

基于相互作用系数探讨的群桩简化分析

戚科骏, 宰金珉, 王旭东, 汪中卫

(南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009)

摘要: 相互作用系数法是群桩分析的一种有效的数值计算方法, 该方法关键在于确定群桩的相互作用系数。传统的弹性分析方法所得的相互作用系数值偏大, 计算结果与实测值差距不小; 采用考虑土体弹塑性特征和桩土界面接触的三维有限元方法计算相互作用系数可以有效减少弹性方法的计算偏差, 在此基础上推导了高承台群桩的简化分析方法。根据 ABAQUS 平台进行了大量三维有限元计算, 分析了荷载水平、桩土模量比、桩距径比和桩长桩径比对相互作用系数的影响; 比较了不同方法下相互作用系数的变化规律。通过有限元方法确定的相互作用系数对两群桩工程实例进行分析, 计算结果表明该方法最接近于实测结果。

关键词: 相互作用系数; 群桩; 有限元法; 简化分析

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Simplified analysis of pile group based on discussion of interaction factors

QI Ke-jun, ZAI Jin-min, WANG Xu-dong, WANG Zhong-wei

(Department of Civil engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The Interaction factor method is a kind of effective numerical methods to analyze pile groups; and the key point of this method is to get the interaction factors. The parameter computed by the traditional elastic method is larger than the real interaction. The new method to compute the interaction factors by the FEM considering the pile soil sliding and the elastoplasticity of soil is presented; and the simplified analysis method of pile groups is established. The influences of various parameters on interaction factors are studied by ABAQUS. Different methods are compared on the two history cases; and the results show that the new method by FEM is more suitable for the analysis of the real engineering cases.

Key words: interaction factors; pile group; FEM; simplified analysis

1 引言

群桩的受荷分析要求考虑桩土(有时还要包括上部结构、筏板基础的影响)的共同作用。影响群桩受荷的因素很多, 如土体的性质、桩间距、桩长与桩径、桩的布置方式以及上部结构的刚度等。寻求一种方法能够涵盖上述所有因素是十分困难的。

近些年来国内外对群桩工作性状进行了广泛的研究, 提出了许多分析方法, 如理论分析法、荷载传递函数法、剪切位移法以及以有限元为代表的数值分析方法等^[1-5]。但上述方法在具体应用于实际工程时存在着许多困难, 因此, 不少学者提出了简化分析方法, Poulos 以及 Poulos 和 Mattes 采用的

相互作用系数法具有一定的理论基础和较强的实用价值^[2-6], 但该方法仅适用于弹性阶段, 确定的相互作用系数远大于实测结果。

由于工程条件差异较大, 根据具体工程通过现场实测相互作用系数来进行桩基设计并不现实。因此, 以桩基测试报告的位移沉降曲线为对比基准, 采用考虑桩土接触三维弹塑性有限元数值方法来确定相互作用系数, 可以有效地降低弹性方法所带来的偏差。在此基础上, 推导了高承台群桩的简化分析方法。

2 相互作用系数法

相互作用系数法的群桩基础计算是基于单桩基

础的分析。根据应力叠加原理,将 2 根桩的分析结果,通过引入一个“相互作用系数”而扩展到群桩中去^[5]。

Poulos & Daves (1980 年) 根据 Mindlin 解应用到桩土相互作用问题,定义相互作用系数为

$$\alpha_{ij} = \frac{\Delta\delta_{ij}}{\Delta\delta_{ii}} \quad (1)$$

式中: α_{ij} 为桩 j 对桩 i 的相互作用系数; $\Delta\delta_{ij}$ 为在桩 j 的桩顶施加单位荷载使桩 i 的桩顶产生的附加位移; $\Delta\delta_{ii}$ 为在桩 i 的桩顶施加单位荷载使桩顶自身产生的位移。相互作用系数与桩距、桩长、桩周土体等因素有关^[6]。

对于由 n_p 根桩组成的群桩体系,运用叠加原理可以求得其中任一桩 k 的沉降为

$$w_{pk} = \rho_{pk} \left(P_{pk} + \sum_{j=1, j \neq k}^{n_p} P_{pj} \alpha_{kj} \right) \quad (2)$$

式中: w_{pk} 为桩 k 的沉降; P_{pk} 、 P_{pj} 为桩 k 和桩 j 上的荷载; ρ_{pk} 为桩 k 在单位荷载下独立的单桩沉降,可根据单桩 P - S 曲线确定,该沉降值与桩顶荷载 P_{pk} 有关; n_p 为桩数。

方程 (2) 可应用于所有 n_p 根桩,可得

$$\{w_p\} = [\rho_p][\alpha]\{P\} \quad (3)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} \{w_p\} &= [w_{p1}, w_{p2}, \dots, w_{pn_p}]^T \\ \{P\} &= [P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{pn_p}]^T, \text{ (为桩分担荷载)} \\ [\rho_p] &= \begin{bmatrix} \rho_{p1} & & & 0 \\ & \rho_{p2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \rho_{pn_p} \end{bmatrix} \\ [\alpha] &= \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1n_p} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{2n_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n_p1} & \alpha_{n_p2} & \cdots & \alpha_{n_p n_p} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由单桩载荷试验,可以得到桩身荷载和沉降之间的关系, $[\rho_p]$ 很容易确定,因此,采用相互作用系数法进行桩土承台共同作用分析的关键在于确定相互作用系数 α_{ij} 。

对于高承台的群桩基础,为了问题的简化,一般假定各桩的沉降相同为 w , 即有

$$w_{p1} = w_{p2} = \dots = w_{pn} = w \quad (5)$$

假定作用在承台上的总的竖向外荷载为 F , 根据荷载平衡条件有

$$F = \sum_{i=1}^{n_p} P_{pi} \quad (6)$$

联合方程 (3)~(6), 共有 w , P_{p1} , P_{p2} , $\dots$, P_{pn} 共 n_p+1 个未知量, 同时也有 n_p+1 个有效方程, 求解这些方程即可得到群桩沉降 w 和各桩分担荷载。

3 相互作用系数的有限元确定方法

确定相互作用系数的方法主要有理论分析、数值方法和试验方法 3 大类。

Poulos^[6]基于弹性理论,给出了随地基土类别、桩距与桩径之比(S/d)、桩长与桩径之比(L/d)等因素而变化的各项群桩相互作用系数。该方法主要采用弹性理论,导致计算出的相互作用系数的值偏大,该方法只能分析比较简单的计算模型,无法反映地基土体复杂的分布和力学性质。

S.C.Wong & H.G.Poulos (2005 年) 更为详细地分析了不同类型桩对相互作用系数的影响,并提出了可以考虑情况比较复杂的简化计算模型^[7]。

Mandolins & Viggiani (1997 年) 给出了考虑极限状态下的群桩计算原理,计算了大量的相互作用系数,给出了一个简化的公式,并且提出桩桩之间超过一定的范围则不考虑相互作用的影响^[8]。

一些学者利用数值方法对群桩相互作用问题进行求解,取得了许多成果。Sharnouby & Novak (1990 年) 应用群桩完全矩阵解,对相互作用系数进行了分析^[9]; Russo (1998 年) 通过大量有限元分析桩-桩的相互作用系数,给出了一个比较简化的桩-桩相互作用系数计算公式^[10]。

现场测试结果表明,理论分析和有限元计算得到的相互作用系数都偏大。Caputo & Viggiani (1984 年) 对 2 根桩做了很详细的相互作用试验^[11],刘金砺等 (1995 年) 对双桩基础进行了详细的试验,试验中得到的相互作用系数大大小于 Poulos 弹性理论值,仅为弹性理论值的 1/2~1/8。同时,桩对桩的相互作用效应随桩距增大迅速衰减,桩距增至 6d 时相互作用系数降至 0.05^[12]。

由于实际工程中土体参数和桩体参数离散性非常大,通过现场试验无法将所有情况都考虑进来。而数值模拟能够考虑多种因素的变化,因此,本文采用数值方法确定相互作用系数,确定相互作用系数的步骤如下:

①采用三维有限元方法模拟单桩载荷试验,确

定合适的桩土计算参数和接触参数;

②根据不同桩距,对双桩进行三维有限元分析;

③根据分析结果确定相互作用系数。

三维有限元分析是基于有限元软件 ABAQUS 平台进行的。基于土体的弹塑性特征,采用 Mohr-Columb 模型模拟土体,桩体采用线弹性体,桩土界面的接触关系采用 ABAQUS 中的主从接触,接触单元的本构采用弹塑性库仑摩擦模型。在此基础上对相互作用系数进行详细计算,计算模型见图 1。

通过大量算例计算,分析了不同荷载水平、桩土模量比、桩距桩径比(S/d)、桩长桩径比(L/d)和土体不同参数对相互作用系数的影响。

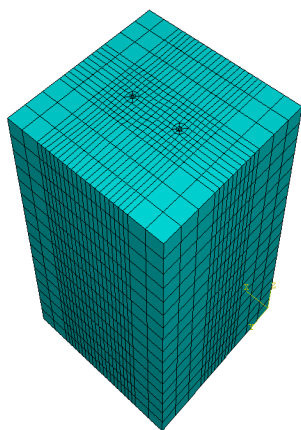


图 1 有限元计算模型
Fig.1 FEM model

4 相互作用系数影响因素讨论

4.1 荷载水平对相互作用系数的影响

图 2 为不同桩距 ($3d$ 、 $6d$ 、 $9d$ 、 $14d$ 和 $20d$, d 为桩体直径) 下双桩基础有限元计算得到结果, 图中 S/d 为桩距径比 (S 为两桩中心间距)。相互作用系数总体随着荷载水平的增加而减少。当图下部的荷载-位移曲线处于线性段时 (图中竖直虚线左侧), 图上部不同桩间距的相互作用系数基本保持不变, 图中表明, 当桩顶荷载小于极限承载力时, 该桩对其他桩体的相互影响是不变的, 对于 $3d \sim 20d$ 不同间距的桩体, 其相互作用系数各接近一定值; 当荷载-位移曲线进入非线性阶段时, 该曲线的曲率增加明显, 图 2 上半部分对应的相互作用系数曲线系中的数值也均发生了陡降, 这显示桩体受荷进入极限状态时, 对其他桩体的影响作用大为减小; 当荷载-位移曲线进入极限状态时, 对应的相互作用系数曲线系中的数值也逐渐保持稳定, 并且逐步趋向 0。

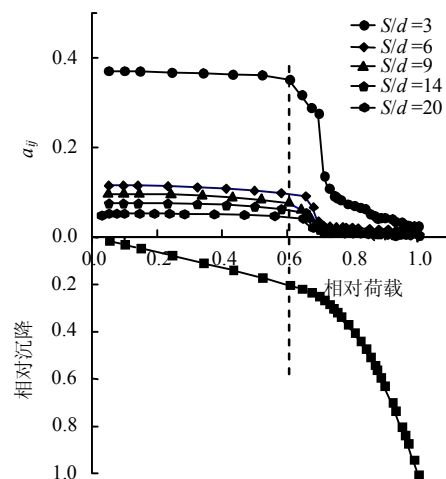


图 2 荷载水平对相互作用系数的影响
Fig.2 Interaction factors at different loads

对于普通的群桩基础,其受荷范围一般都小于其极限荷载,由图 2 可知,采用荷载-位移曲线处于线性段时的相互作用系数基本为一定值,因此,相互作用系数法采用固定的相互作用系数进行群桩基础的分析是可行的,不过,采用该相互作用系数求算得到的群桩刚度偏小,位移偏大。

当群桩中单桩充分发挥承载力时,相互作用系数迅速减小并接近于 0,这表明此时每根单桩都充分发挥了自身的承载作用,承载力增加极少或不再增加,变形增加很大,同时对其他桩体的影响逐渐消失,群桩中的基桩变为单桩的承载特征,体现了塑性支承的特性。

由图 2 中不同桩距径比 ($3d \sim 20d$) 下的相互作用系数曲线系可以清楚的看出,随着桩距径比的增加,相互作用系数也在逐渐减少。

4.2 桩土模量比、桩距径比和长径比对相互作用的影响

图 3、4 显示了 Polous 方法、弹性有限元方法 (土体和接触的本构均为弹性) 和考虑桩土接触的弹塑性有限元方法中相互作用系数在不同桩土模量比和不同桩长径比下随桩距径比变化的曲线。图 3 和图 4 表明,相互作用系数随着桩距径比的增加呈现双曲线形式的递减,当距径比增加到 15 倍桩径以上时,相互作用系数已经比较小,基本小于 0.03。图 3 中随着桩土模量比的增加,相互作用系数也在增加,Polous 方法、弹性有限元方法和考虑桩土接触的弹塑性有限元方法这 3 种方法都体现了这个特点。由于桩体模量基本不变,表明土体越弱,相互作用系数就越大,群桩的相互影响就越明显。

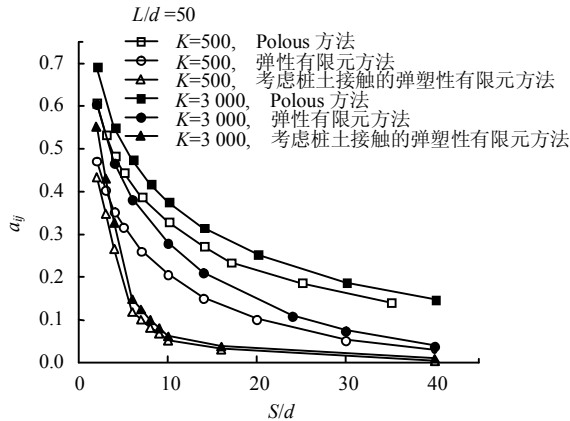


图3 不同桩土模量比对相互作用系数的影响
Fig.3 Interaction factors at different moduli ratios of pile soil

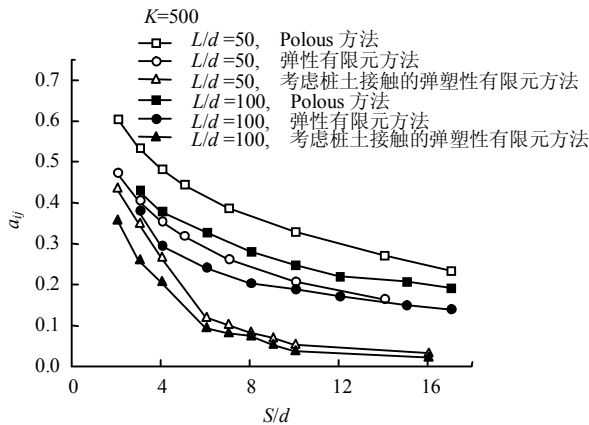


图4 不同桩长径比对相互作用系数的影响
Fig.4 Interaction factors at different ratios of pile length to diameter

图4中,随着桩长径比的增加,相互作用系数在减小,Polous方法、弹性有限元方法和考虑桩土接触的弹塑性有限元方法这3种方法也都体现了这个特征,说明桩越长,相互作用系数就越小,群桩的相互影响就越小。

图3、4同时也显示了Polous方法、弹性有限元方法和考虑桩土接触的弹塑性有限元方法这3种方法求得得到的相互作用系数的差异。Polous方法计算结果最大,弹性有限元方法次之,考虑桩土接触的弹塑性有限元方法最小。

4.3 不同方法求得的相互作用系数对比

图5显示了不同方法求得的相互作用系数。结果表明,Polous方法计算结果最大,弹性有限元方法次之,刘金砺试验结果最小,考虑桩土接触的弹塑性有限元方法次小。这说明采用弹性方法求得的相互作用系数与试验结果相比过于偏大,而采用考虑桩土接触的弹塑性有限元方法求得的结果较为接近试验数据。因此,采用考虑桩土接触的弹塑性有

限元方法求算相互作用系数更为合理。

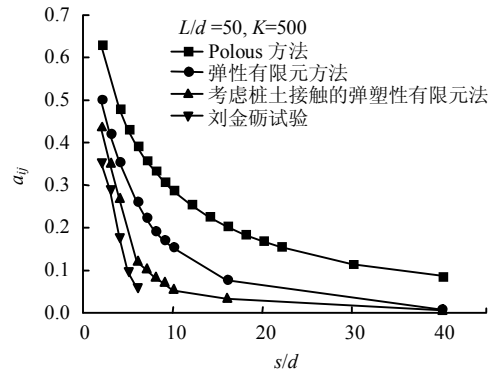


图5 不同方法求得相互作用系数对比
Fig.5 Interaction factors by different methods

5 计算实例

实例1. Briaud et al. (1989 年)在中密的砂土中做了单桩和5桩的群桩试验。桩体采用端部封闭的钢管桩,外径为273 mm,壁厚9.3 mm,沉桩深9.15 m,群桩通过混凝土承台连接。砂土剪切模量为38.3 MPa,摩擦角为35°,干重度为15.7 kN/m³,变形模量 $E_s = 63$ MPa,钢管桩弹性模量 $E_p = 210$ GPa。单桩和群桩示意图如图6所示。图7显示了该试验实测的单桩荷载沉降曲线。根据试验中桩长、桩径、桩土模量以及群桩布置,计算了不同桩间距下的相互作用系数,见表1。

图8显示了实测、Poulos方法和考虑桩土接触的相互作用系数法的群桩 $P-S$ 曲线对比。结果表明,与传统Poulos方法比较,考虑桩土接触的相互作用系数法计算得到的 $P-S$ 曲线与实测结果更为吻合。

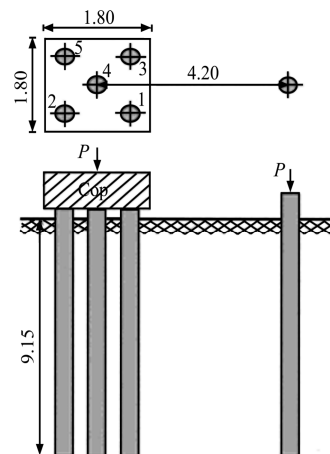


图6 群桩布置图 (单位: m)
Fig.6 Pile group arrangement (unit: m)

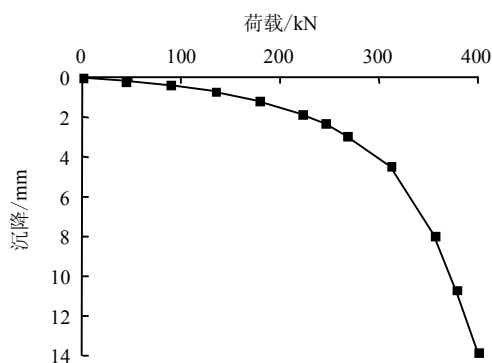


图7 单桩荷载-沉降实测曲线

Fig.7 Field test P - S curve

表1 不同桩间距下的相互作用系数

Table 1 Interaction factors at different pile distances

参数	α_1	α_2	α_3
S/d	3.9	5.5	7.9
Poulos 方法	0.51	0.44	0.31
考虑接触	0.46	0.19	0.09

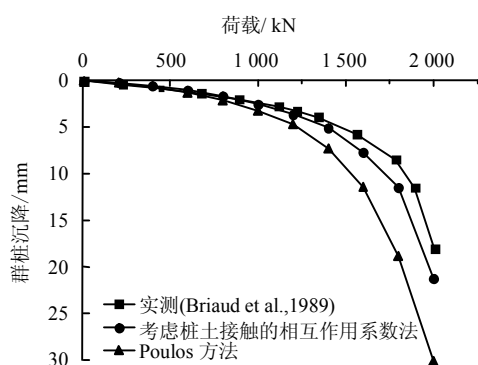


图8 群桩荷载-沉降曲线对比

Fig.8 The P - S curves of pile group

实例2. O'Neill et al. (1982年)介绍了黏土中单桩和群桩的载荷试验。桩体为端部封闭的钢管桩。桩外径为273 mm,管壁厚为13.1 mm,桩入土深度为13.1m。桩基布置如图9所示,桩间距为3倍桩径,群桩上承台为钢筋混凝土的刚性承台。图10为该试验实测的单桩荷载沉降曲线。试验中,图中所示的单桩和9桩都加荷到破坏。土体变形模量 $E_s = 195$ MPa,钢管桩弹性模量 $E_p = 210$ GPa。

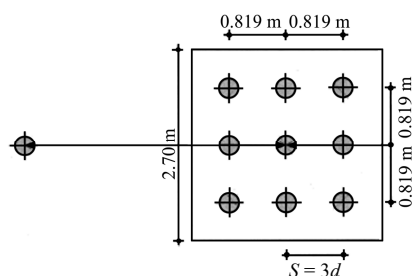


图9 试验布置示意图

Fig.9 Arrangement of the pile group test

根据桩体数据,可得桩长径比为 $L/d=48$,桩土模量比 $E_p/E_s=1077$,分别求得不同桩距下的相互作用系数,见表2。

表2 不同桩间距下的相互作用系数

Table 2 Interaction factors at different pile distances

参数	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
S/d	3	4.24	6	6.7	8.48
Poulos	0.49	0.42	0.31	0.25	0.18
考虑接触	0.33	0.28	0.14	0.12	0.09

图11为Poulos方法和考虑桩土接触的相互作用系数法与实测结果的对比。结果表明,两种方法都能较好地模拟群桩沉降,计算所得的沉降都偏大,其中考虑桩土接触的相互作用系数法与实测结果更为接近。根据前述对相互作用系数的分析,Poulos方法和考虑桩土接触的相互作用系数法所采用的相互作用系数都比实测结果要大,而后者的结果更接近于实测值,图中计算结果也表明了这一点。

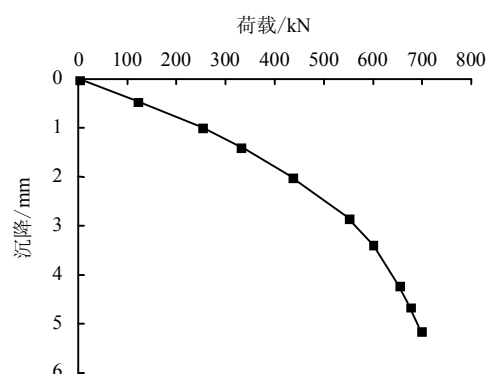


图10 实测单桩荷载-沉降曲线

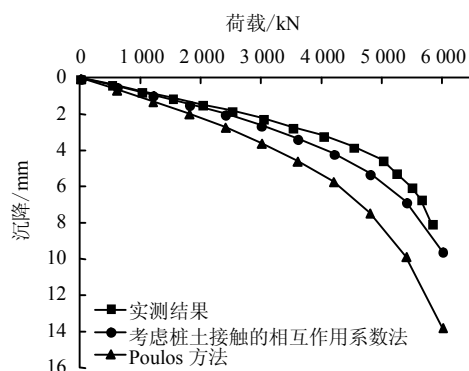
Fig.10 P - S curve of pile group

图11 群桩荷载-沉降曲线对比

Fig.11 P - S curves of pile groups

6 结 论

根据上述分析,可以得到如下结论:

(1) 经典的Poulos方法中采用的相互作用系数

只能适应弹性分析, 计算结果明显偏大, 采用考虑桩土接触的弹塑性有限元分析得到的相互作用系数, 扩展了相互作用系数法的应用范围, 与其他方法比较所得的相互作用系数更接近于工程实测。

(2) 工程实例计算表明, 基于相互作用系数的群桩简化方法能有效的进行群桩分析。

(3) 根据不同桩距下相互作用系数的有限元分析, 可以得到在桩体荷载-位移曲线线性阶段的相互作用系数基本为一定值, 这表明在该受荷阶段采用相互作用系数法分析群桩是可行的。

(4) 相互作用系数主要与桩土模量之比、桩长径比以及桩距径比有关。桩土模量比的增加, 相互作用系数也在增加; 桩长径比和桩距径比增大, 相互作用系数均减小; 当距径比增大到 10 倍桩径以上时, 相互作用系数已很小, 为桩筏基础的进一步简化分析提供了基础。

参考文献

- [1] POULOS H G. Analysis of the settlement of pile groups[J]. *Geotechnique*, 1968, 18: 449—471.
- [2] MATTES N S, POULOS H G. Settlement of single compressible pile[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE*, 1969, 95(1): 189—207.
- [3] SEED H B, REESE L C. The action of soft clay along friction piles[J]. *Trans. ASCE*, 1957, 122: 731—754.
- [4] RANDOLPH M R, WROTH C P. An analysis of the vertical deformation of pile groups[J]. *Geotechnique*, 1979, 29(4): 423—439.
- [5] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
- [6] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [7] WONG CHUNG S, POULOS H G. Approximate pile-to-pile interaction factors between two dissimilar piles[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32: 613—618.
- [8] MANDOLIN A, VIGGIAN C. Settlement of pile foundations[J]. *Geotechnique*, 1997, 47(4): 791—816.
- [9] SHARNOBY B E, NOVAK M. Stiffness constants and interaction factors for vertical response of pile groups[J]. *Can. Geotech. J.* 1990, 27: 813—822.
- [10] RUSSO G. Numerical analysis of piled rafts[J]. *Int. J. Numer. Anal. Mech. Geomech.*, 1998, 22: 477—493.
- [11] CAPUTO V, VIGGIANI C. Pile foundation analysis: a simple approach to nonlinearity effects[J]. *Rivista Italiana di Feotecnica*, 1984, 18(2): 32—51.
- [12] 刘金砺, 黄强. 竖向荷载下群桩变形性状及沉降计算[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 1—13.
- LIU Jin-li, HUANG Qiang. Deformation Behaviour and settlement calculation of pile group under vertical load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(6): 1—13.
- [11] 黄义, 王小岗. 横观各向同性饱和弹性多孔介质三维非轴对称 Lamb 问题[J]. 中国科学 E 辑, 2004, 34(9): 1037—1060.
- HUANG Yi, WANG Xiao-gang. The 3D non-axisymmetrical Lamb's problem in transversely isotropic saturated poroelastic media[J]. *Science in China (Ser. E)*, 2004, 47(5): 526—549.
- [12] 艾智勇, 王全胜. 多层横观各向同性地基轴对称固结的传递矩阵解[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 921—925.
- AI Zhi-yong, WANG Quan-sheng. Transfer matrix solutions for axisymmetric consolidation of multilayered transversely isotropic soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(4): 921—925.
- [13] 孙宏磊, 蔡袁强, 徐长节. 移动荷载作用下横观各向同性饱和地基的动力响应[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(8): 1382—1387.
- SUN Hong-lei, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie. Response of transversely isotropic poroelastic half-space to moving load[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, 40(8): 1382—1387.
- [14] SHENG X. Ground vibration generated by a load moving along a railway track[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 228(1): 129—156.
- [15] JONES D V, HOUED DEC D L, PEPLOW A T. Ground vibration in the vicinity of a moving harmonic rectangular load on a half-space[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 1998, 17: 153—166.

上接第 1603 页