

路堤下软土地基侧向位移与沉降关系分析研究

李 飞^{1,2}

(1. 盐城工学院 土木系, 江苏 盐城 224003; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘 要: 总结了软土地基下侧向位移的研究现状, 从路堤中最大侧向位移和路中沉降之间的比例关系出发进行了分析研究。利用有限单元法, 建立了路堤下软土地基的计算模型。计算结果表明, 在路堤填筑期间最大侧向位移和路中沉降的增量大致相等, 而在固结期两者的比例关系在 0.14 左右。不同的加载方式在数值上也有所不同。计算结果对路堤下地基侧向变形的计算分析具有一定的指导作用。

关 键 词: 路堤; 侧向变形; 沉降; 有限单元法

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Research on relationship between lateral displacement and settlement in soft ground under embankment

LI Fei^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224003, China;

2. Geotechnical Institute Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The state-of-the art of lateral displacement in soft ground under embankment is reviewed. The problem is investigated using the relationship between the maximum lateral displacement and settlement of embankment center. The calculated model is established with finite element method. The computed results show that during the loading period $\Delta y_m = \Delta S$ and during the period of consolidation $\Delta y_m = 0.14\Delta S$. The loading consequences also affect the ratio. The calculated results is helpful to the research on the lateral displacement.

Key words: embankment; lateral displacement; settlement; finite element method

1 引 言

淤泥、淤泥质黏土等饱和软黏土广泛分布在我国东部沿海地区。软土的物理力学性质很差, 具有高含水率、高压缩性、低强度等特点。在软土地基上修筑高速公路时, 应进行稳定验算与变形计算, 而变形计算更为复杂^[1]。路堤下软土地基的变形可分为垂直沉降(包括瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降)以及侧向位移。侧向位移不仅会影响沉降的大小, 更重要的是影响邻近的构筑物的受力, 侧向变形过大还会影响到地基的稳定性^[2,3]。目前, 对路堤下软基变形的研究多集中在沉降计算和预测上, 而对侧向位移的研究则较少。对路堤中侧向位移的研究多集中在观测数据的分析上^[4~6], 方磊等^[7]通过对大量实测数据的统计分析, 得出了地基处理型式、土层结构、软土层厚度和路堤高度这 4 个影

响因素变化时所对应的软土路基侧向变形的特点。

目前, 对路堤沉降的研究较为深入, 取得了大量的研究成果。从观测水平上来看, 沉降观测技术也要高于侧向变形的观测; 从变形机理上来说, 侧向位移和沉降必然有一定的联系, 因此, 本文从侧向位移与沉降的关系入手进行分析研究, 从而在沉降研究结果的基础上加深对侧向变形的认识 and 了解。

2 路堤下软土地基侧向位移与沉降的关系

影响路堤下软基的侧向位移因素很多^[6], 如地基结构型式、地基土的性质、填土性状、路堤及地基的几何尺寸、填土高度及加荷速率等。因此, 路堤下地基的侧向位移问题十分复杂, 目前的研究除了数值分析的方法, 尚无实用计算和理论分析方法。

国内外的学者都试图从对填土施工期和固结期的位移和沉降的相关分析,来寻找两者之间的定量关系,下面简述国外有代表性的观点。

2.1 传统的观点

图1为传统的最大侧向位移 y_m 和路堤中心沉降 S 的关系曲线。图中 A 点表示填土达到设计标高。传统观点认为:(1) OA 段表示施工期,黏性土地基表现为不排水变形,大部分侧向位移在该工期完成;(2) AB 段为固结期。黏性土地基处于固结状态,孔隙水压力消散,有效应力增加,该阶段不发生侧向位移,甚至出现回缩现象。

2.2 Tavenas 等的研究观点

加拿大的学者 Tavenas 等^[2]从地基土的固结状态出发,认为在正常固结的天然地基中 $\Delta y_m = \Delta S$ (见图2);而在超固结土中,当地基土中附加应力小于前期固结应力 P' 时, $\Delta y_m = (0.18 \pm 0.09)\Delta S$,而当附加应力大于 P' 时, $\Delta y_m = (0.91 \pm 0.2)\Delta S$,其中 y_{mu} , S_u 是由于不排水条件下发生的变形,见图2。Tavenas 还对 Bourges 等提供的 Palavas-les-Flots 地区的高速公路侧向位移和沉降的观测数据进行了分析讨论,如图3所示。可以看出:在 OA 段第一次路堤填筑施工期间黏性土地基基本上处于不排水状态,该阶段的 $\Delta y_m/\Delta S$ 为1.0左右,大部分侧向位移在此阶段完成, AB 段为固结期,黏性土地基处于长期排水阶段,该阶段的 $\Delta y_m/\Delta S$ 的平均值为0.15; BC 段在第一次路堤填筑施工期间黏性土地基基本上处于不排水状态,该阶段的 $\Delta y_m/\Delta S$ 为1.0左右; CD 段为固结期,黏性土地基处于长期排水阶段,该阶段的 $\Delta y_m/\Delta S$ 的平均值为0.34。

2.3 某现场实测结果

马时冬教授^[6]通过对某高速公路试验工程中6个观测断面的侧向位移和沉降资料的相关分析,获取了其中的代表性 y_m-S 曲线,如图4所示。从图中可以看出,存在 A, B 2个转折点。分别对应于填土的临界高度和设计高度。文中还将6个断面中3个阶段的 $\Delta y_m/\Delta S$ 的比值归纳如下: OA 段为施工前期,比值为0.07~0.19; AB 段为施工后期,比值为0.17~0.58; BC 段固结期,比值为0.10~0.30。

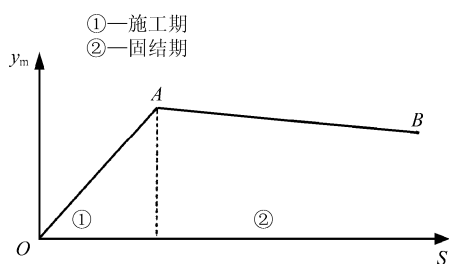


图1 传统的观点
Fig.1 Traditional viewpoint

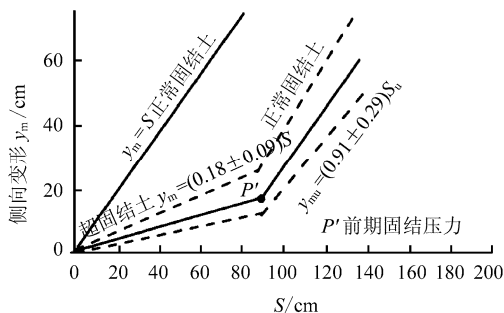


图2 Tavenas 观点
Fig.2 Tavenas viewpoint

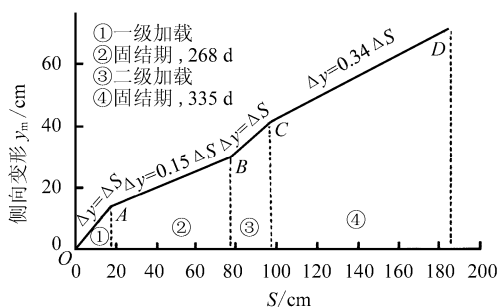


图3 Tavenas 的观测数据
Fig.3 Observed data of Tavenas

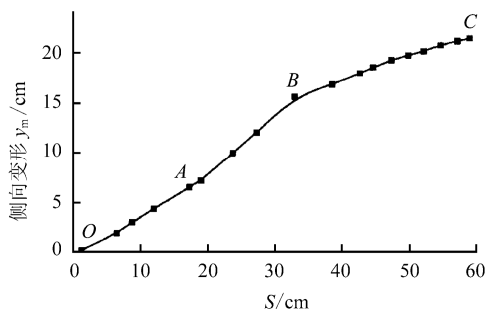


图4 马时冬的观测数据
Fig.4 Observed data by Ma Shi-dong

3 数值模拟分析

3.1 概述

随着计算机和有限元应用技术的发展,该法可以较全面地考虑土体的变形特性及其边界条件,理论上也较为严密。人们可以将复杂的土工计算问题编制成有限元程序,从而得到较准确的计算结果。因此,利用数值模拟计算路堤的性状已成为理论计算上的一种辅助工具。在本算例中,路堤填土仅作为加载,填料采用莫尔-库仑塑性模型;地基土层为华东沿海地区的典型土层,采用剑桥软土模型,参数见表1所示。为便于分析,采用对称的模型分析。路堤外侧受水平向约束,底部和水平向受垂直约束。取路堤底面为地下水位面,并设为固结排水面。土

体采用 6 节点三角形单元。分别采用一级加荷和二级加荷两种工况对路堤下最大侧向位移和路中沉降的关系进行讨论分析。

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soil layers

OCR	λ^*	κ^*	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	$k_x=k_y$ $/10^{-3} \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
硬壳层	0.03	0.012	20	30	$2 \cdot 10^{-3}$	18.5
软土层	1	0.05	0.013	5	$4 \cdot 10^{-3}$	11.5
下卧层	1.1	0.02	0.005	14	$2 \cdot 10^{-3}$	17.1

3.2 一级加荷

图 5 给出了计算模型的有限元剖分示意图, 加载方式如图 6 所示, 填土高度为 4 m。计算结果如图 7~10 所示。

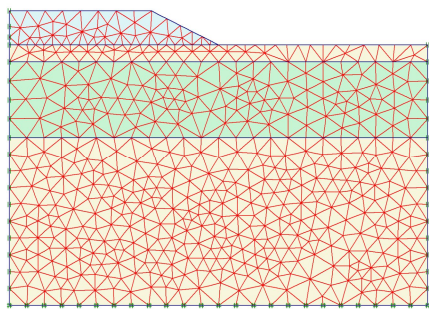


图 5 模型有限元剖分示意图

Fig.5 Sketch of Meshes of Model

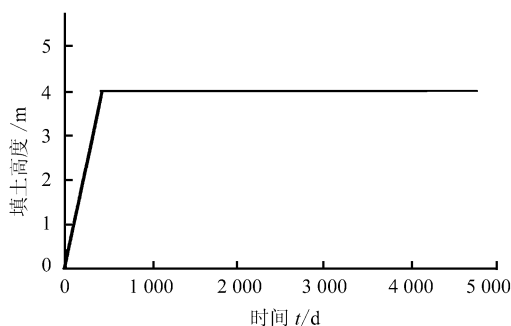


图 6 填土过程曲线

Fig.6 Curve of earth filling process

图 7 给出了路堤下地基土不同位置的沉降-时间变化曲线。 A 点为坡脚处, B 点为对应的坡脚断面最大侧向位移所在位置 (软土层约 $1/3$ 的位置), H 点为路肩, E 点为路中位置。从图中可以清楚地看出, 路中 E 点的沉降最大, 而沿坡脚剖面的沉降在加载过程中有一定的隆起, 在固结过程中则发生了一定的沉降, 在数值上明显小于路中和路肩的沉降。图 8 给出了不同位置的侧向位移-时间的变化曲线。除了上述的 A, B 点外, 还选取了地基中最大侧向位

移所在位置 C 点, 与 B 点基本在同一深度, 在路肩下方。从图可以看出, C 点的侧向位移明显大于其他两点, 在曲线形状上呈现出一种 S 型的分布; 还可以看出, 在加载过程中, 3 个点的侧向位移大小差别不大, 随着固结的进行, 位移差异逐渐明显。

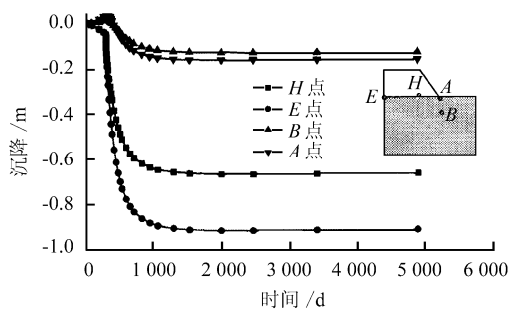


图 7 路堤下地基土不同位置的沉降时间曲线

Fig.7 Settlement-time curves for different positions of base soil under embankment

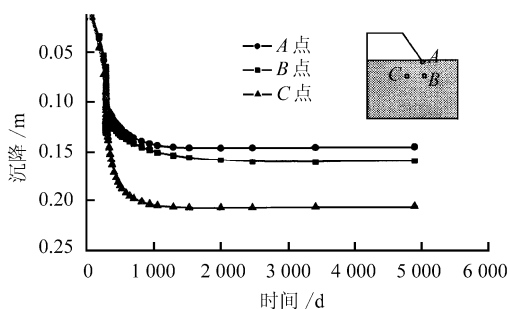


图 8 路堤下地基土不同位置的侧向变形时间曲线

Fig.8 Lateral deformation-time curves for different positions of base soil under embankment

图 9 和图 10 分别给出了 C 点和 B 点的侧向位移和路中的沉降的对比曲线。从图 9 可以看出, 在加载的过程中, 侧向位移和路中的沉降的大小基本相等, 这与 Tavenas 等的研究成果是一致的, 而在加载结束后的固结过程中, 侧向位移的增长速度明显小于路中沉降的增长速度。在加载结束后, 两者的比例关系存在一个反弯点, 随后两者的关系大致呈一个线性关系。在数值上 $\Delta y_m / \Delta S$ 约等于 0.04, 小于 Tavenas 文献中观测结果, 而略小于文献[4]结果的下限, 因此可以看出: 本文的计算模型较好地反映了路堤下地基土的侧向位移和沉降的比例关系, 其中的差异主要取决于参数的选用问题。 C 点的观测结果与 B 点类似, 只是在数值上略大于 B 点, $\Delta y_m = 0.11 \Delta S$ 。因为在实际的侧向位移的观测中, 通常观测到坡脚断面的数据, 因此, 以 B 点的分析结果为主。

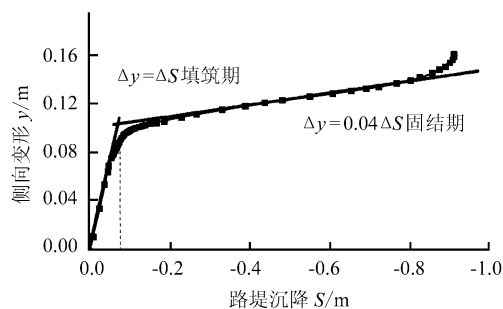


图9 B点侧向位移和路中的沉降的关系曲线

Fig.9 Lateral displacement at point B vs. settlement at center of road curve

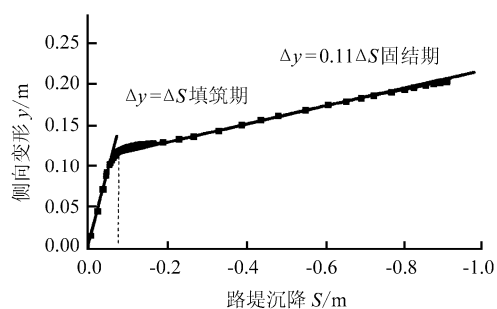


图10 C点侧向位移和路中沉降的关系曲线

Fig.10 Lateral displacement at point C vs. settlement at center of road curve

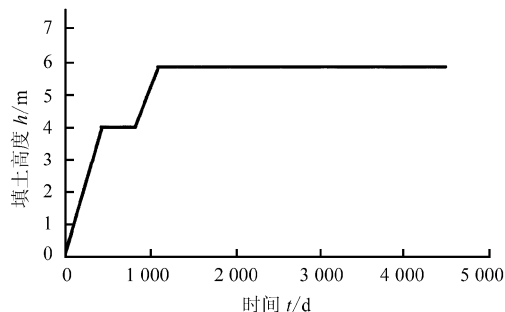


图12 填土过程曲线

Fig.12 Curve of earth filling process

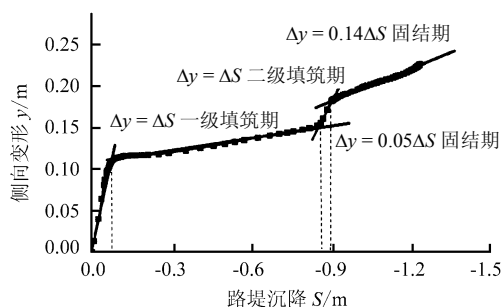


图13 B点侧向位移和路中的沉降的关系曲线

Fig.3 Lateral displacement at point B vs. settlement at center of road curve

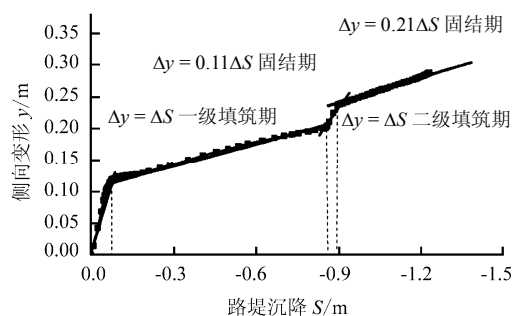


图14 C点侧向位移和路中的沉降的关系曲线

Fig.14 Lateral displacement at point C vs. settlement at center of road curve

3.3 二级加荷

为了更好地对比分析本文与 Tavenas 的观测结果,对算例进行了两级加载过程的模拟计算,计算模型的有限元单元剖分如图 11 所示;加载过程如图 12 所示(一级填土高度为 4 m,二级填土高度为 6 m)。

图 13 给出了两级加载过程中 B 点的侧向位移和路中沉降的关系曲线。与上面算例的计算结果类似,在两次加载的过程中, $\Delta y_m / \Delta S$ 约等于 1。在第一次加载结束后的固结期间,两者的比例关系也呈现直线关系,数值上约等于 0.05;在第二次固结期间,两者仍保持线性关系, $\Delta y_m = 0.14 \Delta S$ 。这种结果与 Tavenas 提出的规律保持一致。图 14 给出了 C 点的侧向位移和路中沉降的对比关系曲线,与 B 点的结果相类似,只是数值上略大一些。

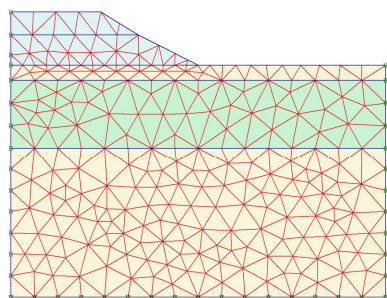


图11 模型有限元剖分示意图

Fig.11 Sketch of meshes of model

4 结 论

本文分析了路堤下地基土的侧向位移问题,并从地基土中最大侧向位移和路中沉降的比例关系入手进行了专门研究。首先,分析了传统的观点以及 Tavenas 和马时冬等学者的观点;然后,建立了计算路堤下地基变形的有限元模型,分别讨论了一级加荷和两级加荷两种工况。本文的计算结果和有关实测结果表明,传统观点对最大侧向位移与路中沉降关系的认识是不符合实际情况的,这是因为传统观点将土体假定为弹性,而实际上土体是一种复杂的黏塑性材料。Tavenas 的观点能基本上反映侧移与沉降之间的实际关系,但对于各阶段变形机理的

认识不够清楚,尤其是在固结过程中,侧向位移与沉降的比例关系数值上偏大。而本文的计算结果能较好地反映两者关系的全过程。只要确定合理的计算参数,就能较好地反映两者的关系,从而可以通过对路堤沉降的分析就可以得到地基土侧向位移的变化规律。不过本文仅对天然地基进行了分析讨论,对水泥土搅拌桩等复合地基中侧向位移和沉降的关系有待进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Malek M. Smadi. Lateral deformation and associated settlement resulting from embankment loading of soft clay and silt deposits[D]. Illinois: University of Illinois, 2001.
- [2] Tavenas F, Leroueil S. The behavior of embankments on soft foundations[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1980, 17: 236—259.
- [3] Tavenas F, Mieussens C, Bourges F. Lateral displacements in clay foundations under embankments[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1979, 16: 532—550.
- [4] 阎钊, 朱长歧, 王良民. 海沧大道路基施工侧向位移数据[J]. 岩土力学, 2003, 24(Supp. 2): 465—468.
- YAN Ke, ZHU Zhang-qi, WANG Lian-min. Analysis of lateral displacement in soft soil deposits under fill construction of haicang highway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, S2: 465—468.
- [5] 马时冬. SLS 路堤的稳定性和沉降分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 331—334.
- MA Shi-dong. Stability and settlement of embankment filled with stabilized light soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 331—334.
- [6] 马时冬. 路堤下软黏土地基的侧向位移[J]. 华侨大学学报, 1995, 16(2): 165—167.
- MA Shi-dong. Lateral displacement of soft clay foundation under embankment[J]. **Journal of Huaqiao University**, 1995, 16(2): 165—167.
- [7] 方磊, 朱中卫. 软土路基侧向变形影响因素研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 33—38.
- FANG Lei, ZHU Zhong-wei. Study of influence factors of lateral deformation of soft soil foundation under embankments[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2005, 22(11): 33—38.