

文章编号:1673-2049(2017)01-0084-07

## 高填方路堤沉降模型现场试验

朱彦鹏<sup>1,2</sup>, 蔡文霄<sup>1,2</sup>, 杨校辉<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 甘肃土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**通过单点沉降现场实测数据对软土地区兰永一级公路高填方路堤沉降规律进行分析,建立了指数模型、乘幂模型、双曲线模型、对数模型 4 种沉降预测模型,并将这 4 种模型的预测值和实测值进行对比,在此基础上,利用最小二乘法建立了指数与双曲线模型的组合模型。结果表明:4 种模型中指数模型和双曲线模型的预测精度相对较高,利用指数与双曲线组合模型得到的预测曲线与实测曲线吻合良好,使误差平方和减小到 22.789 mm<sup>2</sup>,能够满足工程要求;高填方路堤工后沉降在 730 d 左右的时间内基本完成,预测最终沉降量为 60.44 mm。

**关键词:**单点沉降计;高填方路堤;预测模型;工后沉降;组合模型

中图分类号:TU447 文献标志码:A

## Field Test of High Embankment Settlement Model

ZHU Yan-peng<sup>1,2</sup>, CAI Wen-xiao<sup>1,2</sup>, YANG Xiao-hui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, Gansu, China)

**Abstract:** The settlement laws of high embankment on Lanzhou-Yongjing expressway in soft soil area were analyzed through in-site measuring data by single point settlement gauge. Four kinds of settlement forecasting models including exponential model, power model, hyperbolic model and logarithmic model were established and the forecasting values and measuring values of settlements were compared. Based on this, combination model of index model and hyperbolic model was established. The results show that exponential model and hyperbolic model are relatively accurate in the four kinds of models, the forecasting curves of combination model of index model and hyperbolic model agreed with the measuring curves, and the error sum of squares is 22.789 mm<sup>2</sup>, which satisfy the need of engineering, the post-construction settlement of high embankment will finish within about 730 d, the forecasting final settlement is 60.44 mm.

**Key words:** single point settlement gauge; high embankment; prediction model; post-construction settlement; combination model

## 0 引言

随着中国高等级公路建设的需求增多,越来越

多的高填方路堤应用到公路建设中,而建设高填方公路不可避免地要面临路堤沉降问题。近年来,科研技术人员为解决这个问题做了部分研究工作,目

收稿日期:2016-07-26

基金项目:教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1368);甘肃省创新研究群体计划项目(1210RJA003)

作者简介:朱彦鹏(1960-),男,甘肃庆阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:zhuyp@163.com。

前预测路堤最终沉降和工后沉降主要有分层总和法、数值算法、实测沉降资料预测法。土体是一种复杂的工程材料,试验得到的土体参数是比较离散的,而需要大量试验来获取尽可能接近实际参数的分层总和法和数值算法显示出局限性,依据现场实测沉降资料的预测法就显示出独有的优势,它是在对实测数据分析的基础上做出的预测,能考虑诸多因素对土体沉降的影响,预测结果与实际情况往往吻合较好<sup>[1]</sup>。这类方法包括指数曲线法、S 形成长曲线法、双曲线法、泊松曲线法、Asaoka 法<sup>[2]</sup>、三点法、遗传算法、灰色系统法、人工神经网络法<sup>[3]</sup>。

目前,指数曲线法对沉降数据后期拟合程度较好,但对前期沉降拟合不够稳定;双曲线法是根据不同的填土高度和时间测得相应的沉降量。该方法一般将开始沉降的时刻取为荷载稳定期,仅适用于一级加荷的情况;Asaoka 法最大的缺点是最终沉降量的预测值过分依赖于时间间隔的划分。总之,以上这些单一的方法是针对量值较大的沉降,而关于量级小、相对波动大的沉降预测方法研究甚少<sup>[4-13]</sup>。因此,利用“组合”的思想,结合高等级公路工程的结构特性、地质特征以及沉降量级小、数据相对波动大等特点,对沉降预测方法进行系统分析和优化比选,然后进行组合,得到稳定性好、精度高、操作方便的组合预测方法。

本文通过单点沉降计即电测位移传感器上接沉降板,下接测杆并套金属软管、锚头,当底层锚头基

础下沉时,沉降板随基础一起下沉并使传感器与测杆之间发生相对滑移,得到现场大量监测数据。对工程中常用的指数、乘幂、双曲线、对数模型进行对比研究,分析其变形规律,建立 4 种沉降预测模型;基于最小二乘法,建立指数与双曲线模型的组合模型,分析其特性,探讨其合理性,从而预估高填方路堤的最终沉降量。为软土地区高填方路堤最终沉降量的计算提供理论依据。

## 1 工程概况

甘肃省兰永一级公路第 4 标段高填方路堤为本文试验的沉降监测对象,该高填方路堤先采用浅层换填法清除表面软塑土,再通过压路机分层压实与重锤隔层夯实相结合的方式填筑处理。采用一级公路标准建设,设计车速为  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,整体式路基宽度为  $23.0 \text{ m}$ ,分离式路基宽度为  $11.25 \text{ m}$ ,路线全长  $48.246 \text{ km}$ 。高填方路堤位于兰永一级公路第 4 标段(道路桩号  $K24+000 \sim K24+400$ ),采用土石混填材料,材料来源为左侧边坡开挖的红泥岩和粉质黏土,路基顶面回填  $1 \text{ m}$  左右的砂砾,局部水浇地或沼泽芦苇地路段采用浅层换填后,再利用强夯垫层法处理,最大填土高度  $18 \text{ m}$ 。该高填方路堤的浅层换填设计如图 1 所示。

地质断面特性见表 1。K24+350 路段为风积黄土,最大干密度为  $1.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,最佳含水量为  $12.7\%$ ,加州承载比(CBR)为  $9\%$ ,压实度为  $96\%$ 。

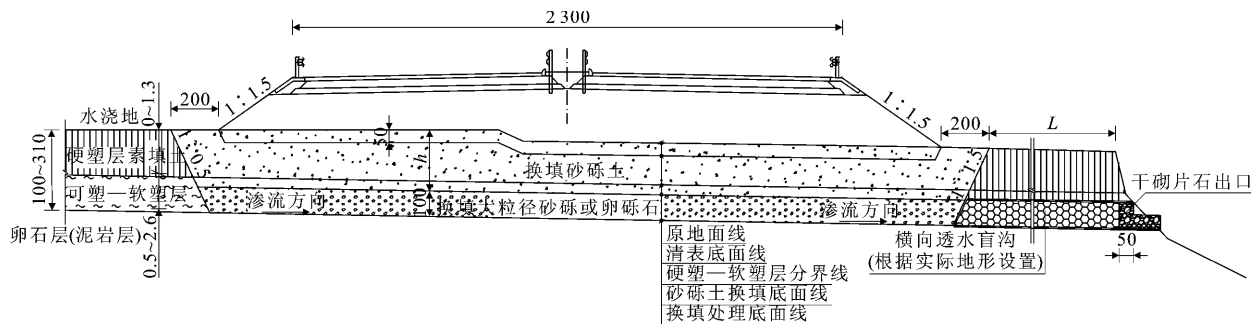


图 1 浅层换填设计(单位:cm)

Fig. 1 Design of Shallow Layer Replacement (Unit:cm)

## 2 试验方案

### 2.1 沉降监测点的布置

根据兰永一级公路的具体情况,本文工程第 4 标段监测位置沿道路纵断面布置 2 列监测点,分别在右幅路基(黄羊头→永靖方向)右路肩中心和超车道中心,2 列纵向监测位置处沿道路纵向每隔  $1 \text{ m}$  打孔,按不同深度布置单点沉降计,具体测点布置如

图 2~4 所示。

### 2.2 沉降计的埋设与安装

该段路基填料为土石混填材料,材料来源为左侧边坡开挖的红泥岩和粉质黏土,路基顶面回填  $1 \text{ m}$  左右的砂砾。现场钻孔与沉降计的埋设如图 5 所示。

### 2.3 监测方法

本文试验沉降监测采用单点沉降计,其型号为

表 1 地质断面特性

Tab. 1 Characteristics of Geological Section

土层编号	土层	土层特点
①	黄土	浅黄色, 土质较均匀, 干燥—稍湿, 含砂量较高, 主要以粉粒组成, 可塑。
②	黄土	浅红色, 稍湿, 土质较均匀, 含砂量较高, 黏粒含量较高, 硬塑。
③	卵石	黄褐色—青灰色, 分选性差, 磨圆度较好, 骨架成分以变质砂岩碎屑组成。
④	泥岩	紫红色, 成岩性好, 抗风化能力差, 遇水易软化、易崩解, 岩芯呈碎块状。
⑤	泥岩	紫红色, 中厚层状构造, 泥质结构, 岩芯断面新鲜, 软硬不均匀。

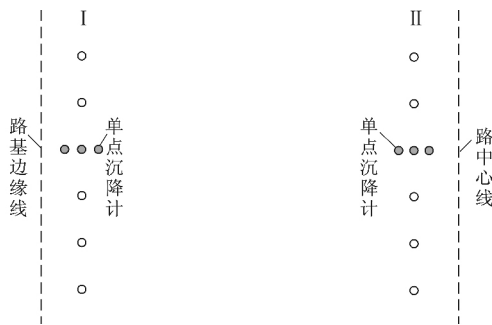


图 2 单点沉降计布置平面图

Fig. 2 Plan of Single Point Settlement Gauges

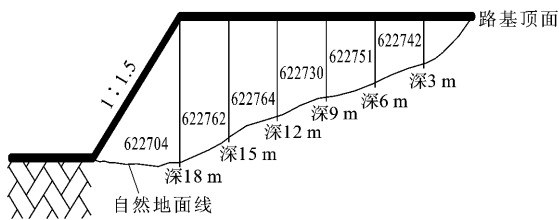


图 3 路肩位置剖面图

Fig. 3 Profile of Road Shoulder Position

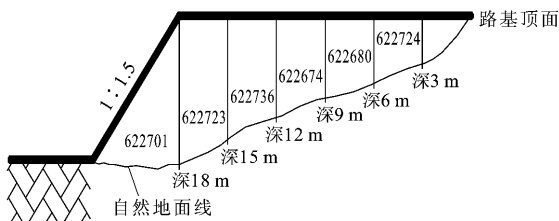


图 4 超车位置剖面图

Fig. 4 Profile of Overtaking Lane Position

JMDL4740, 量程为 400 mm, 灵敏度为 0.1 mm, 标距为 2 210 mm。单点沉降计由沉降板、电测位移传感器、测杆及金属软管、锚头、加长杆、底层锚头等组成, 是一种埋入式电感调频类智能位移计。单点沉降计利用电磁感应原理, 与测杆固接的磁体活塞杆插入螺管线圈并可来回移动, 线圈的电感量与导



图 5 沉降计埋设与安装

Fig. 5 Burying and Installation of Settlement Gauges

磁体活塞杆插入线圈的长度有关。当发生位移时, 将引起线圈电感量的变化, 电感调频电路将线圈电感量的变化变换成频率信号, 通过读数仪即可显示位移值。电感式单点沉降计采用钻孔式安装, 如图 6 所示。

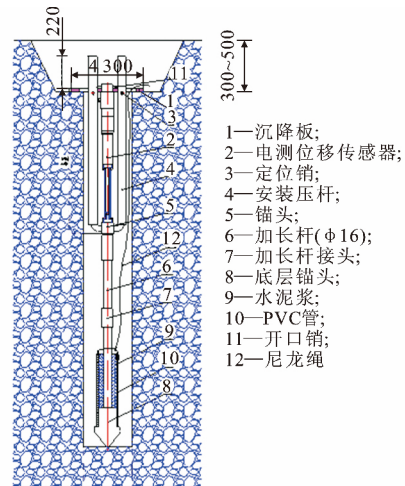


图 6 单点沉降计的安装(单位:mm)

Fig. 6 Installation of Single Point Settlement Gauge (Unit:mm)

本文高填方路段最大填方高度为 18 m, 分别在路肩和超车位置布置单点沉降计, 深度分别为 3, 6, 9, 12, 15, 18 m, 共埋设 12 个单点沉降计, 沉降计编号和埋置深度如表 2 所示。

### 3 沉降规律分析

为分析高填方路堤总体沉降规律, 路肩位置选取编号为 622742, 622751, 622730, 622764, 622762,

表 2 高填方路肩和超车道单点沉降计编号及埋置深度

Tab. 2 Single Point Settlement Gauge Number and Buried Depth of High Embankment Road Shoulder and Overtaking Lane

沉降计编号	路肩	622742	622751	622730	622764	622762	622704
	超车道	622724	622680	622674	622736	622723	622701
埋置深度/m		3	6	9	12	15	18

622704 的沉降计,埋置深度分别为 3,6,9,12,15,18 m;由于施工,编号为 622724 的沉降计被损坏,即选取超车道位置编号为 622680,622674,622736,622723,622701 的沉降计,埋置深度分别为 6,9,12,15,18 m。路肩与超车道沉降计埋设处于同一水平线上。监测时间从 2014 年 9 月 20 日至 2015 年 9 月 20 日,历时 365 d,共进行 12 次现场监测。数据以 9 月 20 日的监测为基准,此时间后所得沉降数据均为相对沉降量。

路肩与超车道填方体沉降监测结果分别如图 7,8 所示,“—”表示土层沉降向下发生位移,其中, $t$  为时间, $s$  为沉降量。

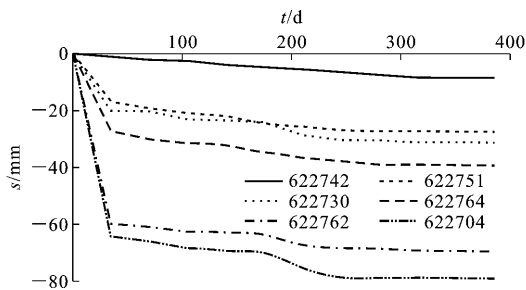


图 7 路肩沉降量与时间关系

Fig. 7 Relation of Settlement and Time of Shoulder

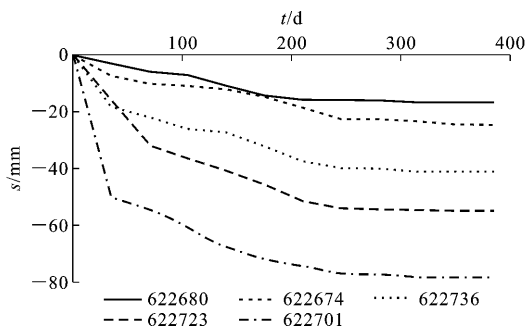


图 8 超车道沉降量与时间关系曲线

Fig. 8 Relation of Settlement and Time of Overtaking Lane

根据对第 4 标段路堤现场实测,由图 7,8 可以看出:路肩位置的沉降大于超车道沉降,这与路肩一侧没有侧向约束而超车道两侧有约束有关;对比路肩与超车道沉降,以深度 3 m 处填方体沉降量最小,深度 18 m 处沉降量最大,填方体沉降速率呈先增大后减小,最后趋于平缓的趋势,0~40 d 的沉降量变化较小,但曲线陡峭,即沉降速率一直增大;

40~160 d 沉降量继续增加,沉降速率较前 30 d 减小,并在 160 d 达到峰值;160~250 d 沉降速率越来越小,大约在 250 d 沉降速率开始趋于平缓稳定。

## 4 沉降预测模型对比

### 4.1 沉降预测模型的建立及对比分析

运用 ORIGIN 软件,选取指数、乘幂、双曲线和对数 4 种公式模型,对超车道沉降计编号 622674 (埋置深度 9 m),622736 (埋置深度 12 m),622723 (埋置深度 15 m) 的 0~365 d 实测数据进行曲线拟合,得到与实测曲线最接近的曲线模型,即拟合曲线与实测曲线的判定系数  $R^2$  最为接近 1。建立的模型如表 3 所示。

由表 3 可知,对于超车道 3 种深度单点沉降计监测数据的拟合指数模型、双曲线模型和对数模型的判定系数均在 0.95 以上,乘幂模型较这 3 种模型判定系数稍小,但也达到了 0.94。因此,对于短期沉降预测,4 种模型都可以做出较为准确的预测。

为进一步分析出各模型的预测精度,以超车道沉降计编号 622723、埋置深度 15 m 为例,将各模型预测沉降量与现场实测数据进行比对,并对 420,455,490,525,560,595,630,665,700,735,770,805,840 d 的沉降量进行了预测,结果如表 4 所示。

计算出各模型误差平方和,结果见表 5。4 种预测模型曲线如图 9 所示。

由表 4 可知,超车道沉降计编号 622723、埋置深度 15 m 的实测数据在 0~35 d 内沉降较快,35~70 d 内沉降大幅度增加,之后一直到 365 d,实测沉降量平稳增加。分析其原因,由于路堤完成填筑后,填方体自重与路面车辆荷载共同作用使各土层的变形处于明显变化状态;随着时间的增加,下层土体发生一定的压缩下沉后导致沉降盘下沉,电测位移传感器随着土体下沉,但土体下沉滞后于沉降盘下沉,使电测位移传感器相对于沉降盘向上运动,因此现场监测数值会出现一段时间内变化不大的现象。

比较表 4 中沉降实测值与各模型的预测值,乘幂模型和对数模型的预测值相对偏大,指数模型与双曲线模型的预测值相对偏小。比较表 5 中 4 种模型的误差平方和可知,指数模型和双曲线模型的误

表 3 沉降预测模型

Tab. 3 Forecast Models of Settlement

沉降计编号	622674	622736	622723
指数模型	$y=32.67-31.20e^{-0.0038x}$ $R^2=0.9571$	$y=43.02-40.25e^{-0.0088x}$ $R^2=0.9595$	$y=51.12-57.03e^{-0.0101x}$ $R^2=0.9917$
乘幂模型	$y=0.8036x^{0.5843}$ $R^2=0.9423$	$y=4.7131x^{0.3744}$ $R^2=0.9468$	$y=5.7759x^{0.3931}$ $R^2=0.9434$
双曲线模型	$y=\frac{43.9692x}{280.8369+x}$ $R^2=0.9580$	$y=\frac{52.1984x}{93.2404+x}$ $R^2=0.9701$	$y=\frac{72.1973x}{98.6314+x}$ $R^2=0.9889$
对数模型	$y=16.269\ln(x+108.010)-75.169$ $R^2=0.9575$	$y=12.792\ln(x+14.305)-33.746$ $R^2=0.9748$	$y=13.398\ln(x-18.372)-21.511$ $R^2=0.9746$

表 4 各模型沉降预测值与实测值比较

Tab. 4 Comparisons Between Predicted Values and Measured Values of Models

时间/d	沉降/mm				
	实测值	指数模型	乘幂模型	双曲线模型	对数模型
0	0.00	0.09	0.00	0.00	
35	16.25	17.07	23.37	18.91	16.15
70	31.71	29.00	30.69	29.97	31.33
105	36.91	37.37	35.99	37.23	38.27
140	40.84	43.25	40.30	42.36	42.82
175	45.67	47.38	43.99	46.17	46.20
210	51.59	50.28	47.26	49.12	48.91
245	54.09	52.32	50.21	51.47	51.15
280	54.60	53.75	52.92	53.39	53.08
315	54.87	54.75	55.42	54.98	54.96
350	54.95	55.46	57.77	55.32	56.26
385	55.05	55.95	59.97	56.47	57.60
420		56.30	62.06	58.47	58.82
455		56.54	64.04	59.34	59.94
490		56.71	65.94	60.10	60.97
525		56.84	67.75	60.78	61.93
560		56.92	69.49	61.39	62.83
595		56.98	71.17	61.93	63.67
630		57.02	72.78	62.42	64.46
665		57.05	74.35	62.87	65.20
700		57.07	75.86	63.28	65.91
735		57.08	77.33	63.66	66.58
770		57.10	78.76	64.00	67.22
805		57.10	80.15	64.32	67.83
840		57.10	81.50	64.61	68.41

表 5 各模型误差平方和

Tab. 5 Error Sum of Squares of Models

预测模型	指数模型	乘幂模型	双曲线模型	对数模型
误差平方和/mm <sup>2</sup>	23.667	124.798	29.316	32.536

差平方和小于其他 2 种模型, 所以其预测精度高于其他 2 种模型。

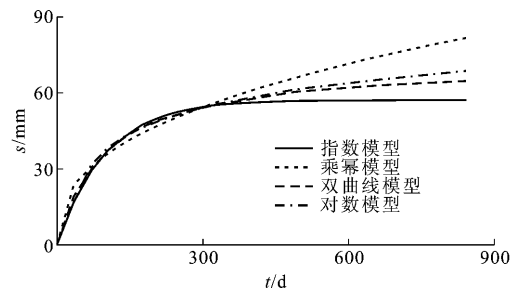


图 9 4 种预测模型曲线

Fig. 9 Four Kinds of Prediction Model Curves

由图 9 可以看出, 乘幂模型曲线在 0~315 d 比较接近于实测曲线, 315 d 之后是 4 种曲线中增长速率最快的, 也是与实测值偏离程度最大的。对数模型曲线增长速率低于乘幂模型曲线, 但高于其他 2 种曲线, 预测值在 315 d 以后开始高于实测值。在 0~315 d, 与前 2 种曲线比较, 双曲线模型是 4 种曲线中与实测值拟合程度较高的。指数模型是 4 种曲线中后期增长最慢的, 它的拐点在 200 d, 0~200 d 预测沉降速率持续增大, 200 d 之后沉降速率逐渐开始平缓, 在 315 d 曲线开始进入收敛阶段, 并在接近 700 d 时达到收敛极限。

与其他 3 种预测曲线比较, 指数曲线收敛较快, 在 0~365 d 内, 其预测值与实际值相比偏小。指数、乘幂、双曲线和对数模型 4 种曲线均属于光滑曲线, 因此对于分层填筑夯实的路堤, 沉降量的预测存在着先天不足, 仅有指数模型曲线存在明显拐点, 而且随着时间的增加其预测模型沉降量有收敛值, 其余 3 种模型都是随时间增加沉降量无限增长, 无法预测其最终沉降量。

#### 4.2 建立组合模型

由以上分析可知, 超车道沉降计编号 622723、埋置深度为 15 m 的指数模型和双曲线模型预测精度优于其他 2 种模型。如果没有时间上的限定, 双曲线模型的沉降量预测无法收敛, 而指数模型的沉

降量预测虽可以收敛,但有明显拐点,即收敛过快。为更准确地预测沉降,将 2 种模型组合进行优缺点互补,即选取指数模型和双曲线模型组合进行路堤长期沉降的预测。对于同一预测问题,设有  $n$  种预测模型和  $N$  个时间点,并假设:  $y(t')$  为第  $t'$  期的实际观测值,  $t'=1,2,3,\dots,N$ ;  $\hat{y}_i(t')$  为第  $i$  个模型的第  $t'$  期预测值;  $w_i(t')$  为第  $i$  个预测模型在第  $t'$  期的加权值<sup>[14]</sup>,且满足  $\sum_{i=1}^n w_i(t') = 1(t'=1,2,3,\dots,N)$ ,  $w_i(t') \geq 0(i=1,2,3,\dots,n)$ ;  $s_{it'} = y(t') - \hat{y}_i(t')$  为第  $i$  种模型在第  $t'$  期的预测误差( $t'=1,2,3,\dots,N$ ),则组合预测模型可表示为

$$\hat{y}(t') = \sum_{i=1}^n w_i(t') \hat{y}_i(t') \quad (1)$$

式中:  $\hat{y}(t')$  为组合预测模型的第  $t'$  期值。

设  $W_1, W_2$  分别为指数模型和双曲线模型的权重系数,且满足  $W_1 + W_2 = 1$ ,其中  $W_1 \geq 0, W_2 \geq 0$ ;  $y_1(t'), y_2(t')$  分别为指数模型和双曲线模型函数,则组合预测模型函数可表示为

$$\hat{y}(t') = W_1 y_1(t') + W_2 y_2(t') \quad (2)$$

综上所述,求解模型的关键在于最佳权重系数的确定。基于最小二乘法,最佳权重系数  $W_i(t')$  应满足残差平方和  $S$  达到最小<sup>[14]</sup>,其中

$$S = \sum_{t'=1}^N [(\hat{y}(t') - y(t'))]^2 \quad (3)$$

对于本文试验现场路堤沉降监测,由于每一个时间点都对应一组权重系数和一期预测值,无法准确得到一个组合模型,并且计算很复杂。因此,为简化计算和方便应用,利用 MATLAB202B 编制计算程序,选取时间 0~365 d 中的 12 个时间点和其对应的实测值,通过比较优选出一组变权重系数使得预测值与实测值的误差平方和最小,计算结果见表 6。组合模型的预测曲线与实测曲线的对比结果如图 10 所示。

表 6 权重系数与误差平方和

Tab. 6 Weight Coefficients and Error Sum of Squares

超车道沉降计编号	权重系数		误差平方和/mm <sup>2</sup>
	指数模型	双曲线模型	
622723	0.516	0.484	22.789

由图 10 可以看出,组合模型的预测值与现场实测数据拟合程度相对较高,并且曲线存在收敛值,故可以预估最终沉降量。

基于指数模型的收敛趋势,使得组合模型有一

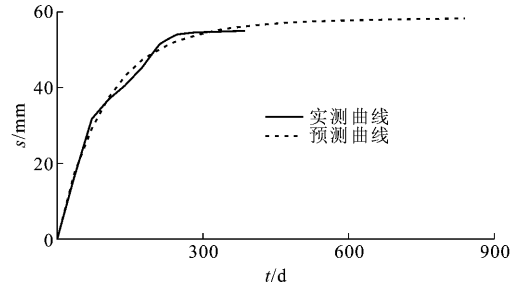


图 10 组合模型预测曲线与实测曲线

Fig. 10 Prediction Curve and Measured Curve of Combined Model

个收敛时间。根据表 4 指数模型的预测值可知,在 770 d 左右模型达到了极限沉降值,因此可以认为本文试验路堤完工后沉降约在 770 d 内基本完成。组合模型为

$$\hat{y} = 0.516(57.119 - 57.032e^{-0.0101x}) + 0.484 \frac{72.1973x}{98.6314x} \quad (4)$$

由式(4)可知,当  $0 \leq x \leq 770$  时最终沉降量为 60.44 mm。

根据组合模型对沉降量的预测,高填方路堤在完工后 365 d 内沉降量可达到 90%,在 730 d 左右的时间里沉降基本完成。

### 5 结 语

(1)高填方路堤填方体路肩位置沉降量大于超车道位置,这与路肩一侧没有侧向约束而超车道两侧有侧向约束有关。对于同一水平断面来说,即使在填方因素基本相同的情况下,也有可能产生沉降差异。

(2)指数模型、乘幂模型、双曲线模型和对数模型均能较为准确地拟合本文路堤的短期实测沉降数据,比较 4 种模型的误差平方和,指数模型和双曲线模型拟合程度更优,预测精度更高。指数模型虽然有收敛值,但存在明显拐点,即收敛过快,其他 3 种模型都是随时间的增加沉降量无限增加,故无法预测最终沉降量。

(3)建立指数和双曲线的组合模型,结合两者的优点,弥补其缺点,能较好地使误差平方和减小到 22.789 mm<sup>2</sup>,提高了预测精度,并且可以预测高填方路堤最终沉降量,为指导类似工程提供借鉴。

(4)兰永一级公路高填方路堤完工后 365 d 内沉降量基本达到 90%,工后沉降在 730 d 左右的时间里基本完成,预测最终沉降量为 60.44 mm。

## 参考文献:

## References:

- [1] 张卫兵. 黄土高填方路堤沉降变形规律与计算方法的研究[D]. 西安:长安大学, 2007.  
ZHANG Wei-bing. Study on Settlement-deformation Laws and Calculation Method of High Loess-filled Embankment[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [2] 金莉. 几种预测模型在高路堤沉降预测中的对比分析[J]. 西部探矿工程, 2006(4): 234-236.  
JIN Li. Forecasting Contrasting Analysis of Some Forecasting Models Used for High Embankment Settlement Prediction[J]. West-China Exploration Engineering, 2006(4): 234-236.
- [3] 徐晓宇, 王桂尧, 匡希龙, 等. 基于皮尔-遗传神经网络的高路堤沉降预测研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(1): 40-43, 47.  
XU Xiao-yu, WANG Gui-yao, KUANG Xi-long, et al. Research of the Settlement Prediction for High Embankment Based on the Pearl Curve and Genetic Neural Network[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(1): 40-43, 47.
- [4] 牛志力. 软基高填路堤沉降及边坡强度折减稳定性分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(4): 54-56.  
NIU Zhi-li. Analysis on Settlement of Soft Foundation Highly-filled Embankment and Stability of Strength-reductive Side Slope[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 26(4): 54-56.
- [5] 郑建国, 王婷, 张继文. 黄土路基沉降量预测方法的研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 321-326.  
ZHENG Jian-guo, WANG Ting, ZHANG Ji-wen. Study of Settlement Prediction Methods of Loess Subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 321-326.
- [6] 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.
- [7] 常保平. 软基路堤沉降历程预报的改进方法[J]. 中国公路学报, 1995, 8(3): 5-9.  
CHANG Bao-ping. Improvement of Settlement Prediction for the Embankment on Soft Soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8(3): 5-9.
- [8] 王景, 刘良栋, 王作义. 组合预测方法的现状和发展[J]. 预测, 1997(6): 37-38.  
WANG Jing, LIU Liang-dong, WANG Zuo-yi. The Actuality and Development of Combination Forecasting Method[J]. Forecasting, 1997(6): 37-38.
- [9] 王丽琴, 靳宝成, 杨有海, 等. 黄土路基工后沉降预测模型对比研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(1): 43-47.  
WANG Li-qin, JIN Bao-cheng, YANG You-hai, et al. Contrast Study on Prediction Models of Settlement of Loess-fill Subgrade After Construction[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(1): 43-47.
- [10] 徐晓宇. 高填方路堤沉降变形特性及其预测方法研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2005.  
XU Xiao-yu. The Research on Settlement Character and Prediction Method for High Embankment[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2005.
- [11] 宰金珉, 梅国雄. 成长曲线在地基沉降预测中的应用[J]. 南京建筑工程学院学报, 2002(2): 8-13.  
ZAI Jin-min, MEI Guo-xiong. Poission Curve Application to Forecast the Setting of Foundation[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 2002(2): 8-13.
- [12] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [13] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.  
WU Zhong-wei, LIAN Hui-zhen. High Performance Concrete [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999.
- [14] 赵明华, 刘煜, 曹文贵. 软土路基沉降变权重组合S型曲线预测方法研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1443-1447.  
ZHAO 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.