

# 服役隧道动力响应特征 与损伤评价研究

Study on Dynamic Response Characteristics and  
Damage Evaluation of Existing Tunnels

吴波 吴冬 刘宁 李栋伟◎著

中国建筑工业出版社

# 服役隧道动力响应特征 与损伤评价研究

吴波 吴冬 刘宁 李栋伟 著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

服役隧道动力响应特征与损伤评价研究/吴波等著. —北京:  
中国建筑工业出版社, 2019.5  
ISBN 978-7-112-23336-6

I. ①服… II. ①吴… III. ①隧道-动力-响应-研究②隧道-损伤(力学)-评价-研究 IV. ①U459

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 033467 号

本书共分 2 篇, 第 1 篇主要包括: 基于弹塑性损伤理论混凝土拉压损伤机理研究、隧道仰拱混凝土累积损伤特征的试验研究、重载铁路隧道结构动力响应特性的数值研究、重载铁路隧道结构累积损伤特性的数值研究、隧道仰拱结构试验验证与分析等内容; 第 2 篇主要包括: 隧道地震反应分析地震动输入方法与人工边界、隧道衬砌结构损伤本构模型与损伤评价方法、Rayleigh 波作用下隧道洞口段的损伤反应分析、山岭隧道洞口段仰坡地震动力稳定性研究等内容。

本书可供从事隧道工程、地下工程技术与管理工作的科研、设计、施工人员使用, 同时, 也可作为高等院校隧道工程、地下工程及相关专业的参考书。

责任编辑: 王砾瑶  
责任设计: 李志立  
责任校对: 党 蕾

## 服役隧道动力响应特征与损伤评价研究

吴波 吴冬 刘宁 李栋伟 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17¼ 字数: 426 千字

2019 年 5 月第一版 2019 年 5 月第一次印刷

定价: 75.00 元

ISBN 978-7-112-23336-6

(33640)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 序

重载铁路运输已成为我国铁路现代化发展的主要趋势，随着重载列车重量和行车密度的提高，隧道结构承受振动荷载更加明显，影响结构动力响应及累积损伤特性，不利于结构服役期间的稳定性及安全性。作者应用 ABAQUS 二次开发子程序交互式运算方法，实现了仰拱累积损伤数值计算；基于研制的能考虑隧底基岩条件及静动载耦合作用的隧底力学环境模拟实验装置，模拟了列车荷载长期作用下隧底结构混凝土的受力及变形状态；提出了疲劳寿命拟合公式和累积损伤计算公式组合求解待定参数的方式；揭示了仰拱结构的累积损伤分布特征及发展规律；建立了隧底结构的累积损伤预测方法。

高烈度地震区山岭隧道洞口段是隧道震害的易发部位，其震害主要包括洞口段衬砌结构因地震波作用而开裂受损和洞口仰坡因动力失稳而崩塌、滑坡掩埋洞口两大类，这两类震害均会严重危害隧道工程的运营安全。作者基于域缩减法提出了一种解耦时域波动输入方法，将外源波问题转化为内源波问题，具有计算精度高、吸收边界选取灵活等优点；提出了一种适用于竖向传播剪切波作用下隧道地震反应分析的简化剪切波波动输入法；提出了两种用于评价衬砌结构在地震作用下的损伤与开裂程度的指标，即衬砌裂缝开口宽度和动力损伤指数；以龙洞子隧道为原型设计并完成了隧道洞口段大型振动台模型试验，研究了地震作用下隧道仰坡动力特性及仰坡坡体和衬砌结构的相互作用机制。

本书采用理论分析、室内实验、数值计算、软件开发等综合手段，深入研究了服役隧道循环重载和地震动载作用下两个方面的若干科学问题，提出了多项具有原始创新的重要理论成果，对促进我国隧道工程技术进步具有重要作用，相信该书的出版，将为该领域的广大科技人员提供十分有益的帮助。

谨此与作者共勉之，是以为序。

中国工程院院士

顾金才

2018年12月25日

# 前 言

本书包括两篇内容，第1篇研究服役隧道循环重载动力响应及累积损伤特性，第2篇研究服役隧道地震动力损伤特性及评价方法。

第1篇：服役隧道循环重载动力响应及累积损伤特性研究。重载铁路运输已成为我国铁路现代化发展的主要趋势。随着重载列车重量和行车密度的提高，使得隧道结构承受振动荷载更加明显，影响结构动力响应及累积损伤特性，不利于结构服役期间的稳定性及安全性。由于我国重载铁路运输发展相对较晚，上述问题的研究尚处于初期阶段。本文采用理论分析、室内试验以及数值计算相结合的方法，系统地研究了静动载耦合作用下重载铁路隧道底部结构的动力响应、损伤特性和损伤累积过程及发展规律，以期为我国重载铁路隧道建设提供理论参考。主要研究内容如下：

(1) 根据隧底结构混凝土的不同损伤机制，在不可逆热力学理论框架内构建考虑拉压损伤变量的混凝土弹塑性损伤模型。通过对本构模型和流动法则积分算法迭代格式的推导，实现弹塑性损伤模型的数值计算分析，并结合已有成果进行理论模型的验证分析。

(2) 研制能够模拟隧底力学环境的混凝土试验装置，建立以刚度相似理论为基础的装置弹簧刚度与基岩抗力系数的关系，并提出试验装置与MTS疲劳试验机组合加载的方式，以开展仰拱混凝土试验研究。

(3) 探明不同动载因素、静载因素与基底条件对混凝土累积损伤影响程度及规律。构建表征疲劳寿命的拟合参数与累积损伤参数之间的关系，以反映各因素对混凝土累积损伤特性的影响。

(4) 基于已有重载铁路车辆、轨道及隧道的设计参数，建立考虑轮轨接触关系和轨道不平顺的列车—轨道—隧道动力耦合仿真模型，模拟列车运行过程中轨下结构和隧道结构的动力响应特征，并结合已有工程实测数据进行了一体化仿真模型可靠性的验证。

(5) 在隧底结构的动力响应特性方面，通过进行仰拱结构不同位置处的位移、加速度、动应力及动应变的规律性分析，探讨列车轴重、隧道埋深、基底条件等各因素对隧底结构动力响应的影响。

(6) 在仰拱混凝土的累积损伤特性方面，形成考虑混凝土刚度衰减模式和损伤准则的交互式计算方式，开展各因素对隧道结构累积损伤特性影响的数值研究。

(7) 基于非线性累积损伤理论，建立隧底结构的累积损伤预测方法，构建结构损伤值与荷载循环次数的关系，进行不利工况下隧道衬砌结构循环次数的量化分析，开展重载铁路隧道衬砌结构累积损伤状态的预测及评价研究。

(8) 以重载铁路隧道的仰拱结构为研究对象，研制隧底力学环境模拟系统，开展隧道仰拱结构缩尺模型的试验研究，进行对隧底结构数值计算结果的试验验证研究。

第2篇：服役隧道地震动力损伤特性及评价方法研究。高烈度地震区山岭隧道洞口段是隧道震害的易发部位，其震害主要包括洞口段衬砌结构因地震波作用而开裂受损和洞口

仰坡因动力失稳而崩塌、滑坡掩埋洞口两大类，这两类震害均会严重危害隧道工程的运营安全。本文从实际的震害现象出发，采用理论推导、数值分析和振动台模型试验相结合的方法，对地震作用下隧道洞口段衬砌结构的损伤演化以及仰坡的动力稳定性这两个关键性问题进行了深入研究，所取得的主要研究成果与结论如下：

(1) 总结了现有的各类吸收边界与波动输入方法，指出现有的各类表现形式各异的波动输入方法均为具有内在统一性的耦合波动输入法。基于域缩减法提出了一种名为“域缩减波动输入法”的解耦时域波动输入方法，该方法将等效荷载输入界面移入吸收边界设置界面的内侧，将外源波问题转化为内源波问题，具有计算精度高、吸收边界选取灵活、等效荷载求解方便，且能够有效地结合无限元边界构建静—动力统一人工边界等优点。

(2) 基于域缩减波动输入法提出了一种适用于竖向传播剪切波作用下隧道地震反应分析的简化剪切波波动输入法，一维土柱模型、自由场模型、含隧道的模型之间的对比分析表明这种方法所得到的结果符合理论预测，是一种简单可靠的竖向传播剪切波波动输入法。

(3) 在总结、评述现有的各类混凝土损伤与开裂本构模型的基础上，将混凝土塑性损伤模型和钢筋的建模方法引入钢筋混凝土衬砌结构的地震反应分析。此模型基于连续介质损伤力学和弹塑性理论，不需要预先假定构件的开裂部位，对于复杂地震波动场中衬砌结构的损伤开裂的预测具有良好的适用性。以汶川地震中的烧火坪隧道为原型，分析了隧道洞口段衬砌结构在剪切波作用下的破坏机理，所得到的衬砌裂缝分布与震害现象一致，验证了塑性损伤模型的适用性。

(4) 为突破传统应力分析法中应力指标及相应的内力指标的局限性，提出了两种用于评价衬砌结构在地震作用下的损伤与开裂程度的指标，即衬砌裂缝开口宽度和动力损伤指数。其中，裂缝开口宽度能够从理论上预测衬砌结构裂缝开口的宽度，这一指标可以作为衬砌结构第二水平“中震可修”与第三水平“大震不倒”阶段分析与设计的评价依据；而动力损伤指数能够简单直观地描述衬砌结构整体的损伤程度随时间的变化，明确地指出引发或加剧衬砌损伤的时间段。

(5) 推导了 Rayleigh 波的自由场位移解，在域缩减波动输入法的基础上，提出了适用于三维有限元模型的 Rayleigh 波时域波动输入方法。与现有的黏弹性边界波动输入法的比较表明，二者具有一致的数值精度，但由于域缩减波动输入法与吸收边界的解耦，且不要求解自由场应力解，因而避免了黏弹性边界波动输入法中三维有限元模型中侧面吸收边界设置和波动输入的难题。

(6) 以汶川地震中的龙溪隧道为原型，应用 Rayleigh 波时域波动输入方法和混凝土塑性损伤模型，建立了隧道洞口段三维有限元模型，分析了 Rayleigh 波作用下隧道洞口段损伤演化过程。分析结果表明，Rayleigh 波对隧道洞口段衬砌结构的影响局限于洞口附近一定范围，且其影响随着进深增加而减小。衬砌的损伤是一个在地震波循环往复作用下随时间的逐步累积过程，幅值相对较小的波峰也可能导致显著的加剧损伤，单独的弹性分析并不能准确地指出衬砌结构发生最大破坏的时间和破坏的部位。素混凝土衬砌与钢筋混凝土衬砌损伤反应的对比表明，在强烈的地震作用下，钢筋的引入并不能阻止衬砌的开裂，但能有效地抑制裂缝的扩展，对于维持衬砌这类厚板壳状结构的整体力学稳定性和防水性具有重要作用。分析结果很好地再现了龙溪隧道的震害现象，验证了有限元建模方法的合理性。

(7) 为研究地震作用下山岭隧道仰坡的动力响应特性及仰坡坡体和衬砌结构的相互作

用,以汶川地震中的龙洞子隧道为原型,设计并完成了隧道洞口段大型振动台模型试验。试验结果表明,地震作用下仰坡的加速度反应存在显著的非线性放大效应和趋表效应;当输入地震波幅值超过 $0.6g$ 时,土体的非线性反应明显增强,加速度放大系数显著降低,表现出放大效应饱和的特性,且沿坡体竖直向上,加速度分布逐渐表现出平均化的趋势;隧道洞口段仰坡水平向动力反应受隧道结构存在的影响较小,可简化为自然边坡进行分析;仰坡的动力失稳是影响衬砌结构安全性的重要因素,当输入地震波幅值较小时,竖直向地震作用下衬砌主要受力部位受力要大于水平向地震作用,当幅值较大时,水平向地震动对衬砌结构的影响则明显大于竖向地震动;均质仰坡的破坏部位主要位于仰坡坡肩至坡面上部,破坏过程表现为地震力诱发—坡肩土体拉裂张开—坡肩土体倾倒崩塌—崩塌的土体沿坡面滑落碰撞—形成碎屑流堆积于坡脚。

本书第1篇由吴波教授和刘宁博士共同撰写,本书第2篇由吴波教授、吴冬博士、李栋伟教授共同撰写,博士生徐世祥、硕士生兰扬斌为全书做了大量文字整理工作,吴波教授负责全书统校工作。

本书撰写过程中,得到了广西大学、东华理工大学、宁波工程学院、西南交通大学、中南大学等单位领导及同仁的大力支持,撰写过程中参阅了国内外相关文献和研究成果,在此一并表示感谢!我国著名地下工程专家、中国工程院院士顾金才研究员百忙之中审阅了书稿并为本书作序,在此表示衷心感谢!

本书的出版得到国家自然科学基金项目(51678164、51478118、41672278、41271071)、广西自然科学基金项目(2018GXNSFDA138009)、广西科技计划项目(桂科AD18126011)、广西大学科研基金项目(XTZ160590)、广西特聘专家专项经费、广西岩土与地下工程创新团队项目(2016GXNSFGA380008)的资助,在此深表感谢!

鉴于服役期动载作用下隧道结构与围岩相互作用的复杂性,作者虽在系统性和前瞻性等方面付出了极大努力,由于水平和时间有限,疏漏与不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

2018年11月

# 目 录

第 1 篇 服役隧道循环重载动力响应及累积损伤特性研究 .....	1
第 1 章 绪论 .....	3
1.1 重载铁路研究背景及发展现状 .....	3
1.2 混凝土结构累积损伤理论研究进展 .....	5
1.3 隧道结构动力响应性能研究进展 .....	9
1.4 存在的问题与研究方向 .....	14
1.5 主要研究内容及技术路线 .....	15
第 2 章 基于弹塑性损伤理论混凝土拉压损伤机理研究 .....	18
2.1 隧底结构混凝土的受力损伤机制 .....	19
2.2 混凝土弹塑性损伤本构模型 .....	19
2.3 本构模型的数值实现研究 .....	26
2.4 弹塑性损伤模型的验证 .....	29
2.5 本章小结 .....	32
第 3 章 隧道仰拱混凝土累积损伤特征的试验研究 .....	34
3.1 应变演化模型和非线性累积损伤模型 .....	34
3.2 隧道仰拱混凝土试验设计 .....	36
3.3 考虑动载因素试验结果分析 .....	42
3.4 考虑静载因素试验结果分析 .....	47
3.5 考虑基底条件试验结果分析 .....	52
3.6 本章小结 .....	57
第 4 章 重载铁路隧道结构动力响应特性的数值研究 .....	58
4.1 隧道结构非线性动力学分析方法 .....	58
4.2 重载铁路隧道及车轨系统构造及特征 .....	59
4.3 车辆—轨道—隧道动力计算模型 .....	61
4.4 重载列车运行时隧底结构动力响应特征 .....	66
4.5 不同因素对隧底结构力学性能影响的研究 .....	73
4.6 本章小结 .....	89
第 5 章 重载铁路隧道结构累积损伤特性的数值研究 .....	90
5.1 混凝土结构累积损伤过程 .....	90
5.2 混凝土结构累积损伤数值模型 .....	91
5.3 不同因素对隧底结构损伤特征影响的研究 .....	94
5.4 隧道仰拱结构累积损伤计算方法 .....	100

5.5	本章小结 .....	103
<b>第6章</b>	<b>隧道仰拱结构试验验证与分析</b> .....	105
6.1	仰拱结构模型试验 .....	105
6.2	仰拱结构动力响应特征的验证与分析 .....	109
6.3	仰拱结构累积损伤特征的验证与分析 .....	111
6.4	本章小结 .....	114
<b>第7章</b>	<b>结论与展望</b> .....	116
7.1	结论 .....	116
7.2	展望 .....	118
	参考文献 .....	119
<b>第2篇</b>	<b>服役隧道地震动力损伤特性及评价方法研究</b> .....	129
<b>第1章</b>	<b>绪论</b> .....	131
1.1	课题选题背景及研究意义 .....	131
1.2	隧道地震损伤反应分析与评价方法的研究现状及存在的问题 .....	133
1.3	本书研究内容和技术路线 .....	138
<b>第2章</b>	<b>隧道地震反应分析地震动输入方法与人工边界</b> .....	140
2.1	引言 .....	140
2.2	隧道地震反应分析中的吸收边界耦合波动输入法 .....	142
2.3	域缩减波动输入法的原理及其验证 .....	149
2.4	域缩减波动输入法在隧道地震反应中的应用 .....	161
2.5	隧道地震反应分析中的静—动力统一人工边界问题 .....	176
2.6	本章小结 .....	177
<b>第3章</b>	<b>隧道衬砌结构损伤本构模型与损伤评价方法</b> .....	178
3.1	引言 .....	178
3.2	混凝土塑性损伤模型与钢筋的有限元模型 .....	178
3.3	地震作用下隧道衬砌结构的损伤演化与损伤评价 .....	198
3.4	隧道围岩的波动反应及其验证 .....	205
3.5	衬砌结构的损伤演化 .....	206
3.6	衬砌结构的裂缝扩展以及对衬砌稳定性的影响 .....	209
3.7	衬砌结构的动力损伤指数与损伤评价方法 .....	211
3.8	本章小结 .....	212
<b>第4章</b>	<b>Rayleigh波作用下隧道洞口段的损伤反应分析</b> .....	214
4.1	引言 .....	214
4.2	龙溪隧道的工程概况与震害调查结果 .....	215
4.3	Rayleigh波的时域波动输入方法 .....	217
4.4	龙溪隧道洞口段的有限元建模 .....	227
4.5	龙溪隧道洞口段数值模型的计算结果分析 .....	230
4.6	本章小结 .....	237

<b>第5章 山岭隧道洞口段仰坡地震动力稳定性研究</b> .....	239
5.1 引言 .....	239
5.2 模型试验方案设计 .....	239
5.3 试验结果分析 .....	245
5.4 本章小结 .....	249
<b>第6章 结论与展望</b> .....	251
6.1 结论 .....	251
6.2 展望 .....	252
参考文献 .....	254

# 第 1 篇

---

服役隧道循环重载动力响应及  
累积损伤特性研究



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 重载铁路研究背景及发展现状

### 1.1.1 研究背景

客运高速、货运重载是当今世界各国铁路发展的两大趋势。在“十一五”期间，我国重点开展了高速铁路和客运专线的建设，基本实现了客运高速化的发展目标。重载铁路的货物输送能力大，经济和社会效益显著，发展铁路重载运输，已成为世界各国铁路运输发展的重要方向，也是我国加速提高铁路运输能力的重要途径。在“十二五”期间及其以后，我国铁路建设重点必将逐步转入到重载铁路的发展，重载铁路建设已经列入《国家中长期科学和技术发展纲要》中的优先主题和《铁路科技发展“十二五”规划》的主要自主创新领域。为了适应我国重载铁路快速发展的需要，研发符合我国国情的重载铁路运输技术体系，攻克制约我国重载铁路发展的关键技术难题，已是摆在铁路科技工作者面前的重大课题。

国外的研究和实践经验表明，增大轴重能够显著提高运输效率，重载运输发达国家大多是在没有进行基础设施大规模投资的情况下，通过既有线改造、采用预防性养护维修体制和完善轮轨管理等措施来实现重载运输。以美国、加拿大、澳大利亚、南非等国家为代表的重载铁路具有轴重大、牵引质量高的特点，其轴重在 20 世纪 70 年代就达到了 30t。我国重载铁路起步晚，与国外重载线路行车密度不高、路网结构简单不同，目前我国重载铁路轴重较小（目前最大 25t）。目前我国比较典型的重载铁路有大秦线和朔黄线，都是煤炭运输专线，主要开行 25t 轴重 1 万~2 万 t 重载列车，并逐步增加开行数量。我国重载铁路由于煤炭的强劲需要，年运量都较大，列车开行密度高，但在养护维修和轴重两个方面与国外重载铁路存在较大差距，列车轴重低于国际重载协会的最新重载标准轴重 27t。因此，我国重载铁路轴重有较大的提高空间，增大轴重将是我国重载铁路发展的主要方向之一。

重载铁路运输的核心是提高轴重，而提高轴重会给重载铁路基础设施的设计、运营维护带来新的挑战，应重点解决轨道、桥梁、隧道和路基对轴重提高的安全性和耐久性问题。为了应对重载列车运行对隧道结构长期服役性能的影响，开展我国重载铁路 30t 及以上轴重条件下隧底结构动力响应特性分析理论研究，提出结构服役状态评估及累积损伤预测理论体系，为建立适合于我国国情的 30t 及以上轴重的重载铁路隧道结构设计规范奠定理论基础。

### 1.1.2 发展现状

铁路重载运输因其运能大、效率高、运输成本低、节能环保而受到世界各国铁路的广

泛重视,特别是在一些幅员辽阔、资源丰富,煤炭、矿产等大宗货物运输占有较大比重的国家,如美国、加拿大、巴西、澳大利亚、南非等重载技术发展尤为迅速<sup>[1]</sup>。大轴重、大编组、高牵引重量成为重载铁路运输的发展趋势,也是铁路货运发展的重要方向<sup>[2]</sup>。

### 1. 国外重载铁路发展概况

美国最早开展重载运输技术问题的研究,目前其重载铁路运量占美国集装箱总运量的70%以上。现阶段美国以重载单元列车方式运输为主,一般采用108节重载列车编组,3~6台牵引机车提供动力,列车运行时速为60~80km/h,列车总重达到了13600t,轴重位于29.8~35.4t之间<sup>[3]</sup>,目前运营列车最大轴重为35.7t<sup>[4]</sup>。通常重载铁路采用有砟轨道,2003年进行了轴重35t列车运营条件下重载铁路无砟轨道的经济性和技术可行性的试验研究,探明了无砟轨道不仅能够满足重载铁路长期服役性能的要求,还可减少养护维修周期<sup>[5]</sup>。2014年依托普韦布洛试验线,开展了轴重40t、45t列车运营安全性及适应性的试验研究。

澳大利亚因其煤炭、铁矿石等大宗商品运输需求,通过借鉴吸收美国重载铁路建造经验及相关技术,建造了四条最具代表性的重载铁路运输线路:(1)纽曼山铁路连接纽曼山矿区(Mt. Newman)到海德兰港(Port Hedland)全长426km,年运量超过1.09亿t<sup>[6]</sup>,2009年最大开行列车轴重达40t,年运量超过1.08亿t,最高时速75km/h。(2)Queensland国有运煤专线连接Goonyella矿区与海衣角港,列车牵引总重一般为0.7万~1万t,年运量1.76亿t,列车轴重为20~26t,采用80~120辆列车编组,重载列车的运行速度为80km/h。(3)哈默斯利铁矿铁路连接新Solomon Hub矿区及海德兰港(Port Hedland),采用230辆及以上的列车编组,列车牵引总重一般为3万t以上,列车净载重达100t以上,年运量大于1.1亿t。(4)FMG公司重载铁路连接皮尔巴拉矿区到海德兰港(Port Hedland),列车编组240辆,牵引总重达4万t,2015年运营列车最大轴重达42t,年运量1.1亿t,且已开展了轴重44t、45t列车的设计及使用<sup>[7]</sup>。

加拿大太平洋重载铁路运输线路由英属哥伦比亚东南部的矿山到温哥华海岸,全长超过1100km,净载重量11000~13250t的运煤列车,年运输量超过2500万t。列车牵引由中间列车提供动力,最大由13辆机车牵引,采用111节列车编组,专用敞车载重95t,列车轴重30t<sup>[5]</sup>。

巴西著名的重载铁路线路为米纳斯铁路和卡拉亚斯矿山铁路<sup>[7]</sup>:(1)米纳斯铁路全线905km,其中单线359km和复线546km,牵引总重3.9万t,列车编组超过320辆,列车轴重30t,平均时速为70km/h,年运量达1.3亿t以上。(2)卡拉亚斯矿山铁路全长892km,最大列车编组为330辆,最大列车轴重31.5t,最高时速为80km/h,年运量超过1.1亿t。

南非的两条重载线路总长仅占铁路总长的6.3%,却承担了62%的铁路总运量<sup>[7]</sup>:(1)Orex矿石运输专线连接塞申(Sishen)与萨达纳(Saldanha),全长861km,牵引总重最高达2.6万t,最高列车编组342辆,列车轴重30t,平均时速50~60km/h,最高时速70km/h。(2)COALink运煤专线连接姆普马兰加(Mpumalanga)煤炭基地到理查兹湾(Richardsbay),全长580km,列车编组最高为300辆,列车轴重26t。

### 2. 国内重载铁路发展概况

目前我国普通铁路货车轴重一般为21t和23t,重载列车轴重最大为30t。我国第一条重

载铁路大秦铁路<sup>[8]</sup>采用碎石道床,全长 653km,其中 52 座隧道采用有砟道床,隧道总长为 67.2km。大秦线于初期列车轴重为 21t,最大牵引总重为 1 万 t;年设计运量为 1 亿 t;2007 年实现 3 亿 t 年总运量,列车轴重达 25t,延米重量 7t,最大单车载重 2 万 t,日开行 49 对列车;2014 年运行列车最大轴重为 27t,最大单车载重 3 万 t,年总运量 4.5 亿 t。

我国第二条重载铁路为朔黄铁路<sup>[9]</sup>,全长 590km,其中含 77 座隧道共 66.3km。2013 年在国内首次开行 30t 轴重 2.5 万 t 重载列车,设计近期年运量为 3.5 亿 t (2013),远期年运量为 4.5 亿 t。

按照 30t 轴重重载铁路标准建设的瓦日铁路<sup>[10]</sup>,全长 1269.836km,其中 196 座隧道总长 377.8km,列车设计时速为 120km/h,年设计货运量 2 亿 t。为了支撑我国重载铁路技术的发展,瓦日线选取代表性路段作为 30t 轴重重载综合试验基地,其中包含隧道 10 座。

当前,我国主要重载铁路大秦线、朔黄线、瓦日线的运行列车轴重分别为 25t、27t,其中瓦日线处于对轴重 30t 列车线路运行的关键技术攻关阶段,相比国外重载铁路技术,我国重载铁路技术存在不小的差距,轴重 30t 级以上重载铁路线下结构相关设计建设标准没有出台,重载列出荷载引起隧道结构长期服役性能方面的研究工作需要开展和推动。

然而,每年我国铁路运输承担了我国货物运输总量的过半以上,在煤炭运输方面尤为突出,铁路运输完成全国 4/5 左右的货运量<sup>[11]</sup>。依据国家铁路发展规划,我国在“十三五”后将完成 8 横 9 纵的重载运输通道网络格局,重载线路总运营里程达到 3 万 km,我国重载铁路运输技术具有巨大的发展潜力。

## 1.2 混凝土结构累积损伤理论研究进展

### 1.2.1 损伤力学理论研究

在工程结构制作和使用过程中,工程材料本身所具有微观裂纹及空洞等多种微观缺陷,这些微观缺陷在各种外部荷载和环境作用下进一步扩展和不断出现,进而导致材料缺陷的产生与结构力学性能的劣化称之为损伤<sup>[12,13]</sup>。从细观层面而言,混凝土材料内部存在的大量微裂缝和微空洞等内部缺陷;外力作用下的内部缺陷的扩展和材料刚度劣化及强度下降表现为损伤演化。从宏观连续介质的层面,损伤演化过程是一种不可逆的、能量耗散的微细结构发展过程。

损伤力学用于研究材料及构件由服役环境作用引起内部损伤的发生和发展,诱发宏观力学性能的逐渐劣化,到最终结构破坏的整个过程的演化规律<sup>[14]</sup>。Dougill 早在 1976 年将损伤力学概念应用于混凝土非线性特征的描述,给出了具备损伤力学雏形的 Dougill 模型<sup>[15]</sup>。在之后混凝土损伤力学理论研究近 40 年的发展中,在混凝土试验方面从单轴到多轴,从静力到动力开展研究;在理论方面从各向同性到各向异性,从弹性和弹塑性损伤等方面开展研究,国内外学者进行了大量及丰富的研究工作,提出了多种混凝土损伤模型。

在混凝土损伤本构研究方面,法国学者 Mazars 在 Ladeveze<sup>[16]</sup>拉应力和压应力张量分解的基础上,通过引入弹性损伤释放率建立损伤准则,奠定了混凝土损伤力学的热力学基础。Ladeveze-Mazars 模型<sup>[17]</sup>能够较好模拟低周循环荷载作用下混凝土的性能退化现象,仅与单轴试验结果具有较好的一致性和准确性,但难以反应混凝土双轴受压应力状态。此

后,学者们在弹性损伤理论框架内修正和完善弹性损伤模型,比较经典的弹性损伤模型包括 Kachanov 模型<sup>[18]</sup>、Loland 模型<sup>[19]</sup>、分段线性<sup>[20]</sup>和分段曲线损伤模型<sup>[21]</sup>等。

弹性损伤模型因其理论框架的局限性,难以准确地反映多轴受力状态下混凝土非线性力学行为的机理和特性,忽略了非线性发展阶段部分材料存在塑性变形。针对上述问题,学者们尝试将塑性应变及其演化规律导入损伤本构模型中,例如, Simo 和 Ju<sup>[22]</sup>、Lee 和 Fenves<sup>[23]</sup>、Faria<sup>[24]</sup>、Jefferson<sup>[25]</sup>、Kratzig<sup>[26]</sup>、Jason<sup>[27]</sup>以及 Faleiro<sup>[28]</sup>等学者提出的弹塑性损伤模型。基于经验建立损伤准则, Richard<sup>[29]</sup>、Mai<sup>[30]</sup>、Saboori<sup>[31]</sup>等在采用求解目标函数最小值的问题来确定损伤演化的方向方面进行了大量的理论研究,能够较好地模拟混凝土力学行为,但其理论框架缺乏热力学基础。

相对于上述宏观损伤力学研究,细观损伤力学的研究从混凝土内部细观缺陷的产生到扩展过程去表征混凝土力学行为的改变。Nemat-Nasser 和 Hori<sup>[32]</sup>对单一裂缝发展过程对材料宏观性质的影响进行了详细评述,且研究内容已较为完善。然而,细观损伤模型难以用于结构工程,实用性较差,可为宏观损伤力学的计算结果提供一定的参考。

相对于宏观裂纹的扩展以及所导致的破坏,断裂力学的研究从微观裂纹的扩展和疲劳产生的机理,到断裂力学模型的建立和混凝土疲劳的研究。早期在线弹性断裂力学的基础上,建立的 Paris 公式用于表达混凝土疲劳破坏过程,但不能表征混凝土的疲劳破坏过程所呈现的非线性特征。针对上述问题,学者 Hillerborg<sup>[33]</sup>等建立了非线性黏聚裂缝模型, Gylltoft<sup>[34]</sup>、Reinhardt<sup>[35]</sup>、Hordijk<sup>[36]</sup>等将该理论模型用于混凝土疲劳破坏的研究中,并结合混凝土疲劳实验给出了循环荷载作用下  $\sigma-\omega$  衰减曲线的表达式。

微观模型理论对于疲劳产生机理以及损伤发展过程的表征,迄今为止仍未取得实质突破,难以有效反映工程结构的损伤发展和疲劳破坏。混凝土结构受力力学性质不仅表现为高度的非线性,而且表现为典型的随机性,20 世纪 60 年代末期有学者开始致力于力学参数随机性,并进行混凝土随机损伤模型研究。混凝土结构的随机性是损伤力学的另一个研究角度,20 世纪 90 年代期间对于该方面的研究主要侧重于线性结构,90 年代末期李杰等<sup>[37]</sup>从概率密度演化角度开展了混凝土结构随机非线性力学分析。

### 1.2.2 累积损伤试验研究

混凝土的累积损伤问题的研究正在从基于混凝土疲劳试验现象的数学描述,发展到损伤问题物理机制的认识。在循环荷载反复作用下,引起隧道结构混凝土损伤逐渐累积,诱发局部材料破坏并造成结构失效。基于隧道结构混凝土累积损伤的研究背景,以及混凝土损伤问题研究所具有的现象学、经验性的特点。本节从混凝土受压疲劳方面、受拉及弯折疲劳方面、混凝土损伤监测方面,尝试从反映疲劳损伤的物理本质这一角度对损伤问题进行梳理。

#### 1. 混凝土受压疲劳试验研究

20 世纪 70 年代早期混凝土受压疲劳试验研究中, Van Ornum<sup>[38]</sup>采用棱柱体和立方体试件开展了混凝土单轴受压疲劳性能试验,给出了在最小应力水平  $S_{\min}=0$  条件下大应力水平  $S_{\max}$  试件的疲劳寿命。在此基础上, Gray<sup>[39]</sup>、Murdock<sup>[40]</sup>和 Bennett<sup>[41]</sup>进一步开展了不同类型混凝土的单轴受压疲劳性能试验研究。Aas-Jakobsen<sup>[42]</sup>进行了最小应力水平对混凝土疲劳性能影响的试验研究,指出了最大应力水平和最小应力水平之间存在较好线性关

系,并建立了线性形式的疲劳寿命方程。

在随后的研究中,Holmen<sup>[43,44]</sup>基于大量试验样本研究,给出了混凝土疲劳寿命及不可逆应变发展等工程问题的结果,通过声发射试验获取了混凝土内部微裂缝扩展过程能量耗散状态,表征了混凝土损伤发展。在此期间混凝土疲劳寿命曲线研究方面比较有代表性的学者还有 Tepfers<sup>[45]</sup>、Hsu<sup>[46]</sup>和 Cornelissen<sup>[47]</sup>。从上述研究成果可以发现混凝土试验结果具有很强的离散性、疲劳损伤与不可逆应变有密切关联。

20世纪80年代以来,研究者们对于混凝土的单轴及多轴受压疲劳做出了大量试验研究,试图改进相关疲劳寿命曲线以包含更多物理要素影响,并进行损伤量与物理要素相关性的系统研究。

Whaley<sup>[48]</sup>考虑平均应力、应力幅值和最大应力水平等物理要素,通过三组疲劳试验,系统地开展了物理要素影响疲劳应变塑性演化规律的研究。Jeragh<sup>[49,50]</sup>考虑比例疲劳加载和定侧压疲劳两种加载路径,进行了不同加载条件下混凝土双轴疲劳试验,指出双轴应力状态对混凝土疲劳极限有所提高。Buyukozturk<sup>[51]</sup>通过一定侧压条件下的混凝土试件双轴受压疲劳试验,得到了初始侧压条件对混凝土应力—应变发展规律的影响,并提出了可用于计算各向等效应变和残余应变极值的简易模型。Petkovic<sup>[52]</sup>等基于高强混凝土受压疲劳性能试验研究,指出了混凝土存在疲劳极限,但难以用应力水平表征。

此外,国外学者 Sparks<sup>[53,54]</sup>、Hohberg<sup>[55]</sup>、Breitenbücher<sup>[56,57]</sup>等对混凝土试验过程中相关物理量变化进行了全程观测,并作了混凝土的疲劳应变演化规律、动态和静态弹性模量变化过程的研究。Hohberg采用脉冲响应以及超声波传播的手段,进行疲劳加载过程中动静弹性模量测定。

国内研究方面,刘凯<sup>[58]</sup>通过高频加速试验方法,进行了圆柱形混凝土试件的疲劳试验研究。在满足振动次数要求条件下,该试验方法极大地缩短试验时间,节约了试验成本。基于高频疲劳试验结果的分析,提出了符合高频条件的损伤累积模型,并得出了考虑存活概率的疲劳寿命曲线。

肖建庄<sup>[59]</sup>开展了再生混凝土的单轴受压疲劳试验,从混凝土的应变响应和疲劳损伤累积的角度,去反映混凝土疲劳损伤演化规律。依据连续损伤力学理论和试验研究工作,给出了混凝土损伤模型,对混凝土疲劳性能的理论研究和数值分析提供参考。

朱劲松<sup>[60-62]</sup>在大量的混凝土试验样本的基础上,采用超声波速法进行了定侧压混凝土双轴抗压疲劳变形及其损伤累积规律的研究。

曹伟<sup>[63,64]</sup>进行了四种初始定侧压的混凝土三轴静压试验和两种初始定侧压的混凝土三轴等幅抗压疲劳试验,得到了不同加载工况下混凝土统一的疲劳寿命曲线,验证了 Miner 线性损伤累积理论的不适用性,提出了非线性损伤累积模型<sup>[65]</sup>。

余自若<sup>[66]</sup>通过对活性粉末混凝土的轴压疲劳试验研究,得到了不同应力水平和应力比条件下混凝土的疲劳寿命,进而给出了混凝土的疲劳寿命方程,并建立了活性粉末混凝土的疲劳损伤演化模型<sup>[67,68]</sup>。

欧进萍<sup>[69]</sup>进行了混凝土单级或两级等幅轴压条件下的高周疲劳试验研究,依据混凝土疲劳损伤的三阶段演化特征和实际工程应用,建立了混凝土刚度衰减率和剩余静载极限强度的方程式。基于混凝土试验研究结果,得到了不同加载等级下混凝土方程式的相关参数,并对多级等幅混凝土疲劳公式进行了推广。