

STUDY ON THE VIBRATION
ISOLATION PERFORMANCE OF CONTINUOUS BARRIER

连续屏障隔振 性能研究

常 亮 肖旺新 ◎ 著

中国建筑工业出版社

连续屏障隔振性能研究

常 亮 肖旺新 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

连续屏障隔振性能研究 / 常亮著. — 北京: 中国建筑工业出版社,

2018. 12

ISBN 978-7-112-22737-2

I. ①连… II. ①常… III. ①隔振-研究 IV. ①0328

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第223739号

本书提出了一种新型的屏障隔振措施——锚杆约束的聚氨酯硬泡连续屏障,并对其隔振性能进行了数值和模型试验研究,取得了一些有实际应用意义的成果。这些研究成果既可为城市地面交通、高架交通、地铁交通、建筑打桩施工等引发的振动问题提供解决方案,也可为相关领域的振动研究和治理提供参考。全书共分为10章,主要内容有土介质中波动理论及屏障的隔振机理、有限元数值分析基本原理、锚杆的布置对屏障系统固有频率的影响、典型场地中本屏障隔振性能研究、试验模型的建立与振动的传播与衰减规律、地面振源作用下屏障隔振效果试验研究、隧道振源作用下屏障隔振效果试验研究、连续屏障参数对隔振效果影响分析等。

本书可供从事工程振动研究的科研人员 and 高校相关专业师生参考。

责任编辑:杨允

责任校对:张颖

连续屏障隔振性能研究

常亮 肖旺新 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

北京建筑工业出版社制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 8½ 字数: 21万字

2018年10月第一版 2018年10月第一次印刷

定价: 40.00元

ISBN 978-7-112-22737-2

(32835)

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)



前 言

轨道交通以其运量大、高速便捷、空气污染指数小等优点已成为解决城市交通拥挤的有效措施。与此同时列车运行引起的振动对周边环境，建筑物安全和精密仪器的正常使用造成了越来越严重的影响，必须采取减隔振措施加以缓解，减隔振已经成了非常重要的环境和工程问题。

本书研究了连续屏障的隔振性能，共分 10 章。第 1 章绪论，分析了屏障隔振的研究现状及存在的问题，提出了本书的研究内容和创新点；第 2 章介绍了土介质中的波动理论及屏障的隔振机理；第 3 章介绍了有限元数值分析方法的基本理论和本书研究过程中采用的有限元参数；第 4 章分析了喷锚支护与连续屏障一体的复合屏障中锚杆布置对屏障系统固有频率的影响；第 5 章对典型场地中本屏障的隔振性能进行了研究；第 6 章进行了基坑槽模型试验，研究振动波的传播与衰减规律；第 7 章在基坑槽模型中研究了地面振源作用下屏障的隔振效果；第 8 章在基坑槽模型中研究了隧道振源作用下屏障的隔振效果；第 9 章分析了连续屏障参数对隔振效果影响；第 10 章结论与展望，指出了今后的研究方向和本书研究的不足之处。

本书是作者对连续屏障隔振效果研究的成果总结，第一完成单位是南昌航空大学，硕士研究生曾松，邵斌参与了基坑槽模型试验，硕士研究生朱先均，罗颖参与了有限元数值计算，同时上海理工大学镇斌副教授在减隔振理论方面给予了指导，淮阴工学院肖旺新教授参与了本书第 9 章的部分研究工作。在此表示感谢！

本书受到江西省自然科学基金（20161BAB216103），江西省教育厅科技项目（GJJ160708），国家自然科学基金（11672185，51378234）的资助，在此一并感谢！

限于作者水平，本书一定存在不少缺点，悬请读者批评指正！

作者

于南昌航空大学，江西，南昌

2018 年 7 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 屏障隔振的研究现状及存在的问题	1
1.3 本书的主要内容与创新点	8
1.4 本章小结	10
第 2 章 土介质中波动理论及屏障的隔振机理	11
2.1 土介质中波动理论	11
2.2 屏障的隔振原因	13
第 3 章 有限元数值分析基本原理	18
3.1 有限元数值模拟方法概述	18
3.2 有限元数值分析的参数设计	18
3.3 本章小结	24
第 4 章 锚杆的布置对屏障系统固有频率的影响	25
4.1 屏障系统共振效应	25
4.2 锚杆的布置对屏障系统固有频率影响	26
4.3 屏障系统固有频率对锚杆参数的敏感性分析	32
4.4 本章小结	41
第 5 章 典型场地中本屏障隔振性能研究	42
5.1 模型的建立及分析参数的确定	42
5.2 无隔振措施时地表振动传播规律分析	45
5.3 地面振源激励下隔振措施的隔振性能研究	50
5.4 桩振源激励下隔振措施的隔振性能研究	62

5.5 本章小结	73
第 6 章 试验模型的建立与振动的传播与衰减规律	74
6.1 模型试验的研究概况	74
6.2 试验模型的建立	75
6.3 振动的传播与衰减规律	80
第 7 章 地面振源作用下屏障隔振效果试验研究	88
7.1 无屏障时的试验	88
7.2 聚苯乙烯泡沫板的隔振试验	92
7.3 聚氨酯硬泡的隔振试验	99
7.4 不同隔振屏障对低频振动的隔振效果对比分析	115
7.5 本章小结	117
第 8 章 隧道振源作用下屏障隔振效果试验研究	118
8.1 概述	118
8.2 无屏障时的试验	119
8.3 聚苯乙烯泡沫板的隔振试验	122
8.4 聚氨酯硬泡的隔振试验	129
8.5 不同隔振屏障对低频振动的隔振效果对比分析	141
8.6 本章小结	143
第 9 章 连续屏障参数对隔振效果影响分析	145
9.1 隔振效果与屏障位置的关系	146
9.2 隔振效果与屏障宽度的关系	148
9.3 隔振效果与屏障深度的关系	150
9.4 隔振效果与屏障刚度的关系	152
9.5 本章小结	153
第 10 章 结论与展望	154
10.1 结论	154
10.2 展望	156
参考文献	157

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

随着我国经济建设飞速发展,人口急剧增长,城市交通问题越来越严峻。地下轨道交通以其容量大、速度快、安全可靠、运行准时、不占用地面道路等特点,迅速成为一种现代化的交通工具。这些地铁系统在改善城市交通环境、缓解城市交通拥挤、减少城市污染等方面起到了积极作用,但地铁运行所引发的环境振动问题日益突出,受到了越来越广泛的关注。

除地铁振动外,城市地面交通、高架交通、建筑打桩施工等也引发了严重的振动。振动不仅造成了建筑物的损害,而且影响精密仪器的正常工作和人们的身心健康,已经成为城市化进程中一个极其普遍的环境难题。国际上,环境振动被列为七大环境公害之一,并已经着手研究环境振动的污染规律、产生原因、传播途径、控制方法以及对人体的危害^[1-4]。因此对交通荷载激励下振动的隔振措施进行研究具有明显的实际意义,它既可以解决交通沿线的振动问题,也可以为邻近领域振动的研究和治理提供参考。

20世纪60年代以来,振动问题受到各国学者的普遍重视,纷纷找寻各种有效的隔振措施。但是,对于有特殊减隔振要求的区域(如精密仪器实验室、医院等),单一的隔振措施往往达不到预期的减隔振效果,需要几种措施的合理组合。并且传统的隔振屏障存在稳定性差;对低频振动隔振效果差;隔振区出现振动放大异常现象等缺点。

基于上述背景,锚杆约束的聚氨酯硬泡连续屏障作为一种新型的隔振措施,本书对其隔振性能进行研究,以期能弥补传统隔振屏障的不足并且可以为本屏障隔振应用中的设计与施工提供参考。

1.2 屏障隔振的研究现状及存在的问题

屏障隔振是一种用来阻隔或改变振动波向屏蔽区传播的方法,其实质是弹性

波被存在于介质中的屏障所反射、散射和衍射。屏障分为连续屏障和非连续屏障两种。连续屏障有空沟、膨润土泥浆填充沟、混凝土芯墙等形式；非连续性屏障有孔列、混凝土单排桩、多排桩等形式。屏障隔振分为近场主动隔振和远场被动隔振。近场主动隔振由于屏障接近振源，主要用于阻隔体波（P波和S波）；远场被动隔振由于屏障远离振源，主要用来阻隔面波（R波）。关于近远场隔振的评定标准，Lysmer^[5]最早提出距离波源 $2.5\lambda_R$ （ λ_R 为瑞利波波长）为近场与远场隔振分界线，Haupt^[6]也提出 $2\lambda_R$ 作为近场与远场隔振分界线。

1.2.1 国外研究现状

Woods^[7]1968年第一次在现场试验的基础上研究了空沟的隔振效果，并提出了用振幅衰减系数来衡量隔振效果。但是由于当时的各种条件的限制，其研究也存在一定的缺陷，如试验中采用了较高的激振频率，由此其结论推广到低频时能否使用值得探讨。

Adam^[8]对空沟和填充沟渠的隔振效果进行了研究，建立了土层-6层建筑物模型，分析表明使用沟渠屏障可以减少80%的振动，隔振沟的效果主要取决于沟深与表面波的波长之比，试验资料表明，当沟深小于表面波长的30%时，对低频振动，空沟几乎没有什么效果，因此空沟和充填式沟渠只适合中高频振动波的隔离。

Fuyuki^[9]等运用有限差分法研究空沟对瑞利波的散射，发现对于浅空沟而言，空沟的宽度对瑞利波散射起着非常重要的作用。这一结论与过去的研究成果（即空沟的深度对瑞利波的散射有很大的影响，而宽度的影响却不大）有一定的不相符。

Peplow^[10]基于前人的研究成果，采用2D成层弹性半无限空间的模型，从理论上研究了WIB的隔振效果，结果表明：WIB能有效减弱地表荷载产生的低频振动在远场的振动响应，足以减小其振幅；隔振效果主要依赖于土的特性。由于WIB的存在，基础和土的振动水平都明显降低，但由于波的反射和透射，WIB并不能完全屏蔽振动波向邻近区域传播。

Takemiya^[11,12]将H-WIB应用于瑞士高速铁路和中国台湾高速铁路的隔振项目，在水平谐振荷载作用下的数值结果与实测数据对比表明：这种H-WIB对2~5Hz范围内的低频隔振效果比任何传统的隔振措施都好。

M.Adam^[13]等采用BEM-FEM建立二维土-结构体系，这个模型完全考虑土结构相互作用的影响，并直接决定了波屏障对结构的振动响应效果。结果指出，用一个沟屏障，可减少建筑物振动达80%以上；增加沟深度或沟槽宽度可以提高其隔振效果，且使用较软的回填材料也会有很好隔振效果。

J.A.Forrest^[14]等采用了一种圆形横截面的地铁隧道动态三维模型。土包围的隧道可以考虑为无限长,薄的圆柱形外壳和土作为一个无限均匀各向同性的统一体。在隧道施加了标准单元点荷载的情况下数值结果表明:由于无限土的辐射阻尼效应,被土包围的隧道对于一自由通道的驱动点响应不显示环形模式的共振表现。对于本书考虑的参数,远离隧道的振动响应由在隧道的材料和与土界面横波传播共同决定。

Chang-Chi Hung^[15]等采用三种人工神经网络(BPN、GRNN和RBF)来评估填充沟物理模型的隔振性能。结果表明:三种模型都能以不同的精度来估算填充沟隔振的有效性,但GRNN的精度最高,且GRNN数值计算的结果比经验多变量回归方法得到的结果可靠性更高。

Yao^[16]等通过建立车辆-轨道-土体-隔振沟-建筑物的三维有限元模型,分析隔振沟对铁路线建筑物的隔振效果,发现有隔振沟时建筑物的振动远小于无隔振沟时建筑物的振动。隔振沟越深、离建筑物越近,隔振效果越好。而隔振沟的宽度和长度对隔振效果影响不大。

P. Galvin和S. Francois^[17]提出了一种基于系统的边界积分方程,将有限元与边界元方法相结合,采用层状弹性半空间格林函数,采用基于轨道纵向坐标的傅立叶变换的2.5D模型来研究铁路交通在地面和隧道中引起的地面振动。当隧道与自由表面之间的距离和半空间的层界面与土中的波长相比较小时,不可使用该有限元-边界元方法。

Ashref^[18]等全尺寸现场试验的方法来评估空沟和土工泡沫填充沟的隔振性能以及探究沟的形状和位置对隔振效果的影响。结果表明:土工泡沫填充沟对于波的散射是切实可行的,屏蔽效果达68%甚至更高;沟的深度对空沟和土工泡沫填充沟的隔振效果影响很大,最优标准深(沟深/波长)是0.6;随着宽深比的增加,空沟的隔振性能降低,而土工泡沫填充沟却几乎没有影响。不足的是,试验却没有在不同的尺寸和不同的土剖面情况下来评估其隔振性能。

E. Celebi^[19]等采用非线性二维有限元模型,充分考虑到土的局部塑性变形对振动耦合土壤结构系统的动态响应的影响,来进行对列车诱发地面传播的振动的结构响应的数值模拟和计算。结果表明:空沟的深度为4.5m时,对结构的振动有明显的屏蔽效果,减少垂直方向上的振动达85%以上;振源到屏障的最佳隔振距离是5米左右;并且回填材料的阻尼比对屏障的隔振性能有显著的影响。

Pieter Coulier^[20]等人讨论了刚性屏障阻碍瑞利波的隔振效果,指出屏障和土体介质之间的刚度对比足够大的话,则隔振效果非常好。数值模拟表明,隔振效果是由介质中的瑞利波与屏障中的弯曲波的相互作用决定的,这会导致临界频率

和临界角的存在;刚性屏障对中高频率的振动波有非常好的隔振效果。

S.D. Ekanayake^[21] 等用三维有限元模型来研究不同的填充材料对地面振动衰减效率。该模型首先在使用 EPS 土工泡沫作为填充材料的全尺寸波屏障现场试验中得到验证,然后将相同的模型用来评估空沟,水填充的波屏障和填充 EPS 土工泡沫波屏障对地面振动衰减效率。结果表明:EPS 土工泡沫被认为是最有效的填充材料,其衰减效率接近空沟。EPS 土工泡沫和水填充的波屏障的隔振效果可随着波屏障的深度的增加而增加。

Pablo Zoccali^[22] 等用有限元模型来重点研究空沟的长度和不同的回填材料之间相互影响,通过各个观测点的观测数据,以振幅衰减系数 A_{RC} 来分析振动在时域和频域上的衰减效率。结果表明:增加沟的长度和不同的回填材料都会对地面振动有很好的屏蔽效果;当沟的长度受到限制时,可以采用回填材料来弥补其屏蔽效果不佳。不足的是,本书并未对土特性、火车运行速度和沟截面尺寸等一些较关键的参数进行研究。

D.Uigen^[23] 进行了一系列的现场全尺寸试验,分别研究了空沟、充水屏障和泡沫填充屏障在不同激励频率、土层分层、材料类型和屏障尺寸下的隔振效果。结果表明,空沟和泡沫填充屏障的隔振效果非常接近。当归一化深度 D 为 1 或 1.5 时,振动幅度可降低 67% 或更高。由于空沟的稳定性问题,建议采用泡沫填充屏障作为有效地减少地面振动传播的隔离系统。

P.Coulier^[24] 等人现场测试了在铁路沿线安装灌浆柱屏障的隔振性能,现场测试结果表明,设置灌浆柱屏障后减振效果,8Hz 以上的振动降低了 5dB,而对于 30Hz 的振动降低可达 12dB,并将实验结果与基于耦合有限元-边界元法的数值模拟进行了比较。

A.Dijckmans^[25] 通过现场实测和数值模拟研究了板桩墙减小铁路引发振动传播的隔振效果。现场实测表明,板桩墙能有效减少了从 4Hz 以上的振动,隔振效果随振动频率的增加而增加,随着屏障后距离的增加而逐渐减小;在软土条件下,只要板桩墙的深度足够深,其隔振效果优异。模拟结果表明,板桩墙作为刚性波障,其隔振效果取决于屏障与土体的深度和刚度对比,板桩墙只有当板桩的深度与土中的瑞利波长相比足够大时才有效。

D.J.Thompson^[26] 等利用 2.5D 边界元方法研究了空沟和柔性屏障对减少铁路运行引发的地面振动的隔振作用。结果表明,对于均匀地基,屏障的深度至少为瑞利波长的 0.6 倍才有效,然而对于层状地基,隔振效果受土层深度和刚度的影响。考虑所有地基条件下,空沟的隔振效果最好,柔性材料的隔振效果比空沟差,屏障深度越大,隔振效果越好,而宽度对其隔振性能影响很小;屏障的刚度

和阻抗比是影响隔振性能的最重要的材料参数。

J.D.R.Bordón^[27]等人结合有限元和边界元方法,研究了多孔弹性土中三种波屏障(空沟,单壁,空沟混凝土壁)的隔振效果。结果表明,除去土体高孔隙度和小耗散系数的影响之外,这三种屏障的隔振效果与在弹性土中的设置同样屏障的隔振效果类似。

C.Van.hoorickx^[28]等人利用数值模拟的方法,用2.5D有限元法研究了双喷浆墙屏障和双混凝土墙屏障的性能进行了研究,并与相同厚度的单墙屏障的性能进行了比较。结果表示,双墙屏障比单墙屏障的隔振效果稍强,当双墙之间的距离为四分之一瑞利波长时,隔振效果最好。

Y.B.Yang^[29]等人用2.5D方法研究了空沟和填充沟渠对铁路沿线的建筑物的隔振效果,结果表明,对自振频率较高的建筑,空沟的隔振效果比填充沟的隔振效果要好。当空沟位置靠近振源时,隔振效果不佳,因为体波可以从沟底绕射而过;列车以R波速运行时,铁路沿线的建筑物的振动会变大,因此,列车不应该以R波或接近R波波速运行。

1.2.2 国内研究现状

闰维明、聂晗^[30]等对地铁引起地面振动进行了实测分析,得出地铁引起的振动在距离振源30m左右时会出现振动放大现象,其振动放大频带主要集中在10Hz以下,在这一距离范围内的建筑物若其自振频率低于10Hz必受到地铁列车运营的干扰。

潘昌实^[31]等根据实测轨道加速度得到了列车荷载的模拟数学表达式,采用有限元法分析了隧道和周围土体的振动响应特性,结果表明:高频振动分量随距离增加衰减快,低频衰减较慢,地面建筑物主要受地铁列车低频振动分量的影响。

丁浩民^[32]等针对不同振源、不同传播土层、不同的结构及基础形式和不同的隔振方式等方面均进行了不同程度的研究,尤其是在以地铁振源为主的研究基础上,对可采用的分析方法进行了总结,并提出了一些建议。

李浩、冯劲^[33]通过建立隧道结构-弹性地基板隔振的二维有限元数值模型,计算列车通过时地基的动力响应以及布置弹性地基板之后的振动情况,计算表明:设置弹性地基板后,地面测点的竖向位移和隧道衬砌振动影响明显减小,且弹性地基板屏障隔振造价低、施工方便,对已建成的隧道通过路基注浆的方法也可以很容易达到隔振效果。然而,缺乏相应的试验资料和工程经验,在实际工程应用中,如何综合考虑各方面因素,如何合理选择各种设计参数仍有待进一步的研究和试验。

谢伟平^[34]等使用线性回归分析方法,得到了拟建场地环境振动的振级衰减回归曲线,使用 ANSYS 有限元软件对拟建场地的环境振动进行了三维有限元数值模拟,数值计算结果表明,连续墙加减振材料的隔振效果较好。武汉轻轨振动的隔振措施研究表明:地下连续墙能有效减少轻轨运行产生的地面振动。但对波长较大的低频振动,连续墙深度足够深时才有效。

丁亚光^[35, 36]等人基于 Biot 波动理论,分析了在饱和土体中设置刚性单排空心管桩对振动波的隔振效果。通过参数分析研究了桩间距和土体渗透性对隔振效果的影响。结果表明:随着饱和土的渗透系数的降低,单排刚性桩的隔振效果得到提高,当降低到一个阈值时,隔振效果不再变化;而桩间距对隔振效果的影响较大,空心刚性桩的隔振效果要比实心刚性桩好。

黄开勇^[37]等利用显式动力有限元计算软件 LS-DYNA 来模拟泡沫板隔振模型试验,介绍了数值模型的网格划分、边界设置、参数选取以及荷载模拟。将数值结果和试验结果进行对比分析,得到了相同的振动衰减规律,从而肯定了泡沫板的隔振效果,也同时发现模型试验中用于吸振的泡沫板不能完全消除边界对振动波的反射干扰,相比之下数值计算中的非反射边界条件更加接近半无限空间情形。然而,柔性屏障隔振易出现入射波全透射现象导致隔振屏障失效。

邱畅^[38]等分析了影响屏障隔振效果的主要参量,研究得出柔性屏障隔振易出现入射波全透射现象导致隔振屏障失效,刚性屏障不会产生明显的入射波全透射现象,故工程中应优先选用刚性屏障。

高广运、冯世进^[39]等基于采用薄层法对三维层状地基竖向激振波阻板的主动隔振效果的进行研究。结果表明:三维层状地基中波阻板的隔振效果也主要取决于波阻板的厚度及波阻板的弹性模量。

夏唐代等^[40, 41]基于 Twersky 的理论,引入圆柱体对声波和电磁波的多重散射解析解,对用排桩隔离环境振动的问题,提出了一种新的求解任意排列、任意直径刚性桩对平面 SH 波多重散射的理论方法,在数值计算分析中讨论了散射重数、排间距、桩间距等因素对刚性桩隔振效果的影响。结果表明:散射重数越多,计算结果与实际符合得越好;当排间距 $h/a_s = 31.5$ (a_s 为桩半径)、桩间距 $s_p/a_s = 3.0$ 左右时能取得较佳的隔离效果。

徐平等^[42, 43]运用复变函数的保角映射方法和波函数展开法,分别对多排柱腔、多排桩、蜂窝状空腔等构成的非连续屏障对弹性波隔离效果进行了研究。结果表明:随着柱腔或桩排数的增多,隔离效果明显提高,综合经济及隔离效果,三排柱腔或桩构成的隔振屏障是最理想的措施。然而,对于桩长、桩间距、桩径、桩的弹性模量和泊松比等参数对隔振效果的具体影响机理研究较为缺乏,故

可以考虑对这些参数的影响机理进行研究。

高广运^[44-46]采用基于薄层法(TLM)的基础解(Green函数)推导了饱和土和分层土的边界元法(BEM)方程。系统地研究了不同厚度、等效直径、剪切模量和埋深对 WIB 隔振效果的影响,并与单相弹性土进行了对比。结果表明,WIB 可以有效地降低饱和地基中的振动幅值,随着剪切模量、等效直径、厚度的增加和 WIB 埋深的减小,WIB 的隔振性能增加。当 WIB 埋深大于或厚度小于一定阈值时,反而会使饱和土中的振动显著放大。

楼梦麟、盛涛^[47-49]等人对建有地下连续墙上海某地铁沿线的建筑物进行了现场测量,以研究地铁运行引发的振动衰减情况。根据相关测点得到的数据,分析了加速度峰值衰减率,傅立叶谱,希尔伯特边带谱振动水平的变化情况。结果表明,地铁运行引发的振动主要集中在 45 ~ 75Hz 之间;设置地下连续墙后,振动在水平方向得到了很大的衰减,水平振动衰减程度随地下施工深度的增加而增加;而对于垂直方向的振动的衰减作用不明显,甚至会出现放大作用。

周凤玺^[50]根据含液饱和和多孔介质中的流-固耦合作用,研究了含液饱和多孔 WIB 的隔振效果,采用线弹性理论和 Biot 模型建立计算公式,分析了多孔材料的物理参数,包括固相、孔隙率、孔隙流体的性质对隔振效果的影响,结果指出,与单相固体 WIB 隔振系统相比,含液饱和多孔 WIB 的隔振效果更好,且设计可更加灵活。

刘斯宏、王艳巧^[51,52]等人数值分析和试验研究了土工袋的减振效果,由于土工袋具有可变水平刚度和较大的阻尼,因此是用于基础减振和隔离的优良材料。结果表明,土工袋可减少 75% 左右的振动,土工布袋的减振是主要由土颗粒间的摩擦力和黏性力以及袋的张力引起的能量耗散。

高广运^[53]通过现场试验研究了在竖向荷载作用下层状地基中水平波阻块(WIB)的主动隔振问题。在不同的加载条件下,系统地研究了 WIB 的尺寸,埋深和剪切模量对隔振效果的影响。结果表明,对高频振动,WIB 能够有效地减小地面振动;当 WIB 的剪切模量增加或埋深减小时,隔振效果将得到提高。当 WIB 的剪切模量较小或埋深大于一个阈值时,WIB 失去隔振效果,不是减小地面振动而可能是放大振动。

丁光亚^[54]等人试验研究了袋装砂袋对振动的影响,研究了编织袋中填充材料、振源频率、振源激振力大小对减振性能的影响。研究表明,砂袋中的峰值加速度随振源之间距离的增加而减少,随着振源频率的增加,砂袋中峰值加速度增大,土压力也随之增大,振动频率是评价袋装砂袋减振效果的一个重要因素。

高广运^[55]等人通过现场实测和数值模拟的方法研究了筏桩基础的减振效果。

指出了筏桩基础对地面振动控制总体起积极作用,能明显降低当振动频率低于60Hz的水平振动,但会增加振动频率高于30Hz的垂直振动。

黄建坤、石志飞^[56-58]等人引入固体物理学的周期理论提出了一种分层周期性结构来构建波屏障,采用有限元方法研究了此类型屏障的隔振效果。结论表明:屏障结构的周期数和屏障的深度对减振效果有着显著影响,相比之下,屏障的长度对减振效果相对较小;周期性屏障可将铁路振动荷载降低69.5%,而传统的混凝土屏障只能降低34.47%,周期性屏障中的空沟、泡沫屏障、橡胶屏障的隔振效果相近。

1.2.3 存在的问题

从现有国内外研究成果来看,连续屏障在缓解环境振动方面已取得比较理想的效果,尤其是对中高频振动的隔振取得较大的成果,但仍存在以下问题:

(1) 对低频振动的隔振效果较差。低频振动(尤其是10Hz范围以内)在土介质中传播较快,衰减缓慢,因此其对周围环境的影响更加明显。而在实际工程中,由于各方面的限制,传统的隔振屏障对低频振动的隔振效果不理想。

(2) 隔振区出现振动放大异常现象。一方面,由于屏障前存在波的反射和折射,屏障后存在波的透射和绕射,导致振动波发生相互干涉,使得振幅叠加而增大;另一方面,轨道交通振源激励下振动频带很宽(既有高频又有低频),并且在靠近屏障或远离屏障时,屏障系统对不同频率的振动波产生一定的共振效应,形成二次振源,向隔振区辐射振动波;以上两个原因都可能导致隔振区出现振动放大现象。

(3) 对隔振效果的研究,一般集中在单一的隔振措施上,缺乏多种组合隔振措施的研究。屏障材料研究成果少,工程应用上几乎都是使用钢筋混凝土,故连续屏障的应用受到限制。

因此本课题提出一种锚杆约束的聚氨酯硬泡连续墙的新型隔振屏障,采用数值模拟的方法,研究本屏障的隔振性能,其研究成果可为本屏障隔振应用中的设计与施工提供参考。

1.3 本书的主要内容与创新点

1.3.1 研究的主要内容

本书以锚杆约束的聚氨酯硬泡连续屏障的隔振性能为总的研究内容。研究技

术路线图如图 1-1 所示。具体的主要工作分为:

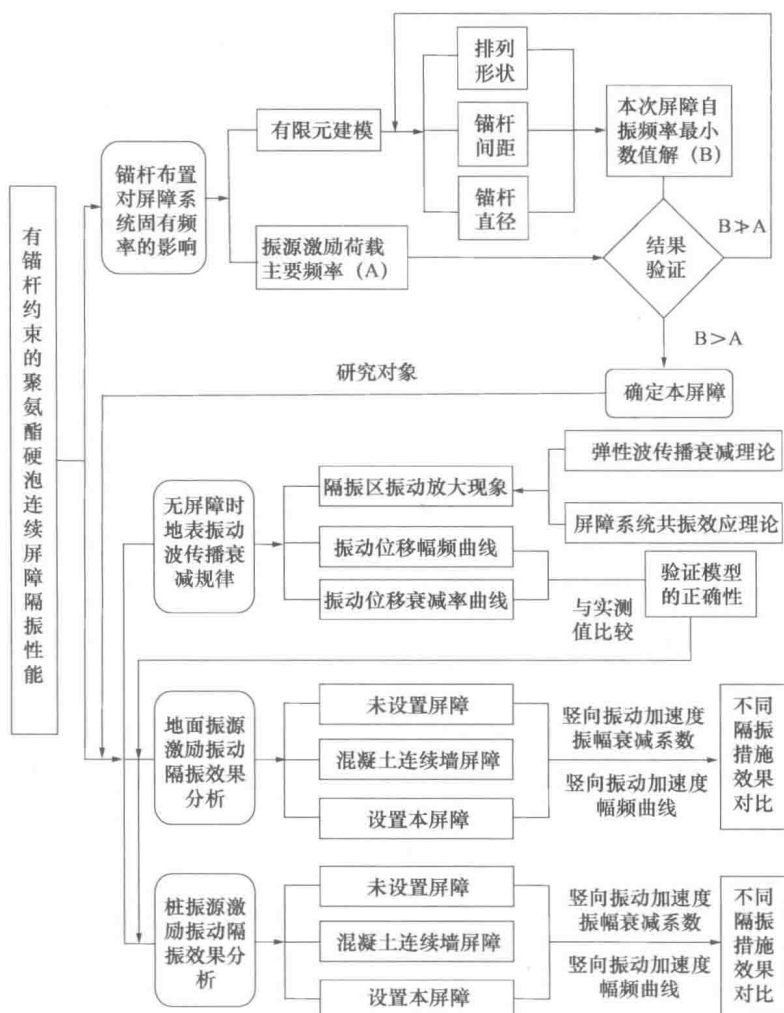


图 1-1 研究技术路线图

(1) 研究锚杆排列形状 (例如: 矩形、梅花形布置)、锚杆间距、锚杆直径对本屏障 (锚杆约束的聚氨酯硬泡连续屏障) 系统固有频率的影响, 通过锚杆参数敏感性分析, 选取本屏障系统最低固有频率大于振源荷载主要振动频率时的锚杆布置方式, 用作后续研究;

(2) 研究典型场地未设置隔振屏障后, 绘制自由场地拾振点振动波的位移幅频曲线和位移振幅衰减率曲线, 分析地表振动波的传播及衰减规律, 并与前人现场实测数据对比, 验证有限元数值模型的正确性与可靠性; 观察分析隔振区的振动放大现象;

(3) 研究典型场地未设置屏障和设置混凝土连续墙屏障后, 分别施加地面振源激励简谐荷载和桩振源激励简谐荷载, 通过拾振点的竖向振动加速度幅频曲线和特征点值来分析混凝土连续墙屏障对不同振动频率的隔振效果;

(4) 研究典型场地分别设置本屏障和混凝土连续墙屏障后, 分别施加地面振源激励简谐荷载和桩振源激励简谐荷载, 通过拾振点的竖向振动加速度幅频曲线和特征点值, 对比分析两种隔振屏障措施对不同振动频率的隔振效果; 并通过拾振点的竖向振动加速度振幅衰减系数 A_{RC} , 对比分析两种隔振屏障措施对低频振动的隔振效果。

1.3.2 创新点

本书的创新点在于:

(1) 锚杆与聚氨酯硬泡组合

聚氨酯硬泡性能良好且自重轻, 锚杆作为聚氨酯硬泡连续屏障的多点支承约束, 减小连续屏障的计算跨度, 连续屏障受力更加合理, 稳定性更好。

(2) 锚杆布置方式对屏障系统固有频率的影响

基于屏障系统共振效应原理, 研究锚杆的布置方式(包括排列形状、锚杆间距、锚杆直径)对屏障系统固有频率的影响, 将数值计算结果与振源激励荷载的主要频率进行对比分析。选取本屏障系统最低固有频率大于主要振动频率时的锚杆布置方式, 用作后续研究。

(3) 锚杆约束的聚氨酯硬泡连续屏障隔振性能研究

对锚杆约束的聚氨酯硬泡连续屏障分别在地面振源激励简谐荷载和桩振源激励简谐荷载作用下的隔振效果进行研究, 尤其是低频振动下的隔振效果研究。

1.4 本章小结

本章针对日益严重的环境振动问题, 以及传统隔振屏障存在着对低频振动的隔振效果不理想这样的背景下, 提出了锚杆约束的聚氨酯硬泡连续屏障这一新型隔振屏障。从连续隔振屏障和非连续隔振屏障两方面对国内外的研究现状进行概括和总结, 指出了目前连续屏障隔振措施存在的问题, 并结合现有的研究成果给出了本课题的主要研究内容、技术路线和主要的创新点。

第2章 土介质中波动理论及屏障的隔振机理

2.1 土介质中波动理论

当岩土介质在任一点内受到动荷载的作用后,这种扰动引起的变形将以应力波的形式逐渐传播到介质的其他部位,周围的介质就会接收到新的振动能量也产生振动,使振动逐渐向远方传播,这种振动的传播过程称为波动。产生波动的局部振动体即为波源,而传播波动的物体则称为介质。波动是振动在土介质中的传播过程,只是能量的传递,而被迫振动的介质只是在原位上下振动,并没有随着振动波一起向远处前进,服从波动理论。引起振动的因素是多方面的,如地震作用、爆炸冲击、机器基础的振动以及人工激发的各种波动作用。

为分析问题的方便,对于小应变问题,通常可将岩土介质看作是理想的线弹性介质,利用经典的弹性理论来分析波在岩土介质中的传播特性。一般来说,按照振动的持续时间来分类,可将波分为连续波和脉冲波;而按照波阵面形式不同,可以把不同波源发出的波分为平面波、柱面波和球面波,对于不同的波动形式,将在土介质内产生不同的动力响应。有研究表明,工程建设、交通运输和工业生产等人类活动引发的振动,主要以两种不同形式的波向通过土介质向周围传播,分别是体波和面波。而根据波的传播方向和体波的振动方向不同,又可以把体波分为横波和纵波。

纵波是波动的一种(波动分为横波和纵波),亦称“疏密波”,通常被称为P波,是质点的振动方向与波传播方向相同的波,其特点是波的传播速度较快、振动周期短,在液体、气体和固体中都能传播。而横波又通常被称为剪切波或S波,其振动的特点是传播速度很慢,振动的周期大,只能在固体中传播。而根据横波偏振方位的不同,S波又分为SV波和SH波,其中SV波是与射线垂直的入射面内的S波,SH波是与射线和入射面垂直(与分界面平行)的S波。

当横波和纵波传播到地表或介质分界面时,在受到边界作用下,横波和纵波在一定条件的前提下相互叠加,将会激发一种沿地表或分界面传播的波,这就是面波,主要的面波有瑞利波和乐夫波。瑞利波又被称为R波,由Rayleigh在