第24卷第4期 西安工程学院学报 Vol. 24 No. 4
2002年12月 JOURNAL OF XI'AN ENGINEERING UNIVERSITY Dec. 2002

深基坑开挖中双排桩支护结构的数值分析与工程应用

邓小鹏[1,2]，陈征宙[1]，韦　杰[3]

（1.南京大学 地球科学系，江苏 南京 210093；2.东南大学 土木学院，江苏 南京 210096；3.江苏建筑设计研究院，江苏 南京 210029）

[摘要]　采用平面应变线弹性有限单元法，对深基坑双排桩支护结构的内力和变形进行了数值分析，揭示了桩身及连梁刚度、桩长、排距、土体性质等各种因素对双排桩影响的规律，并分析了不同区域的土体加固效果与加固宽度、加固深度之间的关系，为双排桩的优化设计提供了参考依据。

[关键词]　深基坑 双排桩 有限元

[中图分类号]　TU413.62　[文献标识码]　A　[文章编号]　1007－9955(2002)04－0042－06

[作者简介]　邓小鹏(1972－)，男，硕士研究生，以城市环境岩土工程为研究方向。

双排桩支护结构是由两排平行的钢筋混凝土桩及桩顶的连梁形成的空间门式围护体系，具有整体刚度比较大，侧向变形较单排悬臂桩小，不需设置支撑，施工方便等优点，因而在实际工程中得到了广泛的应用[1]。但是双排桩的受力机理比较复杂，其内力和变形受到诸多因素的影响，其设计计算方法还不够成熟。笔者利用平面应变有限元法对双排桩的受力和变形进行了数值分析，为双排桩的优化设计提供了参考依据。

1　有限元分析模式及围护结构、土体参数选取

笔者采用的有限元程序系由南京大学地球科学系编制，采用的计算模型是线弹性二维平面应变，土体、桩身与连梁均采用8结点(其中4个中间结点为自动生成)等参单元，并作如下一些假定。

(1)连梁与前后排桩之间为刚性连接。

(2)不考虑桩间土(如图1中2区土)在排桩作用下的侧向挤出效应。

(3)土体内、土体与桩身及连梁的接触面处均满足变形协调条件。

为方便，假定土体为均质土体，其参数选取如表1。双排桩围护结构的有关参数如表2所示。

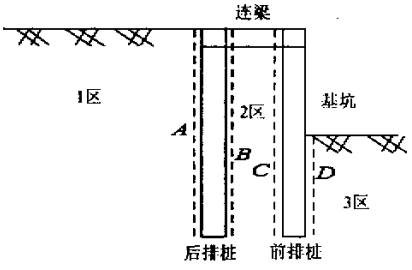


图1　双排桩围护结构示意图

表1　土体参数

弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	内摩擦角 φ/(°)	C/kPa	γ/(kN/m^3)
35	0.35	26.1	12	19.2

表2　围护结构的有关参数

双排桩及连梁弹性模量 E/MPa	双排桩及连梁重度 γ/(kN/m^3)	双排桩及连梁泊松比 μ	桩长/m
28 000	25.0	0.2	16
基坑深度/m	**连梁高度/m**	**桩径/m**	**排距/m**
7.4	0.8	0.8	2.4

2　围护结构及土体的参数对双排桩的影响分析

由桩身及连梁组成的围护结构受力非常复杂，

[收稿日期]　2002－06－30

万方数据

这是因为桩身的工作状态一般为弹性嵌固,在桩后土体侧压力的作用下,桩身产生挠曲变形,引起土侧压力的重新分布,土侧压力的变化又使桩身及连梁的内力发生变化[2]。通过前述的有限元计算模型,笔者运用该程序对影响双排桩的变形及内力的各种参数进行了分析。

2.1　桩身及连梁的影响

图 2 为前排桩桩身刚度分别为 $0.5EI$、$1.0EI$、$1.5EI$、$2EI$ 时的桩身侧向变形。随着前排桩桩身刚度的加大,前排桩最大水平位移减小很快,并且其最大水平位移的位置由桩顶逐渐下移,前排桩桩身最大拉应力由 3.09 MPa 增加到 7.76 MPa,最大压应力也由 2.33 MPa 增加到 6.17 MPa,最大拉压应力作用点逐渐下移;后排桩桩身最大水平位移也逐渐减小,最大拉应力由 3.92 MPa 增加到4.19 MPa,最大压应力由 4.09 MPa 增加到 5.04 MPa,最大拉压应力作用点上移。这说明前排桩桩身刚度增加时,双排桩水平位移将减小,但桩身应力增加,并且前排桩桩身应力增加的幅度大于后排桩。当后排桩桩身刚度增加时,双排桩水平位移也随之减小,前、后排桩的应力都会增加,但后排桩桩身应力增加的幅度大于前排桩。

有连梁的双排桩水平位移较无连梁要小,随连梁的刚度增加桩身水平位移减小,随深度增加,连梁对桩身侧向变形的影响减弱。但从图 3 可以发现,从无连梁到连梁刚度为 $0.5EI$,再到 $1EI$ 时,桩身最大位移减小较快,但从 $1\sim2EI$ 时,桩身最大位移减小并不明显。连梁的刚度增加,虽然使前后排桩的桩顶位移差进一步减小,从而使桩身侧向变形减小,但土体的被动土压力也随之减小,主动土压力随之增大,导致桩身应力增大,使桩身位移有增大的趋势,这就削弱了桩身位移减小的幅度。这说明连梁刚度增加到一定程度时,对桩身水平位移的影响较大,但继续增加,效果并不明显。

图 4 为前排桩的桩长对前排桩侧向变形的影响,桩越长,前后排桩的最大水平位移越小,但减小的程度趋于平缓。增加桩的嵌固深度,可以增加被动土抗力,从而达到减小桩身侧向变形的目的。因此,为了能有效地控制双排桩的侧向变形,必须要有足够的嵌固深度。但是超过一定的入土深度继续增加时,对抑制桩身变形的效果并不明显,反而会增加桩身折断的可能性,同时也掩盖了被动区土体破坏的可能性。后排桩桩长的变化对桩身侧向变形的影响也基本类似。

2.2　排距的影响

排距的变化,将影响到 2 区土体的侧压力变化,从而使双排桩的内力和变形发生变化。图 5,图 6 是排距分别为 $3d$ 和 $8d$(d 为桩径)时 2 区土体在 B、C 线处的土侧压力图,当排距为 $8d$ 时,B 线处的大部分土侧压力(除在 2.5~4.5 m 外)及 C 线处的土侧压力都小于排距为 $3d$ 时的土侧压力,B 线处土侧压力在排距较大时更接近静止土侧压力状态,C 线处的土侧压力则更接近朗肯主动状态。这表明:当排距较大时,后排桩对 2 区土的影响减弱,后排桩侧向变形减小,前排桩侧向变形加大,前排桩通过桩顶连梁将拉力传递到后排桩上,使前后排桩变形趋于一致,其受力形状类似于拉锚桩[3],桩土之间的协同作用将减弱,桩身变形也较大[3],如图 7 中排距为 $8d$ 时的侧向变形较 $3d$ 时大;排距过小,排桩、连梁与桩间土组成围护结构体系的抗弯刚度较小,排桩变形也较大。计算表明:在排距在 $2.5\sim4.5d$ 时,双排桩围护效果最好。

2.3　土体的参数变化对双排桩的受力影响

由于连梁和桩间土的作用,使前后排桩协同作

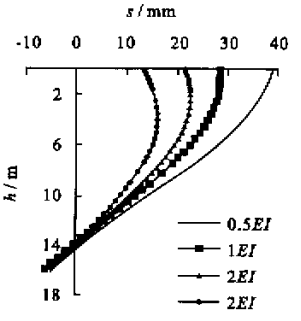


图 2　桩身刚度对桩身变形的影响

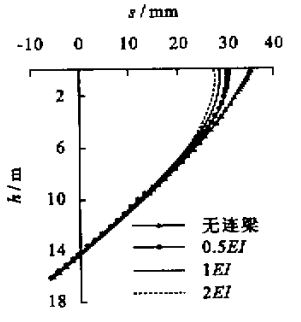


图 3　连梁对桩身变形的影响

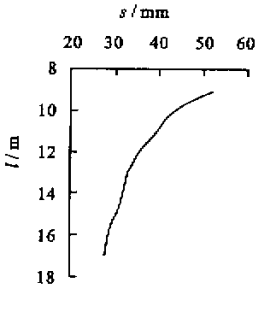


图 4　桩长对桩身变形的影响

万方数据

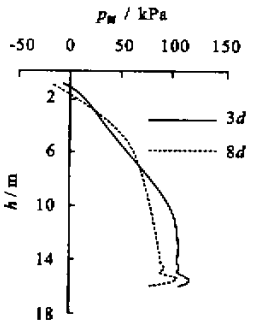


图 5 不同排距时 B 线处土侧压力图

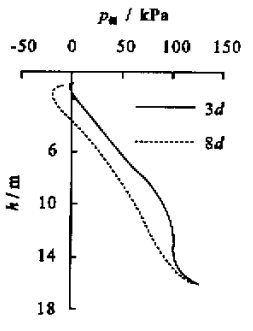


图 6 不同排距时 C 线处土侧压力图

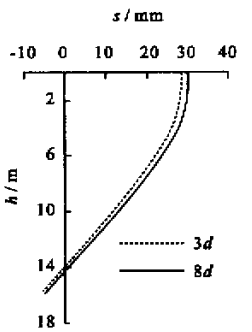


图 7 不同排距时桩身水平位移图

用,前后排桩的水平位移相差很小,以下只分析土体参数的变化对前排桩水平位移的影响。

1 区土体弹性模量增加,将使 A 线处的土侧压力减小,从而使双排桩的侧向变形减小。如图 8 所示,位移减小的趋势减缓。在位移减小的同时,前后排桩桩身最大水平位移的位置分别由桩顶逐渐下移至深度为 1.4 m、1.6 m 处。

如条件允许时,对 1 区土进行加固,也可以收到很好的效果。图 9 为采用水泥搅拌桩进行加固时对双排桩水平位移及 A 线处土侧压力的影响,水泥搅拌桩的弹性模量取 80 MPa,泊松比为 0.28。在考虑加固深度对桩身水平位移的影响时,其加固宽度取 4.8 m。除在桩顶与桩端附近,桩身水平位移增大外,其余都呈减小趋势,但减小的趋势由缓至快最后又减缓。当加固深度由零增至 2.5 m 时,A 线处土侧压力在加固土层与未加固土层之交界面处,满足变形协调条件,但上下土层的弹性模量、泊松比不同,由土体的线弹性本构关系可知,在该处有应力突变,出现土侧压力的峰值,如图 10 所示。与此相对应的,后排桩桩身水平应力在该位置处由于应力集中,也出现桩身水平应力的峰值。在深度 1.0～3.0 m的范围内,加固后的土侧压力大于未加固时的土侧压力,其余则小于未加固时的土侧压力。A 线处土侧压力的合力作用点上移,从而使后排桩向右的挠曲变形加大,通过连梁和桩间土的作用力使前排桩的位移也随之增大。因此,当加固深度为 2.5 m时,双排桩位移反而较未加固时为大。随着 1 区土体加固深度的增加,加固土层与未加固土层之交界面逐渐下移,A 线处土侧压力突变区也逐渐下移,土侧压力的合力减小,且合力作用点下移,因此双排桩侧向变形逐渐减小,在加固深度约 15 m 处侧向变形为最小值。此时后排桩的水平位移零点在深度 14.5 m 处,A 线处土侧压力在位移零点以上为主动状态,在位移零点以下,则处于被动状态。土侧压力突变区使该处处于被动状态的土体侧压力增大,从而减小了双排桩的侧向变形,然而继续增加加固深度时,土侧压力突变区逐渐下移,超过被动土体范围,它对被动状态的土侧压力贡献减小直至为 0,因此桩身水平位移反而增大。其理想加固深度约为桩长的 3/4。

加固宽度对桩身水平位移影响也较大,桩身水平最大位移随加固宽度的增加而逐渐减小,减小的

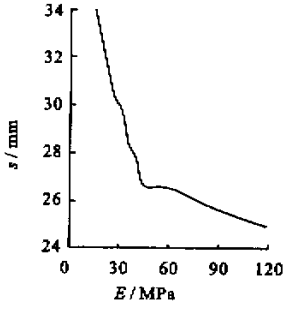


图 8 1 区土体弹性模量对双排桩水平位移的影响图

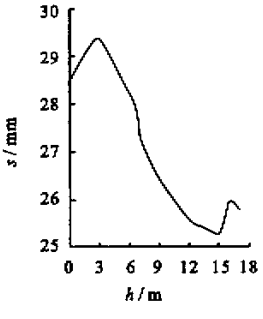


图9 1区土加固深度对双排桩水平位移的影响图

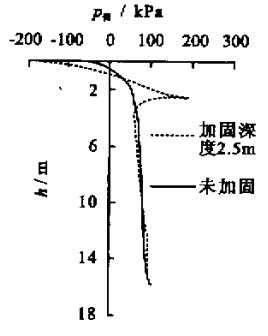


图 10 1 区土加固深度对双排桩 A 线处土侧压力的影响图

幅度减缓,最后趋于一稳定值。随加固宽度增加,1 区土体的受拉区的最大深度逐渐减小,土侧压力合力逐渐减小,合力作用点略有上移。

2 区土处于前后排桩以及连梁三向约束之下,是一个比较稳定的组合体,其受力情况较为复杂。如图 11 所示,随着土体重度的增加,双排桩的水平位移基本上呈线性增加,如能采取一些止水措施使 2 区土体的重度减小,对控制桩身侧向变形的效果是显而易见的。2 区土的弹性模量增加时,双排桩的最大水平位移曲线除在弹模 20～60 MPa 之间有所振荡外,总的趋势仍然是在减小,如图 12 所示。对于出现反复振荡的现象,作者的解释是:2 区土体的弹性模量增加,使 B 线处的土侧压力增加,C 线处的土侧压力减小,这些将使双排桩的位移有减小的趋势,但由于受到 A 线处的土侧压力随桩身水平位移减小而增加、D 线的土侧压力随桩身水平位移减小而减小的影响,这种趋势有所削弱;对于前后排桩可视作桩顶承受水平力、桩身受分布力(桩身两侧净土压力)、桩端嵌固的悬臂梁,由于 2 区土体上半部分水平位移较下半部分大,上半部分土体在 2 区土对桩身的作用中所占的比重增加,这些有可能使前后排桩桩身所受的分布力的合力增加、作用点上移,而使前排桩的侧向变形加大、后排桩的变形减小,但如果前者增加的趋势大于后者减小的趋势,双排桩的侧向变形将加大。由于影响桩身位移增加和减小趋势的因素很多,并且这些因素之间又互相制约,使围护结构与土侧压力的大小与分布不断变化,桩身侧向变形曲线出现反复振荡的现象,但随着 2 区土体弹性模量的继续增加,桩身侧向变形减小的趋势超过了增加的趋势,桩身侧向变形逐渐减小。

由于通常所采用的加固措施,如采用水泥搅拌桩进行加固,其弹性模量可达到 80 MPa,与未加固时相比,仍然可取得理想的效果,同时在 2 区土进行水泥搅拌桩或压密注浆等措施进行加固,亦可取得止水的效果,这在工程实际中应用较多。当采用水泥搅拌桩进行加固时,其弹性模量取 80 MPa,泊松比为 0.28。2 区土加固的深度对桩身位移的影响如图 13 所示,随加固深度增加其最大水平位移曲线在总的减小趋势下也出现反复振荡的现象,其原因也如前所述,在土层交界面处,B 线和 C 线处的土侧压力产生应力突变的极值,与未加固时相比,B 线处土侧压力的合力增加,合力作用点下移,而 C 线处土侧压力的合力减小,但合力作用点上移。这些既可能使双排桩位移增大,又可能使其位移减小,因此在增加和减小的两种趋势作用下,桩身侧向变形出现振荡的现象。

3 区土位于基坑底部,随着 3 区土体弹性模量的提高,它所提供的被动土压力增大,双排桩的水平最大位移明显减小,但减小的趋势减缓。因此可以利用对 3 区土体的加固来减小双排桩的水平位移。其加固的宽度与深度对加固的效果影响很大,随着加固宽度和加固深度的增加,桩身最大水平位移均逐渐减小,但减小的趋势在放缓,并且前后排桩的桩身最大位移由桩顶逐渐下移。其加固深度和宽度在土体的朗肯被动状态范围内效果最好。

3　工程实例

3.1　工程概况

南京市云峰大厦位于太平南路和科巷交叉口。该工程基坑三面临街,南面临老式民宅,西侧为太平南路,人流集中,且地下管网较多,北侧为科巷,东侧为西北菜园,路东为 6～7 层的住宅楼。基坑长约为 120m,宽约为70m,面积约8000m^2,开挖深度为

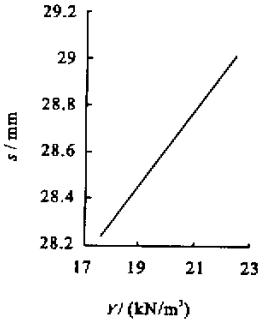


图 11　2 区土体重度变化对双排桩水平位移的影响图

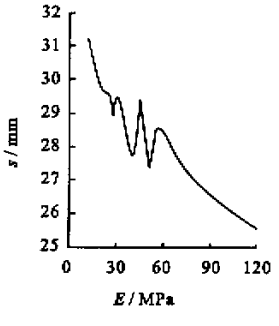


图 12　2 区土体弹性模量对双排桩水平位移的影响图

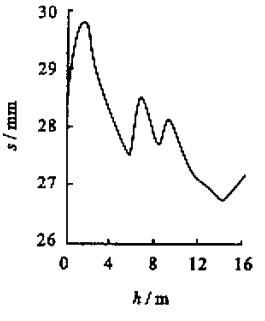


图 13　2 区土加固深度对双排桩水平位移的影响图

万方数据

7.4～13.85 m 不等，土方工程量约 6×10^4 m^3。

场地土体的工程地质有关参数如表 3 所示。

综合考虑本工程的工程地质勘察资料，周围环境条件及基坑的形状因素，所采用的基坑支护方案如图 14 所示。基坑在 AB 段采用 Φ800 双排钻孔灌注桩支护类型，桩长为 16 m，该处基坑开挖深度为 7.4 m，前排桩间距为 1 m，后排桩间距为 2 m，前、后排桩中心距为 2.5 m，前后排桩之间用钢筋混凝土连梁连接起来，连梁高度为 0.8 m，宽度为 0.8 m。其余则采用间距为 1 m 的 Φ800 柱列式钻孔灌注桩加一道钢筋砼内支撑(以角支撑为主，局部辅之以对撑)的支护结构形式，桩长有 15 m 和 17 m两种。止水结构采用连续双排双轴 Φ700 深层搅拌桩墙止水(半封闭)，桩长在 CD 段为 13.5 m，其余段为 13 m。

基坑在 AB 段采用 Φ800 双排钻孔灌注桩支护类型，桩长为 16 m，该处基坑开挖深度为 7.4 m，前排桩间距为 1 m，后排桩间距为 2 m，前后排桩中心距为 2.5 m，前后排桩之间用钢筋混凝土连梁连接起来，连梁高度为 0.8 m，宽度为 0.8 m。其余则采用间距为 1 m 的 Φ800 柱列式钻孔灌注桩加一道钢筋砼内支撑(以角支撑为主，局部辅之以对撑)的支护结构形式，桩长有 15 m 和 17 m 两种。止水结构采用连续双排双轴 Φ700 深层搅拌桩墙止水(半封闭)，桩长在 CD 段为 13.5 m，其余段为 13 m。

3.2 结果比较

对于本工程，由于后排桩布桩的非连续性，根据抗弯刚度等效的原理[4]，将间距为 2 m 的后排桩及后排桩之间的土体等效间距为 1 m 的后排桩布置，采用前述的有限元计算模型进行了分析。用有限元计算的位移与实测位移对比见图 15 所示。通过有限元计算前排桩最大水平位移为 34.05 mm，在深度为 4.5 m 处，实测最大位移为 36.3 mm，在深度为 6.5 m 处，最大水平位移误差为 6.2%，二者相当接近。但是，从桩身侧向变形曲线来看，二者仍存在一定的差别，这主要是因为该程序采用二维平面应变来考虑，未考虑其空间效应，也未考虑桩间土体的侧向挤出效应，并且对于连梁与桩身的结点按刚性结点来考虑，而在实际中其受力状态介于刚性结点和铰接结点之间，这些都导致计算结果与实测位移不完全吻合。

表 3 场地土物理、力学性质指标

层序	土层名称	土层厚度/m	重度 γ/(kN/m)	内聚力 C/kPa	内摩擦角 φ/(°)	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
1	素填土	1.0	18.9	7	17.3	25	0.38
2	淤泥质土	2.5	18.1	6	10.0	6	0.43
3	粉土－粉质粘土	2.3	18.5	12	22.1	10	0.41
4	粉砂夹淤泥质土	4.5	18.1	12	26.1	8	0.39
5	淤泥质土	5.0	17.6	9	22.7	6	0.42
6	淤泥质土与粉土粉砂互层	4.7	17.4	12	25.6	30	0.4
7	粉质粘土	40	19.7	30	16.1	50	0.4

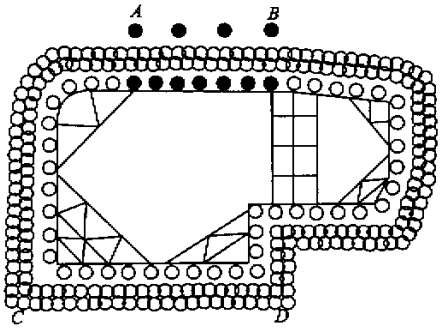


图 14 基坑支护平面布置图

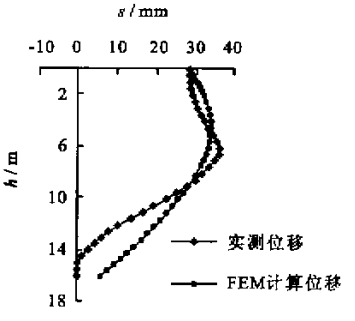


图 15 桩身水平位移图

万方数据

4　结论

(1)双排桩桩身受到交变应力的作用。提高桩身的刚度,将使双排桩的侧向变形减小,但是前后排桩桩身的内力都将增大,尤其是刚度提高的排桩其本身内力增加更为明显。

(2)连梁将使前后排桩变形更加一致,双排桩的侧向变形较无连梁时大大减小。随连梁的刚度增加双排桩的位移将减小,但减小的趋势变缓,此时依靠继续增加连梁刚度来减小排桩变形效果并不明显。

(3)增加排桩的嵌固深度,可以增加被动土抗力,从而达到减小桩身侧向变形的目的。因此,为了能有效地控制双排桩的侧向变形,必须要有足够的嵌固深度。但是超过一定入土深度时,嵌固深度的增加对抑制桩身变形的效果并不明显,反而会增加桩身折断的可能性,同时也掩盖了被动区土体破坏的可能性。

(4)排距影响桩身及桩间土体的应力分布和侧向变形。排距过小,排桩、连梁与桩间土组成围护结构体系的抗弯刚度较小,排桩变形较大;而排距过大,桩土之间的协同作用将减弱,排桩变形也较大,当排距在 2.5～4.5d 时,双排桩围护效果最好。

(5)对 1～3 区土体进行加固,可减小双排桩的侧向变形,但侧向变形的情形是不一样的。随加固范围的加大,排桩的侧向变形基本上呈减小的趋势,但其趋势趋于平缓,2 区土随加固深度增加,在桩顶与桩端附近出现桩身侧向变形增加的现象。3 区土随弹模、加固深度的增加,其侧向变形曲线出现反复振荡现象,在实际工程中,应避免加固情形在该范围内。

[参 考 文 献]

[1] 黄强.深基坑支护设计技术[M].北京:中国建材工业出版社,1997,3.

[2] 李俊才.软土深基坑开挖现场测试及三维数值模拟研究[D].成都:成都理工学院,2001:39～40.

[3] 蔡袁强,等.软粘土地基基坑开挖中双排桩式围护结构的数值分析及应用[J].建筑结构学报,1999,20(4):65～68,71.

[4] 熊巨华.一类双排桩支护结构的简化计算方法[J].勘察科学技术,1999(2):32～34.

NUMERICAL ANALYSIS AND APPLICATION OF RETAINING STRUCTURE WITH DOUBLE－ROW PILES ON DEEP EXCAVATION

DENG Xiao-peng[1,2], CHEN Zheng-zhou[1], WEI Jie[3]

(1. *Dept. of Earth Science, Nanjing University, Nanjing* 210093, *China*;
2. *Dept. of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing* 210096, *China*;
3. *The Construction Designation and Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing*, 210029, *China*)

Abstract: By means of 2D－Fintie Element Method, this paper analyzes the characteristics of internal force and lateral displacement of the retaining structure with double－row piles, and reveals the regularity of effect of several factors on this type of retaining structure, such as the rigidity of the piles and beams, the length of the piles, the distance between front and back row piles, the properties of soil. The relation between reinforcement efficiency and the width and depth of reinforcement in different soil areas is also presented. The conclusion can be used for the optimum design reference.

Key words: deep excavation; double－row piles; Finite Element Method(FEM)

万方数据