

横观各向同性土体三维比奥固结有限层解法

梅国雄^{1, 2, 3}, 宰金珉¹, 赵维炳², 殷建华³

(1. 南京工业大学土木工程学院, 南京 210009; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 南京 210024; 3. 香港理工大学土木与结构工程系, 香港九龙)

[摘要] 建立了三维横观各向同性土体固结的有限层求解方法, 并编制了相应的计算程序; 通过2个算例的分析对比, 验证了计算方法和程序的正确性; 探讨了横观各向同性地基参数对三维地基固结的影响, 给出了对工程有价值的相关计算图表和结论。

[关键词] 有限层; 比奥固结; 三维; 横观各向同性

[中图分类号] TU433 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2004)07-0043-05

1 前言

固结问题一直是岩土工程的核心课题, 但到目前为止, 由于问题的复杂性, 涉及土体三维固结的计算还很少。文献[1]初步探讨了采用有限层法求解三维弹性土体的固结问题, 笔者在此基础上, 对横观各向同性层状地基固结性状进行了探讨, 得出了一些有意义的结论。

2 三维横观各向同性土体固结的有限层求解^[1]

2.1 横观各向同性土体的本构关系^[2]

地基土往往由层沉积而成, 呈层状分布, 土的性质在层内比较均匀, 而各层之间差别较大。此外, 由于扁平颗粒在沉积过程中的取向多取扁平面为水平方向的关系, 土体在水平方向和竖直方向的性质(变形模量、泊松比和剪切模量等)存在差异, 呈现各向异性的现象, 例如, 水平向模量通常大于竖向模量, 而在水平面内却往往是各向同性

的, 构成以水平面为同性面的所谓横向各向同性弹性体, 其弹性矩阵 D 为:

$$D = \begin{pmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & 0 & 0 & 0 \\ d_2 & d_1 & d_3 & 0 & 0 & 0 \\ d_3 & d_3 & d_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_6 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 $d_1 = \lambda\alpha(1 - \alpha\nu_2^2)$, $d_2 = \lambda\alpha(\nu_1 + \alpha\nu_2^2)$, $d_3 = \lambda\alpha\nu_2(1 + \nu_1)$, $d_4 = \lambda(1 - \nu_1^2)$, $d_5 = E_1/2(1 + \nu_1)$, $d_6 = G_2$, $\lambda = E_2/(1 + \nu_1)(1 - \nu_1 - 2\alpha\nu_2^2)$, $\alpha = E_1/E_2$ 。式中共有5个独立的弹性常数:

E_1, ν_1 为 xoy 平面(水平面)内的变形模量和泊松比;

E_2, ν_2 为 z 方向(竖向)变形模量和泊松比;
 G_2 为与 xoy 平面垂直的平面内的剪切模量。

2.2 位移模式和超静空隙水压力模式^[1]

根据位移边界条件和超静空隙水压力的边界条

[收稿日期] 2003-11-04; [修回日期] 2004-03-10

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50279021; 50278042); 中国博士后基金资助项目(2003034389); 江苏省青年科技创新人才资助项目(BK2003418); 霍英东青年教师基金资助项目(91076)

[作者简介] 梅国雄(1975-), 男, 湖北黄梅县人, 博士, 南京工业大学副教授, 南京水利科学研究院博士后, 香港理工大学 Research Assistant

件, 对于有限层的层元取如下的形函数形式 (见图1):

$$\begin{aligned}
 u &= \sum_{m=1}^r \sum_{n=1}^s [(1-\bar{z})U_{mn}^i + \bar{z}U_{mn}^{i+1}] \cos k_mx \sin k_ny, \\
 v &= \sum_{m=1}^r \sum_{n=1}^s [(1-\bar{z})V_{mn}^i + \bar{z}V_{mn}^{i+1}] \sin k_mx \cos k_ny, \\
 w &= \sum_{m=1}^r \sum_{n=1}^s [(1-\bar{z})W_{mn}^i + \bar{z}W_{mn}^{i+1}] \sin k_mx \sin k_ny, \\
 p &= \sum_{m=1}^r \sum_{n=1}^s [(1-\bar{z})P_{mn}^i + \bar{z}P_{mn}^{i+1}] \sin k_mx \sin k_ny
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中: $k_m = m\pi/a$; $k_n = n\pi/b$; $\bar{z} = (z - z_i) / h_i$; $U_{mn}^i, V_{mn}^i, W_{mn}^i, P_{mn}^i$ 为第 i 层的位移参数和超静空隙水压力参数; a, b 为计算时选取的水平面上的计算范围参数 (长和宽); h_i 为层元的厚度。

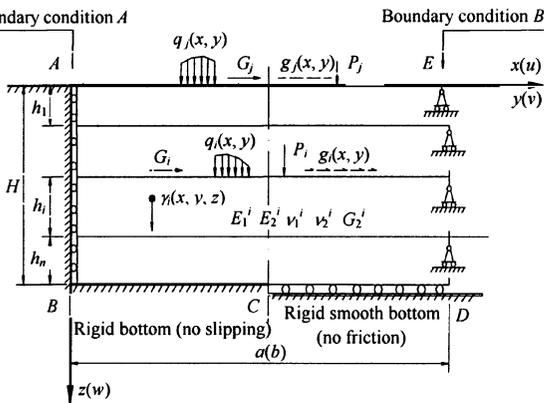


图1 有限层计算边界条件

Fig. 1 Boundary conditions for finite layer analysis

2.3 三维横观各向同性层状土体比奥固结有限层求解格式

针对三维横观各向同性层状土体, 采用伽辽金方法、变分方法或加权余量法均可推导出类似有限元形式的比奥固结方程的有限层求解格式, 对于 t 时刻的第 mn 项, 有

$$\begin{pmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}' \\ \mathbf{K}'^T & \mathbf{K} \end{pmatrix}_{mn} \begin{pmatrix} \delta \\ \beta \end{pmatrix}_{mnt} = \begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{R} \end{pmatrix}_{mnt} \tag{3}$$

式中 $(\mathbf{K})_{mnt}$ 为刚度矩阵, $(\mathbf{K}')_{mnt}$ 为耦合矩阵, $(\mathbf{K})_{mnt}$ 为渗透矩阵, $(\delta)_{mnt}$ 为位移参数向量, $(\beta)_{mnt}$ 为孔压参数向量, $(\mathbf{F})_{mnt}$ 为荷载向量, $(\mathbf{R})_{mnt}$ 为有效应力平衡的荷载向量。

3 算例考证

为了验证上述计算方法的正确性和所编制的程

序的可靠性, 采用2个已发表的算例来考证, 并假定土体为各向同性。

3.1 弹性半空间均质地基固结验证

Gibson & McNamee^[3] 给出, 当泊松比 $\nu = 0$ 时, 弹性半空间均质地基的三维比奥固结问题的解析解为模拟弹性半空间, 计算时 x, y, z 方向均取20倍的矩形边长, 计算参数和结果见图2。由图2可见, Gibson & McNamee 的解析解与笔者所提出的方法计算结果能很好地吻合, 显示了所提出的计算方法具有良好的计算精度以及计算方法和计算程序的合理性。

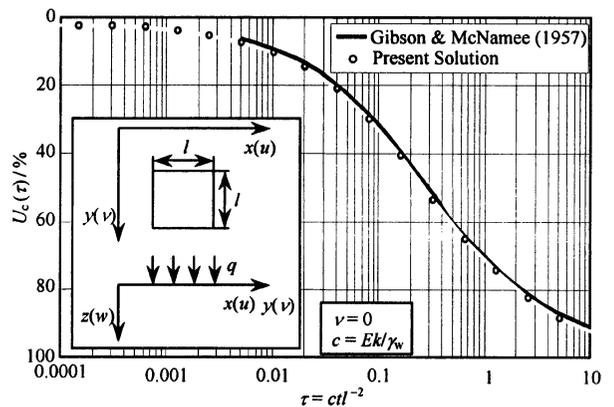


图2 均布矩形荷载作用下时间因子和固结度之间的关系

Fig. 2 Time factor-degree of consolidation for center point of rectangular uniformly loaded area

3.2 双层地基的固结验证

对于双层地基问题, Booker & Smaller^[4] 给出了圆形均布荷载作用于双层地基的解答, Smaller & Zhang^[5] 采用面积等效的方法, 对相应的正方形荷载作用于双层地基的问题进行了研究, 二者的计算参数和结果如图3所示。笔者采用与 Smaller & Zhang 相同的计算条件, 对此问题进行对比计算, 其计算结果亦示于图3。由图3可见, 对于双层地基问题, 三者的计算结果也非常的吻合, 再次显示了所提出的计算方法具有良好的计算精度及其计算程序的合理性。

4 横观各向同性地基参数对三维地基固结的影响

在各向同性的基础上, 通过每次计算, 仅改变

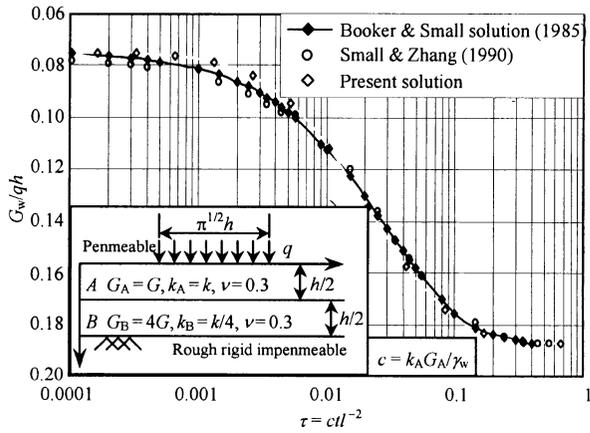


图 3 正方形荷载作用下时间—沉降曲线
Fig. 3 Time-settlement curve for center point of rectangular uniformly loaded area

一个参数来反映横观各向同性对三维地基比奥固结性状的影响。

4.1 弹性半空间均质地基

4.1.1 弹性模量比对地基固结性状的影响 根据 Barden^[9] 的研究对于粘性土弹性模量比 α 的取值为 1~3。计算时, 分别令 α 等于 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 (保持 E_2 不变, 仅根据 α 改变 E_1), 来观察弹性模量的横观各向同性对地基固结性状的影响, 计算结果如图 4 所示。

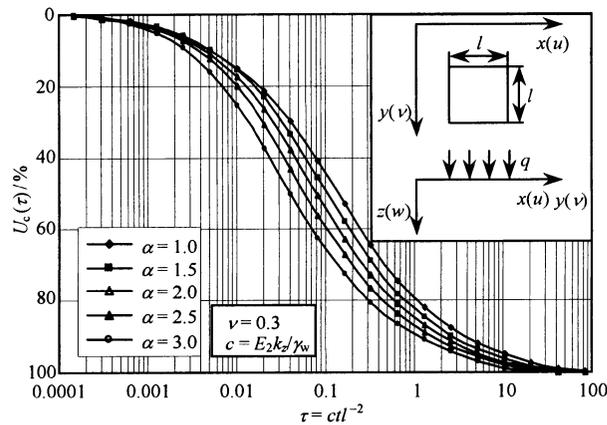


图 4 弹性模量比对固结度的影响
Fig. 4 Influence of elastic modulus ratio on the degree of consolidation

由图 4 可见:

- 1) 模量比 α 越大, 固结的速度越快;
- 2) 在固结的中间阶段, 弹性模量比 α 每增加 0.5, 相应的固结度约增加 5 %;
- 3) 对于同一时间因子, 由弹性模量的横观各

向同性引起的固结度差异最大达 23 %。

4.1.2 泊松比对地基固结性状的影响 仅改变 ν_1 来考虑泊松比对地基固结性状的影响。泊松比对时间因子 τ 和固结度 $U_c(\tau)$ 关系的影响见图 5 所示。

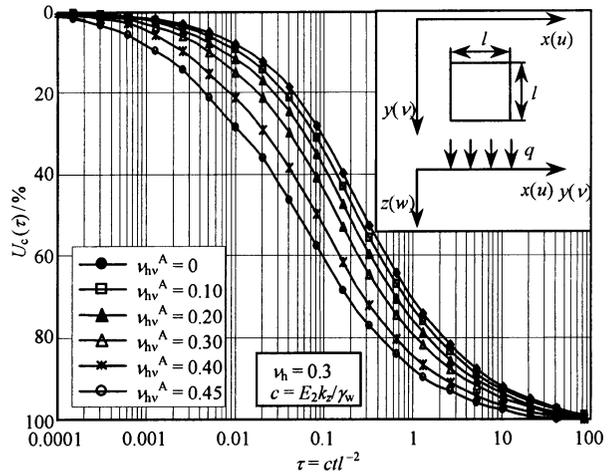


图 5 泊松比对固结度的影响

Fig. 5 Influence of Poisson's ratios on the degree of consolidation

由图 5 ($\nu_h = \nu_2, \nu_{hv} = \nu_1$) 可见:

- 1) 当 $\nu_2 = 0.3$ 时, ν_1 越大, 固结越快;
- 2) 当 $\nu_2 > 0.3$ 时, 固结度增长速率越来越大;
- 3) 对于同一时间因子 τ , 由泊松比的横观各向同性引起的固结度差异高达 30 %。

4.1.3 渗透系数比对地基固结性状的影响 定义渗透系数比 χ 为

$$\chi = k_x / k_z. \tag{4}$$

改变渗透系数比 χ (保持 k_z 不变, 改变 k_x ($k_x = k_y$)) 进行计算, 来观察横观各向同性的渗透系数对时间因子 τ 与固结度 $U_c(\tau)$ 关系的影响, 计算结果见图 6。

由图 6 可见:

- 1) 渗透系数比 χ 越大, 固结越快;
- 2) 固结度的增幅速率随着渗透系数比 χ 的增大而降低;
- 3) 对于同一时间因子 τ , 由渗透系数的横观各向同性引起的固结度差异高达 40 %。

4.2 双层地基

对于图 3 所示的双层地基, 仅改变上面一层地基的某一个参数, 保持下面一层地基的参数不变, 用类似于讨论弹性半空间地基的方法, 可得出类似的结论, 结果如图 7 至图 9 所示。

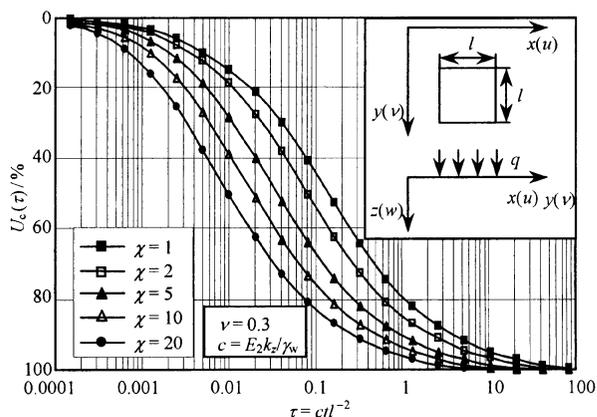


图 6 渗透系数对固结度的影响

Fig. 6 Influence of permeability coefficient ratios on the degree of consolidation

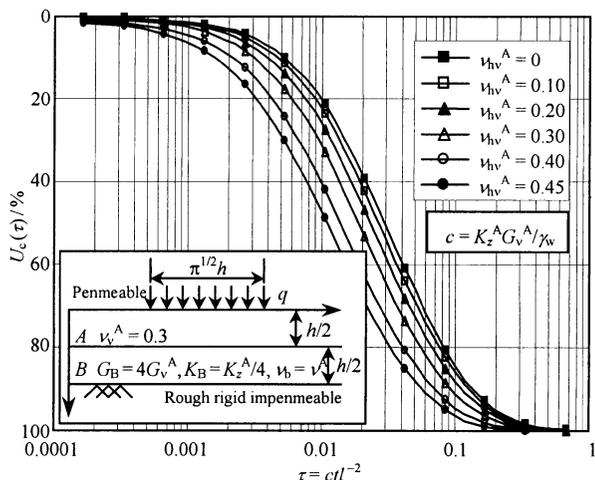


图 8 泊松比对固结度的影响

Fig. 8 Influence of Poisson's ratios on the degree of consolidation

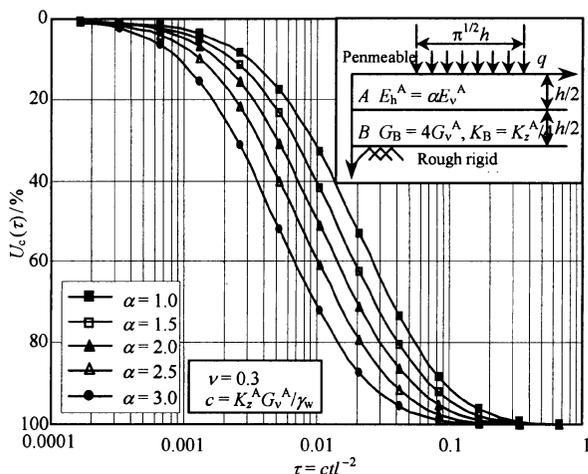


图 7 弹性模量比对固结度的影响

Fig. 7 Influence of elastic modulus ratios on the degree of consolidation

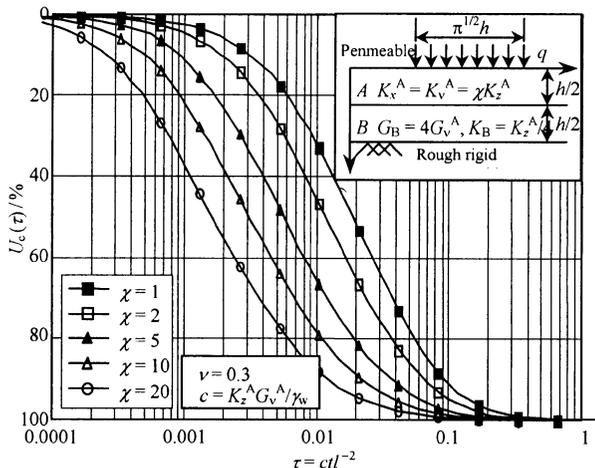


图 9 渗透系数对固结度的影响

Fig. 9 Influence of permeability coefficient ratios on the degree of consolidation

5 结论

建立了三维横观各向同性土体固结的有限层求解方法，编制了相应的计算程序；通过 2 个算例的对比分析，验证了计算方法和程序的正确性；最探讨了横观各向同性地基参数对三维地基固结的影响，指出横观各向同性对地基固结性状具有很大影响。

参考文献

[1] 梅国雄. 固结有限层理论及其应用 [D]. 南京: 河海大学, 2002

[2] 宰金珉, 宰金璋. 高层建筑基础分析与设计——土与结构物共同作用理论与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001

[3] Gibson R E, McNamee J. The consolidation settlement of a load uniformly distributed over a rectangular area [A]. Proc 4th Int Conf Soil Mech Found Eng. Vol 1 [C], 1957. 297 ~ 299

[4] Booker J R, Small J C. Finite layer analysis of settlement, creep and consolidation using microcomputers [A]. Proc 5th Int Conf Numer Anly Meth Geomech [C]. Nagoya, Japan, 1985. 3 ~ 18

[5] Small J C, Zhang B Q. Consolidation of clays subjected to three dimensional embankment loadings [J].

International Journal for Numerical and Analytical
Methods in Geomechanics, 1991, 15: 857~870

anisotropic soil[J]. Geotechnique, 1963, 13(2): 198
~210

[6] Barden L. Stresses and displacements in a cross-

Finite Layer Analysis of Three-Dimensional Biot Consolidation of Homogeneous Soils

Mei Guoxiong^{1, 2, 3}, Zai Jinmin¹, Zhao Weibing², Yin Jianhua³

(1. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology,

Nanjing 210009, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research
Institute, Nanjing 210024, China; 3. Department of Civil and Structural Engineering,

The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

[Abstract] This paper presents a finite layer procedure for the consolidation analysis of layered soils using a cross isotropic elastic constitutive model. The program is first verified using two published results. Then using this program, the influences of cross isotropy on the consolidation behavior are analyzed. The results obtained using the cross isotropic elastic model are compared with results using isotropic elastic model. It is found that the cross isotropy has very large influences on the consolidation behavior. Curves of the average degree of consolidation are obtained and presented in the paper, which is useful for engineering practice.

[Key words] finite layer analysis; Biot's consolidation; three-dimension; cross-an isotropic

(cont. from p.33)

[23] Li H Shen, L Y Love, P. E. D. ANN-based mark-up
estimation system with self-explanatory capacities[J].
Journal of Construction Engineering and Management,
1999, 125(3): 185~189

Construction Engineering and Management, 1997,
123(4): 450~458

[24] Adeli H, Karim A. Scheduling/ Cost optimization and
neural dynamics model for construction[J]. Journal of

[25] Savin D, Alkass S, Fazio P. Calculating weight matrix
of neural network for resource leveling[J]. Journal of
Computing in Civil Engineering, 1998, 12(4): 241~
248

Application of Artificial Neural Network to Engineering Project Management

Wang Yingluo, Yang Yaohong

(School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[Abstract] Applications of ANN to engineering project management were summarized, including prediction and evaluation of risk, cost estimation, performance prediction, organization effectivity, engineering accident diagnoses claim and litigation analysis, enter bidding decision, schedule/cost optimization and resource leveling. Problems existing in application were summarized and analyzed, some suggestions on how to develop application of ANN to engineering project management in China were submitted.

[Key words] engineering project management; ANN; prediction; optimization; DS