

# 软弱下卧层的验算方法探讨

孔祥国

(长江大学城市建设学院, 湖北荆州 434025)

**【摘要】** 根据建筑地基基础设计规范, 分析了软弱下卧层强度验算中存在的问题, 并对不同情况下软弱下卧层强度验算方法进行了探讨, 提出了一些改进方法。

**【关键词】** 软弱下卧层; 应力扩散; 地基承载力验算

**【中图分类号】** TU 470

## Research on Checking Method for Soft Substratum

Kong Xiangguo

(Urban Construction Academy, Yangtze University, Hubei Jingzhou 434025 China)

**【Abstract】** According to the national standard of the design of building foundation, some question of the bearing capacity checking method for soft substratum are analyzed, meanwhile, suitable methods are put forward.

**【Key Words】** soft substratum; spread of stresses; bearing capacity checking

### 0 引言

软弱下卧层的土具有“三高”“三低”特性, 即土的天然含水量高, 天然孔隙比高, 压缩性高, 而土的抗剪强度低, 承载力低, 渗透性低<sup>[1]</sup>。基础持力层下若有这种土层, 基础设计中往往要作软弱下卧层承载力验算。对软弱下卧层强度验算, 《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)作了如下规定: 要求基础传递到软弱下卧层顶面的附加应力和上覆土的自重应力之和不超过软弱下卧层的承载力, 即:

$$P_z + P_{cz} \leq f_{az} \quad (1)$$

式中:  $P_z$  为相应于荷载效应标准组合时, 软弱下卧层顶面处的附加应力值, kPa;  $P_{cz}$  为软弱下卧层顶面处的自重应力值;  $f_{az}$  为软弱下卧层顶面处经深度修正后的地基承载力特征值, kPa。

关于附加应力  $P_z$  的计算, 规范根据大量的试验研究并参照双层地基中附加应力分布的理论解答, 提出了按扩散角原理的简化计算方法, 即当持力层与软弱下卧层土的压缩模量比值  $E_{s1}/E_{s2} \geq 3$  时, 假定基底处的附加应力向下传递按某一角度  $\theta$  向外扩散, 并均匀分布在较大面积的软弱下卧土层上, 由基底与软弱下卧层顶面处扩散面积上的附加应力相等的条件, 得出了附加应力  $P_z$  的表达式<sup>[2]</sup>:

矩形基础:

$$P_z = \frac{lb(P_k - \gamma_m d)}{(l + 2z \tan \theta)(b + z \tan \theta)} \quad (2)$$

条形基础:

$$P_z = \frac{b(P_k - \gamma_m d)}{b + 2z \tan \theta} \quad (3)$$

式中:  $b$  分别为条形和矩形基础底面宽度, m;  $l$  为矩形基础底面长度, m;  $\gamma_m$  为基础埋深范围内土的加权平均重度(地下水水位以下取浮重度)  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $d$  为基础埋深, m;  $z$  为基础底面至软弱下卧层顶面的距离, m;  $\theta$  为地基压力扩散角;  $P_k$  为基底平均压力设计值, kPa。

可见, 软弱下卧层强度能否满足设计要求, 主要与持力层及下卧层的压缩模量比, 持力层的厚度, 基础尺寸及埋深有关, 同时也与自身的厚度、性质及所受荷载类型等因素有关。在工程实际运用过程中, 遇到的问题往往复杂, 若处理不慎, 就会出现偏差过大或计算错误, 造成事故隐患, 甚至酿成严重后果。

### 1 持力层厚度的影响

建筑物基础作用于地基土上的荷载, 是通过土颗粒接触点传递的, 随着深度的增加, 荷载分散到更大的面积上, 因而作用于单位面积上的附加应力就越来越小。对于下覆有软弱层的地基(双层地基), 在软弱层顶面处的附加应力  $P_z$  比均质地基的要小, 即产生应力扩散现象, 其扩散程度主要决定于持力层本身的强度与厚度。

1)  $z/b < 0.25$  的情况, 即持力层相对基础宽度较薄

当地浅层有一定厚度的硬壳层, 而基础尺寸相对较大时, 常会出现这种情况, 《规范》规定地基压力扩散角按  $\theta=0$  计, 即不考虑应力扩散作用。

2)  $z/b > 0.5$  的情况, 即持力层相对基础宽度较厚

当持力层厚度相对于基础宽度较大时, 《规范》规定  $\theta$  取值不变, 即当持力层厚度相对较大时,  $\theta$  的取值按  $z/b=0.5$  考虑。试验研究证明: 当基底压力增加到一定值后, 传至软弱下卧层顶面的压力将随之迅速增加, 即  $\theta$  角迅速降低, 直到持力层剪切破坏时的  $\theta$  值为最小, 实际发生破坏时,  $\theta$  角一般为  $6^\circ \sim 25^\circ$ , 最大也不超过  $30^\circ$ , 所以计算时  $\theta$  角取值一般不超过  $30^\circ$  [3]。当满足了软弱下卧层承载力的验算公式, 实际上也就保证了上覆持力层不会发生剪切破坏, 说明基础尺寸设计是合适的; 否则应考虑增大基础底面积, 或改变基础埋深, 甚至改用地基处理或深基础设计地基基础方案。

## 2 下卧层有双层及多个软弱夹层的情况

根据现行规范规定, 在确定压力扩散角  $\theta$  时, 当上、下两层土的压缩模量之比  $E_{s1}/E_{s2} \geq 3$  时, 扩散角才能按规范取值, 而  $E_{s1}/E_{s2} < 3$  时, 规范未作明确说明, 有些设计人员就根据  $z/b$  的比值近似按  $E_{s1}/E_{s2}=3$  来确定  $\theta$  角, 或者干脆不考虑应力扩散, 实际上, 这两种做法都不可取。当  $E_{s1}/E_{s2}=1$  时, 地基可视为均质土, 不存在软弱下卧层强度验算问题; 而地基压力扩散角  $\theta$  是  $E_{s1}/E_{s2}$  的增函数 [4], 故  $E_{s1}/E_{s2} < 3$  时, 压力扩散角  $\theta$  应介于  $E_{s1}/E_{s2}=1$  和  $E_{s1}/E_{s2}=3$  对应的扩散角之间。可见, 当上下两层土的压缩模量之比  $E_{s1}/E_{s2} < 3$  时, 上覆土应力扩散能力比  $E_{s1}/E_{s2} \geq 3$  时的情况差些。按  $E_{s1}/E_{s2}=3$  来确定  $\theta$  角,  $\theta$  角取值偏大, 不安全; 不考虑应力扩散, 取  $\theta$  角为  $0^\circ$ , 又太保守, 这样确定的基础尺寸过大, 会造成很大的浪费。当  $E_{s1}/E_{s2} < 3$  时, 若  $z/b$  的比值在  $0 \sim 0.5$  之间,  $\theta$  角可以近似取  $0^\circ$ , 计算偏于安全; 若  $z/b$  的比值大于  $0.5$  时, 应采用双层地基附加应力分布的理论来计算附加应力  $P_z$ , 或者通过实验手段确定压力扩散角才较合理 [5]。

当下卧层含有两层软土(见图1)时, 应先验算上层软土, 满足公式(1)后, 再将上层软土顶面作为新基底, 此层顶面的附加压力  $P_{z1}$  作为新基底附加压力, 上层软土厚度  $Z_2$  作为新基底至软弱下卧层顶面的距离, 新基底宽  $b_1 = b + 2z_1 \tan \theta_1$ , 再根据比

值  $E_{s2}/E_{s3}$  (一般在  $1 \sim 3$  之间) 及  $Z_2/b_1$  的值来确定  $\theta_2$ , 而后进行第二个软弱下卧层的验算, 依此类推。工程中很多人会忽视第二个及多个软弱下卧层的验算, 这样就存在事故隐患。

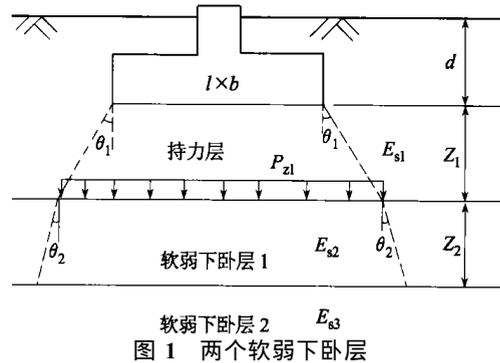


图1 两个软弱下卧层

## 3 偏心荷载情况

目前, 规范中提供了在均布荷载下软弱下卧层的验算方法, 对于偏心荷载作用则是取基底平均压力值按均布荷载情况来简化计算的, 这种简化计算势必影响基础设计的安全性。笔者认为, 可以参照规范对建筑物地基承载力的要求:

$$P_k \leq f_a, \quad P_{kmax} \leq 1.2f_a \quad (4)$$

进行验算。即对于偏心荷载作用下软弱下卧层的验算, 要求满足下列公式:

$$\bar{P}_z + P_{cz} \leq f_{az}, \quad P_{zmax} + P_{cz} \leq 1.2f_{az} \quad (5)$$

式中:  $P, P_{zmax}$  为相应于荷载效应标准组合时, 软弱下卧层顶面处附加应力的平均值和最大值, 其它符合意义同前。

## 4 相邻基础的影响

两个相邻基础靠得较近, 而下覆又有软弱夹层时, 考虑应力扩散效应, 软弱下卧层该如何验算, 规范并没有作明确规定。有的设计人员不考虑相邻基础的影响, 直接按单独基础验算下卧层, 也有设计人员考虑基础间的应力叠加影响, 采用下式:

$$P_{cz} + \sum P_{zi} \leq f_{az} \quad (6)$$

验算下卧层承载力, 这两种计算结果相差较大, 有时甚至会出现相反的结论。前一种算法没有考虑相邻基础的影响, 显然不合适, 存在事故隐患; 后一种方法考虑了应力叠加的影响, 但又过高的估计了应力重叠的影响。当基底压力小于地基承载力时, 地基土基本处于弹性变形阶段, 而根据双层弹性地基的理论解答, 基础传到软弱下卧层顶面的附加应力不像规范假定的那样, 仅在扩散角  $\theta$  的压力扩散面积上均匀分布, 在扩散区外为  $0$ , 而是不均匀地分布在一个相当大的范围内。有关试验研究资料表明在弹

性阶段, 硬壳层具有类似于扩展基础分布荷载的能力, 能将上部荷载传递到较大的范围, 从而降低软弱下卧层顶面的附加应力值。因此直接用公式  $P_{cz} + \sum P_{zi} \leq f_{az}$  验算有相邻基础影响的软弱下卧层时太保守, 很不经济, 会使设计的基础尺寸过大, 甚至出现无论怎样调整, 也不能满足规范要求的情况。根据经验, 当相邻基础距离较近, 按规范计算的软弱下卧层顶面处附加应力产生重叠时, 可以将相邻基础压力扩散后的净面积作为计算软弱下卧层顶面处附加应力分布的面积<sup>[9]</sup> (见图 2)。在式(1)的验算中:

$$P_z = \sum (P_{0i} \times A_i) / \sum A_{i\text{净}}$$

$$\sum A_{i\text{净}} = A_1 + A_2 - A_{12}$$

式中:  $A_1$  为基础 1 对应的扩散面积,  $A_2$  为基础 2 对应的扩散面积,  $A_{12}$  为两基础产生的应力重叠面积,  $P_0$  为基底附加压力, 实践表明, 效果颇佳。

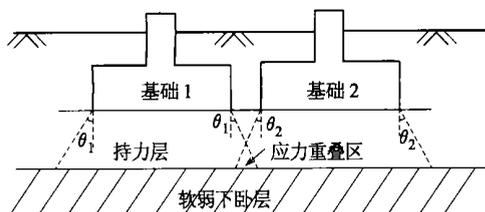


图 2 软弱下卧层顶部应力叠加

## 5 结 论

关于软弱下卧层的验算, 工程实践中碰到的问题往往比较复杂, 比较具体, 而现行规范中又没有作明确规定, 因此在设计过程中, 需要设计人员正确理解规范, 掌握有关的知识, 做正确的判断, 选用较为合理的计算方法就很重要了, 根据多年的实践经验, 本文所述的方法可在设计中采用。

## 参 考 文 献

- 1 梁 静. 软弱下卧层地基评价的几个问题. 土工基础, 2001, 12(4): 43~45
- 2 GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范
- 3 赵明华. 土力学与基础工程. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003
- 4 姬深堂, 胡向奎. 地基软弱下卧层强度验算的讨论. 煤碳工程, 2001(7): 59~60
- 5 郑敏杰, 张殿竹. 软弱下卧层验算中应注意的问题. 安徽建筑, 1998(4): 52~53
- 6 刘之春, 蒋永生. 软弱下卧层地基承载力验算应注意的问题. 建筑技术, 2002, 12(33): 921~922

收移日期: 2004-04-02

(上接第 140 页)

同程度的变化, 但损失了部分纯摩擦性能。从试件剪切变形中的局部破坏特征分析, 以上变化很可能是由于土工织物局部断裂引起的。只是由于连续增强区的存在, 表现不突出而已。

## 4 结 论

本文用三轴剪切试验证实了加筋尾矿砂变形过程中存在水平连续增强区域, 得出了和文献[4]一致的研究结果, 即在土工织物的铺设层数较多的条件下, 试件变形过程中产生数个连续增强带。连续增强区的存在有效地抑制了剪切变形的进一步发展, 使加筋土结构的宏观强度增长特征有所改变。研究连续增强区出现的应变特征点及发展规律对弄清加筋土结构的变形、破坏机理相当重要。

## 参 考 文 献

- 1 吴雄志, 赵乃茹. 加筋土强度模型与应力—应变特性研

- 究. 岩土工程学报, 1992, 14(增2): 80~87
- 2 保华富, 等. 土工格栅加筋碎石土试验研究. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 217~221
- 3 吴景海, 王德群, 陈 环. 土工合成材料加筋砂土三轴试验研究. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 199~204
- 4 Siddiquee M S A, et al. Numerical simulation of bearing capacity characteristics of strip footing on sand. Soil and Foundations, 2000, 39(4): 93~109
- 5 王凤江. 加筋尾矿砂的三轴试验研究. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(5): 618~620
- 6 黄晓明, 朱 湘. 公路土工合成材料应用原理. 北京: 人民交通出版社, 2001, 31~37
- 7 陈忠达. 公路挡土墙设计. 北京: 人民交通出版社, 2000, 129~132

收稿日期: 2004-03-08