

叠加推算沉降误差分析

刘吉福

(1. 华南理工大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省航盛建设集团有限公司, 广东 广州 511442)

摘 要: 堤坝等荷载是分级施加的, 地基多是成层的, 因此实测的表面沉降-时间曲线是由各级荷载、各层土对应的沉降-时间曲线叠加而成的。理论分析、工程实例表明叠加的沉降-时间曲线通常不是双曲线或指数曲线, 在此基础上提出了叠加推算沉降和分别推算沉降的概念。叠加推算沉降误差分析表明叠加推算沉降的误差不但与土层之间的 β 比值、各级荷载之间的时间间隔有关, 而且受沉降推算拟合函数与实际是否相符的影响。 β 相同的地层可以作为同一层地基, 沉降推算采用的拟合函数与实际不同时, 分别推算也存在误差。叠加推算的沉降小于分别推算的沉降, 通常小于实际沉降。为了减少沉降推算误差, 建议尽量利用预压后期的监测数据, 并尽可能采用分别推算沉降或采用修正的双曲线法或指数法等。

关键词: 叠加推算; 分别推算; 成层地基; 分级加载; 误差分析

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)11-1773-06

作者简介: 刘吉福(1971-), 男, 山东阳谷人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事公路软基处理施工、监测、科研等工作。E-mail: ljfmxxy@163.com。

Error analysis of settlement predicted by accumulative prediction method

LIU Ji-fu

(1. College of Civil & Communication Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Province Hangsheng Construction Group Co., Ltd., Guangzhou 511442, China)

Abstract: Since the stage construction is typical for embankments and the ground is usually in layers, the curve of the measured ground settlement-time is accumulated by the curves of settlement-time corresponding to different ground strata and embankment construction stages. The theoretical analysis and project examples show that the curve of the accumulated settlement-time is not usually exponential or hyperbolic. Based on the above, the accumulative prediction method and respective prediction method are put forward. It is proven by error analysis of settlement predicted by the accumulative prediction method that the error is influenced by the β ratio of strata, the time interval of loading stages and whether or not the employed function reflects the true situation. Different strata with equal β can be taken as the same stratum. If the function employed by the settlement prediction is not the same as the true one, the settlement predicted by the respective prediction method has errors too. The settlement predicted by the accumulative prediction method is less than that by the respective prediction method and usually less than the true settlement. To reduce the error of the predicted settlement and large starting time for the settlement prediction, the respective prediction method and improved exponential method or hyperbolic method are suggested.

Key words: accumulative prediction method; respective prediction method; multi-stratum ground; stage construction; error analysis

0 引 言

堤坝等工程的荷载是分级施加的, 地基往往由不止一个土层组成, 如果每级荷载、每个土层对应的沉降-时间曲线为双曲线或指数曲线^[1-2], 叠加后是否还是双曲线或指数曲线? 利用叠加的沉降-时间曲线推算的沉降误差如何? 文献查阅表明, 对上述问题的研究很少^[1-10]。

显然, 实测的表面沉降-时间曲线实际是各级荷载、各个土层的沉降-时间曲线叠加而成的沉降-时间曲线, 工程实践中的沉降推算基本上都是利用叠加的沉降-时间曲线推算沉降的, 称之为叠加推算。与

收稿日期: 2008-08-01

之相对应的是分别推算, 即对每级荷载、每个土层对应的沉降-时间曲线分别推算沉降, 然后将分别推算的沉降累加得到总沉降。显然, 分别推算的结果等于或更接近实际沉降。因此, 有必要对叠加推算沉降的误差进行研究。为研究方便, 分两种情况进行分析:

①一级瞬时施加荷载, 成层地基; ②均质地基, 分级加载。上述两种情况的研究结论可以推广到成层地基分级加载等复杂情况。

1 一级瞬时施加荷载、成层地基

1.1 沉降-时间曲线为双曲线时

设土层 1、土层 2 的沉降-时间曲线都是双曲线,

$$S_1 = S_{01} + \frac{t - t_0}{a_1 + b_1(t - t_0)}, \quad (1)$$

$$S_2 = S_{02} + \frac{t - t_0}{a_2 + b_2(t - t_0)}。 \quad (2)$$

式中 S_{01} , S_{02} 分别为 t_0 时土层 1、土层 2 的沉降; a_1 , b_1 , a_2 , b_2 为拟合参数, 分别表示 t_0 时的沉降速率 V_s 的倒数和剩余沉降 S_r 的倒数。

设两个土层的沉降-时间曲线叠加后仍然是双曲线, 则有

$$S_1 + S_2 = S_0 + \frac{t - t_0}{a + b(t - t_0)}, \quad (3)$$

式中, $S_0 = S_{01} + S_{02}$ 。

将式 (1), (2) 代入式 (3), 然后由式 (3) 等号两侧 $t - t_0$ 的同次项系数相等可得

$$a(a_1 + a_2) = a_1 a_2, \quad (4)$$

$$b(b_1 + b_2) = b_1 b_2, \quad (5)$$

$$a_1 b_2 + a_2 b_1 = a(b_1 + b_2) + b(a_1 + a_2)。 \quad (6)$$

由式 (4) 和 (5) 可得

$$a = \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2}, \quad (7)$$

$$b = \frac{b_1 b_2}{b_1 + b_2}。 \quad (8)$$

将式 (7), 式 (8) 代入式 (6), 可得到

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{b_2}{a_2}。 \quad (9)$$

因此, 双层地基的沉降-时间曲线满足双曲线的必要条件是满足式 (9)。由 $V_s = \beta S_r^{[1]}$ 及参数 a 、 b 的含义, 可知式 (9) 的实质是

$$\beta_1 = \beta_2。 \quad (10)$$

此时, 由式 (7), (8) 可得

$$V_s = \frac{1}{a} = \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = V_{s1} + V_{s2}, \quad (11)$$

$$S_r = \frac{1}{b} = \frac{1}{b_1} + \frac{1}{b_2} = S_{r1} + S_{r2}。 \quad (12)$$

因此, 当两土层的沉降速率系数 β 相等时, 两土层分别推算的最终沉降之和等于作为同一土层推算的最终沉降; 否则, 不能作为同一土层推算, 应分别推算沉降。

以此类推, 多层土地基也有类似的结论。

1.2 沉降-时间曲线为指数曲线时

设土层 1、土层 2 的沉降-时间曲线都是指数曲线, 即

$$S_1 = S_{01} + (S_{\infty 1} - S_{01})[1 - e^{-\beta_1(t-t_0)}], \quad (13)$$

$$S_2 = S_{02} + (S_{\infty 2} - S_{02})[1 - e^{-\beta_2(t-t_0)}], \quad (14)$$

式中, S_{01} , S_{02} 分别为 t_0 时土层 1、土层 2 的沉降。

设两土层叠加的沉降-时间曲线仍然是指数曲线, 则有

$$S_1 + S_2 = S_0 + (S_{\infty} - S_0)[1 - e^{-\beta(t-t_0)}], \quad (15)$$

式中, $S_0 = S_{01} + S_{02}$, $S_{\infty} = S_{\infty 1} + S_{\infty 2}$ 。

将式 (13), (14) 代入式 (15) 可得

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta。 \quad (16)$$

因此, 当两土层的 β 相等时, 对两土层分别推算的最终沉降之和等于作为同一土层推算的最终沉降; 否则, 不能作为同一土层推算, 应分别推算沉降。

以此类推, 对多层土地基也有类似的结论。

1.3 算例分析

某公路地基软土厚 40 m, 地基处理深度为 20 m, 加固层和下卧层的最终固结沉降均为 1 m (简便起见, 忽略瞬时沉降), 即地基表面实际最终沉降为 2 m。两土层的沉降速率系数 β 分别为 0.02 d^{-1} 和 0.005 d^{-1} (双曲线法的初始沉降速率系数 β 为 0.02 d^{-1} 和 0.005 d^{-1})。

通常预先不知道沉降-时间曲线是双曲线还是指数曲线, 因此假设加固层和下卧层的沉降-时间曲线均为指数曲线 (或者均为双曲线), 利用上述参数和式 (13) (或式 (1)) 分别得到不同时间对应的加固层和下卧层的沉降量, 然后将相同时间对应的加固层沉降和下卧层沉降相加得到表面沉降。对上述加固层沉降、下卧层沉降、表面沉降数据分别采用指数法和双曲线法推算最终沉降。图 1 是推算得到的最终表面沉降与推算起点时间 t_0 的关系曲线。图 1 (a) 对应的沉降-时间曲线是指数曲线, 图 1 (b) 对应的沉降-时间曲线是双曲线。

由图 1 可见:

(1) 当沉降-时间曲线类型、推算方法相同时, 叠加推算沉降小于分别推算沉降。推算起始时间 t_0 越大, 叠加推算与分别推算的差异越小。叠加推算沉降应利用预压后期的沉降监测资料。

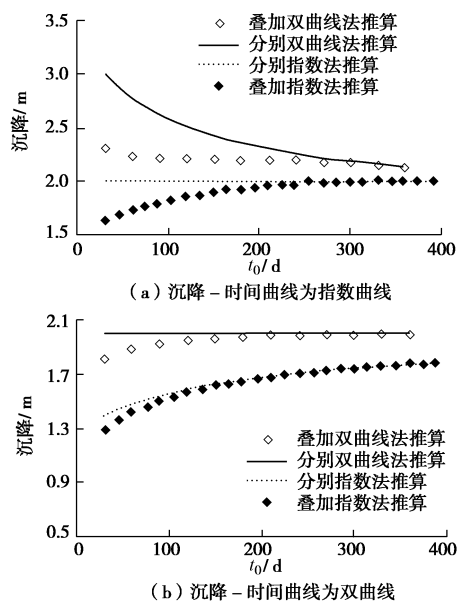


图 1 叠加推算与分别推算对比

Fig. 1 Comparison of the settlements by accumulative prediction method and by respective prediction method

(2) 当沉降-时间曲线为指数曲线时, 采用双曲线拟合推算的沉降比实际沉降大。当沉降-时间曲线为双曲线时, 采用指数曲线拟合推算的沉降比实际沉降小。相同的沉降-时间曲线, 双曲线拟合推算的沉降大于指数曲线拟合推算的沉降。

(3) 当采用双曲线拟合推算沉降时, 如果推算沉降随 t_0 增大而减小, 则实际的沉降-时间曲线为指数曲线, 否则为双曲线。由于最终沉降包括次固结、水平位移等因素导致的沉降, 大量工程实践表明双曲线法拟合推算沉降比指数曲线拟合推算沉降更接近实际沉降^[7]。

2 均质地基、分级加载

2.1 沉降-时间曲线为双曲线时

设堤坝等工程荷载分 n 级瞬时施加, 每级荷载对应的沉降-时间曲线为双曲线, 则第 i 级荷载对应的沉降-时间曲线为

$$S_{ti} = S_{di} + \frac{t - \tau_i}{a_i + b_i(t - \tau_i)}, \quad (17)$$

式中, τ_i , S_{di} , a_i , b_i 分别为第 i 级荷载对应的加载时间、瞬时沉降、拟合参数。

结合文献[11~12]可得

$$a_i = 1/V_{si} = 1/\beta S_{ri}, \quad (18)$$

$$b_i = 1/S_{ri}. \quad (19)$$

因此, 式 (17) 可转变为

$$S_{ti} = S_{di} + \frac{(S_{\infty i} - S_{di})\beta(t - \tau_i)}{1 + \beta(t - \tau_i)}. \quad (20)$$

由式 (20) 可得第 i 级荷载对应的应变固结度

$$U_i = \frac{S_{ti} - S_{di}}{S_{\infty i} - S_{di}} = \frac{\beta(t - \tau_i)}{1 + \beta(t - \tau_i)}. \quad (21)$$

各级荷载对应的沉降-时间曲线统一取时间点 t_a 作为曲线拟合的起始时间, 分别根据各级荷载对应的沉降-时间曲线推算沉降, 然后相加称为分别推算法。将多级荷载对应的沉降-时间曲线叠加后推算沉降的方法称为叠加推算法。例如, 二级荷载对应的沉降-时间曲线叠加后得到的沉降-时间曲线为

$$\frac{t - t_a}{S_t - S_a} = \frac{a_1^2 + \beta a_1(t - t_a)}{S_{\infty 1}\beta + S_{\infty 2}\beta \frac{a_1^2 + \beta a_1(t - t_a)}{a_2^2 + \beta a_2(t - t_a)}}, \quad (22)$$

式中, $a_1 = 1 + \beta(t_a - \tau_1)$, $a_2 = 1 + \beta(t_a - \tau_2)$ 。

很显然, 式 (22) 不是双曲线。因此, 如果每级荷载对应得沉降-时间曲线为双曲线, 叠加的沉降-时间曲线不是双曲线, 采用双曲线拟合叠加推算沉降存在误差。

2.2 沉降-时间曲线为指数曲线时

设每级荷载对应的沉降-时间曲线均为指数曲线, 则有

$$\begin{aligned} S_t &= \sum_{i=1}^n S_{di} + \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{di}) [1 - e^{-\beta(t - \tau_i)}] \\ &= \sum_{i=1}^n S_{di} + \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{di}) [1 - e^{-\beta(\tau_n - \tau_i)}] + \\ &\quad [1 - e^{-\beta(t - \tau_n)}] \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{di}) e^{-\beta(\tau_n - \tau_i)}, \end{aligned} \quad (23)$$

式中, S_{di} , $S_{\infty i}$, τ_i 分别为第 i 级荷载对应的瞬时沉降、最终沉降、荷载施加时间。

由式 (23) 可知, 如果每级荷载对应的沉降-时间曲线为指数曲线, 叠加的沉降-时间曲线在恒载阶段仍然是指数曲线, 可以采用指数法推算沉降, 而且可以证明, 叠加推算沉降没有误差。

2.3 算例分析

设均质地基上两级瞬时施加荷载对应的沉降-时间曲线均为双曲线。第 2 级荷载施加的时间为 τ_2 , 此时第 1 级荷载的固结度为 U_1 , 沉降推算时间起点 t_a 对应的两级荷载联合预压时间为 370 d。不同 β 时的叠加推算沉降偏差 δ (分别推算沉降大于叠加推算沉降时为正) 与 τ_2 或 U_1 的关系曲线见图 2、图 3。由图 2、图 3 可见:

(1) 叠加推算沉降小于分别推算沉降 (等于实际沉降)。 β 不同, 叠加推算沉降的误差不同。

(2) 荷载间隔时间越长, 叠加推算沉降误差越大。间隔时间小于 200 d 时, 叠加推算沉降的误差小于 1%, 可以忽略不计。荷载间隔时间大于 200 d 时, 可以利

用前一级荷载对应的沉降-时间资料推算沉降。

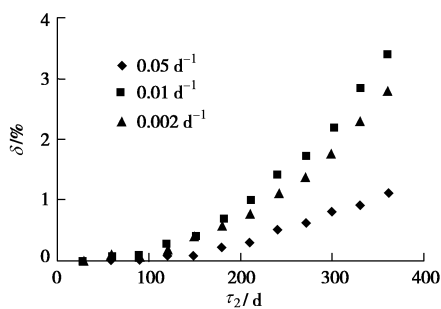


图 2 不同 β 时 τ_2 - δ 关系

Fig. 2 Relationship between τ_2 and δ with different β

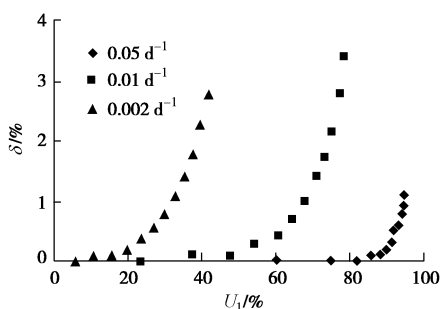


图 3 不同 β 时 U_1 - δ 关系

Fig. 3 Relationship between U_1 and δ with different β

$\tau_2=210 \text{ d}$, 叠加推算沉降误差 δ 与沉降推算时间起点 t_a 的关系曲线见图 4。由图 4 可知: t_a 越大(联合预压时间越长), 叠加推算沉降误差越小。 t_a 对叠加推算沉降误差影响较小, 可以忽略不计。 β 越大, 叠加推算沉降误差越小。

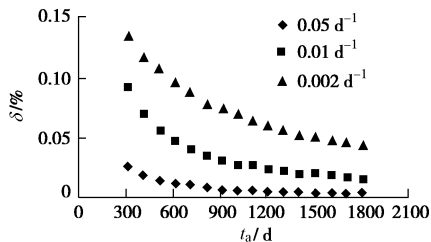


图 4 不同 β 时 t_a - δ 关系

Fig. 4 Relationship between t_a and δ with different β

$\tau_2=210 \text{ d}$, $t_a=310 \text{ d}$ 时, 叠加推算沉降误差 δ 与 t_p 后的预压时间 t_p 的关系曲线见图 5。由图 5 可知: t_p 越长, 叠加推算沉降误差越小; 叠加推算沉降误差与 β 有关。

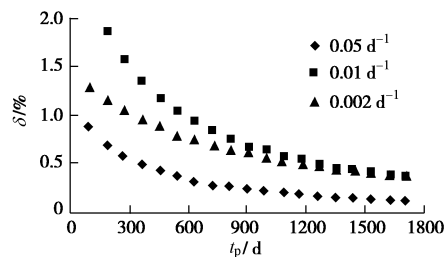


图 5 不同 β 时 t_p - δ 关系

Fig. 5 Relationship between t_p and δ with different β

S_1 , S_2 分别是利用土样 1、土样 2 的压缩资料推算的最终压缩量, S 是利用土样 1 和土样 2 相同时间的压缩量相加后推算的最终压缩量, β_1 , β_2 分别是土样 1、土样 2 的 β 。令

$$\delta = \frac{S_1 + S_2 - S}{S_1 + S_2}, \quad (24)$$

$$R_\beta = \beta_1 / \beta_2. \quad (25)$$

图 6 是 R_β 与 δ 的散点关系图。可见, 压缩量-时间曲线为双曲线时, 分别推算的压缩量大于叠加推算的压缩量, R_β 越大, δ 越大, 两者大致呈线性关系, 拟合曲线为

$$\delta = 0.0826 R_\beta - 0.0653. \quad (26)$$

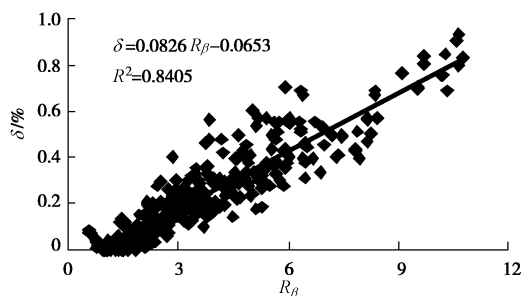


图 6 压缩土样 R_β - δ 关系图

Fig. 6 Relationship between R_β and δ of samples of consolidation tests

当竖向排水体穿透软土层时, 各土层的 R_β 通常并不大, 多在 20 以内, 采用叠加推算沉降的误差并不大。当存在软黏土下卧层时, R_β 可能大于 100, 此时 δ 不可忽略不计, 应利用分层沉降资料分层推算沉降, 然后累加得到总沉降。

3.2 实例 2

某高速公路两断面处的地基处理情况见表 1。路堤堆载预压期表面沉降监测资料采用双曲线法推算时的相关系数非常高, 因此采用双曲线法推算沉降并得到的工后沉降。图 7 是两断面路中线处(设于中间分隔带)的分层沉降工后监测资料^[13]。

可见, 根据施工期监测资料预测的工后沉降均小于 30 cm; 通车 3 a K34+950 断面的工后沉降为 368

3 工程验证

3.1 实例 1

大量的压缩试验表明, 压缩量-时间曲线更接近双曲线。对大量压缩土样的压缩资料采用双曲线法推算最终压缩量, 并将 β 不同的两个压缩土样的相同时间的压缩量相加后再采用双曲线法推算最终压缩量。

mm, 其中下卧层工后沉降 268 mm, 占工后总沉降的 73%。K47+060 段面的工后沉降为 202 mm, 其中下卧层工后沉降 161 mm, 占工后总沉降的 80%。推算的工后沉降与实测工后沉降相差很大, 除了路面加铺引起的工后沉降增大等因素外, 主要原因是地基处理没有穿透软黏土层, 人为地形成了上下两层 β 差异很大的双层地基 (路堤高度较大, 交通荷载对工后沉降的影响较小), 叠加推算沉降误差较大。可见, 对于多层土组成的地基, 单纯利用表面沉降资料推算的沉降严重偏小, 应采用分层沉降或深层沉降资料推算沉降。

表 1 某高速公路部分路段地基处理情况

Table 1 Ground treatment of some segments of an expressway		
断面编号	K34+950	K47+060
处理方法	袋装砂井	真空预压
处理深度/m	20	20
下卧层厚度/m	13	15
设计高度/m	6.53	5.0
超载大小	1.5 m 填土	80 kPa 真空预压
施工期沉降/cm	372.8	271.0
预测工后沉降/cm	12.6	9.0

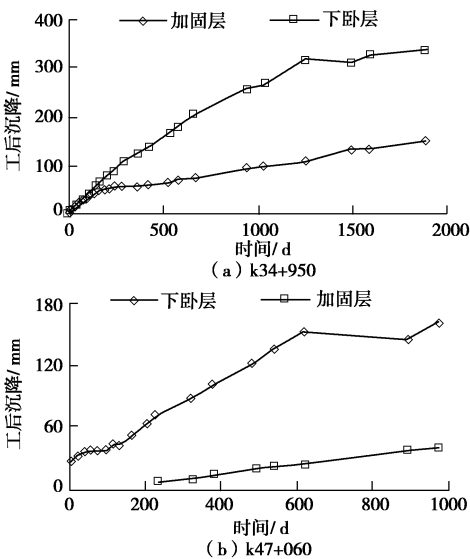


图 7 多层土地基分层沉降工后监测结果

Fig. 7 Ground settlement of multi-strata after construction

3.3 实例 3

广珠北高速公路软基试验段 (K25~870~K26+025) 位于观音沙大桥南桥头, 自上而下的土层为: ①耕植土, 层厚 0.6~1.0 m, 灰黑色, 富含植物

根系, 黏土为主, 含少量粉细砂, 湿, 硬塑; ②淤泥层, 层厚 10~15.1 m, 灰黑色, 饱和、流塑, 含腐质及蚝壳, 中下部多含粉细砂; ③淤泥质黏性土层, 层厚 8.3~12.5 m, 灰黑色, 饱和、流塑, 含大量腐质, 不规则夹薄层淤泥; ④粉细砂层, 层厚 0.3~1.8 m, 分选性、磨圆度差, 下伏亚砂土。

淤泥、淤泥质黏性土的主要物理力学指标见表 2。

表 2 软土主要物理力学指标平均值

Table 2 Average of main indexes of soft soil				
土层编号	C_v /($10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	C_h /($10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	E_s /MPa	e
②	1.83	7.895	1.91	1.899
③	2.732	11.166	3.9	1.284

试验段设计填土高度 4.6~5.5 m, 采用袋装砂井排水固结法, 袋装砂井长度 21.3~22.8 m, 间距 1.1 m, 梅花形布置, 满载预压 283 d。

试验段的表面沉降和分层沉降与时间的关系曲线均可以采用双曲线较好地拟合。对试验段 3 个同时进行表面沉降和分层沉降检测的断面采用叠加推算法和分别推算法推算的结果见表 3。可见, 当两层土之间的 R_β 较小时, 叠加推算法与分别推算法的沉降误差

4 建 议

为了减少或避免叠加推算沉降的误差, 采用叠加推算法时应尽量利用预压后期的监测资料; 对沉降速率系数相差较大的成层地基建议采用分层沉降或深层沉降资料分层推算。

沉降差法^[8]、修正的双曲线法或修正的指数法^[9-10]等沉降推算方法对于多级加载情况采用类似式 (23) 的公式, 实质是分别推算法。因此, 多级加载时建议采用上述沉降推算方法。

5 结 论

(1) β 相同的地层可以作为同一层地基, 即不同地层叠加推算不存在误差。如果各级荷载对应的沉降-时间曲线为指数曲线, 叠加推算沉降没有误差; 如果每级荷载对应的沉降-时间曲线为双曲线, 叠加的沉降-时间曲线不是双曲线。

(2) 叠加推算的误差不但与土层之间的 β 比值、各级荷载之间的时间间隔有关, 而且受沉降推算拟合函数与实际是否相符的影响。沉降推算采用的拟合函

表 3 叠加推算和分别推算的沉降

Table 3 Settlement predicted by accumulative prediction method and respective prediction method								
项目	a_1	b_1	a_2	b_2	$(S_1+S_2)/\text{mm}$	S/mm	R_β	$\delta/\%$
K25+875	0.4372	0.0103	0.3031	0.0061	1677	1679	1.1706	-0.12
K25+960	0.4263	0.0106	0.4788	0.007	1673	1675	1.7008	-0.12
K26+000	0.3834	0.4596	0.4596	0.0058	1584	1585	1.5914	-0.06

数与实际不同时, 分别推算也存在误差。叠加推算的沉降小于分别推算的沉降, 双曲线法推算的沉降大于指数法推算沉降。

(3) 成层地基、分级加载时, 沉降推算采用的拟合函数与实际相符时, 叠加推算的沉降小于实际沉降, 这可能是推算沉降通常小于实际沉降的原因之一。

(4) 荷载间隔时间小于 200 d 时叠加推算沉降误差可以忽略不计。 R_p 小于 20 时可以忽略不计叠加推算沉降的误差。对沉降速率系数相差较大的成层地基建议采用分层沉降或深层沉降资料分层推算。叠加推算沉降时预压时间应尽量长, 并尽量利用预压后期的沉降监测资料。

参考文献:

- [1] 杨 涛, 李国维, 杨伟清. 基于双曲线法的分级填筑路堤沉降预测[J]. 岩土力学, 2004, **25**(10): 1551 - 1554. (YANG Tao, LI Guo-wei, YANG Wei-qing. Settlement prediction of stage constructed embankment on soft ground based on hyperbolic method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(10): 1551 - 1554. (in Chinese))
- [2] 杨 涛, 戴济群, 李国维. 基于指数法的分级填筑路堤沉降预测[J]. 土木工程学报, 2005, **38**(5): 92 - 95. (YANG Tao, DAI Ji-qun, LI Guo-wei. Settlement prediction of stage-constructed embankment on soft ground using the exponent fitting method[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, **38**(5): 92 - 95. (in Chinese))
- [3] 潘林有, 谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J]. 岩土力学, 2004, **25**(7): 1053 - 1058. (PAN Lin-you, XIE Xin-yu. Observational settlement prediction by curve fitting methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(7): 1053 - 1058. (in Chinese))
- [4] 赵明华, 刘 煜, 曹文贵. 软土路基沉降变权重组合 S 形曲线预测方法研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(9): 1443 - 1447. (ZHANG Ming-hua, LIU Yu, CAO Wen-gui. Study on variable-weight combination forecasting method of S-type curves for soft clay embankment settlement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(9): 1443 - 1447. (in Chinese))
- [5] 肖武权, 冷伍明. 软土路基沉降实时建模动态预测[J]. 岩土力学, 2005, **26**(9): 1481 - 1484. (XIAO Wu-quan, LENG Wu-ming. Real-time modeling and dynamic predicting of settlement of soft soil roadbeds[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(9): 1481 - 1484. (in Chinese))
- [6] 李国维, 杨 涛, 宋江波. 公路路基沉降双曲线预测法的进一步探讨[J]. 公路交通科技, 2003, **20**(1): 19 - 20. (LI Guo-wei, YANG Tao, SONG Jiang-bo. Further research on the hyperbolic fitting method for prediction of subgrade settlement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, **20**(1): 19 - 20. (in Chinese))
- [7] 刘吉福, 莫海鸿, 李 翔, 徐小庆. 两种新的沉降推算方法[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 140 - 144. (LIU Ji-fu, MO Hai-hong, LI Xiang, XU Xiao-qing. Two new methods of settlement prediction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 140 - 144. (in Chinese))
- [8] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 86 - 90. (YIN Zong-ze. Principle of Soil Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007: 86 - 90. (in Chinese))
- [9] 铁建设[260]158 号. 客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2006. (Railway Construction[260]158. Technical manual for conditions evaluation for construction of no-ballast railroad of passenger railway[S]. Beijing: Chinese Railway Press, 2006. (in Chinese))
- [10] 黄广军. 分级加载条件下提早预测地基沉降的沉降差法[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(6): 811 - 818. (HUANG Guang-jun. New method to predict in advance settlement of ground under multi-stage filling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(6): 811 - 818. (in Chinese))
- [11] 刘吉福, 陈新华. 应用沉降速率法计算软土路堤剩余沉降[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(2): 233 - 235. (LIU Ji-fu, CHEN Xin-hua. Application of rate of settlement to evaluate residual settlement of embankment on soft soil ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(2): 233 - 235. (in Chinese))
- [12] LIU Ji-fu, PANG Qi-si. Methods of decision of coefficient settlement velocity[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, **46**(3): 35 - 38.
- [13] 刘吉福, 莫海鸿. 对工后沉降法确定卸载时机的认识[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增 2): 3518 - 3522. (LIU Ji-fu, MO Hai-hong, WEI Jin-xia. Study on determination of unloading using method of settlement after construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3518 - 3522. (in Chinese))