

一种用桩土载荷试验结果计算复合地基承载力的方法

付文光

(中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088)

摘要: 有关规范中复合地基承载力采用了特征值设计法, 特征值为桩、土特征值按经验系数调整后之和, 因经验系数较难计取, 计算结果不易准确。桩、土及复合地基的承载力取值是建立于载荷试验基础上的, 载荷试验用相对变形值指标直接确定复合地基及土的承载力特征值, 用绝对变形值指标先确定单桩承载力极限值再取特征值, 三者方法不同及指标不匹配, 是特征值设计法很难计算准确的一个重要原因。可把桩达到极限状态时土的状态视为土的极限状态, 复合地基极限承载力为桩的极限承载力与土的视极限承载力加权之和, 特征值取其一半。这种极限状态设计法所需经验系数较少, 在条件具备时更容易操作, 准确性及安全性也更好一些。

关键词: 载荷试验; 复合地基; 承载力特征值; 极限承载力; 特征值设计法; 极限状态设计法

中图分类号: TU470 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)S2-0592-04

作者简介: 付文光(1970-), 男, 北京人, 注册岩土工程师, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程设计咨询、工程实践、试验研究等工作。E-mail: zgjy1992@126.com。

A method for calculating composite foundation bearing capacity by results of load tests on piles and soils

FU Wen-guang

(China JingYe Engineering Corporation Limited Company, Beijing 100088, China)

Abstract: In the technical code, the bearing capacity characteristic value of composite foundation is the sum of bearing capacity characteristic values of piles and soils adjusted by empirical coefficients, which is called the characteristic value design method. Due to the difficulty of determining the empirical coefficients, it is not easy to obtain the accurate results. The bearing capacities of the piles and the soils are based on the load tests. In the load tests, the bearing capacity characteristic values of the composite foundation and soils are directly confirmed by the relative deformation value, but the bearing capacity characteristic value of pile is indirectly confirmed by the absolute deformation value that first determines the ultimate bearing capacity of single pile and then the characteristic value. The above methods and indexes are not matched, and it is a significant reason leading to the inaccurate calculated results by means of the characteristic value design method. In the limit state design method, when the piles reach the limit state, the soil state is regarded as the limit state. The ultimate bearing capacity of the composite foundation is the sum of the ultimate bearing capacity of the piles and the assumed ultimate bearing capacity of the soils, and the characteristic value takes half. This method needs less empirical coefficients, and it is practical, more correctness and safety when the conditions are enough.

Key words: load test; composite foundation; bearing capacity characteristic value; ultimate bearing capacity; characteristic value design method; limit state design method

0 引言

复合地基在国内的工程应用已十分广泛, 业界积累了丰富的实践经验, 多个地区及行业都编制了复合地基技术标准。但同时, 复合地基技术中的不少问题尚存在着争议, 即使在最核心的内容——复合地基承载力特征值计算公式上也是如此。本文即从载荷试验的角度, 探讨一种计算复合地基承载力的方法。

1 承载力特征值计算式中的经验系数

复合地基承载力特征值通用表达式为^[1]

$$f_{spk} = k_p \lambda_p m R_a / A_p + k_s \lambda_s (1 - m) f_{sk}, \quad (1)$$

式中, 各符号的意义见相关规范。该式可称为特征值设计法, 为按承载力控制设计思路^[2], 计算原理可概况为: 复合地基承载力特征值为桩、土特征值按经验系数调整后之和。式中有4个经验系数, 《复合地基技术规范》解释为: ① k_p 为复合地基中桩体实际承载力的修正系数, 反映了其与自由单桩承载力之间的差异; ② λ_p 为桩体承载力发挥系数, 反映了复合地基破坏时桩体承载力发挥程度; ③ k_s 为复合地基中桩间土地基实

际承载力的修正系数,反映了复合地基中桩间土实际承载力与天然地基承载力之间的差异;④ λ_s 为桩间土地基承载力发挥系数,反映了复合地基破坏时桩间土地基承载力的发挥程度。这些经验系数的概念十多年前就被提出了^[2],最新规范^[1]中只是定性没有定量,显然不好确定。《建筑地基处理技术规范》^[3]做了简化,用单桩承载力发挥系数 λ 替代 $k_p \lambda_p$,用桩间土承载力发挥系数 β 替代 $k_s \lambda_s$,无经验时 λ 取0.7~0.9, β 取0.9~1.0。该规范修编前^[4]视 λ 为1.0,无经验时 β 取0.75~0.95。

这些经验系数很难取值,导致了按式(1)进行准确计算很难。困难的原因除了很多客观因素外,笔者认为还和一个重要的主观因素有关,这个主观因素即桩、土及复合地基承载力特征值的确定方法。

2 载荷试验确定承载力特征值的方法

本质上,土、桩及复合地基的承载力都是通过载荷试验确定的,载荷试验方法是桩、土及复合地基技术的核心内容之一。复合地基、桩及土通过载荷试验确定承载力特征值的方法不同,下面以刚性桩复合地基为例进行说明。

载荷试验大多采用相对变形值法确定复合地基及地基土承载力特征值。刚性桩复合地基承载力特征值在以黏性土为主的地基中,可取 $p-s$ 曲线上 $s/b=0.01$ 所对应的压力;地基土承载力特征值可取 $s/b=0.01\sim 0.015$ 所对应的压力,黏性土中 s/b 通常取0.015;但两者均不应大于最大加载压力的一半。 s/b 为压板沉降量与压板宽度之比,即相对变形值。确定单桩承载力特征值方法,对于陡降型 $Q-s$ 曲线取其发生明显陡降的起始点对应的荷载值,对于缓变型 $Q-s$ 曲线取 $s=40$ mm对应的荷载值为单桩极限承载力,然后取其一半为单桩承载力特征值。

载荷试验用相对变形值指标直接确定复合地基及地基土的承载力特征值;确定单桩承载力特征值时,用绝对变形值指标先确定极限值再确定特征值,是一种间接方法,复合地基载荷试验中这两种方法是同时使用的,那么,会不会存在矛盾呢?

3 方法及指标不匹配现象

以某工程^[5]为例。该场地主要土层为黏性土,土、桩径420 mm的CFG单桩及单桩复合地基载荷试验结果如图1所示。图1所示载荷试验中,土采用 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 压板, $p-s$ 曲线为缓变形,加载到150 kPa时沉降量约56 mm,没有比例界限,按相对变形值 $s/b=0.015$ (绝对沉降量为15 mm)确定特征值 $f_{sk}=67$ kPa。单桩加载到517 kN沉降量9.2 mm,加载到540 kPa时沉降量18 mm, $Q-s$ 曲线陡降,确定单桩极限承载力 R_u 为517 kN、特征值 R_a 为258.5 kN。查桩的 $Q-s$ 曲

线,特征值258.5 kN对应的沉降量为2.7 mm。

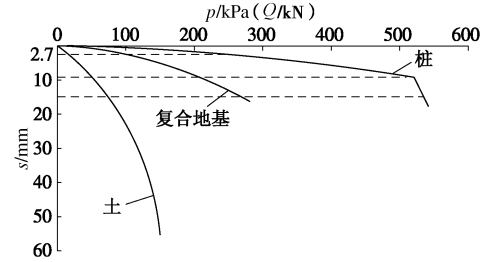


图1 案例1地基土、桩及复合地基载荷试验 $p(Q)-s$ 曲线

Fig. 1 $p(Q)-s$ curves of soils, piles and composite foundations

根据试验结果按式(1)计算复合地基承载力特征值 f_{spk} 。按规范^[4] β 取0.75则 $f_{spk}=176$ kPa, β 取0.95则 $f_{spk}=188$ kPa;按规范^[3] λ 取0.7, β 取0.9则 $f_{spk}=146$ kPa, λ 取0.9, β 取1.0则 $f_{spk}=179$ kPa,即 f_{spk} 的取值范围按规范^[4]为176~188 kPa,按规范^[3]为146~179 kPa。复合地基荷载试验最大荷载应为2倍 f_{spk} ,即292~376 kPa。实际试验中采用 $1.414\text{ m}\times 1.414\text{ m}=2\text{ m}^2$ 压板,设了找平层,加载到260 kPa时沉降量18.5 mm,没有加载到2倍 f_{spk} 。从图1可看出,此时单桩承载力已超过极限承载力,如果加载到2倍 f_{spk} ,桩破坏的风险相当大。

图1中桩承载力特征值对应的沉降量为2.7 mm,土承载力特征值对应的沉降量为15 mm,因承压板为刚性且无褥垫层,桩、土的绝对沉降值相等,复合地基沉降量为2.7 mm时,桩受力已达到特征值258.5 kN,查土的 $p-s$ 曲线,此时土受力仅17 kPa,为特征值67 kPa的25%。几乎不能使土的实际受力达到特征值状态,若达到需沉降15 mm,桩应该已经破坏了。这说明,从确定桩、土的承载力特征值的指标来看,两者就不太可能同步达到理想状态,即特征值状态。

复合地基承载力任何情况下都应大于桩的承载力,这是复合地基存在的意义。只计算桩、不计算土的承载力时,复合地基承载力计算值最小,应等于桩的承载力。本例中桩达到承载力特征值时,按式(1)计算(λ 取1.0, β 取0)得到复合地基承载力最小值为129 kPa。查复合地基 $p-s$ 曲线,沉降量为2.7 mm时承载力实测值为105 kPa,比129 kPa低23%。此时经验系数已用到了极限,计算值与实测值之间仍有较大的误差,说明按式(1)要得到较为准确的计算结果难度很大。

土与复合地基承载力特征值确定指标不匹配也带来不小问题。规范中,同一土层,用于确定复合地基承载力特征值的 s/b 指标通常小于用于确定土的,例如例1中为黏性土,应取 $s/b=0.015$ 对应的压力为土的承载力特征值,取 $s/b=0.01$ 为复合地基的。 b 相同时,复合地基的 s 比土的 s 少50%,这意味着,复合地基达到承载力特征值时,因绝对沉降量不足,土达不到特征值状态。 b 不同时,不管 s 是否相同,复合地基达到承载力特征值时,不管桩的受力状态如何,土的

实际承载力也不会是特征值状态,不再赘述。

综上,仅载荷试验确定桩、土及复合地基的承载力特征值的方法及指标不匹配,就会造成三者实际承载力与计算特征值之间产生较大误差。从规范对上述经验系数的定义来看,目前还没有用以调整这种误差的经验系数,这种误差尚需要依靠已有的那些经验系数来调节,大大增加了这些系数取值的难度,计算结果的不确定性很大。那么,还有没有其它计算方法呢?

4 承载力的极限值设计法

桩、土及复合地基的承载力与沉降量一一对应,而沉降量在工程中是容易测试和控制的,那么,如果以沉降量作为控制指标来确定承载力是否可行呢?按这种沉降控制设计思路,笔者试提出另一种复合地基承载力特征值计算方法,估且称之为极限值设计法,具体计算式为

$$f_{\text{spu}} = mR_u / A_p + \beta^*(1-m)f_{\text{su}}^* \quad (2)$$

式中 f_{spu} 为复合地基极限承载力,取其一半为承载力特征值 f_{spk} ; R_u 为单桩极限承载力; β^* 为桩间土承载力发挥系数,通常不小于 1.0; f_{su}^* 估且称为土的视极限承载力,不是真正的极限承载力。

式(2)计算原理与特点如下:

(1) 计算原理:把桩达到极限状态时土的状态视为土的极限状态,复合地基极限承载力为桩的极限承载力与土的视极限承载力加权之和。特征值设计法有时可能会因过度使用桩的承载力而使桩较早超过特征值状态,造成复合地基安全储备不足,本法中桩土同时达到极限状态,理论上保证了安全储备的可靠性。

复合地基工作在承载力特征值状态时,理论上安全系数为 2.2 是综合安全系数,并不需要桩土各自的安全系数均为 2,哪个承担多一些、哪个承担少一些都是允许的,这也是复合地基中桩土的实际工作状态,既然难以分清、也就没必要把各自的实际承载力分清楚,毕竟搞清楚的目的就是为了工程安全。

(2) 式(2)强调了桩的作用。估且称单桩极限承载力对应的沉降量为标准沉降量。计算复合地基极限承载力时,不对单桩极限承载力折减,最大程度上发挥了桩的功效。复合地基载荷试验时,如不考虑褥垫层变形,加载到复合地基极限承载力计算值时,压板沉降量不会超过标准沉降量,这就保证了桩达不到极限状态,不会破坏。相对土而言,桩的承载力相对稳定、不确定度较小,强调了桩的作用,理论上有利于减少复合地基承载力计算结果的不确定性。

(3) 土的视极限承载力通过查 $p-s$ 曲线确定,不能采用相对变形值指标。视极限承载力定义为:当土的载荷试验压板尺寸与复合地基的相同时,查土的 $p-s$ 曲线,与标准沉降量对应的荷载即为土的视极限

承载力。这样,式(2)的核心问题就简化为如何确定土在标准沉降量时的承载力。标准沉降量是不确定的,但根据相关规范对单桩极限承载力的确定方法,通常不大于 40 mm。这就需要土的 $p-s$ 曲线中 s 不小于 40 mm。这容易解决,选用的压板尺寸大一些,通常大于 $0.707 \text{ m} \times 0.707 \text{ m} = 0.5 \text{ m}^2$ 即可。相关规范均规定了土及复合地基压板的 $s/b \geq 0.06$ 时为极限状态,而实际工程中 b 通常不小于 1.0 m (或者直接要求不小于 1.0 m), $s=40 \text{ mm}$ 时 $s/b \leq 0.04$,土一般不会破坏。

式(2)不需确定土的承载力特征值,故不需要针对不同的土层确定不同的 s/b ,也避免了多层土质或混合土质中如何选取 s/b 的困扰。

(4) 当土的压板尺寸与复合地基的不同时,标准沉降量需修正,不能直接使用。地基土载荷试验时,当承压板宽度超过一定值后,宽度的增加与压板沉降量的增加成正比;宽度再增加时,沉降量趋于定值,不再随宽度的增加而增加。复合地基亦如此。规范规定土及复合地基可采用相对变形值法来确定承载力,以 s/b 为指标、与 s 及 b 的绝对值不直接相关,同时规定 b 的范围应为 0.5~2.0 m、超过 2 m 按 2 m 计算,主要理论依据就是该规律。如例 1 中,土采用 $s/b=0.015$ 指标来确定特征值,压板尺寸 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,取沉降量 15 mm 对应的压力,确定承载力特征值 67 kPa;如果采用 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 压板,取沉降量 30 mm 对应的压力,亦应为 67 kPa。土工作在复合地基中,标准沉降量是用于复合地基中的,故复合地基压板尺寸与土的不同时,需要按复合地基压板 b 与土压板 b 的比例修正标准沉降量。如例 1 中,标准沉降量为 9.2 mm,复合地基压板 b 为 1.414 m,土压板 b 为 1 m,标准沉降量应修正为 $9.2/1.414 \times 1 = 6.5 \text{ mm}$,查土的 $p-s$ 曲线,6.5 mm 对应的荷载 37 kPa 为土的视极限承载力。

按式(2)初步设计时,不知道以后试验时的复合地基压板尺寸,但这时置换率 m 已经初定,可根据压板下桩的置换率应等于 m 这一原则,通过 m 反算压板尺寸,或者干脆预先规定好复合地基检验时的压板尺寸。如果检验多桩复合地基,压板的尺寸一般大于 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,按规范规定,此时 b 取 2 m。

(5) 复合地基压板试验时往往不设置褥垫层,低估了土的承载力,导致试验结果一般偏小^[6]。因为褥垫层,复合地基中土的沉降量要大于桩的,故土的实际承载力通常高于视极限承载力,之间的差异用 β^* 来调整。 β^* 应不小于 1.0,为安全起见,无经验时应取 1.0。

(6) 式(2)是以刚性基础下刚性桩复合地基的沉降规律为基础建立的。如果应用于其它类型复合地基及柔性基础,尚需要更多的研究。

5 案例分析

按式(2)验算前例。如前所述,单桩极限承载力

517 kN, 土的视极限承载力为 37 kPa, β^* 取 1.0, 按式 (2) 计算复合地基极限承载力 $f_{spu}=293$ kPa。承载力特征值 f_{spk} 取其一半, 为 146.5 kPa, 与按规范^[3]计算的最小值 146 kPa 相等, 但此时并不需担心载荷试验中最大压力达到 2 倍复合地基承载力特征值时桩是否会破坏。试验中实际承载力特征值按最大试验荷载的一半计取 (如按 s/b 取值则超过了最大试验荷载的一半), 为 130 kPa, 与之相比, 式 (2) 计算结果偏高 13%, 式 1 计算结果偏高 35%~45% (经验系数取值按规范^[4]) 或 13%~38% (经验系数取值按规范^[3])。

再举一个黏性土场地进行了地基土、单桩及复合地基载荷试验的案例^[6]。该案例桩型为直径 400 mm 的 CFG 桩及素混凝土桩, 采用 2 m×3.6 m 载面板进行了土及多桩复合地基试验, 采用 1.2 m×1.2 m 载面板进行了单桩复合地基试验。试验结果如图 2 所示。

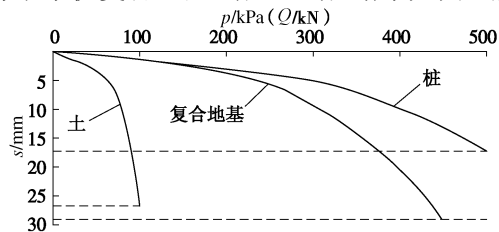


图 2 案例 2 地基土、桩及复合地基载荷试验 $p(Q) - s$ 曲线

Fig. 2 $p(Q) - s$ curves of soils, piles and composite foundations

桩的 $Q - s$ 曲线为缓变形, 取试验最大荷载 500 kN 为极限承载力, 标准沉降量为 17.1 mm; 土的压板尺寸与复合地基的不同, 标准沉降量需修正, 修正结果为 $17.1/1.2 \times 2 = 28.5$ mm。土载荷试验最大荷载为 100 kPa, 相应沉降量为 26.8 mm, 小于修正后的标准沉降量, 故取最大荷载 100 kPa 为土的视极限承载力。 β^* 取 1.0, 按式 (2) 计算复合地基极限承载力 $f_{spu}=438$ kPa, 承载力特征值 f_{spk} 取其一半, 为 219 kPa。单桩复合地基最大试验荷载为 450 kPa, $p - s$ 曲线平缓, 取其一半 225 kPa 作为承载力特征值, 计算结果与之相比偏低了仅 3%。再按式 (1) 计算复合地基承载力特征值 f_{spk} : 桩承载力特征值为 250 kN, 土的取最大试验荷载的一半, 为 50 kPa, 如按规范^[4] β 取 0.75 则 $f_{spk}=242$ kPa, β 取 0.95 则 $f_{spk}=260$ kPa, 比试验结果 225 kPa 偏高 8%~16%; 如按规范^[3] λ 取 0.7, β 取 0.9 则 $f_{spk}=204$ kPa, λ 取 0.9, β 取 1.0 则 $f_{spk}=248$ kPa, 与试验结果相差 -9%~10%。

以上结果说明, 按式 (1) 计算, 需要对经验系数的选取相当有经验, 难度很大; 式 (2) 几乎不需经验系数, 在条件具备时更容易操作一些。

6 结 论

(1) 现行技术标准中, 复合地基承载力设计计算

采用了按承载力控制的特征值设计法, 特征值为桩与土特征值分别按经验系数调整后之和。桩、土和复合地基的承载力确定方法及计算式是建立于载荷试验基础上的, 载荷试验确定复合地基及土的承载力特征值时用相对变形值指标直接确定, 确定桩时用绝对变形值指标先确定极限值再确定特征值, 是一种间接方法, 三者方法不同及指标不匹配, 是造成特征值设计方法较难计算准确的一个重要原因。

(2) 本文提出了一种按沉降控制设计的复合地基承载力极限状态设计法。该方法把桩达到极限状态时土的状态视为土的极限状态, 复合地基极限承载力为桩的极限承载力与土的视极限承载力加权之和, 再取其一半为承载力特征值。该法所需经验系数较少, 在条件具备时更容易操作一些, 准确性更高一些, 安全可靠性和更强一些。

参考文献:

- [1] GB/T 50783—2012 复合地基技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. (GB/T 50783—2012 Technical code for composite foundation[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese))
- [2] 龚晓南. 复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GONG Xiao-nan. Composite foundation theory and engineering application[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [3] JGJ79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. (JGJ79—2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese))
- [4] JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002. (JGJ79—2002 Technical code for ground treatment of buildings[S]. Beijing: China Planning Press, 2002. (in Chinese))
- [5] 郑刚, 于宗飞. 复合地基承载力载荷试验及承载力确定的标准化问题[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(1): 83 - 91. (ZHENG Gang, YU Zong-fei. Standardization of bearing test and the determination of bearing capacity of composite foundation[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(1): 83 - 91. (in Chinese))
- [6] 闫明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (YAN Ming-li, ZHANG Dong-gang. CFG pile composite foundation technology and engineering practice[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))