

混合桩型复合地基工程性状的近似解法

An approximate approach for the analysis of composite foundation with hybrid piles

梁发云^{1, 2}, 陈龙珠², 李镜培¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海交通大学 安全与防灾工程研究所, 上海 200030)

摘要: 基于虚拟桩模型, 采用积分方程法对混合桩型复合地基进行分析, 以 Winkler 分布弹簧模拟垫层的作用, 建立求解所需的第二类 Fredholm 积分方程组, 通过数值计算得到包括垫层压缩量、桩土的荷载分担、沿桩身的荷载传递特性以及地基土应力分布等主要性状, 与有限元解答和试验结果的对比如验证了本文方法的正确性, 最后还考察了桩长对复合地基性状的影响。本文方法能够适应实际工程中对混合桩型复合地基性状分析的要求。

关键词: 混合桩型; 复合地基; 垫层; 积分方程; 工程性状

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)04-0459-05

作者简介: 梁发云 (1976-) 男, 安徽省肥东县人, 博士, 讲师, 主要从事桩基础、地基处理、岩土力学数值分析方法等领域的科研与教学工作。

LIANG Fa-yun^{1, 2}, CHEN Long-zhu², LI Jing-pei¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Engineering Safety and Disaster Prevention, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on imaginary piles model, integral equation approach was applied to analyze composite foundation with hybrid piles. By simulating the cushion with the Winkler spring, the effect of cushion was taken into consideration, and then the second kind of Fredholm's equations were deduced to solve the problems. Using the numerical calculation, compression of cushion, loads shared by piles and subsoil, load transfer characters and stress distribution of subsoil were obtained. Comparison with the finite element method and experiment results verified the accuracy of the present calculation method. Finally, the influences of pile length on the working behavior of the foundation were studied. The present method is suitable to analysis the foundation under working loads.

Key words: hybrid piles; composite foundation; cushion; integral equation; working behavior

0 引言

混合桩型复合地基是土木工程界根据我国的实际情况, 在总结工程实践经验的基础上, 最近才逐渐探索和发展起来的一种新型地基形式。在工程实践中, 当一般的地基处理方法不能满足要求时, 通常会采用桩基础。为节约投资, 有些人就尝试着将多种地基处理方法与桩基础结合起来综合应用, 形成了由不同类型桩或不同长度桩所组成的混合桩型复合地基。根据桩体材料刚度或桩的长度不同, 这种新型复合地基通常又被称为刚-柔性桩或长-短桩复合地基, 可应用于多层及小高层建筑, 目前已成功地应用于一些实例, 具有较为显著的经济效益^[1~3]。尽管近些年来工程界对这种新型复合地基在工程实践方面进行了一些探索, 并在工程设计中得到了应用, 但混合桩型复合地基理论的发展还是明显地落后于工程实践。从近年文献发表看, 已有一些学者对这种新型复合地基从理论和试验两个方面进行了研究, 其中理论研究以有限元法分析居多, 葛忻声等^[4]用有限元分析了长-短桩复合地基的工程性状; 笔者等^[5]则用有限元法全面地分析了混

合桩型复合地基的工程特性。在现场试验研究方面, 刘奋勇等^[2]应用载荷板试验对混合桩型复合地基工程性状进行试验研究; 笔者等^[3]则对某采用长-短桩复合地基的 14 层建筑进行了现场原位试验, 观测在建造和使用过程中长桩、短桩和地基土的受力状况以及基础沉降的变化情况。

有限元分析难以应用至实际工程的分析中, 试验研究仅是针对某些特定情况进行的, 一般只能揭示出了定性的规律。因此, 近年来基于解析方法的各种简化算法受到关注, 从桩、土和垫层的共同作用机理入手, 宋二祥等^[6]提出了刚性桩复合地基的一种近似分析方法, 而笔者则基于 Muki 等^[7]提出的较为严格的虚拟桩模型, 给出了由混合桩型所构成的桩筏基础的积分方程解答^[8]。本文拟在文献^[8]对桩筏基础求解的基础上, 采用宋二祥等^[6]对垫层的简化方法, 引入垫层的作用, 建立混合桩型复合地基的分析模型, 分析垫层作用下的桩土荷载分担和基础沉降特性。

基金项目: 上海市教育发展基金会曙光计划项目 (2001sg013); 国家自然科学基金资助项目 (50478022)

收稿日期: 2004-05-30

1 混合桩型复合地基的分析模型

1.1 计算模型

混合桩型复合地基的构成如图 1(a)所示, 其中 n 根桩的长度、直径及弹性模量可以各不相等, 垫层的厚度为 h , 在弹性半空间中建立三维坐标系, 图 1(a)中 L_i 、 d_i 和 N_{0i} 分别为第 i 根桩的长度、直径和桩顶作用的竖向外荷载, 图 1(b)中斜线阴影表示桩, 第 i 根和第 j 根桩的桩间距记为 s_{ij} 。地基土的弹性模量和泊松比分别为 E_s 和 μ_s , 地基土表面的受力为 p_s 。为便于分析, 假定各桩的直径相等, 并将地基土在平面内离散成与桩直径相等的方形单元, 平面内土单元的总数记为 m 。以第 k 个土单元作为研究对象, 其表面所受压力的合力记为 Q_{0k} , 分析时将方形土单元按面积等效为圆形单元。

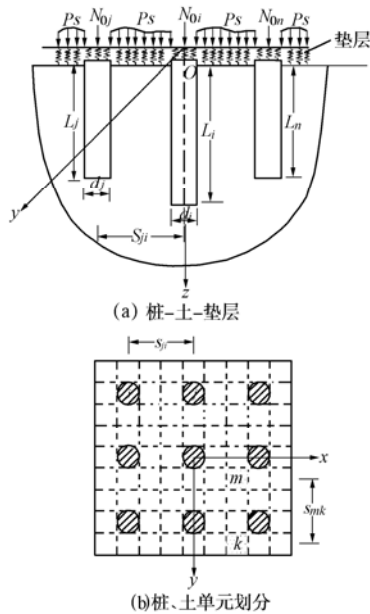


图 1 混合桩型复合地基的计算模型

Fig. 1 Scheme of composite foundation with hybrid piles

1.2 垫层作用的模拟

复合地基中垫层的受力状态较复杂, 难以精确地描述, 宋二祥等^[6]建议以 Winkler 分布弹簧来模拟垫层作用。Winkler 模型的特征是把土体视为一系列侧面无摩擦的土柱或彼此独立的竖向弹簧, 在厚度不超过基底短边之半的薄压缩层中, 剪应力较小, 与 Winkler 模型接近^[9]。由于复合地基中的垫层厚度一般较小, 因此, 可采用 Winkler 分布弹簧来近似模拟垫层的作用, 其特征函数可表示为

$$p(x, y) = k_m \cdot w(x, y) \quad (1)$$

式中 $p(x, y)$ 为地基上 (x, y) 坐标点处所受的压力强度 (kN/m^2); $w(x, y)$ 为该点的地基变形 (m); k_m 为基床弹簧系数, (kN/m^3)。

垫层的弹簧系数 k_m 可表示为

$$k_m = E_m / h \quad (2)$$

式中 E_m 为垫层模量 (kN/m^2); h 为垫层厚度 (m)。

由于桩顶与桩间土顶面部位的垫层所受竖向应力相差悬殊, 而水平约束应力基本相同, 宋二祥等^[6]建议将桩顶垫层的模量 E_m 取为变形模量 E_{m0} , 而桩间土顶面垫层的模量则取为侧限压缩模量 E_{ms} , 这种取值方法是较简化的, 进一步则应考虑应力水平及基底摩擦约束对垫层变形性态的影响。

经过垫层的调节和分配后, 上部荷载由桩和桩间土分担, 由于桩和桩间土刚度的不同, 第 i 根桩桩顶作用的竖向应力 p_{pi} 会明显大于桩间土顶面作用的竖向应力 p_s 。由于垫层假定为 Winkler 模型, 变形仅与其所受的压力强度成正比, 桩顶垫层的压缩量会明显大于桩间土顶面垫层的压缩量, 垫层便近似地模拟了桩向垫层内的刺入效应, 其变形如图 1(a)所示。在 Winkler 分布弹簧的作用下, 桩顶或地基土表面所受荷载与垫层在相应位置处的受力是一致的, 如图 2 所示。因此, 可采用文献[8]的分析方法研究垫层底面以下的桩土体系, 考虑垫层压缩量后的桩-土-承台的位移协调方程如下

$$w_c = w_{pi}(0) + w_{mpi} \quad (3a)$$

$$w_c = w_{sk}(0) + w_{msk} \quad (3b)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n$; $k = n+1, n+2, \dots, n+m$; w_c 为刚性承台的位移; $w_{pi}(0)$ 为第 i 个桩的桩顶位移; $w_{sk}(0)$ 为第 k 个土单元的表面位移; w_{mpi} 为位于第 i 个桩顶位置的垫层压缩量; w_{msk} 为位于第 k 个土单元顶面位置的垫层压缩量。

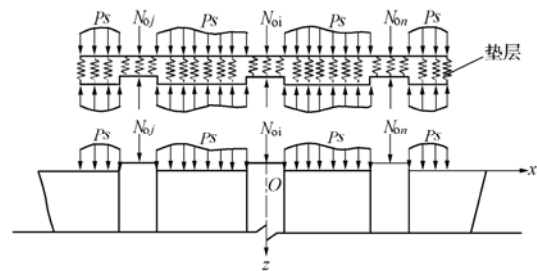


图 2 桩-土-垫层-承台的荷载分布和位移协调关系

Fig. 2 Load distribution and displacement coordination of pile-subsoil-cushion-raft system

由于垫层假定为 Winkler 弹簧模型, 可得出垫层压缩量为

$$w_{mpi} = \frac{N_{0i}}{A_{pi} E_{m0}} \quad (4a)$$

$$w_{msk} = \frac{Q_{0k}}{A_{sk} E_{ms}} \quad (4b)$$

式中 A_{pi} 为第 i 个桩的截面面积; A_{sk} 为第 k 个土单元的面积; 其它同上。

2 混合桩型复合地基的积分方程解法

按 Muki & Sternberg^[7]方法, 分析时可将真实桩分解为虚拟土和虚拟桩, 即将图 1 的问题分解为扩展的弹性半空间土和 n 根虚拟桩的叠加。由虚拟桩与半空间扩展土在桩身处的竖向应变协调条件, 按照文献[8]的方法, 可建立如式(5)的求解混合桩型复合地基第二类 Fredholm 积分方程, 推导过程从略。

$$N_{*i}(z) \left[\hat{\varepsilon}_{ij}(z, z^+) - \hat{\varepsilon}_{ij}(z, z^-) - \frac{1}{E_{p*} A_{pi}} \right] + \sum_{j=1}^n \int_0^{L_j} N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{\varepsilon}_{ij}(z, \xi)}{\partial \xi} d\xi = \sum_{j=1}^n [N_{0j} \hat{\varepsilon}_{ij}(z, 0)] + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k} \hat{\varepsilon}_{ik}(z, 0) \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

$$\text{式中} \quad \hat{\varepsilon}_{ij}(z, z^+) - \hat{\varepsilon}_{ij}(z, z^-) = -\frac{(1-2\mu_s)(1+\mu_s)}{E_s A_{pi}(1-\mu_s)};$$

$N_{*i}(z)$ 为第 i 根虚拟桩在 z 处的轴力; 桩在 $z=\xi$ 处的截面可记为 Π_ξ 截面, $\hat{\varepsilon}_{ij}(z, \xi)$ 为第 j 根桩 Π_ξ 截面轴线处受单位力作用时引起第 i 根虚拟桩 Π_z 截面轴线处所对应的 z 向应变; $\hat{\varepsilon}_{ik}(z, 0)$ 为第 k 个土单元表面受合力为单位的均布荷载作用时引起半空间扩展土在第 i 根虚拟桩 Π_z 截面轴线处所对应的 z 向应变。

与文献[8]相类似, 可求得桩顶位移和地基土单元的表面位移分别为

$$w_{pi}(0) = \sum_{j=1}^n \left\{ N_{0j} \hat{w}_{ij}(0, 0) - \int_0^{L_j} N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{w}_{ij}(0, \xi)}{\partial \xi} d\xi \right\} + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k} \hat{w}_{ik}(0, 0) \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (6)$$

$$w_{sk}(0) = \sum_{j=1}^n \left\{ N_{0j} \hat{w}_{kj}(0, 0) - \int_0^{L_j} N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{w}_{kj}(0, \xi)}{\partial \xi} d\xi \right\} + \sum_{l=n+1}^{n+m} Q_{0l} \hat{w}_{kl}(0, 0) \quad (k=n+1, n+2, \dots, n+m). \quad (7)$$

由荷载平衡条件, 即各桩顶分担荷载 N_{0i} 以及地基土单元表面的压力 Q_{0k} 之和应等于刚性筏板上作用的总荷载 N_0 , 可再补充了 1 个约束条件:

$$N_0 = \sum_{i=1}^n N_{0i} + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k}. \quad (8)$$

这样, 在引入式(3)和式(8)的位移约束和荷载平衡条件后, 就可求解出式(5)构成的第二类 Fredholm 积分方程组。由于考虑了垫层的作用, 本文解法与文献[8]求解桩筏基础的主要不同点在于需要在位移协调方程引入垫层压缩量, 而式(4)中的垫层压缩量均是已有参数的显式表达, 因此, 在引入垫层压缩量后, 需要求解的未知数并没有增多, 可按照文献[8]相类似的

方法来求解本文问题。以上求解过程也可适用于分析桩长、桩径、桩身刚度和桩间距均不相等的情况。

3 算法验证

在求解过程中, 对式(5)所构成的第二类 Fredholm 积分方程组进行数值计算是关键。如假定第 i 根桩在积分区间 $[0, L_i]$ 内的分段数为 s_i , 则本文问题可归结为含有 $\sum_{i=1}^n (s_i + 1) + n + m + 1$ 个未知量的线性方程组的求解, 其中的未知量分别为 n 根虚拟桩的桩身轴力 $N_{*i}(\xi)$ 、 n 根桩的桩顶作用荷载 N_{0i} 、筏板下 m 个地基土单元表面作用荷载 Q_{0k} 以及 1 个中间变量 w_c 。

根据上面推导的方法, 用 Fortran90 语言编写了混合桩型复合地基的计算程序 CPRC (Composite Piled Raft with Cushion), 为验证分析程序的正确性, 将其结果与有限元分析以及试验资料进行对比。

图 3 给出了本文方法解答与有限元解答的对比, 分析模型同文献[5], 主要分析参数为: 地基土 $E_s=5 \text{ MPa}$, $\mu_s=0.35$; 长桩与土的模量比为 $k_1=5100$, $L_1=50d=22.5 \text{ m}$, $d=0.45 \text{ m}$; 短桩与土的模量比为 $k_2=100$, $L_2=25d=11.25 \text{ m}$; 桩间距 $s=2d$; 垫层 $E_m=50 \text{ MPa}$, $\mu_m=0.3$, $h=0.3 \text{ m}$, 垫层的弹簧系数由式(2)确定; 承台尺寸为 $2.7 \text{ m} \times 2.7 \text{ m}$, 其上作用均布荷载 $p=100 \text{ kPa}$ 。两种方法解得的桩身轴向应力随深度变化关系的对比如图 3(a)~3(b)所示, 而桩身沉降随深度变化关系的对比如图 3(c)~3(d)。由图 3 可看出, 本文方法可与有限元解答较好地吻合。

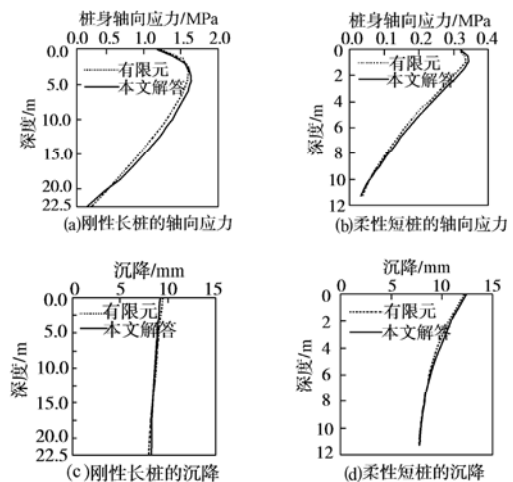


图3 本文方法与有限元解答的对比

Fig.3 Comparison of the present method with FEM

以池跃君等^[10]的室内模型试验为例对比分析, 试验对象为 9 桩复合地基, 刚性荷载板的尺寸为 $1.6 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$, 桩直径为 0.15 m , 桩长为 2.5 m , 桩间距为 3.5 倍桩径 (0.525 m)。试验采用的垫层为中砂, 土体为人工回填粉土。主要分析参数为: 地基土弹性模量

$E_s=10$ MPa, 泊松比 $\mu_s=0.25$; 各桩弹性模量 $E_p=2 \times 10^4$ MPa, $L=2.5$ m; 垫层厚度 $h=0.15$ m, 垫层 $E_m=40$ MPa, $\mu_m=0.25$ 。图 4 给出了用本文方法求得的内桩桩身轴力和桩侧摩阻力分布与试验观测结果的对比, 两者具有较为一致的规律性。

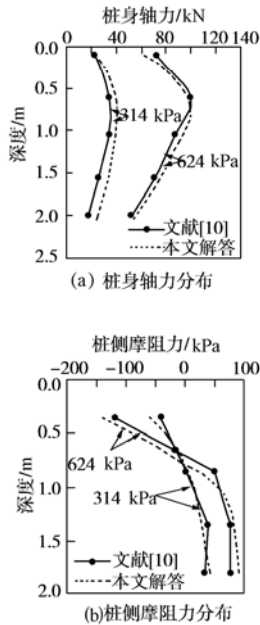


图 4 本文方法与文献[10]试验研究的对比

Fig.4 Comparison of the present method with that of Ref. [10]

通过与有限元解答和已有文献试验研究结果的比较, 可看出本文解答能够反映出混合桩型复合地基的主要工程特性, 提供包括垫层压缩量、桩土的荷载分担特性、沿桩身的荷载传递和位移关系以及地基土应力分布等性状在内的各种信息, 能够满足工作荷载下的混合桩型复合地基性状分析和设计的工程要求, 也说明了用 Winkler 弹簧模拟垫层的变形特性是可行的。

4 桩长对复合地基性状的影响

垫层厚度、垫层模量和桩长等参数对复合地基的桩土荷载分担、荷载传递以及基础沉降等工程性状均有明显的影响, 其中关于垫层参数的影响已有一些文献进行了讨论^[1, 5], 限于本文的篇幅, 仅就桩长对混合桩型复合地基性状的影响进行一些讨论, 针对由 3×3 的群桩模型(如图 5 所示)进行分析。如无特别说明, 所取分析参数均为: 地基土 $E_s=5$ MPa, $\mu_s=0.5$; 垫层 $k_m=10$ ($k_m=E_m/E_s$), $\mu_m=0.25$, $h=0.3$ m; 桩 $k_p=1000$ ($k_p=E_p/E_s$), $d=1$ m, $L/d=25$; 承台 $s/d=5$, $B_0/d=1$, 复合地基的沉降特性以基础的无量纲刚度 $K=N_0/(E_s w_c d)$ 表示。

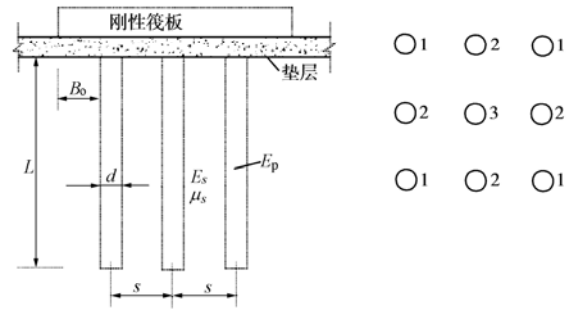


图 5 9 桩复合地基示意图

Fig.5 Scheme of composite foundation with 9 piles

在图 5 中其它参数不变的情况下, 分别考察各桩的长度对复合地基性状的影响。图 6(a)~(c)中分别给出了角桩、边桩和内桩的桩长改变对荷载分担和群桩沉降特性的影响, 从中可得如下一些结论:

(1) 角桩、边桩或内桩中某类桩桩长的增加, 都会使该类桩所承担的荷载显著增加, 而使其它桩以及地基土承担的荷载有所降低。

(2) 角桩、边桩或内桩中某类桩桩长的增加, 复合地基的无量纲刚度会随之增大, 即复合地基沉降减小, 其中角桩桩长对复合地基沉降的影响更为明显, 边桩次之, 内桩的影响最小。

(3) 通过合理地布置各类桩的桩长, 可以调节各桩和地基土之间的荷载分布, 从而达到改善承台的受力性能, 有效的控制基础沉降, 较充分利用地基土承载力的目的。

5 结 语

本文将积分方程方法在地基基础工程中的应用进一步推广至混合桩型复合地基的求解, 采用 Winkler 分布弹簧模拟复合地基中的垫层作用, 采用积分方程方法建立了混合桩型复合地基的分析模型, 通过数值计算可求得混合桩型复合地基中的垫层压缩量、桩土荷载分担、沿桩身的荷载传递和位移以及地基土的荷载分担等各种信息, 较为全面的反映了混合桩型复合地基在工作荷载下的工程性状。与有限元分析以及试验研究结果的对比, 验证了本文方法和计算程序的正确性。本文方法可应用于由非等长或非等径桩等各种复杂桩型所构成的复合地基问题, 具有较好的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 刘奋勇, 杨晓斌, 刘 学. 混合桩型复合地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25 (1): 71 - 75.

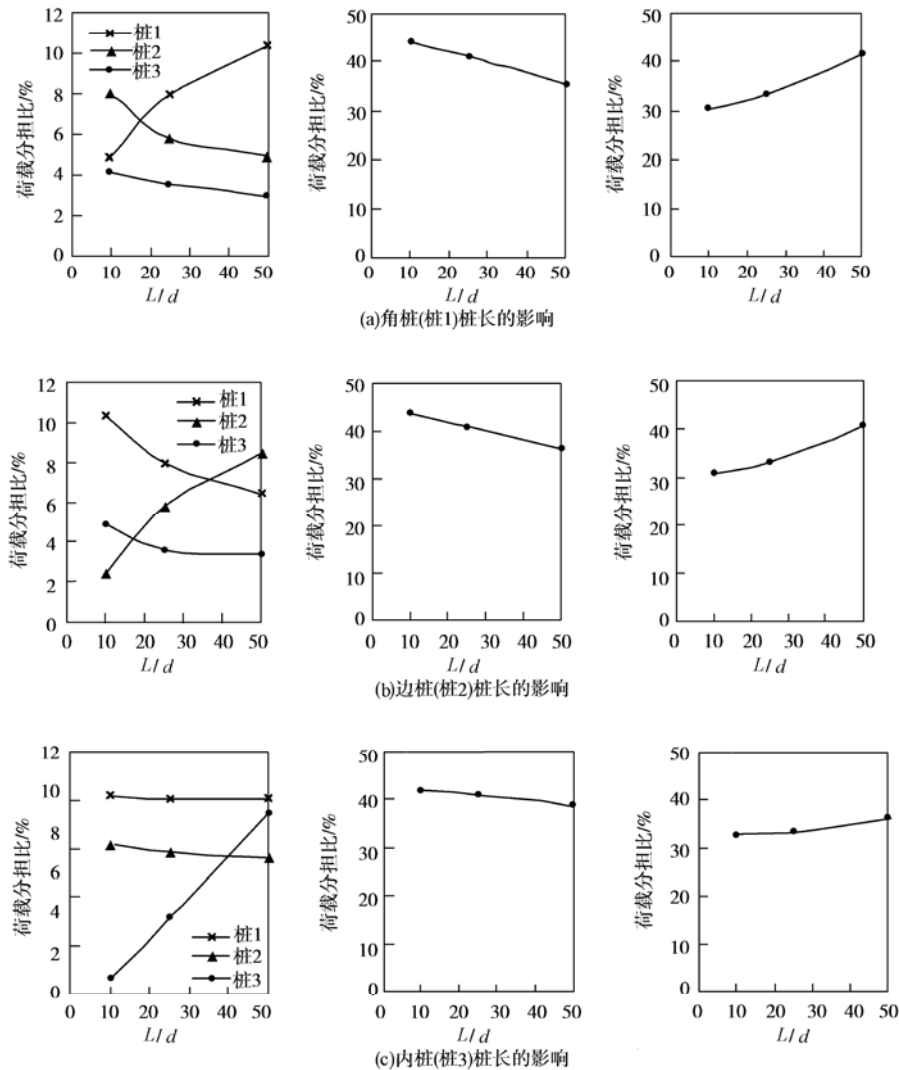


图6 各桩的桩长对桩土荷载分担和基础沉降特性的影响

Fig. 6 Effects of pile length on the load distribution and settlements of composite foundation

- [3] 陈龙珠, 梁发云, 黄大治, 等. 高层建筑应用长短桩复合地基的现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 167 - 171.
- [4] 葛忻声, 龚晓南, 张先明. 长短桩复合地基有限元分析及设计计算方法探讨[J]. 建筑结构学报, 2003, 24 (4): 91 - 96.
- [5] Liang Fa-Yun, Chen Long-Zhu, Shi Xu-Guang. Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(6): 443 - 453.
- [6] 宋二祥, 沈伟, 金淮, 等. 刚性桩复合地基-筏板基础体系内力、沉降计算方法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 268 - 272.
- [7] Muki R, Sternberg E. Elastostatic load-transfer to a half-space from a partially embedded axially loaded rod [J]. International Journal of Solids and Structures, 1970, 6 (7): 69 - 90.
- [8] 陈龙珠, 梁发云. 桩筏基础的积分方程解法及其参数分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (6): 733 - 738.
- [9] 宰金珉, 宰金璋. 高层建筑基础分析与设计—土与结构物共同作用的理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [10] 池跃君, 宋二祥, 金淮, 等. 刚性桩复合地基应力场分布的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24 (3): 339 - 343.