**DOI：**10.16285/j.rsm.2016.2524

# 深基坑桩锚支护结构和土体之间协同作用

周 勇[1, 2, 3]，朱亚薇[1, 2, 3]

（1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室，甘肃 兰州 730050； 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心，甘肃 兰州 730050；3. 兰州理工大学 土木工程学院，甘肃 兰州 730050）

**摘 要：**目前深基坑桩锚支护结构的研究已引起学者的高度关注，支护结构与土体之间协同工作的研究仍然是一个亟待深入研究的课题。以桩锚支护结构与土体相互作用体系为研究对象，考虑桩后土抗力与锚杆拉力共同作用，建立静力平衡方程，在前人总结的桩锚变形协调条件的基础上，对其进行改进，并与变形协调条件的其他 3 种算法对比。结果表明，改进的方法更能反映桩锚支护结构受力变形的实际情况，由此算得的锚杆设计拉力较其他方法算得的锚杆设计拉力偏大，这是因为克服了前述方法中忽略锚杆倾角、增大了锚杆的伸长量以及未考虑桩锚实际受力状态的缺点。结合工程实例，应用 FLAC$^{3D}$ 模拟的桩身内力与改进方法算得的桩身内力基本吻合，说明改进方法的优越性。

**关 键 词：**桩锚结构；深基坑；变形协调；内力；结构变形

**中图分类号：**TU470.1 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 09－3246－07

# Interaction between pile-anchor supporting structure and soil in deep excavation

ZHOU Yong[1,2,3], ZHU Ya-wei[1,2,3]

(1. Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;
2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou, Gansu 730050, China;
3. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

**Abstract:** The studies of pile-anchor supporting structure of deep foundation pits have aroused the attention of scholars, and the interaction between supporting structure and soil still needs to be further researched. We established the static equilibrium equation considering the combined action of soil resistance after the pile and anchor tensile. The pile anchor deformation compatibility condition is modified and compared with the other three algorithms of deformation compatibility condition. The results show that the improved method can reflect the actual situation of the pile anchor supporting structure deformation. The designed pulling force of anchor is larger than other methods of designed pulling force of anchor. To overcome the ignored obliquity of the anchor, the anchors' elongation is increased and the stress states are not considered. FLAC$^{3D}$ is used to simulate the pile body's internal force. The calculated internal force of pile body by the modified method is consistent, indicating the advantage of the proposed method.

**Keywords:** structure of pile-anchor; deep excavation; deformation coordination; internal force; structural deformation

## 1 引 言

桩锚支护结构作为一种主动支护形式，削弱了非稳定土体的下滑力，提高了基坑的整体稳定性，因而在深基坑工程中得到了广泛的应用。在国内外，已有许多学者从不同角度对桩锚支护结构进行了研究。比如，帅红岩等[1]综合考虑深基坑支挡结构-内支撑结构-土体空间整体协同工作，采用线弹性有限元计算方法，模拟深基坑开挖全过程位移与内力变化情况；付晓等[2]利用多级框架锚索和抗滑桩联合作用，借助振动台试验，研究了边坡的抗震性能；毛明章等[3]揭示了预应力锚索抗滑桩协同工作机制；Li[4]、Grabe[5]、Duan[6]等对支护体系的数值模拟、稳定性计算也有一定研究。其中，研究较多的是预应力锚索与土体相互作用分析，支护桩与土体相互作用分析，而关于桩锚支护结构与土体间协同

收稿日期：2016-10-26
基金项目：国家自然科学基金（No. 51568042）；教育部长江学者和创新团队发展计划（No. IRT_17R51）。
This work was supported by the National Science Foundation of China(51568042) and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University(IRT_17R51).
第一作者简介：周勇，男，1978 年生，博士，教授，博士生导师，主要从事深基坑开挖支护和边坡加固方面的教学与研究工作。E-mail: gsutzhouy@163.com

作用的研究至今仍尚未成熟，还没有一种既合理、又简单实用并得到人们广泛认可的方法[7]。此外，对桩锚的变形协调条件，简文星等[8]优化了变形协调条件，王羽等[9]建立了一种新的考虑桩土作用效应的平面杆系有限单元分析模型，用接触单元来模拟锚固段桩锚间的协调变形。吴润泽等[10]对土抗力的分布规律进行了研究，研究表明桩后土抗力的分布形式逐渐由梯形向矩形变化。近年来，深基坑事故时有发生，比如，2009 年西安地铁 1 号线洒金桥站基坑发生坍塌事故，2 人死亡；2011 年兰州市酒钢大厦北侧局部基坑坍塌，导致邻近的招待所发生严重变形；2013 年西安地铁 3 号线发生塌方事故，5 人死亡。因此，为了减少事故的发生，提高基坑支护设计水平，对桩锚支护结构支护效果的影响进行综合性研究是非常重要的。

虽然前人对桩锚变形协调研究了很多，但仍然存在不足之处，比如忽略了锚杆的倾角，扩大了锚杆的变形量，计算与实际情况不相符等。本文针对这些不足，以桩锚支护结构与土体相互作用体系为研究对象，考虑桩后土抗力与锚杆拉力共同作用，建立静力平衡方程，对桩锚变形协调条件进行了改进，并与文献中利用变形协调计算的锚杆设计拉力进行了对比，结果表明本文提出的改进方法更符合工程实际，并为以后桩锚支护结构与土体协同工作的研究提供参考。

## 2　桩锚支护与土体相互作用体系的内力分析

研究桩锚支护与土体相互作用体系的问题，需考虑桩后岩土体土压力的分布形式，而桩后岩土体土压力的分布形式主要与土体本身的性质和支挡结构物的受力变形有关，有梯形、三角形、矩形、抛物线和倒梯形等分布形式。为了使桩锚支护结构与土体相互作用的内力表达具体化，以桩背岩土压力呈三角形分布为例。将支护桩与锚杆视为一个整体结构，滑面以上的桩视为桩底弹性嵌固的静力结构，滑面以下的锚固段桩体视为横向变形约束的弹性地基梁[11−12]，其计算简图如图 1 所示。图中 $H$ 为基坑深度，$h$ 为桩锚固段深度，$R_i$ 为第 $i$ 根锚杆的设计拉力，$\alpha$ 为锚杆的倾角，$q_z$ 为桩后土压力。

假设推力分布形式为三角形。根据基本假定，同一地层为力学性质相同的均质体，滑体为刚性体，作用于每根桩上的土压力为两相邻桩“中−中”间距的岩土压力，即作用在单根支护桩上的土压力计算宽度应取桩间距，不计桩与岩土间摩擦力、桩身自重、锚杆竖向力及桩底反力。

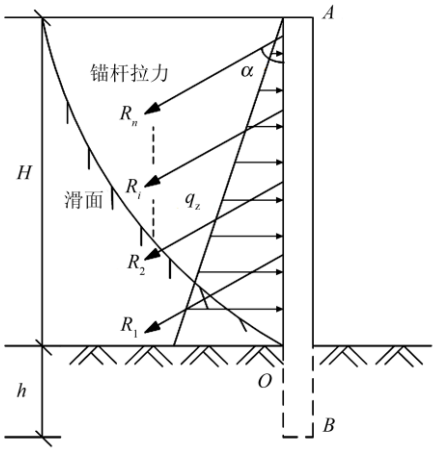



**图 1　桩锚计算简图**

**Fig.1　Sketch for computing of pile-anchor**

### 2.1　平衡条件

桩后为土体侧压力和锚杆拉力，建立静力平衡方程。整体结构在 $O$ 点处的弯矩和剪力计算如下：

$$M_0 = M - \sum_{i=1}^{n} R_{\mathrm{h}i} H_i \tag{1}$$

$$Q_0 = Q - \sum_{i=1}^{n} R_{\mathrm{h}i} \tag{2}$$

式中：$M_0$、$Q_0$ 分别为桩锚固段顶端 $O$ 点处的弯矩和剪力；$M$、$Q$ 分别为土压力和桩前合力作用于 $O$ 点的弯矩和剪力；$H_i$ 为第 $i$ 根锚杆距桩锚固段顶端 $O$ 点处的距离；$R_{\mathrm{h}i}$ 为第 $i$ 根锚杆拉力的水平分量，$R_{\mathrm{h}i} = R_i \sin\alpha_i$；$\alpha_i$ 为第 $i$ 根锚杆的倾角。

### 2.2　变形协调条件

桩锚支护结构与土体相互作用，必然要考虑桩锚支护结构的变形协调条件。由基本假定，桩锚变形协调假定，即不考虑锚杆在受力过程中与桩夹角的变化，认为锚杆的伸长量与锚杆作用点处桩的水平位移存在一个等式关系（参见图 2），图 2 中 $\Delta_i$ 为变形稳定后锚杆与桩连接处锚杆的变形量，$f_i$ 为变形稳定后锚杆与桩连接处桩的水平位移，$\theta$ 为变形稳定后锚杆的倾角。目前，桩锚的变形协调主要有以下 3 种算法：

（1）方法 1 认为 $f_i = \Delta_i$，即锚杆的变形量 $\Delta_i$ 与支护桩在该锚杆点的水平位移 $f_i$ 相等，这种方法忽略了锚杆的倾角，认为锚杆的变形量就是锚杆的水平伸长量。

（2）方法 2 认为 $f_i = \Delta_i \cos\theta$，即锚杆变形量

在水平方向上的分量 $\Delta_i \cos\theta$ 与支护桩在该锚杆点的水平位移 $f_i$ 相等，这种方法虽然考虑了锚杆的倾角，但却扩大了锚杆的变形量。

（3）方法 3 认为 $f_i \cos\theta = \Delta_i$ [13]，即锚杆的伸长量 $\Delta_i$ 与支护桩在该锚杆点的水平位移 $f_i$ 沿锚杆方向的分量相等，这种方法仅从桩锚支护结构最终达到的状态给出了变形协调条件，并没有考虑结构的实际受力状况。

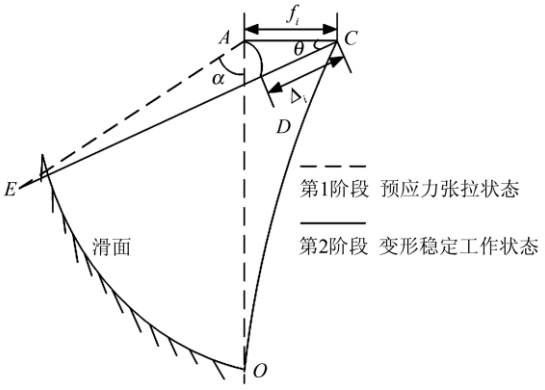



**图 2 情况 1 桩锚变形协调示意图**
**Fig.2 Pile-anchor deformation coordinate diagram under condition 1**

### 2.3 改进的变形协调条件

可以看出，从方法 1 到方法 3 在变形协调的表达式上有一定的突破，但上述 3 种方法都存在一些缺陷。乔莉[14]在此基础上进一步改进了变形协调方程，认为 $\Delta_i = (f_i - f_i')\cos\theta_i$，其中 $f_i$ 为变形稳定阶段，桩在锚杆点处的变形位移值；$f_i'$ 为桩受锚杆预应力、零或很小的土抗力值时，桩在锚杆点处的变形位移值。当向桩前土体移动时为正，向土体内侧移动时为负。基于乔莉所述情况及前 3 种方法的不足，本文认为 $\Delta_i$ 与 $f_i$ 存在某种定量关系，这种关系存在于桩锚支护结构与土体相互作用的整个阶段。按桩移动的方向分为两种情况：如图 2（桩向桩前移动）、图 3（桩向桩后土体内侧移动）所示。

情况 1：当桩向桩前移动时，如图 2 所示，$AE$ 为锚杆的初始长度，$CE$ 为锚杆变形稳定后的长度，由数学关系，设 $AE = L_i$，$CE = L_i'$，则 $\Delta_i = L_i' - L_i$，由代数关系得

$$L_i' = \sqrt{(L_i \sin\alpha_i + f_i)^2 + (L_i \cos\alpha_i)^2} \tag{3}$$

$$\Delta_i = \sqrt{L_i^2 + f_i^2 + 2 f_i L_i \sin\alpha_i} - L_i \tag{4}$$

情况 2：当桩向桩后土体内侧移动时，如图 3 所示，各物理量如情况 1。此时，得到的桩锚变形协调方程为

$$\Delta_i = L_i - \sqrt{L_i^2 + f_i^2 - 2 f_i L_i \sin\alpha_i} \tag{5}$$

$$\Delta_i = \delta_i (R_i - R_{i0}) \tag{6}$$

$$f_i = x_0 + \varphi_0 H_i + \Delta_{iq} - \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{n} \Delta_{ij} \tag{7}$$

$$\delta_i = \frac{L_{zi}}{N E_g A_s} \tag{8}$$

式中：$L_i$ 为第 $i$ 根锚杆的长度；$x_0$ 为桩锚固段顶端 $O$ 点处桩的位移大小；$\varphi_0$ 为桩锚固段顶端 $O$ 点处桩的转角大小；$\Delta_{iq}$ 为桩后土抗力和桩前合力作用下桩锚交接点 $i$ 处桩身的水平位移量；$\Delta_{ij}$ 为锚杆拉力 $R_j$ 作用于第 $i$ 根锚杆在桩锚结合点处产生的水平位移量；$R_{i0}$ 为第 $i$ 根锚杆的初始预应力；$\delta_i$ 为第 $i$ 根锚杆的柔度系数；$L_{zi}$ 为第 $i$ 根锚杆自由段的长度；$N$ 为每孔锚杆的束数；$E_g$ 为锚杆的弹性模量；$A_s$ 为每束锚杆的公称截面面积。

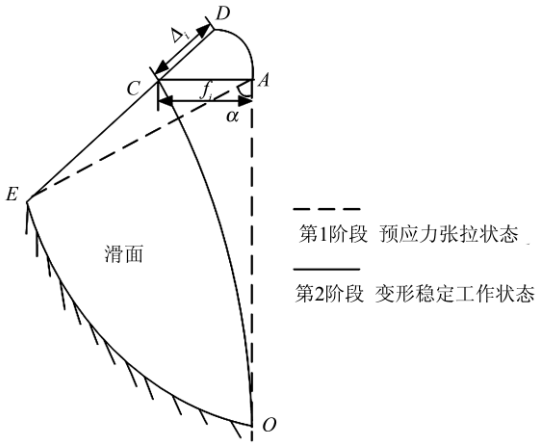



**图 3 情况 2 桩锚变形协调示意图**
**Fig.3 Pile-anchor deformation coordinate diagram under condition 2**

### 2.4 关于变形协调中 $\Delta_{iq}$ 的算法

$\Delta_i$ 计算简图如图 4 所示。

根据结构力学虚功原理，欲求 $i$ 点的位移，先在 $i$ 处作用一个单位荷载 $p = 1$，那么在单位荷载作用下桩身任意截面的弯矩为：当 $0 \leqslant x \leqslant H_i$ 时，$\overline{M} = -(H_i - x)$；当 $x > H_i$ 时，$\overline{M} = 0$。

$$M_q = -\frac{q}{6H}(H - x)^3 \tag{9}$$

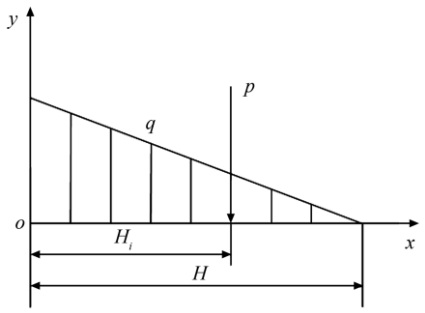



**图 4　土抗力作用下桩身位移计算示意图**
**Fig.4　Sketch for computing of pile displacement**

$$\Delta_{iq}=\int\frac{\overline{M}M_q}{EI}\mathrm{d}x=$$
$$\frac{q}{6EIL}\int_0^{H_i}\left[(H_i-x)(H-x)^3\right]\mathrm{d}x=$$
$$\frac{qH^4}{120EI}\left[10\left(\frac{H_i}{H}\right)^2-10\left(\frac{H_i}{H}\right)^3+5\left(\frac{H_i}{H}\right)^4-\left(\frac{H_i}{H}\right)^5\right] \tag{10}$$

令 $\xi_i=\dfrac{H_i}{H}$，则有

$$\Delta_{iq}=\frac{qH^4}{120EI}\left[10\xi_i^2-10\xi_i^3+5\xi_i^4-\xi_i^5\right] \tag{11}$$

### 2.5　求 $\Delta_{ij}$

由结构力学图乘法可得

当 $j\geqslant i$ 时，有

$$\Delta_{ij}=\frac{R_jH_i^2}{6EI}(3H_j-H_i) \tag{12}$$

当 $j<i$ 时，有

$$\Delta_{ij}=\frac{R_jH_j^2}{6EI}(3H_i-H_j) \tag{13}$$

桩锚固段桩顶的剪力与弯矩分别为 $Q_0$、$M_0$，由地基系数法[15]，可以确定 $x_0$ 和 $\varphi_0$：

$$x_0=\frac{\Phi_1}{\beta^3EI}Q_0+\frac{\Phi_2}{\beta^2EI}M_0 \tag{14}$$

$$\varphi_0=-\frac{\Phi_2}{\beta^2EI}Q_0-\frac{\Phi_3}{\beta EI}M_0 \tag{15}$$

$$x_0+\varphi_0H_i=\left(\frac{\Phi_1}{\beta^3EI}-\frac{\Phi_2H_i}{\beta^2EI}\right)Q_0+\left(\frac{\Phi_2}{\beta^2EI}-\frac{\Phi_3H_i}{\beta EI}\right)M_0 \tag{16}$$

令

$$A_i=\frac{\Phi_1}{\beta^3EI}-\frac{\Phi_2H_i}{\beta^2EI} \tag{17}$$

$$B_i=\frac{\Phi_2}{\beta^2EI}-\frac{\Phi_3H_i}{\beta EI} \tag{18}$$

式中：$\Phi_1$、$\Phi_2$、$\Phi_3$ 为滑动面处桩位移和转角的无量纲系数；$\beta$ 为桩的变形系数；$E$ 为桩的弹性模量，$I$ 为桩的截面惯性矩。

则有

$$x_0+\varphi_0H_i=A_iQ_0+B_iM_0 \tag{19}$$

$$\Phi_1=\frac{\varphi_2\varphi_3-\varphi_1\varphi_4}{4\varphi_3^2-4\varphi_2\varphi_4} \tag{20}$$

$$\Phi_2=\frac{\varphi_2^2-\varphi_1\varphi_3}{4\varphi_3^2-4\varphi_2\varphi_4} \tag{21}$$

$$\Phi_3=\frac{\varphi_1\varphi_2+4\varphi_3\varphi_4}{4\varphi_3^2-4\varphi_2\varphi_4} \tag{22}$$

式中：$\varphi_1$、$\varphi_2$、$\varphi_3$、$\varphi_4$ 可通过查表确定。

将式（19）代入式（7），再结合式（4）和式（6），整理得

$$\left[\delta_i(R_i-R_{io})+L_i\right]^2=$$
$$L_i^2+(A_iQ_0+B_iM_0+\Delta_{iq}-\sum_{i=1}^{n}\Delta_{ij})^2+$$
$$2(A_iQ_0+B_iM_0+\Delta_{iq}-\sum_{i=1}^{n}\Delta_{ij})L_i\sin\alpha_i \tag{23}$$

令

$$c_i=A_iQ_0+B_iM_0+\Delta_{iq}-\sum_{i=1}^{n}\Delta_{ij} \tag{24}$$

则有

$$\left[\delta_i(R_i-R_{io})+L_i\right]^2=L_i^2+c_i^2+2c_iL_i\sin\alpha_i \tag{25}$$

式（23）为第 $i$ 排锚索作用点处与桩锚的变形协调条件，假设有 $n$ 排锚索，可得到 $n$ 个等式形式的方程组，有 $2n$ 个未知数。先根据实际情况确定锚索的预应力 $R_{io}$，这样就有 $n$ 个未知数、$n$ 个方程组，显然是可以求解的。

## 3　算例分析

### 3.1　工程背景

兰州市某住宅楼工程地下车库基坑支护结构设计。桩几何尺寸如下：桩直径为 800 mm，桩身混凝土强度等级为 C30，$H_1$ = 4.3 m，$H_2$ = 8.3 m，

$H_3$ = 12.3 m，$H$ = 14.9 m，$h$ = 5.0 m，桩的弹性模量 $E$ = 30 GPa；锚杆采用 3 束 Φ 15.2 mm 的预应力钢绞线制作，每束锚杆的公称截面面积 $A_s$ = 140 mm$^2$，其设计强度 $\sigma$ =1 860 MPa，锚杆与水平面的夹角为 10°，$L_1$ = 14 m（$L_{z1}$ = 4 m、$L_{m1}$ = 10 m），$L_2$ = 15 m（$L_{z2}$ = 4 m、$L_{m2}$ = 11 m），$L_3$ = 16 m（$L_{z3}$ = 4 m、$L_{m3}$ = 12 m），其中 $L_{z1}$、$L_{z2}$、$L_{z3}$ 分别为锚杆 1、2、3 的自由段长度，$L_{m1}$、$L_{m2}$、$L_{m3}$ 分别为锚杆 1、2、3 的锚固段长度；钢绞线弹性模量 $E_g$ = 195 GPa。最下一排锚杆的设计极限抗拔力为 254 kN。由于桩后土体是分层的，实际岩土体压力分布形式如图 5 所示，土体参数如表 1 所示。

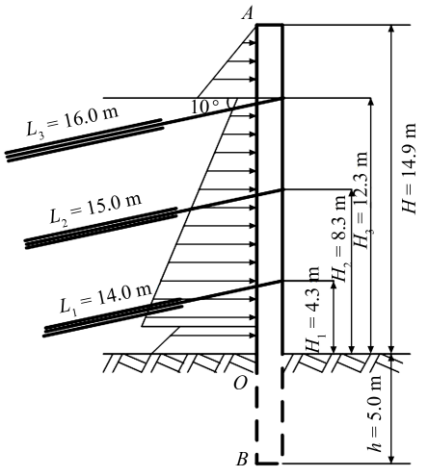



**图 5 桩锚计算简图**

**Fig.5 Calculation diagram of the pile-anchor structure**

**表 1 各土层土体参数**

**Table 1 Soil parameters of soil layers**

| 岩土名称 | 重度 $\gamma$ /(kN/m$^3$) | 黏聚力 $c$/kPa | 内摩擦角 $\varphi$ /(°) | 厚度 $h$ / m |
|---|---|---|---|---|
| 杂填土 | 17.0 | 10.0 | 15.0 | 2.6 |
| 粉土 | 15.0 | 15.0 | 20.0 | 10.5 |
| 卵石 | 23.0 | 0.0 | 40.0 | 1.8 |

## 3.2 计算锚杆设计拉力

用改进的桩锚变形协调方程计算的锚杆设计拉力与前 3 种方法中所得锚杆设计拉力如表 2 所示。

由表 2 可以看出，用改进的方法计算的锚杆设计拉力较前 3 种方法有所增大，这主要是考虑了桩锚实际的工作状态，方法 1 中忽略锚杆倾角对第 $i$ 排锚杆作用点处桩身位移的贡献，使得计算的锚杆拉力增量偏小，锚杆预应力偏大，若用该方法计算得到的预应力对桩−锚结构进行预应力的施加，可能会导致支护桩向桩后土体内产生一定的变形，使支护桩在桩体施工完成后预应力施加阶段处于不利的受力和变形状态；方法 2 中扩大了锚杆的变形量，不利于锚杆性能的充分发挥，不能反映桩锚变形协调的实际状态；方法 3 中弥补了方法 2 的不足，但是没有考虑桩锚实际的工作状态，仅从桩锚最终达到的变形状态给出变形协调方程，它假定了桩在预应力施加阶段，桩身锚杆点不发生位移，显然与实际不符；而改进的方法无论是在桩锚变形协调的哪个阶段，都存在如式（3）或式（4）那样的等量关系，理论上更能反映锚杆实际的受力状态，增大了锚杆设计的安全系数，减小事故的发生；不足之处是，虽然改进的变形协调条件在一定程度上反映桩锚支护结构与土体协同作用的真实状态，但方程求解比较复杂。

**表 2 4 种方法计算的锚杆设计拉力（单位：kN）**

**Table 2 Design tension values of anchors using four different methods(unit: kN)**

| 方法 | 锚杆 1 $R_1$ | 锚杆 2 $R_2$ | 锚杆 3 $R_3$ |
|---|---|---|---|
| 方法 1 | 172.51 | 203.44 | 183.90 |
| 方法 2 | 172.43 | 203.23 | 183.27 |
| 方法 3 | 172.31 | 203.12 | 183.81 |
| 改进方法 | 178.26 | 218.20 | 188.45 |

## 3.3 数值验证

为了验证本文方法的可靠性及实用性，采用 FLAC$^{3D}$ 平面应变模型进行数值模拟。FLAC$^{3D}$ 计算模型：长×宽×高为 60.0 m×2.0 m×30.0 m（$x$×$y$×z），由开挖深度确定基本模型的尺寸及形状如图 6 所示，土体模型为摩尔−库仑模型，模型底面采用固定支座边界类型，约束铅直方向变形，顶面为自由面。一共包括 3 060 个单元体，总计 5 133 个节点。

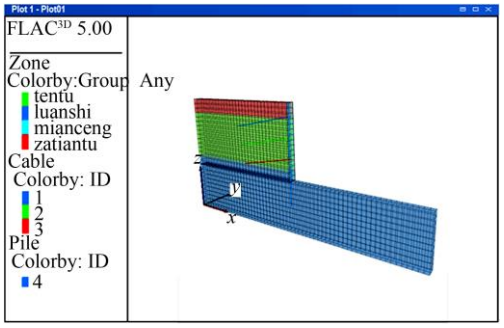



**图 6 基本模型**

**Fig.6 Basic model**

采用 cable 单元模拟预应力锚杆，pile 单元模拟支护桩。支护桩、锚杆等结构划分单元与土层划分单元一致通过接触面（interface）进行耦合。桩锚支护结构变形满足平面应变问题，由弹性力学中平面

应变模型可知，该模型实质上就是二维模型，即本例中模型沿 $y$ 方向无限长，以任一横截面为 $xz$ 面，任一纵线为 $y$ 轴，则所有一切应力分量、形变分量以及位移分量都不沿 $y$ 方向变化。所得位移云图如图 7 所示，$y$ 轴方向的应力云图如图 8 所示。

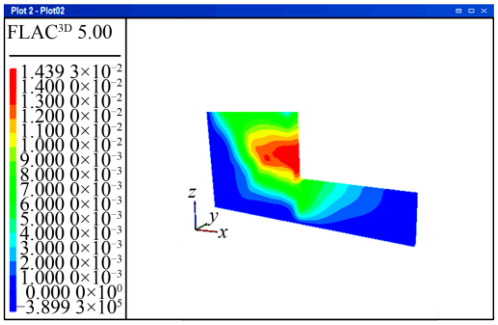



**图 7　位移云图（单位：m）**
**Fig.7　Displacement contour(unit: m)**

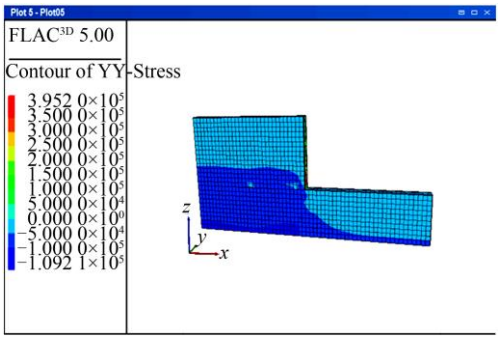



**图 8　$y$ 轴方向的应力云图（单位：Pa）**
**Fig.8　Stress contour in the direction of *y*-axis(unit: Pa)**

将文献[13]中利用方法 3 算得的桩身弯矩和本文方法，即将求得的桩身弯矩与模拟结果进行对比，结果如图 9 所示。经计算，桩后土压力为 533.3 kN/m，其合力点距桩锚固段 $O$ 点的距离为 5.1 m，那么，由桩后土体推力产生的桩锚固段顶端 $O$ 点处的弯矩 $M$ = 2 720.3 kN·m，剪力 $Q$ = 533.3 kN；而由锚杆拉力所产生的弯矩为 2 886.2 kN·m，剪力为 354.5 kN。

因此，桩锚固段顶端 $O$ 点处的弯矩和剪力分别为 165.9 kN·m、178.8 kN。用改进的变形协调条件分别计算了 $H$ 为 0、1.8、4.3、8.3、12.3 m 处桩身的弯矩，$M$ 值分别为 165.9、−168.6、−463.53、−167.8、29.4 kN·m。

由计算结果与模拟结果可以看出，桩身内力变化值相差不是很大，而文献[13]中算得的桩身弯矩比实际弯矩偏小，证明本文提出改进的变形协调方程，在理论上更能反映桩身实际的受力状态，说明将该方法运用于工程实践是完全可行的。

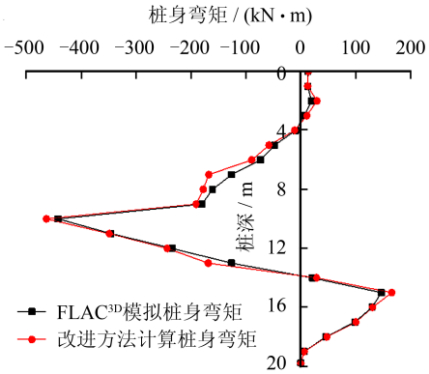



**图 9　桩身弯矩图曲线**
**Fig.9　Bending moment curves of pile body**

## 4　结　论

（1）本文在桩锚支护结构相互作用的基础上，建立了新的静力平衡方程。对桩锚变形协调条件进行了改进，所得结果更好地反映了桩锚支护结构的内力与变形规律。

（2）经过分析和计算，不仅证明了本文所采用的计算方法在计算桩锚变形及内力时的优越性；同时也证明了将土与结构的相互作用理论应用于桩锚支护结构是可行的，但改进的方法在方程求解时比较复杂。

（3）由于考虑的是桩锚支护结构与土体间协同作用，其受力情况比较复杂，不管是平衡方程还是变形协调方程，都是在基本假定条件下建立的，与实际情况有一定差别。在锚杆总拉力求解方法以及桩后土体土压力的分布形式等方面还有待进一步研究。

## 参 考 文 献

[1]　帅红岩，陈少平，曾执. 深基坑支护结构变形特征的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊2): 374－380.
SHUAI Hong-yan, CHEN Shao-ping, ZENG Zhi. Numerical simulation of deformation characteristics of supporting structure of deep foundation pits[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(Supp.2): 374－380.

[2]　付晓，张建经，周立荣. 多级框架锚索和抗滑桩联合作用下边坡抗震性能的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 462－470.

FU Xiao, ZHANG Jian-jing, ZHOU Li-rong. Experimental study on the seismic performance of the slope under the joint action of multistage frame anchoring and anti-sliding pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 462－470.

[3] 毛明章, 邹先锋. 预应力锚索抗滑桩协同工作机理[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(增刊2): 1552－1555.
MAO Ming-zhang, ZOU Xian-feng. Research on mechanism of collaborative working of prestressed anchor anti-slide piles[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2010, 6(Supp.2): 1552－1555.

[4] LI ZHONG, WEI JIA, YANG JUN, et al. Stability calculation method of slope reinforced by prestressed anchor in process of excavation[J]. **The Scientific World Journal**, 2014(10): 1661－1667.

[5] GRABE JÜRGEN, HENKE SASCHA, SCHÜMANN BJÖRN. Numerical simulation of pile driving in the passive earth pressure zone of excavation support walls[J]. **Bautechnik**, 2009, 86(Supp.1): 40－45.

[6] DUAN LIANGLIANG, FANG LIGANG. Interaction between transverse isotropy rock slope and supporting structure[J]. **Journal of Central South University of Technology**, 2008, 15(Supp.1): 415－423.

[7] 李凯玲, 门玉明. 锚索抗滑桩与岩土体相互作用研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, (1): 20－22, 26.
LI Kai-ling, MEN Yu-ming. Study of interaction among anti-slide pile, anchor and soil body[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2006, (1): 20－22, 26.

[8] 简文星, 邓先华. 优化的变形协调条件在桩-锚结构锚索拉力计算中的应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2171－2178.
JIAN Wen-xing, DENG Xian-hua. Application of optimized deformation consistence condition to anchor cable tensile force calculation of pile-anchor cable structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(8): 2171－2178.

[9] 王羽, 柴贺军, 吴祖松, 等. 基于桩-土作用效应的组合式抗滑桩结构研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(1): 90－93.
WANG Yu, CHAI He-jun, WU Zu-song, et al. Structure of combined anti-sliding piles based on pile-soil interaction[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science Edition)**, 2014, 33(1): 90－93.

[10] 吴润泽, 周海清, 胡源, 等. 基于FLAC$^{3D}$的锚索抗滑桩滑坡推力分布规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(5): 548－555.
WU Run-ze, ZHOU Hai-qing, HU Yuan, et al. Research on distribution law of landslide thrust of anchored anti-slide pile based on FLAC$^{3D}$[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation of Engineering**, 2013, 33(5): 548－555.

[11] 朱彦鹏, 魏升华. 深基坑支护桩与土相互作用的研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2840－2844.
ZHU Yan-peng, WEI Sheng-hua. Research on interaction between deep excavation supporting pile and soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2840－2844.

[12] 桂树强. 预应力锚索抗滑桩结构计算方法[J]. 地球科学, 2005, 30(2): 233－240.
GUI Shu-qiang. Design method for using stabilizing piles with pre-stressed anchored cables in landslide remediation works[J]. **Earth Science**, 2005, 30(2): 233－240.

[13] 刘焕斌, 晏鄂川, 吴益平, 等. 桩锚结构预应力的变形协调确定方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 891－894, 900.
LIU Huan-bin, YAN E-chuan, WU Yi-ping, et al. A compatible distortion method of cable in structure of pile-anchor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.): 891－894, 900.

[14] 乔莉. 桩、锚协同作用的预应力锚索抗滑桩设计及程序开发[D]. 武汉: 中国地质大学, 2007.
QIAO Li. Design and program development of anti-slide pile with pre-stressed anchored cables based on pile-anchor's cooperation[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2007.

[15] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
The Second Railway Survey and Design Institute. Anti-slide pile design and calculation[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983.