

均质土层中超长两桩基础承载性状的数值研究

张齐兴^{1,2}, 陆朝新³

(1. 河海大学农业工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

3. 无锡大诚建设有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘 要: 基于三维有限元分析方法, 研究了均质地基土中超长两桩基础的承载性状。在有限元模型建立中, 为了考虑桩-土共同作用, 桩和地基土均用 8 结点等参单元模拟; 为了考虑桩-土间的变形非线性特性, 桩-土间设置了一层有厚度的薄单元; 桩身混凝土的应力应变关系用线弹性模型模拟, 地基土用 Duncan-Chang 非线性弹性模型模拟, 桩周薄单元用河海大学薄单元模型模拟。计算分析表明, 基桩的竖向刚度随桩中心距的增大、桩长的增大而增大, 但其总小于单桩的竖向刚度; 桩侧阻端阻综合群桩效应系数随桩顶沉降、桩中心距的增大而增大, 随桩长的增大呈先减小后增大或基本保持不变的变化特点。

关键词: 超长桩; 两桩基础; 承载性状; 群桩效应系数; 有限元法

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)06-0945-07

作者简介: 张齐兴(1963-), 男, 江苏江阴人, 副教授, 博士研究生, 主要从事桩基研究。E-mail: zhangqx63@sina.com。

Numerical study on behavior of super-long two-pile foundation in homogeneous soil

ZHANG Qi-xing^{1, 2}, LU Chao-xin³

(1. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering,

Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Wuxi Dacheng Construction Co. Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: Based on the three-dimensional finite element method (3D FEM), the behavior of super-long two-pile foundation in homogeneous soil was investigated. During the course of establishing the finite element model, both the piles and soil were simulated using 8-node isoparametric elements in order to consider the co-action of the piles and soil, and a layer of thin element was placed along the side surface of the piles in order to consider the possible nonlinear deformation between the piles and soil. The relationship between stress and strain of concrete around the piles was simulated using a linear elastic model, that of the foundation soil was simulated using a nonlinear elastic model suggested by Duncan & Chang, and that of the special thin element was simulated by a special model suggested by Hohai University of China. The computed results indicated that the vertical stiffness of the piles in the super-long two-pile foundation increased with the increase of the distance between the two piles or the length of the piles, but the stiffness was always less than that of single super-long pile. The coefficient of two-pile foundation effect defined by the combination of critical tip resistance and side resistance of the piles was also investigated. The coefficient increased with the increase of the settlement at pile top or the distance between the two piles. But with the increase of the pile length, the coefficient first decreased and then increased or was almost invariant.

Key words: super-long pile; two-pile foundation; loading behavior; coefficient of group-pile effect; finite element method

0 前 言

超长桩基础在我国大型桥梁中已有不少应用, 如在建的苏通长江大桥主桥索塔群桩基础的基桩长度为 116 m, 桩身直径上部为 2.8 m, 下部为 2.5 m^[1]。随着工程实践的深入, 对超长桩基础的研究也不断增多。对于超长单桩基础的承载性状, 也有不少学者进行了较为深入的研究, 如基于有限元数值方法的研究^[2-5]、基于现场试验的研究^[6-8]、基于室内模型^[9]或离心模型试验^[10-11]的研究等。虽然目前的研究并没有完全解决

超长单桩设计中的所有问题, 但对于超长单桩的承载性状, 人们已有一个比较全面的认识。对于超长群桩基础, 虽然在工程建设中的应用远多于超长单桩基础, 但对其承载性状的研究报道却很少, 使得人们并不清楚超长群桩基础的承载性状与超长单桩基础相比的差别, 也不清楚超长群桩基础的承载性状和常规群桩基础相比的差别。

收稿日期: 2008-02-01

造成目前对超长群桩基础研究较少的原因是多方面的,就研究方法而言,传统的方法是通过桩的小比例尺模型试验或桩的现场静载试验来研究。模型试验由于不能模拟地基中的自重应力条件,因而无法准确地观测到桩基深处土层在实际应力条件下的性状及其与桩的相互作用;而现场静载试验的影响因素过多,非大量试验难以找出规律性,且超长桩特别是超长群桩基础的现场静载试验的难度、成本通常很高,试验工期又较长。相比之下,数值分析方法具有很强的优势,可以同时克服小比例尺模型试验和现场静载试验的缺陷。但数值方法要得到合理的计算分析结果,尚需处理好有限元模型、模型参数等许多问题,文献[12]对该问题进行了较为全面的研究。

可以肯定的是,研究超长群桩基础的承载性状,不仅对完善超长桩设计理论具有理论意义,且对指导工程实践也有意义。两桩基础是桩数最少的群桩基础,也是桥梁工程中应用最多的群桩基础。对于确定地层中的超长两桩基础而言,其承载性状除与地基土的物理力学性质、成桩工艺等有关外,还与桩长、桩径桩中心距离等有关。本文基于三维有限元分析方法,以苏通大桥索塔地基中的粉细砂层为地基土,假定地基为半无限均质地基,研究桩长、桩中心距离对高承台超长两桩基础承载性状的影响,以期获得一些有益的认识。

1 有限元模型及计算方案

1.1 有限元模型

在实际的超长桩基础工程中,超长桩的直径通常较大,其施工方法多采用钻孔灌注的方法。建立有限元模型时,应考虑所建立的有限元模型不仅能够模拟桩-土的共同作用,而且能够模拟桩-土间可能的变形非连续特性。

为了考虑桩-土的共同作用,桩和地基土均用 8 结点六面体等参单元模拟。已有研究表明,当超长桩桩底没有达到坚硬地层或基岩时,超长桩的承载性状属于摩擦型桩^[5],因此,在建立桩身有限元模型时,把圆形截面的超长桩按照桩侧面积相等的原则等效为方形截面桩。

在超长钻孔灌注桩的施工中,由于护壁泥浆作用和施工机械对地基土的扰动作用,使得桩周一定范围内的土体性质有别于其它部位地基土的性质,在建立有限元模型时应该考虑到这点。另外,由于桩身混凝土和地基土的模量间存在很大差别,在桩顶荷载作用下,桩-土间可能发生非连续变形(即接触非线性问题),建立有限元模型时对此必须考虑。综合考虑以上两点,桩-土间设置一层有一定厚度的薄单元来模拟桩-土间可能的变形非连续特性,而不是用无厚度的

接触面单元处理该问题,因为无厚度的接触面单元只能模拟桩-土间的非连续变形,却不能充分考虑桩周一定范围内的特殊土体。

对高承台两桩基础而言,由于承台与地基土脱离,承台底部土体并不承担上部荷载,承台的作用仅仅是将上部荷载平均地传递给两根桩,因此,在有限元建模中可忽略承台。由于地基土是均质半无限体,满足结构对称和荷载对称的条件,故建模中仅取整个地基基础的 1/4 建模。为了满足边界条件,地基土影响范围水平方向取 30 倍桩径,桩底以下取桩长的 1.2 倍。有限元网格如图 1 所示。

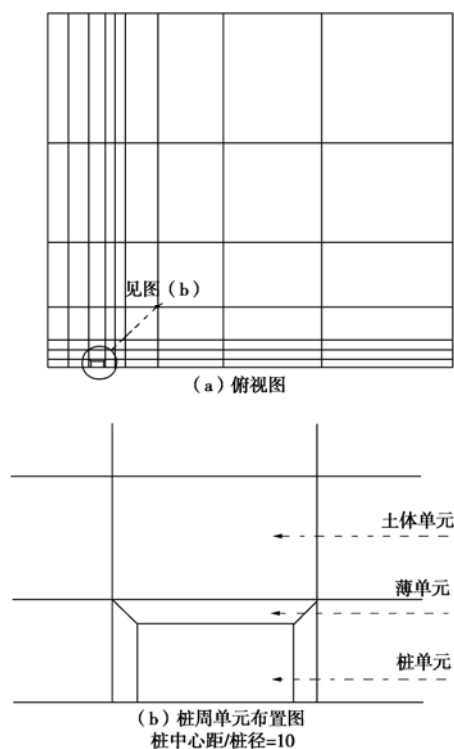


图 1 有限元网格

Fig. 1 Finite element mesh

1.2 模型参数

在上部结构荷载作用下,桩身混凝土的应力应变关系基本符合线性弹性关系,因此桩身混凝土可采用线弹性模型模拟,模型参数取值参照苏通大桥主桥索塔群桩基础桩身混凝土参数^[1],即取弹性模量 $E = 3.3 \times 10^4 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.167$ 。考虑到我国超长桩应用地区的地下水位通常较高,桩身混凝土、地基土及桩周薄单元的重度均取浮重度计算。其中桩身混凝土的浮重度 $\gamma' = 14 \text{ kN/m}^3$ 。

假定地基土为均质,且其应力应变关系用邓肯-张 $E-\nu$ 模型^[13]模拟,模型参数参照苏通大桥主桥索塔地基中的粉细砂层的模型参数^[1, 5]取值,各模型参数如表 1 所示。

表 1 地基土和薄单元模型参数

Table 1 Values of parameters for foundation soil and thin elements

	K	R_f	n	G	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\gamma'/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
地基土	320	0.84	0.61	0.40	31.0	24	9.8
薄单元	100	0.90	0.66	0.40	20.7	12	9.8

注：模型参数 F, D 均取为零； γ' 为浮重度。

桩周薄单元的应力应变关系用河海大学薄单元模型^[14]模拟，其模型参数应综合考虑地基土的力学性质、成桩工艺等许多因素，并结合一定试验确定。本文对薄单元模型参数的确定没有进行深入研究，考虑到在相同施工工艺下，薄单元模型参数应主要与地基土的力学性质相关，同时结合文献[12]的研究，确定薄单元模型参数按以下原则取值：内摩擦角 φ 取地基土内摩擦角的 2/3，黏聚力 c 取地基土黏聚力的 1/2，浮重度与地基土浮重度相等。薄单元模型参数取值也列于表 1。

1.3 计算方案

依据研究目的，即超长两桩基础中桩长、桩中心距对群桩基础承载性状的影响，设计了两大类共 25 个计算方案：I—超长单桩基础，II—超长两桩基础。各方案的类型、桩径、桩长和桩中心距等列于表 2。

表 2 计算方案

Table 2 Schemes for computing

序号	类别	桩径	桩长	桩中心距/桩径	序号	类别	桩径	桩长	桩中心距/桩径
1	I	2.4	50	—	14	II	2.4	90	2
2	I	2.4	70	—	15	II	2.4	90	6
3	I	2.4	90	—	16	II	2.4	90	10
4	I	2.4	110	—	17	II	2.4	90	18
5	I	2.4	130	—	18	II	2.4	110	2
6	II	2.4	50	2	19	II	2.4	110	6
7	II	2.4	50	6	20	II	2.4	110	10
8	II	2.4	50	10	21	II	2.4	110	18
9	II	2.4	50	18	22	II	2.4	130	2
10	II	2.4	70	2	23	II	2.4	130	6
11	II	2.4	70	6	24	II	2.4	130	10
12	II	2.4	70	10	25	II	2.4	130	18
13	II	2.4	70	18					

2 承载性状分析

比较群桩基础中基桩与单桩承载性状的异同，可以了解群桩基础的承载性状。由于篇幅的限制，下面仅通过比较两桩基础中基桩与单桩的荷载—沉降关系曲线、桩长—荷载关系曲线，以及桩中心距—荷载关系曲线三个方面，分析超长两桩基础的承载性状。

2.1 荷载—沉降曲线

图 2 给出的是不同桩长、不同桩中心距时的桩顶荷载—桩顶沉降关系曲线。

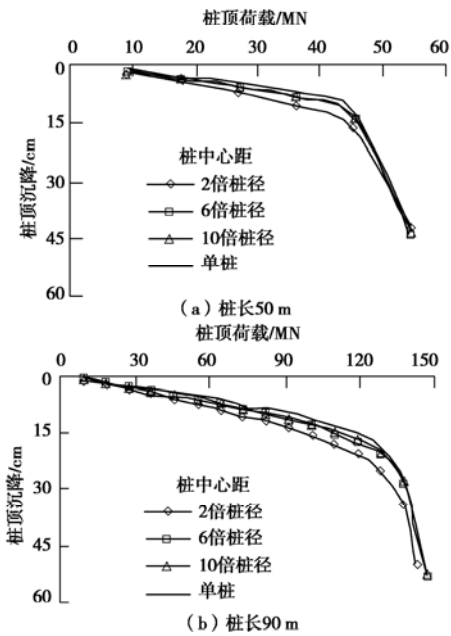


图 2 桩顶荷载—桩顶沉降曲线

Fig. 2 Variation of settlements at pile top with loads acting on pile top

图中显示，单桩的荷载—沉降曲线的斜率最小，两桩基础中基桩的荷载—沉降曲线的斜率大于单桩，且随桩中心距的增大，基桩的荷载—沉降曲线的斜率在减小。另外，图中还显示，各桩顶荷载—桩顶沉降关系曲线具有明显的拐点，拐点前的大部分曲线可近似为直线。若定义图中桩顶荷载—桩顶沉降关系曲线在拐点前的直线段的斜率的倒数为基桩或单桩的刚度，即定义群桩基础中基桩或单桩基础在竖向荷载作用下的刚度

$$K_v = \frac{Q}{S} \quad , \quad (1)$$

式中， Q 为作用于群桩基础中基桩或单桩基础顶面的竖向荷载， S 为群桩基础中基桩或单桩基础顶面的沉降量。

基于式 (1)，由图 2 可知，单桩基础的刚度最大，基桩的刚度随桩中心距的增大而增大，但总小于单桩的刚度。

2.2 桩长—荷载曲线

图 3 显示的是不同桩中心距、不同桩顶沉降时的桩顶荷载随桩长增大的变化曲线，为了便于和单桩情况比较，图中也给出了相应的单桩计算结果。图中显

示,对于单桩基础,当桩顶沉降为某一确定值(图中假定桩顶沉降分别为 5 cm 和 10 cm,该桩顶沉降的假定对于实际的工程而言可能并不一定是适当的,但从本文研究的目的而言,作该假设是可以的)时,桩顶荷载随桩长的增大呈非线性增大。结合式(1)对单桩竖向刚度的定义,可知随桩长的增大,单桩刚度也呈非线性增大。

比较图 3 中单桩和不同桩中心距时基桩的桩顶荷载随桩长的变化曲线可知,当桩中心距一定时,随桩长的增大,基桩的桩顶荷载也呈非线性增大,但基桩的桩顶荷载总小于单桩的桩顶荷载,且单桩与基桩的桩顶荷载的差值随桩长的增长而增大。结合式(1)可知,当桩中心距一定时,基桩的竖向刚度随桩长的增大呈非线性增大变化,但单桩刚度与基桩刚度的差值也随桩长的增大而增大。

2.3 桩中心距-荷载曲线

在常规群桩基础设计中,当桩中心距大于 6 倍桩径时,通常假定基桩的承载性状与单桩的类似,对于超长群桩基础,对此尚无研究报道。为了分析该问题,图 4 给出了不同桩长、不同桩顶沉降时的桩顶荷载随桩中心距的变化曲线。图中显示,当桩长一定时,不同桩顶沉降的桩顶荷载随桩中心距的增大呈非线性增大变化。

为了定量说明桩中心距对桩顶荷载的影响,下面以桩顶沉降 5 cm 为例进行分析,表 3 给出了相应的计

算结果。表中显示,对桩长为 50 m 的情况,当桩中心距为桩径的 10 倍时,基桩桩顶荷载已超过单桩桩顶荷载的 90%,而对于桩长大于 50 m 的其它情况,基桩桩顶荷载均小于单桩桩顶荷载的 90%。这就是说,对于超长两桩基础而言,在常规群桩基础中得到的“桩中心距大于 6 倍桩径时可不考虑群桩效应”的认识并不一定适用。

表 3 桩中心距对桩顶荷载的影响(桩顶沉降=5 cm)

Table 3 Impact of distance between piles on loads acting on pile top (settlement at pile top = 5 cm)

桩长/m	桩中心距/桩径	基桩桩顶荷载/单桩桩顶荷载	桩长/m	桩中心距/桩径	基桩桩顶荷载/单桩桩顶荷载
50	2	0.713	110	2	0.736
50	6	0.848	110	6	0.836
50	10	0.909	110	10	0.885
50	18	0.968	110	18	0.940
70	2	0.715	130	2	0.756
70	6	0.829	130	6	0.847
70	10	0.888	130	10	0.892
70	18	0.948	130	18	0.942
90	2	0.717			
90	6	0.827			
90	10	0.883			
90	18	0.941			

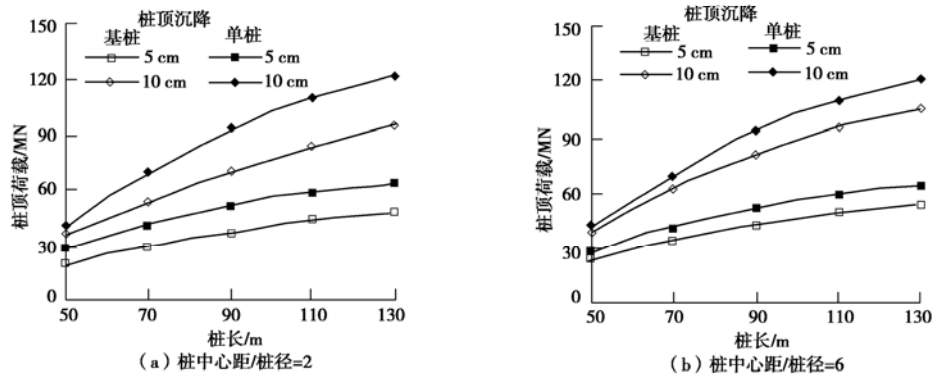


图 3 桩长对桩顶荷载的影响

Fig. 3 Impact of pile length on loads acting on pile top

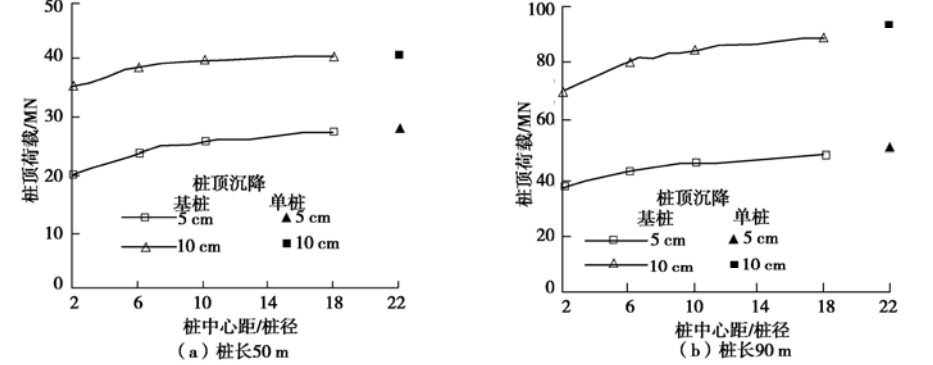


图 4 桩中心距对桩顶荷载的影响

Fig. 4 Impact of distance between piles on loads acting on pile top

3 群桩效应分析

由 2 根桩组成的桩基础是桩数最少的群桩基础，但在桥梁工程中，两桩基础的应用相当广泛。在上部荷载作用下，两桩基础中两基桩之间的变形相互影响，因而存在着所谓的群桩效应^[15]，群桩效应的大小可通过分析群桩效应系数来研究。关于群桩效应系数，《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—94)^[15]中定义了四种不同的群桩效应系数，即桩侧阻力群桩效应系数 η_s 、桩端阻力群桩效应系数 η_p 、桩侧阻端阻综合群桩效应系数 η_{sp} 和承台底土阻力群桩效应系数 η_c 。对于桥梁工程中常用的高承台群桩基础，由于承台底面与地基土脱离，因而不存在承台底土阻力群桩效应系数。对于超长桩基础，已有的研究成果均表明，当桩底没有达到基岩或坚硬土层时，超长桩的承载性状属于摩擦型桩^[5]，即桩顶荷载主要由桩侧阻力承担。因此，对于超长两桩基础，前述四个群桩效应系数中的前三个是值得研究的。由于篇幅的限制，本文仅就桩侧阻端阻综合群桩效应系数 η_{sp} 及其影响因素进行分析，为便于表述，下文将桩侧阻端阻综合群桩效应系数简称为群桩效应系数。

《规范》^[15]中对群桩效应系数的定义为：群桩中的基桩平均极限承载力与单桩极限承载力之比。对于桩基极限状态，《规范》中规定了两类，即承载能力极

限状态和正常使用极限状态。因此，桩基极限承载力的确定也就有两类。对于桥梁工程而言，通常上部结构对基础的沉降变形有较为严格的要求，因此桩基极限承载力常按照正常使用极限状态确定。在本文的研究中，由于并没有针对某一具体的实际工程，因此假定桩顶沉降为某一值时的桩顶荷载为单桩或基桩的极限承载力；由于不同工程能够允许的桩顶沉降量可能不同，因此，下文的研究假定了不同的桩顶沉降进行分析。

3.1 群桩效应系数 - 桩顶沉降曲线

图 5 给出的是不同桩长、不同桩中心距时的群桩效应系数随桩顶沉降量增大的变化。图中显示，桩顶沉降越大，群桩效应系数也越大。这种现象可从桩 - 土共同作用的观点给予解释。两桩基础中，桩间地基土同时受到来自两基桩变形的影响，因而具有群桩效应现象；基桩对地基土变形的影响程度及范围与基桩的变形量直接相关，基桩的沉降量越大，对桩间土变形的影响程度就越大，影响范围也越大，这有利于桩间土体的承载能力进一步发挥，因而有利于增大群桩效应系数的值。

3.2 群桩效应系数 - 桩长曲线

图 6 显示的是不同桩中心距、不同桩顶沉降时的群桩效应系数随桩长增大的变化曲线。由图可见，当桩中心距较小时，群桩效应系数随桩长增大的变化呈

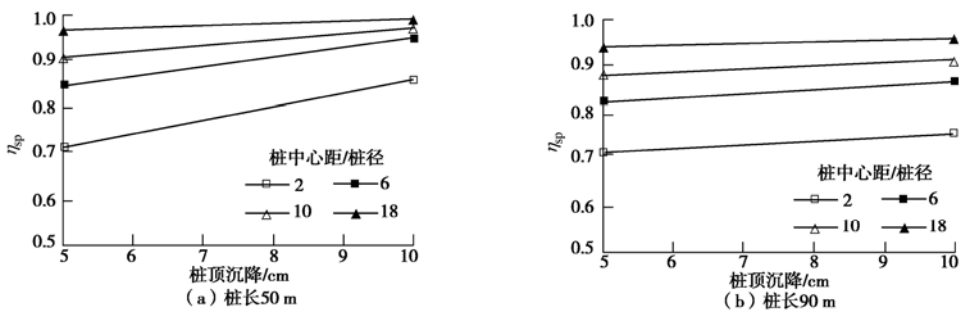


图 5 群桩效应系数 - 桩顶沉降曲线

Fig. 5 Relationship between coefficient of group pile effect and settlement at pile top

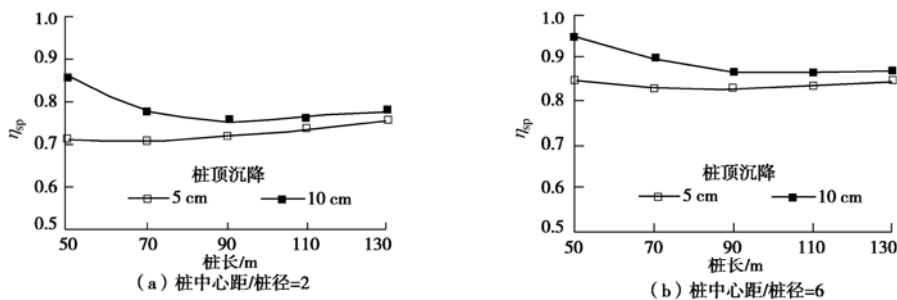


图 6 桩长对群桩效应系数的影响

Fig. 6 Impact of pile length on coefficient of group pile effect

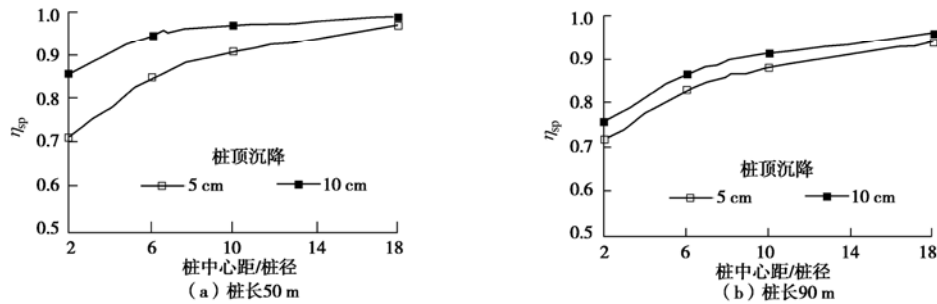


图 7 桩中心距对群桩效应系数的影响

Fig. 7 Impact of distance between piles on coefficient of group pile effect

现先减小后增大或基本保持不变的特点。

在上部荷载作用下,两基桩间的地基土同时受到来自两基桩变形的影响,当桩中心距一定时,桩长的增大造成两基桩间地基土的体积(或者说是引起群桩效应的地基土体积)增大,因此在同一桩顶沉降下,群桩效应系数随桩长的增大应该是呈减小变化的。这一点可用于解释图 6 中各曲线的群桩效应系数随桩长增大呈减小变化的部分。另外,图中的曲线还显示,当桩长大于某值后,群桩效应系数随桩长增大呈增大变化或基本保持不变的特点。对此现象,笔者尚未有合理的解释,尚需进一步研究解决。

3.3 群桩效应系数-桩中心距曲线

通常认为,在群桩基础中,当桩中心距大于一定值后,群桩中基桩的承载性状可近似为单桩,也就是说,当桩中心距达某一值后,群桩效应系数应该接近甚至达到 1.0。

为了研究超长两桩基础的群桩效应系数与桩中心距的关系,图 7 给出了不同桩长、不同桩顶沉降时的群桩效应系数随桩中心距的变化曲线。图中显示,随桩中心距的增大,群桩效应系数呈非线性增大变化。当桩中心距较小时,群桩效应系数随桩中心距增大而增大的变化较快,即图中相应的曲线段较陡;而当桩中心距较大时,群桩效应系数随桩中心距增大而增大的变化较慢,即图中相应的曲线段较缓。当桩顶沉降和桩长均为一定值时,两基桩间受到同时来自两桩沉降影响的土体范围随基桩间距的增大而减小,因而群桩效应系数表现出随桩间距的增大呈增大变化的特点。

4 结 论

基于三维有限元分析方法、用 Duncan-Chang 非线性弹性地基土模型、河海大学桩周薄单元模型和线性弹性桩身混凝土模型,研究了均质地基土中超长两桩基础的承载性状,分析了桩侧阻端阻综合群桩效应系数及其影响因素,得出以下几点认识和结论。

(1) 当桩长一定时,基桩的竖向刚度随桩中心距的增大而增大,但总是小于单桩的刚度。

(2) 当桩中心距一定时,基桩的竖向刚度随桩长的增大呈非线性增大,且其与单桩刚度的差值也随桩长的增大而增大。

(3) 当桩长和桩顶沉降一定时,基桩的桩顶荷载随桩中心距的增大呈非线性增大变化。

(4) 当桩长、桩中心距一定时,桩侧阻端阻综合群桩效应系数随桩顶沉降的增大而增大。

(5) 当桩中心距一定时,群桩效应系数随桩长增大的变化呈现先减小后增大或保持不变的特点。

(6) 当桩长和桩顶沉降一定时,随桩中心距的增大,群桩效应系数呈非线性增大变化。

参考文献:

- [1] 河海大学岩土工程研究所. 苏通长江公路大桥跨江大桥工程主桥索塔群桩基础与土体共同作用数值模拟分析研究报告[R]. 南京: 河海大学岩土工程研究所, 2003. (Research Institute of Geotechnical Engineering of Hohai University. Report of numerical study on co-action between soil mass and pile groups of mail bridge of Sutong Large Bridge[R]. Nanjing: Research Institute of Geotechnical Engineering of Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [2] 蒋建平, 高广运, 汪明武. 大直径超长桩有效桩长的数值模拟[J]. 建筑科学, 2003, 19(3): 27 - 29. (JIANG Jian-ping, GAO Guang-yun, WANG Ming-wu. FEM numerical simulation on effective length of large diameter and super-long pile[J]. Building Science, 2003, 19(3): 27 - 29. (in Chinese))
- [3] 陈开旭, 安关峰, 鲁 亮. 采用有厚度接触单元对桩基沉降的研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 92 - 96. (CHEN Kai-xu, AN Guan-feng, LU Liang. Research on the pile settlement considering thin interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 92 - 96. (in Chinese))
- [4] 曾友金, 章为民. 用有限单元法分析超长单桩的荷载传递[J].

- 岩土力学, 2002, **23**(6): 803 - 806. (ZENG You-jin, ZHANG Wei-min. Analysis of load-transfer of super-long single pile with finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(6): 803 - 806. (in Chinese))
- [5] 王俊杰, 朱俊高, 魏松. 不同桩底地层超长桩工作性能的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, **26**(2): 328 - 331, 336. (WANG Jun-jie, ZHU Jun-gao, WEI Song. Numerical simulation of behavior of overlength piles with different base stratum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(2): 328 - 331, 336. (in Chinese))
- [6] 朱向荣, 方鹏飞, 黄洪勉. 深厚软基超长桩工程性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(1): 76 - 79. (ZHU Xiang-rong, FANG Peng-fei, HUANG Hong-mian. Research on super-long pile in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(1): 76 - 79. (in Chinese))
- [7] 钟闻华, 石名磊, 刘松玉. 超长桩荷载传递性状研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(2): 307 - 310, 318. (ZHONG Wen-hua, SHI Ming-lei, LIU Song-yu. Load transfer performance of overlength piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(2): 307 - 310, 318. (in Chinese))
- [8] 张帆, 龚维明, 戴国亮. 大直径超长灌注桩荷载传递机理的自平衡试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(4): 464 - 469. (ZHANG Fan, GONG Wei-ming, DAI Guo-liang. Experimental research on the load transfer mechanism of super-long large diameter bored pile with the self-balanced load test method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(4): 464 - 469. (in Chinese))
- [9] 刘春波, 李晓红, 王成. 黏土中超长单桩的模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, **1**(6): 1118 - 1121. (LIU Chun-bo, LI Xiao-hong, WANG Cheng. Model-test study of super-long single pile in the clay[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, **1**(6): 1118 - 1121. (in Chinese))
- [10] 张忠苗, 辛公锋, 吴庆勇, 等. 考虑泥皮效应的大直径超长桩离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(12): 2066 - 2071. (ZHANG Zhong-miao, XIN Gong-feng, WU Qing-yong, et al. Centrifuge model tests on super-long piles with large diameters considering mudcake effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(12): 2066 - 2071. (in Chinese))
- [11] 游庆仲, 王年香, 章为民. 大直径超长单桩竖向承载性能离心模型试验研究[J]. 桥梁建设, 2006, **1**: 1 - 4. (YOU Qing-zhong, WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min. Centrifugal model test study of axial bearing behavior of large diameter and very long single pile[J]. Bridge Construction, 2006, **1**: 1 - 4. (in Chinese))
- [12] 张齐兴, 姚波, 俞中奇. 超长摩擦桩承载性状的有限元法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, **35**(6): 681 - 685. (ZHANG Qi-xing, YAO Bo, YU Zhong-qi. FEM for analysis of bearing behaviors of over-length friction piles[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, **35**(6): 681 - 685. (in Chinese))
- [13] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Principle and computation on soil engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese))
- [14] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(3): 14 - 22. (YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(3): 14 - 22. (in Chinese))
- [15] JGJ 94—94 建筑桩基技术规范[S]. 1994 (JGJ 94—94 Technical code for building pile foundations[S]. 1994. (in Chinese))