

高速公路岩溶路基沉降稳定性分析

薛兴龙

山东东方路桥建设有限公司 山东 临沂 276000

【摘要】：为分析岩溶区高速公路填方路基施工期沉降规律及稳定性，选取某岩溶路段 14 个监测断面、28 个测点开展连续沉降观测，并对不同监测时段、断面及左右幅沉降特征进行分析，结合指数渐近模型进行沉降预测。结果表明：路基沉降总体呈“前期较快、中期减缓、后期趋稳”的阶段特征，最终平均累计沉降约为 5.18 mm，最大累计沉降为 10 mm；不同断面及左右幅之间存在一定差异，右幅平均沉降总体高于左幅；随着施工推进，沉降速率持续降低，后期未见明显新增沉降。指数模型能够较好地反映实测沉降的渐近变化趋势。综合分析表明，研究路段施工期沉降总体趋于稳定，但局部沉降较大及差异明显断面仍需加强动态监测。

【关键词】：岩溶区；高速公路；路基工程；施工期沉降；监测分析；沉降预测

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.026

前言

随着高速公路建设向复杂地质区域延伸，岩溶区路基稳定性问题日益受到关注。岩溶地基中溶洞、溶隙及覆盖层分布具有明显非均质性，在地下水活动和工程荷载作用下，可能引发局部变形或岩溶塌陷，进而影响路基稳定性^[1-4]。地质与水文地质条件、岩溶空洞特征、上部荷载及覆盖层性质等，均会对地基变形产生影响^[1-4]。因此，有必要结合施工期现场监测，动态掌握路基实际变形状态。

施工监测可通过测点高程变化获取累计沉降、阶段沉降和沉降速率，进而分析沉降的时间演化与空间差异。现有研究已由最终沉降评价逐步拓展至施工过程动态监测、差异变形分析及沉降预测^[5-8]。对于监测期数有限的施工现场数据，指数渐近模型因参数少、形式简单，能够较好地描述沉降逐步趋稳的过程，具有较好的工程适用性^[5,7-8]。

基于此，本文以某高速公路岩溶区填方路基段为对象，布设 14 个监测断面，对施工期沉降数据开展分析。通过累计沉降、沉降速率、断面差异及左右幅对比，揭示路基沉降的时空演化特征及其对填筑过程的响应；进一步采用指数渐近模型拟合和预测沉降趋势，对施工期路基稳定性进行评价，为岩溶区填方路基施工监测与稳定性分析提供参考。

1 监测方案

研究区段共布设 14 个监测断面，各断面分别设置左右幅沉降测点，共计 28 个测点。地表沉降采用沉降板进行高程观测，观测仪器为 Trimble DiNi03 电子水准仪。监测自 2023 年 5

月 18 日至 2023 年 10 月 12 日，共开展 11 期观测，累计监测 147 d。

2 数据处理与分析方法

2.1 沉降特征分析方法

为进一步评价同一断面左右幅沉降差异，引入差异沉降量：

$$D_j = |S_{Lj} - S_{Rj}|$$

式中： D_j 为第 j 个监测断面的左右幅沉降差(mm)； S_{Lj} 、 S_{Rj} 分别为该断面左幅和右幅累计沉降量。通过比较不同断面的 D_j ，识别差异沉降相对明显的区段。

2.2 沉降预测及模型评价

根据实测沉降总体呈现随时间增长逐渐趋稳的变化特征，采用指数渐近模型描述施工期沉降发展过程：

$$S_{(t)} = S_{\infty}(1 - e^{-kt})$$

式中： $S_{(t)}$ 为时间 t 对应的累计沉降量(mm)； S_{∞} 为模型预测的最终沉降量(mm)； k 为沉降发展速率参数； t 为自首次观测起的累计时间(d)。模型采用前期监测数据进行参数拟合，并利用后期实测数据进行验证。预测效果采用决定系数 R^2 、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)进行评价：

3 路基施工期沉降变形特征及预测分析

3.1 沉降时间演化特征

对 28 个监测点 11 期沉降数据进行统计，得到各监测时段平均累计沉降及阶段平均沉降速率，结果见表 2。

表1 各监测时段平均沉降及填筑高度变化

观测日期	累计时间 /d	平均填土 高度/m	平均阶段 沉降 /mm	平均累计 沉降 /mm	平均沉降速 率 /(mm·d ⁻¹)
2023/5/18	0	0	0	0	—
2023/5/30	12	0.8	1.39	1.39	0.116
2023/6/14	27	1.2	1.36	2.75	0.09
2023/6/29	42	2	0.93	3.68	0.062
2023/7/14	57	2.4	0.68	4.36	0.045
2023/7/29	72	2.8	0.46	4.82	0.031
2023/8/16	90	3.6	0.25	5.07	0.014
2023/8/31	105	4.57	0.11	5.18	0.007
2023/9/15	120	5.14	0	5.18	0
2023/9/30	135	5.4	0	5.18	0
2023/10/12	147	5.63	0	5.18	0

由表1可知,监测开始后的前42 d,累计平均沉降由0增至3.68 mm,占最终平均累计沉降量的约71.0%,表明该阶段为沉降集中发展期。42~90 d期间,累计平均沉降进一步增至5.07 mm,但沉降速率由0.062 mm/d逐步降至0.014 mm/d,沉降增量明显减小。至第90 d时,累计沉降已达到最终监测值的约97.9%。90 d以后,平均沉降发展进一步放缓;第105 d累计平均沉降达到5.18 mm,至第147 d基本保持稳定。考虑到原始监测数据按毫米级记录,后期出现的“0 mm”沉降增量应理解为在现有观测精度下未监测到明显新增沉降,并不意味着地基变形完全停止。总体而言,施工期路基沉降主要集中于前、中期,后期沉降速率持续衰减并逐渐趋于稳定。

3.2 沉降空间分布特征

为分析路基沉降沿线路方向的空间差异,对最后一期14个监测断面的左右幅累计沉降进行统计。从空间分布来看,各断面最终平均累计沉降为3.5~7.0 mm,整体平均值为5.18 mm,表现出一定的纵向非均匀性。其中K178+250断面平均累计沉降最大,为7.0 mm;K177+830和K177+910断面均为6.5 mm;K178+330断面最低,为3.5 mm。沿线路方向沉降值并未表现出连续增大或减小的规律,而是呈局部波动分布,说明不同断面的沉降响应存在明显差异。

3.3 左右幅差异沉降特征

对14个监测断面左右幅最终沉降进行对比可知,左幅平均累计沉降为4.29 mm,右幅平均累计沉降为6.07 mm,右幅

总体沉降水平高于左幅。在14个断面中,有12个断面表现为右幅沉降大于左幅,1个断面左幅大于右幅,另有1个断面左右幅沉降相同。各断面左右幅绝对沉降差平均为2.36 mm,其中K177+910断面差异最为明显,左幅累计沉降为3 mm、右幅为10 mm,差值达到7 mm;K177+580断面则表现为左幅沉降7 mm、右幅3 mm,差值为4 mm;K178+250断面左右幅累计沉降均为7 mm,未表现出明显差异,如图3所示。

3.4 填筑过程中的沉降响应特征

路基施工过程中平均填土高度由0逐步增加至5.63 m,而累计沉降增长幅度呈逐步降低趋势。监测前42 d平均填土高度达到2.00 m,对应平均累计沉降为3.68 mm,占最终累计沉降量的71.0%;至第90 d,平均填土高度增加至3.60 m,平均累计沉降达到5.07 mm,占最终值的97.9%。由此可见,路基沉降主要集中发生于施工前、中期,如图1所示。

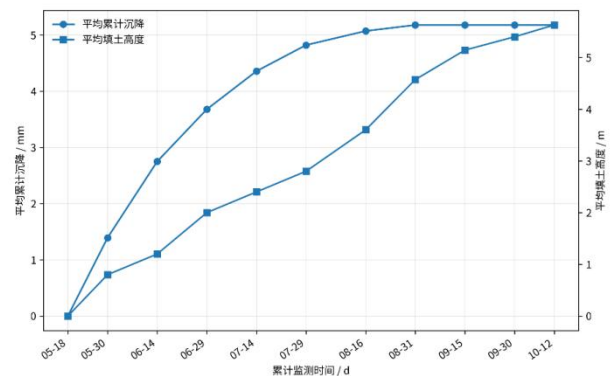


图1 平均填土高度与平均累计沉降变化

在第90~105 d期间,平均填土高度由3.60 m增至4.57 m,而平均累计沉降仅增加0.11 mm;第105~147 d期间,平均填土高度进一步增至5.63 m,但累计沉降未见明显增加,表明随着施工推进,路基新增沉降响应逐渐减弱。对14个断面的最终平均沉降量与填筑高度进行相关分析,Pearson相关系数约为-0.13,线性拟合决定系数 R^2 约为0.017,表明二者相关性较弱。说明填筑高度虽是影响沉降发展的重要因素,但不同断面的沉降差异还受到局部地基条件等因素影响。

3.5 沉降预测及模型验证

根据实测结果,施工期平均累计沉降随时间增加逐渐接近稳定值,整体具有明显的渐近变化特征,因此采用第2章所述指数渐近模型进行拟合。首先利用全部11期平均累计沉降数据进行参数反演,得到:

$$S_{(t)} = 5.402(1 - e^{-0.02770t})$$

式中, t 为自首次观测开始计算的累计时间(d); $S_{(t)}$ 为平均累计沉降量(mm)。

模型拟合决定系数为:

$$R^2 = 0.9968$$

表明指数渐近模型能够较好描述监测期内平均累计沉降的发展过程。模型得到的渐近沉降量 S_{∞} 为 5.40 mm，与第 147 d 实测平均累计沉降 5.18 mm 较为接近，两者相差约 0.22 mm。对 28 个监测测点分别进行指数模型拟合，其 R^2 为 0.937~0.995，平均值约为 0.973，表明多数测点均具有较明显的渐近沉降特征。

为进一步检验模型的预测能力，采用前 8 期监测数据，即 2023 年 5 月 18 日至 8 月 31 日数据进行模型参数拟合，将后 3 期数据作为独立验证样本。利用前 8 期数据拟合得到：

$$S(t) = 5.674(1 - e^{-0.02494t})$$

据此预测第 120、135 和 147 d 平均累计沉降分别为 5.390、5.478 和 5.529 mm，对应实测值均为 5.179 mm。

3 期验证数据的平均绝对误差为：

$$MAE = 0.287 \text{ mm}$$

均方根误差为：

$$RMAE = 0.293 \text{ mm}$$

平均绝对百分比误差为：

$$MAPE = 5.54\%$$

该指数渐近模型可用于描述本研究路段施工期沉降的总体发展趋势，如图 2 所示。

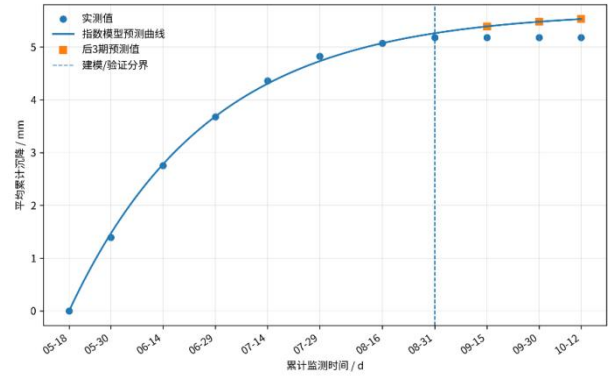


图 2 实测沉降与指数模型预测验证

4 结论

基于某高速公路岩溶区填方路基 14 个监测断面、28 个测点的 11 期监测数据，对施工期沉降演化、空间差异及预测结果进行了分析，主要结论如下：

施工期沉降总体呈“前期较快—中期减缓—后期趋稳”特征。28 个测点最终平均累计沉降约 5.18 mm，前 42 d 累计沉降约占最终值的 71.0%，至第 90 d 已达到约 97.9%。路基沉降具有一定空间非均匀性，各断面最终平均累计沉降为 3.5~7.0 mm，单点最大沉降为 10 mm。左右幅平均累计沉降分别约 4.29 mm 和 6.07 mm，局部断面差异较明显，最大左右幅沉降差为 7 mm。随着施工推进，阶段沉降量和沉降速率持续降低，后期在填筑高度继续增加的情况下未见明显新增沉降，表明路基沉降总体趋稳。不同断面沉降差异与最终填筑高度相关性较弱，说明局部地基条件等因素对空间差异仍有影响。指数渐近模型能够较好描述施工期沉降发展趋势，整体拟合 R^2 约为 0.997；采用前 8 期数据预测后 3 期时，MAE 约为 0.287 mm，RMSE 约为 0.293 mm，可作为施工期沉降趋势判断的辅助方法。

参考文献：

- [1] KIM Y J,NAM B H,JUNG Y H,et al.Probabilistic spatial susceptibility modeling of carbonate karst sinkhole[J].Engineering Geology,2022,306:106728.
- [2] LI P X,BAI M Z,WEI Z J,et al.Stability analysis of subgrade under dynamic loading of single and double high-speed railways in karst areas[J].KSCE Journal of Civil Engineering,2022,26(8):3301-3313.
- [3] 姜巽,曹聪,刘智,等.歌乐山地区隧道工程诱发的岩溶塌陷发育规律与形成条件[J].水文地质工程地质,2023,50(5):181-191.
- [4] LIU R,SUN H F,QIN J W,et al.A multi-geophysical approach to assess potential sinkholes in an urban area[J].Engineering Geology,2023,318:107100.
- [5] 常洲,程小强,张留俊,等.基于三点修正曲线模型的软岩高填路堤沉降预测[J].公路交通科技,2022,39(5):33-40.
- [6] WANG C J,XIE L F,LIU Z M,et al.Study on settlement deformation law of new and old subgrade of expressway reconstruction and expansion based on CPTU[J].Transportation Geotechnics,2024,49:101392.
- [7] YANG E H,WANG K,HE J H,et al.Settlement prediction of a high embankment based on non-linear regression and neural network algorithm[J].Transportation Geotechnics,2025,50:101443.