

既有铁路提速改造 软基动力性能分析与应用

■ 王 峰 等 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

既有铁路提速改造软基动力性能 分析与应用

王 峰 等 著

中国铁道出版社

2 0 1 2 · 北 京

图书在版编目(CIP)数据

既有铁路提速改造软基动力性能分析与应用/王峰等著. —北京:中国铁道出版社, 2012. 2

ISBN 978-7-113-14225-4

I. ①既… II. ①王… III. ①铁路提速—影响—软土地区—铁路路基—动力特性—研究 IV. ①U213. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 021288 号

书 名:既有铁路提速改造软基动力性能分析与应用
作 者:王 峰 等

责任编辑:徐 艳 陈小刚 电话:010-63549495 电子邮箱:cxgsuccess@163.com
封面设计:崔丽芳
责任印制:陆 宁

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京市精彩雅恒印刷有限公司

版 次:2012年2月第1版 2012年2月第1次印刷

开 本:787 mm×960 mm 1/16 印张:8.75 字数:174千

书 号:ISBN 978-7-113-14225-4

定 价:40.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

作者简介

王 峰 上海铁路局副局长,高级工程师。近年来,曾组织建设上海铁路局管段中国第一条既有铁路提速 200 km/h 开行动车组的浙赣铁路,中国最早建成的 250 km/h 有砟轨道客运专线合宁铁路、合武铁路、沿海铁路,时速 350 km 沪宁城际铁路、沪杭高速铁路、宁杭城际铁路、宁安城际铁路等大批高速、高标准铁路建设任务,有效地服务于长三角区域经济快速发展。

本着“以科技创新引领铁路建设发展”的理念,组织多项重点课题研究和攻关,其中京沪电气化铁路提速 250 km/h 接触网系统成套技术研究,为我国铁路客运专线建设积累了经验;250 km/h 沿海铁路客运专线移动模架现场制梁、软土路基处理和隧道安全控制等关键技术研究,为 350 km/h 高速铁路建设积累实践经验。先后承担了铁道部“铁路建设项目标准化管理体系研究”、“客运专线整孔箱梁移动模架法施工技术研究”、“基于路局层面的高速铁路联调联试技术管理创新研究”、“高速铁路与邻近既有有线运营振动相互影响研究”、“宁杭客专无砟轨道大跨度预应力混凝土刚构连续梁长期变形监控技术研究”等多项重点课题研究;获国家级企业管理现代化创新成果二等奖,铁道部科技进步二、三等奖,上海市科技进步二等奖,上海市优秀发明金奖,并获上海市重点工程“十大杰出人物”、铁道部火车头奖章、上海市五一劳动奖章等多项殊荣。

组织编著出版了《铁路建设项目管理岗位工作指南》、《铁路工程建设标准化管理》、《铁路建设工程标准化评定工作指南》、《高速铁路工序管理要点》、《高速铁路联调联试探索与实践》等丛书,已广泛应用于上海铁路局工程建设管理领域,对铁路工程建设管理进行了有益的探索。

项宝余 上海金山铁路有限责任公司,总经理,教授级高级工程师。

徐永福 上海交通大学,教授,博士生导师。

张 骏 上海铁路局建设管理处,副处长,高级工程师。

前 言

铁路列车运行速度是维系铁路生存和发展的根本动力。自 1825 年在英国诞生第一条铁路以来,提高列车运行速度一直是铁路这一运输方式持续提升竞争力的重要方面。我国铁路在 1997 年至 2007 年十年间进行了六次大提速,大面积改善了原有运力不足、低速落后的既有运输路网。

作为铁路重要组成部分的轨道结构基础,不但要承受上部结构重量,还要承受长期列车荷载的循环作用。随着行车速度的提高,路基承受的荷载密度增大,对路基的冲击作用加强,路基内部的附加动应力增大,影响深度亦增加,加剧了路基的变形,同时也产生了更强烈的轨道冲击动荷载,严重影响轨道系统的平顺和稳定,甚至危及线路安全。软土地区路基受行车影响的恶性循环效应更为显著,制约线路速度提升的影响突出表现在两个方面:其一,早期修建的铁路工后沉降标准低,过低的工后沉降标准,导致既有铁路路基局部出现明显的差异沉降,轨道基础形成刚度不平顺,加剧了局部列车荷载的动力不利效应。其二,尽管现有速度条件下软土路基沉降稳定,但是从低速水平提高至较高速度后,行车荷载的附加动力成分增加,车辆与轨道相互作用加强,路基土体的动应力提高,引起新的长期附加沉降,导致各种路基病害,甚至导致路堤垮塌。如日本东海道新干线,设计时速为 210 km,只采取了轨道加强措施,忽略了软土路基加固,导致路基沉降难以控制,运行速度下降到 110~180 km/h;澳大利亚哈默莱特铁路曾因路基问题 13 次出轨。因此,软土地区既有铁路提速一直是铁路提速的难点。

本书以上海铁路局管内的金山城郊铁路为依托,以现场测试和数值仿真为手段,研究了路基在行车荷载下的动力特性,论证了既有线列车速度提速至 160 km/h 设计方案可行性,分析了提速引起的软土路基附加沉降,评价了提速过程中路桥过渡段的动力特性,为今后类似软土地区提速改造工程提供了借鉴。本书主要分为以下 8 个部分。

(1)根据现场调查和现场测试,调查了现有路堤的破坏形式,检测了现有路基的承载力和密实度等性状,提出路基处理的初步建议。

(2)采用表面波探测试验方法,探测金山铁路既有线路堤的土层剪切波速度构造,确定路基处理的合理深度。

(3)测试了既有铁路普通路段和路桥过渡段在现行速度下的动力响应特性,研究了路基、路桥过渡段关键部位承受列车动荷载的振动响应规律。

(4)建立列车-路基动力作用模型,输入现场实测的现行速度下的动力响应特性作为激励荷载,分析了现行速度下路基的动应力和沉降及其分布规律。

(5)建立既有线普通路基-场地动力分析模型,研究路基结构在列车荷载作用下动力响应特性,评价了列车提速引起的动应力及其影响深度,计算了动荷载循环作用下的累积沉降。

(6)建立简化的三维梁-离散弹簧支承模型和过渡段轨道折角空间动力分析模型,分析差异沉降和刚度变化对轨道动力性能的影响,建立差异沉降与轨道振动的相关关系,提出了过渡段内的差异沉降控制值。

(7)通过现场实测数据和有限元计算,分析紧邻增建二线堤基处理的搅拌桩、多向旋喷桩和高压注浆施工对既有线路基的影响,分析了软基处理施工引起的超孔隙水压力、土压力和侧向位移的特性,引起超孔压力消散引起既有线的附加沉降。

(8)从应力平衡角度提出既有线合理抬道高度的定义,计算了路基抬道前后地基中的附加应力,由此确定抬道合理高度,分析抬道对路基应力和沉降的影响。

在本书相关内容的研究过程中,得到金山公司、铁四院、中铁二十局、上海建工集团和上海交通大学等单位的张旗、那同伶、唐培文、许抒、孙德安、车爱兰、许杰、杨磊、王益栋等直接帮助和支持,在此深表谢意!本书对软土地地区提速改造的相关难题作了一定分析,提出了初步的解决方法建议,可对今后的类似的工程建设提供指导意义。为了保持研究内容的完整性,书中尽可能地引用相关学者的研究成果,对书中引用的成果的著者致以深深的敬意!由于笔者才疏学浅,书中不当之处肯定存在,恳请读者不吝赐教!

2011年12月于上海

目 录

1 绪 论	1
2 现状调查	4
2.1 既有铁路路基地貌	4
2.2 既有铁路路基特性	8
2.3 既有铁路提速改造措施	11
2.4 小 结	12
3 现场勘探试验	13
3.1 表面波勘探原理和方法	13
3.2 现场数据采集	15
3.3 数据分析	16
3.4 小 结	18
4 既有铁路路基动力特性测试	19
4.1 试验目的	20
4.2 试验方法	20
4.3 试验内容	22
4.4 测试分析	24
4.5 小 结	36
5 既有铁路路基动力响应分析	37
5.1 分析模型	37
5.2 列车荷载模拟	41
5.3 计算分析	42
5.4 小 结	50

6 既有铁路路基提速分析	51
6.1 动力指标	51
6.2 荷载模拟	52
6.3 提速影响分析	58
6.4 提速引起的附加沉降	67
6.5 小 结	70
7 提速条件下路桥过渡段动力分析	72
7.1 路基-场地计算模型	72
7.2 轨道-基础计算模型	75
7.3 计算结果分析	81
7.4 小 结	86
8 新建二线软基处理施工影响分析	87
8.1 现场测试实施	87
8.2 测试结果分析	92
8.3 软基处理施工影响比较	107
8.4 MMP 桩湿喷法施工影响分析	110
8.5 小 结	116
9 既有线抬道合理高度	117
9.1 抬道合理高度	117
9.2 抬道应力分析	121
参考文献	125

1 绪 论

自 1825 年在英国诞生第一条铁路以来,不断提高列车运行速度一直是铁路持续提升竞争力的重要手段。1997 年至 2007 年十年间我国铁路进行了六次大提速(翟婉明,2007),大面积改善了原有低速落后的既有运输路网的运力不足。随着我国经济建设的蓬勃发展,一些地处沿海软土地区且非主要干线的次级城郊、城乡铁路也逐步纳入提速的日程。这些属于修建时间早的既有铁路,依附于主要干线路网,是沟通中心城区和周边的重要运输纽带。由于运输任务重,线路状况制约,行车速度较低,平均速度往往徘徊在 $40\sim 50\text{ km/h}$ (马伟斌,2006)。我国铁路提速的基本目标是,繁忙干线旅客列车最高速度 200 km/h ,其他线路旅客列车最高速度 $120\sim 160\text{ km/h}$;货物列车最高速度 $90\sim 120\text{ km/h}$,轻快货物车最高速度 160 km/h (翟婉明,2007)。因此,从低速状态提升至 160 km/h 甚至 200 km/h ,是低等级既有铁路亟待实现的目标。

对于轨道来说,提速技术已日臻成熟,多次大提速过程中已积累了较多的经验,但提速过程中既有线软土路基处理还处于探索阶段。作为铁路有机组成部分、轨道结构的基础,路基不但要承受上部结构的重量,还要承受长期列车荷载的循环作用。路基中随车辆移动而往复变化的动应力,短期可以看成是一种动态过程,长期则是一种往复累积过程,与荷载密度、频率和强度密切相关。随着行车速度的提高,路基承受的荷载密度增大,对路基的冲击作用加强,路基内部附加动应力相应增大,且向下传递范围加深,加剧路基累积变形,威胁轨道系统的平顺和稳定,产生更强烈的轨道冲击动荷载,形成恶性循环,危害线路安全(胡安洲等,1996)。

就软土路基而言,这种恶性循环效应更为显著,制约线路速度提升的不利影响突出表现在两方面:其一,早期修建的铁路工后沉降标准低,如萧甬线增建二线施工完成后,工后沉降高达 50 cm (王利,2009)。工后沉降标准过低,导致既有铁路路基局部出现明显的差异沉降,轨道基础形成刚度不平顺,加剧局部列车荷载的动力不利效应,在既有铁路路桥过渡段显得尤为突出。软土环境中形成的桥台和路基的过大差异沉降迫使钢轨产生形变,造成折角或曲线状不平顺,引发轨道在提速列车荷载下产生过大振动,影响行车安全。其二,尽管现有速度条件下软土路基沉降稳定,但从低速水平成倍增至 160 km/h 速度后,行车荷载的附加动力成分势必会增加,车辆与轨道相互作用力加强,路基土体的动应力也相应提高。随着速度增加,较高的动应力

或过大振动就有可能影响到路基下卧的软土,地基中超孔隙水压力上升,塑性变形增加,破坏路基稳定状态,引起新的附加沉降,导致各种路基病害,使路基继续陷入不利轨道运营的恶性循环。在软土地区这种现象已屡见不鲜,上海地铁 1 号线建成未通车的 2 年 3 个月内沉降基本没有发展,但通车后沉降竟达到 30~60 mm,4 年内甚至达到 140 mm(陈云敏等,2002),可见车辆动荷载引起的附加沉降非常可观;日本东海道新干线,设计时速为 210 km,由于只采取了轨道加强措施,忽略了软土路基加固,导致路基沉降难以控制,使运行速度下降到 110~180 km/h(刘雪珠和陈国兴,2008);澳大利亚哈默莱特铁路曾因路基问题 13 次出轨(刘雪珠和陈国兴,2008)。因此,软土地区既有铁路提速面临着严峻的路基问题。但是,迄今为止软土地区的提速改造工程为数不多,如沪宁线,津浦线(宗军良,2006),尤其关于提速对路基附加变形、过渡段路基轨道稳定的影响等方面,仍缺乏深入的研究。

上海铁路局管内的上海南至金山扩能改造工程位于上海市南部,途经上海市闵行区、松江区、金山区。主体工程分两部分,一是与既有线并行增建线路从上海南站出站,沿既有老沪杭线经莘庄至春申;再沿沪杭线至新桥,然后沿既有新闵线增建二线至闵西;从闵行站出站后向南沿既有金山支线至金山增建二线,全长 55.45 km。二是增建二线完毕后,对金山既有线进行提速改造,其中包括金山和新闵两条支线。新闵支线修建于 1959 年,金山支线 1974 年建成通车,线路为国铁 II 级,设计标准低,地理位置如图 1-1 所示,新闵支线迄今运营已有 50 年,金山支线运营也有 36 年,运营车辆以货车为主,客车一天往复两对,客货混跑,线路速度低,维持在 40~80 km/h,运力极低,完全不能满足当前的运输需求,因而亟待提速改造,按设计要求线路速度目标拟提升至 160 km/h,以缓解目前运能不足的紧迫现状。

由于上海南至金山扩能改造工程位于长江三角洲入海口东南前缘之滨海积平原区,沿线广泛分布深厚软土地层,既有线路基在长期列车荷载作用下情况不容乐观。现场调查表明,既有线路基未进行整治,基床出现不同程度的下沉外挤、边坡外鼓、坍塌、陷穴等病害,路桥结合处差异沉降明显,过渡段轨道不平顺严重,过大的路基沉降引起道床普遍加厚,线路路基现状极差。目前行车速度低于 80 km/h。现场 N_{10} 动探试验勘测中,既有线路基及地基的基本承载力均不满足提速要求,提速后软土地基不稳定。因此,对现有路基状态给出评价十分迫切和必要,在此基础上提出路基整治措施。

本书以上海南至金山扩能改造工程为依托,从动力学角度出发,以现场测试和数值仿真为手段,分析了既有线提速至 160 km/h 后,路基处理设计方案能否满足提速要求,提速引起的软土路基附加沉降量;评价了提速过程中路桥过渡段动力响应等关键问题,建立了行车速度与路基动力指标和沉降的理论关系,揭示了软土地基的动力影响范围,为以后软土环境类似的提速改造工程设计或工程评价提供依据。



图 1-1 金山铁路地理位置及基本路线

2 现状调查

既有铁路提速已成为世界铁路发展的共同趋势,提速线路的路基基床必须要有足够的强度,保证上部轨道结构的稳定性和列车运行的安全性,不发生大的基床病害,基床的结构不产生大变形。与路基有关的应力概念一般有两个,一是由运营列车作用在路基上的动应力(动强度),二是路基本身的静承载力(静应力、静强度)。

提速条件下的路基动强度稳定条件应满足: $q_d \leq [q_d]$,这里 q_d 是由运营列车产生的动应力, $[q_d]$ 是路基允许的动强度。路基的动强度不易直接求出,一般由静承载力乘以折减系数得到。由列车行驶作用产生于路基上的应力,称为动应力。按时速 160 km 铁路路基设计暂行规定中的公式计算,当时速达到 160 km 时,路基面最大动应力值大约 89 kPa;铁科院《关于路基动应力与车速关系的研究》成果,当列车轴重确定时,时速每提高 10 km,路基面应力将增大 4~6 kPa。

路基静承载力与路基填料、形状、压实度、线路养护条件、列车速度等有关,列车提速路基承受的动应力值变化不大,但应力作用次数增加许多,路基所需承载力增加。土质条件不同,路基的动、静强度比不同。对于颗粒细、粒间黏结力小的粉土,动、静承载力比为 0.6;广深线资料显示,当基床表层 0.3 m 为弃渣时,动、静强度比可增大至 0.7~0.8。

现行规范以 K_{30} 地基系数作为检查路基基床的强度与变形的综合性指标。对于 120 km/h 以上的 I 级干线细粒土基床表层, K_{30} 值就要求达到 0.9 MPa/cm。根据大秦线有关研究资料介绍,地基系数 K_{30} 值与基床表面的允许承载力(即静强度)的关系为 $[\delta_0] = 0.24 K_{30} + 0.015$,这里 $[\delta_0]$ 的单位为 MPa, K_{30} 值的单位为 MPa/cm。细粒填料的动静强度比一般约为 0.6,按此计算,当 $K_{30} = 0.9$ MPa/cm 时,相对应的基床表面的允许静强度为 0.231 MPa,允许动强度为 0.14 MPa。

2.1 既有铁路路基地貌

为直观认识既有线铁路路基工程现状,了解路基在列车动荷载长期作用下的影响状态,进一步确定列车荷载对路基动态作用的基本参数,有必要对提速改造路段进行现场踏勘,调查既有线路基和过渡段存在的病害状况,获取地基土层的基本

参数。

以上海南至金山扩能改造工程为例,既有新闵支线新桥至闵西区段,全长 6.283 km,既有线路基均为填方路基,路基填土高度一般为 0.5~2.5 m;既有金山支线闵西至金山段,全长 34.608 km,路基填高一般为 1~2.5 m,路基边坡坡率 1:1.5,坡面采用草皮护坡,局部采用浆砌片石护坡。既有线路基填料多为线路两侧就地取土,基床填料一般为 C 和 D 类土。既有线两侧由于就地取土,形成了沿线大量的取土坑、水塘,造成既有线两侧水网密布。同时,既有铁路地处长江三角洲入海口,地层具有海陆相相互交替沉积的特点。大部分地段地表以下 25~27 m 范围内上部广泛分布第四系全新统冲海积、海积流塑软土层;其下为第四系上更新统冲海积、海积、湖积地层。上海地处中纬度沿海地区,在全球气候带分布中属北亚热带南缘,是南北冷暖气流交汇地带,气候湿润,四季分明,雨热同季,降雨充沛,地表水和地下水发育十分丰富,地下水埋深非常浅。从沿线地理情况可知,既有线路基工程处于典型的软土工程环境之中,加上长期承受繁忙沉重的客货运压力,路基情况不容乐观。

由于年久失修,加上上海地区独特的气象和水文条件导致既有线产生了大量的病害,如翻浆冒泥、路基基床下沉外挤、边坡溜坍、陷穴等。为了进一步明确既有线路基病害发展的程度,在整个金山铁路沿线,采用重点区段观察、文字描述和影像记录的方式展开踏勘调研。踏勘区段包括 K2+280~K3+040、K12+190~K12+550、K30+960~K31+210 和 XMK4+950~XMK6+163。踏勘区段路基状况如表 2-1、表 2-2 所述。

表 2-1 既有铁路(新闵支线)踏勘区段路基情况(线路冒浆板结 $\geq 60\%$)

里 程		边坡防护类型		路肩宽度(m)		道砟厚度 (m)	既有路基描述
起始里程	终止里程	左侧	右侧	左侧	右侧		
K4+950	K5+650	浆砌护肩 草皮护坡	浆砌护肩 草皮护坡	0.2~0.5		0.7~0.8	路基略有下沉局部 路肩破坏
K5+650	K6+100	浆砌护肩 草皮护坡	浆砌护肩 草皮护坡	0~0.4		0.8~1.0	路基略有下沉部分 路肩破坏、片石脱落
K6+100	K6+199	浆砌护肩 草皮护坡	浆砌片石 拱形骨架护坡	0.3~0.5		0.5~0.6	右侧拱形骨架护坡 坡面存在裂缝
K6+199	K6+163	浆砌片石 护坡	浆砌片石 拱形骨架护坡	0.3~0.5		0.5~0.6	两侧坡面存在裂缝

表 2-2 既有铁路(金山支线)踏勘区段路基情况

里 程		边坡防护类型		路肩宽度(m)		道砟厚度 (m)	既有路基描述
起始里程	终止里程	右侧	左侧	左侧	右侧		
K2+280	K2+590	浆砌护肩 草皮护坡	浆砌护肩 草皮护坡	0.5~0.7	0.85	1.0~1.2	路基下沉,左侧路 肩破坏、塌陷,边坡外 鼓,片石脱落
K2+650	K2+685	浆砌片石	浆砌片石	0.6~0.7		0.7~0.9	路基下沉两侧浆砌 片石护坡开裂
K2+685	K2+800	浆砌护肩 草皮护坡	浆砌护肩 草皮护坡	0.6~0.7		1.2	路基下沉、下陷路 肩塌陷
K2+800	K3+040	浆砌护肩 草皮护坡	浆砌护肩 草皮护坡	0.9~1.0		0.75	路基略有下沉,路 肩坍塌严重外倾,用 轨枕支护
K12+190	K12+380	浆砌护肩 草皮护坡	浆砌护肩 草皮护坡	0.75	0.7	0.9	路基下沉,部分浆 砌护肩结合草皮护坡 护坡开裂,外倾,采用 抛石和轨枕支挡
K12+405	K12+550	浆砌护肩 草皮护坡	浆砌护肩 草皮护坡	0.8	0.8~0.9	0.8~1.0	路基下陷,部分路肩 开裂边坡塌陷,外挤
K30+960	K31+210	浆砌片石 护坡	浆砌片石 护坡	0.9~1.0		0.6	路肩和边坡被长草 覆盖

根据以上实地调查结果,既有线路基病害严重,按照病害程度由轻到重细分,呈现以下四种不同表现形态。

2.1.1 脱落型

脱落型破坏表现为道砟或护坡碎石由于振动量过大,脱离路基母体而滚落或陷落到坡脚,如图 2-1 所示。



图 2-1 脱落式病害表现形态

2.1.2 鼓出型

图 2-2 中路肩一侧呈现明显的向外鼓出特征,表现出路堤土体显著的渐进性不均匀侧向变形,使得片石护坡形态呈蛇形。



图 2-2 鼓出型病害表现形态

2.1.3 挤断型

鼓出型病害如果不加以控制,即发展为挤断型。图 2-3 为现场部分路基护坡被鼓出的土体挤断的情形,可以看到现场采用了木枕支挡护坡,以防止路基进一步破坏。



图 2-3 挤断型病害表现形态

2.1.4 塌落型

塌落型是既有铁路存在的最为严重的病害形式。如图 2-4 所示,现场路基护坡已失去作用,片石散落在坡脚,基床土体完全暴露出来,路肩一侧塌陷严重。



图 2-4 塌落型病害表现形态

现场沿线踏勘情况表明,沿线路基存在着不同程度的变形破坏,轻微的如道砟振落、松陷,严重至基床外鼓、护坡塌落。既有线路基状态不容乐观,在列车动荷载的反复作用下,路基质量大幅度下降。

现场踏勘过程中,实地考察了新闵和金山支线上几座桥梁衔接的路桥过渡段,如新闵 4 号桥路桥过渡段和金山支线盐铁塘路桥过渡段,如图 2-5 所示。路桥过渡段是路基沉降控制的薄弱环节,先期外业勘测表明,路桥差异沉降明显,轨面弯曲,列车振动增强。



图 2-5 金山铁路路桥过渡段

2.2 既有铁路路基特性

2.2.1 路基基床

根据《铁路路基设计规范》(TB 10001—2005)第 11.1.4 条规定,设计时速为 160 km 的改建地段,既有线基床表层的基本承载力不应小于 160 kPa。

表 2-3、表 2-4 分别为 2007 年、2008 年连续两年对既有线基床和基床下部 0~

1.5 m 范围内的轻型动力触探试验(N_{10})成果,动力触探深度为 1.5 m。轻型动力触探击数为 14~19,既有线路路基床表层基本承载力平均为 92~112 kPa,基床底层基本承载力为 92~115 kPa。轻型动力触探试验结果表明,既有线路基承载力不能满足提速要求。基床土的压实系数介于 0.74~0.92,干密度介于 1.50~1.67 g/cm³,含水率介于 19%~26%;基床土的压实系数和干密度小,含水率偏离最佳含水率,土质条件差。

在基床部位剪切波速比较小,介于 150~200 m/s,基床剪切波速小,说明密度小,路基状态差,容易产生基床下沉病害。剪切波速与土的动剪切模量和动弹模量的关系为: $G=\rho v_s^2$, $E_d=2\rho v_s^2(1+\mu)$, ρ 是土的密度, μ 是泊松比。

表 2-3 2007 年轻型动探成果表

指标类别	贯入深度 0~0.6 m		贯入深度 0.6~1.5 m	
	N_{10} 值	基本承载力(kPa)	N_{10} 值	基本承载力(kPa)
样本数量	60	51	74	74
平均值	27.02	111.99	25.51	118.97
最大值	180.00	160.00	120.00	160.00
最小值	7.00	0.00	8.00	85.00
标准差	25.43	43.81	18.06	19.80
变异系数	94.13	39.12	70.79	16.64
修正系数	0.79	0.91	0.86	0.97
标准值	21.39	101.46	21.92	115.03

表 2-4 2008 年轻型动探成果表

指标类别	贯入深度 0.3~0.6 m		贯入深度 0.6~1.5 m	
	N_{10} 值	基本承载力(kPa)	N_{10} 值	基本承载力(kPa)
样本数量	30	27	54	50
平均值	14.90	92.22	19.07	101.00
最大值	43.00	150.00	107.00	220.00
最小值	5.00	0.00	4.00	0.00
标准差	8.41	29.94	15.24	42.28
变异系数	56.41	32.47	79.88	41.86
修正系数	0.82	0.89	0.81	0.90
标准值	12.24	82.21	15.52	90.73