

文章编号: 1000-7598-(2007)增刊-0849-06

路桥过渡段的三维数值模拟分析

孟凡会¹, 侯永峰¹, 吴涛²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 华东交通大学 土建学院, 南昌 330013)

摘要: 根据秦沈客运专线 DK266+521 路桥过渡段结构形式及过渡段的路基面纵向、横向的动应力测试结果, 采用三维有限差分数值计算, 模拟了动荷载作用下过渡段的沉降变形分别在线路纵向、横向及路基深度方向的变化规律及过渡段设置形式、材料刚度、过渡段的尺寸对沉降变形的影响。结果表明, 正梯形过渡段的性能优于倒梯形过渡段; 过渡段碎石刚度必须满足一定的要求; 过渡段梯形上下底宽的变化对过渡段沉降的影响不明显。

关键词: 路桥过渡段; 数值模拟; 动荷载; 沉降

中图分类号: TB 115

文献标识码: A

3D numerical reasearch on bridge-subgrade transition

MENG Fan-hui¹, HOU Yong-feng¹, WU Tao²

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture Departments, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on the construction form of transition zone and the longitudinal and transverse stresses measured from the DK266+521 bridge-subgrade transition in Qin-Shen passenger special line, the longitudinal, transverse and in-depth settlements of track transition under traveling load are analyzed by finite-difference program FLAC3D, and the settlement with different factors such as format, material stiffness, and dimension is also studied. The results show that: the engineering effect of track transition in trapezium form is better than in inverse trapezium form; the graded broken stone should be intensive enough; the size of trapezium has little effect on settlement.

Key words: bridge-subgrade transition; numerical simulation; dynamic loading; settlement

1 引言

随着铁路系统第6次提速的完成, 以及动车组的使用, 高速列车对路基的作用强度越来越大, 作用频率越来越高。路桥过渡段是路基中的薄弱环节, 列车动荷载的增大会造成路桥过渡段的差异沉降不断地发展, 极易造成桥头跳车和其他路基病害。在瑞典国家铁路局和其他单位联合进行的高速列车振动的现场测试中发现, 高速列车的反复作用引起的沉降, 已经超过了铁路安全运营的界限^[1]。因此, 动荷载作用下路桥过渡段的沉降控制已成为目前路桥过渡段设置过程中亟待解决的重要问题。

根据秦沈客运专线DK266+521路桥过渡段结构形式及过渡段的路基面纵向、横向的动应力测试结果, 本文采用三维有限差分数值计算, 分析了过渡

段的沉降变形沿线路纵向、横向及沿路基深度变化规律; 并研究了过渡段设置形式、材料刚度及过渡段的尺寸对沉降变形的影响。

2 数值模型

2.1 几何模型简介

过渡段尺寸如图1所示, 其中基床表层高度为0.6 m, 基床底层厚1.9 m, 路堤填土厚度为3.1 m, 过渡段为碎石填筑梯形, 梯形上边长5 m, 斜边坡比为1:2, 基础部分取深度为20 m。桥台部分材料性质较好, 预计变形很小, 因此将其简化为宽两米, 深度自地面至基础以下20 m的不规则实体。

2.2 材料的本构模型和特性参数

Mohr-Coulomb 塑性模型所应用的代表性材料为松散、胶结粒状材料如岩石、土和混凝土, 适用

收稿日期: 2007-05-30

作者简介: 孟凡会, 女, 1982年生, 硕士研究生, 从事岩土工程方向研究。E-mail: 05121260@bjtu.edu.cn

于岩土力学分析。因此对于路桥过渡段的沉降问题,本文选用 Mohr-Coulomb 塑性模型进行 FLAC^{3D} 数值计算^[2, 3]。

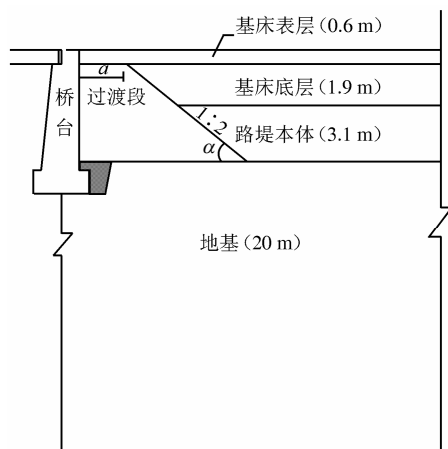


图1 过渡段尺寸图
Fig.1 The dimension of bridge-subgrade transition

Mohr-Coulomb 屈服准则的表达式为

$$f(I_1, J_2, \theta) = \frac{1}{3}I_1 \sin \varphi + \sqrt{J_2} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{\sqrt{J_2}}{\sqrt{3}} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \sin \varphi - c \cos \varphi = 0, \quad (1)$$

($0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$)

式中: I_1 为应力张量不变量; J_2 为偏应力张量不变量; θ 为 Lode 角。

根据材料特点,基床表层、基床底层、路堤填土、过渡段碎石、基础、桥台均采用三维结构实体单元来模拟,其中基床表层、基床底层、路堤填土、过渡段碎石、基础采用 Mohr-Coulomb 塑性模型来模拟,桥台部分采用线弹性模型来模拟。具体参数如表 1 所列。

表 1 材料参数表

Table 1 Parameter of materials

位置	模型	弹性模量 E /MPa	泊松比 μ	内摩擦角 φ / ($^\circ$)	凝聚力 c /kPa	密度 /g·cm ⁻³
基床表层	Mohr-Coulomb	150	0.33	27	70	1.95
基床底层	Mohr-Coulomb	70	0.35	20	55	1.90
路堤填土	Mohr-Coulomb	45	0.35	20	40	1.85
碎石过渡	Mohr-Coulomb	160	0.33	35	250	20.0
基础	Mohr-Coulomb	35	0.4	16	30	1.80
桥台	线弹性模型	30 000	0.22	30	350	24.0

2.3 边界条件

由于过渡段沿纵向为轴对称结构,模型只取其一半,具体模型如图 2 所示。在重力平衡计算时,模型的边界条件为四周及底部约束,上部为自由面;在动力计算部分,模型的底部约束,四周为自由边界。

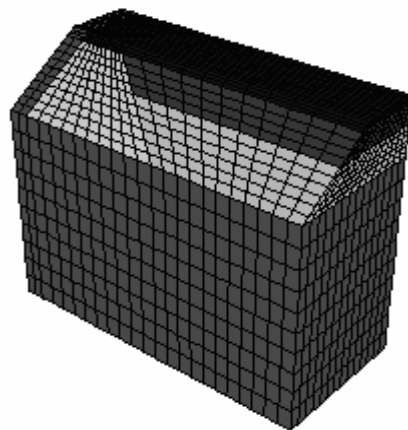


图2 正梯形过渡段模型图
Fig.2 Three dimensional model with trapezium form

3 列车荷载的模拟与施加

3.1 列车竖向振动荷载

所选用的列车荷载为秦沈客运专线实测数据中的典型曲线。在过渡段轨道正下方的基床表层埋设土压力传感器,使实验列车以 200 km/h 的速度通过过渡段,获得动应力曲线如图 3 所示。试验列车由“中华之星”动力车牵引,挂 4 节“中华之星”拖车和一节“奥星”动力车。车行方向为下行^[4]。

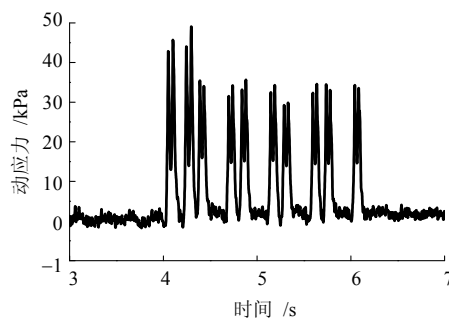


图3 动应力实测曲线
Fig.3 The history of measured dynamic stress

3.2 列车荷载沿横向分布规律

列车振动荷载横向分布类似于马鞍状^[5],根据秦沈客运专线实测数值^[6],作出列车动荷载横向分布图。为便于计算将其简化为阶梯状直线段,如图 4 所示,其中分段点的选择既考虑了曲线的形状也考虑了模型网格的划分情况。

3.3 列车荷载的施加

根据列车竖向荷载以及列车荷载横向分布曲线,在道床所覆盖的基床表层上分段施加荷载,具体分布为

$$y = \begin{cases} 0 \leq x \leq 0.8 & \text{或} 4.2 < x \leq 5.25 \\ 0.6F(t), & 0.8 < x \leq 1.2 \text{或} 3.6 < x \leq 4.2 \\ F(t), & 1.2 < x \leq 1.8 \text{或} 2.8 < x \leq 3.6 \\ 0.5F(t), & 1.8 < x \leq 2.8 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $F(t)$ 为作用在路基表面上随时间而变化的动力，方向为竖直向下，即图5中的动应力。这种分段施加荷载方式在一定程度上模拟了实际列车通过时列车振动荷载在过渡段纵向和横向的分布情况。

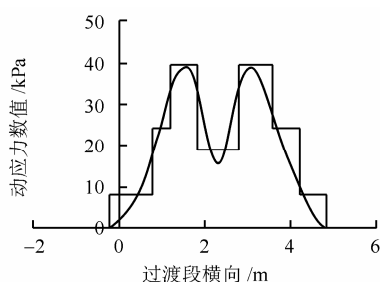


图4 列车荷载沿横向分布简化曲线

Fig.4 The simplified curves of transverse distribution under dynamic loading

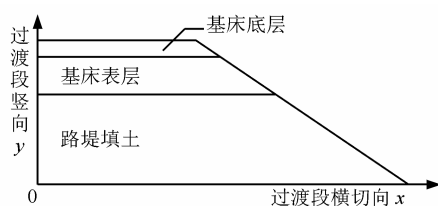


图5 过渡段横切面图

Fig.5 The profile of bridge-subgrade transition

4 计算结果及分析

4.1 时间对沉降的影响

根据上述列车荷载的实测数值和横向分布规律，在过渡段路基表面施加动荷载。荷载作用时间约为 2.3 s，分别计算 2.3, 2.7, 3.0, 3.5 s。

自桥台后依次选取一系列点，分别为外轨正下方基床表层上距离桥台为 0, 4, 8, 10, 14, 18, 22, 26, 30, 32 m 的点，得到纵向沉降曲线如图 6 所示（以下纵向沉降曲线都是该系列点所得）。取桥台后 30 处外轨正下方一系列点，以基床表层上表面为原点，分别为距离原点 0, 5.6, 10.6, 15.6, 20.6, 25.6 m，得到沉降沿深度变化曲线如图 6 所示（以下沉降沿深度变化曲线都是该系列点所得）。

以路基边坡与水平地面相交处为原点，取桥台后 30 m 处外轨正下方基床表层上一系列点，分别

为距离原点 9.4, 11.05, 12, 13.65, 14.65 m，也就是道碴所覆盖到的基床表层的几个特征点，得到路基表面沉降沿横向分布曲线（以下沉降沿过渡段横向变化曲线都是该系列点所得），如图 7 所示。

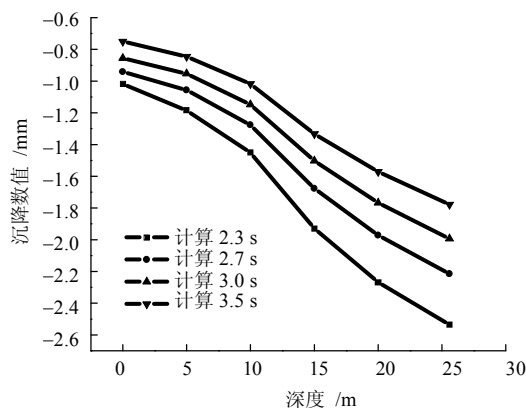


图6 沉降沿深度曲线

Fig.6 Variation of settlement with in-depth

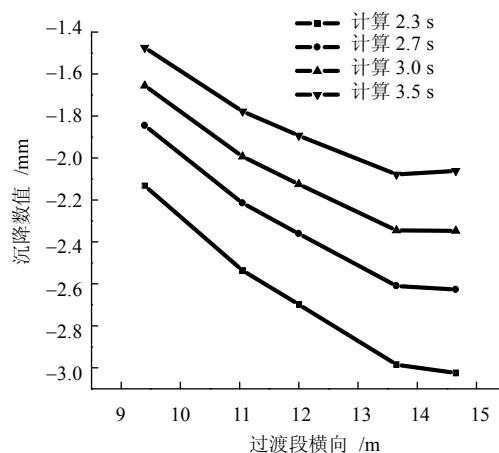


图7 路基表面沉降沿横向分布曲线

Fig.7 Variation of settlement in transverse wise

由图 6 可知沉降随深度增加而递减，到达基础以下 20 m 时，沉降已接近于 0。由图 7 可见，对于同一系列点，随着计算时间的不同，沉降沿过渡段横向分布规律是相似的。图 8 显示，荷载作用完毕时沉降值达到最大，之后随着时间增长，部分弹性变形恢复，沉降趋于稳定。

4.2 循环荷载作用下的沉降及与实测值的比较

选用正梯形模型，保持其他条件不变，对过渡段路基表面施加循环荷载。根据上述分析，选取荷载作用时间段分别为 0~7.0, 10.0~17.0, 20.0~27.0, 30.0~37.0 s，计算时间为 40.0 s。记取第 10.0, 20.0, 30.0, 40.0 s 的计算结果，得到纵向沉降曲线如图 9 所示（为方便与实测数据比较，取该曲线沉降值为正）。由图 9 可见，在循环荷载作用下路基表面的

沉降随荷载循环作用次数增加而增加, 沉降规律相似, 沉降变形为塑性变形。实测沉降是根据秦沈客运专线实测速度积分所得, 图 10 为车速度自 197~210 km/h 之间变化时的曲线。比较可见, 数值计算的过渡段的沉降规律与实测沉降规律相似。

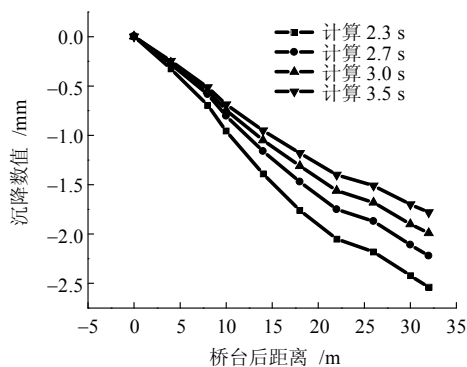


图 8 纵向沉降与计算时间关系曲线
Fig.8 Variation of settlement with computing time

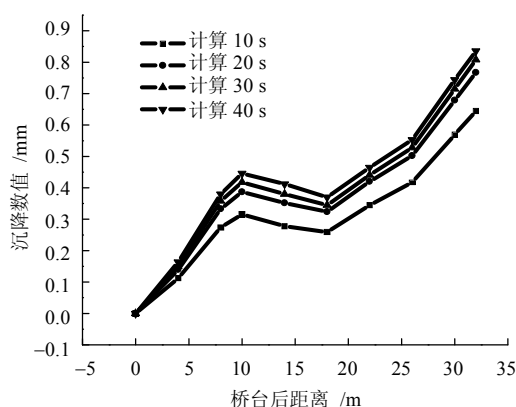


图 9 循环荷载作用下沉降沿纵向分布曲线
Fig.9 Variation of settlement with cyclic loading

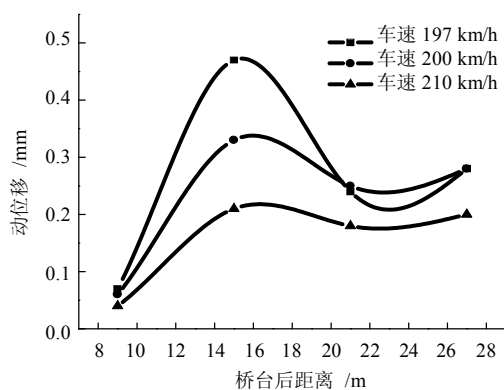


图 10 实测沉降沿纵向分布曲线
Fig.10 Variation of settlement with observational data

4.3 过渡段设置形式对沉降的影响

以前的国内规范都要求路桥过渡段设置为倒梯形, 而京沪高速铁路设计暂行规定要求路桥过渡段设置为正梯形形式^[7, 8]。因此, 对上述两种设置

方式的路桥过渡段进行数值计算, 分析过渡段不同设置形式对沉降的影响。

在材料特性参数和其他边界条件相同的条件下, 对正梯形和倒梯形的过渡段施加动荷载。所加荷载为实测值, 荷载作用时间约为 2.3 s。计算时间也是 2.3 s, 所得沉降为弹性变形 (以下分析所加荷载、计算时间、沉降性质皆同)。结果如图 11~13 所示。

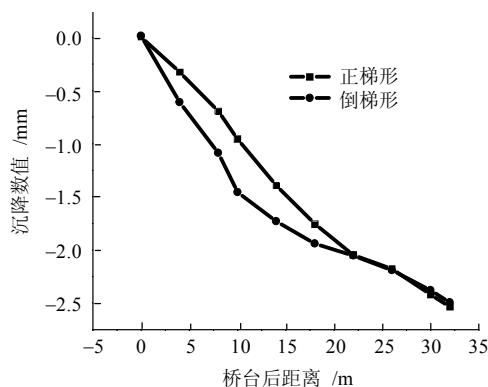


图 11 正梯形和倒梯形过渡段沿纵向沉降变化曲线
Fig.11 Variation of settlement in trapezium and inverse trapezium

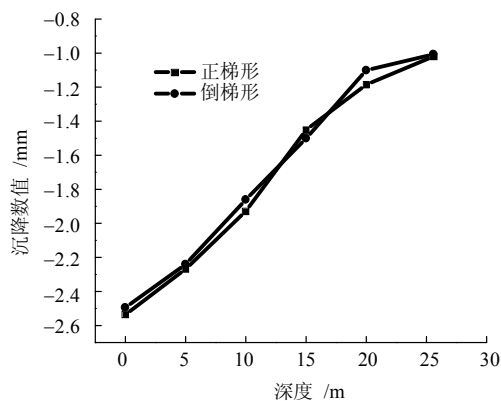


图 12 正梯形和倒梯形沿深度沉降变化曲线
Fig.12 Variation of settlement with depth in trapezium and inverse trapezium

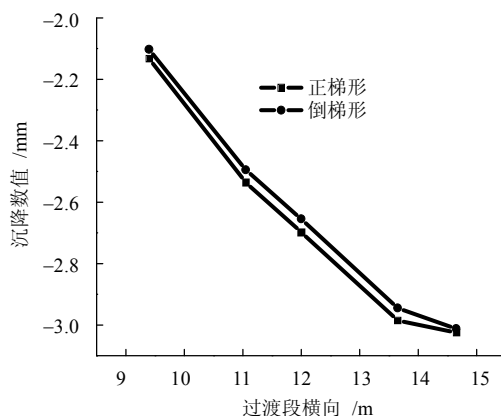


图 13 正梯形和倒梯形路基表面沉降沿横向分布曲线
Fig.13 Variation of settlement in transverse wise with trapezium and inverse trapezium

由图 11~13 可见,在动荷载作用下,正梯形和倒梯形过渡段的各方向沉降曲线是相似的。从沉降沿纵向分布曲线上看来,正梯形过渡段较平缓;而从沉降沿过渡段横向分布曲线上来看,倒梯形的沉降值较小,但差值很小。在材料参数及其他条件相同的情况下,采用正梯形过渡段可以更好的保持过渡段的平顺性,减少路基病害的发生。

4.4 过渡段碎石刚度对沉降的影响

在保持其他条件不变的情况下,过渡段碎石弹性模量分别采用 120, 140, 160, 180, 200 MPa 对过渡段进行动荷载作用下的数值分析,结果分别如图 14~16 所示。由图可见,碎石刚度为 120 MPa 时过渡段沉降有突变,显然碎石刚度太小是不能符合要求的。碎石刚度逐渐增大时,沉降曲线平缓,沉降有规律,这种沉降能够保证过渡段的几何平顺性;碎石刚度大于 160 MPa 以后,曲线不再有明显变化,因此碎石刚度约为 160 MPa 时就能保证过渡段的力学平顺性。碎石部分是过渡段的关键部分,该部分必须要满足设计要求的刚度。

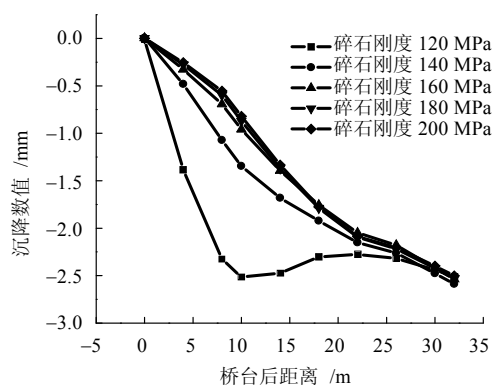


图 14 碎石刚度变化与纵向沉降关系曲线
Fig.14 Variation of settlement with the stiffness of graded broken stone

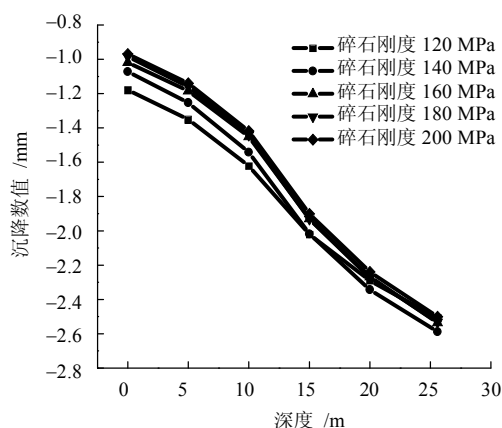


图 15 沉降沿深度变化曲线
Fig.15 Variation of settlement with in-depth

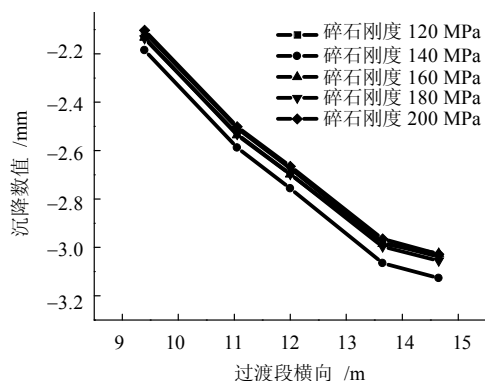


图 16 沉降沿横向分布曲线
Fig.16 Variation of settlement in transverse wise

4.5 过渡段尺寸的影响

对于正梯形过渡段,其梯形部分上底宽度一般要求在 3~5 m。本文在其他条件不变的情况下,对其过渡段上底宽分别取值 3, 4, 5, 6 m, 然后按照过渡段下底宽的计算公式改变下底宽数值,但保持过渡段斜面的角度不变化^[7]。

分别对 4 种模型进行数值计算,沿纵向沉降曲线如图 17 所示。由图可见,正梯形过渡段上下底宽取值不同时,符合设计要求的 3 种模型(上底宽分别为 3, 4, 5 m)的过渡段的最大沉降值没有明显变化,过渡段的沉降规律也没有明显差异,上底宽 3 m 时稍好一些,上底宽为 6 m 的过渡段沉降规律与前 3 种模型类似。可见过渡段的上下底宽度对于沉降的影响很小,在处理过渡段时只要符合设计要求即可。若盲目的增大过渡段尺寸,反而会增大造价,最后只能是事倍功半。

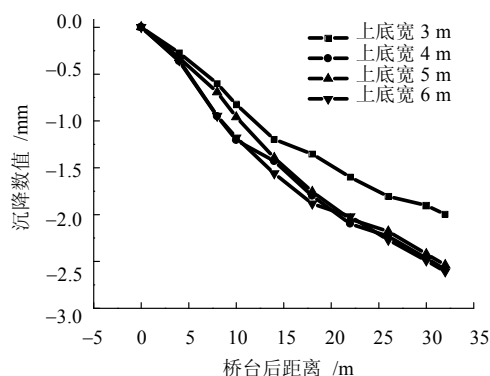


图 17 过渡段尺寸变化与纵向沉降关系曲线
Fig.17 Variation of settlement with the dimension of bridge-subgrade transition

5 结 论

(1) 对于碎石处理的路桥过渡段,在列车动荷载作用下,采用正梯形过渡段比倒梯形过渡段有利

于保持轨道的平顺性。从沉降沿过渡段横向变化曲线看,正梯形的沉降值稍大一些,但与倒梯形的差值很小。

(2) 数值分析表明,对于碎石处理的过渡段,碎石的刚度必须满足设计要求,碎石刚度不低于 160 MPa 时,过渡段沉降较小,沉降更加平缓。

(3) 在符合设计要求的范围内,过渡段上下底的尺寸变化对于沉降的影响不明显;当过渡段的尺寸比设计要求更大时,过渡段沉降曲线没有明显变化。因此过渡段尺寸方面只要符合要求即可,可以根据具体的施工要求选择。

参 考 文 献

- [1] Hall L. Simulations and analyses of train-induced ground vibrations, a comparative study of two and three—dimensional calculations with actual measurements[Ph. D].
- [2] Itasca Consulting Group, Inc. Fast language analysis of continua in three dimensions[R]. [s. l.]: Itasca Consulting Group. Inc., 1997.
- [3] 刘波. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [4] 刘建坤, 曾巧玲, 侯永峰. 路基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [5] 韩自力, 张千里. 既有线提速路基动应力分析[J]. 中国铁道科学, 2005.
- [6] 铁道科学研究院铁道建筑研究所. 不同基床表层结构及路基、轨道动态试验研究[R]. 北京: 铁道科学研究院铁道建筑研究所, 2003.
- Sweden: Department of Civil and Environmental Engineering. Royal Institute of Technology, 2000. 95—108.