

doi: 10.3969/j.issn.1007-2861.2011.03.022

· 研究简报 ·

挤扩支盘桩的数值模拟及变刚度调平应用

米晓庆, 朱杰江

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

摘要: 差异沉降是群桩复合地基研究中一个不容忽视的问题, 往往使得结构产生不良内力. 传统的解决方法是采用改变桩长、桩距、桩径等来实现地基的刚度调平. 支盘桩是一种具有高承载力和低沉降量特性的新型桩, 通过差分分析软件 FLAC 3D 对挤扩支盘桩、基础、土层共同作用进行模拟, 并对挤扩支盘桩的参数进行敏感性分析, 最终达到减少和消除差异沉降的目的, 使结构布置更加合理.

关键词: 挤扩支盘桩; 变刚度调平; 差异沉降; 数值模拟

中图分类号: TU 473.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-2861(2011)03-0325-06

Numerical Simulation of Squeezed Branch and Plate Pile and Application to Balance Design for Variable Rigidity

MI Xiao-qing, ZHU Jie-jiang

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Differential settlement of composite foundation cannot be ignored, and often brings undesirable internal force to the structure. Traditional solutions are to change length, spacing, and diameter of the pile to achieve even foundation stiffness. Squeezed branch pile is a new type of pile with high pile capacity and low settlement. This paper simulates the interaction between squeezed branch pile and soil using the finite difference analysis software FLAC 3D, and get the best solution to reduce, or even eliminate, differential settlement, leading to a more reasonable structural arrangement.

Key words: squeezed branch pile; balance settlement for variable rigidity; differential settlement; numerical simulation

地基的不均匀沉降是引起土木、建筑工程事故的主要原因之一. 实测表明, 基础沉降存在碟形分布特征, 导致基础内力和上部结构次生应力增加, 板厚和配筋增多, 从而对上部结构产生不利影响. 一般情况下, 在承受均匀荷载的柔性筏板中部设置桩群, 将极大地减少筏板的差异沉降. 目前, 国内多层、高层建筑桩基设计一般采用“变桩长、变桩径、变桩

距”^[1](即变刚度)等设计方法, 必要时以增加筏板厚度来增加筏板中部区域的刚度, 从而使得中部沉降减少, 沉降趋于均匀^[2]. 采用以上方法, 虽然能够有效减少地基的不均匀沉降, 但增加了工程材料的使用, 加大了工程投入. 挤扩支盘桩又称 DX 桩, 是一种新型桩, 其承载力和刚度大大优于同等长度的普通灌注桩^[3], 本研究通过有限差分软件 FLAC 3D

对挤扩支盘桩进行模拟,对挤扩支盘桩的参数进行敏感性分析,包括支盘位置、盘径大小和数量对桩的承载力的影响,以及支盘与桩的相互作用,找到最优的挤扩支盘桩的模型.同时,地基采用挤扩支盘桩和普通灌注桩共同承担上部荷载,可有效减少地基的不均匀沉降.

1 挤扩支盘桩的理论计算与实测对比

挤扩支盘桩是在原有等截面钻孔灌注桩基础上发展起来的一种变截面灌注桩.支盘桩和直桩的受力性能的比较如图1所示^[4].

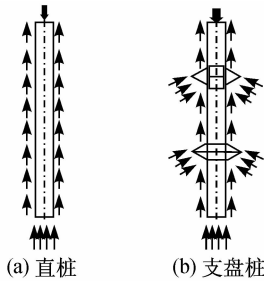


图1 支盘桩和直桩的受力性能的比较

Fig. 1 Comparison of the behavior between DX pile and straight pile

支盘桩通过专用设备在桩身不同高度设置盘和分支,扩大端承面积,以此提高承载力.众多研究表明,挤扩支盘桩的荷载-沉降曲线呈缓变型,沉降曲线表现出摩擦端承桩的特征.但是,由于桩身多个承力盘和分支的存在,使支盘桩的破坏模式与普通端承桩有所不同.

北京某商业住宅区为2座地上28层、地下3层的塔楼,工程地基采用筏板基础,桩型采用挤扩支盘桩^[5].桩径650 mm,桩长19.5 m,桩端挤扩支盘桩,桩身2处挤扩成盘,挤扩盘直径1400 mm,如图2所示.

本研究采用FLAC 3D有限差分法建模.如图3所示,模型区域 x, y 方向宽度为20 m, z 方向宽度为30 m,桩长为19.5 m.网格随土体与桩距离的缩短而逐渐加密,为了更加真实有效地模拟支盘效果,在 z 方向按支盘所在的深度进行加密.

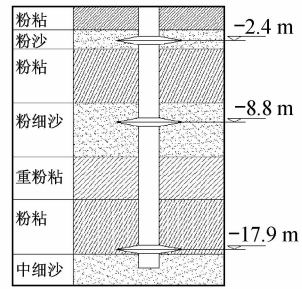


图2 挤扩桩剖面图

Fig. 2 Profile of DX pile

模型基本条件如下:桩体和地基土为空间轴对称,桩土间设置面-面接触,桩体采用线弹性模型,地基土采用Mohr-Coulomb模型.材料的体积模量 K 、弹性切变模量 G ^[6]分别表示如下:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (2)$$

地基土根据工程地质实测确定,其Mohr-Coulomb模型的参数以及土层参数如表1所示^[3].数值模拟结果如表2所示.

表1 桩土材料参数

Table 1 Pile-soil parameters

土名	深度/m	E /MPa	泊松比	体积模量 K /MPa	切变模量 G /MPa
粉粘	1.65	9.7	0.40	16.17	3.6
粉砂	1.49	24.5	0.22	14.58	10.0
粉粘Ⅱ	4.16	16.0	0.45	53.33	5.5
粉砂Ⅱ	4.14	45.0	0.40	43.33	9.2
重粉粘	3.30	13.6	0.45	45.33	4.6
粉粘	4.18	15.2	0.40	50.67	5.2
粉砂Ⅲ	6.10	26.0	0.38	43.33	9.2
桩	19.50	3 000.0	0.20	—	—

如图4所示,采用FLAC 3D对挤扩支盘桩进行模拟,并与试桩结果进行比较.FLAC分析得出的沉降位移比实际情况偏大,但与实际情况基本吻合.在桩长相同的情况下,由于没有支盘来承担荷载,因此直桩与挤扩支盘桩相比承载效果明显较差,单桩承载力低,一般为挤扩支盘桩的1/6~1/2^[7].而且

表2 挤扩支盘桩FLAC模拟沉降结果

Table 2 Simulation settlement of DX pile with FLAC 3D

荷载/kN	0	1 360	2 040	2 720	3 400	4 080	4 760	5 440	6 120	6 800
模拟沉降值/mm	0	1.24	2.17	3.32	4.55	6.33	8.20	11.47	16.69	22.83

在临近破坏荷载时直桩位移发展迅速,挤扩支盘桩的承载力大大优于普通灌注桩的承载力.挤扩支盘桩单桩的荷载与沉降位移曲线($Q-S$ 曲线)基本上呈缓变型,且呈延性破坏趋势.

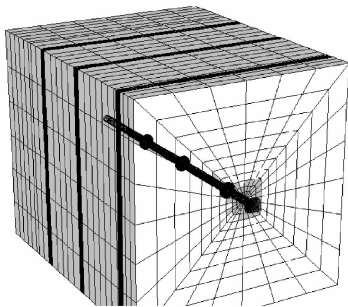


图3 挤扩支盘桩 FLAC 3D 模型

Fig.3 FLAC 3D model graphics of DX pile

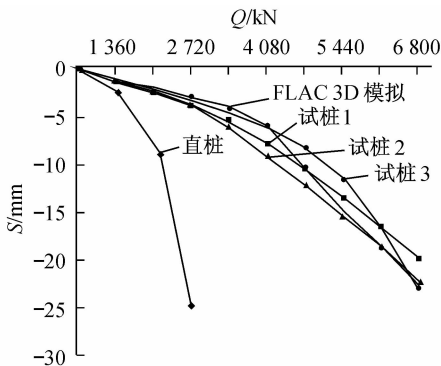


图4 FLAC 3D 模拟结果和试桩结果比较

Fig.4 Comparison between FLAC 3D simulation and experiment under load at all levels

2 挤扩支盘桩的参数敏感性分析

2.1 支盘位置对桩受力性能的影响

用 FLAC 3D 对单支盘的挤扩支盘桩建模,采用单一土层,土层参数 $K = 16.7 \text{ MPa}$, $G = 3.6 \text{ MPa}$,桩长 20 m,桩径 650 mm,支盘半径 700 mm,支盘上端距桩顶分别为 2,4,6,8,10,12,14,16,18 m,对桩顶加载 2 000 kN,结果如图 5 所示.

由图 5 可见,随着支盘位置的降低,沉降值逐渐增大.支盘在桩最低处沉降最大;在距桩顶 2 m 处和 18 m 处支盘承载力最大;在桩中心处支盘承载力最小.当支盘布置在桩中心处时,由于支盘影响在其上部和下部的桩土之间的位移变化,使桩承载力降低.所以,在设计挤扩支盘桩时,应尽量将支盘布置在靠近桩顶和桩底处,这样更有利于桩承载力发挥作用.

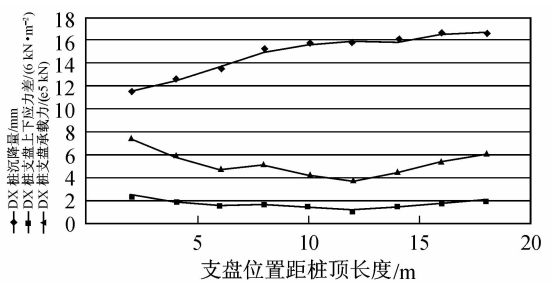


图5 单支盘 DX 桩随支盘位置变化对桩沉降值和支盘受力性能的影响

Fig.5 Effect of different position of plate on the pile settlement value and the performance of the force of plate

2.2 支盘盘径变化对桩受力性能的影响

用 FLAC 3D 对单支盘的挤扩支盘桩建模,采用单一土层,土层参数 $K = 16.7 \text{ MPa}$, $G = 3.6 \text{ MPa}$,桩长 20 m,桩径 650 mm,支盘上端距桩顶 2 m,支盘半径分别为 500,700,900,1 100,1 300 mm,对桩顶加载 2 000 kN,结果如图 6 所示.

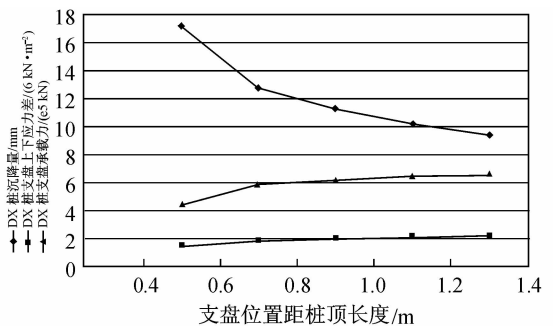


图6 单支盘 DX 桩随支盘盘径增大对桩沉降值和支盘受力性能的影响

Fig.6 Effect of increasing radius of plate on the pile settlement value and the performance of the force of plate

由图 6 可见,随着支盘半径增大,沉降值逐渐减小,这表明半径增大可以有效地控制支盘桩的沉降.支盘半径 $r = 500 \text{ mm}$ 时,支盘的承载力最低;当 $r = 700 \text{ mm}$ 时,支盘承载力显著增大,之后随着支盘半径的增大,支盘承载力变化不大.所以,当 $r = 700 \text{ mm}$ 时,支盘承载力最有效.

2.3 支盘数量对桩承载力的影响

用 FLAC 3D 对单支盘的挤扩支盘桩建模,采用单一土层,土层参数 $K = 16.7 \text{ MPa}$, $G = 3.6 \text{ MPa}$,桩长 20 m,桩径 650 mm,支盘半径 700 mm.分别对 0,1,2,3,4 支盘的 DX 桩的受力性能进行比较,对桩顶逐步加载,结果如图 7 所示.

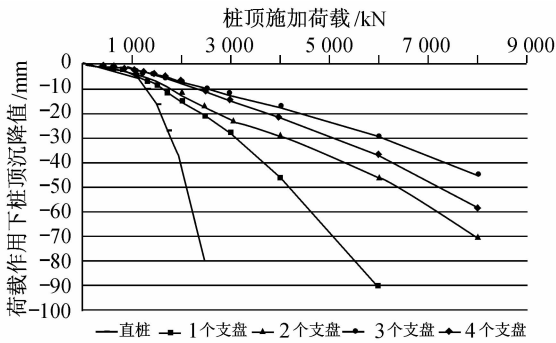


图7 随支盘数量增加 DX 桩沉降值和承载力的关系
 Fig. 7 Relationship between the settlement and the bearing capacity of DX pile as the increase of plate

由图7可见,随着支盘数量的增多,DX 桩承载力增大,但3支盘与4支盘的曲线比较接近,这说明随着支盘数量的增多,承载力不再明显增加.在本模型中,3支盘对桩承载力贡献最有效.直桩时,承载力最小,而且挤扩支盘桩单桩的荷载与沉降位移曲线(Q-S 曲线)基本上呈缓变型曲线;加荷载初期为线性关系,当桩体破坏后,荷载-位移曲线变化平缓.

由图8和图9可以看出,施加荷载较小时,支盘承担荷载总比例及各支盘承担荷载均无明显变化.当荷载达到一定值后,支盘承担荷载总比例增大,各支盘承担荷载亦自下而上依次增大,支盘承担荷载总比例达55%以上.到3支盘发挥极限承载力时,桩顶位移已超过30mm.支盘桩受荷载作用时,桩侧摩阻力先于支盘端阻力发挥作用.支盘发挥极限承载力需较大的相对位移,当土质条件相差不大时,上面支盘先达到极限状态,然后下面支盘依次达到极限状态.

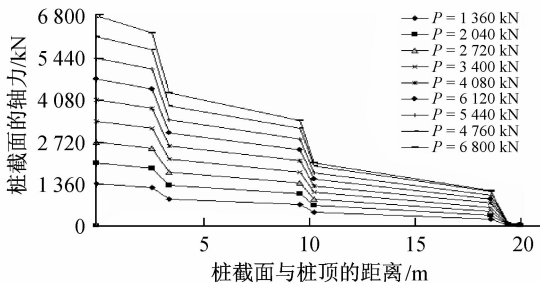


图8 各级荷载下的桩身轴力 Q 与桩的埋深 H 的关系
 Fig. 8 Relationship between Q and H under load at all levels

3 工程算例

3.1 模型基本假定

桩上部结构-基础-地基共同作用体系较为复杂,为了简化计算,引入如下基本假定:

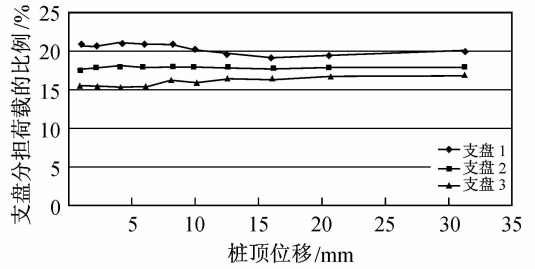


图9 支盘分担荷载比例随位移的变化
 Fig. 9 Branch plate load-sharing ratio graph with the displacement variation

- (1) 筏板基础为线弹性体,采用壳型结构单元,既抗薄膜荷载,又抗弯曲荷载;
- (2) 地基土为筏板下部原状土体共7个部分,并均采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型;
- (3) 加固区及周围土体、筏板与下部土体变形过程中,不产生相对滑动或脱离;
- (4) 不考虑上部结构的刚度,假定基础顶面的荷载均匀分布.

3.2 模型的选取

本研究采用岩土工程软件 FLAC 3D 对桩筏共同作用进行模拟,土层主要为粉质粘土及砂层.基础采用挤扩支盘桩的技术,整个模型的筏板尺寸改为 17 m × 17 m,筏板板厚 0.3 m,为柔性筏板.桩径 0.65 m,支盘半径 1 400 mm.板下共 7 个土层,将上部结构传至基础顶面的荷载假定为均布荷载,量值取为 250 kPa,且桩是对称布置的,所以在进行数值分析时,取地基整体的 1/4 建立 FLAC 3D 计算模型进行计算.计算模型的影响宽度取 3B (B 为筏板宽度).筏板桩的布置如图 10 所示.

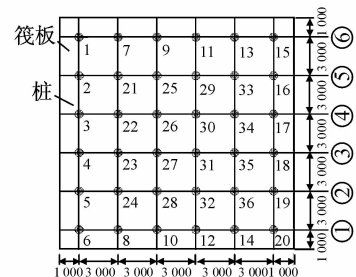


图10 筏板桩的布置图
 Fig. 10 Layout of raft and pile

以下分3种情况进行讨论.

情况1 如图11所示,1~20号桩为普通灌注桩,21~36号桩为2个支盘的挤扩支盘桩.图12为筏板中间轴线处桩的沉降图,中间处和边缘处桩的沉降值相差很大,约为12cm,倾角约为0.012°,不能满足变刚度调平的要求.

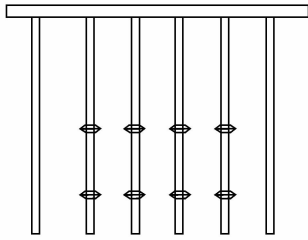


图 11 情况 1 时,筏板、桩在中轴线处剖面图

Fig. 11 Profiles of raft and pile in the axis of case 1

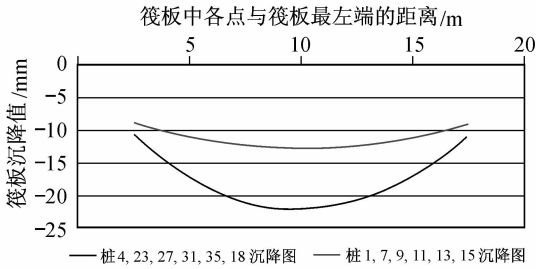


图 12 情况 1 时,筏板中间轴线处和边缘处桩的沉降比较
Fig. 12 Comparison of settlement between pile in the middle and pile at the edge of raft (case 1)

情况 2 如图 13 所示,1~20 号桩为普通灌注桩,21~25 号,28~29 号,32~36 号桩为 2 个支盘的挤扩支盘桩. 26~27 号,30~31 号桩为 3 个支盘的挤扩支盘桩. 图 14 是筏板中间轴线处桩的沉降图,中间处和边缘处桩的沉降值相差 9 mm,相对筏板边缘,中间处沉降较大,倾角约为 0.009°,需要对桩重新布置来改变基础的刚度.

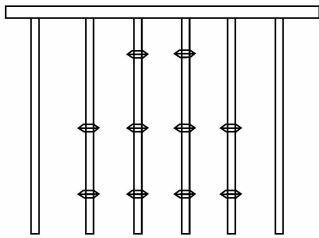


图 13 情况 2 时,筏板、桩在中轴线处剖面图

Fig. 13 Profiles of raft and pile in the axis of case 2

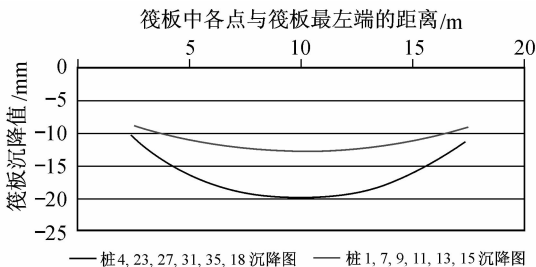


图 14 情况 2 时,筏板中间轴线处和边缘处桩的沉降比较
Fig. 14 Comparison of settlement between pile in the middle and pile at the edge of raft (case 2)

情况 3 如图 15 所示,1~20 号桩为普通灌注桩,21~36 号桩为 3 个支盘的挤扩支盘桩. 图 16 是筏板中间轴线处桩的沉降图,中间处和边缘处桩的沉降值非常接近,约为 4 cm,倾角约为 0.004°,满足了变刚度调平的要求.

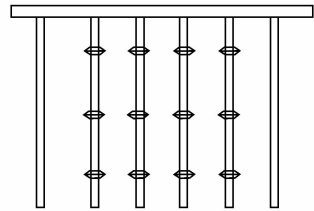


图 15 情况 3 时,筏板、桩在中轴线处剖面图

Fig. 15 Profiles of raft and pile in the axis of case 3

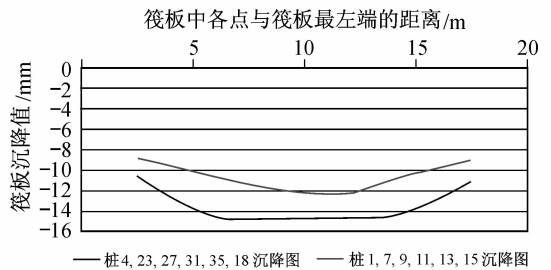


图 16 情况 3 时,筏板中间轴线处和边缘处桩的沉降比较
Fig. 16 Comparison of settlement between pile in the middle and pile at the edge of raft (case 3)

3.3 数值模拟结果分析

最终选取图 15 所示的直桩和支盘桩组合方案,沉降及筏板弯矩云图如图 17 和图 18 所示.可以看出,在桩的布置图轴线中,对角线沉降曲线变化明显筏板中心处沉降值最大,最大值为 15 mm;两侧沉降依次减少,筏板边缘处中部沉降较小,约为 11 mm;筏板 4 个角点处的沉降最小,约为 9 mm.但由于所占面积太小,因此,可以忽略这几个部分对整体结构的影响.集中在中心区域的沉降值大部分比较接近,沉降差比较小,满足变刚度调平的要求,对上部结构所产生的不良内力可以忽略不计.

差异沉降的减小可以明显减少由差异沉降所引起的板的内力分布不均匀^[8].以 x 方向弯矩为例,图 19 表示 x 方向的弯矩.由图可见,筏板的弯矩变化比较平缓,在桩的布置图轴线 2 和 4 中,由于在此处桩的刚度发生了明显的变化,所以弯矩值和其他处的正负方向相反, M_x 约为 $2.5 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$.在整块筏板的大部分区域内,弯矩值接近,弯矩变化比较平缓,变化值不大,对筏板的影响较小;在筏板 4 个角点处弯矩值变化较大,但由于所占面积较小,可忽略不计.

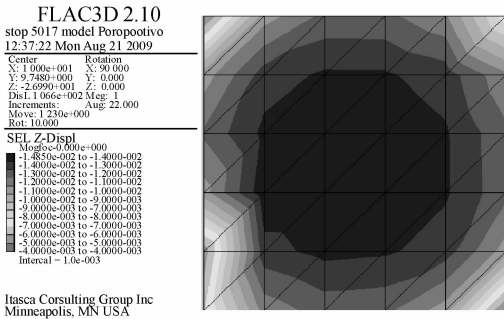


图 17 FLAC 3D 模拟筏板沉降图

Fig. 17 Raft settlement plan with FLAC 3D simulation

(2) 采用普通桩和挤扩支盘桩共同作用,来调节沉降差异效果明显,可有效减少不均匀沉降对结构产生的不利影响.基础中心处的沉降量最大,随着距离的增大,沉降量由中心点向两边逐渐减小;基础角点处的沉降量最小;基础长边的沉降量比基础短边的沉降量大;基础长边上中点的沉降量大,由中点向两边逐渐减小,短边上也有同样的规律.但中间和两边的沉降差值较小,对结构整体产生的不良内力较小.相比于以往的方法,本方法效果明显,并且大大节约了混凝土的用量.

(3) 桩筏基础在通过本方法进行变刚度调平设计后,可以有效减小桩筏基础的沉降差,从而减小筏板的内力及上部结构的次应力,有效降低工程造价.

参考文献:

[1] 徐至钧,张国栋.新型桩挤扩支盘灌注桩设计与工程应用[M].2版.北京:机械工业出版社,2003:81-103.
 [2] 刘金砺,迟铃泉.桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J].岩土工程学报,2003,22(2):151-157.
 [3] 高笑娟,李跃辉.人工挖孔支盘桩承载性状试验研究[J].岩土工程技术,2005,9(3):148-151.
 [4] 刘金砺,黄强,李华,等.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.
 [5] 徐至钧,张晓玲,张国栋.新型桩挤扩支盘灌注桩设计与工程应用[M].北京:机械工业出版社,2007:26-67.
 [6] 彭文斌.FLAC 3D 实用教程[M].2版.北京:机械工业出版社,2007:16-24.
 [7] 赵明伟.竖向荷载作用下挤扩支盘桩的试验研究与理论分析[D].太原:太原理工大学,2002:12-33.
 [8] 贾园,朱杰江.虑变刚度的高层建筑结构空间协同分析[J].上海大学学报:自然科学版,2008,14(3):319-322.

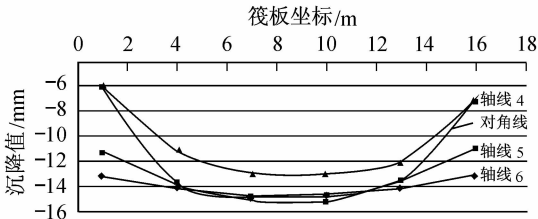


图 18 FLAC 3D 模拟筏板各轴线沉降图

Fig. 18 Raft settlement plan with FLAC 3D simulation on each axis

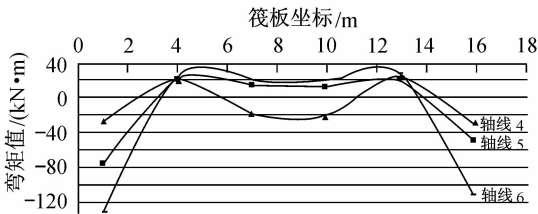


图 19 筏板的各轴线弯矩图 M_x

Fig. 19 Bending moment of raft M_x on each axis

4 结论

(1) 挤扩支盘桩单桩的荷载与沉降位移曲线(Q-S曲线)基本上呈缓变型.在传递过程中,支盘附近处轴力变化急剧降低,这说明支盘处作用力很大,承担的荷载比较多,一般占极限荷载的60%以上.