

文章编号:1000-582X(2004)08-0100-05

# 柱板式挡土墙面板后土压力有限元分析\*

周世良<sup>1,2</sup>, 陆春华<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 工程力学系, 重庆 400030; 2. 重庆交通学院 河海建筑工程系, 重庆 400074)

**摘要:**采用三维有限元分析方法对柱板式挡土墙面板后土压力进行数值计算。计算中选用了8结点等参单元,混凝土采用各向同性线弹性本构模型,土体则采用弹塑性模型,其屈服准则采用D-P准则,引入刚塑性接触面模型,以模拟混凝土和土体之间的相互作用。研究表明面板后土压力与经典土压力理论有较大差别,其分布接近一抛物线。根据有限元分析,提出了一个用于柱板式挡土墙面板后土压力计算的修正公式,按此进行工程设计,将更趋经济、合理。

**关键词:**柱板式挡土墙;土压力;有限元;接触面

**中图分类号:**O344

**文献标识码:**A

柱板式挡土墙由立柱和面板构成,具有安全可靠、结构简单、施工方便和经济适用等特点,近年来得到了广泛的应用,已成为岩土工程中主要的支挡结构之一。柱板式挡土墙施工所需开挖的土石方量少,对于建筑用地宽度小、场地不允许大开挖或大开挖不经济的工程,尤为适用。

柱板式挡土墙以立柱为主要受力构件,立柱除了要承受直接作用的土压力外,还要承受立柱间土体成拱(土拱效应)传递的间接土压力以及通过面板传递的间接土压力。根据不同的使用要求和施工条件,立柱可以采用方柱、圆柱或空心圆柱型。圆柱型通常采用钻孔或挖孔灌注桩,方柱则常为挖孔灌注桩。立柱间的连接构件是面板,主要起到挡土和形成直立墙壁的作用。根据结构选型和施工方法的不同,面板可以采用平板、弧形板、折板、变厚度板等。面板可现浇,也可预制安装。

在目前的工程设计<sup>[1]</sup>中,柱板式结构所承受的土压力通常直接取整体挡墙上的土压力,即同一般重力式挡土墙一样,直接按经典土压力理论进行计算。这种算法对立柱尚能接受,但对面板会使土压力随埋深增加呈线性增大,这与模型试验<sup>[2]</sup>和原型观测差别甚大。事实上,柱板式挡土墙在使用过程中,立柱间的土体能以立柱为拱脚形成土拱(土拱的形成及作用机理

见太沙基的《理论土力学》<sup>[3]</sup>,在此不作讨论)而维持稳定,面板只承受土拱内土体的压力,荷载明显减小。鉴于此,首先对柱板式挡土墙面板后土压力进行三维有限元分析,在此基础上,提出一个比较接近于工程实际,而又简单实用的面板后土压力计算方法。

## 1 有限元分析方法

### 1.1 单元的选择

进行有限元分析需将分析问题的求解域离散成有限个适当的仅在结点处相连的单元,等参元是有限元分析中适用性最广的单元型式。等参元采用等参变换来描述单元的几何特性和力学特性,即采用相同数目的结点参数和相同的插值函数来进行单元几何形状和场函数的变换。借助于等参元,不仅可以对一般的任意几何形状的工程等问题方便地进行有限元离散,而且可采用标准化的数值积分方法计算有限元方程所含各矩阵中的元素,从而使编制各类工程实际问题的有限元分析通用化程序成为可能。根据分析问题属性的不同,可以选择不同的等参元。本问题为空间问题,考虑到计算模型中无曲面,故选用了空间八结点等参元。

### 1.2 有限元基本方程

按空间八结点等参元的等参变换原则,取单元内

\* 收稿日期:2004-04-21

基金项目:国家自然科学基金(10172098)资助课题

作者简介:周世良(1972-),男,浙江宁波人,讲师,重庆大学博士研究生,主要从事港口工程、工程力学的教学与研究。

任一点沿  $x, y, z$  三方向的位移  $u, v, w$  模式为

$$\{u\} \approx \{\bar{u}\} = \{\bar{u} \bar{v} \bar{w}\}^T = [N]\{\delta\}^e \quad (1)$$

式中： $\{u\} = \{u \ v \ w\}^T$  为单元内任一点的位移矢量； $\{\bar{u}\}$  为位移矢量的近似解； $\{\delta\}^e = \{\delta_1^T \ \delta_2^T \ \dots \ \delta_8^T\}^T$  为单元结点位移矢量。

单元静力平衡方程

$$[L]^T\{\sigma\} = \{f\} \quad (2)$$

材料本构方程

$$\{\sigma\} = [D_{ep}]\{\epsilon\} \quad (3)$$

式中： $[D_{ep}]$  为材料弹塑性矩阵。

几何方程

$$\{\epsilon\} = [L]\{u\} \quad (4)$$

将几何方程(4)代入物理方程(3)，再代入平衡方程，即得以位移表示的控制方程，写成矩阵形式有

$$[L]^T[D_{ep}][L]\{u\} = \{f\} \quad (5)$$

应力边界条件

$$[n]^T\{\sigma\} + \{F\} = 0 \quad (6)$$

式中： $[n] = \begin{bmatrix} n_x & 0 & 0 & n_y & 0 & n_z \\ 0 & n_y & 0 & n_x & n_z & 0 \\ 0 & 0 & n_x & 0 & n_y & n_z \end{bmatrix}$ ，其中  $n_x, n_y, n_z$

为该边界外法线与  $x, y, z$  轴正向夹角的余弦； $\{F\}$  为面力矢量，即  $\{F\} = [F_x \ F_y \ F_z]^T$ 。

利用加权残值法将控制方程和边界条件在空间上离散，可得空间离散后以单元结点位移表示的单元平衡方程

$$[K_e]\{\delta\}^e = \{R\}^e \quad (7)$$

式中： $[K_e]$  为单元刚度矩阵，其计算式为

$$[K_e] = \iiint_{V_e} [B]^T [D_{ep}] [B] dx dy dz \quad (8)$$

$\{R\}^e$  为单元等效结点荷载列阵。

由体积力产生的单元等效结点荷载向量可用下式计算

$$\{R\}_V^e = \iiint_{V_e} [N]^T \{f\} dx dy dz \quad (9)$$

由面力产生的单元等效结点荷载向量可用下式计算

$$\{R\}_F^e = \iint_{S_e} [N]^T \{F\} ds \quad (10)$$

将单元平衡方程在计算域内整体组装，即可得到包含所有结点未知量的总体平衡方程

$$[K]\{\delta\} = \{R\} \quad (11)$$

求解总体平衡方程可得各单元结点处的位移，代回位移模式、几何方程和物理方程，即可得到计算域内任一点处的位移、应变和应力。

### 1.3 材料的力学模型

混凝土可视为各向同性线弹性材料，故计算中采用各向同性线弹性本构模型，土体则采用了弹塑性模型，其屈服准则采用德鲁克-普拉格( Drucker-Prager) 准则<sup>[4]</sup>。

Drucker-Prager 屈服准则的表达式为：

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (12)$$

式中： $\alpha = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{9 + 3\sin^2\varphi}}$ ， $K = \frac{\sqrt{3}C\cos\varphi}{\sqrt{3 + \sin^2\varphi}}$ ， $C$  为粘聚力， $\varphi$  为内摩擦角； $I_1$  为应力张量第一不变量， $J_2$  为应力偏量第二不变量。

若土体的应力满足上式，则材料进入塑性状态，取塑性势函数与屈服函数的表达式相同，则塑性矩阵为：

$$[D_p] = [D] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [D] / \left( A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [D] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} \right) \quad (13)$$

式中： $[D]$  为弹性矩阵， $F$  为屈服函数， $A$  为应变硬化参数。

弹塑性矩阵为：

$$[D_{ep}] = [D] - (1 - \gamma)[D_p] \quad (14)$$

式中： $\gamma = \begin{cases} 1 & \text{弹性区单元或卸载单元} \\ 0 & \text{塑性区单元} \end{cases}$

在应变空间中以矩阵形式表示的本构关系为：

$$\{d\sigma\} = [D_{ep}]\{d\epsilon\} \quad (15)$$

### 1.4 接触面单元的力学模型

接触单元模型的选取将直接影响柱板式挡墙面板上所受到的水平向土压力和竖向摩擦力的大小与分布，以及土体和结构之间的相对位移。采用殷宗泽<sup>[5]</sup>等提出的刚塑性接触面模型，并推广应用于三维空间问题。对于有厚度的接触面单元内的土体，其变形包括土体的基本变形  $\epsilon$  和破坏变形  $\epsilon''$ 。基本变形与其他土体单元一样，不论土体滑动与否都存在；而滑动破坏和拉裂破坏变形，则只有当剪应力达到抗剪强度，并产生了沿接触面方向的滑动破坏或接触面法向的拉裂破坏时才存在。计算基本变形所用的本构模型与其他土体单元相同，根据刚塑性变形的假定，即破坏前接触面上无相对位移，一旦拉裂或滑动，相对位移会不断发展。对破坏变形  $\epsilon''$ ，其应力应变关系可表示为

$$\Delta\epsilon'' = \begin{bmatrix} \Delta\epsilon''_x \\ \Delta\epsilon''_y \\ \Delta\epsilon''_z \\ \Delta\gamma''_{xy} \\ \Delta\gamma''_{yz} \\ \Delta\gamma''_{zx} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/E'' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G'' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xy} \\ \Delta\tau_{yz} \\ \Delta\tau_{zx} \end{bmatrix} = C''\Delta\sigma \tag{16}$$

式(16)表示的接触面位于  $xy$  平面内,参数  $E''$  和  $G''$  分别反映拉裂和剪切破坏所产生的变形。由于受到接触面上混凝土的约束,接触面方向的正应变  $\Delta\varepsilon''_x$  和  $\Delta\varepsilon''_y$  为 0。应注意的是,式(16)中的  $C''$  是有方向性的。根据接触面破坏的刚塑性假定,如果接触面被拉裂,可令  $E''$  为一很小的数;如果接触面受压,  $E''$  应取一很大的值或者直接令  $1/E'' = 0$ 。同理,当  $\tau \geq 0.99\tau_f$  (破坏时的剪应力)或应力水平  $s \geq 0.99$ ,  $G''$  取一小值;当  $\tau < 0.99\tau_f$  (或  $s < 0.99$ ),  $G''$  取一大值或者直接令  $1/G'' = 0$ 。薄层单元的厚度对计算结果影响较大, Desai<sup>[6]</sup> 提出,取其厚度为薄层单元长度的  $1/100 \sim 1/10$ 。

## 2 工程实例分析

### 2.1 有限元计算模型

乌江航道专用码头 AB 段的挡墙采用柱板式支挡结构,桩柱采用  $1.5 \times 2.2 \text{ m}$  的方桩,中心距  $6 \text{ m}$ ,面板厚度为  $0.3 \text{ m}$ ,挡墙高度  $7 \sim 10 \text{ m}$  不等,结构布置见图 1。现运用三维有限元法对柱板式挡墙面板后土压力进行计算。根据柱板式挡墙的结构特点和相关工程计算经验,模型计算范围按如下选取:长度取一个柱板结构受力单元的长度 ( $7.5 \text{ m}$ ),即两根桩柱加一块面板,高度取  $10 \text{ m}$ ,宽度取高度的 3 倍 ( $30 \text{ m}$ )。模型的边界条件采用混合边界条件,即既有位移边界条件,又有应力边界条件。柱板挡墙底部采用全固定边界,即不允许挡墙产生滑动或沉降,挡墙两侧边界在挡墙长度方向固定。墙后土体底部边界垂直方向固定,两侧边界在挡墙长度方向固定,土体后方边界施加一静止土压力。在挡墙和填土接触面设置了接触面单元,三维有限元计算网格见图 2。模型上施加的外力为结构自重,计算中使用的材料参数见表 1。

表 1 计算中的材料参数

项目	容重 /kN/m <sup>3</sup>	泊松比 $\mu$	弹性模量 $E_s$ /kPa	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\phi$ /°
墙体单元	25	0.22	$2.4 \times 10^7$		
土体单元	19	0.32	7 000	0	32

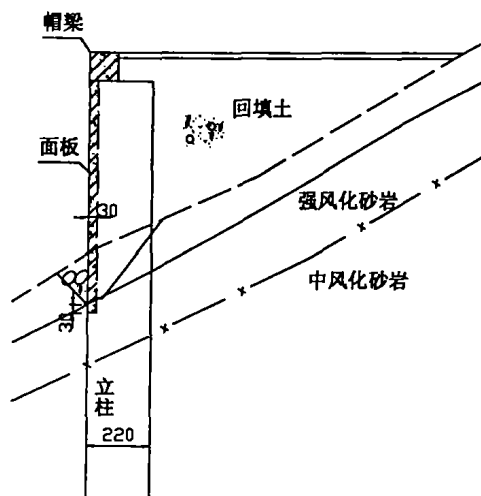


图 1 柱板式挡墙结构图

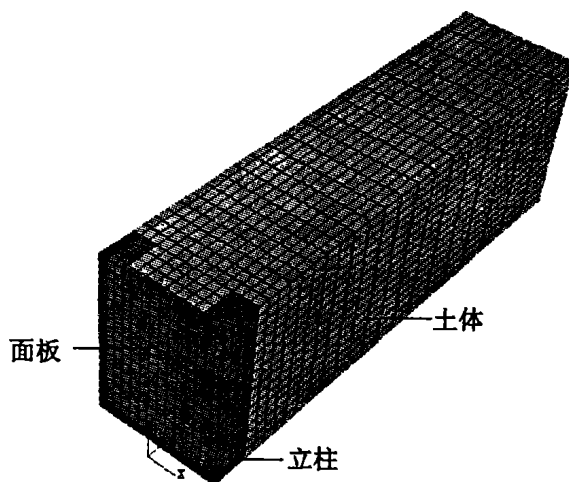


图 2 三维有限元计算网格

### 2.2 计算结果与分析

#### 2.2.1 土压力沿墙高分布规律分析

有限元分析得到柱板式挡土墙面板后土压力沿墙高分布见图 3。可以看出:1) 面板后的土压力分布不同于库仑主动土压力,而接近一抛物线。土压力在约  $1/2$  墙高以上随覆土深度增加较快,数值略大于库仑公式计算值; $1/2$  墙高以下随覆土深度增加越来越不明显,数值也较规范公式计算值小得多,在挡墙底部土压力反而有所减小。2) 数值模拟得到的面板后土压力的最大值约位于距墙顶  $0.6H$  处,数值约为按库仑公式得到的土压力最大值的  $60\%$ 。

#### 2.2.2 土压力水平方向分布规律分析

面板后不同高度处水平方向土压力分布见图 4。可以看出:1) 土压力在面板跨中最大,往两边逐渐减小。2) 在挡墙的上部,面板后水平方向土压力受立柱的影响不大,分布较为均匀;在挡墙的下部,面板后水平方向土压力极大地受到立柱的影响,表现出中部大,两侧快速减小的现象。

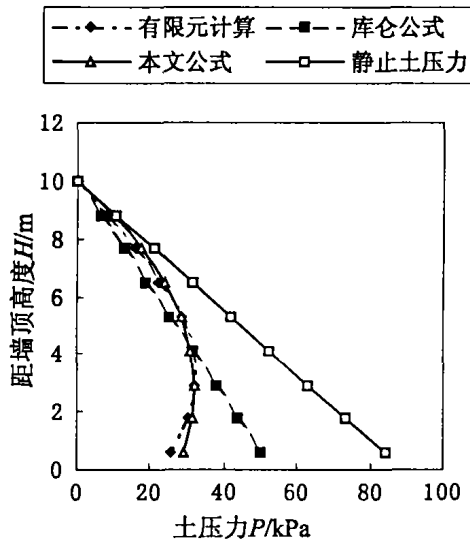


图3 土压力沿墙高分布

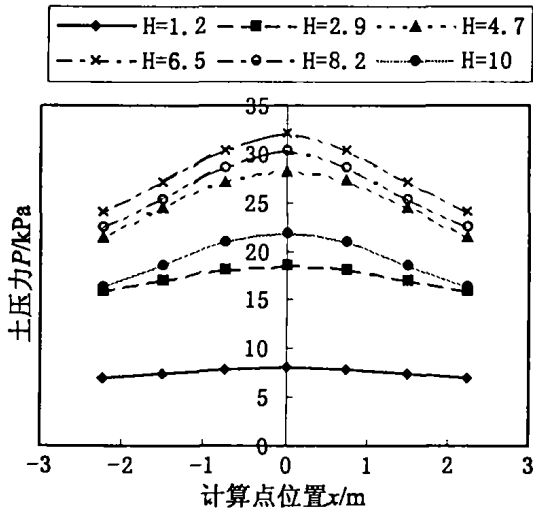


图4 距墙顶不同高度处水平方向土压力分布

柱板式挡墙面板后土压力分布不同于按经典土压力理论计算的结果,这是由于立柱间土拱效应造成的。由于立柱间隔布置,使立柱后的土体水平变形发展不均匀,产生相对位移,从而以立柱后部为拱脚产生水平方向的土拱效应;另外由于立柱间土体与立柱产生相互摩擦,使立柱间土体的水平变形发展也不均匀,从而会以立柱的侧面为拱脚产生水平方向土拱效应。这些土拱的存在,将柱板式挡墙面板后土体的很大一部分侧压力传至立柱上,使作用在面板上的土体侧压力大大降低,且远小于经典土压力理论的计算值。此外,随着覆土深度的增加,位于立柱间的土体也越多,由于土体与立柱间的相互摩擦,面板后土体的竖向变形发展也越不均匀,使竖向土拱效应越来越明显。拱上面土体的一部分重量通过立柱向下传递,从而减小了拱下面土体的垂直压力和水平侧压力,使挡墙底部面板后土压力随覆土深度不再增加,甚至略有减小。

### 2.2.3 土压力简化计算方法

根据以上分析,考虑到工程应用的方便和实用,笔者提出将柱板式挡墙面板后土压力系数表示成随深度变化的光滑连续线性表达式,即:

$$K_i = K_0(1 - h_i/H) + 0.5K_a h_i/H \quad (17)$$

式中: $K_i$  - 柱板式挡墙面板后土压力系数; $K_0$ 、 $K_a$  - 加筋体填料的静止土压力系数和库仑主动土压力系数; $H$  - 挡墙高度(m); $h_i$  - 距墙顶高度或覆土深度(m)。

按本文提出的计算公式求得的土压力(见图3)与有限元计算结果比较接近,由此计算的面板后土压力也更接近于工程实际。

## 3 结 语

1) 有限元计算表明,柱板式挡土墙面板后土压力分布受立柱的影响较大。土压力沿墙高分布与经典土压力理论得出的分布规律有较大差别,而接近一抛物线。土压力在约1/2墙高以上随覆土深度增加较快,数值略大于库仑公式计算值;1/2墙高以下随覆土深度增加越来越不明显,数值也较规范公式计算值小得多,在挡墙底部土压力反而有所减小。距墙顶不同高度处,沿水平方向,跨中土压力最大,往两侧逐渐减小。土压力最大值约为按库仑公式得到的最大值的60%。

2) 根据有限元计算结果提出了柱板式挡土墙面板后土压力系数计算的修正公式,它是随覆土深度变化的光滑连续线性表达式,能方便地应用于工程设计,依此进行柱板式结构设计也将更趋经济、合理。

### 参考文献:

- [1] YB9258-97. 建筑基坑工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [2] 张金民,曾进群. 桩锚挡墙支护体系挡板土压力的试验研究[M]. 地下空间,2002,22(1):58-64.
- [3] K 太沙基. 理论土力学[M]. 徐志英译. 北京:地质出版社,1960.
- [4] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算. 北京:中国水利水电出版社,1980.
- [5] YIN ZONGZE, ZHU HONG, ZU GUOHUA. A study of deformation in the interface between soil and concrete [J]. Computer & Geotechnics, 1995, 17: 75-92.
- [6] DESAI C S. Modeling for cyclic normal and shear behavior of interfaces [J]. J Eng Mech ASCE, 1988, 114 (7): 1198-1217.

## FEM analysis on the earth pressure behind the panel of post-panel retaining wall

ZHOU Shi-liang<sup>1,2</sup>, LU Chun-hua<sup>1</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Department of River and Ocean Engineering, Chongqing Institute of Communications, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** the distribution of earth pressure behind the panel of post-panel retaining wall is analyzed with 3-D FEM. Eight-noded isoparametric element is adopted, concrete is regarded as linear elastic object, soil is regarded as elastic-plastic object, an interface model is introduced to simulate the interaction between concrete and soil. It is demonstrated that the earth pressure behind the panel of post-panel retaining wall is greatly different from the classical earth pressure theory, its distribution is close to a parabola. Based on FEM analysis, a modified formula is induced to calculate the earth pressure behind the panel of post-panel retaining wall, the engineering design by this modified formula will be more economical and reasonable.

**Key words:** post-panel retaining wall; earth pressure; finite element method (FEM); interface

(编辑 张小强)

---

(上接第 85 页)

## Short-time fourier transform analysis of the phonocardiogram signal

ZHU Bing-lian, YANG Lei

(College of Communications Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Heart sound is a highly nonstationary signal, and the Short-time Fourier Transform (STFT) is an effective method for this kind of signal to be analysed. Because of the nonstationarity of the phonocardiogram, it is important to maintain an analysing time window as short as possible to guaranty the stationarity hypothesis over small analysed segments. This will reduce the frequency resolution of the resulting spectrogram. However by adjusting the sliding time window, we can reach an acceptable result. The spectrogram is calculated by using first, short length sliding window to generate a temporal representation of the PCG, then longer length sliding window in order to generate a spectral representation of the PCG power. The resolution in such representations depend directly on the sliding window length. The temporal representation allows heart sounds and cardiac cycle durations to be measured. Whereas the spectrum, assuming a good frequency resolution, allows spectral characterization of each heart sound. The results we obtained on normal PCG signal show that the STFT analysis with different scale basis provides a clear comprehension of the cardiac events in both time and frequency domain.

**Key words:** phonocardiogram signal; STFT; time-frequency analysis

(编辑 吕赛英)