

文章编号:1673-2049(2017)03-0103-09

EPS 颗粒-黄土混合土减震层对黄土地区隧道衬砌结构的减震作用

胡志平^{1,2}, 魏雪妮¹, 张 鹏¹, 王 瑞¹, 夏香波¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 地下结构与工程研究所, 陕西 西安 710061)

摘要:为了分析聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)颗粒-黄土混合土减震层在不同条件下对隧道衬砌结构减震效果的影响,采用通用有限元软件 ANSYS 建立了在隧道支护体系内设置减震层的数值模型,分析了 EPS 颗粒掺入比、减震层厚度及地震动强度对隧道衬砌结构动力响应规律的影响。结果表明:设置减震层可以减小传递至隧道衬砌结构的地震能量,从而使得隧道衬砌结构各关键点正应力、剪应力、最大主应力、位移及加速度峰值均有所减小,且一定范围内随着 EPS 颗粒掺入比的增大,减震效果逐渐明显;减震层的厚度控制在 30~50 cm 区间内时减震效果最佳;减震层在强震作用下的减震效果更好,该混合土减震层更适合高烈度地震区的抗减震;所得结论可为今后在土体环境尤其是黄土地区开挖的隧道衬砌结构抗减震工程建设提供一定参考。

关键词:EPS 颗粒-黄土混合土;隧道衬砌结构;减震层;有限元分析;减震效果

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Damping Effect of Shock Absorption Layer of EPS Bead-loess Mixture to Tunnel Lining Structure in Loess Area

HU Zhi-ping^{1,2}, WEI Xue-ni¹, ZHANG Peng¹, WANG Rui¹, XIA Xiang-bo¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Institute of Underground Structure and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the damping effects of shock absorption layer of expanded polystyrene sphere (EPS) bead-loess mixture to tunnel lining structure under different conditions, the numerical model of damping layer in the tunnel support system was established using finite element software ANSYS. The influences of mixing ratio of EPS beads, damping layer thickness and seismic intensity on the dynamic responses of tunnel lining structure were analyzed. The results show that the seismic energy transferred to tunnel lining structure can be reduced by setting the damping layer, and the normal stress, shear stress, maximum principal stress, displacement and acceleration peak value of the key points of tunnel lining structure are reduced. The damping effect will be more and more obvious with the increase of the EPS bead content within a certain range. When the thickness of damping layer is controlled in the range of 30-50 cm, the damping effect is the best. The damping effect of damping layer is better under the action of strong earthquake, and the mixed soil damping layer is more suitable for seismic resistance of high intensity seismic zone. The research conclusion can provide reference for the later

收稿日期:2016-12-01

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2016JM4103);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310828163409)

作者简介:胡志平(1973-),男,湖南益阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:huzhiping@chd.edu.cn.

construction of damping engineering of tunnel lining structure in soil environment, especially in loess area.

Key words: EPS bead-loess mixture; tunnel lining structure; shock absorption layer; finite element analysis; damping effect

0 引言

中国东临环太平洋地震带,南接欧亚地震带,地震活动非常频繁,近些年来更是发生了几次较大的地震,位于多发地震区和高烈度地震区的隧道结构遭受地震破坏更为严重。专家学者对近年来发生的隧道震害现场进行了调研,发现大部分隧道破坏主要表现为衬砌与围岩同时坍塌引起的坍方以及二次衬砌坍塌 2 种形式,且严重影响到人民的生命财产安全和城市经济的正常运行^[1-3]。许多地震灾害实例表明^[4-8]:地震作用会引起地层产生较大的相对位移及变形,从而可能导致地下结构出现严重的地震灾害,而且这种震害破坏的规模往往较大且修复困难。已有众多学者对地下结构的抗减震进行了深入研究,结果表明:设抗震缝、围岩加固以及设置减震层等措施都能在一定程度上减轻结构的震害,并且各种减震措施在同一地质条件下的减震效果有所差异^[9-14]。由于上述减震措施的研究大多是以岩石隧道为基础进行的,考虑到中国中西部地区隧道多数是在土体环境中开挖建设的,且针对黄土地区隧道衬砌结构减震措施的研究还较少,尤其是针对不同厚度、不同地震动强度条件下同一减震措施的减震效果和变化规律方面的研究更是少之又少。因此,处于黄土地区的隧道衬砌结构抗减震研究及安全性评价工作的迫切性及重要性也愈发明显。鉴于此,有必要进一步对黄土地区隧道衬砌结构抗减震进行研究,以确保黄土地区隧道衬砌结构在地震作用下的安全性。

1 隧道衬砌结构模型的建立

1.1 减震层材料

考虑到中国西部地区交通类隧道所处土质环境的特殊性,本文以陕西地区典型的黄土地基为基础,通过在土体与隧道衬砌结构之间设置聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)颗粒-黄土混合土减震层的方式来进行抗减震研究。EPS 具有优异的憎水、封闭和抗冲击等性能,是制作轻质土工材料常用原料之一。在现有的轻质土工材料中,EPS 颗粒混合轻质土是使用最为广泛的轻质土工材料。首先对混合土试样进行

室内动三轴试验^[15],通过试验获得混合土试样的动力特性,并将混合土动力特性应用于有限元数值模拟研究中。

EPS 颗粒-黄土混合土试样中 EPS 颗粒掺入比(体积比)设定为 3 种:0%,10%及 25%。土体取自陕西省延安市吴起县某地 3~5 m 深度处的黄土,先将原状土晒干、碾细、烘干和过 2 mm 筛,然后喷水调制均匀密封存放 24 h 后按比例掺入 EPS 颗粒进行制样;EPS 颗粒为直径 1~2 mm 的球粒,堆积密度为 $41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;试验用水为自来水。此次试验的原料只有烘干过筛的黄土、EPS 颗粒以及水,没有其他固化剂(如水泥),混合土能够重塑成试验要求的试样,主要靠的是有一定含水量的黄土本身所具有的黏结性,利用该黏结性可适量添加 EPS 颗粒,达到重塑土样的要求。此次 EPS 颗粒混合土试样的含水率保持在 15%左右。三轴试验是选用 3 种 EPS 颗粒掺入比的试样在 4 种围压下进行的,共计 12 组试样。试验开始前先在等向固结压力下固结稳定,然后在不排水条件下进行动三轴试验,试验完毕后计算分析试验结果。

1.2 有限元模型

隧道截面选用常用的三心圆隧道截面,截面尺寸如图 1 所示,数值计算采用二维平面应变模型。数值模拟中,边界问题的处理是至关重要的^[16-17],本文模型侧边界及底边均采用黏弹性边界^[16]。已有研究成果表明^[18-19],在对地下结构进行动力时程分析时,当整体计算模型的宽度为地下结构宽度的 5 倍及以上时,模型边界对结构动力反应的影响可以忽略不计,本文有限元模型总宽度设置为衬砌结构的 11 倍,得出整体有限元模型几何尺寸为 $60 \text{ m} \times 95 \text{ m}$ 。隧道高 6.3 m,宽 5.1 m,衬砌厚 0.45 m,衬砌结构埋深为 12 m(结构顶部与地面距离),衬砌结构与土体的二维有限元模型如图 2 所示。土体本构关系采用 D-P 模型,易于在 ANSYS 有限元软件中实现。由于土体-减震层之间的接触属柔性-柔性接触,且两者之间差异性较小,为了减小模型计算误差,故只单独考虑结构与土体接触面的设置。模型结构与土体之间接触单元的目标面和接触面分别采用 Target169 单元和 Conta171 单元^[20-21],参数设置

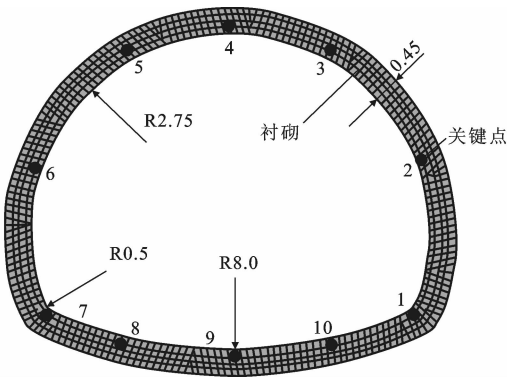


图 1 隧道断面形式及关键点位置(单位:m)
Fig. 1 Section Form of Tunnel and Locations of Key Points (Unit:m)

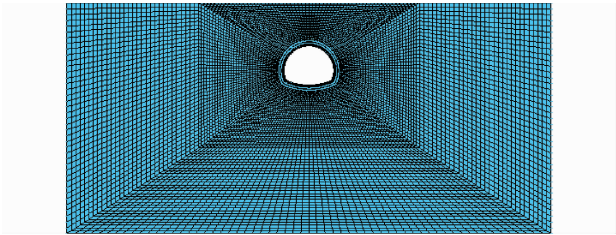


图 2 二维有限元模型
Fig. 2 2D Finite Element Model

如下: $\mu=0.466\ 3$ (摩擦因数取 $0.466\ 3$); $FKN=0.1$ (法向接触刚度取 0.1); $FTOLN=0.15$ (最大渗透范围为 0.15); $KEYOPT,3,9,0$ (包括初始渗透影响); $KEYOPT,3,10,1$ (在每一步更新闭合状态的接触刚度); $KEYOPT,3,12,2$ (接触行为为不分离但允许相对滑动)。本文地震荷载选用美国

表 1 材料物理力学参数

Tab. 1 Physical and Mechanical Parameters of Material

材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	动弹性模量/MPa	主泊松比	阻尼比	黏聚力/Pa	内摩擦角/($^{\circ}$)
原状黄土	1 840	106.800	0.35	0.147	12 600	16.8
颗粒掺入比 10% 的混合土	1 760	72.329	0.35	0.182	16 520	20.0
颗粒掺入比 25% 的混合土	1 650	53.726	0.35	0.223	17 410	16.0
混凝土	2 490	30 000.000	0.15			

轴试验结果分析中获得)。

2 有限元分析结果

2.1 衬砌结构应力响应规律

通过衬砌结构的应力云图确定结构在承受地震荷载过程中的 10 个受力关键点,衬砌结构关键点位置见图 1。

2.1.1 EPS 颗粒掺入比对衬砌结构应力影响

时程分析过程中,1~10 号关键点的正应力 σ_x 和 σ_y 的峰值、剪应力峰值和最大主应力峰值与 EPS 颗粒掺入比之间的关系如图 4 所示(为了实现单一

El Centro地震波经过调幅后的 2 种地震波进行研究,峰值加速度分别为 $0.1g,0.4g$ (g 为重力加速度),如图 3 所示。由于 El Centro 波 EW 方向的主要幅值加速度都集中在前 20 s,为了缩短计算时间,减少工作量,数值模拟时可以只选取前 20 s 的加速度值,每隔 0.02 s 输入相应时刻的加速度。

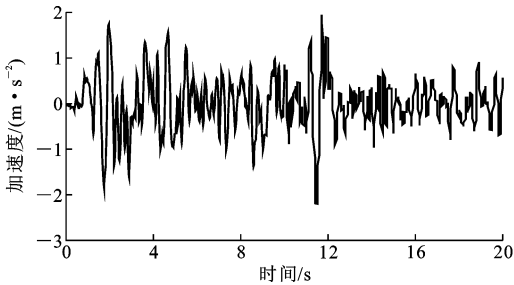


图 3 El Centro 地震波
Fig. 3 Seismic Wave of El Centro

如图 2 所示模型,将地震波自模型底部向上垂直入射。减震层厚度分为 10,30,50,80 cm,分别在大震作用($0.4g$ 地震动峰值)和小震作用($0.1g$ 地震动峰值)下建立衬砌结构二维平面减震模型。数值模拟重点分析了以下 3 种情况:无减震层;选用 EPS 颗粒掺入比为 10% 的 EPS 颗粒-黄土混合土作为减震材料填充在隧道衬砌与周围黄土介质之间;选用 EPS 颗粒掺入比为 25% 的 EPS 颗粒-黄土混合土作为减震材料填充在隧道衬砌与周围黄土介质之间^[22]。衬砌采用 C30 混凝土,计算采用的物理力学参数如表 1 所示^[23](混合土材料力学参数从动三

变量,峰值加速度选取 $0.4g$,减震层厚度取 30 cm)。

由图 4 可以看出,各关键点中 X 方向正应力 σ_x 峰值中的较大值出现在 1,4,7 号关键点处(1 号和 7 号关键点位于衬砌结构拱脚处,4 号关键点位于拱顶处),而 Y 方向正应力 σ_y 峰值较大值出现在 1 号和 7 号关键点处,说明在水平地震作用下衬砌结构拱脚处是正应力峰值最大值出现的部位。同时还可看出,减震层的存在在一定程度上减小了各关键点的正应力峰值,尤其是在 1 号和 7 号关键点,正应力峰值减小幅度更为明显。随着 EPS 颗粒掺入比的增大,正应力峰值减小幅度增大,甚至可以达到

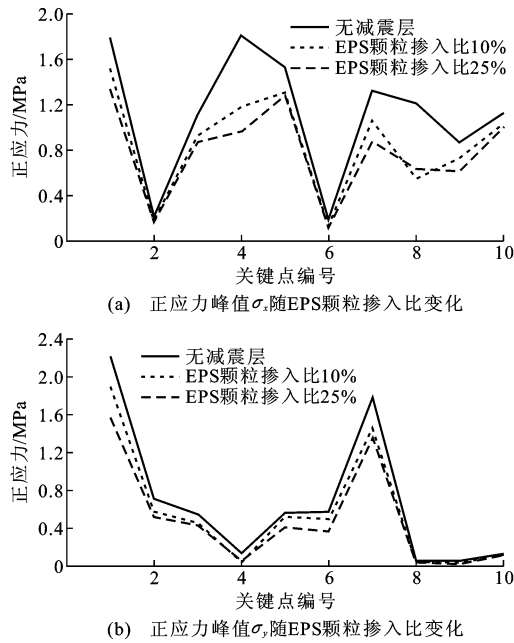


图4 各关键点正应力峰值 σ_x 和 σ_y 随 EPS 颗粒掺入比变化
Fig. 4 Changes of Peak Normal Stress σ_x and σ_y of Key Points with Mixing Ratios of EPS Beads

40%左右,减震效果更明显。这主要是因为 EPS 颗粒具有较好的弹性性能,当地震波传递至减震层时, EPS 颗粒反复压缩变形,从一定程度上消耗了地震能量,从而减小了传递至衬砌结构的地震能量,所以 EPS 颗粒-黄土混合土减震层对隧道衬砌结构具有较好的减震效果。

衬砌结构在 1 号和 7 号关键点处最大主应力 σ_1 和剪应力峰值比其他关键点峰值都大(图 5),说明了这 2 个关键点在地震作用下剪力最大,弯矩最大,是最先破坏的地方。通过分析还可知,减震层的存在从一定程度上减小了最大主应力 σ_1 和剪应力峰值,且随着 EPS 颗粒掺入比的增大,最大减小程度达 35%左右,减震效果更明显。

2.1.2 减震层厚度对衬砌结构应力影响

选取峰值加速度 0.4g 和 EPS 颗粒掺入比 25% 的衬砌结构在不同减震层厚度作用下 1~10 号关键点的应力峰值进行对比分析,结果如图 6,7 所示。

由图 6 可知,减震层厚度从无到 10,30,50,80 cm 依次增加过程中,衬砌结构正应力峰值 σ_x 和 σ_y 先减小至一定程度,后又逐渐增大,说明减震层的厚度并非越厚越好,而是有个最合理值。通过对比可知:与无减震层相比,设置 10 cm 厚减震层时,衬砌结构正应力峰值 σ_x 和 σ_y 减小幅度在 10%~20%之间;设置 30 cm 厚减震层时,正应力峰值 σ_x 和 σ_y 减小幅度在 20%~38%之间;设置 50 cm 厚减震层

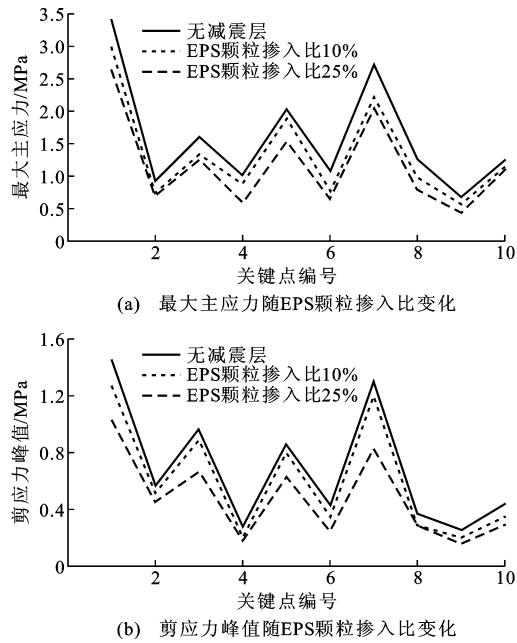


图5 各关键点最大主应力和剪应力峰值随 EPS 颗粒掺入比变化
Fig. 5 Changes of Maximum Main Stress and Peak Shear Stress of Key Points with Mixing Ratios of EPS Beads

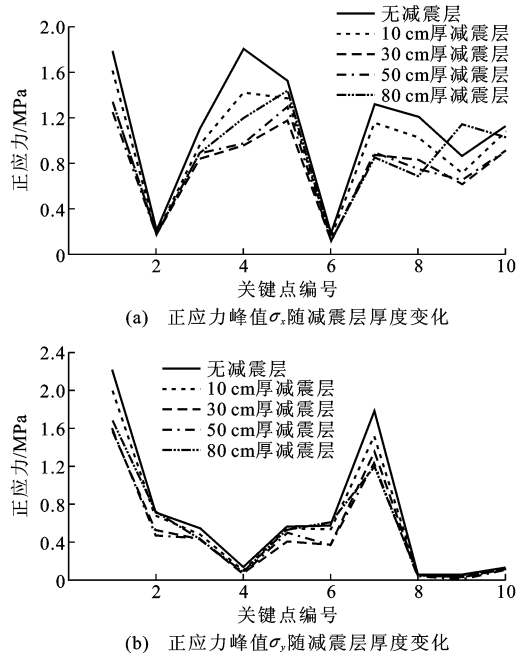


图6 各关键点正应力峰值 σ_x 和 σ_y 随减震层厚度变化
Fig. 6 Changes of Peak Normal Stress σ_x and σ_y of Key Points with Thicknesses of Damping Layer

时,正应力峰值 σ_x 和 σ_y 减小幅度在 20%~45%之间;设置 80 cm 厚减震层时,正应力峰值 σ_x 和 σ_y 减小幅度在 15%~35%之间,有些关键点处正应力峰值 σ_x 和 σ_y 不降反升。

由图 7 可以看出,随着减震层厚度的逐渐增加,

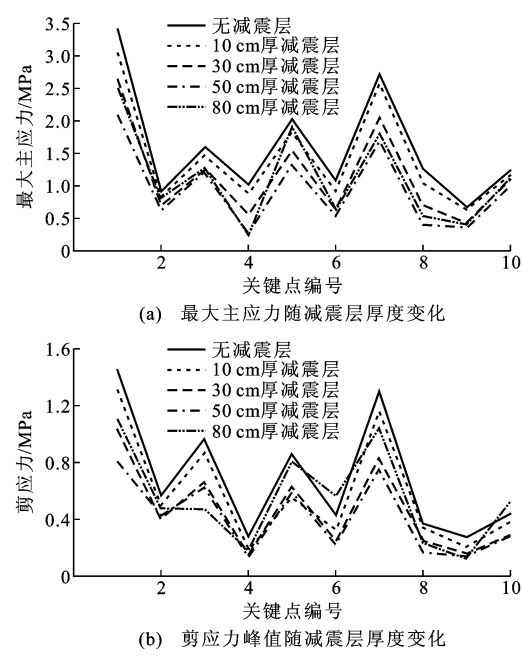


图 7 各关键点最大主应力和剪应力峰值随减震层厚度变化
Fig. 7 Changes of Maximum Main Stress and Peak Shear Stress of Key Points with Thicknesses of Damping Layer

最大主应力和剪应力峰值先减小后逐渐增加,同样说明减震层厚度存在合理的区间。通过对比可知:与无减震层相比,当设置 10 cm 厚减震层时,最大主应力 σ_1 和剪应力峰值平均减小幅度在 18% 左右;当设置 30 cm 厚减震层时,最大主应力 σ_1 和剪应力峰值平均减小幅度约为 30%,尤其是最易破坏的两点(1 号和 7 号关键点)减小幅度达到 35% 左右,减震效果较明显,这对于高烈度地震区的隧道结构抗减震来说是很利;当设置 50 cm 厚减震层时,最大主应力 σ_1 和剪应力峰值平均减小幅度约为 38%,减震效果基本同 30 cm 厚减震层;当设置 80 cm 厚减震层时,最大主应力 σ_1 和剪应力峰值减小幅度平均值约为 28%,减小幅度没增反降,有的关键点处最大主应力 σ_1 和剪应力峰值反而超过了无减震层时的相应峰值,说明设置 80 cm 厚减震层时,减震效果比 30 cm 和 50 cm 厚减震层减震效果差,故将减震层的厚度控制在 30~50 cm 区间内最合理,减震效果将达到最佳。

2.1.3 地震动强度对衬砌结构应力影响

选取 30 cm 厚减震层和 EPS 颗粒掺入比 25% 的衬砌结构在不同地震动强度作用下各关键点应力峰值进行对比分析,结果如图 8,9 所示。

由图 8 可以看出,衬砌结构在强震(峰值加速度 0.4g)作用下,各关键点的正应力峰值 σ_x 和 σ_y 均小于小震(峰值加速度 0.1g)作用下各关键点的正应

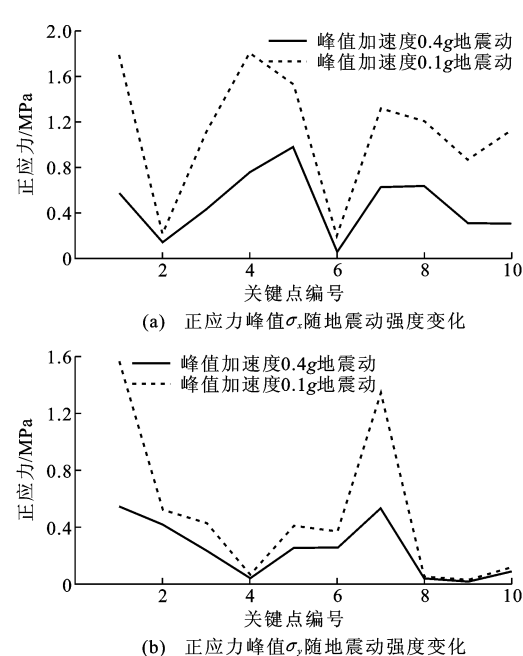


图 8 各关键点正应力峰值 σ_x 和 σ_y 随地震动强度变化
Fig. 8 Changes of Peak Normal Stress σ_x and σ_y of Key Points with Ground Motion Intensity

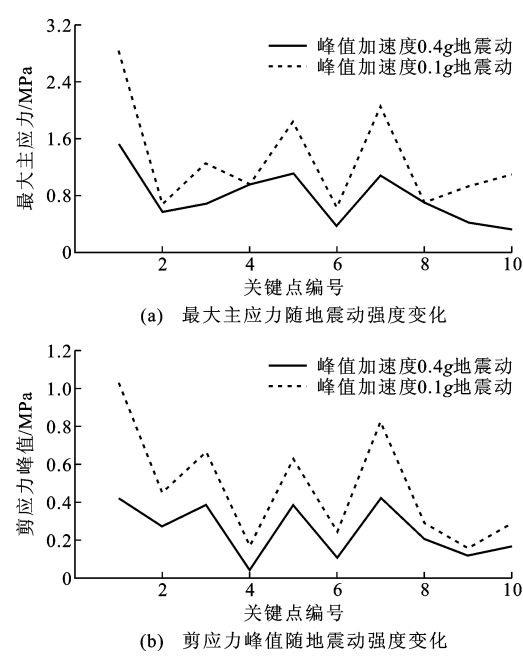


图 9 各关键点最大主应力和剪应力峰值随地震动强度变化
Fig. 9 Changes of Maximum Main Stress and Peak Shear Stress of Key Points with Ground Motion Intensity

力峰值,尤其是在 1 号、4 号和 7 号关键点处正应力峰值差异更大,且这 3 个关键点处正应力值最大,是最易破坏的地方。通过数据对比分析可知:在小震作用下,有减震层的隧道衬砌结构各关键点正应力峰值 σ_x 和 σ_y 比无减震层时各关键点正应力峰值减小约 17%;在强震作用下,有减震层时各关键点正

应力峰值 σ_x 和 σ_y 要明显小于无减震层时各关键点正应力峰值,平均减小幅度达 35%,4 号键点处正应力峰值 σ_x 和 σ_y 减小幅度甚至达到 56%。

通过图 9 及数据对比分析可知,有减震层的衬砌结构在强震作用下减震效果基本都比小震作用下要好,应力减小幅度达 28% 左右。减震层的存在可以明显削弱传递至衬砌结构的地震能量,从而达到减震的效果。

通过图 8,9 分析可知,减震层在强震作用下的减震效果更好,说明 EPS 颗粒-黄土混合土减震层更适用于高烈度地震区。

2.2 衬砌结构位移和加速度响应

2.2.1 EPS 颗粒掺入比对衬砌结构位移和加速度影响

选取强震作用下 30 cm 厚减震层的衬砌结构在不同 EPS 颗粒掺入比条件下的各关键点位移峰值和加速度峰值进行对比分析,结果如图 10 所示。

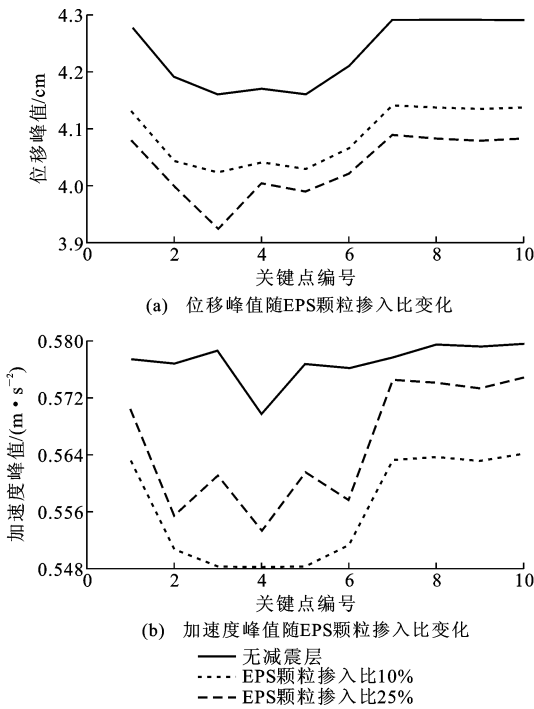


图 10 各关键点位移峰值和加速度峰值随 EPS 颗粒掺入比变化

Fig. 10 Changes of Peak Displacements and Peak Accelerations of Key Points with Mixing Ratios of EPS Beads

由图 10 可知,在相同强度地震动作用下,衬砌结构各关键点位移峰值和加速度峰值随 EPS 颗粒掺入比的变化规律略有不同,尤其是 1,7,8~10 号关键点处位移峰值和加速度峰值要大于其他关键点处,其中 1 号和 7 号关键点位于衬砌结构拱脚处,

8~10 号关键点位于仰拱部位,说明衬砌结构拱脚和仰拱区域的位移峰值和加速度峰值较其他区域的大。

由图 10 还可看出,有减震层的衬砌结构各关键点加速度峰值要小于无减震层,说明减震层的存在可以减小衬砌结构加速度反应,也从一定程度上影响结构本身所受的惯性力及响应位移,但相对于截面较小、对称性好的隧道结构影响不是很明显。当 EPS 颗粒掺入比在 25% 时加速度峰值反而略大于 EPS 颗粒掺入比在 10% 时,其原因可能是在 10% 颗粒掺入比时,整个混合材料的颗粒级配更合理。在强震作用下,EPS 颗粒掺入比 10% 的减震层对传递至衬砌结构的加速度削弱程度更大。减震层的存在在一定程度上减小了衬砌结构的变形位移,且 EPS 颗粒掺入比越大,衬砌结构各关键点水平位移峰值越小。

2.2.2 减震层厚度对衬砌结构位移和加速度影响

选取强震作用下和 EPS 颗粒掺入比 25% 的衬砌结构在不同减震层厚度条件下各关键点水平向位移峰值和加速度峰值进行对比分析,结果见图 11。

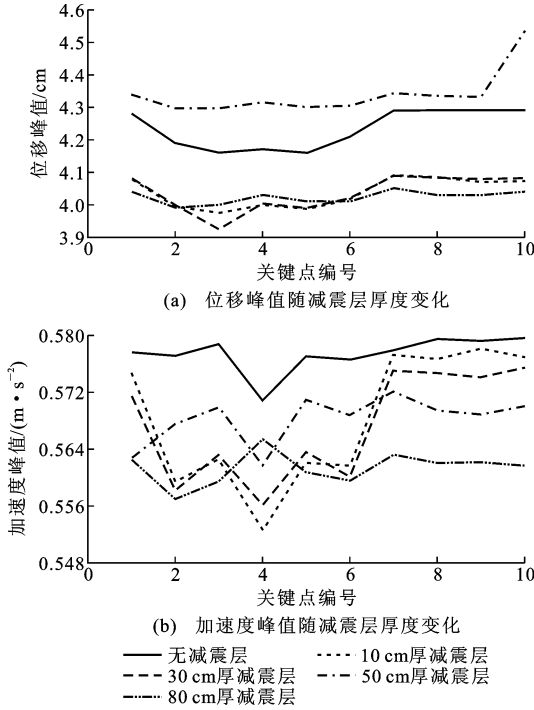


图 11 各关键点位移峰值和加速度峰值随减震层厚度变化

Fig. 11 Changes of Peak Displacements and Peak Accelerations of Key Points with Thicknesses of Damping Layer

由图 11(a)可以看出,同一厚度的减震层衬砌结构各关键点 X 向位移峰值几乎相同,均不会随关键点不同而产生较大差异,说明衬砌结构在强震作

用下整体性较好。当减震层厚度为 10, 30, 80 cm 时,各关键点位移峰值均小于无减震层时。当减震层厚度为 50 cm 时,各关键点位移峰值反而略大于无减震层时,说明设置 50 cm 厚减震层对衬砌结构位移是不利的,主要原因可能是 50 cm 厚减震层的存在对地震动引起的衬砌结构位移有放大作用,故位移峰值会略大于无减震层时的位移峰值,但位移增加值很小。整体而言,设置减震层后的衬砌结构位移峰值没有明显减小,但其变形具有较好的对称性。

从图 11(b)可以看出,各关键点加速度峰值均小于无减震层时衬砌结构各关键点加速度峰值,但减小效果不很明显。随着减震层厚度增加,加速度变化规律不明显。整体而言,设置 80 cm 厚减震层时各关键点加速度峰值最小,设置 10 cm 和 30 cm 厚减震层衬砌结构在 1, 7~10 号关键点处加速度峰值较其他位置处加速度峰值稍大,主要因为这 5 点均处于仰拱上,本文模型地震波是通过在底部垂直入射的方式施加,所以地震加速度首先是传递至衬砌结构仰拱部位,故仰拱部位的加速度会稍大于其他位置处的加速度。加速度峰值随减震层厚度不同而不同,但相互差异较小,只在 $0 \sim 0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 之间变化。对整个衬砌结构而言,减震层厚度对于衬砌结构加速度影响不很明显。

2.2.3 地震动强度对衬砌结构位移和加速度影响

选取 30 cm 厚减震层和 EPS 颗粒掺入比 25% 的衬砌结构在不同地震动强度作用下各关键点位移峰值及加速度峰值进行对比分析,结果如图 12 所示。

由图 12 可知,有减震层时各关键点水平向位移峰值都比无减震层时的位移峰值小,减小幅度为 0.002 mm,减弱效果不是很明显。对于加速度峰值而言,有减震层时,强震作用下各关键点加速度峰值均小于无减震层时的加速度峰值,减小幅度约为 $0.001 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,减弱效果不是很明显。由图 12(b)可以看出,有减震层的衬砌结构在小震作用下各关键点加速度峰值基本都大于无减震层时的加速度峰值,这与上文关于减震层对加速度影响的研究结果均不相同,尤其是在衬砌结构以 Y 轴为对称轴的右侧关键点(1~3, 10 号关键点)和左侧边墙处的 2 个关键点(5, 6 号关键点)的加速度峰值明显大于无减震层时的加速度峰值,其原因可能是小震作用下衬砌结构和周围岩土介质会产生同步运动,减震层相对于周围岩土介质和衬砌结构而言是软弱层,即相

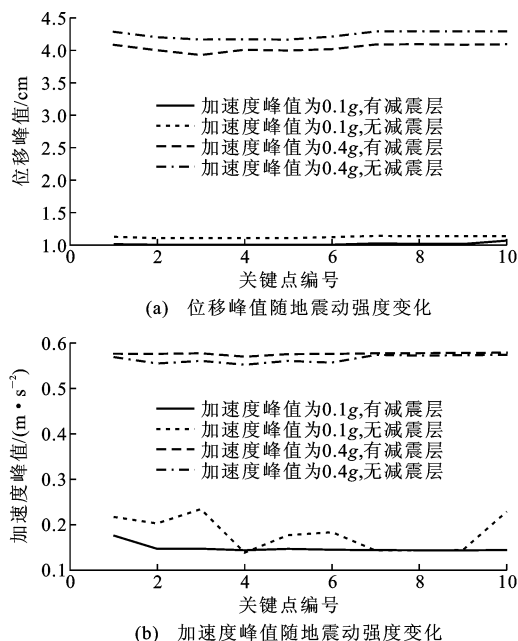


图 12 各关键点位移峰值和加速度峰值随地震动强度变化

Fig. 12 Changes of Peak Displacements and Maximum Accelerations of Key Points with Ground Motion Intensity

当于整体运动其中的一个薄弱层,当地震波传递至减震层时,会对加速度有放大效果,故传递至衬砌结构上的加速度峰值会大于无减震层时的加速度峰值。由于在小震作用下加速度峰值增加幅度很小,故对衬砌结构整体变形受力影响很小。考虑到减震层的存在会对衬砌结构应力及位移都有减小作用,所以设置减震层有利于衬砌结构的抗减震。

3 结 语

(1)水平地震作用下衬砌结构应力响应峰值主要集中在拱脚与拱顶处,且减震层的存在不改变衬砌结构的震动频谱特性。

(2)衬砌结构在强震作用下、30 cm 厚减震层和 EPS 颗粒掺入比为 25% 时,其正应力峰值、剪应力峰值和最大主应力峰值较无减震层时减小约 35%。EPS 颗粒掺入比为 10% 时,各应力峰值较无减震层时减小约 15%,拱脚处(最易破坏部位)减小幅度也均超过 15%。对于衬砌各关键点加速度峰值和位移峰值而言,减震层的存在对其影响不是很明显,减小幅度约为 5%。EPS 颗粒-黄土混合土减震层更适合于高烈度地震区。

(3)在强震作用下,当设置 EPS 颗粒掺入比为 25%、减震层厚度为 30~50 cm 时,应力峰值较无减震层时减小幅度达 40%,减震效果很明显,考虑工

程经济性问题,建议工程使用 EPS 颗粒掺入比 25% 和 30 cm 厚的减震层。

参考文献:

References:

- [1] 李天斌. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 742-750.
LI Tian-bin. Failure Characteristics and Influence Factor Analysis of Mountain Tunnels at Epicenter Zones of Great Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 742-750.
- [2] WANG Z Z, GAO B, JIANG Y J, et al. Investigation and Assessment on Mountain Tunnels and Geotechnical Damage After the Wenchuan Earthquake[J]. Science in China Series E: Technological Science, 2009, 52(2): 546-558.
- [3] 潘家伟, 李海兵, 吴富晓, 等. 2010 年玉树地震 (Ms7.1) 地表破裂特征、破裂机制与破裂过程[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3449-3459.
PAN Jia-wei, LI Hai-bing, WU Fu-yao, et al. Surface Rupture Characteristics, Rupture Mechanics, and Rupture Process of the Yushu Earthquake (Ms7.1) [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3449-3459.
- [4] 黄胜. 高烈度地震下隧道破坏机制及抗震研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院, 2010.
HUANG Sheng. Research on Failure Mechanism and Aseismic Measures for Underground Engineering Under High Intensity Earthquake[D]. Wuhan: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [5] 张林. 山岭隧道洞口段地震动力响应及抗减震措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
ZHANG Lin. Study on Seismic Dynamic Response and Damping Measures of Mountain Tunnel Portal Tunnel[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [6] 刘奇祥. 隧道地震灾害的防治对策[J]. 公路交通技术, 2011(3): 125-130.
LIU Qi-xiang. Prevention and Cure Countermeasures for Seismic Hazards in Tunnels[J]. Technology of Highway and Transport, 2011(3): 125-130.
- [7] 苏木标, 井海明, 戎密仁. 铁路隧道地震灾害损失评估技术研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(11): 98-105.
SU Mu-biao, JING Hai-ming, RONG Mi-ren. Research on Technology of Earthquake Disaster Loss Assessment for Railway Tunnels[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(11): 98-105.
- [8] 朱永全. 109 号隧道地震灾害与加固处理的思考[J]. 国防交通工程与技术, 2008(4): 1-4.
ZHU Yong-quan. Our Reflection on the Earthquake Damage to the No. 109 Tunnel and Our Consolidating Treatment[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2008(4): 1-4.
- [9] 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): 222-229.
GAO Feng, SHI Yu-cheng, YAN Song-hong, et al. Study of Two Shock Absorption Measures in Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 222-229.
- [10] 王明年, 崔光耀. 高烈度地震区隧道设置减震层的减震原理研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(8): 126-131.
WANG Ming-nian, CUI Guang-yao. Study of the Mechanism of Shock Absorption Layer in the Supporting System of Tunnels in Highly Seismic Areas [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8): 126-131.
- [11] 刘金云, 陈健云, 姜伟. 输水隧道的减震措施研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(2): 196-201.
LIU Jin-yun, CHEN Jian-yun, JIANG Wei. Study on Shock Absorption Measures of Water-conveyance Tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(2): 196-201.
- [12] 凌燕婷, 高波. 高烈度地震区双线公路隧道减震措施研究[J]. 隧道建设, 2008, 28(4): 412-415.
LING Yan-ting, GAO Bo. Study on Shock Absorption Measures for Double-lane Highway Tunnels in High Earthquake Intensity Regions[J]. Tunnel Construction, 2008, 28(4): 412-415.
- [13] 信春雷, 高波, 王英学, 等. 跨断层隧道可变形抗减震措施振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1041-1049.
XIN Chun-lei, GAO Bo, WANG Ying-xue, et al. Shaking Table Tests on Deformable Aseismic and Damping Measures for Fault-crossing Tunnel Structures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 1041-1049.
- [14] 信春雷, 高波, 周佳媚, 等. 跨断层隧道抗减震措施性能振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1414-1422.
XIN Chun-lei, GAO Bo, ZHOU Jia-mei, et al. Shaking Table Tests on Performances of Anti-seismic and Damping Measures for Fault-crossing Tunnel Structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1414-1422.

- [15] 聂良佐,项伟.土工实验指导书[M].武汉:中国地质大学出版社,2009.
NIE Liang-zuo,XIANG Wei. Guide Book of Geotechnical Test[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press,2009.
- [16] 汪精河,周晓军,毛露露,等.地下结构抗震分析中地震动输入方法的比较研究[J].现代隧道技术,2015,52(3):103-109.
WANG Jing-he,ZHOU Xiao-jun,MAO Lu-lu,et al. Comparative Study of Earthquake Input Methods for the Seismic Analysis of Underground Structures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 103-109.
- [17] 刘晶波,谷音,杜义欣.一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J].岩土工程学报,2006,28(9):1070-1075
LIU Jing-bo,GU Yin,DU Yi-xin. Consistent Viscous-spring Artificial Boundaries and Viscous-spring Boundary Elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(9):1070-1075.
- [18] 柳锦春,还毅,李建权.人工边界及地震动输入在有限元软件中的实现[J].地下空间与工程学报,2011,7(增2):1774-1779.
LIU Jin-chun,HUAN Yi,LI Jian-quan. Application of Artificial Boundary and Seismic Input in General Finite Element Software[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S2): 1774-1779.
- [19] 楼梦麟,王文剑,朱彤,等.土-结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题[J].地震工程与工程震动,2000,20(4):30-36.
LOU Meng-lin,WANG Wen-jian,ZHU Tong,et al. Soil Lateral Boundary Effect in Shaking Table Model Test of Soil-structure System[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2000, 20(4): 30-36.
- [20] 石娜.黄土地区地铁车站结构抗震设计简化方法探讨[D].西安:长安大学,2015.
SHI Na. Discuss on the Seismic Design Simplified Method of Subway Station Structures in Loess Area [D]. Xi'an:Chang'an University,2015.
- [21] 许婧伟.近地裂缝场地地铁车站地震动力响应[D].西安:长安大学,2014.
XU Jing-wei. Study on the Seismic Dynamic Response of Subway Station Under Near-field [D]. Xi'an: Chang'an University,2014.
- [22] 王明年,崔光耀.高烈度地震区隧道减震模型的建立及其减震效果模型试验研究[J].岩土力学,2010,31(6):1884-1890.
WANG Ming-nian,CUI Guang-yao. Establishment of Tunnel Damping Model and Research on Damping Effect with Model Test in Highly Seismic Area[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(6):1884-1890.
- [23] 张鹏.EPS颗粒重塑黄土动力特性及其对隧道衬砌结构的减震作用[D].西安:长安大学,2016.
ZHANG Peng. Dynamic Characteristics of EPS Beads-reconstituted Loess and Damping Effect on Tunnel Lining Structure[D]. Xi'an:Chang'an University,2016.