

复合地基与基础设计若干问题浅析

党昱敬

(中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

摘要: 相较于不改变地基土的工程力学性质、而采取改变基础形式的天然地基上的相对独立的浅基础设计, 复合地基与基础设计, 就是针对在地基土中设置增强体, 以改善地基土的工程力学性质为目的的地基加固处理后的浅基础设计。本文通过对结构工程师做上部结构和基础设计、岩土工程师做复合地基设计的不足进行剖析, 基于现有设计规程、规范理论, 就选取复合地基与基础设计计算参数进行探讨分析, 提出复合地基与基础一体化设计理念。随着计算机应用的普及, 可将复杂的数学方程公式和工程地质条件, 通过电子计算技术和模拟进行求解, 达到优化设计的目的。本文有关复合地基与基础一体化设计中的若干问题的探讨分析和结论, 可为工程技术人员进行复合地基与基础设计提供参考。

关键词: 浅基础; 复合地基; 增强体; 关联性设计; 优化设计

中图分类号: TU745

文献标识码: A

文章编号: 2096 - 7195(2019)02 - 0033 - 11

作者简介: 党昱敬(1961 -), 男, 陕西大荔人, 教授级高级工程师, 国家注册土木工程师(岩土), 主要从事地基与基础、岩土工程的研究、设计和咨询工作。E-mail:djy765@sina.com。

Discussion on several problems of composite foundation and foundation design

Dang Yu-jing

(Central Research Institute of Building and Construction MCC, Beijing 100088, China)

Abstract: Compared with the relatively independent shallow foundation design on the natural foundation that changes the basic form without changing the engineering mechanical properties of the foundation soil, the composite foundation and base design are the design of shallow foundation after foundation reinforcement treatment, which set the reinforcement in the foundation soil to improve the engineering mechanical properties. This paper analyzes the insufficiency that structural engineers design superstructure and foundation and geotechnical engineers design composite foundation. Based on the existing design codes, this paper discusses on the selection of calculation parameters about composite foundation and base design, and proposes the integrated design concept of composite foundation and base. With the popularization of computer applications, complex mathematical equations and engineering geological conditions can be solved by electronic computing technology and numerical simulation. This paper discusses and analyzes on some problems in the integrated design of composite foundation and base, which can provide reference for engineering and technical personnel to carry out composite foundation and base design.

Keywords: shallow foundation; composite foundation; reinforcement; related design; optimized design

0 引言

天然地基上的浅基础设计是不改变地基土的工程力学性质、而采取改变基础形式的地基与基础设计, 通常由结构工程师独立完成设计计算。当结构工程师通过调整基础底面积或改变基础形式, 天然地基仍不能满足建(构)筑物的地基承载力和基础沉降要求时, 通常结构工程师根据建(构)筑物

竖向设计和使用功能要求设计基础形式, 并以此向岩土工程师提出复合地基设计计算目标值, 岩土工程师按照目标值要求进行复合地基设计。工程设计和研究表明: 岩土工程师在对地基进行加固处理以改善地基土的工程力学性质时, 也有不同的复合地基形式和与其对应的加固处理效果, 而受结构工程师提出的复合地基设计目标值和基础形式等条件限制, 难免出现不尽合理的复合地基设计方案,

同时由于结构工程师在进行基础设计时,限于对作为其设计依据的复合地基加固处理效果的认识问题,使基础设计方案也可能会出现些许偏颇之处,最终导致复合地基与基础设计综合性价比不是最优方案。因此,把改变基础形式或调整基础底面积与以天然地基作为基体、通过在一定深度范围内设置竖向增强体(习惯上成为桩)的复合地基与基础设计,在保证建(构)筑物的安全和正常使用前提下,进行统筹考虑和相互关联的一体化设计,不但对优化设计大有裨益,也会受到工程设计和施工人员的青睐。相较于传统的基础和复合地基互相独立设计,通过上述分析,就很容易形成和接受对地基进行加固处理以改善地基土的工程力学性质的复合地基与基础一体化设计理念。复合地基的形成是以天然地基作为基体、通过在一定深度范围内设置竖向增强体,在荷载作用下,基体和增强体共同承担荷载作用。根据竖向增强体的性质不同,竖向增强体通常分为散体材料桩、半刚性桩和刚性桩^[1,2]。本文既对如何选取复合地基与基础设计计算参数和进行复合地基与基础关联性设计,进行探讨分析,又对散体材料桩、半刚性桩和刚性桩所形成的复合地基设计中常见的问题进行剖析,并根据工程设计实践经验,针对复合地基与基础一体化设计理念的实施过程、设计计算方法和如何对增强体进行平面和竖向布置,进行阐述。随着计算机应用的普及和发展,可将复杂的数学方程式和工程地质条件,通过电子计算技术和模拟进行求解,复合地基与基础一体化设计通过应用该技术,不但能减轻设计人员的劳动强度,更有利于优化设计、节省投资。

1 复合地基与基础设计理论和计算方法简述

复合地基设计,既要满足上部结构荷载条件及基础结构合理设计的地基强度和地基变形要求,又要使选择的增强体和基础方案综合性价比最高。而复合地基的本质作用就是在天然地基土设置的增强体与基体土共同承担上部结构荷载作用,其加固处理效果也是基础设计的重要依据。因此不难发现,选择复合地基与基础方案时,除了满足周边环境和施工条件等客观条件外,同一结构不同基础形式或同一结构相同基础形式不同基础底面积设计所提出的地基强度和变形要求,也是依据地质资料进行设置增强体形成复合地基设计计算的目标值,由此分析逻辑不难发现,复合地基设计与上部结构基础

设计具有很强的关联性,将两者同时进行关联设计,本文称之为复合地基与基础设计。复合地基与基础设计计算通常所遵循的国家规程、规范有文献^[2-5],式(1)~(7)为复合地基与基础设计计算所依据的主要理论计算数学公式。不同形式基础的结构设计计算理论和方法限于篇幅,本文不再赘述。

基础底面积 A 依据下列公式确定:

$$p_k = \frac{F_k + G_k}{A} \leq f_a \quad (1)$$

$$f_a = f_{spk} + \gamma_m (d - 0.5) \\ = [1 + m(n-1)] f_{sk} + \gamma_m (d - 0.5) \quad (2)$$

$$f_a = f_{spk} + \gamma_m (d - 0.5) \\ = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m) f_{sk} + \gamma_m (d - 0.5) \quad (3)$$

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_{pi} + \alpha_p q_p A_p \quad (4)$$

复合地基变形 s 依据下列公式计算:

$$s = \psi_s s' = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_o}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (5)$$

$$p_o = p - \gamma_0 d \quad (6)$$

$$E_{spki} = \xi \times E_{si} = \frac{f_{spk}}{f_{ak}} \times E_{si} \quad (7)$$

式(2)和式(3)中的 f_{spk} 分别是散体材料增强体(散体材料桩)复合地基和有粘结强度增强体(半刚性桩和刚性桩)复合地基的承载力特征值理论计算方法。式(2)、(3)表明:通过改变增强体形式或调整同一增强体不同设计参数,可为基础设计提供不同设计条件,依据不同设计条件可选择不同的基础形式或同一基础形式的不同基础底面积。式(1)和(6)中 p_k 和 p 分别为相应于作用的标准组合和准永久组合时,基础底面处的平均压力值,当偏心荷载作用时,相应于作用的标准组合基础底面边缘的最大压力值 $P_{kmax} \leq 1.2f_a$ ^[4,5];同一结构不同基础形式或同一结构同一基础形式的不同基础底面积,上部结构荷载效应产生的 P_k 和 p 也不同,即对复合地基设计要求也不同,同样不同的地基加固处理效果,也会有不同的基础形式和同一基础形式的不同基础底面积。式(2)和式(3)中 d 为基础自室外地面标高算起的基础埋置深度,为了确定地基土在原有

自重应力状态下的客观承载力特征值，对地基土固有特性的承载力特征值进行深度 (d) 修正，考虑主楼周边纯地下室和裙房等对基础计算埋深的影响时，均可将其荷重等效为计算埋置深度^[4,6]。式 (6) 中 d 为自室外地面标高算起的基础埋置深度，由于地基变形由建 (构) 筑物的荷载作用产生的附加应力引起，因此该基础埋置应反映原有地基土有效自重应力状态^[4,5]。式 (5) 和式 (7) 中 E_{si} 为基底第 i 层土的天然地基压缩模量， E_{si} 均取在同一基底附加应力 P_0 作用下每层土实际应力状态所对应的天然地基压缩模量，即在计算建筑物的地基变形时，天然地基压缩模量取基底每层土自重压力 (σ_{cz}) 至土自重压力与附加压力之和 ($\sigma_{cz} + \sigma_z$) 压力段所对应的天然地基压缩模量^[2,4,5]。

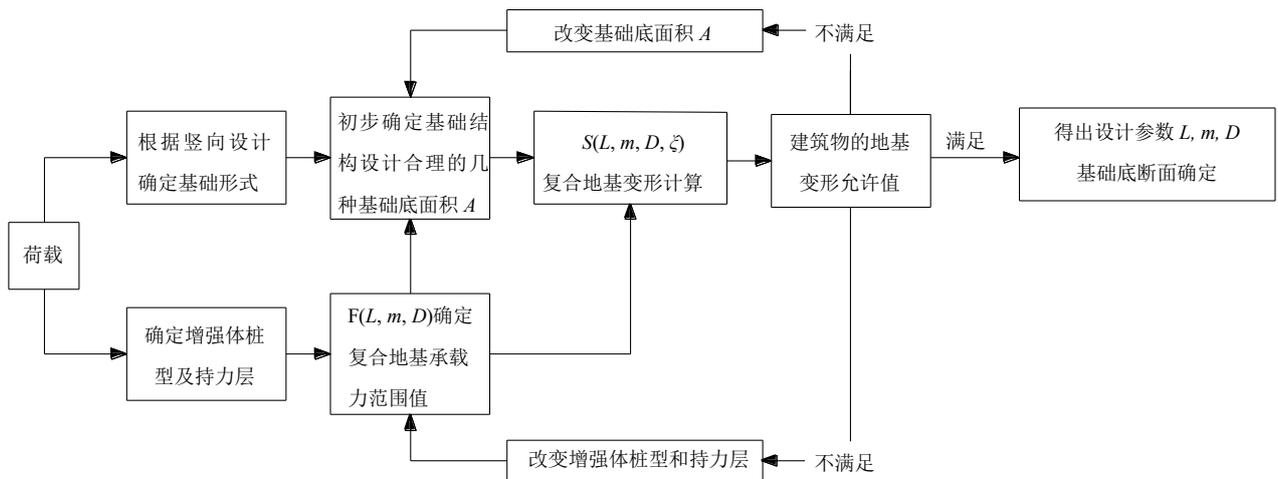
式 (1)~(7) 其它符号意义解释详见文献^[2-5]，本文从略。

通过以上对复合地基与基础设计计算理论的梳理发现：相较于不改变地基土的工程力学性质、而采取改变基础形式的天然地基上基础的独立设计，复合地基与基础设计，就是针对在地基土中设置增强体，以改善地基土的工程性质为目的的地基加固处理后的浅基础设计。后者的浅基础不再是独立的设计计算，与在地基土中设置增强体、改善地基土的工程力学性质效果有直接关系，对于同一工程地质单元的地基土，由于不同增强体或相同增强体不同设计参数，对地基土加固处理效果明显不同，同样也会对选取基础形式和同一基础形式的不同基础底面积的设计产生影响。因此反观结构工程师

做基础设计和岩土工程师做复合地基设计的分工，不能充分利用复合地基设计调节承载力和改变地基土压缩性质的功能，难免带来不尽合理的复合地基与基础设计方案。

选定基础形式后，基础底面积 A 可在基础结构设计合理范围内和周边环境允许情况下进行调整，其大小与基底标高和复合地基承载力大小有关，而当竖向设计确定后，基础底面积 A 的确定与复合地基承载力和复合土层与下卧层组成的压缩层中各土层的压缩模量有关。基础设计中基础底面积 A 的确定，既要满足承载力极限状态下基础结构设计的合理性和安全性，又要使正常使用极限状态下地基变形验算满足基础沉降各项控制指标要求^[4,5]。复合地基承载力设计计算是满足上述基础设计中确定基础底面积 A 的必要条件，而最终复合地基承载力设计计算参数确定由复合地基变形控制。因此，只有通过复合地基与上部结构浅基础进行一体化设计，才能使复合地基与基础方案设计更加合理、可行和综合性价比更高，因此将具有极强关联性的复合地基与基础实施一体化设计计算，也是一个优化过程，图 1 的复合地基与基础设计流程即可满足多次循环的优化设计计算。

通过上述对复合地基与基础设计计算理论简述、梳理、归纳和分析发现，在建 (构) 筑物竖向设计确定后，根据完善的地质资料和上部结构荷载条件及拟建建筑物周边环境和施工条件，复合地基与基础一体化设计通常按以下三种方法进行分析计算：



L -桩长; m -面积置换率; D -桩径

图 1 复合地基与基础设计流程图

Figure 1 Design flow chart of composite foundation and base

(1) 对于高层建筑筏板基础和柱下(或墙下)条形基础, 当其底面积和增强体设计桩长确定后, 由式(1)可知: 基底总压力与复合地基承载力特征值和基础周边的超载有关, 而复合地基承载力特征值与增强体面积置换率有关。又由式(6)可知: 当基础底面积确定后, 基底的附加压力大小也已确定。由图1复合地基与基础设计流程可知: 采用式(5)~(7)进行复合地基变形分析计算, 就是在上述满足不同形式增强体形成的复合地基承载力特征值 f_{spk} 最小置换率 m 和复合土层压缩模量最小提高系数 ζ 的基础上, 验算复合地基变形是否满足要求。如果在满足复合地基承载力特征值要求情况下, 复合地基变形不满足基础沉降要求, 可通过式(8)~(10)逐级(每级5 kPa)增加复合地基承载力特征值, 调整提高复合土层压缩模量提高系数 ζ , 直至满足基础沉降控制指标要求为止, 满足基础沉降控制指标要求的复合土层压缩模量提高系数 ζ 所对应的增强体设计桩长、桩径和面积置换率即为复合地基最终方案设计参数。

$$\zeta = \frac{f_{spk} + 5i}{f_{sk}} \quad (i=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

$$m = \frac{(f_{spk} + 5i) - f_{sk}}{f_{sk}(n-1)} \quad (9)$$

$$m = \frac{(f_{spk} + 5i) - \beta f_{sk}}{\lambda \frac{R_a}{A_p} - \beta f_{sk}} \quad (10)$$

当高层建筑筏板基础和柱下(或墙下)条形基础底面积确定后, 基体地基土层构成满足在合理桩长范围内增加桩长至第二相对硬层时, 也是在首先满足复合地基承载力特征值的前提下, 验算复合地基变形, 直至复合地基变形满足基础沉降要求, 复合地基变形验算方法和步骤同上。

(2) 对于框架结构和工业厂房等独立基础, 当基体地基土层构成和基底面积有利于调整增强体设计桩长和面积置换率时, 由图1和式(5)~(7)可知: 复合地基变形要满足基础沉降各项控制指标要求, 则需对桩长和桩距进行反复多次调整。而由

式(1)~(4)可知: 在对桩长和桩距进行调整后, 复合地基承载力也得以提高, 基础底面积相应地减小, 基础结构也需重新设计计算。借助现代化计算机辅助设计计算软件, 设计人员可轻松实现每一循环设计计算全过程, 综合考虑最终选择性价比最高的复合地基与基础设计方案。

(3) 复合地基能有效地提高地基承载力, 与桩基础相比, 复合地基可以利用桩间土的承载力, 具有较好的经济性。对于增强体为刚性桩的复合地基, 根据基体地基土层构成和施工工艺条件确定增强体长度达到合理的最大长度, 且式(10)所计算的面积置换率 m 也达到最大值时, 复合地基变形计算结果仍不能满足基础沉降控制指标要求, 可考虑通过扩大基础底面积或改变基础形式、以减少基底总压力、从而减少基底附加压力的方法, 按图1的复合地基与基础设计流程进行复合地基与基础全过程设计。当采用刚性桩复合地基方案使得基础设计不合理、且经济性不明显时, 应考虑采用桩基方案^[7,8]。

2 复合地基设计相关参数取值和计算方法探讨分析

2.1 考虑地下水影响时基底压力计算

对独立基础或条形基础, 式(1)中 G_k 可按下式计算:

$$G_k = \gamma_G A d \quad (11)$$

式中: γ_G 为基础及其上覆土体的混合重度, A 为基础底面面积; d 为基础埋深; 见图2。

图2(a)和(b)基底压力分别为式(12)和式(13):

$$P_k = \frac{F_k}{A} + \gamma_G d \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P_k &= \frac{F_k}{A} + \gamma_G \times h + (\gamma_G - \gamma_w) \times (d-h) \\ &= \frac{F_k + G_k}{A} - \gamma_w \times (d-h) \end{aligned} \quad (13)$$

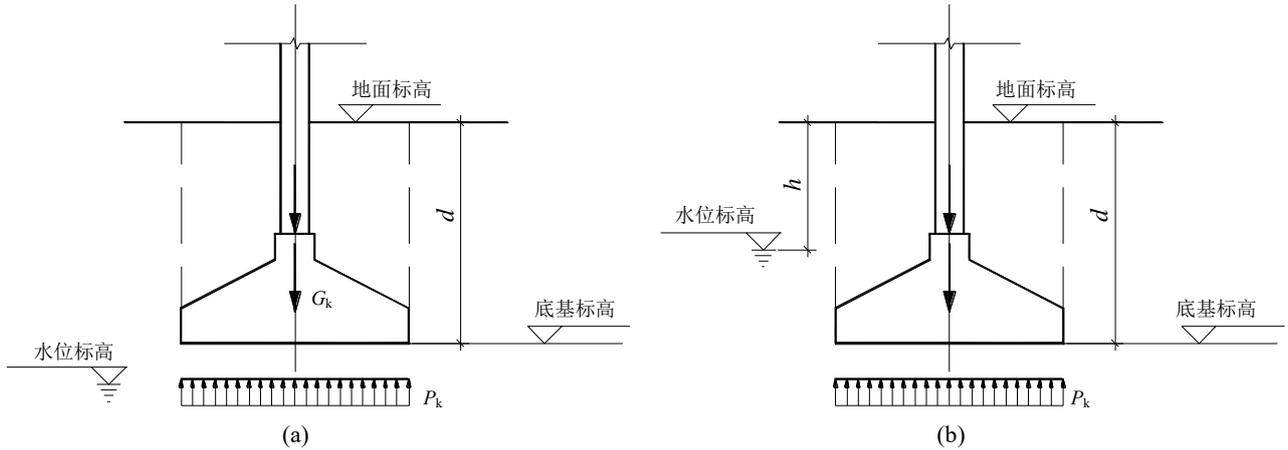


图 2 中心荷载作用下的基础
Figure 2 Foundation under the center load

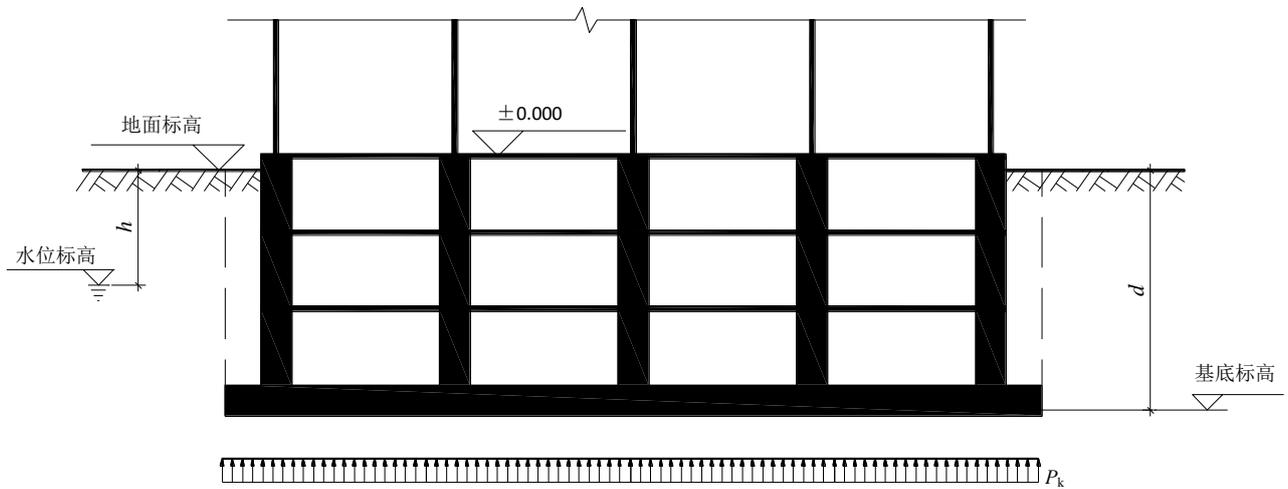


图 3 中心荷载作用下的筏板基础
Figure 3 Raft foundation under central load

现在多数高层建筑地下室用作停车库、机电用房等，需要有较大平面空间，因此筏板基础较箱型基础应用普遍，其与周边外墙相结合，整体刚度也很大。对于筏板基础，式 (13) 中 G_k 包括筏板及肋梁自重、筏板挑出范围上的土重和地下室底层筏板上土覆土及地面做法或地面架空板重，见图 3。

式 (13) 式相较于 (12) 不难发现，当地下水位高于基底时，基底压力应减去水浮力；或由有效应力原理可知：基础底板传至地基上的基底总压力由土骨架（有效应力）和水（静止孔隙水压力）共同承担。

2.2 复合地基承载力特征值深度修正

基础埋深对于复合地基承载力有很大影响，见式 (2)、(3)。在经深度修正后，复合地基承载力特征值均增加 $\gamma_m(d-0.5)$ 。 $\gamma_m(d-0.5)$ 的含义是将基础周边土体重 $\gamma_m(d-0.5)$ (对应于图 4 中的 $\gamma_m d$) 当成超载，其主要作用：一是本身阻止土体滑动向上隆起，二是在滑动面上施压产生摩擦阻力。当地下水位位于

基底以上时，散体材料增强体复合地基（散体材料桩）和有粘结强度增强体复合地基（半刚性桩和刚性桩）基础周边的超载由水压力和由土体有效压力两部分组成，如图 4 所示。

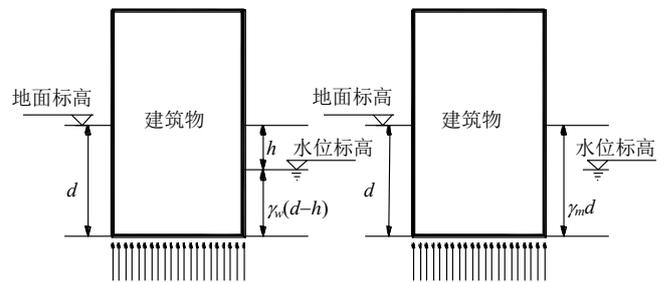


图 4 复合地基承载力特征值修正
Figure. 4 Correction of bearing capacity characteristic value of composite foundation

当考虑散体材料增强体复合地基（散体材料桩）和有粘结强度增强体复合地基（半刚性桩和刚性桩）基础周边的超载由水压力和有效压力两部分组成时，深度修正后的复合地基承载力特征值按以下式

表示:

$$\begin{aligned} & f_{spk} + \gamma_w(d-h) + \gamma h + (\gamma - \gamma_w)(d-h) \\ & = f_{spk} + \gamma d - \gamma_w(d-h) \end{aligned}$$

为满足地基稳定要求, 把建(构)筑物整体作为隔离体, 式(13)的大小应满足下式要求:

$$P_k = \frac{F_k + G_k}{A} - \gamma_w \times (d-h) \leq f_{spk} + \gamma d - \gamma_w(d-h)$$

$$\text{或 } P_k = \frac{F_k + G_k}{A} \leq f_{spk} + \gamma d \quad (14)$$

式(2)、(3)相较于式(14), 其表达的含义是当基础埋置深度小于0.5 m时, 按0.5 m考虑。

通过以上分析探讨, 很明显可以发现:

(1) 深度修正后的复合地基承载力特征值应不小于基底总压力, 深度修正后的复合地基承载力特征值不因地下水位位于基底以上而减少; 基于基础埋深反映了基础周边土体的有效自重应力对复合地基承载力特征值的影响程度的理念, 在计算 γ_m 时, 位于地下水以下的土层式(2)和式(3)取有效重度^[4,5]。而由式(14)可知, 如果在计算基底总压力时不考虑水浮力作用, 其结果是偏于安全的。

(2) 主(高层住宅或办公楼等)辅(裙房或纯地下车库)一起的建筑物, 其主楼部分的复合地基承载力特征值, 采用计算埋深进行深度修正。根据有效应力原理, 计算计算埋深(或称等效土层厚度)时, 辅楼的基底压力 P_k 应按式(13)计算取值(即当地下水位高于基底时, 基底压力应减去水浮力), 由于计算埋深(或称等效土层厚度)反映的是基础周边原有土体有效自重应力对复合地基承载力特征值的影响, 因此无论是计算计算埋深(或称等效土层厚度) P_k/γ_m 式中的 γ_m 、还是式(2)和式(3)中的 γ_m , 在计算 γ_m 时, 位于地下水以下的土层均取有效重度。

(3) 上述(2)的工况, 当按式(13)计算为负值时, 即如果辅楼的自重不足以抵抗水浮力、需要采用锚固体(抗浮锚杆或抗拔桩)平衡水浮力时, 则复合地基承载力的深度修正部分 $\gamma_m(d-0.5)$ 大小按零考虑。

2.3 基底附加压力计算

由式(6)式可知: 通过建筑物传至基底的荷载(P)和有效自重应力($\gamma_0 d$), 求基底附加压力(P_0), 如图5所示, 图5中 γ 为天然重度。

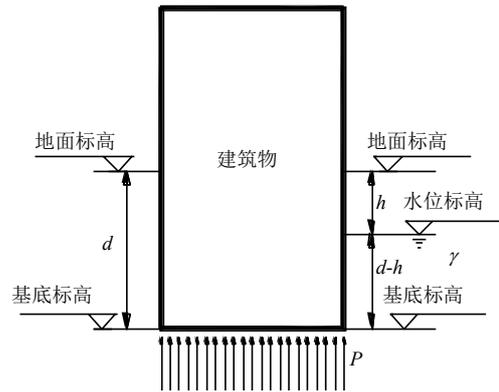


图5 基底附加压力计算

Figure 5 Additional pressure calculation of foundation bottom

如前所述, P_k 和 P 分别为相应于作用的标准组合和准永久组合时, 基础底面处的平均压力值(或称荷载), 如同式(14)一样, 通常上部结构分析计算结果为基底总压力, 没有考虑地下水浮力的影响。根据有效应力原理, 在计算地基变形时, 基底压力也应为减去水浮力后的基底压力, 即按式(13)计算。因此根据式(6)和式(13), 推导出如下计算公式。

$$\begin{aligned} P_0 &= P - \gamma_0 d \\ &= \frac{F_k + G_k}{A} - \gamma_w \times (d-h) - [\gamma h + (\gamma - \gamma_w) \times (d-h)] \\ &= \frac{F_k + G_k}{A} - \gamma d \end{aligned}$$

$$\text{即 } P_0 = \frac{F_k + G_k}{A} - \gamma \quad (15)$$

式(15)表明: 当计算相应于作用的准永久组合基础底面处的平均压力值(或称荷载)为总压力时(即没有考虑地下水浮力影响), 基底附加压力计算应不考虑地下水的影响, 即基底以上地基土重度均取天然重度 γ 。

2.4 增强体单桩竖向承载力特征值和复合地基承载力特征值估算

复合地基设计通常以单体建筑为工程地质单元进行分析计算。

式(4)是针对有粘结强度增强体(半刚性桩和刚性桩)的单桩竖向承载力特征值的估算公式, 计算方法和取用的设计计算参数与灌注桩基本一致, 其在复合地基中的效应主要是置换作用, 也称桩体效应, 即半刚性桩和刚性桩增加长度或将桩端置于承载力和压缩模量相对较高的土层, 有利于提高复合地基置换作用。因此为保证工程地质单元范围内增强体桩端全部进入所选取的桩端持力层, 增强体

桩端持力层标高应选取层顶标高最深勘探孔,并要求桩端进入该孔增强体桩端持力层的深度不小于文献[3]的规定。对工程地质单元范围内存在有桩端持力层厚度不满足桩端以下厚度(3倍桩径)的勘探孔,增强体桩端阻力取增强体桩端持力层下卧层的相对较小值。基于复合地基增强体单桩静荷载试验确定单桩竖向极限承载力的相关规定^[2],根据式(4)并通过工程地质单元内每个勘探孔的地基土层构成情况和各层土体的侧阻和端阻参数,分别计算出每个勘探孔所对应的单桩竖向承载力特征值,当满足极差不超过平均值的30%时,取其平均值为该工程地质单元增强体单桩竖向承载力特征值;当极差超过平均值的30%时,取其计算的所有勘探孔所对应的单桩竖向承载力特征值中的最小值作为该工程地质单元增强体单桩竖向承载力特征值。采用工程地质单元增强体单桩竖向承载力特征值和其周边土的承载力特征值,通过式(3)确定有粘结强度增强体(半刚性桩和刚性桩)的复合地基承载力特征值。

如前所述,有粘结强度增强体(半刚性桩和刚性桩)在复合地基中的效应主要是置换作用(也称桩体效应)。而散体材料增强体(散体材料桩)单桩竖向承载力特征值是依靠增强体桩周土体的侧限阻力保持其形状并提供抗力,工程实践表明:当其在复合地基中的效应既有置换作用、又有挤密和振密作用时,才能达到提高地基承载力和减少地基变形的目的,否则适得其反。式(2)和式(3)中的 f_{spk} 都是根据刚性板下增强体与基体变形相互协调原理,通过应力叠加得到的复合地基承载力计算公式。式(2) $f_{spk}=[1+m(n-1)]f_{sk}$ 是以基体土的承载力特征值的某一倍数(桩土应力比)来表达复合地基的承载力。多年来的设计实践和研究表明^[9,10]:由散体材料增强体(散体材料桩)形成的复合地基中的散体材料增强体(散体材料桩)和基体土的承载力特征值,均能根据基体土的物理力学性能和散体材料桩的密实度有效的进行确定。对适用于散体材料增强体(散体材料桩)进行加固处理的土层,处理后桩间土承载力特征值 f_{sk} 一般为天然地基承载力特征值的(1.15~1.25)倍,对于细颗粒基体土体提高幅度取小值、粗颗粒基体土体提高幅度取大值;当散体材料桩(碎石桩)桩体长度范围内连续重型动力触探试验锤击数均大于17击时(达到密实状态时),其承载力特征值 f_p 不小于500 kPa。因此作者建议散体材料增强体(散体材料桩)复合地基承载

力特征值也可按下式进行估算。

$$f_{spk}=m \times f_p+(1-m) \times f_{sk} \quad (16)$$

采用式(16)估算公式更易于设计计算和进行施工质量控制。式(16)均适用于振冲碎石桩、振动沉管砂石桩和柱锤冲扩碎石桩三种挤密置换工艺,三者散体材料增强体和基体桩间土体的承载力取值大小基本相同,其地基承载力提高幅度和降低变形效果的差异,主要是由于三种工艺散体材料增强体成桩直径和布置间距不同,导致增强体面积置换率大小不同所致。面积置换率 m 与桩径和平面布置形式及桩间距有关,式(16)中的面积置换率 m 由式(17)~(19)计算取值^[1]:

$$\text{正方形布置} \quad m=\frac{D^2}{(1.13c)^2} \quad (17)$$

$$\text{等边三角形布置} \quad m=\frac{D^2}{(1.05c)^2} \quad (18)$$

$$\text{矩形布置} \quad m=\frac{D^2}{(1.13\sqrt{ab})^2} \quad (19)$$

式中: D 和 c 及 a 和 b 分别为散体材料增强体桩身直径和桩间距及散体材料增强体纵间距和横间距。

3 建(构)筑物复合地基变形计算

复合地基竖向压缩变形表现为建(构)筑物基础的沉降,复合地基变形计算主要是对上部结构浅基础的沉降计算,是复合地基与基础设计中重要的组成部分。由复合地基与基础设计流程图(图1)可知:建(构)筑物浅基础设计计算首先在满足复合地基承载力要求前提下,建(构)筑物的复合地基变形计算值不应大于地基变形允许值。由此不难理解,复合地基承载力确定与复合地基变形控制有关,即复合地基承载力不再是强度概念,而是满足建(构)筑物正常使用要求的综合性特征指标。

复合地基变形引起的建(构)筑物基础沉降可以分为沉降量、沉降差、倾斜和局部倾斜四种。建(构)筑物的结构类型不同,起控制作用的沉降类型也不一样。通常多、高层及高耸建筑由倾斜值和平均沉降量控制;框架结构和单层排架结构受相邻柱基础的沉降差控制;砌体承重结构受局部倾斜值控制。地基与基础规范根据上部结构对地基变形的适应能力和使用上的要求,确定了地基变形控制指标允许值^[4,5]。随着计算机辅助设计技术的不断发展,通过多年的设计实践和应用研究发现,其可将复杂的数学方程公式和工程地质条件,通过电子计算技术和模拟进行求解,在复合地基变形分析计算时,既能考虑上部结构荷载不同大小分布、相邻荷载和

基础不同形式的影响,也能考虑地基土层分布的影响。相较于以往将不规则基础形式按面积当量成矩形或圆形基础、平均附加压力值和单一柱状图的手工简易变形计算方法,计算机辅助设计技术进行复合地基变形分析计算,更能准确地确定沉降量和不均匀沉降,正确诠释建(构)筑物基础的沉降量、沉降差、倾斜和局部倾斜等含义。

借助计算机辅助设计技术进行复合地基变形分析计算,通常以下数学方法和步骤完成^[11,12]:

(1)建(构)筑物地基土层构成及分布情况和基底下复合土层及下卧层的压缩模量,是反映地基土层由附加压力引起竖向变形大小和分布的重要几何及力学参数。对地基土层进行建模时,通过输入工程地质单元范围内每个勘探孔位置和柱状图及基底下所有土层物理力学参数,复合地基变形计算中任意点的竖向各土层的标高和物理力学参数,根据工程地质单元范围内勘探孔提供的竖向各土层的标高和物理力学参数,计算机辅助设计软件通过数学形函数方法插值法求得。

(2)对建(构)筑物形状不规则的筏板基础和附加荷载分布不均匀的复合地基变形计算,采用分块集中力法计算基础下的压力分布,并按刚性基础的变形协调原则调整,分块越小计算精度越高。

(3)对有相邻基础荷载影响的独立基础复合地基变形计算,按应力叠加原理,采用角点法计算。

(4)对条形基础地基变形计算,首先将条形基础按纵、横墙交点分成若干个矩形基础,考虑相邻矩形基础荷载相互影响,按应力叠加原理,采用角点法计算。

利用计算机辅助设计根据式(5)进行复合地基变形计算时,通过式(6)计算的基底附加压力是按柔性荷载考虑。由于柱下钢筋混凝土独立基础(扩展基础)和墙下条形基础(刚性基础)底面积尺寸较小,结构简单,其基底压力分布接近于式(5)和式(6)的线性分布假定,因此可直接应用式(5)和式(6)复合地基变形分析计算结果,进行判断基础的各项沉降是否满足控制指标要求;与之相反,柱下钢筋混凝土条形基础和钢筋混凝土筏板基础底面积尺寸较大,结构复杂,采用式(5)和式(6)进行复合地基变形分析计算,其基础沉降与基底反力分布在分析计算中出现基础底与复合地基持力层背离(俗称不粘锅)现象,主要原因是由于柱下

钢筋混凝土条形基础和钢筋混凝土筏板基础的底面积大,其不但可以减小基底压力,同时也能有效地增强基础的整体性,再加上上部结构对基础刚度的贡献,使得柱下钢筋混凝土条形基础和筏板基础能有效地传递荷载,并对复合地基的变形起约束和调整作用,因此对于柱下钢筋混凝土条形基础和钢筋混凝土筏板基础,在应用式(5)和式(6)对复合地基进行变形分析计算时,应考虑基础和上部结构刚度对基础沉降的均衡作用^[13,14]。

4 复合地基增强体平面布置

由上述分析计算发现,同时满足上部结构浅基础基底压力设计目标值和沉降控制指标的复合地基最终方案由增强体设计桩长(L)、桩径(D)和面积置换率(m)三个设计参数体现。

由于散体材料增强体(散体材料桩)单桩竖向承载力特征值是依靠桩增强体周围土体的侧限阻力保持其形状并提供抗力。因此相较于散体材料增强体(散体材料桩)复合地基处理范围需扩充至基础外缘外一定范围,以增强地基的稳定性,防止基底下被处理土层在基底压力作用下产生侧向变形,增强体主要起桩体效应(置换作用)的有粘结强度增强体(半刚性桩和刚性桩)复合地基处理范围仅在基础范围内布桩即可^[2]。同时为了使基底下复合地基中各增强体受力较为均匀,在布置增强体时,尽可能使基础中心与增强体群的横截面形心重合或接近,因此根据基础形式不同,复合地基增强体平面布置通常按以下原则进行:

(1)对于独立基础有粘结强度增强体(半刚性桩和刚性桩)复合地基和散体材料增强体(散体材料桩)复合地基的增强体布置,首先均按式 $n=(A \times m)/A_p$ (A 和 A_p 分别为独立基础底面积和增强体截面面积)计算增强体桩数(n),以等边(腰)三角形或矩形(含正方形)形式均匀地布置在基础范围以内,见图6中的实心圆部分;图6中基础范围内有粘结强度增强体(半刚性桩和刚性桩)布置间距和基础边缘距最外一排增强体中心的距离,应同时满足 $3D \leq 2a(2b) \leq 5D$ 和 $D \leq c(c_1) \leq a(b)$ 要求, D 为增强体桩直径。然后再根据基础范围内增强体纵、横向增强体布置间距,对散体材料增强体(散体材料桩)复合地基处理范围向基础外进行扩充,扩充部分增强体布置见图6中的空心圆部分,扩充范围要求见文献[2]。

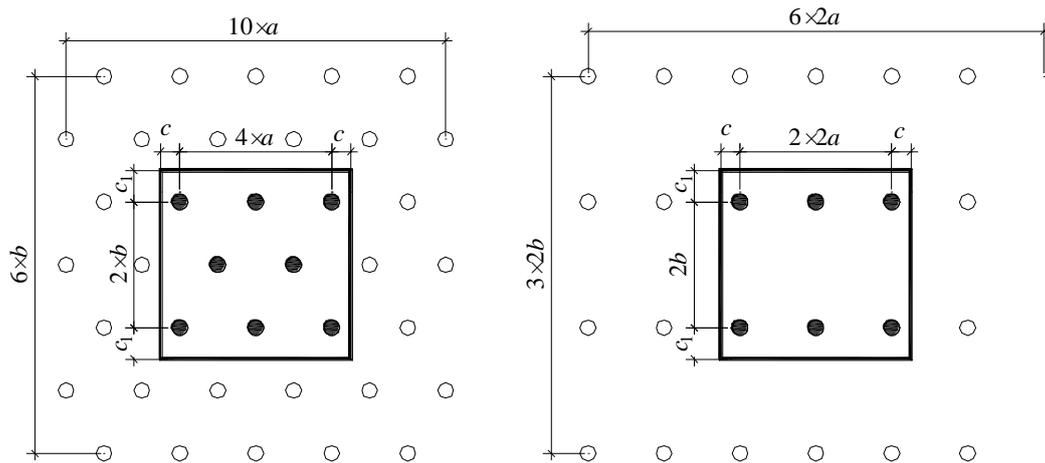


图 6 复合地基增强体平面布置 (独立基础)

Figure 6 Reinforcement layout of composite foundation(independent foundation)

(2) 对于条形基础有粘结强度增强体(半刚性桩和刚性桩)复合地基和散体材料增强体(散体材料桩)复合地基的增强体布置,首先沿建(构)筑物基础的纵、横向轴线将条形基础分成若干个矩形基础单元,然后对每个矩形基础单元按上述独立基础布置原则实施布置增强体;对相邻矩形基础单元间扩充增强体重叠区域,取相邻矩形基础单元布置间距的相对较小值。

(3) 对于矩形筏板基础有粘结强度增强体(半刚性桩和刚性桩)复合地基和散体材料增强体(散体材料桩)复合地基的增强体布置,按上述独立基础布置原则实施布置增强体。对于异形筏板基础有粘结强度增强体(半刚性桩和刚性桩)复合地基和散体材料增强体(散体材料桩)复合地基的增强体布置,选择筏板基础纵、横两边最长边作为矩形基础形式,首先均按式 $m = A_p/(a \times b)$ (A_p 增强体截面面积, a 、 b 分别为增强体纵、横向中心间距)在其范围内进行均匀布置增强体。对于有粘结强度增强体(半刚性桩和刚性桩)复合地基,筏板基础上下和左右的凹凸部分,在满足均匀布置和兼顾基础边缘距桩中心 $D \leq c(c_1) \leq 1/2a(b)$ 的原则上进行补桩,见图 7(a)中实心圆部分增强体;对于散体材料增强体(散体材料桩)复合地基,增强体外扩间距与筏板基础范围内增强体布置间距一致,扩充范围要求同上述独立基础,见图 7(b)。

(4) 由于刚性增强体(CFG 桩等)复合地基技术加固效果显著^[15],通常筏板基础无需外挑,其即可满足地基承载力和地基变形控制要求^[2,4,7]。该筏

板基础刚性增强体(CFG 桩等)平面布置执行以下原则:首先根据筏板基础外围相邻纵、横墙节点分别选取纵、横墙长,在不同长度纵、横墙下沿墙布置单排刚性增强体,刚性增强体圆心与纵、横墙中心线重合,在保证纵、横墙节点处布置刚性增强体的同时,相邻两节点均匀布置刚性增强体, c_1 、 c_2 、 c_3大小在满足 $3D \leq (c_1, c_2, c_3, \dots) \leq 5D$ 前提下,刚性增强体桩距 c_1 、 c_2 、 c_3大小可在 $\sqrt{A_p/m}$ 上下调整,见图 8 中实心圆部分;然后按式 $n = (A \times m)/A_p$ (A 和 A_p 分别为无外挑筏板基础底面积和刚性增强体截面面积)计算刚性增强体总桩数(n),在满足 $3D \leq$ 刚性增强体桩间距 (a 、 b 和实心圆与空心圆间间距) $\leq 5D$ 前提下,将其余刚性增强体桩(总桩数扣除实心圆部分刚性增强体桩数)均匀布置在无外挑筏板基础内,见图 8 中空心圆部分。

(5) 在地震设防区,采用振冲碎石桩、振动沉管砂石桩和柱锤冲扩碎石桩三种挤密置换增强体对地基进行加固处理,所形成的散体材料增强体(散体材料桩)复合地基,在消除饱和砂土和饱和粉土产生液化影响的同时,也能提高地基承载力和降低地基变形^[10]。因此在基础设计计算时应考虑这一有利影响,以达到减少基础底面积、降低造价的目的。在振冲碎石桩、振动沉管砂石桩和柱锤冲扩碎石桩加固地基设计所依据的规程、规范中,对基础边缘以外的处理宽度文献[2]和文献[16]的规定存在明显差异,文献[17]已对此进行详细分析探讨,并给出设计建议,限于篇幅,不再赘述。

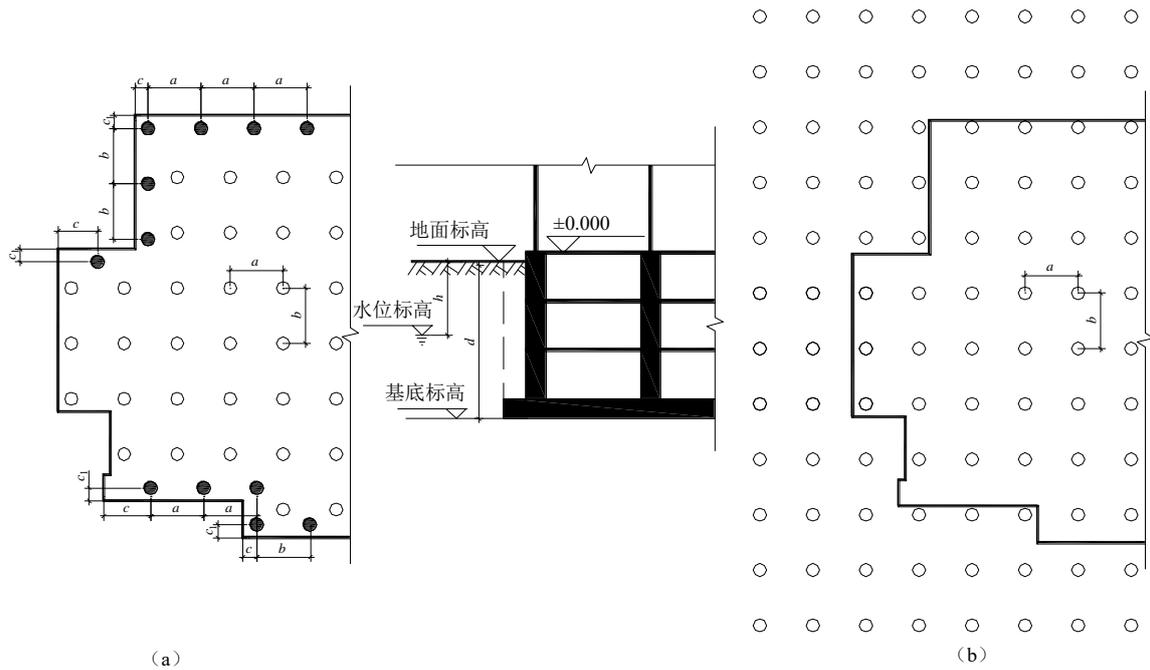


图7 复合地基增强体平面布置图(筏板基础)

Figure 7 Layout plan of reinforcement of composite foundation (raft foundation)

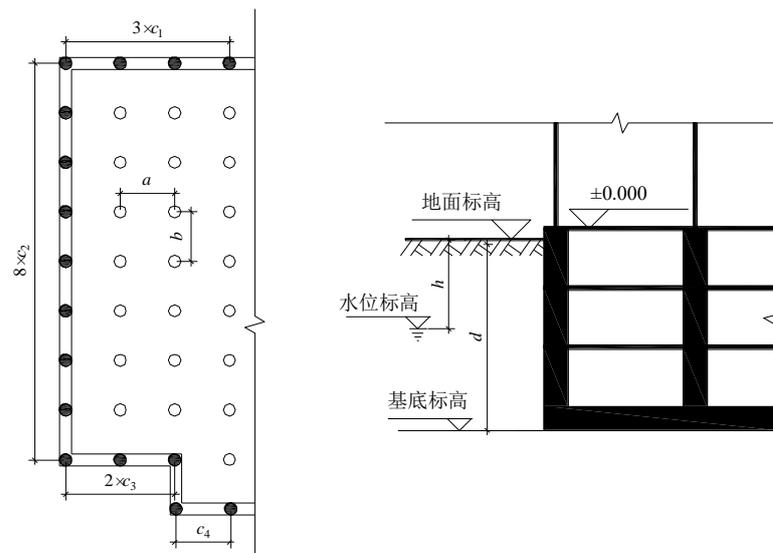


图8 复合地基增强体平面布置图(无悬挑筏板基础)

Figure 8 Layout plan of reinforcement of composite foundation (no overhanging raft foundation)

5 同一单体建筑基底埋深不同的增强体设计桩长处理

复合地基设计通常以单体建筑为工程地质单元,同一工程地质单元的增强体设计桩长(L)由基(板)底最浅标高确定,框架结构或厂房独立基础(或条形基础)由于受加工设备工艺限制或为了满足地下管线设施埋深和走向要求以及高层住宅或

办公用房筏板基础受集水坑和电梯井等局部下沉影响,导致同一单体建筑结构基础埋深不在同一标高上,因上述原因使基(板)底标高降低时,其增强体设计桩顶标高情况相应降低,增强体桩径(D)、增强体面积置换率(m)和增强体桩底标高保持不变^[18,19]。即如图9所示,不因基底埋深不同产生的高差 h_1 或 h_2 ,而增加基底埋深相对较深部分增强体的设计桩长。

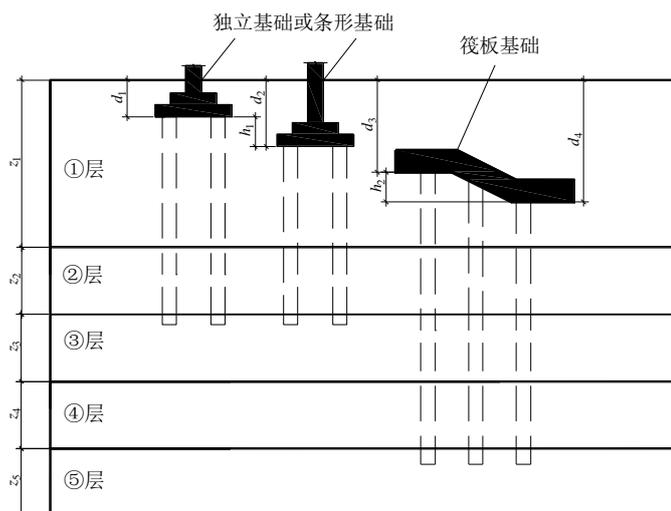


图 9 不同基础埋深复合土层示意图

Figure 9 Schematic diagram of foundation with different buried depth in composite soil layers

6 结语

(1) 复合地基与基础两项设计计算既具有一定的关联性, 又在满足复合地基与基础两项设计的相关规程、规范要求时, 互相独立。

(2) 本文通过理论分析并结合工程设计实践, 对有关复合地基与基础一体化设计中的若干问题的探讨分析和结论, 可为工程技术人员进行复合地基与基础一体化设计提供参考。

(3) 将复杂的复合地基与基础设计计算的数学方程式和工程地质条件, 通过电子计算技术和模拟进行求解, 使得复合地基与基础设计一体化设计理念将会受到广大工程技术人员的青睐。随着计算机应用的普及, 基于现有设计规程、规范设计计算理论, 通过对复合地基与基础进行一体化设计, 最终可实现综合性价比较好的复合地基与基础设计方案。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [2] JGJ79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] GJ94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [4] GB50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [5] JGJ6-2011 高层建筑筏形与箱形基础技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

- [6] 朱炳寅, 姜宇, 杨琦. 建筑地基基础设计方法及实例分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [7] 党昱敬. CFG 桩复合地基设计的几点认识[J]. 建筑结构, 2013, 43(24): 80-83.
- [8] 党昱敬, 张若筠. 预应力高强混凝土管桩在湿陷性黄土地基中的应用设计研究[J]. 工程勘察, 2012, 40(5): 19-23.
- [9] 党昱敬, 王余庆. 碎石桩复合地基承载力计算公式的可靠性探讨[J]. 建筑结构, 1995, 6: 31-36.
- [10] 党昱敬. 挤密碎石桩法处理粉土地基的设计方法[J]. 工业建筑, 1995, 25(12): 24-28.
- [11] 中国建筑科学研究院 PKPM CAD 工程部. TAT、SATWE、JCCAD 用户手册及技术条件[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [12] 同济启明星 (Qimstar®) 桩基础设计计算软件 PILE7.2 使用手册[M]. 上海: 2012.
- [13] 党昱敬. 刚性桩复合地基沉降计算方法的研究及应用[J]. 建筑技术, 2012, 43(3): 243-247.
- [14] 党昱敬. CFG 桩复合地基与钢筋混凝土筏板基础设计[J]. 建筑结构, 2016, 46(8): 55-63.
- [15] 闫明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [16] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010(2016 年版).
- [17] 党昱敬. 人工地基设计问题分析研究[J]. 建筑技术, 2016, 47(12): 1101-1104.
- [18] 党昱敬. CFG 桩复合地基与钢筋混凝土独立基础设计[J]. 建筑结构, 2015, 45(11): 75-80.
- [19] 党昱敬. 综合性结构具有不同 ζ 值的 CFG 桩复合地基设计[J]. 建筑结构, 2018, 48(S1): 715-727.