

西南山区高速铁路建设工程技术研究丛书

四川省 2019—2020 年度重点图书出版规划项目

西南山区有砟轨道高速铁路 沉降预测数学模型

王明慧 曹成度 张 桥 编著

西南交通大学出版社

·成 都·

内容简介

本书概述了预测理论研究的现状与发展趋势,以西南山区有砟轨道高速铁路为例,系统介绍了沉降预测模型的基本原理,以及各种沉降预测模型在工程实践中的应用。

本书适合高等院校路基工程、岩土工程专业的本科生、研究生学习参考,也可供高速铁路建设工程技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

西南山区有砟轨道高速铁路沉降预测数学模型 / 王明慧, 曹成度, 张桥编著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2021.12

ISBN 978-7-5643-8392-3

I. ①西… II. ①王… ②曹… ③张… III. ①山区铁路—高速铁路—轨道(铁路)—路基沉降—数学模型 IV. ①U238

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第232660号

Xinan Shanqu Youzha Guidao Gaosu Tielu Chenjiang Yuce Shuxue Moxing
西南山区有砟轨道高速铁路沉降预测数学模型

王明慧 曹成度 张 桥 编著

出 版 人 王建琼
策 划 编 辑 王 旻
责 任 编 辑 王 旻
特 邀 编 辑 王玉珂
封 面 设 计 何东琳设计工作室

出 版 发 行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区二环路北一段111号
西南交通大学创新大厦21楼)

发 行 部 电 话 028-87600564 028-87600533

邮 政 编 码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 四川煤田地质制图印刷厂

成 品 尺 寸 210 mm × 285 mm

印 张 11

字 数 220 千

版 次 2021年12月第1版

印 次 2021年12月第1次

书 号 ISBN 978-7-5643-8392-3

定 价 68.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

铁路是国民经济的大动脉，在国民经济中发挥着重大的作用。而高速铁路具有运能大、速度快、能耗省、污染小、占地少、安全性高、经济效益好等优点。世界上把新线设计速度达到 250 km/h 以上、既有线改造速度达到 200 km/h 的铁路统一定义为高速铁路。高速铁路是现代化铁路的重要标志，集中体现了当代高新技术的发展成果，代表着当今世界铁路的发展方向。我国已成为世界上高速铁路发展最快、系统技术最全、集成能力最强、运营里程最长、运营速度最高、在建规模最大的国家。近年来，铁路部门还紧密围绕高速铁路建设运营和技术装备现代化，深化关键技术创新，扩大技术创新成果，完善铁路技术创新体系，搞好技术成果的运用，开展铁路主要技术政策和技术规程的修订工作，以形成具有我国铁路特色的高速铁路技术标准体系。

高速铁路对轨道的平顺性提出了更高的要求，而路基是铁路线路工程的一个重要组成部分，是承受轨道结构重量和列车荷载的基础，它也是线路工程中最薄弱、最不稳定的环节。路基几何尺寸的不平顺，自然会引起轨道的几何不平顺，因此需要轨下基础有较高的稳定性和较小的永久变形，以确保列车高速、安全、平稳运行。由于软土特殊的工程性质和高速铁路路基的特点，在一般情况下，多数路段地基的强度与稳定性的处理难度都不大，不成为控制因素；给工程带来的主要难题是沉降变形及其各种处理措施条件下的固结问题，所以路基沉降变形问题是高速铁路设计中所要考虑的主控因素。

目前，计算沉降量与时间关系的方法有两大类。第一类为根据固结理论，结合各种土的本构模型，计算沉降量的各种有限元法；第二类为根据实测资料推算沉降量与时间关系的预测方法。

随着工程实践与科研工作的深入开展，第一类方法得到很大发展，相关人员提出了各种计算地基沉降的理论与方法。在这些方法中，有基于某些基本假设的理论公式，也有基于实测资料统计形成的经验公式。从学科发展的角度来说，采用严密的理论假设并通过先进的计算方法（如有限元程序等）来推算地基沉降的探索是我们应努力的方向，但要使这些新的理论研究达到推广应用的程度，还需要一个较长的过程。

第一类方法由于其分析方法是建立在小土样试验得到的应力-应变关系基础上的，这种试验在应力水平、加载速率、边界条件等方面，都和实际工程有很大差别，而且计算参数较多，一般又需通过三轴试验确定，而有些单位还不具备做三轴试验的条件，且不同的单位做出来的结果有较大的差别，加之压缩、固结理论自身的缺陷性，导致沉降计算得不准确性和地区差异性。相对而言，第二类方法以实测资料为依据，估算地基沉降的平均趋势，是一种实用价值比较高的方法。

重庆至万州铁路（也称渝万铁路客运专线）是西南山区第一条有砟轨道高速铁路，设计速度为 250 km/h。设计要求一般地段工后沉降不大于 10 cm，过渡段不大于 5 cm，年沉降速率不大于 3 cm。其路基分布为谷地相呈集窝状，地基处理形式有高压旋喷桩、多向搅拌桩、换填、CFG 桩、螺杆桩，下卧地层多为软质岩泥岩、泥质砂岩，受地下水影响容易软化和风化，桥隧及桥路、路隧过渡段多，沉降变形控制分析离散性大，不易进行综合性评价。如何确定相应的沉降变形评估参数，建立适用的分析模型，在施工过程中更为精确地对路基变形进行评估分析和控制，实现运营安全质量与效益，是该线建设的关键控制技术之一。

本书是在总结“西南山区有砟轨道高速铁路沉降预测数学模型研究”的基础上，经过修改、补充、整理而成，以渝万铁路客运专线为例，对高速铁路有砟轨道路基的沉降预测模型进行了系统的介绍，以期推动沉降预测技术的发展，有助于西南山区有砟轨道高速铁路线下工程沉降变形分析和评估工作。本书既有理论模型，又有实证分析，可作为高速铁路建设技术人员和高等院校相关专业本科生、研究生的参考用书。

参加课题研究的还有高玉明、陈林、毕立栋、饶雄、王作钰、张桥、蒋树平、李开兰等，他们为本书的完成提供了许多研究成果和实践经验。参加编写的还有王昊天、郑亚辉、齐华等，在此一并表示衷心的感谢。

在资料的收集、调研和写作过程中，作者得到了中铁第四勘测设计院集团有限公司、渝万铁路有限公司、西南交通大学等单位有关领导、专家和学者的大力支持和热忱帮助，谨向他们表示诚挚的谢意。

书中参阅了许多国内外著作、学术论文等文献资料，在此谨向文献的作者表示由衷的感谢。

由于作者水平有限，不妥之处敬请批评指正。

编著者

2021年5月

目 录

1	绪 论	001
1.1	沉降预测模型研究现状	001
1.2	沉降预测模型分类	004
1.3	沉降预测模型选择	004
2	双曲线模型	006
2.1	基本原理	006
2.2	实际应用	007
3	三点模型	016
3.1	基本原理	016
3.2	实际应用	017
4	抛物线模型	023
4.1	基本原理	023
4.2	实际应用	023
5	指数曲线模型	029
5.1	基本原理	029
5.2	实际应用	031
6	沉降速率模型	036
6.1	基本原理	036
6.2	实际应用	036

7	星野模型	042
7.1	基本原理	042
7.2	实际应用	043
8	Asaoka 模型	048
8.1	基本原理	048
8.2	实际应用	049
9	泊松曲线模型	054
9.1	基本原理	054
9.2	实际应用	055
10	灰色理论预测模型	060
10.1	基本原理	060
10.2	实际应用	065
11	人工神经网络	077
11.1	基本原理	077
11.2	实际应用	079
12	ARMA 模型	085
12.1	基本原理	085
12.2	实际应用	086

13	皮尔曲线模型	092
13.1	基本原理	092
13.2	实际应用	095
14	Sloboda 模型	101
14.1	基本原理	101
14.2	实际应用	101
15	朗格缪尔模型	107
15.1	基本原理	107
15.2	实际应用	107
16	Boltzmann 模型	113
16.1	基本原理	113
16.2	实际应用	113
17	Gompertz 模型	119
17.1	基本原理	119
17.2	实际应用	120
18	Kalman 滤波模型	125
18.1	基本原理	125
18.2	实际应用	126
19	幂指数函数模型	131
19.1	基本原理	131
19.2	实际应用	133

20	对数曲线模型	138
20.1	基本原理	138
20.2	实际应用	138
21	Richards 模型	143
21.1	基本原理	143
21.2	实际应用	144
22	移动算数平均预测模型	149
22.1	基本原理	149
22.2	实际应用	150
23	Weibull 曲线模型	155
23.1	基本原理	155
23.2	实际应用	155
	参考文献	161

1 绪 论

1.1 沉降预测模型研究现状

在沉降预测推算方面，著名的一维固结理论由 Terzaghi 在 1923 年提出。根据 Terzaghi 的一维固结理论，得到对于弹性土体的单向固结孔隙水压力解析解，也就是得到了反映孔隙水压力消散程度的固结度 U 与土体变形间的函数关系，所以土体压缩变形的过程符合指数曲线发展规律，沉降曲线也就拟合于指数曲线。《地基处理手册》《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)，以及国内的一些文献均推荐采用指数曲线法。不过使用指数曲线法计算，起点宜选择在曲线变缓段，而且要求恒载一年以上，预报结果的最初一段和实际相差较大，如果在曲线后段选择计算起始点，推算出的最终沉降就较为接近实测值。

固结度对数配合法（三点法）是基于曾国熙提出的一维固结度方程 $U = 1 - \alpha e^{-\beta t}$ 推导而出的，其中 α 、 β 为与地基排水条件、地基土性质等有关的参数，从而导出公式 $S_t = (S_\infty - S_d) \cdot (1 - \alpha \cdot e^{-\beta t}) + S_d$ ，其中 S_∞ 为最终沉降， S_d 为瞬时沉降，地质沉降最后由 $s-t$ 算出。

经过一个工程实例的检验，魏汝龙（1993 年）认为软黏土压缩曲线的整个形状更符合双曲线。双曲线法是沉降变形计算方法中较为常用的方法之一，从沉降与时间曲线的后部取任意两点，就可以预测最终沉降以及任意时间的沉降变形。但是双曲线法同样存在一个局限性，即只能在沉降基本趋于稳定的曲线后段取点计算，如果在曲线前段应用便会出现较大偏差。国内的很多工程也采用了双曲线的沉降推算方法。也有不少学者以此为基础，在特定的工程条件下，改进了传统双曲线法：例如泊松双曲线法、修正双曲线法和复合双曲线法。复合双曲线法对于土的本构关系做了线弹性假设，这种假设对于推算以后有填土情况下的未来沉降会有一定的误差。

Asaoka（1978 年）将 Mikasa 在一维固结状态下用体积应变来表示的固结方程，表示为一个含有待定系数的级数形式的微分方程，利用已有的沉降观测资料求出这些待定系数，然后根据这些系数带回原方程来预估总沉降量，即 Asaoka 法，也称为浅岗法。但是 Asaoka 法及泊松曲线法只能在数据是等时间距的条件下使用，然而工程实际中的观测数据很难满足这一要求。

另外，根据实测的沉降数据发展变化的特点，国内外学者也提出了一些其他的沉降推算方法。邓聚龙（1982 年）提出了灰色预测模型 GM(1, 1)，其基本思想是在一定程度上对无规则的数据序列做变缓，得到比较有规律的序列，从而可以比较准确地用

曲线逼近,其实质就是将指数函数作为拟合函数,对等时间距沉降数据序列进行拟合。 $GM(1,1)$ 只能描述单调的变化过程,要求沉降数据必须等时间距数据,如荷载突然变化,则所建立模型精度可能就会达不到较为理想的效果。对于实测时间较短,要求推算的日期较短时,用灰色系统理论更为合适。

目前国内对基于实测数据的沉降预测方法已经开展了很多相关方面的研究:

陈善雄、王星运等基于武广高速铁路路基沉降量级小、数据相对波动大的实测数据,探讨了指数曲线法对无轨道路基沉降预测的适用性,并把三点法的思想引入指数曲线模型,对指数曲线法进行了优化和改进,而且分析了3点修正的指数曲线模型的特性。

罗浩、马建林等根据北京环线特大桥的沉降观测数据提出了“变形过程指数法”。该方法在预测模型中加入了荷载变化,以及与土层性质、桩基布置、施工方法和工艺等有关参数 α ,并且讨论该新模型的特性以及变形指数 α 的建议取值。

高燕希、莫志兵等根据湖南省岳阳市城陵矶(松阳湖)进港道路工程,针对该工程软土地区的沉降数据进行分析,对指数曲线法进行了优化,并讨论了3点的取值不同对最后预测结果的影响。总结并提出,对于该工程,选取3点的时间越晚,时间跨度越大,拟合精度就越高,预测结果也就越准确。

杨涛、李国维等针对在软土中采用分级施工方法修筑的路基,在传统的双曲线沉降预测方法的基础上提出了新的双曲线预测模型,新模型考虑了土体变形的非线性和固结性随荷载的变化。即将沉降拟合方程中的两个待定参数分别在两个不同荷载级中确定,利用有较长预压期的前一级实测沉降,确定与土的固结性质有关的参数,待预测沉降荷载级的最终沉降量由该级较短预压期内实测沉降量确定。

王星运、陈善雄等以某铁路客运专线施工现场观测数据为依据,针对高速铁路路基小变形的特点,对双曲线法、三点法、指数曲线法和Asaoka法这4种方法在小变形路基情况下的适用性进行了研究,并探讨了这4种方法选取不同时间起点和样本值的起止时间间隔对相关系数的影响,且验算后期观测值的预测效果,研究表明:数据的波动会造成指数曲线法无法计算;沉降数据波动较小时,双曲线法、三点法、Asaoka法的拟合效果均较好;当沉降数据波动较大时,仅三点法、Asaoka法的拟合效果较好,双曲线法较差。

许小健、李士奎等提出对软土地基沉降预测Gompertz曲线的参数拟合是一个非线性优化问题,如果对其参数采用传统方法进行估计,会给最终估计的结果带来很大误差,因此,应用改进的差分进化算法(AADE算法)对沉降预测Gompertz曲线模型的参数进行优化拟合,大大提高了计算的速度、精度及通用性。

王志亮、黄景忠等基于直线最小二乘法和抛物线插值法编制了Asaoka法预测地基最终沉降的程序,并探讨了时间间隔 Δt 对Asaoka法的预测结果及其相关指标的影响,同时还给出了 Δt 的建议取值范围。

彭满红、徐许杭探讨了应用 Asaoka 法进行越级预测的方法,进而提出了该法图解中每级荷载下沉降数据对应的直线在纵坐标轴上截距与路堤高度之间的近似关系,并且结合某工程实例进行研究,得到令人满意的结果精度。

张成良、刘小泉采用江苏沿江高速公路常熟段的沉降观测资料,系统地对 Asaoka 法从理论基础到沉降递推结果进行分析,并利用三次样条插值法来处理非等时间间隔的沉降数据,结果表明这种处理方法是可行的。

李洪然、张阿根等在传统 GM(1,1)灰色模型的基础上引入了参数累积估计方法来代替最小二乘法,从而构建了参数累计估计的灰色沉降预测模型。并以上海地面沉降的观测数据为依据,证实了模型的可行性,预测结果给出了上海沉降的发展趋势,为地面沉降的合理防治提供了帮助。

常方强、涂帆等以福建泉州大坪山隧道连接线道路工程为依托,通过对沉降数据及 Verhulst 预测模型的分析,得出该模型有效削弱原始数据中不规则数据随机性的影响,具有很强的适应性。尽管施工期的预测值与实测值有一定差距,但随着时间的增长,二者逐步接近,因此该模型可用于最终沉降的预测。

李宗坤、乔小琴等针对传统 GM(1,1)模型的不足,分别从提高原始序列的光滑度、优化背景值、优化时间响应函数三方面对其进行了改进,建立了一种新的 GM(1,1)模型,并将改进了的模型应用于大坝沉降预测中,结果显示,新的 GM(1,1)模型拟合预测精度明显高于传统模型。

杜颜良、姬来等以京津城际客运专线沉降数据为基础,分别采用传统灰色系统和修正灰色预测模型对试验段的铁路路基进行沉降预测,研究结果表明:一方面,因为修正灰色预测模型对原始资料中已有信息的利用更加充分,所以,模型的精度更高;另一方面,修正灰色预测模型突破了传统灰色预测模型等间隔时序系统的限制,拓宽了模型在实际预测中的适用范围。因此,在实际应用中,推荐采用修正的非等时距灰色预测模型。

蔡君君、王星华将灰色理论应用到桥梁群桩基础的工后沉降预测当中。通过应用等时距 GM(1,1)模型及改进的新陈代谢模型对沉降进行预测,再与蕴藻浜特大桥一墩的沉降观测资料的对比分析,证明文中提出的工后沉降灰色理论预测方法,在工程实际中是可行的。

总体上在沉降预测方面存在以下不足:目前沉降预测模型较多,但由于推导公式假设条件有所不同,或因地基土的物理力学性质不同,因而,各种推算方法对于某一地区的适用程度也不一样,需要结合具体工程项目中沉降变形的特点,选择合适的预测方法进行沉降预测分析。此外,高速铁路沉降曲线具有“小量级、大波动”特性,而目前国内外对于沉降预测方法的研究大多针对沉降变形量较大的数据进行分析,而关于量级小、相对波动大情形下的沉降预测方法的研究甚少,对于高速铁路而言,缺乏相关的经验。

因此，需要结合高速铁路线下工程的结构特征、地质特征以及沉降变形量级小、数据相对波动大等特点，对沉降预测方法进行系统分析和选择，得到稳定性好、精度高、操作方便的预测方法。

1.2 沉降预测模型分类

目前，高速铁路路基工后沉降值的主要计算方法的基本思路是：通过分析地基现场前期实测的沉降数据，预测沉降发展的规律，推算后期工后沉降量，并由此指导现场的施工。基于这种思路的沉降预测方法大致可分为 3 类（见表 1.1）：一是曲线拟合法，这类方法一般是用简单函数来拟合沉降的发展规律，有些方法有一定的理论基础，如双曲线法、指数曲线法、星野法、三点法、Asaoka 算法（浅岗法）、沉降速率法等；二是系统理论法，如灰色系统理论法、神经网络法等；三是数值分析法，这类方法一般是先建立有限元法模型，然后反演计算参数，最后正演预测后期沉降。这 3 类方法中第一类方法在工程中运用相当广泛，例如拓展双曲线就在德国相关工程中得到过成功的运用。

表 1.1 沉降预测方法分类

分 类	预测方法
曲线拟合法	双曲线法、指数曲线法、星野法、三点法、Asaoka 算法（浅岗法）、沉降速率法等
系统理论法	灰色系统理论法、神经网络法等
数值分析法	参数反演法

1.3 沉降预测模型选择

铁路的沉降观测是验证设计与指导施工的重要手段，以沉降观测数据为基础进行分析，选择适当的沉降预测方法，可以推算地基的最终沉降量，确定铺筑路面的时间。但由于沉降受多种因素的影响，所以在沉降观测资料的分析工作中，很难找到一种适合各种情况的完善方法来确定沉降量，往往需要采用多种不同的方法来分析实测沉降观测资料，并根据多种方法得出的结果进行分析比较，以最终确定采用哪种方法。而不同的方法有不同的要求，在合理选择沉降预测方法的同时还应充分考虑各沉降预测方法的适用性。现有规范推荐的方法有双曲线模型、指数曲线模型、三点模型、沉降速率模型等；常用的还有 Asaoka 模型、GM(1, 1) 灰色模型、Gompertz 模型、皮尔曲线模型、Weibull 曲线模型、人工神经网络模型等。这些方法中大都具有各自的适用性，对实测沉降数据都有一定的要求。沉降预测模型的适用性如表 1.2 所示。

表 1.2 沉降预测模型的适用性

预测模型	对实测数据的要求	是否包含次固结
双曲线模型	恒载期沉降数据	是
Gompertz 模型	全沉降曲线	是
Pearl 曲线模型	全沉降曲线	是
Weibull 曲线模型	全沉降曲线	是
指数曲线模型	需沉降曲线拐点数据	是
Asaoka 模型	等时距, 恒载期	否
GM (1, 1) 灰色模型	等时距, 恒载期	否
三点模型	恒载期沉降数据, 三个数据点等时距	否
沉降速率模型	自加载起的所有加荷及沉降数据	否
神经网络模型	等时距 (处理)	是
Boltzmann 模型	全沉降曲线	是
Richards 模型	全沉降曲线	是
泊松曲线模型	静压期观测, 等时距	否

2 双曲线模型

2.1 基本原理

曲线拟合, 是选择一条适当的连续曲线拟合离散观测数据 (x_i, y_i) , 从而得到 y 关于 x 的近似函数 $y = f(x)$ 。在沉降预测过程中, y 则表示沉降量, x 表示沉降时间, 根据任意时间点即可求得预测沉降量, 该公式代表了随着沉降时间的变化, 沉降量随之变化的沉降规律。

双曲线法是曲线拟合法的一种, 是指沉降量的变化与沉降时间呈双曲线形式, 当沉降量逐渐趋于稳定时, 双曲线的末端延长至某一相对固定值, 以此来推算到达某个时间点取最终沉降量。双曲线法的基本方程为

$$S_t = S_0 + \frac{t - t_0}{\alpha + \beta(t - t_0)} \quad (2-1)$$

式中: S_t 为任意时刻 t 的沉降量; S_0 为时刻 t_0 的沉降量; α 、 β 为待定系数。当 $t \rightarrow \infty$ 时, 即 $(t - t_0) \rightarrow \infty$, 则由公式 (2-1) 可得出最终的沉降量

$$S_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} S_t = S_0 + \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t - t_0}{\alpha + \beta(t - t_0)} = S_0 + \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{\alpha}{(t - t_0)} + \beta} = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (2-2)$$

式中: S_∞ 为最终沉降量; S_0 为时刻 t_0 的沉降量。

公式 (2-1)、(2-2) 中都存在待定系数 α 、 β , 因此, 利用双曲线法预测沉降量就要先求解待定系数 α 、 β 。为了求解待定系数 α 、 β , 将公式 (2-1) 改写为

$$\frac{\Delta t}{\Delta S} = \frac{t - t_0}{S_t - S_0} = \alpha + \beta(t - t_0) = \alpha + \beta \Delta t \quad (2-3)$$

由公式 (2-3) 可知, 待定系数 α 、 β 分别为 $\frac{\Delta t}{\Delta S}$ 与 Δt 直线方程图中的截距和斜率。

因此, 可通过已知的实测沉降数据作图求解待定系数 α 、 β , 再代入公式 (2-1) 就可以求解任意时刻 t 的沉降量 S_t 。此外, 由公式 (2-2) 可知, 最终沉降量与待定系数 α 无关, 只由选择的初始时刻的沉降量 S_0 和待定系数 β 共同决定, 常取 $t_0 = 0$, 则有 $S_0 = 0$, 此时最终沉降量由待定系数 β 决定。

2.2 实际应用

为了对各模型的建模精度进行比较, 本节从工程实际出发, 从重庆至万州铁路(简称“渝万铁路”)中抽取了3段典型路基为例进行分析, 其施工里程分别为DK84+920~DK85+760、DK169+737~DK171+031、DK180+418~DK181+126, 其中DK84+920~DK85+760段路基在施工过程中进行了加固和防护措施(包含对基地增加土工格栅、水泥搅拌桩或多向水泥搅拌桩), 后两段路基填土高度5~7m, 为本线路路基填筑高度较高段, 3段路基填筑完成后观测最短周期已达6个月, 观测频次满足设计及相关文件要求。

2.2.1 DK84+920~DK85+760段

DK84+920~DK85+760段地质情况为: 背斜成条状中低山, 向斜成宽缓低山丘陵谷地, 构造线与山脊一致, 呈北东向展布, 丘陵区内, 地形起伏较小, 条状低山区内, 地形起伏较大, 地势陡峻。此段主要地质问题有: 顺层、岩溶、岩溶水、煤层瓦斯和采空区、软土、松软土等。沿线不良地质主要有: 地震区(及活动性断裂)、滑坡、溜坍、危岩落石、岩堆、岩溶、岩溶水、泥石流、断层破碎带、顺层、浅层天然气、泥岩风化剥落、人工填土等。从中选取测点0085500G1、0085500G2和0085500L1进行所得数据统计, 观测时间从2014年12月29日开始, 到2015年8月1日为止。观测时间及沉降数据如表2.1、表2.2和表2.3所示。

表 2.1 0085500G1 观测时间及沉降量

观测期次	1	2	3	4	5	6	7	8
天数/d	0	3	6	9	12	15	18	21
沉降量/mm	0.00	0.76	1.49	2.31	3.07	3.65	4.26	4.55
观测期次	9	10	11	12	13	14	15	16
天数/d	24	29	34	39	44	49	64	69
沉降量/mm	5.33	5.81	6.22	6.50	6.82	7.10	6.75	7.05
观测期次	17	18	19	20	21	22	23	24
天数/d	74	79	84	89	103	117	131	145
沉降量/mm	6.83	7.02	6.74	7.16	6.98	6.85	7.03	6.84
观测期次	25	26	27	28	29			
天数/d	159	173	187	201	215			
沉降量/mm	6.96	6.82	6.97	6.72	6.94			

表 2.2 0085500G2 观测时间及沉降量

观测期次	1	2	3	4	5	6	7	8
天数/d	0	3	6	9	12	15	18	21
沉降量/mm	0.00	0.81	1.61	2.42	3.26	3.88	4.41	4.85
观测期次	9	10	11	12	13	14	15	16
天数/d	24	29	34	39	44	49	64	69
沉降量/mm	5.56	5.93	6.42	6.66	6.99	7.32	6.89	7.23
观测期次	17	18	19	20	21	22	23	24
天数/d	74	79	84	89	103	117	131	145
沉降量/mm	7.46	7.30	7.46	7.33	7.39	7.76	7.38	7.61
观测期次	25	26	27	28	29			
天数/d	159	173	187	201	215			
沉降量/mm	7.25	7.55	7.30	7.58	7.21			

表 2.3 0085500L1 观测时间及沉降量

观测期次	1	2	3	4	5	6	7	8
天数/d	0	3	6	9	12	15	18	21
沉降量/mm	0.00	0.68	1.13	1.64	2.20	2.57	3.04	3.30
观测期次	9	10	11	12	13	14	15	16
天数/d	24	29	34	39	44	49	64	69
沉降量/mm	4.07	4.39	4.75	5.14	5.41	5.64	5.78	5.63
观测期次	17	18	19	20	21	22	23	24
天数/d	74	79	84	89	103	117	131	145
沉降量/mm	5.40	5.63	5.30	5.77	5.58	5.41	5.65	5.41
观测期次	25	26	27	28	29			
天数/d	159	173	187	201	215			
沉降量/mm	5.68	5.58	5.76	5.55	5.67			

以沉降数据作为样本值进行模型建模，模型的实测结果与预测结果如图 2.1 ~ 图 2.3 所示，沉降预测成果如表 2.4 所示。

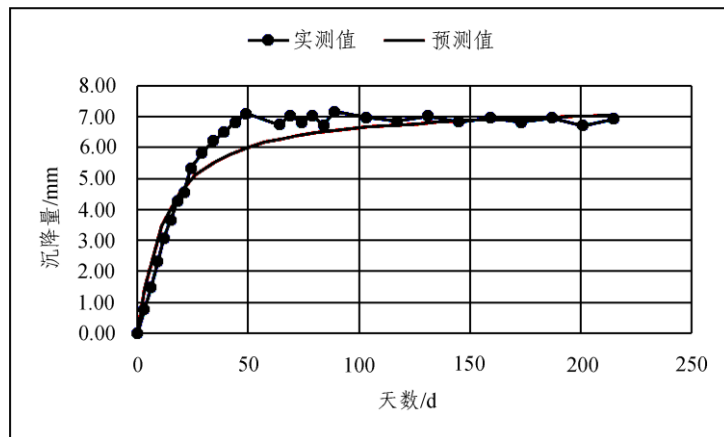


图 2.1 双曲线模型在 0085500G1 的实测曲线与预测曲线对比图

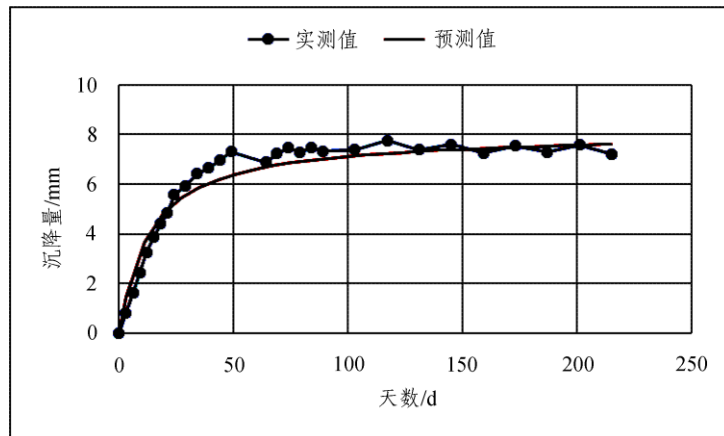


图 2.2 双曲线模型在 0085500G2 的实测曲线与预测曲线对比图

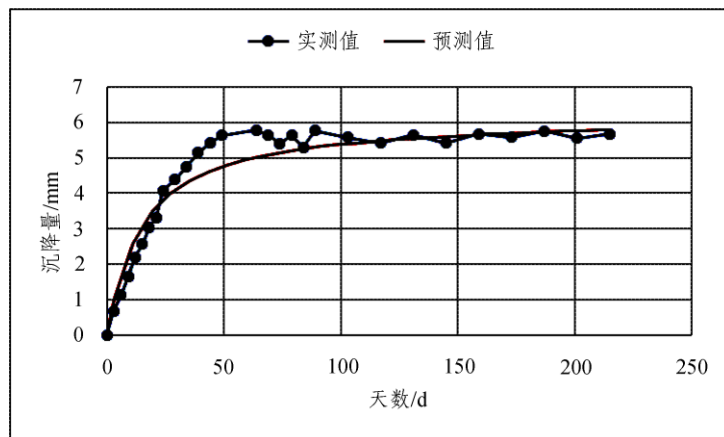


图 2.3 双曲线模型在 0085500L1 的实测曲线与预测曲线对比图

表 2.4 DK84 + 920 ~ DK85 + 760 段沉降预测成果表

测点编号	实测总沉降量/mm	预测模型	预测工后沉降量/mm	相关系数	S_t/S_∞
0085500G1	6.94	双曲线模型	0.51	0.972	0.930
0085500G2	7.21	双曲线模型	0.86	0.980	0.890
0085500L1	5.67	双曲线模型	0.51	0.970	0.920

2.2.2 DK169 + 737 ~ DK171 + 031 段

DK169 + 737 ~ DK171 + 031 段地质情况为：背斜成条状中低山，地势陡峻，向斜成平状低山区，深切沟谷处砂岩多形成陡崖，地形起伏较小。沿线主要地质问题有：顺层、软土、松软土、泥岩风化剥落等。沿线主要的特殊岩土为：人工弃土、软土、松软土等。从中选取测点 0170495L2、0170900L2 和 0171031L2 进行所得数据统计，其中，0170495L2 和 0170900L2 的观测时间从 2015 年 3 月 17 日开始，到 2015 年 12 月 8 日为止，0171031L2 的观测时间从 2015 年 3 月 29 日开始，到 2015 年 12 月 8 日为止。观测时间间隔及沉降数据如表 2.5、表 2.6 和表 2.7 所示。

表 2.5 0170495L2 观测时间及沉降量

观测期次	1	2	3	4	5	6	7	8
天数/d	0	1	2	3	4	5	12	14
沉降量/mm	0.00	0.89	1.62	2.82	2.89	3.90	5.01	6.77
观测期次	9	10	11	12	13	14	15	16
天数/d	28	31	32	33	34	36	37	44
沉降量/mm	7.58	8.39	8.73	8.90	9.02	8.83	9.25	10.12
观测期次	17	18	19	20	21	22	23	24
天数/d	47	51	54	57	64	71	78	85
沉降量/mm	10.37	10.80	10.30	10.77	10.62	10.57	10.89	10.37
观测期次	25	26	27	28	29	30	31	32
天数/d	92	99	106	113	128	144	159	175
沉降量/mm	10.26	10.73	10.53	10.21	10.30	10.76	10.16	10.63
观测期次	33	34	35					
天数/d	205	236	266					
沉降量/mm	10.39	10.74	10.40					

表 2.6 0170900L2 观测时间及沉降量

观测期次	1	2	3	4	5	6	7	8
天数/d	0	1	2	3	4	5	12	13
沉降量/mm	0.00	0.81	1.51	3.28	3.40	4.47	5.99	7.88
观测期次	9	10	11	12	13	14	15	16
天数/d	14	15	18	22	24	26	31	32
沉降量/mm	9.18	8.83	8.74	9.19	9.90	9.47	10.21	10.29
观测期次	17	18	19	20	21	22	23	24
天数/d	33	34	36	37	44	47	51	54
沉降量/mm	10.61	10.69	10.88	11.21	11.37	11.66	11.80	11.59
观测期次	25	26	27	28	29	30	31	32
天数/d	57	64	71	78	85	92	99	106
沉降量/mm	12.00	11.73	11.60	11.79	11.65	11.61	11.75	11.76
观测期次	33	34	35	36	37	38	39	40
天数/d	113	128	144	159	175	205	236	266
沉降量/mm	11.55	11.60	11.80	11.57	11.76	11.66	11.93	11.67

表 2.7 0171031L2 观测时间及沉降量

观测期次	1	2	3	4	5	6	7	8
天数/d	0	1	2	3	6	10	12	14
沉降量/mm	0.00	1.24	2.20	2.76	2.60	2.53	3.62	3.45
观测期次	9	10	11	12	13	14	15	16
天数/d	19	20	21	22	24	25	32	35
沉降量/mm	4.06	4.13	4.16	4.49	4.66	4.97	5.16	5.36
观测期次	17	18	19	20	21	22	23	24
天数/d	39	42	45	52	59	66	73	80
沉降量/mm	5.49	5.29	5.66	5.49	5.34	5.45	5.37	5.35
观测期次	25	26	27	28	29	30	31	32
天数/d	87	94	101	116	132	147	163	193
沉降量/mm	5.40	5.44	5.32	5.34	5.43	5.32	5.41	5.37
观测期次	33	34						
天数/d	224	254						
沉降量/mm	5.56	5.37						

以沉降数据作为样本值进行模型建模，模型的实测结果与预测结果如图 2.4~图 2.6 所示，沉降预测成果如表 2.8 所示。

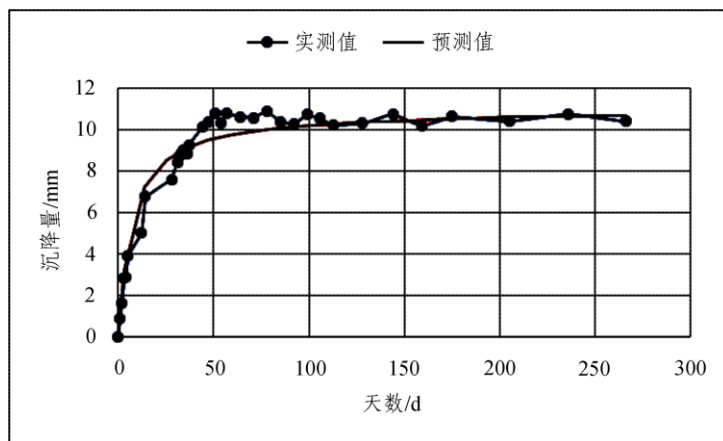


图 2.4 双曲线模型在 0170495L2 的实测曲线与预测曲线对比图

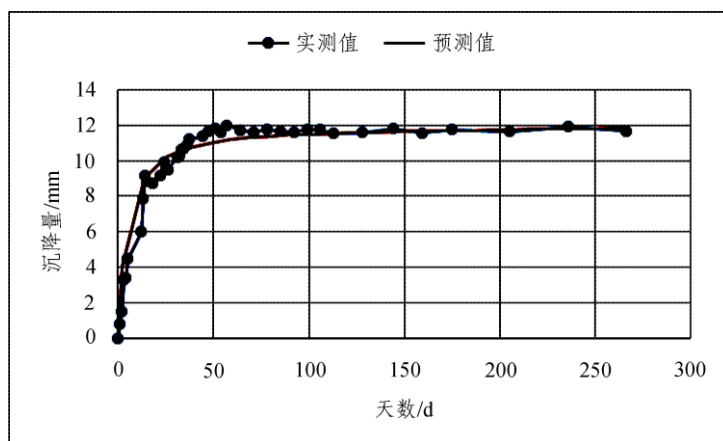


图 2.5 双曲线模型在 0170900L2 的实测曲线与预测曲线对比图

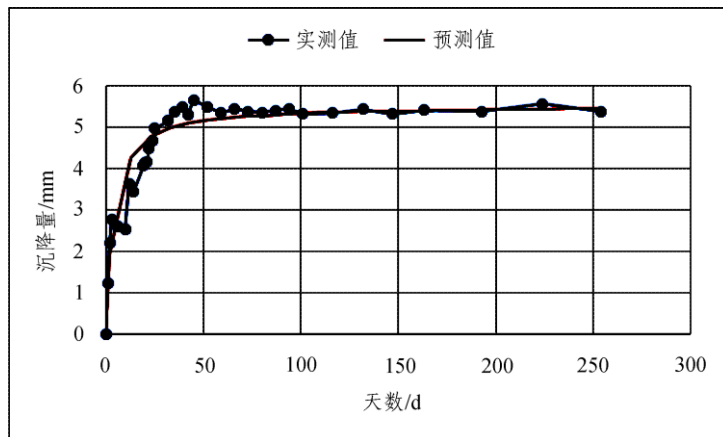


图 2.6 双曲线模型在 0171031L2 的实测曲线与预测曲线对比图

表 2.8 DK169 + 737 ~ DK171 + 031 段沉降预测成果表

测点编号	实测总沉降量/mm	预测模型	预测工后沉降量/mm	相关系数	S_t/S_{∞}
0170495L2	10.40	双曲线模型	0.52	0.755	0.950
0170900L2	11.67	双曲线模型	0.27	0.858	0.970
0171031L2	5.37	双曲线模型	0.14	0.853	0.970

2.2.3 DK180 + 418 ~ DK181 + 126 段

DK180 + 418 ~ DK181 + 126 段地质情况为：背斜成条状中低山，地势陡峻，向斜成平状低山区，深切沟谷处砂岩多形成陡崖，地形起伏较小。沿线主要地质问题有：顺层、软土、松软土、泥岩风化剥落等；沿线主要的特殊岩土为：人工弃土、软土、松软土等。从中选取测点 0180418G1、0180418G2 和 0180495G1 进行所得数据统计，观测时间从 2015 年 3 月 22 日开始，到 2015 年 12 月 26 日为止。观测时间间隔及沉降数据如表 2.9、表 2.10 和表 2.11 所示。

表 2.9 0180418G1 观测时间及沉降量

观测期次	1	2	3	4	5	6	7	8
天数/d	0	1	3	5	9	13	16	20
沉降量/mm	0.00	-0.44	1.16	1.62	1.82	2.33	3.30	3.15
观测期次	9	10	11	12	13	14	15	16
天数/d	23	27	30	35	50	65	80	96
沉降量/mm	4.42	4.61	4.17	4.79	3.94	5.64	5.26	5.64
观测期次	17	18	19	20	21	22		
天数/d	126	157	188	218	249	279		
沉降量/mm	4.67	5.53	4.58	5.48	5.80	4.75		

表 2.10 0180418G2 观测时间及沉降量

观测期次	1	2	3	4	5	6	7	8
天数/d	0	1	3	5	9	13	16	20
沉降量/mm	0.00	-0.31	1.05	1.52	1.83	2.33	3.30	2.97
观测期次	9	10	11	12	13	14	15	16
天数/d	23	27	30	35	50	65	80	96
沉降量/mm	3.81	4.07	3.66	4.30	3.57	5.15	4.77	5.15
观测期次	17	18	19	20	21	22		
天数/d	126	157	188	218	249	279		
沉降量/mm	4.02	5.29	4.36	5.00	5.69	4.04		

表 2.11 0180495G1 观测时间及沉降量

观测期次	1	2	3	4	5	6	7	8
天数/d	0	1	3	5	9	13	16	20
沉降量/mm	0.00	0.23	1.58	2.65	2.58	3.57	4.54	4.35
观测期次	9	10	11	12	13	14	15	16
天数/d	23	27	30	35	50	65	80	96
沉降量/mm	5.75	6.20	5.84	6.73	6.45	7.18	6.88	7.18
观测期次	17	18	19	20	21	22		
天数/d	126	157	188	218	249	279		
沉降量/mm	6.28	7.34	6.45	7.17	7.64	6.55		

以沉降数据作为样本值进行模型建模，模型的实测结果与预测结果如图 2.7~图 2.9 所示，沉降预测成果如表 2.12 所示。

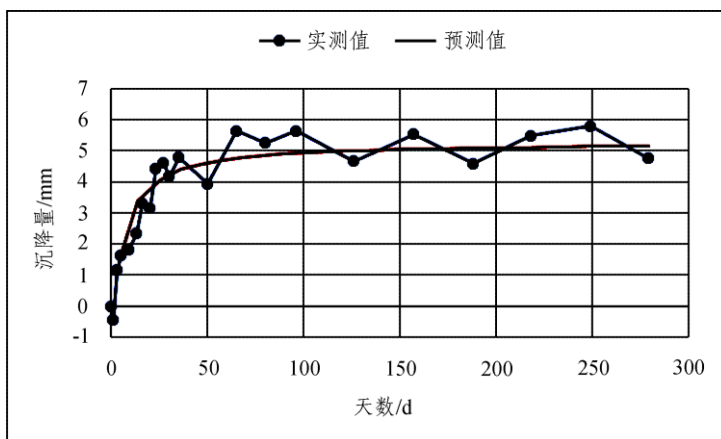


图 2.7 双曲线模型在 0180418G1 的实测曲线与预测曲线对比图

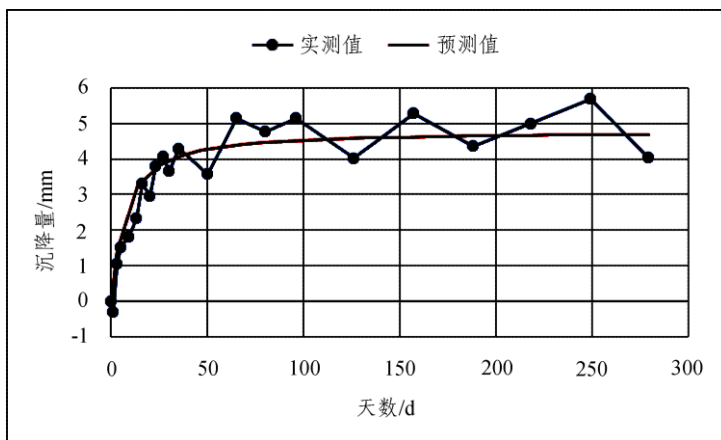


图 2.8 双曲线模型在 0180418G2 的实测曲线与预测曲线对比图

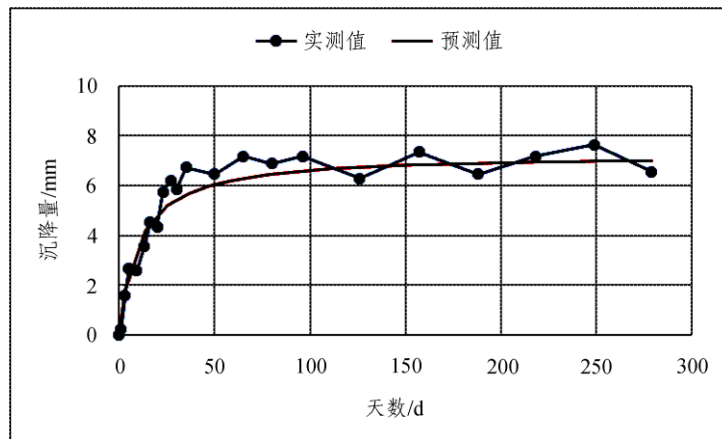


图 2.9 双曲线模型在 0180495G1 的实测曲线与预测曲线对比图

表 2.12 DK180 + 418 ~ DK181 + 126 段沉降预测成果表

测点编号	实测总沉降量/mm	预测模型	预测工后沉降量/mm	相关系数	S_i/S_∞
0180418G1	4.75	双曲线模型	0.58	0.954	0.890
0180418G2	4.04	双曲线模型	0.78	0.945	0.840
0180495G1	6.55	双曲线模型	0.76	0.967	0.900

通过运用双曲线模型对渝万铁路实测沉降数据的分析，得到以下结论：

(1) 从图 2.1 ~ 图 2.9 可以看出，双曲线模型均能大体反映出沉降趋势。但在不同的路基段拟合效果不同，如在 DK180 + 418 ~ DK181 + 126 段，实测数据波动较大，预测曲线的拟合效果较差。

(2) 从表 2.4、表 2.12 可以得出，DK84 + 920 ~ DK85 + 760 段、DK180 + 418 ~ DK181 + 126 段中实测沉降量与预测沉降量的相关系数较高，均大于 0.92，达到了《客运专线铁路变形观测评估技术手册》中的要求。而由表 2.8 可得，路基段 DK169 + 737 ~ DK171 + 031 段相关系数较低，均小于 0.92。 S_i/S_∞ 的值均大于 0.75，说明主要沉降已经完成。

综合以上分析，当数据波动较大时，双曲线模型预测结果和实测沉降量的相关系数较高，但拟合效果较差。当实测数据波动较小时，相关系数较低。故对于渝万高速铁路量级小、波动大的观测数据的适用性较差，稳定性较差。