



高速铁路无砟轨道 桩板结构路基理论与实践

■ 王 峰 等 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高速铁路无砟轨道桩板结构 路基理论与实践

王 峰 等 著

中国铁道出版社

2012·北京

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路无砟轨道桩板结构路基理论与实践/王峰等著. —北京:中国铁道出版社, 2012. 1

ISBN 978-7-113-14080-9

I. ①高… II. ①王… III. ①高速铁路—无砟轨道—铁路路基—结构设计—研究 IV. ①U213. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 000343 号

书 名:高速铁路无砟轨道桩板结构路基理论与实践
作 者:王 峰 等

责任编辑:陈小刚

电话:010-63549495

电子邮箱:cxgsuccess@163.com

封面设计:崔丽芳

责任校对:王 杰

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1月第1版 2012年1月第1次印刷

开 本:787 mm×960 mm 1/16 印张:13.5 字数:273千

书 号:ISBN 978-7-113-14080-9

定 价:59.00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,组织了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技术攻关,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 高速铁路建设积累了实践经验。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。

刘家兵 沪杭客运专线股份有限公司,副总经理,高级工程师。

张 骏 上海铁路局建设管理处,副处长,高级工程师。

马坤全 同济大学,副教授。

前 言

桩板结构是高速铁路无砟轨道一种新的环保型路基结构形式,因其具有强度高、刚度大、稳定性和耐久性好以及建筑成本适当、施工工艺简单等特点,目前已在国内外多条高速铁路路基以及普通铁路不良地基处理中得到一定应用,并将会作为一种有效控制基础变形尤其是工后沉降的地基处理方式而得到广泛应用。

尽管桩板结构从其传力路径上看类似于板式桥梁结构,但两者本质上还是存在较大差别的,其一是桩板结构没有墩台结构,也未设置支座,承载板与桩基或托梁的连接方式也明显不同于梁墩连接构造;其二是传统的桥梁结构每个墩台基础大多采用群桩基础,单个墩台桩基的根数、长度及桩径均明显多于或长于桩板结构的单个桩基。因此,针对桩板结构具体的结构构造特点,研究总结高速铁路无砟轨道桩板结构路基的设计、施工质量控制理论和方法,对于推广应用桩板结构路基具有重要的理论和工程意义。

2010年10月26日,上海铁路局管内的沪杭高速铁路开通运营,在整个建设过程和系统调试过程中,参建各方对桩板结构路基段进行了大量的现场试验和理论分析工作,从桩板结构的施工过程受力监测、桩板结构路基静动力性能分析以及高速动车组行车试验等方面,系统开展了桩板结构在高速铁路沿海滨海相软土地基处理中的应用研究。本书结合沪杭高铁的实践,阐述桩板结构路基的受力及变形机理,推导桩板结构温度应力的计算公式,明确了桩板结构静力计算方法,提出桩板结构的合理结构形式和构造参数;模拟高速动车组通过桩板结构路基及过渡段的全过程,计算分析高速列车—桩板结构—沿海滨海相软土地基系统的空间耦合振动响应,并与现场动力测试结果进行综合比较,在两者基本吻合的基础上,深入探讨了高速列车在桩板结构路基上的运营性能和结构振动特性,补充了桩板结构的动力设计参数,完善了桩板结构路基的动力设计理论。最后,对桩板结构路基的施工方法也进行了探讨,提出了高速铁路桩板结构路基设计若干建议。

在本书相关内容的研究过程中,得到了中建股份、同济大学、沪杭客专公司、铁四院等单位的杜名赞、吴定俊、程飞、姚宏生、梁龙标等直接帮助和支持,在此深表谢意!

期望本书可对从事高速铁路桩板结构路基建设的各方工程技术人员有所启示,本书所述的内容和方法是初步的、探索性的,同时限于作者水平,难免有许多不妥之处,敬望读者给予指正。

2011年12月于上海

目 录

1 绪论	1
1.1 桩板结构简介	2
1.2 应用现状	4
1.3 研究概况	10
2 设计方法的探讨	12
2.1 容许应力法	12
2.2 极限状态法	15
2.3 计算说明	18
3 静力性能分析	20
3.1 沪杭高铁桩板结构静力性能分析	20
3.2 不同结构形式性能比较	36
3.3 结构温度应力分析	42
3.4 结构构造参数的影响	54
3.5 基础刚度对结构性能影响	70
4 动力测试分析	73
4.1 试验列车	73
4.2 测试内容及方案	73
4.3 评定标准	80
4.4 测试结果	81
5 动力性能分析	110
5.1 结构动力特性分析	110
5.2 车板空间耦合振动分析	131

6 动力设计参数分析	163
6.1 结构变形	163
6.2 挠跨比对动力响应的影响	165
6.3 差异沉降对列车运营性能的影响	174
6.4 桩板结构与过渡段路基差异沉降对列车运营性能的影响	179
7 离心模型试验及沉降观测	185
7.1 离心模型试验简介	185
7.2 模型设计	188
7.3 试验结果分析	192
7.4 沉降观测	193
8 施工质量控制	197
8.1 基本要求	197
8.2 验收标准	199
9 设计方面的建议	201
9.1 结构形式	201
9.2 设计荷载	202
9.3 伸缩温度应力	203
9.4 梯度温度应力	205
9.5 结构变形	205
9.6 构造规定	206
参考文献	207

1 绪 论

土质路基由于其填料取材便利、施工简单等经济因素及维修简便等技术因素被广泛应用于铁路工程,以前土质路基上一般采用有砟轨道结构,这种结构方式具有易铺设且经济的优点,随着经济和技术的发展,列车速度的提高和密度的增加,有砟轨道的养护变得相对困难,对路基结构形式提出了新的要求。以往高速铁路无砟轨道多铺设在隧道内、高架结构和桥梁上,后来逐步推广到土质路基上,而土质路基上的无砟轨道结构以其适用范围广、性价比高、维修量小等优点,得到了工程界的广泛重视。

日本从 20 世纪 70 年代就开始尝试在土质路基上铺设无砟轨道,并采用了多种轨道结构形式,但所有这些都处于试验性研究阶段,而且铺设的长度非常短,处于资料的积累阶段。20 世纪 80 年代末 90 年代初,日本、德国等国家开始把在高架桥和隧道等被广泛应用的板式轨道等轨道结构形式推广到土质路基上,经过长期不断的试验研究,从 20 世纪 90 年代中叶,开始较大规模地在土质路基上铺设无砟轨道,经过近十多年的工程试铺及运营检验,已基本掌握了在土质路基上铺设无砟轨道的成套技术。为确保轨道结构的动静态平顺性、提高列车运行的平稳性和乘坐的舒适性,对路基面的地基系数、工后沉降、弯折变形和沉降挠度,以及基床结构强化等路基技术标准均提出了明确要求。

在我国,对在土质路基上铺设无砟轨道的研究则起步较晚,近几年配合高速铁路的建设,通过对国内外相关成果资料的调研,在适当借鉴国外先进技术和成熟经验基础上,针对性地开展了一系列技术攻关,取得了较丰硕的科技成果。

由于高速铁路对线路的高平顺性、稳定性、耐久性等均提出了新的要求,为确保高速行车的安全性与乘客舒适性,并减少轨道结构养护工作量,须对路基地基的总沉降、工后沉降及差异沉降量加以严格限制。传统的路基结构,采用高路堤时,总沉降及工后沉降量较大、差异沉降难以控制;而采用低路堤结构,动力对地基的影响显著,由于动力对地基的影响,工后沉降难以控制。目前解决高速铁路路基尤其是软土地基路基工后沉降的方式主要有两种,一是以桥代路,二是对软土地基进行处理,我国高速铁路建设规模大、线路长,区域地质条件复杂,优质填料缺乏,而桥梁结构造价很高,在财力有限的前提下,迫切需要寻求一种强度高、刚度大、稳定性和耐久性好,并且建筑成本适当、施工工艺简单、环保型的路基新结构、新工法。

1.1 桩板结构简介

桩板结构是可用于基础变形控制严格的深厚软弱地基、湿陷性黄土地基、桥隧间短路基过渡段、岔区路基及既有路基加固、岩溶及采空区地基处理的一种新型路基结构形式,具有强度高、刚度大、稳定性好、沉降小等特点。根据连接方式、组合形式及设置位置的不同,桩板结构可分为非埋式(图 1.1-1)、浅埋式(图 1.1-2)及深埋式(图 1.1-3)三种。高速铁路无砟轨道较多采用非埋式或浅埋式桩板结构路基,非埋式桩板结构由下部钢筋混凝土桩基、地基土与上部钢筋混凝土承载板(对于托梁式桩板结构路基还包括钢筋混凝土托梁)组成,承载板直接与轨道结构连接,并与托梁固结或搭接,托梁与桩固结,由承载板、桩及地基土三者共同组成一个承载结构体系。它综合了板式无砟轨道或轨枕埋入式无砟轨道结构与桩基础的各自特点,充分利用桩-土、板-土之间的共同作用来满足无砟轨道的强度与沉降变形要求。桩板结构无砟轨道在构造上可分为上部结构和下部结构两部分,上部结构由钢轨、扣件、混凝土轨道板(对于板式轨道还有沥青砂浆层和支承层)和钢筋混凝土承载板组成;下部结构由桩基和地基土共同组成。钢筋混凝土承载板现浇在地基土表层,在中支点处通过钢筋与桩及托梁固结相连,在边支点处与托梁搭接,形成了桩-板-土三者共同作用的复合结构体系。非埋式桩板结构承载板直接跟轨道结构连接,使得桩板结构直接承受列车荷载动力作用,因此,其动力性能应予以特别关注。浅埋式桩板结构的桩与承载板直接刚性连接,承载板上部通过基床表层与轨道结构连接。总体来说,桩板结构路基具有以下特点:

(1)整体性强、稳定性好,轨道变形小,且变形累积缓慢,有利于高速行车,可大大减少线路养护维修工作量、降低作业强度和改善作业条件。

(2)设计相对简单。构造上比较灵活,适应性较强。上部钢筋混凝土承载板可以适应各种线路情况,做成任何形状的特殊异形板,下部桩基础可以结合当地条件合理布置;计算可采用板单元下面布设一些固结或简支的支承点来进行分析。

(3)与桥梁结构相比,桩与板(或托梁)或板与托梁之间通过钢筋固结(或设置聚酯长丝复合聚乙烯土工膜滑动层),可以节省昂贵的支座,温度和混凝土收缩应力也较小,只需在板与板连接处设置伸缩缝。

(4)与普通路基结构相比,由于板下是桩基础,对路基填料要求不高,可以就地取材,且沉降相对小而快,工后沉降较易控制,可缩短工期,相对加快工程进度。

(5)施工方便。由于承载板是实心板,外形简单,可直接浇筑在地基上,只需要侧模,加工制作简易;内部通常采用纵横双向布置钢筋,无须布设预应力筋,加工和布设简易;浇筑混凝土可大面积进行,振捣方便。其施工过程基本上就是土石方工程、桩基工程、钢筋混凝土及模板工程的组合,这其中的每一项也都是较

成熟的施工技术,其所需要的机械设备也是比较普遍的,因此,在了解其施工组织要点后配以适当的质量控制,可以顺利完成施工任务。

桩板结构路基较传统的路基形式而言,不仅是无砟轨道一种新的路基结构形式,也是一新型的地基处理技术与加固方法,它是介于桥梁与传统路基之间的一种特殊的结构形式,总结分析高速铁路桩板结构路基已有研究成果,可为其推广应用提供理论依据和实践参考。

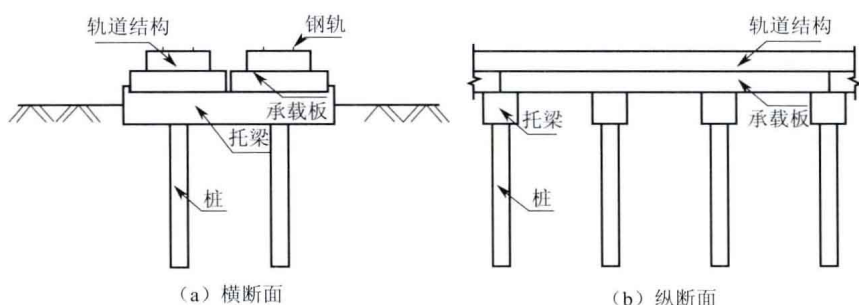


图 1.1-1 非埋式桩板结构形式示意图

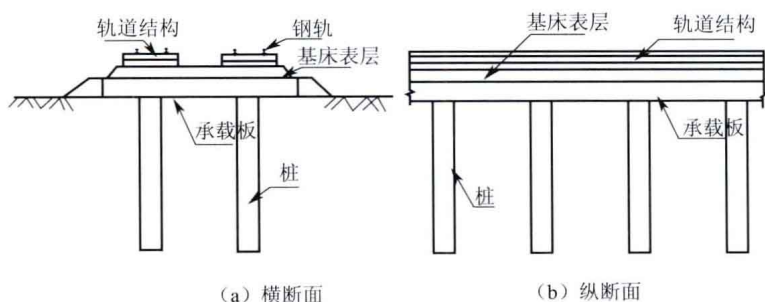


图 1.1-2 浅埋式桩板结构形式示意图

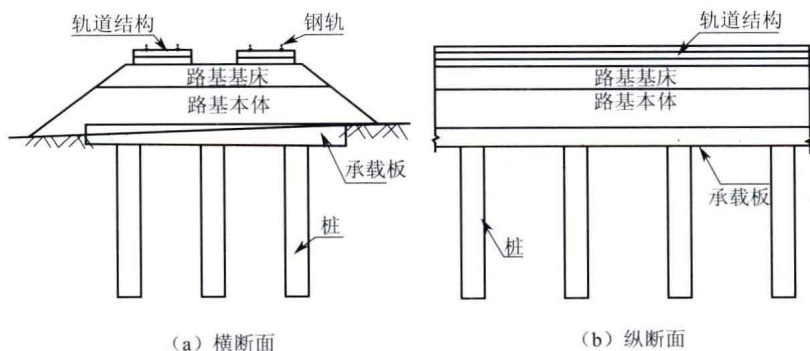


图 1.1-3 深埋式桩板结构形式示意图

1.2 应用现状

1.2.1 国外实例

1. 德国纽伦堡—英戈尔施塔特铁路

德国纽伦堡—英戈尔施塔特铁路在具有膨胀性的北段黏性土地基上修建了桩板结构路基(图 1.2-1),桩板结构形式为:钻孔灌注桩直径 0.9 m,桩顶现浇 0.6 m 厚钢筋混凝土板。为了桩板结构路基尽可能均匀过渡到土质路基,在过渡段采用了厚度渐变的素混凝土板来减小刚度的差异,素混凝土板长 20 m(图 1.2-2)。

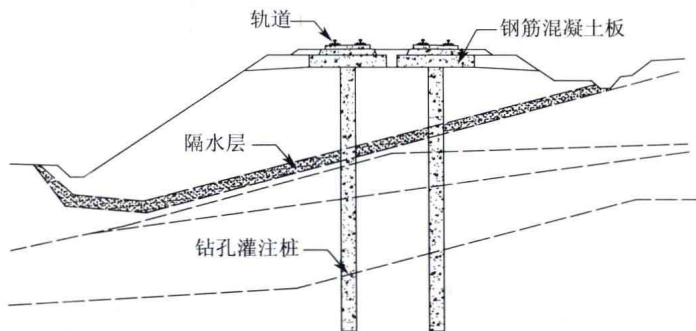


图 1.2-1 德国纽伦堡—英戈尔施塔特线“桩板结构”典型横断面

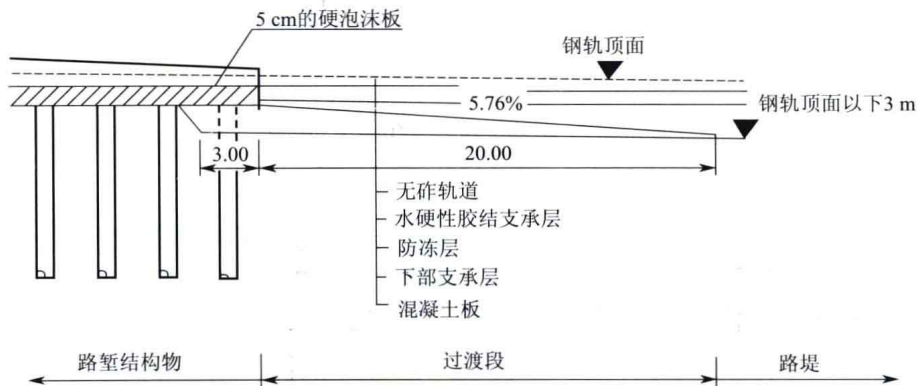


图 1.2-2 德国纽伦堡—英戈尔施塔特线“桩板结构”纵立面(m)

2. 荷比高速铁路

荷比高速铁路阿姆斯特丹至布鲁塞尔线,地质条件为海相沉积、土质极软。全线铺设无砟轨道,大量采用了“桩板结构(Settlement Free Plate)”。此桩板结构由

钻孔灌注桩和现浇钢筋混凝土板构成(图 1.2-3~图 1.2-5),单联长 30 或 35 m,纵横向桩间距根据具体情况设计。

3. 英法海底隧道连接线

英法海底隧道连接线在穿越一个沼泽地区时有 7 km 路基采用了桩板结构,这种桩板结构由桩基础和钢筋混凝土板构成(图 1.2-6),横向布置 4 排桩,桩间距为 2.5 m,桩板结构上部铺设碎石轨道。

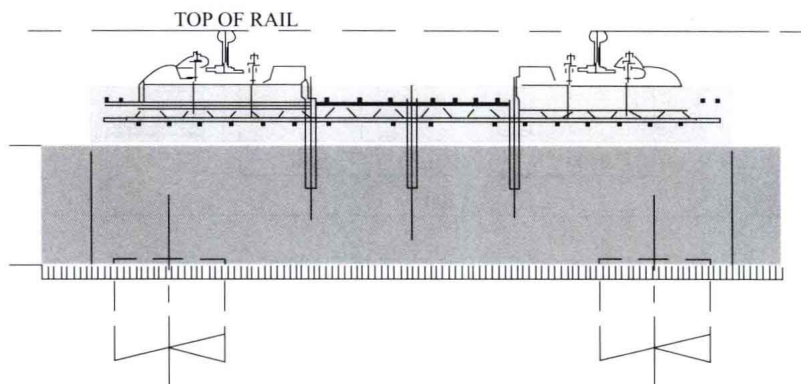


图 1.2-3 桩板结构典型横断面



图 1.2-4 桩板结构的支承桩(HSL-Zuid)

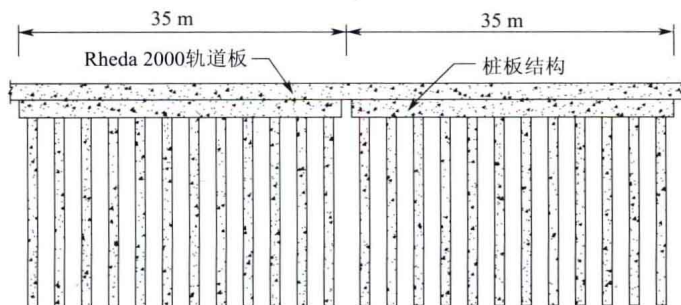


图 1.2-5 荷兰 HSL-S 段——桩板结构典型纵立面

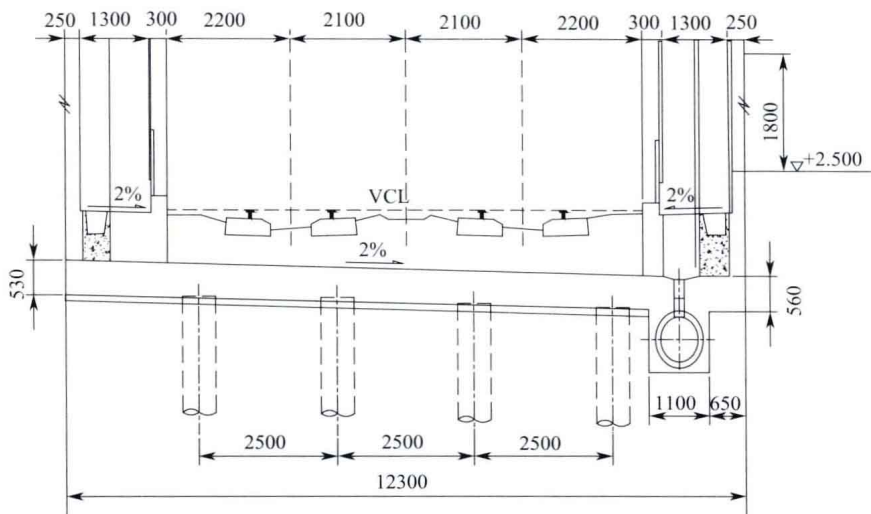


图 1.2-6 英法海底隧道连接线(英国段)桩板结构示意图(mm)

1.2.2 国内实例

1. 遂渝铁路

我国遂渝铁路无砟轨道综合试验段采用钢筋混凝土桩板结构的地基处理措施,它由下部钢筋混凝土桩基、路基本体与上部钢筋混凝土承载板组成,承载板直接与轨道结构连接(图1.2-7、图1.2-8)。遂渝铁路桩板结构路基尺寸为:钢筋混凝土承载板尺寸:长 $6 \times 5 \text{ m} = 30 \text{ m}$,宽 4.4 m ,厚 0.6 m ,厚跨比 $1/8.33$ (跨度为 10 m 时,板厚为 0.8 m ,厚跨比 $1/12.5$),C40混凝土。其桩基为钻孔灌注桩,直径 1.2 m ,横向采用两排桩,桩间距 2.5 m ,纵向采用6排桩,桩间距 5 m ,桩长 21 m ,入泥岩夹砂岩层 2 m 。

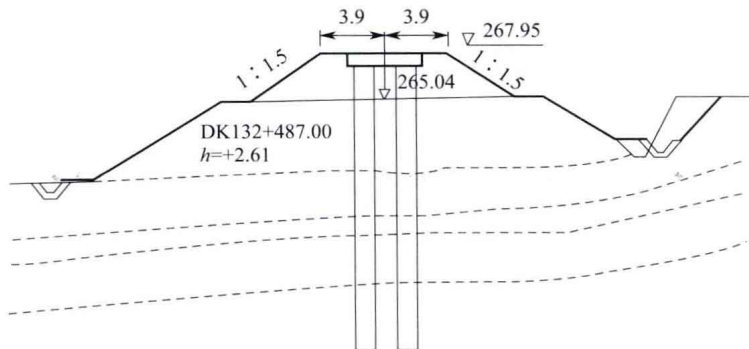


图 1.2-7 遂渝铁路 DK132 桩板结构路基典型横断面(m)

2. 郑西高速铁路

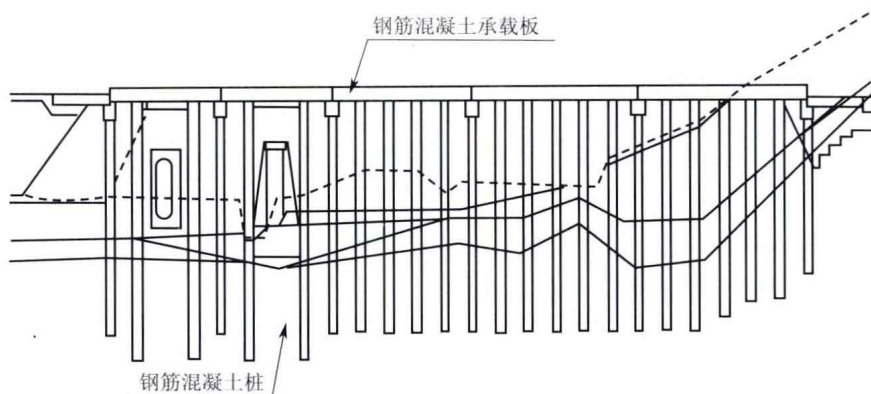


图 1.2-8 遂渝铁路 DK132 桩板结构路基纵断面

郑西高速铁路采用的钢筋混凝土承载板厚 0.6~0.8 m, 宽 10.5 m, 厚跨比 1/11.67~1/11.25, C40 混凝土, 桩基为直径 1 或 1.25 m 钻孔灌注桩, 横向 2 根桩, 间距 5 m, 纵向间距 7~9 m, C30 混凝土。

郑西高速铁路采用的双线托梁式桩板结构, 主要由桩基、托梁、承载板三部分组成(图 1.2-9), 承载板为现浇钢筋混凝土板, 托梁为现浇钢筋混凝土梁, 桩基为钻孔灌注桩, 三跨一联, 相邻联处共用托梁和桩基, 相邻联的板间纵向预留 2 cm 伸缩缝, 桩与托梁均固接, 两个边托梁与承载板搭接, 两个中托梁与承载板固接。考虑双线行车对承载板的动力作用, 承载板采用上下行线双板分幅设置, 以降低横向扭曲变形, 减小单线过车对桩板结构整体使用性能的影响。承载板的宽度根据路肩宽度和轨道结构宽度等确定。板宽采用 2×4.99 m(双线), 中间预留 2 cm 构造缝; 托梁根据承载板宽度确定, 取为 10.4 m; 桩基横向间距为铁路线间距 5 m, 桩基纵向间距为承载板跨度。

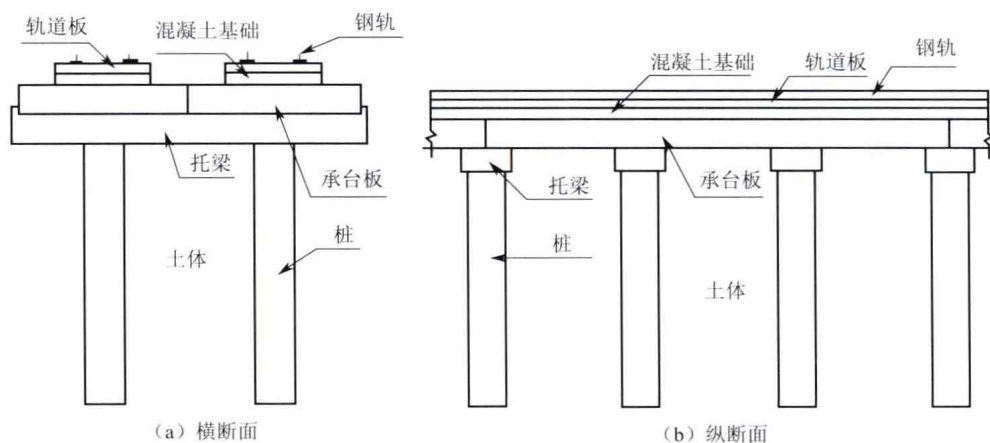


图 1.2-9 郑西高速铁路典型托梁式桩板结构

3. 武广高速铁路

武广高速铁路有三段采用了桩板结构路基,此三段均位于缓丘地段,段内为丘陵地貌,桩板结构由钢筋混凝土桩基、托梁和混凝土承载板组成(图 1.2-10)。桩基钢筋伸入托梁中,与托梁钢筋相连。三段钢筋混凝土承载板分别采用 2 联“ $3 \times 7.5 \text{ m}$ ”、3 联“ $3 \times 7.5 \text{ m}$ ”+1 联“($7.5+10+7.5$)m”、3 联“ $3 \times 7.5 \text{ m}$ ”的连续板结构形式,板厚均为 0.8 m ,厚跨比为 $1/9.38 \sim 1/12.5$,板宽 $2 \times 4.99 \text{ m}$,在与土质路基相连端均设 10 m 长的钢筋混凝土搭板。

在每排桩顶均设置了一根托梁, 7.5 m 跨度的托梁尺寸为:长 \times 宽 \times 高 $=10.4 \text{ m} \times 1.6 \text{ m} \times 0.85 \text{ m}$ 。桩基采用钢筋混凝土钻孔灌注桩,桩直径 1.2 m ,按端承桩设计,要求桩嵌入稳定基岩不小于 3 m ,横向布置两排桩。

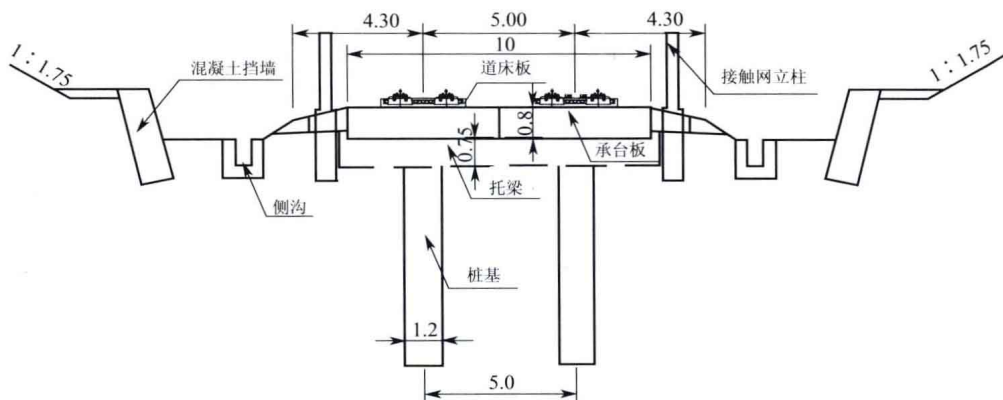


图 1.2-10 武广高速铁路典型托梁式桩板结构(m)

4. 沪杭高速铁路

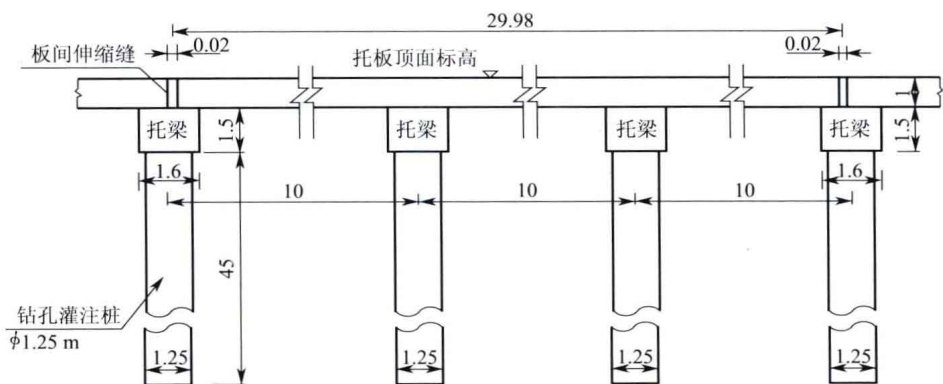


图 1.2-11 沪杭高铁桩板结构纵向设计详图(m)

沪杭高速铁路有三段采用了桩板结构路基,此三段均位于软土地基区域,第一段位

于沪杭高铁 DK30+951.5~DK31+115.085 路段,斜穿在建的上海 A15 公路,属下穿地段。桩板结构路基每榀托梁下纵向布置两根 $\phi 1\ 250$ mm 钻孔灌注桩,桩长 45.0 m,单桩承载力设计值 3 900 kN。另外两段分别位于沪杭高铁 DK3+300~DK3+550 段(占压上海 A9 公路及匝道立交桥承台)及 DK5+250~DK5+531、DK5+344.8~DK5+374.8(跨上海地铁 M9 线)。桩板结构路基每榀托梁下纵向布置四根 $\phi 800$ mm 钻孔灌注桩,桩长 43.0 m,桩体混凝土强度为 C35,单桩承载力设计值 2 050 kN。

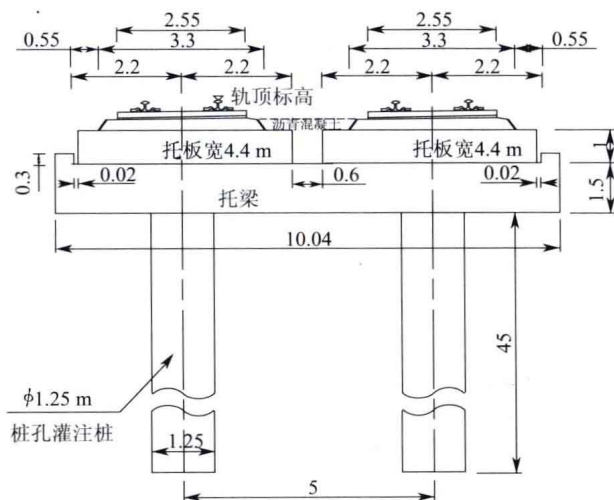


图 1.2-12 沪杭高铁桩板结构横向设计图(m)



图 1.2-13 沪杭高铁 DK30+951.5~DK31+115.085 段路基

沪杭高铁桩板结构路基均采用桩-托梁-承载板结构(图 1.2-11、图 1.2-12、图

1.2-13), 承载板采用 C40 钢筋混凝土结构, 承载板宽 2×4.4 m, 跨度 3×10 m, 板厚 1 m。两中支点通过桩基主筋穿过托梁铺入承载板而使托梁与托板刚接, 两边支点托梁与承载板搭接, 托梁与承载板间设置聚酯长丝复合聚乙烯土工膜滑动层。

1.3 研究概况

国内外已用桩板结构路基主要结构形式及构造尺寸如表 1.3 所示。在国外, 虽然德国、日本、荷兰、比利时及英法海底隧道连接线使用过类似桩板的高架结构, 但关于桩板结构路基的研究文献较为少见。

表 1.3 国内外已用桩板结构路基主要结构形式及构造尺寸

线路	线路布置	结构形式	纵向跨度布置	板厚 (m)	板宽 (m)	厚跨比	地基土性质
德国纽伦堡—英戈尔施塔特线	双线	独立墩柱式	—	0.6	—	—	膨胀性黏性土
荷比高速铁路	单线	独立墩柱式	单联长 30 或 35 m (纵向每跨 2~3 m)	—	—	—	海相沉积, 极软土
英法海底隧道连接线	双线	独立墩柱式	—	0.53	12.3	—	沼泽地区
意大利米兰—都灵高速铁路	双线	独立墩柱式	长度 48~60 m(纵向每跨 6.5~8 m)	—	—	—	有毒土壤区
遂渝线	单线	复合式	6×5 m, (5+10+5)m	0.6~0.8	4.4	1/8.3~1/12.5	软土厚 0.5~8 m, 其下为基岩
郑西高速铁路	双线	托梁式	3×7 m, 3×9 m	0.6~0.8	2×4.99	1/11.7~1/11.3	深厚湿陷性黄土
武广高速铁路	双线	托梁式	3×7.5 m, (7.5+10+7.5)m	0.8	2×4.99	1/9.4~1/12.5	深厚软土
沪杭高速铁路	双线	托梁式	3×10 m	1.0	2×4.4	1/10.0	沿海滨海相软土

我国对桩板结构路基的较为系统研究主要为铁道第二勘察设计院、西南交通大学、重庆大学等单位结合遂渝铁路建设开展的无砟轨道桩板结构路基的设计技术研究。为满足遂渝铁路桩板结构设计需要, 对桩板结构路基的研究表现在以下几个方面: