

# 地基处理后复合地基承载力的深宽修正

朱金泰<sup>1</sup> 刘尊平<sup>2</sup> 徐耀德<sup>3</sup>

(1. 总后勤部建筑设计研究院, 北京 100036; 2. 中兵勘察设计研究院, 北京 100053;  
3. 北京城建设计研究总院, 北京 100038)

**【摘要】** 地基处理的目的是提高地基强度和控制在基变形。根据国家行业标准《建筑地基处理技术规范》, 对处理后的复合地基, 修正后的复合地基承载力特征值提高不大, 甚至有时比地基处理前反而降低。国家标准《建筑地基基础设计规范》与该行业标准之间对修正后的地基承载力特征值的规定在具体工程实践中产生冲突。对此进行了分析讨论, 提供了初步改进建议。

**【关键词】** 地基承载力特征值; 复合粘聚力; 复合内摩擦角

**【中图分类号】** TU 472

## Depth and Width Revision of Composite Foundation Bearing Capacity

Zhu Jintai<sup>1</sup> Liu Zunping<sup>2</sup> Xu Yaode<sup>3</sup>

(1. Building Design & Research Institute of the General Logistics, Beijing 100036;  
2. China Ordinance Industry Institute of Geotechnical Survey & Design, Beijing 100053;  
3. Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., LTD, Beijing 100038 China)

**【Abstract】** Ground treatment is employed to reinforce the ground and control the settlement. The revised bearing capacity is determined by the regulation of the Technical Code of Ground Treatment of Buildings. But the revised bearing capacity of the composite foundation is far lower than the expected value. There is conflict between the state standard and industry standard regulation. The conflict is studied, opinion is proposed.

**【Key Words】** characteristic value of subgrade bearing capacity; composite  $c$ ; composite  $\varphi$

### 0 引言

按现行规范, 当天然地基承载力在强度上不满足要求, 或天然地基强度上满足要求而变形不能满足要求, 可通过地基处理来提高地基强度和控制在基变形。但在对地基处理前后的地基承载力特征值进行深宽修正, 因所依据的规范不同, 采用不同的承载力修正公式, 即天然地基承载力修正公式<sup>[1]</sup>和处理后地基承载力修正公式<sup>[2]</sup>, 造成了处理后的复合地基承载力修正的提高量不大, 可能仍然不满足地基强度要求, 甚至有比地基处理前反而有所降低的现象。尤其是天然地基强度满足要求而变形不满足要求的地基, 在经地基处理后, 变形满足了要求, 但由于修正的限制, 地基强度反而不满足要求。两种规范在地基承载力修正问题上产生的这些现象, 在理论上不易解释, 在工程实践中产生矛盾。

### 1 问题的提出

国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002) 明确规定了地基承载力特征值的修正

方法: 当基础宽度大于 3 m 或埋置深度大于 0.5 m 时, 从载荷试验或其它原位测试、经验值等方法确定的地基承载力特征值, 应按式(1)进行修正。

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \quad (1)$$

式中:  $f_a$  为修正后的地基承载力特征值;  $f_{ak}$  为地基承载力特征值;  $\eta_b$ 、 $\eta_d$  为基础宽度和埋深的地基承载力修正系数;  $\gamma$  为基础底面以下土的重度, 地下水位以下取浮重度;  $b$  为基础底面宽度, 当基宽小于 3 m 按 3 m 取值, 大于 6 m 按 6 m 取值;  $\gamma_m$  为基础底面以上土的加权平均重度, 地下水位以下取浮重度;  $d$  为基础埋置深度, 一般自室外地面标高算起。

公式(1)针对的是天然地基进行的地基承载力深宽修正。对经处理后的地基, 则须按国家标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002) 的规定: 基础宽度的地基承载力修正系数  $\eta_b = 0$ , 基础埋深的地基承载力修正系数  $\eta_d = 1.0$ 。

根据该规定, 经地基处理后的复合地基承载力应修正为:

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5) =$$

$$f_{spk} + 0 \cdot \gamma (b-3) + 1.0 \cdot \gamma_m (d-0.5) =$$

$$f_{spk} + \gamma_m (d-0.5) \quad (2)$$

以刚性桩,如CFG桩复合地基为例,其复合地基承载力特征值为:

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (3)$$

则修正后的刚性桩复合地基承载力特征值可以表述为:

$$f_a = f_{spk} + \gamma_m (d-0.5) =$$

$$m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{ak} + \gamma_m (d-0.5) \quad (4)$$

式(2)、式(3)及式(4)中: $f_{spk}$ 为复合地基承载力特征值; $f_{sk}$ 为桩间土承载力特征值,如设计方法对桩间土无横向挤密等改良作用,则 $f_{sk} = f_{ak}$ ;  $m$ 为桩的置换率; $\beta$ 为桩间土承载力折减系数,宜取 $\beta = 0.75 \sim 0.95$ ;

## 2 工程实例

### 2.1 换填垫层法处理后地基的承载力修正

某工程地上24层,地下2层,框架剪力墙结构,筏型基础。基础埋深 $d$ 约为天然地面下8.80m,对应于荷载效应标准组合的基底静压力 $P = 445$  kPa。

工程场地地层岩性分布由上至下依次为:杂填土①层、新近沉积砂质粉土②层、细砂③<sub>1</sub>层及粉质粘土③<sub>2</sub>层、一般第四纪卵石④层及细砂④<sub>1</sub>层、粉质粘土④<sub>2</sub>层、卵石⑤层。

本工程地基持力层为以卵石⑤层为主,其天然地基承载力特征值 $f_{ak} = 250$  kPa,局部为粉质粘土④<sub>2</sub>层,其天然地基承载力特征值 $f_{ak} = 120$  kPa,层厚0.30~1.10m,在基底下局部小范围内分布。因本工程拟采用天然地基,须对天然地基承载力进行修正,按照《建筑地基基础设计规范》即采用式(1),经深宽修正的地基承载力特征值计算如下:

1) 卵石⑤层,  $\eta_b = 3.0$ ,  $\eta_d = 4.4$ :

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5) =$$

$$1135 \text{ kPa} > 445 \text{ kPa}$$

修正后的卵石⑤层地基承载力在强度上完全满足要求。

2) 粉质粘土④<sub>2</sub>层,  $\eta_b = 0.3$ ,  $\eta_d = 1.6$ :

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5) =$$

$$396 \text{ kPa} < 445 \text{ kPa}$$

修正后的粉质粘土④<sub>2</sub>层地基承载力在强度上不满足要求。

由于本工程地基持力层以卵石⑤层为主,该层为优

良的天然地基,因此可采用天然地基,但须对局部分布的薄层粉质粘土④<sub>2</sub>层进行地基处理。采用换填垫层法是常规地基处理,将残留粉质粘土④<sub>2</sub>层彻底清除至卵石⑤层顶,然后采用级配砂石分层夯实回填至基底设计标高。按《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》(DBJ 01-501-92)的相关规定,控制压实系数0.94,处理后的级配砂石承载力特征值也可达到250 kPa。

按《建筑地基处理技术规范》,即采用公式(2),可计算得到处理后的级配砂石垫层的地基承载力修正值为:

$$f_a = f_{ak} + \gamma_m (d-0.5) = 411 \text{ kPa} < 445 \text{ kPa}$$

处理后地基仍然不能满足地基承载力强度要求。

### 2.2 CFG桩复合地基承载力修正

复合地基承载力修正后降低的现象更为突出。某工程地上25层,地下3层,为业务办公楼,框架剪力墙结构,筏板基础。基础埋深约10.0m,对应于荷载效应标准组合的基底静压力 $P = 475$  kPa。

本工程地基持力层为细砂层,中密状态,天然地基承载力特征值 $f_{ak} = 180$  kPa,已属强度较高天然地基。若按单栋建筑物天然地基承载力深宽修正的条件进行计算,因细砂持力层 $\eta_b = 2.0$ ,  $\eta_d = 3.0$ 则:

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5) =$$

$$850 \text{ kPa} > 475 \text{ kPa}$$

地基承载力强度满足要求。

由于本工程周边范围均为大面积地下车库,且地下车库基底标高与本工程基底标高一致,致使本工程不完全具备单栋建筑物地基承载力修正的条件,经过结构对地下车库荷载的核算,周边地下车库对本工程贡献仅可以等代3.50m厚土层的压力值,故在进行承载力修正时应按 $d = 3.50$  m进行实际修正,计算得到:

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5) =$$

$$470 \text{ kPa} < 475 \text{ kPa}$$

按本工程修正条件天然地基强度不完全满足要求,修正后的地基承载力特征值与基底静压力 $P = 475$  kPa十分接近,但不满足要求。由于本工程尚存在软弱下卧层,经过结构进行变形计算后,在变形上也不满足要求,故要求对本工程进行地基处理,且要求采用CFG桩复合地基,使处理后地基在强度及变形上均满足现行相关规范要求。

按《建筑地基处理技术规范》中提高承载力最大的刚性CFG桩复合地基方法对其进行设计,桩径采用400mm,桩间距采用1.60m,桩长采用12.0m,单桩竖向承载力特征值采用500kN进行复合设计,在变形满足的前提下进行强度复合验算:

$$f_{\text{spk}} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{\text{sk}} = 349 \text{ kPa}$$

本工程 CFG 桩复合地基按上述施工参数进行施工,经 CFG 桩单桩复合地基静载试验及动测试验表明,桩身完整性良好,复合地基承载力特征值  $f_{\text{spk}} = 350 \text{ kPa}$ ,达到了 CFG 桩复合地基设计目的,且变形验算及实测变形均满足要求。按《建筑地基处理技术规范》,采用公式(2)对该复合地基承载力特征值进行深宽修正:

$$f_a = f_{\text{spk}} + \gamma_m(d-0.5) = 408 \text{ kPa} < 475 \text{ kPa}$$

按本方案进行地基处理后,地基变形虽已满足要求,但修正后的复合地基承载力特征值比修正后的天然地基承载力特征值还低。

### 3 分析与探讨

#### 3.1 通过上述两个处理前后地基承载力修正的计算对比得出3个结论

1) 为了提高软弱地基承载力,无论是采用换填垫层法还是 CFG 桩复合地基法,依据《建筑地基处理技术规范》中相关公式求得的处理后地基承载力特征值修正提高量不大,仍然不满足地基强度要求,甚至有比处理前天然地基承载力特征值修正值反而有所降低的现象。

2) 换填级配砂石实例中,处理后的级配砂石承载力特征值达到  $250 \text{ kPa}$ ,在施工控制中已属对工艺要求较高的地基处理方法<sup>[3]</sup>;CFG 桩复合地基实例中,地基处理方案所设计有关参数桩长、桩间距等已属对地基投资较高的相关地基处理参数。以上两个实例对地基强度的再度提高,必然会对地基造价造成极大的提高,施工上也不宜操作。尤其是该两种地基处理方案在实际工程中为常遇地基处理方案,因此该问题为工程实践中常遇问题。

3) 对比两个规范规定的地基承载力修正公式可知其区别根本所在,即与天然地基承载力修正相比,处理后地基承载力修正时虽然一定程度上提高了(2)式中  $f_{\text{ak}}$  项,即  $f_{\text{spk}}$  项,但宽度修正项  $\eta_b \gamma(b-3)$  由于  $\eta_b = 0$  为零,深度修正项  $\eta_d \gamma_m(d-0.5)$  由于  $\eta_d = 1.0$  使该项也有一定程度的降低(天然地基的  $\eta_d > 0$ )。当处理后地基较天然地基提高的承载力增加值小于修正项减少带来的损失值时,就会得出处理后地基较原来天然地基承载力降低。

#### 3.2 处理后基础宽度和埋深的地基承载力修正系数的取值是地基承载力修正的关键,必须进行深层的探讨

1) 按传统土力学太沙基强度理论<sup>[4]</sup>,地基中滑动面的形状见图 1 所示,共分三区。

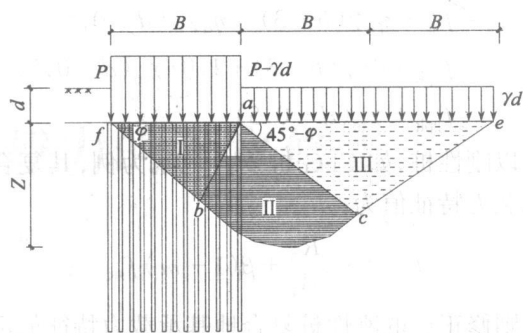


图 1 太沙基假定地基滑动面

I 区——基础下的楔形  $abf$  弹性压密区,由于土与基底的摩擦作用,此区的土不发生位移而处于压密状态,它与基底所成夹角为  $\varphi$ ;

II 区——滑动面按对数螺旋线变化,  $b$  点处螺旋的切线垂直,  $c$  点处螺旋的切线与水平线成  $\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$  角;

III 区——底角与水平线成  $\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$  的等腰三角形

在中心荷载作用下,地基处于极限平衡时,计算压密区土楔的自重,土楔斜面  $ab$  上作用的粘聚力的垂直分力和 I 区、III 区土滑动时对斜面  $ab$  的被动土压力(铅直向)。由作用于土楔上的各力在垂直方向上的静力平衡条件,可整理得:

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma B N_r + c N_c + q N_q \quad (5)$$

上式适用于较密实地基土整体剪切破坏的情况,而对于局部剪切破坏的松软土,其极限平衡状态对应的公式为:

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma B N_r + \frac{2}{3} c N_c + \gamma D N_q \quad (6)$$

上述两个公式都直接表达了地基承载力由三部分组成:一是与基宽相关的承载力部分  $\frac{1}{2} \gamma B N_r$ ;二是与基底埋深相关的承载力部分  $\gamma D N_q$ ;三是与土的强度指标相关的承载力部分  $\frac{2}{3} c N_c$ ;这三部分承载力组成与地基承载力特征值  $f_a = f_{\text{ak}} + \eta_b \gamma(b-3) + \eta_d \gamma_m(d-0.5)$  的三部分构成正好一一对应,在理论上是相通的。

地基处理前后,基宽  $b$  和基础埋深  $d$  均未发生变化,因而由于建筑物尺寸带来的承载力部分不应丧失,因而修正公式(2)、(4)中,其深度和宽度两项修正项是否应降低修正,即考虑  $\eta_b = 0$  和  $\eta_d = 1.0$  是否合理,值得商榷。

2) 探讨《建筑地基处理技术规范》规定  $\eta_b = 0$  和  $\eta_d = 1.0$  的原因,可能是由于进行地基处理后,处理深度范围内土体强度指标较天然地基土有所降低而采取的偏于地基安全的考虑所致。但实际上,多种地基处理方案是让天然地基土强度指标有所提高的,如

CFG 桩复合地基处理前后, 视对天然地基土(处理后为桩间土)无影响考虑, 即  $f_{ak} = f_{sk}$ , 但  $f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk}$  中的桩间土承载力折减系数  $\beta$  取 0.75 ~ 0.95, 视桩间土承载力发挥情况可适当折减, 表明复合地基土承载能力有一定丧失, 但较有限。从处理后地基的模量计算看, 也能说明处理后的地基提高和加强了原天然地基的强度。按《建筑地基处理技术规范》有关规定, 复合地基土层的压缩模量等于该层天然地基压缩模量的  $\xi$  倍,  $\xi = \frac{f_{spk}}{f_{ak}}$ , 即处理深度范围以内各土层的压缩模量  $E_{spk} = \xi E_s = \frac{f_{spk}}{f_{ak}} E_s$ 。由于  $\xi > 1$ , 因而处理后复合地基的模量较原天然地基均有较大程度的提高。

3) 处理后地基强度得到提高, 将不仅是对复合压缩模量的提高, 原天然地基的强度指标  $c$ 、 $\varphi$  值显然也应是得到提高的。图 1 所示的 CFG 桩位于可能发生滑动面上, CFG 桩群桩均深入到该剪切面下, 桩身强度远大于原状土抗剪作用, 会使整个复合地基受力层内总体地基土强度指标提高。提高后的复合地基强度指标可抽象地称为复合粘聚力和复合内摩擦角, 分别表示为  $c_{spk}$  和  $\varphi_{spk}$ 。

#### 4 结论与建议

1) 经过处理的地基在进行承载力修正时, 因处理前后所遵循的规范不同, 造成处理后地基提高的承载力部分有可能不足以弥补宽度修正项归零、深度修正项降低所带来的承载力损失, 在具体工程实践中造成矛盾在深基坑地基承载力特征值修正中尤其突出。

2) 地基土极限承载力的大小不但与地基土的  $c$ 、 $\varphi$  和  $\gamma$  值有关, 还与建筑物的基础埋深  $d$ 、基础宽度  $b$  有关, 由于建筑物参数未发生变化, 因而对处理后地基而言, 对与之相关的承载力修正部分进行归零或大幅度降低处理, 理论上难以解释通过, 并可能导致工程实践中出现不良后果。

3) 地基处理是对原天然地基的强度的提高, 建议遵循强度复合理论  $f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk}$ , 引入强度发挥或折减系数  $\beta$  (取 0.75 ~ 0.95), 针对地基处理方法及土层的不同, 考虑对强度指标适当折减, 而两项承载力修正项不作大的修正, 可有效解决两种规范对地基承载力修正时的矛盾, 且更接近工程实践。

4) 修正后的复合地基承载力特征值, 根据本文的观点, 宜按下式修正。

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5) = f_{spk} + \beta_1 \eta_b \gamma (b-3) + \beta_2 \eta_d \gamma_m (d-0.5)$$

式中:  $\beta_1$  与  $\beta_2$  为处理后地基强度发挥系数, 初步建议  $0 < \beta_1 \leq 1.0$ ,  $0 < \beta_2 \leq 1.0$ , 其值可根据地基处理方法对地基强度提高程度及地基处理工程经验综合确定。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[ S ] .
- [ 2 ] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[ S ] .
- [ 3 ] 常士骠主编. 工程地质手册(第三版)[ M ] . 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 860-863.
- [ 4 ] 陈希哲编著. 土力学地基基础(第二版)[ M ] . 北京: 清华大学出版社, 1991: 110-113.

收稿日期: 2006-11-30

(上接第 31 页)

#### 5 结 论

通过对该车站基坑工程异常变形的分析, 可以得到以下结论, 希望能对其他的类似工程起到一定的借鉴作用。

1) 在基坑施工过程中, 邻近建筑物的超载会引起基坑地下墙的测斜、附近地表沉降、建筑物沉降等多种变形的变形速率突然地加剧, 会同时出现多种较大的变形, 具有突然性和同时性的变形特征。

2) 邻近建筑物对基坑变形的影响是显著的, 施工过程中必须高度重视建筑物超载的影响, 加强现场监测工作, 及时发现工程中存在的隐患, 及时采取措施, 从而保证基坑工程的安全。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[ M ] . 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [ 2 ] 赵锡宏. 高层建筑深基坑围护工程实践与分析[ M ] . 上海: 同济大学出版社, 1996.
- [ 3 ] 刘国彬, 鲁汉新. 地下连续墙成槽施工对房屋沉降影响的研究[ J ] . 岩土工程学报, 2004, 26(3): 287-289.
- [ 4 ] 高彦斌. 地下连续墙施工对邻近建筑物沉降的影响[ J ] . 地下空间, 2003, 23(2): 115-118.
- [ 5 ] 杨国伟, 刘建航. 邻近建筑物或地面超载作用下围护结构水平位移与坑周地表沉降关系研究[ J ] . 地下工程与隧道, 2002(3): 11-14; 32.

收稿日期: 2006-10-27