

文章编号: 1000-7598-(2007)10-2183-05

格栅状复合地基压缩模量的计算

吴保全^{1,2}, 李天斌¹

(1. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059; 2. 河南省诚城岩土工程有限公司, 郑州 450002)

摘要: 由于深层搅拌桩复合地基压缩模量与桩端土压缩模量、桩尺寸、荷载等参数相关性差, 所以准确计算复合地基压缩模量的难度较大。根据格栅与土共同作用的原理, 推导出模量的计算式。通过高层建筑结构地基静载荷试验的资料对比, 证实了压缩模量的计算式是适宜的。

关键词: 土围压; 隔栅; 复合地基; 压缩模量; 计算式

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Calculation of compressive modulus of grid structure -composite foundation

WU Bao-quan^{1,2}, LI Tian-bin¹

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of technology, Chengdu 610059, China;

2. Henan Chengcheng Corporation of Geotechnical Engineering, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The formula for deep-mixing pile composite foundation on the code is bad with correlation of the geologic strata parameter (such as soil modulus on the end of pile foundation, pile foundation size, subsidiary stress etc). So, it is more difficult to accurately calculate modulus of grid composite foundation. Based on the interaction of grid and soil, a formula about compressive modulus of grid composite foundation is deduced. By comparing the field static load test results of engineering of high-rise building, it is proved that the formula is reasonable for calculating for grid foundation for high-rise buildings.

Key words: confining pressure about soil; grid; composite foundation; compressive modulus; formula

1 引言

格栅结构地基是复合地基的特种形式之一。它是由地基土和格栅结构组成。地基土被均匀的格栅分割成体积、垂直截面积相等的土柱, 土柱与土柱之间由格栅包围。格栅结构由等深度的深层搅拌桩首尾相割连接而成。

通常的深层搅拌桩复合地基多以独立单桩型式和地基土构成, 地基压缩模量采用桩的面积置换率与桩的压缩模量之积加上土的面积置换率与土的模量之积计算。然而, 实际施工、检测资料表明, 这种计算方式存在着较大的地基压缩模量计算误差。

分析模量计算值误差的根本原因后得知, 一方面是由于复合地基模量计算公式原理引起的误差, 另一方面是没有考虑地基模量关键影响因素等所致。

复合地基模量计算很复杂, 就桩与土之间的力学关系而言, 桩和桩间土在水平方向上不仅存在并联的力学关系, 桩和桩端土尚在垂直方向上存在串联的力学关系。而通常的模量计算公式是以两者间的并联关系为基础推导的, 只是桩和桩间土的应力应变规律的反映, 没有表征桩和桩端土之间的串联力学属性。

桩和桩端土串联力学关系对地基模量计算的影响很大。大量文献研究证实: 复合地基模量不仅受控于桩的材料模量, 更主要受制于桩端土的压缩性大小和格栅结构尺寸以及附加应力、甚至地基的整体刚度等因素。

通过把深层搅拌桩布置为格栅结构形式植入地基土中的研究, 发现该种地基结构对桩间土的作用不仅起到三轴强度试验中的围压效应——限制了地基土的侧向变形, 并籍此围压效应减少地基的差异沉降和沉降总量; 而且, 格栅结构地基整体刚度

比水泥土单桩地基的刚度大, 因此, 其模量计算继续沿袭传统模量计算公式显然是不适宜的。

本文依据压缩模量的物理定义和考虑关键因素的影响, 在桩和桩端土串联力学模型基础上, 应用弹性理论和相应的条件推导出有一定适应性的、涵盖因素广泛的格栅结构及格栅结构地基的压缩模量计算式, 其合理性和适宜性在原型工程的试验中得到证实。

2 影响地基模量关键因素分析

规范和大量的文献均采用桩和桩间土模量的面积加权方式来计算复合地基压缩模量^[1,2], 其表达式为

$$E = mE_p + (1 - m)E_s \quad (1)$$

式中: E 为复合地基的压缩模量; m 为面积置换率; E_p 为桩本身的压缩模量; E_s 为桩间土的压缩模量。

把桩和土看作单元体时, 我们知道, 桩和土之间存在两种力学关系, 即桩和桩间土是并联的, 桩和桩端土是串联的。只要复合地基受到相对应的荷载作用, 两种力学关系同时存在。但是, 式(1)是采用材料力学的平截面假设及在刚性基础下复合地基模量的计算公式, 其模量计算仅仅采用桩和土力学关系组合中的桩和桩间土并联模型^[3], 没有考虑桩和桩端土串联力学关系。这种单一力学关系的实例几乎没有, 而且式(1)的 E 计算结果往往比实际静载荷试验的数据大, 最终导致地基沉降量计算值准确性低的结果。

可见, 将桩和桩间土在基础内所占的面积权重计算 E_p , E_s 对 E 的贡献, 计算虽然简便, 然而理论上却过于简化, 桩和桩间土的应力应变关系处理粗糙, 式(1)没有涵盖地基模量众多影响因素。大量工程实践表明, 复合地基和格栅结构的模量受控于: (1) 复合地基中桩的尺寸效应; (2) 桩端部土抵抗桩的位移效应; (3) 地基基础刚度影响; (4) 桩和地基土的应力分担比等关键因素。

尺寸效应: 在工程设计计算中, 如若两个复合地基中桩本身抗压强度相同即 E_p 完全相等, 桩深度不一致, 且桩深度范围内的地基土压缩模量 E_s 、桩的面积置换率 m 等相同, 依据式(1)计算得出的两个复合地基压缩模量完全相同。但是, 静载荷试验结果则表明, 桩长较长的地基压缩模量值高于桩长短的地基模量值。同样, 桩横截面积的大小也对地基压缩模量值有同样影响, 即桩横截面积大的, 地基压缩模量值相对小的而言比较高。

抵抗桩位移效应: 如若桩的抗压强度相同, 即 E_p 完全相等, 桩深度一致, 桩深度范围内地基土的压缩模量 E_s 及面积置换率 m 等相同的两个复合地基, 其中一个桩端部落在土压缩模量为 E_1 的天然地层上, 另一个落在土压缩模量为 E_2 的地层上, 并且 $E_1 > E_2$, 那么依据式(1)计算出的模量值也同样完全相同。静载荷试验结果则表明, 桩坐落于压缩模量值 E_1 土层上时的复合地基模量值要高出模量为 E_2 的土层许多。

上部建筑荷载 Q 形式、大小是桩和地基土的应力分担比的主控因素, 而应力分担比是衡量桩和地基土各自模量给予复合地基模量所作贡献的比值, 比值的不同对模量的影响有相应的变化^[4], 即地基和桩的模量大小不同。

地基的整体刚度: 地基的整体刚度越高, 桩与土间的相互作用效应越明显, 复合地基的附加应力向持力层的传递作用增加, 端部土承载力发挥的就越充分。

3 格栅结构地基模量计算式的推导

E 既然按照式(1)计算存在诸多缺陷, 而且受一些关键因素的制约, 由此计算结果得出的地基最终沉降量与实际检测的数据相去甚远是绝对的。为了弥补式(1)计算时的偏差, 应对该式进行修正, 并满足格栅结构地基模量计算的要求。

3.1 基本假设

(1) 结构和结构端部土的串联关系如图1。图中, AB 面以上为格栅结构单元体, 结构本身模量为 E_p , 结构顶部分担的应力为 p , 结构间土侧摩阻力为 q , 作用在 AB 面上的附加应力为 F_1 。 AB 面以下为单元土体, 其压缩模量为 E_2 , F_2 为单元土体对 AB 面的端阻力。

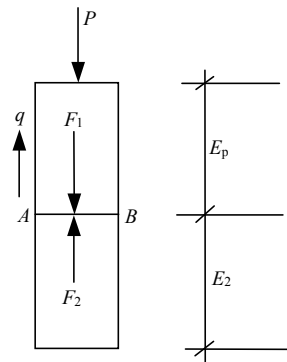


图1 应力分析图

Fig.1 The analytical scheme of stress on pile and soil

(2) 在 AB 面应力达到平衡条件下, $F_1 = F_2$; 结构单元体的位移 S_1 等于其端部土的位移 S_3 , 即 $S_1 = S_3$; 同时, $F_1 = (p - q)$ 且在结构单元内均匀应力分布。

(3) 由于结构单元体的径向受到土以及相邻结构单元体反作用力的约束, 径向变形甚小, 可以忽略不计, 本文中仅考虑结构垂向荷载效应引起的垂直变形。

(4) 结构单元体与土之间保持弹性接触, 并不考虑相邻桩的挤压限制。把结构单元和端部土单元视为等效、均质、各向同性、线弹性体, 且依据弹性理论计算地基中各层的附加应力。

(5) 将格栅结构均匀地布置于天然地基土中, 视格栅结构为天然地基土中一种与土体紧密结合的、均匀的结构体。同时把格栅结构地基视为一种新的、等效的天然地基。设计布置桩和施工时应该按照这一规定执行, 实施格栅结构时, 不因人为因素介入而失去结构的均匀性。

3.2 技术思路

为发扬传统的精髓, 因此继续沿用《建筑地基基础设计规范》、《建筑地基处理技术规范》中沉降变形计算方法, 并结合本文推导的格栅结构地基模量计算式, 既实现了建筑工程已经积累的实践经验的充分应用, 又使得计算结果的精度大幅提高、计算过程简约化、设计易于理解和掌握。模量计算式推求的技术思路如下:

(1) 在并联力学关系模量计算公式 (1) 的基础上, 分析、简化结构和结构端部土的串联力学关系, 并根据工程结构力学中的等效原理, 把结构间土侧摩阻力视为结构中的等效力系。

(2) 建立结构和结构端部土的串联力学模型, 推导出结构模量的计算式, 并将其代入地基模量计算式 (1) 中, 推导出新的地基模量计算式。

(3) 明确格栅地基和格栅结构压缩模量的物理意义及区别, 根据结构本身的变形和位移关系以及位移和结构端土变形关系等, 利用线弹性理论推求结构模量计算式。

(4) 对整个地基进行验算时, 格栅结构地基沉降变形的验算深度、结果必须满足规范相关规定。

(5) 采用已经竣工的工程实例、试验数据、观测结果予以验证各个计算式的适宜性、假设内容的合理性等。

3.3 格栅结构模量计算式的推导

在推导结构地基模量计算式之前, 为了更加明确推导过程的物理意义, 应首先确切了解结构、结

构地基等模量的各自物理含义。

格栅结构地基模量是复合地基对变形的抵抗能力。该种地基由结构和结构间土共同组成, 故模量应为结构和结构间土的模量根据比例联合贡献。

格栅结构模量是格栅结构对变形 S 的抵抗能力。而结构在分担的荷载效应 p 的作用下, 产生总的变形 S 。载荷试验揭示: S 由结构本身压缩变形 S_1 和结构位移 S_2 等构成

$$S = S_1 + S_2 \quad (2)$$

因此, 若是结构模量为 E_{sp} , 则有

$$E_{sp} = p/s \quad \text{或} \quad s = p/E_{sp} \quad (3)$$

在 AB 面处, 结构和结构端部土等达到应力平衡, 该面上附加应力 $F_1 = (p - q)$ 在结构中均匀分布 (q 为土侧摩阻力, 按照规范计算), 若格栅结构本身模量为 E_p , 则有

$$E_p = (p - q)/S_1 \quad \text{或} \quad S_1 = (p - q)/E_p \quad (4)$$

AB 面以下土压缩变形量为 S_3 , 且 $S_2 = S_3$, 土模量为 E_2 时, 则

$$E_2 = (p - q)/S_2 \quad \text{或} \quad S_2 = (p - q)/E_2 \quad (5)$$

将式 (3) ~ 式 (5) 代入式 (2), 得到:

$$\frac{1}{E_{sp}} = \left(\frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_2} \right) \left(\frac{p - q}{p} \right) \quad (6)$$

式中: q 为结构间土侧摩阻力; p 为结构体顶部分担的应力, $p = mQ/n$, 其中 Q 为高层建筑传至地基的总荷载, n 为组成格栅结构地基的总桩数。

令 $K_1 = p/(p - q)$, $K = E_p/(E_p + E_2)$, 本文称 K 为结构端部天然土模量折减系数, 与结构和土模量比相关, 则由式 (6) 可得到:

$$E_{sp} = KK_1 E_2 \quad (7)$$

从式 (7) 可以看出, 结构模量 E_{sp} 完全与地基的关键因素相关, 而且计算式简单、明晰, 采用工程勘察地基土压缩模量和建筑荷载值即可得到结构模量 E_{sp} 。但是, 随着结构竖向和水平向的刚度及整体性等不同, 式 (7) 中 K 有如图 2 所示的变化, 但是, 一般情况下对于 K 有两种认识。

第 1, 通常情况下, 桩 (例如, 钻孔灌注桩类) 的整体性优良并且刚度大, E_p 比 E_2 大 2 个数量级以上, $E_2/E_p \geq 0.1$, $K \geq 90\%$, $S_1 \approx 0^{[5]}$, 假设 $K \approx 1.0$, 模量计算式 (7) 简化为

$$E_{sp} = K_1 E_2 \quad (8)$$

由式(8)可知, 桩或结构只是传递附加应力的构件。对于模量起控制作用的不再是桩或结构本身而应该是结构的几何尺寸、端部土压缩模量等。也就是说结构模量 E_{sp} 应为结构侧面土和端部土的压缩模量的具体映射, 而不应为结构材料模量 E_p 的表征。而且, 以上结论经常被刚性桩复合地基模量计算所采用。

第 2, 单桩型深层搅拌桩等地基结构的整体性一般较差, 且刚度较小, E_p 比 E_2 小于 2 个数量级, $E_2/E_p < 0.1$, $K < 90\%$, 见图 2, 继续采用 $K \approx 1.0$ 显然不适应, 故此, K 宜采用计算值。

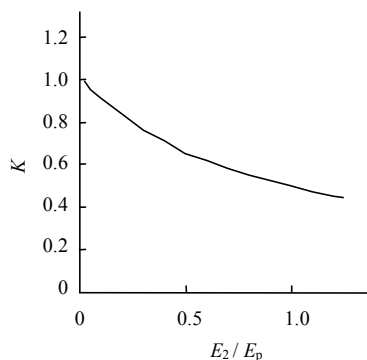


图 2 模量比 E_2/E_p 与折减系数 K 的关系
Fig.2 The relation of modular ratio and K

水泥土桩的 E_p 按照规范取值, 即 $E_p = 100 \sim 120 f_{cu}$ (f_{cu} 结构抗压强度)。本文认为: 水泥搅拌单桩复合地基端部土模量折减系数应该按照计算取 K 值; 而格栅结构地基由于地基的整体结构刚度大于单桩型复合地基的结构刚度, 是否采用 $K \approx 1.0$, 使计算过程进一步简化, 须由实例计算比较得出。

3.4 格栅结构地基的模量

从上述结构模量推导过程可知, 结构模量 E_{sp} 继续采用结构本身的模量 E_p 显然不适宜^[5], 所以, 格栅结构地基模量 E 的计算式(1)中 E_p 应为 E_{sp} , 故此, 将式(7)代入式(1)即可得到格栅结构地基模量的计算式:

$$E = mKK_1E_2 + (1-m)E_s \quad (9)$$

4 实例校验

4.1 工程概况

实际工程的沉降计算中, 地基模量的计算关系到沉降量计算值预测性是否能够对工程实施过程起

到指导性作用, 为验证推导过程的实践特性以及和工程沉降结果的吻合度。笔者在 1994~2002 年选择河南省金贸 32 层高层等数栋公寓地基作为上述思路校验对象。其一简要工况如下:

(1) 公寓为地上 32 层、地下 2 层、基础采用箱型基础、基础埋深 8.2 m、高度 109 m、框剪结构的高层建筑。

(2) 基础埋深 8.2 m 以下土的物理力学参数见表 1。强度结构 f_{cu} 与结构模量 E_p 测试结果见表 2。

表 1 土层物理力学参数
Table 1 Parameters of soils

层号	土名	e	E_{1-2} / MPa	f_k / kPa
2	粉细砂	0.67	15.9	135
3	粉土	0.68	8.0	130
4	粉土	0.58	13.6	200
5	粉细砂	0.58	18.1	240
6	粉土	0.56	17.0	256

表 2 结构强度 f_{cu} 与模量 E_p 测试结果
Table 2 The test results of strength and modulus

强度 f_{cu} / MPa	模量 E_p / MPa	强度 f_{cu} / MPa	模量 E_p / MPa
1.20	168	4.0	491
2.10	313	5.6	686
3.0	376	6.0	762

(3) 公寓垂直沉降变形要求小于 30 mm, 倾斜变形不大于 0.001, 比邻建筑间距只有 30 cm, 严格控制差异沉降量。

(4) 格栅结构复合地基承载力设计要求值为 500 kPa。

4.2 格栅结构地基模量的计算

(1) 格栅结构的桩径 410 mm, 桩长 3.5 m, 水泥掺入量 60 kg/m。格栅结构处理的地层为第 2, 3 层粉细砂、粉土, 土承载力 $f_k = 130 \sim 135$ kPa。格栅端部地层为第 4 层粉土, 其承载力特征值为 200 kPa 且满足各种验算要求。

(2) 格栅结构的置换率 $m = 0.436$, 结构轴线距离为 1.2 m × 1.2 m, 桩间距 400 mm。单桩承载力特征值 $R_a = 136$ kN。结构顶部试块的抗压强度均值 5.6 MPa。

(3) 不同 K 的模量计算比较。表 3 中 E_{sp} 按照式(7)计算, 分别为 $K = 1.0$ 和 $K = 0.98$ 时的值, E_p 为表 2 中的值, 地基压缩模量 E_1 为式(1)计算值, E_2 为式(9)计算值, 地基压缩模量 E 为静载荷试验平均值。

表 3 格栅结构地基模量比较表
Table 3 Comparison of moduli of foundation

K	K_1	E_{sp}/MPa	E_p/MPa	E_1/MPa	E_2/MPa	E/MPa
1.0	12.36	168	686	253	82	84.2
0.98	12.36	165	686	253	80.9	84.2

由上述计算及检测结果可知, K_1 在地基荷载 Q 、桩数量 n 、置换率 m 、桩长度 L 、地基土物理力学参数等确定情况下是定值。 K 在结构刚度较大时, $K \approx 1.0$, 计算较为简单, 且 E_2 和 E 的误差为 2.6%。取 K 计算值时, E_2 和 E 的误差为 3.9%。但是, 两种 K 情况下的 E_{sp} 计算值相差很小, 误差只有 1.8%。可见, 格栅结构地基 E_2 和现场测试值之间的误差很小, 在工程误差范围内, 所以, 此种地基的 E_{sp} 按照式 (8) 计算是适宜的。虽然地基中单桩强度低、刚度不大, 但是组合后的地基整体刚度很高, 和混凝土桩等地基有接近的刚度。此时, 可以不考虑格栅结构本身的压缩模量 E_p 的试验测试工作, 实现合理地简化计算、测试等步骤。

(4) 静载荷试验

现场实施的 12 组静载荷试验揭示: 格栅结构地基承载力比例极限值 $Q = 510 \text{ kPa}$, 大型静载荷试验在试验极限荷载条件下, 试验曲线上均没有拐点。试验点的最大沉降量 8.39 mm, 试验点之间最大倾斜率为 0.000 12, 最大的差异沉降量为 1.82 mm。实测地基模量 $E = 83.9 \sim 85.8 \text{ MPa}$, 均值为 84.2 MPa。与式 (9) 计算结果极为接近, 即 $E_2 \approx E$, 但是与式 (1) 计算值 E_1 相差甚大, 而且强度值越大, 相差越大。

试验值 E 略高于计算值 E_2 , 两者相差 1.5 MPa, 这是由于实验承压板宽度小, 影响深度有限所致。

(5) 沉降观测

该工程 1994 年 7 月开始施工到 1995 年 7 月竣工, 施工期间的沉降量 9 mm, 装修期间沉降量 1 mm, 2005 年 6 月累计沉降量 11 mm, 各角点之间没有差异沉降。

4 结 语

(1) 通过本文的研究, 得出格栅状复合地基压

缩模量的计算公式: $E = mKK_1E_2 + (1-m)E_s$ 。这一计算式在随后的工程中经过检验和验证, 并在随后诸多的工程设计中已被证实是适用的, 计算的结果满足工程要求并对于工程的总沉降量的估算误差有减少作用。

(2) 影响格栅状复合地基压缩模量的关键因素在本文推导计算公式 (9) 中得到充分考虑, 而且, 计算式比较简单, 实效性较好。

(3) 由水泥土构成的复合地基整体刚度与高强度的、独立承担荷载钢筋混凝土桩的地基刚度间的比较是今后研究的重点。

(4) 在公式 (9) 的推导中同样采用相应的假设, 目的是使得模量计算简化、实用。所以, 文中提出的概念与方法在理论上应该继续完善, 这里仅是这种类型地基模量计算研究的开端而已, 考虑到其在工程应用中误差影响可以忽略不计, 加之这种类型的地基在高层建筑中使用尚待普及, 所以值得深入探讨。

参 考 文 献

- [1] JGJ79-2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [2] 曾国熙, 卢肇钧, 等. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993, 6: 399-422.
- [3] 张士乔, 龚晓南, 裘慰伦, 等. 水泥土桩复合地基复合模量计算[A]. 第三界地基处理学术讨论会论文集[C]. [s. l.]: [s. n.], 1992, 6: 140-143.
- [4] 秦然, 陈征宙, 董平. 水泥土桩复合地基桩土应力比的一种解析算法[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 96-98.
QIN Ran, CHEN Zheng-zhou, DONG Ping. Analytical calculation on pile-soil stress ratio of cement-soil foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(1): 96-98.
- [5] 闫明礼, 王名山, 闫雪峰, 等. 多桩型复合地基设计计算方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2003, (3): 352-355.
YAN Ming-li, WANG Ming-shan, YAN Xue-feng, et al. Study on the calculation method multi-type pile composite foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, (3): 352-355.