

文章编号: 1000-7598-(2005) 02-0225-06

横观各向同性土体有限层分析

梅国雄^{1,2}, 宰金珉¹, 赵维炳²

(1.南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009; 2.南京水利科学研究院 土工所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 首先概括介绍了三维横观各向同性比奥固结有限层分析方法, 并采用已经发表的 4 个算例结果来考证所编制的计算程序, 然后详细地讨论了横观各向同性对瞬时沉降、最终沉降和固结性状的影响, 发现横观各向同性对计算结果的影响分别高达 33%, 24% 和 40%, 最后给出了一些对工程实践有一定参考价值的计算图表。

关 键 词: 横观各向同性; 有限层分析; 比奥固结; 瞬时沉降; 最终沉降

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Finite layer analysis for a cross-isotropy homogeneous elastic soil

MEI Guo-xiong^{1,2}, ZAI Jin-min¹, ZHAO Wei-bing²

(1.College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China

2. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the introduction of finite layer analysis for three-dimensional Biot's consolidation with a cross-isotropy elastic soil and the verification using four published results, the influences of cross-isotropy on the immediate settlement, the final settlement and the consolidation behaviour are discussed. It is found that the cross-isotropy has very large influences on the immediate settlement, the final settlement and the consolidation behaviour. The maximum differences are over 33%, 24%, and 40% respectively. In the end, curves or tables of the immediate settlement coefficients, the final settlement coefficients and the average degree of consolidation are obtained and presented in the paper, which is useful for engineering practice.

Key words: cross-anisotropy; finite layer analysis; Biot's consolidation; immediate settlement; final settlement

1 前 言

地基土往往呈层状分布, 在各层内土的性质比较均匀, 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, 但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^[1]。因此, 对横观各向同性土体进行研究具有十分重要的学术价值(反映了一定的各向异性)和运用价值(抓住问题的主要矛盾)。本文的研究工作建立在三维横观各向同性比奥固结有限层分析的基础上, 分析了横观各向同性对地基瞬时沉降、最终沉降和固结性状的影响。

2 三维横观各向同性比奥固结有限层分析简介^[2, 3]

2.1 位移模式和超静孔隙水压力模式

根据位移边界条件和超静孔隙水压力的边界条件, 对于有限层的层元取如下的形函数形式如图 1 所示。其中

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{m=1}^r \sum_{n=1}^s [(1-\bar{z})U_{mn}^i + \bar{z}U_{mn}^{i+1}] \cos k_m x \sin k_n y; \\ v &= \sum_{m=1}^r \sum_{n=1}^s [(1-\bar{z})V_{mn}^i + \bar{z}V_{mn}^{i+1}] \sin k_m x \cos k_n y; \\ w &= \sum_{m=1}^r \sum_{n=1}^s [(1-\bar{z})W_{mn}^i + \bar{z}W_{mn}^{i+1}] \sin k_m x \sin k_n y; \\ p &= \sum_{m=1}^r \sum_{n=1}^s [(1-\bar{z})P_{mn}^i + \bar{z}P_{mn}^{i+1}] \sin k_m x \sin k_n y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

收稿日期: 2003-11-03

修改稿收到日期: 2004-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(No.50279021; No.50278042), 霍英东青年教师基金(No.91076), 江苏省青年科技创新人才项目(No.BK2003418), 中国博士后基金项目(No.2003034389), 江苏省高校自然科学基金研究计划项目(No.04KJB560048), 江苏省博士后基金项目。

作者简介: 梅国雄, 男, 1975 年生, 博士后, 教授, 主要从事固结理论、土压力理论、土与结构物共同作用和沉降预测等方面的研究和教学工作。
E-mail: meiguox@163.com

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 和 P_{mn}^i 分别为第 i 层的位移参数和超静孔隙水压力参数; 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。

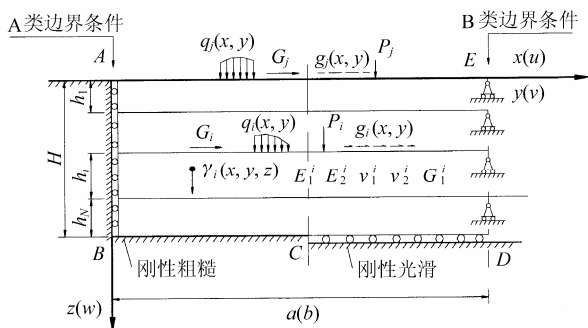


图 1 有限层计算边界条件

Fig. 1 Boundary conditions for finite layer analysis

2.2 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:

$$\begin{bmatrix} \bar{K} & K' \\ K'^T & \tilde{K} \end{bmatrix}_{mn} \begin{Bmatrix} \delta \\ \beta \end{Bmatrix}_{mnt} = \begin{Bmatrix} F \\ R \end{Bmatrix}_{mnt} \quad (2)$$

其具体形式详见文献[2, 3]。

3 算例考证

为了验证上述计算方法的正确性和所编程序的可靠性, 以下采用 4 个已发表的算例分别对瞬时沉降、最终沉降和固结过程进行考证, 鉴于横观各向同性研究的比较少, 以下算例考证均采用各向同性。

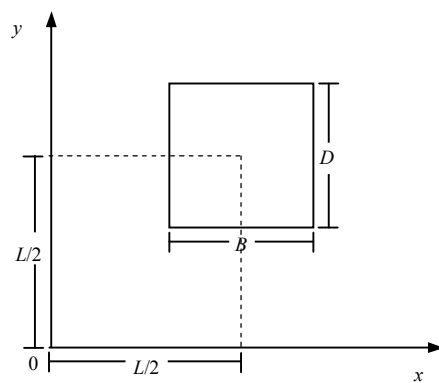
3.1 计算说明

计算对象如图 2 所示, 以下所采用的计算参数如没有特别申明, 均按表 1 取值。

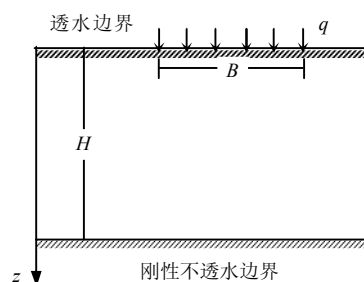
表 1 计算参数
Table 1 Calculation parameters

参数	取值	符号和文献[3]对应形式
剪切模量	$G_v = G = \frac{E}{2(1+\nu)}$	$G_v = G_2$
弹性模量	$E_h = E_v = E$	$E_h = E_1$; $E_v = E_2$
泊松比	$\nu_h = \nu_{vh} = \nu = 0.3$	$\nu_h = \nu_1$; $\nu_{vh} = \nu_2$
渗透系数	$k_x = k_y = k_z = k$	
计算边界	$L = H = 20B$	
荷载作用域	$D = B$	
荷载	q	

注: 下标 vh 表示水平向, h 表示垂直向。



(a) 平面图



(b) 立面图

图 2 计算对象

Fig. 2 Calculation object

3.2 瞬时沉降

Ground (1972 年)^[4] 曾给出矩形荷载作用于均质各向同性地基的瞬时沉降计算方法, John T. Christian & W. David Carrier (1978 年)^[5] 进一步指出 Ground 的方法仅适用于 $\nu = 0.5$ 的情形, 为了进行对比, 本文计算也取 $\nu = 0.5$, 实际计算时取为 0.49。定义瞬时沉降系数 I_s 如下:

$$I_s = \frac{S_i E}{qB} \quad (3)$$

式中 S_i 为荷载作用面积内土体的平均沉降。

瞬时沉降系数 I_s 的计算结果如图 3 所示, 可见本文的方法和 Ground 的方法能较好的吻合, 显示出本方法有较好的计算精度。

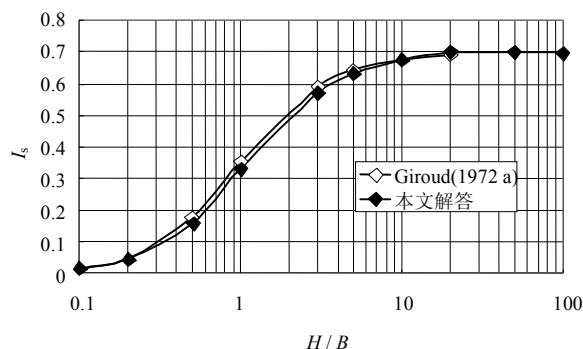


图 3 瞬时沉降系数 I_s

Fig. 3 Immediate settlement coefficients I_s

3.3 最终沉降

Ueshita and Meyerhof (1968 年)^[6]曾给出矩形均布荷载作用于各向同性有限厚度弹性体的矩形角点处的沉降计算方法。并定义角点最终沉降系数为

$$I_{cr} = \frac{S_r E}{qB} \quad (4)$$

式中 S_r 为矩形角点处土体的最终沉降。 I_{cr} 的计算结果如图 4 所示, 可见本文的方法和 Ueshita and Meyerhof (1968 年) 的方法能较好的吻合, 显示出本文方法有较好的计算精度。

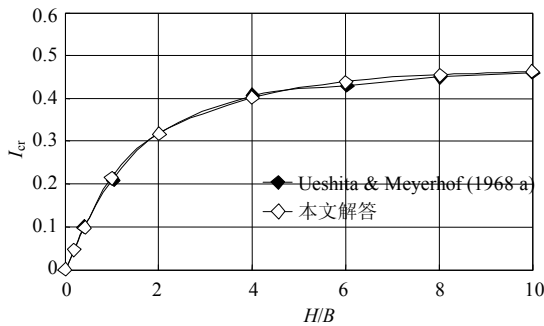


图4 最终沉降系数 I_{cr}

Fig. 4 Final settlement coefficients I_{cr}

3.4 固结过程

Gibson & NcNamee (1957 年)^[7]曾给出各向同性弹性半空间问题当 $\nu=0$ 时的解析解。为了比较, 也对弹性半空间问题进行分析, 由图 3、图 4 可知, 当 $H/B=20$ 时, 有限厚度地基基本上能模拟半空间地基, 故计算采用 $H/B=20$ 来进行。时间因子 τ 和定义固结度 $U_c(\tau)$ 如下:

$$\tau = \frac{Ekt}{\gamma_w B^2}; \quad U_c(\tau) = \frac{W(\tau) - W(0)}{W(\infty) - W(0)} \quad (5)$$

式中 t 为时间; γ_w 为水的重度; $W(\tau)$ 为时间因子 τ 对应的沉降; $W(0)$ 为瞬时沉降; $W(\infty)$ 为最终沉降。时间因子 τ 和定义固结度 $U_c(\tau)$ 的关系计算结果见图 5。与 Gibson & NcNamee (1957 年) 的解析解能很好的吻合, 显示了本文计算方法和程序的正确性。

3.5 横观各向同性

文献[8]曾给出条形均布荷载下横观各向同性弹性地基中附加应力的分布规律。文献[9]曾根据能量的方法, 给出横观各向同性弹性半空间上圆形荷载作用时的解答。考虑到本方法的适应性, 采用等面积的方形荷载来代替圆形荷载 $B = \sqrt{\pi} r^2$, 其中 B 为方形荷载的边长; r 为圆形荷载的半径。仅变化

横观各向同性参数 $\alpha = E_h/E_v$ 来验证本文的计算方法。根据 Barden (1963 年)^[10] 的研究, 对于粘性土, α 的取值为 1~3, 泊松比取 $\nu_h = \nu_{hv} = 0.3$, 定义 $I_{fc} = \frac{S_{fc} E_v}{qB}$, S_{fc} 为最终沉降; q 为均布荷载。其计算结果如图 6 所示。由图可见, 二者吻合的较好, 但有一定的偏差, 其原因在于: (1) 采用方形荷载来代替圆形荷载; (2) 采用 $H = 20B$ 来近似模拟半空间。

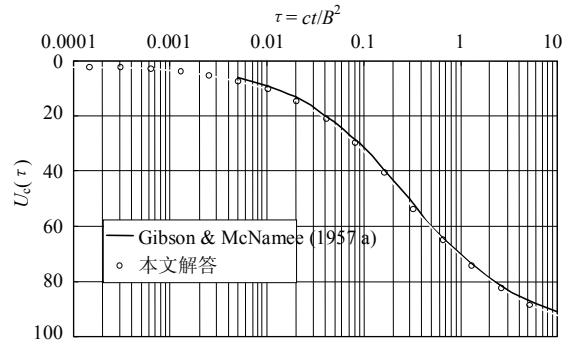


图5 均布矩形荷载作用下时间因子和固结度之间的关系
Fig. 5 Time factor-degree of consolidation for center point of rectangular uniformly loaded area

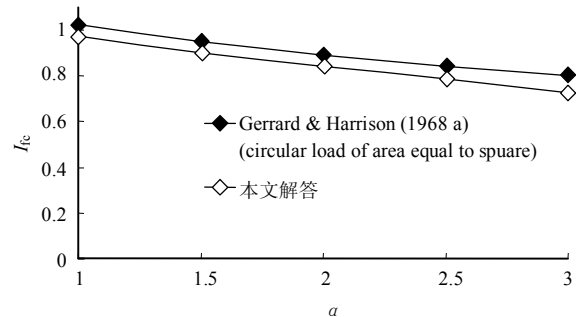


图6 杨氏模量比与方形荷载中心点最终沉降系数的关系
Fig. 6 Young's modulus ratio-final settlement coefficient for the center point of uniformly loaded square

4 横观各向同性对瞬时沉降的影响

为了简单起见, 以下分析均采用每次仅在各向同性的基础上, 改变一个参数来考虑横观各向同性对计算结果的影响, 计算对象和参数取值遵从 3.1 节的说明。以上说明亦适合于第 5 节和第 6 节的讨论。

4.1 弹性模量比的影响

定义弹性模量比 α 如下:

$$\alpha = E_h/E_v \quad (7)$$

根据 Barden(1963 年)^[10] 的研究, 对于粘性土 α 的取值为 1~3, 弹性模量比 α 对瞬时沉降系数 I_s

的影响见图 7 所示。由图可见, 弹性模量比 α 越大, 瞬时沉降系数 I_s 越小。弹性模量的横观各向同性对瞬时沉降系数 I_s 的影响高达 0.23。

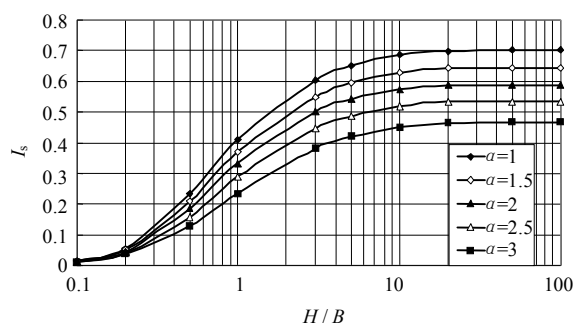


图 7 弹性模量比对瞬时沉降系数 I_s 的影响
Fig.7 Influence of elastic modulus ratios on immediate settlement coefficient I_s

4.2 泊松比的影响

由于泊松比的组合情况非常多, 以下仅针对 $H/B=20$ 时不同泊松比组合情况进行研究, 计算结果如表 2 和图 8 所示。

表 2 泊松比对瞬时沉降系数 I_s 的影响
Table 2 Influence of poisson ratios on immediate settlement coefficients I_s

ν_{hv}	不同 ν_h 下沉降系数 I_s					
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.49
0.0	0.627	0.625	0.622	0.614	0.602	0.586
0.1	0.653	0.654	0.653	0.649	0.640	0.628
0.2	0.675	0.678	0.679	0.678	0.672	0.663
0.3	0.691	0.696	0.700	0.700	0.697	0.691
0.4	0.701	0.707	0.713	0.715	0.713	0.705
0.49	0.701	0.707	0.711	0.711	0.701	0.642

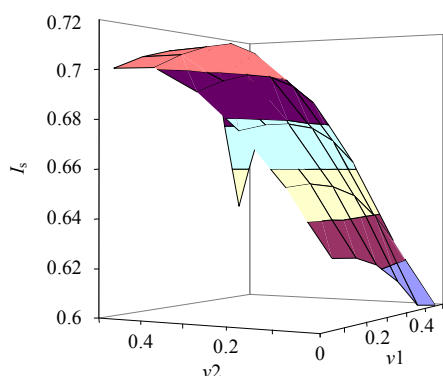


图 8 泊松比对瞬时沉降系数 I_s 的影响
Fig.8 Influence of Poisson ratios on immediate settlement coefficients I_s

由表 2、图 8 可见, 泊松比的横观各向同性对瞬时沉降系数 I_s 计算结果的影响约为 $-0.08 \sim +0.11$ 。

5 横观各向同性对最终沉降的影响

5.1 弹性模量比的影响

弹性模量比 α 对最终沉降系数 I_{cr} 的影响如图 9 所示。由图可见, 弹性模量比 α 越大, 最终沉降系数 I_{cr} 越小, 弹性模量的横观各向同性对最终沉降系数 I_{cr} 的影响达 0.12。

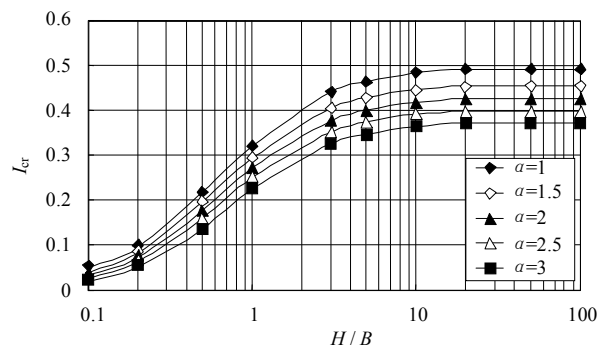


图 9 弹性模量比对最终沉降系数的影响
Fig.9 Influence of elastic modulus ratios on final settlement coefficient I_{cr}

5.2 泊松比的影响

由于泊松比的组合情况非常多, 以下仅针对 $H/B=20$ 时, 不同泊松比组合情况进行研究, 计算结果如表 3 和图 10 所示。

表 3 泊松比对最终沉降系数 I_{cr} 的影响
Table 3 Influence of poisson ratios on final settlement coefficients I_{cr}

ν_{hv}	不同 ν_h 下最终沉降系数 I_{cr}					
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.49
0.0	0.582	0.582	0.580	0.577	0.572	0.567
0.1	0.566	0.564	0.561	0.557	0.551	0.544
0.2	0.543	0.540	0.534	0.529	0.521	0.512
0.3	0.512	0.507	0.501	0.493	0.483	0.472
0.4	0.474	0.467	0.459	0.449	0.436	0.421
0.49	0.433	0.424	0.413	0.399	0.378	0.331

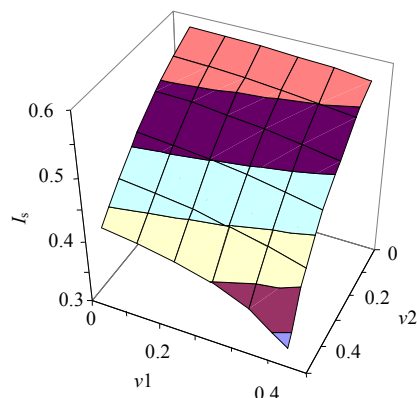


图 10 泊松比对最终沉降系数的影响
Fig.10 Influence of Poisson ratios on final settlement coefficient I_{cr}

由表 3 及图 10 可知, 横观各向同性泊松比对最终沉降系数 I_{cr} 的影响为 $-0.15 \sim +0.24$ 。

6 横观各向同性对固结性状的影响

6.1 弹性模量比的影响

弹性模量比 α 对时间因子 τ 和定义固结度 $U_c(\tau)$ 关系的影响如图 11 所示。由图可见, 弹性模量比 α 越大, 固结越快; 对于同一时间因子 τ , 由弹性模量的横观各向同性引起的固结度差异达 20 %。

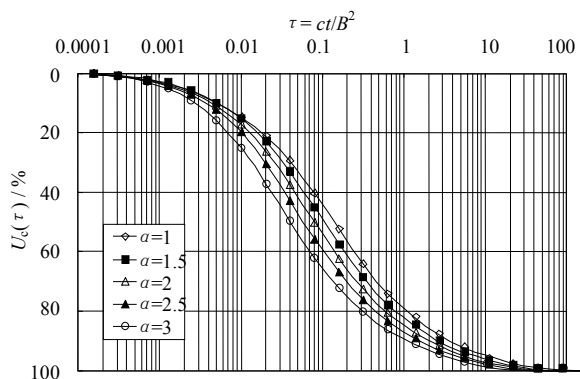


图 11 弹性模量对固结度的影响

Fig. 11 Influence of elastic modulus ratios on the degree of consolidation

6.2 泊松比的影响

泊松比对时间因子 τ 和固结度 $U_c(\tau)$ 关系的影响如图 12 所示。由图可见, 对于同一 $\nu_h = 0.3$, ν_{hv} 越大, 固结越快; 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 %。

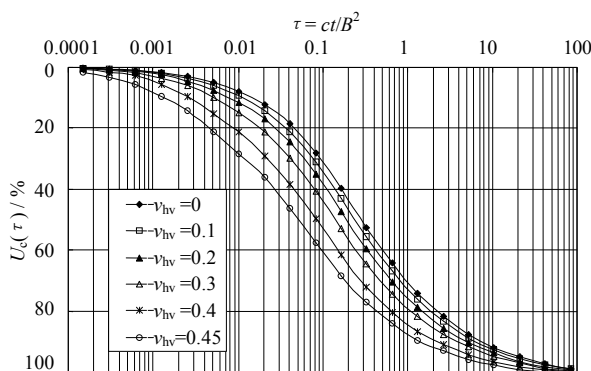


图 12 泊松比对固结度的影响

Fig. 12 Influence of Poisson's ratios on the degree of consolidation

6.3 渗透系数比的影响

定义渗透系数比 χ 如下:

$$\chi = k_x / k_z \quad (8)$$

改变渗透系数比 χ , 即保持 k_z 不变, 改变 k_x

($k_x = k_y$) 进行计算, 讨论横观各向同性的渗透系数对时间因子 τ 和定义固结度 $U_c(\tau)$ 关系的影响, 计算结果见图 13。图 13 显示, 渗透系数比 χ 越大, 正如期望的那样, 固结越快。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达 40 %。

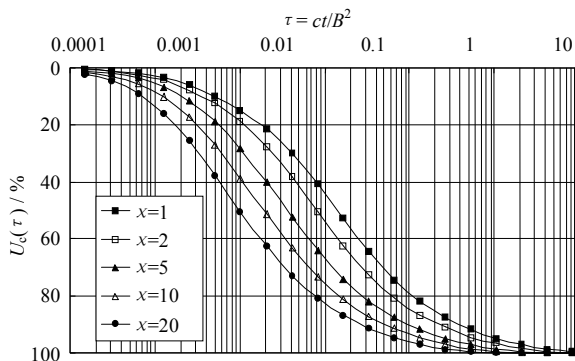


图 13 渗透系数比对固结度的影响

Fig. 13 Influence of permeability coefficient ratios on the degree of consolidation

7 结 语

本文在简单介绍三维横观各向同性比奥固结有限层分析的基础上, 详细地讨论了横观各向同性对瞬时沉降、最终沉降和固结性状的影响, 发现横观各向同性对计算结果有较大影响, 因而加强土体横观各向同性的研究具有十分重要的理论价值 (反映了土体的一定各向异性) 和实用价值 (抓住问题的主要矛盾, 且简单实用), 文中并给出了一些对工程实践有一定参考价值的计算图表。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 梅国雄. 固结有限层理论及其应用[博士论文D]. 南京: 河海大学, 2002.
MEI Guo-xiong. Theory and practice of consolidation finite layer[D]. Nanjing: Hohai University, 2002.
- [3] 宰金珉, 梅国雄. 有限层求解三维比奥固结问题[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 31—33.
ZAI Jin-min, MEI Guo-xiong. Finite layer analysis for three dimensional biot consolidation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(1): 31—33.
- [4] Giroud J P. Settlement of rectangular foundation on soil layer[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 1972, 98(SM1): 149—154.
- [5] John T Christian, W Danid Carrier. Janbu, Bjerrum and Kjaernsli's chart reinterpreted[J]. *Canadian Geotechnical Journal*. 1978, 15: 123—128.

- [6] Ueshita K, Meyerhof G G. Surface displacement of an elastic layer under uniformly distributed loads[J]. **Highway Research Record**, 1968, 228: 1—10.
- [7] Gibson R E, McNamee J. The consolidation settlement of a load uniformly distributed over a rectangular area[A]. **Procedure 4th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering**[C]. Rotterdam: Balkema, 1957, (1): 297—299.
- [8] 陈越. 条形均布荷载下横观各向同性弹性地基中附加应力的分布规律[J]. 岩土力学, 1994, 15(4): 1—11.
- CHEN Yue. Distribution regularity of additional stress in a transversely isotropic elastic subsoil under strip even load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 15(4): 1—11.
- [9] Gerrard C N, Harrison W J. Circular loads applied to a cross-anisotropy half-space[R]. Australia: [s.n.], 1970, (10): 1—61.
- [10] Barden L. Stresses and displacements in a cross-anisotropic soil[J]. **Geotechnique**, 1963, 13(2): 198—210.

如何写好中英文摘要

一. 文摘

写好中英文摘要的重要性: (1) 文摘是沟通国内读者和作者之间的桥梁: 在知识爆炸的今天, 读者不可能通过直接浏览刊物的方式去获取全面的信息。只有通过专业的二次文摘数据库, 检索相应文章的文摘, 再提取原文。(2) 英文文摘是作者和国际同行进行交流的必经之路: 在当今的科技领域, 英语已经成为事实上的国际交流语言。世界各国学者想追踪了解某一学科的发展情况, 多会用英文工具书、数据库进行检索。

如何写好中英文摘要:

1. 文摘应包含正文的要点, 一般来说, 文摘应包含研究对象(目的), 研究方法(所用的设备、材料), 结果和结论。写英文文摘时, 不能因为某些内容不好翻译就弃掉要点。
2. 文摘要尽量简短, 尽可能删掉课题研究的背景信息。
3. 文摘中出现的数据应该是最重要, 最关键的数据。
4. 不需要自己标榜自己的研究结果。
5. 二次文献信息将脱离原文而独立存在, 因此文摘中不能出现图表参数据。
6. 文摘中的内容应在正文中出现, 文摘不能对原文进行补充和修改。
7. 文摘中的缩写名称在第一次出现时要有全称。
8. 文摘的句子应尽量简短。主谓语要搭配。
9. 文章作者是写好文摘的最佳人选: 随着学科专业的细分, 编辑人员不可能了解每一个专业, 不能就文摘关于专业知识方面的论述进行修改, 这就要求作者掌握写文摘的要领, 自己写好文摘。

二. 作者和作者单位

1. 提供完整对应的中英文对照(英文版除外)

不言而喻, 处理数据时使用的语言为英语。因此, 应确保出现在中文文摘的全部作者的姓名、单位及顺序号、城市及邮编、电子信箱(非必须)、身份头衔等在英文中得到对应反映, 不可用 **et al** 代替后几位, 以避免遗漏, 损害著作者权益。

2. 明确姓氏与名字的定位

作者为外族或外国人士时(尤其是中东、日本和朝鲜等国), 最好用完全大写表示姓氏, 首字母大写表示名字。或按照汉语姓名排列, 做到全刊的姓名顺序一致, 以避免可能出现的混淆和误解。

3. 准确标示 E-mail 所属

EI 数据库自 2004 年起规定: Email 中若含有姓名字母, 其使用者应为本人。Email 的位置应该使读者其对应的作者是谁。

4. 明确标示特定联系人

通常, 第一作者即为联系人, 这种情况下, 可不作任何标识, 否则应以文字或符号指明特定联系人。任何象征性的, 或在作者和编者看来不言而喻的说明, 都不足以表明联系人身份。例如: 突出介绍某个第一作者的头衔和成果, 或干脆提供一个可以对号入座的电子信箱。

三. 关键词

1. 尽量不要省去关键词或以分类码代替关键词。
2. 关键词尽量用名词或名词性词组, 避免用形容词或形容词性词组做关键词。
3. 中英文关键词要对应。