

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.131

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 均质地层中桩筏基础筏板荷载分担比的归一化分析方法

王凌<sup>1</sup>, 罗如平<sup>2,3</sup>

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广州 510010; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 南昌 330013;  
3. 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 南昌 330013)

**摘要:**在进行桩-土共同作用的桩筏基础设计时,其核心之一是合理评估筏板的荷载分担特性。为了准确得到筏板的荷载分担比大小,基于桩-土-筏相互作用理论提出了竖向荷载作用下考虑土体非线性弹塑性的刚性板桩筏基础实用分析方法。在此基础上,进一步分析了土体参数、桩数、桩间距、桩长及桩径对筏板荷载分担比的影响,并根据计算结果提出了考虑基础整体安全系数影响的筏板荷载分担比归一化计算模型。计算结果表明:基础整体安全系数对筏板荷载分担比的大小有重要影响,安全系数越小,筏板荷载分担作用越大;桩数、桩长、桩间距直接影响筏板荷载分担比的大小,但其影响程度存在差别,桩间距影响较显著,桩长次之,桩数影响程度较弱;采用归一化分析模型能较好地统一不同参数对筏板荷载分担比的影响。最后,通过实际工程案例初步验证了归一化模型的有效性。

**关键词:**桩筏基础;荷载分担比;桩-土相互作用;安全系数;归一化模型

**中图分类号:**TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)06-0038-08

## Normalized analysis for pile-raft load sharing ratio of piled raft foundation in homogeneous ground

Wang Ling<sup>1</sup>, Luo Ruping<sup>2,3</sup>

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co. Ltd. Guangzhou 510010, P. R. China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 3. Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, Nanchang 330013, P. R. China)

**Abstract:** For the design of a piled raft foundation that considering the pile-soil interaction, one of the key factors is to evaluate the load sharing characteristics of the raft reasonably. In order to determine the load sharing ratio of the raft accurately, a nonlinear elastic-plastic analysis method for the rigid piled raft foundations under vertical loading is developed based on the pile-soil-raft interactions theory. On that basis, the influences of soil parameters, pile number, pile spacing, pile length and pile diameter on the pile-raft

**收稿日期:**2020-06-16

**基金项目:**国家自然科学基金(41972291)

**作者简介:**王凌(1980-),男,高级工程师,主要从事城市轨道交通结构研究,E-mail:283084255@qq.com。

罗如平(通信作者),男,E-mail:luo.ruping@outlook.com。

**Received:**2020-06-16

**Foundation item:**National Natural Science Foundation of China (No. 41972291)

**Author brief:**Wang Ling (1980-), senior engineer, main research interest: structure of mass transit railway, E-mail: 283084255@qq.com.

Luo Ruping (corresponding author), Lecturer, E-mail: Luo.ruping@outlook.com.

load sharing ratio of rigid piled raft are analyzed further, and a normalized calculation method of raft load sharing ratio is proposed based on a series of calculation results of piled raft under different working conditions. The results show that: the overall safety factor of the piled raft has a remarkable influence on the load sharing behavior of raft, i. e., the raft load sharing decreases with the increase of foundation safety factor. Pile number, pile length and pile spacing have a direct influence on the raft load sharing ratio, but the influence degrees are different. Pile spacing has the most significant influence, followed by pile length, and pile number has the least influence degree. The normalized calculation model can unify the influences of the above parameters on the raft load sharing behavior. Finally, the proposed normalized calculation model is verified preliminarily by the collected project examples.

**Keywords:** piled raft foundation; load sharing ratio; pile-soil interaction; safety factor; normalized calculation method

传统桩基础设计方法通常假定上部荷载全部由桩来承担,不考虑桩间土对基础承载力的贡献。在过去几十年的工程实践中,越来越多的设计人员认识到传统桩基础设计方法在某些情况下过于保守,由于筏板与地基土客观存在的接触作用,筏板能分担相当一部分上部荷载<sup>[1-3]</sup>。因此,如果在桩筏基础设计中考虑筏板的荷载分担作用,除了能满足建筑物对基础安全性和变形的要求外,还能减少较为可观的桩数,降低基础工程造价。

早在20世纪30年代,工程设计人员根据简单的共同作用原理,采用地基土分担“老8吨”(即80 kPa)的规定对上海高层建筑进行桩基设计,相关建筑至今仍能满足正常使用要求。这种设计方法虽然较为简单,未考虑基础形式对筏板荷载分担比的影响,但其充分体现了桩-筏共同作用的设计理念。基于桩-筏共同作用设计方法的核心之一是合理确定筏板荷载分担比的大小。相关学者基于工程经验、理论分析及数值模拟等手段对桩筏基础筏板荷载分担问题进行了研究,并提出了相应的计算方法<sup>[4-11]</sup>。但需要指出的是,总体来看,这些计算方法计算参数的确定较为困难,经验性较强,不便于在实际工程设计中广泛应用。

鉴于此,笔者基于刚性板桩筏基础共同作用计算模型,通过分析一系列不同土体参数及基础几何参数下的桩筏荷载分担比变化规律,提出了考虑基础整体安全系数影响的归一化筏板荷载分担比分析模型,并通过10个实际工程案例验证了归一化模型的准确性。

## 1 既有计算方法分析

表1为相关文献中给出的桩筏荷载分担比计算方法。从表中可以看出,大部分桩、筏荷载分担比计算方法都需要较多参数,如方法1、2、4,而这些参数的确定又较为复杂,存在较大的不确定性,因此,在

实际工程应用中存在诸多不便。

此外,目前的桩、筏荷载分担比计算方法多为“确定性”计算方法,无法考虑荷载分担比在加载全过程中动态变化的特点。方法1、4考虑了桩基荷载分担比随沉降的变化过程,但由于桩筏基础的沉降预测是一个复杂的课题,在设计阶段往往难以准确预测出基础沉降值的大小。因此,在实际设计中难以准确计算在工作荷载作用下桩、筏荷载分担比的大小。

考虑到基础整体安全系数 $F_s$ 较基础变形更容易在设计阶段确定,因此,以工程设计中常用的安全系数 $F_s$ 作为变量,建立起筏板归一化荷载分担比分析模型,更便于实际工程的设计应用。

表1 桩筏基础荷载分担比计算方法

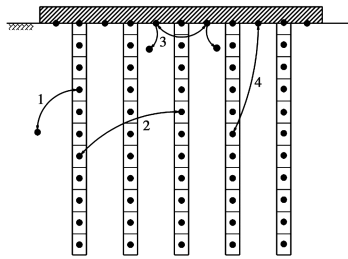
Table 1 Calculation methods for load sharing ratio of piled raft

编号	桩基/筏板荷载分担比计算方法	参考文献
1	$\alpha_p = \frac{S \cdot N \cdot d \cdot E_0}{C \cdot P_t}$ <p>其中:<math>S</math>为桩基沉降;<math>N</math>为桩数;<math>d</math>为桩径;<math>E_0</math>土体弹性模量;<math>C</math>为计算系数,查表计算;<math>P_t</math>为建筑物总荷载</p>	[4]
2	$\alpha_p = 95 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ <p>其中:<math>\alpha, \beta, \gamma</math>分别为相关计算参数</p>	[6]
3	$\alpha_p = 1 - \frac{K_r(1 - \alpha_{rp})}{K_p + K_r(1 - \alpha_{rp})}$ <p>其中:<math>K_r</math>为筏板刚度;<math>K_p</math>为群桩刚度; <math>\alpha_{rp}</math>为桩-筏相互作用系数</p>	[5]
4	$\alpha_p = \frac{1}{(\beta \cdot \xi) \cdot \left[ \frac{a_p \cdot \lambda_B + b_p \cdot (S/B_r)}{a_r + b_r \cdot (S/B_r)} \right] + 1}$ <p>其中:<math>S</math>为基础沉降;<math>B_r</math>为筏板宽度; <math>\beta, \xi, \lambda_B, a_r, a_p, b_r, b_p</math>为相关计算参数,其主要基于经验及统计规律</p>	[7]
5	$\alpha_r = \begin{cases} 23.24 + 5.81 \frac{S}{d} - 0.9 \frac{l_p}{d} & \omega = 2.5\%d \\ 24.39 + 7.10 \frac{S}{d} - \frac{l_p}{d} & \omega = 5\%d \end{cases}$ <p>适用于黏性土,其中:<math>S/d</math>为桩间距桩径比;<math>l_p/d</math>为桩基长径比;<math>\omega</math>为基础整体沉降。</p>	[11]

## 2 桩筏基础分析模型及验证

### 2.1 刚性板桩筏基础分析模型

图1为桩筏基础共同作用分析模型,为简化计算过程,提高计算效率,筏板假定为刚性筏板。在刚性筏板假定的基础上,筏板下各桩头具有相同的沉降值。对于实际工程而言,由于筏板自身、群桩和上部结构对基础体系刚度的贡献很大,采用刚性筏板基础也能较好地反映桩筏基础的荷载分担特性<sup>[12-14]</sup>。



注:

1. 桩-土相互作用: 桩身节点荷载引起周边土体沉降
2. 桩-桩相互作用: 邻近桩基荷载引起本桩变形作用
3. 筏-土相互作用: 邻近筏板荷载引起本筏板节点变形
4. 桩-筏相互作用: 筏板(桩身)节点荷载引起桩身(筏板)变形作用

图1 桩筏基础共同作用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil-pile interactions in piled raft foundation

刚性板桩筏基础共同作用模型的分析:

1) 土体位移方程。对筏板和桩基进行计算单元剖分,假定桩侧和桩端单元界面的剪应力和压应力为均匀分布,通过对桩侧和桩端面积进行数值积分,可建立反映桩-土-筏共同作用的土反力与土体位移方程

$$\mathbf{w}_s = \mathbf{F}_s \mathbf{P}_s \quad (1)$$

式中: $\mathbf{w}_s$ 和 $\mathbf{P}_s$ 分别为土体竖向位移和土体反力列向量,其展开式为

$$\begin{cases} \mathbf{w}_s = [\tau_s^{r1}, \tau_s^{r2}, \dots, \tau_s^{rk}, \tau_s^{p1}, \tau_s^{p2}, \dots, \tau_s^{pn}]^T \\ \mathbf{P}_s = [P_s^{r1}, P_s^{r2}, \dots, P_s^{rk}, P_s^{p1}, P_s^{p2}, \dots, P_s^{pn}]^T \end{cases} \quad (2)$$

式中: $k$ 和 $n$ 分别为筏板和桩身节点数。

$\mathbf{F}_s$ 为土体柔度系数矩阵,矩阵各元素反映桩、土、筏之间的相互作用

$$\mathbf{F}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{rr} & \mathbf{F}_{rp} \\ \mathbf{F}_{pr} & \mathbf{F}_{pp} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{F}_{rr}$ 为筏-土相互作用柔度系数矩阵,主要包括筏-土柔度系数(主对角线元素) $F_{i,i}$ 和筏-土-筏相互作用柔度系数 $F_{i,j}$ 。筏-土柔度系数 $F_{i,i}$ 按式(4)

$$F_{i,i} = \frac{(1 - \nu_s)(1 - \exp(-H_{soil}/(2r_{equ})))}{4G_s r_{equ}} \quad (4)$$

式中: $H_{soil}$ 为可压缩土层深度,该深度以下为不可压缩土层; $r_{equ}$ 为筏板单元等效半径(按矩形筏板单元与圆形筏板单元面积相等原则计算得到); $G_s$ 为土体剪切模量。

$\mathbf{F}_{rr}$ 中非对角线上元素筏-土-筏柔度系数 $F_{i,j}$ 按式(5)计算。

$$F_{i,j} = \frac{(1 - \nu_s^2)}{\pi E r_{equ}} \sin^{-1} \left( \frac{r_{equ}}{r_{i,j}} \right) \quad i \neq j \quad (5)$$

式中: $r_{i,j}$ 为筏板单元 $i$ 和单元 $j$ 中心点之间的水平距离; $E$ 为土体弹性模量。

$\mathbf{F}_{pp}$ 为桩-土相互作用柔度系数矩阵; $\mathbf{F}_{rp}$ 和 $\mathbf{F}_{pr}$ 为桩-土-筏相互作用柔度系数矩阵。各柔度系数均可按照 Mindlin 弹性理论计算,具体计算方法可参考文献<sup>[12-14]</sup>。

2) 桩身位移方程。考虑桩身单元划分的灵活性,根据杆系有限元理论,将桩看作通过一系列结点连接的杆单元,通过联立各单元刚度矩阵得到基础整体刚度矩阵 $\mathbf{K}_p$ ,进而得到桩身位移与荷载的关系式,即:

$$\mathbf{K}_p \cdot \mathbf{w}_p = \mathbf{Q}_{top} - \mathbf{P}_s \quad (6)$$

式中: $\mathbf{w}_p$ 为节点竖向位移列向量; $\mathbf{Q}_{top}$ 为基础外荷载列向量

3) 桩土界面位移协调。假定桩-土界面无相对位移产生,即 $\mathbf{w}_p = \mathbf{w}_s$ ,并对土体柔度系数矩阵 $\mathbf{F}_s$ 进行求逆得到地基刚度矩阵 $\mathbf{K}_s$ 。将式(1)代入式(6),可建立桩筏基础体系外部作用荷载与基础位移的数学关系式,即

$$\mathbf{K}_{tot} \cdot \mathbf{w}_p = \mathbf{Q}_{top} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{K}_{tot}$ 为桩筏整体刚度矩阵,为群桩竖向刚度矩阵 $\mathbf{K}_p$ 和地基土刚度矩阵 $\mathbf{K}_s$ 之和。

4) 在模型中考虑土体塑性影响,令桩、筏各节点极限抗力为

$$q_u = \begin{cases} \eta S_u & \text{桩侧节点} \\ 9S_u & \text{桩底节点} \\ 6S_u & \text{筏板节点} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $S_u$ 为土体不排水强度,可以基于原位试验或室内三轴试验加以确定; $\eta$ 为桩-土摩阻力系数,一般取值为0.35~1.25。在计算过程中,当节点反力大于极限反力时,用极限反力值代替该结点反力。

5) 为考虑桩筏基础的非线性沉降特性,土体模量 $E$ 采用式(9)所示双曲线型变化函数。

$$E = E_s (1 - R_f \cdot q/q_u)^2 \quad (9)$$

式中: $E_s$  为土体的初始弹性模量; $q$ 、 $q_u$  为节点当前节点反力值和极限抗力; $R_f$  为非线性系数,取值范围在 0~1。

需要指出的是,计算过程中土体弹性模量  $E$  需要根据节点相应荷载值进行不断调整修正。计算得到各节点应力后,按照式(9)对土体实际弹性模量进行修正,然后按照修正后的弹性模量  $E$  计算地基刚度矩阵  $K_s$ ,并代入整体荷载-位移方程(7)进行求解。

6)采用增量法对式(7)进行求解。由于假定为刚性筏板,为了保证筏板的各节点的位移相同,需通过乘(或加)大数法对式(7)两侧元素修改后进行求解来实现,其具体处理方法可参考文献[12-14]。对于筏板荷载分担比的计算,根据式(7)可得到不同筏板沉降下桩身、筏板节点的位移  $w_p$ ;考虑桩-土界面位移协调条件  $w_p = w_s$ ,基于方程(1)可得到各节点的土反力  $P_s$ ,通过对各节点土反力进行求和计算,即可分别得到桩基、筏板各自所承担的荷载值,从而得到筏板的荷载分担比大小  $\alpha_r$ 。

### 2.2 模型验证

以 Basile 等<sup>[15]</sup>给出的经典计算案例为例,其桩筏基础布置及相应材料参数如图 2 所示。筏板尺寸为 6 m×10 m,筏板厚度为 1 m,筏下布置 9 根桩径为 0.5 m、桩长为 20 m 的桩基,单桩基础竖向抗压承载力为 873 kN。

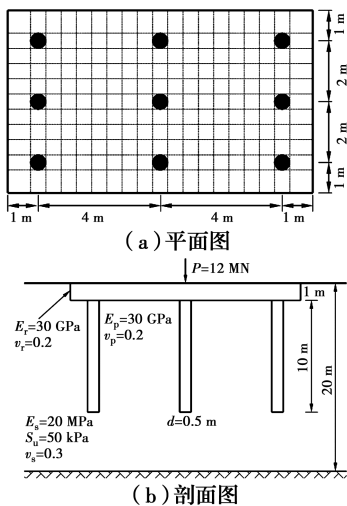


图 2 桩筏布置示意图及相应材料参数

Fig. 2 Layout of piled raft and its corresponding material parameters

由图 3 所示的荷载-沉降及荷载分担比变化曲线可以看出,计算结果与 Basile 等<sup>[15]</sup>给出的计算结

果十分吻合,证明了采用刚性板桩筏共同作用分析模型可以准确地评估基础整体沉降及荷载分担特性。

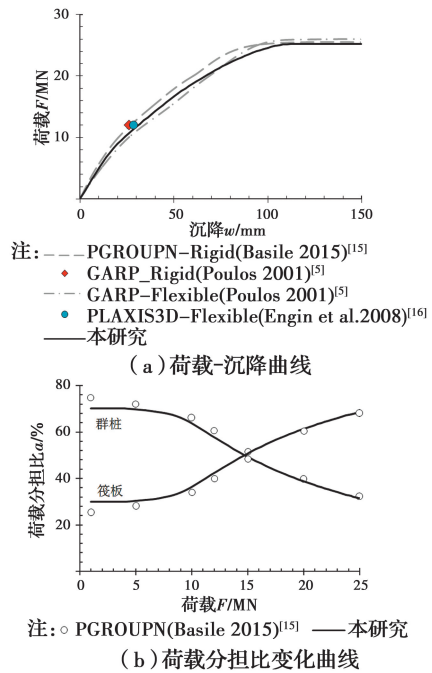


图 3 计算结果对比图

Fig. 3 Comparison graph of calculation results

## 3 筏板荷载分担比归一化分析

### 3.1 计算工况

采用上述介绍的刚性桩筏基础共同作用分析模型进行筏板荷载分担比的参数分析,其计算模型如图 4 所示。

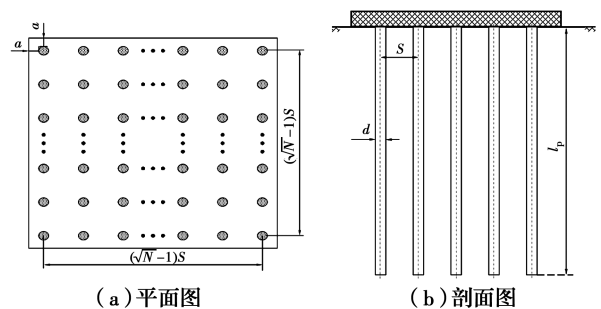


图 4 桩筏基础布置模型

Fig. 4 Calculation model of piled raft

刚性桩筏基础桩基均匀布置,桩径为  $d$ ,桩长为  $l_p$ ,桩间距为  $S$ ,筏板边缘距离桩基外围尺寸为  $a = d$ 。分析桩径、桩长、桩间距、桩数及土体参数对筏板荷载分担比的影响,共计算了 5 大类工况,相应计算工况如表 2 所示。



表 2 模型计算工况

Table 2 Calculation conditions of model

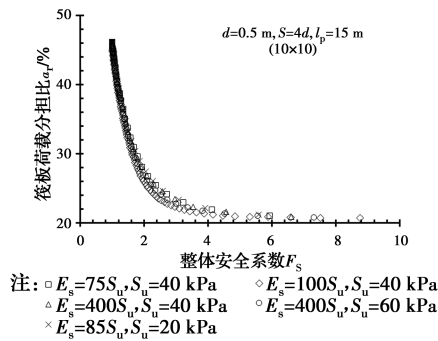
编号	桩径 $d/m$	桩长 $l_p/m$	桩间距桩径比 $S/d$	土体不排水强度 $S_u/kPa$	弹性模量强度比 $E_s/S_u$	筏板规格(桩数)
PR-1	0.5	15	4	40	75	5×5; 7×7; 10×10; 15×15; 20×20
					100	
					400	
					800	
PR-2	0.5	25	4	40	75	5×5; 7×7; 10×10; 15×15; 20×20
					400	
PR-3	0.5	35	4	40	75	5×5; 7×7; 10×10; 15×15; 20×20
					400	
PR-4	0.5	25	3, 4, 6, 9	40	75	5×5; 7×7; 10×10; 15×15
					400	
PR-5	0.3, 0.8, 1.0	25	4	40	75	10×10

### 3.2 筏板荷载分担比影响因素分析

3.2.1 土体参数影响 图 5 所示为在不同土体参数条件下筏板荷载分担比随基础整体安全系数  $F_s$  的变化规律。基础整体安全系数  $F_s$  的定义为

$$F_s = (N \cdot Q_p + Q_{ur}) / Q \quad (10)$$

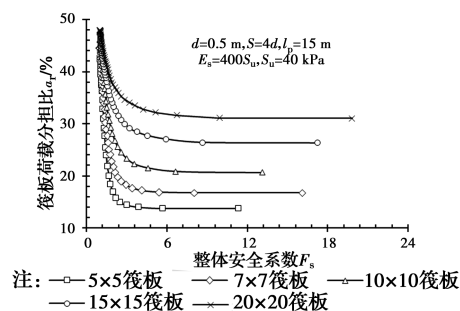
式中:  $N$  为桩数;  $Q_p$  为单桩极限承载力;  $Q_{ur}$  为筏板极限承载力;  $Q$  为上部总荷载。

图 5 不同土体参数下筏板荷载分担比  $\alpha_r$  变化规律Fig. 5 Load sharing ratio  $\alpha_r$  under different soil condition

从图 5 可以看出,随着基础整体安全系数  $F_s$  的减小,筏板荷载分担能力逐渐发挥,其相应的荷载分担比  $\alpha_r$  逐渐增大。总体来看,当基础整体安全系数  $F_s > 4$  时,筏板荷载分担比的变化速率显著降低,筏板荷载分担比基本维持不变。这可能是由于上部总荷载  $Q$  相对较小,大部分桩侧与筏板节点应力仍处于弹性受荷状态,没有进入屈服阶段,桩基础与筏板同步承担上部荷载。此外,从图 5 中还可以看出,土体参数对筏板荷载分担比基本没有影响,这主要与

模型假定的均质土体条件有关,桩基及筏板的承载性能同步、成比例发挥。

3.2.2 桩数影响 图 6 所示为在不同桩数条件下筏板荷载分担比随基础整体安全系数  $F_s$  的变化规律。与直观理解不同的是,在初始加载阶段,随着桩数的不断增加,筏板荷载分担比也逐渐增大。其原因是桩间距保持恒定,因此,单桩所分摊的筏板面积一致,而由于群桩效应的存在,桩数越多,筏板中间部位的桩基荷载发挥能力越弱,导致在基础整体安全系数较大时,筏板荷载分担比随着桩数的增加而不断增大。

图 6 不同桩数下筏板荷载分担比  $\alpha_r$  变化规律Fig. 6 Load sharing ratio  $\alpha_r$  under different pile number

3.2.3 桩间距影响 图 7 所示为在不同桩间距条件下筏板荷载分担比随基础整体安全系数  $F_s$  的变化规律。在此只介绍桩数为 100 时的变化规律,其他工况条件下的变化趋势与之完全相同。筏板的荷载分担比随着桩间距的增大而显著提高,因此,在桩筏基础设计中采用大桩距桩基布置方案不仅能有效

发挥筏板荷载的承载潜力,还能减少桩基数量,节约建设成本。

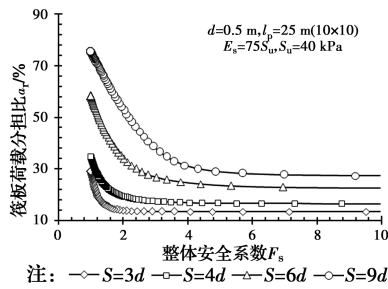


图 7 不同桩间距下筏板荷载分担比  $\alpha_r$  变化规律

Fig. 7 Load sharing ratio  $\alpha_r$  under different pile space

3.2.4 桩长影响 不同桩长条件下筏板荷载分担比随基础整体安全系数  $F_s$  的变化规律如图 8 所示。从图中可以看出,随着桩长的增加,桩基荷载承载力提高,筏板所承担的荷载比例逐渐降低,但降低的幅度明显减小。

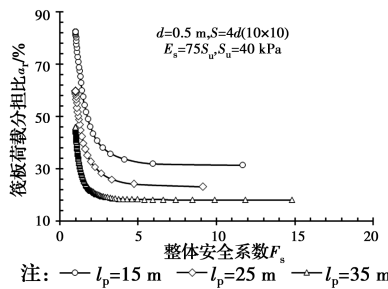


图 8 不同桩长下筏板荷载分担比  $\alpha_r$  变化规律

Fig. 8 Load sharing ratio  $\alpha_r$  under different pile length

3.2.5 桩径影响 桩径对桩筏荷载分担比的影响如图 9 所示,从图中可以看出,随着桩径的增大,筏板荷载分担比也逐渐增大。这是因为在保持桩间距比  $S/d$  恒定情况下,桩径  $d$  越大,相应的桩间距离  $S$  也越大,单桩分摊的筏板面积也更大,单桩承载力的增长水平(基本与桩径  $d$  的一次方呈比例)要低于筏板承载力(与桩径  $d$  的二次方呈比例)的提高幅度。

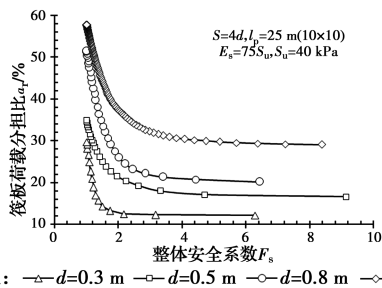


图 9 不同桩径下筏板荷载分担比  $\alpha_r$  变化规律

Fig. 9 Load sharing ratio  $\alpha_r$  under different pile diameter

### 3.3 筏板荷载分担比归一化模型

经过大量拟合分析,提出了归一化筏板荷载分担比  $\alpha'_r$  概念。图 10 所示为归一化筏板荷载分担比随基础整体安全系数变化曲线,其中归一化筏板荷载分担比  $\alpha'_r$  定义为

$$\alpha'_r = \frac{\alpha_r \cdot d_0 \cdot 0.5 \cdot l_p^{0.5}}{N^{0.3} \cdot d \cdot \left(\frac{S}{d}\right)} \quad (11)$$

式中:  $\alpha_r$  为筏板实际荷载分担比;  $d_0$  为标准桩径,  $d_0 = 1 \text{ m}$ ; 其余参数物理意义同前。

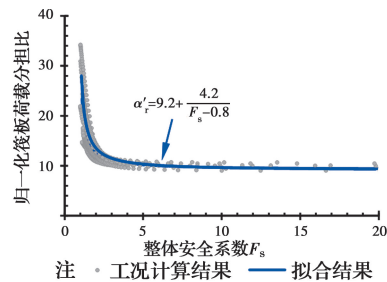


图 10 归一化筏板荷载分担比曲线

Fig. 10 Normalized curves of raft load sharing ratio

从上述归一化筏板荷载分担比  $\alpha'_r$  定义来看,桩间距  $S$  对筏板归一化荷载分担比的影响较为显著,桩长  $l_p$  次之,桩数  $N$  的影响程度较弱。

从图 10 中可以看出,引进归一化荷载分担比后,不同工况下筏板荷载分担比曲线能较好地得到了统一。相应的拟合函数如图 10 所示。

## 4 工程案例验证

为了验证所提出的归一化模型的有效性,搜集了 10 个位于不同区域的工程案例,场地包括软、硬黏土及粉土等,桩长 12~60 m,桩径 0.3~0.9 m,平均桩间距 2.6d~9.7d,桩数 20~351,基本涵盖了工程上常见的桩筏基础尺寸,具体工程实例资料如表 3 所示。其中,若相应文献中没有明确给出建筑物安全系数  $F_s$ ,则根据场地地质条件、荷载大小等信息,通过式(10)计算得到。

从表 3 中可以看出:采用传统桩基础设计方法设计的建筑物整体安全系数大于 5;相反,采用减沉桩设计的建筑物,由于本身已考虑了筏板的荷载分担作用,其整体安全系数在 2~3 之间,实现了基础设计安全高效、经济合理的目的。

表 3 桩筏基础工程实例资料汇总

Table 3 Database of project example of piled raft

案例编号	国家/地区	场地类别	建筑类型/层数	桩型	桩长/m	桩径/m	平均桩间距/m	桩数	实测筏板荷载分担/%	安全系数	文献来源
1	英国	硬黏土	办公楼/16	灌注桩	13.0	0.45	1.6	351	25	6.4	[17]
2	瑞典	软黏土	办公楼/7	木桩	12.0	0.30	2.1	200	67	1.9	[1]
3	瑞典	软黏土	住宅楼/4	木桩	26.0	0.30	2.9	104	60	2.0	[1]
4	德国	硬黏土	办公楼/30	灌注桩	20.0	0.90	2.9	42	24	2.6	[17]
5	日本	硬黏土夹砂	住宅楼/5	SMW	15.8	0.70	5.6	20	53	2.2	[5]
6	武汉	粉土夹砂	住宅楼/22	预制管桩	22.0	0.55	1.7	344	20	5.5	[19]
7	上海	软黏土	商业楼/11	预制方桩	30.0	0.40	2.9	150	32	2.7	[20]
8	西安	硬黄土	办公楼/36	灌注桩	60.0	0.80	2.1	271	15	5.8	[21]
9	上海	软黏土	办公楼/16	预制方桩	22.0	0.45	1.7	203	17	5.0*	[6]
10	上海	软黏土	办公楼/32	预制方桩	54.6	0.50	2.0	108	11	5.0*	[6]

注: \* 由于资料有限,工程案例 9、10 无法计算建筑物整体安全系数,鉴于桩间距  $S=4d$  左右,桩基按照传统设计方法设计,整体安全系数取为 5。

图 11 为工程实测归一化荷载分担比分布图,从图中可以看出,实测工程案例的归一化荷载分布规律与计算得到的分布模型吻合较好,尤其是当基础整体安全系数  $F_s \geq 5$  时,验证了归一化分析模型的适用性。

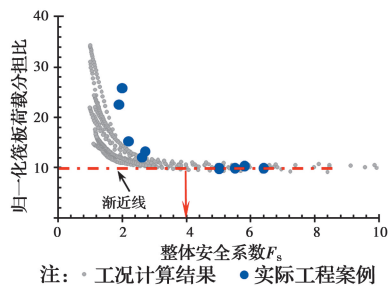


图 11 工程实测归一化荷载分担比分布图

Fig. 11 Measured normalized raft load sharing ratio

对于实际桩筏基础设计,如图 11 所示,总体而言,当整体安全系数控制在  $F_s > 4$  时,归一化筏板荷载分担比随受基础整体安全系数影响基本可以忽略,此时归一化筏板荷载分担比基本为一常数,可以近似按照归一化荷载分担比  $\alpha'_r = 10$  进行筏板荷载分担比计算,即筏板荷载分担比

$$\alpha_r = 10N^{0.3} \cdot S/L_p^{0.5}$$

需要说明的是,该归一化荷载分担比计算模型主要适用于均质地基或吉布森地基,对于场地表面具有较厚硬壳层或者典型端承桩的情况,模型不适用,可能会带来较大误差。

## 5 结论

基于桩筏基础共同作用模型分析了影响桩筏基

础筏板荷载分担比的各因素,并根据计算结果提出了均质地层中归一化筏板荷载分担比计算模型,根据实际工程案例验证了归一化模型的有效性,得到以下结论:

1) 总体而言,筏板荷载分担比随着基础整体安全系数  $F_s$  的增大而逐渐减小,但当基础整体安全系数  $F_s > 4$  时,筏板荷载分担比基本保持不变。

2) 桩数、桩长、桩间距直接影响归一化筏板荷载分担比的大小,但影响程度存在差别:桩间距影响较为显著,桩长次之,桩数影响程度较弱。

3) 对于实际桩筏基础设计,当整体安全系数基本控制在  $F_s > 4$  时,可以按照归一化荷载分担比  $\alpha'_r = 10$  进行筏板荷载分担比计算。

## 参考文献:

- [1] HANSBO S, JENDEBY L. A follow-up of two different foundation principles [C]// Fourth international conference on case histories in geotechnical engineering, St. Louis, Missouri, 1998: 259-264.
- [2] 王磊, 任彦华. 高层建筑结构桩筏基础-地基-上部结构共同作用分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(Sup2): 801-805.  
WANG L, REN Y H. Analysis of interaction of super structure-pile raft foundation-foundation soil [J]. Building Structure, 2018, 48(Sup2): 801-805. (in Chinese)
- [3] 杨军, 杨敏, 罗如平. 减沉桩基变形控制机理的案例析[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(5): 34-43.

- YANG J, YANG M, LUO R P. Case analysis of settlement control mechanism for settlement reducing pile [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(5): 34-43. (in Chinese)
- [4] 赵锡宏. 上海高层建筑桩筏与桩箱基础设计理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
- ZHAO X H. Design theory of piled raft and piled box foundation for high-rise buildings in Shanghai [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1989. (in Chinese)
- [5] POULOS H G. Piled raft foundations: Design and applications [J]. Geotechnique, 2001, 51(2): 95-113.
- [6] 赵锡宏, 龚剑. 桩筏(箱)基础的荷载分担实测、计算值和机理分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 337-341.
- ZHAO X H, GONG J. Load-sharing between pile and raft or box in field experiment, calculation and mechanism analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 337-341. (in Chinese)
- [7] LEE J, PARK D, CHOI K. Analysis of load sharing behavior for piled rafts using normalized load response model [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 57: 65-74.
- [8] KO J, CHO J, JEONG S. Analysis of load sharing characteristics for a piled raft foundation [J]. Geomechanics and Engineering, 2018, 16(4): 449-461.
- [9] KIM D, KIM G, KIM I, et al. Assessment of load sharing behavior for micropiled rafts installed with inclined condition [J]. Engineering Structures, 2018, 172: 780-788.
- [10] 李帆, 吕林峰, 陈洪运. 桩筏基础桩土荷载分担比研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(12): 114-118.
- LI F, LYU L F, CHEN H Y. Study on pile-soil load-sharing ratio of pile-raft foundation [J]. Railway Engineering, 2019, 59(12): 114-118. (in Chinese)
- [11] KONGRATANA J. Numerical study on load-sharing ratio of piled raft foundation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019
- [12] 罗如平, 杨敏, 杨军. 刚性筏板下群桩基础共同作用实用分析方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(11): 54-61.
- LUO R P, YANG M, YANG J. Practical analysis method on interaction of rigid piled raft foundation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(11): 54-61. (in Chinese)
- [13] LUO R P, YANG M, LI W C. Normalized settlement of piled raft in homogeneous clay [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 103: 165-178.
- [14] 杨军, 杨敏. 桩筏基础固结沉降实用计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(12): 1783-1790.
- YANG J, YANG M. Practical method for piled raft consolidation settlement calculation [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(12): 1783-1790. (in Chinese)
- [15] BASILE F. Non-linear analysis of vertically loaded piled rafts [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 73-82.
- [16] ENGIN H K, SEPTANIKA E G, BRINKGREVE R B J. Estimation of pile group behavior using embedded piles [C]// Proceeding of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Goa, India. 2008: 3231-8.
- [17] COOKE R W, SILLETT D F, BRYDEN SMITH D W, et al. Some observations of the foundation loading and settlement of a multi-storey building on a piled raft foundation in London Clay [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1981, 70(3): 433-460.
- [18] REUL O, RANDOLPH M. Piled rafts in overconsolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analyses [J]. Geotechnique, 2003, 53(3): 301-315.
- [19] 何颐华, 金宝森. 高层建筑箱形基础加摩擦群桩的桩土共同作用[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(3): 53-65.
- HE Y H, JIN B S. The interaction between pile and soil of box-foundation with friction pile-group for highrise buildings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(3): 53-65. (in Chinese)
- [20] 张俊峰. 基于桩-筏-土共同作用的理论基础上的减少沉降桩基础设计方法和程序编制[D]. 上海: 同济大学, 1997.
- ZHANG J F. Design method and programming of pile foundation for settlement reducing based on pile-raft-soil interaction theory [D]. Shanghai: Tongji University, 1997. (in Chinese)
- [21] 齐良锋, 张保印, 简浩. 某高层建筑桩筏基础桩间土反力原位测试研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 827-831.
- QI L F, ZHANG B Y, JIAN H. Research on reaction of soil among piles of pile-raft foundation of high-rise building by test in situ [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 827-831. (in Chinese)