

客运专线路基动态施工控制及沉降预测

王国体¹, 吴吉祥², 李刚², 王轶昕¹

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 中铁四局集团有限公司设计研究院, 合肥 230023)

[摘要] 依据合武(合肥-武汉) I 标段设置路基沉降观测的数据, 提出了对高速铁路路基施工进行动态控制方程的公式形式和工后路基沉降预测的依据与具体实现, 并结合典型观测数据进行分析 and 路基施工控制, 确保路基质量、沉降、工期要求。

[关键词] 高速铁路; 客运专线; 路基施工; 施工动态控制; 沉降预测

[中图分类号] U213 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)03-0050-06

1 工程背景和工程概况

1.1 工程背景

高速铁路和客运专线的建设在我国虽然起步较晚, 但发展速度突飞猛进。目前国内对高速铁路路基沉降及位移的控制机理与过程尚没有足够的深入研究, 我国《时速 200 公里新建铁路路线设计暂行规定》中对路基沉降的规定要求是: 在设计时速 200 km 的有碴道路路基工后沉降量一般地段不应大于 15 cm, 路桥过渡段不应大于 8 cm。然而, 为了保证高速行驶车辆的运行安全, 客运专线修建技术在路基的要求重要表现是沉降、不均匀沉降的控制。在德国, 路基工后沉降控制十分严格, 有碴轨道要求路基每年沉降不超过 1~2 cm, 桥墩周围不应有不均匀沉降。日本规定: 有碴道路路基工后沉降量一般地段不应大于 10 cm, 沉降速率应小于 3 cm/a, 桥台台后过渡段路基工后沉降量不应大于 5 cm, 沉降观测至施工结束或沉降结束稳定为止。因此, 依托合武铁路客运专线路基沉降的研究, 从完成路基高标准的建设要求出发, 到结合路基施工的组织设计和过程管理, 抓住对路基施工质量、工期、工艺的综合反映的关键性技术环节——路基沉降, 通过关键特征路段, 进行沉降位移全过程研究、分析、预测, 结

合项目的自然特征、地质条件、施工技术、工艺工序以期对客运专线(高速铁路)的路基建设搭建设计与施工、过程与工艺、管理与控制的基本标准控制体系, 对实现高速铁路施工“质量、工期、投资”三控制的目标展示出指导意义。

1.2 工程概况

合武高速铁路 I 标段起讫里程为 DK17+350.35—DK106+200, 全长 88.85 km。主要工程量有: 路基土石方 $810.93 \times 10^4 \text{ m}^3$, 特大桥 11 座 18 588.89 延米(1 延米 = 1 m), 大桥 20 座 8 699.84 延米, 中桥 5 座 482.42 延米, 小桥 6 座 108.67 延米, 涵洞 418 座 9 301.23 横延米, 改造既有车站 2 座, 新建车站 1 座。工程位于合肥至六安间, 地貌表现为平原微丘。部分路基的地基为软土地基。根据合武铁路设计文件、路基设计以及客运专线施工规范和验标的要求, 选定 DK17+350.35—DK106+200 段路基进行客运专线路基沉降及位移观测的科研工作。全线共设地表沉降观测点 90 处, 位移观测桩 582 个, 路基面(路肩)观测桩 300 个, 观测次数累计 6.5 万余点次。通过关键技术的优化总结、信息反馈、观测数据总结等环节, 为指导关键工序的转换、控制填土速率以及施工工艺的改进提供了科学的依据, 发挥了重要作用, 路基环

[收稿日期] 2009-07-30

[基金项目] 安徽省自然科学基金项目(090414168)

[作者简介] 王国体(1951—), 男, 安徽太和县人, 教授, 研究方向为岩土工程、基础工程与地下结构、地基与基础的数值分析等;

E-mail: wgthome@126.com

节施工控制的成功确保了合武高铁的通车运行。

2 路基沉降观测分析和预测研究的内容

路基沉降的各项观测数据,综合反映了对路基设计、地基处理、施工管理、质量控制等方面的参数互动关系,以此为主线重点解决以下问题。

1) 选择高填方路基、软土路基、桥涵过渡段及一般路基中有代表性的断面,通过施工期和预压期的路基沉降、位移观测以及对观测数据的分析,从中找出各种条件下路基沉降和位移的变化规律,分析各种状态下沉降和产生原因,并运用观测结果和技术数据,及时指导、调整施工工艺和施工方法以及施工进度。实行动态控制填筑速率和信息化指导施工。

2) 建立设计、施工、工艺、控制为一体的技术体系^[1,2]。依据对不同路基地段的最终沉降量的预测和施工期预压、处理方式所观测的实际沉降量,对路基不同地段的沉降变化和工后沉降进行评估,确保实现客运专线的路基施工达到高标准的质量要求。

在软土段中,填方在 10 m 以上的沉降观测数据 8 组,把它们作为路基沉降分析的重点,并结合其他软土段的观测数据一起作为软土路段沉降的典型分析和最终沉降预测的评价基础,见表 1。

表 1 软土高填方段沉降观测点

Table 1 Spots of observation at high filling section

编号	沉降点观测位置	测点编号	路基填筑高度/m	软弱地基处理方法
1	K47+760	C11	10.08	粉喷桩
2	K47+840	C12	10.08	粉喷桩
3	K47+910	C13	10.08	粉喷桩
4	K47+990	C14	10.08	粉喷桩
5	K41+460	C1	7.43	碎石桩
6	K56+490	C22	9.50	碎石桩

2.1 路基观测典型路段形式

在该标段路基沉降观测点位置中,软土路段 36 组、过渡段(涵、桥)观测点 25 组、横断面位移观测桩点 366 组。

过渡段观测数据,取典型路段观测点的沉降分析中,既有涵、桥过渡段的分析,又有软土填方不同高度的位置,还包括地基处理的不同形式,如碎石桩、粉喷桩等(见表 1)。

2.2 路基沉降观测的施工控制工期、质量

通过全路段设置点、长时间监测沉降位移的实

测数据的采集,以路基沉降和侧向水平位移在铁路路基施工过程的监测数据,对高填方路基、软土路基、桥涵过渡段、一般路基中有代表性的断面,通过施工期路基沉降、位移观测以及对观测数据的分析,实时掌握沉降位移速率,实行动态控制填筑速率和信息化指导施工,及时指导、调整施工工艺和施工方法以及施工进度,使路基填筑施工速率正常、有序、可控,实现了工程实施的具体目标。

3 路基填筑施工过程管理的动态控制方程

依据路基施工的具体实际进程,采用力学描述过程,提出路基填筑施工动态控制方程,用以指导填筑路基过程。路基施工过程管理的动态控制方程表述为式(1)、式(2):

$$t_i \geq T_i, \Delta_i \leq [\Delta_i] \cup \sum \Delta_i \leq \sum \Delta_i \quad (1)$$

$$t_i \leq T_i, \Delta_i \geq [\Delta_i] \cap \sum \Delta_i \geq \sum \Delta_i \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, t_i 、 T_i 分别为第 i 级填筑荷载高度施工时间和相应的控制时间周期; Δ_i 、 $[\Delta_i]$ 为填筑时间对应观测沉降速率、控制沉降速率; $\sum \Delta_i$ 、 $\sum \Delta_i$ 为填筑时间内对应观测累计沉降、控制积累沉降。

式(1),其过程控制意义即当前一级填筑荷载引起的沉降速率小于控制沉降速率,同时积累沉降小于控制沉降时,继续或连续施加下一级荷载(填筑高度);式(2),其施工控制意义即当前一级填筑荷载时引起的沉降速率大于控制沉降速率或积累沉降大于控制沉降时,停止或延期施加该级荷载(填筑高度)。

式(1)、式(2)中的控制沉降速率和控制沉降由地基条件参数计算确定。参照具体技术规范和观测数据进行处理确定。

式(1)、式(2)路基填筑施工的过程控制描述为公式(3):

$$p(t_{i+1}) = p(t_i) + \Delta p_{i+1} \cdot \text{sgnf}(T) \quad (3)$$

式(3)中, $p(t_{i+1})$ 、 $p(t_i)$ 、 Δp_{i+1} 分别为第 $i+1$ 、 i 级累计填筑荷载, i 级填筑荷载; $\text{sgnf}(T)$ 为控制函数。

$$\text{sgnf}(T) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (4)$$

满足式(1)时,控制函数取值为 1,满足式(2)时取 0。

这样,式(1)至式(4)构成路基动态施工质量、

工期、过程控制体系。应用这一过程控制体系,通过施工期路基沉降和水平侧向位移的预测及填筑高度的过程控制,避免引发质量的问题,控制路基施工进度,为确保客运专线的路基施工在施工期达到高标准的质量要求,有了具体的公式控制。

4 路基最终沉降量的预测^[3~10]

运用观测结果数据对路基沉降的最终值进行预测。过程简述如下。

4.1 预测的理论依据

对于属软弱土和过渡段,地基土的一般含水量和饱和度高、抗剪强度和承载力低,采用碎石桩、粉喷桩等其他特殊处理后,不仅加强了软弱地基,也提高了地基排水固结的特性,符合软弱地基渗透固结的固结理论。

渗透固结理论的微分方程形式为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = cv \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + cx \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + cy \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (5)$$

式(5)中, cv 、 cx 、 cy 为渗透固结系数,由软弱土地基条件与加固形式确定。

求解微分方程由式(5)和地基边界条件及施工条件联合确定。

式(5)求解经过联合地基和加固形式的变形特点可转化为路基沉降与时间的相应关系。

4.2 最终沉降量预测模型

由式(5)具体简化得到的一维 Terzaghi 渗透固结理论一般解,结合地基条件和观测整理的数据,得到路基沉降与时间的关系曲线形式为:

$$s_t = s \left\{ 1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^3} \exp \left[(-2n-1) \frac{\pi^2}{4} T_v \right] \right\} \quad (6)$$

式(6)中, s 为路基的最终沉降量; s_t 为路基填筑完成后某时间的沉降量; T_v 为路基的地基固结过程的时间因数,可由实测数据和设计参数联合确定。

对于该工程观测的实际应用,理论公式可采用简化公式,即式(6)可为

$$s_t = s \left[1 - \frac{\alpha(\pi-2)}{1+\alpha} + \frac{2}{\pi^2} \exp \left(-\frac{\pi^2}{4} T_v \right) \right] \quad (7)$$

式(7)中, α 为路段地基边界控制参数。

4.3 最终沉降量的预测模拟公式

以理论公式(5)~(7)为依据,结合双曲线模型曲线和相关曲线模拟数值方法的初步处理,同时结合预测方法,以典型的沉降数据为依据,得到最终沉降值。

由沉降观测数据得到数值模拟经验曲线,可以总体表述为公式(8)或公式(9)所示形式。

$$s_t = s [1 - A \exp(-\beta t)] \quad (8)$$

$$s_t = s [1 - A \exp(-\beta t)] + s_d A_1 \exp(-\beta_1 t) \quad (9)$$

其中式(8)应用一般路基,式(9)应用具有地基处理过程的路段地基。 A 、 β 、 A_1 、 β_1 为模拟参数。

5 典型观测数据结果曲线

由于观测数据量巨大,以下内容依据典型观测数据作基础分析。

取位于 K56+490 处测点编号为 C22 的观测数据,路基地表沉降的关系曲线如图 1 所示。它代表典型软土段施工期和预压期的观测沉降数据结果,其代表了所有观测沉降的一般特征和典型基本形式。

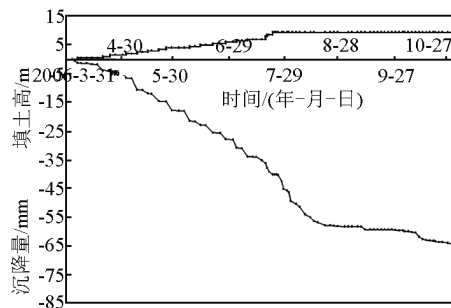


图 1 软土段施工期与预压期路基沉降观测结果曲线 C22(DK56+490)

Fig. 1 The observation curve of C22 (DK56+490) settlement in filling and preloading at soft section

5.1 软土高填方段观测数据的整理

典型软土高填方段,位于 K47+720—K48+010 段,路基填筑高度大于 10 m,软弱地基处理方案为粉喷桩的复合地基形式。

沉降观测数据分两个重要阶段:一是施工期填筑阶段,通过沉降观测值对施工控制起指导作用;二是工后沉降观测数据,结合施工期的观测数据对工后沉降进行预测评价。

考虑施工填筑对理论沉降影响后,整理具体观

测点的数据见表2。

表2 软土高填方段路基沉降与时间数据表
Table 2 The data of settlement and time about filling section

测点编号	观测点位置	填筑总高度/m	施工工期/d	工后时间/d	工期观测沉降/mm	工后观测沉降/mm	观测累积沉降量/mm
C11	DK47+760	10.08	781	525	50.21	43.96	94.17
C12	DK47+840	10.08	781	525	44.82	28.75	73.57
C13	DK47+910	10.08	781	525	40.92	31.44	72.36
C14	DK47+990	10.08	781	525	45.81	44.86	90.67

依据表2地表沉降观测点有代表性的数据,该点位于线路里程为DK47的典型软弱土路段上,该段路基填筑材料为改良土,地基处理采用碎石桩加固,地表沉降观测点设置过程完好,观测数据齐全。

5.2 工后沉降分析结果

路基填筑完工以后,路基的整个施工荷载施加完成,满足固结理论加荷过程的假定,按照固结理论整理的加荷后的地基沉降与时间的关系,对观测记录的数据进行典型处理,可以得到工后最终沉降量的预估值。

以软土段DK56+490位置处、编号为C22的观测沉降数据,进行数据处理比较。图1为施工期和工后沉降观测数据的原始记录。对其进行数据分析和处理后,结合工后沉降曲线段,可以得到最终沉降量,其分析结果见表3。

表3 软土路段典型观测点的沉降量分析结果表

Table 3 The forecast result of settlement at filling section by observation dots

测点里程位置	测点编号	沉降速率/ (mm·a ⁻¹)	工后沉降/mm
K47+760	C11	<40	<150
K47+840	C12	<40	<150
K47+910	C13	<40	<150
K47+990	C14	<40	<150
K56+490	C22	<40	<150
K41+460	C1	<40	<150
K29+810	C19	<40	<150

在该段软弱高填方的观测数据中,进行数据整理后得到观测数据与时间的关系,对工后沉降具体结果进行预测。

5.3 路基填筑对地基的影响

路基沉降随着路基填筑高度的增加和时间的延长而增大,路基在填筑过程中,路基沉降速度逐渐减

缓或加大是地基变形、承载能力的综合响应。对于软土地基,一方面地基加固处理的实施可以提高地基承载力,另一方面,地基和加固体的排水作用在提高地基固结度的同时也提高了地基的承载能力。两个方面都将在变形的过程中通过观测数值表现出来。

软土段路基在初始填筑不断加荷过程中,原加固地基受路基荷载发生压缩作用,桩与周围的软土形成复合地基。路基施工应依据地基固结程度合理控制后期填筑过程。因此,每次填筑作用所引起地基固结和上次填筑引起地基固结相关联,固结的相关可以反映在沉降速率上。

在施工过程中,不断的填筑路基的过程将导致地基的沉降变化,沉降变化的实质是地基固结度随时间的不断变化。沉降速率变化是对地基稳定性最直观的综合反映。

因此,根据沉降速率控制填筑路基的填筑高度以及时间间隔,以适应地基的变形、固结度变化导致的地基强度的增长,以满足地基的稳定性要求。

5.4 路基填筑施工控制方法

在软土地基上填筑,随着填土逐渐加高,沉降量逐渐增大。根据测量沉降值,按照式(8)、式(9),拟合沉降曲线可预测下一阶段沉降量值。同时依据式(1)至式(4),掌握沉降动态,进而进行施工动态控制,更好地控制路基填筑的后期过程。具体应用可见DK56+490处C22的观测应用。2006年4月30日路基分层填筑结束后,有路基填筑速率按照当月填筑速率填筑下,对下个月填筑时进行沉降预测,根据公式推导下月沉降变化量,根据式(1)、式(2)得到动态控制,取得了预期的良好效果。

6 结语

1)按照1998年《时速200公里新建铁路路线设计暂行规定》:一般地段路基工后沉降不大

于 150 mm,年沉降速度应小于 40 mm 的要求,过渡地段路基工后沉降不大于 80 mm,年沉降速度应小于 30 mm 的要求,软土高填方段和软土段的各观测点的沉降预测结果均较好地满足“暂行规定”的要求。

2)路基填筑过程控制实现了既定目标。通过该软弱土路段的沉降观测数据和结果分析,完成了既定的观测方案数据的采集、分析、整理,基于研究的初步数据积累,奠定了进一步深入研究的基础,得到的成果对同类工程的施工具有重要的指导意义。

3)建立了路基填筑施工过程状态管理的动态控制方程。应用动态控制路基填筑高度指导方法用公式通过施工期路基沉降、位移观测以及对观测数据的分析,实现了实时掌握沉降位移速率,动态控制填筑速率和信息化指导施工,及时指导、调整施工工艺和施工方法以及施工进度,确保了路基填筑施工速率正常、有序、可控。实现了本工程设计、施工的控制目标。

4)拓展了沉降分析方法和工后沉降量计算方法的预测数值模型的应用。路基最终沉降的预测是对路基设计、施工控制、质量保证的关键性指标,涉及各环节计算参数相关互动、综合影响。依据观测的直接数据分析,通过 Terzaghi 固结理论模型的理论与实际数据的结合,克服简单函数数值曲线的拟合在理论依据上的缺陷,奠定路基最终沉降分析可靠性的基础。

5)软弱地基处理方案得到了施工的可靠性验证。该软弱土路段经过地基处理加固的方案实施设计和施工实现,通过沉降和位移观测的初步分析,验证了地基处理的初步成效,为深入地将设计、施工、监测为统一体系的控制过程研究提供了观测依据。

6)沉降观测对地基处理设计、施工过程控制、全程质量控制具指导意义。我国高速铁路正处在建

设发展期,该路段开展的沉降、位移监测的范围之大,所提出的施工动态控制方法和沉降预测进一步在理论与设计、施工、控制和质量的全过程总结,为建立企业发展相适应的规范或标准,对地基处理设计、施工过程控制、全程质量控制具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 王国体. 高填土公路路基的稳定分析[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(1):99-103.
- [2] 王国体,方诗圣,潘恒芳. 复合地基理论与其工程应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2000, 23(6):1009-1013.
- [3] Wang Guoti. Testing and applying the parameters of strength on soft soil [C] // Strength Theory, Application, Development & Prospects for 21st Century. Xi'an :Science Press ,1998.
- [4] Wang Guoti. Calculation and check up bearing capacity & settlement on composite foundation[C] //Proceeding of Second International Conference on Soft Engineering . Nanjing: Hohai University Press , 1996.
- [5] Wang Guoti. The method of spline - function to compute bearing capacity on pile load test [C] //Proceeding of The First International Conference on Soft , Engineering. Recent Advances In Soft Engineering. Guangzhou :Science Press, 1996.
- [6] 马飞,王国体. 泥土挤密桩在高速铁路路基中的应用[J]. 工程与建设, 2008, 22(2):227-229.
- [7] 敖斌,王国体. 基于 Matlab 建筑物沉降的灰色预测[J]. 工程与建设, 2008, 22(6):818-820.
- [8] 刘志楠,王国体. 半刚性桩复合地基沉降的复合模量当层解法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2006, 29(9):1158-1160.
- [9] 陈登伟,王国体,赖焕枫. 柔性桩复合地基沉降的 Mindlin 解法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(2):189-192.
- [10] 王国体,陈兵. 地基非线性变形参数实测及应用[C]//第六届全国结构工程学术会议论文集(第三卷). 广西:工程力学 A3,1997.

Dynamic construction control and settlement forecast about roadbed of express passenger line

Wang Guoti¹, Wu Jixiang², Li Gang², Wang Yixin¹

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Institute of China Railway No.4 Engineering Group Co. Ltd., Hefei 230023, China)

[**Abstract**] In this paper, the author proposed the formula of dynamic construction control and settlement forecast about roadbed of high-speed railway according to the observation data of Hefei-Wuhan Express Passenger Line I Bid Package, combining the classic observation data to analyze and control roadbed construction for ensuring that the roadbed quality, settlement and the timelimit can meet the requirement. The method of this paper can be referred in the similar roadbed construction.

[**Key words**] high-speed railway; express passenger line; roadbed construction; dynamic construction control; settlement forecast

(上接 49 页)

Cross-layer QoS routing algorithm of metric-based cooperative relay in WSNs

Xu Nan¹, Sun Yamin¹, Yu Jiming², Wang Hua³

(1. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology,

Nanjing 210094, China; 2. School of Computer Science and Technology, Zhejiang University

of Technology, Hangzhou 310014, China; 3. School of Computer Science and Technology,

Shandong University, Jinan 250023, China)

[**Abstract**] We proposed a cross-layer QoS routing algorithm which is metric-based cooperative relay initiative forwarding(MCRICQR). Nodes form a metric according to energy, channel, congestion and distance to sink. The node with maximal metric forwards or relays or leapfrogs the data in term of it's own states. Simulation results show that MCRICQR can prolong the lifetime of network and guarantee the required QoS. It also can transmit data in time and load balance which improve the reliability and energy efficiency and throughput of WSN(wireless sensor network).

[**Key words**] quality of service; cross-layer design; cooperative relay; initiative forwarding; wireless sensor network