

刚性桩复合地基沉降计算方法

杨光华^{1,2}, 苏卜坤^{2,3}, 乔有梁¹

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 华南理工大学 土木工程系, 广东 广州 510640;

3. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610)

摘要: 基于原状土切线模量法, 对刚性桩复合地基的沉降计算提出一种新的沉降计算方法。该方法用切线模量法分别计算基础下土体和刚性桩的荷载-沉降过程曲线。依据共同作用时桩和桩间土的沉降相等的条件, 对土体和刚性桩的荷载-沉降过程曲线进行复合得到刚性桩复合地基的荷载-沉降过程曲线, 则刚性桩复合地基的沉降可以根据其荷载-沉降曲线得到。对于有复合地基的载荷试验的情况, 提出直接利用其试验曲线建立复合地基的双曲线切线模量方程, 利用该方程计算实际基础的沉降。通过工程实例表明, 新的沉降计算方法具有较好的精度。

关键词: 桩基础; 原状土切线模量法; 刚性桩复合地基; 沉降计算

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)11-2193-08

METHOD FOR CALCULATING SETTLEMENT OF RIGID-PILE COMPOSITE FOUNDATION

YANG Guanghua^{1,2}, SU Bukun^{2,3}, QIAO Youliang¹

(1. Guangdong Provincial Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou, Guangdong 510610, China;

2. Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 3. China Pearl

River Water Resources Planning, Surveying and Designing Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510610, China)

Abstract: Based on undisturbed soil tangent modulus method, a new practical settlement calculation method for rigid-pile composite foundation is proposed. The load-settlement curve of soil under foundation and the load-settlement curve of rigid-pile are obtained by the undisturbed soil tangent modulus method. Considering that the settlement of pile and soil is equal when they support the foundation jointly, the load-settlement curve of the rigid-pile composite foundation is obtained based on the load-settlement curve of soil and the load-settlement curve of rigid-pile, then the settlement of rigid-pile composite foundation can be gotten from the load-settlement curve. For the composite foundation with loading test, the settlement of rigid-pile composite foundation can be calculated by the hyperbola tangent modulus equation which is put forward by directly using the test curve. The practical examples prove that the new method has more precision for settlement calculation.

Key words: pile foundations; undisturbed soil tangent modulus method; rigid-pile composite foundation; settlement calculation

1 引言

刚性桩复合地基是目前地基处理中发展较快和较好的方法。目前应用较多的主要有 CFG 桩^[1]、螺

旋桩、预制混凝土桩等, 更有 CM 桩法^[2]等刚柔性复合桩基。由于刚性桩复合地基质量可控, 承载力较高, 适应性广, 且具有良好的经济效益, 成为越来越广泛应用的 地基处理方法。其不仅可以应用于像上海等深厚软土地基, 也可以应用于北京、广东

收稿日期: 2009-07-10; **修回日期:** 2009-08-29

基金项目: 广东省水利基金资助项目

作者简介: 杨光华(1962-), 男, 博士, 1982年毕业于武汉水利电力学院电厂结构工程专业, 现任教授级高级工程师、博士生导师, 主要从事土的本构理论、基坑工程、高层建筑基础工程和软土工程等方面的教学与研究工作。E-mail: ygh@gdsky.com.cn

等深厚土层的高层建筑基础，是一个具有良好应用前景的地基处理方法，刚性桩复合地基的结构如图 1 所示。

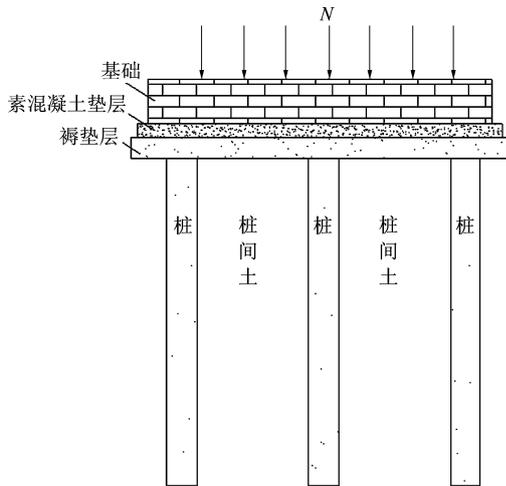


图 1 刚性桩复合地基
Fig.1 Rigid-pile composite foundation

刚性桩复合地基目前虽然在快速发展和推广应用，但对其承载力和沉降计算方面的研究，工程实践中仍缺乏行之有效的设计计算方法。因此，迫切需要进行深入研究，提出简便、实用、有效的设计计算方法。

目前刚性桩复合地基的沉降计算方法思想主要是把沉降分为加固区沉降 s_1 和非加固区沉降 s_2 两部分。总沉降等于两部分之和，即 $s = s_1 + s_2$ 。不同方法的区别主要是 s_1 和 s_2 的计算不同^[4, 5]。通常的工程实用方法均是采用分层总和法为主，目前主要有 4 种方法。

方法一是规范方法^[3]，该方法对加固区和非加固区均采用分层总和法计算其沉降，应力按 Boussinesq 方法计算。加固区各层土的复合模量为

$$E_{sp} = \zeta E_s \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{f_{spk}}{f_{ak}} \quad (2)$$

式中： f_{spk} 为复合地基承载力的特征值， f_{ak} 为基础底面下天然地基承载力的特征值， E_s 为基础底面下各层土的压缩模量。其中，分层总和法采用建筑地基规范的经验公式，该式存在 f_{spk} 的确定、沉降经验系数的取值及对硬土 E_s 的取值误差大等问题。

方法二是桩身压缩量法^[2]，即复合地基的沉降 s 为桩身压缩和桩底刺入变形之和。该方法的合理

性主要取决于桩的荷载分担值的合理性以及桩基沉降计算的准确性。

方法三是双层地基应力法^[6]，即对桩间土的压缩和桩底以下非加固区土进行沉降计算。而该方法关键在于桩间土应力确定的合理性，桩底非加固区的应力考虑了加固区的影响。

方法四是黄绍铭等^[7, 8]提出的上海方法，即当外荷载小于各单桩极限承载力之和时，假定外荷载全部由桩基承担，计算桩基的沉降即是复合桩基的沉降；当外荷载之和大于各桩极限承载力之和时，则超出部分荷载由承台下地基土承担，此时沉降由桩基沉降加上承台沉降，承台沉降按分层总和法计算。

显然，以上各方法中，对土体的沉降计算采用的土的参数仍然用压缩模量 E_s 。用压缩模量 E_s 计算沉降本身误差较大^[10]。同时对于桩的沉降，若按控制沉降量的思想，桩可以设计成塑性桩^[9]，则在受荷过程中桩的沉降量是非线性的。计算桩的非线性沉降，目前还比较缺乏实用有效的计算方法。因此，就现有的方法，地基沉降和桩基非线性沉降计算都存在较大误差，较难解决好刚性桩复合地基中桩土的共同作用问题。

切线模量法较好反映了土的原状性和非线性，是一种较好的沉降算法。杨光华^[11]曾在原位土双曲线切线模量法^[10]基础上，提出了刚性桩复合地基沉降计算的一个设想，本文在此用具体的工程实例对其进行进一步的完善和实践，其思想是把土和桩假设是 2 个相对独立的受力体系，分别采用原状土切线模量法计算土体的非线性沉降和刚性桩的非线性沉降。由桩、土共同作用复合成刚性桩复合地基的 $p-s$ 曲线，通过复合地基的 $p-s$ 曲线确定其荷载对应的沉降，可以考虑非线性变形及其过程，并通过工程实例详细说明其方法的过程，同时验证其合理性。

2 基于原状土切线模量法的刚性桩复合地基沉降计算方法

对桩有一定的间距时，可以假设把桩、土看作为 2 个相对独立的受力体系，对土体的沉降计算，假设忽略桩的存在的影响，按原状土切线模量法^[9]可计算基础非线性沉降过程的荷载 p 和沉降 s 的关系曲线，如图 2 中曲线 s_s 所示，同样，对单桩沉降，桩端采用切线模量法并结合荷载传递法^[12]可计算出单桩的荷载 - 沉降曲线，如图 2 中曲线 s_p 所示。

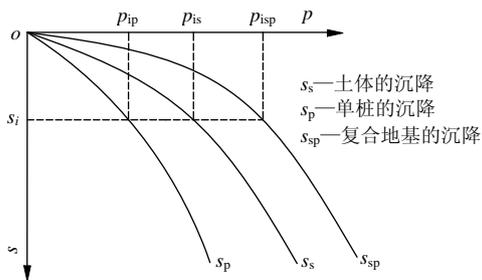


图 2 刚性桩复合地基沉降计算模型

Fig.2 Calculation model of rigid-pile composite foundation

当然， s_p 曲线也可通过单桩载荷试验获得。 s_s 也可利用小尺寸压板试验曲线，通过切线模量法计算实际基础荷载沉降曲线而得到。

当已知单桩的 $p-s$ 曲线 s_p 和基础作用于地基土上的 $p-s$ 曲线 s_s ，则可以通过共同作用求出刚性桩复合地基的荷载沉降曲线 s_{sp} 。如图 2 所示，对于任何一沉降值 s_i ，对应于单桩的 $p-s$ 上的荷载为 p_{ip} ，对应于基础下地基土体的 $p-s$ 上的荷载为 p_{is} ，当基础下有 n 根桩时，则有 n 根桩的复合地基对应于沉降值 s_i 时的荷载为 p_{isp} ，可表示为

$$p_{isp} = np_{ip} + p_{is} \quad (3)$$

对应不同的沉降值，同理，通过单桩的 $p-s$ 曲线和基础下地基土体的 $p-s$ 曲线可以求得相应 n 根桩对应的复合地基的对应的荷载值，由此可以求得整个刚性桩复合地基上基础的非线性荷载 - 沉降曲线，如图 2 中的 s_{sp} 曲线所示，则不同荷载作用下对应的刚性桩复合地基的沉降可由 s_{sp} 曲线上得到。

3 工程应用实例

本文以广东省芦苞大型水闸采用 CFG 桩进行地基处理的工程实例来说明该方法的应用。

该水闸底板采用整体混凝土板基础，底板尺寸为 92.0 m×22.0 m(长×宽×厚)，采用 CFG 桩复合地基处理，要求复合地基承载力特征值为 300.0

kPa。闸室底板尺寸、闸墩布置及典型地质钻孔布置如图 3 所示。底板下布设 CFG 桩共 451 根，闸墩下间距为 2.0 m×2.0 m，其余部位为 2.5 m×2.5 m。桩的平面布置如图 4 所示。桩端要求进入含砾粗砂层不少于 3d，d 为 CFG 桩直径，d = 500 mm。闸底板底标高为 -2.50 m，桩顶标高为 -2.80 m，桩长基本为等长，平均桩长为 22.0 m。设 30.0 cm 粗砂褥垫层，水闸典型地质剖面图如图 5 所示，相应地质力学参数如表 1 所示。鉴于该水闸的重要性，在工程桩施工前进行了系统的试验桩试验，分别进行了桩间土、天然地基、单桩和单桩复合地基的压板载荷试验，桩间土和天然地基采用直径为 800.0 mm，面积为 0.5 m² 的钢板，单桩复合地基针对间距 2.0 m×2.0 m 进行，采用的压板尺寸为 2.0 m×2.0 m，厚为 40.0 mm 的方形钢板，相应试验位置的地质剖面图如图 6 所示(其中，N 为标贯击数，n' 为桩段数)，土体参数见表 2。天然地基和桩间土平板荷载试验曲线如图 7 所示。按双曲线模型法^[10]，对桩间土试验的荷载 p 和沉降 s 的关系可表示为

$$\frac{s}{p} = as + b \quad (4)$$

由式(4)进行拟合反算得

$$a = 0.022 \ 58, \ b = 0.002 \ 62 \quad (5)$$

$$p_u = \frac{1}{b} = 381.7 \text{ (kPa)} \quad (6)$$

初始切线模量为

$$E_0 = \frac{D(1-\mu^2)\omega}{a} = \frac{0.8 \times (1-0.3^2) \times 0.79}{0.022 \ 58} = 25.47 \text{ (MPa)} \quad (7)$$

式中： a 、 b 均为双曲线方程系数； p_u 为地基极限承载力； ω 为几何形状系数； D 为压板的直径； μ 为土的泊松比。

由 p_u 反算 $\varphi = 33^\circ$ ，考虑到该试验仅是代表浅层的指标，对于压板底 2.0 m 以下土层，按表 2 所示选取参数。已知各层土的 c ， φ 和 E_0 对于 2.0 m×

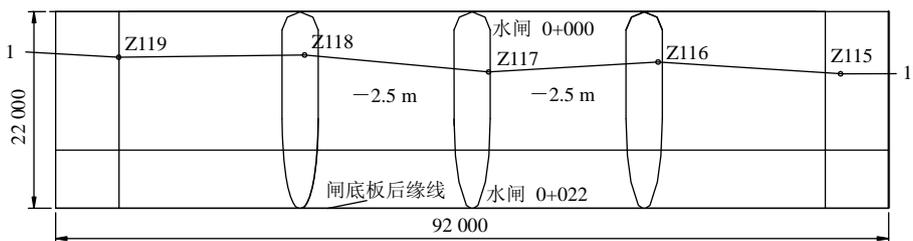


图 3 水闸闸室底板平面图(单位: mm)

Fig.3 Plan of foundation slab of sluice(unit: mm)

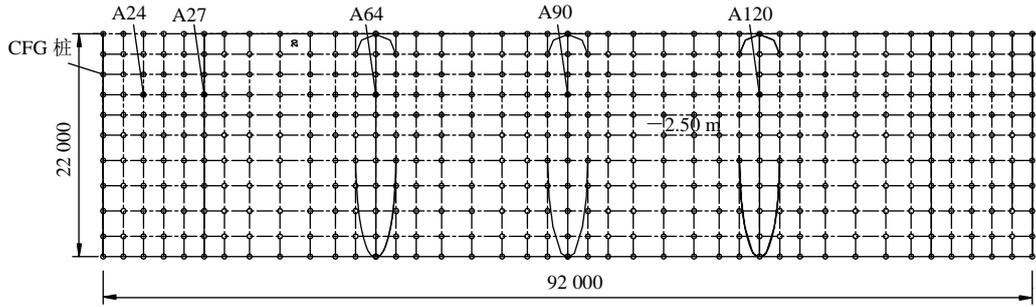


图 4 CFG 桩平面布置图(单位: mm)

Fig.4 Layout plan of CFG piles(unit: mm)

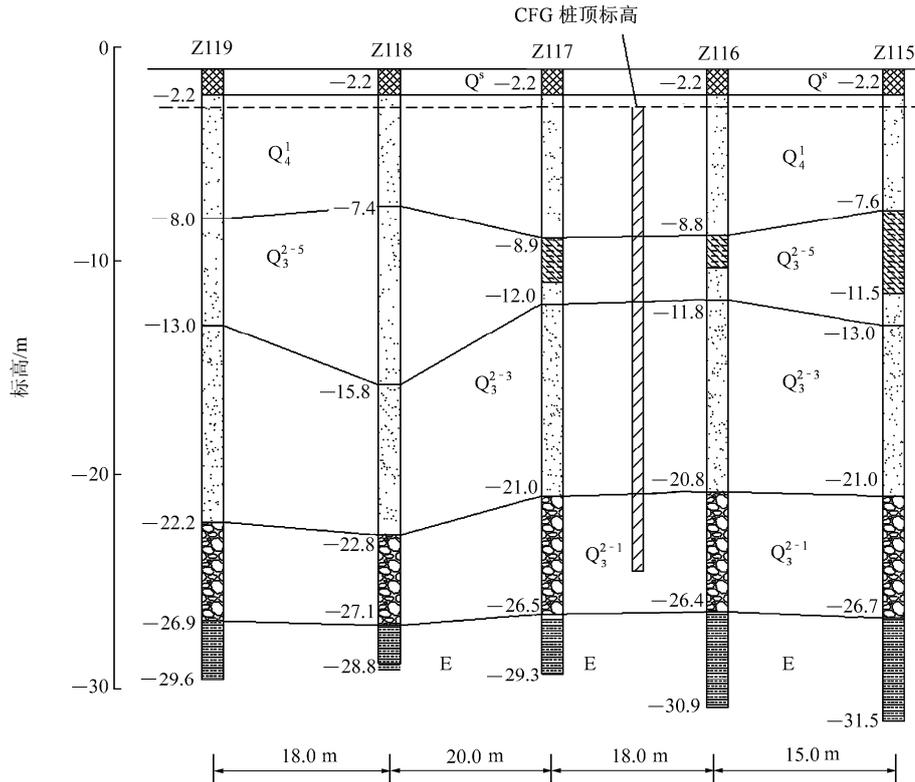


图 5 1-1'地质剖面图

Fig.5 Geological profile 1-1'

表 1 水闸基础下土层的主要力学指标表

Table 1 Primary mechanical parameters of soils under foundation of sluice

土层编号	土层名称	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	初始切线模量 E_0/MPa
Q_4^1	含砾粗砂	0.0	33.0	100
Q_3^{2-5}	淤质黏土	9.8	12.0	12
	淤质细砂	6.0	24.0	30
Q_3^{2-3}	中粗砂	0.0	32.0	80
Q_3^{2-1}	含卵石粗砂	0.0	34.0	140
E	风化土	35.0	25.7	200

2.0 m 压板的复合地基试验, 可以计算出无桩时压板土的 $p-s$ 曲线如图 8 所示。对于单桩, 同样可计

算其 $p-s$ 曲线与试验桩的 $p-s$ 曲线比较如图 9 所示。

压板荷载试验时桩顶设置 15 cm 垫层, 垫层的变形模量按 80.0 MPa 计算, 且垫层的压缩量可表示为

$$\Delta s_s = \frac{p\Delta h}{E} \tag{8}$$

则考虑垫层后桩的沉降为

$$s_p = s_p + \Delta s_s \tag{9}$$

考虑垫层后桩的 $p-s$ 如图 10 所示。则复合地基的 $p-s$ 曲线可以计算为: 某一沉降值处复合地基的荷载等于相同沉降处 2.0 m×2.0 m 压板的荷载迭加上有垫层时桩对应的荷载, 由此合成所得的计算复合地基的 $p-s$ 曲线与复合地基试验曲线比较如图 11 所示, 可见两者是接近的。

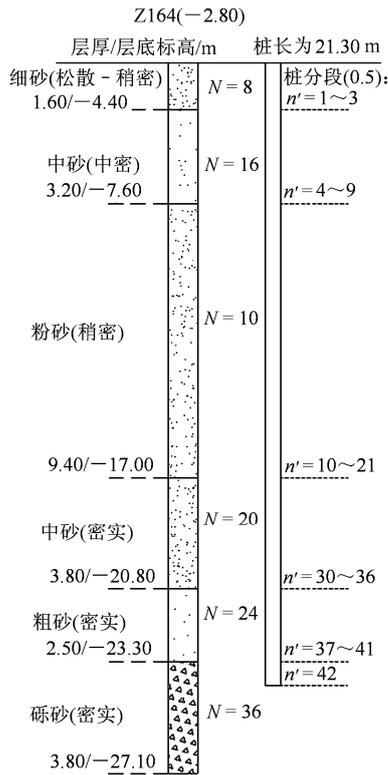


图 6 试验桩的地质剖面图
Fig.6 Geological profile of CFG pile test

表 2 试验桩处土体物理力学参数表

Table 2 Mechanical parameters of soils nearby CFG pile test

土层名称	c/kPa	$\phi(^{\circ})$	E_0 /MPa
细砂	0	25	40
中砂	0	30	80
粉砂	0	20	50
中砂	0	32	100
粗砂	0	34	120
砾砂	0	36	180

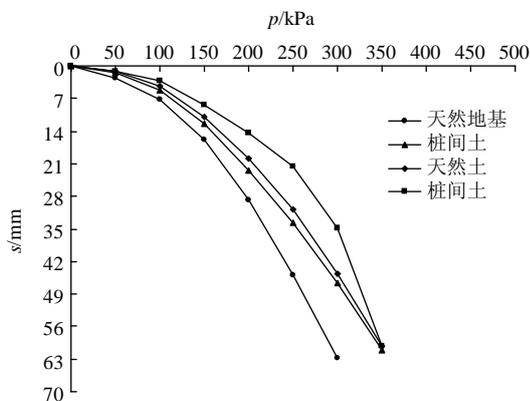


图 7 天然地基和桩间土的平板载荷试验曲线
Fig.7 In-situ plate loading test curves in natural subgrade and soil between piles

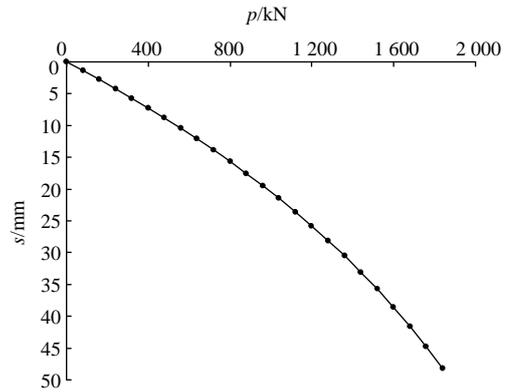


图 8 4 m² 压板土的 p-s 曲线
Fig.8 In-situ plate of 4 m² loading test curve

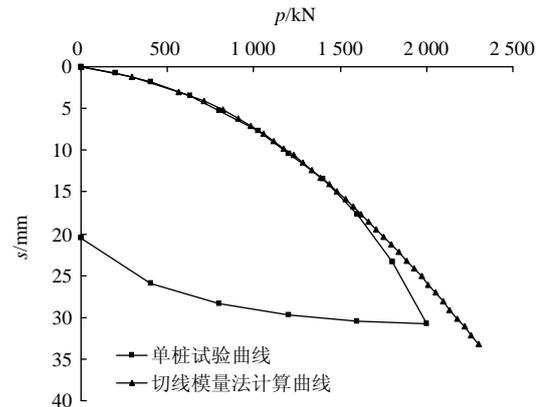


图 9 计算与试验单桩 p-s 曲线对比
Fig.9 Comparison of p-s curves of a single pile between calculation and experiment

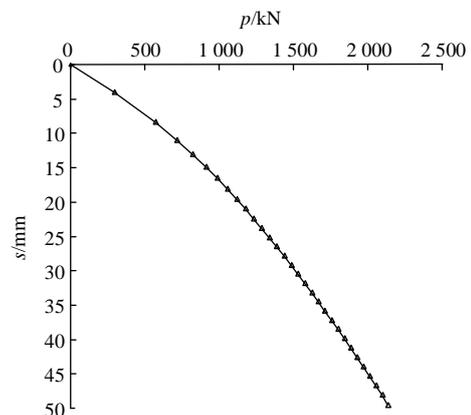


图 10 考虑垫层后采用切线模量法计算单桩 p-s 曲线
Fig.10 p-s curve of a single pile after considering effect of cushion by modulus method tangent

对于整体基础, 当不考虑桩存在时, 按切线模量法对其进行分层沉降计算。各土层参数根据地质报告并结合经验取值如表 1 所示, 计算结果如图 12(a) 所示。由图 12(a)可见, 若不做地基处理, 沉降值较大, 当采用荷载表达时, 451 根桩、天然地基上底板及其迭加后的复合地基荷载沉降曲线如图 12(b)所

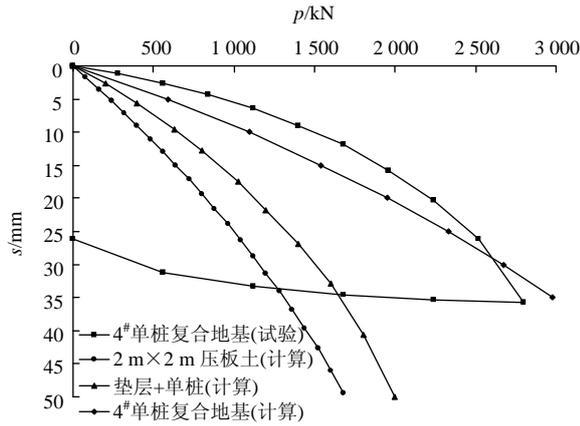
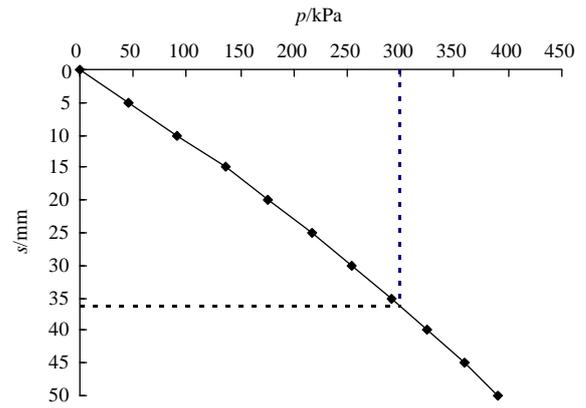


图 11 单桩复合地基 p - s 曲线对比

Fig.11 Comparison about p - s curves of a single pile with composite foundation



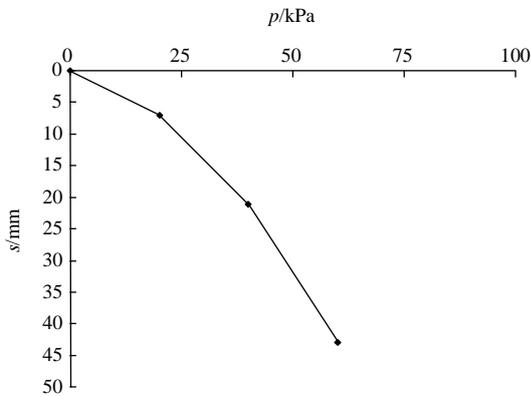
(c) 整体基础复合地基

图 12 p - s 曲线

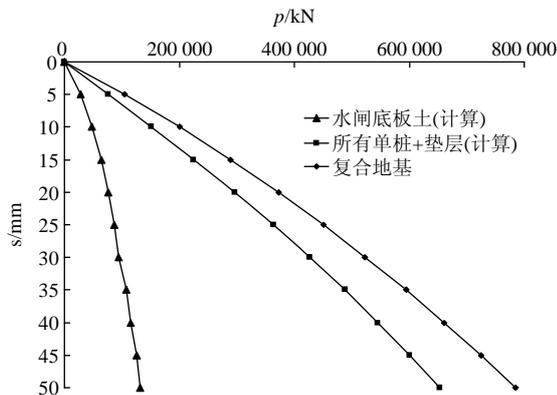
Fig.12 p - s curves

示。将复合地基的荷载除以底板面积，得到复合地基上底板应力荷载与沉降关系，如图 12(c)所示。由图 12(c)可见，当荷载为 300.0 kPa 时，底板对应的沉降为 35.90 mm，实测底板各点沉降如图 13 所示，为 24.0~35.0 mm，计算与实测结果较一致。

若按单桩复合地基载荷试验曲线，如图 14 所示，则当 $p=300.0$ kPa 时，对应的沉降仅为 6.8 mm，



(a) 水闸基础下土体



(b) 复合地基

显然比实测值小很多。苏卜坤^[13]还按规范方法^[3]计算了水闸的沉降，计算沉降值为 $s_c=119.0$ mm，远大于实测值，这主要是地质参数 E_s 取值偏低所致。

4 等效复合地基方法

若直接按单桩复合地基的试验曲线确定底板的沉降则是偏小很多的，主要是未考虑其尺寸效应。这里提出一种简单的利用复合地基试验结果确定复合土体的等效参数 c ， φ 和 E_0 ，再由这些参数应用切线模量法进行分层总和法计算沉降，本工程实例中桩底以下已是卵石粗砂层，其沉降可以忽略不计。

本工程单桩复合地基共进行了 5 个点的试验。结果如图 15 所示。假设复合地基加固区近似为一种等效均质体。对试验点 A27[#]按双曲线模型法^[10]拟合得方程为

$$y = \frac{s}{p} = a + bs \tag{10}$$

对式(10)进行拟合计算得

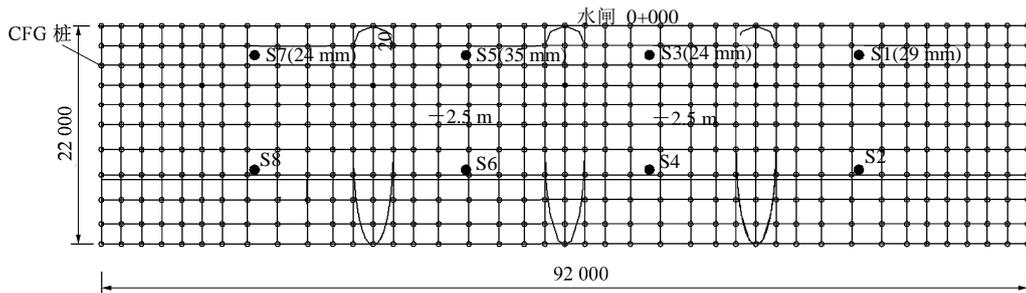
$$a = 0.006\ 528, \quad b = 0.001\ 257 \tag{11}$$

$$E_0 = \frac{D(1-\mu^2)\omega}{a} =$$

$$\frac{2 \times (1-0.3^2) \times 0.88}{0.006\ 528} = 245.34 \text{ MPa} \tag{12}$$

$$P_u = \frac{1}{b} = 795.8 \text{ kPa} \tag{13}$$

Prandtl 地基承载力公式为



注: S2, S4, S6 和 S8 由于闸门遮挡未测到最终沉降

图 13 水闸沉降观测结果(单位: mm)

Fig.13 Results of measured settlements of sluice foundation(unit: mm)

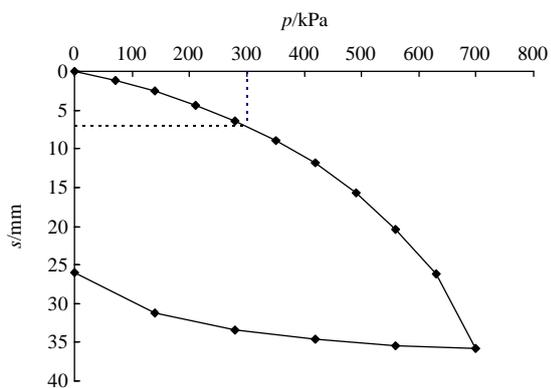


图 14 4#单桩复合地基试验 p-s 曲线

Fig.14 p-s test curve of a single pile No.4 with composite foundation

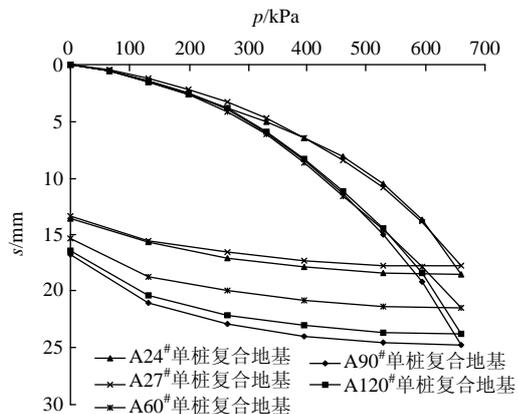


图 15 单桩复合地基荷载试验曲线

Fig.15 p-s test curves of a single pile with composite foundation

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma b N_r + q N_q + c N_c \quad (14)$$

这里: $N_r = 10.88$, $N_q = 10.66$, $N_c = 20.72$, $\gamma = 20$ kPa, $b = 2$ m, $q = 0$ 。

假设 $\varphi = 25^\circ$, 可以反算土的 c 值。把式(13)

代入式(14), 则可得 $c = 27.91$ kPa。同样方法, 根据试验点 A60# 曲线, 求得 $c = 27.3$ kPa, $\varphi = 25^\circ$, $E_0 = 193.6$ MPa。

用已求得的 c , φ 和 E_0 , 采用切线模量法计算整个水闸基础的复合地基的 p - s 曲线, 结果如图 16 所示。

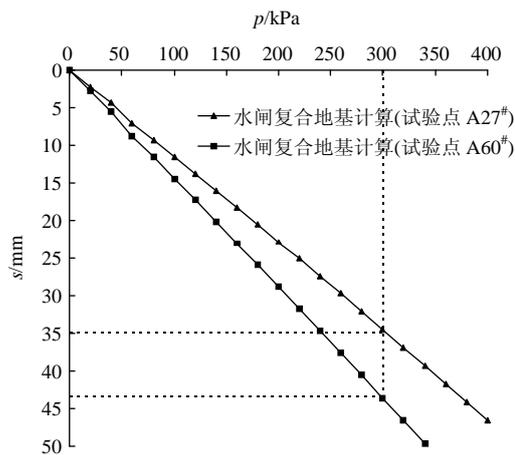


图 16 水闸基础的 p-s 曲线

Fig.16 p-s curves of whole composite foundation of sluice

当荷载为 $p = 300$ kPa 时, 计算得到水闸基础的沉降为 35.0~43.5 mm(见图 18), 而实测沉降为 24~35 mm, 最大值为 35 mm, 与计算值比较接近。

5 结 论

刚性桩复合地基的沉降计算一直还欠缺有效实用的方法, 关键在于参数的合理确定和计算模型的选择。本文采用原状土切线模量法, 可以较好反映原状土的变形参数, 可以分别计算基础的荷载沉降非线性过程和桩基非线性沉降过程, 在假设桩和土

是相对独立的 2 个体系下, 通过桩和土的共同作用得到复合地基的荷载 - 沉降曲线, 这种能考虑非线性的计算是以往按线弹性方法所不及的。根据该曲线可以得到复合地基的沉降, 方法较好地考虑了土、桩的共同作用和沉降的非线性, 具有较好地计算精度, 可为刚性桩复合地基的沉降计算提供一种新的思路。

参考文献(References):

- [1] 闫明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.(YAN Mingli, ZHANG Donggang. CFG pile composite foundation technique and practice[M]. Beijing: China Water Conservancy Publishing House, 2006.(in Chinese))
- [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.(GONG Xiaonan. Theory and engineering application of composite foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [3] 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.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ79 - 2002 Technical code for ground treatment of building[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [4] 王慧萍. 刚性桩复合地基沉降计算方法的探讨[J]. 河北建筑科技学院学报, 2005, 22(2): 37 - 41.(WANG Huiping. Discussion about calculation methods for settlement of rigid-pile composite foundation[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2005, 22(2): 37 - 41.(in Chinese))
- [5] 杨敏. 减少沉降桩基础的设计理论和工程实践[C]// 岩土工程青年专家学术论坛文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 129 - 136.(YANG Min. Theory and application of reducing settlement pile foundation[C]// Proceedings of academic forum young expert on geotechnical engineering. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998: 129 - 136.(in Chinese))
- [6] 池跃君, 宋二祥, 陈肇元. 刚性桩复合地基沉降计算方法的探讨及应用[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 19 - 23.(CHI Yuejun, SONG Erxiang, CHEN Zhaoyuan. An simplified method for settlement of rigid-pile composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11): 19 - 23.(in Chinese))
- [7] 黄绍铭, 王迪民, 裴捷, 等. 按沉降量控制的复合桩基设计方法(上)[J]. 工业建筑, 1992, 22(7): 34 - 36.(HUANG Shaoming, WANG Dimin, PEI Jie, et al. Design method of controlled-settlement composite piled foundation(I)[J]. Industrial Construction, 1992, 22(7): 34 - 36(in Chinese))
- [8] 黄绍铭, 王迪民, 裴捷, 等. 按沉降量控制的复合桩基设计方法(下)[J]. 工业建筑, 1992, 22(8): 41 - 44.(HUANG Shaoming, WANG Dimin, PEI Jie, et al. Design method of controlled-settlement composite piled foundation(II)[J]. Industrial Construction, 1992, 22(8): 41 - 44(in Chinese))
- [9] 宰金珉. 复合桩基理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.(ZAI Jinmin. Theory and application of composite pile foundation[M]. Beijing: China Water Conservancy Publishing House, 2004.(in Chinese))
- [10] 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): 1 927 - 1 931.(YANG Guanghua. Nonlinear settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1 927 - 1 931.(in Chinese))
- [11] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 679 - 686.(YANG Guanghua. A new settlement computation method of the soil foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 679 - 686.(in Chinese))
- [12] 乔有梁. 地基原状土切线模量法在有限压缩层地基和桩基非线性沉降计算中的应用[硕士学位论文][D]. 广州: 华南理工大学, 2007.(QIAO Youliang. Application of the undisturbed soil tangent modulus method on computation of finite compressible layer and nonlinear settlement of single pile[M. S. Thesis][D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2007.(in Chinese))
- [13] 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.(SU Bukun. Study and application on calculating method of settlement of rigid-pile composite foundation[M. S. Thesis][D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2008.(in Chinese))