

基于实测沉降的软基沉降规律研究方法分析

曾玲玲

(东南大学岩土工程研究所, 南京 210096)

摘要: 对基于实测沉降的软基沉降变形规律研究方法进行了总结, 现有的软基沉降预测方法主要有三点法、双曲线法、浅冈法(Asaoka)、增长曲线法、对数抛物线法, 以及灰色系统法和人工神经网络法等; 并总结了基于实测沉降考虑分级加载条件改进的地基沉降预测方法, 以及利用实测沉降进行土体固结参数反演的方法; 最后建议了基于实测沉降的软基沉降规律研究方法的研究方向。

关键词: 沉降实测数据; 预测方法; 参数反演

作者简介: 曾玲玲(1983—), 女, 浙江温州人, 东南大学博士研究生, 从事软土特性和高速公路地基处理方面的研究。

0 引言

在公路施工过程中, 为了控制施工进度, 指导后期施工组织 and 安排, 同时保证路堤的稳定与实用, 需要对路堤不同时刻沉降及最终沉降量进行分析及预测。软基路堤沉降分析主要指沉降的计算和沉降历程的预测两个方面内容。目前采用的分析方法主要为理论公式法和数值分析法。理论公式法具有参数要求少且易取得、直观、简单, 因而在工程中得到广泛的应用; 数值分析方法是近代土力学研究的产物, 随着计算机应用的普及, 该法可以全面地考虑土体的侧向变形、流变以及复杂的边界条件等, 理论上较严密, 但该法所需的计算参数多又不易确定, 距广泛应用有一定距离。土的压缩变形随时间的变化过程不仅在室内试验时能够观测到, 而且在实际工程中也可以通过观测沉降随时间变化得到。采用科学的预测方法处理沉降实测资料, 有助于准确地预测沉降, 从而使后期施工组织安排达到最优。利用沉降实测数据来分析土体的沉降变形规律具有重要意义^[1]。

利用高速公路沉降数据对软基沉降变形进行预测的研究方法主要包括了: 三点法、双曲线法、浅冈法(Asaoka)、增长曲线法、对数抛物线法, 以及灰色系统法和人工神经网络法。这些方法一般

要求在恒载以后有较长时间的沉降观测资料才能较准确地推算, 因此, 尽管对判断预压土卸载时间很有效, 但无法在填筑预留沉降土层前提早推算预留沉降量。为此, 许多学者和工程技术人员开展了一系列的研究, 提出了多种分析方法来预测分级填筑过程中地基的沉降发展规律。另外不少学者也进行了利用实测数据进行的固结参数反演并用于沉降计算的研究。

1 基于实测沉降的地基沉降预测方法

1.1 三点法

该方法也称为指数曲线法或固结度对数配合法, 是从土层平均固结度为时间的指数函数出发, 依据固结度方程和固结度定义得出 t 时刻的沉降 S_t , 表示为

$$S_t = S_d \alpha e^{-\beta t} + S_\infty (1 - \alpha e^{-\beta t}) \quad (1)$$

上式右边有四个未知数, S_d 、 S 、 α 、 β 。在实测初期沉降两时间曲线($S_\infty - t$)上任意选取三点: (t_1, S_1) 、 (t_2, S_2) 、 (t_3, S_3) , 并使 $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ 。将上述三点分别代入式(3), 联立求解得参数 β 和最终沉降量 S_∞ 以及 S_d 的表达式, α 可采用理论值 $\frac{8}{\pi^2}$ 。实例计算表明, 该模型后期拟合较好, 但对前

期沉降拟合不够稳定^[2]。

1.2 双曲线法

该法认为沉降-时间关系符合双曲线式(2),通过曲线外延来推得某时刻的沉降量或最终沉降量。若沉降过程观测历时长,在沉降趋于稳定的后段取点计算,可得到较满意的结果^[2],若在曲线前段应用便会出现较大的误差,正是因为此点,冯文凯等又提出了修正的双曲线法^[3]:

$$S_t = \frac{t}{a+t} S_\infty \quad (2)$$

式中, S_∞ 为最终沉降量; t 为时间; S_t 为 t 时刻的沉降量; a 为参数。双曲线式是通过坐标零点的,对于一级加载情形,可把沉降时间关系起点定在 $\frac{t_0}{2}$ 处(即施工期的一半)^[4]。

该法与上述的指数曲线法都需要有较长时间的观测资料,且需剔除反常的数据,否则会造成推算值存在较大偏差。

1.3 Asaoka 法

该法是由日本学者 Asaoka A.^[5]于1978年提出的,又称图解法^[6,7]。它是依据某级荷载下现场实测的 $n+1$ 个沉降值 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{n+1}$,然后在以 S_{j-1}, S_j 为坐标系中绘出 n 个数据点(S_{j-1}, S_j),其中 $j=1, 2, \dots, n+1$ 。可以看出所有的数据点基本上都在同一条直线上,设该直线的斜率为 β_1 ,它与 S_j 轴的交点纵坐标为 β_0 ,该直线的延长线与 45° 线的交点即为本级荷载下最终沉降量

$$S_\infty = \frac{\beta_0}{1-\beta_1}$$

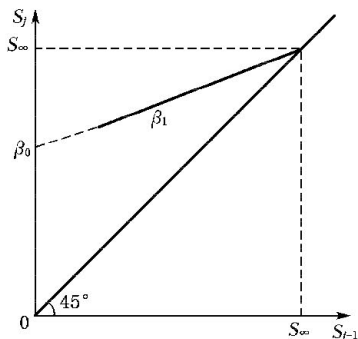


图1 Asaoka 法示意图

其 β_0, β_1 为两个和所选取的时间间隔 Δt 有关的系数。上图中的直线关系只有当土体行为完全符合太沙基一维固结理论的假设时才存在。

该法可作为路堤最终沉降的一种简便的预测

方法,其突出优点在于其可利用较短期的观测资料就能得到较为可靠的最终沉降推算值。其次,还能对是否已进入次固结阶段进行判断,并进行次固结沉降的推算。但该法存在一些不足之处^[5]:最终沉降预测值一定程度上依赖于时间间隔 Δt ;对主、次固结的划分存在一定的人为误差。

1.4 增长曲线法

宰金珉、梅国雄^[8~10]在研究沉降与时间的关系时发现全过程的沉降量与时间的关系曲线不通过原点并且曲线呈反“S”形。不通过原点是因为有瞬时沉降,呈反“S”形主要是由于成长曲线反映的实际上是事物发生、发展、成熟并到达一定极限的过程。基于这个沉降机理提出了一个预测沉降的经验公式——增长曲线模型,并对一级加载下的地基沉降情形作了研究,且通过实例加以了验证。

所谓增长曲线,又名逻辑斯蒂克曲线(Logistic curve)或泊松曲线模型,其一般形式如下:

$$S_t = \frac{b_1}{1+b_2 e^{-b_3 t}} \quad (3)$$

利用时间序列求出上述 b_1, b_2 和 b_3 三个待定参数,即可建立泊松曲线方程,从而可以对今后的 S_t 进行预测。

1.5 对数抛物线拟合法

许永明、徐泽中^[11]通过对现场观测值的分析,发现路堤建完后的沉降-时间曲线在初期并不表现为双曲线或指数曲线形式,而在沉降-时间对数坐标系中($S - \lg t$)可看出大致由两部分组成:第一部分可用抛物线式来拟合;第二部分次固结部分可以由直线拟合。第一、第二部分发生的量级、时间取决于土层固结后达到的孔隙比所对应的当量固结应力,只要营运期间的有效力小于预压期末的固结应力,次固结可以忽略不计。实践表明,除了有机质含量高的土体外,沉降量主要集中在第一部分,沉降曲线表达式可为

$$S = A(\lg t)^t + B \lg t + C \quad (4)$$

式中,参数 A, B, C 可用优化求得。

应用该法仅需掌握短期观测资料,即可求得满足工程精度要求的工后沉降量以及铺设路面时的沉降速率,而且该法实际推算结果比双曲线还要可靠。

1.6 灰色理论法

由于引起地基沉降的因素众多,理论计算最

终沉降量有一定的困难,而上述所介绍的方法均有一定的适用性和地区性。近年来,岩土工程领域的工作者也开始采用了灰色模型对沉降变形规律进行分析。灰色理论进行沉降预测以已知单位时段内的沉降量为研究对象,通过对这些数据的处理来获得地基的沉降变形规律,从而对工后沉降进行预测。

石世云等(1998)^[12]研究了多变量灰色模型 MGM(1, n) 在变形预测中的应用,将单点的 GM(1, 1) 扩充为多点的 MGM(1, n) 模型,通过沉降实例分析,证明了 MGM(1, n) 模型精度高于分别单独使用单点的 GM(1, 1) 的模型;张仪萍(1999)^[13]阐述了灰色理论在沉降预测中的应用,并指出了沉降灰色模型预测法与 Asaoka 法是一致的,从而为灰色理论在沉降预测中的应用奠定的理论基础;雷学文^[14]考虑到测量数据的不等间隔性,运用灰色理论建立了不等时距的预测 GM(1, 1) 模型,采用残差的 GM(1, 1) 模型加以修正,并结合工程实例进行验证,取得了令人满意的结果。曾超等^[15]把灰色模型的路堤沉降预测结果和双曲线法预测值及实测值进行了对比,证明了灰色模型沉降量预测值和实际沉降量更接近。

1.7 人工神经网络法

地基沉降受多种因素的影响和制约,其变化的自然规律很难用一个显式的数学公式予以表示。而人工神经网络是这一领域的一个突破,该方法视传统函数的自变量和因变量为输入和输出,将传统的函数关系转化为高维的非线性映射,而不是显式的数学表达式。该方法在处理非线性问题上,具有独特的优越性。在针对软土地基沉降预测时,就是利用实测资料对复杂的非线性的土工结构进行直接建模。具体做法是:先应用 ANN 建立沉降影响因素参数(如处理方式、软土层厚度、地基硬壳层厚度、软土的压缩模量、硬壳层的压缩模量、路堤宽高比、施工期和竣工时沉降量)与沉降之间的非线性关系,再将待测点的实测沉降影响因素参数输入到已训练好的网络中,即可得到预测的沉降量。

刘勇健^[16]和林代锐等^[17]曾采用传统的三层 BP 网络模型对此作过研究,二者具体实施方法尽管不太相同,但均取得了较满意的结果。但是该法对多级荷载下的路堤沉降预测,特别是沉降-时间曲线上有明显“台阶现象”的情形,适用性较差。

2 基于实测沉降考虑分级加载条件的地基沉降预测方法

考虑分级加载条件改进的地基沉降预测方法,通常通过以下几种方式进行各级沉降预测^[26],最终实现对总沉降的预测。

(1) 将某一级荷载下曲线拟合参数作为常量,用于以后各级荷载作用下的沉降预测。

邵阳光^[18]利用某填土高度 H_1 保持不变的时间段内的沉降观测资料,利用双曲线法来推得该填土高度下的最终沉降量,由此得到单位填土高度所引起的最终沉降量 S_1/H ;考虑到实际土体变形的非线性,乘以修正系数 δ ,从而推算出设计填土高度 H_2 与已填高度 H_1 之差所引起的最终沉降量

$$\Delta S = \delta \cdot \frac{H_2 - H_1}{H_1} \cdot S_1 \quad (5)$$

该方法认为,修正系数 δ 可根据经验取在 0.75~0.9 之间,也可根据较早达到设计填土高度的路段的实测沉降资料,通过线性回归求得。实际上,若修正系数 δ 根据经验取值在 0.75~0.9 之间,则随意性较大,可能会对预测结果产生较大的影响;若根据较早达到设计填土高度的路段的实测沉降资料求得,则对于各路段填土进度相差不大的情况不适用。

(2) 将第 i 级荷载下的曲线拟合参数作为已知量,代入第 $i+1$ 级荷载下的曲线拟合方程中,再对第 $i+1$ 级荷载下的沉降观测数据进行曲线拟合,求出第 $i+1$ 级荷载下的曲线拟合参数

胡庆国等人^[19]提出的分段双曲线法及张仪萍等^[20]提出的分级加载条件下的沉降预测方法均属于此类。

胡庆国等人认为,在每一级荷载增量下,其沉降量与时间关系 $S_i = f(t)$ 符合双曲线函数,因此,通过逐级对各级荷载下的沉降观测数据作双曲线拟合,递推得到分级加载条件的地基沉降随时间变化的关系函数,进一步求得地基最终沉降量。张仪萍等人根据叠加原理,得到第 n 级荷载 t 时刻的沉降

$$S_t = S_{F,n} - \sum_{k=1}^n A_k \cdot e^{-\lambda_k \cdot t} \quad (6)$$

式中, $S_{F, n}$ 为前 n 级荷载作用引起的最终沉降。

对于第一级荷载, 有 $S_t = S_{F, 1} - A_1 \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t}$, 利用单级加载条件下地基沉降性质可求得各项参数 $S_{F, 1}, A_1, \lambda_1$ 。在第二级荷载下, 将 $S_{F, 1}, A_1, \lambda_1$ 作为已知量代入, 得到沉降曲线的表达式 $(S_t + A_k \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t}) = S_{F, 2} - A_2 \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t}$, 按类似方法求得第二级荷载下的参数 $S_{F, 2}, A_2, \lambda_2$ 。依此类推, 可得到第 n 级荷载作用下的待定参数 $S_{F, n}, A_n, \lambda_n$ 。

胡庆国等人提出的分段双曲线法及张仪萍等人提出的分级加载条件下的沉降预测方法只能求得当前累计荷载作用下的最终沉降量, 不能进行越级预测。

(3) 根据第 i 级荷载的曲线拟合参数, 推算第 $i+1$ 级荷载的拟合曲线方程中的待定参数。

刘松玉等人^[21]及彭满江等人^[22]分别提出的基于 Asaoka 法的沉降预测方法, 以及杨涛等人^[23, 24]提出的基于双曲线法和基于指数法的沉降预测方法均属于此类。

根据 Asaoka 法, $S_j = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_{j-1}, S_t = \frac{\beta_0}{(1-\beta_1)}$, 式中, $S_0, S_1, S_2, \dots, S_j$ 分别为 $0, \Delta t, \dots, j \cdot 2\Delta t$ 时刻的沉降, β_0, β_1 , 分别为 $S_1 \sim S_j$ 拟合直线的截距和斜率, S_t 为最终沉降。

刘松玉等人认为, 当地基的固结系数 C_v 在分级加载施工中保持不变, 而且地基沉降量相对于填土层厚度来说较小时, 各级荷载下的 $S_j \sim S_{j-1}$ 拟合直线互相平行, 各平行直线在纵轴上的截距 β_0 与荷载增量引起的瞬时沉降有关。首先根据第一级荷载引起的瞬时沉降推算地基土的不排水模量

$$E_u = \frac{(1 - \nu^2) \cdot q \cdot b \cdot l}{S_0} \quad (7)$$

然后由此推算下一级荷载增量引起的瞬时沉降, 再进一步求得相应于该两级荷载下的 $S_j \sim S_{j-1}$ 拟合直线之间的平移量 $\Delta\beta_0$ 。

彭满江等人提出的方法与此类似, 该方法认为, 各级荷载下的 $S_j \sim S_{j-1}$ 拟合直线之间存在平行关系, 即 β_1 相等, 而各拟合直线在纵轴上的截距 β_0 随外荷载而变化

$$\frac{\beta_0^i}{\beta_0^{(1)}} \approx \frac{H_i}{H_1} \quad (8)$$

式中, H_i 为第 i 级路堤填土高度。求出第一级荷载下的参数 β_0, β_1 后, 就可推算下一级荷载下的相应

参数, 从而求得分级加载条件下的地基沉降。

杨涛等人先后提出了基于双曲线法和基于指数法的分级填筑路堤沉降预测方法。这两种方法的思路基本相同。在基于指数法的预测方法中, 假设各级沉降的发展规律符合指数曲线规律, 则第 i 级荷载下的沉降拟合方程为

$$S_{ti} = S_{0i} + (S_{fi} - S_{0i})[1 - A_i \cdot e^{-B_i(t-t_{0i})}] \quad (9)$$

式中, t_{0i} 为第 i 级荷载下的沉降拟合曲线的时间零点, S_{0i} 为第 i 级荷载下相应于 t_{0i} 时刻的沉降, S_{fi} 为第 i 级荷载下的最终沉降量, A_i, B_i , 为第 i 级荷载下的待定参数。

如果第 i 级荷载的预压期较长, 则上述沉降拟合方程中的 S_{fi}, A_i, B_i , 可根据该级实测沉降由指数曲线拟合法确定。对于需进行沉降预测的第 k 级, 假设 A 值不变, 即 $A_k = A_i B$, 其值与土的固结系数成正比

$$B_k = B_i \left(\frac{1 - \epsilon_k}{1 - \epsilon_i} \right)^\alpha \cdot \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'_k}{\sigma'_0 + \Delta\sigma'_i} \quad (10)$$

式中, σ'_0 为初始应力, $\Delta\sigma'_i, \Delta\sigma'_k$ 分别为第 i 级、第 k 级荷载引起的地基土附加应力, ϵ 为与 $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ 相应的地基土竖向应变。

(4) 将各级荷载下的沉降观测数据进行统一拟合。

从以上对各种预测方法的简要介绍可以看出, 尽管各种方法都有所创新, 但都存在一个共同的不足之处, 即由于采用了分段拟合方法, 故预测结果依赖于某一级荷载下或者每一级荷载下的沉降观测数据的曲线拟合结果, 如果某一级荷载下沉降观测数据较少, 那么通过曲线拟合得出的有关参数的可靠性是值得怀疑的, 而以此为基础进行的后级荷载下的沉降预测中就难以避免存在误差积累或误差传递, 从而影响到预测精度。在工程实际中, 一般情况下, 只要能满足地基稳定性要求, 相邻荷载级的时间间隔不会太长, 相应的各单级荷载下的沉降观测数据也较少。因此, 有必要将各级荷载下的沉降观测数据进行统一拟合而不是分段拟合, 以减少预测误差。

宋绪国等人^[25]建立的修正指数函数法和修正的双曲线法, 克服了分段拟合的缺点, 在修正的指数函数法中, 假设各级荷载增量引起地基沉降是其作用时间的指数函数, 且最终沉降量与荷载增量值成正比。

$$S_t = \sum_{k=1}^m \{ [1 - A \cdot e^{-B(t-t_k)}] \cdot S_k \} \quad (11)$$

$$= \sum_{k=1}^m \{ [1 - A \cdot e^{-B(t-t_k)}] \cdot (C \cdot p_k) \}$$

式中, S_t 为 t 时刻的地基沉降; S_k 为第 k 级荷载增量所引起的最终沉降量; t_k 为第 k 级荷载增量施加的时刻; Δp_k 为第 k 级荷载增量; m 为加荷的总级数 A 、 B 、 C 为待定参数。

根据已有的实测资料, 采用 0.618 优选法, 使各观测时刻的计算沉降与实测沉降之差的平方和最小, 求得参数 A 、 B 、 C , 利用 A 、 B 、 C 可推算下一级荷载的任意时刻的地基沉降。

此法在确定参数 A 、 B 、 C 时虽然可利用已有的各级荷载下的实测资料, 但计算过程较复杂, 而且未能考虑各级荷载施加时产生的瞬时沉降。

修正的双曲线法与修正的指数函数法的思路大致相同。在修正的双曲线法中, 假设各级荷载增量引起的地基沉降

$$S_t = \sum_{k=1}^m \left[\left(d + \frac{t-t_k}{a+(t-t_k)} \right) \cdot (C \cdot \Delta p_k) \right] \quad (12)$$

采用 0.618 优选法, 求得参数 a 、 C 、 d , 即可进行预测。

修正的双曲线法在式(10)中, 假设了

$$d = \frac{S_{0k}}{C \cdot \Delta p_k} \quad (13)$$

为常量(注: 这里 S_{0k} 为第 k 级荷载施加时的初始沉降, 不是瞬时沉降), 这显然与实际不符, 因为 S_{0k} 还与荷载的施加时刻有关, 对于第 k 级荷载 Δp_k , 在不同的时刻施加时, 初始沉降 S_{0k} (不是瞬时沉降) 是不同的。

黄广军^[26] 根据太沙基一维固结理论, 以及分级加载情况下计算地基平均固结度的改进的太沙基法, 提出了一种分级加载条件下提早预测地基沉降的沉降差法。根据太沙基一维固结理论, 若在 $t_1 \sim t_2$ 时间段内为恒载, 由在 $1t$ 之前已施加的各级荷载增量作用引起的 $t_1 \sim t_2$ 段内的沉降差可表示为

$$S_{t_2} - S_{t_1} = \sum_{i=1}^m (S_{t_2 p_i} - S_{t_1 p_i}) \quad (14)$$

由此得到任意时间段内的地基沉降差与加载过程、地基情况之间的关系的基本表达式为

$$S_{t_2} - S_{t_1} = S_{cp总} \cdot \alpha \cdot e^{-\beta(t_1-t_{0p1})} \cdot [1 - e^{-\beta(t_2-t_1)}] \cdot \sum_{i=1}^m \left[\frac{p_i}{p_{总}} \cdot e^{\beta(t_2 p_i - t_{01 p1})} \right] \quad (15)$$

式中, $S_{cp总}$, α , β 为与地基情况等因素有关的参数。

$$\text{令 } A = S_{cp总} \cdot \alpha,$$

$$B = [1 - e^{-\beta(t_2-t_1)}] \cdot \sum_{i=1}^m \left[\frac{p_i}{p_{总}} \cdot e^{\beta(t_2 p_i - t_{01 p1})} \right] \quad (16)$$

得到地基沉降差与加载过程、地基情况之间的线性拟合方程的表达式

$$\ln\left(\frac{S_{t_2} - S_{t_1}}{B}\right) = \ln A - \beta(t_1 - t_{0p1}) \quad (17)$$

该方法将各级荷载作用下的地基沉降发展规律统一了起来, 能同时利用各级荷载下的实测数据来进行线性拟合和预测, 可在工程填土施工过程中提早预测在设计总荷载作用下的地基总沉降量, 但该方法忽略了次固结引起的基础沉降。

3 基于实测沉降的固结系数反演

通常情况下, 计算地基土的沉降所采用的计算模型参数是由室内试验确定的。然而由于土样在取土、运输过程中的扰动, 现场和试验两者边界条件的差异, 以及地基土分布的不均匀, 由室内试验测定的参数往往与实际值存在较大差异。于是很多学者根据实测沉降数据对地基固结参数进行反演求解, 用以预测后期沉降。

岳红宇等人^[27] 运用反分析方法中的直接分析法, 根据现场观测的结果不断修正地基土的未知参数。该方法将根据太沙基固结理论中计算地基平均固结度的公式推导得出的考虑实际施工多级加载 t 时刻的沉降计算公式

$$S_t = \sum_{i=1}^n b_{xi} [1 - a_{xi} \exp(-b_{xi}^2 t)] \quad (18)$$

式中, a_{xi} 、 b_{xi} 、 b_{sx} 为待定参数, 通过目标函数(19)由各加载段实测沉降数据反演得到。

$$J = \sum_{n=1}^{N_t} \left[\sum_{i=1}^{N_d} \left(\frac{u_i}{u_i^*} - 1 \right)^2 \right] \quad (19)$$

式中, N_t 为计算时的时间步长数目; N_d 为量测的位移数目; u_i 为预测的位移; u_i^* 为量测的位移。

该方法利用早期的沉降实测数据和准确的加载信息,可以预测更长时间内的累计沉降量、沉降速率、工后沉降和最终沉降量,同时也可以推算出平均压缩系数 a_v 和平均固结系数 C_v 等主要土体变形的主要参数。

谭昌等^[28]针对多层软土地基,提出了分层迭代反演综合预测法。该方法根据多层软土地基的变形的两个较为突出的特点:一是各软土层的变形大小和发展的快慢主要受该层软土的物理力学性质影响,主固结变形发展的快慢则与孔压的消散有关,这将取决于排水条件和相关各软土层的渗透性;二是各测点的沉降主要由其下软土层的变形引起,即在反演预测分析中,主要受其下软土层计算参数的影响,其上软土层的影响相对较小,得到了分层迭代反演的思想:利用多层软土地基最底层软土层的各测点观测信息反演确定该软土层的计算参数,然后用反演所得参数替代初始参数;再利用第二层各测点观测信息反演确定第二层软土层的计算参数,然后用反演所得参数替代初始参数,重复以上过程,直到软土地基最顶上软土层。该方法能获得在物理意义上合理且数学上唯一的参数,但计算程序较复杂。

赵俊明^[29]根据太沙基一维固结理论利用反分析法得出竖向排水条件的固结系数的反演表达式(20)和径向排水条件的固结系数的反演表达式(21)。并应用于计算路基沉降,与实验室测得的固结系数计算的沉降曲线进行对比和分析的结果表明,根据现场监测资料反分析计算的固结系数明显高于室内测定值,但利用反分析结果计算的沉降历时曲线与实测值比较接近,说明能够用实测资料反算有关参数来修正室内试验参数。

$$c_v = \frac{-4H^2}{\pi^2(t_n - t_{n-1})} \ln \frac{s_{ult} - s_n}{s_{ult} - s_{n-1}} \quad (20)$$

$$c_h = \frac{1}{F_{vh}(t_n - t_{n-1})} \ln \frac{s_{ult} - s_n}{s_{ult} - s_{n-1}} \quad (21)$$

郑永来等^[30]建立了依据路堤填土期施工期和预压期观测资料计算路堤总瞬时沉降、总固结沉降、地基固结指数的基因反演方法,进而根据这三个反演参数计算最终沉降,并与实际值作比较,两者符合较好。

4 结 语

高速公路沉降如果没有得到严格的计算与控

制,建成后不久就会因不均匀沉降而出现路面开裂、桥头错台等现象,为了得到较为准确的后期沉降量推算结果,必须对沉降进行准确的观测,充分利用施工期及运营期的沉降观测数据,探讨路基长期变形规律的计算及预测方法,该研究具有重要的理论和工程意义。目前该方面的研究有较多的研究成果,但更准确实用的新方法仍需要广大的岩土工作者进行探讨和研究,其主要建议有:

(1) 现有的预测沉降的经验公式模型,大多只能适用于一级荷载下沉降预测,因为此时沉降-时间曲线呈渐变、光滑地发展,无明显的“台阶现象”出现,对于多级荷载下的路堤沉降是近几年研究的新方向。

(2) 现有经验公式都不能清楚给出不同时刻的软土次压缩量来,耦合软土流变相的经验公式模型有待进一步研究。

(3) 结合土性的室内试验研究,利用实测沉降数据探讨更为准确的参数反演法。

(4) 基于实测沉降数据考虑预压荷载影响的沉降预测方法目前仍为空白,有待进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] 周焕云,黄晓明. 高速公路软土地基沉降预测方法综述[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 7~10.
- [2] 胡中雄. 土力学和环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997: 22~87.
- [3] 冯文凯,刘汉超. 修正双曲线法在路基沉降变形初期阶段的应用探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(3): 60~63
- [4] 吴心怡. 高等级公路路堤沉降计算方法研究[D]. 南京: 河海大学, 1995: 1~48.
- [5] Asaoka A. Observational Procedure of settlement Prediction[J]. Soils and Foundation. 1978, 18(4): 87~101.
- [6] 戴济群. 深厚软基高等级公路的路基沉降实用计算方法研究及其工程应用[D]. 南京: 河海大学, 1997: 1~40.
- [7] Helbo T. Prediction of settlement and consolidation period using field observational method[C]. Field Measurements in Geomechanics (Leung, Tan & Phoon), Balkema, 1999: 57~68.
- [8] 宰金泯,梅国雄. 成长曲线在地基沉降预测中应用[J]. 南京建筑工程学院学报, 2000, 2: 8~13.
- [9] 梅国雄. 固结有限层理论及其应用[D]. 南京: 河海大学, 2002: 1~102.

- [10] 宰金泯,梅国雄. 全过程沉降量预测方法研究[J]. 岩土力学,2000,21(4):322~325.
- [11] 许永明,徐泽中. 一种预测路基工后沉降量的方法[J]. 河海大学学报,2000,28(5):111~113.
- [12] 石世云. 多变量灰色模型 MGM(1, n)在变形预测中的应用[J]. 测绘通报,1998,(10):9~12.
- [13] 张仪萍,龚晓南. 沉降的灰色预测[J]. 工业建筑,1999,29(4):45~48
- [14] 雷学文,白世伟,孟庆山. 灰色预测在软土地基沉降分析中的应用[J]. 岩土力学,2000,21(2):145~147.
- [15] 曾超,肖峰,唐仲华. 应用灰色模型(G, M)预测软土路基沉降量[J]. 安全和环境工程,2002,9(1):17~19.
- [16] 刘勇健. 用人工神经网络预测高速公路的软土地基的最终沉降[J]. 公路交通科技,2000,17(6):15~18.
- [17] 林代锐,李国维,黄少杰. 汕汾高速公路软基超载预压卸载控制[J]. 河海大学学报,2002,30(4):78~81.
- [18] 邵光辉. 复合双曲线法预测公路沉降探讨[J]. 林业建设,2001(6):30~33.
- [19] 胡庆国,黄庆,黄生文. 用实测资料求多极加载时软基沉降量的方法[J]. 湖南交通科技,1997,23(3):9~12.
- [20] 张仪萍,曹国强,李涛,等. 分级加载条件下沉降预测方法[J]. 中国公路学报,2005,18(1):30~33.
- [21] 刘松玉,经纬. 软土地基上分期施工的路堤沉降预测方法[J]. 岩土工程学报,2003,25(2):228~232.
- [22] 彭满红,涂许杭,王志亮. Asaoka 法对路堤沉降越级预测初探[J]. 水文地质工程地质,2005(1):41~44.
- [23] 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.
- [24] 杨涛,戴济群,李国维. 基于指数法的分级填筑路堤沉降预测方法研究[J]. 土木工程学报,2005,38(5):92~95.
- [25] 宋绪国,刘远锋,杨明雨,等. 利用沉降观测资料推算未来沉降在秦沈客运专线中的应用[J]. 路基工程,2002(5):37~4.
- [26] 分级加载条件下提早预测地基沉降的沉降差法. 岩土工程学报,2007,29(6):811~818.
- [27] 岳红宇,陈功,相阳. 由实测沉降数据反演地基固结参数的适用计算方法[J]. 中国公路学报,2002,15(1):29~33.
- [28] 谭昌,周建,黄广龙. 多层软土地基沉降的分层迭代反演综合预测法[J]. 中国公路学报,2001,14(4):28~32.
- [29] 赵俊明,石名磊. 高速公路软土地基固结系数反分析[J]. 公路交通科技,2005,22(12):50~52.
- [30] 郑永来,童琪华,杨柳峰,等. 软土路堤沉降预测方法研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2005,33(12):1581~1585.