

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1409

基于差异沉降和轴向刚度控制的竖向荷载作用下 群桩基础优化分析

张治国^{1,2}, 张瑞¹, 黄茂松³, 宫剑飞⁴

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;
3. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 4. 中国建筑科学研究院 地基基础研究所, 北京 100013)

摘要: 目前在群桩设计中仍大多数采用均匀等长布桩的方法, 这种方法在基础受力、变形等方面存在较大的缺陷。考虑增大群桩轴向刚度和减小群桩基础差异沉降的条件下, 将群桩基础位移函数与桩长优化函数相结合, 在对基础采取行变换、平面变换的方式下, 通过设置不同的桩长比值 ζ 、连接曲率值 η 设定不同布桩方案, 分析不同方案下群桩基础轴向刚度比、差异沉降比的变化规律; 并利用数值模拟法对所得优化结果的可靠性进行验证。此外, 针对不同桩土刚度比、不同桩间距对群桩基础的轴向刚度比和差异沉降比进行了参数分析。研究表明: 不同群桩基础优化变换方式、不同桩长对群桩基础优化结果会产生不同的影响; 当优化目的是为增加群桩基础刚度时, 应主要考虑行变换的优化方式, 当优化目的是为减小基础差异沉降时, 应主要考虑平面变换的优化方式; 基础轴向刚度比随着桩土刚度比的增加而增大, 随着桩间距的减小而增大; 基础差异沉降比随着桩土刚度比的增加而减小, 随着桩间距的减小而减小。

关键词: 群桩; 桩长优化; 轴向刚度比; 差异沉降比

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)06-2354-15

Optimization analysis of pile group foundation based on differential settlement control and axial stiffness under vertical loads

ZHANG Zhi-guo^{1,2}, ZHANG Rui¹, HUANG Mao-song³, GONG Jian-fei⁴

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
4. Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: At present, the method of uniform isometric piles is used in most group pile designs. This method has major defects in foundation stress and deformation. Considering the increase of group pile foundation stiffness and reducing the differential settlement of group pile foundation, the group pile foundation displacement function is combined with the pile length optimization function. Under the method of line transformation and squared transformation, different group pile designs are determined by setting different pile length ratio ζ and connection curvature η . The scheme is used to analyze the variation law of axial stiffness ratio and differential settlement ratio of group pile foundation under different schemes. The reliability of theoretical analysis results is verified by finite element method. In addition, parametric analysis of axial stiffness ratio and differential settlement ratio of pile group foundations are based on different pile-soil stiffness ratios and different pile spacings. The results show that the optimal transformation mode of different pile groups and different pile lengths have different effects on the optimization results of group pile foundations. When the optimization purpose is to increase the pile group foundation stiffness, the optimization method of line transformation should be chosen. When the optimization purpose is to decrease the differential settlement of pile group foundation, the optimization method of squared transformation should be chosen. The axial stiffness of pile group increases with the increasing of pile-soil stiffness ratio and the decreasing of pile spacing. The differential settlement ratio of pile group decreases with the increasing of pile-soil stiffness ratio and the decreasing of pile spacing.

Keywords: pile group; optimization of pile length; axial stiffness ratio; differential settlement ratio

收稿日期: 2018-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(No.51738010, No.41772331); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室基金项目(No.SKLGDEK1707)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51738010, 41772331) and the Projects of State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology(SKLGDEK1707)。

第一作者简介: 张治国, 1978年生, 男, 博士(后), 副教授, 硕士生导师, 主要从事地下工程施工影响方面的研究与教学工作。E-mail: zgzhang@usst.edu.cn

1 引言

当前在群桩基础设计中常常采用的设计理念是均匀布桩,即所有桩的桩长、桩径、桩间距均相同。这主要是从施工便捷性、工程造价不能过高等方面进行考虑的,但这样的桩基布置形式往往并不能完全发挥群桩基础全部受载功能。因此,通过优化群桩基础的几何特性和布置形式可以获取不同群桩基础的刚度、差异沉降的特点,从而在不同的优化方案中选取最佳的群桩基础形式。

近些年来,国内外学者对于群桩基础受载沉降或者优化设计进行了相关研究,研究方法包括理论解析法^[1-13]、数值模拟法^[14-18]和模型试验法^[19-21]。在理论解析方面,Randolph等^[1]针对单桩沉降问题提出剪切位移法来计算;Shen等^[2]从群桩总势能角度提出群桩基础中单桩位移函数可表达为幂函数,使得群桩沉降计算得到一定简化;王伟等^[3]利用变分原理,提出含两待定参数的单桩位移函数来计算群桩基础中单桩位移;张瑜等^[4]采用数学积分与高斯积分相结合的方法计算地基附加应力和桩基沉降;Horikoshi等^[5]对简单的3×3群桩基础中的单桩进行了桩长优化,分析表明优化群桩基础的桩长对基础整体承载力和变形特性有较为明显的影响;Kim等^[6]对群桩基础的优化分析主要采用遗传算法;Leung等^[7]建立群桩基础中各单桩桩长优化的形函数,对5×5群桩基础在整体刚度、差异沉降进行了分析,对本文研究思路有重要启示;梁发云等^[8-9]采用基于弹性理论的积分方程方法并结合Cut-off方法来反映桩的弹塑性,实现群桩基础的弹塑性优化分析;Nakanishi等^[10]通过考虑筏-桩-土相互作用来评估基础沉降,并提出用Steinbrenner方程简化沉降分析;刘金砺等^[11]考虑承台和上部结构刚度对沉降变形的均化效应,提出Mindlin解均化应力分层总和法计算群桩基础沉降;张忠苗等^[12]通过对现有超长桩实测数据的分析,得到了嵌岩桩桩身压缩系数拟合方程,同时得出了非嵌岩桩桩身压缩系数;高盟等^[13]提出了竖向荷载作用下用于层状地基群桩沉降分析解析算法。数值模拟方法^[14-18]可以较为准确模拟群桩基础与扰动土体间的复杂弹塑性接触关系,也可以模拟复杂土体本构关系,但一般需要借助商用软件平台,建模较为复杂。此外,在模型试验^[19-21]方面,大多数试验成果并未详细考虑复杂群桩基础的优化,仅仅针对简单群桩工况做了相应观测。

上述研究表明,目前针对单桩沉降以及群桩基

础沉降分析进行了较多研究,但针对群桩基础沉降优化设计理论分析的成果还较少,尤其是针对不同形态桩基沉降、刚度特点分析较少,已有理论解析成果仅针对均长等间距布置以及简单优化布置形式的群桩基础进行了研究,还较少考虑桩数较多时基础优化的差异性和复杂性。本文采用Shen^[2]从群桩总势能角度提出的群桩基础单桩位移函数,并结合Leung等^[7]提出的群桩基础桩长优化形函数,将7×7群桩基础在控制差异沉降的条件下进行优化,主要从增加基础刚度比和减小差异沉降比的角度进行了较为详细的讨论分析,并对相应的优化参数进行了分析。

2 群桩沉降计算理论

本文计算基于以下3个假定条件:

(1) 土体为均匀弹性体,其弹性模量表示为 E ,泊松比表示为 ν 。

(2) 承台为绝对刚性,且承台脱空,不承受土体反力。

(3) 群桩为弹性体,其弹性模量表示为 E_p 。

2.1 群桩基础势能基本理论

Shen等^[2]提出的群桩基础总势能 π_p 公式为

$$\pi_p = \sum_{i=1}^{n_p} \frac{1}{2} \iiint_V E_p \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 dV + \frac{1}{2} \iint_S \{\tau\}^T \{w\} dS + \frac{1}{2} \iint_A \{\sigma\}^T \{w_b\} dA - \{w_i\}^T \{p_i\} \quad (1)$$

式中: n_p 为群桩基础中桩总数; V 为单桩体积; S 为单桩桩侧表面积; E_p 为桩体的弹性模量; A 为桩截面面积; $\{\tau\} = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n_p}\}^T$ (见图1)为桩土界面深度 z 处剪切应力矩阵; $\{\sigma\} = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{n_p}\}^T$ 为桩端处应力矩阵; $\{w\} = \{w_1, w_2, \dots, w_{n_p}\}^T$ 为沿桩体深度 z 处的位移矩阵; $\{w_b\} = \{w_{b1}, w_{b2}, \dots, w_{bn_p}\}^T$ 为桩端处位移矩

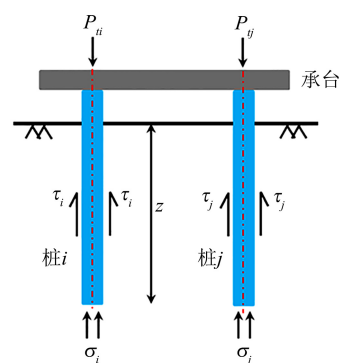


图1 桩*i*、*j*受荷示意图

Fig.1 Stresses acting on pile *i* and pile *j*

阵; $\{p_i\} = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im_p}\}^T$ 为桩顶处的外荷载矩阵, 荷载 p_i 取值按照标准组合轴心竖向力作用进行计算取值^[22]; $\{w_i\} = \{w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im_p}\}^T$ 为桩顶处的位移矩阵。

式(1)中可通过桩土位移协调条件, 将式中的 $\{w_b\}$ 、 $\{\sigma\}$ 、 $\{\tau\}$ 和 $\{w\}$ 利用 Randolph 等^[1]方法进行代换, 并重新改写式(1)可得

$$\pi_p = \sum_{i=1}^{n_p} \frac{1}{2} \iiint_V E_p \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 dV + \frac{1}{2} \iint_S \{w\}^T \{w\} dS + \frac{1}{2} \iint_A \{w_b\}^T [k_b] \{w_b\} dA - \{w_i\}^T \{p_i\} \quad (2)$$

式中: $[k_b]$ 为桩端土的刚度矩阵。

根据最小势能原理, π_p 为 δ_{ij} 的极值, 因此有下式:

$$\frac{\partial \pi_p}{\partial \delta_{ij}} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n_p; j=1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

利用式(3)可将式(2)表达为

$$\sum_{i=1}^{n_p} \iiint_V E_p \frac{\partial w_i}{\partial z} \left(\frac{\partial \left(\frac{\partial w_i}{\partial z} \right)}{\partial \delta_{ij}} \right) dV + \iint_S \left\{ \frac{\partial w}{\partial \delta_{ij}} \right\}^T [k] \{w\} dS + \iint_A \left\{ \frac{\partial w_b}{\partial \delta_{ij}} \right\}^T [k_b] \{w_b\} dA = \left\{ \frac{\partial w_i}{\partial \delta_{ij}} \right\}^T \{p_i\} \quad (i=1, 2, \dots, n_p; j=1, 2, \dots, n_p) \quad (4)$$

本文采用 Shen 等^[2]提出的单桩位移函数作为求解单桩沉降的函数, 于是可得

$$w_i(z) = \sum_{j=1}^k \beta_{ij} \left(1 - \frac{z}{l} \right)^{j-1} \quad (i=1, 2, \dots, n_p) \quad (5)$$

式中: l 为桩长; β_{ij} 为桩与桩之间相互系数, 具体确定方法如下:

$$\beta_{ij} = \frac{1}{1-\nu} + \frac{2\pi}{\ln(r_m/r_0)} \frac{l_j}{l_i r_0} \quad (6)$$

式中: r_0 为桩半径; l_i 、 l_j 为群桩基础中不同单桩桩长; ρ 为土体不均匀系数, 均质土取 1; r_m 可通过下式确定:

$$r_m = 2.5 \rho l_i (1-\nu) \quad (7)$$

2.2 群桩土体-荷载位移关系

本文中桩周土体剪应力与位移关系利用

Randolph 和 Wroth^[1]方法确定:

$$\{w\} = \frac{1}{G_z} [F] \{\tau\} \quad (8)$$

式中: G_z 为任意深度 z 土体剪切模量; $[F]$ 为桩周土柔度矩阵, 矩阵中的元素可通过下式确定:

$$f_{ij} = r_0 \ln \left(\frac{r_m}{r} \right) \quad (i=1, 2, \dots, n_p; j=1, 2, \dots, n_p) \quad (9)$$

式中: 当 $i=j$ 时, $r=r_0$; 当 $i \neq j$ 时, $r=s_{ij}$; s_{ij} 为 i 桩与 j 桩之间的轴线距离。

而桩端土与桩端沉降之间的关系^[1]为

$$\{w_b\} = \frac{1}{G_1} [F_b] \{\sigma\} \quad (10)$$

式中: G_1 为桩端土剪切模量; $[F_b]$ 为桩端土土体柔度矩阵, 矩阵中的元素可通过下式表达:

$$f_{bij} = \frac{1-\nu}{4r_0} A(i=1, 2, \dots, n_p), i=j \quad (11)$$

$$f_{bij} = \frac{1-\nu}{2\pi s_{ij}} A(i=1, 2, \dots, n_p; j=1, 2, \dots, n_p), i \neq j \quad (12)$$

令 $[k_{ss}] = [F]^{-1}$ 、 $[k_{bb}] = [F_b]^{-1}$, 联合式(8)、(10), 可将 Randolph 等^[1]的桩土位移协调公式变换为

$$\begin{cases} [k_{ss}] = \frac{1}{G_z} [k] \\ [k_{bb}] = \frac{1}{G_1} [k_b] \end{cases} \quad (13)$$

式中: $[k_{ss}]$ 为考虑桩周土剪切模量 G_z 后的桩周土体刚度矩阵; $[k_{bb}]$ 为考虑桩端土剪切模量 G_1 后的桩端土刚度矩阵; $[k]$ 为深度为 z 处的桩体周边土刚度矩阵。

2.3 群桩荷载-位移关系

将式(2)~(4)整合后可得

$$\sum_{i=1}^{n_p} \iiint_V E_p \frac{\partial w_i}{\partial z} \left\{ \frac{\partial \left(\frac{\partial w_i}{\partial z} \right)}{\partial (x_i, y_i)} \right\} dV + \iint_S \left\{ \frac{\partial w}{\partial (x_i, y_i)} \right\}^T [k] \{w\} dS + \iint_A \left\{ \frac{\partial w_b}{\partial (x_i, y_i)} \right\}^T [k_b] \{w_b\} dA = \left\{ \frac{\partial w_i}{\partial (x_i, y_i)} \right\}^T \{p_i\} \quad (14)$$

将式(14)整理成矩阵形式可得

$$([k_p] + [k_s][A] + [k_{sb}])\{w\} = \{p\} \quad (15)$$

式中: $[k_p]$ 为桩体刚度矩阵; $[k_s]$ 为桩周土体刚度矩阵; $[A]$ 为桩截面矩阵; $[k_{sb}]$ 为桩端土刚度矩阵;

$\{w\} = \{w_{11}, w_{12}, \dots, w_{mk}\}^T$ ($m=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, n$) 为桩位移向量; $\{p_t\} = \{p_{t11}, p_{t12}, \dots, p_{tmk}\}^T$ ($m=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, n$) 为荷载向量。

式(15)中矩阵 $[k_p]$ 的元素 k_{pij} 具体表达为

$$k_{pij} = E_p \frac{\pi r_0^2 (i-1)(j-1)}{l(i+j-3)} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

式(15)中矩阵 $[k_s]$ 中的元素可通过下式确定:

$$k_{sij} = \begin{pmatrix} k_{ss11} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & k_{ssnn} \end{pmatrix} \quad (17)$$

而 k_{ssij} 可通过式(13)中第1式确定。

将式(15)中矩阵 $[A]$ 的元素 A_{sij} 具体表达为

$$A_{sij} = 2\pi r_0 l G_l \left(\frac{1}{i+j-1} + \frac{1-\lambda}{i+j} \right) \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

式中: λ 为土体模量沿深度线性变化时桩顶处土体与桩端处土体的剪切模量的比值, 本文研究均质土, 取 $\lambda=1$ [2]。

将式(15)中矩阵 $[k_{sb}]$ 的元素可通过下式确定:

$$k_{sbij} = \begin{pmatrix} k_{bbij} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

而 k_{bbij} 可通过式(13)中第2式来确定。

进一步, 将式(15)改写为

$$[h]\{w\} = \{p_t\} \quad (20)$$

式中: $[h] = [k_p] + [k_s][A] + [k_{sb}]$ 。

令 $[f] = [h]^{-1}$ 并将式(20)改写后可得

$$\{w\} = [f]\{p_t\} \quad (21)$$

因此, 式(21)为最后求解矩阵, 通过求解可以获取群桩基础沉降位移。

3 基于差异沉降控制的群桩优化理论分析

3.1 群桩布置形式

既有研究成果表明, 群桩基础采用不同的桩长对群桩基础刚度与沉降均有不同程度的影响, 但群桩中桩长的变换也应遵循一定的规律, 这样也为后期现场施工带来一定便捷性和经济性。本文中桩长

变换主要通过两种不同布置方法来体现, 即行变化 (line transformation, 简称 LT) 和平面变化 (square transformation, 简称 ST)。在行变化中, 每行内的桩长均一致, 行与行之间的桩长进行变换。在平面变换中, 每一平面内的桩长均相同, 不同平面之间的桩长进行变换。本文研究 7×7 群桩基础, 具体如图2所示, 其中 i 代表不同的行与平面。

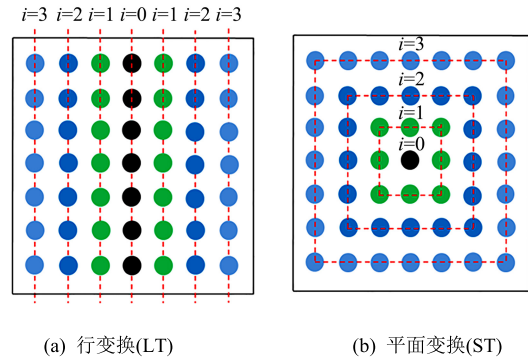


图2 7×7 群桩桩长变换平面示意图

Fig.2 Plan views of pile length transformation in a 7×7 pile group

3.2 群桩桩长优化函数

利用 Leung 等 [7] 提出的桩长形函数, 本文群桩基础中的桩长函数可表达为

$$\frac{l(i)}{r_0} = \frac{l_0}{r_0} \left[1 + \xi i + \eta i \left(i - \frac{N-1}{2} \right) \right] \quad (22)$$

$$L_T = N^2 l_{ave} \quad (23)$$

式中: l_0 为中间桩 ($i=0$) 桩长; ξ 为中心桩与边桩 ($i=3$) 之间长度比; η 为中心桩与边桩连接曲率; N 为桩排数; L_T 为桩总长; l_{ave} 为均匀等长布桩时桩长。具体示意图如图3所示。

在行变换 (LT) 中, 中心桩 l_0 可表达为

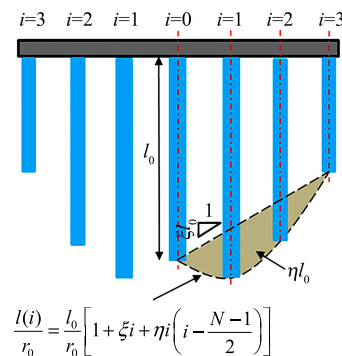


图3 桩长函数几何示意图

Fig.3 Graphical illustration of pile length function

$$l_0 = \frac{24L_T}{N^2(24+\eta) - N^4\eta + 3N(N^2-1)(2\xi+\eta)} \quad (24)$$

在平面变换 (ST) 中, 中心桩 l_0 可表达为

$$l_0 = \frac{24L_T}{3\eta - 2N^2(\eta-12) - N^4\eta + 4N(N^2-1)(2\xi+\eta)} \quad (25)$$

本文进行 7×7 群桩基础优化是基于以下 3 个条件进行, 首先是桩总长 L_T 不变; 其次为在群桩基础中, 最长桩 $l_{\max}$ 与最短桩 $l_{\min}$ 之间桩长比应小于等于 5, 这是考虑到在实际工程建设中施工两根长度差异较大的桩时, 往往会造成过高的施工造价, 因此, 应选取合理的桩长值进行分析。从式 (22) 可知:

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } i=1 \text{ 时, } l(1) &= l_0[1+\xi-2\eta] \\ \text{当 } i=2 \text{ 时, } l(2) &= l_0[1+2\xi-2\eta] \\ \text{当 } i=3 \text{ 时, } l(3) &= l_0[1+3\xi] \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

由式 (26) 及 $l_{\max}/l_{\min} \leq 5$ 可得

$$\left. \begin{aligned} -\frac{4}{15} \leq \xi \leq \frac{4}{3} \\ -2 \leq \eta \leq \frac{2}{5} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

从式 (26) 可知: 当 $\xi < 0$ 时, 即中心桩 ($i=0$) 桩长大于边桩 ($i=3$); 当 $\xi > 0$ 时, 即中心桩 ($i=0$) 桩长短于边桩 ($i=3$); 当 $\eta > 0$ 时, 即桩 ($i=1$)、桩 ($i=2$) 桩长短于中心桩 ($i=0$)、边桩 ($i=3$); 当 $\eta < 0$ 时, 即桩 ($i=1$)、桩 ($i=2$) 桩长大于中心桩 ($i=0$)、边桩 ($i=3$)。

在具体优化计算分析中, 利用式 (22) 可将群桩基础中各单桩桩长进行表示, 并将其代入式 (15)~(21) 中, 可逐步获得群桩基础的刚度计算值, 另外通过指定的外荷载设定值可计算出群桩沉降结果以获取优化方案。

3.3 7×7 群桩基础理论优化分析结果

本文选取的 7×7 群桩基础及土体参数、群桩荷载施加情况如表 1、2 所示。

本文优化分析结果主要从优化桩长后基础轴向刚度 K' (通过式 (20) 确定) 与均匀等长布桩 (ξ 、 η 均为 0 时) 基础轴向刚度 K_0 之比 ϕ ; 以及优化桩

表 1 群桩基础及土体参数
Table 1 Pile group and soil parameter

E_p/G_1	r_0/m	ν	s/m	l_{ave}/m	ρ
4 000	1	0.33	5	20	1

注: E_p/G_1 为桩土刚度比。

表 2 群桩荷载

Table 2 Load applied to pile group	0	1	2	3
P/kN	1.75	1.25	0.86	0.44

长后基础最大与最小沉降差 D' (群桩最大与最小沉降由式 (21) 确定) 与均匀等长布桩时最大与最小沉降差 D_0 之比 ψ 来体现。

7×7 群桩基础在行变换的优化方式下轴向刚度比 ϕ 随桩长比值 ξ 、连接曲率值 η 变化的等值线图如图 4 所示。图中所示群桩仅为 ξ 、 η 取值范围内 6 个取值点示意图, ξ 、 η 取值范围区域为三角形, 该三角形的 3 个顶点 (ξ , η) 取值分别为 (-0.26, 0.4)、(1.3, 0)、(-0.05, -2)。从图中可以看出, 当 ξ 、 η 均为 0 时即均匀等长布桩, 轴向刚度比 ϕ 为 1; 在行变换的优化前提下, 随着不同的桩长即 ξ 、 η 的不同组合形式的设置, 基础轴向刚度比 ϕ 在不断增加, 这是因为群桩基础中设置不同的桩长会减小单桩与单桩之间的不利影响, 从而使得整个基础中每根单桩的承载能力得到了尽可能的发挥; 另外, ξ 、 η 的取值距 (0, 0) 越远, 也就是中心桩与边桩长度差异越大, 基础刚度增加比 ϕ 越大, 这是因为单桩与单桩之间的相互影响达到了最小。

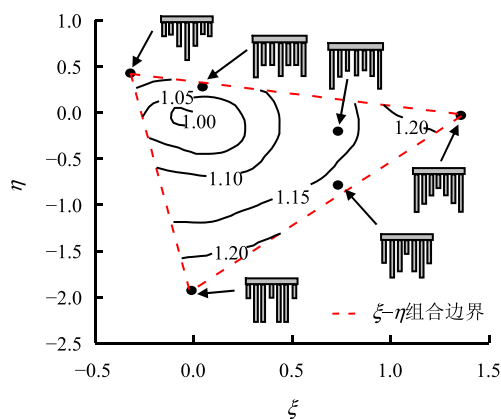


图 4 行变换方式下群桩基础轴向刚度比
Fig.4 Axial stiffness ratio for pile group under line transformation

7×7 群桩基础在行变换的优化方式下差异沉降比 ψ 随桩长比值 ξ 、连接曲率值 η 变化的等值线图如图 5 所示。图中所示群桩仅为 ξ 、 η 取值范围内 6 个示意图 ξ 、 η 取值范围区域为封闭曲线区域, 该图中 6 个 (ξ , η) 取值分别为 (-0.26, 0.15)、(0, 0.2)、(1.2, 0.25)、(-0.05, -2)、(0.95, -1)、(1.1, 0)。从图中可以看出, 群桩基础进行桩长优化后并不是都能减小差异沉降, 当差异沉降比 $\psi < 1$ (均匀布桩

时差异沉降比) 时, 群桩基础是“受益”的; 而差异沉降比 $\psi > 1$ 时, 群桩基础处于不利状态; 当 $\xi < 0$ 时, 也就是中间桩 ($i = 0$) 桩长大于边桩 ($i = 3$) 时, 基础差异沉降比 ψ 均小于 1, 也就是说中间桩长于边桩时, 群桩基础会在差异沉降上“获益”, 中间桩比边桩长度越长, 基础差异沉降越小; 当 η 越小时即中间桩 ($i = 0$) 与边桩 ($i = 3$) 的连接曲率越大, 差异沉降比 ψ 越小。因此, 当考虑减小基础差异沉降时, 可同时选择合适的 ξ 、 η 这两个参数, 使得群桩基础在变形上达到最小。

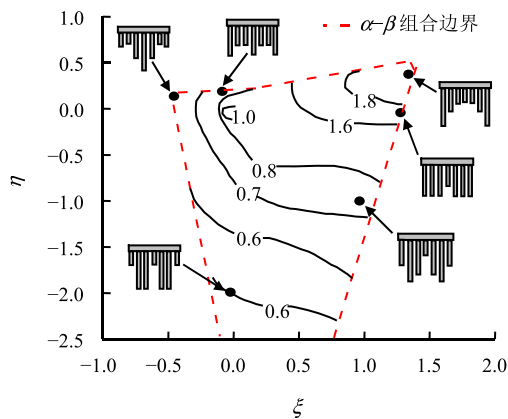


图5 行变换方式下群桩基础差异沉降比

Fig.5 Differential settlement ratio for 7×7 pile group under line transformation

7×7 群桩基础在平面变换的优化方式下轴向刚度比 ϕ 随桩长比值 ξ 、连接曲率值 η 变化的等值线如图 6 所示。图中所示群桩仅为 ξ 、 η 取值范围内 6 个示意图 (ξ 、 η) 取值范围区域为封闭曲线区域, 该图中 6 个 (ξ 、 η) 取值分别为 (-0.26, 0.15)、(0, 0.2)、(1.2, 0.25)、(-0.05, -2)、(0.95, -1)、(1.1, 0)。从图中可以看出, 群桩基础采用平面变换后轴

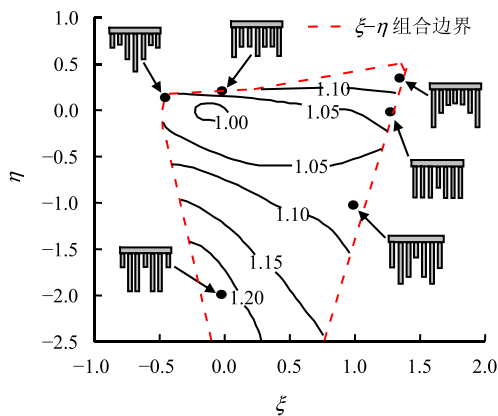


图6 平面变换方式下群桩基础轴向刚度比

Fig.6 Axial stiffness ratio for pile group under squared transformation

向刚度比 ϕ 等值线形态同行变换方式相比发生了变化, 从三角形区域变化为多边形区域; 当 ξ 、 η 均为 0 时即均匀等长布桩, 轴向刚度比 $\phi = 1$; 当群桩基础采用除均匀布桩之外的方法后, 基础轴向刚度比 ϕ 均得到了不同程度的增加; 群桩基础中, 单桩与单桩之间的长度差异越大即 ξ 、 η 的取值越趋向于相应的取值边界, 对基础轴向刚度比 ϕ 的增加越有利。

7×7 群桩基础在平面变换的优化方式下差异沉降比 ψ 随桩长比值 ξ 、连接曲率值 η 变化的等值线如图 7 所示。图中所示群桩形态仅为 ξ 、 η 取值范围内 6 个点的示意图, (ξ 、 η) 取值范围区域为封闭曲线区域, 该图中 6 个 (ξ 、 η) 取值分别为 (-0.26, 0.15)、(0, 0.2)、(1.2, 0.25)、(-0.05, -2)、(0.95, -1)、(1.1, 0)。从图中可以看出, 采用平面变换同采用行变换方式相比, 相应的差异沉降比有所减小, 这表明平面变换在减小差异上效果更佳明显; 在 ξ 、 η 组合区域内, 差异沉降比 $\psi < 1$ 的区域面积远大于差异沉降比 $\psi > 1$ 的区域面积, 这表明在平面变换方式下, 大部分布桩方式在减小群桩基础差异沉降上都是可行的。

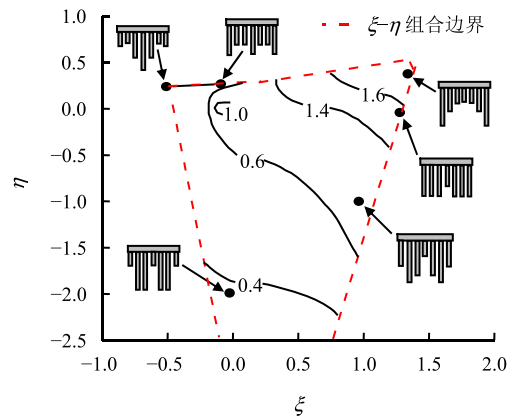


图7 平面变换方式下群桩基础差异沉降比

Fig.7 Differential settlement ratio for 7×7 pile group under squared transformation

4 本文优化法与数值模拟法对比分析

4.1 方案设置

本文将理论优化结果与有限元数值模拟方法进行对比分析, 根据桩长比值 ξ 、连接曲率值 η 取值边界重新设定 6 种群桩基础方案, 具体设置方案及方案有限元数值模型离散图如图 8 所示。需要说明的是, 采用有限元数值模拟手段来分析, 针对每一个优化设定方案均需重新建模, 需要耗费较多时间和人力; 而采用本文优化简化方法, 则仅需针对桩

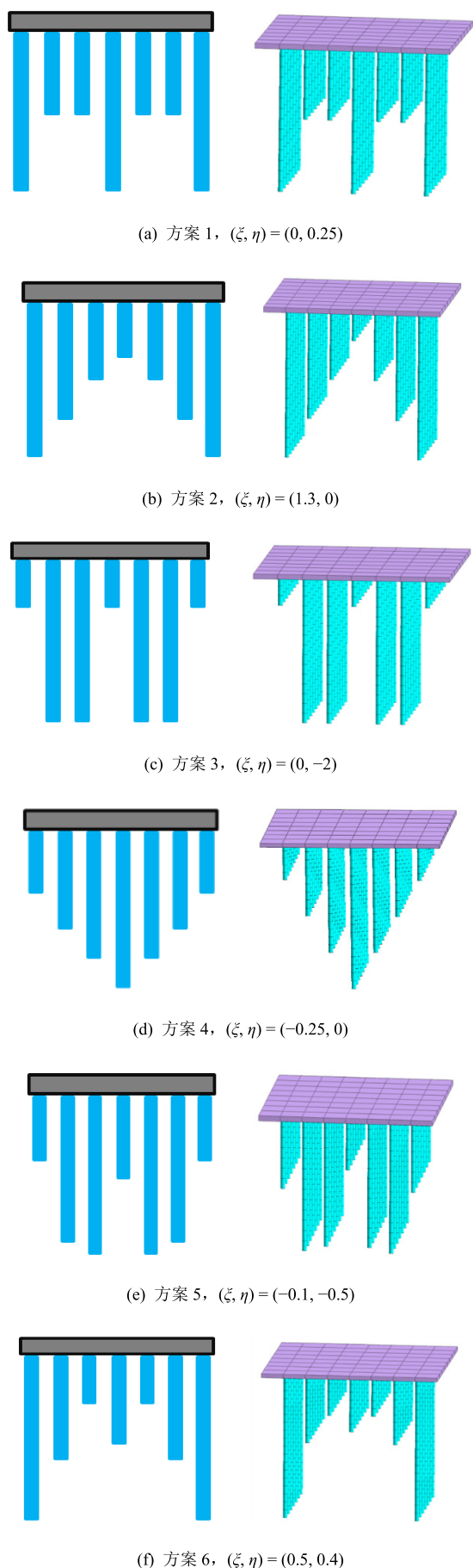


图8 群桩设置方案及有限元离散图

Fig.8 Pile group setting plans and finite element models

长比值 ξ 、连接曲率值 η 作为输入参数进行比选计算即可。

图8所示的6种群桩设置方案和相应的有限元离散模型是基于行变换(ST)、桩间距归一化比值 $s/r_0 = 5$ 、桩土刚度比 E_p/G_1 前提下进行分析。分析主要针对进行桩长优化后的群桩基础与均匀布桩时群桩基础的差异沉降比 ψ 进行对比。

4.2 相同桩土刚度比 E_p/G_1 下桩沉降对比分析

为了更好地将两种方法进行对比, 本文将上述6种不同群桩基础设置方案中的7根典型单桩分别取出, 研究在桩土刚度比 $E_p/G_1 = 4\ 000$ 的条件下桩端沉降规律。7根单桩选取如图9所示, 将所选7根桩从左至右依次编号为1、2、3、4、5、6、7号, 两种算法的对比分析如图10所示。

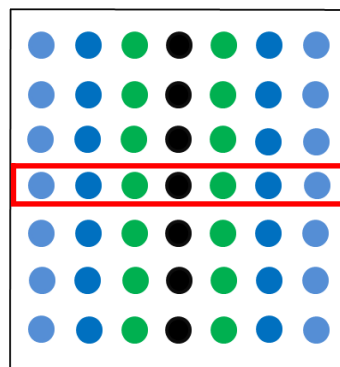


图9 典型桩选取示意图

Fig.9 Selection of representative piles

图10为6种不同方案内选取的典型桩沉降对比图。从图中可以看出, 本文优化算法在沉降数值上比数值模拟法稍大, 但数值模拟法和本文优化法在结果上较为接近, 表明本文优化算法的准确性; 除方案4外, 其余方案沉降值呈现中间大两边小的特点, 即4号桩产生的沉降值最大, 1号桩产生的沉降值最小; 方案2在差异沉降上最大, 达到了30 mm左右; 方案3差异沉降值最小, 仅为10 mm左右, 因此, 应避免在群桩设计时, 将中间桩设置为短桩而边桩设置长桩的设计方法。

4.3 不同桩土刚度比 E_p/G_1 下差异沉降对比分析

图11为6种不同群桩基础在不同 E_p/G_1 、行变换方式下, 本文优化算法与数值模拟法对差异沉降比 ψ 对比分析图。从图11中可以看出, 所有群桩基础设置方案的差异沉降 ψ 率随着 E_p/G_1 的增大而不断减小; 本文优化算法与数值模拟法的结果较为接近, 证明本文优化算法的准确性, 本文优化算法的结果稍大于数值模拟结果; 只有方案2、6的差异

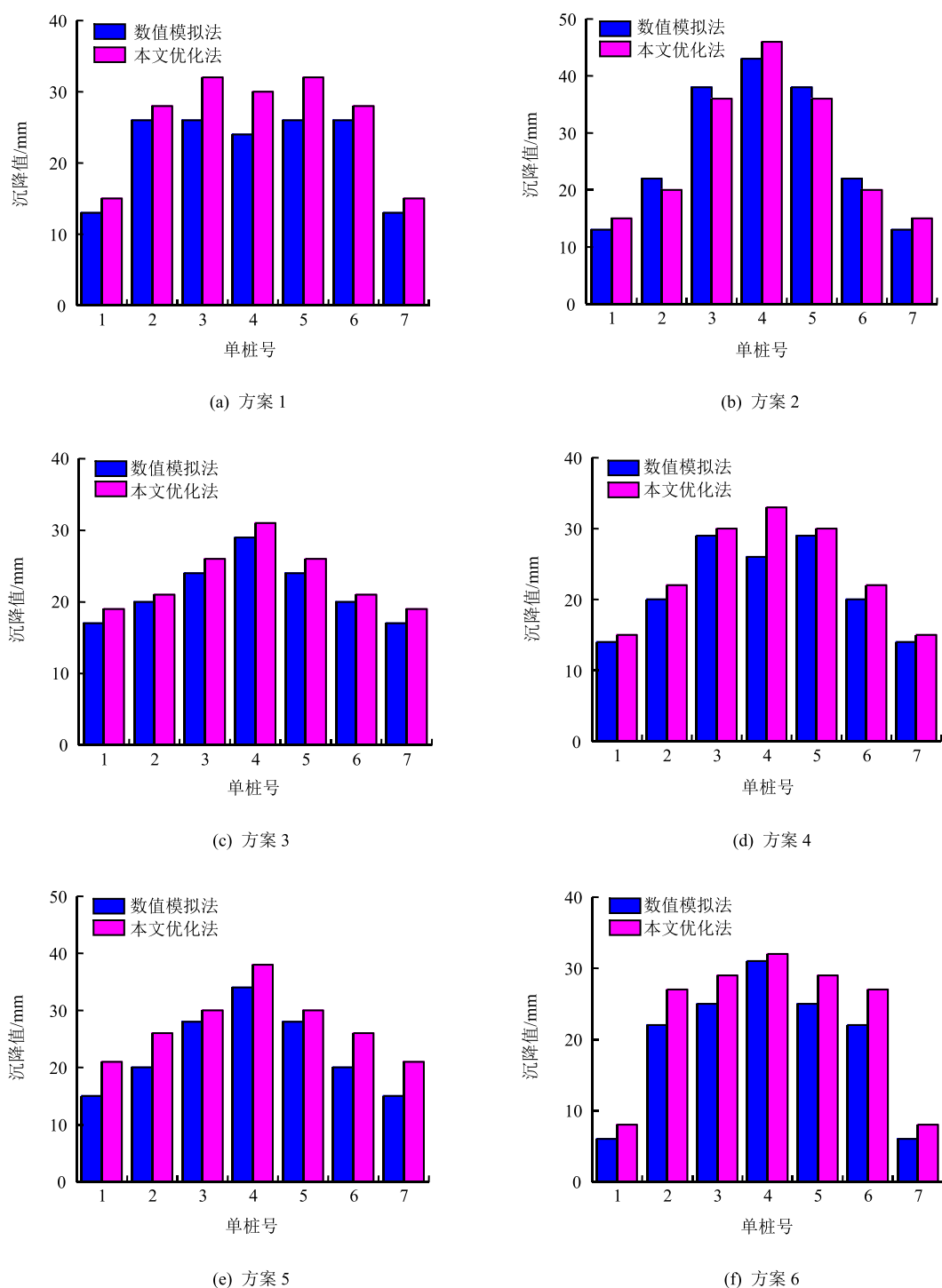


图 10 不同方案典型桩沉降图

Fig.10 Representative piles settlement of different pile groups

沉降比 ψ 始终大于1, 这表明这两种群桩基础设置方案无法减小基础差异沉降, 因此, 在进行群桩设置时应摒弃这样的方案。

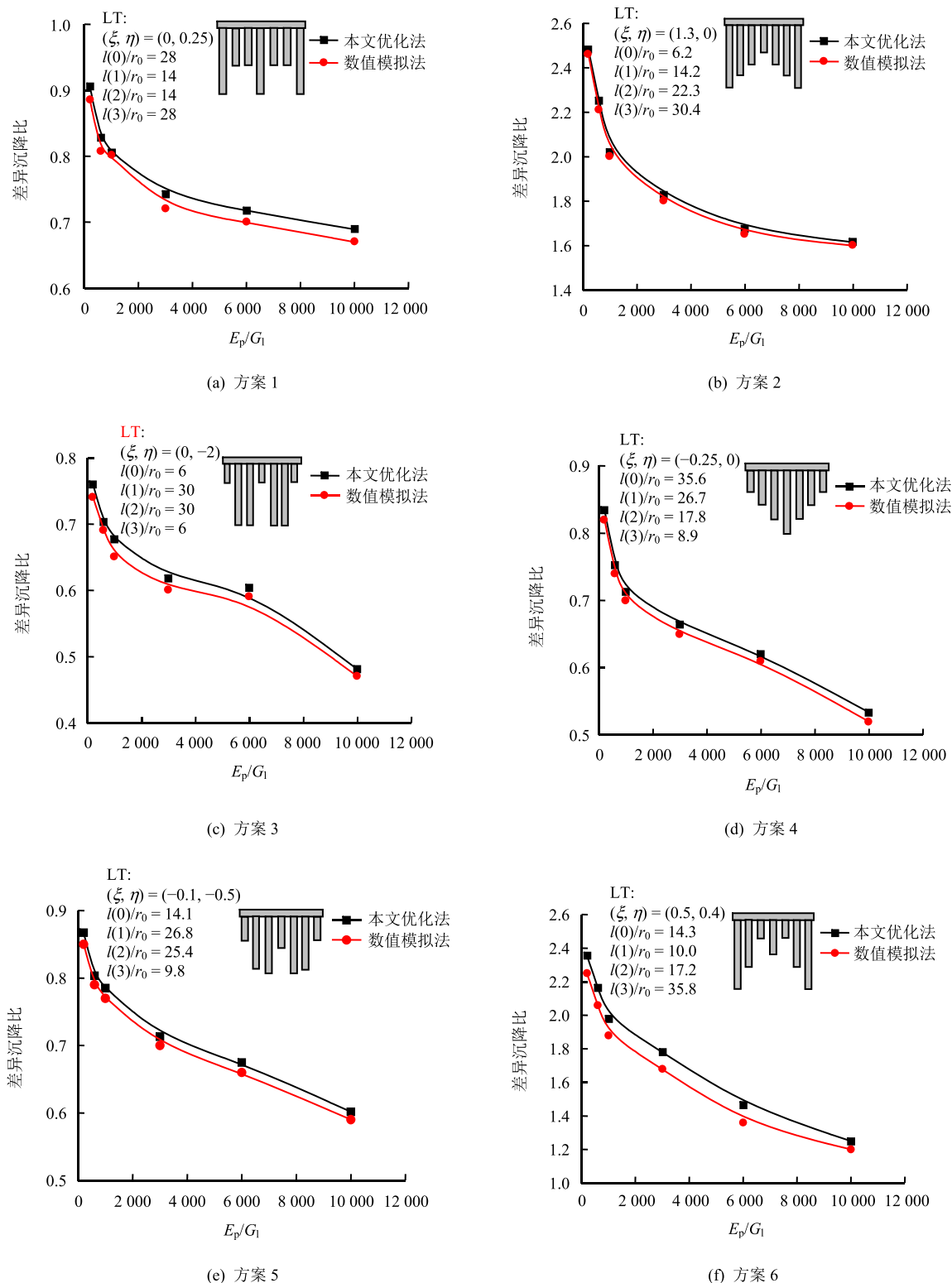
5 参数分析

5.1 桩土刚度比、桩间距归一化比值对基础轴向刚度比影响分析

本文主要针对图8的6种群桩基础在不同 E_p/G_1

下, 桩间距归一化比值 $s/r_0=5$ 、 $s/r_0=8$ 时的基础刚度变化规律。

图12为6种群桩基础在行变换方式下, 基础轴向刚度比 ϕ 随桩土刚度比 E_p/G_1 、桩间距归一化比值 s/r_0 变化规律图。从图12(a)中可以看出, 随着 E_p/G_1 比值的不断增大, 群桩基础轴向刚度比也不断增大; 不同布桩方式的群桩基础在相同的 E_p/G_1 条件下, 轴向刚度比并不相同; 6种群桩设置方案中, 随着

图 11 不同 E_p/G_1 下群桩基础差异沉降比对比Fig.11 Comparison for differential settlement ratio of pile groups under different E_p/G_1

E_p/G_1 的不断变化, 方案 3、5、6 基础轴向刚度比 ϕ 始终较大, 这表明这 3 种群桩基础方案在增加基础轴向刚度上是合理可行的。从图 12(b)中可以看出, 在 s/r_0 从 5 增加至 8 后, 即桩与桩轴线之间的距离变大, 方案 3 的轴向刚度比 ϕ 并不是最大, 此时方

案 6 的轴向刚度比 ϕ 相较其他形式的群桩基础, 轴向刚度比 ϕ 为最大, 这说明 s/r_0 同样对基础轴向刚度比 ϕ 有一定的影响。

图 13 为 6 种群桩基础在平面变换方式下, 基础轴向刚度比 ϕ 随 E_p/G_1 、 s/r_0 变化规律图。从图中可

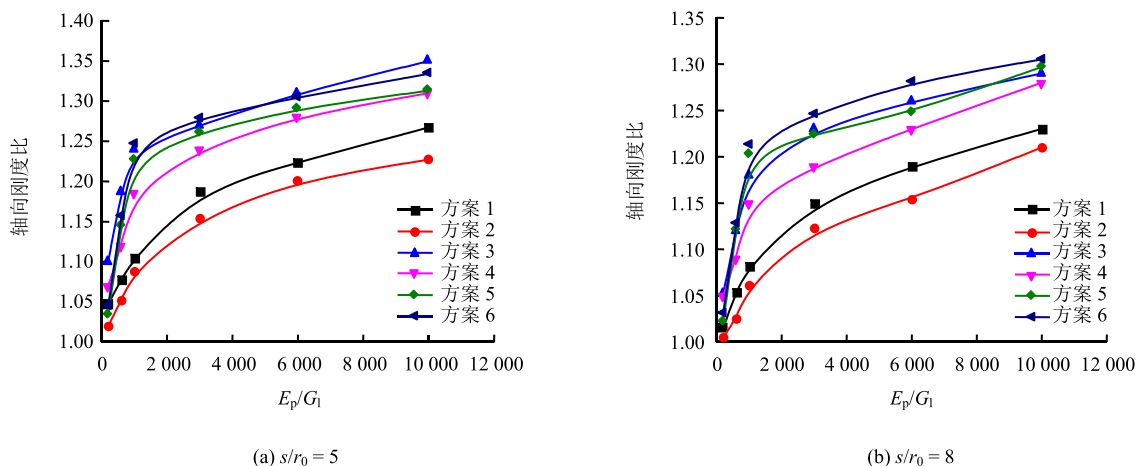


图12 行变换方式下不同群桩基础轴向刚度比

Fig.12 Axial stiffness ratio of different pile groups under line transformation

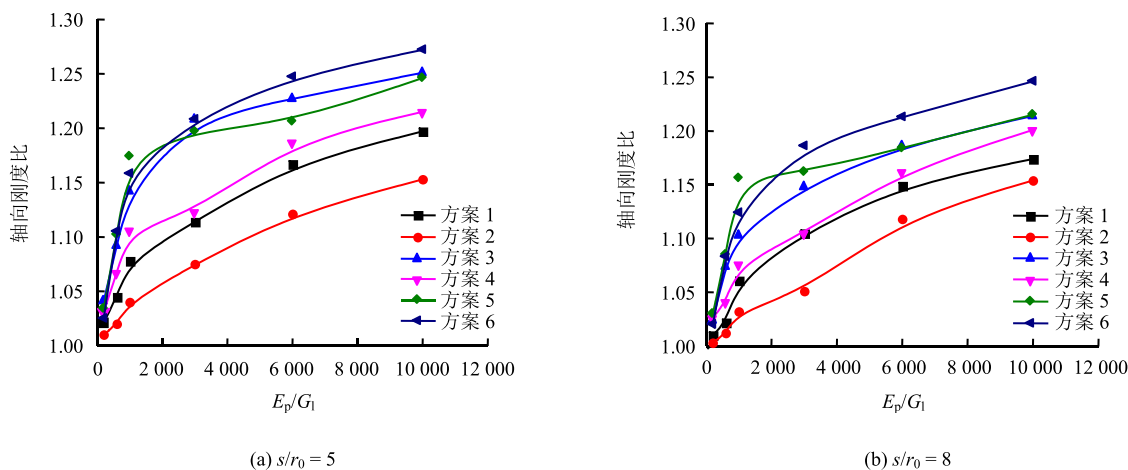


图13 平面变换方式下不同群桩基础轴向刚度比

Fig.13 Axial stiffness ratio of different pile groups under squared transformation

可以看出,随着 E_p/G_1 比值的不断增大,群桩基础轴向刚度比也不断增大;不同布桩方式的群桩基础在相同的 E_p/G_1 条件下,轴向刚度比 ϕ 并不相同;在 $s/r_0 = 5$ 、 $s/r_0 = 8$ 的条件下,6 种群桩基础中方案 6 基础轴向刚度比 ϕ 均最大,方案 2 基础轴向刚度比最小,这说明优化方案 2 对基础轴向刚度比的增加贡献并不明显,但方案 6 对群桩基础在轴向刚度增加上更为合理可行;同群桩基础进行行变换方式相比,在对基础进行平面变换后,基础轴向刚度比 ϕ 增加的绝对值有所减小,这表明行变换方式在增加基础轴向刚度上更适合选择。

图 14 为 6 种群桩基础在不同变换方式、不同 E_p/G_1 、 s/r_0 下,轴向刚度比变化规律图。从图中可以看出,在每个方案内部,当变换方式和 E_p/G_1 一定时,基础轴向刚度比 ϕ 随着 s/r_0 的减小而不断增大;随着 E_p/G_1 的增加,每种群桩基础的轴向刚度比 ϕ 也随之增长;当 E_p/G_1 低于 1 000 时,6 种群桩

基础的基础轴向比 ϕ 较为接近,当 E_p/G_1 增加至 6 000 后,群桩基础在 6 种工况下的基础轴向比 ϕ 差别较大;在不同方案内采用行变换优化方式对基础刚度增加影响大于平面变换优化方式,通过行变换方式的群桩基础轴向刚度比比平面变换方式下增加了 13% 左右,这说明在增加基础刚度的角度上,采用行变换优化方式更加明显有效。

5.2 桩土刚度比、桩间距归一化比值对基础差异沉降影响分析

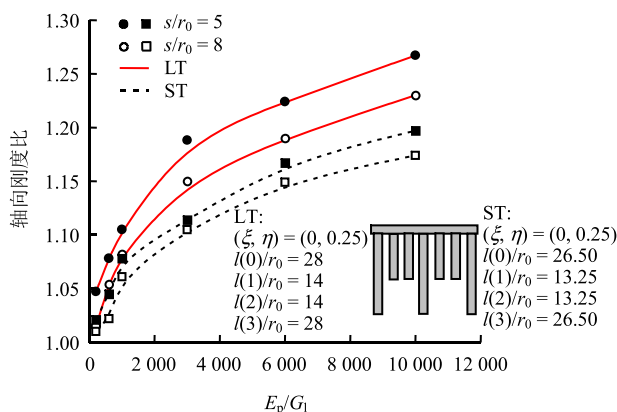
本文主要针对图 8 的 6 种群桩基础在不同桩土刚度比 E_p/G_1 下,桩间距归一化比值 $s/r_0 = 5$ 、 $s/r_0 = 8$ 时的基础差异沉降比的变化规律。

图 15 为 6 种群桩基础采用行变换优化方式下,基础差异沉降比 ψ 随桩土刚度比 E_p/G_1 、桩间距归一化比值 s/r_0 的变化规律。从图中可以得知:并不是所有的群桩在进行优化后,差异沉降比 ψ 较均匀布桩时都会减小,方案 2 与方案 6 的差异沉降更加明

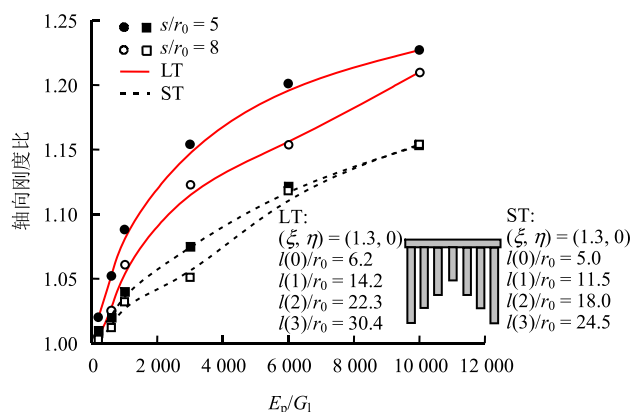
显,尤其在桩土刚度比较小时,这种差异沉降更加明显;方案1、3、4、5均使得差异沉降比 ψ 小于均匀布桩时的差异沉降比,即基础在这几种布桩方案下会“受益”;当桩土刚度比 E_p/G_1 较小时,桩间距的改变对群桩基础的差异沉降不明显;方案3的群桩基础同均匀布桩时的群桩基础相比,差异沉降比 ψ 减小了接近40%,这使得整个群桩基础大幅“受益”。因此,优化群桩基础桩长时不仅应考虑基

础轴向刚度比 ϕ 的相对增加,也应将减小基础差异沉降比 ψ 作为优化的重要因素。

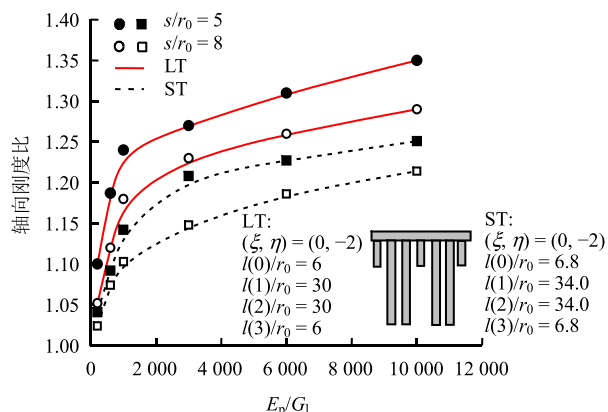
图16为6种群桩基础采用平面变化方式下,基础差异沉降比 ψ 随桩土刚度比 E_p/G_1 、桩间距归一化比值 s/r_0 变化规律图。从图中可以得知:与行变换方式相比,各个方案的差异沉降比 ψ 的数值均有所减小,方案2与方案6差异沉降比仍大于1,但是在差异沉降比 ψ 数值上减小了10%左右;方案3、4、



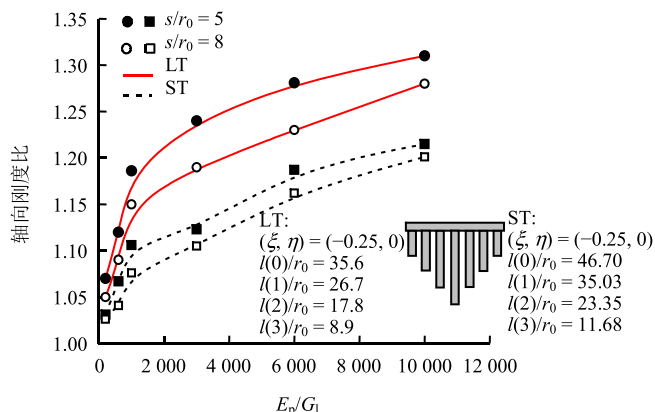
(a) 方案1



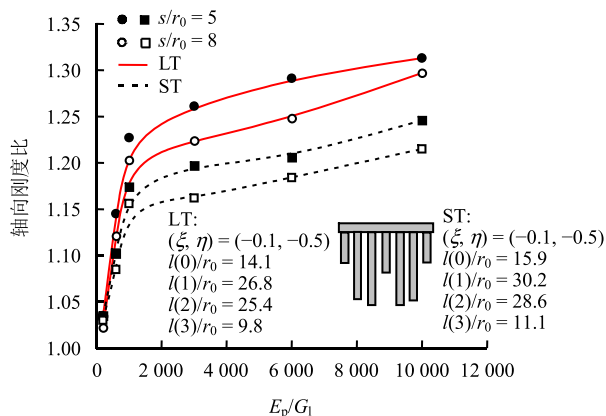
(b) 方案2



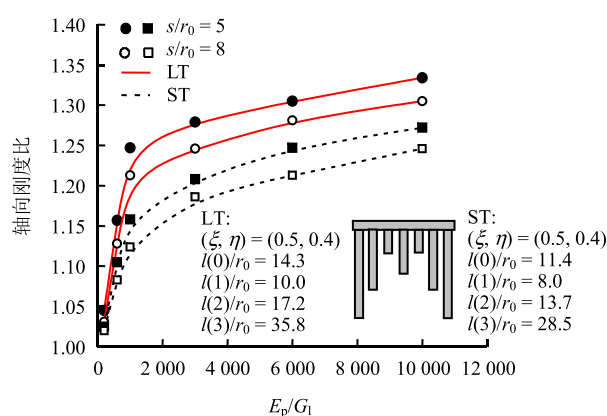
(c) 方案3



(d) 方案4



(e) 方案5



(f) 方案6

图14 不同变换方式对基础轴向刚度比影响图

Fig.14 Influence of different transformation methods on the axial stiffness ratio of pile group

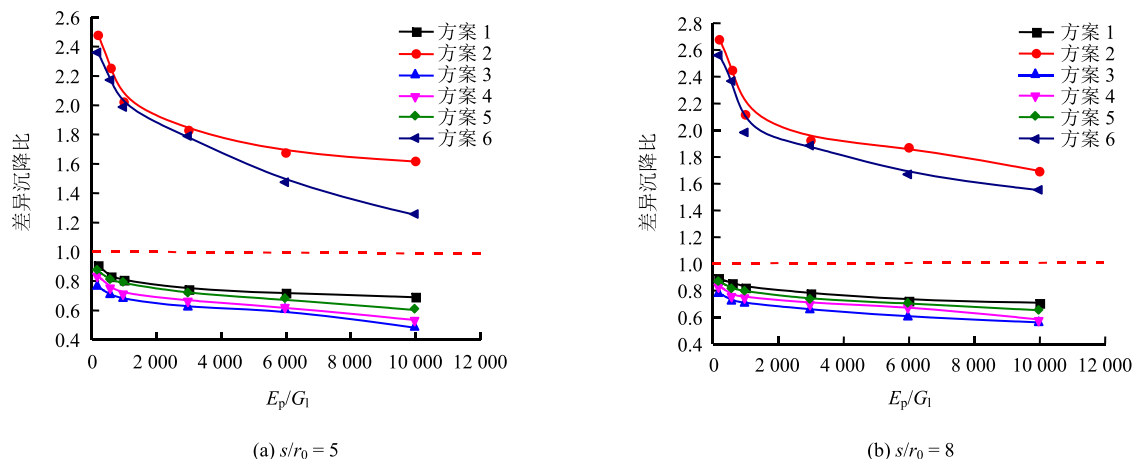


图 15 行变换方式下不同群桩基础差异沉降比

Fig.15 Differential settlement ratio of different pile groups under line transformation

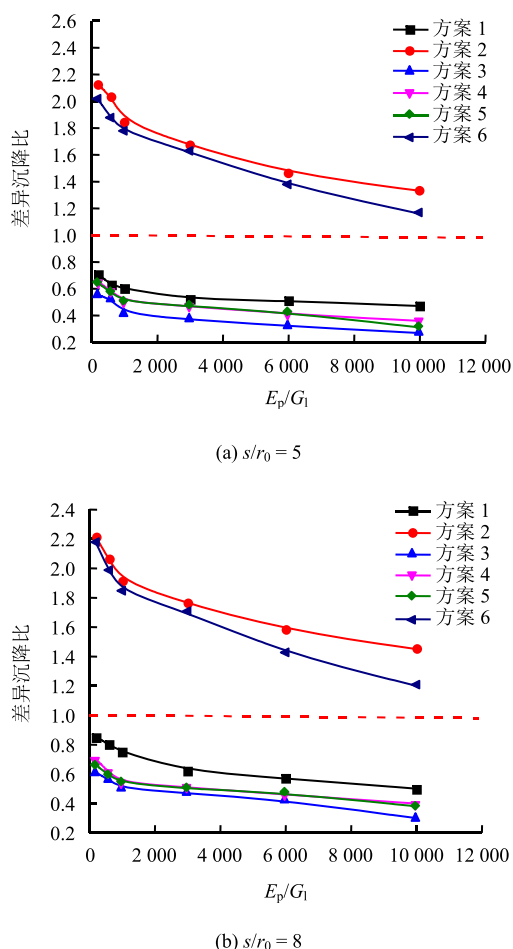


图 16 平面变换方式下不同群桩基础差异沉降比

Fig.16 Differential settlement ratio of different pile groups under squared transformation

5 的差异沉降比 ψ 在桩土刚度比 E_p/G_1 较小时较接近, 方案 3 差异沉降比仍然保持最小, 群桩基础“受益”最多, 此外, 方案 3 的差异沉降比 ψ 数值也有一定的减小; 增大桩间距后, 各群桩基础差异沉降比 ψ 有所增加, 但增加幅度很小; 从减小基础差异

沉降的角度上考虑优化方案时, 采用平面变换的优化方式比行变换方式可以更为显著地减小群桩基础差异沉降比, 基础“受益”更多。

图 17 为 6 种群桩基础在不同变换方式、不同桩土刚度比 E_p/G_1 、不同桩间距归一化值 s/r_0 下, 差异沉降比 ψ 的变化规律。从图中可以看出, 在每个方案内部, 采用平面变换的优化方式同采用行变换方式对基础差异沉降的减小效果最为明显; 变换方式的不同对群桩基础差异沉降比 ψ 的影响远大于其余因素对基础的影响; 在每个群桩基础内, 基础差异沉降比 ψ 随均随着桩土刚度比 E_p/G_1 的增大而不断减小; 在每个方案下, 基础差异沉降比 ψ 随桩间距的减小而减小。因此, 对于设定的某种群桩基础, 建议通过平面变换来减小基础差异沉降。

6 结 论

本文从增大群桩基础刚度和减小群桩基础差异沉降的角度出发, 将群桩基础中单桩位移函数与桩长优化函数相结合, 分别对群桩基础采取行变换、平面变换的方式, 并根据群桩基础桩长优化函数设置 6 种典型群桩基础, 得出 7×7 群桩基础方案下群桩基础轴向刚度比、差异沉降比的变化规律。主要有以下几点结论:

(1) 在群桩基础设计中, 均匀等长布桩所造成的不良结果可通过改变群桩基础桩长来得以改善。

(2) 在增加基础轴向刚度比上, 方案 3、6, 即 $(\xi, \eta) = (0, -2)$ 、 $(\xi, \eta) = (0.5, 0.4)$ 时, 效果最佳, 不建议采用方案 2, 即 $(\xi, \eta) = (1.3, 0)$; 在减小差异沉降上, 方案 3、4、5, 即 $(\xi, \eta) = (0, -2)$ 、 $(\xi, \eta) = (-0.25, 0)$ 、 $(\xi, \eta) = (-0.1, -0.5)$ 效果较好, 不建议采用方案 2、6, 即 $(\xi, \eta) = (1.3, 0)$ 、 $(\xi, \eta) =$

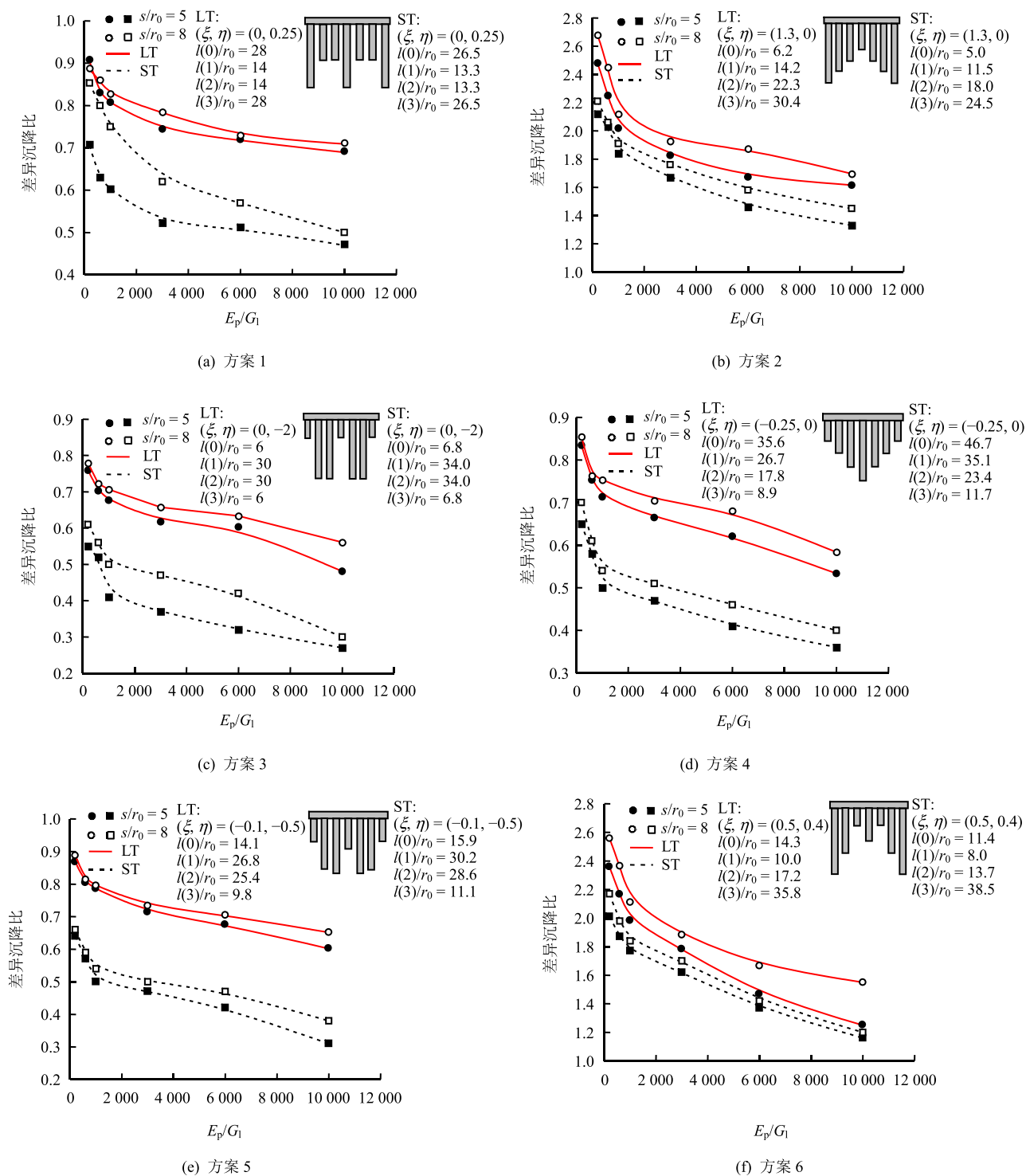


图 17 不同变换方式对基础差异沉降比影响图

Fig.17 Influence of different transformation methods on the differential settlement ratio of pile group

(0.5, 0.4)。

(3) 在对群桩基础进行优化时,应考虑优化目的究竟是增加基础刚度还是减小基础差异沉降,当优化目的是为了增加基础刚度时,可采用行变化方式对基础进行优化;当优化目的是为了减小基础差异沉降时,可采用平面变化方式对基础进行优化。

(4) 无论哪种优化方式,群桩基础轴向刚度比

均随着桩土刚度比的增加而增加,而差异沉降比随着桩土刚度比的增加而减小;群桩基础轴向刚度比随着桩间距的增加而减小,而差异沉降比随着桩间距的增加而增大。

(5) 本文考虑在竖向荷载作用下复杂群桩基础刚度和沉降特点,优化结果尽管具有一定代表性,但在优化设计中,群桩布置形式不只是简单的几何

形态变化, 还要根据上部结构荷载的大小、重心、均匀程度等从变刚度角度对桩基进行重布置, 也应考虑进一步考虑承台刚度影响。在将来研究中, 将考虑承台对群桩基础的影响, 并将理论优化结果同工程实际相结合。

参考文献

- [1] RANDOLPH M F, WROTH C P. An analysis of the vertical deformation of pile groups[J]. **Geotechnique**, 1979, 29(4): 423—439.
- [2] SHEN W Y, CHOW Y K, YONG K Y. A variational approach for vertical deformation analysis of pile group[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1997, 21(11): 741—752.
- [3] 王伟, 杨敏. 基于变分原理的群桩位移计算方法[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1072—1076.
WANG Wei, YANG Min. Calculation method of group pile displacement based on variational principle[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(9): 1072—1076.
- [4] 张瑜, 吴江斌, 蔡永昌. 考虑桩径和桩侧摩阻力分布的改进 Geddes 桩基沉降分析方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2): 406—412.
ZHANG Yu, WU Jiang-bin, CAI Yong-chang. Improved settlement analysis method of Geddes pile foundation considering pile diameter and pile side friction resistance[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Suppl.2): 406—412.
- [5] HORIKOSHI K, RANDOLPH M F. A contribution to optimum design of pile rafts[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(3): 301—317.
- [6] KIM K N, LEE S H, KIM K S, et al. Optimal pile arrangement for minimizing differential settlements in piled raft foundations[J]. **Computers and Geotechnics**, 2001, 28(4): 235—253.
- [7] LEUNG Y F, KLAR A, SOGA K. Theoretical study on pile length optimization of pile groups and piled rafts[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(2): 319—330.
- [8] 梁发云, 陈海兵. 基于 cut-off 方法刚性承台下群桩基础优化分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 61—65.
LIANG Fa-yun, CHEN Hai-bing. Optimization analysis of pile group foundation under rigid pile cap based on cut-off method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Suppl.1): 61—65.
- [9] LIANG F, SONG Z. BEM analysis of the interaction factor for vertically loaded dissimilar piles in saturated poroelastic soil[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 62: 223—231.
- [10] NAKANISHI K, TAKEWAKI I. Optimum pile arrangement in piled raft foundation by using simplified settlement analysis and adaptive step-length algorithm[J]. **Geomechanics and Engineering**, 2013, 5(6): 519—540.
- [11] 刘金砺, 邱明兵, 秋仁东, 等. Mindlin 解均化应力分层总和法计算群桩基础沉降[J]. 土木工程学报, 2014, 47(5): 118—127.
LIU Jin-li, QIU Ming-bing, QIU Ren-dong, et al. Calculation of settlement of pile group foundation by Mindlin solution of uniformized stress stratification[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2014, 47(5): 118—127.
- [12] 张忠苗, 杨淼, 房凯, 等. 考虑桩身压缩的综合系数法计算超长桩基础沉降[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 793—798.
ZHANG Zhong-miao, YANG Miao, FANG Kai, et al. Calculation of settlement of super-long pile foundation considering comprehensive compression method of pile compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 793—798.
- [13] 高盟, 高广运, 杨成斌, 等. 层状地基群桩沉降计算的剪切位移解析算法[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1072—1077.
GAO Meng, GAO Guang-yun, YANG Cheng-bin, et al. Analytical algorithm of shear displacement calculation for settlement of piles in layered soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(4): 1072—1077.
- [14] 乔志炜, 宰金珉, 黄广龙. 控制差异沉降的复合桩基优化设计方法[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(5): 818—821.
QIAO Zhi-wei, ZAI Jin-min, HUANG Guang-long. Optimization design method of composite pile foundation for controlling differential settlement[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2006, 2(5): 818—821.
- [15] LEUNG Y F A, KLAR A, SOGA K, et al. Superstructure-foundation interaction in multi-objective pile group optimization considering settlement response[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2017, 54(5): 1408—1420.

- [16] GHALESARI A T, CHOBBASTI A J. Numerical analysis of settlement and bearing behaviour of piled raft in Babol clay[J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2016, 2(3): 132—140
- [17] SAMANTA M, BHOWMIK R. 3D numerical analysis of piled raft foundation in stone column improved soft soil[J]. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 12(1): 43—50.
- [18] 林智勇, 戴自航. 由单桩载荷试验推算群桩沉降的相互作用系数法[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 155—162.
LIN Zhi-yong, DAI Zi-hang. Calculation of interaction coefficient method for group pile settlement by single pile load test[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(1): 155—162.
- [19] 张武, 迟铃泉, 高文生, 等. 变刚度桩筏基础变形特性试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(7): 94—102.
ZHANG Wu, CHI Ling-quan, GAO Wen-sheng, et al. Experimental study on deformation characteristics of piles with variable stiffness piles[J]. **Journal of Building Structures**, 2010, 31(7): 94—102.
- [20] 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. Calculation of deformation behavior and settlement of pile groups under vertical loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(6): 1—13.
- [21] 秋仁东, 刘金砺, 高文生, 等. 长群桩基础沉降性状的大比例尺模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(3): 85—95.
QIU Ren-dong, LIU Jin-li, GAO Wen-sheng, et al. Large scale model test study on settlement behavior of long pile group foundation[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2015, 48(3): 85—95.
- [22] 中国建筑科学研究院. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
China Academy of Building Research. JGJ 94—2008 Technical specifications for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
-
- 上接第 2353 页
- [92] Jiang S H, LI D Q, CAO Z J, et al. Efficient system reliability analysis of slope stability in spatially variable soils using Monte Carlo simulation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2015, 141(2): 04014096.
- [93] 杨鸽, 朱晟. 考虑堆石料空间变异性的土石坝地震反应随机有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1822—1832.
YANG Ge, ZHU Sheng. Seismic response of rockfill dams considering spatial variability of rockfill materials via random finite element method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(10): 1822—1832.