

基于应力路径的实用沉降计算方法

金耀华¹, 钱玉林², 吕凡任¹

(1.扬州市职业大学 土木工程系, 江苏 扬州 225000; 2.扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225000)

摘 要: 为提高对沉降计算的可靠性与方便性, 提出了一种基于应力路径的实用沉降计算方法。依据应力路径法原理, 采用由 Skempton (司开普顿) 孔隙水压力方程得出的有效应力路径方程来表达应力路径, 得出了沉降计算的实用计算式。所提出的计算式具有形式简洁、参数易确定、方便实用等优点。工程实例分析验证了该方法的可靠性, 可为实际工程的沉降计算提供参考。

关 键 词: 沉降计算; 应力路径; 孔隙水压力; 实用表达式

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

A practical method for calculating settlement based on stress path

JIN Yao-hua¹, QIAN Yu-lin², LÜ Fan-ren¹

(1. Department of Civil Engineering, Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou, Jiangsu 225000, China;

2. Department of Architecture and Civil Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225000, China)

Abstract: In order to raise the reliability and convenience of calculating settlement, a practical method for calculating settlement based on actual stress path is proposed. According to stress path method, a practical expression for calculating settlement is put forward by using effective stress path equation derived from Skempton pore water pressure equation, which has the advantages of explicit conception and simple form with the parameters of expression easy to be obtained. An engineering case study shows that the proposed method is reliable; it can be taken as a reference for engineering applications.

Key words: settlement calculation; stress path; pore water pressure; practical expression

1 引 言

沉降计算是土力学中的重要研究课题之一, 自太沙基提出经典的沉降计算方法以来, 岩土工程科学工作者一直不断地对该课题进行研究^[1-2]。Lambe^[3]于 20 世纪 60 年代年首次提出从应力路径角度计算沉降, 即应力路径法。该方法用应力路径表示建筑物在施工前、施工期间及完工后地基内部的应力变化情况, 既考虑了初始沉降, 又考虑了主固结沉降, 较多地考虑了影响地基变形的因素, 较之其他计算方法更符合实际^[4-5]。但该方法采用作图法, 精度依赖于试验质量, 人为因素较大, 目前尚未在工程界广泛应用^[6]。

本文在分析地基沉降的应力路径的基础上, 依据应力路径法原理, 采用 Skempton 孔隙水压力方程得出有效应力路径方程来表达地基沉降应力路

径, 推导出一个基于应力路径的实用沉降计算公式。

2 基于应力路径的沉降计算方法

2.1 初始沉降计算

初始沉降是地基加载后瞬时变形所引起的, 可采用弹性理论计算。如图 1 所示, 取一土体单元体, 加荷瞬时, 3 个主应力方向上增加了 $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ 和 $\Delta\sigma_3$, 孔隙水压力增加 Δu , 对于饱和土, 体积改变 $\Delta V = 0$, 但土体发生了瞬时变形。

根据广义增量虎克定律, 瞬时变形引起的竖向应变为

$$\Delta\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\Delta\sigma_1 - \nu(\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) + (1-2\nu)\Delta u] \quad (1)$$

瞬时变形时, $\Delta V = 0$, 泊松比 $\nu = 0.5$, 弹性模量 $E = E_0$ (初始模量), 式 (1) 变为

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{1}{E_u} \left[\Delta \sigma_1 - \frac{1}{2} (\Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3) \right] \quad (2)$$

从式 (1)、(2) 可以看出, 瞬时变形状况下 ($\Delta V = 0$, $\nu = 0.5$) $\Delta \varepsilon_1$ 可以用总应力来表示, 这样可避免计算初始孔隙水压力。

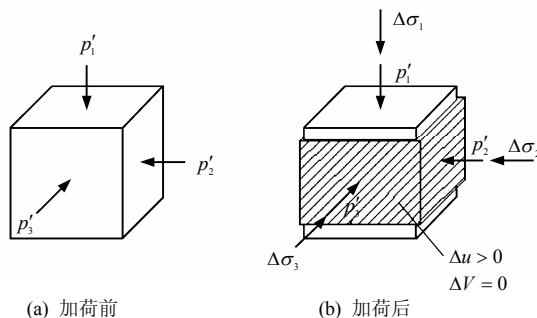


图 1 土体的瞬时变形
Fig.1 The evanescent distortion of soil

设地基土层厚为 H , 则该土层的初始沉降 S_i 与单向压缩固结沉降 S_c 之比 C_i 为

$$C_i = \frac{S_i}{S_c} = \frac{E_s \int_0^H [\Delta \sigma_1 - 1/2(\Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3)] dz / E_u \int_0^H \Delta \sigma_1 dz}{S_c} \quad (3)$$

对于圆形基础或方形基础, 中心点 (下) 附加应力的计算属于轴对称问题, 即 $\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3$, 代入可得

$$S_i = C_i S_c = \frac{E_s \int_0^H (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) dz / E_u \int_0^H \Delta \sigma_1 dz}{S_c} = n(1 - \alpha) S_c \quad (4)$$

式中: $n = E_s / E_u$, E_s 为压缩模量; E_u 可通过三轴固结不排水 (CU) 试验测定; $\alpha = \int_0^H \Delta \sigma_3 dz / \int_0^H \Delta \sigma_1 dz$, 为 Skempton 公式中的参数, 其值参见文献[1]。

2.2 固结沉降计算

外荷载引起的基础沉降可分为初始沉降和固结沉降 2 个阶段, 其应力路径分别如图 2 中的 AB 段和 BC 段。饱和土在固结不排水过程中其有效应力路径实际上为等含水率曲线, 即在同一路径上土体体积保持不变。

根据广义增量虎克定律, 固结沉降过程中竖向应变 ε_1^c 与体变 ε_v 的关系式^[6]:

$$\frac{\varepsilon_1^c}{\varepsilon_v} = \frac{(1 + 2K_0)\Delta \sigma'_1 - K_0 \Theta}{(1 - K_0)\Theta} \quad (5)$$

式中: $\Theta = \Delta \sigma'_1 + \Delta \sigma'_2 + \Delta \sigma'_3$ 。

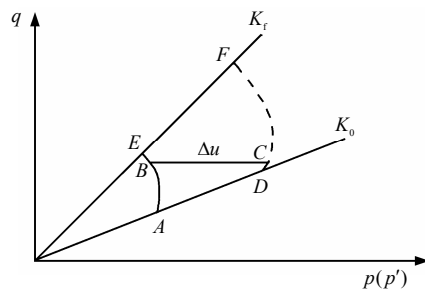


图 2 地基土沉降的应力路径
Fig.2 The stress path of settlement calculation

对于等向固结 BC 路径, 由式 (5) 可知, $\varepsilon_{1BC}^c = 1/3\varepsilon_v$; K_0 固结时, $\varepsilon_v = \varepsilon_1^c$, 即 $\varepsilon_v = \varepsilon_{1AD}^c$, 可得

$$\varepsilon_{1BC}^c = \frac{1}{3} \varepsilon_{1AD}^c \quad (6)$$

式 (6) 表明, 要计算图 2 中路径 BC 上的竖向应变 ε_{1BC}^c , 可通过计算路径 AD 上的竖向应变 ε_{1AD}^c 来实现。 AD 路径即 K_0 固结路径, 其竖向应变可按下列式计算:

$$\varepsilon_{1AD}^c = m_v \Delta \sigma_{zAD} = m_v (\sigma_{zD} - \sigma_{zA}) \quad (7)$$

式中: m_v 为土体的体积模量; σ_{zA} 、 σ_{zD} 分别为 A 、 D 点上竖向应力。

将式 (7) 代入式 (6), 可得

$$\varepsilon_{1BC}^c = \frac{1}{3} m_v (\sigma_{zD} - \sigma_{zA}) \quad (8)$$

A 点和 D 点在 K_0 路径上, A 点为加荷前地基土的自重应力状态, 而 D 点表示 C 点所在有效应力路径 DF 对应的自重应力状态 (图 2)。 D 点应力状态由 C 点应力状态和有效应力路径 DF 确定。

设加荷前地基土的应力状态 (为自重应力状态), 即 A 点的应力状态为 p_A 、 q_A , 地基土受荷后, 附加应力引起的平均总应力增量和广义剪应力增量分别为 Δp 和 Δq , 则 C 点应力状态为

$$p_C = p_A + \Delta p; q_C = q_A + \Delta q \quad (9)$$

根据有效应力原理和 Skempton^[7]提出的孔隙水压力方程, 有效应力路径 DF 的方程为

$$p' = p_D - \left(A - \frac{1}{3} \right) (q - q_D) \quad (10)$$

因 C 点在有效应力路径 DF 上, 故 $C(p_C, q_C)$ 满足式 (10)。将式 (9) 代入式 (10), 可得

$$p_A + \Delta p = p_D - \left(A - \frac{1}{3} \right) (q_A + \Delta q - q_D) \quad (11)$$

式中: $p_A = (1 + 2K_0)\sigma_{zA}/3$; $q_A = (1 - K_0)\sigma_{zA}$; $p_D =$

$(1+2K_0)\sigma_{zD}/3$; $q_D=(1-K_0)\sigma_{zD}$, 整理可得

$$\sigma_{zD}-\sigma_{zA}=\frac{\left[\Delta p+\left(A-\frac{1}{3}\right)\Delta q\right]}{K_0+A(1-K_0)}=\frac{\Delta u}{K_0+A(1-K_0)} \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (8), 则

$$\varepsilon_{IBC}^c=\frac{m_v\Delta u}{3[K_0+A(1-K_0)]} \quad (13)$$

设地基土层厚为 H , 则该土层的固结沉降 S'_c 与单向压缩固结沉降 S_c 之比 C_c 为

$$C_c=\frac{S'_c}{S_c}=\frac{1}{3[K_0+A(1-K_0)]}\int_0^H m_v\Delta u dz / \int_0^H m_v\Delta\sigma_1 dz \quad (14)$$

对于圆形基础或方形基础, 中心点附加应力的计算属于轴对称问题, $\Delta\sigma_2=\Delta\sigma_3$, 则有

$$S'_c=C_cS_c=\frac{a+A(1-a)}{3[K_0+A(1-K_0)]}S_c \quad (15)$$

式中: A 为孔隙水压力系数; K_0 为静止土压力系数; $\alpha=\int_0^H\Delta\sigma_3dz/\int_0^H\Delta\sigma_1dz$, 为司开普顿-比伦公式中的参数, 其值参见文献[1]; S_c 为单向压缩固结沉降。

2.3 基于应力路径的沉降计算方法

基于应力路径的沉降计算应为初始沉降和固结沉降之和, 即

$$S=S_i+S'_c \quad (16)$$

对于圆形基础或方形基础, 根据式 (4)、(15)、(16), 可得

$$S=\left[n(1-a)+\frac{a+A(1-a)}{3(K_0+A(1-K_0))}\right]S_c \quad (17)$$

式 (17) 中参数意义如前所述, 该式完全按照地基土发生沉降时的应力路径来计算, 其本质上是根据应力路径法思路推导出的一种实用沉降计算方法。计算式简洁实用, 且式中参数可由常规室内三轴试验确定, 较之前人成果有所发展。

3 实例分析

本实例为热电厂主厂房工程^[8], 主厂房为 6 层框架结构, 筏板基础, 基础近似正方形, 长 64.0 m, 宽 65.5 m, 上部结构设计总荷载为 352 512 kN。根据岩土工程勘察报告, 持力层主要物理力学指标如表 1 所列。

经计算, 在距离基础底部以下 19 m 位置, 附加应力约为自重应力的 20%, 故压缩层厚度取至基础底下 19.0 m, 分层总和法计算地基沉降为 91.3 mm。采用有限元软件 ADINA 对压缩层进行固结沉降计算, 土体的本构模型采用摩尔-库仑模型, 而孔隙水的属性则由多孔介质属性定义, 主要参数为各方向的渗透系数。边界条件为: 两侧和底边不排水, 顶边(地面)排水。时间步长取竣工后 3 年。有限元沉降计算结果如图 3 所示, 该工程竣工后 3 年的最大沉降为 86.7 mm, 在基底中心位置。

表 1 土层参数

Table 1 The parameters of soil

厚度 / m	重度 / (kN/m ³)	E_s / MPa	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)
20.8	19.5	10.6	100	16.5

表 2 多孔介质土体特性参数

Table 2 The characteristic parameters of porous media soil

特性 参数	E / MPa	ν	ϕ / (°)	c / kPa	K_V / (10 ⁻⁷ cm/s)	K_H / (10 ⁻⁷ cm/s)
大小	7.5	0.3	16.5	100	8.78	9.05

注: K_V 、 K_H 分别为土体的垂直和水平向渗透系数。

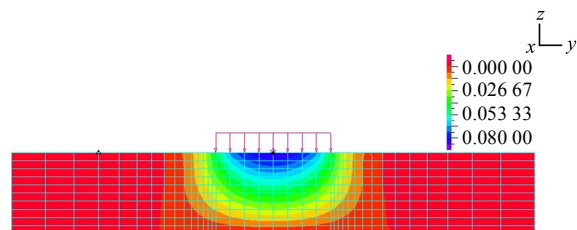


图 3 有限元计算沉降云图 (单位: m)

Fig.3 Nephogram of settlements calculated by finite element method (unit: m)

该基底中心点下附加应力的计算属于轴对称问题, 可用式 (17) 计算地基沉降。相关计算参数见表 3。将表 3 中各参数的数值及 $S_c=91.3$ mm 代入式 (17), 得基底沉降为 101.0 mm。

表 4 列出了分层总和法、有限元法、本文方法的计算值以及沉降实测值。从表中可以看出, 分层总和法、本文方法及有限元计算值都与沉降观测值有一定差距, 其中有限元计算结果偏小, 误差最大, 可能原因: ①用室内压缩模量代替地基土的弹性模量, 导致计算结果偏小; ②有限元计算时间步长取竣工后 3 年, 计算结果不是最终沉降, 沉降有待于进一步发展。分层总和法计算结果也偏小, 主要是

该方法假设土体沿 K_0 路径固结, 只发生单向压缩。相比之下, 本文方法依据沉降实际应力路径来计算, 其计算结果更接近实测值, 但还有一些误差, 可能是本文方法没有考虑次固结沉降的影响, 导致计算值小于实测值。

表3 计算参数数值

Table 3 The parameters of settlement calculation

参数	确定方法	量值
E_s / MPa	单向压缩试验	10.60
E_u / MPa	三轴 CU 试验	6.25
n	$n = E_s / E_u$	1.33
A	三轴 CU 试验	0.30
$\alpha = \int_0^H \Delta\sigma_z dz / \int_0^H \Delta\sigma_1 dz$	$Z/B = 0.594^{[1]}$	0.51
K_0	$1 - \sin \varphi$	0.72

表4 几种沉降计算方法计算结果与实测沉降值

Table 4 The results of settlements calculated by different methods and the measured settlement

参数	计算方法			
	分层总和法	有限元法	本文方法	实测沉降
沉降量/mm	91.3	86.7	101.0	110.0
相对误差/%	17.0	21.2	8.2	0.0

4 结 论

(1) 考虑应力路径的沉降计算方法能够真实反映地基土体发生沉降时的应力变化, 比较符合实际, 其结果比较接近实测值。

(2) 对于圆形基础或方形基础(轴对称问题)条件下, 提出了一个基于应力路径的实用沉降计算式, 该式计算简便, 参数容易确定。工程实例证明, 该方法计算结果可靠, 具有较好的实用性。

(3) 本文方法计算结果略小于实测值, 主要是忽略了次固结沉降的影响。如何将次固结沉降统一到沉降计算中来, 有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [2] 殷宗泽. 土体沉降与固结[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [3] LAMBE T W. Stress path method[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1967, (93): 309—331.
- [4] 李纲林, 刘祖德, 邹勇, 等. 应力路径法在沉降计算中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(6): 57—60.
LI Gang-lin, LIU Zu-de, ZOU Yong, et al. Application of stress path method to calculation of ground settlement[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2003, 36(6): 57—60.
- [5] 周正茂, 蒋洪胜, 杨荣. 考虑应力路径的地基沉降计算方法[J]. 山东建筑工程学院学报, 1997, 12(3): 7—12.
ZHOU Zheng-mao, JIANG Hong-sheng, YANG Rong. Ground settlement calculating approach relating to stress path[J]. **Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering**, 1997, 12(3): 7—12.
- [6] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [7] SKEMPTON A W. The pore pressure coefficient a and B [J]. **Geotechnique**, 1954, 14(4): 143—147.
- [8] 金耀华. 考虑侧向变形的沉降计算方法研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2006.

上接第页 3070 页

HAN You-min, LUO Xian-qi, WANG Shui-lin, et al. Formation algorithm of covers and manifold elements in NMM during propagation of cracks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(6): 662—666.

- [11] TIAN Rong, MATSUBARA Hitoshi, YAGAWA Genki. Advanced 4-node tetrahedrons[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2006, 68: 1209—1231.
- [12] 朱爱军, 邓安福, 曾祥勇, 等. 岩体工程数值流形方法的固定边界约束处理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3582—3587.

ZHU Ai-jun, DENG An-fu, ZENG Xiang-yong. Constraints treatment of fixed boundary in numerical manifold method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(19): 3582—3587.

- [13] 朱爱军, 邓安福, 曾祥勇. 数值流形法对岩体工程开挖卸荷问题的模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 179—183.
ZHU Ai-jun, DENG An-fu, ZENG Xiang-yong. Numerical manifold method for simulation of excavation unloading in geotechnical engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 179—183.