刘泽,徐楚东,严文钦,等.加筋与水泥改良对粉土路基抗震性能的影响试验研究[J].地震工程学报,2026,48(5):1095-1103.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240719002

LIU Ze,XU Chudong,YAN Wenqin,et al.Experimental study on the influence of reinforcement and cement improvement on the seismic performance of silt subgrade[J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(5):1095-1103.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240719002

加筋与水泥改良对粉土路基抗震性能的影响试验研究

刘 泽[1],徐楚东[1],严文钦[1],苏卫卫[2],李吉刚[2]

(1.湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201

2.中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710075)

摘要:为验证高抗震设防区采用粉土填筑路基的可行性及有效处治措施,设计并制作素粉土、加筋粉土及4%水泥改良粉土三组路基模型,开展振动台试验,对比分析其破坏特征与动力响应规律,提出抗震性能提升对策。试验表明:素粉土路基在地震加速度峰值达0.25g后逐步开裂、破碎并发生沉陷破坏;加筋粉土与4%水泥改良粉土路基抗震性能更优,分别加载至0.325g与3.5g时仅出现裂缝,整体结构保持完好。三组路基加速度放大系数均随地震荷载增大而降低,动土压力呈非线性增大;路基开裂损伤后,加速度放大系数显著减小,动土压力出现衰减。工程实践表明,在保证施工质量前提下,采用素粉土填筑路基可满足抗震设防要求;加筋处理与水泥改良均能有效提升抗震性能,建议在抗震设防要求较高的地区优先选用。

关键词:地震荷载;粉土路基;加筋;水泥改良;振动台试验

中图分类号:TU472 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1095-09

DOI:10.20000/j.1000-0844.20240719002

Experimental study on the influence of reinforcement and cement improvement on the seismic performance of silt subgrade

LIU Ze[1], XU Chudong[1], YAN Wenqin[1], SU Weiwei[2], LI Jigang[2]

(*1.School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;*

2.China Communications Fist Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: To verify the feasibility and effectiveness of using silt as subgrade fill in regions with high seismic fortification requirements, three model types were designed and fabricated: plain silt subgrade, reinforced silt subgrade, and 4% cement-improved silt subgrade. The failure characteristics and dynamic response patterns of the three schemes were investigated through shaking table tests, and measures to enhance the seismic performance of silt subgrade in high seismic fortification areas were

收稿日期:2024-07-19

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2022JJ20357);湖南省教育厅重点科研项目(23A0368)

第一作者简介:刘 泽(1975-),男,博士,教授,主要从事边坡与支挡结构的研究。E-mail:csuzeliu@163.com。

explored. The results indicate that the plain silt subgrade progressively underwent cracking, crushing, and subsidence failure after the peak seismic acceleration reached 0.25g. Both the reinforced silt subgrade and the 4% cement-improved silt subgrade exhibited superior seismic resistance. When the loading on the reinforced silt subgrade reached 0.325g, and that on the 4% cement-improved silt subgrade reached 3.5g, cracks appeared in both models, yet they maintained good structural integrity. The acceleration amplification factor within the three subgrade models decreased with increasing seismic load, whereas the dynamic earth pressure increased nonlinearly with increasing load. When cracks and damage appeared in the subgrade, the acceleration amplification factor decreased markedly, and the dynamic earth pressure also decayed. Provided that construction quality is ensured, using plain silt for subgrade filling can satisfy seismic fortification requirements. Reinforcement and cement improvement are effective approaches for enhancing the seismic performance of silt subgrade and can be prioritized in regions with high seismic fortification demands.

Keywords: seismic loading; silt subgrade; reinforcement; cement improvement; shaking table test

0 引言

地震是全球破坏力极强的自然灾害之一。据统计,20世纪以来,我国地震灾害已造成超60万人遇难,地震及其次生灾害引发的经济损失更是难以估量[1]。公路工程属于带状线性构筑物,覆盖范围广、区域跨度大,不仅自身抗震能力弱、易受地震破坏,其震后通行能力还直接决定应急抢险与抗震救灾工作的推进效率[2]。粉土在我国分布范围广泛,普遍存在颗粒级配差、静动力强度低、压实性能差等工程缺陷,且地震作用下易发生液化破坏[3-4]。受就地取材的建设原则影响,我国大量公路路基采用粉土填筑。我国地处地震多发区域,地震活动频繁,因此,保障粉土路基的抗震稳定性与服役安全性,是道路交通工程建设领域非常重视的关键问题。为保障粉土路基整体工程服役性能,国内外学者已从多维度开展系统性研究。部分学者认为,改善粉土压实特性是提升路基整体强度的核心关键。Li[5]针对粉土压实特性开展系列试验研究,推导建立了可表征粉土压实变化规律的拟合方程;申爱琴等[6]以及彭中浩等[7]基于粉土振动压实试验,揭示了粉土压实机理与传统土体压实理论的显著差异,提出宜采用振动压实工艺管控粉土路基压实质量。

另有学者从土体结构改良角度出发开展相关研究。朱永等[8]、宋修广等[9]采用石灰、水泥单一固化剂改良粉土,试验结果表明,改良后粉土的结构稳定性、水稳性与力学强度均得到显著提升;文献[10-14]研究证实,适量木质素掺入可有效改良粉土工程性质,且相较于石灰、水泥改良方案,木质素改良兼具耐久性优、生态环保等优势。除固化改良外,加筋处置也是路基工程常用的加固技术手段。张鹏等[15]探究了土工格栅加筋对粉土力学强度及路基抗变形能力的提升机制;杨广庆等[16]依托粉土路基土工格栅加筋现场试验,结合工程实际,明确了路基填筑高度、格栅布设形式的优化设计建议;杨建琳等[17]以废旧布料为新型加筋材料,通过对比加筋前后粉土抗剪强度变化,验证了块状废旧布料层铺填筑方式可有效增强局部荷载作用下粉土路基的承载能力。在粉土及其路基动力特性研究领域,Peng等[18]借助动三轴试验,分析了粉土动弹性模量与阻尼比的变化规律,结果表明:围压增大、饱和度降低会使粉土动弹性模量升高,阻尼比随之减小。吴遥杰等[19]通过动三轴试验,探究了间歇循环荷载作用下粉土路基的动力响应规律与累积变形发展特征;耿大新等[20]开展降雨入渗与交通荷载耦合作用下的粉土路基模型试验;蔡迎春等[21]分析了飞机动荷载作用下粉土路基的动力响应,指出粉土路基设计需充分重视动荷载的不利影响。

现有研究已为粉土路基工程性能优化奠定理论基础,但针对地震荷载作用下的路基响应研究仍较为匮乏。鉴于此,本文制备素粉土路基、土工格栅加筋粉土路基、4%水泥改良粉土路基三组试验模型;通过振动台试验,对比分析不同处置方案下路基的震损破坏特征与动力响应演化规律,探讨高抗震设防区粉土路基抗震性能的提升技术,以期为同类路基工程抗震设计提供理论参考与实践依据。

1　粉土路基试验模型

1.1　方案设计

濮卫高速滑卫段起点设于河南省滑县留固镇东南，终点至卫辉市司湾村东南的卫辉北收费站，路线总长 59.034 km。项目区地处平原地貌，地表广泛分布粉土层。依据参考文献[18]论述可知，区域抗震设防烈度为Ⅶ度、Ⅷ度，对应设计基本地震加速度分别为 0.1g 与 0.2g，属于强震影响区域。由于项目沿线优质填筑材料匮乏，路基只得就地取材，采用天然粉土填筑。

为保障粉土路基抗震稳定性，本文选取该工程 ZK45+460.1 断面作为原型开展模型试验设计（图 1）。结合路基结构对称性，将试验模型简化为半路堤形式，如图 1 中(b)～(c)所示。模型由地基与路基两部分组成：地基采用素粉土填筑，压实度控制不低于 90%；路基设置三种对比方案，即素粉土路基、4% 水泥改良粉土路基及土工格栅加筋粉土路基。三种路基方案均遵循工程实际，自上而下依次设置 96%、94%、93% 三级压实度分区；加筋路基按筋土比 $l:h$ 为 0.8:1 确定格栅铺设长度，共布设 4 层土工格栅，层间距 10 cm。试验以几何尺寸、材料密度、加速度为核心控制指标，推导确定模型相似关系，主要相似参数如表 1 所列。

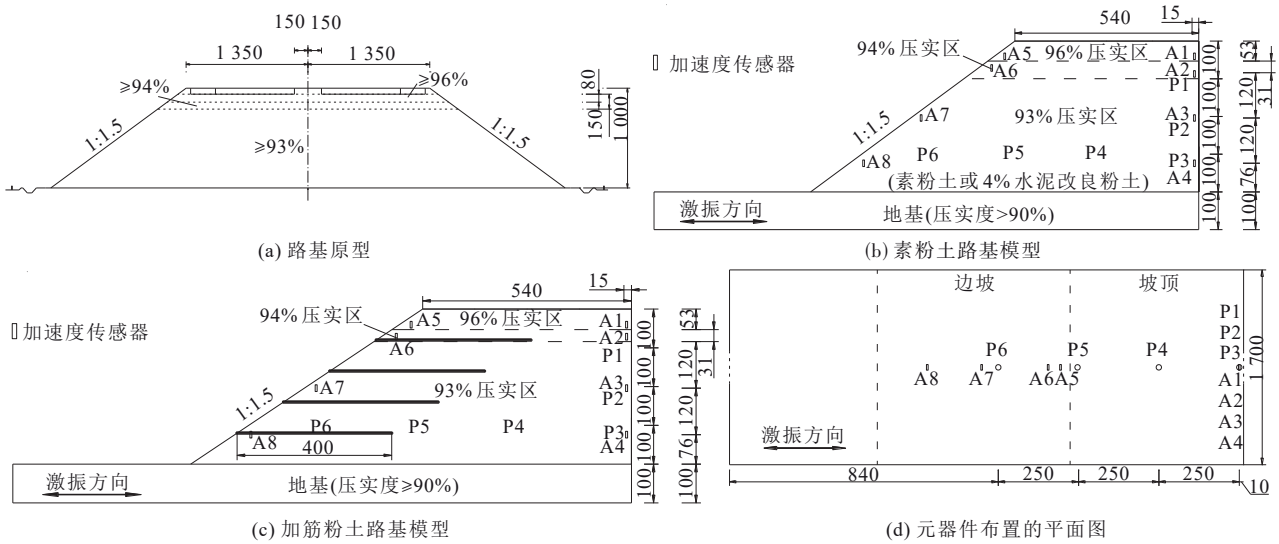


图 1　试验模型与元器件布置图（单位：mm）

Fig. 1　Layout of test model and components (unit: mm)

表 1　模型的相似系数

Table 1　Similarity coefficients of the model

物理量	符号及关系式	相似系数
几何尺寸 l	C_l	25
密度比 ρ	C_ρ	1
侧压力系数 K	C_K	1
输入加速度 a	C_a	1
质点加速度 $\ddot{u}$	$C_{\ddot{u}}$	1
黏聚力 c	$C_c=C_\rho C_l$	25
内摩擦角 φ	C_φ	1
应变水平 $\gamma/\bar{\gamma}$	$C_{\gamma/\bar{\gamma}}=1$	1
时间 t	$C_t=C_\rho^{-1/4}C_l^{3/4}$	11.18
频率 f	$C_f=C_\rho^{-1/4}C_l^{-3/4}$	0.089
阻尼比 λ	$C_\lambda=1$	1

1.2　试验材料

试验用土取自依托工程施工现场，其级配曲线和基本物理力学参数分别如图 2 所示和表 2 所列。土工格栅（图 3）的基本力学参数列于表 3。试验用水泥为普通硅酸盐水泥（型号：P.O32.5R），掺量为 4%。

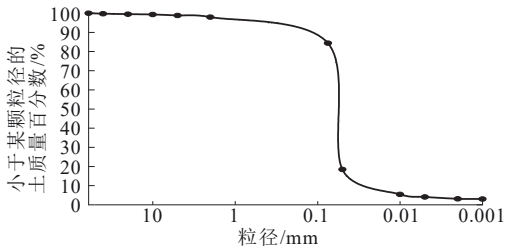


图 2　粉土的级配曲线

Fig. 2　Grain size distribution curve of silt

1.3　试验装置与加载方案

本次试验依托湖南科技大学四联阵振动台开展，振动台台面尺寸为 1 m×1 m（边长），工作频率

表 2 粉土的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of silt

指标	参数	指标	参数
最大干密度/(g/cm^3)	1.74	最佳含水率/%	12
加州承载比CBR/%	10.1	黏聚力/kPa	4.8
内摩擦角/(°)	17.7	液限/%	27
塑限/%	21	塑性指数/%	6
不均匀系数	1.9	曲率系数	1.77

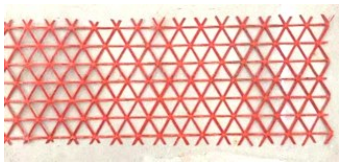


图 3 土工格栅

Fig. 3 Geogrid

表 3 土工格栅的力学参数(单位:kN/m)

Table 3 Mechanical parameters of geogrid(unit:kN/m)

2% 伸长率下的强度	5% 伸长率的强度	极限抗拉强度
6	13	30

区间 0.1～50 Hz。为削弱模型箱边界的地震波反射效应,试验定制了剪切式模型箱,结构形式如图 4 所示。模型箱由多组剪切框架拼装而成,各框架底部均配置滚轮,可沿路基横断面方向自由滑移,实现同步剪切变形。



图 4 剪切变形模型箱

Fig. 4 Shear deformation model box

试验模型采用质量控制法、人工夯实的方式分层填筑制作。元器件和数据采集设备的参数列于表 4,并在制作过程中按表 5 所列进行了加速度计和动土压力盒等元器件的埋设。图 5 所示为制作完成后的路基模型照片(三个模型的外观相同)。

综合考量汶川地震的典型性与工程影响力,试验选取汶川地震波作为输入地震动。试验输入波形与频谱特性如图 6 所示。试验采用水平单向激振模式,通过调控加速度峰值实现不同强度地震荷载

表 4 试验元器件和数据采集设备的参数

Table 4 Parameters of experimental components and data acquisition equipment

序号	元器件名称	型号	误差	数量
1	加速度传感器	CA-YD-188GF	＜0.2%F.S	16
2	电阻应变式动土压力盒	DYB-1	＜0.8%F.S	6
3	动态采集仪	优泰uT8916FRS-DY	-	1
4	加速度采集仪	IMC CS-5008-N	-	1

表 5 试验加载方案

Table 5 Test loading protocol

序号	工况代号	PGA/g	序号	工况代号	PGA/g
1	WC-1	0.025	8	WC-8	0.2
2	WC-2	0.05	9	WC-9	0.225
3	WC-3	0.075	10	WC-10	0.25
4	WC-4	0.1	11	WC-11	0.275
5	WC-5	0.125	12	WC-12	0.3
6	WC-6	0.15	13	WC-13	0.325
7	WC-7	0.175	14	WC-14	0.35



图 5 路基模型

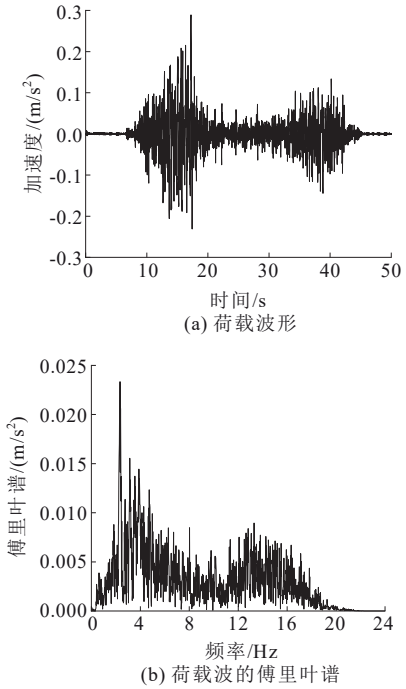
Fig. 5 Subgrade model

的分级加载,具体加载方案如表 5 所列。各级地震荷载施加前,均输入峰值加速度为 0.025g 的平稳高斯白噪声,用以监测模型结构模态参数的变化规律。

2 试验结果与分析

2.1 路基的破坏形式

图 7 为地震荷载作用下素粉土路基的破坏过程照片。当峰值地面加速度(Peak Ground Acceleration,PGA)达到 0.25g 时,路基顶部出现了两条纵向裂缝,将模型顶部分割成三个区[图 7(a)];随荷载继续增加,裂缝逐渐扩展,宽度逐渐加大,在裂缝的两侧出现碎块状土体,且区块间出现差异沉降[图 7(b)];当地震荷载增到 PGA=0.3g 时,裂缝进一步发育,模型出现更多的裂缝,路基顶面碎裂程度加剧,并呈现



(a) 荷载波形

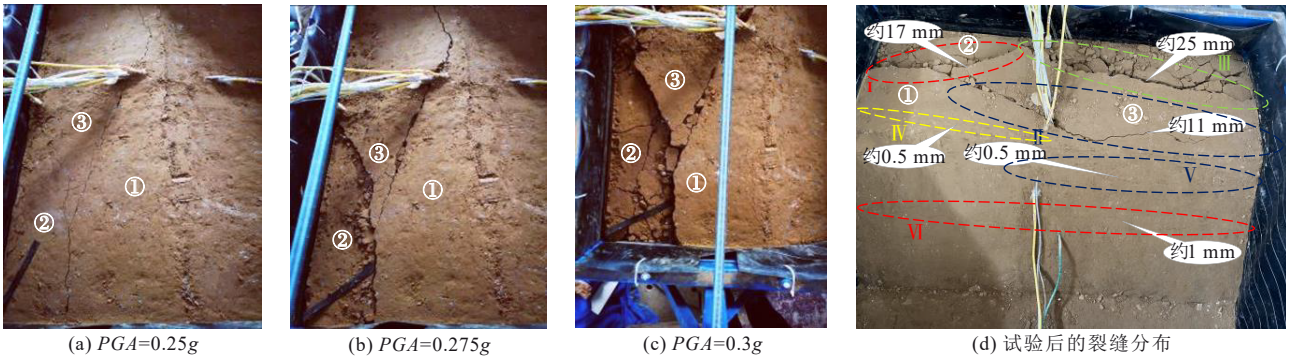
(b) 荷载波的傅里叶谱

图 6　地震荷载波形图

Fig. 6　Waveforms of seismic loading

出明显的沉陷破坏[图 7(c)]；加载结束后 $PGA=0.35g$，模型顶部出现严重破裂、沉陷，最大裂缝宽度达 25 mm，路基边坡侧也出现了两条纵向裂缝[图 7(d)]。进一步对比图 7 中裂缝划分的三个区域演变特征可知：随着地震荷载持续增大，②区土体沉陷程度不断加剧；伴随③区裂缝进一步发育扩展，路基中线附近土体沉降现象更为显著。相较之下，路基边坡一侧的①区整体呈现小幅抬升趋势。综上，地震荷载作用下素粉土路基的典型破坏模式表现为路基中部沉陷、边坡侧向抬升。

图 8、图 9 分别为加载结束后，加筋粉土路基与水泥改良粉土路基的裂缝分布特征。首先分析加筋粉土路基试验结果(图 8)：当地震荷载峰值增至 $PGA=0.325g$ 时，路基顶面与坡面均发育 1 条纵向细微裂缝；荷载进一步提升至 $PGA=0.35g$，既有裂缝宽度增大、发育更显著，全程无新生裂缝产生。路基整体平整度良好，未出现沉降变形与结构破损，其破坏模式以滑移破坏为主。



(a) $PGA=0.25g$　(b) $PGA=0.275g$　(c) $PGA=0.3g$　(d) 试验后的裂缝分布

图 7　地震荷载下素粉土路基的裂缝发展与分布

Fig. 7　Development and distribution of cracks in plain silt subgrade under seismic loading

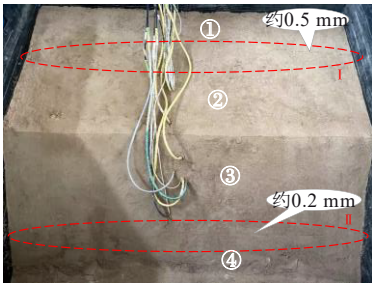


图 8　试验后加筋粉土路基的裂缝分布

Fig. 8　Distribution of cracks in reinforced silt subgrade after testing

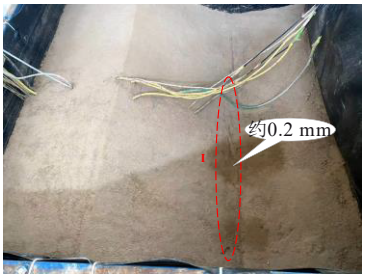


图 9　试验后水泥改良粉土路基的裂缝分布

Fig. 9　Distribution of cracks in cement-improved silt subgrade after testing

针对水泥改良粉土路基(图 9)：在荷载峰值逐步提升至 $PGA=0.325g$ 的过程中，路基结构保持完整，表面无裂缝发育；当荷载增大至 $PGA=0.35g$ 后，路基坡脚处产生一条纵向细微裂缝，裂缝长度约为模型总长的 1/2，破坏模式与加筋粉土路基基本一致，同样以滑移破坏为主要特征。

综上可知，素粉土路基可满足依托工程基本抗震设防要求，但在高等级地震荷载作用下，易发生显著沉降与结构破碎，进而诱发路面损毁，严重影响道路正常服役功能。采用加筋处治可有效增强粉土路基整体性，显著提升其强震作用下的抗灾能力；掺入4%水泥进行改良后，路基抗震性能可得到进一步优化。同时，相较于素粉土路基，加筋、水泥改良两种处置方式也显著改变了路基的整体破坏特征。

2.2 路基加速度响应

以振动台的台面加速度响应峰值为基准，计算不同工况下路基内各测点的加速度放大倍数。图10为三组模型内各测点加速度放大倍数的发展曲线。由图10可知，随着地震荷载增大，三组模型内部的加速度放大倍数总体上都呈现递减趋势。这是由于：随着地震荷载逐渐增加，路基内部的剪切应变逐渐增大，路基刚度出现减小，而土体阻尼效应增强；这种阻尼效应的增强具有滤波作用，能够吸收部分地震能量，从而抑制地震加速度在土体中的传递，造成加速度放大倍数呈现出递减趋势。由图10可知，对于素粉土路基和加筋粉土路基，当模型出现裂缝时，各测点的加速度放大倍数均出现显著降低。

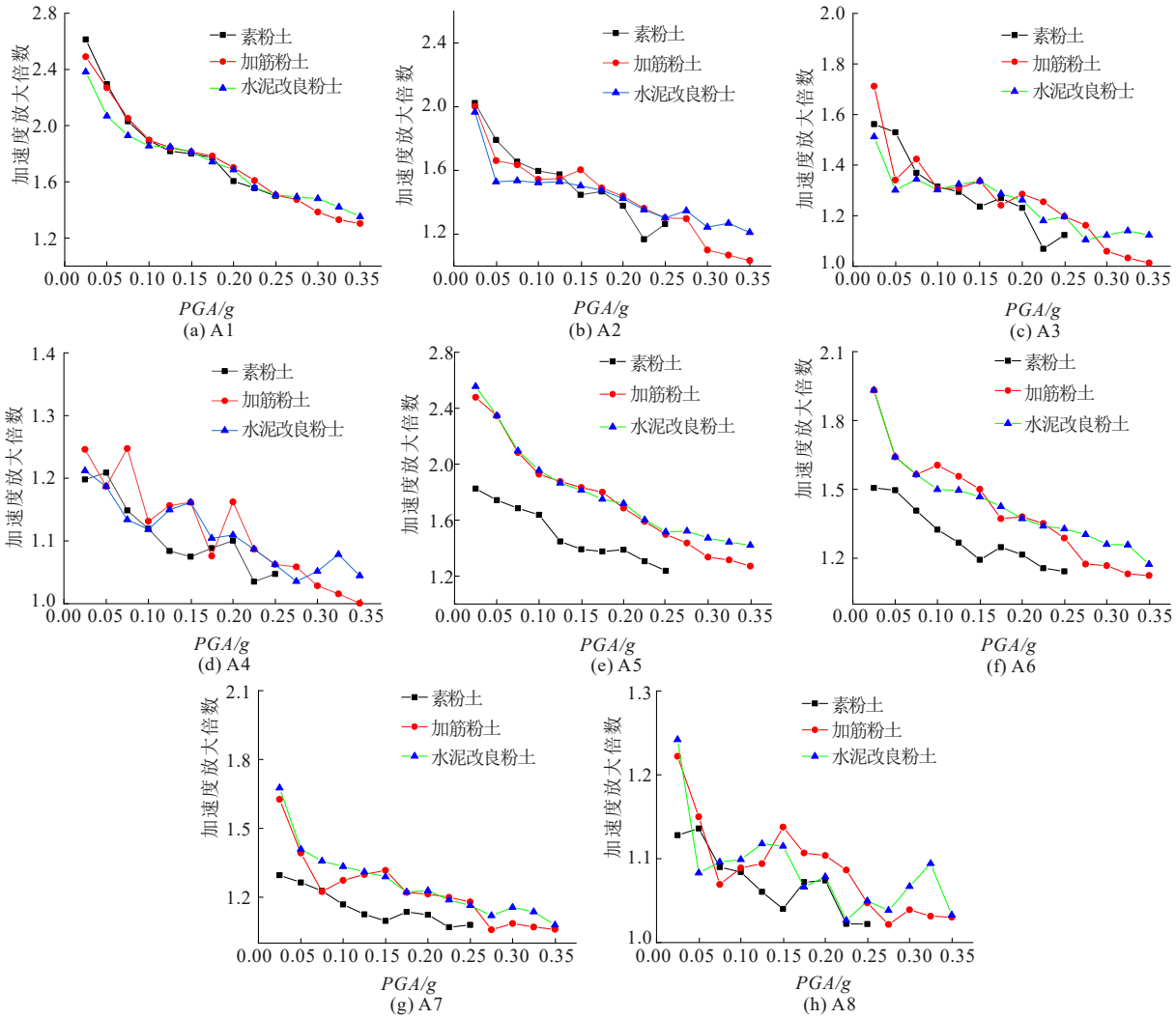


图10 三组模型内部的加速度响应发展曲线

Fig. 10 Acceleration response development curves inside the three models

结合模型的地震裂缝发展过程分析可知，在地震加速度峰值达到$PGA=0.25g\sim0.3g$时，素粉土路基出现了大量裂缝，路基结构受到严重损伤，从而导致加速度放大倍数显著减小。加筋粉土路基在地震加速度峰值达到$PGA=0.35g$时，贯通裂缝的出现可导致加速度放大倍数降低。由此表明，路基结构损伤会显著削弱土体内部的加速度传递效能。水泥改良粉土路基整体完整性更好、结构稳定性更强，因此加速度放大系数整体高于另外两组模型；尤其在素粉土路基与加筋粉土路基相继产生开裂损伤后，水

泥改良路基各测点的加速度放大优势更为突出。

将实测加速度时程曲线进行傅里叶变化后可得到模型的频谱图。图 11 为 $PGA=0.05g$ 时加筋粉土路基内 A5 测点的频谱曲线（其他测点和工况下的变换结果类似）。图 11 中有两个显著的频谱峰值，前一个较大的峰值称为主卓越频率，后一个峰值称为次卓越频率。对三组路基在不同峰值地震荷载下的卓越频率及其占比进行了统计，结果如图 12 所示。由图 12 可知，三组路基模型的加速度主卓越频率都保持在 2 Hz 左右，接近输入地震荷载的主频率（2 Hz）。次卓越频率响应高于地震加载波的次卓越频率，并且随着地震荷载的增加，次卓越频率逐渐趋近于初始地震荷载的次卓越频率（12.5 Hz）。在这一趋势中，加筋土路基和水泥改良土路基的变化要比素粉土路基更为显著。

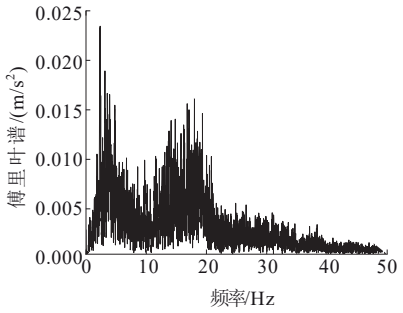


图 11　输入加速度的频谱曲线

Fig. 11　Frequency spectral curve of input acceleration

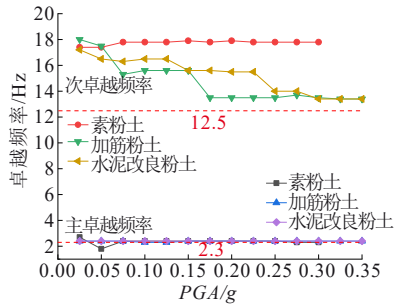


图 12　加速度响应的频谱特征分布

Fig. 12　Distribution of frequency spectral characteristics of acceleration response

2.3　路基动土压力响应规律

图 13 为三组模型内动土压力峰值的发展曲线。由于素粉土路基模型开裂、沉陷破坏后，其内部动土压力测量值出现失真，因此，图中素粉土路基的动土压力峰值只有 $PGA<0.25g$ 时的数据。对比可知，地震荷载作用下，三组模型内各测点的动土压力发展有基本相同的特征：随着地震荷载逐步提高，三组模型内部的动土压力峰值均呈递增趋势；且当地震荷载较小时（$PGA<0.1g$），三组模型的动土压力峰值基本相同；随着荷载不断增加，地震能

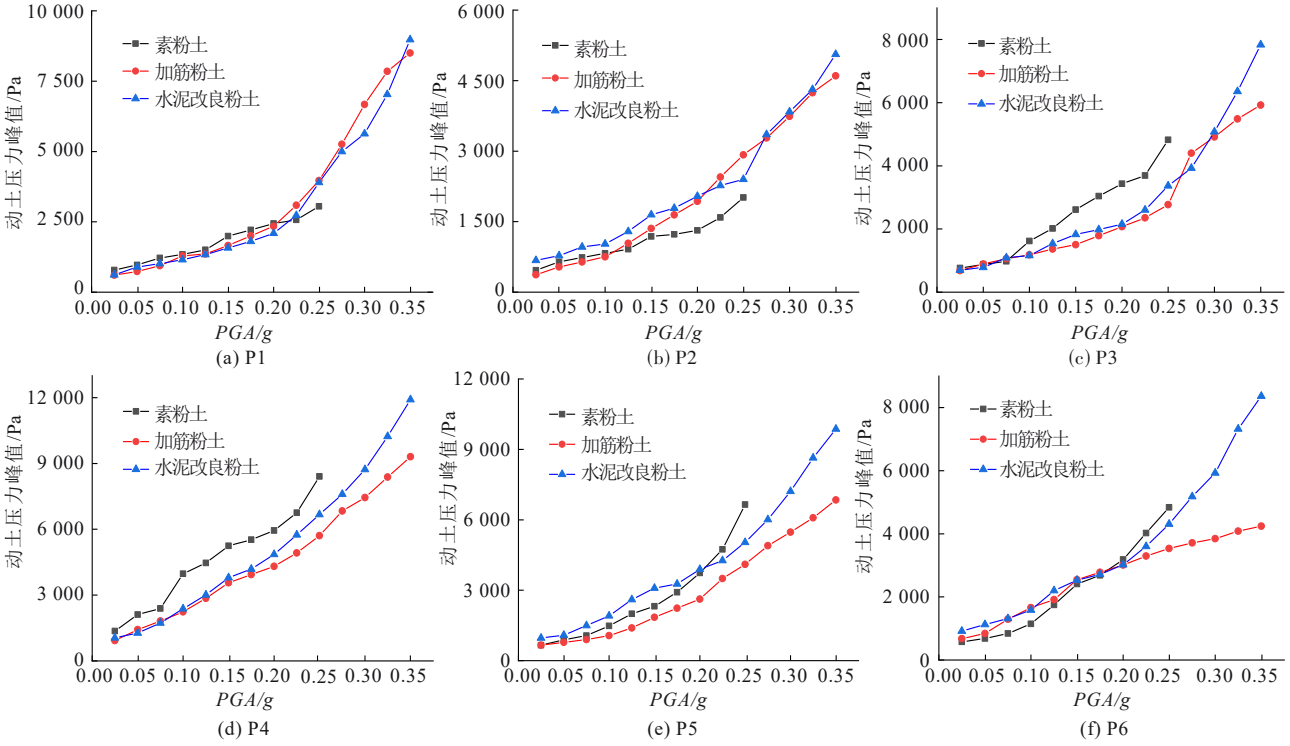


图 13　三组模型内部的动土压力发展曲线

Fig. 13　Development curves of dynamic earth pressure inside the three models

量增大，三组模型的动土压力峰值增速率加大，曲线呈非线性升高形态；当素粉土路基模型和加筋粉土路基模型出现开裂损伤后（分别为0.25g、0.35g），除P1测点外，水泥改良粉土路基内的动土压力峰值明显高于其他两组。

3 讨论

受震后路基病害相对容易抢修的影响，我国现行公路工程的抗震设计以桥梁为主，对于路基的抗震性能多通过选线时绕避不良地质条件区或设计时进行地基处理、放缓边坡坡率等方法来保证。但作为带状工程的公路工程很难完全绕避不良地质区。国内外的大量地震灾害也充分表明，高烈度地震后路基的损毁现象非常严重，其抢修恢复带来的时间和经济损失非常大。随着时代的发展，工程建设的理念也在变化，在设计时充分考虑路基的抗震性能非常必要。

粉土动力性能的已有研究[22-23]表明，粉土的动力特性与其密实度、固结压力等因素相关，动荷载下粉土内的孔压有累积现象，当地震荷载峰值大于0.1g时粉土就有可能出现液化现象，当地震荷载峰值达到0.2g时，粉土构筑物就可能发生拉裂破坏。上述振动台试验的结果进一步表明，随着地震荷载增加，素粉土路基模型会产生裂缝并逐渐延伸、扩宽，随后路基顶面出现严重破碎、沉陷。这主要是由于素粉土抗剪强度低、颗粒间黏结性差，而且粉土在动荷载下易产生位移甚至液化，从而造成路基的整体性差，抗震能力低，容易发生裂缝和破坏。当在路基中加铺土工格栅形成加筋粉土路基后，加筋土结构可以显著提高路基的整体强度和延性，从而抑制了土体的裂缝扩展；同时，筋材还能够吸收和分散荷载能量，抑制路基内部的剪切行为。因此，在地震作用下，加筋粉土路基能够表现比素粉土路基更高的整体性、抗裂性，确保路基在高地震荷载下仍具有良好的完整性。而在粉土中掺入适量的水泥对粉土进行改良时，水泥通过胶凝作用将颗粒较小的粉土胶结成大体积的团体、板体，从而显著提高土体的抗剪强度和结构刚性；这种胶结作用不仅可以有效抑制液化现象的发生，而且在地震荷载下使土体表现出更强的抗震能力。

综上所述，土工合成材料加筋和水泥改良可以有效提高粉土路基的抗震性能。而这两种技术都是岩土工程中常用的技术，不仅施工简便而且经济性好，在无需抗震设防的地区都得到广泛应用。因此，在高烈度地区的道路建设中，这两种路基处治方法值得优先考虑。

4 结论

本文设计并制作了素粉土路基、加筋粉土路基和水泥改良粉土路基等三组模型，开展了振动台模型试验，分析了三种方案下路基的破坏规律和动响应特性。主要结论有：

（1）素粉土路基模型在地震荷载加速度峰值加载到0.25g后逐渐出现开裂、破碎、沉陷式破坏；而加筋粉土路基模型和4%水泥改良粉土路基模型具有更高的抗震能力，且当地震荷载加速度峰值分别达到0.325g和0.35g后模型虽然也产生有裂缝，但路基模型仍保持有良好的完整性。

（2）3种路基模型内的加速度放大倍数均随地震荷载的增加呈递减趋势，且当路基内出现裂缝损伤后，模型的加速度放大倍数会显著减小。

（3）地震荷载下3组路基模型内的动土压力有相同的发展规律，均随地震荷载加速度峰值的增加非线性增大；当模型出现开裂损伤后，动土压力会出现减小趋势。

（4）在严格控制施工质量的前提下，依托工程采用素粉土填筑路基可以满足工程抗震设防要求。但从试验结果看到，在高抗震设防地区若采用加筋和水泥改良等方式对粉土路基进行处治，路基会有更卓越的抗震性能，二者均为行之有效的路基抗震性能提升方案。

参考文献（References）

[1] 尹超，刘菲菲，张敬磊. 西安－宝鸡高速公路地震危险性评价[J]. 地震工程与工程振动，2017，37(2)：181-188.
YIN Chao，LIU Feifei，ZHANG Jinglei. Seismic hazard assessment of Xi'an－Baoji expressway[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics，2017，37(2)：181-188.

[2] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程抗震规范：JTG B02—2013[S]. 北京：人民交通出版社，2014.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specification of seismic design for highway engineering：JTG B02—2013[S]. Beijing：China Communications Press，2014.

[3] 谈云志，吴翩，郑爱，等. 高液限粉土的承载比特性及其利用建议[J]. 土木工程学报，2012，45(8)：166-169.
TAN Yunzhi，WU Pian，ZHENG Ai，et al. The CBR characteristics and utilization of high liquid limit silts[J]. China Civil Engineering Journal，2012，45(8)：166-169.

[4] 武科，马国梁，马明月，等. 公路路基粉土工程特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2009，40(6)：1724-1731.
WU Ke，MA Guoliang，MA Mingyue，et al. Experimental

study on engineering property of silt soil filled in foundation of highway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(6): 1724-1731.

[5] LI H. The family of compaction curves for fine-grained soils and their engineering behavior[D]. Edmonton: University of Alberta, 2001.

[6] 申爱琴，郑南翔，苏毅，等. 含砂低液限粉土填筑路基压实机理及施工技术研究[J]. 中国公路学报，2000，13(4)：12-15.
SHEN Aiqin, ZHENG Nanxiang, SU Yi, et al. Study of compacting mechanism and construction technology of filling road bed with bearing sand silt of low liquid limit[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4): 12-15.

[7] 彭中浩，陈永辉，陈庚，等. 真空降水联合强夯法加固粉土路基的研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版)，2015，32(2)：47-51.
PENG Zhonghao, CHEN Yonghui, CHEN Geng, et al. Experimental research on dynamic consolidation method combined with vacuum well point dewatering to reinforcesilt subgrade[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2015, 32(2): 47-51.

[8] 朱永，宗旭辉. 粉质土的土质特性及处治方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2013，32(2)：220-223.
ZHU Yong, ZONG Xuhui. Characteristics and treatment measures of silt soil[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2013, 32(2): 220-223.

[9] 宋修广，张瑜洪，张海忠，等. 黄泛区粉土路基强度衰减对路面结构的影响分析[J]. 公路交通科技，2010，27(5)：30-35.
SONG Xiuguang, ZHANG Yuhong, ZHANG Haizhong, et al. Analysis on pavement structure performance influenced by strength degradation of silt subgrade in Yellow River inundated area[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(5): 30-35.

[10] 刘松玉，张涛，蔡国军. 工业废弃木质素固化改良粉土路基技术与应用研究[J]. 中国公路学报，2018，31(3)：1-11.
LIU Songyu, ZHANG Tao, CAI Guojun. Research on technology and engineering application of silt subgrade solidified by lignin-based industrial by-product[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(3): 1-11.

[11] 张涛，蔡国军，刘松玉，等. 工业副产品木质素改良路基粉土的微观机制研究[J]. 岩土力学，2016，37(6)：1665-1672.
ZHANG Tao, CAI Guojun, LIU Songyu, et al. Research on stabilization microcosmic mechanism of lignin based industrial by-product treated subgrade silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1665-1672.

[12] ZHANG T, LIU S Y, CAI G J, et al. Experimental investigation of thermal and mechanical properties of lignin treated silt[J]. Engineering Geology, 2015, 196: 1-11.

[13] ZHANG T, CAI G J, LIU S Y, et al. Engineering properties and microstructural characteristics of foundation silt stabilized by lignin-based industrial by-product[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(7): 2725-2736.

[14] CAI G J, ZHANG T, LIU S Y, et al. Stabilization mechanism and effect evaluation of stabilized silt with lignin based on laboratory data[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, 34(4): 331-340.

[15] 张鹏，杨恒卫，吴咪咪，等. 粉土路基坡面复合面层护坡技术的面层材料特性[J]. 中国公路学报，2018，31(3)：12-21.
ZHANG Peng, YANG Hengwei, WU Mimi, et al. Surface material properties of slope surface protection technology with composite layers in silt subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(3): 12-21.

[16] 杨广庆，王昕，王锡朝，等. 软土地区桩承式加筋路堤力学行为现场试验研究[J]. 岩土工程学报，2022，44(11)：2089-2096.
YANG Guangqing, WANG Xin, WANG Xichao, et al. Field tests on mechanical behavior of pile-supported embankment in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(11): 2089-2096.

[17] 杨建琳，刘中涛，曹林涛. 布块加筋粉土的抗剪性能分析[J]. 建材世界，2012，33(4)：121-123.
YANG Jianlin, LIU Zhongtao, CAO Lintao. Analysis on anti-shear performance of used clothing reinforced silty soil[J]. The World of Building Materials, 2012, 33(4): 121-123.

[18] PENG F, LI M Y, LI Y H, et al. Dynamic modulus and damping ratio characteristics of unsaturated silt in the Yellow River flood field[J]. Journal of Central South University, 2024, 31(1): 237-249.

[19] 吴遥杰，周浩东，宫全美. 间歇循环荷载下粉土路基动力特性及累积变形研究[J]. 华东交通大学学报，2022，39(4)：1-9.
WU Yaojie, ZHOU Haodong, GONG Quanmei. Study on dynamic characteristics and accumulative deformation of silty subgrade soil under intermittent cyclic loading[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(4): 1-9.

[20] 耿大新，孟成，王俊，等. 降雨入渗及交通荷载耦合作用下对粉土路基的影响分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2022，41(6)：98-104，112.
GENG Daxin, MENG Cheng, WANG Jun, et al. Coupling influence of rainfall infiltration and traffic load on silt roadbed[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2022, 41(6): 98-104, 112.

[21] 蔡迎春，郑元勋，刘忠玉，等. 飞机荷载作用下粉砂土路基动力响应研究[J]. 岩土力学，2012，33(9)：2863-2868.
CAI Yingchun, ZHENG Yuanxun, LIU Zhongyu, et al. Study of dynamic response of silty sand subgrade loaded by airplane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2863-2868.

[22] 杨琳，何亚伯. 循环荷载下郑汴物流通道粉土路基的液化特性[J]. 武汉大学学报(工学版)，2016，49(4)：565-571.
YANG Lin, HE Yabo. Dynamic characteristics analysis of Zheng-Bian logistics channel silty soil based on dynamic triaxial test[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(4): 565-571.

[23] 郑元勋，黄静卿. 公路跑道粉砂土路基地震液化及稳定性研究[J]. 郑州大学学报(工学版)，2012，33(5)：61-65.
ZHENG Yuanxun, HUANG Jingqing. Seismic liquefaction and stability analysis of highway runway silt soil subgrade[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(5): 61-65.

(本文编辑：任　栋)