

· 地基与基础 ·



单锚式钢板桩结构锚固位置影响分析*

周浩¹, 郭兴文¹, 张福海²

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098)

摘要: 单锚式钢板桩结构锚固位置的变化对结构的体系性能有着显著影响, 但目前设计及研究中对这一问题重视不够。首先采用自由支承法确定单锚式钢板桩结构体系设计方案; 然后基于上述设计方案的有限元模型, 同时考虑桩身及土体变形特性, 研究锚固点位置对板桩弯矩、锚杆轴力及结构位移的影响规律。结果表明, 锚固点位于钢板桩顶部以下0.25~0.3倍开挖深度时, 钢板桩的最大水平位移和桩后土体的最大沉降达到最小值; 随着锚固点位置由桩顶向下移动, 锚杆的轴力逐渐增加, 而板桩的最大弯矩逐渐减小。同时, 与有限元结果相比, 采用自由支承法所得到的结构体系的板桩弯矩偏大, 有利于板桩的安全性, 而锚杆的轴力偏小, 可能导致锚杆的失效。

关键词: 钢板桩; 锚固位置; 自由支承法; 有限元模型

中图分类号: TU 476.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0179-07

Influence of anchor location on single anchored sheet-pile structure

ZHOU Hao¹, GUO Xing-wen¹, ZHANG Fu-hai²

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2 College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The change of the anchor location of single sheet-pile structure has a great influence on its structure system performance, however this problem is insufficiently considered in the current design and research. This paper consists of two parts. The first part is concerned with the design of the single sheet pile structure system using the free earth support method. On basis of the structure system design obtained in the first part, the second part applies the finite element method to investigate the effect of the anchor location on the wall bending moments, anchor forces and structure displacements where the sheet pile and the soil deformation characteristics are taken into account. The results show that, at the anchor point between the 0.25 and 0.3 times of the dredging depth, the maximum wall horizontal deformations and the ground settlements behind the wall reach the minimum value and as the anchor point moves down from the top of the pile, the anchor force increases and the maximum wall bending moment decreases. Furthermore, compared to one of FEM, the single sheet pile structure system of the free earth support method has the overestimating wall bending moments which are conducive to the safety of the wall pile and the underestimating anchor forces which lead to the failure of the anchor.

Keywords: steel sheet pile; anchor location; free earth support method; finite element model

近年来, 随着各类工程的快速发展, 钢板桩在临时性和永久性工程结构中应用得越来越广。

钢板桩支护的常用形式有悬臂式、锚拉式等。悬臂式钢板桩支护结构完全依靠入土深度维持稳定,

收稿日期: 2014-08-18

*基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2012BAD10B02)

作者简介: 周浩 (1990—), 男, 硕士研究生, 从事数值模拟仿真与分析。

挡土高度一般不超过5 m；锚拉式钢板桩锚碇结构由于外拉系统的协同作用，充分调动了周围土体的自稳能力，能维持较大的挡土高度，在实际工程中应用更为广泛。

单锚式钢板桩锚碇结构设计中锚杆的安设倾角及位置对支护结构的内力和位移影响较为显著。规范^[1]中指出锚杆的倾角宜避开与水平方向成 $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 的范围，有的学者^[2-3]也指出，为了施工需要，锚杆倾角一般应在 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。最近有关锚固位置的研究逐渐受到重视。许锡昌等^[4]利用最小势能原理推导了单锚式锚碇结构桩顶最大位移 δ_0 的解析解，研究表明，当地基为一般黏性土时锚杆安设高度对结构的变形影响很大；随着锚固位置离桩顶距离的增加 δ_0 先逐渐减小，超过某一特定范围后又呈现递增趋势。郭院成等^[5]考虑单锚式钢板桩锚碇结构的刚体位移和弯曲变形，建立了锚杆锚固点和支护桩顶的水平位移计算方法，指出锚固位置下移会增加锚杆的拉力，但可以减小桩顶在锚杆张拉锚固后的水平位移。

文献[6-10]结合实际工程，对单锚式钢板桩锚碇结构进行了现场观测和数值模拟研究，其锚固点位置的选择见表1。可以看出锚固点位置的选择多偏向于靠近桩顶，不同工程锚固点位置的选择相差较大，且对锚固点位置选择的合理性均未作详细的论证。

表1 不同研究中的锚固点位置

研究作者	锚固相对位置 x/H
Neelakantan ^[6]	0.170
Ruggeri ^[7]	0.140
Franklin ^[8]	0.070
Krabbenhof ^[9]	0.125
Bilgin ^[10]	0.250

注： x 为锚固点位置距桩顶的距离， H 为开挖深度。

总体而言，锚固点位置对钢板桩锚碇结构的影响已受到关注，但相关研究不系统。实际上锚固点位置的选择往往受到锚杆安设的时机、施工开挖顺序等诸多因素影响，现有成果尚难以形成统一的认识。目前常用的设计与施工规范^[1,11-12]对钢板桩型号选择、锚杆布置的间距和倾角等给出了建议，然而有关锚固点位置的选择问题却少有提及，导致设计中锚固点位置的选择仍主要依据经验，缺乏科学有效的分析。

钢板桩常用的设计方法有自由支承法、等值梁法、弹性曲线法、竖向弹性地基梁法等。自由支承法因其简单方便得到了广泛的应用，但该方法不能考虑施工顺序、桩土相互作用及板桩墙变形等的影响且无法计算出支护结构的位移。由于钢板桩挡土墙设计中存在很多不确定性因素，现有的设计方法尚不能给出严密的理论解答，因此借助有限元模拟技术是解决此类问题的一个有效途径。本文首先通过自由支承法计算不同参数下钢板桩嵌入深度、锚杆轴力和桩身弯矩，探讨设计中锚固点位置对上述量的影响。然后，考虑支护结构、地基的变形特性及桩土相互作用特性，建立自由支承法得到设计方案的有限元模型，进一步研究锚固点位置变化对支护结构的影响，为实际工程和设计提供参考依据。

1 单锚式钢板桩自由支承法计算分析

为了研究锚固点位置变化对单锚式钢板桩锚碇结构的影响，本文拟定了工程中常见的3种典型土质地基条件（表2），采用自由支承法计算不同参数下单锚式钢板桩结构的嵌入深度、锚杆轴力和桩身弯矩，分析锚固点位置变化对上述量的影响，同时上述结果也为有限元数值分析提供模型参数。

表2 地基土体参数

类别	饱和密度/($t \cdot m^{-3}$)	天然密度/($t \cdot m^{-3}$)	粘聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	剪胀角/($^{\circ}$)	弹性模量/MPa	墙土摩擦角/($^{\circ}$)
密实砂土	2.0	1.8	0.3	42	12	75	29.56
中等密实砂土	1.8	1.7	0.3	36	6	35	25.28
松散砂土	1.6	1.6	0.3	30	0	15	21.15

1.1 支护结构设计方案

单锚式钢板桩锚固结构见图 1。假定板桩两侧初始地面水平, 桩两侧地下水位持平且与锚固点位置在同一水平线。图中 H 为开挖深度 (挡土高度), D_e 为钢板桩嵌入深度, α 为锚杆与水平线夹角, x 为锚固点位置与桩顶的距离。定义板桩的嵌入深度 D_e 与开挖深度 H 的比值 D_e/H 为嵌入比。

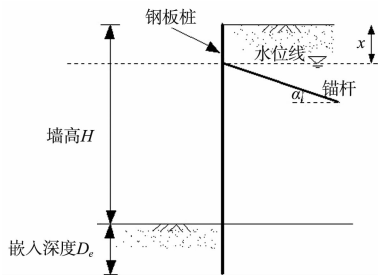


图 1 单锚式钢板桩锚固结构

为方便表述, 对于不同的组合方案采用简写定义, 数字代表挡土高度 H 的值, 字母代表土质类型。用 D 表示密实砂土 (dense sand)、M 表示中等密实砂土 (medium dense sand)、L 表示松散砂土 (loose sand)。如 12D 代表挡土高度为 12 m、土质为密实砂土的方案。本文共计有 9 个计算方案, 分别为 12D、9D、6D、12M、9M、6M、12L、9L、6L。

1.2 自由支承法计算原理及求解条件

自由支承法是将钢板桩简化为竖向简支梁, 计算中将板桩底端视为铰支点, 锚固点视为另一个支点。荷载计算中, 假定板桩前未开挖土体处于被动极限状态, 按被动土压力进行荷载计算; 板

桩后地基土按主动土压力计算荷载。板桩嵌入深度 D_e 由主动土压力和被动土压力对锚杆锚固点的力矩平衡条件确定, 然后利用板桩水平向平衡条件求出锚杆轴力, 进而计算板桩最大弯矩。

1.3 计算结果分析

1.3.1 板桩嵌入比

表 3 给出了不同组合方案下的板桩嵌入比, 图 2 给出了上述方案板桩嵌入比与锚固位置关系。结合表 3 及图 2 分析表明, 对于密实砂土和中等密实砂土, 锚固位置对板桩嵌入比的影响很小, 其值分别为 0.12 和 0.21 左右; 对于松散砂土, 锚固位置对板桩嵌入比的影响较为明显, 随着锚固点位置的下移嵌入比先增大, 后略微减小, 当锚固深度 $x = 0.35H$ 时嵌入比最大, 其值为 0.33。由表 3 及图 2 还可以看出, 对于同一种砂土, 对应不同的挡土高度 H , 尽管其嵌入深度 D_e 不同, 但嵌入比基本相同, 图 2 中表现为锚固点确定时同类型地基对应的嵌入比的点重合, 表明嵌入比与挡土高度 H 无关。

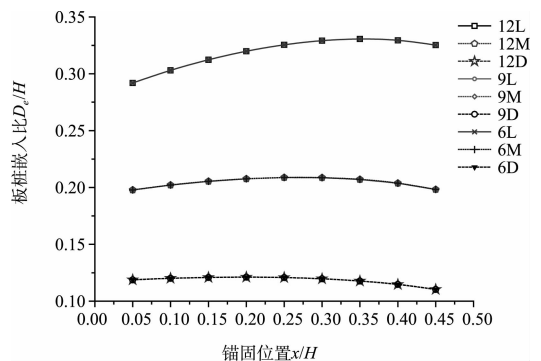


图 2 板桩嵌入比与锚固相对位置关系

表 3 不同组合方案下的板桩嵌入比

锚固位置	12L	12M	12D	9L	9M	9D	6L	6M	6D
0.1H	0.303	0.202	0.120	0.303	0.202	0.120	0.303	0.202	0.120
0.2H	0.320	0.208	0.121	0.320	0.208	0.121	0.320	0.208	0.121
0.25H	0.325	0.209	0.121	0.325	0.209	0.121	0.325	0.209	0.121
0.3H	0.329	0.209	0.120	0.329	0.209	0.120	0.329	0.209	0.120
0.4H	0.329	0.204	0.115	0.329	0.204	0.115	0.329	0.204	0.115

1.3.2 锚杆轴力

表 4 为不同组合方案下的锚杆轴力, 图 3 为不同土质、不同挡土高度条件下锚杆轴力与锚固位置

的关系。表 4 及图 3 均显示锚杆的轴力随着锚固点深度 x 的增加而增加, 且挡土高度越高、土质越松散, 锚杆轴力增加越快。对于 6D 工况, 锚固深度

从 $0.05H$ 变为 $0.45H$ 时, 锚杆轴力从 16 kN/m 增加至 38.6 kN/m , 增加了 141.3% ; 对于 $12L$ 工况,

锚固深度从 $0.05H$ 变为 $0.45H$ 时, 锚杆轴力从 76.8 kN/m 增加至 226.2 kN/m , 增加了 194.5% 。

表4 不同组合方案下的锚杆轴力

锚固位置	12L	12M	12D	9L	9M	9D	6L	6M	6D
$0.1H$	93.21	87.34	73.30	52.43	49.12	41.23	23.31	21.83	18.32
$0.2H$	127.45	114.02	92.71	71.69	64.14	52.15	31.86	28.51	23.18
$0.25H$	145.40	128.23	103.23	81.78	72.13	58.07	36.35	32.05	25.81
$0.3H$	164.07	143.18	114.46	92.29	80.53	64.38	41.02	35.79	28.61
$0.4H$	204.23	176.17	139.89	114.88	99.09	78.68	51.06	44.04	34.97

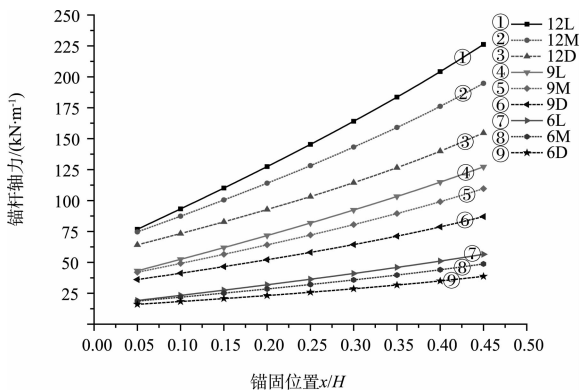


图3 锚杆轴力与锚固相对位置关系

1.3.3 板桩最大弯矩

表5给出了不同组合方案下的板桩最大弯矩, 图4为不同土质、不同挡土高度条件下板桩最大弯矩随锚固相对位置的变化关系。表5及图4表明, 对于松散砂土, 随着锚固点位置的下移, 板桩最大

弯矩 M_{\max} 先增加后减小; 当锚固深度在 $0.15H \sim 0.25H$ 区域时, M_{\max} 最大且变化很小。对于中等密实砂土, 随着锚固点位置的下移, M_{\max} 先缓慢增加后减小; 当锚固深度为 $0.1H$ 时, M_{\max} 最大。对于密实砂土, 随着锚固点位置的下移, M_{\max} 逐渐减小。

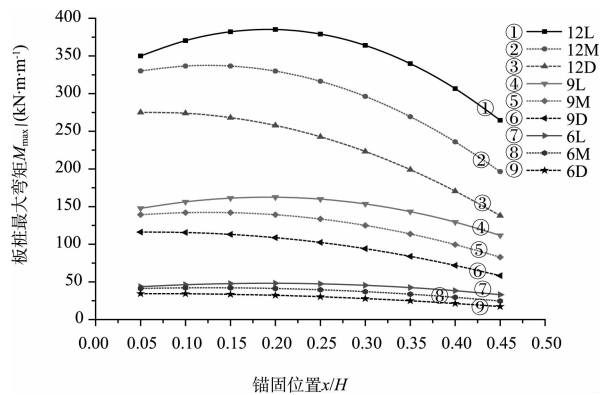


图4 板桩最大弯矩与锚固相对位置关系

表5 不同组合方案下的板桩最大弯矩

锚固位置	12L	12M	12D	9L	9M	9D	6L	6M	6D
$0.1H$	370.40	336.65	273.93	156.27	142.01	115.56	46.31	42.07	34.24
$0.2H$	385.17	329.90	257.75	162.48	139.20	108.73	48.15	41.24	32.23
$0.25H$	379.14	316.48	242.78	159.94	133.52	102.42	47.39	39.55	30.35
$0.3H$	364.05	296.32	223.17	153.59	124.98	94.15	45.50	37.03	27.90
$0.4H$	306.64	236.04	170.56	129.36	99.56	71.93	38.33	29.50	21.32

2 有限元数值模拟分析

自由支承法计算结果表明, 随着挡土高度 H 的增加, 锚固点位置的变化对单锚式钢板桩锚定结构的影响越显著。针对上述3种典型均质砂土, 本文选取 $H = 12 \text{ m}$ 的典型挡土高度, 通过 Abaqus 软件平台建立有限元模型进一步研究锚固点位置的变化对单锚式钢板桩结构位移及内力的影响并与自由支承法的计算结果进行对比分析。

2.1 有限元模型

2.1.1 几何模型

有限元分析中, 计算域选取过小往往会影响到计算结果的精确度, 而计算域过大则会造成计算时间和资源的浪费, 因此合理选取计算域对有限元数值模拟有着重要意义。Briaud 等^[13]对单锚式钢板桩结构的数值模拟研究表明: 模型的深度对板桩墙后土体沉降有着直接影响, 但对板桩的水

平位移影响很小; Bilgin^[14] 发现当模型宽度超过 8 倍挡土高度时 (板桩在模型中间), 板桩的位移、弯矩和锚杆的轴力不再有任何变化。因此本文对单锚式钢板桩结构按平面应变问题进行有限元分析的计算区域及网格见图 5, 计算域在水平方向取 96 m (8H), 竖直方向取 36 m (3H), 且钢板桩在水平方向位于模型中间。

建立有限元模型时, 土体均采用 4 节点平面应变单元、锚杆采用杆单元模拟, 将钢板桩按抗弯刚度 EI 等效为等厚度的钢板, 仍采用 4 节点平面应变单元模拟, 为正确反映钢板桩的受力变形特性, 板桩厚度方向布置 4 层单元。同时考虑计算精度要求, 靠近钢板桩周围的土体划分更加细致的网格。据此根据不同的方案, 将土体离散为 2 640 ~ 2 672 个四边形单元不等, 板桩离散为 128 ~ 176 个四边形单元不等。

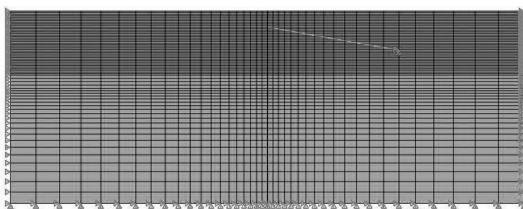


图 5 有限元模型

2.1.2 材料本构及参数

土体采用摩尔库伦模型 (表 2), 地下水位以上取天然密度、以下取浮密度。

钢板桩、锚杆采用各向同性的线弹性模型, 弹性模量 E 为 200 GPa, 其设计选型根据自由支乘法计算得到的板桩最大弯矩及锚杆轴力来确定。对于 12 m 的挡土高度选择 PZ27 型号的钢板桩, 截面面积为 168.1 cm²/m, 惯性矩 I 为 25 200 cm⁴/m, 许用应力设计值为 210 MPa, 按抗弯刚度 EI 等效为均匀厚度的钢板, 其等效厚度为 145 mm。锚杆长度取 25 m, 许用应力设计值为 170 MPa, 横截面为圆形, 其面积 A 由计算得到的锚杆轴力除以材料弹性模量确定。

为反映施工过程中桩土之间的相互作用, 在桩土接触面上设置接触单元。接触采用摩尔-库伦罚函数形式, 摩擦系数根据表 2 中墙土摩擦角确定。

2.1.3 边界条件及加载过程

模型左右均为水平位移约束边界, 下边界为竖向位移和水平位移约束边界, 上边界为自由变形边界, 锚杆一端固定于板桩上锚固点位置, 另一端假设为铰支。

加载过程分为两个步骤, 首先是模拟土体域初始应力场; 随后模拟土体逐级开挖, 每次开挖 1.2 m, 开挖至锚固点位置安设锚杆, 然后继续进行下一步开挖。

2.2 结果分析

2.2.1 板桩最大水平位移和板桩后土体最大沉降

图 6、7 分别给出了板桩最大水平位移、桩后土体最大沉降随锚固位置及倾角变化的关系, 可以看出: 1) 对于密实砂土, 当锚固点位置在板桩顶部以下 0.25H 时, 板桩最大水平位移 $\delta_{h,max}$ 和桩后土体最大沉降 $\delta_{v,max}$ 最小; 当锚固点位于 0.2H ~ 0.3H 时 $\delta_{h,max}$ 和 $\delta_{v,max}$ 变化较小。2) 对于中等密实和松散砂土, 锚固点位置在板桩顶部以下 0.27H ~ 0.3H 区域时, $\delta_{h,max}$ 和 $\delta_{v,max}$ 最小。3) 随着锚杆倾角的增加, $\delta_{h,max}$ 和 $\delta_{v,max}$ 也逐渐增加。

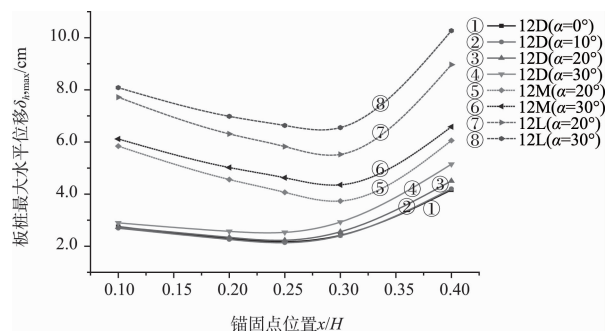


图 6 板桩最大水平位移与锚固位置及倾角关系

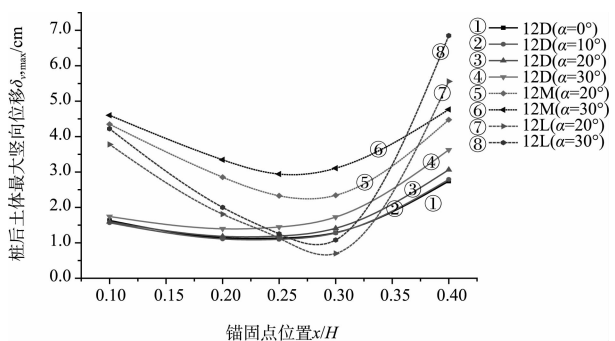


图 7 桩后土体最大沉降与锚固位置及倾角关系

2.2.2 锚杆轴力

图8给出了开挖完成后锚杆轴力与锚固位置的关系,可以看出:随着锚固点位置的下移,开挖完成后的锚杆轴力呈现逐渐增加的趋势,这与自由支承法得到的规律是一致的,且锚杆倾角越大,其最终的轴力也越大。

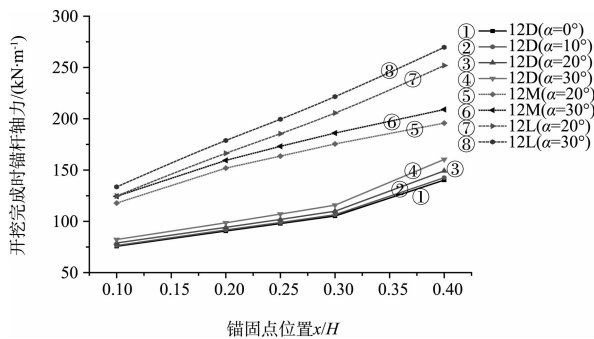


图8 开挖完成后锚杆轴力与锚固相对位置关系

从图8可以看出,对于不同锚杆倾角,锚杆轴力变化规律基本一致。表6列出了锚杆水平时,不同锚固点位置对应的自由支承法与有限元解得到的锚杆轴力及其变化比,锚杆轴力变化比定义为有限元解减去自由支承解之差与自由支承解之比。由表6可以看出:对于密实砂土,两种方法得到的锚杆轴力值比较接近;对于中等密实和松散砂土,有限元模拟得到的锚杆轴力明显大于自由支承法得到的轴力。在锚固点位于 $0.1H$ 时,有限元法得到的锚杆轴力较自由支承法得到轴力值增加近30%。造成这种现象的原因是土与结构的相互作用引起了应力的重新分布,使锚杆轴力增加。因此从增加锚杆安全性方面考虑,对于中等密实和松散砂土地基,建议设计中适当增加自由支承法得到锚杆轴力值。

表6 两种方法锚杆轴力比较

锚固位置	12D			12M			12L		
	自由支承解/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	有限元解/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	变化比/ %	自由支承解/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	有限元解/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	变化比/ %	自由支承解/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	有限元解/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	变化比/ %
$0.1H$	73.3	75.7	3.0	87.3	112.0	28.3	93.2	118.2	26.8
$0.2H$	92.7	90.6	-2.3	114.0	145.6	27.7	127.4	156.2	22.6
$0.25H$	103.2	97.8	-5.2	128.2	156.4	22.0	145.4	174.4	19.9
$0.3H$	114.5	105.2	-8.1	143.2	165.1	15.3	164.1	193.0	17.6
$0.4H$	139.9	140.2	0.2	176.2	183.8	4.3	204.2	237.7	16.4

2.2.3 板桩最大弯矩

有限元模拟研究还表明,锚杆倾角变化不影响板桩弯矩的分布规律。限于篇幅,本文仅以锚杆水平为例,讨论锚固点位置变化对板桩弯矩的影响。

图9给出了锚杆水平时,3种典型砂土条件下开挖完成后不同锚固位置对应的板桩弯矩分布,可以看出:对于3种典型砂土,土质越密实板桩弯矩越小;随着锚固点位置的下移,板桩的正弯

矩(开挖侧)逐渐降低,而负弯矩(未开挖侧)逐渐增大。

表7给出了锚杆水平时,锚固点位置不同时自由支承法和有限元解得到的板桩最大弯矩及变化比,板桩最大弯矩变化比定义为自由支承解减去有限元解之差与自由支承解之比。从表中可以看出有限元得到的板桩最大弯矩明显小于自由支承法得到的值,对于12D、12M、12L的工况,板桩弯矩变化比的最大值分别为43.2%、63.3%、51.5%。

表7 两种方法板桩最大弯矩比较

锚固位置	12D			12M			12L		
	自由支承解/ ($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	有限元解/ ($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	变化比/ %	自由支承解/ ($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	有限元解/ ($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	变化比/ %	自由支承解/ ($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	有限元解/ ($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	变化比/ %
$0.1H$	273.9	158.7	42.1	336.7	182.0	45.9	370.4	239.0	35.5
$0.2H$	257.8	148.6	42.4	329.9	147.3	55.4	385.2	207.0	46.3
$0.25H$	242.8	140.2	42.3	316.5	129.2	59.2	379.1	189.0	50.1
$0.3H$	223.2	127.9	42.7	296.3	108.7	63.3	364.1	176.5	51.5
$0.4H$	170.6	96.9	43.2	236.0	143.2	39.3	306.6	229.6	25.1

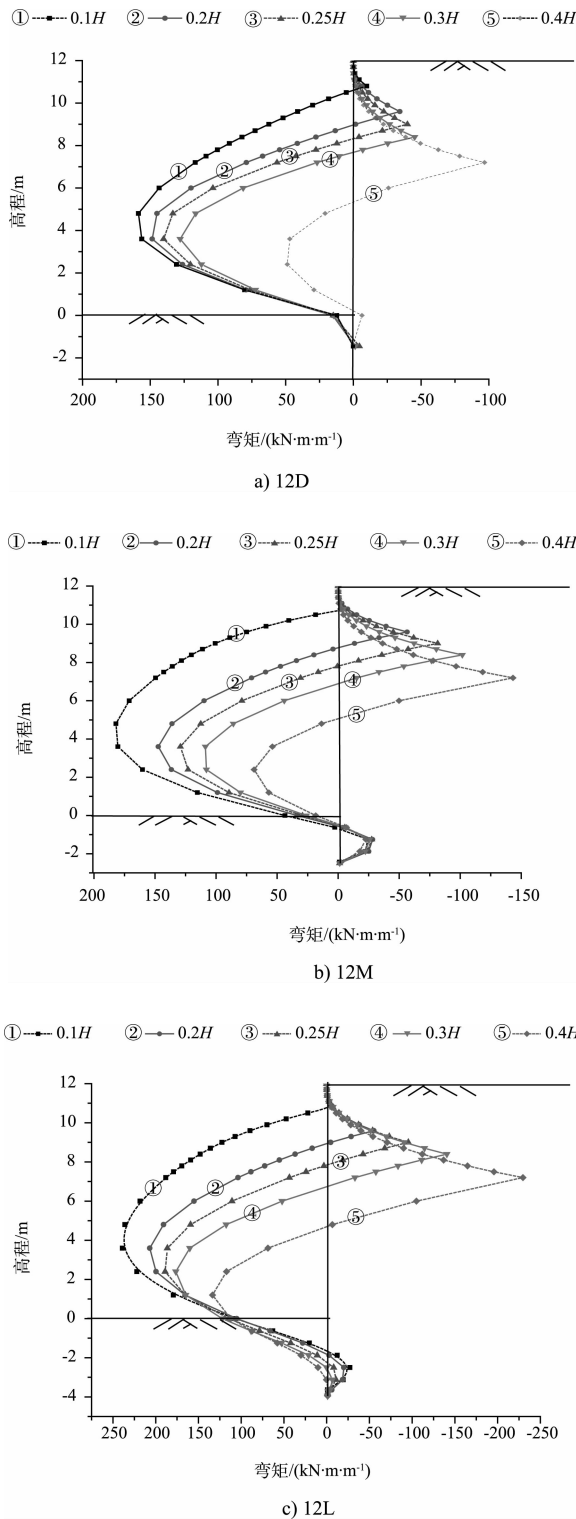


图 9 板桩弯矩与锚固位置关系

造成这种现象的主要原因是钢板桩上部和下部分别受锚杆和地基土的约束作用, 而跨中受桩后主动土压力作用, 变形较大, 桩后土体变形过程中出现“拱”现象, 减小了土作用于钢板桩上的主动土压力, 使跨中一部分土压力通过土条之

间的摩擦力传向上下两端, 形成了跨中主动土压力小于上下两端土压力, 即所谓的“R”型分布。而自由支承法把板桩墙当作静定的简支梁, 利用静力平衡原理解得的弯矩自然比有限元法解得的弯矩要大。因此, 根据自由支承法计算得到的板桩最大弯矩对单锚式钢板桩结构进行设计是偏安全的, 应用该法进行设计时可以考虑选用较小截面的钢板桩以优化成本。

3 结论

1) 锚固点位置变化对板桩弯矩、锚杆轴力及体系位移有着显著影响, 设计中需要给予充分的重视, 结合实际情况合理确定锚固点位置将提高设计体系的安全性与经济性。

2) 对于密实砂土地基, 锚固点位置在板桩顶部以下 $0.25H$ 最合适, 此时板桩最大水平位移和桩后土体最大竖向位移最小, 且锚杆的轴力和板桩最大弯矩也处于合理水平。

3) 对于中等密实砂土和松散砂土地基, 锚固点最佳位置应设置在板桩顶部以下 $0.27H \sim 0.3H$ 区域, 此时板桩最大水平位移、桩后土体最大沉降以及板桩最大弯矩最小。锚固深度超过 $0.3H$ 时, 锚杆轴力和板桩最大弯矩都会明显增加; 锚固深度小于 $0.27H$ 时, 锚杆轴力虽然降低, 但支护结构位移和板桩弯矩明显增大。

4) 自由支承法计算得到的锚杆轴力值小于有限元得到的值, 为确保锚杆不会失效, 建议设计中适当增加自由支承法得到锚杆轴力值; 对比分析表明, 根据自由支承法计算得到的板桩最大弯矩对单锚式钢板桩结构进行设计是偏安全的, 适当条件下可以选用较小截面的钢板桩以优化成本。

参考文献:

[1] CECS 22: 2005 岩土锚杆(索)技术规程[S].
 [2] 倪红梅. 数值模拟锚杆参数对支护结构水平位移的影响[J]. 煤炭工程, 2007(2): 88-90.
 [3] 康红普, 姜铁明, 高富强. 预应力锚杆支护参数的设计[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 721-726.