

文章编号: 1000-4700(2007)Sup.I-0104-04

# 固结计算中接触面渗流问题的模拟

\*介玉新<sup>1,2</sup>, 许延春<sup>3</sup>, 李广信<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(清华大学), 北京 100084;

3. 天地科技股份有限公司, 北京 100013)

**摘 要:** 在土工数值计算的固结问题有限元计算中常遇到两种材料的接触问题, 此时一般要设置接触面单元, 比如 Goodman 无厚度单元。接触面单元的力学行为可以通过其切向和法向刚度系数反映, 但如何反映其渗透性质有待进一步探讨, 加筋土固结计算中也有如何模拟沿筋材的导水性问题。针对这一问题, 本文采用了一种较为简单且物理概念明确的方法, 并在实际计算中得到初步应用。这种方法也可直接应用在常规的渗流分析中。

**关键词:** 固结; 渗流; 接触面; 有限元; 加筋土

**中图分类号:** TU4      **文献标识码:** A

## SIMULATING SEEPAGE THROUGH INTERFACE IN CONSOLIDATION ANALYSIS

\*JIE Yu-xin<sup>1,2</sup>, XU Yan-chun<sup>3</sup>, LI Guang-xin<sup>1,2</sup>

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Tiandi Science & Technology Co., Ltd, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Interface element such as Goodman's interface element is often used in consolidation analysis by FEM. With shear stiffness and normal stiffness, Goodman's element can model the mechanical property of the interface. However, how to simplistically simulate its seepage characteristics deserves further investigation. Similar thing occurs with seepage along geosynthetics. The authors resolved the problems in a simple way, and verified it with a case analysis. It is thought that the method is not only suitable for consolidation problem, but also very useful in general seepage analysis.

**Key words:** consolidation; seepage; interface; finite element analysis method (FEM); reinforced soil

固结和渗流分析是岩土工程中的经典课题。固结分析中, 在遇到两种模量相差较大的材料时, 一般会设置接触面单元, 以协调两者变形性质的差异。接触面单元常采用无厚度的 Goodman 单元, 其力学性质可以通过接触面切向和法向刚度系数反映。但无厚度接触面单元的渗流特性的反映在一

般有限元程序中难以实现。较简单的方法是采用罚函数方法, 比如邓肯的 CON2D 程序中就采用这种方法<sup>[1,2]</sup>。但这种方法只是要求接触面单元相邻的两个节点孔压近似相等, 物理概念不明确, 且难以反映接触面单元的透水性和导水性。在与加筋土有关的固结计算中, 筋材单元通常模拟成杆单元, 也

收稿日期: 2006-08-07; 修改日期: 2006-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50274042)

作者简介: \*介玉新(1970), 男, 河南人, 副教授, 博士, 从事土工数值计算、基础工程、土工合成材料等研究(E-mail: jieyx@tsinghua.edu.cn);

许延春(1963), 男, 河北人, 研究员, 博士, 特殊条件下煤炭开采等研究工作(E-mail: yanchun-xu@163.com);

李广信(1941), 男, 黑龙江人, 教授, 博士, 博导, 从事土的本构关系、土工合成材料、基础工程等研究(E-mail: ligx@tinghua.edu.cn).

只是反映了其力学特性,没有反映其沿筋材表面的导水性。本文对这一问题进行研究,采用了一种较为简便的方法处理该问题,并应用于某煤矿地表沉降和井壁受力的分析计算。该方法不但适用于固结分析,在常规渗流分析中,沿裂隙或夹层的渗透性质也可以直接采用这一方法。

## 1 接触面单元的渗流模拟

把图1的接触面单元1234当成一4节点薄层矩形单元。单元长度为 $L$ ，“厚度”为 $\delta$ 。可以得到矩形单元的形函数为<sup>[3,4]</sup>:

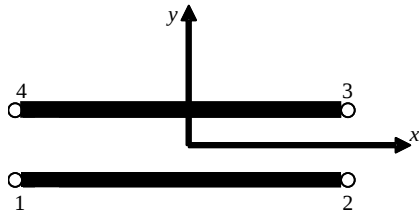


图1 接触面单元

Fig.1 Interface element

$$N_1 = \left( \frac{1}{2} - \frac{x}{L} \right) \left( \frac{1}{2} - \frac{y}{\delta} \right) \quad (1a)$$

$$N_2 = \left( \frac{1}{2} + \frac{x}{L} \right) \left( \frac{1}{2} - \frac{y}{\delta} \right) \quad (1b)$$

$$N_3 = \left( \frac{1}{2} + \frac{x}{L} \right) \left( \frac{1}{2} + \frac{y}{\delta} \right) \quad (1c)$$

$$N_4 = \left( \frac{1}{2} - \frac{x}{L} \right) \left( \frac{1}{2} + \frac{y}{\delta} \right) \quad (1d)$$

进而可以得到其渗流矩阵为:

$$[K_s] = \int [B_s]^T [k] [B_s] dx dy \quad (2)$$

其中,  $[k] = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix}$ ,  $k_x$ 、 $k_y$ 分别为 $x$ 方向和 $y$

方向的渗透系数;

$$[B_s] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \left( \frac{1}{2} - \frac{y}{\delta} \right) & \frac{1}{L} \left( \frac{1}{2} - \frac{y}{\delta} \right) & \frac{1}{L} \left( \frac{1}{2} + \frac{y}{\delta} \right) & -\frac{1}{L} \left( \frac{1}{2} + \frac{y}{\delta} \right) \\ -\frac{1}{\delta} \left( \frac{1}{2} - \frac{x}{L} \right) & -\frac{1}{\delta} \left( \frac{1}{2} + \frac{x}{L} \right) & \frac{1}{\delta} \left( \frac{1}{2} + \frac{x}{L} \right) & \frac{1}{\delta} \left( \frac{1}{2} - \frac{x}{L} \right) \end{bmatrix}$$

将式(2)进行积分运算后,可以得到:

$$[K_s] = \frac{\delta}{3L} k_x \begin{bmatrix} 1 & & \text{对称} \\ -1 & 1 & \\ -1/2 & 1/2 & 1 \\ 1/2 & -1/2 & -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{L}{3\delta} k_y \begin{bmatrix} 1 & & \text{对称} \\ 1/2 & 1 & \\ -1/2 & -1 & 1 \\ -1 & -1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

记 $k'_x = k_x \cdot \delta$ , 为导水率;  $k'_y = k_y / \delta$ , 为透水率。于是:

$$[K_s] = \frac{k'_x}{3L} \begin{bmatrix} 1 & & \text{对称} \\ -1 & 1 & \\ -1/2 & 1/2 & 1 \\ 1/2 & -1/2 & -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{L}{3} k'_y \begin{bmatrix} 1 & & \text{对称} \\ 1/2 & 1 & \\ -1/2 & -1 & 1 \\ -1 & -1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

沿接触面的导水率 $k'_x$ 及其法线方向的透水率 $k'_y$ 反映了接触面的渗透性质,已知 $k'_x$ 和 $k'_y$ ,就可以直接将式(4)累加入整体刚度(劲度)矩阵中,进行接触面的渗流计算。 $k'_x=0$ 且 $k'_y=0$ ,表明接触面为一不透水的接触面。

## 2 杆单元的渗流模拟

在与加筋土有关的渗流或固结计算中,筋材单元通常模拟成杆单元<sup>[5~7]</sup>,常有沿筋材本身的渗流发生,如塑料排水板。可以采用上述同样的思路构造相应的渗流矩阵。

对于如图2所示的长度为 $L$ 的杆单元,可以写出其两个形函数为:

$$N_1 = \frac{1}{2} - \frac{x}{L} \quad (5a)$$

$$N_2 = \frac{1}{2} + \frac{x}{L} \quad (5b)$$

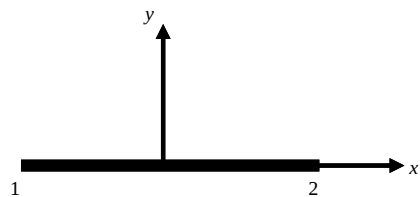


图2 杆单元

Fig.2 Bar element

其渗流矩阵同式(2), 其中的 $[B_s]$ 变为:  $[B_s] =$

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{bmatrix}, \text{于是可以得到:}$$

$$[K_s] = \int [B_s]^T [k] [B_s] dx dy = \frac{\delta}{L} k_x \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{k'_x}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

已知导水率 $k'_x$ , 就可以很容易在有限元计算中模拟沿筋材的渗流情况。 $k'_x=0$  表明没有沿筋材的渗流发生。

需要指出的是, 在邓肯的 CON2D 程序中采用所谓的罚函数方法, 该方法是针对接触面相邻的两节点, 如图 1 中节点 2 与节点 3, 将两节点与水头(或孔压)对应的主对角线元素  $K_{22}$  和  $K_{33}$  分别加上一大数, 而将非对角线元素  $K_{23}$  和  $K_{32}$  则分别减去该大数, 这样来强制节点 2 与节点 3 水头(或孔压)相等。从式(6)可以看出, 这种罚函数方法其实相当于在节点 2 与节点 3 之间增加了一个反映其水力联系的杆单元。与式(4)相比, CON2D 程序中的罚函数法是不严密的。

### 3 实例计算

本文选择了某煤矿副井为计算模型。该煤矿副井于 1985 年竣工, 井口标高+45.80m, 井筒直径 6m, 井壁厚 1m。采用轴对称有限元进行计算。竖直方向取基岩(埋深-184.45m)下 10m 向上至地面, 横向区域取为至井筒中心 150m 范围之内。计算采用作者自主开发的有限元程序 NM2DC.3, 计算网格模型如图 3 所示, 井壁与土层之间设 Goodman 接触面单元<sup>[8~10]</sup>。

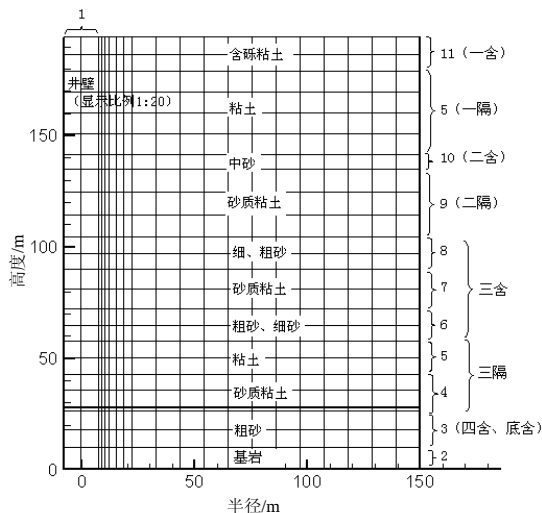


图 3 有限元网格及地层性质

Fig.3 FEM mesh and soil layers

根据该副井底含(高度 10m 处)5 年的水位观测资料, 用有限元计算模拟了 5 年中水位变化对土层以及井壁的受力变形的影响, 并预测到第 8 年。(固结计算共分 8 级进行, 每 1 年为 1 级)。各年地表沉降量的计算值与实测值如图 4 所示, 从图中可以看到, 计算结果与实测结果基本一致, 说明计算较好地模拟了实际情况。

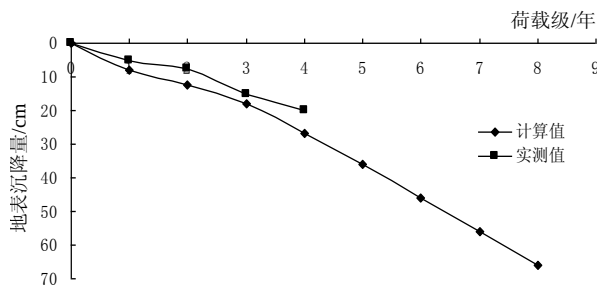
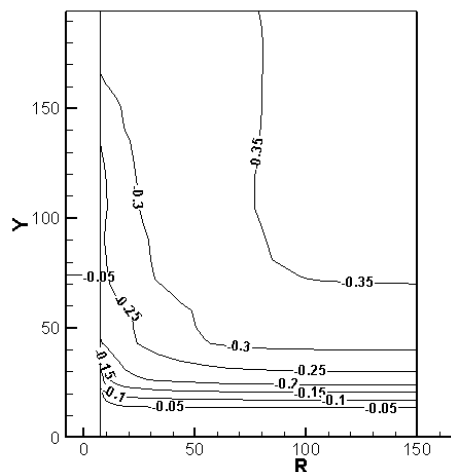


图 4 地表沉降量随时间的变化

Fig.4 Annual ground settlement

第 5 年土层和井壁竖向位移等值线如图 5 所示(井壁沿径向放大 20 倍显示), 从图中可以看到, 土层压缩集中发生在高度 10m 到 50m 的范围内。土层向下的压缩变形带动了井壁的压缩, 但由于井壁的弹性模量大, 压缩变形小, 对附近土层起到支承作用, 使土层的沉降等值线发生了弯曲, 土层靠近井壁的部分竖向位移较小, 远离井壁的部分竖向位移较大。各年地表的沉降曲线如图 6 所示, 距井壁外侧 10m 以外地表各点的沉降量差别不大。



大非常明显,且逐年递增,各年中井壁竖向应力的最大值均出现在靠近底部基岩的位置,这一规律已经得到了实践的检验。

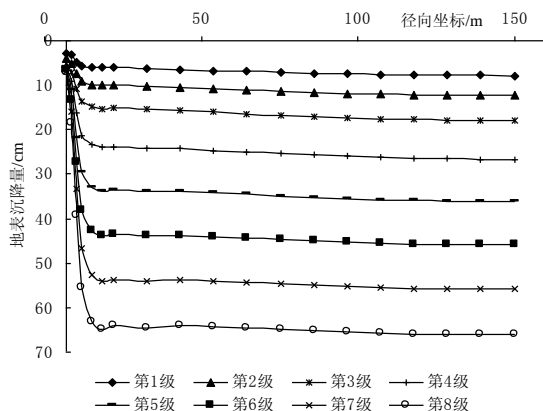


图6 各年(荷载级)的地表沉降

Fig.6 Distribution of ground settlement at the end of each year (load step)

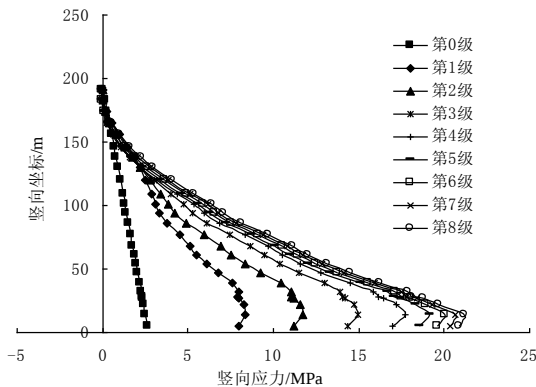


图7 井壁的竖向应力分布

Fig.7 Vertical stresses of the shaft wall

## 4 结论

沿接触面的渗流以及沿土工合成材料表面的渗流是需要常常面对的问题。本文推荐的方法恰当解决了有限元数值计算中对无厚度接触面单元和杆单元渗流特征的模拟。该方法具有一般性,只要通过试验测试出透水率和导水率,就可以计算相应的渗流矩阵。采用罚函数法强制要求接触面单元相邻的两个节点孔压近似相等只是其特例。通过实例计算,表明了它的适用性。这种方法不仅对固结问题,对一般渗流问题也是适用的。对很薄的透水层(如塑料排水板)或弱透水层(如土工合成材料膨润土衬垫)都可以进行模拟。

## 参考文献:

[1] 严北川. 有限元固结计算在高土石坝应力变形分析中的应用研究[D]. 北京: 清华大学, 1999.

- Yan Beichuan. Application and study of FEM consolidation computation in stress-strain analysis for high rockfill earth dam [D]. Beijing: Tsinghua University, 1999. (in Chinese)
- [2] 陈平. 软土地基预压固结设计方法的研究与应用[D]. 北京: 清华大学, 2002.
- Chen Ping. Study and application of preloading consolidation design method on soft ground [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002. (in Chinese)
- [3] 王勘成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- Wang Xucheng, Shao Min. Fundamental theory and numerical method of finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)
- [4] 王勘成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- Wang Xucheng. Finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [5] 介玉新. 加筋土的等效附加应力法分析及模型试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1998.
- Jie Yuxin. A study on geosynthetic-reinforced earth by equivalent additional stress method and model tests [D]. Beijing: Tsinghua University, 1998. (in Chinese)
- [6] 介玉新, 李广信. 加筋土数值计算的等效附加应力法[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 614~616.
- Jie Yuxin, Li Guangxin. Equivalent additional stress method for numerical analysis of reinforced soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 614~616. (in Chinese)
- [7] 介玉新, 李广信. 加筋土的计算方法[J]. 水利水电技术, 1999, (5): 67~69.
- Jie Yuxin, Li Guangxin. Calculation method for geosynthetic-reinforced soil [J]. Technology in Hydraulic and Hydropower Engineering, 1999, (5): 67~69. (in Chinese)
- [8] 刘正. 深部粘土性质及土层疏水对矿井井壁受力变形影响的研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- Liu Zheng. Properties of deep clay and the effect of soil drainage to stress and deformation in the shaft wall [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)
- [9] 许延春, 耿德庸, 官云章, 徐法奎. 深厚含水松散层的工程特性及其在矿区的应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- Xu Yanchun, Geng Deyong, Guan Yunzhang, Xu Fakui. Property and application of thick & deep aquiferous unconsolidated layers in coal field [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [10] 许延春. 矿区深厚复合含水松散层的工程、力学特性及其应用[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2002.
- Xu Yanchun. Engineering properties and application of thick deep aquiferous unconsolidated layers in coal field [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2002. (in Chinese)