



岩土工程分层物理指标加权处理

马祥配¹, 刘福臣²

(1.山东省第八地质矿产勘查院, 山东日照 276826; 2.山东水利职业学院, 山东日照 276826)

摘要: 对分层土层, 根据不同计算量与物理指标、土层厚度相互关系, 推导出平均物理指标加权处理的通用计算公式。详细给出了土的平均密度、桩侧平均摩阻力、水平向平均渗透系数、土的压缩模量当量值、土层等效剪切波速、垂直向平均渗透系数、土的平均比例系数等指标平均值表达式。对同一物理指标, 分析了不同计算方法的误差大小、变化规律。

关键词: 岩土工程; 分层土层; 物理指标; 加权处理

中图分类号: TU 452

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)09-0156-04

Weighted processing for layered physical index in geotechnic engineering

MA Xiang-pei¹, LIU Fu-chen²

(1. The Eighth Geological Mineral Prospecting Institute in Shandong Province, Rizhao 276826, China;

2. Shandong Vocational Polytechnic College of Water Resources, Rizhao 276826, China)

Abstract: A general calculation formula for the average physical index'weighted processing is deduced according to the relationships among the different calculation amount, physical index and soil thickness for layered soil. The paper gives the expressions for the average index such as the average soil severe, average fiction resistance of pile sides, horizontal average permeability coefficients, equivalent value of the soil compression modulus, shear wave velocity of soils, average permeability coefficients in vertical dimension and the average proportion coefficients. This paper also analyzes the error size and changing rule of different calculation methods for the same physical index.

Key words: geotechnic engineering; layered soil; physical index; weighted processing

在岩土工程中, 由于自然地质作用, 土往往是分层的, 各土层的物理性质指标不相同。在进行各种计算时, 要用到整个土层的平均指标。分层土层的平均指标的处理方法比较混乱, 有算术平均值、大值平均值、小值平均值、加权平均值等方法。算术平均、大值平均、小值平均等方法主要适用于同一土层物理性质指标的统计处理; 对于分层土层平均值的处理一般采用加权平均方法, 权函数的大小, 影响到平均指标的大小, 对同一物理指标, 不同的规范采用不同的加权处理方法, 给工程设计造成了很大不便, 有必要对常见平均指标计算方法加以推导、分类、梳理。

设 f_i 为第 i 土层计算量, x_i 为第 i 土层的物理指标, h_i 为 i 土层的厚度, f 为各土层的计算量的综合值。各种计算量有不同的计算公式, 因此分层指标的平均值也有不同的表达式。

1 计算量与物理指标、土层厚度成正比

岩土工程各种计算中, 计算量 f_i 与土的物理指标 x_i , 土层厚度 h_i 成正比关系, 三者满足以下关系:

$$f_i = ax_i h_i \quad (1)$$

式中: a 为常数。

$$f = \sum_{i=1}^n f_i \quad (2)$$

收稿日期: 2013-02-03

作者简介: 马祥配(1979—), 男, 工程师, 主要从事工程地质和水文地质勘察。

设 x_m 为各土层物理指标平均值, 将

$$f = ax_m \sum_{i=1}^n h_i \quad (3)$$

代入式(2), 求得 x_m :

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (4)$$

在工程中, 只要满足式(1)和式(2)条件的, 其物理性质指标平均值可按式(4)进行加权平均处理。这类指标主要有土的平均密度、桩侧平均摩阻力、水平向平均渗透系数等。

1) 土的平均密度。

在土的自重应力计算时, 土的竖向自重应力

$$\sigma_{czi} = \rho_i g h_i = a \rho_i h_i \quad (\text{常数 } a = g) \quad (5)$$

竖向自重应力与土的密度、土层厚度成正比, 且

$$\sigma_{cz} = \sum_{i=1}^n \rho_i g h_i \quad (6)$$

满足式(1)和式(2)的条件, 则分层土的平均密度按下式计算:

$$\rho_m = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (7)$$

2) 桩侧平均摩阻力。

JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》^[1]在桩基负摩阻力计算时, 单桩负摩阻力引起的下拉荷载

$$Q = u \sum_{i=1}^n q_{si}^n h_i \quad (\text{常数 } a = u) \quad (8)$$

式中: q_{si}^n 为中性点以上桩周第 i 层土负摩阻力标准值; u 为桩周长。下拉荷载与负摩阻力标准值、土层厚度成正比, 满足式(1)和式(2)的条件, 中性点以上桩周土层平均负摩阻力标准值按下式计算:

$$q_s^n = \frac{\sum_{i=1}^n q_{si}^n h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (9)$$

3) 水平向渗透系数。

在渗流计算时, 如水流沿着水平方向流动, i 土层的单宽水平渗流量

$$q_{xi} = k_{xi} J_i h_i \quad (10)$$

式中: k_{xi} 为 i 层的水平渗透系数; J_i 为 i 层的水力坡度。由于通过各土层相同距离的水头损失相等, 因此各土层的水力坡降相等, 均为常数 J , 即

$$q_{xi} = J k_{xi} h_i \quad (\text{常数 } a = J) \quad (11)$$

单宽水平渗流量与土的渗透系数、土层厚度

成正比, 且 $q = J \sum_{i=1}^n k_{xi} h_i$

$$(12)$$

满足式(1)和式(2)的条件, 则水平向平均渗透系数按下式计算:

$$k_{xm} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{xi} h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (13)$$

2 计算量与物理指标成反比、与土层厚度成正比

计算量 f_i 与土的物理指标 x_i 成反比, 与土层厚度 h_i 成正比, 即满足以下两式:

$$f_i = a \frac{h_i}{x_i} \quad (14)$$

$$f = \sum_{i=1}^n f_i \quad (15)$$

设 x_m 为各土层物理指标平均值, 将

$$f = \frac{a}{x_m} \sum_{i=1}^n h_i \quad (16)$$

代入式(15), 求得 x_m :

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{x_i}} \quad (17)$$

在实际工程计算中, 只要满足式(14)和式(15)条件的, 其物理性质指标平均值均可按式(17)进行加权平均处理。这类指标主要有土的压缩模量当量值、土层等效剪切波速、垂直向平均渗透系数等。

1) 土的压缩模量当量值。

在地基沉降量计算时, 第 i 土层的沉降量与土的压缩模量成反比, 与土层厚度成正比, 即 $s_i = \frac{\bar{\sigma}_{zi}}{E_{si}} h_i$, $\bar{\sigma}_{zi}$ 为第 i 土层的平均附加应力, 总的沉降量为

$$s = \sum_{i=1}^n s_i \quad (18)$$

满足式(14)和式(15), 土的压缩模量当量值按式(17)计算。由于

$$s = \frac{\bar{\sigma}_h}{\bar{E}_s} \sum_{i=1}^n h_i = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\sigma}_{zi}}{E_{si}} h_i \quad (19)$$

则求得土的压缩模量当量值为

$$\bar{E}_s = \frac{\bar{\sigma}_h \sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\bar{\sigma}_{zi} h_i}{E_{si}}} \quad (20)$$

式中： $\bar{\sigma}_h$ 为整个土层的平均附加应力，该式分子项为总的附加应力面积 $\sum A_i$ ，分母项中的 $\bar{\sigma}_{zi} h_i$ 为*i*土层的附加应力面积 A_i ，即GB 50007—2002《建筑地基基础设计规范》^[2]给出的计算公式。

$$\bar{E}_s = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{E_{si}}} \quad (21)$$

JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》式(5.6.2-3)中的 \bar{E}_s 按厚度加权计算平均压缩模量，另外《岩土工程勘察与设计》^[3]16.3中也有类似做法，显然这种做法是不合理的。

2) 土层等效剪切波速。

土层剪切波速计算时，*i*土层的剪切波传播时间

$$t_i = \frac{h_i}{v_{si}} \quad (\text{常数} a=1) \quad (22)$$

式中： v_{si} 为*i*土层的剪切波速，且 $t = \sum_{i=1}^n (d_i/v_{si})$ ，满足式(14)和式(15)，故土层等效剪切波速按式(17)计算：

$$v_{se} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_{si}}} \quad (23)$$

GBJ 1189《建筑抗震设计规范》^[4]规定，土层等效剪切波速按厚度加权平均处理，显然是不合理的。GB 5011—2001《建筑抗震设计规范》^[5]废除了该项规定，采用式(23)计算土层等效剪切波速。

3) 垂直向平均渗透系数。

在渗流计算时，如水流沿着垂直方向流动，则流经单位面积上的渗流量相等， $q_{z1}=q_{z2}=q_{z3}=\dots=q$ 。第*i*土层的水头损失为 Δh_i ，水力坡降为

$$J_i = \frac{\Delta h_i}{h_i} \quad (24)$$

根据达西定律得到

$$\Delta h_i = q \frac{h_i}{k_{zi}} \quad (\text{常数} a=q) \quad (25)$$

第*i*土层的水头损失与土的渗透系数成反比，与土层厚度成正比，且总水头损失

$$\Delta h = \sum \Delta h_i \quad (26)$$

满足式(14)和式(15)，垂直向平均渗透系数按式(17)计算，即：

$$k_{zm} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{k_{zi}}} \quad (27)$$

3 计算量与物理指标成正比、与土层厚度平方成正比

当计算量与物理指标成正比、与土层厚度平方成正比，分层土的物理指标的平均值可按厚度平方加权处理，权函数的大小应根据具体情况确定。

JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》附录C，采用*m*法计算土的弹性抗力时，深度*z*处的水平抗力

$$\sigma_z = mz\delta \quad (28)$$

式中： δ 为该点的水平位移；第*i*土层总的水平抗力

$$\sigma = \frac{1}{2} m\delta h_i^2 \quad (29)$$

即计算量水平抗力 σ 与土的比例系数*m*成正比，与土层厚度平方成正比，经过复杂的推导，分层土的平均比例系数 \bar{m} 为：

$$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\sum_{i=1}^n h_{i-1} + \sum_{i=1}^n h_i) h_i}{h^2} \quad (30)$$

对于两层土

$$\bar{m} = \frac{m_1 h_1^2 + m_2 (2h_1 + h_2) h_2}{h^2} \quad (31)$$

式(31)即JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》附录C给出的计算公式。

4 计算量与物理指标、土层厚度无明确的函数关系

当计算量与土的物理指标、土层厚度无明确的函数关系时，原则上不能用土层厚度加权平均处理。如GB 50007—2002《建筑地基基础设计规范》在计算地基承载力特征值时，对于分层地基，土的内摩擦角、凝聚力平均值按基底下1倍基

础宽度内加权处理, 只是一种近似处理方法。

5 不同计算方法误差分析

5.1 误差公式

对同一物理指标, 采用不同的处理方法, 其结果并不相同, 绝对误差的大小, 主要取决于不同土层的物理指标和土层厚度。以两层土为例, 给出不同计算方法的绝对误差。

设 x_1, x_2 为两土层的物理指标, h_1, h_2 为两土层厚度, 通过详细的推导, 得到式(4)与式(17)的绝对误差:

$$\Delta = h_1 h_2 (x_1 - x_2)^2 = h_1 (h - h_1) (x_1 - x_2)^2 \quad (32)$$

5.2 误差分析

由式(32)可知, 绝对误差大于零, 即按式(4)计算值大于按式(17)计算值。两土层的物理指标相差愈小, 绝对误差 Δ 愈小, 即按式(4)和式(17)计算结果相差不大, 当 $x_1 = x_2$ 时, 绝对误差 $\Delta = 0$; 两土层的物理指标相差愈大, 绝对误差 Δ 愈大, 两种计算方法计算结果相差愈大。

1) 压缩模量、土层等效剪切波速。

按式(4)计算出的压缩模量偏大, 由此计算的地基沉降量偏小, 偏于不安全的; 按式(4)计算出的土层等效剪切波速偏大, 高估了地基土类别, 也是不安全的, 在工程设计中应严格按式(21)和(23)计算压缩模量、土层等效剪切波速。

2) 渗透系数。

对于成层土, 按式(13)计算值大于按式(27)计算值, 即水平向平均渗透系数大于垂直向平均渗透系数。如果各土层的厚度大致相近, 而渗透性却相差悬殊时, 水平向平均渗透系数取决于最透水土层的厚度和渗透性; 而垂直向平均渗透系数取决于最不透水土层的厚度和渗透性。即水平向平均渗透系数主要由透水性强的土层控制, 垂直向平均渗透系数主要由透水性弱的土层控制^[6]。

6 结论

1) 当计算量与物理指标、土层厚度成正比

时, 物理性质指标平均值可按式(4)进行加权平均处理, 土的平均密度、桩侧平均摩阻力、水平向平均渗透系数计算属于这种类型。

2) 当计算量与物理指标成反比, 与土层厚度成正比时, 物理性质指标平均值可按式(17)进行计算, 土的压缩模量当量值、土层等效剪切波速、垂直向平均渗透系数计算属于这种类型。

3) 当计算量与物理指标成正比、与土层厚度平方成正比时, 土的物理指标的平均值可按厚度平方加权处理, 权函数的大小应根据具体情况确定。土的平均比例系数计算属于这种类型, 当土层为两层时, 按式(31)进行计算; 当土层为多层时, 按式(30)进行计算。

4) 当计算量与土的物理指标、土层厚度无明确的函数关系时, 原则上不能用土层厚度加权平均处理。GB 50007—2002《建筑地基基础设计规范》^[2]在计算地基承载力特征值时, 对于分层地基内的内摩擦角、凝聚力平均值按基底下1倍基础宽度内加权处理, 只是一种近似处理方法, 是不严密的。

5) 按式(4)计算值大于按式(17)计算值。两土层的物理指标相差愈小, 绝对误差 Δ 愈小, 两种计算方法计算结果相差愈小; 两土层的物理指标相差愈大, 绝对误差 Δ 愈大, 两种计算方法计算结果相差愈大。在工程设计中应严格按式(21)和(23)计算当量压缩模量、土层等效剪切波速。

参考文献:

- [1] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].
- [2] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S].
- [3] 高大钊. 岩土工程勘察与设计[M]. 北京: 中国交通出版社, 2002.
- [4] GBJ 1189 建筑抗震设计规范[S].
- [5] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S].
- [6] 刘福臣, 林世乐, 黄怀峰. 地基及基础处理技术与实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.