

不同混合比橡胶-砂土路基地震响应特征研究

罗超^{1,2}, 黄强², 李晶晶², 祝梦凡², 王昊^{1,2}, 王树栋^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043)

摘要: 随着废弃橡胶轮胎数量的增加, 利用橡胶颗粒改良砂土路基成为提升工程抗震性能与资源再利用的重要途径。通过对比分析不同混合比橡胶-砂土路基在罕遇地震作用下的动力响应, 重点考察了加速度、相对位移、等效应力及等效应变的分布规律。结果表明: 橡胶掺量对相对位移、等效应力和等效应变影响显著, 普通路基(混合比0%)的相对位移、等效应力明显高于橡胶-砂土路基, 且同一高程处边坡响应大于内部; 加速度放大系数主要受地震动波形控制, 不同混合比间差异较小; 普通路基普遍存在显著的应变集中, 随着橡胶掺量的增加, 应变峰值逐渐降低, 当混合比为5%和10%时, 应变场趋于均匀。研究表明: 橡胶颗粒能够有效削弱应力与应变集中, 提升路基整体抗震性能; 坡肩与坡脚区域为地震响应敏感部位, 在抗震设计中需重点关注, 研究成果可为橡胶-砂土路基的抗震优化设计提供理论依据。

关键词: 橡胶砂; 路基; 混合比; 地震响应; 减震

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2026.09.026

Study on seismic response characteristics of rubber-sand subgrade with different proportions

LUO Chao^{1,2}, HUANG Qiang², LI Jingjing², ZHU Mengfan², WANG Hao^{1,2}, WANG Shudong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: With the increasing number of abandoned rubber tires, utilizing rubber particles to improve sand subgrades has become an important method to improve the seismic performance of projects and reuse resources. In this paper, the dynamic responses of rubber-sand subgrade with different mixture ratios under rare earthquakes were compared and analyzed, focusing on the distribution laws of acceleration, relative displacement, equivalent stress, and equivalent strain. The results show that the rubber content has a significant impact on the relative displacement, equivalent stress, and equivalent strain. The relative displacement and equivalent stress of ordinary subgrade (0% mixing ratio) are significantly higher than those of rubber-sand subgrade, and the slope response at the same elevation is greater than that of the interior; the acceleration amplification factor of subgrade is mainly controlled by the ground motion waveform, and the difference between different mixing ratios is small; significant strain concentration is common in ordinary subgrade. With the increase of rubber content, the peak strain value gradually decreases. When the mixing ratio is 5% and 10%, the strain field becomes uniform. The study indicates that the rubber particles can effectively weaken stress and strain concentrations and improve the overall seismic performance of subgrade; slope shoulder and toe areas are sensitive to seismic response and require special attention in seismic design. The research results can provide a theoretical basis for the seismic optimization design of rubber-sand subgrade.

Key words: rubber-sand mixture; subgrade; different proportion; seismic response; seismic mitigation

基金项目: 河北省自然科学基金(E2022210095; E2024210049); 中央引导地方科技发展资金项目(216Z5402G); 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室自主课题(ZZ2021-03); 2025年度河北省地震科技星火计划项目(DZ2025092800001)

收稿日期: 2025-08-21 修改稿收到日期: 2025-12-08

第一作者 罗超 男, 博士, 讲师, 1987年生

通信作者 李晶晶 女, 硕士生, 1999年生

E-mail: lijingjing01200@163.com

随着全球经济快速发展, 汽车数量激增导致废弃轮胎数量大幅上升, 这些废弃轮胎难以自然降解, 长期堆积不仅占用大量土地资源, 还会污染生态环境。因此, 如何处理和有效利用废弃轮胎已成为当前研究的热点问题。

橡胶材料具有密度低、弹性高、耐久性好和耗能力强等优点, 适宜用作耗能减震材料^[1-2]。近年来, 许

多学者将橡胶颗粒与砂土混合形成橡胶砂^[3-7],并将其广泛应用于岩土工程及工程减震领域,如:橡胶砂垫层被应用于低层房屋的减震设计,橡胶砂作为路基回填材料及边坡加固材料等。目前,橡胶砂作为一种耗能减震材料,已进行了大量的试验研究。熊伟等^[8]通过不同橡胶砂混合比、不同垫层厚度和配重条件的振动台试验,得到了橡胶砂垫层有较好的隔震性能。Ehsani等^[9]通过扭转共振柱试验和动三轴试验研究了橡胶砂的动态响应,结果表明,加入橡胶颗粒可以显著降低橡胶砂的剪切模量并提高橡胶砂的阻尼比。Mashiri等^[10]通过固结不排水三轴试验也得到了相同的结论。Brunet等^[11]通过建立非线性、弹塑性数值模型模拟了具有橡胶砂垫层的结构在不同地震动作用下的地震响应,结果表明,混合比为15%~25%,厚度为2~3m的橡胶砂垫层减震效果最好。Ding等^[12]通过循环三轴试验研究了橡胶砂的静力学和动力学特性,结果表明,橡胶砂的剪切模量与橡胶含量成反比。Pamukcu等^[13]通过扭转共振柱试验研究了橡胶砂的低应变动态性能,结果表明,加入橡胶颗粒可以提高砂土的剪切模量和阻尼比。上述研究结果表明,橡胶砂具有良好的隔震和耗能性能。但也有一些学者持相反观点,李丽华等^[14]研究了橡胶含量对橡胶砂的动强度和阻尼比的影响,结果表明,加入橡胶材料降低了纯砂的动强度,阻尼比随着橡胶含量的增加呈现先增加后降低的趋势。Promputthangkoon等^[15]通过循环三轴荷载试验得到了随着橡胶含量的增加,橡胶砂的抗液化能力有所降低。

虽然许多学者对橡胶砂的力学性能做了大量研究,但没有达成一致的结论。因此,橡胶砂混合比对结构的地震响应分析还有待进一步深入研究。本文以不同混合比的橡胶-砂土路基为研究对象,研究在罕遇地震作用下,不同橡胶砂混合比对路基地震反应的影响规律。

1 模型建立及地震波选择

1.1 模型建立

本文以橡胶-砂土路基为研究对象,橡胶-砂土路基由路基和地基两部分组成,总高度为53.2m,总宽度为50.0m,总长度为550.0m,其断面图如图1所示。其中路基部分包括轨道板、混凝土底座、基床表层和基床底层,路基部分的坡度为1:1.5。为研究橡胶砂混合比对橡胶-砂土路基地震响应的影响,基床表层分别采用0%(级配碎石)、5%、10%、15%及20%混合比的橡胶砂。普通路基材料参数(即混合比为0%的级配碎石):其剪切波速、密度与泊松比等参数主要参考GB 50111—2006《铁路工程抗震设计规范》^[16]中的路基材料取值,确保模型具备工程实际代表性。橡胶-砂混合

料的密度参考祝梦凡等的试验研究成果,采用其试验数据作为密度赋值依据。橡胶砂的剪切波速与泊松比依据GB 50111—2006《铁路工程抗震设计规范》进行取值。各部分材料参数,如表1所示。

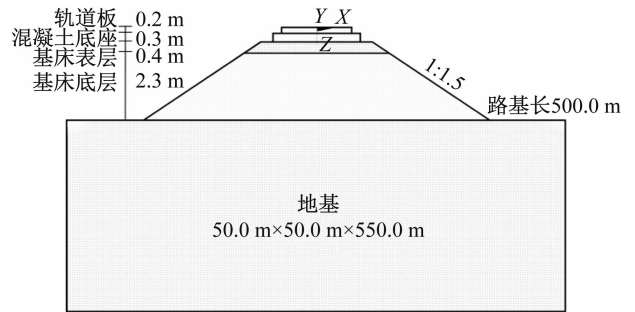


图1 橡胶-砂土路基模型断面图

Fig. 1 Rubber-sand subgrade model profile

表1 各部分材料参数表

Tab. 1 Material parameters of each part

名称	剪切波速/ ($m \cdot s^{-1}$)	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	泊松比
轨道板	2 300.00	2 700	0.16
混凝土底座	2 300.00	2 700	0.16
基床表层			
混合比0%	400.00	2 300	0.30
混合比5%	250.00	1 780	0.30
混合比10%	250.00	1 760	0.30
混合比15%	250.00	1 600	0.30
混合比20%	250.00	1 570	0.30
基床底层	300.00	1 920	0.30
地基	500.00	2 000	0.35

根据某铁路路基工程资料建立橡胶-砂土路基有限元模型,轨道板和混凝土底座采用壳单元模拟;基床表层、基床底层和地基层采用3D实体单元模拟,其中基床表层和基床底层均采用DP(Drucker-Prager)理想弹塑性本构模型^[17],基床表层的黏聚力和内摩擦角通过试验得到,基床底层的黏聚力和内摩擦角取值^[18]见表2所示,剪胀角取内摩擦角的1/3^[19],其他部分采用线弹性本构。壳单元之间及壳单元与实体单元之间均采用生成刚性区的方式连接。橡胶-砂土有限元模型,如图2所示。

表2 基床表层和基床底层的黏聚力和内摩擦角

Tab. 2 Adhesion and internal friction angle of the surface and bottom of the foundation bed

名称	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
基床表层(混合比0%)	5.23	22.74
基床表层(混合比5%)	3.22	24.35
基床表层(混合比10%)	3.13	30.43
基床表层(混合比15%)	2.10	27.40
基床表层(混合比20%)	2.03	26.24
基床底层	10.10	40.20

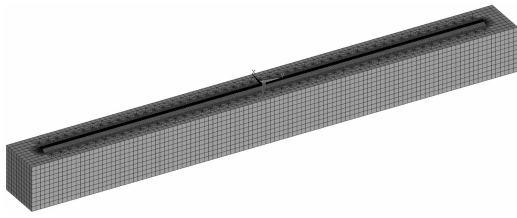


图2 橡胶-砂土路基有限元模型

Fig. 2 Rubber-sand subgrade finite element model

1.2 地震波选择

本文中橡胶-砂土路基的抗震设防类别为C类,场地类型条件为II类,地震基本烈度为7度。本文使用动力时程分析方法对橡胶-砂土路基进行地震反应分析,根据GB 50111—2006《铁路工程抗震设计规范》确定橡胶-砂土路基的规范反应谱。GB 50111—2006《铁路工程抗震设计规范》指出:在对结构进行动力反应时程分析时,选取地震波的数量应至少为3条。本文在美国太平洋地震工程研究中心强地震动数据库中选取反应谱值与规范反应谱值相差最小的3条天然地震动,地震波信息如表3所示,其加速度反应谱如图3所示。

表3 地震波信息
Tab. 3 Seismic wave information

序号	编号	震级	震中距/ km	震源深度/ km	剪切波速/ ($m \cdot s^{-1}$)
1	RSN599	5.99	18.39	23.42	322.75
2	RSN1001	6.69	29.52	33.99	285.28
3	RSN19916	4.50	26.37	27.00	453.67

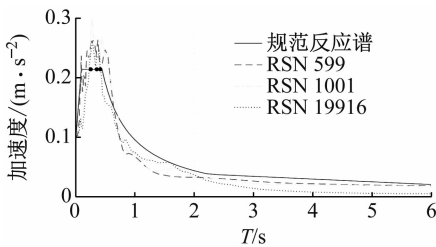


图3 加速度反应谱

Fig. 3 Acceleration response spectrum

本文研究橡胶-砂土路基在罕遇地震作用下的地震响应。根据GB 50111—2006《铁路工程抗震设计规范》,罕遇地震作用下地震动峰值加速度为0.21g。将美国太平洋地震工程研究中心强地震动数据库中选取的3条天然地震动调幅为0.21g进行地震响应分析。

2 地震动输入

本文使用如图4所示的改进的区域缩减法^[20]并搭配三维黏弹性人工边界实现对橡胶-砂土路基的地震动输入。图4中:深灰色部分记为 Ω ,表示计算时所关心的区域;黑色部分记为 Ω^+ ,表示系统中的其他区域;浅灰色部分记为 Γ ,表示计算时所关心的区域与系统中

的其他区域的交界面。改进的区域缩减法的等效力载荷可表示为

$$P_{\text{eff,MDRM}} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -M_{be,\Omega^+} \ddot{u}_{e,0} - C_{be,\Omega^+} \dot{u}_{e,0} - K_{be,\Omega^+} u_{e,0} \\ M_{eb,\Omega^+} \ddot{u}_{b,0} + C_{eb,\Omega^+} \dot{u}_{b,0} + K_{eb,\Omega^+} u_{b,0} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: M 和 K 分别为系统的质量矩阵和刚度矩阵;下标 i 、 b 和 e 分别为区域 Ω 、 Γ 和 Ω^+ 上的节点; u 为位移响应;下标0为自由场。

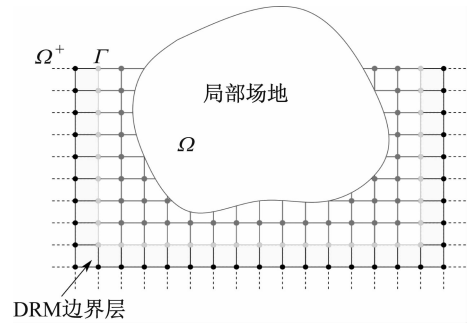


图4 改进的区域缩减法计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the modified domain reduction method

通过改进的区域缩减法,能有效地模拟 Ω 范围内的区域,但在 Ω^+ 区域内会存在残余位移场。为防止 Ω^+ 区域内残余位移场对计算区域的干扰,需要在模型的外侧边界处放置三维黏弹性人工边界来吸收残余位移场。使用改进的区域缩减法对模型加载时,需要先计算边界节点的自由场时程,然后通过式(1)计算出等效力载荷,即可实现对橡胶-砂土路基有限元模型的加载。

3 工况分析

本文研究橡胶砂混合比对橡胶-砂土路基的地震影响,其中橡胶砂混合比分别采用0% (级配碎石)、5%、10%、15%和20%,对比不同混合比橡胶-砂土路基的地震响应,设计计算工况。本文设置5组计算工况,分别对应橡胶砂混合比为0%、5%、10%、15%和20%,地震动强度统一采用罕遇地震工况(峰值加速度0.21g)。

4 计算结果

橡胶-砂土路基的纵向总长度为550.0 m,本文重点研究模型纵向中心100.0 m范围内结构的地震响应。为减少模型边界效应的影响,每隔25.0 m取一个横断面。由于橡胶-砂土路基有限元模型为对称结构,本文在横断面对称轴右侧的边坡和模型内部设置观测点,如图5所示。将取出的所有断面上相同位置观测点的地震响应最大值进行地震响应分析。

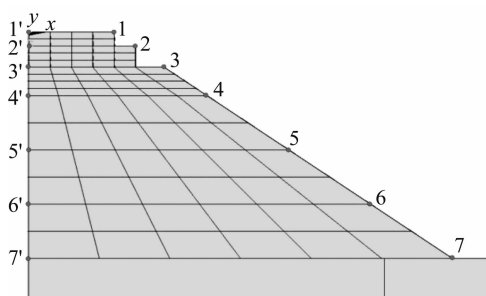


图5 橡胶-砂土路基有限元模型观测点示意图

Fig. 5 Observation point diagram of the finite element model of rubber-sand subgrade

为清晰地描述不同参数与减震效果的关系,本文引入一个归一化参数 r , 定义为

$$r = \frac{R}{R_0} \quad (2)$$

式中: R 为某一混合比下的地震反应; R_0 为普通路基下

的地震反应; r 为不同橡胶砂混合比的地震反应变化率。 $r > 1$ 表示该混合比下的结构响应大于普通路基, 减震效果较差; $r < 1$ 表示该混合比下的结构响应小于普通路基, 具有一定的减震效果。

4.1 加速度分布特征

4.1.1 动力放大系数变化规律

本节讨论不同混合比橡胶-砂土路基的加速度分布特征, 引入动力放大系数表示橡胶-砂土路基不同高度处加速度响应峰值与模型底部加速度响应峰值的比值, 观测点距地面的高度记为 h 。橡胶-砂土路基动力放大系数沿高程的分布, 如图6所示。路基边坡在基床表层 ($h = 2.70 \text{ m}$) 处动力放大系数随混合比的变化趋势, 如图7所示。图8绘制了路基边坡在基床表层 ($h = 2.70 \text{ m}$) 处动力放大系数的变化率随混合比变化趋势图。

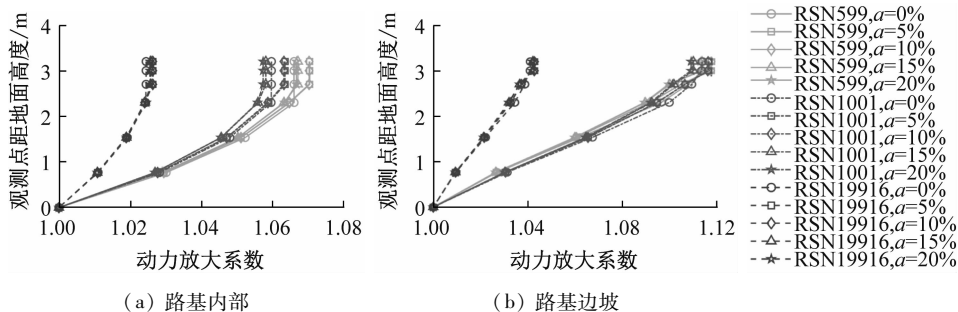


图6 罕遇地震作用下动力放大系数沿路基高程的分布

Fig. 6 Distribution of dynamic amplification factor along the subgrade elevation under rare earthquake loading

从图6可以看出, 橡胶-砂土路基模型的动力放大系数随观测点高程的增加而增大, 并且在同一高度位置处, 路基边坡的动力放大系数大于路基内部。对于路基内部, 在基床底层 ($0 \text{ m} < h < 2.30 \text{ m}$) 范围内, 混合比为20%的橡胶-砂土路基的动力放大系数小于其他四种路基; 而混合比为0%的普通路基的动力放大系数在不同强度的地震动作用下均大于其他四种路基, 在基床表层 ($2.30 \text{ m} < h < 2.70 \text{ m}$) 范围内其增加幅度逐渐减小, 在混凝土底座和轨道板 ($2.70 \text{ m} < h < 3.20 \text{ m}$) 范围内0%的普通路基的动力放大系数最小, 而混合比为5%的橡胶-砂土路基的动力放大系数略大于其他四种路基。对于路基边坡, 在基床底层和基床表层 ($0 \text{ m} < h < 2.70 \text{ m}$) 范围内, 混合比为20%的橡胶-砂土路基的动力放大系数略小于其他四种路基; 混合比为0%的普通路基的动力放大系数均大于其他四种路基, 在混凝土底座 ($2.70 \text{ m} < h < 3.00 \text{ m}$) 范围内其增加幅度逐渐减小, 在轨道板 ($3.00 \text{ m} < h < 3.20 \text{ m}$) 范围内0%的普通路基的动力放大系数小于其他四种路基, 而混合比为5%的橡胶-砂土路基的动力放大系数略大于其他四种路基。

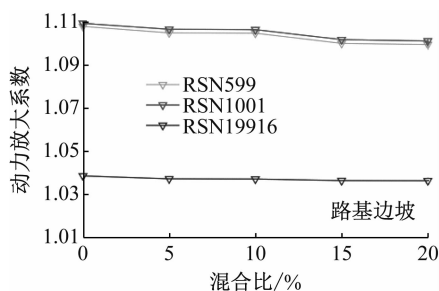


图7 动力放大系数随混合比的变化趋势

Fig. 7 Variation trend of dynamic amplification factor with mixing ratio

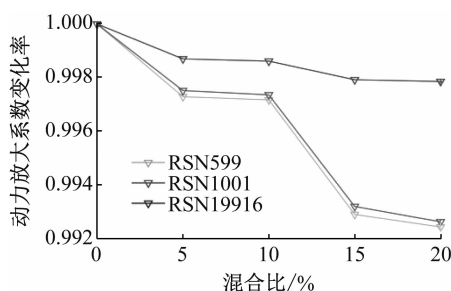


图8 动力放大系数的变化率随混合比变化趋势

Fig. 8 Variation trend of dynamic amplification factor change rate versus mixing ratio

从图7中可以看出,随着橡胶砂混合比的增大,路基边坡在基床表层($h = 2.70\text{ m}$)处的动力放大系数逐渐减小,但减小的幅度十分有限。这说明加速度响应主要受地震波波形的影响,橡胶砂混合比对其影响较小。

从图8中可以看出,在不同地震波作用下,随着混合比的增大动力放大系数的变化率均略有减小,混合

比为20%的橡胶砂土路基动力放大系数比普通路基小了约0.214%~0.756%,表明加速度响应主要受地震波影响,对橡胶砂混合比变化的敏感性相对较弱。

4.1.2 加速度峰值分布特征

为深入研究加速度峰值的分布特征,图9绘制了不同混合比橡胶-砂土路基的加速度峰值云图。

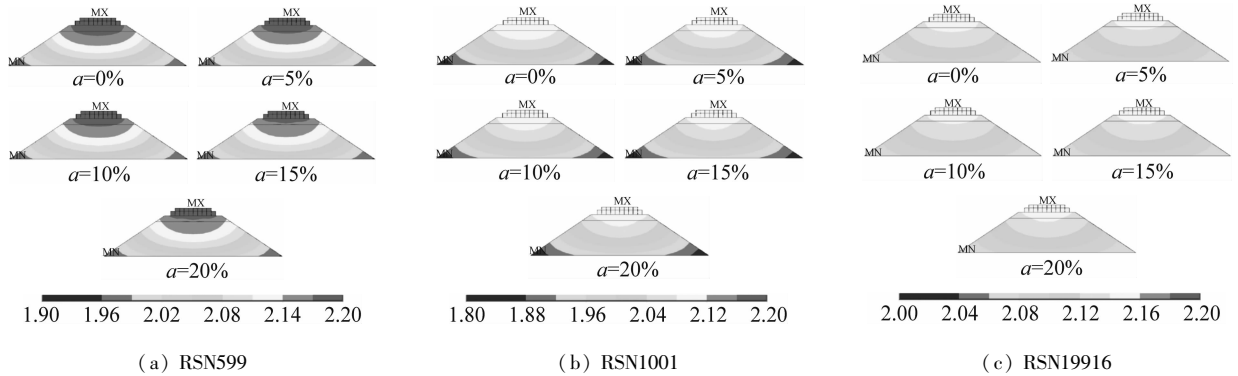


图9 罕遇地震作用下加速度峰值分布云图(m/s^2)

Fig.9 Cloud image of peak acceleration distribution under rare earthquake loading (m/s^2)

从图9中可以看出:不同混合比的橡胶-砂土路基加速度峰值分布特征相似,即随着路基高程越大,加速度峰值越大,轨道板和混凝土底座位置的加速度峰值显著大于其他位置;对于同一高程位置处,路基两侧边坡的加速度峰值小于路基内部。随着橡胶砂混合比的增加,加速度峰值最大的区域逐渐变小,混合比为20%的橡胶-砂土路基加速度峰值最大的区域面积最小。

综上,橡胶-砂土路基的动力放大系数和加速度峰值随路基高程的增加而增大,当高程相同时,路基边坡的动力放大系数大于路基内部,加速度峰值小于路基内部。在基床底层范围内,混合比为20%的橡胶-砂土路基的动力放大系数最小,混合比为0%的普通路基的动力放大系数最大;在轨道板范围内,混合比为0%的普通路基的动力放大系数最小,混合比为5%的橡胶-砂土路基的动力放大系数最大。造成该差异的主要原因在于,在基床底层范围内,高掺量橡胶降低剪切波速并提高阻尼,有效抑制了向上传播的剪切波反射,从而

获得最低放大系数;在轨道板范围内,结构刚度由轨道板主导,混合比为0%的普通路基因整体模量高抑制了高频放大,混合比为5%的橡胶-砂土路基则因阻尼增幅不足触发局部共振,从而导致放大系数最高。在基床表层($h = 2.70\text{ m}$)位置处,随着混合比的增大动力放大系数的变化率略有减小,但减小的幅度十分有限。加速度响应主要受地震波影响,对橡胶砂混合比变化的敏感性相对较弱。

4.2 位移分布特征

为研究不同混合比橡胶-砂土路基的相对位移分布特征,绘制了不同混合比橡胶-砂土路基相对位移沿高程的分布图,如图10所示,本文中相对位移定义为各高程观测点的位移峰值减去模型底部($h = 0\text{ m}$)处的位移峰值。路基边坡在基床表层($h = 2.70\text{ m}$)处相对位移随混合比的变化趋势,如图11所示。图12绘制了路基边坡在基床表层($h = 2.70\text{ m}$)处相对位移的变化率随混合比变化趋势图。

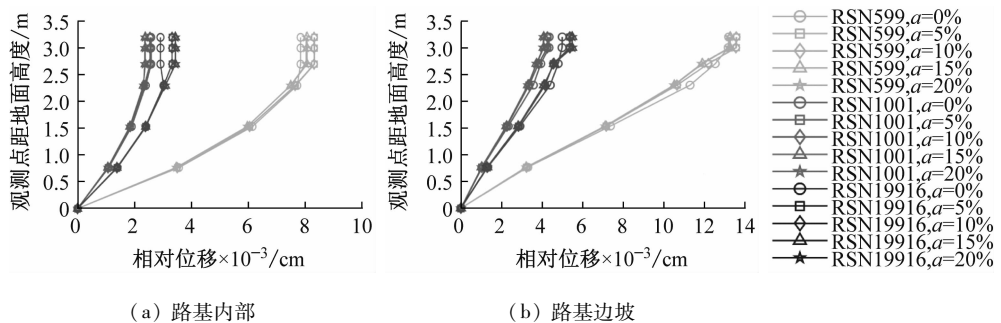


图10 罕遇地震作用下相对位移沿路基高程的分布

Fig.10 Distribution of relative displacement peak along the subgrade elevation under rare earthquake loading

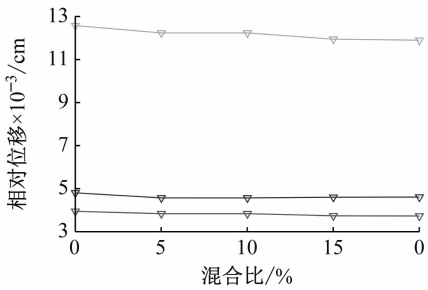


图 11 相对位移随混合比的变化趋势

Fig. 11 Variation trend of relative displacement with mixing ratio

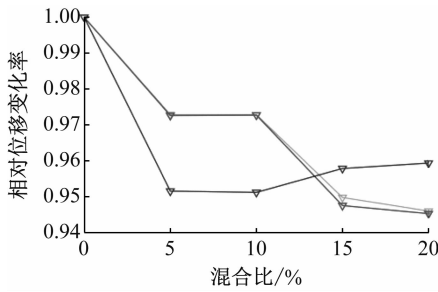


图 12 相对位移的变化率随混合比变化趋势

Fig. 12 Variation trend of relative displacement change rate versus mixing ratio

从图 10 可以看出:不同工况下路基模型的相对位

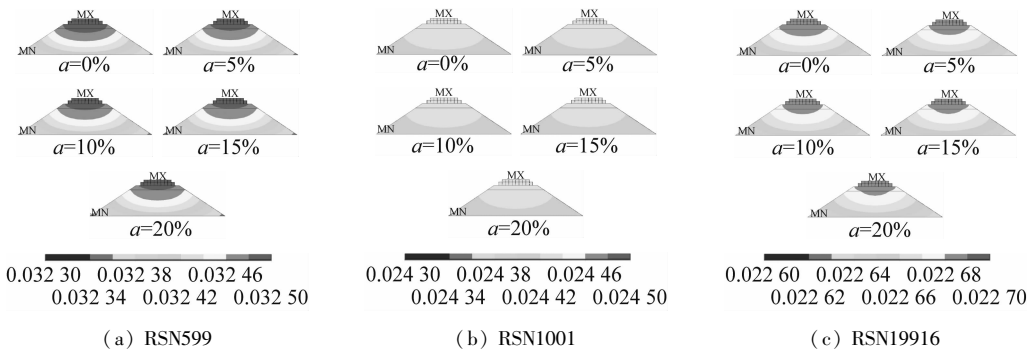


图 13 罕遇地震作用下位移峰值分布云图(m)

Fig. 13 Cloud image of peak displacement distribution under rare earthquake loading (m)

从图 13 可以看出:不同混合比的橡胶-砂土路基位移峰值分布特征相似,即随着路基高程越大,位移峰值越大,轨道板和混凝土底座位置的位移峰值显著大于其他位置;对于同一高程位置处,路基两侧边坡的位移峰值小于路基内部。随着橡胶砂混合比的增加,位移峰值最大的区域逐渐变小,混合比为 15% 和 20% 的橡胶-砂土路基位移峰值最大的区域面积最小。

4.3 等效应力分布特征

为研究不同混合比橡胶-砂土路基等效应力的分布特征,绘制了不同混合比橡胶-砂土路基的等效应力峰值沿路基高程的分布变化趋势,如图 14 所示。

从图 14 可以看出,橡胶-砂土路基等效应力的分布变化趋势相似。对于路基内部,在基床底层和基床表层范围内 ($h < 2.70 \text{ m}$),各混合比橡胶-砂土路基的等

移随观测点高程的增加而增大。对于路基内部,在基床底层 ($0 \text{ m} < h < 2.30 \text{ m}$) 范围内,不同混合比的橡胶-砂土路基的相对位移相差不大;而混合比为 0% 的普通路基的动力放大系数在不同强度的地震动作用下均大于其他四种路基,在基床表层 ($2.30 \text{ m} < h < 2.70 \text{ m}$) 范围内相对位移受地震波波形的影响较大,在混凝土底座和轨道板 ($2.70 \text{ m} < h < 3.20 \text{ m}$) 范围内,各种工况下相对位移响应基本没有变化。对于路基边坡,在基床底层 ($0 \text{ m} < h < 2.30 \text{ m}$) 范围内,不同工况下路基模型的相对位移随橡胶砂混合比的增大而减小;在基床表层 ($2.30 \text{ m} < h < 2.70 \text{ m}$) 范围内,混合比为 0% 的普通路基的相对位移均大于其他四种路基。

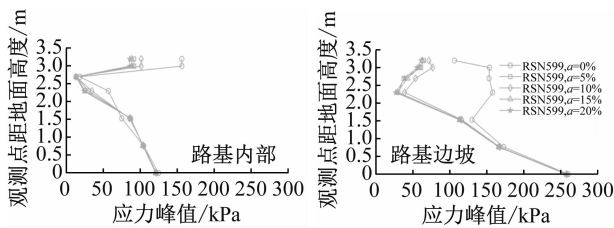
从图 11 可以看出,在不同地震波、不同橡胶砂混合比工况下,在基床表层 ($h = 2.70 \text{ m}$) 位置处的相对位移差别不大。从图 12 可以看出,在不同地震波作用下,混合比为 20% 的橡胶砂土路基相对位移变化率比普通路基小了约 4.058% ~ 5.464%,减幅较为明显。这表明,橡胶掺量增加显著提升了材料的阻尼特性,从而有效控制了路基的位移响应。

图 13 绘制了橡胶-砂土路基的位移峰值云图。

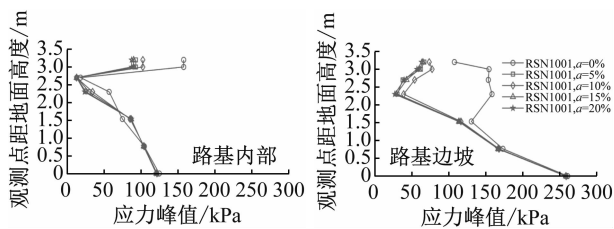
效应力峰值均随路基高程的增加而减小,在基床表层与混凝土底座的分界位置处 ($h = 2.70 \text{ m}$) 等效应力峰值达到最小;在混凝土底座范围内 ($2.70 \text{ m} < h < 3.00 \text{ m}$),等效应力峰值随路基高程的增加而增大;在轨道板范围内 ($3.00 \text{ m} < h < 3.20 \text{ m}$),模型的等效应力峰值基本没有变化。在基床底层 ($h < 0.76 \text{ m}$) 时,不同混合比橡胶-砂土路基的等效应力峰值相差不大;在 $0.76 \text{ m} < h < 1.52 \text{ m}$ 时,混合比为 0% 的普通路基的等效应力峰值显著小于其他混合比的橡胶-砂土路基;在 $h > 1.52 \text{ m}$ 时,混合比为 0% 的普通路基的等效应力峰值逐渐大于其他混合比的橡胶-砂土路基。

对于路基边坡来说,当 $h < 1.52 \text{ m}$ 时,模型的等效应力峰值随路基高程的增加而减小;当 $h > 1.52 \text{ m}$ 时,混合比为 0% 的普通路基与其他混合比的橡胶-砂土路

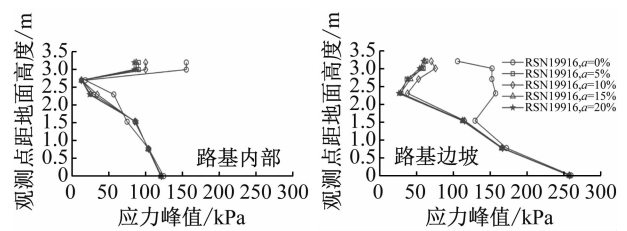
基的等效应力峰值分布规律不同:混合比为0%的普通路基在 $1.52\text{ m} < h < 2.30\text{ m}$ 的范围内,等效应力随路基高程的增加而增加;在 $h > 2.30\text{ m}$ 时,等效应力随高程的增加而减小。其他混合比的橡胶-砂土路基在 $h < 2.30\text{ m}$ 时,等效应力随路基高程的增加而减小;在 $h > 2.30\text{ m}$ 时,等效应力随路基高程的增加而增加。在路基边坡位置处,混合比为0%的普通路基的等效应力峰值显著大于其他混合比的橡胶-砂土路基。



(a) RSN599



(b) RSN1001



(c) RSN19916

图14 罕遇地震作用下等效应力峰值沿路基高程的分布
Fig. 14 Distribution of equivalent stress peak along the subgrade elevation under rare earthquake loading

从图14可以看出,在不同地震波作用下,各混合比路基模型的等效应力峰值差异较小。这是由于模型在地震作用下进入了弹塑性状态,等效应力趋于上限。因此,本节没有进一步开展等效应力峰值及其变化率随混合比变化的分析。

图15绘制了橡胶-砂土路基的等效应力峰值分布云图。从图15可以看出,在基床底层和基床表层范围内($h < 2.70\text{ m}$),对于同一高程位置处,路基边坡的等效应力峰值均大于路基内部;在混凝土底座和轨道板范围内($h > 2.70\text{ m}$),路基内部的等效应力峰值随高程的增加显著增大,导致路基内部的等效应力峰值略大于路基边坡。

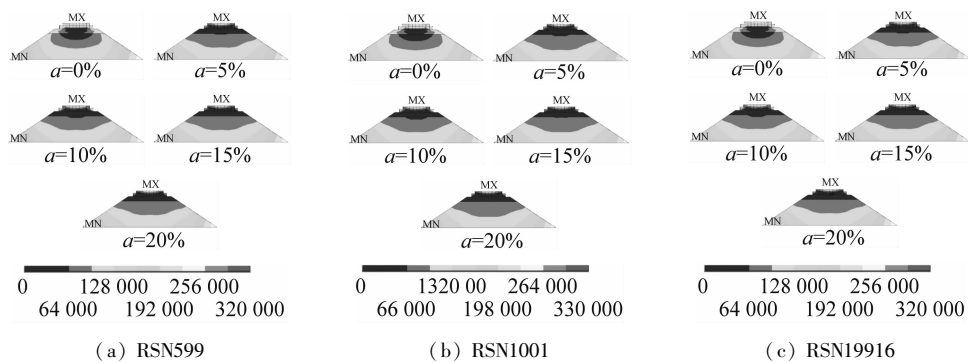


图15 罕遇地震作用下等效应力峰值分布云图(Pa)

Fig. 15 Cloud image of equivalent stress peak distribution under rare earthquake loading (Pa)

综上,橡胶砂的混合比对橡胶-砂土路基等效应力的分布有较大影响。在路基边坡位置处,混合比为0%的普通路基的等效应力峰值大于其他四种混合比的橡胶-砂土路基。在路基内部,当 $h > 1.52\text{ m}$ 时,混合比为0%的普通路基的等效应力峰值大于其他四种混合比的橡胶-砂土路基;当 $h < 1.52\text{ m}$ 时,各混合比的橡胶-砂土路基等效应力峰值差别不大。

4.4 等效应变分布特征

为研究不同混合比橡胶-砂土路基等效应变的分布特征,绘制了不同混合比橡胶-砂土路基的等效应变峰值沿路基高程的分布变化趋势,如图16所示。

从图16可以看出:不同混合比橡胶-砂土路基的等效应变峰值沿路基高程的分布变化趋势相近,即在

$0\text{ m} < h < 1.52\text{ m}$ 的范围内,路基内部和路基边坡等效应变峰值均随橡胶砂混合比的增大而减小;在 $1.52\text{ m} < h < 3.00\text{ m}$ 的范围内,路基内部混合比为20%的橡胶-砂土路基的等效应变峰值最大,路基边坡处混合比为0%的普通路基等效应变峰值最大;在轨道板范围内($3.00\text{ m} < h < 3.20\text{ m}$),不同混合比橡胶-砂土路基的等效应变峰值相差不大。

图17绘制了路基边坡在基床表层($h = 2.40\text{ m}$)处等效应变随混合比的变化趋势。从图17中可以看出,随着橡胶掺量的增加,5%混合比的橡胶-砂土路基工况下的等效应变峰值与普通路基工况相比有显著的减小。当混合比大于5%时,等效应变峰值变化不大。

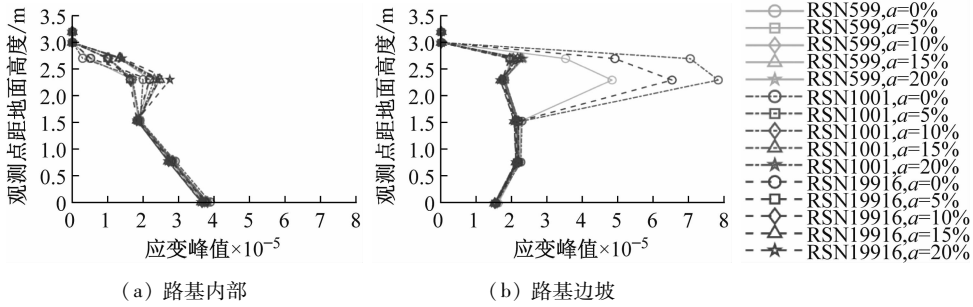


图 16 罕遇地震作用下等效应变峰值沿路基高程的分布

Fig. 16 Distribution of equivalent strain peak along the subgrade elevation under rare earthquake loading

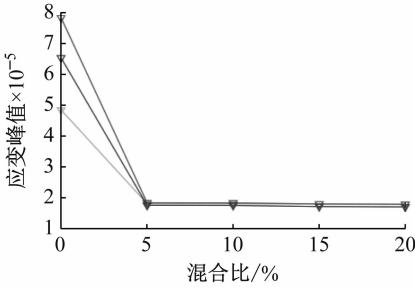


图 17 等效应变随混合比的变化趋势

Fig. 17 Variation trend of equivalent strain with mixing ratio

图 18 绘制了不同混合比橡胶-砂土路基等效应变

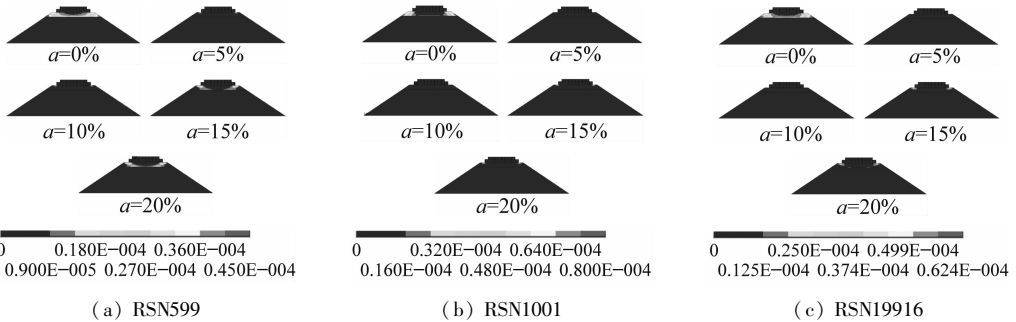


图 18 罕遇地震作用下等效应变峰值分布云图

Fig. 18 Cloud image of equivalent strain peak distribution under rare earthquake loading

5 结论

本文以不同混合比的橡胶-砂土路基为研究对象,通过对比分析不同混合比橡胶-砂土路基在罕遇地震作用下地震反应的异同,对橡胶-砂土路基的加速度、位移、等效应力和等效应变的分布规律进行了分析和讨论,得到的主要结论如下:

(1) 橡胶砂的混合比对路基的放大系数和加速度峰值影响较为有限。整体上,路基边坡的动力放大系数普遍大于路基内部,且混合比为 0% 的普通路基的放大系数和加速度响应均略高于掺有橡胶颗粒的路基。这是由于橡胶的阻尼比大,在相同地震动作用下,橡胶-砂土路基在一定程度上削弱了地震波的传播与放大效应,相比普通路基表现出略有改善的减震性能。

(2) 橡胶砂的混合比对路基的相对位移影响较为显著。随着橡胶掺量的增加,材料的阻尼特性明显增

强,从而在地震作用下有效抑制了路基的相对位移。
 (3) 橡胶砂的混合比对路基的等效应力有较大影响。混合比为 0% 的普通路基等效应力峰值大于其他四种混合比的橡胶-砂土路基。在基床范围内,对于同一高程位置处,路基边坡的等效应力峰值大于路基内部。
 (4) 混合比为 0% 的普通路基在不同地震动输入下均出现了显著的应变集中的现象,随着橡胶砂混合比的增加,等效应变峰值逐渐减小,当混合比为 5% 和 10% 时,应变场近似呈均匀分布;当混合比提高至 15% 和 20% 时,仅在坡肩和基床表层下缘出现轻微的应变集中现象。综上,橡胶颗粒的引入能够有效削弱路基坡肩处应变的集中效应,降低等效应变的峰值水平,显著改善路基的抗震性能。

强,从而在地震作用下有效抑制了路基的相对位移。

(3) 橡胶砂的混合比对路基的等效应力有较大影响。混合比为 0% 的普通路基等效应力峰值大于其他四种混合比的橡胶-砂土路基。在基床范围内,对于同一高程位置处,路基边坡的等效应力峰值大于路基内部。

(4) 混合比为 0% 的普通路基在不同地震动输入下均出现了显著的应变集中的现象,随着橡胶砂混合比的增加,等效应变峰值逐渐减小,当混合比为 5% 和 10% 时,应变场近似呈均匀分布;当混合比提高至 15% 和 20% 时,仅在坡肩和基床表层下缘出现轻微的应变集中现象。

综上所述,橡胶颗粒具有较高的阻尼和较低的密度,能够显著提高材料的能量耗散能力。在所研究的 0% ~ 20% 橡胶掺量范围内,混合比为 20% 的橡胶-砂土路基的减震效果最好。路基两侧的坡肩和坡脚均是

地震响应较大的部位,比路基内部更容易破坏。在进行路基工程的抗震设计时,应充分考虑橡胶砂混合比对路基地震响应的影响,并重点关注路基两侧坡肩和坡脚等易破坏部位,以提高路基工程的抗震性能。

参考文献

- [1] 丁瑜, 张家生, 陈晓斌, 等. 橡胶颗粒-砂混合物新型路基填料动力参数特性的试验研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(5): 170-177.
DING Yu, ZHANG Jiasheng, CHEN Xiaobin, et al. Experimental study on dynamic parameter characteristics of new subgrade filler composed of granular rubber-sand mixtures [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(5): 170-177.
- [2] 刘方成, 吴孟桃, 景立平. 加筋橡胶砂复合垫层隔震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(22): 184-189.
LIU Fangcheng, WU Mengtao, JING Liping. Experimental study on the isolating performance of a new reinforced rubber-sand mixture composite cushion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(22): 184-189.
- [3] ZORNBERG J G, CABRAL A R, VIRATJANDR C. Behaviour of tire shred sand mixtures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(2): 227-241.
- [4] 刘方成, 姚玉文, 吴孟桃, 等. 橡胶砂垫层在不同类别场地上的减震效应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(1): 128-137.
LIU Fangcheng, YAO Yuwen, WU Mengtao, et al. Isolating effects of rubber sand mixture cushion at different categorized sites [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(1): 128-137.
- [5] 祝梦凡, 罗超, 王昊, 等. 不同混合比橡胶砂动力性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2022, 38(3): 153-161.
ZHU Mengfan, LUO Chao, WANG Hao, et al. Experimental study on dynamic performance of rubber-sand with different proportion [J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(3): 153-161.
- [6] O'SHAUGHNESSY V, GARGA V K. Tire-reinforced earthfill. Part 2: pull-out behaviour and reinforced slope design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1): 97-116.
- [7] 李博, 黄茂松. 掺有橡胶粉末砂土液化特性的动三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1343-1349.
LI Bo, HUANG Maosong. Dynamic triaxial tests on liquefaction characteristics of rubber-sand mixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1343-1349.
- [8] 熊伟, 曾庆豪, 尚守平, 等. 新型岩土隔震系统试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增刊2): 39-45.
XIONG Wei, ZENG Qinghao, SHANG Shouping, et al. Experimental study on innovative geotechnical seismic isolation system [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(Suppl. 2): 39-45.
- [9] EHSANI M, SHARIATMADARI N, MIRHOSSEINI S M. Shear modulus and damping ratio of sand-granulated rubber mixtures [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(8): 3159-3167.
- [10] MASHIRI M S, VINOD J S, SHEIKH M N. Liquefaction potential and dynamic properties of sand-tyre chip (STCh) mixtures [J]. Geotechnical Testing Journal, 2016, 39(1): 69-79.
- [11] BRUNET S, DE LA LLERA J C, KAUSEL E. Non-linear modeling of seismic isolation systems made of recycled tire-rubber [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 85: 134-145.
- [12] DING Y, ZHANG J S, CHEN X B, et al. Experimental investigation on static and dynamic characteristics of granulated rubber-sand mixtures as a new railway subgrade filler [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121955.
- [13] PAMUKCU S, AKBULUT S. Thermoelastic enhancement of damping of sand using synthetic ground rubber [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(4): 501-510.
- [14] 李丽华, 肖衡林, 唐辉明, 等. 轮胎颗粒混合土动力特性参数影响规律试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 359-364.
LI Lihua, XIAO Henglin, TANG Huiming, et al. Dynamic properties variation of tire shred-soil mixtures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 359-364.
- [15] PROMPUTTHANGKOON R, HYDE A. Compressibility and liquefaction potential of rubber composite soils [C]// International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials: Opportunities and Challenges. Bangkok, Thailand: [S. n.], 2007.
- [16] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程抗震设计规范(2009年版): GB 50111-2006 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [17] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [18] 蒋红光. 高速铁路板式轨道结构一路基动力相互作用及累积沉降研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [19] 张鲁渝, 刘东升, 时卫民. 扩展广义 Drucker-Prager 屈服准则在边坡稳定分析中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 216-219.
ZHANG Luyu, LIU Dongsheng, SHI Weimin. Application of the extended general Drucker-Prager yield criterion to slope stability analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 216-219.
- [20] LUO C, LOU M L, GUI G Q, et al. A modified domain reduction method for numerical simulation of wave propagation in localized regions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 18(1): 35-52.