

文章编号: 1004-4574(2007)02-0154-06

# 饱和软土刚性长短桩复合地基 ——强度及变形实用计算公式

潘林有

(温州大学 建筑与土木工程学院, 浙江 温州 325027)

**摘要:** 刚性长短桩复合地基有许多特点, 如桩体均为刚性、短桩及长桩桩端为低压缩或中压缩性土等。长短桩复合地基的设计理论目前仍处于研究阶段, 现行规范中尚无有关其强度及变形的具体计算方法, 重点探讨了饱和软粘土上采用刚性长短桩复合地基的强度及变形理论, 并提出了适用于工程应用的实用计算方法。

**关键词:** 刚性长短桩; 复合地基; 强度; 沉降; 实用计算方法

**中图分类号:** TU 434; TU 472      **文献标识码:** A

## Composite foundation formed with rigid long-short pile in saturated soft soil practical calculation formula for strength and settlement

PAN Lin-you

(College of Architectural and Civil Engineering Wenzhou University Wenzhou 325027, China)

**Abstract** The rigid long-short-pile composite foundation has a lot of special characteristics such as rigid pile body and lower or medium compressible soil near long and short pile end. At present, the design theory of length-short-pile composite foundation remains in study, and there is no concrete method to calculate its strength and settlement. This paper put forward the applicable calculation method with the emphasis on theories of the rigid length-short-pile composite foundation strength and settlement.

**Keywords** rigid length-short-pile; composite foundation; strength; settlement; practical calculation method

近几年刚柔性长短桩、柔性长短桩复合地基在上海、杭州等地已有应用, 但在饱和软粘土地区的高层建筑中却鲜有应用的实例。温州大学行政信息中心大楼(二类高层)已成功采用刚性长短桩复合地基, 并于2006年9月投入使用, 这种新的软土地基处理方法产生了较好的综合效益。目前柔性桩复合地基的应用与研究已较为成熟, 近几年对刚柔性长短桩复合地基的研究和试验也见诸有关文献<sup>[1-2]</sup>; 但对刚性长短桩复合地基的理论及试验研究甚少。刚性长短桩复合地基具有许多特殊性, 如桩体均为刚性、短桩桩端及长桩桩端均为低或中压缩性土、褥垫层较厚等等。有鉴于此, 本文重点探讨其承载力及沉降理论, 并提出适用于工程应用的实用计算方法。

### 1 刚性长短桩复合地基强度(承载力)实用公式研究

近几年许多学者对长短桩复合地基承载力进行了研究, 如马骥等<sup>[3]</sup>参照同一桩长复合地基承载力计算

收稿日期: 2007-01-30    修订日期: 2007-03-16

基金项目: 浙江省建设厅项目(20031109)

作者简介: 潘林有(1963-), 男, 教授, 博士研究生, 主要从事软粘土性能与地质灾害研究. E-mail: ply51204@yahoo.com.cn

方法, 先计算短桩 (如图 1) 复合地基承载力, 然后视短桩复合地基为长短桩复合地基的“桩间土”, 得到长短桩复合地基的承载力公式; 张耀东等<sup>[4]</sup>认为长短桩复合地基的承载力计算可分别按长桩或短桩复合地基承载力的公式计算, 然后视短桩复合地基为长桩复合地基的桩间土来计算, 也得到了相应的承载力公式; 葛忻声等<sup>[2]</sup>从土体复合置换角度研究也得到相应的公式。但这些公式各有其特定的适用范围, 而且属于同类型算法, 均从常规复合地基承载力基本公式<sup>[5]</sup>出发, 是常规复合地基承载力的扩充, 另外都没有很好解决桩土共同作用问题, 即桩与土各自承载能力的利用到底达到何种程度不明确。特别是对刚性长短桩复合地基, 由于其具有许多特殊性, 应该进行特别的研究。

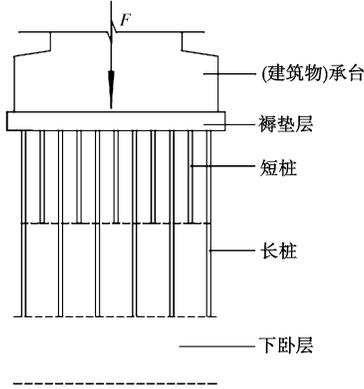


图 1 剖面示意图

Fig. 1 Sketch of section

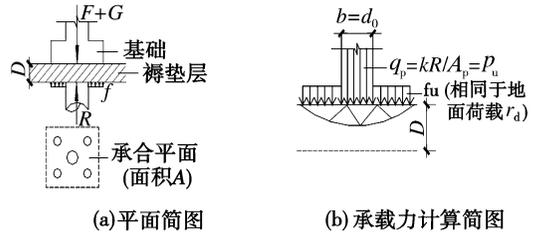


图 2 平面简图

Fig. 2 Sketch of plan

### 1.1 刚性桩复合地基承载力计算新探索

刚性长短桩复合地基是刚性桩复合地基的一种特殊情况, 现先来研究刚性桩 (桩体等长) 复合地基承载力计算方法。如图 2 (a) 为刚性桩复合地基平面简图。假设: (1) (加权) 桩径为  $d_0$ ; (2) 采用褥垫层, 厚度  $D = 300 \sim 400 \text{ mm}$ ; (3) 垫层材料的强度参数为  $c, \varphi$ ; (4) 复合地基基底面积为  $A$ , 桩身总面积为  $A_p$ , 桩间土面积为  $A_m = A - A_p$ , 上部结构及基础回填土传至基底的竖向荷载为  $F + G$ , 桩的总极限承载力为  $R_u$ , 总承载力特征值为  $R$ ; 桩间地基土极限承载力为  $f_u$ , 承载力特征值为  $f$ , 桩及桩间地基土承载力安全系数假定为  $k$ 。则从图 2 (a) 可以建立以下平衡方程:

$$R + fA_m = F + G \quad (1)$$

现试从独特角度对此问题进行分析, 即将图 2 (a) 上部图形倒过来得到图 2 (b), 经分析图 2 (b) 就相当于作用在垫层上的个荷载板试验, 符合 Terraqhi 课题, 由 Terraqhi 极限承载力公式 (对图 2 (b), 公式中  $q = f_u$ ), 可得到:

$$P_u = cN_c + qN_q + 0.5\gamma bN_r = cN_c + f_u N_q + 0.5\gamma bN_r \quad (2)$$

从图 2 易知  $P_u = kR/A_p$ , 而  $f = f_u/k$ , 将这 2 个公式及 (1-1) 式代入 (1-2) 式可得到:

$$F + G = \frac{A_p (cN_c + f_u N_q + 0.5\gamma bN_r)}{k} + \frac{A_m f_u}{k} = \frac{(A_m + A_p N_q) f_u}{k} + \frac{A_p (cN_c + 0.5\gamma bN_r)}{k} \quad (3)$$

也就是

$$f_{sp k} = \frac{F + G}{A} = \frac{(A_m + A_p N_q) f_u}{kA} + \frac{A_p (cN_c + 0.5\gamma bN_r)}{kA} \quad (4)$$

经简化整理可得:

$$f_{sp k} = \frac{(A_m + A_p N_q) f_u}{k} \quad (5)$$

由于工程上常用片石 (碎石)、矿渣作为褥垫层, 故  $c = 0$  另外由土力学教材易知  $0.5\gamma bN_r$  值很小, 可以忽略不计, 这样公式 (4) 就简化成公式 (5), 另外以上公式成立的前提是桩土之间无相对位移。

由公式 (2) 也可以知道桩身极限应力约等于  $f_u N_q$  这与文献<sup>[6]</sup>的研究结果相同, 这说明刚性桩复合地基在桩身极限承载力不大于  $A_p f_u N_q$  时, 桩土之间无相对位移; 而超过  $A_p f_u N_q$  部分就会产生桩土相对位移, 桩土相对位移的具体表现就是桩身的刺入, 包括桩顶在褥垫层内的刺入和桩端土下卧层内的刺入。这样, 刚性桩

极限承载力对刚性桩复合地基  $f_{sp, k}$  的贡献可分  $A_p f_u N_q$  和  $(R_u - A_p f_u N_q)$  两部分, 所以:

(1) 第一部分  $A_p f_u N_q$  与土复合达到极限平衡状态 (桩土无相对位移时), 符合公式 (5)。

(2) 第二部分  $(R_u - A_p f_u N_q)$  对刚性桩复合地基的贡献, 采用常规复合地基公式<sup>[5]</sup>

以上两式相加经整理可得到刚性桩复合地基承载力为:

$$f_{sp, k} = f_{sp, k_1} + f_{sp, k_2} = \frac{mR_u}{kA_p} + (1-m) \frac{f_u}{k} = \frac{mR_u}{k_1 A_p} + (1-m) \frac{f_u}{k_2} \quad (6)$$

式中,  $m$  为置换率,  $m = A_p / A$ ,  $k_1, k_2$  分别为桩、土安全系数, 其余符号同前说明。式中将  $k$  改为  $k_1, k_2$ , 主要是考虑实际工程中桩、土的发挥程度不同, 不同的安全系数值代表桩、土不同的发挥程度, 合理选择  $k_1, k_2$  值有利于双方协调作用共同发挥。

## 1.2 刚性长短桩复合地基承载力实用计算公式研究

对刚性桩复合地基而言, 由于它的承重“元素”已不同于单纯“天然地基”与单纯“桩基”, 而是由单一的承重元素转为“桩基”与“桩间土”二个承重“元素”复合而成的“二元地基”; 而刚性长短桩复合地基已复合成为的“三元地基”。它们都是用桩去改善桩间土 (天然地基) 沉降压缩量大的弊端, 用桩间土的承载力或短桩-土的承载力去补偿桩基承载力不足部分, 使二者达到最佳组合与匹配效应。这是刚性长短桩复合地基承载力确定的关键所在。另外, 刚性长短桩复合地基承载力有以下几方面的受力特点:

(1) 具有长桩+短桩+桩间土“三元”复合作用。(2) 长桩及短桩均为刚性桩, 故其适用的地质条件具有特殊性, 即基底以下需存在上下两层较为理想的桩端持力层。(3) 长桩为主桩, 不仅作为主要受力体承载而且可将荷载通过桩身向地基深处传递, 以减少压缩层变形, 短桩的主要作用是辅助长桩承载, 并与常规桩基相比减少造价。以此获得良好的经济效益, 这也是研究的主要目的与动力所在。(4) 有刚性桩复合地基的相关受力特性, 但也有其自身的特点, 如本文验证的工程项目为地下室一层, 表层粘性土已挖去, 基底土以淤泥为主, 它与刚性桩复合地基 (一种桩长) 的基底桩间土复合不同, 不是直接利用桩间土的承载力, 而是通过辅助桩 (短桩) 利用桩间土的深层承载力进行承载力的补偿, 及配合桩间土浅层承载力协同补偿。(5) 刚性长短桩复合地基长桩为主桩, 短桩虽为刚性桩, 但为辅助桩。(6) 由于褥垫层和长短桩-土之间的负摩阻力的协调作用, 使得长桩-短桩-土三者协调发展, 共同承受建筑物荷载。

根据以上刚性长短桩复合地基的特点以及承载力极限状态的可靠度分析, 刚性长短桩复合地基的受力还是界于桩基与天然地基之间, 所以刚性长短桩复合地基安全系数  $K$  取值自然介于天然地基与桩基之间。

实际工程的受力是非常复杂的, 而且处于不断变化之中, 但成功的工程桩土肯定共同作用, 最后都处于协调发展。刚性长短桩就是两种桩长的刚性桩, 公式 (6) 适用于一种桩长的刚性桩复合地基, 将此公式进行推广, 考虑刚性长短桩复合地基三元素的不同作用, 提出刚性长短桩复合地基承载力实用简便公式如下:

$$f_{sp, k} = \frac{m_1 R_{u1}}{k_1 A_{p1}} + \frac{m_2 R_{u2}}{k_2 A_{p2}} + \frac{(1-m_1-m_2) f_u}{k_3} \quad (7)$$

式中  $m_1, R_{u1}, A_{p1}$  分别为桩置换率、单桩极限承载力、桩身面积,  $f_u, k$  分别表示基底桩间土极限承载力和安全系数, 下标 1, 2, 3 分别表示长桩、短桩、基底桩间土。

公式 (7) 主要考虑桩土的共同作用, 考虑组成长短桩复合地基三元素协同工作效应。具体使用时, 根据建筑物变形要求, 建议采用:  $k_1 = 1.70 \sim 1.90$ ,  $k_2 = 2.20 \sim 2.40$ ,  $k_3 = 3.40 \sim 3.60$ 。以上  $k$  值分别是长桩、短桩、基底桩间土安全系数取值, 变形要求高时取大值, 变形要求低时取小值。 $k$  值的选取是承载力公式的关键, 也是长桩、短桩、桩间土能否共同作用的前提。以上  $k$  值主要根据该三元素在工程现场试验时对变形的不同效应和三者的协调确定的, 在饱和软粘土地区为确保工程安全, 要求长桩置换率占长短桩总置换率的 50% 以上。公式 (7) 可谓动态设计公式, 具体应用时可以根据工程实际情况事前确定  $k$  值取值范围, 并根据工程现场试验情况加以调节。

## 2 刚性长短桩复合地基变形 (沉降) 实用计算公式研究

近几年许多学者对长短桩复合地基变形进行了研究, 如马骥等<sup>[3]</sup>认为复合地基变形计算采用复合模量法, 计算时采用的复合土层除与天然地基相同外, 短桩桩端位置、长桩桩端位置也作为复合土层的分层边界 (见图 1); 葛忻声等<sup>[2]</sup>、杨军龙等<sup>[1]</sup>都进行了不同的研究, 这些方法虽各有优点, 但对目前工程上碰到的两大

问题(计算繁杂和经验系数难以确定)没有很好解决。

另外褥垫层的设计是刚性复合地基成败的关键,第 1.1 节中研究发现,桩土相对位移的具体表现就是桩身的刺入,包括桩顶在褥垫层内的刺入和桩端在下卧层内的刺入,刺入的程度决定了刚性长短桩复合地基承载力发挥的程度。特别是对刚性长短桩复合地基的变形,由于其具有许多特殊性,应该进行相应的考虑。

### 2.1 刚性长短桩复合地基变形机理研究

刚性长短桩复合地基的变形主要是短桩桩端土变形及长短桩之间的桩间土变形,还有桩体向上刺入(褥垫层刺入)变形和桩体向下刺入(长桩桩尖刺入)变形等组合产生。

以上变形组合的分析还是比较复杂的,为了问题的简化,我们将这些变形组合用解析示意图来表示(图 4)。其变形从长桩方面分析,应该是  $S_{1b} + S_{2b} + S_{3b}$ ;从短桩方面分析,应该是  $S_{1a} + S_{2a} + S_{3a}$ 。当然实际的变形应该是双方的综合协调。现以短桩受力变形为主线(图 4),结合长短桩、桩间土复合受力效果综合考虑,采用分段的简单迭加法原理不难看出刚性长短桩复合地基变形由以下 3 方面组成,即:(1)长短桩共同作用在褥垫层内的桩体上刺变形量  $S_1$ , (2)短桩桩体范围内(1区)长短桩桩体压缩变形量  $S_2$ , (3)短桩桩端以下复合土层(2区、3区)压缩变形量  $S_3$ 。则刚性长短桩复合地基的总变形量为以上三者之和。

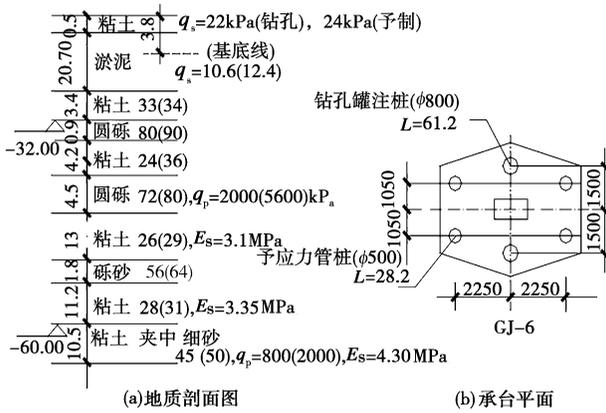


图 3 地质剖面图和承台平面

Fig 3 Geoligical profile and bearing platform flat

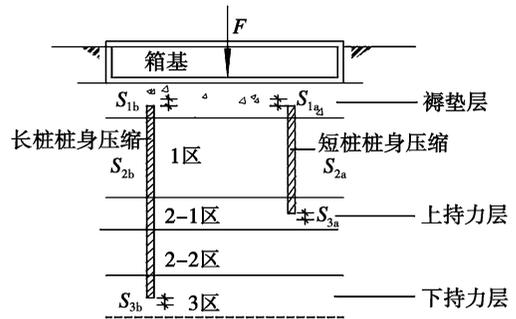


图 4 变形组合解析示意图

Fig 4 Analytic sketch for settlement composite

### 2.2 桩体上刺变形量 ( $S_1$ ) 及下刺变形量计算研究

目前对桩体上刺变形量的计算研究很少,文献可查的有刘绪普等<sup>[7]</sup>1995年利用 Vesic 小孔扩张理论研究得到的近似公式,但计算很繁杂。而实际上  $S_1$  的变形与  $S_3$  相比很小,如温大行政信息中心大楼 20 个测点实测表明其值在 2~4.5 mm,而用刘绪普<sup>[7]</sup>近似公式计算也是 3.2 mm,因此建议  $S_1$  取 3~5 mm,多层取小值,小高层及高层取大值。

桩体下刺变形量指的是长桩刺入下持力层的刺入量,目前对该变形量的计算研究也很少。因为下持力层土质很好,一般为碎石层、卵石层或基岩,其压缩模量很大,而对长桩其桩端轴力一般较少,故该部分变形也很少。本文从另一角度,即将其作为图 4 中 3 区复合土体变形的一部分来考虑(见下面第 2.4 节)。

### 2.3 $S_2$ (1区长短桩桩体压缩变形量) 计算分析

因为长短桩桩体均为刚性,其桩体压缩变形量很小,而且在  $S_3$  计算时偏大考虑(见  $S_3$  计算说明),故  $S_2$  可以忽略不计。

### 2.4 $S_3$ (2区、3区复合土体压缩变形量) 简化计算

$S_3$  采用规范法公式计算,但对基底附加应力应结合刚性长短桩复合地基特点相应处理,则  $S_3$  为:

$$S_3 = \varphi \sum_{i=1}^n \frac{P_{03}}{E_{si}} (Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (8)$$

式中  $\varphi$  为经验系数,  $P_{03}$  为上持力层面处刚性长短桩复合地基土中附加应力,将长短桩组合视作整体考虑,其值为基底附加应力减去长短桩摩阻力 ( $T_a$ ) 折算应力值,具体为  $P_{03} = (F - T_a) / A$

以上公式实际应用时很繁杂,而对刚性长短桩复合地基作如下简化切实可行:

(1)本来  $S_3$ 应该考虑长桩在 2区、3区段对桩间土的复合效果,用复合模量方法计算,这样将减少  $S_3$ 值,但考虑到  $S_2$ 已忽略不计,而且长桩复合产生的复合模量提高约在 5%左右。故  $S_3$ 计算时不计长桩对 2区、3区段桩间土的复合效果。

(2)如图 4可知,  $S_3$ 由以下 3部分组成: (a)上持力层厚度范围(如图 4的 2-1区)的复合土体变形  $S_{31}$ 。该层一般为单一土层,可以按分层总和法基本公式( $\frac{p_0 h_1}{E_{s1}}$ )计算,计算非常简单; (b)上持力层底至下持力层面之间(如图 4的 2-2区)的复合土体变形  $S_{32}$ 。该层层厚很大,采用“修正”规范法计算,即不考虑计算厚度,按全深度分层计算,同时也不考虑经验系数。分层计算时碰到厚度小于 3m的硬夹层均归入上(或下)软土层计算,这样既减少了分层(一般 3~4个分层就够),同时人为增大了变形值,可以更有理由忽略经验系数; (c)下持力层(如图 4的 3区)土体变形  $S_{33}$ 。因为下持力层土体压缩模量很大,而且长短桩组合传力至此(下持力层面)的附加应力已很小,故该部分变形值很小。但考虑这部分变形相似于桩体下刺变形量,桩体下刺变形量理论上难以求得,而在这里可以用“修正”规范法公式(不考虑经验系数)方便求得,该层土层厚度取 10d(d为长桩桩径)已足够。作了以上简化后,可得 2区、3区复合土体压缩变形量为:

$$S_3 = \sum_{i=1}^3 \frac{P_{03}}{E_{si}} (Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \tag{9}$$

### 2.5 刚性长短桩复合地基变形(沉降)实用计算公式

综合以上分析、探讨,可以得到如下刚性长短桩复合地基最终沉降(变形)实用计算公式(具体工程计算时必须控制该值在 100mm以内):

$$S = \sum_{i=1}^3 \frac{P_{03}}{E_{si}} (Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + S_1 \tag{10}$$

式中  $i=1, 2, 3$ 分别对应图 4的 2-1区段、2-2区段、3区段。对 2-1区段,土层单一,层厚为上持力层厚度;对 2-2区段,土层较厚,分层较多,按上述简化方法分层计算;3区段土层也单一,层厚 10d,  $s_1=3\sim 5\text{mm}$ 。

## 3 工程验证

温州大学行政信息中心大楼位于茶山高教园区,主楼为 13层,地下 1层。根据温州工程勘察院提供的勘察报告(如图 3(a)),在 -32m处及 -60m处分别有一层低压缩性土及中压缩性土。该工程实际设计时长桩置换率占长短桩总置换率的 56%,采用  $k_1=1.8, k_2=2.3, k_3=3.5$ 对其 GJ-6承台(如图 3(b))的刚性长短桩复合地基承载力计算及现场静载荷试验结果见表 1;GJ-6承台的最终沉降计算及该工程主体结顶后 1年的实测沉降数据见表 2。

表 1 刚性长短桩复合地基承载力计算

Table 1 Bearing capacity calculation of rigid long-short-pile composite foundation

长桩极限承载力 $R_u$ 计算 /kN	短桩极限承载力 $R_u$ 计算 /kN	$m_1, m_2$	$f_u$ /kPa	$k$	$F$ /kN	刚性长短桩复合地基 承载力计算 $f_{spk}$ /kPa	静载荷试验 结果 /kN
$R_u = (19.2 \times 10.6 + 3.4 \times 33 + 0.9 \times 80 + 4.2 \times 24 + 4.5 \times 72 + 13 \times 52 + 1.8 \times 56 + 11.2 \times 28 + 3 \times 45) \times 0.8 \times 3.14 + 0.42 \times 3.14 \times 800 = 5521$ (取 5500)	$R_u = (19.2 \times 12.4 + 3.4 \times 34 + 0.9 \times 90 + 4.2 \times 26 + 0.5 \times 26) \times 0.5 \times 3.14 + 0.252 \times 3.14 \times 5.600 = 1973$ (取 1950)	$m_1 = 2 \times 0.5 / 22.08 = 0.0453$ $m_2 = 4 \times 0.196 / 22.08 = 0.0356$	100	$k_1 = 1.8$ $k_2 = 2.3$ $k_3 = 3.5$	8850	$f_{spk} = (0.0453 \times 5500) / (0.5 \times 1.8) + (0.0356 \times 1950) / (0.196 \times 2.3) + (1 - 0.0453 - 0.0356) \times 100 / 3.5 = 457$ (取 450)	502

注:长桩为钻孔灌注桩,桩端进入下持力层(粘土夹中细砂)内 3m,实长 61.2m,桩径 800mm;短桩为预应力管桩,桩端进入上持力层(圆砾)内 0.5m,实长 28.2m,桩径 500mm,6桩承台  $A = 22.08\text{m}^2$ ,取承台高 1m,由公式  $A = (1.05 \times 8850) / f_{spk} - 20d = 21.61 < 22.08\text{m}^2$ ,可知该承台设计符合要求。(考虑弯矩、剪力较小,取放大系数 1.05经相关验算符合设计要求)。

表 2 刚性长短桩复合地基变形计算

Table 2 Settlement calculation of rigid long-short-pile composite foundation

$A$ /mm	$F$ /kN	$P_{03} = (F - T_a) / A$ /kN	$s$ 计算 /mm	$s_y$ 实测数据 /mm
22.08	8850 / 1.25 = 7080	(7080 - 5263) / 22.08 = 82.29	$S = 82.29 \times 4 \times [ (0.176 \times 4.5 - 0) / 12.8 + (0.06 \times 19.3 - 0.176 \times 4.5) / 3.10 + (0.0407 \times 30.5 - 0.06 \times 19.3) / 3.35 + (0.033 \times 38.3 - 0.0407 \times 30.3) / 4.3 + s_l = 69.78 + 5 = 75 < 100$	42.5

注: 表中  $E_{31} = 12.8$ ,  $E_{321} = 3.10$ ,  $E_{322} = 3.35$ ,  $E_{33} = 4.30$  层厚  $h_{31} = 4.50$ ,  $h_{321} = 14.80$ ,  $E_{322} = 11.20$ ,  $E_{33} = 8.0$ ,  $T_a = 5263$  承台尺寸  $l \times b = 6 \times 3.7$  以承台中点用迭加法计算。

从该工程实例可知本文公式(7)概念清晰明确,操作方便实用,而且与静载荷试验结果比较接近(偏小);公式(10)实用简便,而且计算值与实测值(预估最终沉降约65)较接近(偏大),因此可以为工程使用参考。

## 4 结语

刚性长短桩复合地基目前来说是复合地基的最新发展,国内外研究不多,特别是在饱和软粘土地区的高层建筑工程中应用很少,本文实例由于地质的特殊性以及各方面的配合采用了这种最新的复合地基,并获得了很好的经济效益。刚性长短桩复合地基的设计理论目前仍处于研究阶段,现行规范中尚没有其承载力及沉降计算的具体方法。本文从刚性桩复合地基承载力研究出发,从刚性长短桩复合地基的受力特点及其变形机理入手,探讨其承载力及沉降的计算公式,并结合工程实例及现场试验(具体情况本文略)进行应用及验证,认为本文提出的承载力及沉降实用计算公式,概念清晰明确,操作简便实用,可以作为工程设计参考。

## 参考文献:

- [1] 杨军龙, 龚晓南, 等. 长短桩复合地基沉降计算方法探讨 [J]. 建筑结构, 2002, 32(7): 78-100
- [2] 葛忻声, 龚晓南, 等. 长短桩复合地基设计计算方法探讨 [J]. 建筑结构, 2002, 32(7): 73-74
- [3] 马骥, 张东, 等. 长短桩复合地基设计计算 [J]. 岩土工程技术, 2001, 2: 86-91
- [4] 张耀东, 王晓东, 等. CM 长短桩复合地基设计与应用 [J]. 铁道建筑技术, 2002(2): 41-44
- [5] 龚晓南. 复合地基 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992
- [6] 池跃君, 宋二祥. 刚性桩复合地基承载及变形特试验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 3(3): 237-240
- [7] 刘绪普, 龚晓南, 等. 用弹性理论法和传递函数法联合求解单桩沉降 [C] // 第四届地基处理学术讨论论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1995. 484-488