

文章编号: 1000-7598 (2012) 02-0539-08

考虑桩端刺入沉降的桩土自平衡式复合地基设计

刘 鹏^{1,2}, 杨光华^{1,3}

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 广州市水务规划勘测设计研究院, 广州 510640;
3. 广东省水利水电科学研究院, 广州 510610)

摘 要: 复合地基的本质是增强体与地基土通过变形协调共同承担上覆荷载。褥垫层的设置起到了协调桩土变形的作用, 但褥垫层工作性状及变形特性尚不明确, 其厚度设计仍然参考规范依靠经验判断, 往往不能充分发挥地基土的承载作用。目前复合地基设计通常采用褥垫层调节桩土变形, 而忽略了桩端刺入沉降协调桩土变形来发挥地基土的承载作用, 为了利用桩端刺入沉降协调桩土变形, 充分发挥桩间土承载的作用, 减薄褥垫层或不设褥垫层并减小设计桩长, 以期降低地基处理费用, 实现桩土共同承担荷载的目的, 建立了通过控制桩端刺入沉降协调桩土变形的自平衡式复合地基设计方法。通过与褥垫层方法对比以及工程实例计算, 结果表明, 该方法可更好地发挥桩土承载作用, 为复合地基优化设计提供参考。

关 键 词: 复合地基; 桩端刺入沉降; 褥垫层; 桩土自平衡式; 变形协调

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

Pile-soil self-balanced composite foundation design considering pile-end piercing settlement

LIU Peng^{1,2}, YANG Guang-hua^{1,3}

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Guangzhou Institute of Water Plan Investigation & Design, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Provincial Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China)

Abstract: The nature of composite foundation is the load from the overlying shared by the reinforcement and ground soil via the deformation compatibility. Cushion plays a coordinating role of pile-soil deformation; however, its characteristics of the work and deformation characteristics are not yet clear. Designing cushion thickness still depends on experience or reference standard. It can not fully play the bearing capacity of foundation soil. The pile-soil deformation is usually adjusted by cushion in current composite foundation design. The pile-end piercing settlement coordinates pile-soil deformation and plays the role of foundation soil bearing capacity is ignored. Using pile-end piercing settlement to adjusted pile-soil deformation and bring foundation soil bearing capacity into full play, the cushion thickness is reduced or not to set cushion, and the designed pile length is shortened in order to reduce the cost of ground handling and achieve the purpose of load shared by pile and soil finally. A design method for pile-soil self-balanced composite foundation is established through controlling pile-soil deformations adjusted by pile piercing settlement. Through contrasting with the cushion method and project examples, it is proved that the method can show the foundation soil bearing capacity better, and provide references for the optimal design of composite foundation.

Key words: composite foundation; pile-end piercing settlement; cushion; pile-soil self-balance; deformation compatibility

1 引 言

复合地基的本质及其形成的基本条件是部分土体被增强或者被置换形成增强体, 增强体与地基土通过变形协调共同承担上覆荷载^[1-2]。规范^[1]常用的复合地基沉降计算方法是将加固区压缩量与下卧层压缩量之和作为复合地基总沉降量, 该方法计算

简便, 但准确性差, 尤其是荷载传递计算模型的误差大, 导致下卧层压缩量很难准确计算, 设计计算没有考虑桩土变形协调作用, 也没有真实反映桩土各自的压缩量, 褥垫层的协调作用及变形均没有考虑。复合地基桩长设计传统确定方法是在满足地基承载力的情况下, 估算地基沉降, 且通常以桩端进入一定的持力层依靠经验来研判, 但往往桩长取值

收稿日期: 2011-06-26

基金项目: 广州市水务局水利科研项目资助 (穗水科研 2008-05)。

第一作者简介: 刘鹏, 男, 1977 年生, 博士研究生, 高级工程师, 从事岩土工程方面的咨询、设计与研究工作。E-mail: lpp_rock@163.com

偏于保守,造成不必要的浪费。目前土和桩的承载力发挥系数的确定还是以经验为主,缺乏量化方法,这一问题应从沉降变形协调方面寻找解决方法^[3]。

影响复合地基设计的因素较多,如地质条件、复合地基设计控制的沉降量、复合地基上覆荷载、褥垫层的厚度及其模量、桩身荷载传递模式、桩端沉降量,以及地基土承载力的发挥等。其中,褥垫层对复合地基设计的影响较大,起到协调桩土变形的作用。尽管很多学者对褥垫层不同厚度和刚度的工作机制及其效应作了大量的研究^[4-9],取得了很多有价值的研究成果^[10-12],但目前对褥垫层的工作性状及变形特性还并不十分明确,其厚度设计仍依靠经验判断,随意性较强,其刚度也复杂多变,实际工程中往往很难最大限度地发挥地基土承载力作用,所以对褥垫层还有待进一步研究。另外,有些研究成果是建立在桩端落在坚硬土层或岩石上,桩端沉降很小,几乎不考虑桩端刺入沉降作为桩土协调形变的影响因素,忽略了桩端刺入沉降也可以发挥地基土承载力的作用。

对于桩端刺入沉降的相关研究相对较少,宰金珉^[13]提出塑性桩或卸荷减沉桩的概念,认为塑性支承桩在荷载分担上恪守承担 p_u 的责任,在沉降发展上则既具有自适应性,又具有可协调性。

为了利用桩端刺入沉降协调桩土变形,发挥桩间土承载力的作用,达到桩土共同承担荷载的目的,结合前人研究的成果,在褥垫层与桩端刺入沉降对地基土承载力发挥程度的对比研究基础上,本文建立了通过控制桩端刺入沉降调节桩土变形的自平衡式复合地基设计方法,所谓通过控制桩端刺入沉降调节桩土变形的自平衡式复合地基是指不设褥垫层情况下,通过对桩端刺入沉降的控制,协调桩土变形达到自我平衡的方式,桩端刺入沉降既不会过大而失去承载力作用,也不会过小而让地基土发挥不了应有的作用。该方法对桩端刺入沉降的有效控制显得至关重要,为了较准确计算桩端刺入沉降量,建立了一个考虑桩土变形协调和土的压缩变形对桩体荷载传递影响的双曲线模型函数,以及建立荷载从桩顶向下传递计算的方法,可更准确计算桩侧摩阻力及桩端荷载,桩端土层沉降(桩端刺入沉降)采用原位土双曲线切线模量法^[14-15]计算。本文建立的设计方法可以最大限度地利用桩体和土体的承载力,同时可以减薄褥垫层或不设褥垫层,减小设计桩长,降低地基处理费用,达到优化设计的目的。目前,在珠江三角洲地区已有已建水利工程复合地基设计时不设置褥垫层的案例,建成后运行较好,

但其设计计算理论方法欠缺,本文建立的通过控制桩端刺入沉降调节桩土变形的自平衡式复合地基设计方法,将为今后复合地基设计提供一个新思路。

2 不同型式桩土变形协调机制分析

按照沉降控制的复合地基设计,应首先满足地基沉降控制的要求,而桩体向上刺入或向下刺入都是地基沉降的重要组成部分。在复合地基设计控制的沉降量及承载力下,刚性基础底板与褥垫层、桩间土及桩顶沉降是一致的,设计时应充分考虑桩土变形协调作用。当复合地基设置褥垫层时,基础底板的沉降等于桩间土上部褥垫层变形量 s_{cs} 与桩间土的沉降量 s_s 之和(即 $s_0 = s_{cs} + s_s$),或者桩顶上部褥垫层变形量(或桩顶刺入量) s_{cp} 与桩顶沉降量 s_p 之和(即 $s_0 = s_{cp} + s_p$),桩顶沉降量 s_p 等于桩身压缩量 Δs_p 与桩端沉降量 s_b 之和($s_p = \Delta s_p + s_b$);当复合地基不设置褥垫层时,根据桩土变形协调的条件,基础底板的沉降等于桩间土顶面的沉降量 s_s ,也等于桩顶沉降量 s_p ,即 $s_0 = s_s = s_p$ 。

复合地基褥垫层设置的作用是协调桩土变形,并尽可能发挥地基土的承载力,但如果桩土通过桩端刺入沉降可实现桩土自平衡协调,也可最大限度地发挥地基土的承载力作用,则可不设置褥垫层。在同一地质条件和地基基础下,相同的地基沉降量和上覆荷载作用,对比分析褥垫层与桩端刺入沉降对地基土承载力发挥的作用,有以下4种典型设计型式:

(1) 型式 I: 当桩端进入持力层,桩端无刺入沉降时,桩长为 L_1 ,桩土变形协调完全依靠褥垫层,因此,褥垫层的设置是必须的,如图1所示,桩端无刺入沉降,桩顶刺入褥垫层,通过褥垫层变形来协调发挥地基土的承载力,达到桩土共同承担上覆荷载的目的。桩顶刺入量越大,地基土压缩沉降就越大,承载力贡献越多,此时在设计允许的沉降范围内,褥垫层厚度应适当加大,以保证桩顶足够刺入。但地基土沉降越大,在桩侧产生的负摩阻力就越大,且负摩阻力的影响深度越深,桩身轴力越大,所需桩长或桩端阻力越大。目前刺入量还没有准确计算的方法,沉降也很难准确控制,但大多都偏于保守,沉降量也较小,所以,实际工程中很难做到让地基土承载力最大限度地发挥。这种设计型式一般多用于桩端基本无沉降的刚性桩复合地基,其基础底板沉降主要由桩顶刺入褥垫层量构成,桩身压缩量相对较小,在此情况下 $s_0 = s_{cp} + s_p = s_{cs} + s_s$ 。

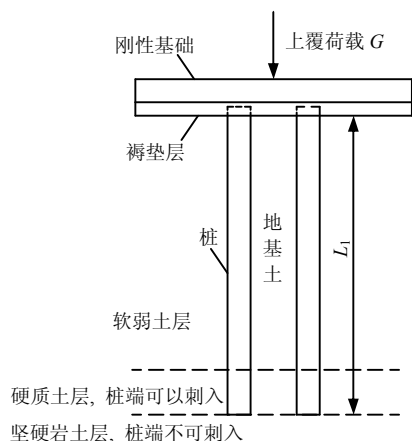


图1 桩端无刺入沉降

Fig.1 Pile-end without piercing settlement

(2) 型式II: 当桩端置于硬质土层, 不进入坚硬岩土层, 且有较小的刺入沉降量, 桩顶设置褥垫层, 但褥垫层厚度小于设计型式I, 桩顶也有一定的刺入量时, 桩的长度为 L_2 , 显然 $L_1 > L_2$, 如图2所示。

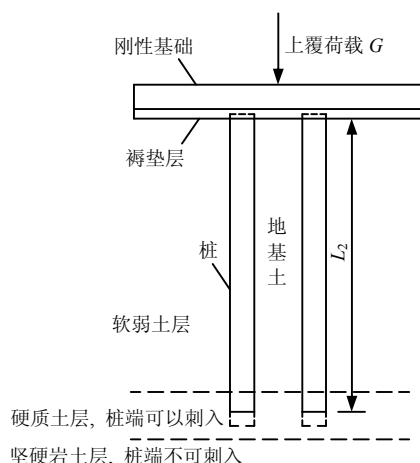


图2 桩端及桩顶均有刺入变形

Fig.2 Pile-end and pile-top with piercing deformation

通过桩端刺入和桩顶刺入褥垫层来协调地基土承载力发挥, 此时, 如果桩端沉降较大, 褥垫层刺入量可以适当减小, 反之, 如果桩端沉降量较小, 褥垫层刺入量可以适当增大, 两者之和总的沉降控制在设计允许的范围内。基础底板沉降主要由褥垫层和桩端刺入沉降构成, 在此情况下 $s_0 = s_{cp} + s_p = s_{cs} + s_s$ 。

(3) 型式III: 当桩端置于硬质土层顶面, 桩端有一定的刺入条件, 褥垫层可以不设置, 桩长为 L_3 , 可知 $L_2 > L_3$, 如图3所示。通过桩端刺入来协调地基土承载力发挥。

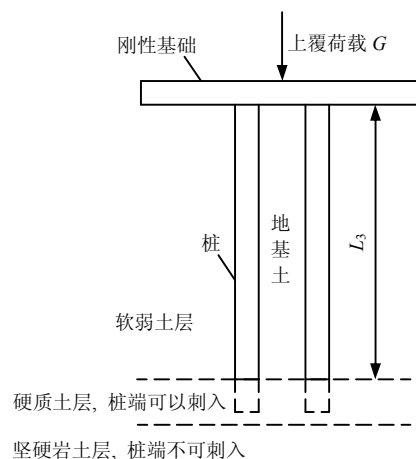


图3 无褥垫层有一定的桩端刺入沉降

Fig.3 A certain piercing settlement of pile-end without cushion

在上覆荷载作用下, 基础底板、桩与地基土一起沉降, 首先是桩顶受力传至桩端, 产生刺入沉降, 桩顶下移, 地基土承载力增加, 地基土顶面相应向下位移, 桩顶再次承担更大荷载, 桩端刺入沉降加大, 单桩承载力有所提高, 地基土承载力再次提高, 直至桩土共同承担上覆荷载, 通过控制桩端刺入沉降来协调桩土变形, 达到桩土自平衡、自适应的状态。桩顶(或桩端)沉降越大, 地基土承载力发挥越多, 应尽可能接近底板基础设计沉降控制值, 这样才能最大限度地发挥地基土的承载力。基础底板沉降主要有桩端刺入沉降构成, 且桩顶沉降与桩间土顶面的沉降相等, 即 $s_0 = s_s = s_p$ 。

(4) 型式IV: 当桩端置于软弱土层时, 桩端有较大的沉降, 不设置褥垫层, 桩长为 L_4 , $L_3 > L_4$, 如图4所示, 通过桩端刺入沉降来协调桩土变形, 发挥地基土承载力。桩端沉降较大, 地基土承载力发挥多, 其桩土变形协调机制如同设计型式III, 也靠控制桩端刺入沉降来协调桩土变形, 达到桩土自平衡、自适应的状态。但桩端承载力较低, 其刺入沉降较大, 不易控制, 相同荷载作用下, 桩端刺入沉降易超过设计控制的沉降量, 这就需要适当增加桩的数量, 减少桩顶荷载。这种设计型式主要在深厚软土中上覆荷载不大、沉降要求不高的情况下应用。基础底板沉降主要由桩端沉降构成, 即 $s_0 = s_s = s_p$ 。

由上述4个典型的复合地基设计型式对比可以看出, 从地基土承载力发挥程度的角度分析, 设计型式III和IV发挥的程度最高, 因为, 桩土随基础底板一起沉降, 由地基土荷载-沉降($p-s$)曲线知, 地基土承载力可以按照设计控制的沉降量来发挥,

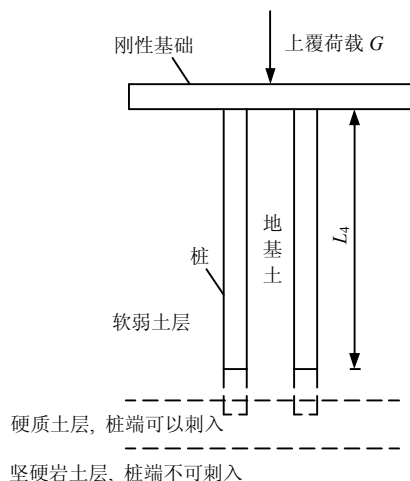


图 4 无褥垫层有较大桩端刺入沉降

Fig.4 A larger piercing settlement pile-end without cushion

也就是在设计控制的沉降范围内,地基土沉降越是接近设计控制的沉降量,其承载力发挥的越大,其次是设计型式 II,最低的是设计型式 I,主要是因为地基土顶部褥垫层有一定压缩变形,占用了一小部分地基土沉降量,在总沉降量一定的情况下,地基土的压缩沉降要小些。另外,褥垫层刺入量也很难确定,从而地基土承载力的发挥受到较大影响。从地基处理费用的角度分析,在相同承载力、沉降量等外界条件下,设计型式 III 处理地基费用最省,其次是型式 IV,费用最高的是设计型式 I,主要是因为受桩侧负摩阻力作用,设计桩长最长,且设有较厚的褥垫层。由此可见,设计型式 III 在上覆荷载的作用下,桩顶及地基土顶面与基础底板一起沉降,通过桩端刺入沉降来协调桩土变形,构建桩土自平衡式的变形协调关系,是地基处理较优化的方法。

3 桩土荷载传递力学模型

3.1 荷载传递力学模型

荷载传递法中,桩被视作弹性单元组合体,每一单元与土体之间均用非线性弹簧联系,其应力-应变关系表示桩侧摩阻力与剪切位移之间的关系,通常称为荷载传递函数^[16]。设置褥垫层和不设置褥垫层的复合地基桩土荷载传递规律是不相同的。设置褥垫层复合地基桩土荷载传递力学模型如图 5 所示,桩顶及地基土顶面沉降不同,桩体等沉面上部出现负摩阻力,等沉面以下桩侧才出现正摩阻力;不带褥垫层复合地基桩土荷载传递力学模型如图 6 所示,桩身自上而下均为正摩阻力。

在桩顶荷载作用下,取小段 Δh_i 作为研究对象,则由力的竖向平衡条件可得:

$$N_i = u_p h_i \tau(h_i) + N_{i+1} \quad (1)$$

小段桩身产生的弹性压缩量为

$$\Delta s_{pi} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2E_p A_p} \Delta h_i \quad (2)$$

式中: N_i 为桩体第 i 单元顶部荷载或轴力; u_p 为桩周长; A_p 为桩身截面面积; E_p 为桩身混凝土弹性模量; $\tau(h_i)$ 为桩侧摩阻力函数,也即传递函数。

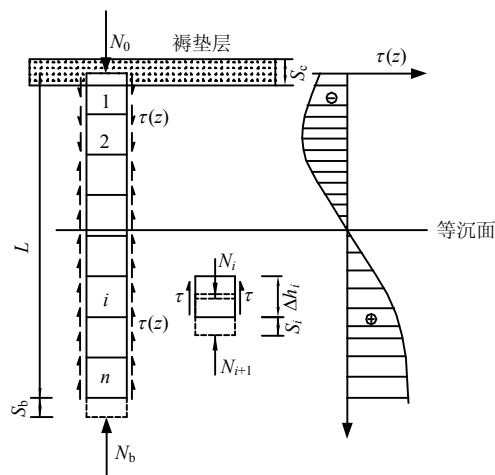


图 5 带褥垫层桩体荷载传递模型

Fig.5 Mechanical model of load transfer with cushion

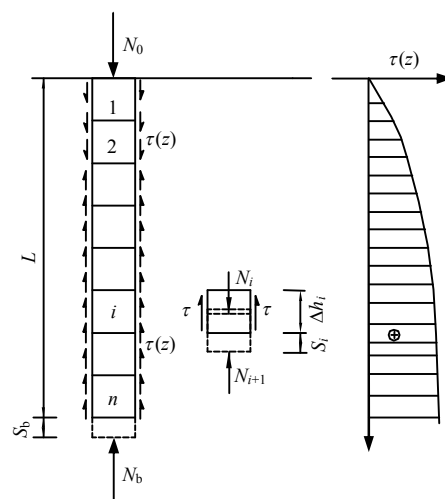


图 6 不带褥垫层桩体荷载传递模型

Fig.6 Mechanical model of load transfer without cushion

3.2 非线性双曲线模型传递函数

由于土体的非线性与成层非均质性,大量的静载试验表明,桩-土之间的传递函数可用非线性双曲线函数来描述^[17-18],即:

$$\tau(z) = \frac{s(z)}{a + bs(z)} \quad (3)$$

式中: a , b 两个参数, 可由桩侧 (或桩端) 产生极限位移 (沉降) s_u 时相应的桩侧 (或桩端) 极限摩阻力 τ_u 来确定。当 $s \rightarrow \infty$ 时, $1/b$ 实际上就是桩侧土的摩阻力极限值, 由于桩-土之间的剪切位移是发生在桩侧土体中的, 因此, 在某一深度处的 $1/b$ 就是该处土的竖向抗剪强度。

4 桩土自平衡式复合地基设计

地基土的沉降位移采用原位土双曲线切线模量法^[14-15]推求, 进而求得桩间土、桩端土层的 $p-s$ 曲线。无褥垫层复合地基正常工作情况下, 基础底板与桩间土顶面及桩顶沉降是相等的, 假设复合地基设计控制沉降量为 s_0 , 则桩间土承担的荷载依据其 $p-s$ 曲线可确定为 P_s , 在已知复合地基桩数为 n 的条件下, 由式 (4) 可以求得单桩桩顶在相应沉降量下承担的荷载 $N_0 = P_p A_p$ 。

$$G = nP_p A_p + (A - nA_p)P_s \quad (4)$$

式中: A 为刚性基础面积; A_p 为桩的截面面积; n 为桩数; G 为复合地基上覆荷载; P_p 为桩顶应力; P_s 为复合地基桩间土应力。

由于刚性基础底板下桩顶承担的荷载及沉降已知, 桩间土承担的荷载及沉降也已知, 这为荷载向下逐单元传递计算提供了基础条件。考虑桩-土体连续性的自上而下的计算方法, 桩顶荷载向下逐单元传递计算, 以桩体压缩量及桩端刺入沉降量为控制要求, 进而确定满足地基沉降及桩土自平衡的单桩长度, 这种方法更符合桩身荷载传递规律。荷载传递计算及桩长确定方法及步骤如下:

(1) 根据土层划分和实际计算精度需要将桩长沿深度分为 $1, 2, \dots, n$ 个单元, 土层同样对应桩深度分为 $1, 2, \dots, n$ 个单元, 每个单元长度均为 Δh (一般 0.5 m), 且桩、土单元对应相等。

(2) 假定桩的第 1 单元底面处的位移为 s_{p1} , 桩的第 1 单元 Δh 压缩量为 Δs_{p1} , 土的第 1 单元底面处的位移为 s_{s1} , 桩间土体第 1 单元 Δh 压缩量为 Δs_{s1} , s_{s1} 与 Δs_{s1} 可由双曲线切线模量法计算确定。

(3) 由桩-土相对位移关系可以确定桩的第 1 单元桩对土相对位移为 $\Delta s_1 = s_{p1} - s_{s1}$, 同理, 第 2 单元桩底面处的位移为 s_{p2} , 土的第 2 单元底面处的位移为 s_{s2} , 则桩对土相对位移为 $\Delta s_2 = s_{p2} - s_{s2}$ 。依次, 第 n 单元桩底面处的位移为 s_{pn} , 土的第 n 单元底面处的位移为 s_{sn} , 则桩对土相对位移为 $\Delta s_n = s_{pn} - s_{sn}$ 。

(4) 将桩对土相对位移 Δs_i 代入式 (3) 计算桩

侧摩阻力值 τ_i ; 然后求桩的第 1 单元底面处的轴向力 $N_1 = N_0 - \tau_1 u_p \Delta h$ 。同理, 桩的第 2 单元底面处的轴向力 $N_2 = N_1 - \tau_2 u_p \Delta h$, 依次地, 第 n 单元底面处的轴向力 $N_n = N_{n-1} - \tau_n u_p \Delta h$, 桩端下土体顶面由该公式传递计算得到。

(5) 小段桩身 Δh_i 的压缩量 Δs_{pi} 由式 (1) ~ (3) 联合计算求得。

(6) 在桩端荷载 N_p 的作用下产生的刺入沉降由双曲线切线模量法求得。计算得到的桩端刺入沉降须在设计控制的沉降范围内, 由此方法计算得到的桩长可以协调桩土变形, 实现桩土自平衡和自适应状态, 共同承担上覆荷载的目的。

5 实例分析

芦苞水闸^[3, 19]是北江大堤防洪工程的一座大型分洪闸, 该闸底板采用整体混凝土板基础, 底板尺寸为 $92.0 \text{ m} \times 22.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚)。闸室基础采用水泥粉煤灰碎石桩 (即 CFG 桩), 要求复合地基承载力特征值为 300 kPa 。现工程设计 CFG 桩桩端进入含砾粗砂层, 桩径为 500 mm , 底板下布设 CFG 桩, 共 451 根 (见图 7), 桩间距为 $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$, 设厚为 30 cm 粗砂褥垫层, 桩身设计强度为 C20, 其弹性模量 $E_p = 25.5 \text{ GPa}$ 。水闸下地质剖面图如图 8 所示, 岩土层物理力学参数见表 1。

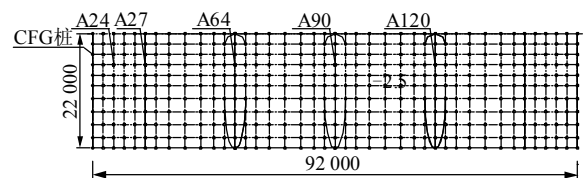


图7 CFG桩平面布置图

Fig.7 Layout plan of CFG piles

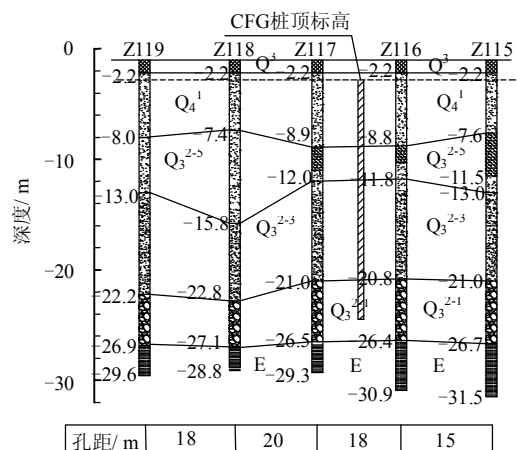


图8 地质剖面图

Fig.8 Geological profile

表 1 土层物理力学性质指标
Table 1 Physico-mechanical properties of soil layers

土层名称	重度 γ /(kN/m ³)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	弹性模量 E_0 /MPa
细砂	17.8	0.0	25.0	30
中砂	20.2	0.0	30.0	80
粉砂	18.5	0.0	20.0	50
中砂	20.5	0.0	32.0	100
粗砂	21.0	0.0	34.0	140
砾砂	22.0	0.0	36.0	180
泥质粉砂岩	22.5	35	25.7	400

由于水闸下各土层分布不均匀，局部还存在淤泥质黏土、淤泥质细砂，所以水闸有一定的不均匀沉降，复合地基上覆荷载设计值 $p = 300 \text{ kPa}$ ，设计桩长平均为 22 m，实测资料表明，水闸的沉降为 24.0~35.0 mm。

采用文中列举的 4 种设计型式，分别对芦苇水闸复合地基进行设计计算，基础底板沉降按照 30 mm 控制，4 种设计型式的桩长分别为 31、22、

17.2、15 m，对比分析各自的桩土协调情况、地基土承载力发挥、地基处理用桩量等。将桩体沿深度方向划分为若干单元，每单元长度为 0.5 m，采用非线性双曲线模型函数，即式 (3) 计算桩侧摩阻力，其中 a ， b 两个参数沿深度方向根据不同土层特性参数，按照桩体计算长度每 0.5 m 计算出相应的数值， s 由桩-土相对位移计算求得，将每单元桩侧摩阻力代入式 (1)，进而求得该单元底部轴力，按文中荷载传递计算及桩长确定方法及步骤依次计算，4 种设计型式计算成果见表 2。采用双曲线切线模量法计算水闸地基下不设褥垫层、褥垫层厚度 300 mm 及 500 mm 的地基土 $p-s$ 的曲线，如图 9 所示，计算结果表明，在基础沉降量相同的情况下，不设褥垫层、褥垫层厚度 300 mm 及褥垫层厚度 500 mm 分别所对应的承载力依次减小，也就是在相同的荷载作用下，不设褥垫层对应的沉降最小，主要因为褥垫层有一定的压缩量，如果上覆荷载较小，三者之间沉降差异微小。

表 2 4 种设计型式桩土特性的对比分析 (地基沉降控制量 30 mm)

Table 2 Comparative analysis of pile-soil characters in four designs (control the amount of foundation settlement of 30 mm)

设计型式	设计单桩长度 / m	垫层厚度 / mm	地基土承载力 / kPa	桩顶应力 (承载力) / kPa (kN)	桩土应力比	桩体压缩量 / mm	桩端刺入沉降量 / mm	桩顶刺入量 / mm	用桩量 / 根
I	31.0	500	82.7	4 306.7/845.2	57.47	8.0	0	22.0	530
II	22.0	300	83.2	5 040.9/989.3	60.60	4.5	10.0	15.5	451
III	17.2	0	84.0	6 276.2/1 231.7	74.70	3.4	26.6	0	360
IV	15.0	0	84.0	5 301.4/1 040.4	63.10	2.6	27.4	0	427

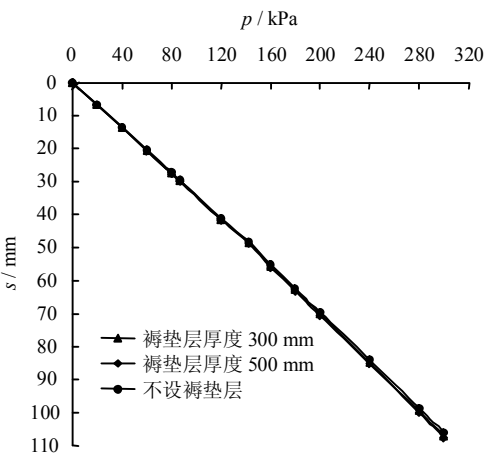


图 9 刚性基础下地基土有无褥垫层的 $p-s$ 曲线

Fig.9 $p-s$ curves of soil with cushion and without cushion under rigid foundation

地基土顶面上的褥垫层有较小的压缩量，承载力越大，压缩量也就越大，在相同的基础底板沉降量下，无褥垫层地基土承载力贡献最大，褥垫层越

厚、或刚度越小，垫层压缩量越大，地基土承载力贡献越小，因为褥垫层的压缩变形占用了地基土沉降量。

从表 2 中可以看出，设计型式 I 即桩端无沉降时的复合地基的总用桩量为 16 430 m，褥垫层厚度 500 mm；设计型式 II 即桩端有一定沉降时的复合地基总用桩量 9 922 m，褥垫层厚度 300 mm；设计型式 III 桩端刺入沉降 26.6 mm，无褥垫层，复合地基总用桩量为 6 192 m；设计型式 IV 桩端刺入沉降为 27.4 mm，无褥垫层，复合地基总用桩量 6 405 m。通过 4 种设计型式的对比分析可知，在上覆荷载、地基沉降、地质条件相同的情况下，设计型式 III 用桩量最小，地基处理费用最省，地基土承载力发挥最大，桩的承载力也是最大的，而设计型式 I 不考虑桩端刺入沉降量，其设计桩长最长，用桩量最大，桩土各自的承载力发挥也都最小，地基处理费用最高。设计型式 IV 虽然桩长小于设计型式 III，但在相

同的设计控制沉降范围内,减小桩端刺入沉降,需要增加桩的数量来分担上覆荷载,总的用桩量有所增加。因此,相比而言,设计型式III是优化的设计方法。

4种型式的桩身轴力及桩身摩擦力分别见图10和图11。从图10中可以看出,桩顶刺入褥垫层越多,桩身负摩擦力越大,影响范围越深,桩土等沉面处的位置越深,桩端阻力也越大,因此,桩端需要支撑在十分坚硬的岩土层上,设计时采用的桩需要更长,才能控制桩端无刺入沉降,另外,桩的最大轴力发生在等沉面处,设计时,应复核桩的自身强度是否满足。

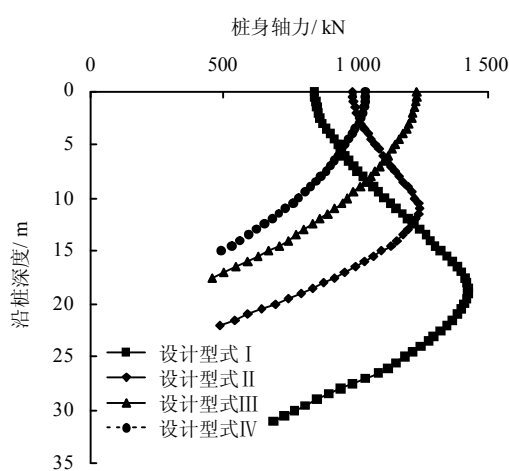


图10 4种设计型式的桩身轴力图

Fig.10 Axial force of pile along the depth direction for four designs

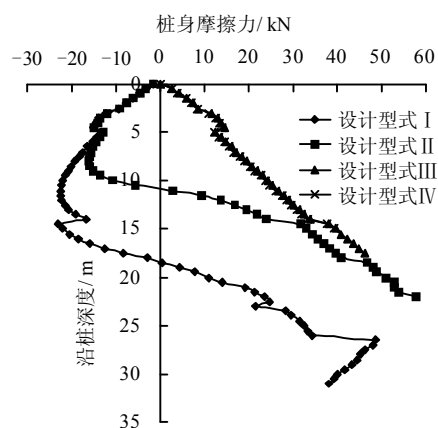


图11 4种设计型式的桩身摩擦力图

Fig.11 Skin friction curves of pile side unit along the depth direction for four designs

如果桩顶无刺入量,桩土一起沉降,桩身最大应力在桩顶,受土体正摩擦力作用,桩身荷载沿桩深度逐渐减小,见图11所示,桩顶承载力可以通过桩的数量合理调整,使之尽可能发挥作用。

通过4种复合地基设计型式对比计算分析可知,复合地基不设置褥垫层时,通过控制桩端刺入沉降来协调桩土变形,并达到桩土自平衡共同承载的方法是可行的,尤其是在坚硬岩层埋置较深的地基中效果更加明显,不仅可以充分发挥地基土和桩的承载力作用,而且可以减少地基处理的费用。

6 结 论

(1) 本文列举了4种典型的复合地基设计型式进行了对比分析,发现设计型式III即不设褥垫层而通过控制桩端刺入沉降的设计方法,能使地基土承载力发挥程度最高,用桩量最少,地基处理费用最节省,由此本文建立的通过控制桩端刺入沉降调节桩土变形的自平衡式复合地基设计方法,可以最大限度地利用桩体和土体的承载力达到优化设计的目的。

(2) 目前在珠江三角洲地区,已有少数水利工程在复合地基设计时不设置褥垫层的案例,主要是因为褥垫层是渗透通道而引发工程防渗问题,建成后运行较好。但无褥垫层复合地基设计计算理论方法欠缺,本文建立的通过控制桩端刺入沉降调节桩土变形的自平衡式复合地基设计方法,可为实际工程尤其是桩端很难进入坚硬岩土层上的工程,提供一个实用的设计方法,为今后无褥垫层复合地基设计提供借鉴,但理论计算仍有一定的假设,还需通过实践不断的完善和验证。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国行业标准编写. JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [3] 杨光华, 李德吉, 官大庶. 刚性桩复合地基优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 818—825.
YANG Guang-hua, LI De-ji, GUAN Da-shu. Optimization design of rigid pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 818—825.
- [4] 周爱军, 栗冰. CFG桩复合地基褥垫层的试验研究和有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1803—1808.
ZHOU Ai-jun, LI Bing. Experimental study and finite element analysis of cushion in CFG pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1803—1808.

- [5] 张建伟, 戴自航. CFG 桩复合地基褥垫层效用的有限元分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 171—174.
ZHANG Jian-wei, DAI Zi-hang. Finite element analysis of functions of cushion of cement flyash gravel pile composite foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Supp.): 171—174.
- [6] 李宁, 韩煊. 褥垫层对复合地基承载机理的影响[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 68—73.
LI Ning, HAN Xuan. Study on mechanism of cushion in composite pile foundation[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2001, 34(2): 68—73.
- [7] 何结兵, 洪宝宁, 丘国锋. 高速公路 CFG 桩复合地基褥垫层作用机理研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1663—1665.
HE Jie-bing, HONG Bao-ning, QIU Guo-feng. Research on cushion action mechanism of CFG pile composite foundation for expressway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1663—1665.
- [8] 任鹏, 邓荣贵, 于志强. CFG 桩复合地基试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 81—86.
REN Peng, DENG Rong-gui, YU Zhi-qiang. Experimental research on composite foundations with CFG piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 81—86.
- [9] 王兵, 杨为民, 李占强, 等. 褥垫层对复合地基承载特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 403—408.
WANG Bing, YANG Wei-min, LI Zhan-qiang, et al. Test study of influence of cushion on loading behavior of composite foundations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 403—408.
- [10] 郑俊杰, 陈健, 骆汉宾, 等. 刚性桩复合地基垫层破坏模式及厚度分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 120—123.
ZHENG Jun-jie, CHEN Jian, LUO Han-bin, et al. Analyzing failure modes and appropriate thickness of the cushion on rigid pile composite ground[J]. **J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition)**, 2008, 36(7): 120—123.
- [11] 周龙翔, 童华炜, 王梦恕, 等. 复合地基褥垫层的作用及其最小厚度的确定[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 841—843.
ZHOU Long-xiang, TONG Hua-wei, WANG Meng-shu, et al. Study of the role of cushion of composite ground and its minimum thickness[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(7): 841—843.
- [12] 亓乐, 施建勇, 侯仟. 复合地基桩体对垫层的刺入量研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 815—819.
QI Le, SHI Jian-yong, HOU Qian. Research on pile penetration into cushion of composite ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 815—819.
- [13] 宰金珉. 塑性支承桩——卸荷减沉桩的概念及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 273—278.
ZAI Jin-min. Concept of plastically bearing pile and its practical application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(3): 273—278.
- [14] 杨光华. 地基非线性沉降计算的原状土切线模量法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1927—1931.
YANG Guang-hua. Nonlinear settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(11): 1927—1931.
- [15] 杨光华, 苏卜坤, 乔有梁. 刚性桩复合地基沉降计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2193—2200.
YANG Guang-hua, SU Bu-kun, QIAO You-liang. Method for calculating settlement of rigid-pile composite foundation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(11): 2193—2200.
- [16] SEED H B, REESE L C. The action of soft clay along friction piles[J]. **Trans. ASCE**, 1955, 122: 731—754.
- [17] 党发宁, 刘娜, 何文安. 西安地区单桩荷载传递双曲线模型与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1428—1432.
DANG Fa-ning, LIU Na, HE Wen-an. Hyperbolic model of load transfer method for single pile in Xi'an area and its engineering application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(9): 1428—1432.
- [18] 肖宏彬. 竖向荷载作用下大直径桩的荷载传递理论及应用研究[博士学位论文 D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [19] 苏卜坤. 刚性桩复合地基沉降计算方法的研究及应用[硕士学位论文 D]. 广州: 华南理工大学, 2008.