

# 考虑围岩松动圈的隧道抗减震措施

赵旭<sup>1,2</sup>, 代志杰<sup>1,2</sup>, 黎若寒<sup>3,4</sup>, 陶连金<sup>1,2</sup>

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124;

3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 4. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 为了研究考虑松动圈的情况下隧道抗减震措施的有效性和机理, 建立同时考虑松动圈和抗减震措施的有限元计算模型, 通过设置减震层、注浆加固和综合措施 3 种减震措施, 研究隧道结构的地震动响应。首先将数值计算模型与振动台试验结果相对比, 验证数值计算模型的有效性; 然后在数值模型基础上, 进一步分析减震层、注浆加固以及综合措施(即 2 种措施同时施作)的情况下隧道结构的附加应力、附加应变、围岩塑性区以及衬砌损伤的变化。结果表明: 考虑松动圈后, 与不设置减震措施时相比, 减震层的存在使结构的主应力发生小幅变化, 同时减震层增大了衬砌总体的环向变形, 在减小围岩塑性应变的同时还增加了衬砌的拉伸损伤; 而注浆加固不仅能减小衬砌各处的主应力响应, 还能减小衬砌各处的应变响应, 减弱了松动圈对隧道变形的不利影响; 同时施作 2 种减震措施, 则衬砌各处的主应力及应变均显著减少, 衬砌的抗震性能得以显著改善。因此, 当考虑松动圈时, 减震层与注浆加固相结合的综合减震措施对于隧道结构更为适宜, 且易于和实际辅助施工措施相结合。

**关键词:** 隧道松动圈; 模型试验; 数值计算; 减震措施; 动力响应; 变形机理

**中图分类号:** U 461; TP 308

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2020)09-1027-12

**doi:** 10.11936/bjtxb2019110009

## Earthquake Mitigation Measures for Tunnels Considering Loosen-zone in Surrounding Rock

ZHAO Xu<sup>1,2</sup>, DAI Zhijie<sup>1,2</sup>, LI Ruohan<sup>3,4</sup>, TAO Lianjin<sup>1,2</sup>

(1. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Key Lab of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

4. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To study the effectiveness and mechanism of mitigation measures for tunnel structures considering loosen-zones under earthquake, a finite element analysis model considering both loosen-zone and mitigation measures was established. First, two kinds of mitigation measures, namely buffer layer and grouting, were set up, respectively. Then, a model considering the combined measures of buffer layer and grouting was also established. The impact on seismic responses of the tunnel structure considering these measures was analyzed. Results of the finite element model established were compared with results from a former shaking table test of a model with a buffer layer around the tunnel structure, and the effectiveness of the mitigation measures and the validity of the finite element model were verified. Furthermore, the finite element model was used to analyze stress, strain, plastic zone of the surrounding

收稿日期: 2019-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41672289); 土木工程防灾国家重点实验室开放基金资助项目(SLDRCE16-02)

作者简介: 赵旭(1976—), 女, 副教授, 主要从事隧道与地下工程方面的研究, E-mail: zhaoxu@bjut.edu.cn

rock and damages of lining under the two kinds of mitigation measures including the buffer layer and the grouting. Results show that compared with the structure with no mitigation measures, the principal stress variation of the structure is small when the buffer layer is installed. At the same time, this buffer method not only increases the circumferential deformation of the whole lining, but also reduces the plastic strain of the surrounding rock. The tensile damage of the lining increases, too. By applying the grouting, the main stress response throughout the lining is reduced, and also the strain response of the lining is reduced. So that the adverse effect of the loosen zone on the tunnel deformation is weakened. Under the combined seismic mitigation measures with both buffer layers and grouting, the principal stresses and strains of the lining are significantly reduced, and the seismic performance of the lining is significantly improved. Therefore, the comprehensive mitigation measure combining the buffer layer and grouting reinforcement is more suitable for tunnels while considering the loose zone, which is also easy to be applied in project construction.

**Key words:** loosen-zone in tunnel; model test; numerical simulation; buffer measure; dynamic response; deformation mechanism

地下空间如巷道、隧道在开挖前,岩体处于三向应力平衡状态。开挖后,由于岩体受到扰动,打破原有应力平衡状态,产生应力集中现象,当集中应力大于岩体强度时,岩体发生破坏,应力集中向岩体深处转移,直到达到新的应力平衡。伴随着围岩应力调整及其重分布,会围绕开挖空间形成塑性应变集中直至破碎的区域,通常把这个区域认为是围岩松动圈,简称松动圈。研究表明<sup>[1-3]</sup>,松动圈的存在会对地下结构的受力状态产生不利影响。目前,对于松动圈的成因、影响范围及快速探测等方面的研究已取得长足进步,对松动圈的认识也更为深刻<sup>[4-6]</sup>。但针对松动圈对隧道结构影响的研究大多数集中于静力分析,且对巷道分析居多<sup>[7-8]</sup>,对考虑松动圈的隧道结构动力响应研究则相对较少,不能满足工程中需考虑松动圈的隧道抗减震安全性的需求。

隧道结构抗减震措施可分为3类:改变围岩力学参数、改变隧道结构性能以及设置减震装置<sup>[9]</sup>。胡辉<sup>[10]</sup>基于FLAC3D软件展开静、动力耦合模拟计算,并与模型试验结果相对照,验证减震缝、扩大断面及柔性吸能材料的减震效果。崔光耀<sup>[11]</sup>通过断裂黏滑段抗震试验,探究隧道抗震缝的最佳设置间距、减震层的最佳铺设厚度以及减震缝对初期支护的减震效果。方林等<sup>[12]</sup>通过数值模拟分析跨断层隧道的动力响应特征,验证减震层的有效性。但上述对于隧道抗减震措施的研究,都是基于不考虑松动圈的隧道结构而言的。如果考虑松动圈,隧道周围的围岩力学性质相对较弱,对隧道的约束能力减小,需要进一步研究上述减震措施

的有效性。

松动圈对隧道地震动响应的不利影响主要是由于松动圈相对于围岩力学性质较为弱化,使得隧道结构与周围介质相对刚度比增大,同时松动圈对结构的约束作用相比于周围岩体弱,故在地震作用下,隧道结构产生更大变形,进而使隧道更易发生破坏。考虑松动圈对隧道地震动响应的影响机理,减震层和注浆加固可能会是较为理想的减震措施。

为了探明考虑松动圈的隧道结构的合理减震措施,建立有限元动力计算模型,通过分别设置减震层、注浆加固和2种减震措施共同作用的综合措施,对考虑松动圈隧道的地震动响应进行研究,分析不同减震措施的减震效果,以期得到最优的工程减震措施。

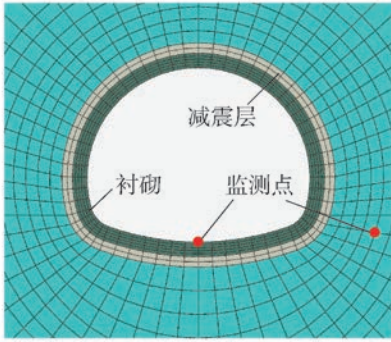
## 1 数值模型的验证

### 1.1 数值模型的建立

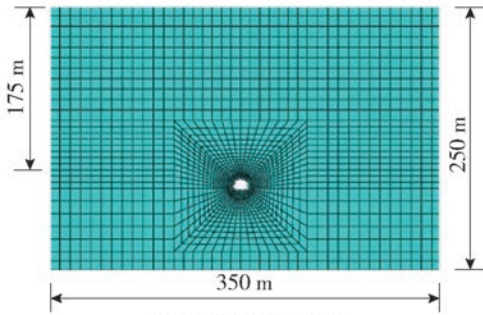
利用已有试验成果,首先验证数值模拟方法的正确性。在振动台模型试验中分别实现在衬砌和围岩之间设置减震层及不设置减震层2个工况,并建立相应的数值计算模型。通过对比分析结果,验证数值计算建模方法。

建立考虑减震层的二维有限元计算模型,模型的长、宽分别为350.0、250.0 m。衬砌结构跨度12.5 m,高10.3 m,厚0.7 m,材料为C30混凝土。计算中,围岩采用弹塑性模型及摩尔-库伦准则,衬砌采用混凝土塑性损伤模型,减震层为弹性,厚度0.5 m,隧道埋深175.0 m,见图1。材料参数见表1。有限元模型的侧面及底面施加黏弹性人工边界<sup>[13]</sup>。选取汶川地震中卧龙波的前20 s作为计算输入,其

中地震波加速度时程曲线及其傅立叶谱见图2。地震波从底部垂直入射,在水平面内垂直隧道轴向振动。



(a) 减震层及监测点设置



(b) 埋深及模型尺寸

图1 有限元计算模型

Fig.1 FEM model

表1 数值模型材料参数

Table 1 Physical parameters of the numerical model

项目	重度/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )
围岩	20	2.0	0.2	27
减震层	10	0.3		
衬砌	25	30.0		

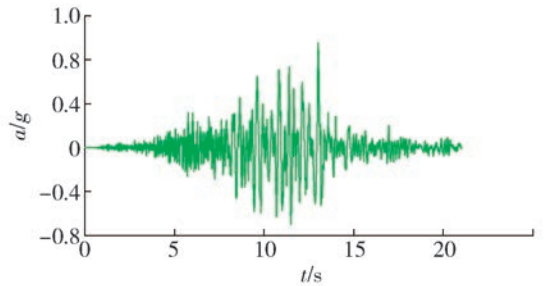
### 1.2 模型试验的设置<sup>[3]</sup>

模型试验在北京工业大学结构试验中心进行,振动台尺寸为3 m×3 m、载重量为10 t,拥有水平面内x及y方向2个自由度。在衬砌周围环绕布置减震层,材料采用厚10 mm的海绵橡胶,其拉伸断裂强度为2.3 MPa,伸长率为220%,密度为0.4 g/cm<sup>3</sup>。以气泵控制的气囊压力模拟原型中埋深产生的地应力,试验设置见图3。

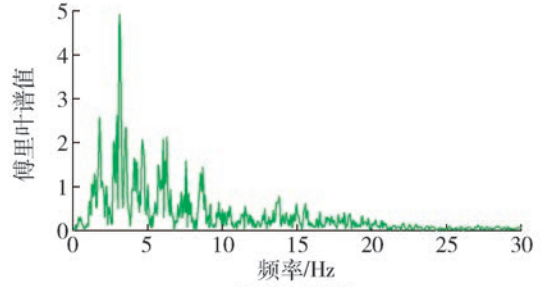
将前述地震波输入振动台台面,峰值逐级按照0.3、0.4、0.5、0.6、0.8、1.0 g的峰值加速度加载。

### 1.3 结果对比验证

选取模型试验中峰值加速度为0.8 g的工况作



(a) 加速度时程曲线



(b) 傅里叶谱

图2 卧龙波

Fig.2 Wolong wave



(a) 模型箱



(b) 减震层

图3 试验减震层

Fig.3 Arrangement of buffer layer in model test

为特征工况,与数值模拟中的分析工况进行对比,分析围岩和结构的动力响应特性。

#### 1.3.1 加速度响应对比

选取衬砌拱底以及围岩相同高度处2个点作为监测点,见图1。图4、5为数值模拟中有无减震层2

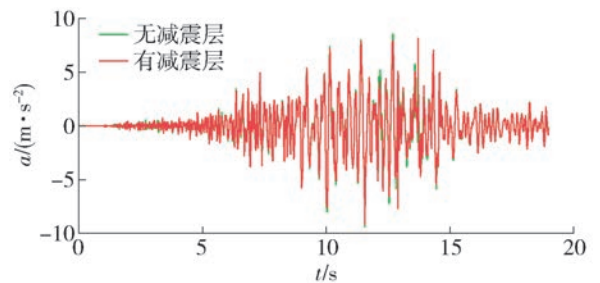


图4 数值模型仰拱处加速度时程曲线

Fig.4 Time history of acceleration on invert in numerical model



种工况中监测点处加速度时程曲线,图6、7为模型试验中对应监测点加速度时程曲线.可以发现,衬砌自身振动特性表现不明显,仰拱处和同一高度处围岩的加速度响应规律基本一致,且仰拱处的加速度比围岩内的加速度大.

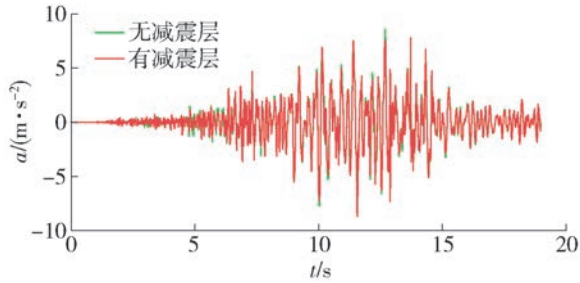


图5 数值模型围岩加速度时程曲线

Fig. 5 Time history of acceleration in rock in numerical model

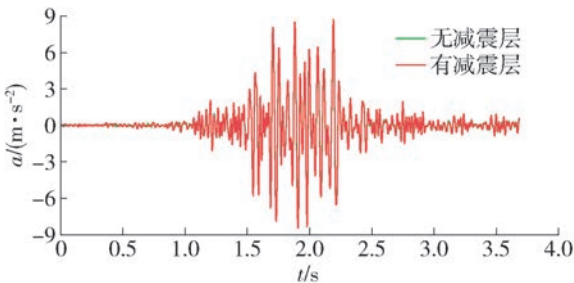


图6 模型试验仰拱处加速度时程曲线

Fig. 6 Time history of acceleration on invert in model test

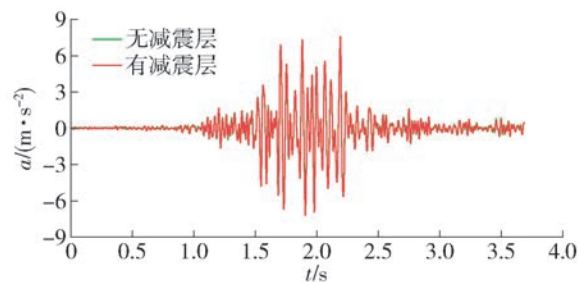


图7 模型试验围岩处加速度时程曲线

Fig. 7 Time history of acceleration in rock in model test

对比有无减震层的加速度时程曲线,减震层没有改变围岩和衬砌的振动特性,但衬砌仰拱处的加速度较没有减震层的加速度要小.

### 1.3.2 应变响应对比

选取衬砌拱顶、两侧拱肩、两侧拱腰、两侧拱脚和拱底共8个关键点作为监测点,见图8.

为便于分析地震动带来的应变响应而不考虑初始应力值,仅考虑由地震动产生的附加应变.图9~



图8 模型监测点

Fig. 8 Model monitoring point

16为数值模型和模型试验中是否有减震层2种工况衬砌各点的附加应变时程曲线.

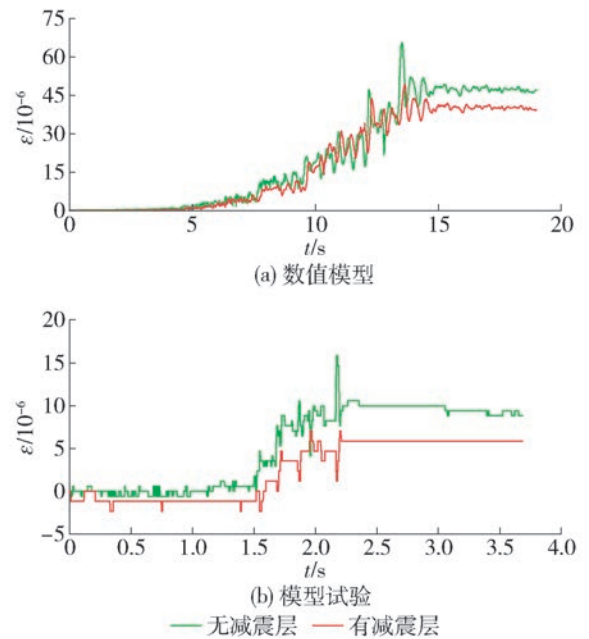


图9 拱顶应变时程曲线

Fig. 9 Time history of strain on arch top

由图9~16可以发现,减震层有效减小了衬砌各点的附加应变响应,同时也减小了衬砌各点最终的不可恢复变形.由于数值模拟和模型试验存在各自误差,因此数值模拟结果和模型试验结果数值上存在一定的差异,但总体规律统一.

将计算得到的衬砌各点最大附加应变绘于图17.可见,数值模拟和模型试验的最大附加应变分布规律基本一致,减震层的存在有效地减小了衬砌各点的应变差异,使得结构趋于同步变形,有利于隧道结构的受力状态.

数值模拟和模型试验的结果都表明,在隧道周围设置减震层是一种有效的减震措施.这是利用减震层自身所具有的柔性阻隔并吸收地震波能量,将

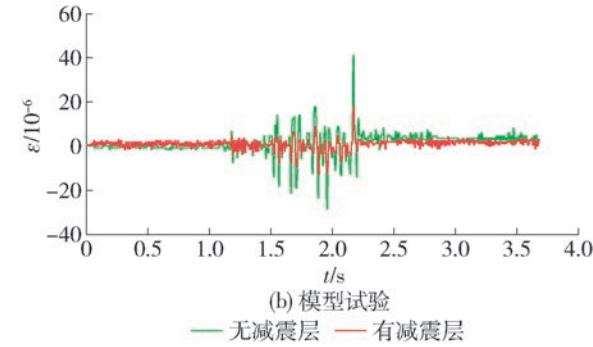
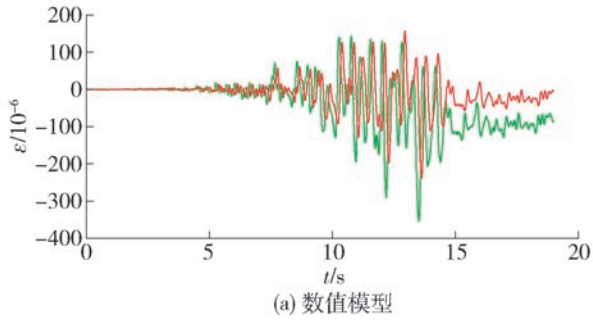


图10 右拱肩应变时程曲线

Fig. 10 Time history of strain on right arch shoulder

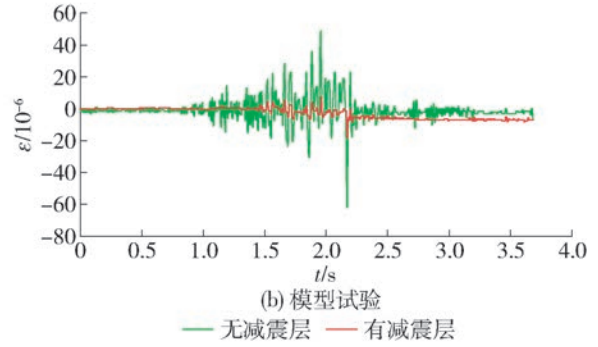
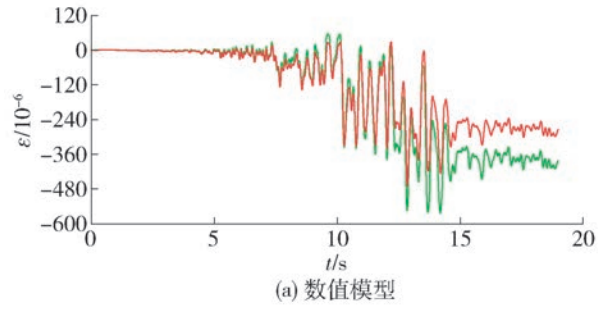


图12 右拱脚应变时程曲线

Fig. 12 Time history of strain on right arch foot

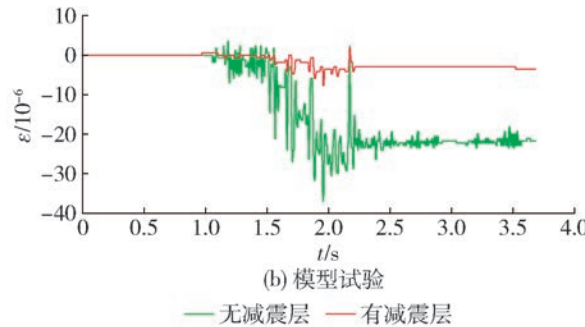
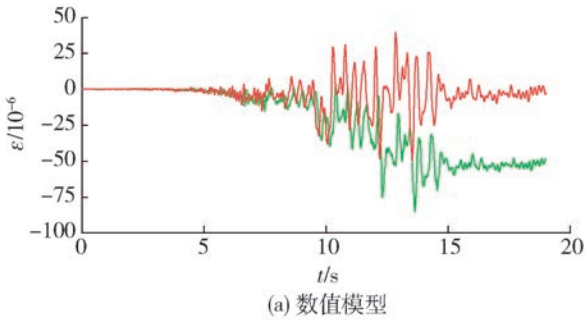


图11 右拱腰应变时程曲线

Fig. 11 Time history of strain on right arch waist

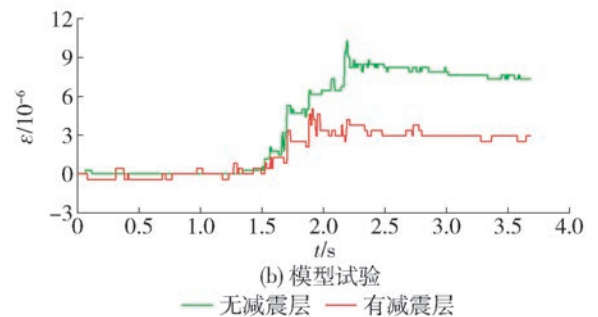
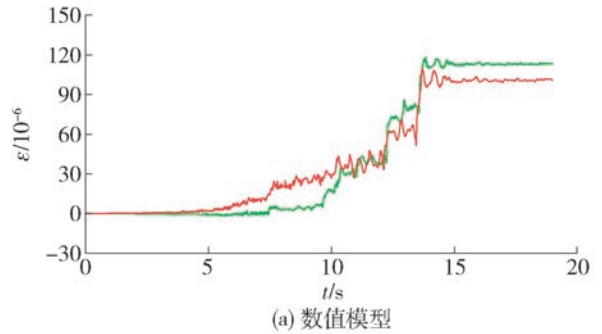


图13 拱底应变时程曲线

Fig. 13 Time history of strain on invert

衬砌-围岩系统变为衬砌-减震层-围岩系统. 后者可以将围岩与衬砌有效地隔离,一方面使整个体系的等效刚度减小,柔性增大,进而通过自身的变形,减小围岩变形向衬砌的传递,削弱地震对隧道结构的作用,另一方面,减震层吸收了一部分地震波的能量,间接减小隧道结构的加速度及应力响应,从而提

高了隧道的抗震性能.

对隧道周围设置减震层的振动台试验与数值模拟进行对比分析可以发现,数值模拟与模型试验的加速度响应和应变响应在规律上基本一致. 证明本文所采用的数值计算模型有效.

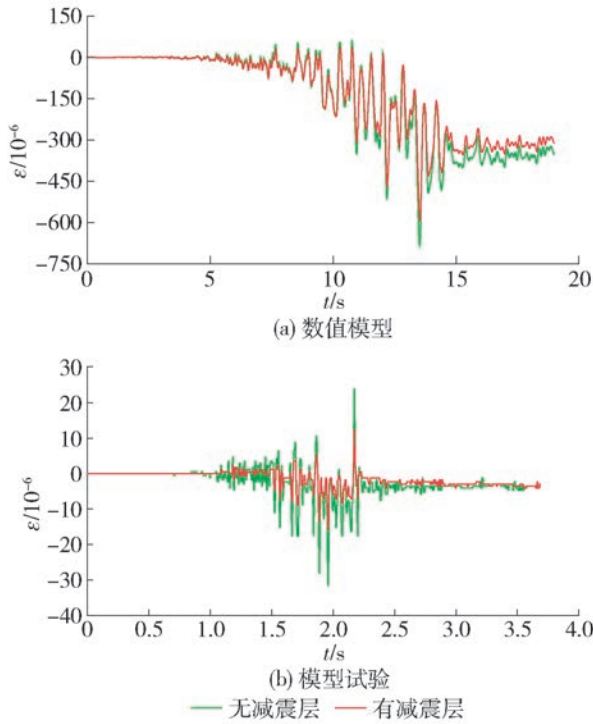


图 14 左拱脚应变时程曲线

Fig. 14 Time history of strain on left arch foot

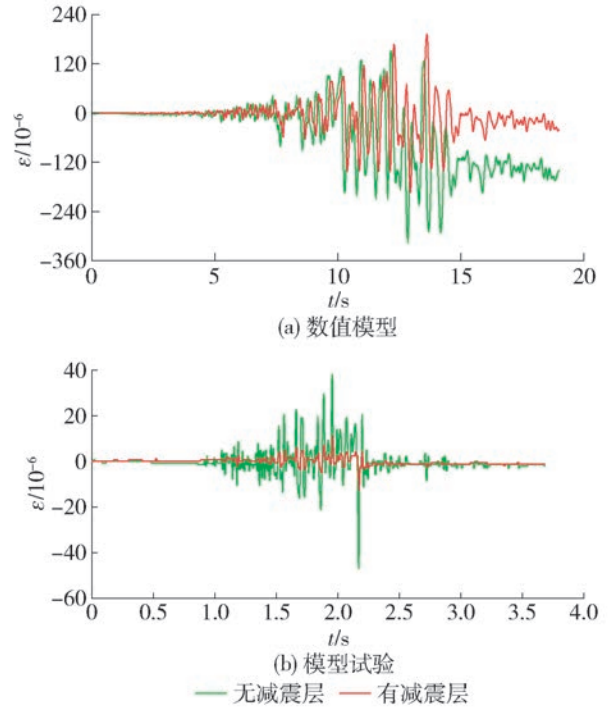


图 16 左拱肩应变时程曲线

Fig. 16 Time history of strain on left arch shoulder

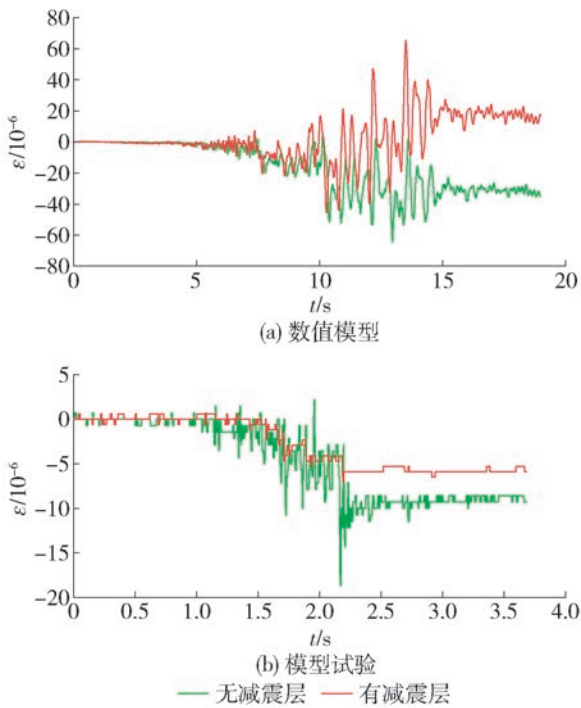


图 15 左拱腰应变时程曲线

Fig. 15 Time history of strain on left arch waist

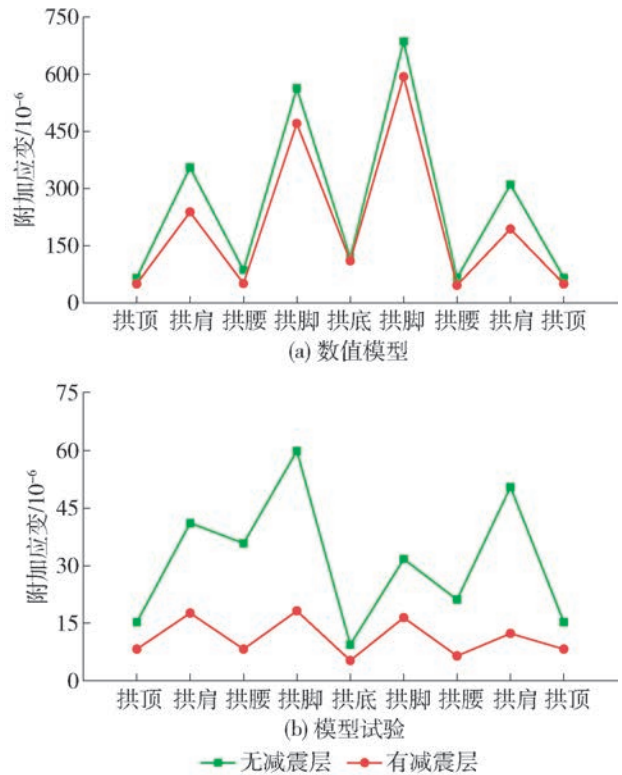


图 17 衬砌各处最大附加应变

Fig. 17 Maximum strain on liner

## 2 考虑松动圈隧道减震层与注浆加固模型分析

在上述模型的基础上,建立含有松动圈的数值

模型,对设置减震层、注浆加固 2 种减震措施进行分析,研究考虑松动圈隧道在不同减震措施下的减震效果.



### 2.1 计算工况

建立与1.1节中几何尺寸相同的计算模型,分别设置3种工况:1)仅考虑松动圈,2)考虑松动圈和减震层,3)考虑松动圈和注浆加固,考察不同减震措施对隧道的减震效果。

松动圈半径采用芬纳公式确定<sup>[14]</sup>。围岩内摩擦角27°,单向抗压强度5 MPa,远场应力15 MPa,根据公式

$$R_p = R_0 \left[ \frac{2}{\xi + 1} \frac{P_0(\xi - 1) + \sigma_c}{\sigma_c} \right]^{\frac{1}{\xi - 1}}$$

$$L_p = R_p - R_0$$

式中: $R_p$ 为塑性区半径,m; $P_0$ 为远场应力,MPa; $\sigma_c$ 为岩石的单向抗压强度,MPa; $\xi$ 为与围岩的内摩擦角有关的参数, $\xi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ , $\varphi$ 为围岩的内摩擦角; $R_0$ 为隧道的半径,m; $L_p$ 为松动圈半径,m。计算得到松动圈厚度为5 m。

减震层厚度为50 cm,注浆方式采用水泥渗透注浆,以提高松动圈范围内岩体的弹性模量和抗剪强度。围岩、松动圈、减震层及注浆区材料参数见表2,衬砌采用C30混凝土塑性损伤模型。地震动参数及地震波入射方向同1.1节,输入的地震动峰值为0.3 g,设置减震层及注浆加固的模型如图18所示。

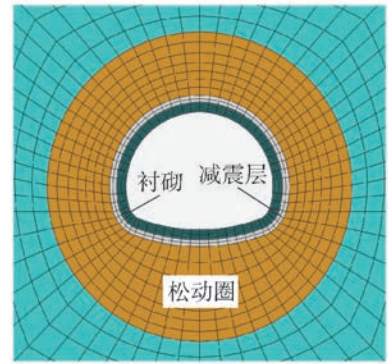
表2 模型材料参数

Table 2 Physical parameters of model

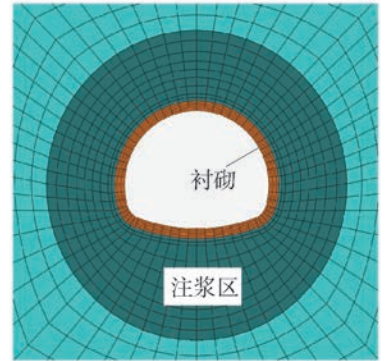
参数	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模 量/GPa	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/(°)
围岩	20	2.0	0.2	27
松动圈	20	1.2	0.12	27
减震层	10	0.3		
注浆区	22	2.4	0.6	30

### 2.2 应力与应变响应分析

对比分析3种工况中衬砌的附加应力、附加应变响应特征。选取衬砌拱顶、两侧拱肩、两侧拱腰、两侧拱脚和拱底作为监测点,将衬砌外侧最大主应力峰值及内侧的最小主应力峰值绘于图19、20。可以看出,在松动圈与隧道衬砌之间设置减震层并未有效减小衬砌内外侧的主应力峰值,减震层的设置对于周围存在松动圈隧道的应力响应影响有限;注浆加固虽然没有改变衬砌的主应力响应规律,但明显减小了衬砌外侧的最大主应力峰值,尤以拱脚处最为显著,同时对于衬砌内侧的最小主应力峰值也有一定的减小作用,这表明采用注浆加固对于存在



(a) 考虑松动圈的减震层模型



(b) 注浆加固模型

图18 模型示意图

Fig. 18 Finite element model

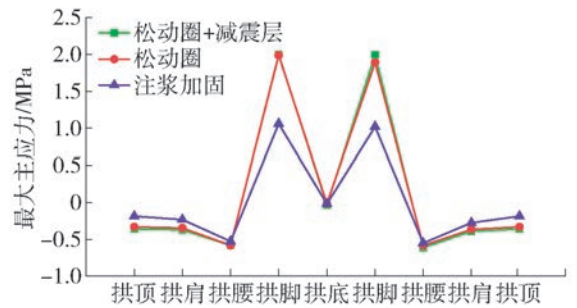


图19 衬砌外侧最大主应力峰值

Fig. 19 Maximum principle stress of outside liner

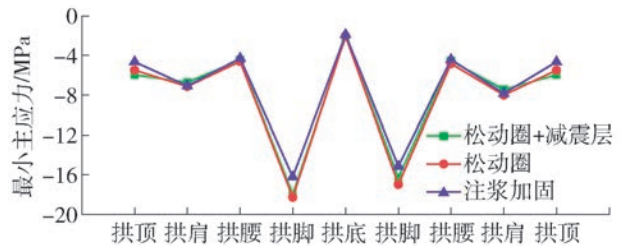


图20 衬砌内侧最小主应力峰值

Fig. 20 Minimum principle stress of inside liner

松动圈隧道的应力响应有良好的改善作用。

将衬砌各监测点内外侧的环向正应变峰值和环向剪应变峰值绘于图21~24。可以发现,设置减震

层没有改变衬砌在地震作用下的变形规律,减震层的存在减小了衬砌内侧的应变,但同时也增大了衬砌外侧应变,且外侧应变的增大幅度大于内侧应变的减小幅度,故减震层使得衬砌总体变形出现了增大. 将松动圈注浆加固后,衬砌各处的应变明显地减小,尤其是拱脚处的环向正应变和环向剪应变以及拱底外侧的环向正应变. 因此,可以认为注浆加固能改善松动圈对隧道变形的不利影响.

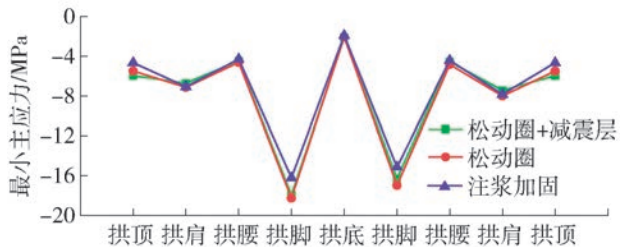


图 21 衬砌外侧环向正应变峰值

Fig. 21 Maximum normal strain of outside liner

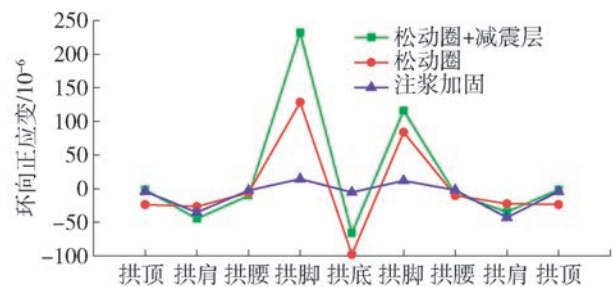


图 22 衬砌外侧环向剪应变峰值

Fig. 22 Maximum shear strain of outside liner

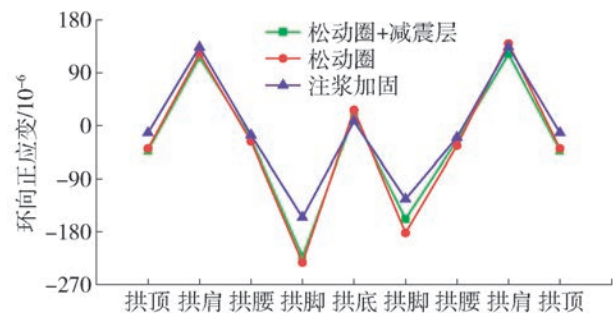


图 23 衬砌内侧环向正应变峰值

Fig. 23 Maximum normal strain of inside liner

### 2.3 围岩塑性区及衬砌损伤分析

将计算最终时刻 3 种工况的围岩塑性区及衬砌损伤绘于图 25 ~ 27. 损伤因子越接近 1, 表明损伤越严重. 减震层没有改变围岩的塑性区分布以及衬砌拉伸损伤分布. 虽然设置减震层减小了塑性区内的最大塑性应变,但增大了衬砌的拉伸损伤,减震层并未起到保护隧道衬砌的作用,反而使其破坏更为

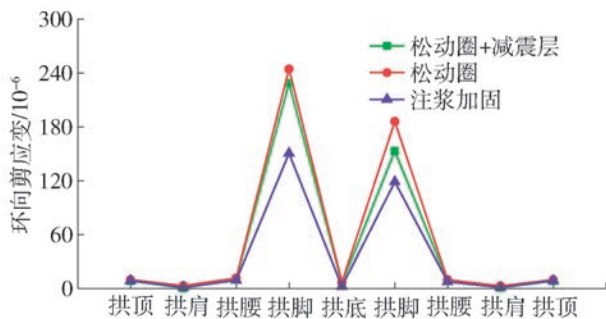
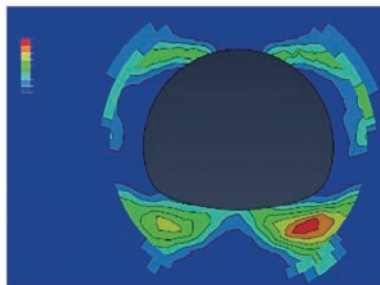


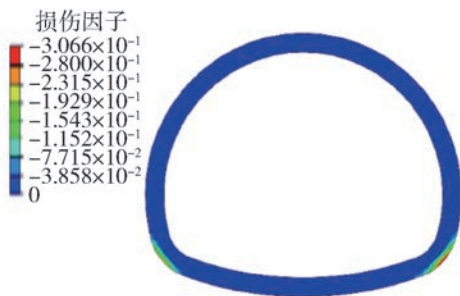
图 24 衬砌内侧环向剪应变峰值

Fig. 24 Maximum shear strain of inside liner

严重;将松动圈注浆加固后,围岩基本不出现塑性区,同时使得衬砌拱脚外侧没有出现拉伸损伤,仅在衬砌内侧拱脚与拱底之间出现了极小的拉伸损伤. 这表明注浆加固对控制围岩塑性区范围以及减小衬砌损伤有显著作用.



(a) 塑性区云图



(b) 衬砌拉伸损伤

图 25 设置减震层塑性区云图及衬砌拉伸损伤

Fig. 25 Plastic zone and tension damage with buffer layer

分析结果表明,设置减震层对地震作用下衬砌的主应力响应有积极影响,增大了衬砌总体环向变形,减小了围岩塑性应变的同时增大了衬砌的拉伸损伤;注浆加固能减小衬砌各处的主应力响应,对衬砌的应力响应有着良好的改善作用. 与此同时,注浆加固后围岩基本不进入塑性状态,衬砌的拉伸损伤也大为减小.

对比分析设置减震层后,未考虑松动圈的隧道



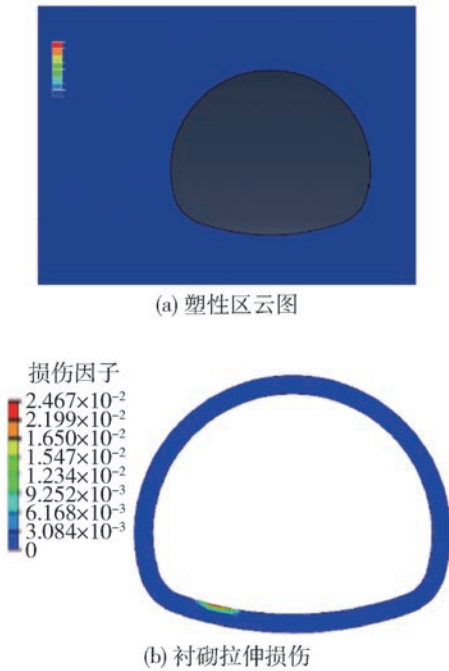


图 26 注浆加固后塑性区云图及衬砌拉伸损伤  
Fig. 26 Plastic zone and tension damage after grouting

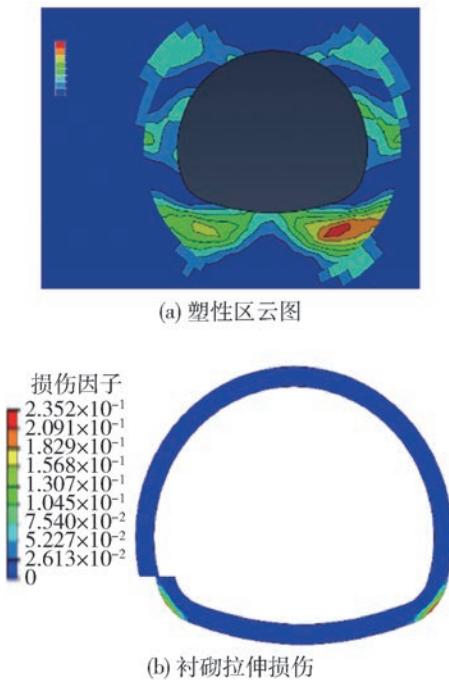


图 27 仅考虑松动圈时塑性区云图及衬砌拉伸  
Fig. 27 Plastic zone and tension damage  
without buffer layer

和考虑松动圈的隧道地震响应规律可以发现,在前者衬砌结构与围岩之间设置减震层,可以有效提高抗震能力,但其在考虑松动圈隧道结构中的减震效果却不明显,甚至增大了衬砌的总体环向应变。这是因为松动圈的存在降低了隧道周围岩体的刚度,

这时在松动圈与隧道之间设置柔性的减震层,二者刚度相差相对较小,减震层自身变形特性不明显,并不能很好地阻隔围岩变形向衬砌的传递,因此设置减震层,并未减小衬砌的应变响应,甚至还加剧了衬砌的拉伸损伤。但减震层吸收地震波的能力不受松动圈存在的影响,仍然能降低衬砌的加速度及应力响应。注浆加固在考虑松动圈隧道中的减震效果要好于设置减震层,主要原因是二者减震机理不同。注浆加固通过物理手段改变一定范围内围岩的力学性能指标,增强其力学强度及抗变形能力,提高围岩稳定性。而处于稳定性较好的坚硬围岩中的地下结构,抗震能力能够大大提升。注浆加固恰好弥补了松动圈带来的围岩刚度不足等一系列问题,降低了衬砌的相对刚度,因此衬砌的地震动响应有减小的趋势。减震层主要依据自身柔性的特点弱化变形并吸收地震波能量,不能从根本上解决松动圈刚度较小的问题,因此减震效果有限。在以往相关研究中,赵旭等<sup>[4]</sup>指出“松动圈对隧道结构的不利影响主要是因为松动圈比围岩较软弱”。根据该结论,结合高峰等<sup>[15]</sup>通过对不同减震措施对比研究提出“软质围岩中设置加固层的减震效果要优于减震层”的观点,本节针对考虑松动圈隧道设置减震层和注浆加固 2 种减震措施所得出的结论能得到很好印证。同时,高峰等<sup>[15]</sup>也提出“减震层的弹性模量与围岩弹性模量相差越大,减震效果越好”,也解释了考虑松动圈隧道中减震层减震效果不理想的现象。

综合分析认为,在松动圈与隧道衬砌之间设置减震层不利于隧道衬砌的变形并有可能加剧其破坏。而将松动圈范围内岩体注浆加固是一种更优的减震措施。

### 3 考虑松动圈隧道综合减震措施下模型分析

建立松动圈存在时,同时考虑减震层和注浆加固 2 种减震措施的模型,以考察 2 种减震措施联合作用下隧道的减震效果。各部分的参数设置同 2.1 节,模型效果见图 28。

#### 3.1 应力与应变响应分析

对比分析隧道既设置减震层又进行注浆加固和仅存在松动圈两工况中衬砌的附加应力、附加应变响应特征。选取衬砌拱顶、两侧拱肩、两侧拱腰、两侧拱脚和拱底作为监测分析点,将衬砌外侧的最大主应力峰值及内侧的最小主应力峰值绘于图 29、30。

可以看出,将减震层和注浆加固 2 种减震措施

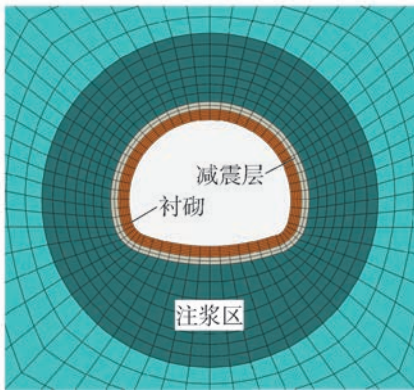


图 28 模型示意图

Fig. 28 Finite element model

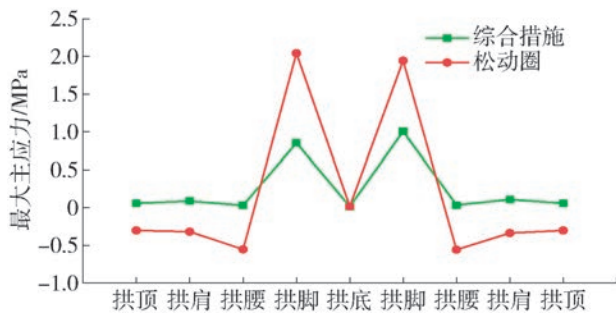


图 29 衬砌外侧最大主应力峰值

Fig. 29 Maximum principle stress of outside liner

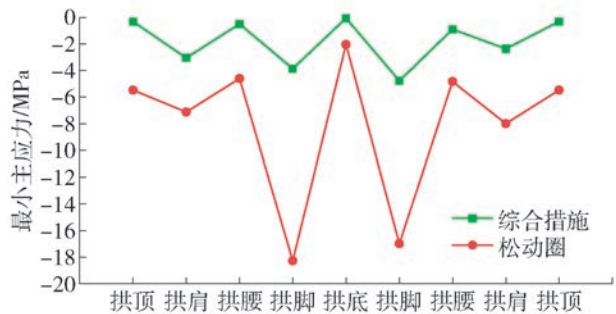


图 30 衬砌内侧最小主应力峰值

Fig. 30 Minimum principle stress of inside liner

共同应用于隧道结构,对衬砌外侧最大主应力和衬砌内侧最小主应力都有明显的减少作用,尤其是两侧拱脚位置处,应力峰值的变化最为显著。这表明,相对于单独设置减震层或注浆加固的减震措施,两者共同工作下能够显著减小考虑松动圈隧道结构的受力,提高其抗震性能。

将计算得到衬砌各监测点内外侧的环向正应变峰值和环向剪应变峰值绘于图 31 ~ 34。可以发现,将松动圈注浆加固并设置减震层后,衬砌各处的应变都显著减小,尤其是衬砌内侧环向正应变和剪应变,各处的应变值都发生了明显减小,以拱脚处为

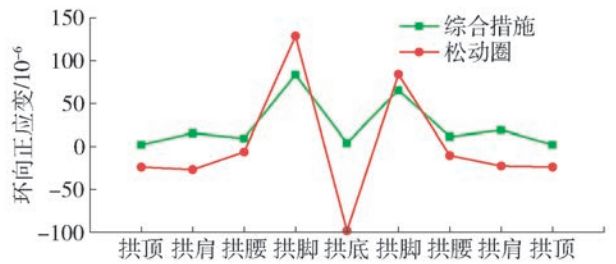


图 31 衬砌外侧环向正应变峰值

Fig. 31 Maximum normal strain of outside liner

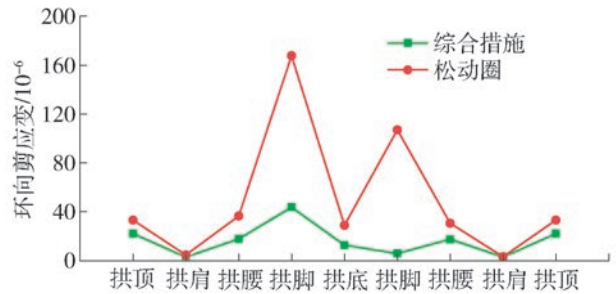


图 32 衬砌外侧环向剪应变峰值

Fig. 32 Maximum shear strain of outside liner

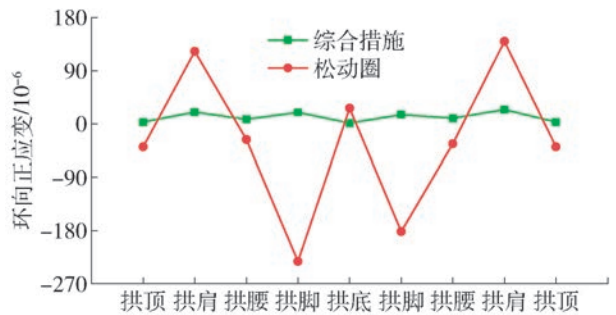


图 33 衬砌内侧环向正应变峰值

Fig. 33 Maximum normal strain of inside liner

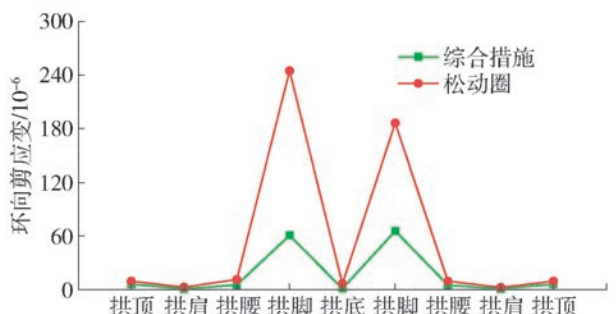


图 34 衬砌内侧环向剪应变峰值

Fig. 34 Maximum shear strain of inside liner

最。这说明 2 种减震措施共同作用,减少了衬砌受地震作用下的变形,对维持隧道稳定,减少裂缝和破坏具有积极作用。

### 3.2 围岩塑性区及衬砌损伤分析

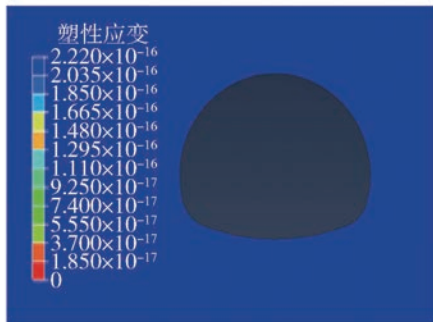
将 2 种减震措施施加后衬砌损伤绘于图 35。围

岩塑性区的变化基本同注浆加固措施一致,在施加了2种减震措施后,塑性区基本消失,衬砌外侧拱脚位置的损伤也得以减少,表明注浆加固和减震层共同作用对减轻衬砌损伤具有显著作用。

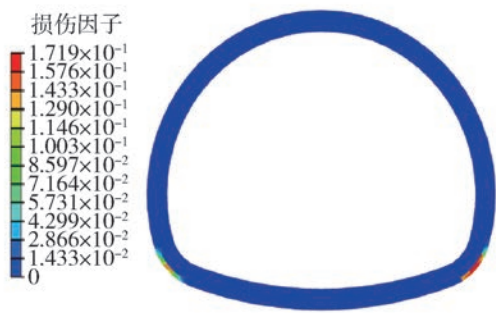
表3 各减震措施减震效果

Table 3 Comparison of different mitigation measures

项目	设置减震层	设置注浆加固层	综合设置减震层与注浆加固
外侧最大主应力/MPa	+0.10	-0.88	-1.19
内侧最小主应力/MPa	+0.68	-2.05	-14.40
外侧环向正应变/ $10^{-6}$	+103.43	-114.16	-44.99
外侧环向剪应变/ $10^{-6}$	+145.64	-164.83	-124.10
内侧环向正应变/ $10^{-6}$	-23.67	-76.74	-213.69
内侧环向剪应变/ $10^{-6}$	-32.82	-93.95	-183.36
拉伸损伤	+0.07	-0.21	-0.63



(a) 塑性区云图



(b) 衬砌拉伸损伤

图35 设置综合减震后的衬砌拉伸损伤

Fig. 35 Tension damage with the comprehensive measure

由前述分析可知,注浆加固提高了松动圈的力学性能,根本上改变了围岩和衬砌相对刚度比低的问题,在此基础上减震层不再受软弱围岩的影响,得以正常发挥作用,减震效果提升。因此,针对松动圈隧道而言,在松动圈与衬砌之间设置减震层,同时对松动圈范围内进行注浆加固是一种更为优良更加合适的减震措施。

### 3.3 3种减震措施的对比分析

本文分别研究了在考虑松动圈的情况下,设置减震层、注浆加固和2种减震措施综合设置3种工况下的结构地震响应。选取地震响应最大、损伤最为集中的拱脚作为研究对象,将各工况与只存在松动圈的情况进行对比,计算出拱脚地震响应的差值,列于表3,其中正值为放大,负值为减小。

由表3可以看出,相对于洞周不设任何减震措施的情况,设置减震层会放大衬砌主应力及环向应变,对存在松动圈隧道有着不利影响,而注浆加固减小了衬砌的地震响应,但3种措施中,最为理想的减震方式是将减震层和注浆加固相结合,能够最大程度地全面减少衬砌动力响应。

## 4 结论

1) 对不考虑松动圈,设置及不设置减震层的2种工况,本文所构建的数值模型计算结果和物理模型试验结果相互印证,趋势类似,该数值建模方法能较为准确地反映隧道周围设置减震层时隧道的地震响应。

2) 考虑松动圈后,减震层对地震作用下衬砌的主应力响应影响较小,这种减震方式不但增大了衬砌总体的环向变形,还在减小围岩塑性应变的同时增大了衬砌的拉伸损伤。因此在松动圈与隧道衬砌之间设置减震层不但没有起到减震效果,反而不利于隧道衬砌的变形并加剧其破坏。

3) 对松动圈进行注浆加固能减小衬砌各处的主应力响应,还能够减小衬砌各处的应变响应,降低了松动圈对隧道变形的不利影响。与此同时,注浆加固后围岩基本不进入塑性状态,衬砌的拉伸损伤也大为减小。因此注浆加固相对于设置减震层来说,是一种较好的减震措施。

4) 在隧道周围设置减震层并将松动圈进行注浆加固后,隧道各处的地震响应都得到显著减小,整体的变化同对松动圈进行注浆加固类似,但地震响应幅度小于单纯使用注浆加固一种措施。其减震效果相对于单独设置减震层、注浆加固要好。

5) 综合考虑3种减震措施,对于考虑松动圈的隧道,设置减震层和注浆加固相结合是更适宜的减震措施,能够全面地提升隧道抗震水平,且易于和实际辅助施工措施相结合,是比较理想的工程减震措施。

### 参考文献:

[1] CAI M, KAISER P K. Assessment of excavation damaged



- zone using a micromechanics model[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005 (20): 301-310.
- [2] 李磊, 谭忠盛. 挤压性破碎软岩隧道大变形特征及机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(增刊1): 3593-3603.  
LI L, TAN Z S. Characteristic and mechanism research for large deformation problem in squeezing-shattered soft rock tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37 (Suppl 1): 3593-3603. (in Chinese)
- [3] 赵旭, 黎若寒, 陶连金, 等. 松动圈及减震层对隧道地震响应影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(增刊1): 3310-3319.  
ZHAO X, LI R H, TAO L J, et al. Shaking table tests of influences on tunnel seismic response from loosen zone and buffer layers [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37 (Suppl 1): 3310-3319. (in Chinese)
- [4] 赵旭, 黎若寒, 代志杰, 等. 松动圈对隧道围岩地震动力响应的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2019, 45(3): 243-252.  
ZHAO X, LI R H, DAI Z J, et al. Influences of loosen-zone on dynamic response of the surrounding rock around a tunnel [J]. *Journal of Beijing university of technology*, 2019, 45(3): 243-252. (in Chinese)
- [5] 肖明, 张雨霖, 陈俊涛, 等. 地下洞室开挖爆破围岩松动圈的数值分析计算[J]. *岩土力学*, 2010, 31(8): 2613-2618.  
XIAO M, ZHANG Y T, CHEN J T, et al. Numerical analysis of excavation damaged zone of underground caverns induced by excavation blasting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(8): 2613-2618. (in Chinese)
- [6] 徐坤, 王志杰, 孟祥磊. 深埋隧道围岩松动圈探测技术研究及数值模拟分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(增刊2): 464-470.  
XU K, WANG Z J, MENG X L, et al. Research on detection technology for deep tunnel surrounding rock loose circle and numerical simulation analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34 (Suppl 2): 464-470. (in Chinese)
- [7] 赵宾, 梁宁宁, 王方田, 等. 浅埋高强度采动巷道围岩松动圈演化规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(5): 33-39.  
ZHAO B, LIANG N N, WANG F T, et al. Surrounding rock broken zone evolution law of high-intensity mining affected roadway in shallow coal seam [J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(5): 33-39. (in Chinese)
- [8] KWON S, LEE C S, CHAO S J. An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009(24): 1-13.
- [9] 信春雷. 穿越断层隧道结构地震动破坏机理与抗震措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
XIN C L. Aseismic and buffer measures research for fault-crossing tunnel structures based on seismic damage mechanism. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [10] 胡辉. 穿越活动断层的隧道减震结构研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
HU H. Study on aseismic structure for tunnel passing through active fault [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [11] 崔光耀. 隧道洞口浅埋段和断裂粘滑段抗震设计计算方法及试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.  
CUI G Y. The seismic design calculation method and test study of tunnel shallow-buried portal and rupture stick-slipping section [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [12] 方林, 宋林俐. 穿越断层破碎带隧道减震措施研[J]. *公路*, 2010(2): 194-197.  
FANG L, SONG L L. Research on damping measures of tunnels passing through fault fracture zone [J]. *Highway*, 2010(2): 194-197. (in Chinese)
- [13] 赵密. 近场波动有限元模拟的应力型时域人工边界条件及其应用[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.  
ZHAO M. Stress-type time-domain artificial boundary condition for finite-element simulation of near-field wave motion and its engineering application [J]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [14] 靖洪文, 李元海, 许国安. 深埋巷道围岩稳定性分析与控制技术研究[J]. *岩土力学*, 2005(6): 877-880, 888.  
JING H W, LI Y H, XU G A. Analysis of surrounding rock stability of deeply buried roadways and study on its control techniques [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005 (6): 877-880, 888. (in Chinese)
- [15] 高峰, 石玉成, 严松宏, 等. 隧道的两种减震措施研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(2): 223-229.  
GAO F, SHI Y C, YAN S H, et al. Study of two shock absorption measures in tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(2): 223-229. (in Chinese)