

列车荷载作用下 无砟轨道含水裂纹的 受力特性及影响研究

LIECHE HEZAI ZUOYONG XIA
WUZHA GUIDAO HAN SHUILIEWEN DE
SHOULI TEXING JI YINGXIANG YANJIU

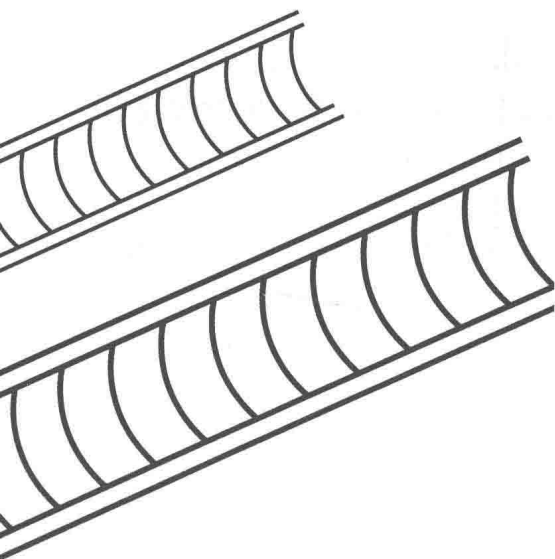
◎ 徐桂弘 著



电子科技大学出版社

列车荷载作用下无砟轨道 含水裂纹的受力特性及影响研究

◎ 徐桂弘 著



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

列车荷载作用下无砟轨道含水裂纹的受力特性及影响研究 /

徐桂弘著. — 成都: 电子科技大学出版社, 2017.4

ISBN 978-7-5647-4371-0

I. ①列… II. ①徐… III. ①无砟轨道-受力性能-研究 IV. ①U213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 096912 号

列车荷载作用下无砟轨道含水裂纹的受力特性及影响研究

徐桂弘 著

出版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段159号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 李述娜

责任编辑: 谭伟麟

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 北京一鑫印务有限责任公司

成品尺寸: 170mm × 240mm 印 张 12.5 字 数 240千字

版 次: 2017年9月第一版

印 次: 2017年9月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-4371-0

定 价: 42.00元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言

无砟轨道以其高平顺、高稳定和少维修的特点成为高速铁路上的主要轨道结构型式，随着我国客运专线的大规模兴建并投入运营，无砟轨道技术得到了快速发展与广泛应用。无砟轨道作为行车的基础一直暴露于复杂的自然环境中，常年承受列车荷载、温度变化、雨水侵蚀等作用，受自身材料特性、结构特性和外部环境的影响，其整体性能处于不断劣化的过程中。通过对全国各地的无砟轨道服役情况调研发现，各型无砟轨道均出现了不同程度的伤损，其中以轨道板或道床板开裂、层间连接破坏和填充层破损等伤损最为普遍。另外，在降雨量丰富的地区或排水不畅地段，无砟轨道破损速率较干燥地区快得多。

如何确保无砟轨道结构在预定的使用年限和适当的维修条件下，长期抵御结构性能劣化的能力，是实现无砟轨道长期稳定运营的关键。该书针对典型无砟轨道含水裂纹受力及扩展问题，对高速列车动荷载作用及雨水侵入条件下，混凝土的裂纹扩展机理进行理论与试验研究。依据高速列车动荷载作用特征，通过建立理论计算及模型试验，进行了混凝土中裂纹内动水压力理论与试验研究，分析了动水压力的作用特性及裂纹扩展性态；基于混凝土断裂力学及冲蚀磨损理论，初步研究了水环境下混凝土中裂纹的发展机理和相关因素。主要研究内容如下。

（1）列车动荷载与水耦合作用下裂纹内水压力计算模型及参数

针对典型 CRTS II 型板式无砟轨道砂浆调整层底部含水裂纹的受力特点，应用结构动力学、流体动力学和流固耦合振动的基本原理，建立了列车动荷载与水耦合作用下裂纹内动水压力双向瞬态流固耦合三维计算模型，简称“裂纹内动水压力计算模型”。模型可用于对高速列车通过时无砟轨道裂纹中水动压力的模拟计算。列车荷载是计算中的主要参数之一，具有加载频率高、作用力大的特点。通过研究明确用于裂纹水压力特性研究的荷载分布、作用力大小、加载频率等，为相关的理论计算和试验研究提供加载参数。

（2）循环动荷载作用下裂纹水压力的模型试验

针对典型 CRTS II 型板式无砟轨道砂浆调整层底部含水裂纹，根据实际轨道结构缩小比例，浇筑了带裂纹的钢筋混凝土模型试件，将试件安放于水槽中，采用液压伺服疲劳机施加循环动荷载，采用高灵敏度传感器测量裂纹内水压力。试

验研究了裂纹不同位置压力变化特点，加载频率、荷载幅值对水压力的影响。

当循环荷载作用于模型试件上时，裂纹内部的水产生动水压力。随着测点向裂纹深度的增加，水压力逐渐增大，在裂纹的尖端，水压力达到极大值。随着加载频率的增加，动水压力增大。随着加载幅值增大，裂纹内各点的动水压力增加。

同时基于试验中的模型试件和加载条件，应用前述无砟轨道裂纹水压力计算模型，完成了相应的理论计算，并对比分析了理论计算与试验结果。

（3）无砟轨道裂纹动水压力和流速作用特性计算分析

应用裂纹内动水压力计算模型和商用计算软件 ANSYS Transient Structure-CFX，针对砂浆调整层底部含水裂纹，考虑不同的列车荷载特性和裂纹尺寸，对无砟轨道裂纹内水压力进行了计算，得到了裂纹内水压力及水流速的变化特性，为裂纹的扩展和冲蚀磨损等研究提供了基础数据。

裂纹的宽度、深度、开口量、列车荷载的幅值和频率是影响裂纹水压力的重要因素。当裂纹的宽度和深度保持一定值不变时，沿裂纹深度方向水压力逐渐增大。在裂纹的同一深度，最大水压力出现在裂纹中间位置。在裂纹的尖端，当开口量为 3mm 时，裂纹内水压力值最大。当裂纹开口量保持不变，随着裂纹深度的增加，裂纹内水压力增大。随着列车速度（即加载频率）的增加，裂纹内水压力增大。

（4）动载与水耦合作用下无砟轨道裂纹扩展研究

当裂纹尖端因水压力产生的强度因子大于材料的断裂韧度时，导致 I 型裂纹扩展。通过拉伸试验确定材料的断裂韧度，基于前述裂纹内水压力计算的统计值，采用商用软件 ANSYS/WORKBENCH-Fracture，计算了不同条件下裂纹尖端的强度因子，与试验得到的断裂韧度对比分析，判断了裂纹的扩展情况，为裂纹的修复时机提供了理论基础。

（5）建立了裂纹水冲蚀磨损的计算模型，对裂纹扩展冲蚀磨损机理进行了初步分析

基于 ANSYS-CFX 数字仿真软件，建立宏观状态下的固-液两相流分析模型。以裂纹内颗粒运动特性作为研究对象，当裂纹表面凹凸不平时，分析了微颗粒的运动轨迹，分析了水流速度、裂纹开口量的变化、粒径分布范围对裂纹表面冲蚀磨损的影响。但是基于时间的限制，这部分只是做了理论分析。需要进一步试验的验证。

本文从试验方案、试验方法、试验的操作、数值模拟、理论分析、论文写作整个的过程，论文的每一段字符，每一副图片，都凝聚着刘学毅教授的精心教诲

和悉心指导。刘学毅教授严谨的治学态度、高尚的科学道德、敏锐的洞察力及深厚渊博的专业知识都深深的影响并感动着我，这是我今后学习的力量 and 方向。四年以来，刘学毅教授亦师亦父，更多的教会了我认识问题、分析问题和解决问题的能力，及面对问题不畏惧的态度和不放弃的精神。这些都是我永远的、宝贵的财富！

该书是在刘学毅教授指导下，杨荣山教授的国家自然科学基金（面上项目：列车荷载与水耦合作用下的无砟轨道伤损机理研究，No.：51278431）资助支持下完成的。非常感谢刘学毅教授和杨荣山教授在试验方案选取、研究内容、研究思路、试验方法、试验操作等方面给予了莫大的经济资助和精神支持。

试验带有太多的不确定性，完成试验是个艰辛的过程。特别是在确定试验方案、方法的时期，西南交通大学流体力学教研室（我的硕士导师）陈春光教授、浙江大学土木工程学院王海龙教授，在试验方案、试验操作方面多次给予指导和帮助，衷心的感谢他们。

安士亚太公司软件工程师孟飞老师、李小鹏老师、刘伟老师、许沛老师在软件 ANSYS-CFX 学习和模拟计算过程给予了指点和帮助，衷心的感谢他们。

感谢李耀东、周珂、万章博、苏成光、洪康、张灵之、张四放等师弟们在试验实施、仪器操作和材料购置方面给予的支持和帮助。

目 录



第 1 章 概 述	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外高速铁路无砟轨道应用现状	3
1.2.1 国外高速铁路无砟轨道的应用现状	3
1.2.2 我国高速铁路无砟轨道应用状况	5
1.3 无砟轨道的伤损现状调研	9
1.3.1 板式无砟轨道	9
1.3.2 双块式无砟轨道	13
1.4 计算流体力学及流固耦合研究现状	16
1.4.1 计算流体力学的发展及研究现状	16
1.4.2 流固耦合研究现状	18
1.5 水环境下混凝土伤损研究	20
1.5.1 混凝土中空隙水压力	21
1.5.2 水对混凝土强度的影响	21
1.5.3 水对混凝土断裂性能的影响	23
1.6 冲蚀磨损研究进展	25
1.6.1 液两相流研究现状	25
1.6.2 冲蚀磨损研究现状	26
1.7 本课题研究主要内容和研究思路	28
1.7.1 本课题研究的主要内容	28
1.7.2 研究的技术路线	30
第 2 章 无砟轨道裂纹水流特性计算模型及方法	31
2.1 无砟轨道裂纹水流特性计算模型	31

2.1.1 模型简化要点	32
2.1.2 计算模型	33
2.2 模型中的流体、固体及流固耦合理论	35
2.2.1 流体理论	35
2.2.2 边界条件	41
2.2.3 结构运动方程	42
2.3 计算方法	43
2.3.1 ANSYS-CFX 简介	44
2.3.2 构建瞬态耦合分析系统	44
2.3.3 网格划分及网格检验	45
2.3.4 标记界面条件	48
2.3.5 ANSYS-CFX 数据传递方式	49
2.3.6 求解	52
2.4 计算参数	53
2.4.1 结构参数	53
2.4.2 荷载参数	54
2.4.3 方法参数	56
本章小结	57
第 3 章 模型试验研究与计算方法验证	58
3.1 裂纹动水压模型试验概况	58
3.1.1 试验模型	58
3.1.2 试验设备	61
3.1.3 测点布置	63
3.1.4 试验步骤	64
3.2 试验结果与分析	66
3.2.1 试验工况	66
3.2.2 裂纹内不同位置点水压力	67
3.2.3 裂纹形态对水压力的影响	71
3.2.4 加载频率对裂纹水压力的影响	75

3.2.5 荷载幅值对裂纹内水压力的影响	79
3.3 试验模型中裂纹水压力的理论计算	83
3.3.1 裂纹内第 1、3、5 测点水压力实程曲线	83
3.3.2 裂纹宽度对水压力的影响	87
3.3.3 加载频率影响	89
3.3.4 加载幅值影响	91
本章小结	95
第 4 章 无砟轨道裂纹内水压力特性计算分析	97
4.1 计算工况	97
4.1.1 计算点布置	97
4.1.2 计算工况	103
4.2 无砟轨道裂纹内水压力分布特性	106
4.2.1 典型工况的分析	106
4.2.2 沿裂纹宽度 (Z) 方向水压分布特性	107
4.2.3 沿裂纹深度 (X) 方向水压分布特性	108
4.3 裂纹开口量的影响	110
4.4 裂纹形态的影响	111
4.4.1 裂纹宽度 (W) 影响	111
4.4.2 裂纹深度 (L) 影响	112
4.5 列车速度的影响	113
本章小结	114
第 5 章 列车荷载与水耦合作用下裂纹稳定性分析	116
5.1 水压力作用下裂纹尖端应力强度因子计算方法	116
5.1.1 计算简化要点	116
5.1.2 裂纹强度因子理论分析	117
5.1.3 水压力作用下裂纹尖端强度因子计算实现	123
5.1.4 计算参数	126

5.2 CA 砂浆与底座板黏结断裂韧度的试验测定	126
5.2.1 试验概况	127
5.2.2 实验结果	128
5.2.3 砂浆与底座板黏结断裂韧度	129
5.3 裂纹稳定性分析	129
5.3.1 裂纹开口量的影响	130
5.3.2 裂纹宽度的影响	131
5.3.3 裂纹深度的影响	133
5.3.4 列车速度的影响	135
5.4 裂纹修补技术标准	136
5.4.1 规范中裂纹开口量限值	136
5.4.2 裂纹修补技术标准	137
本章小结	142
第 6 章 裂纹内水流速度及冲蚀磨损机理分析	144
6.1 列车荷载 - 水耦合作用下裂纹内动水流速特性分析	144
6.1.1 裂纹水流速变化特性	144
6.1.2 裂纹形态的影响	147
6.1.3 裂纹开口量的影响	150
6.1.4 列车速度的影响	151
6.1.5 裂纹冲蚀磨损过程分析	152
6.2 无砟轨道裂纹内水冲蚀磨损计算模型及方法	155
6.2.1 计算模型	155
6.2.2 模型中颗粒运动及冲蚀磨损理论	157
6.2.3 计算方法	160
6.2.4 计算参数	163
6.3 裂纹冲蚀磨损影响因素分析	164
6.3.1 颗粒运行轨迹	164
6.3.2 水流速度影响	168
6.3.3 裂纹开口量的影响	169

6.3.4 粒径尺寸的影响.....	170
本章小结	171
结论与展望	172
本文的主要工作及结论.....	172
有待进一步研究的问题.....	174
致 谢.....	175
参考文献.....	177
攻读博士期间发表论文	188

第 1 章 概 述

1.1 研究背景及意义

无砟轨道以其高平顺、高稳定和少维修的特点成为高速铁路上的主要轨道结构型式,随着我国客运专线的大规模兴建并投入运营,无砟轨道得到了快速发展与广泛应用。CRTS I 型板式(整体及框架)、CRTS II 型板式(纵连板式)、双块式无砟轨道目前我国高速铁路上的主要无砟轨道结构型式,已在京沪、京津、武广、郑西等线上实现了动车组的安全、平稳运营。

一般的,无砟轨道具有较高的稳定性和耐久性,建成后很少需要维护。但是,无砟轨道作为行车的基础一直暴露于复杂的自然环境中,并且常年承受列车荷载、温度变化、雨水侵蚀等作用,受自身材料特性、结构特性和外部环境的影响,其整体性能处于不断劣化的过程中。如何确保无砟轨道结构在预定的使用年限和适当的维修条件下,长期抵御结构性能劣化的能力,是实现无砟轨道长期稳定运营的关键。

目前我国高速铁路采用的无砟轨道主要有 CRTS I 型板式、CRTS II 型板式、CRTS I 型双块式、CRTS II 型双块式和 CRTS III 型板式无砟轨道。CRTS I 型板式无砟轨道是由轨道板、乳化沥青砂浆(CA 砂浆)和底座组成的三层传力体系,采用单元式结构,CA 砂浆与轨道板和底座不完全粘连,通过层间摩擦和专门的限位凸台保证结构的整体性。CRTS II 型板式无砟轨道是由预制轨道板、水泥沥青砂浆(BZM 砂浆)和底座板/支承层组成的全连续型式,通过砂浆的黏结和轨道板的连续实现轨道整体性。CRTS I 型双块式和 CRTS II 型双块式结构基本相同,只是施工方法不同,CRTS I 型双块式采用轨枕埋入式施工方法,CRTS II 型双块式采用轨枕振入式施工方法。双块式无砟轨道采用桥上单元、路基纵连的总体方案,路桥上双块式无砟轨道是将预制轨枕连续混凝土道床板直接浇注在支承层上,靠支承层和道床板的黏结和道床板的连续限制轨道的纵、横向位移;桥上双块式轨道为单元式结构,将单元道床板直接浇注在铺有土工布隔离层的底座上。CRTS III 型板式无砟轨道由预制轨道板、自密实混凝土和底座组成,在底座上铺设限位凹槽和隔离

层, 轨道板和自密实混凝土通过连接钢筋浇筑成一体, 形成两层受力体系。

由前述可见, 当前的无砟轨道均采用混凝土层状结构体系, 最上层为承力层(预制轨道板或现浇道床板), 承力层之下为传力层(钢筋混凝土底座或水硬性支承层), 传力层下为防冻层或级配碎石层。各层混凝土本身及层间的连接状态直接影响轨道的使用状态。

通过对全国各地的无砟轨道服役情况调研发现, 各型无砟轨道均出现了不同程度的伤损, 其中以轨道板/道床板开裂、层间连接破坏和填充层破损等伤损最为普遍。调查时还发现, 在降雨量丰富的地区或排水不畅地段, 无砟轨道破损速率较干燥地区快得多。以双块式无砟轨道为例, 在武广、郑西、遂渝等线路均发现预制轨枕与现浇道床板间出现裂纹的现象(如图 1-1 所示), 由于郑西线的降雨量较少, 道床板出现新旧混凝土裂纹后, 轨道状态长时间保持不变, 裂纹也没有明显发展, 但在遂渝线和武广线, 同样的病害, 道床板裂纹发展较快, 在病害严重地段, 裂纹开口量增加, 预制轨枕松动下雨后, 经列车荷载的作用, 在裂纹处有白浆冒出, 进一步加剧了轨枕松动。另外, 对于不同类型的无砟轨道, 均发现有道床板与支承层, 轨道板与 CA 砂浆、CA 砂浆与底座、支承层与路基面等层间连接离缝的现象, 在南方多雨地区, 凡离缝处均发现有冒浆现象发生, 在排水不良地段, 列车经过时, 离缝处的冒浆现象非常明显, 且病害发展迅速。可见, 列车荷载与水的耦合作用对无砟轨道病害发展起着极为关键的作用, 无砟轨道的水致病害问题实质上是高频重载与水耦合作用下的混凝土伤损问题。开展列车荷载与水耦合作用下的无砟轨道伤损机理研究, 明确高频重载与水耦合作用下的混凝土伤损发展机制, 解决无砟轨道水致病害的基本理论问题, 对完善无砟轨道设计理论, 合理制定无砟轨道养护维修方法和规程具有重要理论意义。

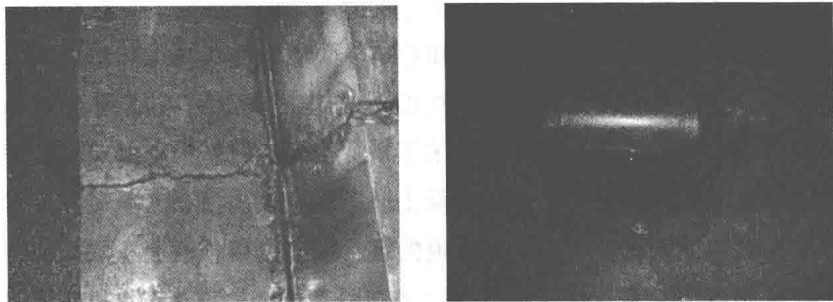


图 1-1 道床板开裂和轨枕松动

1.2 国内外高速铁路无砟轨道应用现状

1.2.1 国外高速铁路无砟轨道的应用现状

欧洲高速铁路发达的国家主要是德国和法国，亚洲主要是日本^[1]。日本的高速铁路主要采用的是无砟轨道，轨道结构的形式主要是板式无砟轨道结构。德国的高速铁路主要采用的也是无砟轨道，结构形式包括：德国雷达、旭普林、博格等。法国高速铁路主要采用的是有砟轨道^[2]。目前高速铁路中应用数量最多的，是日本的板式无砟轨道结构。

1. 日本无砟轨道

日本无砟轨道结构主要是普通 A 型无砟轨道和框架板式无砟轨道如图 1-2 示。板式无砟轨道主要由钢轨、扣件系统、预制轨道板、CA 砂浆调整层和混凝土基础（支承层）组成^[3]。

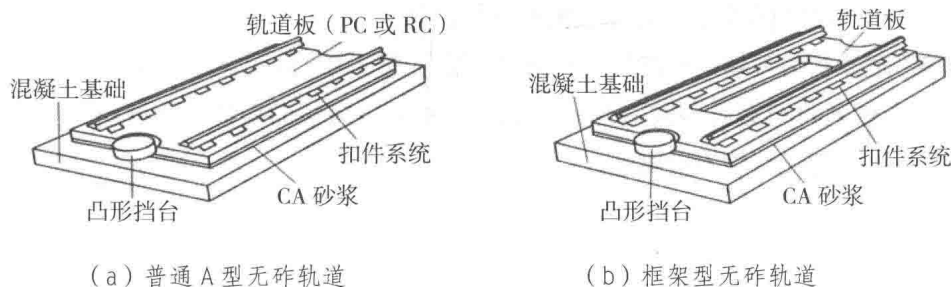


图 1-2 日本板式轨道

板式轨道的主要有以下特点。

(1) 轨道板由专业工厂预制，标准化程度提高。轨道板现场施工时可以更好地保证轨道结构的施工质量和精度，施工过程相对简单，能更有效的满足施工进度要求。凸型挡台可以作为板式轨道铺设和调正时的基准点，也能满足限制轨道板纵横位移的要求。

(2) CA 砂浆调整层的主要成分是乳化水泥沥青，填充在轨道板和混凝土底座（支承层）之间，其主要作用是为轨道结构提供一定的弹性并传递竖向力，在施工过程中起到调整上部结构误差的作用。CA 砂浆一般多采用砂浆袋进行灌注，这种施工方法大大地提高了维修的方便性。

(3) 板式轨道结构的基础是混凝土底座（或混凝土支承层）。高速铁路曲线地段的外轨超高可以通过混凝土底座板实现^[3]。施工过程中，只要保证了施工的精度和质量，便可以保证轨道结构的质量和精度。

(4) 扣件直接将钢轨与轨道板联结在一起，起到调整轨道结构的几何形位的作用，是板式无砟轨道结构的重要组成部分。

2. 德国无砟轨道

德国无砟轨道应用最多的是：雷达、博格、旭普林等结构形式。

(1) 雷达无砟轨道^[2]

雷达无砟轨道经过多年的发展，最新结构形式为 Rheda2000。它主要由钢轨、扣件系统、双块式轨枕、混凝土道床板和下部支承结构（底座或水硬性支撑层）等组成。Rheda2000 结构剖面图如图 1-3 所示。

Rheda2000 型无砟轨道主要有以下特点。

A. 双块式轨枕为专业工厂预制，带有桁架钢筋，这样可以保证钢轨的几何形位，并方便扣件的安装，轨道结构的整体性能好。

B. 道床板为现场连续浇注，在允许开裂的范围内（最大容许宽度为 0.5mm），钢筋可有效地将荷载自裂纹一侧传递到另一侧（道床板的配筋率在 0.8% ~ 0.9% 之间），同时保证钢筋不被腐蚀。

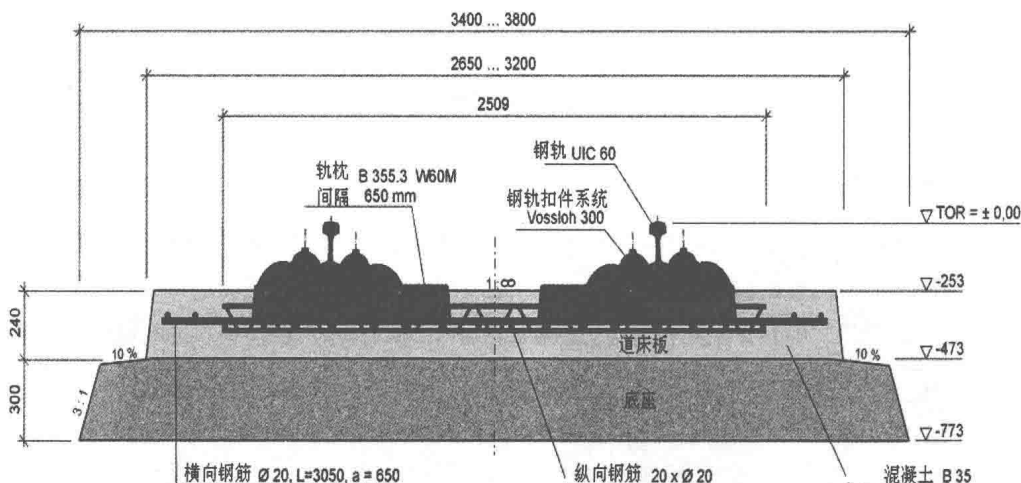


图 1-3 Rheda2000 轨道结构剖面图

C. 在不同的地基基础上, Rheda2000 无砟轨道上部基础有一定的区别。路基地段采用水硬性支承层, 桥梁地段采用钢筋土底座。

(2) 博格板无砟轨道

博格板无砟轨道结构部件主要包括: 钢轨、Vossloh 200 扣件、轨道板、BZM 砂浆及支承体系^[4], 如图 1-4 所示。

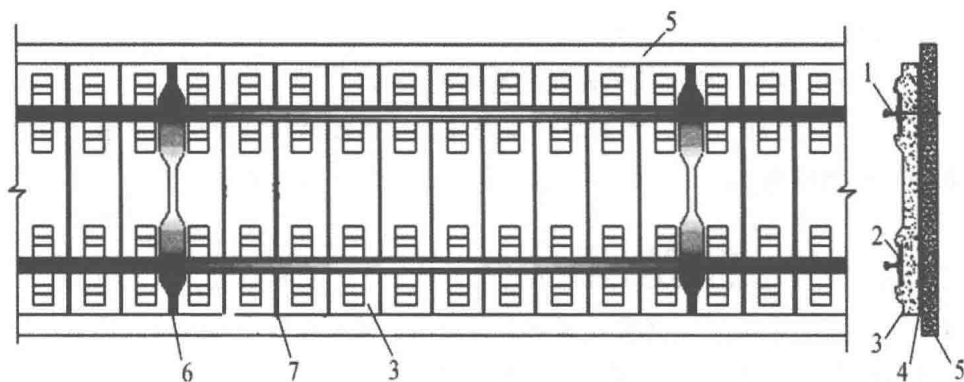


图 1-4 博格板无砟轨道结构图

- 1—钢轨 2—Vossloh300 扣件 3—博格轨道板 4—BZM 砂浆层
5—水硬性支承层 (路基) 或钢筋混凝土底座 (桥梁) 6—轨道板纵向连接缝
7—预设假缝

博格板无砟轨道主要有以下特点。

A. 博格轨道板为专业工厂预制, 轨道板沟槽可防止轨道扣件处混凝土出现裂纹。

B. 砂浆调整层弹性模量大, 可达到 5000N/mm^2 , 属于半刚性材料范围, 可以将轨道板和混凝土底座板 (或混凝土支承层) 有效的粘结为整体结构。

C. 博格轨道板与轨道板之间, 采用了螺杆连接, 该连接方式可提高结构的整体性。

1.2.2 我国高速铁路无砟轨道应用状况

我国无砟轨道研究可追溯到 20 世纪 50 年代, 与日本、德国几乎同步开始, 但是由于各方面原因, 我国无砟轨道发展比较缓慢。21 世纪初, 因列车提速及高速铁路的发展, 无砟轨道发展迎来了高潮。

1. 初期无砟轨道的应用状况

我国的无砟轨道起始于 20 世纪 50 年代,几乎与德国、日本同步。在 1934 年和 1939 年,分别铺设了长木枕和短木枕式混凝土整体道床。后来,在成昆线、北京地铁隧道和许多车站码头上进行了整体道床轨道、普通钢筋混凝土板式轨道和宽轨枕的铺设^[5]。在 1958 年到 1980 年间,我国铺设的无砟轨道主要形式是整体道床式轨道,无砟轨道的研究工作没有被视为重点,无砟轨道应用、发展、研究状况进展缓慢^[6]。

2. 20 世纪 80 ~ 90 年代无砟轨道的应用情况

到了 20 世纪 80 年代,为满足日益提高的铁路提速和高速运输需求,我国才对无砟轨道结构系统理论进行了大量的研究工作,我国无砟轨道进入了一个新阶段^[103]。

80 年代后,我国主要对长枕埋入式无砟轨道、浮置板轨道、板式轨道、弹性支撑轨道进行了研究^[7-8],无砟轨道的主要应用、铺设在隧道内和特大桥上,浮置板主要应用在减震地段,并取得了一定的应用效果^[9-10]。

1999 年,在秦沈客运专线的狗河特大桥和双河特大桥上铺设了板式轨道;在沙河特大桥、渝怀线鱼嘴二号隧道内、赣龙线枫树排隧道铺设了长枕埋入式轨道。弹性支承式轨道也进行了一定的研究,主要铺设在陇海线白清隧道和安康线大飘沟隧道内。

3. 遂渝线综合试验段

2004 年,我国开始了无砟轨道的综合研究,包括理论研究和现场试验研究。2006 年在遂渝线建成了我国首个无砟轨道综合试验段。试验段的轨道结构形式较多,主要有板式轨道、双块式无砟轨道、纵连板式无砟轨道以及岔区长轨枕埋入式无砟轨道^[11-12]。铁道科学研究院、西南交通大学、中铁二院、中铁二院二十四局等多个单位,联合对试验段多种无砟轨道结构形式进行研究和试验检测,并对其在桥梁、隧道、路基及各种过渡段的不同线下基础进行了研究。其中,板式轨道共设计了铺设路基上的 I 型平板、铺设桥梁上的 I 型框架及铺设隧道中的 I 型减振型板式轨道结构;在桥涵、隧道、桩板结构及桩网结构路基地段铺设了双块式轨道;在桥梁上铺设了纵连板式轨道^[13],并对纵连板式轨道结构进行了进一步的研究和优化;在岔区铺设了长轨枕埋入式无砟轨道^[14-15]。

遂渝线综合试验段多种无砟轨道结构形式在不同的线下基础的研究,为我国