

钢弹簧浮置板浸水条件下的减振效果<sup>\*</sup>袁德浩<sup>1</sup> 张宏亮<sup>2</sup> 杨 林<sup>1</sup> 周 宇<sup>3</sup> 牛晓莉<sup>1</sup>

(1. 青岛地铁集团有限公司, 266035, 山东青岛; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100071, 北京;

3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海)

**摘 要** [目的] 针对浮置板浸水后的减振效果问题, 有必要研究运营条件下列车运行速度、钢弹簧隔振器刚度对减振效果的影响。[方法] 基于流固耦合理论, 建立了包含浸水钢弹簧浮置板与隧道在内的浮置板-浸水-隧道流固耦合振动模型, 通过实测数据验证了所提模型的准确性; 分析浸水浮置板在列车荷载作用下, 隔振器刚度和列车运行速度对其减振效果的影响。[结果及结论] 钢弹簧浮置板浸水工况下, 隔振器刚度和列车运行速度的变化主要影响隧道壁振动级的幅值, 对主频分布影响较小。当钢弹簧隔振器刚度越大或列车运行速度越高时, 浮置板在发生浸水时的减振效果降低越明显。当浸水深度从 80 mm 增加至 160 mm 以上(即浸水达到浮置板板侧空间高度的 1/4 ~ 1/2) 时, 隧道壁最大 Z 振级幅值会增大 10% 以上。在浸水浮置板工况下, 列车运行速度从 80 km/h 降低至 40 km/h 时, 隧道壁振动级最大降低约 8%, 但仍大于无浸水工况时的隧道壁振动级。当浸水高度超过板侧空间高度 1/2 以上时, 无论是降低隔振器刚度或降低列车运行速度, 均对减振效果的提升作用有限。

**关键词** 轨道交通; 浮置板轨道; 减振效果

**中图分类号** U231.94

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.014

### Vibration Reduction Effect of Steel Spring Floating Slabs under Water Immersion Conditions

YUAN Dehao<sup>1</sup>, ZHANG Hongliang<sup>2</sup>, YANG Lin<sup>1</sup>, ZHOU Yu<sup>3</sup>, NIU Xiaoli<sup>1</sup>

(1. Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266035, Qingdao, China; 2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100071, Beijing, China; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] To address the issues of reduced vibration isolation performance of floating slabs under water immersion, it is necessary to study the impact of train operating speed and steel spring isolator stiffness on vibration reduction under operational conditions. [Method] Based on fluid-struc-

ture interaction theory, a floating slab-immersion-tunnel fluid structure coupled vibration model is developed, incorporating the water-immersed steel spring floating slab and the tunnel. The accuracy of the model is validated using field data. The isolator stiffness and train speed affecting the vibration reduction performance of the water-immersed floating slab under train load action is analyzed. [Result & Conclusion] Under steel spring floating slab water immersion conditions, changes in isolator stiffness and train operating speed primarily affect the amplitude of tunnel wall vibration, with minimal impact on the distribution of the dominant frequencies. As the stiffness of the steel spring isolators increases or the train operating speed rises, the vibration reduction performance of the floating slab deteriorates more significantly when immersed. When the water depth increases from 80 mm to over 160 mm (the immersion reaches from 1/4 to 1/2 of the slab side space height), the maximum Z-vibration level of the tunnel wall increases by over 10%. When the train operating speed decreases from 80 km/h to 40 km/h under floating slab water immersion conditions, the maximum vibration level of the tunnel wall decreases by approximately 8%, though it remains higher than that under non-immersed conditions. Once the water height exceeds 1/2 of the slab side space height, further reducing isolator stiffness or train operating speed is limited in improving vibration reduction performance.

**Key words** rail transit; floating slab track; vibration reduction effect

近年来,钢弹簧浮置板广泛应用于轨道交通地下线路的减振区段中,但某些富水地下区段容易产生局部浸水现象,当水浸入钢弹簧浮置板与基础之间的空隙后,容易导致减振效果降低、列车运行限速等情况。

针对不同的减振需求,钢弹簧浮置板采用不同的刚度隔振器。文献[1]研究了场段地段的浮置板

<sup>\*</sup> 青岛地铁环境减振降噪综合技术研究项目(M8-ZX-2021-036);山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010427)

隔振器刚度对其减振效果的影响。文献[2]研究了高架线钢弹簧浮置板隔振器刚度对轨道的减振效果。已有文献对列车速度影响钢弹簧浮置板减振效果的研究主要从提速方面考虑<sup>[3]</sup>。但上述文献均以正常无浸水情况下的浮置板受列车荷载作用为前提开展研究的。在浸水浮置板的减振效果研究方面,现有文献多基于工程实测开展研究,如文献[4]和文献[5]分别实测了浸水排出前、后的钢弹簧浮置板减振效果。对于结构-水-结构之间的流固耦合分析方面,目前研究多集中于含液体的板在荷载作用下的自身振动情况<sup>[6-7]</sup>,以及固体管道与其内部液体间的相互作用<sup>[8-9]</sup>。

在运营条件下,本文研究考虑不同隔振器刚度的钢弹簧浮置板发生浸水时的车速降低情况,基于流固耦合理论建立列车荷载作用下浮置板-浸水-隧道流固耦合振动模型,分析浸水浮置板和基础的垂向振动响应特性,预测隧道内浮置板下方存在不同程度浸水时,列车速度和钢弹簧隔振器刚度对浮置板减振效果的影响。本文研究可为浮置板浸水后的养护维修提供参考。

## 1 浮置板-浸水-隧道流固耦合振动模型

当浮置板与基础之间存在浸水时,浮置板上的列车荷载作用会引起隔振器弹簧压缩变形和板体垂向位移,液体受板底振动也会产生相应的位移、压强、流速等,从而改变了浮置板-浸水-基础之间的相互关系。而受扰动的液体流场反过来作用于浮置板和基础,影响上下两个固体结构的受力情况,这样的现象就使得浮置板-浸水-基础在列车动荷载作用下形成了强流固耦合关系。作为振动导体,水传导振动的能力比空气强很多,于是水将道床的更多振动能量传至基底,影响浮置板的减振效果,由此建立浮置板-浸水-隧道流固耦合振动模型。

### 1.1 流固耦合原理

在流固耦合系统中,当流体受到小扰动、流体自由表面为小波动时,将流固耦合求解域离散化并构造插值函数,结合流体物理运动方程和固体物理运动方程,流固耦合系统的有限元方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ -\mathbf{Q}^T & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{a}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{a}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \frac{1}{\rho} \mathbf{Q} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{P}_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$\mathbf{p}$ ——流体结点压力向量;

$\mathbf{a}$ ——固体结点位移向量;

$\rho$ ——流体密度;

$\mathbf{M}_s, \mathbf{M}_f, \mathbf{C}_s, \mathbf{C}_f, \mathbf{K}_s, \mathbf{K}_f$ ——固体质量矩阵、流体质量矩阵、固体阻尼矩阵、流体阻尼矩阵、固体刚度矩阵、流体刚度矩阵;

$\mathbf{F}_s$ ——固体外载荷向量;

$\mathbf{P}_0$ ——外压强向量;

$\mathbf{Q}$ ——有限元单元处的流固耦合矩阵。

### 1.2 建立流固耦合模型

本文采用有限元建模分析法,对浮置板-浸水-隧道流固耦合振动模型在列车荷载作用下的流固耦合振动问题进行数值计算。所建立的有限元固体和流体动力学模型设置流体-固体相互作用面,该模型中有两个相互作用面,分别为浮置板底面与流体域上表面的交界面,以及流体域下表面与基础上表面的交界面。钢弹簧浮置板结构及水体与钢弹簧浮置板相互作用示意图如图1所示。固体模型和流体模型的相互作用面应在同一坐标系下一一对应,且完全重合。

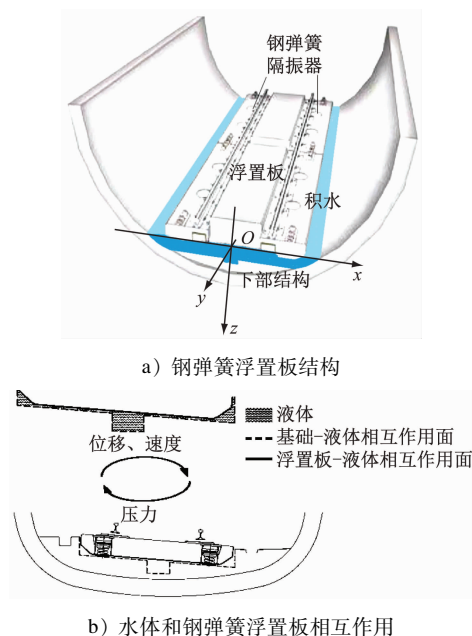


图1 钢弹簧浮置板结构及水体与钢弹簧浮置板相互作用示意图

Fig. 1 Diagram of steel spring floating slab structure and interactive force between water and steel spring floating slab

上述固体模型中包括钢轨、扣件、轨道板、钢弹

簧隔振器、轨下基础、隧道壁、土层等结构,轨道模型结构参数如表 1 所示,其中,弹簧、隔振器均采用弹簧阻尼器模拟。

表 1 轨道模型结构参数

Tab. 1 Summary of track model structure parameters

部件	参数	取值
钢轨	弹性模量/Pa	$2.1 \times 10^{11}$
	泊松比	0.3
	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7 850
扣件	垂向刚度/( $\text{N}/\text{m}$ )	$4 \times 10^7$
	垂向阻尼系数/( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ )	10 650
	横向刚度/( $\text{N}/\text{m}$ )	$2 \times 10^7$
	横向阻尼系数/( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ )	10 650
隔振器	垂向刚度/( $\text{N}/\text{m}$ )	$6.9 \times 10^6$
	垂向阻尼系数/( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ )	20 590
	横向刚度/( $\text{N}/\text{m}$ )	$1 \times 10^7$
	横向阻尼系数/( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ )	20 590
浮置板	弹性模量/Pa	$3.45 \times 10^{10}$
	泊松比	0.2
	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2 500
土体	弹性模量/Pa	$3.15 \times 10^{10}$
	泊松比	0.18
	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2 100

考虑工程现场实际情况,将振动模型的钢弹簧浮置板轨道结构-下部基础-隧道各部分组成为叠合实体部件,包括两个子系统:浮置板轨道子模型和隧道-土层子模型,保证模型与现场实际情况基本符合。有限元固体和流体动力学模型示意图如图 2 所示。如图 2 a) 所示,为消除模型的尺寸效应,该模型设置了 3 块联结浮置板。在土层方面,取 9 倍隧道最大宽度作为隧道两端的计算宽度,取 5 倍隧道最大高度作为隧道上、下侧的计算高度,即土体模型的尺寸为 75.0 m(长)×46.8 m(宽)×28.5 m(厚)。如图 2 b) 所示,将浮置板侧面与基础侧面的空间高度(板侧空间高度)定义为浸水严重程度参数。此外,采用列车-轨道多体动力学模型计算作用在钢轨上的列车荷载,A 型车主要技术参数如表 2 所示。

2 模型验证

2.1 评价标准及数据处理方法

采用 Fourier 积分变换对试验数据进行随机信

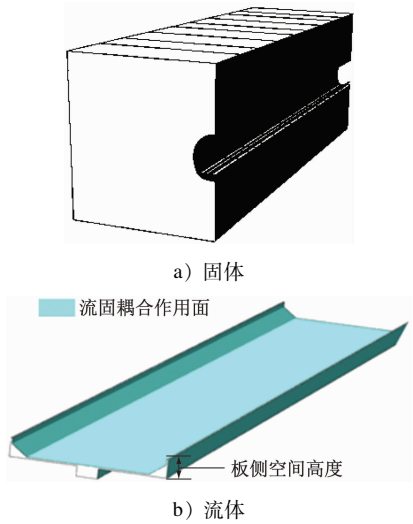


图 2 有限元固体和流体动力学模型示意图

Fig. 2 Diagram of finite element solid and fluid dynamics models

表 2 A 型车主要技术参数

Tab. 2 Main technical parameters of type A vehicles

主要技术参数	取值
车辆全长/m	22.5
车辆定距/m	15.6
固定轴距/m	2.5
车体质量/t	41.86
转向架质量/t	7.358
轨距/m	1.435
轨道至梁体重心的偏心距/m	2.05
一系横向弹簧刚度/( $\text{kN}/\text{m}$ )	5 000
一系竖向弹簧刚度/( $\text{kN}/\text{m}$ )	1 384
二系横向弹簧刚度/( $\text{kN}/\text{m}$ )	158
二系竖向弹簧刚度/( $\text{kN}/\text{m}$ )	355
车体侧滚质量转动惯量/( $\text{t} \cdot \text{m}^2$ )	155
车体点头质量转动惯量/( $\text{t} \cdot \text{m}^2$ )	1 959
车体摇头质量转动惯量/( $\text{t} \cdot \text{m}^2$ )	1 875

号分析,以获得振动加速度频谱,参考 GB 10070—1988《城市区域环境振动标准》,并通过 1/3 倍频程谱进行分析。

振动加速度级  $S_{\text{VAL}}$  (单位 dB) 可以表示为:

$$S_{\text{VAL}} = 20 \lg(a_{\text{rms}}/a_0) \quad (2)$$

式中:

$a_{\text{rms}}$ ——振动加速度有效值,单位  $\text{m}/\text{s}^2$ ;

$a_0$ ——基准加速度,取为  $1 \times 10^{-6} \text{ m}/\text{s}^2$ 。

Z 振级  $S_{\text{VLZ}}$  (单位 dB) 及频率计权振动加速度

的均方根值  $a_{\text{rmsl}}$  可以表示为:

$$S_{\text{VLZ}} = 20 \lg(a_{\text{rmsl}}/a_0) \quad (3)$$

$$a_{\text{rmsl}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{avg}}} \int_0^{t_{\text{avg}}} a_w^2(t) dt} \quad (4)$$

式中:

$a_w(t)$ ——经过频率计权后,时间  $t$  上的瞬时加速度值,单位  $\text{m/s}^2$ ;

$t_{\text{avg}}$ ——振动测量的平均时间,即积分的时间周期,单位  $\text{s}$ 。

## 2.2 现场数据验证

测试断面位于半径为 450 m 的缓和曲线段,实测地段的浮置板钢弹簧刚度为 6.9 kN/mm,列车运行速度约为 40 km/h。测试断面的钢轨状态良好,扣件安装符合设计要求。测试期间,浮置板的板下存在浸水,两侧钢弹簧隔振器打开后均有浸水,浸水深度达到了板侧空间的一半高度。针对该测试条件,根据前文所建立的仿真工况,隧道壁的垂向振动仿真及实测结果对比,如图 3 所示。

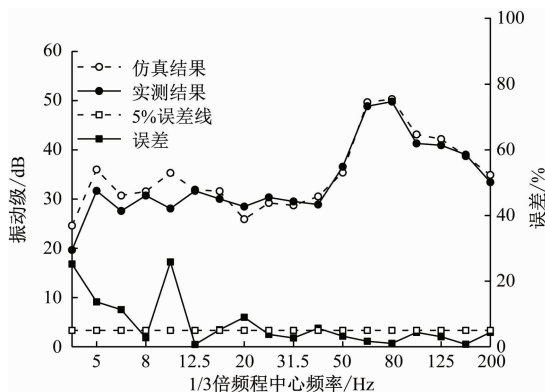


图3 隧道壁的垂向振动仿真及实测结果对比

Fig. 3 Comparison of tunnel wall vertical vibration simulation and field measurement results

由图 3 可知:在隧道壁 16 ~ 200 Hz 分频振级的峰值和频率方面,仿真计算获得的隧道壁峰值频率为 80 Hz,与实测结果相同;仿真计算获得的隧道壁振动级峰值较实测结果大 0.5 dB,误差为 1.04%;在大于 25 Hz 频段,隧道壁振动级的仿真与实测误差均小于 5%。

综上所述,本文所建立的浸水浮置板轨道流固耦合振动模型具有一定的准确性,可以将其用于分析不同隔振器刚度下运行列车速度变化对浮置板轨道的减振效果影响。

## 3 结构参数影响分析

考虑到常用的隔振器刚度<sup>[4]</sup>及浮置板发生浸

水时的列车限速条件,设置隔振器刚度分别为 6.0 kN/mm、6.9 kN/mm 和 8.0 kN/mm,列车运行速度分别为 80 km/h、60 km/h 和 40 km/h。不同浸水工况下的浸水深度及浸水特征如表 3 所示。

表 3 不同浸水工况下的浸水深度及浸水特征

Tab.3 Water accumulation depth and immersion characteristics under different water immersion conditions

工况	浸水深度/mm	浮置板浸水特征	隔振器浸水特征
1	320	满水	两侧均浸水
2	160	1/2 高度浸水	两侧均浸水
3	80	1/4 高度浸水	单侧浸水
4	0	正常浮置板	无浸水

### 3.1 隔振器刚度

由浮置板-浸水-隧道流固耦合振动模型计算得到 3 种刚度情况下,浮置板、隧道壁等位置的垂向振动响应。以最不利工况(工况 1)和正常工况(工况 4)为例进行分析,当列车运行速度为 40 km/h 时,不同隔振器刚度下的隧道壁分频垂向振动级如图 4 所示。

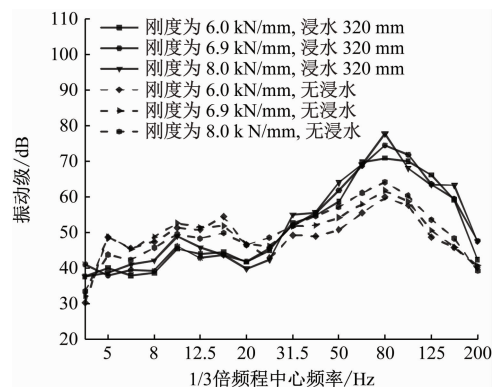


图4 不同隔振器刚度下的隧道壁分频垂向振动级

Fig. 4 Frequency-segmented vertical vibration levels of tunnel walls under the stiffness of different vibration isolators

由图 4 可知:3 种隔振器刚度下,隧道壁垂向分频振动级的频域分布变化趋势基本一致,在 1/3 倍频程振动级结果上体现出的垂向振动主频段均为 63 Hz,即浮置板钢弹簧隔振器刚度的变化对隧道壁垂向振动加速度的频域分布和主频段影响较小,对各分频的振动级幅值有一定影响。

通过隧道壁最大 Z 振级  $S_{\text{VLZ,max}}$  来分析钢弹簧隔振器刚度对浮置板振动规律的影响,不同隔振器刚度及浸水工况下的隧道壁  $S_{\text{VLZ,max}}$ ,如表 4 所示。



在同一浸水深度工况下,隧道壁  $S_{VLZ,max}$  随着隔振器刚度的增大而增大;随着浸水深度的增加,当浸水深度超过 80 mm 时,各隔振器刚度下的隧道壁  $S_{VLZ,max}$  增量明显,幅值增大百分比从约 4% 跃升至约 16% ~ 18% (浸水深度为 160 mm) 和 16% ~ 21% (浸水深度为 320 mm)。由此可知:浸水深度的增加会导致  $S_{VLZ,max}$  幅值的增大,使列车通过时的浸水浮置板减振效果变差;当浸水深度超过浮置板板侧空间高度的 1/2 及以上且单侧隔振器已经发生浸水时,  $S_{VLZ,max}$  幅值会增大 10% 以上。

表 4 不同隔振器刚度及浸水工况下的隧道壁  $S_{VLZ,max}$

Tab. 4 Tunnel wall maximum Z-vibration level  $S_{VLZ,max}$  under the stiffnesses of different vibration isolators and immersion conditions

工况	$S_{VLZ,max}/dB$		
	隔振器刚度为 6.0 kN/mm	隔振器刚度为 6.9 kN/mm	隔振器刚度为 8.0 kN/mm
1	59.9	61.8	64.1
2	62.0	64.3	67.2
3	66.5	68.6	71.8
4	68.3	71.0	74.4

### 3.2 列车运行速度

设置隔振器刚度为 6.9 kN/mm。以工况 1 和工况 4 为例,不同列车运行速度下的隧道壁 1 ~ 200 Hz 分频垂向振动级,如图 5 所示。由图 5 可知:3 种列车运行速度下,隧道壁垂向分频振动级的频域分布趋势基本一致,在 1/3 倍频程振级结果上体现出的垂向振动峰值频率均为 63 Hz,即列车运行速度的变化对隧道壁垂向振动加速度的频域分布和主频段影响较小,对各频段的振动级幅值有一定的

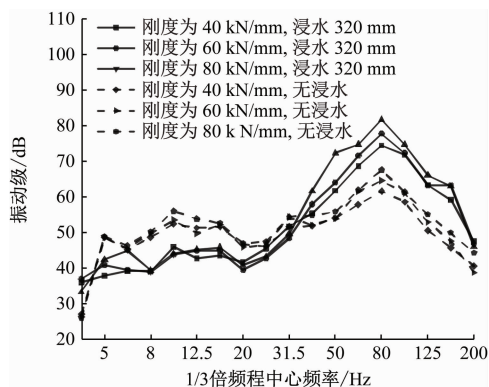


图 5 不同列车运行速度下的隧道壁垂向振动级

Fig. 5 Tunnel wall vertical vibration level at different train operating speeds

影响,即列车运行速度降低时,振动级也相应降低,这种现象在 25 ~ 200 Hz 频段尤为明显;相较于无浸水工况,浸水工况时,各列车运行速度条件下的隧道垂向振动级均较大。

通过隧道壁最大 Z 振级  $S_{VLZ,max}$  来分析不同列车运行速度对浮置板振动规律的影响,不同列车运行速度及浸水工况下的隧道壁  $S_{VLZ,max}$ ,如表 5 所示。在同一浸水深度工况下,隧道壁  $S_{VLZ,max}$  随着列车运行速度的降低而减小,例如浸水深度从 320 mm 分别降低到 160 mm 和 80 mm 时,隧道壁  $S_{VLZ,max}$  分别降低了 4% ~ 6% 和 7% ~ 9%。由此可知,当浮置板存在浸水暂未排出情况时,降低列车运行速度可在一定程度上降低隧道壁的振动,缓解因浮置板浸水导致的减振效果降低的影响。当列车运行速度降低 1/2 时,隧道壁  $S_{VLZ,max}$  最多降低了约 8%。当列车运行速度从 80 km/h 降低至 40 km/h 时,隧道壁  $S_{VLZ,max}$  最大仅降低了约 8%,此时,隧道壁  $S_{VLZ,max}$  仍比正常工况时的隧道壁  $S_{VLZ,max}$  大约 3 ~ 4 dB。故在浮置板浸水时,列车运行速度从 80 km/h 降低至 40 km/h 对隧道壁的振动缓解影响有限,仍需尽快进行浮置板浸水的抽排水工作。

表 5 不同列车运行速度及浸水工况下的隧道壁  $S_{VLZ,max}$

Tab. 5 Tunnel wall maximum Z-vibration level  $S_{VLZ,max}$  under different train operating speeds and water immersion conditions

工况	$S_{VLZ,max}/dB$		
	列车运行速度为 40 km/h	列车运行速度为 60 km/h	列车运行速度为 80 km/h
1	61.8	64.1	66.0
2	64.2	66.6	68.6
3	67.2	69.7	72.1
4	69.8	72.4	75.3

## 4 结语

通过建立浮置板-浸水-隧道流固耦合振动模型,分析浸水浮置板在列车荷载作用下,隔振器刚度和列车运行速度对其减振效果的影响,主要获得以下几个结论:

1) 钢弹簧浮置板浸水工况下,隔振器刚度和列车运行速度的变化主要影响隧道壁振动级的幅值,对主频分布影响较小。

2) 当钢弹簧隔振器刚度越大或列车运行速度越高的情况下,浮置板在发生浸水时的减振效果降

低越明显。当浸水深度从 80 mm 增加至 160 mm 以上(即浸水深度达到浮置板板侧空间高度的  $1/4 \sim 1/2$ )时,隧道壁  $S_{VLZ,max}$  幅值会增大 10% 以上。

3) 在浮置板浸水条件下,列车运行速度从 80 km/h 降低至 40 km/h,隧道壁  $S_{VLZ,max}$  最大仅降低约 8%,此时隧道壁  $S_{VLZ,max}$  仍比正常工况时的隧道壁  $S_{VLZ,max}$  大约 3~4 dB。故在浮置板浸水时,列车运行速度从 80 km/h 降低至 40 km/h 对隧道壁的振动缓解影响有限,仍需尽快进行浮置板浸水的抽排水工作。

## 参考文献

- [1] 陈罄超,和振兴,孙建树,等. 轨道交通场段钢弹簧浮置板减振轨道刚度研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(12): 50.  
CHEN Qingchao, HE Zhenxing, SUN Jianshu, et al. Research on the damping stiffness of steel spring floating slab used in urban rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(12): 50.
- [2] 程珊,刘林芽,王少锋. 高架钢弹簧浮置板轨道减振特性研究及参数优化[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(5): 146.  
CHENG Shan, LIU Linya, WANG Shaofeng. Vibration reduction study and parameter optimization of steel spring floating slab tracks in metro viaducts[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(5): 146.
- [3] 夏志强,朱林军,吴福来,等. 地铁车辆-轨道耦合振动响应分析及轨道结构参数优化[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(2): 168.  
XIA Zhiqiang, ZHU Linjun, WU Fulai, et al. Analysis of metro vehicle-track coupling vibration responses and optimization of track structure parameters[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(2): 168.
- [4] 张斌,王建立,王建,等. 钢弹簧浮置板浸水时的减振效果实测分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(9): 75.  
ZHANG Bin, WANG Jianli, WANG Jian, et al. Test analysis of the damping effect impact on steel spring floating slab track soaked in water[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(9): 75.
- [5] 王建立,张斌,王建,等. 钢弹簧浮置板浸水对减振效果及振动传递的影响[J]. 都市快轨交通, 2015, 28(4): 100.  
WANG Jianli, ZHANG Bin, WANG Jian, et al. Impact on vibration control effect and vibration transmission when steel spring floating slab track is soaked in water[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2015, 28(4): 100.
- [6] 周凤玺,李丹,曹小林. 含液饱和不可压多孔弹性板的随机振动[J]. 振动与冲击, 2017, 36(10): 168.  
ZHOU Fengxi, LI Dan, CAO Xiaolin. Random vibration of fluid-saturated porous elastic plates[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(10): 168.
- [7] 刘丰,王正中,厉宽中,等. 考虑流固耦合效应的弧形钢闸门地震动力响应研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 158.  
LIU Feng, WANG Zhengzhong, LI Kuanzhong, et al. Seismic dynamic responses of spillway radial steel gates considering fluid-solid coupling effects[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(3): 158.
- [8] 张春晋,孙西欢,李永业,等. 基于流固耦合的管道车振动运移水力特性数值模拟与试验[J]. 振动与冲击, 2019, 38(5): 251.  
ZHANG Chunjin, SUN Xihuan, LI Yongye, et al. Numerical simulation and tests for vibration migration hydraulic characteristics of a piped carriage based on fluid-structure interaction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(5): 251.
- [9] 王壬,侯新康,徐建国,等. 地震荷载下考虑管内有压流体的 PCCP 耦合动力分析[J]. 世界地震工程, 2021, 37(4): 206.  
WANG Ren, HOU Xinkang, XU Jianguo, et al. Coupled dynamic analysis of PCCP considering the inner pressure fluid under seismic load[J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(4): 206.

· 收稿日期:2024-03-04 修回日期:2024-04-26 出版日期:2024-12-10  
Received:2024-03-04 Revised:2024-04-26 Published:2024-12-10  
· 第一作者:袁德浩,高级工程师,379938309@qq.com  
通信作者:张宏亮,正高级工程师,54364417@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## 敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式阅读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

