

# 天津市刚性桩复合地基沉降估算的探讨

李连营 王 华

(天津市勘察院,天津 300191)

**【摘要】** 刚性桩复合地基在天津地区广泛应用,常用的沉降计算方法包括分层总和法和同济大学“启明星”计算程序。通过工程实例对两种计算方法进行了对比分析。

**【关键词】** 刚性桩复合地基;估算沉降值;沉降比

**【中图分类号】** TU473

## Discussion on the Settlement Evaluation of Rigid-pile Composite Foundation in Tianjin Urban District

**【Abstract】** The rigid-pile composite foundation is widely used in Tianjin area, the methods for calculating its settlement include Layer-wise summation method and “Qi Ming Xing” program calculation method of Tongji University. The two calculation methods are matched and analyzed each other through some engineering cases.

**【Key words】** rigid-pile composite foundation; estimated settlement; settlement ratio

### 0 引言

复合地基是指由人工制作的桩体和桩间土组成共同工作的改性地基,它一般由两种刚度(或模量)不同的材料(桩体和桩间土)所组成,是在相对刚性基础下两者共同分担上部荷载并协调变形的地基。复合地基按桩体成桩后强度可分为柔性桩复合地基、半刚性桩复合地基和刚性桩复合地基<sup>[1]</sup>。

刚性桩复合地基的桩土应力比较大( $n > 10$ )<sup>[1]</sup>,桩的作用(包括桩端承载力)能得以充分发挥,加固层土体挤密效果较好,但对桩间土及桩端持力层要求相对较高,因此其适用性受到一定的限制。目前,天津市刚性桩复合地基应用较广泛,主要以静压预制桩(包括空心桩和微型桩)和素砼桩为主。为调整桩土之间应力分布,一般应在桩顶铺设 200~300 mm 褥垫层。

### 1 设计步骤

刚性桩复合地基设计一般遵循以下几个步骤:

1)选择桩型和桩端持力层,一般要求持力层厚度  $H > 2$  m,压缩模量  $E_{s(1-2)}$  平均值  $> 10$  MPa<sup>[1]</sup>,桩长  $L < 18$  m,计算单桩承载力。要求桩间土有一定的承载力,80 kPa 以上最为适宜;

2)根据上部荷载和基础面积(或要求加固后达到的复合地基承载力)计算置换率  $m_s$ ,然后确定桩数  $n_0$ ;

3)按基础形式和受力状态布桩,要求所布桩数  $n \geq n_0$ ;

4)验算桩体强度;

5)估算沉降量。

### 2 沉降估算

在天津地区,刚性桩复合地基沉降估算通常有 2 种方法,即传统分层总和法和同济大学“启明星”方法。

#### 2.1 传统分层总和法

传统分层总和法沉降量由三部分组成,包括加固段沉降量、下卧层沉降量及柔性垫层沉

降量。

### 2.1.1 加固段沉降量

一般可按式确定:

$$s_1 = \frac{p_0 + p_b}{2 E_{cs}} = \mu_s s_{1s} \quad (1)$$

$$p_b = \frac{ABp_0}{(A + 2L \tan \theta)(B + 2L \tan \theta)} \quad (2)$$

$$E_{cs} = m E_{ps} + (1 - m) E_{ss} \quad (3)$$

式中:  $p_0$  为基础底面附加压力, kPa;

$p_b$  为加固段底面附加压力, kPa;

$E_{cs}$  为加固段复合压缩模量, MPa;

$E_{ps}$  为桩体压缩模量, MPa, 可通过室内试验确定, 或参考表 1 采用。

表 1 桩体压缩模量表

桩体砼强度等级	C10	C15	C20	C25	C30
$E_{ps}/\text{MPa}$	600	850	1100	1400	1700

$E_{ss}$  为桩间土压缩模量的厚度加权平均值, MPa;

$\mu_s$  为应力修正系数,

$$\mu_s = \frac{1}{1 + m(n-1)}$$

$s_{1s}$  为加固段在未加固地基(天然地基)状态下承受  $p_0$  附加压力所产生的沉降量, mm;

$\theta$  为压力扩散角, ( $^\circ$ );

$$\theta = \frac{\varphi}{4},$$

$\varphi$  为加固段桩间土内摩擦角的加权平均值, 一般可取  $20^\circ \sim 22^\circ$ 。

多项工程的实际计算表明, 加固段地基的沉降量通常较小, 一般在  $1 \sim 3$  cm 之间。

### 2.1.2 下卧层沉降量

在  $p_0$  附加压力作用下的下卧层沉降量可按分层总和法计算:

$$s_2 = m_s \sum \frac{\Delta p_i}{E_{si}} h_i \quad (4)$$

式中:  $m_s$  为沉降经验系数, 可按压缩层范围内压缩模量加权平均值查表 2 取值。

表 2 沉降经验系数表

$E_s/\text{MPa}$	2.5	4.0	7.0	15.0	>20
$m_s$	1.4	1.3	1.0	0.4	0.2

### 2.1.3 柔性垫层的沉降量

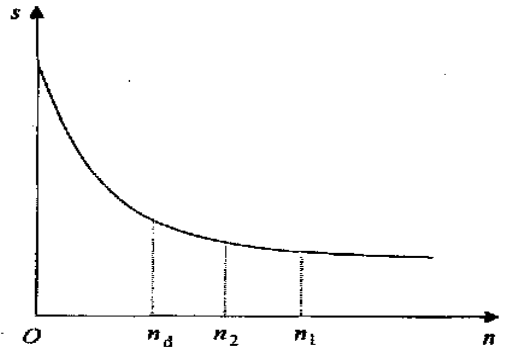
柔性垫层由中粗砂或碎石子组成, 由于厚度仅  $200 \sim 300$  mm, 而压缩模量却较高, 且填垫时经夯实, 沉降量很小可忽略不计。

### 2.1.4 基础总沉降量

$$s = s_1 + s_2 \quad (5)$$

### 2.2 “启明星”计算程序

同济大学编制的“启明星”计算程序对于刚性桩复合地基的沉降计算具有较好的适用性。假定若干种不同的用桩数量, 分别计算相应的沉降量后得出  $s-n$  曲线(见图 1)。



$n_1$  为荷载完全由单桩设计承载力承担所需的桩数  
 $n_2$  为荷载完全由单桩极限承载力承担所需的桩数  
 $n_d$  为荷载由桩和桩间土共同承担所需的桩数

图 1 沉降-桩数关系图

该程序采用有限元方法对桩顶受力平均分配后计算, 计算时考虑桩数及桩与桩、桩与土之间的相互影响, 计算较简便。

## 3 实例分析

### 3.1 工程概况

天津市南运河旁一片新建住宅小区, 由于位于古河道上, 故均采用静压预制空心桩复合地基处理, 桩顶埋深为现地面下  $1.4$  m, 桩端为海相④a粉土, 桩长  $L = 10$  m, 各层地基土物理力学性能见表 3、表 4。

表3 1号楼地基土物理力学性能

地层号	岩性	平均厚度 /m	含水量 $w/\%$	孔隙比 $e$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	标贯击数 $N$
①a	杂填土	1.4						
①b	素填土	1.4	33.3	0.98	16.9	0.83	4.5	2.9
②a	粉质粘土为主	3.7	30.2	0.87	13.5	0.87	5.8	4.4
③	粉质粘土	1.5	26.7	0.77	13.4	0.61	5.3	7.0
④a	粉土	5.5	27.4	0.80			15.2	14.6
④b	粉质粘土	2.2	28.2	0.81	12.1	0.87	7.1	7.2
⑤	粉质粘土	1.3	27.0	0.78	12.2	0.58	6.5	
⑥	粉质粘土为主	4.5	25.4	0.78	13.4	0.57	6.5	
⑦	粉质粘土	>5.0	26.2	0.77	12.9	0.67	7.8	

表4 16、20号楼地基土物理力学性能

地层号	岩性	平均厚度 /m	含水量 $w/\%$	孔隙比 $e$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	标贯击数 $N$
①a	杂填土	1.8						
①b	素填土	1.5	41.9	1.24	22.2	0.93	3.0	2.9
②a	粉质粘土为主	4.8	37.6	1.09	14.5	0.98	3.3	4.4
②b	粉土	1.8	26.8	0.78			12.0	10.0
④a	粉土	2.0	28.0	0.79			18.9	14.6
④b	粉质粘土	3.5	27.4	0.74	11.6	0.83	7.2	7.2
⑤	粉质粘土	1.0	22.2	0.67	12.7	0.35	5.7	
⑥	粉质粘土	5.0	24.7	0.70	11.8	0.60	6.2	
⑦	粉质粘土	>5.0	28.2	0.75	11.7	0.51	7.8	

### 3.2 沉降估算

对小区内1、16、20号楼进行沉降估算,各幢楼具体沉降估算指标见表5。

表5 沉降估算指标

楼号	层数	基础长度 /m	基础宽度 /m	基底压力 $p/\text{kPa}$	桩数 $n/\text{根}$
1	7	58	16	140	206
16	7	79	16	140	333
20	7	53	16	140	263

#### 3.2.1 两种计算方法估算结果

采用两种计算方法对上述三幢住宅楼的边线中点分别进行沉降估算,估算结果见表6。

表6 沉降估算结果

楼号	传统分层总和法			“启明星”计算程序
	$s_1/\text{mm}$	$s_2/\text{mm}$	$s/\text{mm}$	$s/\text{mm}$
1	17.2	95.5	112.7	87.2
16	15.1	128.4	143.5	107.8
20	15.1	124.6	139.7	89.6

#### 3.2.2 沉降观测推算最终沉降量

根据小区住宅楼施工期间沉降观测结果,分别计算上述三幢楼边线中点沉降观测平均值。根据《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7-89)第5.2.3条,对于低压缩性土,建筑物在施工期间完成的沉降量一般为最终沉降量的50%~80%。天津地区刚性桩复合地基一般以中~低压缩性粉土层作为桩端持力层,根据天津地区经验施工期间完成的沉降量一般可按最终沉降量的60%考虑。据此分别推算三幢楼边线中点的最终沉降值见表7。

表7 建筑物边线中点沉降观测平均值及推算最终沉降值

楼号	沉降观测平均值 $s/\text{mm}$	推算最终沉降值 $s_{\infty}/\text{mm}$
1	55.6	92.7
16	68.9	114.8
20	61.1	101.8

### 3.2.3 计算结果与观测结果的对比

将三幢楼按传统分层总和法及“启明星”计算方法估算沉降值(估算值)及根据沉降观测推算最终沉降值(观测值)见表8,并分别计算沉降比(估算值与观测值之比)。

表8 沉降估算值与观测值对比

楼号	传统分层总和法			“启明星”算法		
	估算值 s/mm	观测值 s/mm	沉降比	估算值 s/mm	观测值 s/mm	沉降比
1	112.7	92.7	1.22	87.2	92.7	0.94
16	143.5	114.8	1.25	107.8	114.8	0.94
20	139.7	101.8	1.37	89.6	101.8	0.88

从表8计算结果可看出,“启明星”计算程序的计算结果虽较沉降观测结果略小,但较接近,沉降比介于0.88~0.94;传统分层总和法的计算结果较沉降观测结果略大,沉降比介于1.22~1.37,亦属于合理范围。

(上接第24页)

下部和未加固层对承载力的影响,相应的提高了设计安全度。

## 4 结论

1)复合地基具有与桩基和天然地基所不同的特点。用静载试验来判定其承载力时可靠性值得研究,运用时静载规程有必要做相应的修改。

2)单桩试验时的桩土变形与真实情况相差很大,试验所得的承载力会偏高,按规范设计单桩竖向承载力标准值 $R_d^k$ 时有必要作相应的折减。单桩试验所表现出的临界桩长在真实情况下可能不存在。

3)复合地基载荷板试验存在着偏于不安全的尺寸效应。采用大的载荷板进行多桩复合地基试验;或者用相对较大的沉降量所对应

## 4 结语

复合地基设计主要取决于处理后基础沉降量的控制。本文通过采用传统分层总和法和同济大学“启明星”计算程序对三幢住宅楼的沉降进行估算,并将计算结果与实际观测结果相比较,得出了同济大学“启明星”计算程序的计算结果与实际沉降观测结果较接近,沉降比介于0.88~0.94,而传统分层总和法的计算结果一般比实际观测结果略大,沉降比介于1.22~1.37,亦属于合理范围。因此,两种沉降计算方法均可作为地基基础设计的依据。

## 参考文献

- 1 张季超.基础工程处理检测实录.北京:中国建材工业出版社,1997.153~154,163~164
- 2 龚晓南.地基处理新技术.陕西:陕西科学技术出版社,1997.113~117
- 3 叶书麟等.地基处理与托换技术.北京:中国建筑工业出版社,1994.517~518,531~534

收稿日期:2001-08-30

的荷载,除以相应的折减系数来设计复合地基承载力可减小尺寸效应的不利影响。

## 参考文献

- 1 郝玉龙等.深层软土水泥搅拌桩复合地基沉降分析及控制.岩土工程学报.2001,23(3):345~349
- 2 化建新,张宝龙,王玉霞.复合地基技术及应用.岩土工程技术.2001(2):73~79
- 3 段继伟等.水泥土搅拌桩的荷载传递规律.岩土工程学报.1994,16(4):1~8
- 4 张忠坤等.复合地基临界桩长的研究.岩土工程学报.1999,21(2):184~188
- 5 叶为民,唐益群,杨林德.水泥土搅拌法复合地基测试方法探讨.工程勘察.1998(1):18~20

收稿日期:2001-10-17