

接触面单元计算方法探讨

丁勇春, 王建华, 陈锦剑

(上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

摘 要: 针对接触面单元的构造特性, 提出了一种接触面单元计算方法。该方法有效地克服了 Goodman 接触面单元有可能存在的两侧单元相互嵌入的缺陷, 解决了单元应力误差难以控制的问题。详细介绍了该方法的数值实现过程, 使其在数值计算中易于使用, 并通过数值模型验证了该方法的合理性与有效性。

关 键 词: 土与结构相互作用; 接触面单元; 嵌入; 数值分析

中图分类号: TB 115; TU 43

文献标识码: A

Investigation on calculation methods for interface elements

DING Yong-chun, WANG Jian-hua, CHEN Jin-jian

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In light of the defects of existing interface elements, a new calculation method for interface elements is put forward. The problems of considerable large error in stress calculation and large element overlapping in existing Goodman interface element can be avoided. The implementation steps of the model are given to facilitate the numerical calculation, and the method is proved to be reasonable and effective by the numerical model verification.

Key words: soil-structure interaction; interface element; penetration; numerical analysis

1 前 言

岩土工程问题中常会遇到土体与结构相互作用的问题, 如桩土间的接触面、挡土墙与墙后填土间的接触面、混凝土面板坝的面板与垫层间的接触面等, 深入研究土与结构接触面的特性, 在数值计算过程中进行相应地处理是十分必要的。目前工程中较常用的接触面单元模型有 Goodman 无厚度单元和 Desai 薄单元。Goodman 接触面单元由文[1]提出, 并应用于岩石力学中作为节理单元, 后来作为接触面单元, 被推广应用于土与结构的相互作用、人工块体结构的有限元计算中由于其形式简单, 应用方便, 目前仍被广泛应用。Goodman 单元在法向取一个较大的弹性系数以反映接触面法向特性, 但在使用中存在两大问题: 一是在受压时会使两侧的单元有可能相互嵌入, 二是当求解的法向位移有一个较小的偏差就可能引起法向应力的计算有一个较大的偏差, 有时甚至是不合理的^[2]。土体沿结构材料表面的抗剪性质与材料表面的粗糙度密切相关,

只有相当光滑的材料表面剪切破坏才发生在接触面上。对于在实际工程中大量遇到的粗糙接触面, 剪切破坏将发生在土体中, 因此采用无厚度接触面单元, 将滑动限制在两种材料的交界面上, 似乎是不合适的。

基于土与结构的接触面发生剪切破坏的部分常是在靠近接触面的土体内, 且破坏区具有一定的厚度, Zienkiewicz^[3], Ghaboussi^[4]及 Desai^[5]等都提出有厚度的接触面单元模型。

对于有厚度的接触面单元, 厚度的确定十分重要。厚度取得太薄, 接触面不易错开, 太厚又变成普通单元。如何选取适宜的厚度对能否取得良好的错动模拟效果影响颇大, Desai 建议的单元厚度变化范围较大, 相差可达 10 倍, 且未提出选择的原则, 在实际运用时不好把握。

笔者在文[6]的基础上, 提出了一种具有滑移失效及拉伸、剪切黏结特性的接触面单元计算方法, 并通过数值分析验证了该方法的合理性。

2 单元模型

2.1 几何特性

接触面由一系列三角形平面(接触面单元)及空间节点(接触面节点)所组成,而且可以在空间任意位置设置接触面。一般情况下接触面单元黏结在实体模型网格划分后的实体单元面上,每个四边形单元面可以划分为两个三角形接触面单元,同时,在每个接触面单元的顶点处设置一个接触面节点。每个接触面节点都有与之相关联的代表面积。这样,整个接触面就被分割为能够代表所有接触面面积区域的活性节点。接触面单元和接触面节点以及与单个节点相关联的代表面积的几何关系如图 1 所示。

接触面单元具有单面特性,这不同于 Goodman 接触面单元,可以形象地理解为在假想的目标体(一般应为刚度较大的结构体)的外表面上铺设的一层褶皱表层,当它与土体表面接触时引起了该表层对相互穿透及错动作用的敏感性。

单元的基本接触关系由接触面节点及单元外表面(即目标面)来确定。接触面的方向由目标面的法向来决定。

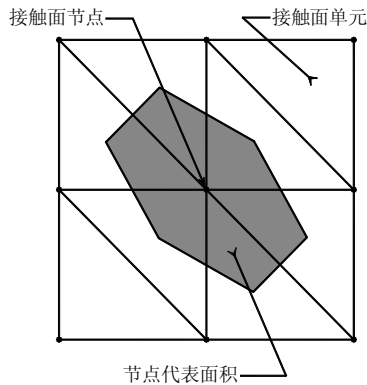


图 1 接触面节点代表面积的几何分布
Fig. 1 Distribution of representative areas to interface nodes

2.2 本构关系及数值实现方法

在每一计算时步内,首先计算每一个接触面节点与目标面之间的绝对法向位移及相对剪切速度的大小,然后根据接触面的本构模型来确定其法向力和剪切力的大小。接触面的本构模型由控制作用在接触面节点上剪切力大小的线性 Coulomb 剪切强度准则来定义,当剪切力达到目标面上剪切强度限值后通过拉伸和剪切黏结强度、剪胀角来定义有效法向应力的增长。作用在接触面节点 P 上的接触面单元本构模型的各分量,如图 2 所示。

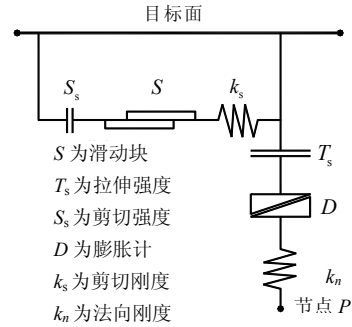


图 2 接触面单元本构模型分量
Fig. 2 Components of the interface constitutive model

在 $t + \Delta t$ 时刻单元的法向力和剪切力可表示为

$$\left. \begin{aligned} F_n^{(t+\Delta t)} &= k_n u_n A + \sigma_n A; \\ F_{si}^{(t+\Delta t)} &= F_{si}^{(t)} + k_s \Delta u_{si}^{(t+(1/2)\Delta t)} A + \sigma_{si} A \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $F_n^{(t+\Delta t)}$ 为 $t + \Delta t$ 时刻单元的法向力; $F_{si}^{(t+\Delta t)}$ 为 $t + \Delta t$ 时刻单元的剪切力; u_n 为接触面节点与目标面之间的绝对法向位移; Δu_{si} 为接触面节点与目标面之间相对切向位移增量; σ_n 为剪胀作用引起的附加法向应力; k_n 为法向刚度; k_s 为切向刚度; σ_{si} 为附加剪应力; A 为接触面节点的代表面积。

Coulomb 准则控制了剪切力的大小,可表示为

$$F_{smax} = cA + \tan \phi (F_n - pA) \quad (2)$$

式中, c 为沿接触面长度方向的黏聚力; ϕ 为接触面的摩擦角; p 为孔隙压力。如果满足该准则 ($|F_s| \geq F_{smax}$), 则产生滑移, 且滑移后满足 $|F_s| = F_{smax}$, 剪切力大小为定值。

如果剪切力大小超过了剪切力限值并产生滑移, 则附加剪切位移将引起节点的有效法向应力的增加, 可表示为

$$\sigma_n = \sigma_n + \frac{|F_s|_0 - F_{smax}}{Ak_s} \tan \psi k_n \quad (3)$$

式中, ψ 为接触面的剪胀角; $|F_s|_0$ 为上述修正之前的剪切力值。

如果垂直接触面的拉伸作用超过了接触面定义的拉伸黏结强度 T_s , 则接触面将开裂, 并且剪切力和法向力自动变为 0。一般认为土体不能承受拉应力, 即 $T_s = 0$ 。

计算过程中接触面节点处的法向力和剪切力将分布在目标面和接触面节点所黏结的面(主面)的正向及反方向上, 同时, 在每个面上通过加权函数来控制法向力和剪切力的分布。为保证整个数值计算过程的稳定性, 在新的计算时步接触面的法向刚度和剪切刚度将自动添加到已有的接触面刚度中进行计算。

接触面单元的特性参数是与每个接触面节点相关的,但各个接触面节点之间的特性参数可以不同,在每个接触面节点上与之相关的应力是在其代表面积上均匀分布的,而接触面上的力仅仅通过接触面节点来传递。

3 模型验证

桩的单侧堆载问题可以简化为平面应变问题进行分析,桩身采用线弹性模型,土体采用 Mohr-Coulomb 模型,模型尺寸及参数如图 3 所示。桩与桩间土等效为板桩,等效后桩的弹性模量取 20 GPa,桩土界面采用本文所提出的接触面单元。边界条件为底边界采用固端约束,左右边界约束水平向位移。桩土界面也分设接触面单元与不设接触面单元两种情况。施加的均布压力大小为 100 kPa,堆载区边缘距离桩侧 4 m。桩身几乎没有弯矩,而设接触面单元后,桩顶位移明显变大,桩身位移曲线呈现出明显非线性

图 4 为桩土界面在两种接触条件下计算得到的侧移曲线,不设接触面单元时,桩的水平位移曲线呈线性,桩身几乎没有弯矩,而设接触面单元后,桩顶位移明显变大,桩身位移曲线呈现出明显非线性

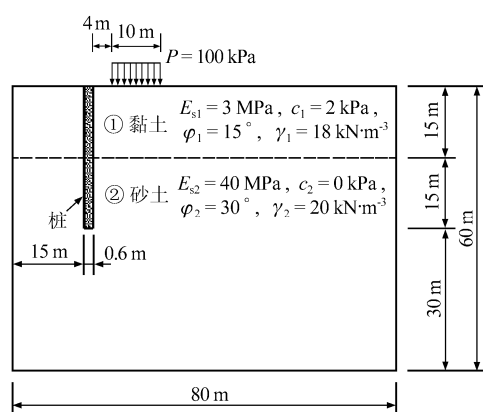


图 3 计算模型

Fig. 3 Calculating model

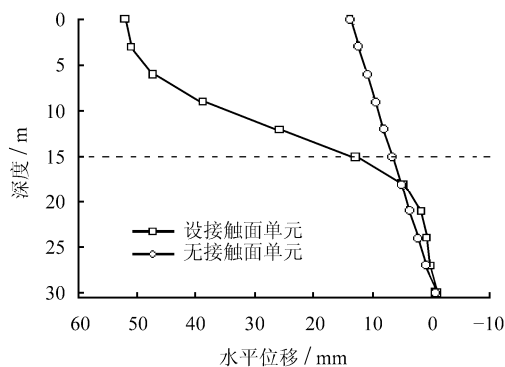


图 4 桩身侧移曲线

Fig. 4 Distribution of lateral displacement of pile

性,侧移在上部 15 m 黏土范围内较大,到了持力层迅速减小。如果荷载继续增大,用接触面无滑移计算得到的桩身变形也会出现非线性,但由于桩顶无法与土层分离,致使上部的侧移会实际小很多,甚至会出现负值。因此,桩土接触面模型的选择对被动桩分析有很大的影响。

4 结 语

Goodman 单元形式简单,物理意义明确,易于针对特殊问题进行模型调整,显示出了较大的优越性,被广泛地应用于岩石裂隙模拟、人工块体结构、土与结构物的接触面以及土工织物与土的相互作用等问题中,但存在的缺陷是两侧单元有可能互相嵌入以及法向位移易产生偏差。本文提出的接触面单元计算方法能够有效地克服 Goodman 接触面单元存在的不足,而且在数值计算过程中实现方式灵活,值得在工程实践中进一步推广应用。

参 考 文 献

- [1] Goodman R E, Taylor R L, Brekke T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1968, 94(3): 637—659.
- [2] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料的接触面的变形及数学模型[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(3): 14—22.
YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(3): 14—22.
- [3] Zienkiewicz O C. Analysis of nonlinear problems in rock mechanics with particular reference to jointed rock systems[A]. *Proceedings of the 2nd Congress of the International Society for Rock Mechanics*[C]. Belgrade: Yugoslavia, 1970.
- [4] Ghaboussi J, Wilson E L, Isenberg J. Finite element for rock joints and interfaces[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1973, 99(10): 833—848.
- [5] Desai L S, Zaman M M. Thin-layer element for interfaces and joints[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1984, 8(1): 19—43.
- [6] Itasca Consulting Group. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Users' Manual[Z]. USA: Itasca Consulting Group, 1997.