

论铁路客运专线沉降变形评估标准与合理控制

汤晓光¹, 陈善雄², 许锡昌², 秦尚林²

(1. 武广铁路客运专线有限责任公司, 武汉 430060)

2 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 沉降变形观测分析评估是确保铁路客运专线轨道结构铺设质量的关键环节, 探讨沉降变形评估标准与合理控制具有重要意义。针对沉降变形评估指标分类及其控制标准、观测期合理控制、曲线回归相关系数的控制标准和沉降量 < 1 mm观测断面的评估等进行深入讨论。总结提出铁路客运专线沉降变形评估指标体系, 并将 10 个评估指标细分为核心指标、基本指标和一般指标 3 个等级。核心指标应严格满足相关要求, 任何一个指标不满足要求, 不能通过评估; 基本指标应整体满足相关要求, 个别指标超过限值不大时, 可以基本通过评估, 同时提出完善意见; 一般指标应基本满足相关要求。根据沉降变形的发展趋势, 将沉降-时间曲线分为 3 种类型, 并提出了相应的观测期控制标准。建议曲线回归相关系数的最低标准可以由 0.92 放宽至 0.85。建议对于观测期满足《评估技术指南》的要求, 实测沉降量小于 1 mm 的观测断面, 在整体沉降趋于稳定的条件下, 直接判定其满足评估要求。

关键词: 武广铁路客运专线; 沉降评估; 评估指标; 标准; 曲线回归; 相关系数

中图分类号: U238 U213.1+57 文献标识码: A

文章编号: 1004-2954(2010)02-0001-03

1 概述

高速铁路作为当代铁路科学技术的一项重大成就, 给铁路运输注入了新的活力, 代表着铁路运输的发展方向。随着《中长期铁路网规划》的实施, 我国铁路将进入加快发展的黄金时期。

铁路客运专线的生命力体现在其高速度、高密度、高舒适性和高安全性方面, 而要实现快速、舒适和安全, 则需要平顺且稳定的线路, 这就要求严格控制线下结构的沉降变形。由于设计计算还无法准确预估沉降变形和有效地控制轨道的工后沉降和变形。因此, 在铺设无砟轨道前, 应对线下构筑物变形作系统的评估^[1~3]。

铁路客运专线沉降变形观测与评估的目的主要有如下四方面: (1)对路基、桥涵、隧道、过渡段等地段在铺轨前的沉降变形观测数据进行分析, 推算出最终的沉降量和工后沉降, 合理确定无砟轨道开始铺设时间。

这是铁路客运专线沉降变形观测与评估的根本目的。

(2)为施工提供及时的反馈信息, 验证和调整设计参数与措施。建立线下构筑物变形监测网, 对线下构筑物进行变形观测, 以及对沉降观测数据进行系统的综合分析, 来验证和调整设计参数与措施, 使路基、桥涵、隧道等线下工程达到规定的变形控制要求。

(3)发展沉降变形预测方法。依托实际工程, 根据现场的观测数据, 探讨适用于铁路客运专线沉降变形的预测方法, 解决铁路客运专线线下工程沉降的合理预测问题, 可推动沉降分析预测方法的进步。(4)积累经验, 以提高工程的设计和施工水平。每一个具体工程的施筑, 在某种意义上说, 都是一次 1:1 的实体试验, 所取得的数据是结构在各种复杂因素影响和作用下的综合体现。开展现场观测和分析, 对于认识和把握客观事物的发展规律具有重要意义。

为规范铁路客运专线沉降变形观测分析评估工作, 确保沉降变形观测分析评估的顺利进行, 铁道部组织相关专家编写了《客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南》(下称《指南》)。武广、京津、郑西等铁路客运专线均依据该《指南》全面开展了线下工程沉降变形观测与评估, 《指南》为这些线路无砟轨道的顺利铺设提供了技术支持与保障, 发挥了重要作用。

但无砟轨道沉降变形观测评估毕竟是近几年才开展的工作, 《指南》中也有一些不尽合理之处, 需在工程实践中不断探索, 加以完善。

2 沉降变形评估指标分类及其控制标准

《指南》的基本思路是: 对路基、桥涵、隧道、过渡段等地段在无砟轨道铺设前的沉降变形观测数据进行分析, 推断基础工程是否满足铺设无砟轨道条件。其具体做法是对实测沉降变形数据进行回归分析, 然后外推工后沉降, 最后通过比较工后沉降与控制标准, 来判定是否满足铺设无砟轨道条件。然而利用短期的观测数据回归外推长期的发展趋势是存在相当风险的, 为保证沉降变形预测的可靠性, 除工后沉降外, 《指南》规定了 9 项评估指标, 包括稳定性、相关系数、观测期、可靠性、 $S(t)/S(\infty)$ 、设计总沉降量和预测总沉降量的吻合性、观测频次、最终沉降量、观测数据的一致性, 详见表 1。

收稿日期: 2009-12-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (kzcx2-yw-150); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目 (SKL08032)。

作者简介: 汤晓光 (1966-) 男, 高级工程师。

表 1 沉降评估控制指标

| 指标类别 | 具体指标 | 说 明 |
|------|-------------------|--|
| 核心指标 | 工后沉降 | 沉降变形评估首要核心指标, 应严格满足, 如不满足要求, 决不能通过评估 |
| | 稳定性 | 后期沉降是否趋于稳定是反映路基沉降特征的重要指标, 应严格满足, 如不满足要求, 决不能通过评估 |
| | 相关系数 | 相关系数 R 是判断曲线回归方程有效性的一个重要参数, 相关系数 ≥ 0.92 时认为预测是可靠性的 |
| 基本指标 | 观测期 | 足够的观测期是线下结构完成其剩余沉降所必需条件, 也是取得足够的观测数据以利于沉降预测的必要条件 |
| | 可靠性 | 间隔不少于 3 个月的两次预测最终沉降的差值反映了两次预测的一致性, 是说明沉降预测是否可靠的指标 |
| | $S(t)/S(\infty)$ | $S(t)/S(\infty)$ 提出了对沉降预测时间的基本要求 |
| 一般指标 | 观测频次 | 以足够高的观测频次进行观测, 才能取得系统可靠的观测数据 |
| | 最终沉降量 | 主要用于考察是否满足 $S(t)/S(\infty) \geq 75\%$ 和地基处理的有效性 |
| | 观测数据的一致性 | 不同观测手段从某一侧面间接反映沉降变形的发展规律, 观测数据的一致性主要用于考察不同观测手段所反映的线下工程沉降变化趋势是否一致 |
| | 设计总沉降量和预测总沉降量的吻合性 | 对比设计总沉降量和预测总沉降量可验证和调整设计参数与措施, 使路基、桥涵、隧道等线下工程达到规定的变形控制要求 |

各个指标所反映与表征的沉降变形变化规律是不同的, 各自反映了沉降变形的一个侧面, 对工程安全的影响程度也有很大差异, 在沉降变形评估中按统一的尺度把握显然是不合适的, 应按照各个指标对工程安全的影响程度。根据《客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南》将评估技术要求提炼成 10 项评估指标, 结合武广铁路客运专线的评估经验, 可以按照各个指标对工程安全的影响程度, 进一步将该 10 项评估指标细分 3 个等级, 即核心指标、基本指标和一般指标(表 1)以区别对待。

沉降变形观测与评估的根本目的是控制工后沉降, 因此, 工后沉降理所当然是沉降变形评估第一核心指标, 应严格满足, 如不满足要求, 决不能通过评估。

正常情况下, 路基填筑完成后一段时间内, 部分尚未完成的固结继续发展, 以及由于颗粒之间的调整引起蠕变变形, 沉降将随着时间的推移而缓慢发展, 但沉降速率递减, 并逐渐向零速率趋近^[4]。后期沉降是否趋于稳定是反映路基沉降特征的重要指标, 应严格满足, 如不满足要求, 决不能通过评估。在实际评估中也曾发现过, 在一定的沉降观测期内, 沉降速率较低, 但近似常数的情况。对于此种情况需进一步延长观测, 以观察其稳定性是否满足要求。

相关系数 R 是直线相关条件下说明两个现象之间相关关系密切程度的统计分析指标, 是判断曲线回归方程有效性的一个重要参数, R 越大, 所求的曲线回归方程越有效, 只有当 R 足够大时采用曲线回归方程外推最终沉降变形才是可靠的。因此, 应将相关系数 R 列为沉降变形评估的核心指标, 应严格满足。

当路基填筑完成, 荷载不再增加时, 部分尚未完成的固结或因土体的流变导致路基的沉降随时间的延长而继续, 但沉降速率递减, 一段时间后, 从曲线上明显看到沉降速率快速减小, 并趋于稳定。足够的观测期是路基完成其剩余沉降所必需条件, 也是取得足够的观测数据以利于沉降预测的必要条件, 但它可以不像

核心指标严格, 只要观测期长到足以准确判断其稳定性和进行可靠的回归预测, 就可以了。因此, 宜将观测期列为沉降变形评估的基本指标, 应满足。

间隔不少于 3 个月的两次预测最终沉降的差值直接反映了两次预测的一致性, 当两次预测的差值小于一定值时, 可认为沉降预测是可靠的。因此, 宜将可靠性列为沉降变形评估的基本指标, 应满足。

$S(t)/S(\infty)$ 说明观测期内沉降的完成量, 其值越大, 说明已发生的沉降比例越大, 后续沉降比例越小, 对于轨道运行越有利。该指标提出了观测时间的基本要求, 宜列为沉降变形评估的基本指标, 应满足。

观测频次的确定应以能系统反映观测项目的重要变化过程, 而又不遗漏其变化时刻为原则。只有以足够高的观测频次进行观测, 才能取得系统可靠的观测数据, 但过高的观测频次并不能增加有效信息, 因此, 观测频次达到一定的值即可, 可将其列为一般指标予以要求。

最终沉降量主要用于考察 $S(t)/S(\infty)$ 和地基处理的有效性, 观测数据的一致性主要用于考察不同观测手段所反映的路基沉降变化趋势的一致性, 它们只是从某一侧面间接反映沉降变形的发展规律, 因此, 可将二者列为一般指标予以要求。

设计中对于土质路基、桥梁墩台基础等均进行了沉降变形计算, 对比设计总沉降量和预测总沉降量可验证和调整设计参数与措施, 使路基、桥涵、隧道等线下工程达到规定的变形控制要求。《指南》要求设计预测总沉降量与通过实测资料预测的总沉降量之差不宜大于 10 mm。但实际评估分析过程中, 两者的差异较大, 其原因在于: 一方面, 设计单位在设计计算时, 为了工程安全, 其相关地质条件、荷载状况等计算参数取保守值, 且在最不利工况下计算地基总沉降量, 留有充足的安全储备, 这样给出的设计总沉降量偏大; 另一方面, 在实际施工过程中, 同样出于工程安全, 地基加固及填筑质量尽可能地按高标准予以实施, 造成实测沉

降量要小于预期值。因此,《指南》提出的“设计预测总沉降量与通过实测资料预测的总沉降量之差不宜大于 10 mm”这一标准实际可操作性差,可作为一般对比指标。

鉴于各指标对评估影响不同,在实际评估中应区别对待,对于核心指标,要求严格满足,任何一个指标不满足要求,不能通过评估;对于基本指标,要求整体满足,个别指标超限不大时,可以基本通过评估,同时提出完善意见;对于一般指标,要求基本满足。

3 观测期合理控制

3.1 路基沉降观测期的合理控制

文献[5]结合武广铁路客运专线大量高速路基沉降实测数据,对路基沉降变形的稳定时间进行系统的分类和研究。根据沉降发展的发展趋势,可将沉降一时间曲线可分为 3 种类型,相应的观测期控制方式如下。

(1) 第 I 类曲线

主要特征为,路基填筑期间,沉降变形明显增长,填筑完成后,沉降速率逐步减小,沉降变形在 6 个月内已基本趋于稳定。沉降过程表现为较平滑、规律的收敛曲线。

对于第 I 类情况,建议对严重影响整体施工进度的特殊工点,在沉降变形趋势已基本稳定的条件下,路基沉降观测期可放宽至 4 个月以上,容许其提前进行沉降评估,并在后续施工阶段中继续加强观测。

(2) 第 II 类曲线

主要特征为,路基填筑完成,沉降逐步趋于稳定的过程中,沉降变形出现突然增长,沉降速率明显变大,尔后又逐步趋于稳定。沉降过程表现为具有明显拐点、呈台阶状发展的收敛曲线。

对于第 II 类情况,采用拐点后较短时间(不大于 2 月)的数据进行分析预测,其分析预测结果是不真实的。为了准确地进行分析预测,需要在沉降突变后继续观测不少于 2~3 个月,待沉降趋势基本稳定后,才能进行有效的评估。

(3) 第 III 类曲线

主要特征为,路基填筑期间,沉降变形开始增长,填筑完成后,沉降变形继续发展,沉降速率未明显减小,在填筑完成 6 个月后未见稳定趋势。

这种类型的观测断面应引起观测单位和建设单位的重视,应延长观测期并加强后期观测,以判断其沉降变化趋势,必要时采取工程处理措施以满足铺轨的要求。

3.2 桥梁墩台沉降观测期的合理控制

客运专线桥梁墩台的沉降变形实测数据表明,墩

台基础沉降变形特征表现为:

(1) 架梁期间:墩台沉降变形过程曲线出现明显的拐点,沉降速率出现突变;

(2) 架梁后 1 个月内:沉降变形很快趋于稳定,由架梁荷载引起的沉降增量较小(一般 < 3 mm);

(3) 架梁后 2 个月以上:沉降变形已基本稳定;

(4) 大部分桥梁路段,嵌岩桩墩台和摩擦桩墩台的沉降变形趋势基本一致,均符合上述变化规律,且实际观测的沉降变形量无明显的差异。

鉴于以上分析成果,建议对影响整体施工进度桥梁工点,沉降变形观测期采用以下控制标准:

(1) 嵌岩桩墩台在架梁后 1 个月内的沉降增量小于 3 mm,后期沉降趋于稳定,可直接通过评估;

(2) 地质条件类似,且摩擦桩墩台与嵌岩桩墩台沉降变形趋势、沉降量无明显差异的区段内,摩擦桩墩台沉降观测期可放宽至 2~3 个月,类比嵌岩桩容许其提前进行沉降评估,并在后续施工阶段中继续加强观测。

4 曲线回归相关系数的控制标准

《指南》要求根据实际观测数据作多种曲线的回归分析,曲线回归的相关系数不应低于 0.92。由于客运专线实测沉降变形量一般较小(如武广铁路客运专线 80% 以上的路基涵洞基础沉降量小于 10 mm, 90% 以上的桥梁墩台、隧道沉降量小于 5 mm),相对于较小的沉降增量而言,测量系统误差易造成观测数据出现较大的波动,尤其是主体施工完成后(路面观测桩数据和墩台基础沉降数据)的沉降增量与测量系统误差处于同一量级上,数据相对波动较大造成曲线回归相关系数不易达到 0.92。但从整体变形趋势来看,其沉降已基本趋于稳定,其他评估指标均能满足《指南》的要求,整体上可以判定其沉降变形满足无砟轨道铺设条件。

因此,在观测总沉降量较小的情况下,测量系统误差对曲线回归的相关系数的影响较大。鉴于以上情况,建议对观测总沉降量 $< 10(5)$ mm 的工点,在可以确定后期沉降变形趋势的情况下,曲线回归相关系数的最低标准可以由 0.92 放宽至 0.85。

相关系数是直线相关条件下说明两个现象之间相关关系密切程度的统计分析指标。在数学上,判断两变量线性相关密切程度的具体标准为: $0 \leq R < 0.3$ 称为微弱相关; $0.3 \leq R < 0.5$ 称为低度相关; $0.5 \leq R < 0.8$ 称为显著相关; $0.8 \leq R < 1$ 称为高度相关。可以认为,曲线回归相关系数的标准放宽至 0.85 并不会明显降低预测的可靠性,因为,当 $R \geq 0.85$ 时,回归曲线与实测值是高度相关的,由此进行的预测将是可靠的。

(下转第 14 页)

。线路 路基。

析结果, 目前卸载后路基的工后沉降是能满足控制要求的。

以下直接采用观测数据计算工后沉降量, 进行定量分析以进一步校验上述分析结果, 计算结果列于表 2。

表 2 路基工点工后沉降分析结果汇总

| 观测断面桩号 | 基底处理方式 | H /m | ΔH /m | $\xi_{\text{max}}(t)$ /mm | ξ_{∞} /mm | η | s_R /mm |
|-------------|--------|-------|---------------|---------------------------|--------------------|--------|-----------|
| DK1+426.46 | 冲击压实 | 2.938 | 2.72 | 2.88 | 3.23 | 1.1 | 0.932 |
| DK1 671+440 | 冲击压实 | 2.306 | 2.77 | 3.64 | 4.25 | 1.1 | 1.363 |
| DK1 671+475 | CFG桩 | 2.770 | 2.72 | 4.72 | 5.39 | 1.1 | 1.634 |
| DK1 672+810 | CFG桩 | 2.166 | 3.15 | 6.96 | 8.03 | 1.1 | 2.499 |
| DK1 672+834 | CFG桩 | 2.586 | 3.28 | 8.12 | 9.30 | 1.1 | 2.841 |
| DK1 672+850 | CFG桩 | 3.047 | 3.04 | 7.49 | 9.02 | 1.1 | 3.106 |

从表 2 所列分析结果可以看出, 计算工后沉降量为 0.932 ~ 3.106 mm, 明显小于容许工后沉降控制值 15 mm。另外, 上述计算工后沉降的过程中, 已引入了加权系数 (安全系数) $\eta = 1.1$ 。因此, 直接采用观测数据来分析得到的工后沉降量远小于 15 mm, 满足工后沉降控制要求, 这与有效应力面积比法分析的结果是一致的。

(上接第 3 页)

5 沉降量 < 1 mm 观测断面的评估

从武广铁路客运专线的观测资料来看, 在满足沉降变形观测期要求的前提下, 桥梁墩台、隧道等部分刚性结构物的实测沉降量小于 1 mm 的断面占有一定的比重。由于沉降水准的测量精度为 ± 1 mm, 沉降实测值与水准观测误差接近, 系统误差成为观测误差的主要来源。

建议对于沉降变形观测期满足《评估技术指南》的要求, 实测沉降量小于 1 mm 的观测断面, 在整体变形趋势稳定的条件下, 可以不进行计算分析, 判定其满足评估要求。在分析相邻过渡段时, 从偏于安全的角度, 工后沉降取 0 计算过渡段差异沉降和折角, 分析其是否满足评估要求。

6 结 论

沉降变形分析评估是我国铁路客运专线建设中的一个特有的技术环节, 缺乏可资借鉴的经验, 探讨沉降变形评估标准与合理控制具有重要意义。

针对沉降变形评估指标分类及其控制标准、观测期合理控制、曲线回归相关系数的控制标准和沉降量 < 1 mm 观测断面的评估等进行了深入讨论。

铁路客运专线沉降变形评估指标主要有: 工后沉

6 结 论

以武广铁路客运专线实测数据为基础, 分析了超载预压路基沉降规律及特征, 系统地总结了与之相适应的评估技术要求和经验。在此基础上, 建议分别采用有效应力面积比法和基于实测数据回归拟合的分析方法, 对超载预压路基的卸载时机和工程沉降进行对比验证分析, 以提高沉降变形评估的准确性和可靠性, 最后结合工程实例验证了上述超载预压路基评估技术的有效性和可行性, 为铁路客运专线超载预压路基的沉降变形评估提供一条有效的途径。

参考文献:

- [1] 潘秋元, 朱向荣, 谢康和. 关于砂井地基超载预压的若干问题[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(2): 1-12
- [2] 张光永, 王靖涛, 卫 军, 等. 超载预压法的卸载控制理论研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1250-1254
- [3] 张光永, 吴玉山, 李彰明. 超载预压法阈值问题的室内试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 79-83
- [4] 钟才根, 张 序. 高速公路软基路堤沉降速率控制[J]. 苏州城建环保学院学报, 2001, 14(4): 48-53
- [5] 铁建设[2006]158号, 客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南[S].
- [6] GB9-2002 建筑地基处理技术规范[S].

降、稳定性、相关系数、观测期、可靠性、 $S(t)/S(\infty)$ 、设计总沉降量和预测总沉降量的吻合性、观测频次、最终沉降量、观测数据一致性等 10 项指标, 并将 10 个评估指标细分为核心指标、基本指标和一般指标等 3 个等级, 对于核心指标, 要求严格满足, 任何一个指标不满足要求, 不能通过评估; 对于基本指标, 要求整体满足, 个别指标超限不大时, 可以基本通过评估, 同时提出完善意见; 对于一般指标, 要求基本满足。

根据沉降变形的发展趋势, 将沉降—时间曲线可分为 3 种类型, 并提出了相应的观测期控制标准。

建议曲线回归相关系数的最低标准可以由 0.92 放宽至 0.85。

建议对于沉降变形观测期满足《评估技术指南》的要求, 实测沉降量小于 1 mm 的观测断面, 在整体变形趋势稳定的条件下, 直接判定其满足评估要求。

参考文献:

- [1] 铁建设[2006]158号, 客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南[S].
- [2] 吴明友. 客运专线无砟轨道铁路工程测量和铺设条件评估关键技术[J]. 中国铁路, 2006(10): 28-32
- [3] 尤昌龙. 无砟轨道工后沉降变形观测、评估的集成理念[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 102(3): 25-28
- [4] 陈善雄, 王小刚, 姜领发. 铁路客运专线路基面沉降特征与工程意义[J]. 岩土力学, 2010, 31(3).