

铁路路基施工的渗流-应力耦合模型分析法

Numerical analysis for railroad embankment construction with the use of seepage-stress coupled model

李尧臣¹, 陈洁¹, 周顺华²

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

关键词: 路基沉降; 变分原理; 有限单元法; 孔隙压力

中图分类号: U 213. 1; O 357. 3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0565-04

作者简介: 李尧臣(1943-), 男, 教授, 现从事固体力学方面的教学和科研工作。

0 引言*

铁路经过软土地基时, 对于工后沉降有一定的要求。建立一个合理的技术标准, 对于铁路的设计、施工、造价和使用等都有深远的影响。高速铁路对路基稳定和工后沉降的要求十分严格。由于我国尚无高速铁路的实践经验, 而即将兴建的高速铁路地质情况复杂, 有相当长的路段建筑在软土地基上, 因此, 基床的合理形式、技术标准和相应的施工工艺等问题, 均需进行前期研究, 从而为我国高速铁路的修建提供前期的技术准备。为此目的, 选择了试验段进行路基填筑的模拟施工, 同时进行全过程的跟踪观测和工后的路基沉降观测。另一方面, 对软土地基上路基填筑施工过程进行数值模拟也是很有实际意义的, 与观测手段相比, 它可以提供更多的结果, 如应力和孔隙压力在地基中的分布, 施工结束后长期的路基沉降和孔隙压力的消散等。如果计算结果与实测结果能互相校核, 则数值模拟的方法和结果应视为可靠, 它们对指导下一路段的施工试验和今后高速铁路的施工建设是有帮助的。

近年来有关路基施工和沉降方面的文章不多, 理论和计算方面的文章更少。经纬等^[1]和赵九斋^[2]根据观测资料分析了软土地基上路基沉降变形的特征, 就硬壳层、软土层厚度和不同地基处理方法的路基沉降规律进行了探讨。郑永来等^[3]依据填土施工期的路堤沉降观测资料, 用遗传算法进行了软土地基上路堤填土的稳定性反演分析。安关峰等^[4]采用了线性粘塑性理论模型与非线性粘塑性经验模型叠加的综合模型对上海软土路基的蠕变沉降进行了研究, 并用三维有限元分析了软土地基上填土桥坡的工后沉降。

本工作采用以 Biot 多孔介质固结理论为基础的有限单元法, 以平面应变模型分析了变形、应力和孔隙压力, 计算了地基的沉降量, 并与实测结果比较验证。

1 变分原理与有限单元法

Biot 的三维多孔介质固结理论已为大家熟悉, 不再赘述。把基本方程中的物理量对时间的导数近似地用向后两步差分表示, 即

$$\frac{\partial(\cdot)}{\partial t} = a_0(\cdot) + a_{-1}(\cdot)_{-1} + a_{-2}(\cdot)_{-2}, \quad (1)$$

便有如下的变分泛函^[5]:

$$\begin{aligned} \Phi = & \int_V \left(\frac{1}{2} H_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} - b_i u_i - \lambda \varepsilon_{ii} - \frac{K_{ii}}{2a_0} p_{,i} p_{,i} - \frac{c}{2} p^2 - \right. \\ & \left. \frac{K_{ii}}{a_0} f_{,i} p_{,i} \right) dV - \int_V \frac{1}{a_0} \lambda [a_{-2}(\varepsilon_{ii})_{-2} + a_{-1}(\varepsilon_{ii})_{-1}] dV - \\ & \int_V \frac{1}{a_0} \varphi [a_{-2} p_{-2} + a_{-1} p_{-1}] dV - \int_{S_0} P_i^* u_i dS - \int_{S_p} \frac{1}{a_0} V_n^* p dS. \quad (2) \end{aligned}$$

令该泛函的一阶变分为零, 并使位移 u_i 和孔隙水压力 p 在边界上等于给定的值, 可得到 u_i 和 p 的解。上述方程中各物理量均以张量分量形式表示。 ε 为应变; σ 为应力; b 为体积力; f 为水的体力; K 为渗透系数; c 为储存系数; λ 为 Biot 有效应力系数; H 为弹性系数; P^* 为边界上的给定荷载; V_n^* 为边界上已知的法向流速; a_0, a_{-1}, a_{-2} 为与时间增量有关的系数。若以 Δ_1, Δ_2 表示向后两步的时间步长, 则下标 $-1, -2$ 表示该物理量分别在时间 $t - \Delta_1$ 和 $t - \Delta_1 - \Delta_2$ 的值。初始位移场和孔隙压力场取为零。对实际地基中存在初始位移场和孔隙压力场问题可采用叠加法进行处理。

在求解区域进行了有限元离散后, 变分泛函取驻值的条件可导出以下耦合的有限元代数方程:

$$KU - LP = F, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} -L^T U - \left(\frac{1}{a_0} G + C \right) P = & \frac{1}{a_0} [Q + L^T (a_{-1} U_{-1} + \\ & a_{-2} U_{-2}) + C(a_{-1} P_{-1} + a_{-2} P_{-2})], \quad (4) \end{aligned}$$

式中 K 为刚度矩阵, L 为应力与渗流的耦合矩阵, C 为渗流流速矩阵, C 为质量矩阵, Q 为等效结点流量向量. U 、 P 、 F 分别为总体结点位移向量、总体结点孔隙压力向量及总体等效结点力向量。

2 计算模型与计算参数

试验区位于同济大学沪西校区以北, 与家属院毗邻。地层情况如下: 第一层为人工杂填土, 第二层为粘土及砂粘土, 第三层为厚约 10 m 的淤泥质粘土, 第四层为粉砂与粘土互层。路基填筑后的主要压缩层是淤泥质粘土层。在填筑区内采用插塑料排水板(插塑板)的方法进行排水固结。插塑板采用正三角形布置, 间距为 1.2 m, 深度为 15.0 m。路堤填筑高度为 2.75 m, 底宽为 30 m, 边坡 1: 1.5, 底部有厚 0.6 m 的砂垫层, 并用 2 层土工格栅加固。在试验段埋设了沉降标志、测斜管、孔隙压力管和传感器等, 在整个施工期内对地基和路堤的变形、应力和孔隙压力等进行了跟踪观测。取路基试验段的中间截面, 用平面应变模型对路基的变形和孔隙水压力进行有限元分析。由路基轴线向路基两侧各取 65 m, 由地面向下取 60 m 作为计算区域。地质分层情况以及各地层的土力学参数(由土工试验获得)列于表 1。

有插塑板地层的等效竖向渗透系数可以用竖向通过插塑板控制区域内土体以及插塑板内部的总流量与土层的竖向压力梯度的关系求出。由试验段插塑板的分布情况可知, 每一个插塑板控制范围的为一个正六边形, 面积为 1.247 m^2 。插塑板外层为透水织物, 里面的塑料板骨架将断面分割成 70 个小隔间, 每个小隔间的断面面积为 $2.5 \times 1.6\text{ mm}^2$ 。换算出竖向等效渗透系数为 $3.073 \times 10^{-3}\text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{d})$ 。

3 有限单元法计算方案

由于计算区域是对称的, 只取其一半进行分析。

图 1 和表 1 表示了各计算区域的编号: 在 ①- ④地层中每层又分了两个区域, 其中在路基下的那部分有竖向的插塑板排水装置, 它的作用是在地层中形成竖向排水通道, 使地基中的孔隙水迅速排出, 从而加速地基的固结过程。

在设计有限元网格时, 路堤和接近地表的地基中采用了较密的网格, 离路堤较远处和地基的较深处采用稀疏的网格。边界条件: 在对称轴处($x = 0$)取 $u_x = 0, P_y = 0$ 和 $V_n = V_x = 0$; 在底部边界($y = -60\text{ m}$)取 $u_y = 0, P_x = 0$ 和 $V_n = V_y = 0$; 在右边界($x = 65\text{ m}$)取 $u_x = 0, P_y = 0$ 。但考虑在该边界水可以在水平方向自由流出, 故取 $p = 0$; 在地表($y = 0$)的非填土部分取 $P_y = P_x = 0$ 和 $p = 0$; 在路堤部分, 由于砂垫层隔断了地基土的毛细管作用, 因此路堤填土不考虑孔隙水压力作用, 它的表面是 $P_y = P_x = 0$ 的边界。荷载分阶段加到地基上, 用以模拟路堤的分层填筑。计算按照表 2 给出的施工进度进行。

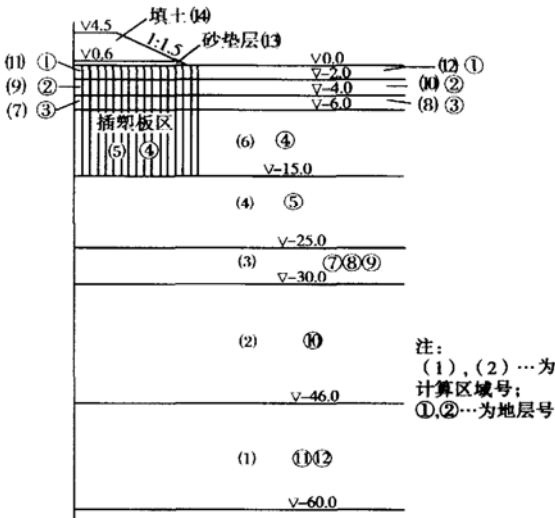


图 1 试验段横截面

Fig. 1 Cross section of test embankment

表 1 地层土力学参数

Table 1 Parameters of mechanical property of soil strata

土层编号	名称	厚度 /m	天然容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	竖向渗透系数 / $10^{-9}\text{ m}^2 \cdot (\text{Pa} \cdot \text{d})^{-1}$	水平渗透系数 / $10^{-9}\text{ m}^2 \cdot (\text{Pa} \cdot \text{d})^{-1}$	计算区域编号
1	人工杂填土	2.0	18.15	3.16	0.35	5.272	4.945	11, 12
2	褐黄色粘土	2.0	18.15	3.16	0.35	5.272	4.945	9, 10
3	粘砂土	2.0	18.05	3.16	0.35	9.989	9.37	7, 8
4	灰色淤泥质粘土	9.0	16.97	1.86	0.35	5.448	7.457	5, 6
5	粘砂土	10.0	18.74	8.68	0.35	6.228	5.838	4
7, 8, 9	粉土粉砂互层及粘砂土	5.0	18.34	3.97	0.35	11.4	8.232	3
10	粘砂土	16.0	18.34	4.65	0.35	5.457	5.457	2
11, 12	粘砂土	14.0	18.25	4.65	0.35	6.371	6.371	1
	路基砂垫层	0.6	19.03		0.25			13
	路基填土	3.0	18.64		0.30			14

表 2 砂垫层和路堤的填筑进度

Table 2 Progress of construction of the railroad bed

日期	07- 23	08- 26	09- 06	10- 11	11- 06	12- 08	12- 13	12- 24	01- 12	03- 19
填筑部位	砂垫层	砂垫层	砂垫层	路基填土	路基填土	路基填土	路基填土	路基填土	路基填土	路基填土
填筑厚度/m	0.3	0.2	0.1	0.22	0.16	0.37	0.36	0.35	0.39	0.30

4 计算结果

为了清楚地表示地基和路堤的变形规律,将地基部分划分为 $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的矩形网格,路堤部分采用了梯形网格。图 2 给出了施工进行到 250 d 时网格结点的位置,图中结点的位移放大了 20 倍。可见变形规律很合理。

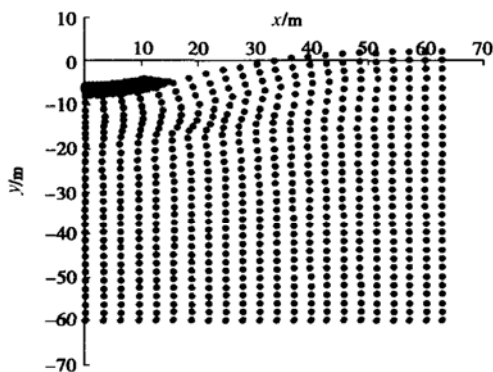


图 2 地基位移图(第 250 天)

Fig. 2 Displacement of the foundation(the 250th day)

图 3 和图 4 以等压线形式分别给出了施工进行到 56 d 和 250 d 时地基内的孔隙压力分布,由此可以看出地基中孔隙水压力的消散过程。在有竖向塑料排水板的区域内孔隙压力几乎为零,几乎画不出等压线,这是由于该区域的竖向渗透系数很大而造成的。较高的孔隙压力都分布在距地表较深处,在插塑板区域的下方出现了高孔压区,而在靠近地表和离路堤较远处孔隙压力逐渐减小到零。

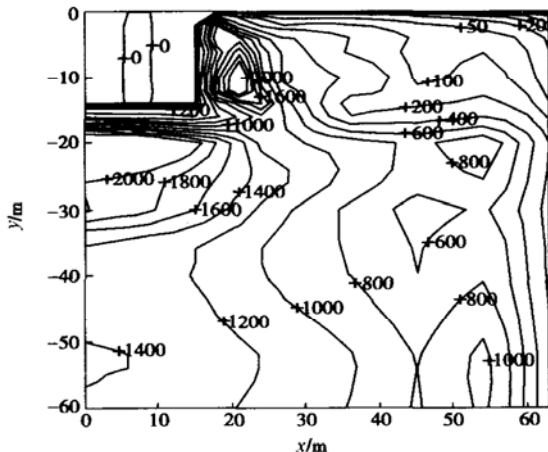


图 3 地基内孔隙压力等值线图(第 56 天)

Fig. 3 Isolines of pore pressure in the foundation(the 56th day)

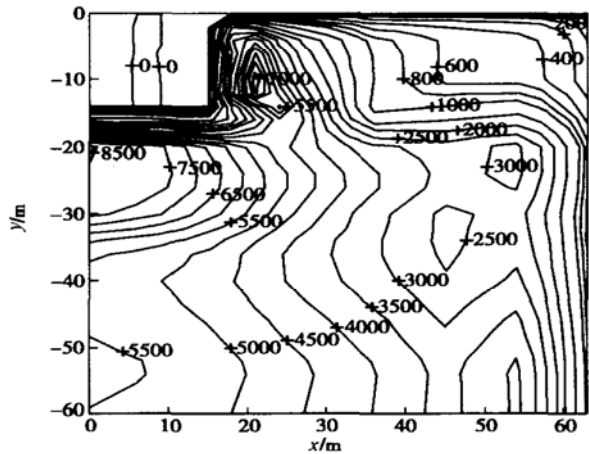


图 4 地基内孔隙压力等值线图(第 250 天)

Fig. 4 Isolines of pore pressure in the foundation(the 250th day)

图 5 和图 6 分别给出了路基坡脚处和路基中心处原地面沉陷曲线的计算结果和实测结果。可以看出在路基中心两条沉降曲线符合得很好,而坡脚处计算的沉降量绝对值比实测的结果大,但趋势还是一致的。从计算结果中还可以看到,在每一层土层填筑完毕后,沉降量很快就接近最终值,在填筑以后的一段时间内,沉降量只有微小的增加,这可能是把插塑板的作用估计得太大,插塑板区的孔隙水排出太快,而周围的软粘土排水又太慢的缘故。另一方面的原因是没有考虑软土的蠕变。

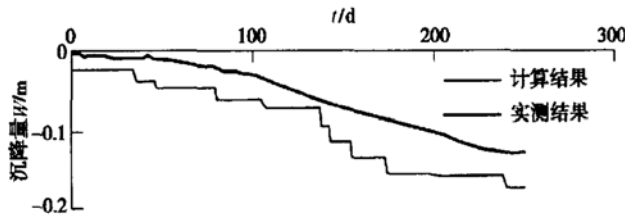


图 5 坡脚沉降量计算结果与实测结果的比较

Fig. 5 Comparison between the computed and measured settlement at the edge of the railroad bed

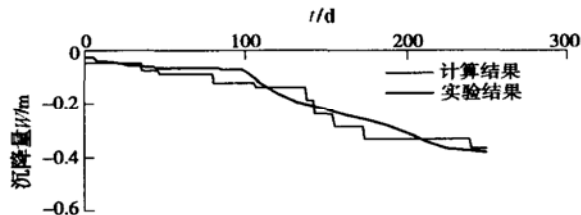


图 6 中心点沉降量计算结果与实测结果的比较

Fig. 6 Comparison between the computed and measured settlement at the central line of the foundation

5 结 论

本文用有限单元法模拟了路基沉降试验段在整个施工过程中地基和路堤的变形、地基中的孔隙水压力和应力,所得的沉降量和实测结果相符。说明用 Biot 三维固结理论及与其相应的有限单元法来模拟路基的沉降是有效的、可靠的。

除了将计算沉降曲线与实测沉降曲线作比较外,数值计算结果还提供了地基在施工过程中的整体响应。这些信息对于高速铁路建设的前期技术储备是需要的,完全靠实测手段是无法得到的,它可作为下个试验段测试方案制定的参考。所提供的计算方法还可作为一种较可靠的方法来估计路基的工后沉降。

参考文献:

- [1] 经 纬,刘玉松,邵光辉.软土地基上路堤沉降变形特征分析[J].岩土工程学报,2001,23(6):728-730.
- [2] 赵九斋.连云港软土路基沉降研究[J].岩土工程学报,2001,22(6):643-649.
- [3] 郑永来,王振宇,钟才根,杨林德.软基路堤填土施工期的稳定性反演分析[J].岩土力学,2002,23(2):196-199.
- [4] 安关峰,鲁 亮.软土地基上填土桥坡工后沉降三维有限元研究[J].岩土力学,2000,21(3):247-251.
- [5] Li Y C. Finite element analysis for a finite conductivity fracture in an infinite poroelastic medium[J]. Int J Numer Anal Meth Geomech, 1999, 23: 187-215.

The Twentieth International Conference on Solid Waste Technology and Management(Call For Papers)

The Twentieth International Conference on Solid Waste Technology and Management will be held in Philadelphia, PA, U. S. A on April 3- 6, 2005. Participants are expected from more than 40 countries.

Researchers, educators government officials, consultants, managers, community leaders, students and others with an interest in solid waste are invited to submit papers for oral presentation at the Conference.

Papers related to all aspects of solid waste technology and management are of interest, including:

Landfilling topics; Recycling; Energy recovery and thermal treatment; Waste reduction; Economics; Policy; Regulations; EU directives; Facility siting; Public involvement; Education; Household hazardous wastes; Waste composition studies; Composting and biological treatment; Chemical and biochemical treatment; Municipal wastes; Industrial wastes; Contaminated sites; Mining and mineral wastes; Medical wastes; Scrap tires; Agricultural wastes; Research topics; Modeling; Utilization of waste materials; Case studies; Solid waste dust; Innovative technologies; Waste collection; Waste generation studies; Integrated waste management; Equipment; Sludge; Ash; Use of waste materials in construction; Environmental impacts; Construction and demolition wastes; Geotechnical topics; Liners, caps, gas and leachate; Environmental equity; All other related topics.

To submit a paper, a one-page abstract (in English) should be sent to: Dr. Ronald L. Mersky, Conference Chair, Department of Civil

Engineering, Widener University 1University Place, Chester, PA 19013 - 5792 U. S. A. ; Fax: 610 499 4059 ; e- mail: solid.waste@widener.edu; phone: 610 499 4042 .

The paper title, the names of all authors, the complete postal and email addresses of the corresponding author and a brief abstract should be provided.

The deadline for submission of abstracts is October 15, 2004. Early submission is encouraged. Authors will be notified by October 29, 2004 concerning acceptance or nonacceptance of submitted abstracts.

A discounted Conference registration fee will be available for authors of accepted papers. That fee includes a CD copy of the Conference Proceedings .

Student presentations will be included in the Conference.

Written versions of papers presented at the Conference may be published in the Conference Proceedings.

Papers presented at the Conference may be reviewed for possible publication in The Journal of Solid Waste Technology and Management.

Authors may submit multiple abstracts. However, no person may present more than two papers at the Conference.

To learn about the Conference structure, you may wish to view the agenda of the 19th Conference at: www.widener.edu/solid.waste.

(Provided by The Journal of Solid Waste Technology and Management)