

DOI: 10.11779/CJGE201904004

临线堆载影响下高速铁路基长期沉降预测方法

姚仰平¹, 王 珅¹, 王乃东¹, 张千里²

(1. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100083; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘 要: 高铁对变形十分敏感, 而铁道的临线区域又不可避免地会遭遇到土体等堆载的作用, 因此工程中十分关注临线堆载下铁路路基变形的情况和趋势。通常采取的办法是对特定监测点进行定期观测, 但是这种观测仅能反映铁路当前的变形情况, 无法对未来做出判断。如能基于已有数据对铁路路基未来变形进行有效的预测, 提早发现铁路未来某时间将会出现的预警变形, 对于高铁的安全运营管理具有重要意义。笔者等提出的蠕变沉降实用算法, 可根据有限沉降数据预测未来变形, 论证了使用蠕变实用算法预测高速铁路基长期变形的可行性并给出了根据已有实测数据时段计算特定误差下的有效预测范围的方法。

关键词: 高铁; 堆载; 沉降; 蠕变; 预测

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2019)04 - 0625 - 06

作者简介: 姚仰平(1960 -), 男, 北京航空航天大学教授, 博士生导师, 973 首席科学家, 主要从事岩土本构理论研究。E-mail: ypyao@buaa.edu.cn。

Prediction method for long-term settlements of high-speed railway subgrade under influences of nearby loads

YAO Yang-ping¹, WANG Shen¹, WANG Nai-dong¹, ZHANG Qian-li²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083; 2. Railway Construction Research Institute of China Railway Research Institute Group Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: The long-term settlement of high-speed railway subgrade usually occurs under the influences of the nearby loads, and it will result in unsafety of the high-speed running trains. A practical computation method for creep is proposed by Yao et al, and it can predict the future deformation according to the limited settlement data. Taking the simulating data from the ABAQUS software which can simulate the increasing subgrade settlement with time as examples, the feasibility of using the practical method for creep to predict the long-term deformation of high-speed railway subgrade is demonstrated, and the relevant method to calculate the effective range of the prediction under certain errors is also given. It is shown that by using the practical method for creep, we can accurately predict the deformation based on the existing data, and also can get the early warning deformation of the railway for the future. It is of great significance to the safe operation management of high-speed railways.

Key words: high-speed railway; load; settlement; creep; prediction

0 引 言

中国高铁技术在不断的发展下已经达到世界领先水平。高铁对变形十分敏感, 为保证高铁安全高速运行, 必须保持轨道的平顺性, 因此对路基沉降需要严格控制。但实际工程中, 铁道的临线区域经常遇到堆载的情况, 长期施加的堆载很可能导致路基的沉降变形, 给高铁运行带来隐患^[1-5]。因此工程中十分关注临线堆载下高速铁路基变形的情况和规律。通常采取的办法是对特定监测点进行定期的观测, 但是这种观测仅能反映铁路当前的变形情况, 无法对未来做出判断。如果能基于已有数据对未来变形进行有效的预测, 提

早发现铁路未来某时间将会出现的预警变形, 对于高铁的安全运营管理具有重要意义。

姚仰平等^[6-7]提出的蠕变沉降实用算法, 可根据有限沉降数据预测未来变形。如能将蠕变实用算法应用于高铁中, 则可实现对高铁蠕变变形的预测。

由于现场实测数据的缺失, 本文应用有限元计算的模拟沉降值代替工程实测值进行研究。首先采用考虑时间效应的 UH 模型^[8-9], 针对临线堆载影响下高速铁路基长期沉降问题进行有限元计算, 分析不同净间距

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672015, 51579005)

收稿日期: 2018 - 03 - 19

条件下高速铁路基的蠕变规律。胡晶等^[10]将某路基现场试验数据与考虑时间效应的 UH 模型的有限元预测结果进行了对比,表明基于 UH 模型的有限元方法可以较好的反映路基变形随时间的发展规律,因此本文利用基于 UH 模型的有限元方法对高铁长期变形进行计算,来模拟高速铁路基的实际沉降。

应用蠕变实用算法对模拟沉降进行预测,并将两者的结果进行比较,比较的一致性表明了使用蠕变实用算法预测高铁长期变形是可行的。

在此基础上,基于某一时段的有限元计算结果,根据蠕变实用算法,推算公式中的参数,对未来变形进行预测。再通过原有限元方法对未来变形进行计算。将预测结果与有限元计算结果进行比较,可找出给定误差范围下的有效预测时间范围。按照这样的方法,依次选取不同时间段的有限元结果,得到特定误差下相应的可预测时间范围,并建立所选时段与可预测时间的关系式。在实际工程中可基于本文的思路,根据已有实测数据计算特定误差下的有效预测范围。

1 本构模型

有限元计算采用考虑时间效应的 UH 模型。该模型采用 UH 模型的再加载公式计算瞬时变形,基于蠕变规律,建立蠕变时间与超固结度的关系,可以较好的反映变形随时间的发展规律。表 1 为考虑时间效应的 UH 模型的参数意义。

表 1 考虑时间效应的 UH 模型的参数意义

Table 1 Parameters of UH model considering time effects

参数	物理意义
M	临界状态应力比
λ	$e - \ln p$ 坐标下 NCL 的斜率
κ	$e - \ln p$ 坐标下回弹线的斜率
ν	泊松比
N	NCL 与轴 $p=1$ kPa 的交点
C_{α}	次固结系数

2 有限元建模

使用能够基于考虑时间效应的 UH 模型进行材料本构关系二次开发的有限元软件 ABAQUS^[11-12],计算铁道临线区域堆载影响下的高铁路基长期沉降变形。利用 ABAQUS 软件建立的三维模型如图 1 所示,沿轨道方向(纵向)总长 200 m,垂直轨道方向(横向)总长 300 m,地基深度 50 m。梯形截面的路堤高 3.5 m,上底长 13.6 m,下底长 24.1 m,路基下方地基为 CFG 桩复合地基。模型的结点总数 16698 个,单元总数为 14265 个,单元类型为 C3D8 单元。边界条件为四周

约束法向位移,底部约束 3 个方向位移。

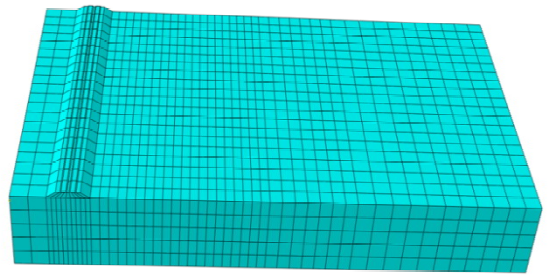


图 1 有限元模型网格

Fig. 1 Finite element model mesh

临线堆载取均布荷载 100 kPa,荷载面积纵向 40 m,横向 20 m。为了分析临线堆载距离对路基变形的影响,堆载与梯形路堤之间的净距离,分别取 0 m, 10 m 和 20 m 进行有限元计算。相关的模型参数取值如表 2 和表 3 所示。地基土本构模型使用考虑时间效应的 UH 模型,模型参数基于典型地基土确定;路基材料通常采用压密散体填料,因此本构模型选用考虑弹塑性的莫尔库仑模型;CFG 桩则采用弹性模型。

表 2 地基土的模型参数

Table 2 Model parameters of foundation soil

参数	取值	参数	取值
M	0.859	N	1.5
λ	0.0701	C_{α}	0.0045
κ	0.0277	重度/(kN·m ⁻³)	17
ν	0.3	初始孔隙比 e	0.95

表 3 路基和 CFG 桩材料的模型参数

Table 3 Model parameters of subgrade and CFG pile

名称	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角	黏聚力/kPa
路基	22	30	0.25	47.1	9.82
CFG 桩	25	1200	0.20	—	—

3 临线堆载对路基沉降的影响分析

3.1 参考线的选取

为了便于分析,将图 2 中 4 条参考线从左到右依次记为轨迹 1,轨迹 2,轨迹 3,轨迹 4。4 条参考线的中心点依次记作点 A,点 B,点 C 和点 D,其位置分别距离中心线左侧 4.4 m,左侧 0.6 m,右侧 0.6 m,右侧 4.4 m。其中矩形表示堆载区域。

3.2 路基长期蠕变沉降分布规律

针对参考点 A, B, C, D 这 4 点,用考虑时间效应的 UH 模型计算长期蠕变沉降,将不同堆载距离下的计算结果绘制于图 3~5 中,其中横坐标为蠕变时间,时间取为 5 a,纵坐标为沉降值。

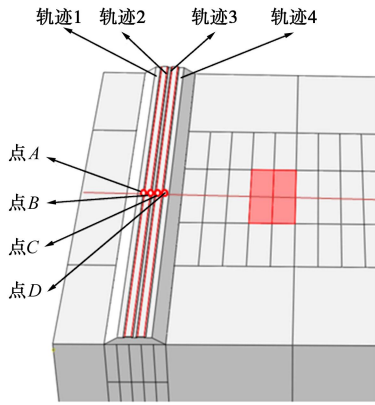


图 2 有限元模型分析的参考线

Fig. 2 Reference lines for finite element model analysis

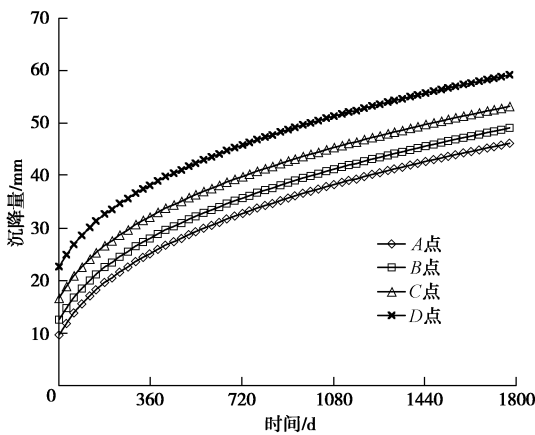


图 3 堆载距离 0 m 下路基参考点的长期蠕变沉降

Fig. 3 Long-term creep settlements of reference points of roadbed under 0 m-load

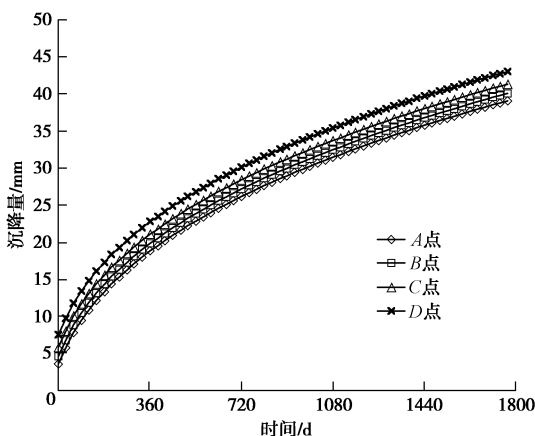


图 4 堆载距离 10 m 下路基参考点的长期蠕变沉降

Fig. 4 Long-term creep settlements of reference points of roadbed under 10 m-load

图 3 堆载距离为 0 m 时点 A 到点 D 的 5 a 后最终沉降值依次为 46.13, 49.07, 53.17, 59.18 mm。图 4 距离为 10 m 时点 A 到点 D 的 5 a 后最终沉降值依次

为 39.12, 40.14, 41.41, 43.07 mm。

图 5 表明堆载距离为 20 m 时, 4 个点的最终沉降值比较接近。由此可以看出, 当临线堆载距离为 20 m 以内时, 堆载影响下高速铁路基的沉降不均匀, 因此不建议在路基净间距 20 m 以内堆放堆载。在堆载距离达到 20 m 以上时, 不均匀沉降现象减小, 但是蠕变沉降量依旧会随时间持续增加, 其对高速铁路的安全运营是否会造成影响值得进一步研究。

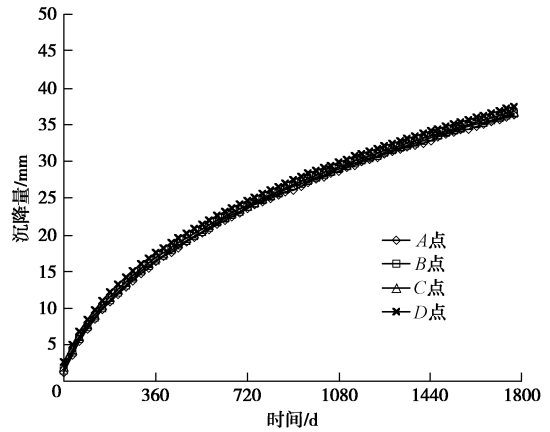


图 5 堆载距离 20 m 下路基参考点的长期蠕变沉降

Fig. 5 Long-term creep settlements of reference points of roadbed under 20 m-load

4 蠕变沉降实用算法

4.1 蠕变沉降实用算法公式介绍

姚仰平等提出的蠕变沉降实用算法^[6], 可以通过有限的沉降观测值来预测未来长期的蠕变沉降发展。在承德机场现场实测数据比对中, 该蠕变实用算法得到了验证^[7], 结果表明这一算法能够预测工程中所关心的蠕变沉降发展趋势。蠕变实用算法计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{s}{s_0} &= C_t \lg \left(\frac{t}{t_0} + A \right) - h_t, \\ A &= 10^{\frac{h_t}{C_t}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, s 为土体蠕变沉降量(mm), t 为经历的时间(d), C_t 是为反映蠕变速率的无量纲参数, h_t 为反映蠕变刚度的无量纲参数, A 为反映土体蠕变对超固结程度影响的中间量, t_0, s_0 为消除量纲的单位常量, 即 $t_0 = 1 \text{ d}, s_0 = 1 \text{ mm}$ 。

确定参数 C_t, h_t 可按照以下步骤:

(1) 中间量 A

分别选取已知数据中的 3 个相异点 $(t_1, s_1), (t_2, s_2)$ 以及 (t_3, s_3) , 并尽量使 3 点等时间距离。分别代入式 (1), 得

$$\left. \begin{aligned} \frac{s_1}{s_0} &= C_1 \lg \left(\frac{t_1}{t_0} + A \right) - h_1, \\ \frac{s_2}{s_0} &= C_1 \lg \left(\frac{t_2}{t_0} + A \right) - h_1, \\ \frac{s_3}{s_0} &= C_1 \lg \left(\frac{t_3}{t_0} + A \right) - h_1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

化简式(2), 并代入 $t_0=1$, $s_0=1$, 得

$$\frac{s_3 - s_1}{s_2 - s_1} = \frac{\lg \left(\frac{t_3 + A}{t_1 + A} \right)}{\lg \left(\frac{t_2 + A}{t_1 + A} \right)}. \quad (3)$$

式(3)为关于参数 A 的一元方程。可通过迭代等数值方法算得参数 A 的值。

(2) 参数 C_1 与 h_1

式(2)中第2式减去第1式并代入 $t_0=1$, $s_0=1$ 得

$$s_2 - s_1 = C_1 \lg \left(\frac{t_2 + A}{t_1 + A} \right), \quad (4)$$

再把得到的参数 A 代入式(4)可得参数 C_1 , 再由式(1)的第2式得

$$h_1 = C_1 \lg A. \quad (5)$$

(3) 参数微调

式(2)表明在 $s/s_0 - \lg(t/t_0 + A)$ 坐标系为直线, 将得到的参数 C_1 与 h_1 代入式中, 并将已知工程数据整理在 $s/s_0 - \lg(t/t_0 + A)$ 坐标系内, 检验得到数据点与直线的相关性, 若相关系数未达到接近1的水平, 需要对参数中的 C_1 进行微调, 直到已知数据点直线的相关系数达到要求。

4.2 蠕变实用算法对长期沉降的预测

前图3~5中显示, 最靠近堆载端的参考点 D 的长期沉降值最大, 因此本文通过有限元方法计算临线堆载距离为20 m, 荷载为100 kPa, 堆载面积为20 m × 40 m的情况下参考点 D 蠕变10 a的有限元计算结果。将10 a的有限元结果使用蠕变实用算法进行拟合, 与原有限元结果进行对比, 绘制于图6中。可以看出二者规律近似且吻合效果良好, 说明蠕变实用算法应用于高铁变形问题是可行的。

实际工程中要想实现通过已有观测数据预测未来变形, 需要解决两个问题: 一是采用何种方法实现这种预测? 二是在保证预测精度的前提下, 可预测的时间范围是多少? 前文已经论证了蠕变实用算法能够预测, 且预测效果良好; 本文将考虑时间效应的UH模型的有限元计算与蠕变实用算法相结合, 研究在预测精度的限定下, 可预测的时间范围。

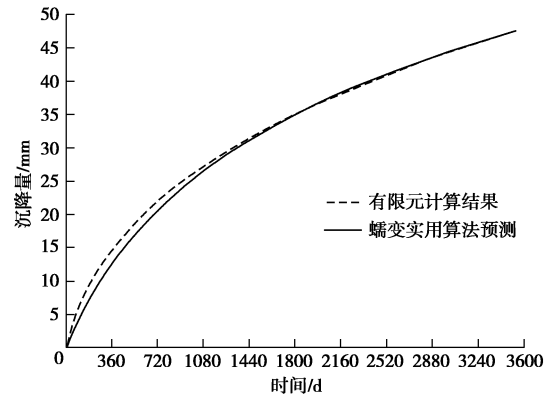


图6 蠕变实用算法结果与有限元结果对比

Fig. 6 Comparison between results by practical method for creep and finite element method

(1) 当已知数据为30 d时, 根据式(3)~(5)解出: $A=115.65$, $C_1=19.32$, $h_1=39.87$ 代入式(1)即可得到长期沉降预测值 s 的计算表达式:

$$s = 19.32 \lg(t + 115.65) - 39.87. \quad (6)$$

在误差为1 mm下, 将有限元结果与由式(6)得到的预测结果绘制于图7中。可以看出, 在允许误差为1 mm的情况下, 使用30 d的数据可以预测120 d的蠕变沉降。

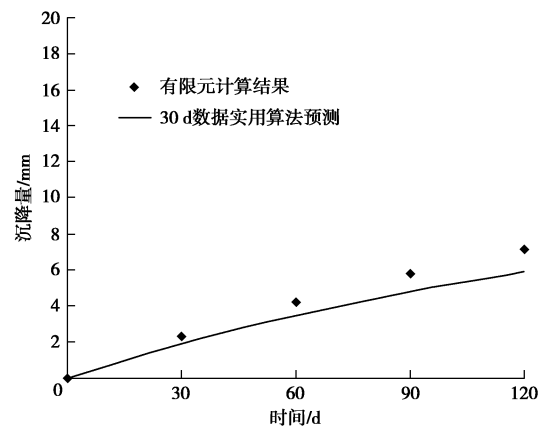


图7 预测误差1 mm下根据30 d数据预测结果

Fig. 7 Prediction based on 30 d-data within error range of 1 mm

(2) 用同样的方式, 使用已知90 d的数据预测沉降, 得到的计算参数为 $A=120$, $C_1=23.29$, $h_1=48.43$ 。

将使用90 d数据预测工后沉降的曲线绘制于图8中。同样取沉降误差范围为1 mm, 使用90 d数据可以预测到330 d。相较于使用30 d数据, 可以预测更久, 近乎可以预测一年的沉降。

(3) 再分别使用180, 360, 720, 1800 d的数据来预测长期蠕变沉降值, 允许误差范围都取为1 mm, 将结果绘制于图9~12中。

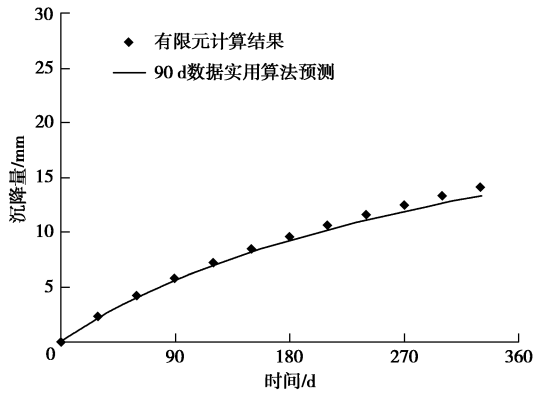


图 8 预测误差 1 mm 下根据 90 d 数据预测结果

Fig. 8 Prediction based on 90 d-data within error range of 1 mm

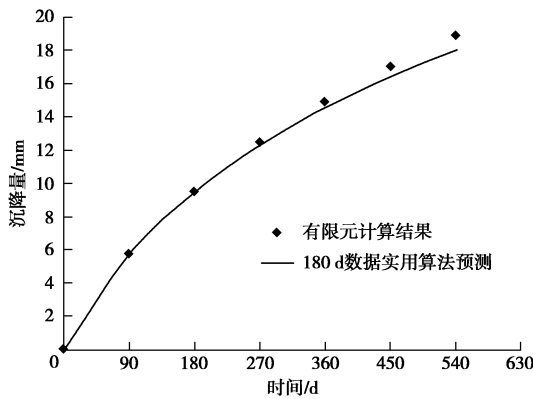


图 9 预测误差 1 mm 下根据 180 d 数据预测结果

Fig. 9 Prediction based on 180 d-data within error range of 1 mm

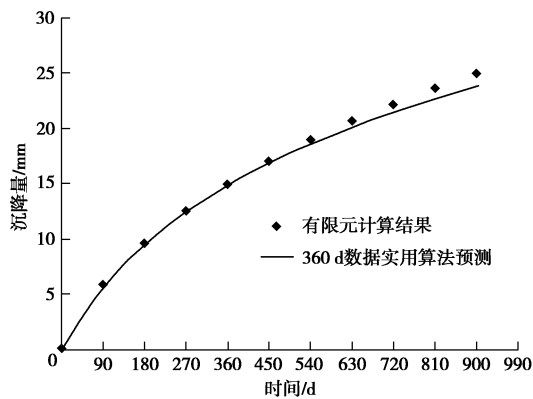


图 10 预测误差 1 mm 下根据 360 d 数据预测结果

Fig. 10 Prediction based on 360 d-data within error range of 1 mm

图 9~12 表明在定义允许误差范围为 1 mm 时, 根据 180 d 数据可以准确预测 570 d 蠕变沉降, 根据 360 d 数据可以预测 900 d 蠕变沉降, 根据 720 d 数据可以预测 1620 d 蠕变沉降, 根据 1800 d 数据可以预测 3480 d 蠕变沉降。

将前文已知数据时段与对应的可预测时间汇总于表 4。

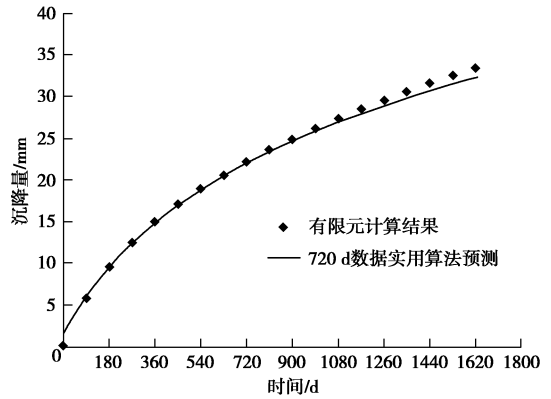


图 11 预测误差 1 mm 下根据 720 d 数据预测结果

Fig. 11 Prediction based on 720 d-data within error range of 1 mm

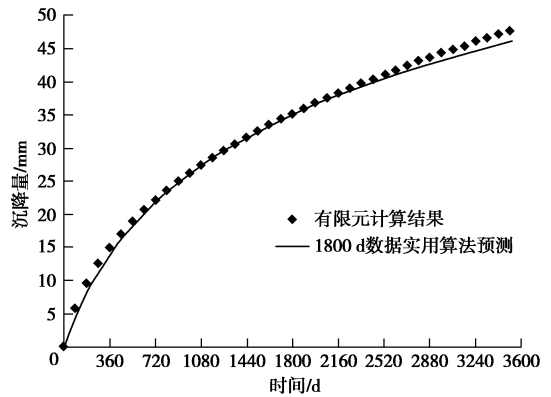


图 12 预测误差 1 mm 下根据 1800 d 数据预测结果

Fig. 12 Prediction based on 1800 d-data within error range of 1 mm

表 4 已知数据时段及对应的可预测时间 (1 mm 误差范围)
Table 4 Data periods and corresponding predictable time (error range of 1 mm)

数据时段/d	可预测时间/d	可预测时间/数据时段
30	120	4
90	330	3.67
180	570	3.17
360	900	2.5
720	1620	2.25
1800	3480	1.93

取已有数据时段为 t_m , 使用蠕变实用算法有效预测的时间为 t , 则通过 t/t_m 来表示可有效预测的时间与已有数据时段之间的比值。将表 4 数据整理绘制于图 13, 纵坐标为反映比值关系的 $\lg(t/t_m)$, 横坐标为 t_m 。

根据图 13 中数据点的变化趋势, 归纳出 t/t_m 与 t_m 之间的关系式如下:

$$\lg(t/t_m) = \kappa t_m^{-n} \quad (7)$$

其中, κ 和 n 为拟合参数, t 和 t_m 的单位为 d。

将图 13 中数据点按照式 (7) 的形式进行拟合, 得到 $\kappa=1.3$, $n=0.2$, 再代入式 (7) 得

$$\lg(t/t_m) = 1.3t_m^{-0.2} \quad (8)$$

图 13 中数据点和曲线的一致性反映了式 (7) 为有效

的。

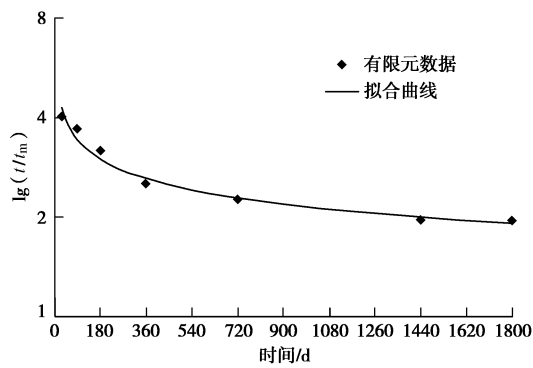


图 13 t/t_m 与 t_m 之间的关系

Fig. 13 Relationship between t/t_m and t_m

5 结 论

通过本文的分析计算, 得以下结论:

(1) 根据蠕变实用算法对有限元模拟结果进行预测, 并将两者的结果进行了比较, 表明使用蠕变实用算法预测高铁长期变形是可行的。

(2) 在使用蠕变实用算法预测未来变形时, 可以按照 $\lg(t/t_m) = \kappa t_m^{-n}$ 公式, 根据已有数据时段 t_m 计算特定误差下有效预测范围 t , 其中参数 κ 和 n 可以根据文中的方法拟合得出。

(3) 在实际工程中可基于本文的思路, 根据高铁路基的已有实测数据时段计算给定误差下的有效预测范围。

参考文献:

- [1] 王炳龙, 周顺华, 杨龙才. 高速铁路软土路基工后沉降试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, **31**(10): 1163 - 1167. (WANG Bing-long, ZHOU Shun-hua, YANG Long-cai. Experimental study on soft soil settlement of high-speed railway subgrade after construction[J]. Journal of Tongji University, 2003, **31**(10): 1163 - 1167. (in Chinese))
- [2] 王其昌. 高速铁路土木工程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1999. (WANG Qi-chang. Civil Engineering on the high-speed railway[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1999. (in Chinese))
- [3] 铁道第三勘察设计院. 京沪高速铁路设计暂行规定[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003. (Railway Third Survey and Design Institute. Temporary design provisions for Jing-Hu high-speed railway[M]. Beijing: China Railway Press, 2003. (in Chinese))
- [4] 曹新文, 蔡英, 苏谦. 高速铁路路基变形控制值的研究[J]. 路基工程, 1998(2): 38 - 41. (CAO Xin-wen, CAI

Ying, SU Qian. Research on the deformation control of high-speed railway subgrade[J]. Subgrade Engineering, 1998(2): 38 - 41. (in Chinese))

- [5] 黄珏鑫. 邻近堆载对深厚软土地区高速铁路桥梁桩基内力与变位影响分析[D]. 长沙: 中南大学, 2014. (HUANG Yu-xin. Analysis of adjacent surcharge impact to the internal force and displacement of high-speed railway bridge pile foundation in deep soft soil[D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese))
- [6] 姚仰平, 祁生钧, 车力文. 高填方地基工后沉降计算[J]. 水力发电学报, 2016, **35**(3): 1 - 10. (YAO Yang-ping, QI Sheng-Jun, CHE Li-wen. Computational method of post-construction settlement for high-fill embankments[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, **35**(3): 1 - 10. (in Chinese))
- [7] 姚仰平, 车力文, 祁生钧, 等. 高填方地基蠕变沉降计算方法研究[J]. 工业建筑, 2016, **46**(9): 25 - 31. (YAO Yang-ping, CHE Li-wen, QI Sheng-jun, et al. Study of creep settlement computation methods for high embankments[J]. Industrial Construction, 2016, **46**(9): 25 - 31. (in Chinese))
- [8] YAO Y P, HOU W, ZHOU A N. UH Model: Three-dimensional unified hardening model for over-consolidated clays[J]. Géotechnique, 2009, **59**(5): 451 - 469.
- [9] 孔令明, 罗汀, 姚仰平. 率相关本构模型的临界状态描述[J]. 岩土力学, 2015, **36**(9): 2442 - 2450. (KONG Ling-ming, LUO Ting, YAO Yang-ping. Description of critical state for rate-dependent constitutive models[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(9): 2442 - 2450. (in Chinese))
- [10] 胡晶, 姚仰平. 基于考虑时间效应 UH 模型的一维固结分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, **41**(8): 1492 - 1498. (HU Jing, YAO Yang-ping. 1D-consolidation analysis based on UH model considering time effect[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, **41**(8): 1492 - 1498. (in Chinese))
- [11] 姚仰平, 冯兴, 黄祥, 等. UH 模型在有限元分析中的应用[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 237 - 245. (YAO Yang-ping, FENG Xing, HUANG Xiang, et al. Application of UH model to finite element analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 237 - 245. (in Chinese))
- [12] 费康. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang. Applications of ABAQUS in the geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010. (in Chinese))