

客运专线路基沉降特征及其影响因素分析

周全能¹, 姜领发²

(1 中铁第四勘察设计院集团有限公司工程承包公司, 武汉 430063)

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: 针对武广铁路客运专线某一区段路基的沉降观测数据, 定量的计算出路基沉降范围值及沉降速率, 并分析其原因; 借助合理曲线回归方法, 预测不同地基处理方式下路基的工后沉降量与路基填高的关系; 以试验区段中的某一观测断面的沉降数据, 探讨分析路基沉降时程发展规律及合理的放置观测期。

关键词: 武广铁路客运专线; 无砟轨道; 路基; 沉降观测

中图分类号: U238 U213.1⁺57 **文献标识码:** A

文章编号: 1004-2954(2010)02-0015-04

路基沉降变形主要包括列车行驶中对路基面的弹性变形、长期行车引起的基床积累下沉(塑性变形)及路基本体填土及地基的压缩下沉。参考国内外经验可知, 列车行驶中弹性变形、运营阶段的塑性变形及路基填土压实下沉, 只要满足基床及路基本体填筑材质、压实标准, 其值都是有限的, 且也是可控的。因此, 如何控制路基的沉降变形特别是工后沉降值, 关键在于控制支承路基地基的沉降。现代铁路修筑经验表明, 作为支承路基地基不允许发生地基破坏, 也不允许发生不适应使用要求的沉降量和沉降速率。以往的设计多只考虑对地基不允许发生基底破坏, 对变形虽有一定要求, 但没予以充分重视。我国铁路路基主要病害现象的下沉问题, 除因填土压实度不够造成之外, 不少也是基底变形所致, 特别是长期困扰我国在软土地基上修筑路基所存在的不断下沉病害问题。随着客运专线的大规模建设, 地基沉降变形控制问题越来越得到建设者的重视, 地基的沉降变形标准也经历了认识、实践、再认识的发展历程, 沉降控制标准逐渐提高。

高速旅客列车要求路基轨下基础提供高平顺性的轨道系统, 按照《京沪高速铁路设计暂行规定》^[1], 路堤基底以下 25 m 压缩层内的地基土不符合基底条件时, 应作工后沉降分析。路基工后沉降不应大于 5 mm, 年沉降速率应小于 2 mm; 按《客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南》^[2] 要求, 路基上铺设无砟轨道前, 应对路基变形作系统的评估, 要求沉降预测应采用曲线回归方法, 并满足一定的观测时间及相关参

数要求。

德、法强调控制路基的不均匀沉降, 其追求沉降的目标为不均匀沉降为零; 对于无砟轨道路基, 德国有更严格的要求, 要求路基的差异沉降为零。由于中德两国的国情不同, 德国采用较长的施工周期来达到工后沉降为零的目的, 而我国具体国情使我们必须通过加大对地基的处理力度、增加填料质量和碾压工艺等措施来尽量消除工后沉降的影响。如何确保路基沉降变形满足设计要求就成为路基工程中的重点课题, 特别是深厚软土路基, 常规方法很难满足工后沉降要求, 迫切需要逐步开发引入新型的更为有效的路基处理方式及探讨合理的沉降观测期。

本文借助合理的预测方法, 针对武广铁路客运专线软土地基实际工点进行了工后沉降预测与分析, 分析了经不同工程措施处理的路基沉降特性及其影响因素, 揭示了路基沉降特性变化规律, 进而探讨了客运专线路基变形控制对策。针对不同地质条件, 建议了合理的地基处理方法及合理的沉降观测期。

1 工程概况

试验区段位于武广铁路客运专线 DK1 343+619 ~ DK1 346+712.32 共有路基工点 8 个, 路基全长 1 174.27 m。

此区段为丘陵区, 丘坡植被发育, 小树较多, 村庄人口密集, 良田分布广泛。跨谷地, 乡间公路、小河和村民住房。

此区段地层自上而下由第四系全新统坡洪积层, 残坡积层, 寒武系上统组成。第四系全新统坡洪积层为粉质黏土、黏土, 残坡积层为细角砾土, 寒武系上统多为黄褐色~灰色页岩。

地基处理方式为 CFG 桩、岩溶注浆、换填。

本区段路基本体均采用 A B 组填料, 基床底层采用 A B 组填料, 基床表层采用级配碎石、级配碎石 + 5% 水泥填筑。

2 路基填土高度和速度对地基沉降的影响

从试验区段中任选 1 个有代表性的断面, 结合现场观测的沉降数据(图 1), 对比分析路基填土高度和填筑速度对地基的影响。利用《沉降观测数据管理与

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: 周全能(1965-)男, 高级工程师。

铁道标准设计 RAILWAY STANDARD DESIGN 2010(2)

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

。线路 路基。

分析预测)软件^[4],可绘制路基沉降(S)-荷载(P)-时间(t)关系曲线和地基沉降速率曲线,详见图2

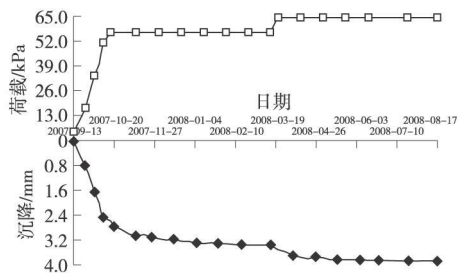


图1 DK1 344+560断面地基沉降数据曲线

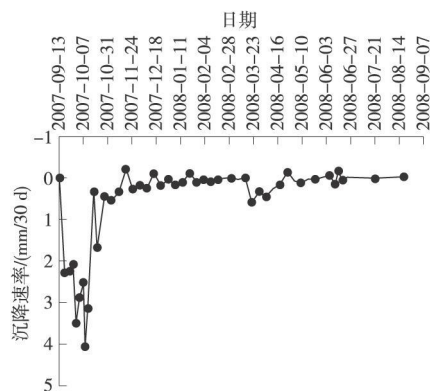


图2 DK1 344+560断面地基沉降速率曲线

(1)从图1的曲线图可知,随着填土高度的加大,沉降进一步增大,停止填土,路基沉降继续发展,但逐步趋于平缓。当路基填筑达到一定高度时,沉降随着填筑高度的增加迅速增大,当路基填筑即将竣工和竣工后,路基沉降又呈缓慢增加形式,直至路基完全稳定下来。其原因主要为:路基在初始填筑过程中,由于原地基具有一定的承载力,可以承受一定高度填土产生的压力,在地基容许承载力范围内,地基沉降呈现出类似弹性变化的形式,即地基沉降随着填土高度的增加而增加。

在路基施工过程中,填土高度是影响路基沉降的主要因素,这是因为路基沉降主要是由于路堤填土产生的静力和路面上的行车荷载产生的动力荷载引起的,而施工期间沉降主要由路堤本身的自重压力引起。故在路堤的设计过程中,一般要设置路堤高度上限,减少自重,以此来减小地基沉降。从图中可知路基沉降量随着填土高度(图中用荷载表示)的增大而增大,而且增加量呈现衰减的趋势,它们之间并不呈线性关系,这是由于路基沉降还受路基宽度、侧向变形等因素影响。

(2)分析图2的填土与沉降数据、沉降速率发现,在施工期间,路基(主要指地基)随填土的不断加高而不断沉降,随着填土高度的增加,填土速度加快,相应的沉降速率也加大。从3个断面填土高度与路基沉降速率对比图上也可看出填土高度曲线陡的时间段,沉

降曲线也较陡,这反映了沉降对加载速率的敏感性。随着时间的延长,沉降速率逐渐变小、收敛。从沉降速率曲线上看,早期沉降速率变化范围比后期明显要大,这除了与填土速率有关外,可能与早期地层孔隙比较大,含水量较高,从而孔隙水消散速率较快有关。

控制填土速率的最终目的是保持填土路基的稳定。若填筑速率快,表示荷载较早地作用于地基增加了初期的沉降量,但它完工得早,与速率较小者相比,到完工时固结的时间较短,因此,完工时的沉降量反而较小。而施工速率对最终沉降量几乎没有影响。此外,填筑速度过快,产生过大孔隙水压力,还可能危及路基的稳定性。

3 不同地基处理方式下路基填土高度与地基沉降的关系

客运专线不但要控制路基填筑的速度和最终沉降量,而且更要控制路基的工后沉降,利用《沉降观测数据管理与分析预测)软件,对DK1 343+619~DK1 346+712.32中地基采用压实和CFG桩处理的断面所提供的路基沉降观测数据(包括用来观测地基沉降的沉降板观测数据和路基沉降的表面桩数据)进行较系统的统计及对不同地基条件下的路基填筑高度和工后沉降的进行曲线回归,其汇总结果及曲线回归见表1及图3、图4。

表1 试验段各断面信息汇总

断面数	地基处理方式	平均填高/m	平均工后沉降/mm
15	压实	4.54	0.47
28	CFG	2.98	0.41

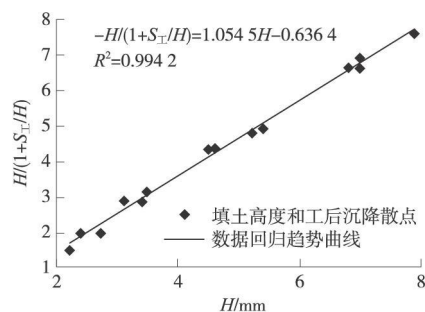


图3 路基填土高度与工后沉降关系(压实)

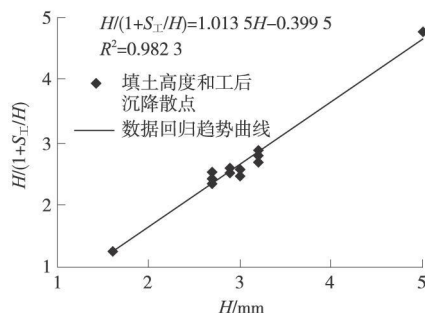


图4 路基填土高度与工后沉降关系(CFG桩)

从前面的分析可知,产生路基沉降(这里重点讨论工后沉降)的因素除了列车动载长期作用和路基填料在自重作用下的压实沉降外,占整个沉降较大比重的因素则是支承路基的地基沉降变形。路基高度不同,地基处理方式不同,沉降也有较大差异。

由表 1、图 3、图 4 可以看到,不同地基处理方式条件下,路基的工后沉降和其填土高度存在一定的相关性。即满足下述关系式

$$\frac{H}{1 + \frac{S}{H}} = a + bH \quad (1)$$

式中, H 为路基填土高度; S 为工后沉降; a 、 b 为回归曲线的常数值。

(1) 用压实方式处理地基时,其路基填土高度和工后沉降的回归趋势线方程为

$$\frac{H}{1 + \frac{S}{H}} = -0.6364 + 1.0545H (R^2 = 0.9942) \quad (2)$$

可见,该回归曲线与数据散点拟合较好(一般 $R^2 \geq 0.85$ 即为优)。

(2) 用 CFG 桩方式处理地基时,其路基填土高度和工后沉降的回归趋势线方程为

$$\frac{H}{1 + \frac{S}{H}} = -0.3995 + 1.0135H (R^2 = 0.9823) \quad (3)$$

同理可知,该回归曲线与数据散点拟合较好。

(3) 从表 1 可知,不同地基处理方式下,路基工后沉降随路基填筑高度的增加而增加,但其关系不是线性的、正比的关系。

一般来说,路建成建成后发生的沉降主要有:路堤(主要指基床)在列车荷载作用下发生的累计沉降;路基本体在自重作用下的压密沉降;支承路基的地基压密沉降。在路基填料的材质与施工质量有保证的前提下,前两部分的数值是有限的,且路基填土的压密沉降主要通过压实度来控制,且沉降最终完成的时间也较短。因此,控制路基沉降主要是控制地基的工后沉降。因为,对一般地基(尤其软土地基)来说,由于其压缩性大,渗透系数小等特性,路建成建成后,不仅沉降量大而且需要较长时间才能完成最终沉降。

从本试验段的观测数据的分析可知,虽然地基对路基的工后沉降影响较大,但通过不同的处理后,不但能满足路基的工后沉降小、最终沉降完成期短的目标,而且还能使不同地质、不同路基填高具有相近的工后沉降值,即可保证列车高速、安全、舒适运行,并尽可能减少维修。

由于武广铁路客运专线沿线地形地质情况复杂,红黏土、软土及松软土分布广泛,成因千差万别、厚度

相差大,所以地基处理方式多样。通过对武广铁路客运专线的大量监测数据统计分析,建议地基处理方式采用下列方案。

① 一般土质地基

以冲击压实为主处理,对沉降不满足设计要求地段采用 CFG 桩、强夯置换等进行处理;当表层软土、松软土、黏性土厚度小于 1.5 m 采用挖除换填 A、B 组填料处理。

② 软土及松软土地基

以 CFG 桩复合地基为主进行加固处理,对于正常固结的淤泥、淤泥质土和软黏土,地基承载力标准值不大于 120 kPa 的黏性土和粉性土底层,厚度不超过 12 m 时,辅以搅拌桩等进行加固。

③ 岩溶发育区地基

一般采用注浆处理防止塌陷,确保路基整体稳定,对上覆红黏土软弱地基带采用 CFG 桩处理。

④ 含较多碎石黏性土和砂性土、填土、碎石土地基采用旋喷桩复合地基加固。

⑤ 部分特殊地段采用预应力管桩、钻孔灌注桩等刚性桩-网复合地基加固。

4 路基沉降时程发展规律与合理观测期

利用试验段某一断面的观测数据(该断面包括 5 个测点,分别为:地基表面左、右两个沉降板;路堤表面左、中、右三个观测桩),分析讨论同一层面不同测点、不同层位测点沉降规律以及路基填筑完成前路基沉降的比例。

(1) 该断面地基表面埋设的两个沉降板的监测数据曲线见图 5。

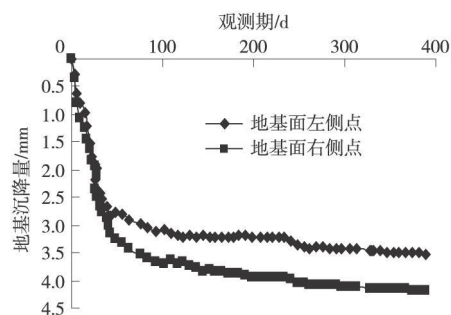


图 5 地基左、右两个沉降板沉降观测曲线

从图中曲线可知,地基左右两侧的沉降规律基本一致,并且在路基填筑初期沉降随着填筑高度的增加迅速增大,当路基填筑即将竣工和竣工后,路基沉降又呈缓慢增加形式,直至路基完全稳定下来。从沉降发展曲线不但可以得出该地基压实质量良好的结论,而且监测数据真实合理,因为其呈“S”形的 4 个阶段,即:

。线路 路基。

①发生阶段:从曲线图可知,路基刚填筑时,亦即地基刚加载时,测点的土体尚处在弹性状态,测点的沉降量随荷载的增加近似线性增减。

②发展阶段:随着路基填筑高度的不断增加,地基测点土体所受的荷载也越来越大,并使其逐步进入到弹塑性状态。随着塑性区不断开展,测点的沉降速率也不断增加,但由于该区段的路基填筑时间较长,导致土体固结完成的比例较大,致使土体的沉降速率到达一定时间后随着路基的填筑增加反而有减小的趋势。

③成熟阶段:当路基填筑完成,地基荷载不再增加时,部分尚未完成的固结即土体的流变导致测点的沉降随时间的延长而继续,但沉降速率递减。

④到达极限:经过 1年多的沉降,从曲线上明显看到沉降速率快速减小,并趋于稳定。

(2)为了验证路基填筑完成后的不同层位(即路基和地基)的沉降趋势是否一致,将地基表面沉降板的沉降数据起点与路基表面桩一致(两者观测始点都为路基填筑完成时)。不同测点曲线见图 6。

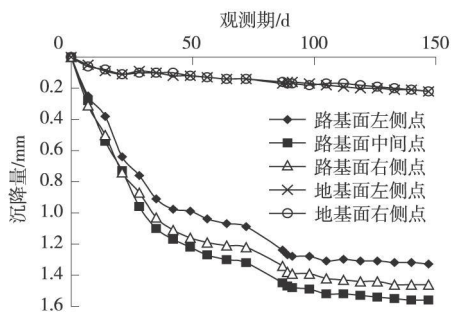


图 6 5个测点路基填筑完成后的沉降观测曲线

从图中可知,路基和地基不但同一层位沉降近似一致,而且由于填筑时间较长,地基的固结大部分已经完成,导致其沉降值和沉降速率在其最初的一段时间内都要远小于路基的相应值。

(3)根据国外高速铁路的经验和实测资料,路堤填土压实沉降量一般在施工期及放置期内基本完成。当路堤以粗粒土、碎石类土填筑时,其总沉降量为其高度的 0.1% ~ 0.3%;当以细粒土填筑时,其总沉降量为其高度的 0.3% ~ 0.5%。该部分沉降一般在路堤竣工之后 1年左右完成^[3]。从中可知,路基压实总沉降量分施工期及放置期,但两者各占多大比例却没有量化。本部分借助上面的断面对路基放置期的沉降量及合理的放置期进行初步探讨,以期对相关工程路基填筑提供借鉴。表 2、表 3 分别为 DK1 345+892 断面 5 个测点的路基填筑后的沉降信息汇总及沉降比例。

由于 DK1 345+892 断面路基的填料属于粗粒土、碎石类土,按上面所提的国外经验,其路基总沉降量为其高度的 0.1% ~ 0.3%;从表 2、表 3 可知,当路堤填

筑高度为 5.2 m 时,其路基总沉降值为 5.2 ~ 15.6 mm;填筑完后进行观测,经过 6 个月的放置期后观测,其路基沉降值为 1.33 mm,占路基总沉降量 8.5% ~ 25.6%;以该观测数据预测工后沉降值(不考虑结构层引起的沉降)为 0.22 mm,占路基总沉降量 1.4% ~ 4.2%。

表 2 DK1 345+892 断面测点沉降信息汇总

层位	6个月沉降值/mm	结构层引起沉降量/mm	最终沉降量/mm	放置期的沉降量/mm	工后沉降量/mm	不考虑结构层的工后沉降量/mm
地基	3.51	0.24	3.81	0.21	0.30	0.06
	4.19	0.29	4.52	0.21	0.34	0.05
平均值	3.85	0.265	4.165	0.21	0.32	0.055
路基	1.43	0.11	1.82	1.43	0.40	0.29
	1.66	0.13	2.08	1.66	0.42	0.29
平均值	1.54	0.12	1.94	1.54	0.397	0.277

表 3 DK1 345+892 断面路基沉降比例

路基高度/m	路基总沉降值/mm	放置期沉降值/mm	占总沉降量比例/%	工后沉降/mm	占总沉降量比例/%
5.2	5.2~15.6	1.33	8.5~25.6	0.22	1.4~4.2

从上面的相关数据可知,在武广铁路客运专线现有地基和路基填料和施工工艺下,路基的大部分(70% ~ 90%)沉降值在路基填筑过程中都已完成,且 6 个月后的路基工后沉降值只占路基总沉降量的 1.4% ~ 4.2%,亦即放置期达到 6 个月后,路基的沉降量基本已经完成。而按国外经验,这个过程要 1 年左右。产生这种差异的原因可能是武广铁路客运专线全线对地基进行针对性处理、路基使用优质填料,并且提高施工质量的结果。

5 结论与建议

(1)在路基工程中,填土高度是影响路基沉降的主要因素。在一定的地基处理方式下,沉降值随着填土高度的加大而增大,停止填土,路基沉降继续发展,但逐步趋于平缓。

(2)路基(主要指地基)沉降随填土高度的不断增加而不断增大,随着填土高度的增加,填土速率加大,相应的沉降速率也加大,沉降对加载的速率具有很强的敏感性。随着时间的延长,沉降速率逐渐变小、收敛。因此,为了保持路基的稳定,应控制填土速率。

(3)不同地基处理方式条件下,路基的工后沉降 S_r 和其填土高度 H 存在一定的相关性,满足关系式

$$\frac{H}{1 + S_r/H} = a + bH \quad (a, b \text{ 为回归曲线的常数值})$$

(4)虽然地基对路基的工后沉降影响较大,但通过不同的处理后,不但能满足路基的工后沉降小、最终沉降完成期短的目标,而且还能使不同地质、不同路基

铁路客运专线路基工后沉降预测方法研究

姜领发, 陈善雄

(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: 利用路基填筑完成后相对较长静置期内的实测沉降值及轨道结构层施工完成后的较短时间内的有限次沉降数据, 提出一种实用的铁路客运专线路基工后沉降预测方法。首先, 利用较长静置期中的路基沉降实测数据进行曲线拟合并判定其拟合参数是否满足要求, 其次, 在满足预测曲线的参数条件后, 根据结构层的荷载情况及施工完成后有限次实测沉降值, 确定与路基土体固结性质有关的结构层施工完成后的沉降发展曲线拟合方程参数, 并给出相应的工后沉降计算式; 最后, 通过工程实例对所建议的预测评估方法进行验证与分析。

关键词: 武广铁路客运专线; 路基; 工后沉降; 结构层; 预测
中图分类号: U238 U213.1+57 文献标识码: A

文章编号: 1004-2954(2010)02-0019-03

铁路客运专线对路基等线下工程的工后沉降要求十分严格, 而现有的沉降设计计算受到多种因素的影响, 计算精度不足以控制无砟轨道工后沉降。因此, 工后沉降的控制应以施工期间系统的沉降观测与综合分析评估为主, 应通过对沉降观测数据系统综合分析评估、验证或调整设计措施, 使路基等工程达到规定的变形控制要求, 分析推算出最终沉降量和工后沉降, 合理确定无砟轨道开始铺设时间, 确保客运专线无砟轨道结构铺设质量。

按《客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南》^[1]要求, 路基上铺设无砟轨道前, 应对路基变形作系统的评估, 要求沉降预测采用曲线回归方法, 并满足一定的观测时间及相关参数要求。

按评估指南规定, 路基结构工后沉降是指在铺轨

工程全部结束后, 整个路基结构物产生的沉降量, 即为路基最终沉降量与铺轨完成时已有沉降量之差。由于工后沉降是指铺设无砟轨道后出现的, 不能通过路基工程本身加以克服的沉降, 将会对后期的运营产生较大的影响, 是路基沉降的重点控制对象。不少学者与工程技术人员对铁路客运专线沉降变形观测评估方法及路基工后沉降满足条件进行了研究探讨。赵俊岭^[2]介绍客运专线路基沉降观测内容和一般规定, 分析评估方法和判定标准; 李明领^[3]结合武广铁路客运专线工程沉降变形评估工作, 系统地介绍了线下结构物沉降变形观测的相关技术、数据管理与分析预测系统, 探讨了工后沉降的预测方法及评估条件与标准。

这些研究虽然都认为客运专线工后沉降是由路基在自重条件下产生的铺轨后的剩余沉降与轨道结构层产生的铺轨后附加沉降组成, 但对轨道结构层产生的路基附加沉降采用的是与前期路堤荷载引起的沉降总值的平均值对比换算, 并且没有去除结构层引起的瞬时沉降值, 这就使该分析方法所推算的结构层引起的工后沉降偏大。在轨道调整量一定的情况下, 导致预测的路基自重产生的剩余沉降偏小, 为了满足这个条件, 需要延长观测期或增强路基填料质量等方案, 有可能造成较大的经济浪费。

本文利用路基填筑完成后相对较长静置期内的实测沉降值及结构层铺设完成后的较短时间内的沉降数据, 提出一种实用的铁路客运专线路基工后沉降预测方法, 通过工程实例验证并分析该方法的适用性。

1 沉降曲线拟合方程

由于双曲线法能够在一定程度上反映次固结的影

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: 姜领发 (1972-), 男, 副研究员。

填高具有相近的工后沉降值, 这即可保证列车高速、安全、舒适运行, 并尽可能减少维修。

(5) 路基填筑完成后, 路基和地基沉降趋势近似一致, 其沉降值和沉降速率在其最初的一段时间内都要远小于路基的相应值。

(6) 武广铁路客运专线现有地基和路基填料和施工工艺下, 路基的大部分 (70% ~ 90%) 沉降量在路基填筑过程中已基本完成, 路基填筑完成后 6 个月的路基沉降值只占路基总沉降量的 1.4% ~ 4.2%, 亦即放置期达到 6 个月后, 路基的沉降量基本已经完成。因

此, 建议在保证施工质量的前提下, 可适当缩短路基填筑完成后的观测期 (4 ~ 6 个月)。这样就可大大提前铺轨时间和提高经济效益。

参考文献:

- [1] 铁建设函 [2004] 157号, 京沪高速铁路设计暂行规定 [S].
- [2] 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].
- [3] 铁建设 [2007] 47号, 新建时速 300 ~ 350 km 客运专线铁路设计暂行规定 [S].
- [4] 陈善雄, 余飞, 刘绍波, 等. 铁路客运专线沉降监测数据管理与分析预测集成系统研发 [J]. 铁道标准设计, 2010(2).