

文章编号: 1000-7598-(2008) 05-1305-05

路堤侧向变形性状及预测模型研究

余 闯¹, 刘松玉²

(1.温州大学 建筑与土木工程学院, 温州 325035; 2.东南大学 交通学院岩土工程研究所, 南京 210096)

摘 要: 结合大量实测资料和已有的研究成果, 分析了路堤荷载作用下水平向应变随深度的变化规律, 得出了侧向变形沿深度呈“弓”型分布的变化规律; 提出了符合该变化规律的预测模型及参数求解方法, 模型中 a 、 b 和 c 等 3 个待定参数能简单地求出。工程实践表明, 该预测模型不仅反映了侧向变形随深度的变化规律, 且有一定的精度, 能反映出最大侧向变形发生的位置, 应用效果良好。

关 键 词: 路堤; 侧向变形; 预测模型; 水平向应变

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

Study on the characteristic and prediction model for lateral deformations under embankments

YU Chuang¹, LIU Song-yu²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, College of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: According to the distribution of horizontal strain in the soil under embankment loads, the characteristic of lateral deformations along the depth is analyzed based on measured data and existing research results. The results show that the typical curve is bow-shaped. On this point, the predicted model is established to forecast the lateral deformation. The three parameters in the model, a , b and c can be easily solved. This model has been applied to study 2 cases. The model can reflect both the distribution of lateral deformation along depth and the location where the maximum deformation occurs. The comparisons demonstrate that the predicted deformations are in good agreements with the measured data.

Key words: embankment; lateral deformation; prediction model; horizontal strain

1 引 言

在软土地基上修筑公路时应进行稳定验算与沉降计算, 而沉降计算较为复杂。路堤软基在荷载作用下总是存在侧向变形, 它不仅影响竖向变形, 更重要的是还影响土中结构的受力, 侧向变形过大甚至还会影响到地基的稳定^[1-3]。侧向变形速率值大小是判断路堤稳定的控制指标之一, 很多学者对此问题做了很多细致深入地研究^[4-6]。目前, 国内外对路堤中侧向变形的研究多集中在观测数据的分析和数值模拟上^[7-9], 而对其预测模型及其机理分析较少。方磊等^[10]通过对大量实测数据的统计分析, 得出了地基处理形式、土层结构、软土层厚度和路堤高度 4 种影响因素变化时所对应的软土路基侧向

变形的特点, 比较了它们各自的地基侧向变形-时间-深度曲线形态、侧向变形大小、最大侧向变形发生位置以及地基中某点侧向变形收敛速率, 并对这一系列现象进行了理论分析, 得出了一些区域性结论; 邓永锋等^[11]分析了粉喷桩复合地基路堤填筑过程中最大侧向变形发展的特性, 确定了坡脚处最大侧向变形与路中沉降呈双直线的关系。本文拟在分析软土路基中侧向变形特点的基础上, 建立适合这种特点的预测模型, 并应用到实际工程的预测中, 以指导工程实践。

2 路堤侧向变形沿深度的分布特征

附加应力是引起土体变形的主要原因。图 1 为均布堤坝荷载(斜线填充部分所示)作用下地基土

收稿日期: 2007-12-20

基金项目: 东南大学优秀博士学位论文基金(No. YBJJ0513); 教育部博士点基金(No. 2001028618)。

作者简介: 余闯, 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 主要从事地基处理、桩基工程等方面的研究。E-mail: geoyuchuang@hotmail.com

中任一点的附加应力, 可由下式求得^[12]:

$$\sigma_x = \frac{p}{\pi} \left[\beta + \frac{x\alpha}{a} + \frac{z}{r_2^2} (x-b) + \frac{2z}{a} \ln \frac{r_1}{r_0} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi} \left[\beta + \frac{x\alpha}{a} - \frac{z}{r_2^2} (x-b) \right] \quad (2)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{p}{\pi} \left[\frac{z\alpha}{a} - \frac{z^2}{r_2^2} \right] \quad (3)$$

式中: σ_x 为水平应力; σ_z 为竖向应力; τ_{xz} 为剪应力; x, z 为应力点坐标, 其他符号意义与图 1 相同。余下同。

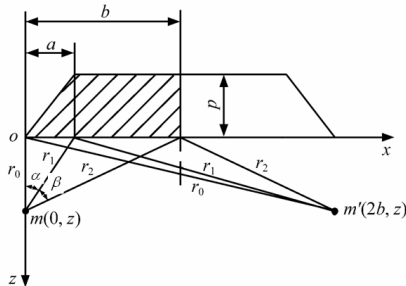


图 1 高速公路路堤荷载示意图

Fig.1 Sketch of embankment loads in highway engineering

典型的路堤荷载如图 1 所示, 在坡脚任取一定点 $m(0, z)$, 由式 (1) 求出其水平方向附加应力的。由对称性, 另一半路堤荷载在 m 点的附加应力大小与阴影部分在 $m'(2b, z)$ 点大小相等, 所以 m 点的水平向附加应力和竖向附加应力分别为

$$\begin{aligned} \sigma_{mx} = \frac{p}{\pi} & \left[\arctan \frac{b}{z} - \arctan \frac{a}{z} - \frac{z}{z^2 + b^2} b + \right. \\ & \left. \frac{2z}{a} \ln \frac{\sqrt{z^2 + a^2}}{z} \right] + \frac{p}{\pi} \left[\arctan \frac{2b-a}{z} - \right. \\ & \left. \arctan \frac{b}{z} + \frac{2b}{a} \left(\arctan \frac{2b}{z} - \arctan \frac{2b-a}{z} \right) + \right. \\ & \left. \frac{1}{z} b + \frac{2z}{a} \ln \frac{\sqrt{z^2 + (2b-a)^2}}{\sqrt{z^2 + 4b^2}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{mz} = \frac{p}{\pi} & \left[\arctan \frac{b}{z} - \arctan \frac{a}{z} + \frac{z}{z^2 + b^2} b \right] + \\ & \frac{p}{\pi} \left[\arctan \frac{2b-a}{z} + \frac{2b}{a} \left(\arctan \frac{2b}{z} - \right. \right. \\ & \left. \left. \arctan \frac{2b-a}{z} \right) - \frac{1}{z} b \right] \end{aligned} \quad (5)$$

由弹性力学计算公式得水平向合和竖向应变分别为

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - u\sigma_z) \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - u\sigma_x) \quad (7)$$

式中: E 为土体弹性模量; u 为土泊松比

将式 (4) 和式 (5) 代入式 (6) 和式 (7) 中, 得到路堤荷载作用下坡脚处沿深度方向地基土水平向应变随深度变化的解析式。该式形式上较为复杂, 为了直观地说明, 取填土高 $h=5$ m, $a=7.5$ m, $b=22.5$ m, 地基土的弹性模量 $E=3$ MPa, 泊松比 $u=0.35$, 荷载 p 可取为 100 kPa, 求出水平向应变随深度的变化规律, 如图 2 所示。

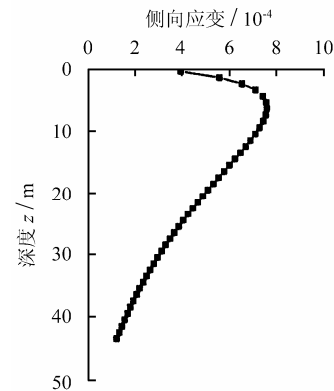


图 2 水平向应变随深度变化曲线

Fig.2 Distribution of the horizontal strain with depth

3 侧向变形沿深度方向的性状及预测

3.1 路堤侧向变形实测数据分析

Tavenas 等^[1]总结了 21 种软黏土地基上路堤的侧向变形发展状况, 分析了施工期和固结期地基侧向变形与沉降的关系, 极大地推动了路堤下软基侧向变形的研究。图 3 为路堤变形的典型剖面图, 从图可知, 路堤侧向变形并不是在地表处达到最大值, 而是在地下某一深度 z_m 处达到最大值 y_m , 随后随深度增加而减小。

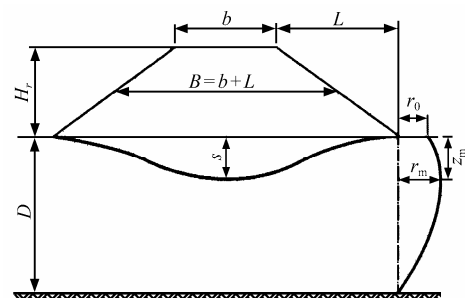


图 3 路堤变形典型剖面图

Fig.3 Typical deformation pattern in embankment

1980年, Tavenas 等^[2]根据对侧向变形的长期观测数据, 作出了典型的侧向变形随深度变化的曲线, 并做了归一化处理, 如图4所示, 大量的侧向变形数据都表明同样的特点: 侧向变形随深度基本上呈现出“弓”型分布, 变形最大值在地表下某深度处。

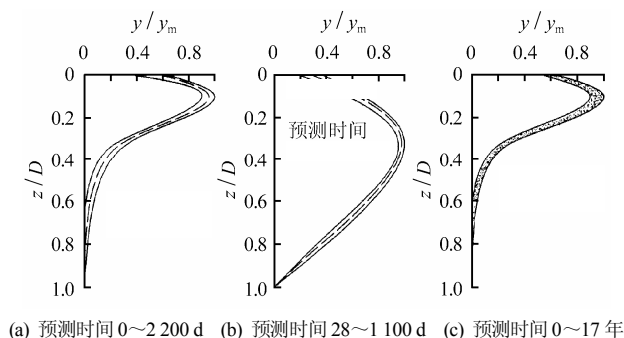


图4 侧向变形随深度变化典型曲线

Fig.4 Distribution of the lateral deformation with depth under embankments

3.2 预测模型的建立

通过对路堤荷载作用下坡脚处地基土水平向应变随深度的分布特征和对大量侧向变形的资料统计分析可知, 侧向变形随深度的变化呈现“弓”型分布, 拟采用下述函数来描述侧向变形 s 的特征:

$$s = (a + bz)e^{-cz} \quad (8)$$

式中: a 、 b 、 c 均为待定参数; z 为深度。该函数在形状上符合侧向变形随深度的变化特征, 并且具有良好的适应性, 图5~7为各参数变化下的预测模型曲线:

在 $z=0$ 时, $s=a \neq 0$, 图形不经过原点, 亦即地表存在侧向变形, 与前面分析一致。

s 对 z 的一阶导数, 见式(9), 当 $z \leq (b-ac)/bc$ 时, $s' \geq 0$, 即表明侧向变形是随深度的增加而增加; 当 $z > (b-ac)/bc$ 时, $s' < 0$, 表明此时侧向变形随深度的增加而减小。 $z = (b-ac)/bc$ 反映出了最大侧向变形发生的位置。

$$s' = (b - ac - bcz)e^{-cz} \quad (9)$$

s 对 z 的二阶导数为

$$s'' = (ac^2 - 2bc + bc^2z)e^{-cz} \quad (10)$$

当 $z \leq (2b-ac)/bc$, $s'' \leq 0$; $z > (2b-ac)/bc$ 时, $s'' > 0$, 二阶导数变号, 曲线存在拐点, 也符合“弓”型的分布特征。

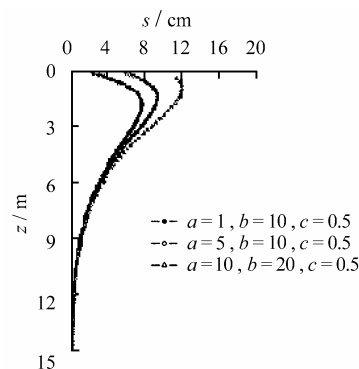


图5 s - z 随 a 变化

Fig.5 The variety of s - z with a

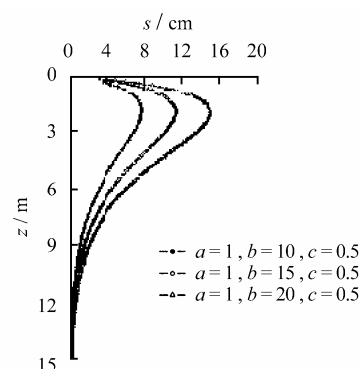


图6 s - z 随 b 变化

Fig.6 The variety of s - z with b

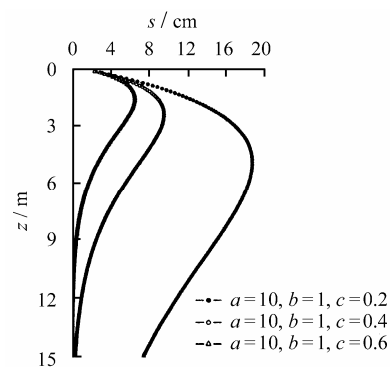


图7 s - z 随 c 的变化

Fig.7 The variety of s - z with c

图8为一阶导数和二阶导数的图形, 可直观地看出一阶导数先大于0后小于0的情况, 反映出侧向变形随深度先增加后减小的特征; 二阶导数先小于0后大于0, 表现了该曲线存在拐点, 符合侧向变形随深度变化的特征。同时可以看出, 在这3个参数当中, a 主要反映了地表位置的侧向变形大小, b 反映了最大侧向变形的数值, c 反映了侧向变形的影响深度。

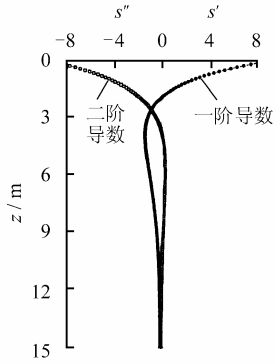


图8 一阶导数和二阶导数图形

Fig.8 The graphs of first and second order differential coefficients

3.3 预测模型的求解

由上面的分析可知,该模型与路堤荷载下地基土的侧向变形的特点相当吻合,如何求解待定参数就显得尤为重要。

由式(8)可知,当 $z=0$,参数 a 在数值上也就是地表的沉降数值, $a=s_{z=0}$,只要有地表的侧向变形的数据,就可以求出参数 a 。

将式(8)做如下变化:

$$se^{cz} = (a + bz) \quad (11)$$

取 (s_1, h_0) , $(s_2, 2h_0)$ 两个数据代入式(11),有

$$s_1 e^{ch_0} = (a + bh_0) \quad (12)$$

$$s_2 e^{c2h_0} = (a + 2bh_0) \quad (13)$$

联立式(12)、式(13)求解, $s_2 e^{c2h_0} - 2s_1 e^{ch_0} = -a$,令 $x = e^{ch_0}$,则

$$s_2 x^2 - s_1 x + a = 0 \quad (14)$$

式中: $x = \frac{S_1 \pm \sqrt{S_1^2 - 4S_2 a}}{2S_2}$ 。由 $x = e^{ch_0}$ 可知,当

$x > 1$, $c = \ln x / h_0$,由求出的 a 、 c 再代入式(11)中即可求出参数 b ,这样3个参数都得到求解。

由此可见,只需要 $(s_0, 0)$, (s_1, h_0) 和 $(s_2, 2h_0)$ 3个不同深度实测数据,就可以求出预测模型的参数,从而得到侧向变形随深度变化的曲线。

由式(9)可知,当 $z = (b - ac) / bc$ 时,模型的二阶导数为0,即是侧向变形最大值出现的位置,因此求出3个待定参数后,就可得出侧边变形最大

值发生的位置 z_m 。

4 应用实例

4.1 连—盐高速公路侧向变形预测分析^[13]

连—盐高速公路位于江苏省东部沿海地区,路线全长约151.5 km,设计车速为120 km/h,实施双向6车道高速公路标准,路基宽度为35 m。工程地质勘察资料表明,线路所经区域绝大部分地势平坦,河流纵横成网,工程地质条件复杂,软土分布广泛且工程性质差,其中k21+200段,设计路堤高2.21 m,表土层厚1.2 m,软土层厚10.4 m,采用加筋+等载预压的地基处理方式,在左右侧均埋设了测斜管,深度均为21 m,埋设时间是2004年5月30日,从8月开始观测,每月观测2次。图9为2005年1月30日至6月8日的连—盐高速公路k21+200右侧侧向变形随深度变化的曲线,可以看出侧向变形随深度变化的“弓”型分布特征,最大侧向变形出现在地表下4 m左右深度处,可见本文所提出的预测模型也较好地反映了这个特征,由模型参数 $(2b - ac) / bc$ 计算所得 $z_m = 3.85$ m。

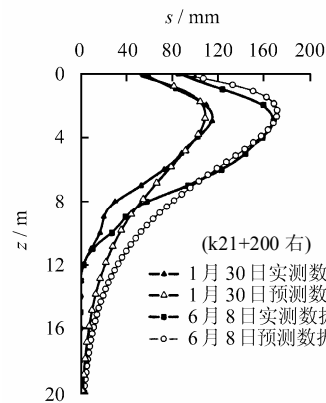


图9 连—盐高速公路路堤侧向变形预测
Fig.9 Prediction of the lateral deformation of Lian—Yan highway engineering

4.2 某高速公路路堤侧向变形预测

Otohiko Suzuki^[14]对 Nagareyama & Toichi 地区高速公路路堤的侧向变形进行了系统的总结和分析,图10为典型的侧向变形随深度变化的曲线,并进行了归一化处理,可以清楚地看出侧向变形随深度的变化特征,本文所提出的预测模型也较好地反映了这个特征,该模型求出的 $z_m = 0.21$,实测数据在0.18左右。

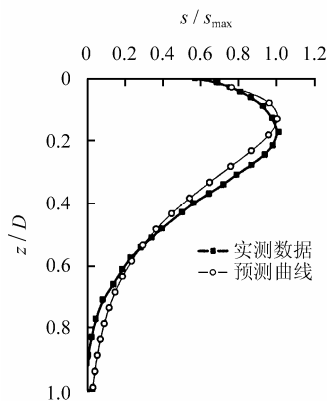


图 10 Nagareyama & Toichi 路堤侧向变形归一化预测
Fig.10 Prediction of the normalized lateral deformation of Nagareyama & Toichi highway engineering

5 结 语

本文从路堤荷载作用下地基土的水平向应变分布特征和大量的观测资料入手分析,得出了路堤侧向变形沿深度呈现“弓”形分布的变化规律,提出了预测模型并给出了参数的求解方法,应用到2个工程实例中。预测结果显示,该模型较好地反映了路堤侧向变形随深度的变化特征,且具有一定的预测精度,能反映出最大侧向变形发生的位置,取得了较好的预测结果。

参 考 文 献

- [1] TAVENAS F, MIEUSSENS C, BOURGES F. Lateral displacements in clay foundations under embankments[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1979, 16: 532—550.
- [2] TAVENAS F, LEROUEIL S. The behavior of embankments on soft foundations[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1980, 17: 236—259.
- [3] MALEK M SMADI. Lateral deformation and associated settlement resulting from embankment loading of soft clay and silt deposits[D]. Urbana, Illinois: University of Illinois, 2001.
- [4] LOGANATHAN N, BALASUBRAMANIAM A S, BERGADO D T. Deformation analysis of embankments[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 119(8): 1 105—1 106.
- [5] HUNTER, GAVAN, FELL, ROBIN. Prediction of impending failure of embankments on soft ground[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2003, 40(1): 209—220.
- [6] INDRARATNA B, BALASUBRAMANIAM A S, SIVANESWARAN N. Analysis of settlement and lateral deformation of soft clay foundation beneath two full-scale embankments[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1997, 21(9): 599—618.
- [7] 阎钊, 朱长歧, 王良民. 海沧大道路基施工侧向位移数据分析[J]. **岩土力学**, 2003, 24(增刊): 465—468.
YAN Ke, ZHU Zhang-qi, WANG Liang-min. Analysis of lateral displacement in soft soil deposits under fill construction of Haicang highway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 465—468.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 邓永锋, 刘松玉, 洪振舜. 高速公路工程中粉喷桩复合地基最大侧向变形研究[J]. **岩土力学**, 2005, 26(4): 604—607.
DENG Yong-feng, LIU Song-yu, HONG Zhen-shun. Maximum lateral deformation of dry mixing column composite foundation in expressway engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26 (4): 604—607.
- [12] POULOS H G, DAVIS E H. Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1974.
- [13] 刘松玉. 东南大学岩土工程研究所. 连—盐高速公路深层水平位移和孔压观测报告[R]. 南京: 东南大学岩土工程研究所, 2005.
- [14] OTOHIKO SUZUKI. The lateral flow of soil caused by banking of soft clay ground [J]. **Soils and Foundations**, 1988, 28(4): 1—18.