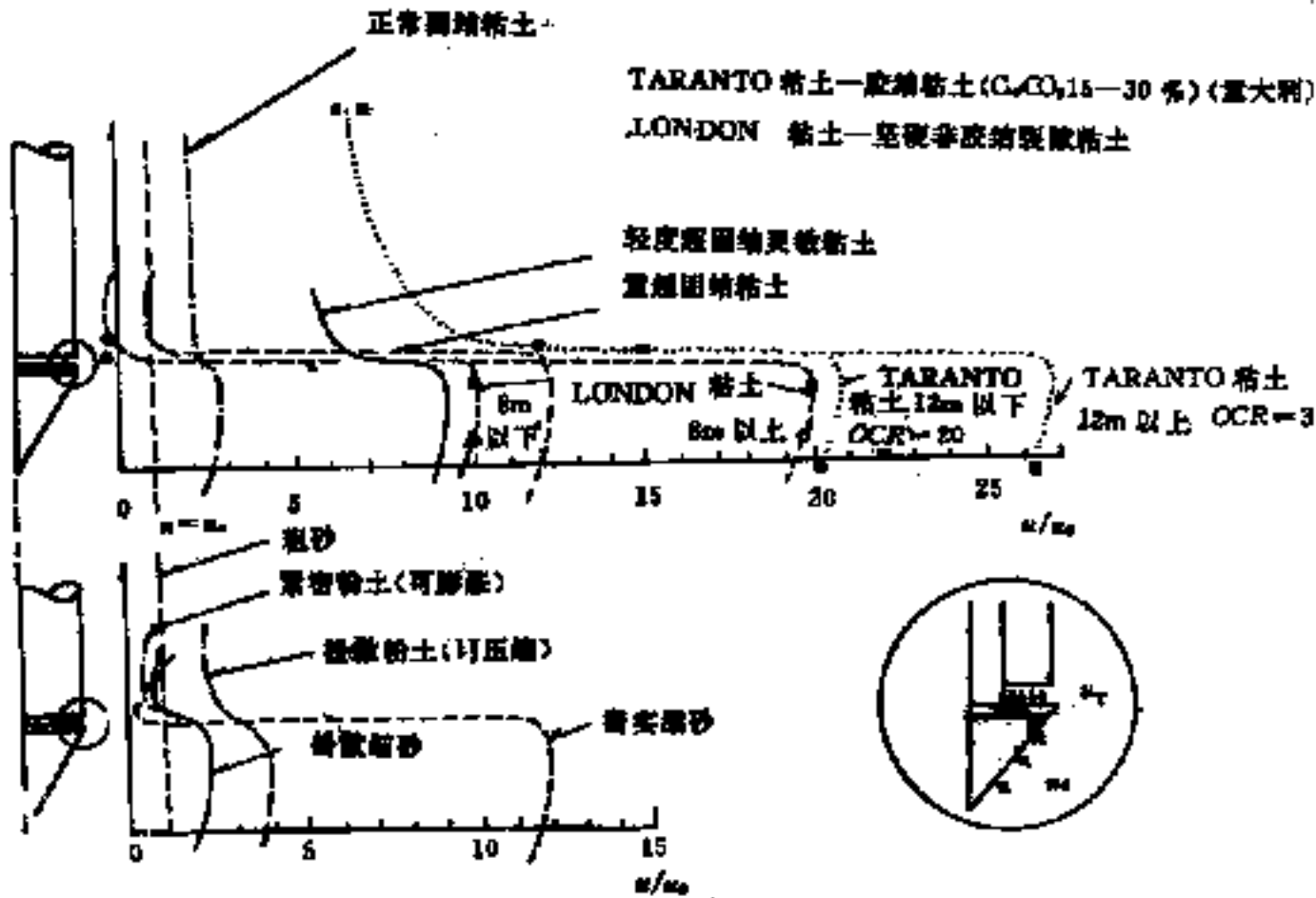
在第 5.2.3 条中对自动记录仪原始记录曲线的修正办法,与本条的修正办法出于一理。

**第 5.2.2 条**  $q_c$ (或  $p_s$ )、 $f$  和  $u_d$ (或  $u_T$ ) 是静力触探三个基本触探参数,连同孔压消散试验数据在内,是据以进行土层划分、定名、确定地基持力层、给定地基设计参数的依据,必须根据计算公式逐点算出,以便绘制触探曲线。

$R_f$ 、 $B_q$  和  $q_T$  则是通过公式计算而得到的触探参数,在手工制图情况下,一般只要求计算分层土的平均值。但考虑今后微机的使用,这些参数也应逐点算出,绘成曲线。其中,  $R_f$  和  $B_q$  是土层分层定名的两个特征参数。从定义式  $B_q = \Delta u / (q_T - \alpha_w)$  看,  $B_q$  与斯开普顿(Skempton)孔隙压力系数( $A_f$ )近义而同形,它反映了探头贯入时土的孔隙水压反应性状,因此它又是一个重要的土质特性参数。而  $q_T$  则是将  $q_c$  转换成具有总应力概念的总锥尖阻力。铁四院在淤泥及淤泥质土层中,使用有效面积比  $\alpha = 0.21$  的孔压探头贯入,常发现  $u_d \geq 0.5q_c$ , 甚而有  $u_d > q_c$  的情况。后种情况,常使人产生误解。事实上,锥尖系以丝扣与探头本体相连,因为结构上的需要,锥尖的全断面与探头本体存在间隙,水可自由出入。丝扣连接部的截

面积为有效面积,间隙部分的环状面积则完全暴露于水中,或者与土体中的水存在水力联系。探头贯入时,特别是在正常固结粘性土中贯入,环状面积受到一个与贯入方向一致的水压力( $u_T$ ),而与来自下方的水压力( $u_d$ )相抵销。因此, $q_c$ 应按公式(5.2.2—3)统一进行修正,以利触探成果的通用与解释。

长沙铁道学院和西南交通大学通过测定静力触探应力~位移场的大量模型试验表明,相对于锥尖下方的土体而言,锥尾全断面处上方的土体处于一种卸荷状态,因此有  $u_T/u_d \leq 1$ ;Robertson 和



说明图 5.2.2 根据现场 CPT 测得的饱和土中孔隙水压分布曲线

Campanella(1985)在探头的不同部位设置了量测孔隙水压力的透水元件,对不同状态的土质进行了系统性的试验与研究,得到如说明图 5.2.2 所示的结果。这些结果经铁四院在广州、深圳、武汉、鄂州、徐州及宁波、温州等地验证与实际情况相符,并将其归纳于表 5.2.2,以供使用。这就可以解释,在同一软土工点,使用不同厂家( $\alpha$  值不同)的探头,何以  $q_c$  值不等的原因;关于  $q_T$  的这一修正问题,在软土地区的深层贯入中,特别是在近海的深水触探中,尤其重要。

**第 5.2.4 条** 经零漂修正后的孔压值,点绘成  $u_t \sim \log t$  曲线后,有时会出现如说明图 5.2.4 所示的几种曲线形态。

1. 曲线的初始段出现陡降,过拐点  $P$  后,曲线进入正常状态。这是因为探头贯入时,有  $u_d > u_T$  这就决定了当探头由  $2\text{cm/s}$  的动态贯入骤然静止时,探头周围土体的孔隙压力在开始阶段存在一个内部应力的调整与平衡过程。在这段时间里,土体内部的渗流状态即应力状态是紊乱的,这个陡降现象可能就是由  $u_d \rightarrow u_T$  时所造成的。因此,对此曲线应予修正,使得  $u_t \sim \log t$  曲线是  $u_T$  意义下的孔压消散曲线;

2. 孔压消散曲线在初始阶段先上升而后下降,导致这种现象出现的原因,可能有以下几种:

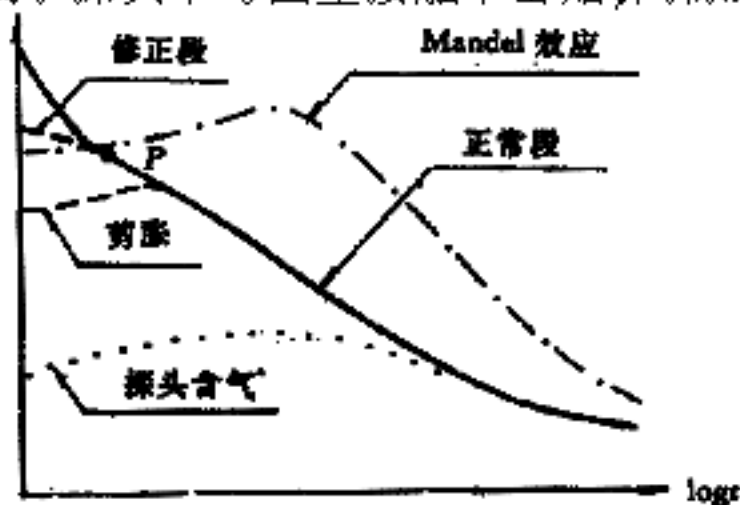
(1)孔压消散试验的位置正好处在土层界面附近,如消散点附近有渗透性良好的砂层或含砂透镜体,使得在探头周围一定范围的土体产生一种 **Mandel** 效应。也就是说,该范围内的土体在孔压消散的同时,由于压缩固结产生一个向心的挤压作用,导致了孔压值的初期上升现象。

(2)也有人认为,这种现象的产生,与土的剪胀性有关。探头贯入时,与探头相接触的土连续发生屈服,使围绕探头的土受到剪切卸荷作用,致这部分土体内部的超孔隙压力相对于探头下方的土而言,处于低压或负压状态。当探头停止贯入后,根据变形协调原理,土体内部应力在初始阶段就会自行调整以达到平衡,这对于渗水元件置于锥尾全断面处的孔压探头来说,特别显得突出。

基于上述两方面原因造成的孔压消散曲线形态,本规则目前尚提不出合理的修正方法。建议:对处于土层界面附近的试验曲线,只作为土层剖面的定性解释资料,不用作计算该土层固结系数的依据;对由剪胀性造成的试验曲线,略去孔压上升的初始段,以曲线的峰值点坐标值作为孔压( $u_t$ )和时间( $t$ )的计量起点,用以近似评估土层的固结特性。

(3)探头含气,即孔压测试元件除气不彻底。例如透水陶瓷片和传递压力用的流体含气、或应变腔四壁有油污使附着于表面的

气体不易排除、或陶瓷片安装于探头中与四壁接触不密贴,间隙过大,甚至土体本身也含气(沼气)等,都可能使探头不饱和。气体的存在,使应力传递出现滞后现象并且数值失真。因此,这种试验数据不能作为测试成果使用。



说明图 5.2.4 各种孔压消散曲线形态

探头之是否含气,可通过下列办法检验出来:探头在贯入过程中,常因加接探杆或其它原因而往往有一段短时间的静止状态,孔隙压力随即消散,当再向下贯入时,若读数(或记录笔)很快回到贯入停止前的数值,或仅出现很狭窄的“喇叭口”形态曲线(不足实际贯入行程的 20cm)时,则表明探头是饱和的或是接近饱和的;“喇叭口”越大,说明探头含气越多,这种试验数据便不能使用。应将探头拔起,重新除气,移位贯入。

**第 5.3.1 条** 贯入图的格式是综合近十余年来各单位的表达形式而初步制定的,以便于资料的统一管理 with 使用。

**第 5.3.2 条** 归一化超孔压比( $\bar{U}$ )与以孔隙水压力为定义的固结度( $U$ )存在下列关系:

$$\bar{U} = 1 - U \quad (\text{说明 } 5.3.2)$$

可以说归一化超孔压消散曲线即固结度与消散时间的关系曲线,是作为估算土的固结特性参数的依据而要求绘制的。

在无附加荷载的地基中,土的静止孔隙水压力即静水压力( $\gamma_w \cdot D_w$ )。如果在饱和地基上施加一分布荷载(如堤、坝、大面积填土等),地基中便产生一相应的超孔隙水压力( $\Delta u$ )。在  $\Delta u$  的消散过程中,如果进行静力触探孔压消散试验,由于探头尺寸比起堆载面积,相当于集中荷载而且属高应力的,因而探头的孔压消散速率远远大于堆载发生的孔压消散速率,于是便出现一种“孔压追踪”现象。设  $u_{tQ}$ 、 $u_{tp}$  分别为堆载和探头在同一部位某时刻  $t$  的孔压值,则



在有限时间内,必有  $u_{tp} \geq u_{tQ}$ 。为使试验时间不致过长,本条文规定,以连续 2h 内  $u_{tp}$  不变为稳定标准,此时视  $u_{tp} \approx u_{tQ}$ ,并称  $u_{tp}$  为均衡孔隙水压力 ( $u'_w$ ),而地基中该点的残余超孔压  $\Delta u_r = u'_w - \gamma_w D_w$ 。

**第 6.1.2 条** 触探参数本身就是力学参数,故根据触探参数分层便称为力学分层。但若进一步给定土层名称、状态、潮湿程度及工程设计需要的地基参数,则超出力学分层范围;而地质分层包含的地层时代、成因类型及矿物组分等诸多内容,又为静力触探所不能解决。为与力学分层及地质分层相区别,本条文将这种分层称之为工程分层。而且特别指出,只有在以钻探资料为依据或有地区性使用经验的条件下,单桥探头才能进行工程分层。以防止单桥探头触探被滥用。

**第 6.2.1 条** 土的分层,一般以端阻为主。《工业与民用建筑工程地质勘察规范》(TJ21—77)及一航院、铁三院等单位,曾对地基土分层规定过定量标准,无疑给静力触探划分土层提供了一个方法。实践表明,土的分布及其力学特性是复杂的,目前的一些分层规定难于概括很多复杂情况;实际上无论作何规定,都必须根据具体工程的特点对地基土分层。如一般工业与民用建筑,基础埋置较浅,对深部的分层不必过细;而对铁路桥涵在冲刷线或最大冻结深度以下的分层是十分重要的,应详细划分并注意软弱层。

**第 6.2.2 条** 探头在成层土中贯入,即使各层土本身是均质的,也会由于上、下土层间密度、状态及土质之不同,使得触探参数值特别是端阻值在土层界面以上及以下一定深度内有提前变大或变小的现象,称之为土层的界面效应。

根据长沙铁道学院、西南交大及铁道科学院所做的大量模型试验表明,超前与滞后深度的大小与上、下土层的密度、上覆有效压力及探头尺寸大小等因素有关;界面效应的实质则与探头对土的破坏机理有关。在界面上、下,探头贯入时,土的破坏一般以剪切(或冲切)为主(有待进一步试验证实),在超前深度以上和滞后深度以下的土体则一般以压密破坏为主。这一机理现象,对桩尖持力

层的选择、沉桩可能性的判断及深基础承载力的计算均有重要意义。

大量工程实践及模型试验还证明,贯入阻力值是土强度及变形性质的综合反映,而端阻又是诸触探参数中最为主要和常用的一个指标。经验表明,不同土层可能有相同的端阻,而侧阻和孔压值可大不相同,因而在划分土层时,要求以端阻为主,结合侧阻或孔压值、摩阻比或孔压参数比予以划分,以同一分层内的触探参数值基本相近为原则。

本条文给出的层面划分标准,系根据长沙铁道学院 47 次大型模型试验结果并经北京铁路局勘测设计院在现场挖探验证后提出来的,经过了路内使用单位钻探分层资料的检验,而且与更为精细的孔压触探分层结果甚相吻合。

**第 6.2.3 条** 条文中的  $R_f$  和  $B_q$  值均取各分层触探参数平均值按有关公式算出,可以简化计算工作量;其中静水压力( $u_w$ )和总自重压力( $\sigma_{vo}$ )同样可取层平均值(或层中值)。对自动记录曲线,提出以盈补缺的条分计算办法可保证取值的准确性。

曲线的特殊大值点往往是由粘性土中的姜石、湖沼软土中的贝壳、泥炭质土中的朽木、土中个别大颗粒异物等造成。为正确反映土层的触探参数值,在计算层平均值时,这些大值均应剔除;但在点绘贯入图时,则应如实绘出,有助于对地层的地质分析。

在黄泛区地表以下 20m 乃至 30m 深度范围内的土层,多由单层厚度为数厘米到 30cm 的粉砂(或粉土)和粘性土互为透镜体状交错沉积而成,触探曲线多呈锯齿状。对这种交错层逐一划分出来是困难的,也无此必要。只要求根据触探曲线幅值的总体趋势分段划分大层,在各大层中分别计算触探参数的大值平均值和小值平均值,亦即只计取大值包络线的平均值和小值包络线的平均值。根据如下:

1. 本规则第六章中绝大部分公式与数表,都是基于均质土地基的试验资料而得到的。为使得这些试验成果能用于这类“复合”式地层,就需要对其进行上述“概化”性处理。铁四院在徐州枢纽大

山 1 号和 2 号特大桥(旱桥)工点,作了 14 次荷载板试验和数十孔钻探、成千孔的触探,表明以大值平均值和小值平均值分别与砂土和粘性土经验公式相联系,所得地基承载力与荷载板试验结果一致。

2. 在这类交错性地层上所进行的任何非足尺的现场试验,都不可能充分反映出工程实际情况。如不加分析而笼统地建立这类地层与触探参数间的一些经验关系,必将使其受到明显的地区性甚而是工点性限制。

铁四院将在徐州枢纽所取得的“概化”处理经验用于商丘枢纽几座大桥和站房的地基勘察设计中,多次被实践证明是成功的;以后这一方法在河南省开封至竖岗全长 50 余公里的地方铁路勘测设计中,全线推广使用,获得良好效果。

**第 6.3.1 条** 我国在使用单桥探头确定地基设计参数方面,建立了许多地区性经验,为使这部分经验能在双桥探头和孔压探头上得到应用,建立各种探头贯入阻力的换算关系是十分必要的。

一、总锥尖阻力( $q_T$ )与比贯入阻力( $p_s$ )的关系

对比试验地点有武昌、深圳、温州、广州、鄂州及徐州等,土质类型有软土、一般粘性土、硬粘土、砂土及砂砾石土等。选择厚度大于 2m 的均质土层,取层平均值作为统计变量;是凡夹于厚层软土中的薄层透镜体,其上、下的  $q_T$  与  $p_s$  均不采用。对比用的探头,其截面积均为  $10\text{cm}^2$ ,其中单桥探头有铁四院和新卫电子仪器厂生产的两种,其不同之处仅于 57mm 长的套筒后面的探头管粗细有别,前者  $\phi 30$ ,后者  $\phi 27$ ;而且还与截面积为  $20\text{cm}^2$  的孔压探头进行了系列性对比。得到如下结论:

1. 通过 97 组数据的统计分析,铁四院的单桥探头与新卫厂的单桥探头其测试值几无差别,两种探头资料可以通用。因为两探头管半径的相对误差(10%)已为土层固有的非均质性所掩盖,故本规则第 2.3.7 条对探头的缩颈率提出了要求,意即限制探头管的直径不得小于规定尺寸,以保证测试资料的通用性。

2. 截面为  $10\text{cm}^2$  和  $20\text{cm}^2$  的孔压探头测得的  $u_d$  值相等,  $q_c$  值

因探头的有效面积比( $\alpha$ )不等而有明显差别,但按公式(5.2.2—3)修正成 $q_T$ 后,二者数值近等。这一结论已为西南交大在柔性边界的砂模型试验中得到了某种证实,也与中南综合勘察院早年的现场试验结果一致。说明了探头截面积为 $10\sim 20\text{cm}^2$ 时,尺寸效应对测试数据所带来的影响,在实用上可不计。

3. 通过 53 组对比数据的统计,得

$$p_s = 0.94q_T + 18 \quad (\text{kPa}) \quad (\text{说明 } 6.3.1-1)$$

$$\text{或 } p_s = 0.96q_T \approx q_T \quad (\text{说明 } 6.3.1-2)$$

其中:相关系数  $r=0.96$ ,标准差  $S=260\text{kPa}$ ,统计值域

$$p_s = 230 \sim 6370\text{kPa}, q_T = 230 \sim 7250\text{kPa}.$$

从实用上看,本条文取  $p_s/q_T=1$ ,以简化换算关系。

二、锥尖阻力( $q_c$ )与比贯入阻力( $p_s$ )的关系

为建立它们之间的换算关系,对统计变量作了如下处理:统计变量均取用层平均值,凡对比孔整孔出现  $q_c > p_s$  的数据均不采用,对层位错动的段落也予删除,但对偶尔出现的  $q_c > p_s$  的数据仍予保留,且双桥探头的  $q_c$  数据均取用有效面积比  $\alpha=0.39$  的探头测试值。

对选择出的统计变量分别按  $p_s = bq_c + a$ 、 $p_s = bq_c$  和  $p_s = q_c + af$ , 三种适线方程进行回归分析;同时考虑到静力触探的独立性,勘察中不一定钻探取样,故采用双桥探头划分土类的方法,将地基土区分为砂性土和粘性土两大类。

铁科院通过对 209 组数据的上述分析,最终推荐

$$p_s = 1.1q_c \quad (\text{说明 } 6.3.1-3)$$

作为各类土层在总体意义上的一个平均换算关系,其相关系数  $\gamma=0.99$ 。

此关系式简单,使用方便,并补充说明两点:

1. 该式并非数理意义上的表达式,因此不能任意将它延扩到用于换算土的  $f_s$ 、 $R_f$  及与之有关的其它方面;建立此式的目的在于:当无地区性经验可循时,用  $q_c$  确定地基的基本承载力、判定  $I_p \leq 10$  的地基土液化可能性,一般是偏于安全的,因而是可行的。

诚如所知,在一般情况下,砂土的摩阻比  $R_t < 2\%$ ,而粘性土的摩阻比  $1\% \leq R_t \leq 5\%$ 。若以大家习用的关系式  $p_s = q_c + 6.41f$  衡量,则比值  $p_s/q_c$  就陆上触探而言,多在  $1 \sim 1.3$  间。故取用  $p_s/q_c$  为 1.1 的换算关系,从总体上反映了土体的属性。

2. 因为  $p_s \approx q_T$ , 而  $q_T = q_c + \beta(1-\alpha)u_d$ , 故有

$$\alpha = p_s/q_c = 1 + \beta(1-\alpha)u_d/q_c \quad (\text{说明 } 6.3.1-4)$$

可统一表为:  $\alpha = f(\beta \cdot u_d \cdot q_c)$  (说明 6.3.1-5)

式中的  $\beta$ 、 $u_d$ 、 $q_c$  均系土质性质与状态的函数。即使对于同一土质性状而言,并在临界深度以下,其中孔隙水压力  $u_d$  尚且是深度的函数。由此可知,  $\alpha$  是一个绝对变量,只能期望在一个地区对某一土层在一定深度范围内,获得一个  $\alpha$  的约值。因此在使用地区性  $\alpha$  值时,必须注意其适用条件。

**第 6.3.2 条** 北京铁路局勘测设计院在《静力触探使用技术暂行规定》(以下简称《暂规》)划分土类的基础上,根据在北京、天津、石家庄、徐州、连云港、上海、南京、沈阳、广州、深圳、武汉等地区的试验结果和《铁路工程地质技术规范》(TBJ12—85)的土质分类标准,提出了用双桥触探参数划分土类的新标准,但在分类的细度上,囿于双桥探头功能,又与上述规范稍有区别。主要有:

一、软土是一种工程性质特殊的土类,广泛分布于我国东南沿海和部分内陆地区。本规则在用双桥探头和孔压探头划分土类中,增加了一类软土。铁四院经对 68 组软土及一般粘性土荷载板试验与静力触探对比,并结合室内土工试验的分析,得到其中 37 组软土地基比贯入阻力( $p_s$ )的上限值为 800kPa,相当于锥尖阻力  $q_c$  的上限值为 700kPa。

二、分别以塑性指数( $I_p$ )10 和 7 为界将粘性土划分成两个亚类,出于下列原因:

1. 《铁路工程抗震设计规范》(GBJ111—87)规定,当地震烈度大于和等于 7 度并具备一定条件时,  $I_p \leq 10$  的砂粘土、粘砂土及砂土有可能液化。本规则有关判别液化的土分类标准也与该规范一致。

2. 在相同条件下,  $I_p > 10$  的土,  $q_c$  值小、 $R_t$  值大, 而  $I_p \leq 10$  的土, 则呈相反趋势。但为与 TBJ12—85 规范的土质分类标准取得一致, 北京铁路局勘测设计院, 在统计分析与比较的基础上, 推荐使用图 6.3.2—b 辅助判别曲线, 籍以将粘砂土从图 6.3.2—a 中  $10 \geq I_p > 3$  的粘性土中划分出来。

三、双桥探头由于受测试精度所限制, 不能进一步将粘土与砂粘土区分开来; 而砂的  $q_c$  (或  $p_s$ ) 值主要取决于其密实度, 与砂的粒度关系不大。例如有些粗砂的  $q_c$  值小于粉砂或细砂的  $q_c$  值, 因此, 砂的粒径级配不可能用触探确定。在本规则中, 地基基本承载力、桩承载力以及液化判别等都是使用贯入阻力值计算的, 故目前将砂土划为一类, 基本上能满足工程需要。若要进一步对其细分, 则应结合区域性地层资料或钻探资料, 进行综合判定。

条文中的(图 6.3.2—a)是通过分析而得出的。对三变量( $q_c$ 、 $f_s$ 、 $R_t$ )和两变量( $q_c$ 、 $R_t$ )作了多种判别形式的分析, 最后推荐了两组线性判别形式, 其正判概率为 86.6%~93.2%。而各变量的权数为  $R_t > q_c > f_s$ , 其中  $f_s$  的权部分为负数, 故放弃了三变量分析结果, 既保证了判别精度, 又方便应用。

**第 6.3.3 条** 孔隙水压触探属连续点测性质, 能详细地揭示出探头贯入时和停止贯入后土的孔隙压力反应, 而且兼具有双桥探头的功能, 因而可对粘性土作出更为细致的划分。现将情况说明如下:

1. 分类的数据资料来源于广州、深圳、温州、武汉、鄂州、徐州及广州至茂名一线, 有一定的土质代表性。根据塑性指数按现行规范的土质分类标准, 对 310 组数据使用两组判别的费歇准则得到如说明表 6.3.3 所列的判别结果。

说明表 6.3.3

序	土类		判别标准	判别函数(Y)	临界值( $Y_c$ )	F(检验)
I	软 土		$Y > Y_c$	$Y = 5.13B_q - 12.4q_T$	-3.03	28.7
II	粘土( $I_p > 17$ )		$Y < Y_c$			
			$Y > Y_c$	$Y = 21.73B_q - 4.5q_T$	5.41	78.5
III-1	砂粘土 (含部分 硬粘土)	$I_p > 10$	$Y < Y_c$	$Y = 9.9B_q - 1.5q_T$	-1.52	33.2
			$Y > Y_c$			
III-2		$I_p \leq 10$	$Y < Y_c$			
IV	粘砂土 ( $3 < I_p \leq 7$ )		$0.01 \leq B_q < 0.1$	——	——	——
V	砂土		$B_q < 0.01$ $q_T > 1.5$	——	——	——

注:  $q_T$  单位为 MPa

2. 条文中的图 6.3.3 之主判别图(a),就是根据说明表 6.3.3 而绘制的。但对图中软土的判别界线,为使用方便,并与双桥探头划分软土的标准取得一致,将表中的判别式  $5.13B_q - 12.4q_T > -3.03$ ,改绘成  $q_T = 0.8\text{MPa}$  的竖直线,使软土在  $B_q \sim q_T$  图中的分布区域适当地扩大了。

此外,为照顾《铁路工程抗震设计规范》(GBJ111—87)和 GBJ7—89 规范的需要,在砂粘土中,以  $I_p = 10$  为界,划分成两个亚类。其中  $7 < I_p \leq 10$  的砂粘土数据不多,这两个亚类之间的判别界线,虽经在武昌、宁波几个工点检验效果甚好,但使用时,仍需使用少量钻探取样试验,予以抽样性检验。

3. 根据 310 组数据散点图的分布情况,在  $B_q < 0.4, q_T < 0.4\text{MPa}$  的区域内无数据点(盲区)。因此,图 6.3.3 中的软土、粘土、砂粘土之间的判别界线,究竟以谁界定谁为宜? 实际上是不够清楚的,但这并不影响使用。

4. 根据图 6.3.3(a)判别时,常会出现硬粘土被错划为砂粘土。为此,引入了固结度达 50% 时的孔压消散历时( $t_{50}$ )作为辅助判别,足以使大部分硬粘土从砂粘土中划分出来,因为这两种土的孔压反应有明显的不同。

5. 本条文所提出的土类判别界线,系以透水元件置于锥面上所测得的数据为基础的;当透水元件置于锥尾的园柱面上时,情况必有所改变。此时则需要将数据按公式 5.2.2 所列换算关系进行转换。

**第 6.4.1 条** 土的天然重度( $\gamma$ )是一项基本的土工计算参数,建立  $\gamma \sim p_s$  的关系,既是必要的,又有其可行性。根据如下:

1.  $\gamma$  是干重度( $\gamma_d$ )和天然含水量( $w_n$ )的函数,西南交大、长沙铁道学院及国外试验研究表明, $p_s$  与砂土的  $\gamma_d$ 、 $D_r$  有良好的关系;而正常固结的饱和粘性土,其强度与  $w_n$  有唯一关系。这为建立  $\gamma \sim p_s$  的经验关系提供了试验依据。

2. 根据理论公式

$$\gamma = \gamma_d + n S_r \gamma_w \quad (\text{说明 6.4.1—1})$$

式中  $n$ ——土的孔隙率,  $n = 1 - \gamma_d / G_s$ ;

$G_s$ ——土粒比重;

$S_r$ ——土的饱和度;

$\gamma_w$ ——水重度。

饱和土,可认为是二相土,  $S_r \approx 1$ , 上式可改为

$$\gamma = \gamma_w + (1 - \gamma_w / G_s) \gamma_d \quad (\text{说明 6.4.1—2})$$

由于造岩矿物的  $G_s$  相差不大,对粘性土而言,  $G_s$  多在 2.6~2.8 间,可恒取  $G_s \approx 2.7$ ;而  $\gamma_w$  可恒取为  $10 \text{ kN/m}^3$ 。故对饱和土而言,其重度  $\gamma$  可用下面的近似式表达:

$$\gamma \approx 6.3 \gamma_d + 10 (\text{kN/m}^3) \quad (\text{说明 6.4.1—3})$$

既然在一定条件下,  $\gamma_d$  与  $p_s$  有良好的对应关系,则  $\gamma$  与  $p_s$  的统计关系也就存在。

3. 如同  $G_s$  值一样,对于非有机质土,  $\gamma$  值的变化不大,一般在  $15 \sim 22 \text{ kN/m}^3$  之间,因此用  $p_s$  估计非有机质饱和粘性土的  $\gamma$  值所造成的误差甚小。在生产实践中,曾多次用本条文给出的经验公式与室内试验结果进行比较,偏差在  $0.3 \text{ kN/m}^3$  以内者占 90% 以上,最大偏差达  $0.5 \text{ kN/m}^3$ 。用于估计淤泥的  $\gamma$  值,一般偏小  $0 \sim 0.2 \text{ kN/m}^3$ ;用于估计硬粘土的  $\gamma$  值,则常偏大  $0 \sim 0.3 \text{ kN/m}^3$ 。



**第 6.4.2 条** TBJ12—85 规范用液性指数( $I_L$ )值域划分粘性土的潮湿程度(稠度状态),反映了土的软硬状态。相同的土在不同状态下,工程性质不同,可用触探参数进行判别。但是实践表明,不同的土在  $I_L$  相同时,贯入阻力( $p_s$  或  $q_c$ )值不同,使得统计结果有较大的离散性(如说明表 6.4.2 所示)。即是说,不分土类(粘土、砂粘土、粘砂土)确定  $I_L$  值精度是不高的。为此,在统计分析时,考虑到  $I_p$  常具有 2~3 的误差,截取了  $I_p \geq 15$  的 159 组试验数据,分别进行了判别分析与回归分析,得到本条文中表 6.4.2—1 所列的综合判别结果。经武昌、江岸及宁波几个工点的实践验证,正判率很高。而条文中的表 6.4.2—2 则是根据铁四院在全国各地多年的实践并结合国内兄弟单位的使用经验而提出的,有一定的代表性。

需要指出的是,表 6.4.2—1 的统计数据全为  $I_p \geq 15$ ,故严格说来,用该表确定粘土的潮湿程度(稠度状态)是合适的,将其外推到砂粘土时,应慎重。

说明表 6.4.2

公式来源	经验公式	适用土类	对应下列 $I_L$ 的 $p_s$ 值(kPa)				
			$I_L$				
			0	0.25	0.50	0.75	1
原北京 综勘院	$I_L = \frac{287}{p_s} + 0.374$	$p_s < 2000 \text{ kPa}$ 粘性土	—	—	(2280)	760	460
武汉 治勘院	$I_L = 1.5834 - 0.934 \log \frac{p_s}{100}$	粘土和 亚粘土	4960	2680	1450	780	420
铁四院	$\frac{1}{I_L} = 0.0011 p_s + 0.462$	$p_s < 3000 \text{ kPa}$ 粘土	—	(3220)	1400	790	490
铁四院	$p_s = 503 I_L^{-1.08}$	$p_s < 1500 \text{ kPa}$ 粘性土	—	—	1050	680	500

**第 6.4.3 条** 原“暂规”给出的十字板强度( $S_n$ )的数值表是按下列公式制出的:

$$\left. \begin{aligned} p_s < 600 \text{ kPa 时, } S_n &= 0.0528 p_s, \\ p_s = 600 \sim 1500 \text{ kPa 时, } S_n &= 0.05 p_s + 1.6 (\text{kPa}) \end{aligned} \right\} \text{(说明 6.4.3—1)}$$

其中：相关系数  $r=0.87$ ，标准差  $S=6.3\text{kPa}$ ，数据 325 组。

上式的资料来源较广，但情况比较复杂，既有电测十字板数据，又有机械十字板数据。在“暂规”试行后的多年实践中发现：

1. 机械十字板测得强度普遍比电测十字板强度为高，《软土地基与地下工程》(孙更生等 1984 年著)一书亦有此说；

2. 用直剪固结快剪强度参数  $(C_{\text{cu}}, \phi_{\text{cu}})$ ，并按下式定义土的天然强度  $(\tau_{\text{cu}})$ ： $\tau_{\text{cu}}=C_{\text{cu}}+p_{\text{c}}\text{tg}\phi_{\text{cu}}$  式中  $p_{\text{c}}$  为土的前期固结压力。则经统计，有  $S_{\text{u}}\approx\tau_{\text{cu}}$ 。显然上式给出的强度  $(\tau_{\text{cu}})$  较土的实际天然强度为高；而室内无侧限强度之半  $(q_{\text{u}}/2)$  则仅为  $S_{\text{u}}$  的 84% 左右。因此，曾提出过十字板强度应按 0.9 进行折减取用的意见。认为  $S_{\text{u}}$  偏高的原因，可简单地归咎于剪切速率较室内试验的剪切速率为快。

鉴此，为消除不同的十字板试验体系对统计成果的影响，在修订本条文内容时，将原 325 组数据中的机械十字板数据全部剔出，并在全国各个软土工点补作了 319 组电测十字板与静力触探对比试验；板头一律使用板高  $H=100\text{mm}$ ，板径  $D=50\text{mm}$  的常规尺寸。对 505 组试验数据，按经典承载力公式  $S_{\text{u}}=(p_s-\alpha_{\text{cs}})/N_{\text{k}}$  求出对应于  $S_{\text{u}}$  的  $N_{\text{k}}$  值。考虑到  $N_{\text{k}}$  值受土的加工软化、各向异性、灵敏度等因素所影响，故以  $N_{\text{k}}$  值与每个地区或工点的软土灵敏度  $(S_{\text{t}})$  和塑性指数  $(I_{\text{p}})$  建立了统计关系：

$$N_{\text{k}}=25.81-0.75S_{\text{t}}-2.25\ln I_{\text{p}} \quad (\text{S6.4.3—2})$$

式中： $S_{\text{t}}=2\sim7$ ， $I_{\text{p}}=12\sim40$ ， $N_{\text{k}}=12\sim19$  平均为 15，标准差  $S=1.5$ 。它较国外  $N_{\text{k}}$  的变化范围要小得多，这与我国软土的  $I_{\text{p}}$  值多在 40 以内有关；同时，因本次修订时，将统计变量限制在  $p_s<800\text{kPa}$  内，也大大减小了  $N_{\text{k}}$  的离散性。

该式必须在已知  $S_{\text{t}}$  和  $I_{\text{p}}$  时方可付诸使用，因而本条文仅推荐下列单相关方程：

$$\tau_{\text{u}}=0.9S_{\text{u}}=0.04p_s+2(\text{kPa}) \quad (\text{说明 6.2.3—3})$$

以估算软土的不排水剪强度。此式最近又经连云港软土地基筑堤试验检验，证明有效；并且还和软土承载力的触探经验公式取得殊

途同归的效果。该式的单相关数  $r=0.816$ 、标准差  $S=0.3\text{kPa}$ 。

**第 6.4.4 条** 饱和粘性土的固结不排水剪强度角 ( $\phi_{\text{cu}}$ ) 一般可用下式表征:

$$\text{tg } \phi_{\text{cu}} = \alpha \frac{\tau_u}{p_c} \quad (\text{说明 } 6.4.4-1)$$

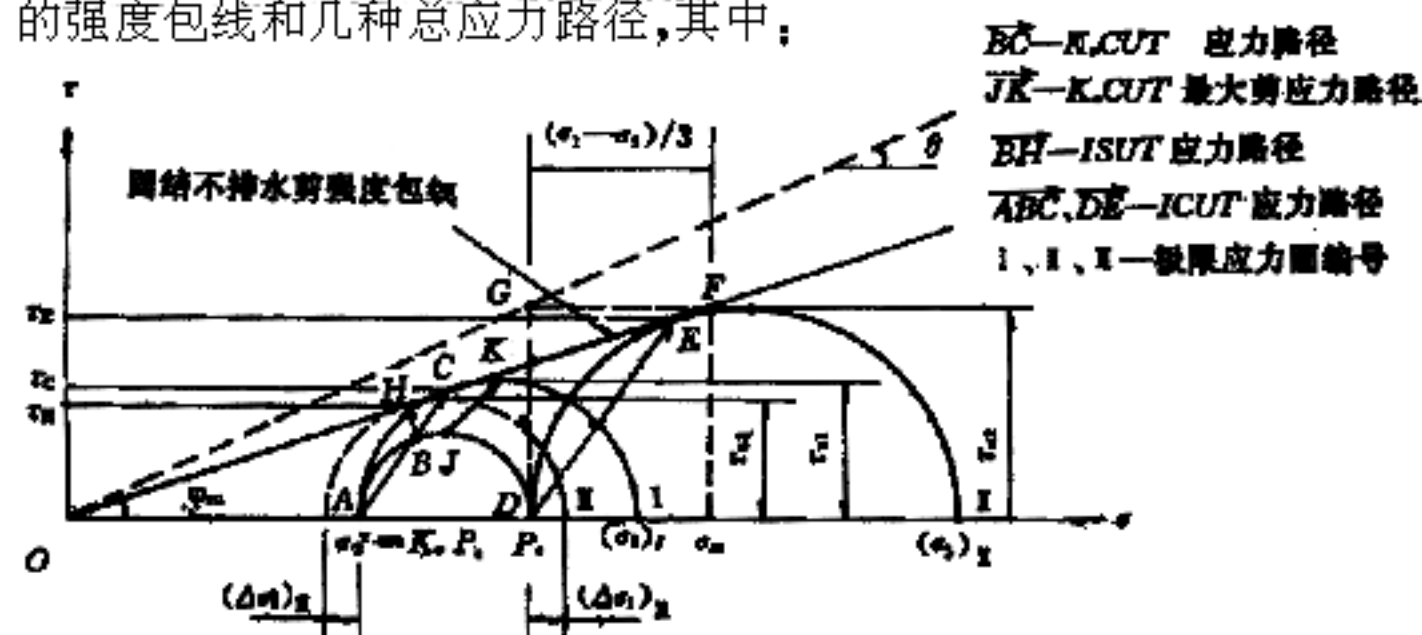
式中  $p_c$ ——土的前期固结压力,对正常固结土,  $p_c = \sigma'_{v0}$ ,  $\sigma'_{v0}$  为土的有效自重压力;比值  $\tau_u/p_c$  称为依固结压力而变的强度增长率,对某一定的土质而言,是一个比较稳定的数;

$\alpha$ ——经验换算系数,其与试验方法和试验时的应力条件有关,当  $\tau_u$  取本规则第 6.4.3 条公式计算值时,  $\alpha=1.4$ 。

现就  $\alpha$  的取值问题,补充以下几点说明:

一、试验方法和应力条件对  $\alpha$  值的影响

说明图 6.4.4—1 给出了正常固结土三轴固结不排水剪试验的强度包线和几种总应力路径,其中:



说明图 6.4.4—1 不同应力条件下正常固结粘性土的抗剪强度

1.  $\overrightarrow{BC}$  为  $K_0$  固结不排水 ( $K_0$ CUT) 剪应力路径,其与室压  $\sigma'_0 = K_0 p_c$  时各向等压固结不排水 (ICUT) 剪应力路径  $\overrightarrow{ABC}$  重合。而  $\overrightarrow{JK}$  是与  $BC$  相对应的最大剪应力路径,当达破坏状态时,其最大不排水剪应力为  $\tau_{u1}$ ;  $\overrightarrow{DE}$  则是  $\sigma'_0 = p_c$  时 ICUT 应力路径,不排水剪强度

为  $\tau_{u2}$ 。因此,在强度包线上,下列恒等式成立:

$$\operatorname{tg} \phi_{\text{en}} = \Delta \tau_{\text{en}} / \Delta \sigma_{\text{N}} = \tau_{\text{en}} / \sigma_{\text{N}} \quad (\text{S6.4.4—2})$$

式中:  $\Delta \tau_{\text{en}} = \tau_{\text{E}} - \tau_{\text{C}}$ ,  $\tau_{\text{E}}$ 、 $\tau_{\text{C}}$  为对应于  $E$ 、 $C$  两点的固结不排水剪强度;  $\Delta \sigma_{\text{N}} = \sigma_{\text{E}} - \sigma_{\text{C}}$ ,  $\sigma_{\text{E}}$ 、 $\sigma_{\text{C}}$  为剪切面上与  $\tau_{\text{E}}$ 、 $\tau_{\text{C}}$  对应的法向总应力;  $\tau_{\text{en}}$ 、 $\sigma_{\text{N}}$  分别是强度包线上任意点的固结不排水剪强度和法向总应力。

当改用不排水剪强度( $\tau_u$ )和前期固结压力( $p_c$ )表征  $\operatorname{tg} \phi_{\text{en}}$  时,因  $\tau_u/p_c \neq \tau_{\text{en}}/\sigma_{\text{N}}$ ,故有

$$\alpha \cdot \tau_u/p_c = \tau_{\text{en}}/\sigma_{\text{N}} \quad (\text{S6.4.4—3})$$

由上图所示几何关系,可求得  $\alpha$  值的表达式:

$$\text{对于 } \tau_{\text{C}}/\sigma_{\text{C}}: \quad \alpha_1 = p_c / [\cos \phi_{\text{en}} (\tau_{u1} + K_o p_c)] \quad (\text{S6.4.4—4})$$

$$\text{对于 } \tau_{\text{E}}/\sigma_{\text{E}}: \quad \alpha_2 = p_c / [\cos \phi_{\text{en}} (\tau_{u2} + p_c)] \quad (\text{S6.4.4—5})$$

由此可知  $\alpha_2 < \alpha_1$ 。经验表明:  $\alpha_1 > 1 \geq \alpha_2$ ,  $\alpha_1$  常在 1.25 左右。

日本土质试验法建议用八面体应力取代剪切面上的法向应力和剪应力,可通过作图求得上图中的  $\overline{OG}$  线,以  $\operatorname{tg} \theta \approx \tau_{u2}/p_c$  近似表征  $\tau_u$  随固结压力的变化。这样便有

$$\alpha = \operatorname{tg} \phi_{\text{en}} / \operatorname{tg} \theta = \left[ 1 / \sqrt{\frac{8}{9} + \frac{4\sqrt{2}\tau_{u2}}{3p_c}} \right] \leq 1$$

2.  $\overline{BH}$  为各向同性土在正常固结的原位应力条件下的不排水 ( $ISUT$ ) 剪应力路径 (假定了  $\Delta \sigma_1 = -\Delta \sigma_3$ )。从图中可以看出  $\tau_{\text{H}} < \tau_{\text{C}}$ , 故  $\alpha_3 = 2 / [\cos \phi_{\text{en}} (1 + K_o)] > \alpha_1$ 。

在这种理想土质条件下进行现场十字板试验,如果十字板试验的剪切速率与室内三轴试验的剪切速率相同,且土样无应力解除和结构扰动,那么,所测得的十字板强度  $S_u \approx \tau_{\text{H}}$ 。实际上,地基土总存在不同程度的各向异性,且十字板强度 ( $S_u$ ) 主要反映的是圆柱面上的强度,这便决定了  $S_u < \tau_{\text{H}}$ 。因此,常规十字板试验经速率修正后的不排水剪强度 ( $\tau_u$ ) 就应不大于  $\tau_{\text{H}}$ ; 由此建立的  $\alpha_4$  则应大于或等于  $\alpha_3$ 。Hasan (1973)、魏汝龙 (1983) 已曾从理论上论述过,在

应力各向异性条件下,十字板强度(排除速率影响)将小于土体的原位不排水剪强度。

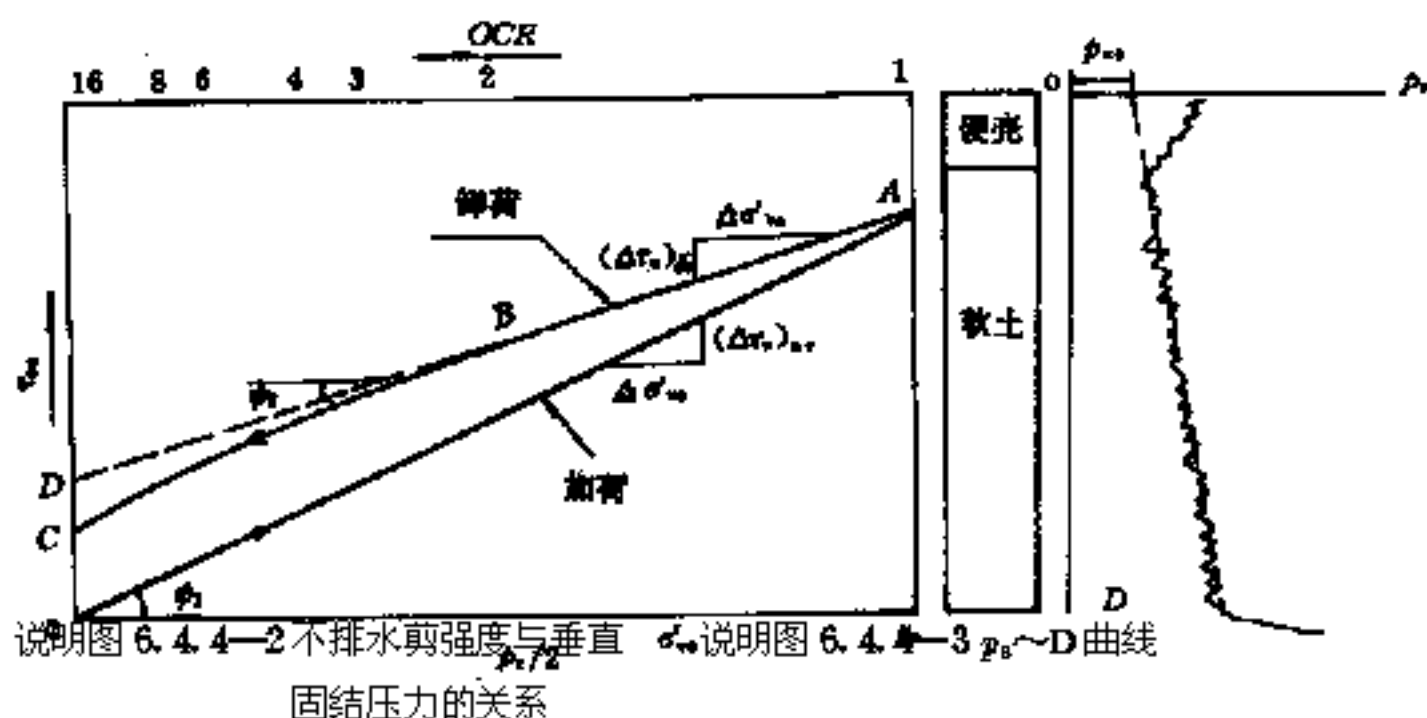
综上所述,可知经验换算系数  $\alpha$  受试验方法、试验时的应力条件所控制,并非是一个恒定的常数。

## 二、统计结果及其适用条件

1. 本条文规定的不排水剪强度( $\tau_u$ )系以电测十字板常规试验值( $S_u$ )为基础的。而十字板试验的应力路径并非十分清楚,因而  $\alpha$  值是经验的,必须通过对比试验去取得。考虑到我国生产部门,在各类剪力仪中,直剪仪的使用是大量的,故本条文选择了直剪固结快剪参数( $\phi_{sk}$ )为对比对象。通过对我国东南沿海和长江、珠江中、下游地区上千组对比数据的统计,得到平均值  $\bar{\alpha}=1.42$ ,均方根误差  $S=0.21$ ,是以本条文推荐  $\alpha$  取 1.4。此值业经若干工点的验证,普遍较直剪仪试验结果偏低在 2% 以内;与三轴固结不排水试验结果相比,大多偏高在 2% 以上,这可能与土样采取和制备时,结构受到了扰动有关。不言而喻,本条文的公式(6.4.4)仅适用于估算直剪固结快剪强度参数,不适用于估算三轴及其它剪力仪的固结不排水剪强度参数。

2. 超固结土与正常固结土的强度特性本不相同,但自然界很难找到超固结比  $OCR=1$  的软土。因为次固结及化学风化作用,使正常固结土多少带有轻度超固结性质,囿于资料数量,本条文将  $OCR=1\sim 2$  的软土一并进行统计,可能是造成  $\phi_{sk}$  的估算值较室内直剪试验值普遍偏小的一个原因。

下面的说明图 6.4.4—2 示出了固结不排水剪强度( $\tau_u$ )与有效固结压力的关系曲线,其中加荷曲线( $\overline{OA}$ )过原点,土是正常固结的(NC),卸荷曲线( $\overline{ABC}$ )则是超固结的(OC)。当  $OCR < 2$  时,若以  $\overline{ABD}$  取代  $\overline{ABC}$ ,便有  $(\Delta\tau_u)_{oc}/\Delta\sigma'_{vo} < (\Delta\tau_u)_{nc}/\Delta\sigma'_{vo}$ ,即  $\text{tg}\psi_2 < \text{tg}\psi_1$ 。由此可知,只要贯入阻力随深度线性递增,则用公式(6.2.4)估算轻度超固结土的  $\phi_{sk}$  值是偏于安全的。



3. 说明图 6.4.4—3 则示出了软土地基触探的  $p_s \sim D$  曲线。在软土层中,  $p_s$  值随深度(D)近于线性递增。将此曲线顺其回归直线(虚线)向上延长交横轴于  $p_{s0}$ , 则可以  $p_{s0}$  值按条文(6.4.3)公式算得一对应的  $\tau_{s0}$  值。此  $\tau_{s0}$  值, 可近似理解为该软土层的固结快剪粘聚力  $C_{sk}$ , 鉴于其是第二次的近似估计值, 故本规则未推荐使用。

**第 6.4.5 条** 大量资料表明, 砂土的  $p_s$  值与内摩擦角( $\phi$ )有良好的相关性, 不同类别的砂土其关系则不尽相同。铁道科学院(1988)对福建的石英砂和南京的片状砂所做的大量试验研究表明, 在同等密度条件下, 两种砂的峰值内摩擦角( $\phi_m$ )相近, 但残余内摩擦角( $\phi_r$ )石英砂低于片状砂  $3^\circ \sim 5^\circ$ , 且二者的体变特性有显著差别; Robertson & Campanella(1983 年)曾得到如说明图 6.4.5 所示的关系。由此说明, 用单一指标  $p_s$  (或  $q_c$ ) 推算  $\phi$  值存在诸多不定性。长沙铁道学院搜集了 44 组现场资料, 将其进行回归分析, 发现离散性较大, 可能与上述原因有关。

本条文是在现场试验资料的基础上, 结合室内大模型试验结果和国外使用经验, 并考虑了一定的安全储备而确定的。不难看出

本条文的表 6. 4. 5 所列数值,相当于说明图 6. 4. 5 的下限值。在应用本条文建议值时,宜参考地区经验值对比使用。

**第 6. 4. 6 条** 本条文划分砂土密实度的界限值系长沙铁道学院根据室内大模型试验和国内外研究成果及经验经综合分析后提出的。现补充说明如下:

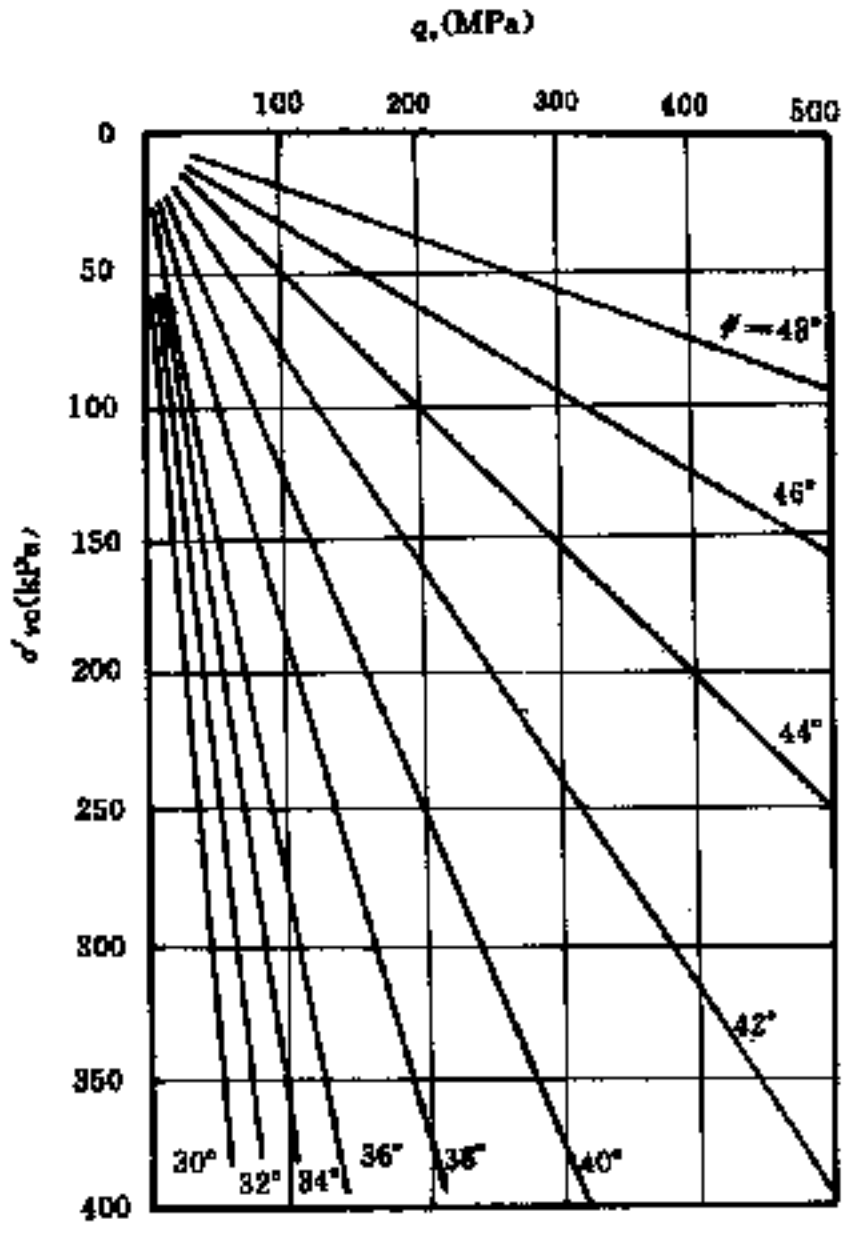
1. 贯入阻力( $p_s$  或  $q_c$ )受砂土压缩性(体变)的影响较之受强度( $\phi$ )的影响更为突出。铁道科学院和西南交大的模型试验表明,砂的体变特性与其级配、矿物成份、颗粒形状及侧向约束力( $\sigma_{HO}$ )有关;在等向压力下,特别在偏应力作用下,南京片状砂较福建石英砂有大得多的体变特性。故本条文所列数值表仅适用于石英砂。

2. 石英质砂土的  $p_s$  或  $q_c$  值,主要取决于密实度,颗粒大小和含水量等不起重要作用,因而本条文未对砂土按颗粒级配作进一步划分。

3. 通过在大模型中所作的 13 组对比试验,得到如下回归方程:

$$D_r = 0.2467 + 0.37 \log p_s \quad (\text{说明 6. 4. 6})$$

式中,  $D_r$  为相对密度,  $p_s$  单位为 MPa, 相关系数为 0. 928。



说明图 6. 4. 5 未胶结的石英砂的  $q_c \sim \phi_m \sim \sigma'_{vo}$  曲线

4. 同时搜集了现场对比试验资料 116 组,其中计青新线、塔里木盆地中砂 4 组、细砂 19 组、粉砂 32 组,九江长江大桥北岸细砂 42 组、粉砂 19 组。将上述数据使用了各种线型并分别按总体和分组回归分析,其相关性均很差( $r < 0.5$ )。除了现场测得的  $D_r$  值不够准确之外,还与上列第 1 项所述原因不无关系。

鉴此,对 116 组数据给予下表所列限制条件后,其回归分析结果表明相关性显著,且与室内模型试验结果相当接近。说明室内大模型试验能够反映现场情况。

说明表 8.4.8

限制条件	回归方程	频数 $N$	相关系数 $r$	标准差 $S$
$p_s \geq 14\text{MPa}$ , $D_r \geq 0.67$	$D_r = 0.351 + 0.349 \log p_s$	15	0.987	0.065
$p_s = 4 \sim 14\text{MPa}$ $D_r = 0.33 \sim 0.67$	$D_r = 0.393 + 0.39 \log p_s$	42	0.982	0.075

第 6.4.7 条 固结系数( $C$ )的基本定义为

$$C = k / (m \cdot \gamma_w) \quad (\text{说明 } 6.4.7-1)$$

式中  $k$ ——土的渗透系数;

$m$ ——土的体积压缩系数;

$\gamma_w$ ——地下水重度。

上式经变量变换可改写为

$$C = l^2 T / t \quad (\text{说明 } 6.4.7-2)$$

式中  $l$ ——排水距离或令定的排水距离,对一维固结情况,有  $l = H$  (单面排水)或  $l = H/2$  (双面排水),  $H$  为压缩层厚度;对二维或三维径向固结情况,可取  $l = r_0$  或  $l = r_m$ ,  $r_0$  和  $r_m$  分别为初始半径和极限半径;

$T$ ——土体固结的时间因数;

$t$ ——相应于  $T$  的固结历时。

朱小林、唐世栋(1986 年)利用傅里叶变换和解析开拓原理导得了孔压触探球对称固结问题的解析解,并推荐用下式估算土的



固结系数;

$$C=1.638r_0^2/t_{50} \quad (\text{说明 } 6.4.7-3)$$

式中  $r_0$  为探头半径,  $t_{50}$  为超孔压消散达 50% 时的历时, 系数 1.638 为固结度达 50% 的时间因数 ( $T_{50}$ )。

此式适用于各向同性土。对于如温州、宁波等地的厚层均质软土, 因其各向异性比不大, 使用该式可得到一个平均意义上的固结系数。

对于三角洲相、冲积相乃至湖相软土, 结构上常表现明显的各向异性特点; 且理论研究和工程实践表明, 水平固结系数在地基固结的全过程中更为重要。因而有必要推求轴对称固结问题的解答, 现陈述如下。

#### 一、轴对称扩散方程及其解

假定从探头停止贯入之时起, 施加于土体的总应力恒定, 且初值条件  $u(r, t=0) = f(r)$ ,  $f(r)$  为探头对土造成的超孔压沿水平径向的初始分布函数, 其依所选择的土模型而定, 如说明表 6.4.7—1。则可将轴对称扩散方程

$$C_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (A-1)$$

变换为贝塞尔方程

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial n^2} + \frac{1}{n} \frac{\partial u}{\partial n} \right) = \frac{\partial u}{\partial T} \quad (A-2)$$

式中  $u$ ——饱和土的超孔隙水压  $u = u(n, T)$ ;

$n$ ——向径比,  $n = r/r_m$ ;

$T$ ——时间因数  $T = C_h t / r_m^2$ ;

$C_h$ ——水平径向固结系数;

$t$ ——与  $T$  对应的固结(消散)历时;

$r_m$ ——满足  $u(n=1, T) = 0$  的极限半径, 相当于说明表 6.4.7—1 中扩孔课题塑性区的最大半径。大量试桩实测资料和模型试验表明: 当  $r_m \geq 60r_0$  时,  $u = 0$ ,  $r_0$  为桩或探头半径。

模型、材料	$f(r)$	分布形式
理想弹性—— 完全塑性体	$2\tau_0 \ln(r_m/r)$	圆柱形对数分布
考虑中主应力的 Henkel 理论	$\tau_0[0.816\alpha + 2\ln(r_m/r)]$	(同上)
应力路径法—— 修正的剑桥模型	$\frac{1+2K_0}{3}\gamma D - \frac{\tau_0}{\sin\phi} + 2\tau_0 \ln(r_m/r)$	(同上)
均质渗流体	$\Delta u_0 \cdot e^{-\lambda r}$	圆柱形负指数分布

注:  $\alpha$ ——Henkel 孔压参数,  $\alpha = \frac{\sqrt{2}}{2}(3A_r - 1)$ ;

$A_r$ ——Skempton 孔压系数;

$K_0$ ——土的静止侧压力系数;

$\gamma$ ——土的有效重度;

$D$ ——深度;

$\phi$ ——土的有效内摩擦角;

$\Delta u_0$ ——探头圆柱面处的初始超孔压  $\Delta u_0 = u(\alpha = \tau_0/m, T=0)$ ;

$\alpha$ ——经验指数,  $\alpha = \beta \cdot r_0/r_m$ ;

$\beta$ ——转换系数。

设  $u = R \cdot P$ ,  $R = R(r)$ ,  $P = P(T)$ , 可将(A—2)分离成

$$P' + \lambda^2 P = 0 \quad (A-3)$$

$$\text{和} \quad R'' + \frac{1}{r} R' + \lambda^2 R = 0 \quad (A-4)$$

其中(A—4)为变系数常微分方程, 可应用贝塞尔函数解法, 得

$$R = AJ_0(\lambda r) + BY_0(\lambda r)$$

式中  $J_0(\lambda r)$ ——零级贝塞尔函数,  $\lambda$  为任意正实数;

$Y_0(\lambda r)$ ——零级诺依曼函数。

因为  $u = RP$  在  $r=0$  处,  $u = \Delta u_0$  有界, 而  $Y_0(\lambda r)$  无界, 故必有  $B=0$ ,

$$\text{于是} \quad R = AJ_0(\lambda r) \quad (A-5)$$

$$\text{解(A—3)得} \quad P = C_0 \cdot e^{-\lambda^2 T} \quad (A-6)$$

合并(A—5)、(A—6)式得

$$u = C \cdot e^{-\lambda^2 T} \cdot J_0(\lambda r) \quad (A-7)$$

式中  $C = AC_0$  为任意正常数

根据边界条件,  $r=r_m$  即  $n=1$  时, 有  $u(a, r)=0$ , 知(A—7)必有

$$J_0(\lambda)=0 \quad (A-8)$$

解(A—8)得正根  $\lambda=\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots$  有无穷个, 取任意  $\lambda_i$  值, 都能满足(A—7), 且有一个  $C_i$  与之对应, 故无穷多个解的线性组合便是它的解:

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} C_i e^{-\lambda_i^2 T} \cdot J_0(\lambda_i n), i=1, 2, 3, \dots \quad (A-9)$$

由初值条件  $u(a, 0)=f(n)$  (见说明表 6.2.7—1) 知

$$f(n) = \sum_{i=1}^{\infty} C_i J_0(\lambda_i n) \quad \text{成立} \quad (A-9')$$

(A—9') 满足狄利克雷条件, 其在  $0 < n < 1$  区间内任意点处存在一个贝塞尔函数的级数展开, 且因  $\lambda_i$  是方程  $J_0(\lambda)=0$  的正根, 故有

$$C_i = \frac{2}{J_1^2(\lambda_i)} \int_0^1 n f(n) J_0(\lambda_i n) dn \quad (A-10)$$

将(A—10)代入(A—9), 便得贝塞尔方程的通解为:

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{2}{J_1^2(\lambda_i)} \int_0^1 n f(n) J_0(\lambda_i n) dn \right] e^{-\lambda_i^2 T} J_0(\lambda_i n) \right\} \quad (A-11)$$

它是一个级数式, 可使用逐项积分法求值。式中的  $J_1(\lambda)$  为一级贝塞尔函数。

作为一个算例, 令  $f(n) = \Delta u_0 e^{-\lambda n}$  代入(A—11), 得

$$u = \Delta u_0 e^{\sigma} \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{2}{J_1^2(\lambda_i)} \int_0^1 n e^{-\lambda n} J_0(\lambda_i n) dn \right] e^{-\lambda_i^2 T} J_0(\lambda_i n) \right\}$$

对于  $T=0$  的初始条件, 由上式可得

$$u_{(so)} = \Delta u_0 e^{\alpha} \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{2}{J_1^2(\lambda_i)} \int_0^1 n e^{-\lambda_i n} J_0(\lambda_i n) dn \right] J_0(\lambda_i n) \right\} = f(n)$$

比较上述的初始分布函数  $f(n)$  知

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{2}{J_1^2(\lambda_i)} \int_0^1 n e^{-\lambda_i n} J_0(\lambda_i n) dn \right] J_0(\lambda_i n) \right\} = e^{-\alpha}$$

绝对收敛。

## 二、轴对称固结问题的数值解

使用(A—11)可求得二维径向非稳定流的精确解答,但计算量颇大。对于此类问题,应用数值方法可足够准确地得到它的近似解。其差分方程如下:

$$\dot{U}_j^{k+1} = \dot{U}_j^k + \frac{1}{R} \cdot \frac{\tau}{h} (\dot{U}_{j+1}^k - \dot{U}_j^k) + \frac{\tau}{h^2} (\dot{U}_{j+1}^k - 2\dot{U}_j^k + \dot{U}_{j-1}^k)$$

$$(K=0, 1, 2, \dots, j=1, 2, 3, \dots) \quad (B-1)$$

式中  $\dot{U}$ ——归一化超孔压比,  $\dot{U} = \Delta u / \Delta u_0$ , 同条文中  $\bar{U}$ ;

$\Delta u$ ——土体中的超孔压  $\Delta u = \Delta u(R, T)$ ;

$\Delta u_0 = \Delta u(R=1, T=0)$ , 即探头圆柱面处的初始超孔压;

$R$ ——向径比,  $R = r/r_0$ ;

$\tau$ ——时间因数( $T$ )的步长;

$h$ ——向径比( $R$ )的步长;

$\dot{U}_j^0$ ——初始分布条件, 对于

### a. Henkel 半经验对数分布

$$\text{在塑性区内 } \dot{U}_j^0 = \frac{0.816\alpha_t + 2\ln R}{0.816\alpha_t + \ln I_c} \quad (B-2)$$

$$\text{在塑性区外 } \dot{U}_j^0 = \frac{0.816\alpha_t \cdot R^2}{0.816\alpha_t + \ln I_c} \quad (B-3)$$

### b. 经验的负指数分布

$$\dot{U}_j^0 = e^{-\alpha(R-1)} \quad (B-4)$$

式中  $\alpha$  为经验指数。

根据初始条件,反复利用(B—1)式计算,可逐点算出任意时刻(时间因数)的归一化超孔压比,如说明表 6.2.7—2 所列。条文中表 6.2.7—1 及表 6.2.7—2 即据本说明表数值而定出的,该表数值满足定义式

$$(C_h)_e = \gamma_0^2 \frac{T}{t} \quad (B-5)$$

式中  $(C_h)_e$  为卸荷条件下的水平固结系数,其它符号同前。

### 三、与室内试验结果的比较及实践检验情况

经与六个工点数十个土样室内试验结果及两处工程实测沉降结果对比的情况如下:

#### (一)探头初始超孔压( $\Delta u_0$ )的预计值

若以角标 s、c 分别代表球形扩孔模型(说明表 6.4.7—1 未列出)和园柱形扩孔模型,将室内试验得到的土参数( $A_r$ 、 $I_r$  等)代入超孔压初始分布函数中,可求得相应的 $(\Delta u_0)_s$  和 $(\Delta u_0)_c$  值,令  $u = \Delta u_0 + u_w$  ( $u_w$  为静水压力),则与探头的贯入实测值有下列关系:

1.  $u_s/u_c = 1.17$ , 与在正常固结粘性土中贯入时所得经验值  $u_d/u_T \approx 1.25$  接近, 即有

$$u_s/u_c \approx u_d/u_T \text{ 或 } u_c/u_T \approx u_s/u_d$$

说明表 8.4.7—2

分布	$A_r$	$\frac{U\%}{\frac{T}{I_r}}$	10	30	50	70	90
对数	1/3	10	0.150	0.534	1.145	2.411	8.421
		50	0.262	1.014	2.487	6.013	25.776
		100	0.314	1.312	3.524	9.725	43.571
		200	0.368	1.643	5.025	15.936	75.218
	2/3	10	0.189	0.703	1.593	3.832	19.318
		50	0.305	1.263	3.346	9.637	54.560
		100	0.359	1.579	4.761	15.379	90.808
		200	0.415	1.969	6.838	25.288	151.218
	1	10	0.230	0.873	2.095	5.439	29.227
		50	0.350	1.514	4.504	14.551	88.070
		100	0.406	1.906	6.447	23.613	146.473
		200	0.464	2.405	9.292	37.696	231.984
	4/3	10	0.270	1.053	2.622	6.890	37.611
		50	0.396	1.838	5.931	19.801	122.765
		100	0.455	2.321	8.629	32.394	194.039
		200	0.514	2.861	12.790	53.198	286.720
负指数	$\alpha=0.15$		0.623	3.237	10.863	35.432	186.526
	0.20		0.472	2.206	6.720	21.332	113.833
	0.25		0.386	1.682	4.804	14.572	73.992
	0.30		0.332	1.385	3.746	11.017	54.930
	0.35		0.294	1.198	3.063	8.586	42.629
	0.40		0.267	1.054	2.665	7.087	34.779

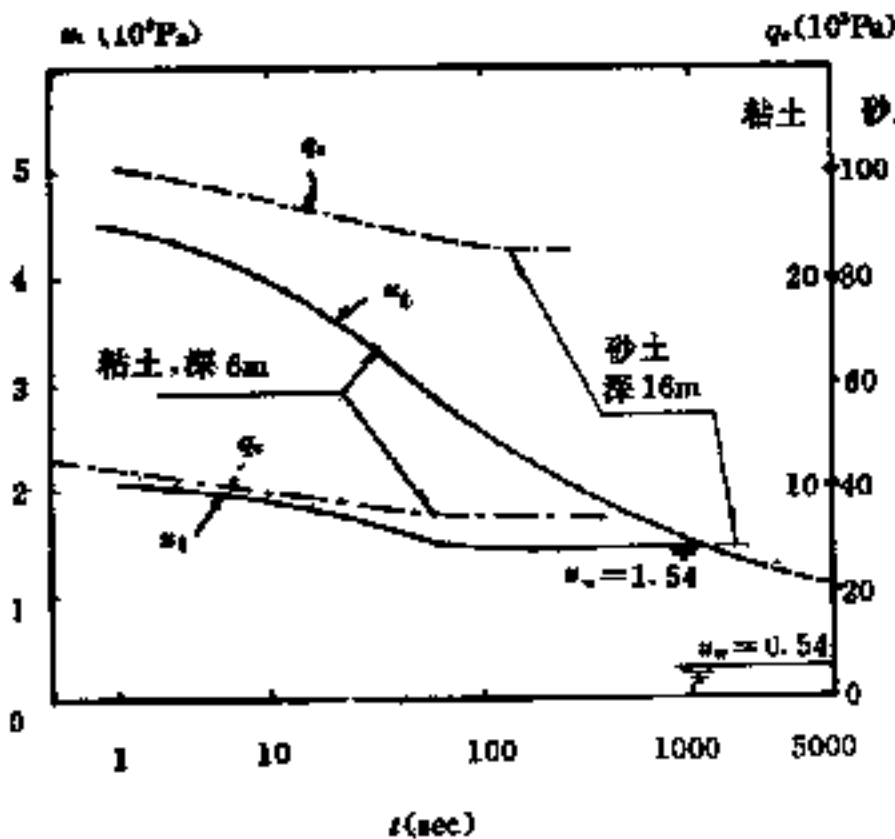
注:  $U$ ——以孔隙压力为定义的固结度,  $U=1-\dot{U}$

2. 以半经验的 Henkel 理论算得的  $u_s$  (或  $u_c$ ) 仅及实测值  $u_d$  (或  $u_r$ ) 的 0.6 倍左右, 即理论值普遍小于实测值。说明理论与实际尚存在种种差别, 但并不甚影响对固结系数的估计。

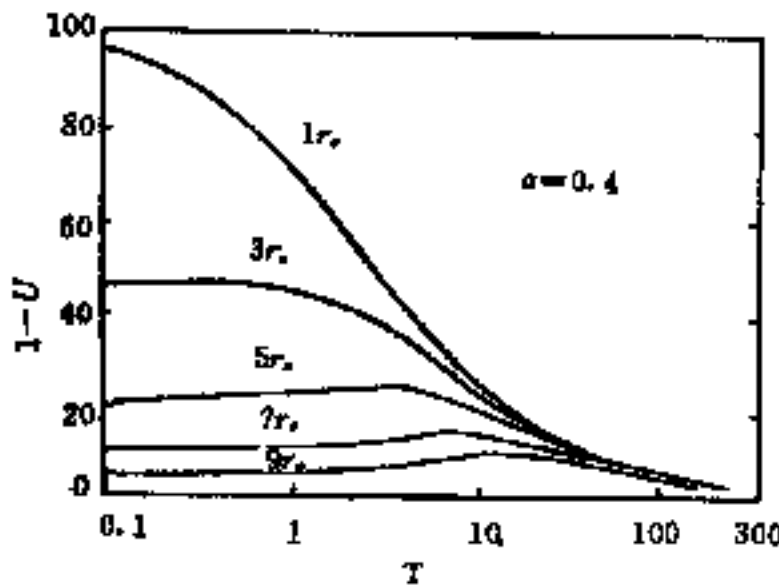
(二) 当  $N$  取 1 时, 按条文公式 (6.4.7) 计算的实测消散曲线与理论固结曲线往往存在一个“剪刀差”, 两线规定在  $U=50\%$  处相交, 随与交点的距离加大, 分歧变大。

(三) 用式 (6.4.7) 计得的  $C_h$  值为室内试验值的 1.3~9.5 倍 (对数分布) 和 1.1~6.4 倍 (负指数分布), 平均为 3.6 和 2.8 倍。

(四)与一处试验堤和一幢住宅楼的实测沉降反算结果相比较,用触探孔压消散试验估算的固结系数较室内固结试验结果更接近于工程实际。



说明图 6.4.7—1  $u_t, q_c$  实测历时曲线(武昌杨园)



说明图 6.4.7—2 探头径向超孔压与时间的关系

以内的土体,超孔压随时间单调减小,而  $3r_0$  以外土体,超孔压在初始阶段反而有上升迹象,并随距离的加大,延滞时间加长。说明在  $3r_0$  以内土体又受到一个向心的挤压作用。

#### 四、问题与处理办法

##### (一) $C_h$ 值的取值方法

##### 1. 触探孔压消散过程的卸荷与再加荷条件

前列的说明图 5.2.2 事实上给出了探头周围土体在抵抗贯入时所形成的孔隙应力场核部。可以看出,相对于锥面而言,锥尾及其上圆柱面部位处于卸荷状态;说明图 6.4.7—1 是在 6m (软塑粘土) 和 16m (中密砂土) 两个深度测记的孔隙水压力 ( $u_t$ ) 和锥尖阻力 ( $q_c$ ) 随时间变化的过程曲线,直接揭示了孔压消散过程中的卸荷条件;说明

图 6.4.7—2 反映出  $3r_0$  以

但公式(A—11)或(B—5)均假定附加荷载为常量的条件而导得的,这与上述情况不符。为此,根据相似性原理,可援引压缩试验的再压(回弹)指数( $C_e$ )与压缩指数( $C_c$ )之比  $N(=C_e/C_c)$  对(B—5)中的( $C_h$ )<sub>e</sub> 予以修正,即

$$C_h = N r_0^2 T / t \quad (B-6)$$

用作在恒载条件下土体水平固结系数的估计值。根据7个软土工点的试验统计结果来看,比值  $N$  在  $1/4 \sim 1/10$  间,与土质状态有关,对于软土,大多集中在  $1/6$  左右。

## 2. $C_h$ 的期望值

(B—6)式是基于实测消散曲线与理论固结曲线处处吻合的期望之上的。实际上,探头停止贯入瞬间的初始孔压读数误差,会影响其前期消散过程曲线;而土的起始水力梯度造成了静水压力取值误差,又影响后期消散速度。为不致偏颇,可取固结度达50%时的  $T_{50}$  和  $t_{50}$  计算  $C_h$  值,遂成本条文的公式(6.4.7)。

## (二)土参数的可变性

由饱和土的下列定义式

$$C = k / (m \cdot \gamma_w)$$

$$I_r = E_a / 3\alpha_a$$

$$A_r = \Delta u / \Delta \sigma$$

可知:

1. 土的固结过程有别于渗流过程,前者伴随着土的渗透系数( $k$ )和体积压缩系数( $m$ )的改变,在整个固结过程中,固结系数( $C$ )本不是个常量;

2. 不排水杨氏模量( $E_a$ )是一个与应力水平有关的参数;而孔隙压力系数( $A_r$ )在土质一定时,它是个状态参数。在前述探头停止贯入后表现的卸荷~再加荷条件下,围绕探头的每一圈环状土体将各循其不同的应力路径,因而,控制固结过程的  $C_h$  和  $I_r$  也不可能是个统一的常数。

兼因(A—1)或(B—1)式基于单向固结理论,即假定流线是辐射状的,与探头附近实际孔隙水流的二维性质不大一样;再加上探



头本身边界条件和土质加工特性的复杂性,便决定了用孔压触探精确求取  $C_h$  值的困难性。与其说公式(6.4.7)是计算式,毋宁说是一种有根据的推测。故在目前使用这项技术时,应配合取样做室内试验,藉以确定符合工程实际的合理数值;更应注意结合工程实测沉降,积累实践经验。

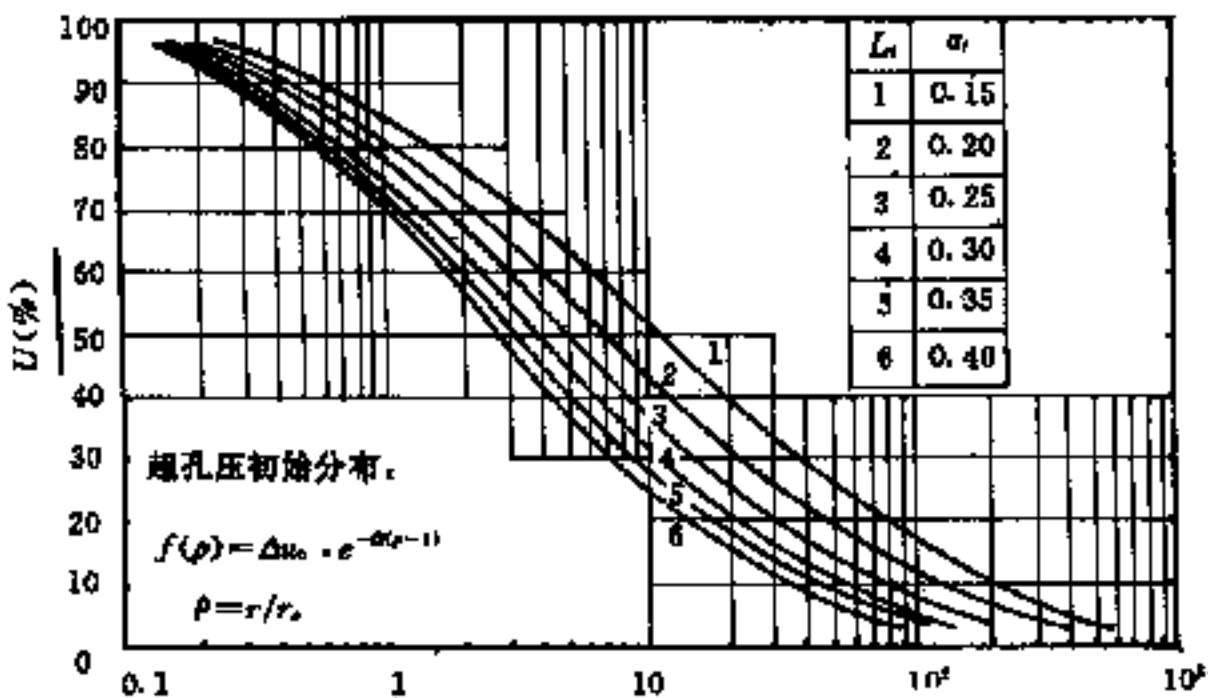
(三)( $C_h$ )<sub>e</sub> 的最佳取值——曲线拟合法

为对整个消散曲线求得一个最贴近理论解的( $C_h$ )<sub>e</sub> 值,推荐使用下面的曲线拟合法,其步骤如下:

1. 制做理论消散曲线“量板”

在给定初、边值条件下,根据(B—1)或(A—11)可计算出探头表面任意时刻的归一化超孔压比( $\dot{U}$ )和时间因数( $T$ ),如说明表 6.4.7—2 所列。据此可在标准的半对数坐标纸上,精细地绘制出一簇  $\dot{U} \sim \log T$  曲线,称之为“量板”。作为示例,说明图 6.4.7—3 给出了  $\alpha$  在 0.15~0.4 的几条理论曲线。

这簇曲线中的任意一条(以  $L_i$  表示)都对应于一组特定的参数( $\alpha_i$  或  $A_{\Sigma}, I_{\alpha}$ ),在曲线上  $\dot{U} = 50\%$  处,其对应的时间因数为  $(T_{50}, T_{i,50})_{i\alpha}$ 。



说明图 6.4.7—3 归一化超孔压理论消散曲线

2. 根据经修正处理的触探孔压消散值,按第 5.3.2 条要求点

绘实测的归一化超孔压消散曲线 ( $\dot{U} \sim \log t$ ), 并在其上查取  $\dot{U} = 50\%$  时的消散历时  $t_{50}$ 。

3. 将  $(T_{50})_i$ 、 $t_{50}$  和探头半径  $r_0$  值代入 (B—5), 算得  $(C_h)_i$ , 此值作为常数对应于土参数 ( $\alpha_i$  或  $A_{\text{H}}, I_{\alpha}$ )。

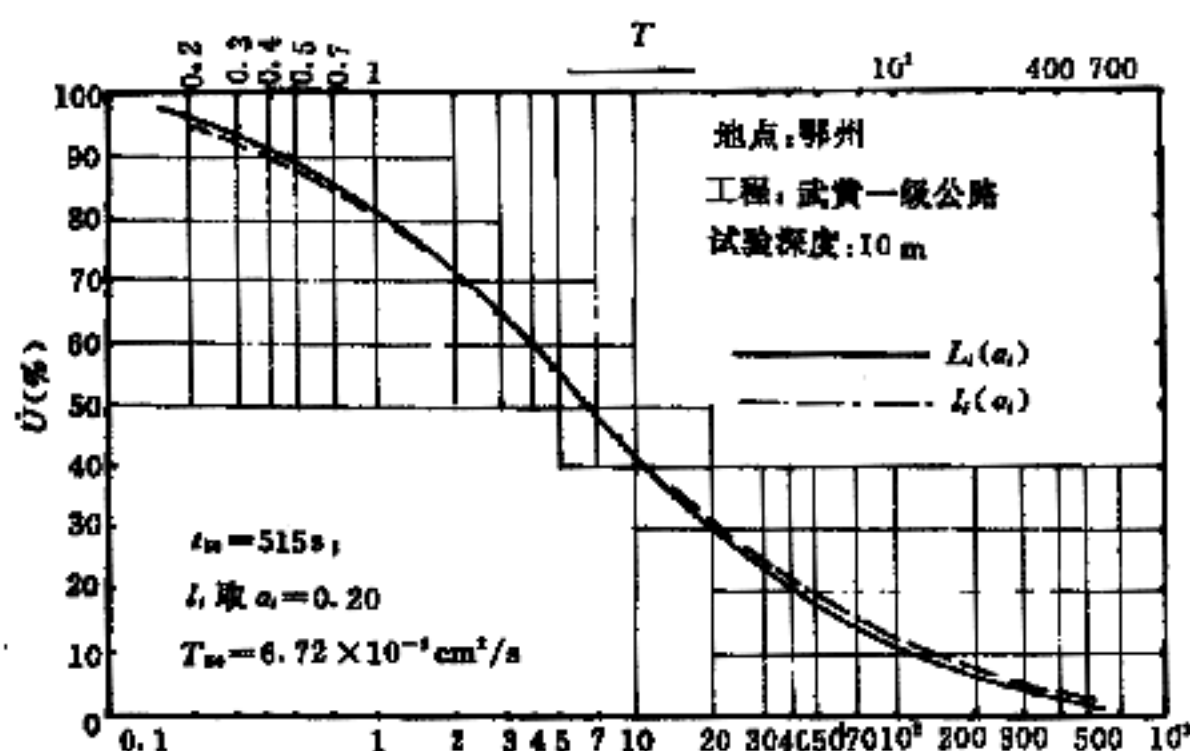
4. 在实测的  $\dot{U} \sim \log t$  曲线上, 查取对应于任意  $\dot{U}_j$  的  $t_j$  值, 再代回式 (B—5) 中, 求得对应于  $t_j$  的时间因数  $(T_j)_i$  值, 然后将所得数组  $\{(T_j)_i, U_j\}$ , 按同等比例尺在透明的半对数坐标纸上, 点绘实测固结曲线  $(\dot{U}_j, T_j)_i$ , 用符号  $i$  表征, 如说明图 6.4.7—4。

5. 在  $l_i$  与  $L_i$  两两相应的曲线群中, 必有一对曲线 ( $l_{i=p}, L_{i=p}$ ) 相互拟合最佳, 此对曲线便是我们所要寻找的。然后根据下式

$$(C_h)_e = r_0^2 (T_{50})_p / t_{50} \quad (S6.4.7-4)$$

即可得到试验点处土层的最佳  $(C_h)_e$  及  $C_h$  值。式中的  $(T_{50})_p$  系第  $P$  条理论固结曲线上的  $T_{50}$  值。

上述曲线拟合方法也可以改用求各对曲线之间均方根误差 ( $S'_0$  或  $S_T$ ) 的方法, 当  $S'_0$  (或  $S_T$ ) 为最小时, 即为所欲求的最佳曲线。



说明图 6.4.7—4 据实测归一化超孔消散曲线点绘的  $\dot{U} \sim T$  曲线

**第 6.5.1 条** 地基承载力通指地基的极限承载力、容许承载

力(和/或)基本承载力,其定义各家略有不同。本条所指的地基基本承载力( $\alpha_0$ )符合《铁路工程地质技术规范》(TBJ12—85)的规定。

我国地域广袤,地质条件不一。目前,用静力触探确定地基承载力的经验公式颇多,这些公式适用于不同地区和不同土层,并经工程实践验证是行之有效的。故本规则第1.0.3条建议,在有使用静力触探经验的地区,可采用当地的经验公式;同时,随着静力触探技术的广泛应用与发展,应进一步在不同地区分别建立适用于本地区的公式或用平板或螺旋板载荷试验,验证已有的公式。

铁路工程地质勘测的特点是路线长、工点分散,若所到之处都建立经验公式是困难的。故《暂规》列入了三个适应性较广的经验公式,分别用于计算粘性土和砂性土的基本承载力,经多年实践证明是适宜的。此次修订,增加了计算软土及新黄土基本承载力公式。现说明于后。

#### 一、资料数量、分布地区及 $\alpha_0$ 的取值标准

我们搜集了全国各地不同土类的平板荷载试验与静力触探试验(包括室内土工试验)共 609 组数据资料,其数量分布地区见说明表 6.5.1—1;统计变量的取值标准分如下几种情况;

##### (一)一般粘性土及砂性土 $\alpha_0$ 和 $p_s$ 的取值

多年实践证明,原《暂规》的三个承载力公式在一般粘性土和砂土中应用是有效的,其取值标准如下:

1. 当  $p_s \leq 3000\text{kPa}$  时,取  $\alpha_0 = p_{0.02}$ ,  $p_{0.02}$  为压板相对下沉  $s/d = 0.02$  时所对应的压力,  $s$  为压板下沉量,  $d$  为压板直径或边长;

2. 当  $p_s > 3000\text{kPa}$  时,取  $\alpha_0 = p_1$ ,  $p_1$  为荷载试验的比例界限(拐点)压力。此时,砂性土沉降已在施工期间基本完成,  $p-s$  曲线拐点比较明显,而  $p_s$  则取压板影响深度范围内的算术平均值,为试验单位所提供。

##### (二)软土 $\alpha_0$ 及 $p_s$ 的取值

软土地基承载力应根据工程建筑特点兼顾地基的稳定性和变形两方面要求,为不失其一般性,对数据取值作了下列规定:

1. 一般按极限荷载( $p_u$ )除以安全系数( $K=2$ )确定为基本承

承载力,即  $\alpha_0 = p_a/2$ ;

2. 对少数工点的软土荷载试验曲线有明显拐点时,则取拐点压力为基本承载力,即  $\alpha_0 = p_a$ ;

3. 个别软土工点受沉降控制,则取  $\alpha_0 = p_{0.02}$ ,其安全系数  $K \geq 2$ ,最大为  $K_{\max} = 2.4$ ;

4. 对未达破坏的荷载试验曲线,且又无明显拐点时,通过绘制  $\lg P \sim \lg S$ 、 $P \sim \lg S$ 、 $P \sim \Delta S/\Delta P$  等曲线,找出曲线斜率明显变化点,并在考虑变形要求的条件下确定  $\alpha_0$  值。

$p_a$  值则通取压板下  $2d$  深度范围内按附加应力系数为权的加权平均值  $p_a$ ,然后再取围绕该试验点所有触探孔(一般为  $2 \sim 4$  孔)的  $p_a$  的算术平均值,与  $\alpha_0$  组成一组统计变量。

由此确定的  $\alpha_0$ ,其对应的沉降一般在  $0.01d \sim 0.02d$  间,对于软粘土,  $S/d = 0.015 \sim 0.02$ ;对于软砂粘土,  $S/d = 0.01 \sim 0.015$ 。

### (三)新近沉积土和新黄土 $\alpha_0$ 及 $p_a$ 取值

以往的研究资料表明,在物理性指标或贯入阻力相同时,新近沉积粘性土和新黄土的基本承载力、变形指标及内聚力等工程性质均不及一般粘性土。因此,在承载力取值上,通取  $\alpha_0 = p_a$ ;当  $p_a$  在曲线上表现不明显时,则取  $\alpha_0 = p_a/2$  或  $\alpha_0 = p_{0.06}/2$ ,  $p_{0.06}$  为  $S/d = 0.06$  时的荷载。由此确定的  $\alpha_0$ ,其对应的  $S/d$  平均值接近  $0.01$ ,一般均能满足强度和变形的双重要求。

$p_a$  值一般取压板下  $2d$  深度范围内的触探贯入阻力平均值;当触探曲线随深度波动不大时,取算术平均值;当曲线起伏较大时,按附加应力系数取加权平均值;新黄土由于土质均匀,取值深度扩至  $3d$ 。

# 荷载试验数量及其分布地区

说明表 8.5.1—1

序	土 类	时代	对比试验组数	主要分布地区
1	老粘性土	$Q_1 \sim Q_3$	30	武汉下蜀土
2	$I_p > 10$ 的一般粘性土	$Q_4$	69	鄂、沪、宁、广、滇等省市
3	砂性土		粉细砂:〈水上 37, 水下 20〉, 中粗砂: 39	各地区
4	软土	$Q_4$	$p_s < 800 \text{ kPa}$ : 41 $p_s < 1400 \text{ kPa}$ : 65	鄂、穗、深、沪、宁、苏、连云港、青、晋等省市
5	$I_p > 10$ 的新近沉积粘性土	$Q_4$	29	西北内陆盆地、黄河下游及北京地区
6	黄土	$Q_1 \sim Q_4$	新黄土( $Q_3, Q_4$ ): 228 老黄土( $Q_1, Q_2$ ): 19	黄河流域的青~鲁一带
7	粘性土( $I_p \leq 10$ )	$Q_4, Q_3$	73	西北内陆盆地、黄河下游等地区

## 二、基本承载力的静力触探经验公式

通过多种方式的统计分析,最后得到说明表 6.5.1—2 所列的回归公式。

说明表 8.5.1—2

序	土 类	公式: $\sigma_0 = f(p_s)$ (kPa)	频数 $N$	相关系数 或指数 $r$	标准差 $S(\text{kPa})$	$p_s$ 范围 (kPa)
1	一般粘性土( $I_p > 10$ )	$5.8 \sqrt{p_s} - 46$	43	0.92	26	350~5000
2	$I_p \leq 10$ 的一般粘性土及饱和砂土	$16.2(p_s/100)^{0.83} + 14.4$	60	0.945	31.6	$\leq 24000$
3	软土	$0.112p_s + 5$	41	0.85	16.7	85~900

续说明表 6.5.1—2

序	土 类	公式: $\sigma_0=f(p_s)$ (kPa)	频数 $N$	相关系数 或指数 $r$	标准差 $S$ (kPa)	$p_s$ 范围 (kPa)
4—1	新 近	$I_p > 10$	29	0.924	31.4	500~6000
4—2	沉积土	$I_p \leq 10$	73	0.849	31	500~10000
5—1	新	东南带	104	0.86	32	500~5000
5—2	黄	西北带	79	0.82	29	1000~5500
5—3	土	北部边缘带	32	0.87	33	1000~6500

本规则的承载力表 6.5.1,便是根据上表而制订的,制订时作了如下的归并与取舍:

(一)粘性土基本承载力经验公式

我国用静力触探确定地基承载力公式大致可分为三类,如说明表 6.5.1—3 所列。

说明表 6.5.1—3

类型	公式的提出单位	经验公式 $\sigma_0=f(p_s)$ (kPa)	适用条件与 $p_s$ 范围值(kPa)
高 值 线	武汉联合试验组	$0.1043p_s + 26.89$	$p_s = 300 \sim 6000$ 的粘性土
	广东航运规划设计院	$0.103p_s + 27$	淤泥质土及一般粘性土
		$0.14p_s - 236$	$p_s > 6000$ 的硬粘性土
	交通部第三航务 工程勘察设计院	$0.1p_s + 25.2$	$p_s = 500 \sim 2500$ 长江三角洲 土
	兖州煤矿设计院	$0.1012p_s + 58.8$	$p_s = 350 \sim 3000$ 的淮北粘性 土
	郑州局武汉设计院	$0.088p_s + 39.3$	武汉地区粘性土
	江苏省建筑设计院	$0.084p_s + 25$	$p_s = 350 \sim 5700$ 南京粘性土
	青岛城建局	$0.074p_s + 82.4$	$p_s = 1000 \sim 5000$ 青岛粘性 土
	连云港规划建筑设计院	$0.0807p_s + 49$	滨海软土

续说明表 0.5.1—3

类型	公式的提出单位	经验公式 $\alpha_0=f(p_s)(\text{kPa})$	适用条件与 $p_s$ 范围值(kPa)
中 值 线	铁三院《暂规》	$5.8 \sqrt{p_s} - 46$	$I_p > 7$ 的一般粘性土
	铁二院	$6 \sqrt{p_s} - 44$	一般粘性土
	铁一院	$5.8 \sqrt{p_s} - 70$	$p_s = 500 \sim 6000$ 一般粘性土
	东北电力设计院	$5.8 \sqrt{p_s} - 31$	$p_s = 800 \sim 4500, I_p > 7$ 的粘性土
	大庆设计院	$0.06p_s + 89$	
	四川省综合勘察院	$\frac{2.49 \log(p_s/100) - 91.2}{1}$	$p_s = 600 \sim 4000$ 一般粘性土
	原建工部综合勘察院	$0.05p_s + 72.6$	$p_s = 1500 \sim 6000$ 一般第四纪土
低 值 线	铁四院	$0.112p_s + 5$	$p_s = 85 \sim 900$ 的软土
	原北京地形地质勘测处	$1.148 \log(p_s/100) + 9.8$	$p_s = 600 \sim 7000$ 粘性土
		$0.0173p_s + 159$	$p_s = 1500 \sim 15000$ 粘性土及砂土
	交通部第一航务工程勘察设计院	$p_s^{0.46}/2.13$	$p_s \leq 5000$ 一般粘性土
	天津建筑设计院	$0.479p_s^{0.387}$	$p_s = 240 \sim 3550$ 一般粘性土

第一类为高值线,以武汉联合小组公式为代表,统计中包括了老粘性土,已列入我国《工业与民用建筑工程地质勘察规范》TJ21—77 规范。所谓老粘性土系指第四纪晚更新世(Q<sub>3</sub>)及其以前沉积的粘性土。本规则建议老粘性土  $\alpha_0$  为比贯入阻力( $p_s$ )的十分之一,是由于考虑了一定的安全储备而采用的较低值;当老粘性土的  $p_s < 2700\text{kPa}$  时,宜按一般粘性土看待。

第二类为中值线,以铁三院公式为代表,已列入《暂规》之中,多年来实践证明对一般粘土和砂粘土是适用的(详见铁三院:“静力触探估算天然地基承载力验证报告”1983 年)根据铁一院对所搜集的百余份一般粘性土试验资料的分析结论,同时考虑到与(GBJ111—87)规范的一致性,本次修订时,将塑性指数的划分界限由  $I_p > 7$  改为  $I_p > 10$ ,并将该式的使用下限定为  $(p_s)_{\min} = 800\text{kPa}$ ;而上限参考了铁一院公式,扩至  $(p_s)_{\max} = 6000\text{kPa}$ ;  $p_s \leq 800\text{kPa}$  的粘性土则按软土对待。这样便造成了在  $p_s = 800\text{kPa}$  时,

一般粘性土与软土基本承载力约有 **23kPa** 的人为间断。在这种情况下,就需要从事该项工作的勘测者,根据工点的工程地质条件结合工程建筑特点与要求以及本人的实践经验予以酌定。可以这样认为:软土一般属低结构性强度的粘性土,一般粘性土则往往表现出较明显的结构性强度。而结构性强度常可用固结不排水剪或固结快剪强度参数  $C_{cu}$  来表征;当基本承载力差值  $\Delta(\sigma_0)=23kPa$  时,结构性强度差  $(\Delta C_{cu})_{min}=(1/2\sim 1/3)\Delta(\sigma_0)=11.5\sim 7.7kPa$ ,此差值与我们以往的实践经验是一致的,这里所言的一般粘性土,是指第四纪全新世沉积的粘性土,但不包括新近沉积的粘性土。

第三类为低值线。这类公式有的包含轻亚粘土 ( $I_p\leq 10$  的粘性土),有的适用于饱和砂土。其中的软土已超出一般粘性土范畴,将其列入说明表 6.5.1—3 中,便于在数值上作出比较。曾对  $p_s<1400kPa$ 、 $I_p>10$  的粘性土作过多种值域的统计,最后选定说明表 6.5.1—2 中的(3)式并限定其上限值  $(p_s)_{max}=800kPa$ ,作为推荐公式列入本规则。它同时兼顾了强度与变形两方面的要求;当其用于条形基础时,宜结合建筑物对地基的具体要求,进行变形检算。

(二)砂性土的基本承载力经验公式

我国有关轻亚粘土和砂类土的触探承载力公式概如说明表 6.5.1—4。

说明表 6.5.1—4

序	公式提出单位	经验公式 [R]或 $\sigma_0=f(p_s)$ (kPa)	$P_s$ 值域 (kPa)	适用地区
1	铁三院《暂规》	$16.2(p_s/100)^{0.63}+14.4$	$\leq 24000$	全路
2—1	建委	中粗砂: $23.81(p_s/100)^{0.64}-12$	1000~12000	全国
2—2		粉细砂: $0.0197p_s+65.6$	5000~16000	
3	铁四院	砂土: $p_s/30$	$\leq 15000$	长江中下游地区
4	河南省建筑设计院	轻亚粘土: $150\lg(p_s/100)-54.4$	300~4000	河南省
5	郑州铁路局设计院	轻亚粘土及砂,含姜石: $176\lg(p_s/100)-23$	$\leq 20000$	东陇海线及黄泛区
6	武汉冶金勘察研究院	粉细砂: $0.02p_s+50$	$\geq 5000$	长江中下游地区



续说明表 8.5.1—4

序	公式提出单位	经验公式 [R]或 $\sigma_0=f(p_s)$ (kPa)	$p_s$ 值域 (kPa)	适用地区
7	原轻工部第二设计院	滨海轻亚粘土: $0.01p_s+150$	2200~16000	
8	铁三院	粘砂土及砂土: $5.8\sqrt{p_s}-46$ (水下减半)	$\leq 20000$	
9—1	铁一院	中粗砂: $36.8(p_s/100)^{0.482}$	1000~ 20000	为配合本次修 订“规则”,所 作统计分析结 果
9—2		粉细砂: $1.14p_s^{0.686}$	500~ 20000	
9—3		轻亚粘土、粉细砂: $2.5\sqrt{p_s}-21$	$\leq 3500$	西北内陆盆地

表中的(1)式即《暂规》采用公式,它居表内诸式之中位,亦为铁一院最近分别对中粗砂和粉细砂所作的统计分析结果所证实。考虑到静力触探不能区分砂土亚类这一事实,故本规则仍推荐使用原《暂规》采用公式。该式将粉砂、细砂、中砂、粗砂及  $I_p \leq 10$  的粘性土划为一大类,是因为所获得的  $p_s \sim \sigma_0$  关系相近,认为影响砂类土强度的主要因素是密度,砂粒的粗细与强度的关系不甚明显。

砂土承载力公式,统计采用的数据多为地下水位以下的试验资料,少量水上砂土荷载试验资料在确定容许承载力时均减半纳入统计。因而,对于地下水位以上的砂,使用该式确定的  $\sigma_0$  应有所增加。增加的具体数值目前尚无统一意见,为安全起见,根据工程特点与要求,酌取 25~50% 的提高数。

### (三)新近沉积土和新黄土基本承载力经验公式

1. 说明表 6.5.1—5 列出了新近沉积土的各种经验公式,从中可以看出,彼此数值相近,推荐式按  $I_p=10$  划界更符合实际。且  $I_p \leq 10$  的新近沉积土与  $I_p \leq 10$  的一般粘性土基本承载力数值也相近,因而在本次修订时,将二者合并于同一个基本承载力数值表中。

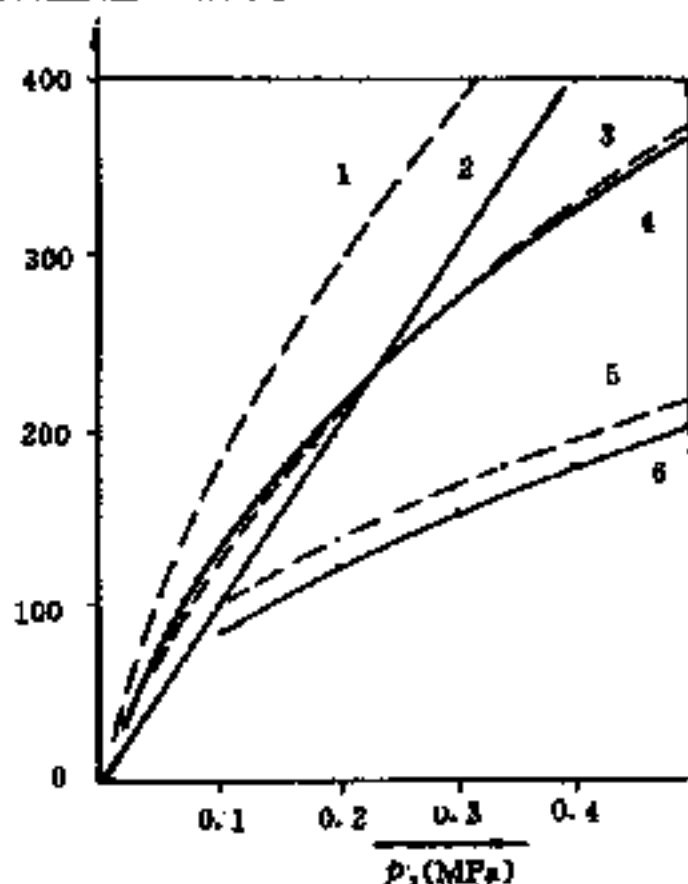
表说明 6.5.1—5

序	编制单位	经验公式 $\sigma_0=f(p_s)$ (kPa)	适用条件
1	铁 — 院	$I_p > 10; 1.4817 p_s^{0.602}$	本规则推荐式
2		$I_p \leq 10; 0.9993 p_s^{0.629}$	并入说明表 6.5.1—2 的公式(2)中
3		$3.3 \sqrt{p_s} - 15$	西北内陆盆地
4		$p_s / (5.69 + 0.00403 p_s)$	新荷线、德东线
5	原北京地勘处	$130.3 + 0.012 p_s$	北京
6	河南省建研院	$28.3(p_s/100)^{0.624}$	郑州~开封

2. 说明表 6.5.1—6 列出了新黄土三带推荐式与其它经验公式。此三带所辖地区系参照《湿陷性黄土地区建筑规范》(TJ25—90)附录一中的七个工程地质分区,结合  $\sigma_0 \sim p_s$  的统计分析结果进行了适当归并。可以看出三个分带推荐式基本上反映新黄土的地区差异性,使用甚为方便。而老黄土的统计结果与东南带新黄土公式相同,因样本数仅 19 组,本规则未予推荐使用。

#### (四)基本承载力经验公式的某些验证情况

1. 为了验证前述几个公式的可靠性,1983 年铁一院和铁三院组成联合小组,搜集了北京、武汉、上海、南京、河南、新疆、青海、广东、陕西等省市 277 组荷载试验与静力触探对比资料,进行统计分析,得到说明表 6.5.1—7 所列的(1)、(3)、(5)式,与本规则所采用的(2)、(4)、(6)式进行比较,结果如说明图 6.5.1 所示。可以看出本规则采用《暂规》的三个公式是可靠的。

说明图 6.3.  $100 \sim p_s$  曲线比较

说明表 0.5.1—6

序	分带	编制单位	公式 $\sigma_0=f(p_s)$ (kPa)	频数 $N$	相关系数 $r$	标准差 $s$ (kPa)	适用条件
1	东	铁一院	$0.05p_s+65$	104	0.86	32	规则推荐式
2			$0.064p_s+29$	27	0.98	27.1	侯月线
3			$0.04p_s+75$	76	0.88	21.4	关中、山东
4	南	铁二院	$0.072p_s+42$	11	—	—	山东
5	带	陕西省综合勘察院	$0.07p_s+51$	30	0.676	54	关中、郑州
6		原一机部勘察公司	$0.08p_s+31$	25	0.85	—	关中
7		原四机部勘察公司	$0.04p_s+68$	—	—	—	关中
8		西安冶金勘察公司	$0.032p_s+93$	—	—	—	关中
9	西北带	铁一院	$0.05p_s+35$	79	0.82	29	规则推荐式
10			$0.043p_s+19$	39	0.94	19	兰州
11			$0.049p_s+34$	6	0.94	36	孝柳线
12		铁科院西北所	$0.061p_s+22$	29	0.87	29	兰州
13		山西省电力设计院	$0.027p_s+77$	17	0.81	25	晋西北
14	北部边缘带	铁一院	$0.04p_s+40$	32	0.87	33	规则推荐式
15			$0.0386p_s+44$	24		30	神地~神木

说明表 0.5.1—7

序	土 类	公 式 $\sigma_0=f(p_s)$ (kPa)	$N$	$r$	$s$ (kPa)
1	老粘性土	$39.5(p_s/100)^{0.67}$	29	0.81	85
2		$0.1p_s$			
3	一般粘性土 ( $I_p > 10$ )	$31.6(p_s/100)^{0.63}$	54	0.71	59
4		$5.8\sqrt{p_s}-46$	43	0.92	26
5	一般粘性土( $I_p \leq 10$ )及饱和砂土	$32.7(p_s/100)^{0.48}$	99	0.86	52
6		$16.2(p_s/100)^{0.63}+14.4$	60	0.945	31.6

2. 根据 TBJ2—85 规范第 12.2.5 条,软土容许承载力 $[\sigma]$ 在满足变形要求时,可按下式确定;

$$[\sigma] = 5.14\tau_a/K + \gamma_2 h \quad (\text{说明 } 6.5.1-1)$$

式中  $K$ ——安全系数,在此取为 2;

$\gamma_2$ ——基底以上土的天然重度,如持力层在水面以下,且为透水者,水中部分应采用浮重;如为不透水者,不论基底以上水中部分土的透水性质如何,应采用饱和重度;

$h$ ——基础底面的埋置深度。

其它符号同前。

对荷载板试验,因  $h=0$ ,上式换为

$$\alpha_0 = 2.57\tau_a \quad (\text{说明 } 6.5.1-2)$$

将本规则公式(6.4.3)代入,得

$$\alpha_0 = 0.1038p_s + 5.14 \quad (\text{说明 } 6.5.1-3)$$

与说明表 6.5.1—2 推荐的软土基本承载力公式极为一致。

#### (五)推荐公式的安全度

由荷载试验与对应的静力触探贯入阻力建立的基本承载力经验公式,其  $\alpha_0$  值最宜以极限荷载除以安全系数来确定。这时除软土荷载试验一般做到破坏阶段外,其它各类土有些没有做到破坏,因此不能逐个对所选取的承载力值得出相应的安全系数。估计其安全度的方法可借助于经验公式的比较得出。铁科院左佐生通过统计得出极限荷载( $p_a$ )的触探经验公式为:

$$\text{粘土、亚粘土: } p_a = 59(p_s/100)^{0.757} (\text{kPa}) \quad (\text{说明 } 6.5.1-4)$$

$$\text{轻亚粘土、砂土: } p_a = 21(p_s/100)^{0.926} (\text{kPa}) \quad (\text{说明 } 6.5.2-5)$$

将此二式与说明表 6.5.1—2 推荐的(1)式、(2)式分别进行数值比较,即可看出,推荐公式的安全系数在 2~3 间,并有随  $p_s$  减小而减小的趋势。

此外,上述公式的  $\alpha_0$  取值是基于荷载板埋深为 0、压板宽度(或直径) $B=50\sim70.7\text{cm}$  的条件下得出的,而我国现行的各种规范中的基本承载力均指基础有一定宽度和一定埋深的。因此,上述公式在使用中是偏于安全的。

### 三、计算基本承载力时贯入阻力( $p_s$ )的取值

(一)对于均质地基浅埋基础,实测资料和理论分析均已证明,土体受荷后产生剪切变形主要发生在基础底面下  $2B$  深度( $B$  为基础短边宽度或直径)范围内的地基浅层,水平附加应力引起的侧向膨胀则更浅。从稳定检算要求上看,只需要计取剪切变形深度范围内土的有关力学性指标。这对均质地基的取值而言,似无此问题。但自然界很少有物理力学性质不随深度而变的均质地基;这里所谓的“均质地基”是泛指时代、成因、物质成份完全一样而土的某些物理力学性质随深度呈线性变化的天然地基。例如我国沿海地区巨厚的软土乃至内地的膨胀土和伦顿、高尔特的硬粘土,其贯入阻力( $p_s$  或  $q_c$ )随深度线性递增。对于这类“均质”土,若取全层贯入阻力平均值计算  $\alpha_0$ ,必然夸大了地基的承载能力。因此,必须对  $p_s$  的取值深度加以限制。

条款中以  $2B$  作为对条形基础下地基  $p_s$  的取值深度是适宜的;对独立基础(圆形或方形)似偏大,但因  $\alpha_0$  的触探经验公式是在  $2B$  取值条件下建立的,故实际上不会带来影响。因此,本条款将浅埋基础  $p_s$  的取值深度范围统一定为基础底面下  $2B$ 。

对地面上构筑的梯形荷载而言, $p_s$  的计深公式(6.5.1—1)是据宫川公式并假定垂直纵向裂缝居于铁路堤的中轴线上而导得的,业经连云港筑堤试验和室内离心模型试验结果证明是可行的。但应指出的是,由于软土的  $p_s$  或不排水剪强度( $\tau_u$ )随深度在改变,用平均强度值检算堤、坝的稳定性是不够确切的;应该将强度作为深度变量的函数列入稳定检算的公式中才是正确的。

(二)成层土有厚薄之分,将土层厚度界限定为  $1m$ ,出于以下考虑;

1. 与第 6.7.3 条地基液化判别的  $p_s$  或  $q_c$  取值标准统一;
2. 成层土对原位测试有界面效应,在界面以上出现超前深度( $d_1$ );在其以下出现滞后深度( $d_2$ ),即有超载的临界深度。长沙铁道学院在大型砂槽中多次触探试验得到  $d_1$  及自由表面下的临界深度( $Z_\alpha$ )与  $p_s$  有下列关系;

说明表 0.3.1—8

相对密度( $D_r$ )	$p_s$ (MPa)	$d_1$ (cm)	$Z_{cr}$ (m)
$\leq 0.30$	$\leq 2$	20~40	40~60
0.50	4~5	40~55	70~80
0.65	7~12	60~70	80~100
0.75	14~22	75~100	$\leq 120$

滞后深度则无论是在模型试验中还是在现场实测中均未发现有 $(d_2)_{\max} > 1\text{m}$ 者。

3. 当土层厚度  $h \geq 1\text{m}$  时, 如为硬层, 取全层平均值  $p_s$ ; 如为软层则扣除  $d_1$  和  $d_2$  范围内的  $p_s$  值后, 便为  $(p_s)_{\min}$  值了。这样做是偏于安全的。

对于那些单层厚度不足  $1\text{m}$  甚而更薄的土层, 在黄泛区是常见的现象。它们是砂性土(或粘砂土)与砂粘土(或粉质粘土)互为夹层的地质组合, 界面效应使这类土层的  $p_s$  值受到歪曲。即使得  $p_s$  的大值较“真值”偏小, 而小值又较“真值”偏大。目前对这种偏差尚无确切的修正办法。故本条款要求对该套分层土层的  $p_s$  值分别计算其大值平均值和小值平均值, 然后分别对应于  $I_p \leq 10$  和  $I_p > 10$  的土层, 在表 6.5.1 查取  $\alpha_0$  值, 再根据工程建筑要求, 酌取这些值( $\alpha_0$ )中的小值或中小值或平均值, 以避免  $p_s$  取值上的随意性。

**第 6.5.2 条** 为修订《暂规》, 西北所、铁二院在铁三院工作的基础上分别对粘性土、砂土、新黄土补做了相同压板面积不同埋深及相同埋深不同压板面积的荷载试验, 并与静力触探、动力触探进行了对比, 得到下列规律性认识:

一、荷载试验与静力触探、动力触探等原位测试均存在临界深度( $Z_{cr}$ )。在  $Z_{cr}$  以内, 地基承载力随土强度(以  $p_s$  或  $N_{60.5}$  表征)和基础埋置深度( $Z$ )的增加而增加; 在  $Z_{cr}$  以下, 地基承载力在实用上应视为常数( $K_2=0$ )。

二、地基土的深度修正系数( $K_2$ )与  $p_s$  呈线性关系, 与  $N_{60.5}$  呈

幂函数关系( $N_{63.5}$ 为动力触探锤击数);在相同  $p_s$  值时,新黄土、砂土的  $K_2$  值小于粘性土的  $K_2$  值。它们的统计关系如说明表 6.5.2—1,同时提出  $K_2$  的推荐值表(见说明表 6.5.2—2),本规则的  $K_2$  值就是在《暂规》基础上根据上述的研究成果而作的补充修订,其安全储备是足够的。

三、粘性土在相对埋深  $Z/B \leq 4$  时( $B$  为基础宽度),修正系数  $K_2$  随  $Z$  值的增加递减缓慢; $Z > 4B$  后, $K_2$  值随相对埋深的增加呈幂函数关系迅减。

四、通过用不同压板面积在四个深度所做的 25 次试验表明,新黄土地基的变形特征基本上不属于整体剪切破坏;在压板下土体以压缩变形为主,并逐渐向下发展而演成“楔入”破坏。因而,其承载力与压板尺寸大小的关系不大。同时虑及基础尺寸增加引起沉降量加大,故建议对新黄土的承载力不作宽度修正( $K_1=0$ )。

说明表 6.5.2—1

序	编制单位	土 类	统计公式	相关系 (指)数 $R$	标准差 $S$	符号使用 单位
1	铁二院	粘性土	$K_2=4p_s/Z$	—	0.1743	$p_s$ :MPa
2		砂 土	$K_2=0.86p_s/Z^{0.088}\sqrt{p_s}$	—	0.3743	$Z$ :m
3	西北所	新黄土	$K_2=0.88p_s+1.0176$	0.72	0.5844	$B$ :m
4	铁二院	碎石土	$K_2=1.71(\frac{Z}{B})^{0.3} \cdot N_{63.5}^0/Z$	0.99	—	

$K_2$  的推荐值 说明表 6.5.2—2

$p_s$ (MPa)	1	2	3	4	5	6	10	14	20	>20
粘性土	1	2	3	4	5	6	—	—	—	—
砂 土	1	2	2.5	3	4	5	6	7	8	9
新黄土	—	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8
$N_{63.5}$ (击次/10cm)	$\leq 4$	6	10	15	20	25	32	40	50	$\geq 60$
中砂~碎石土	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**第 6.5.3 条** 在本次修订过程中,对地基土的模量( $E_s$ 、 $E_0$ )做了较多的增订。表 6.5.3—1 及表 6.5.3—2 是据下表所列公式编制的,现补充说明以下几点:

一、原《暂规》公式的适应性及修订情况

说明表 6.3.3 中的公式(1)、(5)、(6)系原《暂规》采用公式,已经多年实践,证明是适宜的。最近又经铁一院对 83 组一般粘性土  $E_s$ — $p_s$  对比资料验证,符合式(1)的统计关系;而在杭甬高速公路勘察中,发现式(1)极适合于软土和一般粘性土,对老粘性土则较室内试验值偏低。原因于下:

1. 公式(1)的资料取材于西北地区以外全国各地的粘性土,有较广泛的地区代表性(详《暂规》原条文说明)。本次修订时将  $I_p$  的下限定为 10。

2. 在 498 组资料中,软土及  $p_s \leq 4000\text{kPa}$  的一般粘性土占大多数,老粘性土资料为数甚少。故将其用于估计老粘性土  $E_s$  时,偏于保守。

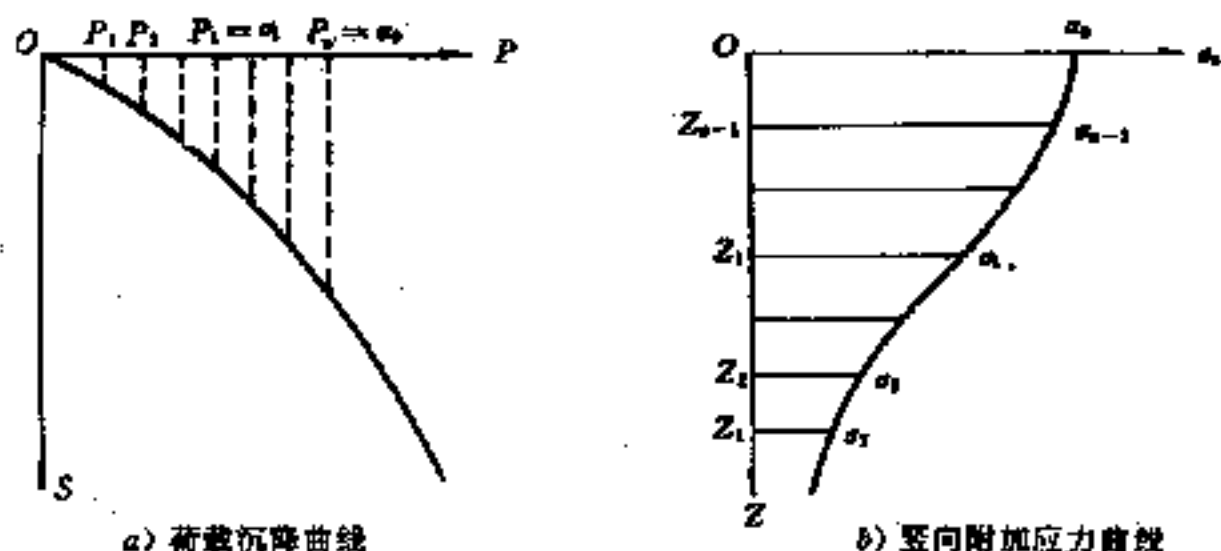
原《暂规》有关粘性土的变形模量( $E_0$ )值(表 4 及表 5)系引自 TJ21—77 规范附表 4 及附表 5 数值。本次依据 66 组对比试验资料,对软土及一般粘土  $E_0$  的取值作了专题研究,情况如下:

1.  $p_s$  的值域为 85~2500kPa,其中  $p_s \leq 799\text{kPa}$  的有 37 组,  $p_s < 1400\text{kPa}$  的有 63 组,仅有 3 组资料为硬塑状态的粘性土。

2. 由于试验地基绝大多数为流塑或软塑状态的粘性土,荷载试验的  $p \sim s$  曲线呈圆滑曲线。为避免人为取值的标准不一,将经过修正的荷载~沉降( $P \sim S$ )曲线与圆形均布荷载下地基的竖向附加应力分布曲线联系起来。根据附加应力分布系数,在  $\alpha$ — $Z$  曲线上,可以找到与  $P \sim S$  曲线上任一级荷载  $p_i$  ( $p_i \leq \alpha_0$ )数值相等的  $\alpha_i$  值及其深度值  $Z_i$ ,如说明图 6.5.3 所示。因而可借助于在半无限体表面荷载作用下的弹性理论解,运用三向分层总和法,求得当  $(P_i)_{\max} = p_n = \alpha_0$  时的地基的  $E_0$  值。然后与两倍压板深度范围内  $p_s$  加权平均值(按附加应力系数加权)组成一对统计变量,建立了如说明表 6.5.3 的公式(7),并编入了本规则的表 6.5.3—2 中,从而



修订了原《暂规》表 4 的数值。严格说来,如此定出的  $E_0$  是特定于  $\alpha_0$  的当量变形模量(割线模量)。当采用的设计荷载小于基本承载力时,所估算的沉降量是偏大的。



说明图 6.5.3 荷载沉降曲线与竖向附加应力曲线

### 压缩模量( $E_s$ )、变形模量( $E_0$ )经验公式

说明表 0.5.3

序	编制单位	土 类	$E_s, E_0 = f(p_s)$ (MPa)	$p_s$ 值域 (10 <sup>3</sup> kPa)	频数 $N$	相关系 (指)数 $r$	标准差 $S$ (MPa)
1	《暂规》 公式	粘性土 $I_p > 7$	$p_s \leq 1300 \text{ kPa}:$ $E_s = 0.85(p_s/100)^{0.687}$ $p_s > 1300 \text{ kPa}:$ $E_s = 0.00214p_s + 2.174$	0.22~ 7.9	498	0.81  0.83	1.30~ 1.83  1.67
2	铁一院	新近沉积土 ( $I_p > 10$ )	$E_s = 0.00116p_s + 3.45$	0.5~6	50	0.70	1.7
3		粘性土及新近沉积土 ( $I_p \leq 10$ )	$E_s = 0.00134p_s + 3.40$	0.5~ 10	30	0.70	1.7
4		新黄土	$E_s = 0.00366p_s - 2$	0.5~ 6.5	76	0.84	3.6
5	《暂规》 表 3	砂 土	$E_s$ 引自武汉建筑设计院《执行 TJ21—77 规范的补充规定》				
6	武汉联合组	老粘性土	$E_0 = 0.01178p_s - 4.69$	3~6	编入 TJ21—77 规范附表 5		

续说明表 6.5.3

续前附表 0.0.0

序	编制单位	土 类	$E_s, E_0=f(p_s)$ (MPa)	$p_s$ 值域 (10 <sup>3</sup> kPa)	频数 $N$	相关系 (指)数 $r$	标准差 $S$ (MPa)	
7	铁四院	软土及一般粘性土	$E_0=0.214(p_s/100)^{1.45}+0.8$	0.085~2.5	66	0.86	0.33~0.63	
8	铁 一 院	粉、细砂	$E_0=0.03176p_s^{0.6838}$	1~20	52	0.84	3.9	
9		新近沉积土 ( $I_p>10$ )	$E_0=0.003p_s+2.87$	0.5~6	27	0.81	3.17	
10		粘性土及新近沉积土 ( $I_p\leq 10$ )	$E_0=0.0023p_s+1.99$	0.5~10	67	0.74	3.15	
11		新 黄 土	东南带	$E_0=0.1574p_s^{0.64}$	0.5~5	120	0.53	11.7
12			西北带	$E_0=0.00595p_s+1.41$	1~5.5	76	0.70	7.2
13			北部边缘带	$E_0=0.005p_s$	1~6.5	32	用低限值公式	

注:表内公式中  $p_s$  值单位为 kPa。

## 二、存在问题与注意事项

(一)现行的《铁路桥涵设计规范》(TBJ2—85)并不使用模量检算地基沉降量。本规则将模量值列入乃出于以下一些考虑:

1. 为适应《铁路工程设计手册》的需要;

2. 因钻探和取土的质量原因而造成土层剖面漏层时,可以作为补充数据在沉降检算中予以考虑,较之毫无根据的猜测显得合理与可靠;

3. 如同压缩系数( $a_{1\sim 2}$ )、孔隙比( $e$ )一样,作为定性判别土的压缩性,不失为一个有用的指标;一般说来,由于  $E_s, E_0$  与  $P_s$  存在较好的统计关系,当作为与  $\alpha_s$  相配套的指标看待是可行的。但必须注意经验公式的局限性,尤其是对于说明表 6.5.3 中那些数据不多、相关系数低、标准差大的经验公式,使用时应予慎重。

(二) $E_s$  是在侧限条件下的排水模量,而  $E_0$  是有侧胀条件的排水模量,理论上应有  $E_0 < E_s$ 。然而,本规则表 6.5.3—1 和表 6.5.3—2 却给出了相反的结果。这是因为  $E_0$  基于弹性理论,在  $P$

$\sim S$  曲线上通常取的是切线模量,甚而是初始切线模量,其值一般较大;而  $E_s$  是以  $100\sim 200\text{kPa}$  压力区段内计得的数值,对中~低压缩性土而言,属低应力水平,兼因取土造成的应力释放和可能的结构扰动,其值一般偏低。可此可知。以  $p_s$  推得的  $E_s$  仅适宜于用单向分层总和法估计地基沉降;而以  $p_s$  推得的  $E_0$  仅适宜于以弹性理论公式求地基沉降。

(三)从机理上看  $E_s$ 、 $E_0$  与  $p_s$  的统计关系,只适用于砂土;对饱和粘性土,  $p_s$  属不排水条件下的触探参数,其与  $E_s$ 、 $E_0$  无机理关系可言。

另外,土的广义模量值是随初始固结压力(或深度)增大而增大、依应力水平提高而降低的可变值,其必须与具体工程的实际应力条件联系起来才有意义。

土的压缩指数( $C_c$ )不依应力增量改变而改变,对一定的土质表现为常数,因而对沉降计算而言具有较确定的意义。如何建立  $C_c$  与触探参数间的经验关系,实属下次修订本规则所应考虑的问题。

**第 6.5.4 条** 饱和粘性土的不排水杨氏模量( $E_u$ )是土在体变增量为零时的弹性常数,它对于预计地基的瞬间变形是一个不可缺少的计算参数。特别是对于厚层软粘土地基,瞬间变形量占地基沉降总量一个相当大的比重,过大的瞬间变形说明地基中存在过大的塑性区。

研究表明,比值( $E_u/\tau_u$ )是一个依应力水平、应力历史( $OCR$ )、灵敏度( $S_t$ )以及塑性指数( $I_p$ )等诸因素而变的经验常数。为此,本条文将饱和粘性土贯入阻力的上限定为  $p_s=1000\text{kPa}$ ,其意有三:

1. 统计对象直指软土,从而大大缩小上述诸影响因素对统计精度的干扰;

2. 对于软土以外的其它各类土,以  $E_0$  估计地基瞬间变形量已足够近似,唯  $E_u$  对软土地基有重要意义;

3. 将  $p_s$  的统计值域从  $800\text{kPa}$  适当放大到  $1000\text{kPa}$ ,可使获得的统计关系具有更好的稳定性。

在不排水条件下,软土具有加工软化特性, $E_a$  值随剪应变大小而变。取中等(50%)剪应力水平下的割线模量作为软土的  $E_a$  值,具有较好的代表性,而且能与软土  $\alpha_s$  的取值标准(安全系数  $K=2$ )求得统一。

$E_a$  的取值方法如下:

1. 每个试验值( $E_{as}$ )均取自三轴固结不排水剪应力~应变曲线上峰值剪应力的一半( $q_t/2$ )所对应的割线模量;

2. 将取得  $E_{as}$  值与其对应的固结压力( $\alpha_{ss}$ )组成一对变量,并按固结压力进行归一。则每组试样各对( $E_{as}$ 、 $\alpha_{ss}$ )值在  $\alpha_{ss}$ - $E_{as}$  座标中构成一通过座标原点的直线( $\alpha_s \sim E_a$ );

3. 根据土样的地基中实际所受固结压力  $\sigma'_m$  ( $\sigma'_m = (1+2K_0)P_c/3$ ,  $P_c$  为土的前期固结压力),在  $\alpha_s \sim E_a$  直线上查取相应的 ( $E_a$ )<sub>*j*</sub> 值;

4. 然后将该土样所在深度处上、下 20cm 范围内的贯入阻力平均值( $p_s$ )<sub>*j*</sub> 与 ( $E_a$ )<sub>*j*</sub> 组成一组统计变量,经统计得到如下相关方程:

$$E_a = 9.2p_s + 100 (\text{kPa}) \quad (\text{说明 } 6.5.4-1)$$

或

$$E_a = 9.5p_s$$

该方程的相关系数  $r=0.95$ 、标准差  $S=75\text{kPa}$ 、 $p_s$  值域为 134~1000kPa。

为检验上式的合理程度,包括了于同一软土工点所进行的荷载板试验在内,计 20 组荷载~静力触探对比试验数据,通过点绘荷载~立即沉降( $p \sim S_d$ )曲线(立即沉降  $S_d$  通过点绘沉降~时间平方根曲线查取)求得地基在“瞬间”(在  $p \sim \sqrt{t}$  曲线上大致对应于 5min 左右)变形条件下的似弹性模量  $E_d$ 。其与相应  $P_s$  值的回归方程如下:

$$E_d = 420(p_s/100)^{1.35} + 1400 (\text{kPa})$$

(说明 6.5.4-2)

$$(R=0.86, S=0.72\text{MPa}, p_s=85 \sim 1400\text{kPa})$$

比较以上两式,在  $p_s \leq 1000 \text{kPa}$  范围内,平均比值  $E_a/E_d \approx 86\%$ 。考虑到  $E_d$  值仍然包含一定程度的固结因素在内,其值比地基土实际存在的弹性模量为小。故本规则将公式(说明 6.5.4—1)提高了 20%并推荐使用。

**第 6.5.1 条** 国外如苏联、挪威、法国等国家已将静力触探推算打入桩承载力列入规范,荷兰则早在 30 年代就使用静力触探推估打入砂层的桩端承载力。

本条文的打入桩承载力触探公式,系铁科院、铁三院、北京局设计院所组成的试验小组,在 1975~1978 年间,根据沪、宁、京、津及石家庄等地 61 根试桩与静力触探对比试验数据,通过 24 种不同条件组合方案计算后优选出来的,已列入《暂规》中使用多年。有关具体细节可详原《暂规》条文说明。

实践表明,该公式有较大的适应性,与实际试桩比较,误差  $< 30\%$  的桩占 85% 以上;最近在武昌又以压入混凝土方桩的静载试验资料校核,误差在 25% 以内,而且偏于安全方面。故本规则仍推荐使用。

用静力触探测得的地层土的触探端阻  $\bar{q}_c$  和触探侧阻  $\bar{f}_s$  值,不能直接当作桩的极限端阻和侧阻,必须进行修正,公式(6.6.1—1)中的综合修正系数  $\alpha$  和  $\beta$  与桩周地层土的类别有关。根据地层土的平均触探端阻  $\bar{q}_c$  和摩阻比  $\bar{f}_s/\bar{q}_c$ ,可将土分为两大类,即砂类土和粘性类土。砂类土的判别标准为  $\bar{q}_c > 2000 \text{kPa}$ ,且  $\bar{f}_s/\bar{q}_c \leq 0.014$ ,不符合此条件的土都划为粘性类土。因此,在确定侧阻综合修正系数时,应根据桩侧壁土层的  $\bar{q}_c$  和  $\bar{f}_s/\bar{q}_c$  值,选择相应的计算  $\beta$  的公式(6.6.1—2~6.6.1—3)。确定端阻综合修正系数  $\alpha$  时,应根据桩底以下持力土层的  $\bar{q}_{cp}$  和  $\bar{f}_s^b/\bar{q}_{cp}$  值,选择相应的计算  $\alpha$  的公式(6.6.1—4~6.6.1—5)。此时,公式中的  $\bar{q}_c$  是考虑了桩底以上土层影响的计算平均值,而不是划分土类的  $\bar{q}_{cp}$  值。

静力触探贯入过程中,如遇到孤石或其它障碍物,而使端阻或侧阻测值异常时,应舍去。

表 6.6.1—1~表 6.6.1—4 的综合修正系数是依下列经验公

式计算的;

一、当土层  $\bar{q}_c > 2000 \text{kPa}$ , 且  $\bar{f}_s / \bar{q}_c \leq 0.014$  时

$$\begin{aligned}\beta_s &= 1.798(\bar{f}_s / 10)^{-0.45} \\ \alpha_s &= 1.257(\bar{q}_c / 100)^{-0.25}\end{aligned}\quad (\text{说明 } 6.5.1-1)$$

在将此式列入表 6.6.1—1 时, 对  $(\beta_s \cdot \bar{f}_s)$  的最大值定为  $100 \text{kPa}$ 。

二、如土层不同时满足  $\bar{q}_c > 2000 \text{kPa}$ ,  $\bar{f}_s / \bar{q}_c \leq 0.014$  时

$$\begin{aligned}\beta_s &= 2.831(\bar{f}_s / 10)^{-0.55} \\ \alpha_s &= 2.407(\bar{q}_c / 100)^{-0.35}\end{aligned}\quad (\text{说明 } 6.6.1-2)$$

**第 6.6.2 条** 早在 1967 年铁科院在京、津等地进行了 16 根灌注桩试桩与静力触探对比试验, 其初步成果经铁一院六根灌注桩试桩验证, 甚相适合。在此基础上本次与大桥局合作共搜集冀、鲁、浙、鄂等 10 个不同地区、49 根灌注桩与静力触探对比试验资料, 其中: 桩长大于 20m 的有 18 根, 长 10~20m 的有 23 根, 最短者为 3.2m; 桩径大于 65cm 的 13 根, 小于 42cm 桩径者 36 根。为多种土质, 有一定的代表性。

对上述资料进行了 36 种组合方案上千次的电算, 提出了形如公式 (6.6.1—1) 的用静力触探参数估算灌注桩极限承载力公式。其中的综合修正系数按下列各式计算:

当桩径  $\phi < 65 \text{cm}$  时:

$$\begin{aligned}\beta_s &= 3.774(\bar{f}_s / 10)^{-0.75} \\ \alpha_s &= 7.878(\bar{q}_c / 100)^{-0.98}\end{aligned}\quad (\text{说明 } 6.6.2-1)$$

当桩径  $\phi \geq 65 \text{cm}$  时:

$$\begin{aligned}\beta_s &= 1.39(\bar{f}_s / 10)^{-0.4} \\ \alpha_s &= 1.625(\bar{q}_c / 100)^{-0.55}\end{aligned}\quad (\text{说明 } 6.6.2-2)$$

试验研究报告指出, 灌注桩成桩后的实际直径, 常较设计的桩径为大, 宜根据钻孔类型按下表放大公式 (6.6.1—1) 中的桩周尺寸 (见说明表 6.6.2)。

由于本次统计数据中, 缺少桩径  $\phi = 42 \sim 65 \text{cm}$  的资料, 在编制本条文内容时, 为增加安全储备起见, 未列入说明表 6.6.2 的建议

值。

说明表 0.0.2

钻孔类型	设计直径增加量(cm)
旋转钻	3~5
冲击钻	5~10
冲抓钻	10~15

上式经五根试桩资料验证,所估算的灌注桩承载力较之公路和铁路桥涵设计规范用物理性指标计算的结果更接近实际,约减少误差 20%,且多偏于安全方面。

**第 6.7.1 条~第 6.7.3 条** 条文内容是以《铁路工程抗震设计规范》(GBJ111—87)附录二“液化土的判定方法”为基础,对其中静力触探法加以补充。现仅作以下几点简要说明:

一、有关砂土液化临界贯入阻力计算公式详见《铁路工程抗震设计规范》(GBJ111—87)条文说明。

二、补充了单桥探头静力触探法中的粘砂土及  $I_p \leq 10$  的砂粘土液化判别方法,建议采用标贯试验法中同样的粘粒含量修正系数  $\alpha_1$ 。

三、增加了用双桥探头触探参数判别地基土液化的方法。双桥探头临界贯入阻力计算公式是由单桥探头公式  $p_s = 1.1q_c$  换算得到的,增添了用摩阻比( $R_f$ )确定  $\alpha_1$  的表格。

经实际对比,分别统计得到单桥(33 组)、双桥(41 组)两种方法与标贯法相同的  $\alpha_1$  值,即此三种方法中的  $\alpha_1$  值是完全一致的。从理论上讲,触探指标  $N_{60s}$ 、 $p_s$ 、 $q_c$  三者彼此密切相关;而  $\alpha_1$  则由土性所决定,其值与采用何种原位测试手段无关。

本方法经回判检验,成功率均在 80%以上,且偏于安全方面。但需指出,本判别方法主要适用于石英质砂土和  $I_p \leq 10$  的粘性土地基,对体变性能较大的片状砂,在未取得判别经验之前,宜结合室内动三轴试验对其进行综合评判。