

文章编号: 1007-2993(2023)02-0201-06

# 深厚填土高边坡三排桩刚架支挡结构受力分析

石洋海<sup>1</sup> 赵小云<sup>2</sup> 王贤能<sup>1</sup> 周伦才<sup>2</sup> 王玥<sup>2</sup>

(1. 深圳市工勘岩土集团有限公司, 广东深圳 518026; 2. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

**【摘要】** 针对深厚填土高边坡中单排悬臂桩、桩锚支护、双排桩、h 型桩等支护结构存在的不足, 分析探讨了三排桩刚架支挡结构。研究表明, 三排桩刚架支挡结构用于支护深厚填土高边坡, 可以同时起到“收坡”、“固脚”作用, 既能节约用地, 又可以有效发挥支挡作用。通过工程实例, 分别采用位移法、MIDAS GTX NX 有限元软件进行计算分析, 对比结果表明, 采用位移法简化方法可近似计算三排桩刚架支挡结构的弯矩。三排桩刚架支挡结构设计时应加强前排桩和连梁的截面刚度, 保证节点位置刚性连接, 刚架结构分级高度应大致均匀布置, 且应尽量减少后排桩悬臂段高度。

**【关键词】** 三排桩; 刚架; 支挡结构; 位移法; 填土高边坡

**【中图分类号】** P 642.22

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.02.012

## Stress Analysis of Three-row Pile Rigid Frame Retaining Structure in High Slope with Deep and Thick Backfill Soil

Shi Yanghai<sup>1</sup> Zhao Xiaoyun<sup>2</sup> Wang Xianneng<sup>1</sup> Zhou Luncai<sup>2</sup> Wang Yue<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Geokey Group Co., Ltd., Shenzhen 518026, Guangdong, China; 2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, Gansu, China)

**【Abstract】** The supporting structures of single row cantilever pile, pile-anchor support, double row pile, H-type pile and other supporting structures have deficiencies in high slope with deep and thick backfill soil. In view of the deficiencies, three-row pile rigid frame retaining structure was analyzed. In supporting deep fill high slope, the three-row pile rigid frame retaining structure can simultaneously play the role of "retracting slope" and "reinforce the foot of the slope". The application of this structure could save land and realize retaining effectively. Through engineering examples, displacement method and MIDAS GTX NX finite element software were used for calculation and analysis. The comparison results show that the simplified displacement method can be used to approximate the bending moment of three-row pile rigid frame retaining structure. The section rigidity of front pile and connecting beam should be strengthened in the design, and ensure that the nodes are rigidly connected. The grading height of rigid frame structure should be roughly uniform and the cantilever height of rear pile should be reduced as much as possible.

**【Key words】** three-row pile; rigid frame; retaining structure; displacement method; high slope with backfill soil

### 0 引言

对于深厚填土高边坡, 在场地条件允许的情况下, 通常按照“宽平台、缓坡率”的原则来保证边坡稳定。该方法需占用较大范围用地, 当用地范围受到限制时, 通常可在坡脚设置可靠性较高的支挡结构, 既可实现“收坡”目标, 减少边坡占地范围, 又可发挥支挡结构“固脚”作用, 承担深厚填土高边坡土压力。由于边坡高度大、填土深厚, 坡脚为高应力区, 常规的单排悬臂桩、桩锚支护、双排桩<sup>[1-3]</sup>、h 型桩等支护结构存在适用高度受限、桩身弯矩大、桩顶位移大、

锚索难以成孔且填土不能提供有效锚固力等难题。

针对上述问题, 探讨三排桩刚架支挡结构, 借鉴 h 型支挡结构<sup>[4-5]</sup>的工作原理及布桩方式, 由三排桩与两道连梁组成台阶状刚架结构, 该结构为存在侧向位移的超静定结构, 可通过结构力学位移法计算内力。

### 1 位移法求解超静定刚架结构的基本原理

超静定结构通常可采用力法、位移法计算。对于超静定刚架结构, 可以某些节点位移(角位移、线位移)作为基本未知量, 得到节点位移后求解刚架结构内力, 这种方法即位移法。

**基金项目:** 国家“十二五”重大科技基础设施项目(编号: 发改高技 [2015]3185 和 3187 号)

**作者简介:** 石洋海, 男, 1984 年生, 汉族, 湖南衡阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程设计、地质灾害治理设计工作。E-mail: 123889156@qq.com

### 1.1 基本假定

为了重点说明主要内容,对填土高边坡三排桩刚架支挡结构进行如下假设,以简化计算过程:

- (1) 作用于刚架结构桩上土压力呈矩形分布;
- (2) 刚架结构桩前悬空,不考虑桩前土抗力;
- (3) 桩端嵌固于地面以下岩土体,嵌固端无水平位移、转角位移;
- (4) 受弯直杆两端之间的距离在变形后仍保持不变,无轴向变形;
- (5) 填土边坡中,不考虑三排桩桩间土压力作用。

### 1.2 位移法典型方程及其求解

根据上述假设,建立三排桩刚架支挡结构简化模型(见图1)。该刚架结构有4个独立的节点角位移,2个独立的节点线位移,共6个基本未知量,加入6个附加约束之后得到基本结构(见图2)。采用位移法计算时,在基本结构中节点1、2、4、5位置分别设置附加刚臂以约束节点角位移,在节点3、6位置分别设置附加链杆以约束节点线位移,位移法典型方程组见式(1)。

$$\left. \begin{aligned} r_{11}Z_1 + r_{12}Z_2 + r_{13}Z_3 + r_{14}Z_4 + r_{15}Z_5 + r_{16}Z_6 + R_{1P} &= 0 \\ r_{21}Z_1 + r_{22}Z_2 + r_{23}Z_3 + r_{24}Z_4 + r_{25}Z_5 + r_{26}Z_6 + R_{2P} &= 0 \\ r_{31}Z_1 + r_{32}Z_2 + r_{33}Z_3 + r_{34}Z_4 + r_{35}Z_5 + r_{36}Z_6 + R_{3P} &= 0 \\ r_{41}Z_1 + r_{42}Z_2 + r_{43}Z_3 + r_{44}Z_4 + r_{45}Z_5 + r_{46}Z_6 + R_{4P} &= 0 \\ r_{51}Z_1 + r_{52}Z_2 + r_{53}Z_3 + r_{54}Z_4 + r_{55}Z_5 + r_{56}Z_6 + R_{5P} &= 0 \\ r_{61}Z_1 + r_{62}Z_2 + r_{63}Z_3 + r_{64}Z_4 + r_{65}Z_5 + r_{66}Z_6 + R_{6P} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $r_{ii}$ 为主系数,如 $r_{11}$ 表示单独由单位位移 $\bar{Z}_1=1$ 引起的刚臂1上的反力矩; $r_{ij}$ 为副系数,如 $r_{31}$ 表示单独由单位位移 $\bar{Z}_1=1$ 引起的链杆3上的反力; $R_{iP}$ 为自由项,如 $R_{1P}$ 表示由荷载 $P$ 单独作用时引起的刚臂1上的反力矩荷载。

位移法典型方程简写成矩阵形式即为 $AX=B$ ,其中:

$$A = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} & r_{16} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} & r_{26} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} & r_{36} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} & r_{46} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} & r_{56} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} & r_{65} & r_{66} \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \\ Z_5 \\ Z_6 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -R_{1P} \\ -R_{2P} \\ -R_{3P} \\ -R_{4P} \\ -R_{5P} \\ -R_{6P} \end{bmatrix}$$

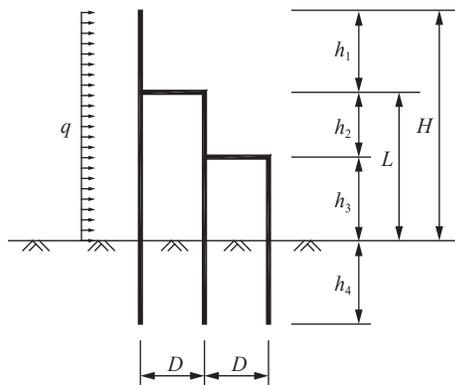


图1 三排桩刚架支挡结构简化计算模型

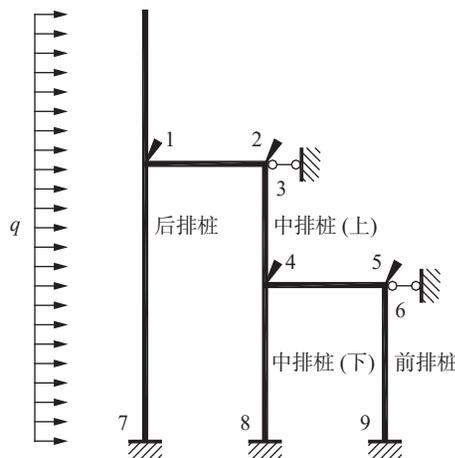


图2 三排桩刚架基本结构

先计算主系数 $r_{ii}$ 、副系数 $r_{ij}$ 、自由项 $R_{iP}$ ,然后求逆矩阵 $A^{-1}$ ,即可求得节点位移值。

$$X = A^{-1}B$$

为了求得位移法典型方程中的主系数、副系数和自由项,可先绘出基本结构分别在单位位移 $Z_1=1$ 、 $Z_2=1$ 、 $Z_3=1$ 、 $Z_4=1$ 、 $Z_5=1$ 、 $Z_6=1$ 、荷载 $P$ 单独作用时的弯矩图(见图3—图9)。对于附加刚臂上的反力矩,可分别取刚节点处的力矩平衡方程 $\sum M=0$ 求得。对于附加链杆上的反力,可截取链杆方向的横梁作为隔离体,根据力平衡方程 $\sum X=0$ 求得。

求得基本未知量 $Z_1—Z_6$ 后,刚架结构的最后弯矩图可由叠加法绘制,计算如式(2)所示。

$$M = M_1Z_1 + M_2Z_2 + M_3Z_3 + M_4Z_4 + M_5Z_5 + M_6Z_6 + M_P \quad (2)$$

## 2 工程实例分析

### 2.1 工程概况

强流重离子加速器装置(HIAF)、加速器驱动嬗变装置(CiADS)为国家重大科技基础设施,建设项目位于广东省惠州市惠东县,项目占地890亩,岩土工程设计包括边坡支护工程、场平工程、隧道基坑支护工程三部分内容。

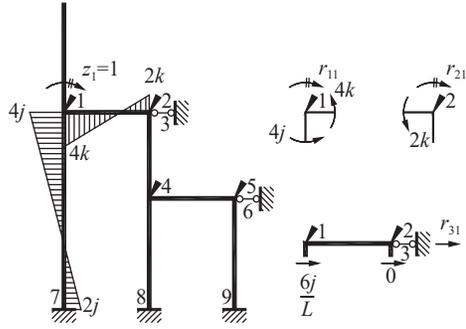


图3  $Z_1=1$  单独作用时弯矩图  $M_1$

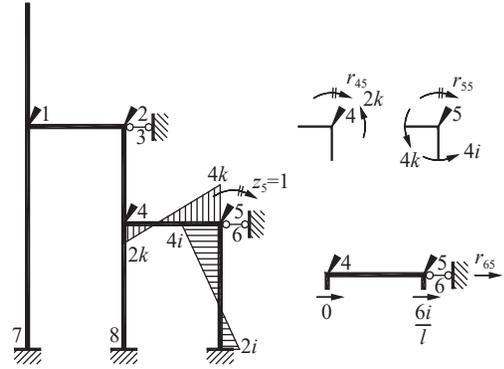


图7  $Z_5=1$  单独作用时弯矩图  $M_5$

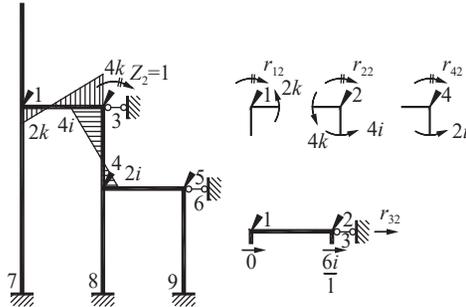


图4  $Z_2=1$  单独作用时弯矩图  $M_2$

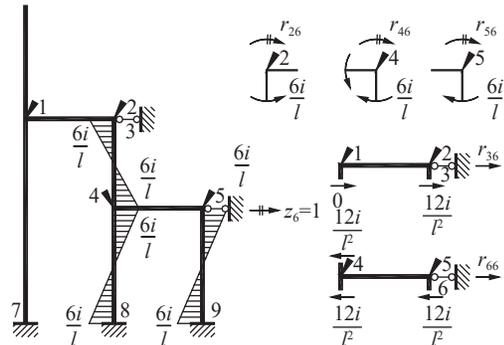


图8  $Z_6=1$  单独作用时弯矩图  $M_6$

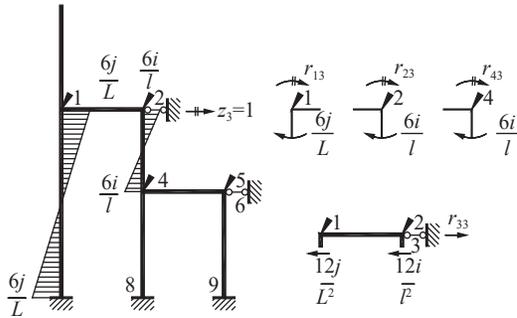


图5  $Z_3=1$  单独作用时弯矩图  $M_3$

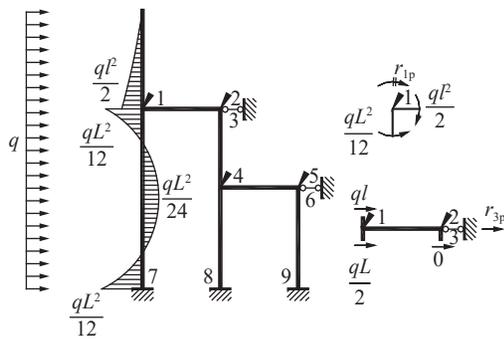


图9 荷载  $P$  单独作用时弯矩图  $M_p$

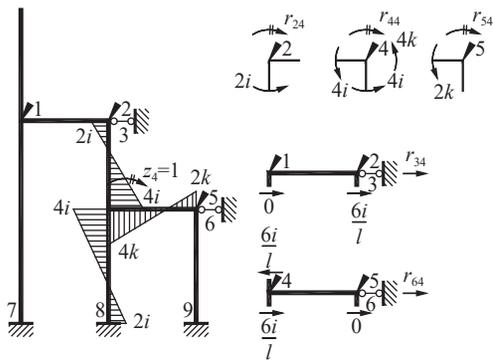


图6  $Z_4=1$  单独作用时弯矩图  $M_4$

两大科学装置区总体分为 HIAF 装置区、CiADS 装置区、主回填区三大区域,其中 HIAF 装置区场平设计高程 150.00 m, CiADS 装置区场平设计高程 126.00 m。场地内边坡总长超过 6 km,挖方边坡最大高度 42 m;主回填区边坡总高度 130 m,最大回填厚度 87 m。

主回填区坡脚设置三排桩刚架支挡结构,支挡

结构高度 15 m, 支护桩规格为  $\phi 1500@3000$  mm, 桩身配筋  $30\phi 32$ , 排距 5 m, 冠梁尺寸  $1.5\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ , 单侧配筋  $10\phi 25$ , 连梁尺寸  $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ , 单侧配筋  $12\phi 32$ 。由于最大回填厚度达 87 m, 且回填范围原始地形为自然冲沟, 渗水量大, 为有效排出坡体内深层渗水, 在填土边坡底部并排布置 8 根  $\phi 1000$  mm 混凝土排水盲管, 每 4 根盲管一组, 外侧用碎石及土工布包裹, 混凝土盲管上半部开口汇集坡体内渗水, 导入混凝土盲管内排泄。同时, 坡面间隔布置  $\phi 1000$  混凝土排水盲管导排浅表层坡体渗水。本边坡计算整体稳定性系数 1.356, 于 2020 年 11 月竣工, 目前边坡位移均未超过预警值。项目平面布置见见图 10, 主回填区边坡三排桩钢架支挡剖面见图 11, 边坡与支挡结构竣工照片见图 12、图 13。

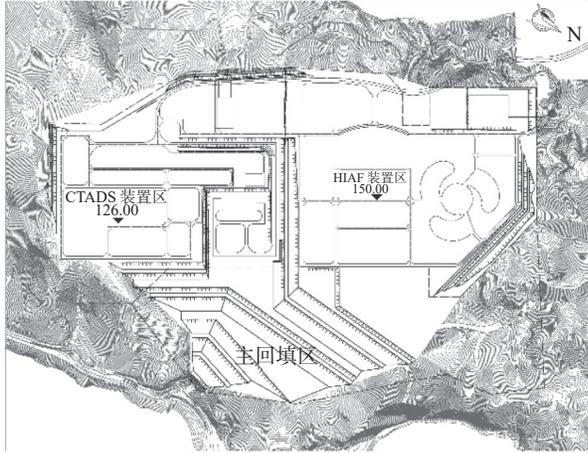


图 10 两大科学装置区平面布置图

2.2 工程地质条件简介

场地内岩土层按其成因及物理力学性质自上而

下分为：第四系人工堆积层(Q<sup>m</sup>)、第四系坡积层(Q<sup>d</sup>)、第四系残积层(Q<sup>e</sup>)及侏罗系基岩层(包括凝灰岩、凝灰质砂岩、玄武岩及少量花岗岩),其中,主回填区边坡范围基岩为凝灰岩,风化程度为强风化—微风化。

2.3 简化计算说明

(1)主回填边坡原地貌为大冲沟,三排桩支挡结构位于冲沟谷口处,由于常年受到地表水流冲刷,设桩处表层覆盖的强风化凝灰岩基本被冲蚀干净,桩身嵌固于中等风化、微风化凝灰岩地层,为简化计算,近似按照嵌固约束处理。

(2)三排桩刚架支挡结构背侧为碾压土石坝,回填材料为场平开挖的碎(块)石及黏性土,压实系数0.92。墙背土体密实性、均匀性及完整性好,为简化计算,墙背土压力按照近似矩形布置。

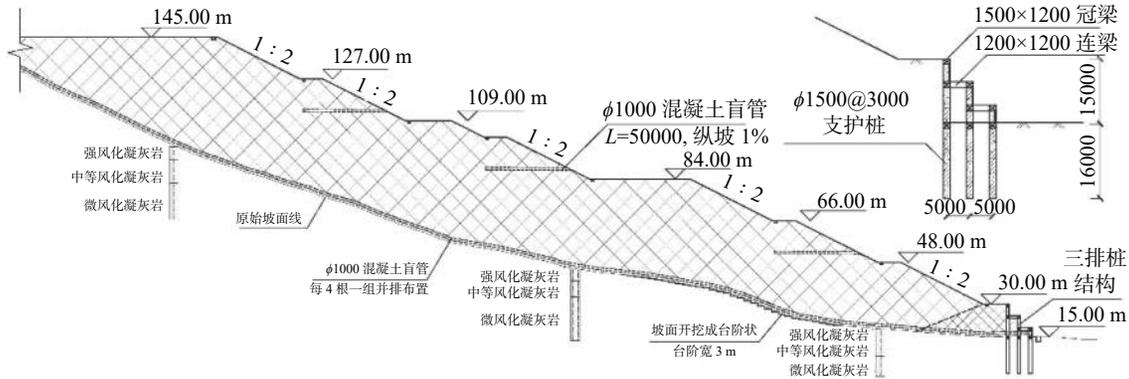


图 11 主回填区边坡三排桩刚架支挡结构剖面图(单位:mm)



图 12 主回填区边坡竣工后航拍照片



图 13 三排桩刚架支挡结构

2.4 三排桩刚架支挡结构弯矩计算

工程实例中,支护桩规格均为 φ1500@3000 mm,

图 1 中排间距  $D=5\text{ m}$ , 刚架结构高度  $h_1=5\text{ m}$ ,  $h_2=5\text{ m}$ ,  $h_3=5\text{ m}$ , 桩顶冠梁尺寸为  $1.5\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ , 排桩间连梁尺寸为  $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ , 均采用 C30 混凝土结构。

基本结构图 2 中梁 34、梁 48、梁 69 线刚度  $i$  如式(3)所示,式中  $E$  为混凝土弹性模量(后同)。

$$i = \frac{EI}{L} = \frac{\pi d^4}{64 \times h} E = 0.05E \quad (3)$$

梁 17 线刚度  $j^{[6-7]}$  如式(4)所示。

$$j = \frac{EI}{L} = \frac{\pi d^4}{64 \times L} E = 0.025E \quad (4)$$

梁 12、梁 45 线刚度  $k$  如式(5)所示。

$$k = \frac{EI}{L} = \frac{bh^3}{12 \times s} E = 0.0346E \quad (5)$$

计算所得土压力  $P=864\text{ kN/m}$ , 后排桩总高度为  $15\text{ m}$ , 因此土压力换算成作用在后排桩上的矩形分布均布荷载值  $q=57.6\text{ kPa}$ 。根据前述位移法内容及式(1)、式(2)可得到系数矩阵  $A$  如式(6)所示,自由项矩阵  $B$  如式(7)所示。

$$A = \begin{bmatrix} 0.2384 & 0.0692 & -0.015 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0692 & 0.3384 & -0.06 & 0.1 & 0 & 0.06 \\ -0.015 & -0.06 & 0.027 & -0.06 & 0 & -0.024 \\ 0 & 0.1 & -0.06 & 0.5384 & 0.0692 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0692 & 0.3384 & -0.06 \\ 0 & 0.06 & -0.024 & 0 & -0.06 & 0.072 \end{bmatrix} E \quad (6)$$

$$B = (483 \ 0 \ 1160 \ 0 \ 0 \ 0)^T \quad (7)$$

经计算, 得到 6 个节点位移  $Z_1 \sim Z_6$  结果为:

$$X = (0.23 \ 0.40 \ 4.51 \ 0.41 \ 0.14 \ 1.29)^T$$

从而, 通过叠加法可得到三排桩刚架结构最终弯矩图(见图 14)。

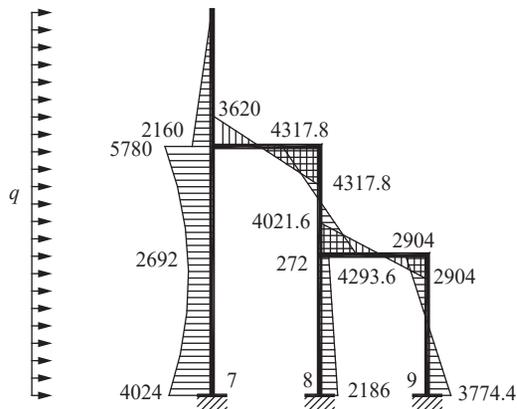


图 14 三排桩刚架结构最终弯矩图  $M$ (单位:  $\text{kN}\cdot\text{m}$ )

根据弯矩计算结果, 结合工程实例支护桩、连梁实际截面尺寸, 得到前排、中排、后排桩配筋分别为  $32\phi 32$ 、 $34\phi 32$ 、 $28\phi 32$ , 前一中排桩间连梁配筋  $14\phi 32$ , 中一后排桩间连梁配筋  $14\phi 32$ 。

### 3 有限元计算分析

为综合分析三排桩刚架支挡结构, 主回填边坡采用 Midas GTX NX 进行三维有限元计算分析<sup>[8-9]</sup>。

#### 3.1 模型计算边界及网格

主回填区边坡总高度 130 m, 平面投影长度 356 m, 模型左、右边界分别从坡顶、坡脚分别向两侧延伸 150 m, 顶部边界取坡顶线, 底部边界从坡脚往下延伸 80 m。模型总长度 656 m, 总高度 235 m。建立的三维模型及网格划分见图 15、图 16。

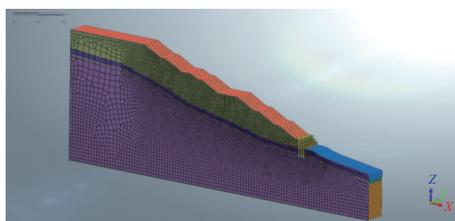


图 15 主回填区边坡三维模型及网格图

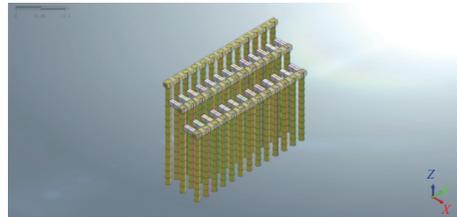


图 16 三排桩刚架支挡结构三维模型

#### 3.2 模型计算参数及结果

根据勘察报告及类似工程经验<sup>[7-8]</sup>, 有限元计算模型及材料参数按表 1 采用。经有限元计算, 三排桩刚架支挡结构桩身弯矩、连梁弯矩结果如图 17、图 18 所示。

表 1 有限元计算参数

| 材料      | 重度 $\gamma$<br>( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 黏聚力<br>$c/\text{kPa}$ | 内摩擦角<br>$\phi/(\circ)$ | 弹性模量<br>$E/\text{MPa}$ | 泊松比<br>$\nu$ | 材料计算模型  |
|---------|--|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------|---------|
| 压实填土    | 19.2   | 8                     | 25                     | 9.6                    | 0.36         | 修正莫尔-库伦 |
| 强风化凝灰岩  | 19.5   | 60                    | 30.0                   | 32.2                   | 0.32         | 修正莫尔-库伦 |
| 中等风化凝灰岩 | 26.5   | 120                   | 35.0                   | 136.5                  | 0.28         | 修正莫尔-库伦 |
| 微风化凝灰岩  | 26.9   | 250                   | 38.0                   | 182.4                  | 0.26         | 修正莫尔-库伦 |
| 抗滑桩、连梁  | 25.0   |                       |                        | 30000                  | 0.25         | 弹性      |

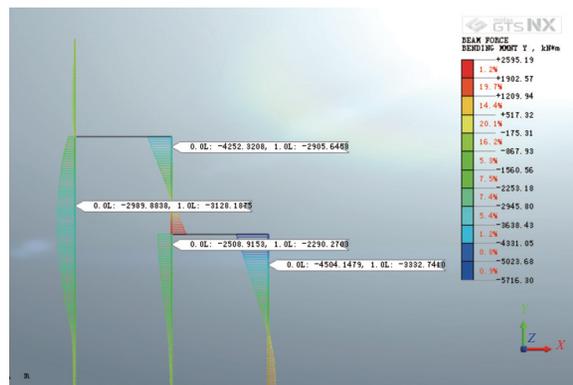


图 17 三排桩弯矩图

#### 3.3 结果对比分析

图 14 中位移法计算弯矩结果与图 17、图 18 有限元法计算弯矩结果对比情况如表 2 所示。

经对比位移法与有限元计算结果, 三排桩刚架支挡结构弯矩在分布形式及变化趋势上吻合度较高, 峰值弯矩位置基本相近, 这说明采用位移法简化方法

可近似计算三排桩刚架支挡结构的弯矩。但由于受基本假定、岩土体性质差异等因素的影响,该计算方法在不同条件下的精确度还有待进一步验证。

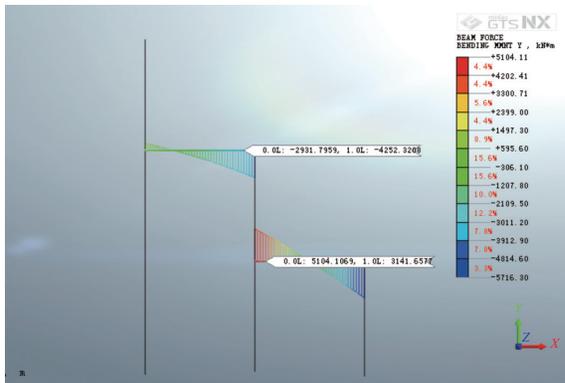


图 18 连梁弯矩图

表 2 计算结果对比表

| 计算方法 | 桩身最大弯矩 $M/(kN \cdot m)$ |         |         |        |
|------|-------------------------|---------|---------|--------|
|      | 后排桩(中部)                 | 中排桩(上部) | 中排桩(下部) | 前排桩    |
| 位移法  | 2692                    | 4317.8  | 2186    | 3774.4 |
| 有限元  | 3128                    | 4252    | 2508    | 4504   |
| 相对误差 | 16.2%                   | 1.5%    | 14.7%   | 19.3%  |

### 3.4 刚架结构分级高度对桩身弯矩影响分析

为分析本项目实例中三排桩刚架结构分级高度对桩身弯矩的影响,假设支挡结构总高度不变,通过调整图 1 中分级台阶高度  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ ,采用 MIDAS GTX NX 软件进行桩身弯矩分析,台阶分级高度类型如表 3 所示,有限元分析结果如图 19 所示。

表 3 台阶分级高度类型

| 台阶分级高度类型 | $h_1$ | $h_2$ | $h_3$ | 台阶分级高度类型 | $h_1$ | $h_2$ | $h_3$ |
|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
| 类型1      | 3     | 5     | 7     | 类型1      | 5     | 5     | 5     |
| 类型2      | 3     | 6     | 6     | 类型2      | 5     | 6     | 4     |
| 类型3      | 4     | 5     | 6     | 类型3      | 6     | 4     | 5     |
| 类型4      | 4     | 6     | 5     | 类型4      | 6     | 5     | 4     |

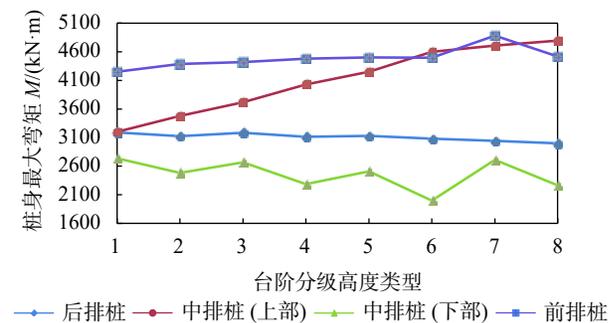


图 19 有限元分析结果

经有限元计算分析,本项目实例中三排桩刚架结构弯矩呈现以下特点:

(1)各排桩桩身最大弯矩总体趋势为  $M_{前} > M_{中上} > M_{后} > M_{中下}$ ,这种趋势是由于前排桩桩前悬空且承受了后排桩及连梁传递的弯矩,较前排的桩对较后排的桩起到了较好的支挡作用;

(2)中排桩上部弯矩随后排桩悬臂段高度  $h_1$  增大而近似呈线性上升趋势;

(3)刚架结构台阶分级高度类型 1—类型 5 中,各排桩桩身弯矩总体差异较小,刚架结构台阶分级高度应大致均匀布置,且应尽量减少后排桩悬臂段  $h_1$  的高度。

## 4 结论

(1)采用位移法简化方法可近似计算三排桩刚架支挡结构的弯矩,但由于受基本假定、岩土体性质差异等因素的影响,该计算方法在不同条件下的精确度还有待进一步验证。

(2)在深厚填土高边坡中采用三排桩刚架支挡结构可同时起到“收坡”、“固脚”作用,既能节约用地,又可以有效发挥支挡作用。

(3)三排桩刚架支挡结构中,前排桩及连梁弯矩较大,设计时应加强前排桩、连梁的截面刚度,加强连梁钢筋的锚固长度,保证节点位置刚性连接。

(4)刚架结构分级高度应大致均匀布置,且应尽量减少后排桩悬臂段高度。

## 参考文献

- [1] GB 50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] 邱红胜,周子煜.基于p-y曲线法的门式双排桩支护变形研究[J].大连交通大学学报,2022,43(1):77-81.
- [3] 杨波,郑颖人,赵尚毅.双排抗滑桩在三种典型滑坡的计算与受力规律分析[J].岩土力学,2010,31(S1):237-244.
- [4] 黄汉盛,罗江波.非常规双排桩在山地建筑边坡支护中的应用[J].工程勘察,2016,(6):39-46.
- [5] 邱俊杰.高边坡路堑双排桩支挡结构理论计算与数值模拟研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- [6] 刘青松,矫伟刚,盛志战.双排桩冠梁刚度分析及抗倾覆优化计算[J].工程勘察,2020,(6):19-23.
- [7] 宫凤梧,刘晨,郭文娟,等.双排桩双梁组合支护刚度计算的改进与位移分析[J].水文地质工程地质,2022,49(1):109-116.
- [8] 黄伟达.高边坡三排桩的工作性状及简化算法[J].工程勘察,2017,(12):9-14.
- [9] 朱华,邓成发.门架式双排桩围护结构的三维有限元分析[J].工程勘察,2011,(1):20-24.