

桩筏基础相互作用下土中应力场的变化规律*

The stress in soil under piled raft foundation

杨敏 王树娟

(同济大学地下建筑与工程系, 上海, 200092)

文 摘 在以往文献的基础上, 通过计算分析, 研究了不同桩数和桩长对土中应力场的影响以及桩基工作性状的变化规律, 从应力角度探讨了桩基对沉降的控制作用。

关键词 群桩, 相互作用, 沉降, 应力场。

作者简介 杨敏, 男, 1960年生, 1990年在同济大学获工学博士学位, 现任同济大学岩土工程学科主任, 教授, 博士生导师。从事土与结构物相互作用、桩基础、基坑支护和软土地基变形控制设计理论等的教学和科研工作。

Yang Min Wang Shujuan

(Dept. of Geotech. eng., Tongji University, Shanghai, 200092)

Abstract The behaviour of piled raft foundation has been studied with the analysis of piles based on Geddes' formulae and "cut-off" method in this paper, and additional stress in the soil induced with different numbers of piles and different length is discussed, which will influence the settlement of the foundation.

Key words piled raft foundation, interaction, settlement, stress field.

1 概 述

文献[1]提出考虑极限承载力下桩筏基础相互作用分析方法。计算过程中, 能综合考虑群桩中不同桩长及土层缺失等情况, 并假定土发生理想弹塑性变形, 引入了荷载超限转移法(cut-off), 模拟群桩中部分桩、土单元上的集中荷载计算结果超过极限承载力的情况, 以适应按沉降控制设计思想设计桩基等新设计方法[2]的需要。本文在文献[1]的理论基础上, 计算与目前工程实践联系比较紧密的两个问题: 桩筏基础共同作用结果随桩数、桩长变化的规律, 分析讨论了土中应力场的变化规律, 并从应力角度探讨桩基对沉降的控制作用。

2 计算分析算例

桩筏基础面积为 $35\text{m} \times 35\text{m}$, 板厚 0.8m ; 钢筋砼桩桩径 0.5m , 桩侧土极限侧摩阻力为 35kPa , 极限桩尖阻力为 1000kPa , 桩长 30m 时单桩极限承载力为 1850kN ; 地基土为均质, 其弹性模量为 5MPa , 泊松比为 0.4 , 假定土的容许承载力为 100kPa ; 地下水位为 1m ; 筏板埋深 5m ; 筏板受 16 个柱荷载作用, 每个柱荷载值的大小为 10000kN 。无桩情况下, 地基土表面接触压力约为 120kPa , 超过土的容许承载力。计算节点划分如图1所示。

3 桩数不同引起土中应力场变化规律

桩数 N 分别取为: $0, 25, 50, 100, 156$ 根, 因排列困难, 布桩不完全对称。桩长均取 30m 。

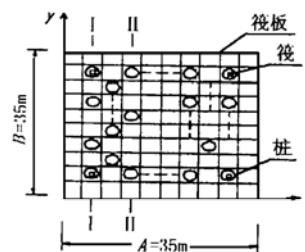


图1 计算节点划分示意

Fig. 1 Plot of calculating nodes

3.1 桩筏基础地基土附加应力分布随桩数变化规律

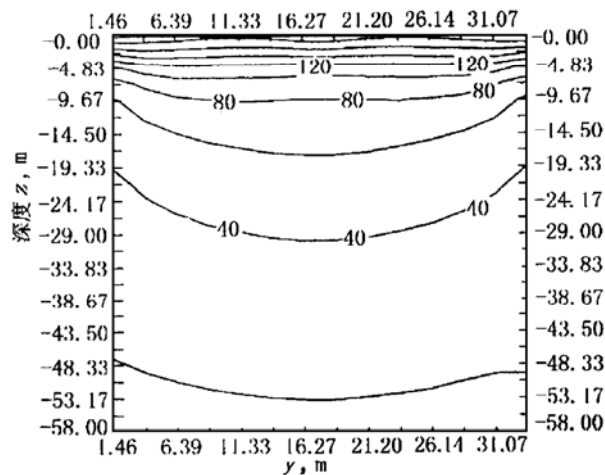
桩筏基础中, 桩的存在能够使整个基础的强度增加, 沉降大大减少。用桩来控制沉降, 其基本原理是: 通过桩对上部结构荷载的传递, 来改变土中的应力分布, 减少上部较软弱土层中的附加应力, 并将其传递至较深土层。桩数的多少直接影响荷载的传递, 影响土中的应力分布。

(1) 桩数 $N=0$ 时(计算时假定此时地基土还处于弹性工作阶段): 图2(a), (b)分别是无桩情况下 I-I, II-II 两剖面的附加应力等值线图。无桩时, 基础型式为片筏基础, 荷载全部由地基土来承担。由图可见, 筏板与地基间接触压力很大, 向下附加压力逐渐减小。II-II 剖面穿过筏板中心, I-I 剖面则接近筏

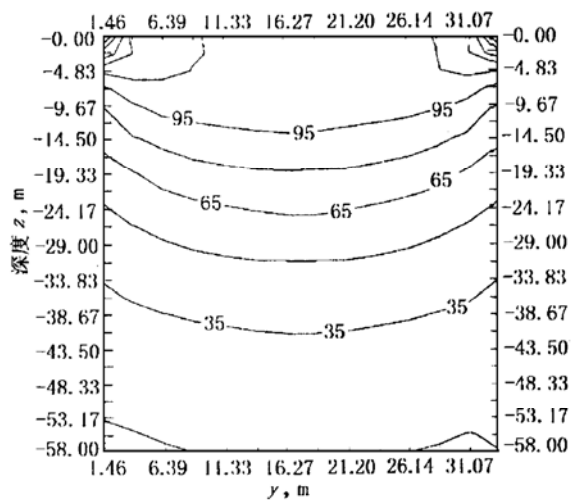
* 国家教委跨世纪优秀人才基金、国家教委优秀青年教师基金及上海市科技启明星计划资助项目。

到稿日期: 1997-04-01.

板的边缘,所以图中 I - I 剖面上节点的接触压力比 II - II 剖面大许多,基本上达到土的极限承载力;但共同作用结果, I - I 剖面下较深土层范围内,土中的附加应力比 II - II 剖面下要小很多,所以一般情况下,筏板中心沉降比边缘大。



(a) I - I 剖面



(b) II - II 剖面

图2 桩筏基础地基土附加应力等值线图($N=0$)

Fig.2 Isogram of additional stress in soils under piled raft foundation($N=0$)

(2) 桩数较少时($N=25, 50$): 图3, 4 分别是 25, 50 根桩时 I - I 剖面附加应力等值线图。桩数较少时, 地基土仍承担约一半甚至大部分的上部结构荷载。由图可见, 筏板与地基土之间的接触压力仍较大, 但很明显, 剖面上节点接触压力比桩数为 0 时有明显降低, 桩的存在将上部土层中应力直接传递到桩端平面以下。由于迭加作用, 随桩数增加, 桩端附近附加应力明显增大, 荷载被传递至更深的土层, 桩数较少时, 桩的荷载传递效果非常明显, 从而对减少沉降产生有效的作用。

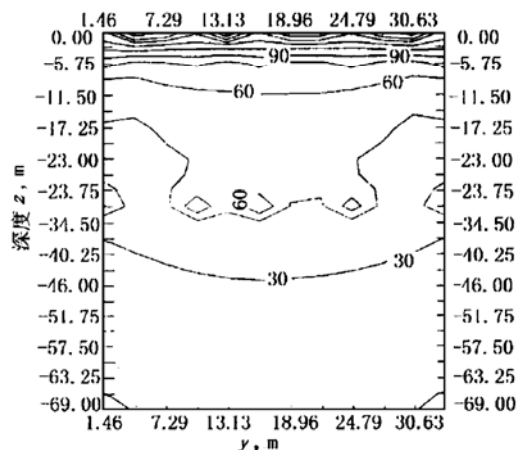


图3 地基土附加应力等值线图($N=25$)

Fig.3 Isogram of additional stress in soils under piled raft foundation($N=25$)

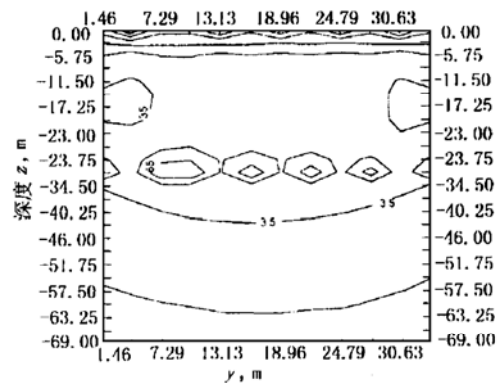


图4 地基土附加应力等值线图($N=50$)

Fig.4 Isogram of additional stress in soils under piled raft foundation($N=50$)

(3) 桩数较多时($N=500, 156$): 图5, 6 分别是 100, 156 根桩时 I - I 剖面的附加应力等值线图。桩数较多时, 地基土只承担小部分的上部结构荷载。由图可见, 筏板与地基土之间仍然存在接触压力, 但其值较小。上部结构荷载大部分通过桩的作用传递至桩端平面附近及其以下土层, 这部分土层中的附加应力比 50 根桩时增大, 说明有更多的荷载传递到桩端持力层。156 根桩的附加应力分布情况与 100 根桩时没有十分明显的差别, 说明布 156 根桩对沉降的控制作用与 100 根桩相差不大。

3.2 桩筏基础的工作性状随桩数的变化规律

(1) 桩筏基础的整体沉降随桩数的变化

图7所示为桩筏基础整体沉降随桩数的变化曲线, 总的趋势是: 随桩数的增加, 桩筏基础的整体平均沉降减小。桩数较少时, 上部软弱土层中的附加应力很大, 基础沉降也较大, 增加桩数, 能够有效将上部土层中的应力向下传递, 对减少桩筏基础整体沉降的效

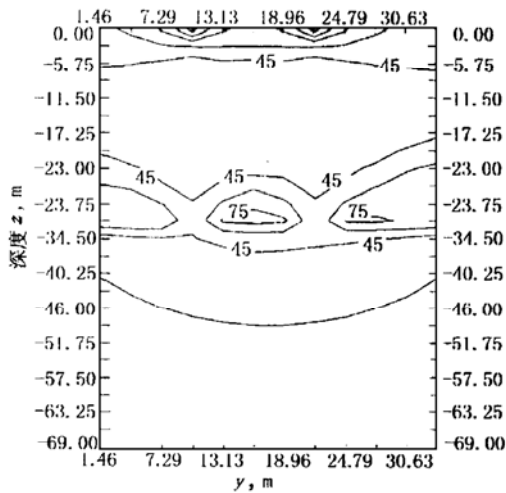


图5 地基土附加应力等值线图(N=100)

Fig.5 Isogram of additional stress in soils under piled raft foundation(N=100)

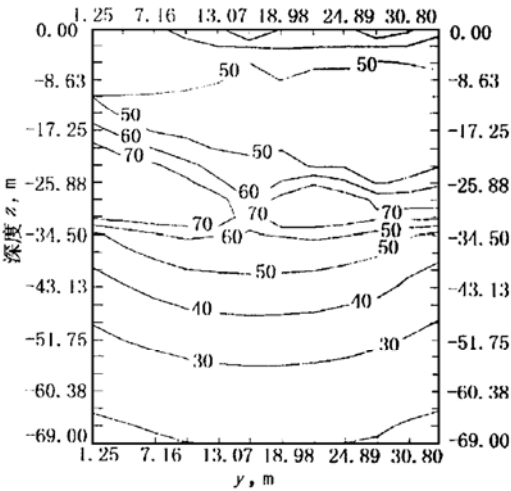


图6 地基土附加应力等值线图(N=156)

Fig.6 Isogram of additional stress in soils under piled raft foundation(N=156)

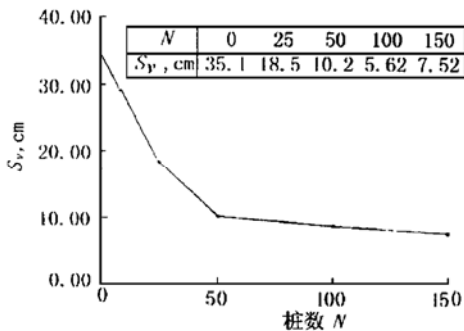


图7 整体沉降随桩数变化曲线

Fig.7 Variation of the settlement with number of piles

果非常明显;桩数较多时,基础沉降已比前降低很多,增加桩数,对土中的应力分布有一定影响,但比以前明显减弱,所以桩筏基础整体沉降减小不很明显;桩数增加到一定程度,桩数变化对土中的应力场影响甚小,基础的沉降较小,并趋于稳定,则继续增加桩数对减少桩筏基础整体沉降几乎没有什么效果。沉降随桩数的变

化曲线,可以作为一些设计方法,即以沉降控制为目的的设计理论的依据,其变化趋势与以往所作的简单分析也是一致的[2]。

(2)桩筏基础的沉降比随桩数的变化规律

所谓沉降比 Δ ,即为桩身范围内土层压缩量在总沉降中所占据比例。图8为沉降比 Δ 与桩数的关系曲线。由图可见,对刚性桩而言,沉降比 Δ 受到桩数的影响仍很大,随着桩数的增多,沉降比 Δ 迅速变小,并趋于稳定。桩数较少时,桩侧土中的附加应力很大,基础的沉降主要是桩身范围内土层的压缩,沉降比 Δ 很大,增加桩数,土的接触压力迅速减小,上部土层中的应力被传递到桩端以下土层,从而使桩身范围内土层的压缩量大大减少,而桩端以下较硬土层的压缩量也相应有所增大,沉降比减小很快;桩数较多时,群桩中部分桩处于弹性状态,群桩基本上承担了大部分的上部荷载,并将其向下传递,桩筏基础的沉降得到了有效的控制,沉降主要为桩端以下土层的压缩,总沉降量比较小,增加桩数,可进一步将土承担的那部分荷载传递到桩端以下土层,沉降比仍有减小;桩数增加到一定程度,大部分桩在弹性范围内工作,桩身范围内附加应力较小,桩筏基础沉降基本上就等于桩端以下土层的压缩量,桩身范围内土层压缩量,桩身范围内土层压缩量可近似认为等于桩的杆件压缩量,它在总沉降中所占比例甚微,沉降比基本趋近于0。

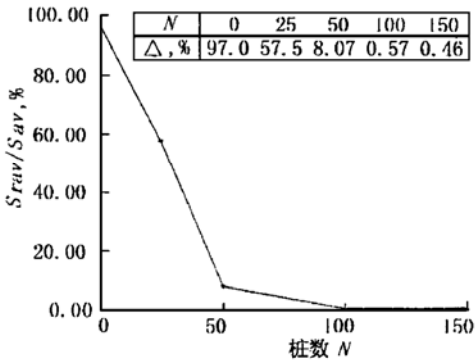


图8 桩筏基础沉降比随桩数的变化曲线

Fig.8 Vairation of settlement ratio of piled raft foundation with number of piles

(3)筏板的荷载分担比随桩数的变化规律

图9为筏板的荷载分担比 θ 随桩数的变化规律曲线。由图可看出,筏板的荷载分担比 θ 随桩数的总体变化趋势是:随着桩数的增多, θ 值逐渐变小。桩数较少时,土的接触压力大,荷载大部分由土来承担,筏板的荷载分担比 θ 很大,增加桩数可使 θ 值明显减少,且在一定桩数范围内, θ 值的减少速度基本相等,这主要因为在此范围内,群桩中各桩都超过了极限承载力,增加桩数,使群桩体系的整体承载能力按同比例增加的

缘故;桩数较多时,群桩承担了大部分的上部荷载,桩数的增加使筏板的荷载分担比减小的趋势变缓;桩数增加到一定程度,桩数变化对筏板的荷载分担比影响非常小。本文中桩数很多条件下,地基土中仍有较小的接触压力,筏板也承担了一定比例荷载。这主要因为:本文假定筏板与下卧土始终保持弹性或理想弹塑性接触,没有考虑因为土的固结作用使得筏板与土脱离的情况。

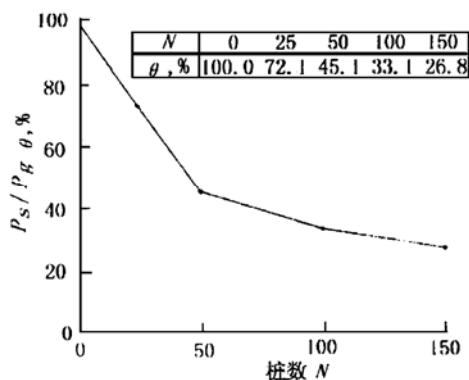


图9 桩筏基础筏板荷载分担比随桩数变化曲线

Fig. 9 Variation of load sharing ratio on raft in piled raft foundation with number of piles

4 桩长不同引起土中应力场变化规律

取桩长 L 分别为:0, 10, 20, 30, 50, 79m, 计算中假定是均匀土, 桩长不同所取的桩极限承载力取值也不同。桩数均取 100 根。

4.1 桩筏基础地基土附加应力分布随桩长变化规律

如上所述, 桩筏基础中, 桩的存在能够使整个基础沉降大大减少, 桩能将上部结构荷载向下传递, 以改变土中的应力分布, 将上部较软弱土层中的附加应力部分转移至较深土层。对于端承桩来说, 桩端持力层为相对硬质土, 其压缩模量较大, 将应力转移至硬质土层则产生的沉降即可大大减少; 对于摩擦桩来说, 它主要能够使应力扩散于桩身范围内及桩端持力层等各土层中, 由各个土层共同承担上部结构荷载, 减少局部软弱土层中的附加应力, 从而达到减少沉降的目的。总之, 控制沉降本身就意味着改变土层中的附加应力。但究竟采用什么样的桩长, 才能经济而又有效地达到这一目的, 这是岩土工程界普遍关心的问题。以下通过不同桩长情况下土中的附加应力等值线图来进行对比讨论。

(1) 桩长 $L = 0$ 时: 图 2(a), (b) 分别是桩长 $L = 0$ 时 I - I, II - II 两个剖面上的附加应力等值线图。桩长为 0 则意味着基础型式为片筏基础, 和桩数为 0 的情况相同, 荷载全部由筏板来承担, 筏板与地基之间的接触压力很大, 持力层为与筏板直接接触的上部土层, 附加压力自上而下逐渐减小。板中心区域的

接触压力小于边缘, 在附加应力向下的递减过程中, 中心区域下卧土层的附加应力很快超过边缘, 致使筏板中心沉降仍比边缘大许多。

(2) 短桩 ($L = 10$ m, 20 m): 图 10, 图 11 分别是桩长 $L = 10$ m, 20 m 时 I - I 剖面上的附加应力等值线图。对于短桩或中长桩, 筏板与地基土之间的接触压力仍很大, 但很明显, 剖面节点的接触应力比桩长 $L = 0$ 时有明显降低。随桩长增大, 桩端处的应力集中区域逐渐明显, 但因桩身范围内土层与筏板距离较近, 所以应力较大, 同时也可说明桩处于极限承载状态, 此时桩筏基础沉降迅速降低但仍较大。

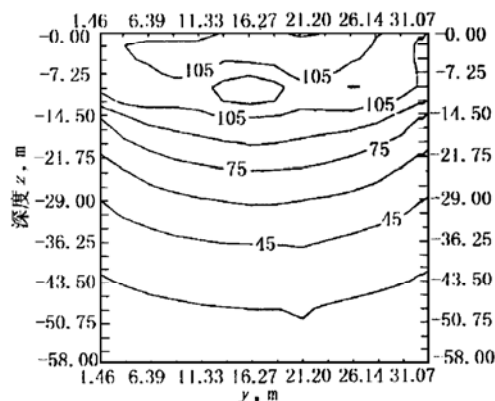


图10 地基土附加应力等值线图($L = 10$ m)

Fig. 10 Isogram of additional stress in soils ($L = 10$ m)

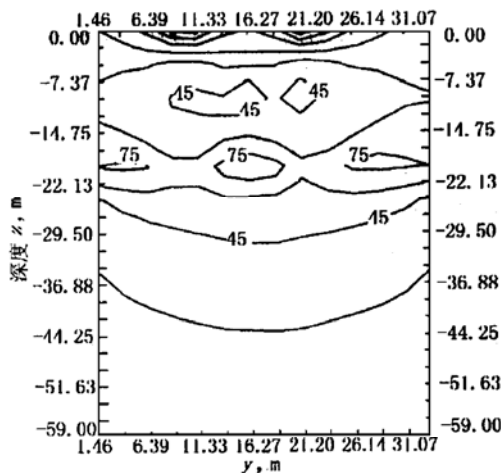


图11 地基土附加应力等值线图($L = 20$ m)

Fig. 11 Isogram of additional stress in soils ($L = 20$ m)

(3) 中长桩 ($L = 30$ m), 图 5 是桩长 $L = 30$ m 时 I - I 剖面上的附加应力等值线图。中长桩桩身范围比较中心的区域土层中的应力小得多, 桩端附近应力集中明显, 桩长范围变大应力也随之分散, 和短桩相比, 整个剖面区域的应力都有所降低, 承担荷载的区域体积增大, 整个桩筏基础的沉降也随之得到有效控制。

(4) 桩长很长时 ($L = 70$ m): 图 12 是桩长 $L = 70$ m 时 I - I 剖面上的附加应力等值线图。由图可见, 筏

板与地基土之间仍然存在接触压力,与中长桩相比,整个剖面的应力普遍减小,这主要是因为桩身区域增加,应力的扩散体积增大。图中大部分土层中的附加应力均小于 40kPa,远远低于软弱土的容许承载力,由此可见,桩长过长,尤其是达到 70m 这样的桩长,不利于充分发挥桩侧摩阻力的作用,尽管桩长非常长,但筏板与土之间仍有相对其它区域较大的接触压力存在,而不能被传递至桩端土中。

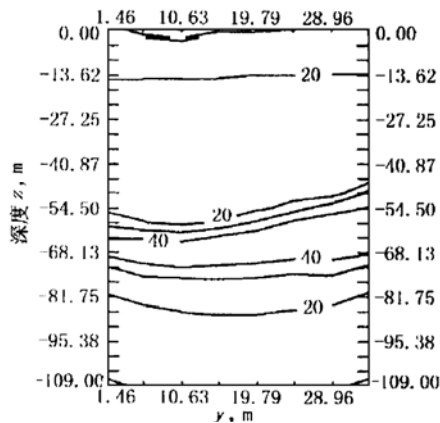


图 12 地基土附加应力等值线图($L=70\text{m}$)
Fig. 12 Isogram of additional stress in soils($L=70\text{m}$)

4.2 桩筏基础的工作状随桩长不同变化规律

(1) 桩筏基础的整体沉降随桩长不同的变化规律

图 13 所示为桩筏基础整体沉降随桩长的变化规律曲线。由图可见,随桩长增长,桩筏基础的整体平均沉降减小。桩长较短,附加应力分布的区域较小,应力值很高,基础沉降很大,桩长为 0 时,筏板下土层的接触压力最大,局部超过土的极限承载力;增加桩长,上部土层中的附加应力迅速减小,桩筏基础整体沉降的降低非常明显;桩长较长,基础沉降比前面降低很多,但仍较大,增加桩长能够命名桩筏基础整体沉降有一定程度的减小,但效果不是非常明显;桩长增加到一定程度,应力场的分布基本稳定,基础的沉降较小,继续增加桩长对减少桩筏基础整体沉降几乎不再产生什么效果。

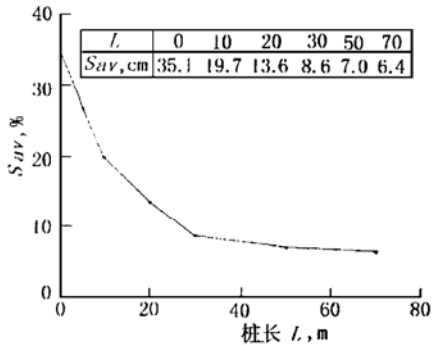


图 13 桩筏基础整体沉降随桩长的变化曲线
Fig. 13 Variation of integral settlement of piled raft foundation with length of pile

沉降随桩长的变化曲线,可以作为桩筏基础设计中确定桩长的依据,以避免使用过长的桩,减少经济上的浪费和施工中的困难。

(2) 筏板的荷载分担比随桩长的变化规律

图 14 为筏板的荷载分担比 θ 随桩长的变化规律曲线。由图可见,随着桩长的增加, θ 值逐渐变小,桩长较小时,土的接触压力很大,桩长为 0 时最大,桩长短时承载力小,荷载大部分由土来承担,筏板荷载分担比 θ 很大,增加桩长可直接分担筏板承受的荷载,使 θ 值明显减少,在一定桩长范围内,各短桩承担荷载均超过其极限承载力,沉降随桩长的变化值和增加的桩长呈一定的比例关系,所以 θ 值的减少速度基本相等;桩长较大时,群桩承担了大部分上部荷载,筏板的荷载分担比 θ 较大,桩长增加使筏板荷载分担比减小的趋势变缓;桩长增加到一定程度,筏板承担荷载比例趋于稳定,继续增加桩长对筏板的荷载分担比影响变得很小。

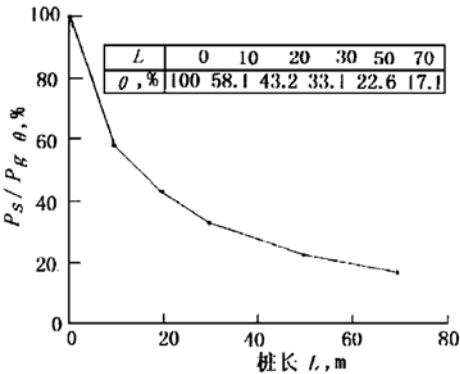


图 14 桩筏基础筏板荷载分担比随桩长变化曲线
Fig. 14 Variation of load sharing ratio on raft in piled raft foundation with length of pile

5 结 论

(1) 桩筏基础中桩数、桩长直接影响土中的应力场的分布,增加桩数和桩长能够使应力扩散的区域增大,局部应力集中程度减弱,从而充分利用各上层对荷载的分担作用,达到控制沉降的目的。

(2) 不同桩数、桩长情况下应力场变化直接引起桩筏基础沉降、筏板荷载分担比等工作性状的变化,随着桩数和桩长的增加,桩基沉降逐步得到控制,筏板荷载分担比逐渐增大,但桩数、桩长增加到一定程度,其变化对桩筏基础沉降的控制效果增强甚微。

参 考 文 献

1 杨 敏,王树娟,王伯钧,周融华. 考虑极限承载力下的桩筏基础相互作用分析. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 82~86.
2 侯学渊,杨 敏. 软土地基变形控制设计理论和工程实践. 上海: 同济大学出版社, 1996.