

深层搅拌桩墙围护结构裂缝成因探讨

高文华¹, 王祥秋², 陈秋南¹, 张志敏¹

(1. 湖南科技大学岩土工程研究所, 湖南湘潭 411201; 2. 佛山科技学院, 广东佛山 528000)

[摘要] 针对基坑支护中深层搅拌桩墙围护结构出现的开裂, 采用 Mindlin 厚板理论对其受力与变形性状进行弹塑性分析, 建立了墙体的厚板力学模型和三维有限元分析模型, 并编制了有限元分析程序; 基于墙体受到纵向弯矩、横向弯矩和扭矩的综合作用, 提出采用等效弯矩法评价墙体的综合抗弯性能; 利用所编制的程序, 获得了某基坑深层搅拌桩墙围护结构墙体水平位移和等效弯矩的空间分布规律; 计算结果表明, 墙体东侧环球广场横向支撑附加力的作用是使墙体形成破裂面的主要原因。

[关键词] 裂缝; 深层搅拌桩墙; 厚板; 等效弯矩; 三维有限元

[中图分类号] TU95 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)12-0088-04

深层搅拌桩墙是用特制的深层搅拌机械, 在深层将水泥和软土强制搅拌而成, 它具有挡土和止水双重功能。在地下水位较高的软土地区, 因其能就地取材, 经济实用, 在深度小于 7 m 的基坑围护结构设计中被广泛采用。但在基坑开挖、施工过程中, 由于应力释放、地面超载及受邻近基坑附加支撑应力等影响, 挡墙内侧可能出现与墙体走向基本一致的较长的水平向裂缝, 从而易引起漏水、渗沙和坍塌, 严重威胁周围建筑和地下管线及基坑本身的安全。对于这类裂缝产生的原因, 文献报道很少。方明曾采用混凝土断裂力学理论来评判水泥土桩墙裂缝的稳定性^[1], 但并未对其产生的原因进行分析。考虑到裂缝的三维性, 平面分析不足已全面解释裂缝产生的原因, 为此, 笔者拟采用可考虑横向剪切变形的 Mindlin 厚板理论对深层搅拌桩墙裂缝产生的原因进行分析, 为基坑开挖、施工过程中采取相应的安全措施提供依据。

1 工程概况

上海某基坑位于浦东新区民生路以西, 地理位置南临浦东大道, 北接铜山街, 东面与环球广场工

程相邻, 西面紧靠正在施工的泰星广场。该工程为海南珠江实业股份有限公司上海房地产公司投资建设的综合住宅区, 占地面积 24 169 m², 规模包括 5 栋 24 层高标准住宅楼, 10 栋花园式别墅, 以及可容 500 个车位的二层地下车库。其中地下车库与高层住宅楼相接, 且都需形成深度相差不大的地下空间, 故在基坑围护设计中令其形成统一的规模较大的基坑, 基坑总长 160.8 m, 宽 79.5 m, 高层基坑深 5.6 m, 地下车库基坑深 6.9 m (图 1)。

基坑围护结构选用重力式水泥土搅拌桩墙, 沿 I 号~V 号高层住宅楼外缘及地下车库轮廓线的走向布置。搅拌桩墙深 15.0~17.0 m, 厚度为 4.2~5.2 m, 墙顶以钢筋混凝土盖板加强, 允许交通车辆通行。在开挖深度达到 6.9 m 的地下车库基坑的坑底处, 沿搅拌桩墙加设了注浆区, 用于帮助保持坑底稳定。此外, 在地位狭窄的东北角, 在搅拌桩墙外侧增设了树根桩。

鉴于地下车库基坑开挖开始前别墅群已完建和投入使用, 在 III 号高层住宅楼与别墅侧搅拌桩墙间增设了两根 $\phi 16 \text{ mm} \times 609 \text{ mm}$ 钢管支撑, 在 II 号高层住宅楼与新建马路侧搅拌桩墙间也增设了一

[收稿日期] 2005-01-05; **修回日期** 2005-09-24

[基金项目] 湖南省自然科学基金重点资助项目 (05JJ20017)

[作者简介] 高文华 (1962-), 男, 湖南宁乡县人, 湖南科技大学教授, 主要专业领域为岩土工程和地下结构工程

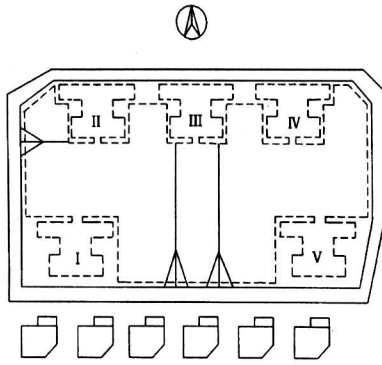


图 1 基坑平面图

Fig.1 The plane layout of foundation

根 $\phi 16 \text{ mm} \times 609 \text{ mm}$ 钢管对撑。另外，地下车库基坑东侧约 10 m 处为环球广场基坑，采用 D700 双头双排搅拌桩加 $\phi 850 \text{ mm}$ 的钻孔灌注桩加二道钢筋砼支护体系，为此，墙体东侧约受到 40 kN/m^2 垂直于墙面的附加压力。

2 裂缝基本特征

东侧墙体于基坑开挖完成后即出现两条裂缝，其中之一为小裂缝，宽约 0.5 cm，长约 15.0 m，形状近于直线，与墙体斜交，展布直达地表；另一条为弧顶朝向上方的弧形大裂缝，沿墙体走向展布，长约 40 m，顶部距地表约 1.5 m，裂缝最大宽度约 5.0 cm，最小宽度约 1.0 cm，裂缝深度不详，有少量渗水（图 2）。为了确定墙体开裂的原因，需对墙体的受力与变形进行分析。

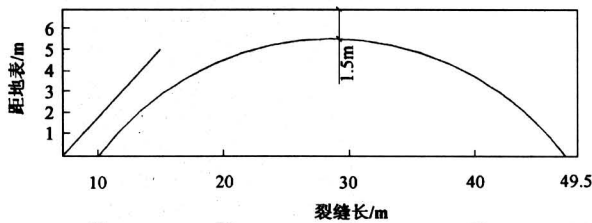


图 2 基坑东侧墙体裂缝示意图

Fig.2 The sketch of crack of supporting wall on the east side of foundation

3 墙体受力与变形分析

理论和实测结果均表明，混凝土挡墙的变形应类似如弹性桩的变形，其受力形式与壁式地下墙类似，不能作为刚体^[2]。鉴于基坑开挖过程中，围护墙体主要承受垂直于板面的横向荷载，笔者采用

可考虑横向剪切变形的 Mindlin 厚板理论对墙体进行内力和变形分析^[3]。

3.1 基本假定及墙体的厚板力学模型

与板的厚度相比较，其挠度 w 是微小的；

垂直于板中面的应力可忽略不计；

变形前垂直于中面的法线，在变形后不一定垂直于中面。

深层搅拌桩墙体在平面上为一系列横截面相交的圆环，采用等刚度法^[4]，可将其转化为刚度等效的板状墙体。由于墙厚与墙体插入深度之比较大，属于厚板范畴。

围护墙体按弹塑性受力阶段设计时，可用增量理论对变形进行弹塑性分析。以增量形式表示的应力应变关系式可写为^[5]：

$$\begin{bmatrix} d\hat{\sigma}_f \\ d\hat{\sigma}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{D}'_{epf} & 0 \\ 0 & [\hat{D}'_s] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\hat{\epsilon}_f \\ d\hat{\epsilon}_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\hat{D}'_{epf} = \hat{D}'_f - \frac{\hat{d}_D \hat{d}_D^T}{\hat{A} + \hat{d}_D^T \hat{\alpha}'}$ 为弹塑性矩阵

$\hat{\alpha}' = \left[\frac{\partial \hat{F}}{\partial M_x}, \frac{\partial \hat{F}}{\partial M_y}, \frac{\partial \hat{F}}{\partial M_{xy}} \right]^T$ ，其中 \hat{F} 为屈服函数

$$\hat{d}_D = \hat{D}'_f \hat{\alpha}'$$

$\hat{A} = -\frac{1}{\lambda} \frac{\partial \hat{F}}{\partial H} dH$ ， λ 为塑性标量因子

$\hat{D}'_f = \int_{-t/2}^{t/2} \mathbf{D}'_f z dz$ 为弹性矩阵

$\hat{D}'_s = \int_{-t/2}^{t/2} \mathbf{D}'_s dz$ ，为剪切矩阵

深基坑支护墙体受力与变形的屈服方式可分为分层屈服和整体屈服二类，分析中按整体屈服考虑。整体屈服塑性理论认为在板某一截面处，弯矩 M 达到屈服弯矩 M_0 时，整个截面同时进入塑性状态。与分层明德林板塑性理论类似，这类理论通常假定屈服函数 \hat{F} 仅为弯矩 $\hat{\sigma}_f$ 的函数，而与剪力 $\hat{\sigma}_s$ 无关。如将材料强化参数仍记为 H' ，则屈服条件可表示为：

$$\hat{F}(\hat{\sigma}_f, H') = 0 \quad (2)$$

或写为：

$$\hat{F}(\hat{\sigma}_f, H') = \int_{-t/2}^{t/2} F(\sigma_f, H') dz = 0 \quad (3)$$

本文采用 Drucker Prager 准则，屈服条件可写为：

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k' = 0 \quad (4)$$

式中:

I_1 ——为应力张量第一不变量;

J_2 ——为应力偏量第二不变量;

α, k' ——为由材料特性参数确定的常数。

如令 Drucker Prager 圆为 Mohr Coulomb 正六边形的外接圆, 则 α, k' 的表达式分别为:

$$\alpha = \frac{2\sin\theta}{\sqrt{3}(3 - \sin\theta)}, k' = \frac{6c\cos\theta}{\sqrt{3}(3 - \sin\theta)} \quad (5)$$

若 Drucker Prager 圆为 Mohr Coulomb 6 边形的内切圆, 则 α, k' 的计算式改为:

$$\alpha = \frac{2\sin\theta}{\sqrt{3}(3 + \sin\theta)}, k' = \frac{6c\cos\theta}{\sqrt{3}(3 + \sin\theta)} \quad (6)$$

式中: c ——为粘聚力;

θ ——为内摩擦角;

笔者采用式 (5) 表达式中 α, k' 的计算值。

3.2 等效弯矩

按照 Mindlin 厚板理论, 墙体同时受到弯矩和剪力的作用。由于屈服函数仅为弯矩的函数, 故在任一点上, 是否产生塑性变形仅取决于该点的弯矩大小。而墙体的弯矩有纵向弯矩、横向弯矩和扭矩之分, 考虑到墙体受力变形的空间效应, 笔者提出取三者的综合值, 即采用等效弯矩来评价墙体的抗弯性能。

从理论上讲, 等效弯矩可以看成是主应力空间坐标系中的一个向量, 与坐标系的选定相关。为方便起见, 以 Drucker Prager 准则所建立的坐标系为准, 墙体上任一点的等效弯矩为:

$$\bar{M} = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} \quad (7)$$

式中各参数含义见式 (4)。

根据式 (5), 可以求得墙体上任一点的等效弯矩值, 当墙体上任一点的等效弯矩值达到墙体的屈服应力时, 墙体产生破坏。

3.3 有限元分析

支护墙体可简化为软土地基上的竖向厚板。墙板的非开挖侧作用地面超载及水土压力产生的侧压力, 基坑转角处侧向挡土墙对墙体的约束可视为固定边界, 挡墙顶部为自由边界, 底部边界一般为弹性支承边界。如果底端插入持力层中, 可当作固定边界。在开挖侧基坑底部被动区的土体对墙体起弹簧支承的作用。由此可以写出结构的整体平衡方程^[6]:

$$KU = [K_P + K_S]U = R \quad (8)$$

式中, U 为墙体位移向量; R 为荷载向量, 包括

作用在墙体上的水土压力、地面超载和邻近基坑的附加支撑力; K 为整体刚度矩阵, K_P 为墙体刚度矩阵, K_S 为地基刚度矩阵。

围护墙体离散为单元, 单元类型选为 8 结点平板等参元; 对于开挖侧基坑底部被动区土体, 地层性态采用可考虑土体间相互作用和流变性能的线性粘弹性模型模拟^[7], 并以附加刚度的形式与板共同作用。

按照所建立的计算模型, 笔者编制了有限元分析程序 TSEF^[8], 并对珠江玫瑰花园基坑东侧墙体的变形和受力进行了分析。

4 墙体裂缝的形成机理探讨

为考虑各弯矩的综合影响, 在考虑施工工况的情况下, 分别做出了开挖结束后墙体的水平位移和等效弯矩等值线图 (图 3, 图 4)。图 3 表明, 水平位移上部大下部小; 墙顶中间部分大两侧小, 最大值为 73 mm。等值线分布形态明显受东侧环球广场附加轴力的影响。图 4 表明, 等效弯矩等值线形成弧顶朝上的弧形高等效弯矩集中带, 走向与墙体破裂面展布形状相似, 位置也基本相同。由此可以推断, 墙体东侧环球广场横向支撑附加力的作用是使墙体形成破裂面的主要原因。由于土体开挖后墙体内存在等效弯矩集中带, 易于超过墙体的抗弯强度, 导致墙体出现破裂面。

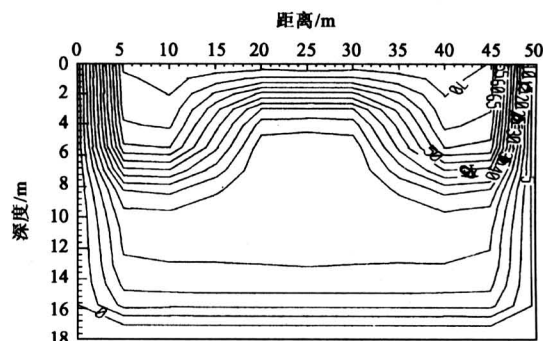


图 3 墙体水平位移等值线 (mm) 图

Fig.3 Displacement field of supporting wall (mm)

5 结语

1) 基于考虑横向剪切变形的 Mindlin 厚板理论, 建立了深层搅拌桩墙体的厚板力学模型和三维有限元分析模型, 编制了有限元分析程序。

2) 分析表明, 采用等效弯矩能考虑墙体受力

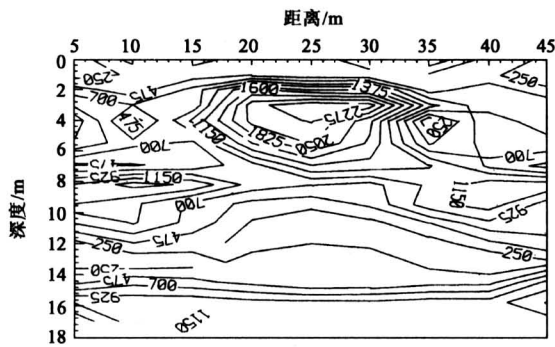


图 4 墙体等效弯矩等值线 ($\text{kN}\cdot\text{m}$) 图
Fig.4 Equivalent bending moment field of supporting wall ($\text{kN}\cdot\text{m}$)

变形的空间效应, 较好地评价墙体的综合抗弯性能。

3) 通过基于可考虑横向剪切变形的 Mindlin 厚板理论的三维有限元分析, 认为墙体东侧环球广场横向支撑附加力的作用是使墙体形成破裂面的主要原因。由于土体开挖后墙体内存在等效弯矩集中带, 易于超过墙体的抗弯强度, 导致墙体出现破

裂面。

参考文献

- [1] 方明. 水泥土围护桩墙裂缝稳定分析[J]. 地基基础, 1998, (2): 39~40
- [2] 宰金璋. 水泥土挡墙的变形及其计算[A]. 朱百里编. 第四届全国地基处理学术讨论会论文集[C], 杭州: 浙江大学出版社, 1995. 253~257
- [3] Owen D R J, Hinton E. Finite elements in plasticity—theory and practice[M]. Pineridge Press Limited, 1980
- [4] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997
- [5] 高文华. 深基坑支护墙体受力变形分析的粘弹性地基厚板理论[D]. 上海: 同济大学, 1998
- [6] 高文华, 杨林德. 基于 Mindlin 板理论的深层搅拌桩墙体受力变形的空间效应[J]. 土木工程学报, 1999, 32(2): 71~75
- [7] 高文华. 地基模型的时效性分析与刚度计算[J]. 岩土力学, 1998, 19(4): 25~30
- [8] 高文华, 沈蒲生, 杨林德. 深基坑支护结构内力与变形时空效应分析的程序实现[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 86~90

Three Dimensional Finite Element Analysis of Cracks for Deep Mixing Wall

Gao Wenhua¹, Wang Xiangqiu², Chen Qiunan¹, Zhang Zhimin¹

(1. Geotechnical Engineering Institute, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2. Fushan College of Science and Technology, Fushan, Guangdong 528000, China)

[Abstract] Aiming at the cracks of supporting structure of deep mixing wall, the elastoplastic behavior of internal force and deformation of deep mixing wall is analyzed in this paper. According to Mindlin plate theory, the thick plate model and three dimensional finite element model of wall are set up. Considering vertical and horizontal bending moment and torsion moment action together, equivalent bending moment is proposed in this paper to evaluate anti-bend capability of wall. Using the program developed by authors, spatial shape of horizontal displacements and equivalent bending moments of wall of supporting structure of deep mixing wall are gained. The calculation results indicate that the cracks of wall are mainly caused by strut's loads of Huanqiu Plaza beside east of wall.

[Key words] cracks; deep mixing wall; thick plate; equivalent bending moment; three dimensional finite element