

用土的现场原始压缩曲线计算 土的变形模量

葛孝椿 王元兴

(安徽省水利科学研究所, 蚌埠)
(治淮委员会)

一、前言

在弹性地基上板梁计算以及二维与三维的地基沉降计算中, 常常要用到土的变形模量 E_0 与泊松比 μ_0 。土的泊松比 μ_0 可以用侧压力仪或三轴剪力仪在室内测定; 而土的变形模量 E_0 用室内试验推求的往往与实际情况相差很大。例如, 从广义虎克定律可推求得

$$E_0 = \beta E_s$$

其中

$$\beta = 1 - \frac{2\mu_0^2}{1 - \mu_0} \quad (1)$$

E_s 为土的压缩模量。由式(1)知, β 值应小于1, 可是由经验关系得到的 β 值有时能达到2以上(见表1)^[1]。产生上述不一致的原因主要在于室内试验求得的压缩模量 E_s 因土样扰动和没有反映天然土层受荷历史而与实际情况不符; 此外, E_0, E_s, μ_0 并非常数, 其值与荷载大小有关。 $\beta = E_0/E_s$, 在经验关系中, E_s 由室内压缩试验求得, 而 E_0 往往由原位试验(例如现场荷载试验)求得。对于结构性强、灵敏度高的正常固结粘性土及超固结土, 室内压缩试验测得的 E_s 在实际遇到的应力范围内比天然土层的 E_s 小得多, 因而由经验关系得出的 β 值会

表1 变形模量 E_0 与压缩模量 E_s 间的经验关系

土 的 种 类	E_0/E_s	
	一般变化范围	平 均 值
老 粘 土	1.45—2.80	2.11
一般粘性土 $\begin{cases} I_p > 10 \\ I_p < 10 \end{cases}$	0.60—2.80	1.35
	0.54—2.68	0.98
新近沉积粘性土	0.35—1.94	0.93
淤泥及淤泥质土	1.05—2.97	1.90
红粘土	1.04—4.87	2.36

比理论计算值大得多。而新近沉积的欠固结土由经验关系得到的 β 值又会比理论计算值小得多。在文献[2]、[3]中建立了许多用经验关系求 E_0 的公式与表格,但是各种经验关系都有很大的局限性,而且各种经验关系求得的 E_0 往往相差过大,以致设计人员对其可靠性产生怀疑。现场荷载试验推求的变形模量 E_0 比较可靠,但是现场荷载试验要有一定的试验设备,并非所有工程都能办得到,而且,现场荷载试验不能反映深层土的压缩性质。

为了克服用理论公式、荷载试验以及经验公式与表格推求 E_0 的上述缺点,又能利用室内压缩试验比较方便的特点,本文介绍用室内压缩试验推求出的现场原始压缩曲线来计算土的变形模量 E_0 。这样求得的 E_0 可以考虑天然土层受荷历史、应力状态以及基坑开挖等因素的作用,并且可以消除或减少土样扰动的影响。

二、正常固结土的变形模量推求

(一)不考虑基坑开挖的影响

在基坑开挖面积较小,基坑开挖后迅速建造建筑物的情况下,可以忽略基坑开挖的影响。

通过室内压缩试验绘制 $e-\lg p$ 曲线,从曲线上求得先期固结压力 p_c ^[2,4-7],若 p_c 等于土样在天然土层中的竖向应力 p_0 ,则该土层为正常固结土,并可绘制现场原始压缩曲线(见图1)^[2,4-7],得出压缩指数 C_c 为

$$C_c = \frac{e_0 - e_1}{\lg\left(1 + \frac{\Delta p}{p_0}\right)} \quad (2)$$

式中 p_0 , e_0 分别为土样在天然土层中的竖向应力与孔隙比; Δp 为附加应力; e_1 为在 $p_0 + \Delta p$ 压缩稳定后的孔隙比。

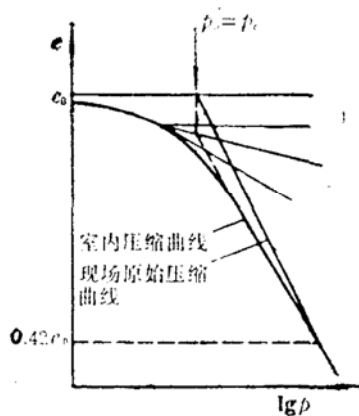


图1 正常固结土压缩曲线

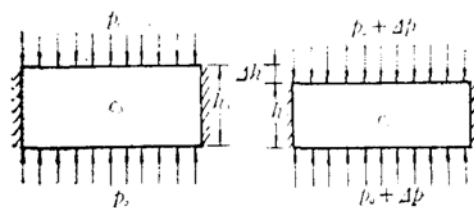


图2 压缩试验中土样的 p, h, e 变化示意图

图2示意土样在压缩试验中荷载与孔隙比、土样高度之间的变化情况。由图2得

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} \quad (3)$$

由广义虎克定律及式(1)可得

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{\Delta p}{E_0} \left(1 - \frac{2\mu_0^2}{1-\mu_0} \right) = \frac{\beta \Delta p}{E_0} \quad (4)$$

由式(3)、(4)得

$$E_0 = \frac{(1+e_0)\beta \Delta p}{e_0 - e_1} \quad (5)$$

将式(2)得出的 $e_0 - e_1$ 代入式(5), 得到推求 E_0 的公式为

$$E_0 = \frac{(1+e_0)\beta \Delta p}{C_c \lg \left(1 + \frac{\Delta p}{p_0} \right)} \quad (6)$$

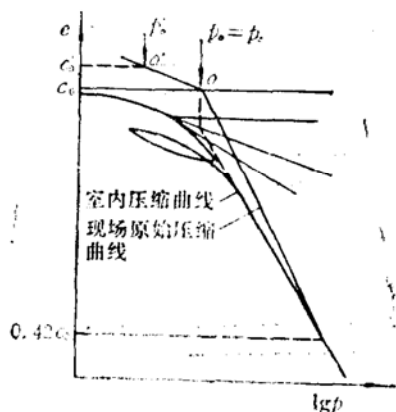
当压力由 p_i 增加到 $p_i + \Delta p$, $\Delta p \rightarrow 0$ 时, 取 E_0 的极限值, 则可得到压力为 p_i 时的切线变形模量为

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta p \rightarrow 0} E_0 &= \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{(1+e_i)\beta p_i}{C_c \lg \left(1 + \frac{\Delta p}{p_i} \right)^{p_i/\Delta p}} \\ &= \frac{(1+e_i)\beta p_i}{C_c \lg e} = \frac{2.303(1+e_i)\beta p_i}{C_c} \end{aligned} \quad (7)$$

故当压力由 p_i 增加到 $p_i + \Delta p$, 且 Δp 较小时, 以平均应力 $p_i + \Delta p/2$ 代替式(7)中 p_i , 就可使式(6)近似地简化为

$$E_0 = \frac{2.303(1+e_i)\beta}{C_c} \left(p_i + \frac{1}{2} \Delta p \right) \quad (8)$$

(二)考虑基坑开挖的影响



当基坑开挖面积大、基坑开挖后未及时施工, 则应考虑基坑开挖卸荷的影响。在这种情况下, 压缩试验应当在 $e-\lg p$ 曲线出现直线段时进行卸荷, 直到压力略小于基坑开挖后天然土层应力 p_0' 为止, 然后进行再压缩(图3)。过图3中 o 点作回滞环中线的平行线 oo' 。 o' 的纵坐标为基坑开挖后建筑物施工前天然土层孔隙比, 用 e_0' 表示; o' 的横坐标为 $\lg p_0'$, p_0' 为 oo' 线上与 e_0' 对应的应力。 oo' 线的斜率绝对值为回弹指数 C_s 。

当附加应力 $\Delta p \leq p_0 - p_0'$ 时, 压力由 p_0'

图3 正常固结土压缩曲线(考虑基坑开挖影响)变化到 $p_0' + \Delta p$ 的 E_0 计算公式为

$$E_0 = \frac{(1 + e_0')\beta \Delta p}{C_s \lg\left(1 + \frac{\Delta p}{p_0'}\right)} \quad (9)$$

当附加应力 $\Delta p > p_0 - p_0'$ 时, 从图 3 可得

$$e_0 - e_1 = C_s \lg \frac{p_0}{p_0'} + C_c \lg \frac{p_0' + \Delta p}{p_0}$$

将上式代入式(5)得 $\Delta p > p_0 - p_0'$ 时, 压力由 p_0' 变化到 $p_0' + \Delta p$ 的 E_0 计算公式为

$$E_0 = \frac{(1 + e_0')\beta \Delta p}{C_s \lg \frac{p_0}{p_0'} + C_c \lg \frac{p_0' + \Delta p}{p_0}} \quad (10)$$

仿照式(7)的推求, 可得对应于 p_i 的切线变形模量为

$$E_0 = \frac{2.303}{C_s} (1 + e_i) \beta p_i \quad p_0' \leq p_i < p_0 \quad (11)$$

$$E_0 = \frac{2.303}{C_c} (1 + e_i) \beta p_i \quad p_i \geq p_0 \quad (12)$$

式中 e_i 是与 p_i 对应的孔隙比。

三、超固结土的变形模量推求

由压缩试验确定土的先期固结压力 p_c , 当 $p_c > p_0$ 时就属超固结土。对超固结土, $e-\lg p$ 曲线一旦出现直线段就应卸荷, 直到压力略小于 p_0 (或 p_0') 后进行再压缩, 并绘制现场原始压缩曲线如图 4 所示。图中 oc 平行于回滞环中线, 其斜率绝对值为回弹指数 C_s 。

(一) 不考虑基坑开挖的影响

当附加应力 $\Delta p \leq (p_c - p_0)$, 土层压力由 p_0 变化到 $p_0 + \Delta p$ 时,

$$E_0 = \frac{(1 + e_0)\beta \Delta p}{C_s \lg\left(1 + \frac{\Delta p}{p_0}\right)} \quad (13)$$

如果 $\Delta p > (p_c - p_0)$, 则从图 4 得

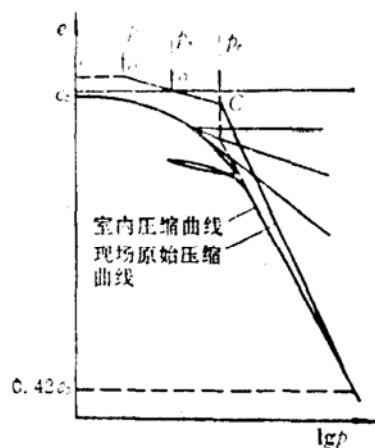


图 4 超固结土压缩曲线

$$e_0 - e_1 = C_s \lg \frac{p_c}{p_0} + C_c \lg \frac{p_0 + \Delta p}{p_c}$$

将上式代入式(5)便得 $\Delta p > (p_c - p_0)$ ，压力由 p_0 变化到 $p_0 + \Delta p$ 时的 E_0 计算公式为

$$E_0 = \frac{(1 + e_0) \beta \Delta p}{C_s \lg \frac{p_c}{p_0} + C_c \lg \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_c} \right)} \quad (14)$$

这种情况的切线变形模量为

$$E_0 = \frac{2.303}{C_s} (1 + e_i) \beta p_i \quad p_0 \leq p_i < p_c \quad (15)$$

$$E_0 = \frac{2.303}{C_c} (1 + e_i) \beta p_i \quad p_i \geq p_c \quad (16)$$

(二)考虑基坑开挖的影响

在图4中延长 co 线到 o' ，使 o' 纵坐标为基坑开挖后建筑物施工前的孔隙比 e_0' ， o' 点横坐标为 $\lg p_0'$ ， p_0' 为 oo' 线上与 e_0' 对应的压力。

当 $\Delta p \leq (p_c - p_0')$ ，压力由 p_0' 变化到 $p_0' + \Delta p$ 时的 E_0 计算公式为

$$E_0 = \frac{(1 + e_0') \beta \Delta p}{C_s \lg \left(1 + \frac{\Delta p}{p_0'} \right)} \quad (17)$$

当 $\Delta p > (p_c - p_0')$ 时，从图4得

$$e_0 - e_1 = C_s \lg \frac{p_c}{p_0'} + C_c \lg \frac{p_0' + \Delta p}{p_c}$$

将上式代入式(5)便得 $\Delta p > (p_c - p_0')$ ，压力由 p_0' 变化到 $p_0' + \Delta p$ 时的 E_0 计算公式为

$$E_0 = \frac{(1 + e_0') \beta \Delta p}{C_s \lg \frac{p_c}{p_0'} + C_c \lg \frac{p_0' + \Delta p}{p_c}} \quad (18)$$

这种情况的切线变形模量为

$$E_0 = \frac{2.303}{C_s} (1 + e_i) \beta p_i \quad p_0' \leq p_i < p_c \quad (19)$$

$$E_0 = \frac{2.303}{C_c} (1 + e_i) \beta p_i \quad p_i \geq p_c \quad (20)$$

四、欠固结土的变形模量推求

当先期固结压力 p_c 小于 p_0 时为欠固结土, 其室内试验的压缩曲线及现场原始压缩曲线示于图 5。

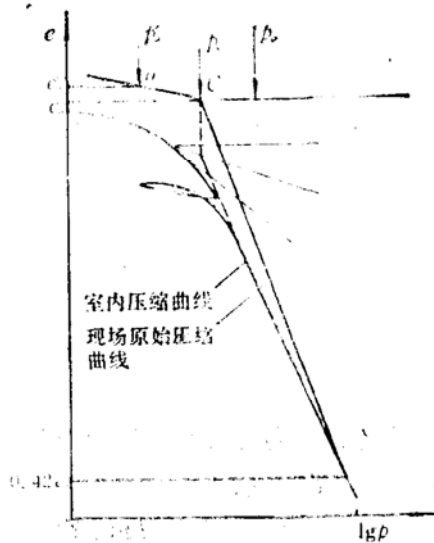


图 5 欠固结土压缩曲线

(一) 不考虑基坑开挖的影响

由图 5 可得

$$e_0 - e_1 = C_c \lg \frac{p_0}{p_c} + \frac{\Delta p}{p_c} = C_c \lg \left(1 + \frac{\Delta p_c}{p_c} \right)$$

式中

$$\Delta p_c = p_0 + \Delta p - p_c \quad (21)$$

代入式(5)得欠固结土不考虑基坑开挖的 E_0 计算公式为

$$E_0 = \frac{(1 + e_0) \beta \Delta p_c}{C_c \lg \left(1 + \frac{\Delta p_c}{p_c} \right)} \quad (22)$$

对于欠固结土的切线变形模量只有当 p_i 为固结压力时才有意义, 可以用下式计算:

$$E_0 = \frac{2.303}{C_c} (1 + e_i) \beta p_i \quad (23)$$

(二) 考虑基坑开挖的影响

用 h_0 , γ 分别表示基坑开挖深度与相应土的容重。若 $\gamma h_0 \leq p_0 - p_c$, 则 E_0 计算公式与不考虑基坑开挖情况一样, 仍用式(22)计算, 不过式中 Δp_c 应当考虑 γh_0 的影响, 不能用式(21)计算。如果忽略基坑开挖过程中有效应力增长, 则式(22)中

$$\Delta p_c = \Delta p + p_0 - p_c - \gamma h_0 \quad (24)$$

若 $\gamma h_0 > p_0 - p_c$, 则在图5中过C点作回滞环中线的平行线 Co' , 使 o' 的纵横坐标分别为 e_0' 与 $\lg p_0'$ 。 $\gamma h_0 > p_0 - p_c$ 时又可分两种情况研究:

1. 当 $\Delta p \leq p_c - p_0'$ 时, 则 $e_0 - e_1 = C_s \lg \left(\frac{p_0' + \Delta p}{p_0'} \right)$, 代入式(5)得

$$E_0 = \frac{(1 + e_0') \beta \Delta p}{C_s \lg \left(1 + \frac{\Delta p}{p_0'} \right)} \quad (25)$$

2. 当 $\Delta p > p_c - p_0'$ 时, 则 $e_0 - e_1 = C_s \lg \frac{p_c}{p_0'} + C_c \lg \left(\frac{p_0' + \Delta p}{p_c} \right)$, 代入式(5)得

$$E_0 = \frac{(1 + e_0') \beta \Delta p}{C_s \lg \frac{p_c}{p_0'} + C_c \lg \left(\frac{p_0' + \Delta p}{p_c} \right)} \quad (26)$$

对应于固结应力 p_i 的切线变形模量为

$$E_0 = \frac{2.303}{C_s} (1 + e_i) \beta p_i \quad p_0' \leq p_i < p_c \quad (27)$$

$$E_0 = \frac{2.303}{C_c} (1 + e_i) \beta p_i \quad p_i \geq p_c \quad (28)$$

五、几个参数的确定

(一) 土层附加应力 Δp 的确定

附加应力通常可以由基底应力及边荷载查有关表格求得。但是, 对于弹性地基板梁的计算, 一般在计算之前并不知道基底应力分布情况。为此, 可以根据基础的平均基底应力及边荷载用有关表格计算附加应力 Δp 。

(二) e_0' 与 p_0' 的确定

e_0' 与 p_0' 分别为基坑开挖后、基础施工前土层的孔隙比与有效应力。如果基坑开挖面大, 暴露时间长, 开挖后土层膨胀已稳定, 那么可以根据施工前土层实际深度确定 p_0' , 再自图3或图4中 oo' 线或图5中 Co' 线查得与 $\lg p_0'$ 对应的 e_0' 。如果在基坑开挖后、基础施

工前土层膨胀尚未稳定,可在 e_0 与上述膨胀稳定的孔隙比之间估算 e_0' 。通过图3或图4中 oo' 线或图5中 Co' 线找出与 e_0' 对应的 $\lg p_0'$,从而确定 p_0' 。如果基坑开挖面小,暴露时间短,可以不考虑基坑开挖影响。

(三)系数 β 的确定

β 值是根据土层泊松比 μ_0 用式(1)计算。而 μ_0 与土层应力有关,所以最好通过侧压力仪或三轴剪力仪由试验确定相应应力状态的 μ_0 。虽然用侧压力仪测定 μ_0 比较方便,设备也较简单,然而毕竟不是常规试验。在没有条件用侧压力仪或三轴剪力仪测定 μ_0 的情况下,可以根据土的物理性质查有关表格确定 μ_0 (例如文献[8]中表4-3-1)。后面将通过例题说明,这样确定的 μ_0 虽然使 E_0 产生误差,但是它比用经验公式计算和由 E_s 推求产生的误差小得多。

六、计 算 实 例

【例1】地基内某土层土样通过高压固结试验得室内压缩曲线如图6。已知 $p_0 = 205\text{kPa}$, $e_0 = 0.689$,用卡萨格兰德方法求得先期固结压力 $p_c = 610\text{kPa}$ 。根据室内压缩曲线及 p_c 绘制现场原始压缩曲线(图6中 oCD),从该曲线上求得回弹指数 $C_s = 0.0253$,压缩指数 $C_c = 0.198$ 。基坑开挖面小,且暴露时间短,可不考虑基坑开挖影响。土层平均附加应力 Δp 已求得为 20.0kPa , μ_0 为 0.30 。求该土层变形模量 E_0 。

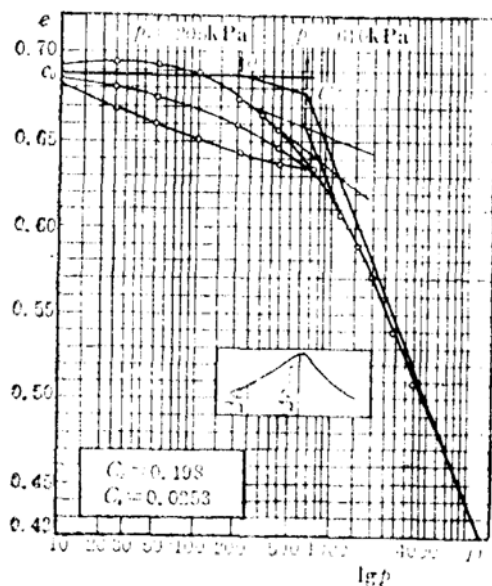


图6 [例1]压缩曲线(应力单位:kPa)

〔解〕 由式(1)得 $\beta = 1 - \frac{2 \times (0.30)^2}{1 - 0.30} = 0.743$ 。

由于 $p_c > p_0$, 为超固结土。 $p_c - p_0 = 405\text{kPa}$, 故 $\Delta p < (p_c - p_0)$, 应用式(13)计算 E_0 :

$$E_0 = \frac{1.689 \times 0.743 \times 20.0 \times 10^{-3}}{0.0253 \lg \left(1 + \frac{20.0}{205} \right)} = 24.5\text{MPa}$$

【例2】地基内某土层土样由室内固结试验得压缩曲线及现场原始压缩曲线如图7所示。已求得 $p_0 = 270\text{kPa}$, $e_0 = 0.524$, 用卡萨格兰德方法求得 $p_c = 650\text{kPa}$ 。从现场原始压缩曲线得回弹指数 $C_s = 0.016$, 压缩指数 $C_c = 0.153$ 。基坑开挖深度为 6.2m , 开挖部分土的天然容重为 19kN/m^3 。基坑面大, 暴露时间长, 回弹稳定。该土层平均附加应力 $\Delta p = 63.0\text{kPa}$, $\mu_0 = 0.30$, 求该土层变形模量。

【解】 $p_c > p_0$, 为超固结土。 $p_0' = p_0 - 6.2 \times 19 = 152.2\text{kPa}$, 在图7中 oC 延长线上查得与 $\lg p_0'$ 相应的 $e_0' = 0.526$ 。 $p_c - p_0' = 497.8\text{kPa}$, 故 $\Delta p < (p_c - p_0')$, 应用式(17)得

$$E_0 = \frac{(2 + 0.526) \times 0.743 \times 0.063}{0.016 \lg\left(1 + \frac{63.0}{152.2}\right)} = 29.6\text{MPa}$$

【例3】某土层通过室内固结试验得现场原始压缩曲线如图8所示。从该图中得 $p_c = 60\text{kPa}$, $C_c = 0.191$, $e_0 = 0.909$, $p_0 = 155\text{kPa}$ 。测得 $\mu_0 = 0.351$, 不考虑基坑开挖影响, $\Delta p = 15.14\text{kPa}$ 。求该土层的变形模量 E_0 。

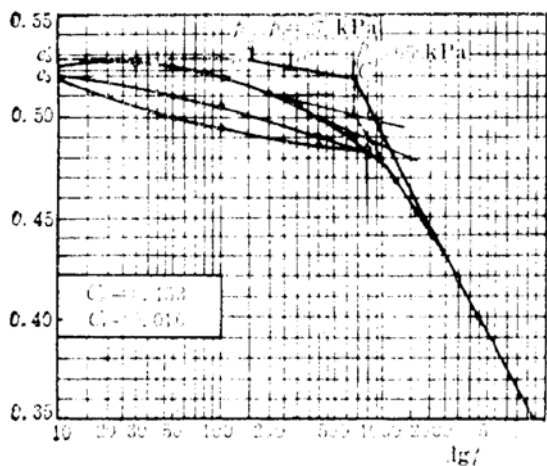


图7 【例2】压缩曲线(应力单位:kPa)

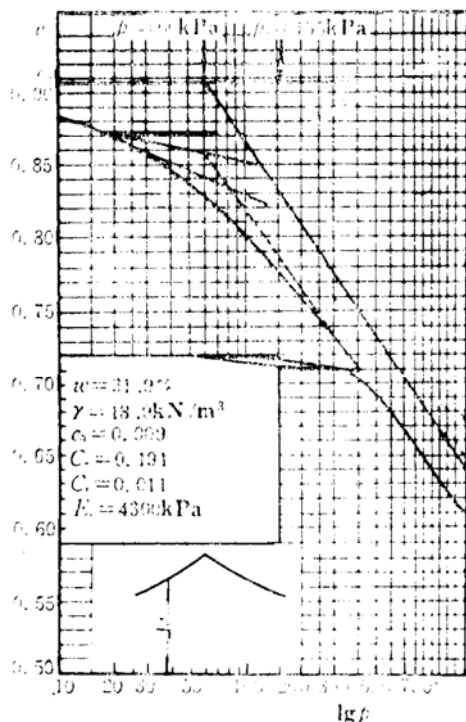


图8 【例3】压缩曲线(应力单位:kPa)

【解】由式(1)得 $\beta = 1 - \frac{2 \times (0.351)^2}{1 - 0.351} = 0.620$

由于 $p_c < p_0$, 故为欠固结土。由式(21)得 $\Delta p_c = 110.14\text{kPa}$, 代入式(22)得

$$E_0 = \frac{(1 + 0.909) \times 0.620 \times 0.11014}{0.191 \lg\left(1 + \frac{0.1114}{60}\right)} = 1.51\text{MPa}$$

七、结 语

1. 以上三个实例中, 土样的压缩模量 E_s 分别为14.1MPa, 19.0MPa 及4.3MPa。例1、例2 按本文方法求得的 E_0 与 E_s 之比分别为1.74与1.56, 其值均在表1所列老粘土的经验值范围之内, 而由 $E_0 = \beta E_s$ 得出的 E_0 分别为10.47MPa, 14.1MPa, 远小于本文方法的计算值, 它们与 E_s 之比均为0.743, 也远小于经验值的范围。例3 为欠固结土, 按 $E_0 = \beta E_s$ 求得的 E_0 为2.67MPa, 又大于按本文方法计算的 E_0 值。这是由于 $E_0 = \beta E_s$ 未考虑土的欠固结作用。

2. 在例1与例2中, μ_0 均为0.30。如果对 μ_0 用查表取值, μ_0 改为0.35, 则用本文方法算得 E_0 分别为20.6MPa与24.8MPa。该值与 $\mu_0 = 0.30$ 的计算值比较虽有误差, 但误差远小于按 $E_0 = \beta E_s$ 或其他经验公式与表格计算产生的误差。所以, 最好用侧压力仪测定相应应力状态的 μ_0 ; 无试验条件时也可以根据土的物理性质查表取值。

参 考 文 献

- [1] 天津大学等编, 地基与基础, 中国建筑工业出版社, 1978年10月, 第155页。
- [2] 华东水利学院主编, 土工原理与计算, 水利出版社, 1981年, 下册, 第60—70页; 上册, 第179—185页。
- [3] 工程地质手册, 中国建筑工业出版社, 第2版, 1982年9月, 第245, 279, 314, 356页。
- [4] Casagrande, A., The Determination of the Preconsolidation Load and Its Practical Significance, Proc. of 1st ICSMFE, Vol.3, 1936, pp.60—64.
- [5] Schmertman, J.H., The Undisturbed Consolidation Behavior of Clay, Trans., ASCE, Vol. 120, 1955, pp.1201—1227.
- [6] 黄文熙主编, 土的工程性质, 水利电力出版社, 1983年, 第216—217页。
- [7] 华东水利学院主编, 水工设计手册, 第3卷, 结构计算, 水利电力出版社, 1984年, 第160—161页。
- [8] 华东水利学院主编, 水工设计手册, 第1卷, 基础理论, 水利电力出版社, 1983年, 第566页。