

新旧路基结合部位沉降特征三维数值分析

李方东

(中铁十四局集团第二工程有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要:新旧路基结合处理技术是确保既有线路改造成功的关键。运用有限元分析的基本原理,采用 Adina 数值模拟软件模拟了局界到湖沿的新旧路基立体交叉结合的典型断面,对新老路基结合部位的沉降特征进行综合研究,包括内侧路肩和外侧路肩顶面的纵向沉降、路基结合处三个剖面顶面的横向沉降,并分析产生不均匀沉降的原因。计算结果表明,不均匀沉降主要发生在新路基一侧;地基的固结沉降和新老路基的相对滑移是造成不均匀沉降的主要原因;沉降量最大值出现在新路基靠近顶点的一侧。结合立体交叉路段的沉降规律,提出了改进措施。

关键词:新旧路基;有限元;Adina;数值模拟

中图分类号:U418.8

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)01-0045-06

3 D Numerical Analysis of Settlement Characteristics at the Joint Part of New and Old Roadbeds

LI Fangdong

(The Second Engineering Co. Ltd, China Railway Fourteenth Group Corporation, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract: The technique for the joint of new and old roadbeds is the key point to reform the existing lines successfully. By using the basic principle of the finite element analysis, a typical section of graded crossing joints of new and old roadbeds from Jujie to Huyan was simulated with Adina software. The settlement characteristics of roadbed joint parts were analyzed, including vertical settlements of roadbed's medial and outboard shoulders and lateral settlements of three different sections, and the reasons inducing the non-uniform settlements were analyzed. The results showed that non-uniform settlement mainly occurred at the side of new roadbed; the consolidation settlements of road foundations and the slippages between new and old roadbeds were two major reasons causing non-uniform settlements; the maximum settlement occurred at the side of new roadbed close to its top. By getting settlement regularity of graded crossing, the improvement measures were suggested.

Key words: new and old roadbeds; finite element analysis; Adina; numerical simulation

铁路的提速一直是世界各国铁路工作者共同追求的长期目标。将一些客流量较大、线路条件较好、并与客运专线相连接的既有有线进一步实施提速,能够达到投资省、见效快的效果。但是线路交叉的地方必然会有新旧路基的结合问题,由于新老路基结合部存在施工时间的差异,导致地基固结程度不同和路基压缩程度不同,从而产生新老路基的不均匀沉降,甚至会造成路基失稳、引起轨道不平顺等许多病害,不仅会造成维护费用的大幅增加,而且对提速后的行车安全构成极大的威胁。

在新旧路基结合的研究方面,国外已经做过一些理论分析和试验研究^[1-3]。日本和挪威主要解决的是软土地基上新老路基拼接问题,美国、印度等主要解决山区公路的路基拓宽问题。田波等^[4]研究了强夯法处理

收稿日期:2011-08-24

基金项目:国家自然科学基金项目(50820135907, 50909056)

作者简介:李方东(1974—),男,山东泰安人,高级工程师,主要从事铁路和公路工程施工组织和技术管理方面的研究。

E-mail: 562001535@qq.com

新旧路基结合部的工法,提高新旧路基结合部位的强度及压实度,减少不均匀沉降。桂炎德等^[5]对新旧路基结合处采取填料控制,防、排水及加筋等措施。何家祥等^[6]对影响新旧路基结合部沉降变形的参数进行敏感性分析,得到了影响新旧结合路基稳定性及沉降变形的主要因素。

本研究从有限元分析的角度出发,利用 Adina 软件进行数值模拟,确定了新旧路基之间不均匀沉降的位置,找到了新旧路基不均匀沉降的原因,得到了新旧路基立体交叉结合典型断面的沉降规律,可以为旧路基拓宽及新旧路基接缝的处理技术提供理论参考,也可以为工程实践提供一定的指导。

1 工程概况

浙赣铁路是我国长江以南惟一横贯东西部的干线铁路。浙赣线弯道太多、部分区段坡度太大,严重制约了列车的运行速度和通行能力,经济的快速发展使其不能满足高速度、大运量的要求,电气化提速改造任务迫在眉睫。为了解决弯道及坡度等影响提速的问题,南铁管内共改造线路 299 处,其中,新建、改建桥梁 81 座,涵洞 1 381 座、隧道由原来的 1 座增加到 15 座。改造前的 57 个车站被缩减为 40 个,进贤、东乡、玉山、上饶车站被整体搬迁至新址。局界到湖沿 DK333+120—DK333+226 是新旧路基立体交叉结合的典型断面。新旧路基交叉角度约为 30°,途中右侧即为旧路基,其中部分已改造为公路路基,左侧运营中的线路下面即是新路基,中间为新旧路基结合部。新路基填筑高度为 5 m,新旧路基宽度均约为 13 m,地质条件分为上下两层,上层为粉质粘土,厚度大约为 4 m,下层为卵石土。

2 沉降计算有限元分析的基本原理

2.1 沉降的基本原理

土的沉降量按其变形可分为三部分,表达式为:

$$S = S_0 + S_c + S_e \quad (1)$$

其中: S_0 为瞬时沉降(初始沉降),cm; S_c 为固结沉降,cm; S_e 为次固结沉降(次压缩沉降),cm。

瞬时沉降是指加荷后立即产生的沉降。固结沉降是由于排水固结引起的沉降,固结沉降不是加荷后立即产生,沉降速率取决于孔隙水的排出速率。次固结沉降是在荷载长期持续作用下,作用于土骨架上的有效压力使土的结构矿物颗粒间接触点产生剪切蠕变,水膜进一步减薄,骨架进一步压缩,导致孔隙体积进一步压缩而产生的沉降。

2.2 沉降计算的基本方法

既有沉降计算方法很多,可归纳为以下几个大类。

1)弹性理论法:将土体视为弹性体,测定其弹性参数,再用弹性理论计算土体中的应力与土的变形量,但由于土的压缩特性随处变化,边界条件比较复杂。加之用这类方法不能求得土体变形随时间的变化,因而应用较少。

2)工程实用法:按弹性理论计算土体的应力,通过试验提供的各项变形参数,利用分层叠加原理计算沉降量,这种方法便于处理土层的非均质,应力应变关系的非线性以及地下水位变动等实际存在的复杂因素。

3)经验法:借经验相关关系,求得土的压缩性指标,再带入理论公式求解。这种方法在无粘性土取原状样进行室内试验有困难的情况下,是一种可行的方法。

4)有限元法:利用计算机作为运算手段,以基本理论为基础,借有限单元法离散化的特点,计算复杂的几何和边界条件、施工与加荷过程、土的应力应变关系的非线性(各种本构关系)。该方法的精确度取决于建立模型与输入参数的正确性。随着计算机科学的快速发展,有限元法在沉降计算中的精确度也越来越高,运用也越来越广泛。

2.3 Boit 固结理论

Boit 从连续介质的基本方程出发,推导了能准确反应孔隙压力消散与土骨架变形相互关系的三维固结方程,建立了 Boit 固结理论^[7-8]

$$\frac{1}{3K} \frac{\partial(\Theta - 3u_w)}{\partial t} + \frac{k_x}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial x^2} + \frac{k_y}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial y^2} + \frac{k_z}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

其中： Θ 为有效应力之和， $\Theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ ； K 为体积模量； u_w 为孔隙水压力值； k_x 、 k_y 、 k_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的渗透系数； γ_w 为水的容重。

结合边界和初始条件，即可得到路基任一点任一时刻的位移 u 、 v 、 w 值和孔隙水压力值 u_w 。

Terzaghi 固结理论中假定总应力和不变，把应力和应变从方程中消去，只含孔隙水压力一个未知变量，孔隙压力的消散只和孔隙压力的初始条件和边界条件有关，与固结过程中位移的变化无关。而 Biot 固结理论没有作总压力和为常量的假定，在方程中不能将应力或应变消去，完整的引入物理方程，进而引入几何方程，最后把孔隙水压力与位移联系起来。这样就考虑了孔隙水压力与土骨架变形的耦合作用，更符合土的实际变形规律。

2.4 土的本构关系

土是一种散粒材料，变形规律非常复杂，具有非线性、弹塑性、粘塑性、剪胀性、各向异性等特征。很难建立一个能反映各种状态的土在各种荷载作用下的应力-应变关系的数学模型。研究土的变形规律常用的材料模式有弹性非线性模型如 Duncan-Zhang 模型，弹塑性模型如 Mohr-Coulomb 模型。本研究采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型，其主要原则条件有：①非关联流动法则；②理想弹塑性 Mohr-Coulomb 屈服特征；③极限抗拉。

Mohr-Coulomb 模型可以用于二维和三维固体单元。当考虑小位移问题时，采用材料非线性描述，当考虑大变形、小位移问题时，采用完全拉格朗日表述。当考虑大变形，大位移问题时，采用更新拉格朗日表述。

3 Adina 计算模型及边界条件

3.1 计算模型

当线路进行裁弯取直改造时，将会出现新旧路基斜交的情况。结合国内外研究现状，新旧路基斜交时，在结合部位的应力、变形规律不同于平行加宽的情况，故需采用三维立体模型对新旧路基斜交时结合部位的沉降规律进行分析^[9-10]。

局界到湖沿 DK333+120-DK333+226 段线路裁弯取直后，新旧路基的交叉角度约为 30°，针对该路段的实际情况，建立的有限元计算模型如图 1 所示。图中沿着 Y 轴方向的是既有路基，与其斜交的是新路基，Y 轴方向的长度为 150 m，X 轴方向的长度为 120 m。新旧路基宽度均为 13 m，坡度为 1:1.5，路基填土高度为 5 m。地质情况与 DK342+480 类似，地基分为两层：上层为粉质粘土，厚度约为 4 m；下层为卵石土，厚度为 16 m。

3.2 材料强度参数

根据地质勘察资料，设计资料以及工程经验，新旧路基以及地基上、下层土体的物理力学参数如表 1 所示。

由表 1 可以看出新路基的粘聚力、内摩擦角和密度要明显大于旧路基的数值，这是因为新路基级配更合理，碾压更密实。根据摩尔库伦准则 $\tau_f = c + \sigma_f \tan \phi$ ，为了使路基更稳定，也要求新路基材料具有较大的粘聚力 c 和内摩擦角 ϕ ，保证路基不被破坏，从而满足铁路运输客运量大、速度快、稳定、安全等要求。

3.3 边界条件

法向为 Y 向的边界为 Y 向约束、无 Y 向位移，法相为 X 向的边界为 X 向约束、无 X 向位移，地基地面为 Z 向约束、Z 向位移为零。地基表面为透水边界，其余均为不透水边界。计算深度取 20 m。

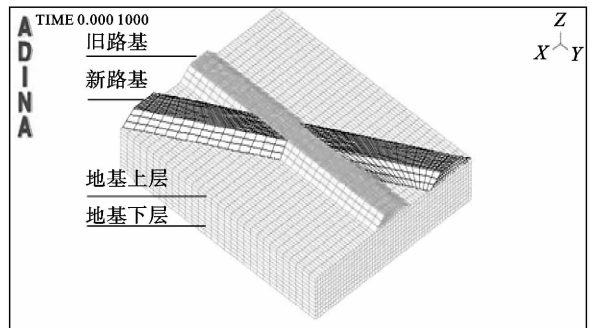


图 1 立体模型示意图

Fig. 1 Schematic of stereoscopic model

表 1 物理力学参数表

Tab. 1 Physical and mechanical parameters

因素 土体	厚度/m	压缩模量/MPa	泊松比	粘结力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(cm/s)	密度/(kg·m ⁻³)
新路基	5	29	0.30	50	24	不考虑	1 900
旧路基	5	33	0.30	40	17	不考虑	1 860
地基上层	4	5	0.40	20	13	1.20×10 ⁻⁷	1 820
地基下层	16	9	0.35	15	21	8.85×10 ⁻⁵	1 800

4 有限元计算结果及分析

4.1 总体沉降位移

图 2 为新旧路基斜交的总体沉降位移云图,描述了整个路基和地基的沉降变化情况。由图 2 可知,固结沉降的最大值发生在新路基一侧,最大值为 12.44 cm,旧路基在新路基的荷载作用下发生了附加变形。

4.2 新旧路基结合部位顶面纵向沉降(内侧路肩)

图 3 为沿着新路基的内侧路肩边线的剖面图,可以得出:旧路基在两侧新路基的荷载作用下发生了附加变形,但沉降量小于两侧的新路基的沉降量。

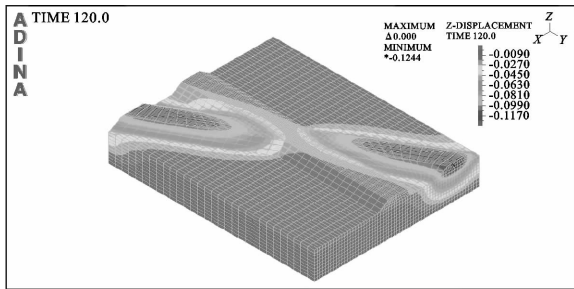


图 2 总体沉降位移云图

Fig. 2 Vertical settlement of the whole region

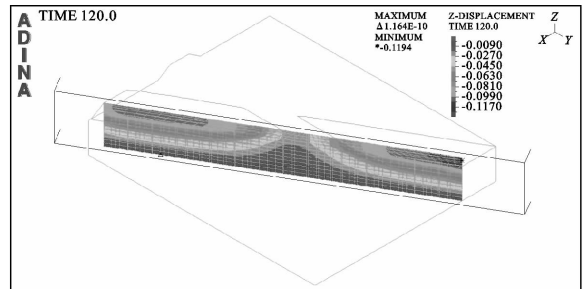


图 3 新路基内侧路肩位移云图切片

Fig. 3 Sliced displacement of new roadbed's medial shoulder

取剖面的上面边线(新路基路肩边线)绘制沉降曲线(图 4)。由图 4 可知,路基顶面的沉降曲线近似成抛物线型,这一规律与现场实测沉降数据一致。沉降的最小值位于既有线中心线附近,最小值为 2.18 cm。最大值出现在新路基一侧,最大值为 11.78 cm,新旧路基沉降差为 9.60 cm,出现了较大的不均匀沉降。

4.3 新旧路基结合顶面纵向沉降(外侧路肩)

沿着新路基的外侧路肩边线的剖面如图 5 所示,可以得出:旧路基在两侧新路基的荷载作用下发生了附加变形,但沉降量小于两侧的新路基的沉降量。

图 6 为新路基顶面外侧纵向剖面的顶面沉降曲线。由曲线可知,沉降的最小值发生在既有线中心线附近,最小值为 2.18 cm;最大值发生在新路基一侧,最大值为 11.76 cm。新旧路基差异沉降为 9.58 cm。新旧路基产生了较大的不均匀沉降。

4.4 新旧路基结合顶面横向沉降

在垂直于旧路基的方向上取 1-1、2-2、3-3 三个横向剖面,分别距离模型原点(旧路基顶面中点)80、90、

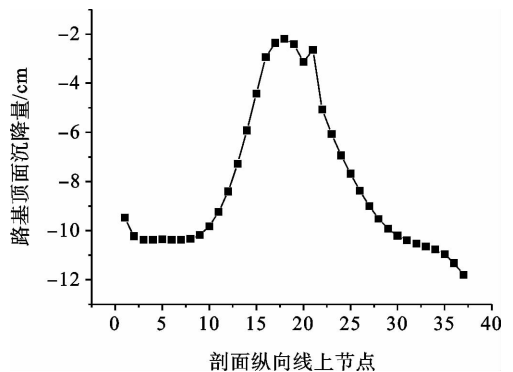


图 4 路基内侧顶面沉降曲线图

Fig. 4 Vertical settlement of medial roadbed's top surface

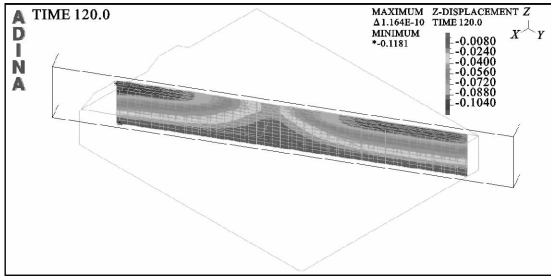


图 5 新路基外侧路肩位移云图切片

Fig. 5 Sliced displacement of new roadbed's outboard shoulder

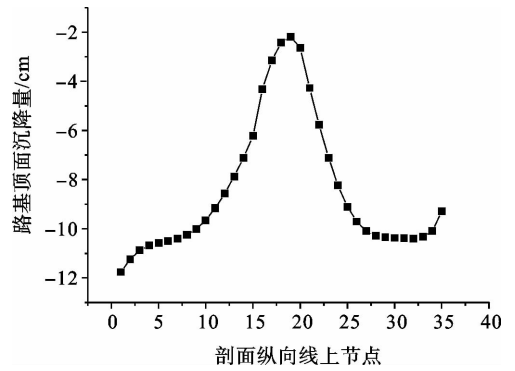


图 6 路基外侧顶面沉降曲线图

Fig. 6 Vertical settlement of outboard roadbed's top surface

100 m。模型示意图如图 7 所示。

1) 1-1 剖面图

如图 8 所示, 1-1 剖面的沉降规律和平面分析相似, 即沉降最大值出现在新路基一侧, 最大值为 5.41 cm, 旧路基在新路基的荷载作用下出现附加变形。

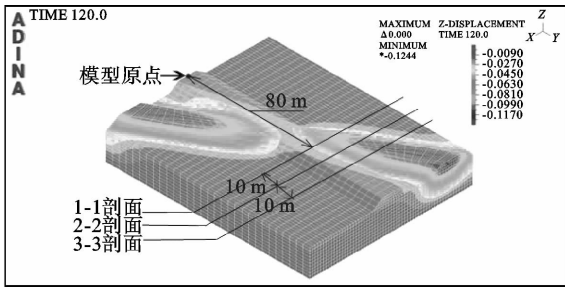


图 7 模型示意图

Fig. 7 Model's schematic

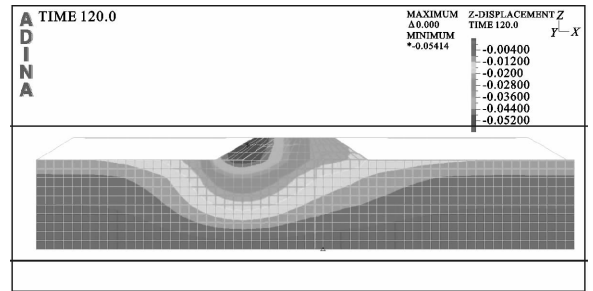


图 8 距模型原点 80 m 处沉降云图

Fig. 8 Vertical settlement of the point 80 meters from model's origin

2) 2-2 剖面

如图 9 所示, 2-2 剖面的沉降最大值发生在靠近左侧顶点的一侧, 最大值为 7.99 cm。

3) 3-3 剖面

如图 10 所示, 3-3 剖面的最大沉降量发生在靠近左侧顶点的一侧, 最大值为 10.10 cm。

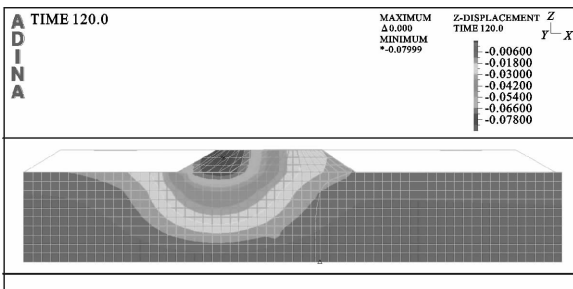


图 9 距模型原点 90 m 处沉降云图

Fig. 9 Vertical settlement of the point 90 meters from model's origin

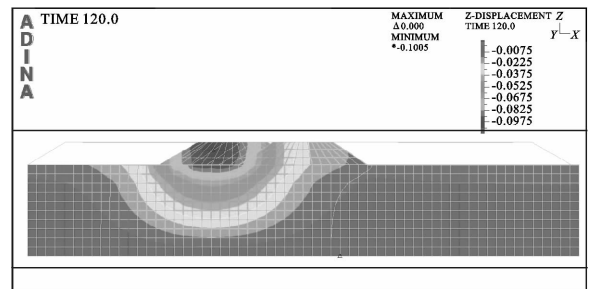


图 10 距模型原点 100 m 处沉降云图

Fig. 10 Vertical settlement of the point 100 meters from model's origin

综合以上三种情况,可得 3 个剖面的路基顶面沉降曲线(图 11)。由图可知,在新旧路基结合处,新路基的沉降量较大,同时由于它的荷载作用,使旧路基发生相应的附加沉降,新路基的宽度越大,沉降量也就越大,同样,差异沉降值就越大,稳定性就越差。新路基宽度较小,沉降曲线呈现单调变化。而宽度较大时,曲线并不是单调变化,而是呈“勺子”型。

5 结论

1) 新旧路基之间产生的不均匀沉降主要发生在新路基一侧,旧路基也发生附加变形。同时,随着时间的变化,地基固结度不断增加,地基固结沉降速率逐渐降低,最终趋于稳定。

2) 地基的固结沉降和新老路基之间的相对滑移是造成新老路基不均匀沉降的主要原因。采用台阶开挖、铺设土工格栅等合理的处理措施,可以有效地减少新路基的侧向位移和不均匀沉降。

3) 在新旧路基立体交叉路段,在新路基纵向方向上的沉降曲线呈抛物线型,靠近旧路基中心线的沉降量最小,两侧填筑的新路基沉降量较大。在路基横向方向上,沉降量随着新路基填筑宽度的增加而增大。宽度较小时,沉降曲线是一条单调曲线,沉降量最大值出现在路基顶面的边缘;宽度较大时,沉降曲线呈勺子型,沉降量最大值出现在新路基靠近顶点的一侧。

参考文献:

[1] CASAGRANDE L. Comments on conventional design of retaining structures[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1973, 121(9): 629-635.

[2] MATSUO M, ASAOKA A. Probability models of undrained strength of clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1982, 108(5): 743-756.

[3] DEGROOT J, BAECHER B. Estimating auto covariance of in-situ soil property[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 119(1): 146-147.

[4] 田波, 谭旭, 刘云全. 强夯法处理新旧路基结合部的工法[J]. 北方交通, 2006(6): 55-57.
TIAN Bo, TAN Xu, LIU Yunqian. Treatments of connection between new-used roadbeds in dynamic compaction method [J]. Northern Communications, 2006(6): 55-57.

[5] 桂炎德, 徐立新. 沪杭甬高速公路(红垦至沽渚段)拓宽工程设计方法[J]. 华东公路, 2001(6): 3-6.
DU Yande, XU Lixin. Design procedures of broadening Shanghai-Hangzhou-Ningbo expressway[J]. East China Highway, 2001(6): 3-6.

[6] 何家祥, 刘涌江. 高速公路新旧结合路基稳定性与沉降变形规律研究[J]. 公路交通技术, 2006(1): 4-8.
HE Jiexiang, LIU Yongjiang. Research on old & new road bed stability & settlement deformation rules of highway[J]. Technology of Highway and Transport, 2006(1): 4-8.

[7] 徐书平, 刘祖德. 比奥固结理论在堆载预压加固工程场地中运用[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 307-310.
XU Shuping, LIU Zude. Application of Biot's consolidation theory to improving soft ground by preloading method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 307-310.

[8] 周刚, 傅少君, 侯建国. 软粘土地基弹-粘塑性比奥固结理论的有限元分析[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(1): 18-21.
ZHOU Gang, FU Shaojun, HOU Jianguo. Finite element analysis of elasto-viscoplastic Biot's consolidation theory for soft clay foundation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(1): 18-21.

[9] 杜艳军. 旧路加宽改建新旧路基不均匀沉降的探析[J]. 低温建筑技术, 2009(10): 125-126.
DU Yanjun. Research on differential settlement of new roadbed rebuilt and broaden from old roadbed[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009(10): 125-126.

[10] 王宇, 魏艳红, 孙勇. 新旧路基沉降的数值模拟分析[J]. 低温建筑技术, 2006(4): 105-107.
WANG Yu, WEI Yanhong, SUN Yong. Numerical simulation and analysis of differential settlement[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2006(4): 105-107.

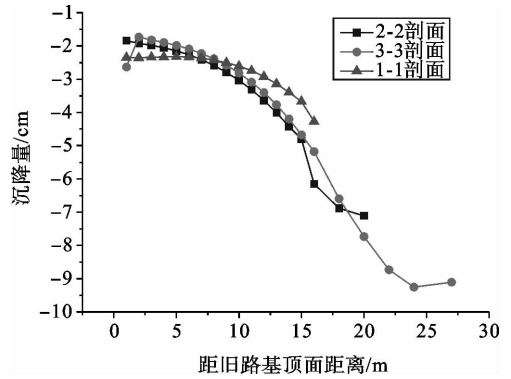


图 11 3 个剖面的路基顶面沉降曲线图

Fig. 11 Settlement curve of roadbed's top faces according to the 3 profiles