

软土地基路堤预抛高确定方法

李国维¹, 盛维高¹, 蒋华忠¹, 钱尼贵²

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 2. 广东省交通科学研究所, 广东 广州 510420)

摘要 根据施工期路堤填土厚度、沉降实测数据建立了一种新的工后沉降预测模型, 并从土力学角度分析了该预测模型的物理意义. 针对不同的软土地基深度、路堤高度和工后沉平控制时间, 导出了路堤预抛高计算公式. 结合工程实例, 将计算的工后沉降、预抛高量与工后实测沉降进行了比较分析, 验证了该计算方法的可行性.

关键词 路堤 填土厚度 工后沉降 预抛高

中图分类号 :TU471.8

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2008)01-0076-06

在软土地基上修建高速公路, 路面结构层施工完成后, 设计基准期内尚未完全固结的路基在路堤荷载、路面结构层荷载及车辆荷载等共同作用下会继续发生沉降. 根据 JTJ 017—96《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》规定, 桥台路堤结合处工后沉降应不超过 10 cm, 箱涵结构物处工后沉降应不超过 20 cm, 一般路基工后沉降应不超过 30 cm. 为了预留路基工后沉降, 沿海各省软土地基高速公路建设普遍采用了路堤预抛高施工技术^[1-5]. 但工程设计与施工过程如何相对准确地确定路堤预抛高的量值, 是一个没有得到很好解决的问题. 潘剑波^[2]利用施工期实测沉降进行双曲线拟合, 并预测了不同工后时刻的沉降, 计算了路堤预抛高. 实际上, 假设沉降呈双曲线分布带有一定的片面性, 且双曲线方法只能使用恒载预压期的实测沉降数据进行拟合. 罗丹等^[3-4]根据固结理论计算了施工期某个时刻的路基沉降, 并以计算沉降与实测沉降的均方差为目标函数, 反演相关参数, 估算后期沉降, 建立预抛高计算公式. 但理论计算的固结度与软土地基实际固结度有一定误差, 而且路堤预抛高计算方法也没有经过工程实例的进一步计算验证. 为了能在实施路堤预抛高之前较准确地估算软土地基工后沉降, 本文从路堤整个填土过程的累计填土厚度、实测沉降数据分析入手, 提出了一种新的工后沉降预测方法, 并导出了预抛高计算公式.

1 工后沉降预测

在工程施工中, 沉降预测的目的主要是确定高速公路工后沉降是否满足设计或规范要求. 尤其是路堤预抛高估算, 要求相对准确地计算工后沉降. 利用实测资料计算的工后沉降, 精度较高. 目前, 计算工后沉降的方法有多种, 但利用实测数据来估算工后沉降的方法需采用恒载条件下的沉降数据序列, 而施工填土过程加载卸载频繁, 恒载条件一般需进行简化处理. 汪建斌等^[5]提出的考虑荷载高度的沉降预测方法以及周刚等^[6]提出的路堤超载预压路段工后沉降预测方法, 都考虑了施工过程填土厚度变化对工后沉降的影响.

1.1 工后沉降预测方法

通过对广东省汕汾、揭普、金凤等公路填土厚度、实测沉降与时间序列的统计分析, 发现沉降发展过程可以用式(1)来表示:

$$S_t = \alpha \sum_{i=1}^n h_i - \frac{\beta \sum_{i=1}^n h_i}{t} \quad (1)$$

式中: S_t —— t 时刻的累计沉降量; $\sum_{i=1}^n h_i$ —— t 时刻累计填土厚度; i, n ——填土级数和累计填土级数; α ,

收稿日期 2006-12-11

基金项目 广东省交通科技项目(粤交科函(2000)108 号)

作者简介 李国维(1964—), 男, 黑龙江大庆人, 副研究员, 主要从事高速公路软土地基研究.

β ——待定系数.

式(1)可以改写为

$$\frac{S_t}{\sum_{i=1}^n h_i} = \alpha t - \beta \tag{2}$$

根据实测填土厚度和沉降数据并利用式(2)进行线性拟合,可求得参数 α, β .

由式(2)可以看出,当 t 足够大时,沉降 $S_t \rightarrow \alpha \sum_{i=1}^n h_i$. 因此,最终沉降 S_∞ 按式(3)计算:

$$S_\infty = \alpha \sum_{i=1}^n h_i \tag{3}$$

1.2 公式的物理意义

地基沉降主要包括瞬时沉降 S_d 、主固结沉降 S_{cj} 和次压缩沉降(或次固结沉降) S_{sj} 3 个部分,可以按式(4)~(6)^[7-8]进行计算:

$$S_d = c_d q B \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right) \tag{4}$$

$$S_{cj} = \frac{a_{vj}}{1 + e_{0j}} \Delta p_j H_j = m_{vj} \Delta p_j H_j = \frac{1}{E_{sj}} \Delta p_j H_j \tag{5}$$

$$S_{sj} = \frac{1}{E_j} (1 - e^{-\eta_j^t}) \Delta p_j H_j \tag{6}$$

式中: c_d ——考虑荷载面积形状和沉降计算点位置的系数; B ——荷载作用面的直径或宽度; ν, E, E_{sj}, E_j ——土的泊松比、变形模量、主固结压缩模量、次固结压缩模量; q ——均布荷载; a_{vj}, m_{vj}, e_{0j} ——各土层的压缩系数、体积压缩系数、初始孔隙比; Δp_j ——作用在土层上的一级荷载产生的附加应力; H_j ——地基各土层的厚度; η_j ——地基各土层的次固结衰减系数; j ——路基分层编号.需要说明的是,式(6)是简化的一种次固结计算公式^[7-8].

将式(4)~(6)中外荷载 q ,附加应力 Δp_j 分别改写为

$$q = \rho g \sum_{i=1}^n h_i \tag{7}$$

$$\Delta p_j = k_{zj} g \sum_{i=1}^n h_i \tag{8}$$

式中: ρ ——路堤填土密度; k_{zj} ——附加应力系数; g ——重力加速度.

将式(7),(8)分别代入式(4)~(6),得土层总的沉降量

$$\begin{aligned} S &= S_d + \sum_{j=1}^m S_{cj} + \sum_{j=1}^m S_{sj} = c_d B \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right) \rho g \sum_{i=1}^n h_i + \\ &\sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{E_{sj}} k_{zj} H_j g \sum_{i=1}^n h_i \right) + \sum_{j=1}^m \left[\frac{1}{E_j} (1 - e^{-\eta_j^t}) k_{zj} H_j g \sum_{i=1}^n h_i \right] = \\ &\left[c_d B \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right) \rho g + \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{E_{sj}} k_{zj} H_j g \right) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{E_j} (1 - e^{-\eta_j^t}) k_{zj} H_j g \right) \right] \sum_{i=1}^n h_i \end{aligned} \tag{9}$$

式中 m 为路基总分层数.

对比式(3),(9)可以得出

$$\alpha = c_d B \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right) \rho g + \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{E_{sj}} k_{zj} H_j g \right) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{E_j} (1 - e^{-\eta_j^t}) k_{zj} H_j g \right) \tag{10}$$

因此,该拟合方法可以考虑土的非线性性质.由于实测沉降包括瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降,从以上分析推导过程也可以看出,该预测方法也综合考虑了 3 个方面的沉降,而且利用整个填土加载过程的实测填土厚度、沉降数据,能更准确地反映路基土层的沉降发展规律.在填土加载卸载波动频繁,填土过程线呈锯齿形,或填土过程超载卸载明显的情况下,该方法都能保证工后沉降预测的准确性.

2 预抛高计算公式推导

2.1 基本假设

a. 假设路堤预抛高填土部分不存在自身压密沉降. 这样的假设是合理的, 因为预抛高填土量本身较小, 路堤填土密度一般都超过 1.95 g/cm^3 , 自身压密沉降完全可以忽略.

b. 假设路堤预抛高部分的填土荷载对路基沉降无突变影响. 因为路堤抛高填方量较小, 在路基各土层产生的附加应力也很小, 所以该假设也是合理的.

2.2 路堤自身压密沉降

路堤填土压密下沉, 是由填土自重引起的, 这种下沉可分为 2 个部分: 一是施工阶段的下沉, 不计入工后沉降; 二是施工完成后对后期运营产生影响的工后沉降. 由散体材料填筑而成的路堤本体产生一定的压密下沉是正常的. 对于路堤填土压密工后沉降, 德国和日本还提出了一种经验公式^[9]:

$$S_a = \frac{h_1^2}{3000} \quad (11)$$

式中: S_a ——路堤填土压密工后沉降, m; h_1 ——路堤高度, m.

文献[9]对这种经验公式进行了分析, 并用其估算了广珠高速铁路的路堤压密沉降.

2.3 计算公式

a. 设置路堤预抛高后, 路面实际高程大于设计高程. 若以路面施工完成至通车后 1 a 的时间作为沉平控制时间, 则路堤预抛高可按式(12)计算:

$$\begin{aligned} h_a = S_{tc} - S_{t0} = & \left[\alpha \left(\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) - \right. \\ & \left. \frac{\beta \left(\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)}{t_c} \right] - \left[\alpha \left(\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) - \right. \\ & \left. \frac{\beta \left(\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)}{t_0} \right] = \beta \left(\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \left(\frac{1}{t_0} - \frac{1}{t_c} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: h_a ——路堤抛高量; S_{tc} ——沉平控制时间内的预测沉降; S_{t0} ——路面结构层施工完成后的预测沉降; t_c ——自路堤第 1 级加载开始至通车后 1 a 所经历的总时间; t_0 ——自路堤第 1 级加载开始至路面结构层施工完成所经历的总时间; Δh ——路面结构层厚度; ρ_1, ρ_2 ——路面结构层密度、路堤填土密度.

b. 当软土深度超过 15 m, 砂井或塑料排水板没有完全打穿软土层时, 存在下卧层. 文献[10]认为, 下卧层主固结是工后沉降的一个重要组成部分, 下卧层孔隙水压力消散非常缓慢. 据此, 以路面施工完成至通车后 1 a 的时间作为沉平控制时间不甚合理. 为此, 本文建议按式(13)计算路堤预抛高量:

$$\begin{aligned} h_a = k(S_{\infty} - S_{t0}) = & k \left\{ \alpha \left(\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) - \right. \\ & \left. \left[\alpha \left(\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) - \frac{\beta \left(\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)}{t_0} \right] \right\} = \frac{k\beta \left(\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)}{t_0} \end{aligned} \quad (13)$$

式中 k 为修正系数, 一般在 0.3~0.6 之间取值.

c. 当路堤高度大于 5 m, 尤其是高填方路堤时, 必须考虑路堤本身在通车运营期的压密下沉, 以路面施工完成至通车后 1 a 的时间作为沉平控制时间, 需按式(14)计算路堤预抛高:

$$h_a = \beta \left(\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \left(\frac{1}{t_0} - \frac{1}{t_c} \right) + \frac{h_1^2}{3000} \quad (14)$$

d. 当路堤高度大于 5 m 且软土深度大于 15 m 时, 可按式(15)计算路堤预抛高:

$$h_a = \frac{k\beta \left(\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)}{t_0} + \frac{h_1^2}{3000} \quad (15)$$

3 工程实例

a. 工程实例 1. 汕汾高速公路为同(江)三(亚)国道主干线粤境段的一部分,穿越粤东地区的韩江三角洲平原,沿线路段 12 km 分布有海相沉积砂土、淤泥土层,软土最大深度达 26 m. 选取 K20+590 断面作为研究对象. K20+590 断面软土深度 21.9 m,采用超载预压. 从图 1 可以看出,由于该断面软土较厚,填土过程都是小数量级施加,而且加载过程卸载明显,整个加载过程线都呈锯齿形. 利用 $\frac{S_{it}}{h_i} \sim t$ 实测数据进行直线拟合,如图 2 所示,相关系数达 0.974 5. 这说明,虽然整个填土过程加载卸载频繁,但总体上实测填土厚度-沉降数据序列仍较好地按式(1)描述的曲线规律发展. 根据式(2)进行拟合, $\alpha = 0.2871, \beta = 11.821$, 累计填土厚度 $\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2}$ 为 812.2 cm, 路堤高度为 4.95 m, 自路堤填土施工开始至路面结构层施工完成后经历的时间 $t_0 = 712$ d, 预测最终沉降 $S_\infty = 233.18$ cm, 预测工后沉降 27.78 cm, 由式(13) 计算得到的路堤预抛高为 4.1~8.2 cm.

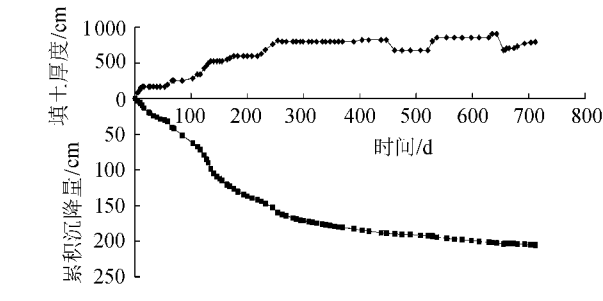


图 1 汕汾高速公路 K20+590 断面填土、沉降与时间关系曲线

Fig.1 Variation of earth-fill and settlement with time for section K20+590 of Shanfen Highway

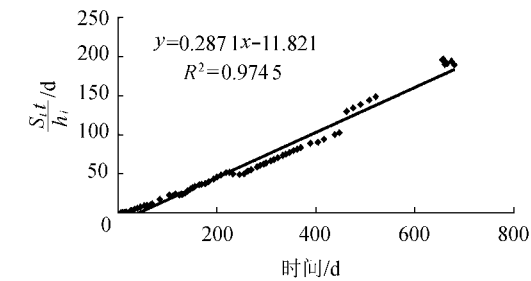


图 2 汕汾高速公路 K20+590 断面 $S_{it}/h_i \sim t$ 的拟合关系

Fig.2 Fitted relationship between S_{it}/h_i and t for section K20+590 of Shanfen Highway

b. 工程实例 2. 揭普高速公路北起广东省揭阳市锡场镇,与汕梅高速公路相接,止于普宁市池尾镇,与普惠高速相连,全长 45.93 km,路线穿越练江冲积平原,软土最典型的是腐木淤泥混合土,其孔隙比高达 3.0,含水量最大达 222%. K11+800 断面软土深度 8.0 m,2002 年 3 月 28 日开始填土,经过 261 d 的不断填土加载,填土高度达到 527 cm,中板累计填土厚度为 627.7 cm 预压 208 d 后,开始卸载,卸载至中板填土厚度 475 cm,又进行小规模加载,加载填土时间 28 d,填土厚度为 490 cm. 路面结构层施工持续时间为 60 d,施工填土过程如图 3 所示. 利用实测数据拟合的 $\frac{S_{it}}{h_i} \sim t$ 关系如图 4 所示,其相关系数达 0.971 6. 这说明整个填土过程超载预压后卸载明显,但总体上实测填土厚度及沉降与时间的数据序列仍然具有式(1)描述的曲线发展规律. 根据

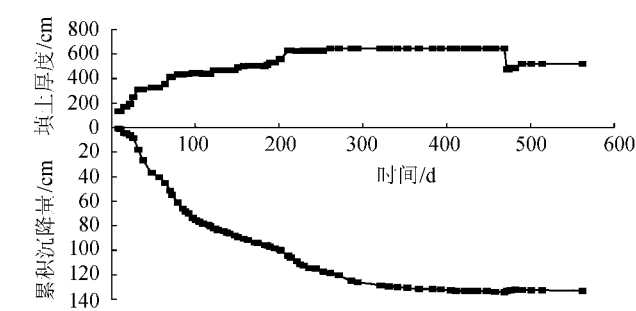


图 3 揭普高速公路 K11+800 断面填土、沉降与时间关系曲线

Fig.3 Variation of earth-fill and settlement with time for section K11+800 of Jiepu Highway

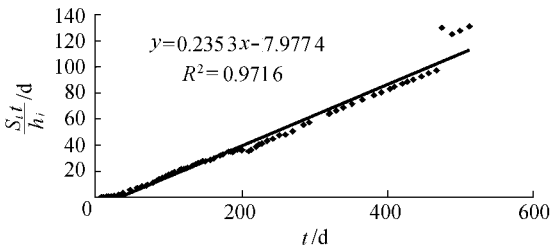


图 4 揭普高速公路 K11+800 断面 $\frac{S_{it}}{h_i} \sim t$ 的拟合关系

Fig.4 Fitted relationship between $\frac{S_{it}}{h_i}$ and t for section K11+800 of Jiepu Highway

式(2)进行拟合, $\alpha = 0.2353, \beta = 7.9774$, 累计填土厚度 $\sum_{i=1}^n h_i + \Delta h \frac{\rho_1}{\rho_2}$ 为 602.16 cm, 路堤高度为 4.2 m, 自路堤填土施工至路面结构层施工完成后经历的总时间 $t_0 = 560$ d, 通车后 1 a 经历的总时间 $t_c = 927$ d, 预测最终沉降 $S_\infty = 141.69$ cm, 预测工后沉降 8.69 cm, 由式(12)计算得到的路堤预抛高为 3.4 cm.

c. 工程实例 1, 2 工后沉降预测、预抛高计算结果见表 1, 括号中数据为工后实测沉降. 从计算结果来看, 计算设置的预抛高与实测的工后沉降对比还是合理的. 例如, 汕汾 K20 + 590 断面, 若建议设置预抛高 8 cm, 则工后预测总沉降为 19.78 cm, 与 27.78 cm 相比, 完全满足普通路段工后沉降 30 cm 的规范要求. 又如, 揭普 K11 + 800 断面, 预测和实测的工后沉降都很小, 但施工期间却实施了预抛高, 仅从计算结果来看, 若加上已经实施的 2 cm 路堤预抛高, 工后 1 a, 2 a, 3 a 的沉降量应分别是 3.11 cm, 5.43 cm, 6.05 cm. 需要说明的是, 由于在式(13)中给出了修正系数 k , 根据汕汾高速公路 K20 + 590 断面的计算结果, 可以设置的路堤预抛高为 4.0 ~ 8.2 cm, 在综合考虑高速公路纵坡、横坡等线形要求的基础上, K20 + 590 断面可以在 4.0 ~ 8.2 cm 的路堤预抛高范围内选定一个具体的预抛高值.

表 1 工后沉降预测及预抛高计算结果

Table 1 Calculated result of predicted post-construction settlement and presetting flip-height									
断面	软土深度/m	处理方法	路堤高度/m	工后总沉降/cm	工后 1 a 沉降/cm	工后 2 a 沉降/cm	工后 3 a 沉降/cm	计算预抛高量/cm	实际预抛高量/cm
汕汾 K20 + 590	21.9	超载 + 砂井	4.95	27.78	8.94 (12.30)	18.87 (18.50)	21.12 (21.94)	4.0 ~ 8.2	0
揭普 K11 + 800	8.0	超载 + 砂井	4.20	8.69	3.51 (1.11)	4.97 (3.43)	5.79 (4.05)	3.4	2

4 讨 论

a. 常规的双曲线法、指数曲线法等沉降预测方法只能利用路堤填土过程中恒载预压下的一段时间内的沉降数据进行后期沉降预测, 而本文提出的工后沉降预测模型可以利用路堤整个施工过程的填土厚度、实测沉降数据进行拟合预测后期沉降, 这扩大了预测样本的原像空间, 大大提高了预测精度.

b. 在进行路面结构层施工完成后的沉降预测时, 一定要将路面结构层厚度转换成当量填土厚度. 当量厚度的转化计算按式(12)进行. 一般情况下, 路面结构层厚度为 80 cm, 材料密度为 2.3 g/cm³, 路堤填土密度为 1.95 g/cm³.

c. $\sum_{i=1}^n h_i$ 是 t 时刻对应的前 n 级荷载累计填土厚度, 而非非累计填土高度. 因为在填土加载过程中, 路基是不断沉降的, 填土厚度包括填土高度和累计沉降量 2 个部分, 所以填土厚度是路基承受的实际外荷载. 以揭普高速公路 K11 + 800 断面为例, 采用填土高度 h'_i 进行 $S_t/h'_i \sim t$ 线性拟合(图 5)时, 相关系数仅为 0.932 9, 而利用填土厚度进行线性拟合时, 相关系数为 0.971 6, 后者比前者相关性更强.

5 结 语

本文根据施工填土厚度、实测沉降数据建立的工后沉降预测模型, 可以使用从施工填土开始一直到路面结构层施工前的填土厚度和实测沉降数据, 这扩大了样本统计的原像空间, 更能准确地反映地基土层的沉降规律. 本文还利用该工后沉降预测模型, 根据不同的工后沉平控制时间、路基软土深度及路堤高度分别给出了预抛高计算公式. 在填土加载卸载频繁, 填土过程线呈锯齿形, 或填土过程超载卸载明显的情况下, 本文方法也能保证工后沉降预测的准确性. 工程实例验证结果表明, 用本文推荐方法计算出的预抛高是合适的. 需

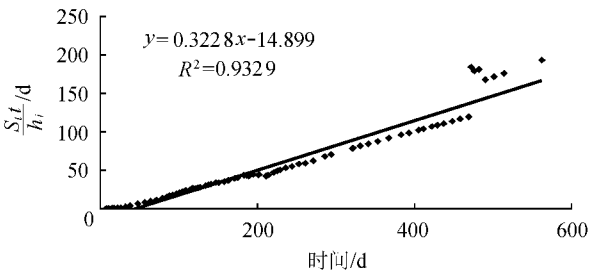


图 5 揭普高速公路 K11 + 800 断面 $S_t/h'_i \sim t$ 的拟合关系

Fig.5 Fitted relationship between S_t/h'_i and t for section K11 + 800 of Jiepu Highway

要说明的是,设置路堤预抛高作为一项预留工后沉降的施工技术措施,实际工程采用时要综合考虑不同路段的软土地基状况、桥梁涵洞等结构物与普通路基的衔接顺畅程度以及整体路线纵坡的要求等因素.

参考文献：

[1] 胡铁权.高速公路软土地基沉降引起的路堤标高及宽度问题的研究[D].杭州 浙江大学,2002.
[2] 潘剑波.软土地区高速公路路基预抛高实用计算方法[J].广东建材,2002(9) 68-70.
[3] 罗丹,程欣,洪宝宁.高速公路软土地基段路床预抛高问题研究[J].南京建筑工程学院学报,2004(4) 100-104.
[4] 徐立新,桂炎德,曹宁.公路软土路堤预抛高的分析和计算[J].东南大学学报:自然科学版,2000,30(3A) 126-131.
[5] 汪建斌,陈忠平.一种考虑荷载高度的沉降预测新方法[J].中外公路,2003,23(5) 72-74.
[6] 周刚,陈谦应.软土地基路堤超载路段工后沉降预测[J].重庆交通学院学报,2003,22(4) 53-56.
[7] 詹美礼,钱家欢.上海软黏土的次固结实验及次固结计算的简化方法[J].港口工程,1993(1) 41-45;
[8] 张军辉,缪林昌,黄晓明.连云港软黏土次固结变形研究[J].水利学报,2005,36(1) 116-119;
[9] 王炳龙.高速铁路软土地基沉降预测与控制[D].上海 同济大学,2003.
[10] 赵维炳,艾英钵,张静.排水固结加固高速公路深厚软土地基工后沉降[J].水利水电工程学报,2003(1) 28-33.

Method for calculation of presetting flip-height of highway embankment on soft foundation

LI Guo-wei¹, SHENG Wei-gao¹, JIANG Hua-zhong¹, QIAN Ni-gui²

- (1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Guangdong Institute of Traffic Science, Guangzhou 510420, China)

Abstract Based on measured data of fill thickness of embankment and settlement during the construction period, a new model for prediction of post-construction settlement was set up, and the physical meaning of the model was analyzed from the angle of soil mechanics. Then formulas for calculation of the presetting flip-height were worked out for different thicknesses of soft foundation, different heights of embankment, and different control time of post-construction settlement. The feasibility of the calculation method was verified by comparison of the calculation result of post-construction settlement and presetting flip-height with the measured data of a practical project.

Key words embankment ; fill thickness ; post-construction settlement ; presetting flip-height