

文章编号:1671-8879(2006)05-0030-05

桥台背路基沉降理论计算

岳鹏飞^{1,2}, 申爱琴¹, 祁秀林³

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;
2. 厦门市公路局, 福建 厦门 361000; 3. 惠州市公路局, 广东 惠州 516001)

摘 要:根据台背路堤分层施工的实际情况,提出台背路基沉降计算理论和计算模型,该理论将路堤填土根据施工进度划分为数层,由于充分考虑了每层填土对地基的不同作用时间,计算模型更加符合施工进度。利用该理论,推导了梯形分布条形荷载作用下土中任意点处应力的计算公式。为验证理论计算的实用性,以广东惠州西林河大桥龙门台背路基沉降为例,将实测结果与计算结果进行了比较分析。结果表明:实测值与理论计算值具有很好的相关性;台背路基填筑时,压实度控制得越好,理论计算沉降与实际沉降就吻合得越好。

关键词:道路工程; 台背路基; 沉降; 条形荷载; 计算

中图分类号:U416.1 **文献标识码:**A

Calculating theory of settlement of bridge approach embankment

YUE Peng-fei^{1,2}, SHEN Ai-qin¹, QI Xiu-lin³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Highway Administration of Xiamen City, Xiamen 361000, Fujian, China; 3. Highway Administration of Huizhou City, Huizhou 516001, Guangdong, China)

Abstract: Based on an actual stratified embankment behind the bridge abutment, this paper puts forward the calculating theory and model for the settlement of subgrade. This theory stratifies the fill into several layers according to the construction progress. In this model, the affect of different layers on the subgrade at different time is taken into account, so this calculating model is good in accordance with construction procedure. With this theory, this paper deduces the formula to calculate the stress at any point of the earth under the trapezoidal distribution strip load. In order to verify the practicability of this theory, the back-a-butment fill settlement of Xilin river bridge in Huizhou City is selected as the calculating case. By comparing the calculated value with the actual measured value, it shows great correlation between them. And it is also confirmed that the better the subgrade is compacted, the better the calculated value meet the actual measured value. 2 tabs; 5 figs; 7 refs.

Key words: road engineering; bridge approach; settlement; uniform load; calculation

0 引 言

台背路基沉降过大是引起桥涵台后病害的主要

原因,因此,台背路基沉降的准确计算对病害处治方案的制定意义重大。台背路基沉降由两部分组成:路堤在自重作用下的沉降和地基沉降。在工程中,

地基沉降计算经常采用分层总和法,将整个路堤看作梯形分布条形荷载,一次加载于地基之上,计算地基在其作用下的沉降变形。而实际上,路基施工是一个分层填筑、逐级加载的过程,路基变形机理不同于一次加载。^[1-3] 本文提出模拟施工进程的台背路基沉降计算理论和模型,不仅将地基划分为数层,而且将路堤填土按施工进度层层划分,每层新填土都视为一次加载,从而充分考虑到各层填土及地基土的力学特性和固结特性。该计算模型与其他模型相比,更加符合施工实际过程,更具合理性。

1 台背路基沉降计算原理

1.1 路堤沉降计算原理

路堤在填筑过程中,是一个逐级加载的过程。因此,随着填土的增加,各填土层既是荷载,又是受压层。作为荷载,每层填土均视为梯形分布条形荷载。各土层填筑完工后,除受到上面土层的荷重而产生变形外,下面土层的固结变形也会引起该土层的下沉。

具体到某一层填土,如对第 i 层土,设其填土完工时间为 t_i ($i = 1, 2, \dots, n$),填筑后某一时刻 T ($T > t_i$) 所产生的压缩变形量 S_T 由两部分组成:一部分为第 i 层填土自身荷重及其上填土荷重引起该层固结沉降值 $S_{T(i)}$,如图 1(a) 所示;另一部分为第 i 层填土下面的土层 ($1 \sim (i-1)$) 从 t_i 到 T 时刻所完成的固结沉降值 $S_{LT(i)}$ 。即

$$S_T = S_{T(i)} + S_{LT(i)} \quad (1)$$

1.1.1 第一部分

考虑到施工进度的原因,将第 i 层的上覆填土划分成数层,从而充分考虑到第 i 层上面各层土对其不同的作用时间。其计算原理如图 1(b) 所示。

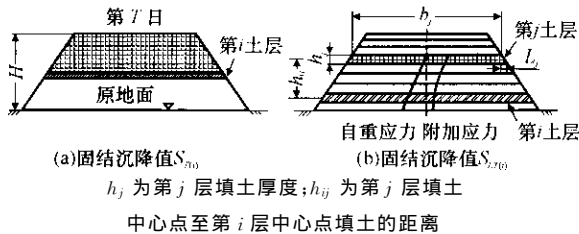


图 1 路堤沉降计算原理图

又设: b_j 为第 j 层填土顶线宽度; L_j 为第 j 层填土边坡水平投影长度; σ_i 为第 i 层填土的自重应力; $\Delta\sigma_{ij}$ 为第 j 层填土施工后在第 i 层填土中所增加的附加应力。

在各层填土中,自重应力可表示为

$$\sigma_i = \gamma(h_{ij} - h_j/2)$$

式中: γ 为土的容重。

设在第 j ($j > i$) 层作用下,第 i 层的压缩量为 $S_{i,j}$,第 j 层填筑完工时间为 t_j ,则

$$S_{i,j} = \Delta\sigma_{ij} / E_{si}$$

式中: $\Delta\sigma_{ij}$ 为第 j 层填土施工后在第 i 层填土中所增加的应力; E_{si} 为 $\sigma_i + \Delta\sigma_{ij}$ 对应的压缩模量。

附加应力增量按梯形分布条形荷载作用下的土中应力计算,其计算式为

$$\Delta\sigma_{ij} = \frac{\gamma h_j}{\pi L_j} \left[\begin{aligned} & (d-x) \left(\arctan \frac{d-x}{z} + \arctan \frac{d+x}{z} \right) - \\ & (c-x) \left(\arctan \frac{c-x}{z} + \arctan \frac{c+x}{z} \right) + \\ & \frac{(d-x)^2 z + z^3}{(d-x)^2 + z^2} + \frac{(d^2 - x^2) z + z^3}{(d^2 + x^2) + z^2} - \\ & \frac{(c-x)^2 z + z^3}{(c-x)^2 + z^2} - \frac{(c^2 - x^2) z + z^3}{(c+x)^2 + z^2} \end{aligned} \right]$$

式中: $c = b_j/2$; $d = (b_j/2) + L_j$; 若路堤边坡坡度取 $1:1.5$,则 $L_j = 1.5h_j$; x, z 为土中任一点的坐标。

由第 j 层填土引起的第 i 层填土压缩量在 T 时刻完成的部分为 $S_{i,j} U_{T(i,j)}$ 。其中, $U_{T(i,j)}$ 为自身压缩量 $S_{i,j}$ 在 T 时刻的固结度,此时的固结时间为 $\Delta T = T - t_j$ 。

由以上分析,第 i 层填土自身荷重及其上填土荷重引起该层压缩量在 T 时刻完成的部分为

$$S_{T(i)} = \sum_{j=i}^m S_{i,j} U_{T(i,j)} \quad (2)$$

式中: m 为路堤填土的分层数,施工期 $m = H/\Delta h$,设在第 T 日填高为 H , Δh 为各分层厚度;在运行期 $m = n$,设路堤设计填高为 H_0 ,则 $n = H_0/\Delta h$ 。

1.1.2 第二部分

第 i 层填土下面的土层 ($1 \sim (i-1)$) 从 t_i 到 T 时刻所完成的固结沉降值 $S_{LT(i)}$,其值等于第 i 层填土下面的土层 ($1 \sim (i-1)$) 从填筑时到 T 时刻所发生的固结沉降值 $S_{LT(i)1}$,减去第 i 层填土下面的土层 ($1 \sim (i-1)$) 从填筑时到第 i 层填筑完工时所发生的固结沉降值 $S_{LT(i)2}$,即

$$S_{LT(i)} = S_{LT(i)1} - S_{LT(i)2} \quad (3)$$

且

$$S_{LT(i)1} = \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{j=k}^m S_{k,j} U_{T(k,j)}$$

式中: $S_{k,j}$ 为由第 j ($j > k$) 层填土引起的第 k ($k < i$) 层填土的压缩量; $U_{T(k,j)}$ 为压缩量 $S_{k,j}$ 在 $t_j \sim T$ 时段内所完成的固结度,其固结时间为

$$\Delta T = T - t_j$$

同上

$$S_{LT(i)2} = \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{j=k}^i S_{k,j} U_{T(k,j,i)}$$

式中: $S_{k,j}$ 为第 j ($i > j > k$) 层填土引起的第 k ($k < i$) 层填土的压缩量; $U_{T(k,j,i)}$ 为压缩量 $S_{k,j}$ 在 $t_i \sim t_j$ 时间段内所完成的固结度, 其固结时间为 $\Delta T = t_i - t_j$ 。

上述公式中的固结度, 可根据实际情况, 选用合适的理论方法计算。填土多属非饱和土, 有关固结问题的研究还未达到实用水平。文献[2]对非饱和土路基固结进行了研究, 并建立固结模型, 但其参数不易获得。文献[3]指出, 当填料在最佳含水量附近填筑压实时, 其饱和度一般为 $0.8 \sim 0.9$, 这时, 孔隙气体将以小气泡形式封闭在孔隙水中, 并随孔隙水一起运动。因此, 计算中可以将含气水当作单一的可压缩流体, 采用类似饱和土的方法进行分析。本文在路堤的固结计算中, 采用了太沙基一维固结理论。

由此, 根据各土层在填筑过程中的实际排水情况和固结时间, 可分别求出其固结度, 将其代入前面的公式中, 即可求出某一时刻各填土层的实际压缩变形量。

1.2 地基沉降计算原理

在实际工程中, 人们除了重视地基总的沉降变形外, 更加关注的是地基的工后沉降。为了比较精确地计算地基工后沉降, 对于地基在路堤填筑过程中的沉降就需要精确地计算, 因此不能简单的将路堤对地基的作用看作一次加载, 必须考虑路基填筑时的分期施工问题。将路堤填土根据施工进度划分为数层, 从而充分考虑到每层填土对地基不同的作用时间。同时将地基受压层范围内的土划分成数层, 从而考虑到每层地基土的力学特性和固结特性。在某一时刻计算每级填土荷载引起的每层地基土的沉降变形, 将数层地基土的沉降变形叠加, 就可得到每级填土荷载作用下地基的沉降变形。再将数级填土荷载引起地基沉降变形叠加, 就可得到任一时刻在路堤作用下地基的沉降变形。将开放交通后某一时刻的地基沉降变形减去开放交通初的地基的沉降变形, 就可得到地基在开放交通后某一时刻的工后沉降变形。其计算原理图如图 2 所示。

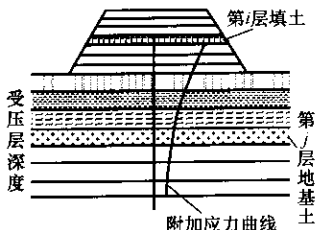


图 2 地基沉降计算原理图

第 i 层填土引起的第 j 层地基土沉降变形在 T 时刻完成的部分为 $S_{i,j}U_{T(i,j)}$ 。其中, $S_{i,j}$ 为第 i 层填土引起的第 j 层地基土沉降变形, 且

$$S_{i,j} = \Delta\sigma_{ij}/E_{sj}$$

式中: $\Delta\sigma_{ij}$ 为第 i 层填土施工后在地基土所增加的附加应力, 可按梯形分布条形荷载作用下的土中应力计算; E_{sj} 为第 j 层地基土的压缩模量; $U_{T(i,j)}$ 为第 j 层地基土在 T 时刻、第 i 层填土作用下得固结度。固结时间为 $\Delta T = T - t_i$, t_i 为第 i 层的完工时间。那么, 第 i 层填土引起地基沉降量为

$$S_{T(i)} = \sum_{j=1}^N S_{i,j}U_{T(i,j)}$$

式中: N 为受压层地基土的分层数。

T 时刻路堤填筑体引起地基沉降变形为

$$S_T = \sum_{i=1}^m S_{T(i)} \tag{4}$$

式中: m 为路堤填土的分层数, 在施工期 $m = H/\Delta h$; 设在第 T 日填高为 H , Δh 为分层厚度; 在运行期 $m = n$, 设路堤设计填高为 H_0 , 则 $n = H_0/\Delta h$ 。

2 土中应力计算的推导

在实际施工中, 路堤是分层填筑的, 为了比较准确地计算任一土层作用于下面路基土层的应力, 从而得到比较准确的沉降变形值, 将任一填土层看作梯形分布条形荷载, 对其作用下的土中应力计算进行了推导。

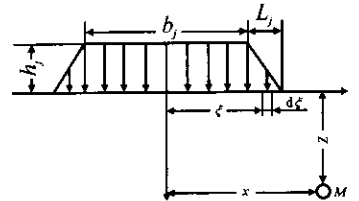


图 3 梯形分布条形荷载作用下的土中应力计算原理图

图 3 为计算原理图, 具体推导过程如下:

设顶宽为 b_j , 填土边坡水平投影长度为 L_j , 填土厚度为 h_j 。令 $c = b_j/2$, $d = c + L_j$, 则 $L_j = d - c$ 。在 $(-c, c)$ 范围内, $p = \gamma h_j$; 在 $(-d, -c)$ 范围内, $p_x = (d - \xi)p/L_j$ 。

计算土中任一点 $M(x, z)$ 的竖向应力时, 可以将弗拉曼公式在荷载分布宽度范围内积分求得。

$$\begin{aligned} \sigma_z = & \int_{-c}^c \frac{2z^3 p}{\pi[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \\ & \int_{-d}^{-c} \frac{2z^3 \frac{d-\xi}{L_j} p}{\pi[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \\ & \int_c^d \frac{2z^3 \frac{d-\xi}{L_j} p}{\pi[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi = \end{aligned}$$

$$\frac{p}{\pi L_j} \left[(d-x) \left(\arctan \frac{d-x}{z} + \arctan \frac{d+x}{z} \right) - (c-x) \left(\arctan \frac{c-x}{z} + \arctan \frac{c+x}{z} \right) + \frac{(d-x)^2 z + z^3}{z^2 + (d-x)^2} + \frac{(d^2 - x^2) z + z^3}{z^2 + (d-x)^2} - \frac{(c-x)^2 + z^3}{z^2 + (c-x)^2} - \frac{(c^2 - x^2) z + z^3}{z^2 + (c+x)^2} \right]$$

式中： ξ 、 $d\xi$ 见图 3 所示。

3 台背路基沉降理论计算模型及参数

图 4 为台背路基计算模型示意图。

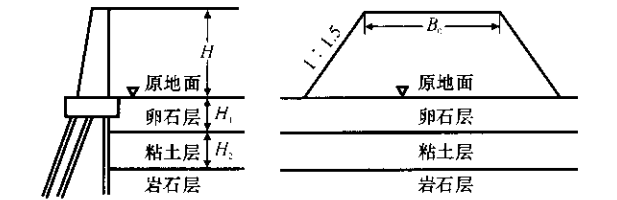


图 4 台背路基计算模型示意图

数值计算的参数为：①路基顶部宽度，路堤边坡坡度；②台背路堤填土高度；③路堤填土固结试验参数；④填筑速度；⑤台背地基各层的压缩模量，固结系数。

4 实测结果与理论计算比较分析

本研究以台背路基沉降计算理论及模型为基础，研发了应用软件。为验证理论计算的实用性，以广东惠州西林河大桥龙门台背路基沉降为例，将实测结果与计算结果进行了比较分析。计算参数为：

- (1)路基顶部宽度 12 m，路堤边坡宽度 1：1.5；
- (2)台背路堤填土高度 9.7 m；
- (3)路堤填土固结试验参数见表 1；
- (4)填筑速度层 1 层/d；
- (5)台背地基上层卵石，厚度 7.6 m，强度较高，下层为粘土，厚度为 7.8 m，其压缩模量 $E_s = 5$ MPa，固结系数 $C_v = 1.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

表 1 路堤填土固结试验结果

荷载/kPa	压缩模量/MPa	固结系数/($10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
0~12.5	4.31	2.66
12.5~25.0	9.26	4.86
25~50	22.73	1.18
50~100	37.04	2.64
100~200	60.60	0.65
200~400	93.02	2.87

在龙门台背路基 8 处埋设了多功能沉降板，在每处 4 个不同深度布置了沉降板，每层的沉降板分别布置在路中线与行车道轮迹线上，如图 5 所示。

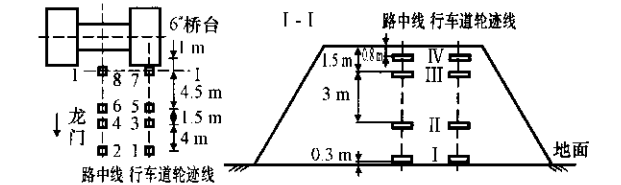


图 5 西林河龙门桥头沉降板埋设图

表 2 为台背施工完成约一年半后各层沉降实测结果与理论计算结果的比较。

表 2 实测结果与理论计算结果的比较

测点	第 I 层沉降		第 II 层沉降		第 III 层沉降		第 IV 层沉降	
	实测值	理论值	实测值	理论值	实测值	理论值	实测值	理论值
1	5.4	4.24	6.4	5.30	5.2	6.15	4.3	6.25
2	4.5	4.46	3.8	5.51	5.8	6.39	6.1	6.49
3	4.4	4.24	4.0	5.30	5.7	6.15	5.0	6.25
4	5.4	4.46	6.9	5.51	4.4	6.39	5.5	6.49
5	6.7	4.24	5.9	5.30	5.0	6.15	5.1	6.25
6	6.7	4.46	5.1	5.51	5.5	6.39	4.0	6.49
7	3.1	4.24	4.8	5.30	6.9	6.15	4.0	6.25
8	1.1	4.46	2.0	5.51	3.8	6.39	5.6	6.49

由表 2 可以看出，理论计算可以得到路基不同深度及宽度处的沉降变形，除测点 8 由于观测问题出现异常外，其余各点的实测值比较接近理论计算值，二者有很好的相关性。同时，可以看到，龙门台背路基填料不均匀，土石混杂，各层压实不均匀，引起沉降在路基内部重新分布，最大沉降不一定出现在路基表面，而理论计算认为路基填土压实均匀，依常理越接近表面沉降越大，因而表层沉降计算值要略大于实测值。台背路基填筑时，压实度控制的越好，理论计算沉降与实际沉降吻合的就越好。

5 结 语

- (1)首次提出了模拟施工进程的台背路基沉降计算理论和模型。该计算模型与其他模型相比，更加符合施工实际过程，更具合理性。
- (2)提出了梯形分布荷载作用下土中任意点处应力的计算公式。
- (3)现场沉降测试结果表明，计算值与实测值有着很好的相关性，验证了本文沉降计算理论和模型的合理性、计算软件的实用性。

参考文献:

References:

[1] 岳鹏飞. 桥涵台后沉降病害防治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2003.
YUE Peng-fei. Research on prevention techniques for the settlement of bridge back[D]. Xi'an: Chang'an University, 2003.

[2] 成辉平. 高等级公路非饱和路堤沉降研究[D]. 西安: 长安大学, 1997.
CHENG Hui-ping. Research on settlement of high-grade highway unsaturated embankment[D]. Xi'an: Chang'an University, 1997.

[3] 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
SHEN Zhu-jiang. Computation of soil mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Sci-Tech Press, 1990.

[4] 张兴强, 闫澎旺, 赵成刚. 台背填土受交通荷载反复作用和桥台影响分析[J]. 公路, 2002, (5): 31-35.
ZHANG Xing-qiang, YAN Peng-wang, ZHAO Cheng-gang. Analysis of soil deformation due to bridge abutment under automobile loading[J]. Highway,

2002(5): 31-35.

[5] 曾卫兵, 张毅, 何挺继. 公路桥背回填压实试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(1): 65-68.
ZENG Wei-bing, ZHANG Yi, HE Ting-ji. Test of backfill compacting on highway bridge back[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 65-68.

[6] 高燕希, 张军, 张起森. 软弱地基桥台台背填筑 EPS 的结构分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 27-30.
GAO Yan-xi, ZHANG Jun, ZHANG Qi-sen. Structure analysis of filling at bridge abutment back on soft foundation by using EPS[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(3): 27-30.

[7] 刘萌成, 黄晓明, 陶向华. 桥台后高填方路堤工后沉降影响因素分析[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(3): 36-40.
LIU Meng-cheng, HUANG Xiao-ming, TAO Xiang-hua. Influence factors on post-construction settlement of high backfills adjacent to abutment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 36-40.

~~~~~  
(上接 12 页)

[3] 苏新国, 倪富健, 赖用满. 旧水泥砼路面沥青加铺层反射裂缝试验研究[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(2): 46-49.  
SU Xin-guo, NI Fu-jian, LAI Yong-man. Experimental research on reflection cracking of asphalt overlay on old concrete pavement[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(2): 46-49.

[4] 武贤慧, 张登良, 李德超. 沥青路面反射裂缝足尺试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(6): 4-6.  
WU Xian-hui, ZHANG Deng-liang, LI De-chao. Full-scale test of asphalt pavement reflection cracking[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(6): 4-6.

[5] 史保华, 蔡良才, 王声, 等. APP 改性油毡作为沥青道面防裂层铺贴宽度与防裂效果试验研究. 中国公路学报, 2003, 16(2): 5-9.  
SHI Bao-hua, CAI Liang-cai, WANG Sheng, et al. Experimental research on the relationship between lay

width and splitproof effect about APP modified felt as asphalt pavement splitproof layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(2): 5-9.

[6] 陈拴发, 郑木莲, 杨斌, 等. 破裂水泥混凝土路面板沥青加铺层温度应力影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(3): 25-30.  
CHEN Shuan-fa, ZHENG Mu-lian, YANG Bin, et al. Thermal stress influence factors of asphalt overlay on cement concrete pavement cracking slab[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 25-30.

[7] Aysar NAJD, 郑传超, 郭进英. 纤维加筋沥青混凝土断裂性能试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(3): 28-32.  
Aysar NAJD, ZHENG Chuan-chao, GUO Jin-ying. Experiments of fracture behavior of glass fiber reinforced asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3): 28-32.