

加筋对粉土路基抗震性能的影响试验研究

刘泽¹, 罗佳晔¹, 严文钦^{1,2}, 黄振华¹

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410012)

摘要:为探究高抗震设防地区粉土路基处治措施的有效性,开展了素粉土路基和加筋粉土路基的振动台模型试验,在对比分析2组模型破坏特征与动响应规律的基础上,探讨了加筋对粉土路基抗震性能的影响机理。研究表明:试验素粉土路基在地震荷载加速度峰值加载到0.25 g后逐渐出现开裂、破碎和沉陷式破坏;在路基边坡侧加入4层土工格栅后,可有效提高粉土路基的抗震能力,当地震荷载加速度峰值加载到0.35 g后加筋粉土路基虽然也出现了裂缝,但路基仍能保持良好的完整性;地震荷载下加筋粉土路基和素粉土路基具有基本相同的加速度和动土压力响应规律,加速度放大倍数随路基高度的增加而非线性增大、随地震荷载的增加加速度放大倍数增幅减小,相同荷载下路基边坡侧的放大倍数较中心线侧大,但加筋粉土路基的差异较小;2组模型的动土压力均在路基高度方向上呈“两边大,中间小”的形态,在沿路基横断面方向上表现为路基中心线侧的动土压力大于边坡侧;受路基结构影响,地震荷载下加筋粉土路基的潜在破裂面会在加筋体末端和低压实度区内形成;加筋是提高路基抗震性能的有效措施。实际工程应用时筋材长度不应小于0.65H,并还应有足够的锚固长度。

关键词:粉土路基;加筋;振动台试验;动响应特性;潜在破裂面

中图分类号:U416.1⁺4

文献标志码:A

Experimental study on the effect of reinforcement on the seismic performance of silt subgrade

LIU Ze¹, LUO Jiaye¹, YAN Wenqin^{1,2}, HUANG Zhenhua¹

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

2. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410012, China)

Abstract: In order to investigate the effectiveness of treatment measures for silt subgrade in high seismic fortification areas, vibration table model tests were conducted on pure silt subgrade and reinforced silt subgrade. Based on a comparative analysis of the failure characteristics and dynamic response laws of the two models, the influence mechanism of reinforcement on the seismic performance of silt subgrade was explored. The experiment shows that after the peak acceleration of seismic load reaches 0.25 g, the experimental pure silt subgrade gradually experiences cracking, fragmentation, and sinking failure. After adding four layers of geogrids on the slope side of the subgrade, the seismic resistance of the silt subgrade can be effectively improved. When the peak acceleration of the seismic load is loaded to 0.35 g, although cracks also appear on the reinforced silt subgrade, the subgrade can still maintain good integrity. Under seismic loads, reinforced silt subgrade and pure silt subgrade have basically the same acceleration and dynamic soil pressure response rules. The acceleration amplification factor increases nonlinearly with the increase of subgrade height, and decreases with the increase of seismic load. Under the same load, the amplification factor on the slope side of the subgrade is larger than that on the centerline side, but the difference between reinforced silt subgrade is smaller. The dynamic soil pressure of both models shows a pattern of

收稿日期:2024-02-11; 修回日期:2024-04-14

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)

作者简介:刘泽(1975—),男,教授,博士,主要从事边坡支挡与加筋土技术方面的研究。E-mail:csuzeliu@163.com

“larger on both sides and smaller in the middle” in the height direction of the subgrade. In the direction of the subgrade cross-section, the dynamic soil pressure on the centerline side of the subgrade is greater than that on the slope side. Due to the influence of subgrade structure, the potential fracture surface of reinforced silt subgrade under seismic loads will form at the end of the reinforced body and within the low pressure compaction zone. Reinforcement is an effective measure to improve the seismic performance of silt subgrades. In practical engineering applications, the length of the reinforcement should not be less than $0.65H$, and there should also be sufficient anchoring length.

Key words: silt subgrade; reinforcement; shaking table test; dynamic response characteristics; potential fracture surface

0 引言

粉土在我国分布非常广泛。粉土不仅黏聚力小、强度低,而且压实性能和动力性能都比较差。当粉土被用作高抗震设防地区的高速公路路基填料时,如何保证路基具有足够的抗震性能是工程建设必须高度关注的问题。

现有粉土的动力性能研究^[1-5]表明,地震作用下粉土的响应特性与其密实度、固结压力等因素相关,路基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,粉土路基的路面、坡面和坡脚都可能发生拉裂破坏。WANG 等^[6]、YUAN 等^[7]的研究表明,粉土在低频和高频荷载下分别呈现出“硬化”和“软化”2种不同的液化特征,在强震作用下极易液化。为保证路基的质量,一些学者从如何提高粉土压实性能的角度开展研究,提出可采取机械组合碾压、振动压实和冲击压实^[8-10]等方法来控制粉土的压实度,安鸿飞等^[11]认为仅用压实度来控制粉土的压实质量有一定不足,提出用含气率作为粉土压实质量控制的第二指标。也有一些研究人员采用固化改良的方法来提高粉土的工程性能。如,刘松玉等^[12]将工业废弃木质素添加到粉土中并对其力学性能进行了测试,结果表明木质素改良后粉土的加州承载比(California bearing ratio, CBR)值和回弹弯沉值均有明显提高,木质素的最佳掺量在 12%左右;刘铭杰等^[13]以石灰和水泥为结合料开展了粉土改良试验,结果显示 2 种方法改良后的粉土均能达到高速公路路基填筑要求。刘璐璐^[14]将再生聚酯纤维掺入到粉土中,对纤维加筋粉土的结构、强度特性进行研究并建立了纤维加筋粉土的本构关系;杨建琳等^[15]则将废旧布料作为加筋材料,研究了布块加筋粉土的抗剪性能,认为废旧布料以块状层铺法植入路基中,可以提高局部荷载作用下路基的承载能力。张鹏等^[16]、高海军等^[17]研究了加筋土工格栅对粉土动力性能的影响,认为加筋能有效提高粉土的强度、限制路基的侧向位移。这些研究多从材料强度角度开展,对提高粉土路基的质量具有重要价值,但加筋后的粉土路基在地震荷载下的动响应规律与性能改善效果还缺乏应有研究。

濮卫高速滑卫段起点位于河南滑县留固镇东南,终点位于卫辉市司湾村东南卫辉北收费站处,路线全长 59.034 km。该路段所在地区属于典型的平原区地形,地表土层为粉土和粉质砂层。根据 GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》^[18],该区域的抗震设防烈度为Ⅶ度和Ⅷ度(对应设计基本地震加速度值为 $0.1g$ 、 $0.2g$),属于强震区。因项目周边无其他优质填料可用,路基只能以就地取得的粉土填筑,而粉土的动力性能较差,需通过合适的改良技术提高其抗震性能。多方探讨后,把加筋列为主要考虑的改良技术之一,但其处治效果还有待验证。为此,本文基于濮卫高速公路滑卫段粉土路基的实际条件,设计并制作了素粉土路基和土工格栅加筋粉土路基模型,通过振动台试验测试了地震荷载下 2 种结构路基的动响应和破坏特征,并在此基础上探讨了加筋对粉土路基抗震稳定性的影响和潜在破裂面的形成过程,为今后高地震烈度区域粉土路基的设计与分析提供了参考。

1 模型设计与试验方法

1.1 方案设计

试验以濮卫高速公路滑卫段 ZK45+660 断面(图 1)为原型,考虑到路基具有对称性,试验模型设计为半

路堤式,见图2。模型由地基和路基两部分组成,并将路基部分从上到下依次设置了96%、94%、93%这三个压实度区,地基的压实度要求不低于90%。模型设计时以几何尺寸比 C_L 、密度比 C_ρ 、侧压力系数 C_K 为基本物理量(由于模型外形与原型基本一致,取侧压力系数 $C_K=1$)^[19],根据 Buckingham π 定理确定出各物理量之间的相似关系,见表1。试验分别设计了素粉土路基和加筋粉土路基2组模型,其中后者是在前者的基础上按筋(l)和路基高度(h)为0.8:1.0的关系增设土工格栅获得,土工格栅的层数为4层、竖向间距为10 cm。

试验所用粉土取自濮卫高速公路施工现场,其物理力学参数和级配曲线分别见表2和图3。筋材的实物图见图4。筋材的力学参数见表3。

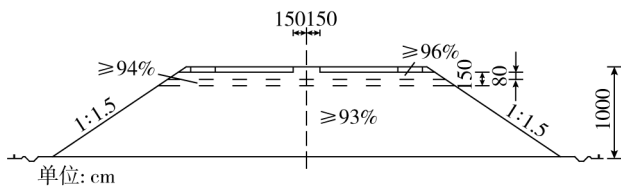


图1 模型试验原型

Fig. 1 Model test prototype

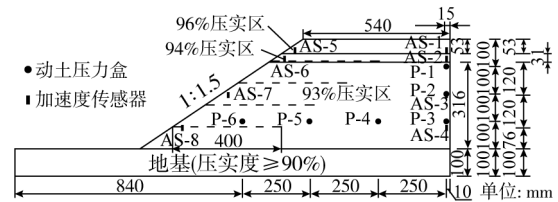


图2 模型设计与元器件布置图

Fig. 2 Model design and components layout

表1 模型主要相似系数(无量纲指数 n 取 2)

Table 1 Main similarity coefficients of the model (Dimensionless exponent $n=2$)

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

表2 填料的物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indexes of filler

物理力学	参数
最大干密度 $\rho_{d,max}/(g/cm^3)$	1.74
最佳含水率 $w_{opt}/\%$	12
加州承载比 $\%$	10.1
黏聚力 c/kPa	4.8
内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	17.7
液限 $w_L/\%$	27
塑限 $w_P/\%$	21

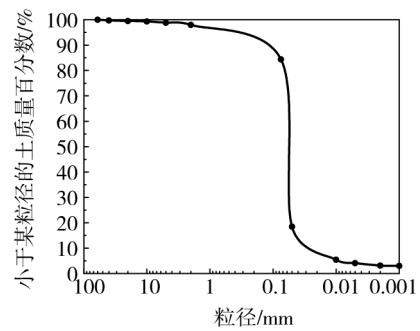


图3 填料的级配曲线

Fig. 3 Grading curve of filler

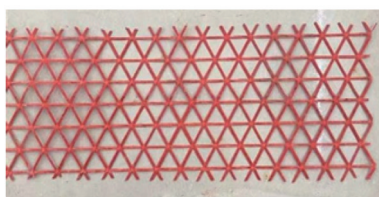


图4 试验用筋材照片

Fig. 4 Photos of reinforcement for test

表3 筋材的抗拉强度

Table 3 Tensile strength of reinforcement kN/m

2%伸长率	5%伸长率	极限状态
6	13	30

1.2 模型制作

试验前制作了一个内部尺寸为1.6 m×1.7 m×0.8 m的剪切变形模型箱,见图5(a)。模型箱由一块加肋底板和若干叠放在一起的钢框架组成,每个框架的顶面均设有一组可自由滚动的钢珠、底面设有导向槽,允许模型箱在路基横断面方向自由滑动,以减小试验时模型箱的边界反射效应。同时,为了防止填料从框架之间的孔隙中漏出,模型箱内侧衬有一层橡胶垫。

试验模型采用质量控制法并以人工夯实的方式制作。模型制作时,按图 2 所示设计方案在指定位置埋设了加速度计和动土压力盒等监测元器件。监测元器件的参数见表 4。制作好的素粉土路基模型与加筋粉土路基模型见图 5。

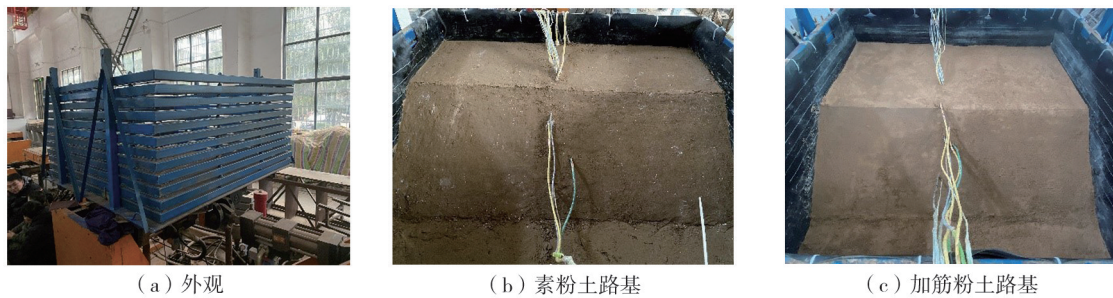


图 5 路基模型

Fig. 5 Subgrade model

表 4 试验使用的元器件

Table 4 Components used in the test

序号	元器件名称	型号	误差	数量
1	加速度传感器	CA-YD-188GF	小于 0.2%F.S	16
2	电阻应变式动土压力盒	DYB-1	小于 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

1.3 试验加载方案

试验以汶川波为基本荷载波,通过振动台台座在模型箱底部施加水平分级地震荷载,控制地震荷载的加速度峰值(peak ground acceleration, PGA)从 0.025 g 开始,并按 0.025 g 的增量逐级增大地震荷载。正式加载前和每级荷载加载后,对模型施加时长为 50 s 的白噪声进行扫频,以便分析模型自振频率的变化情况。试验加载方案见表 5。输入地震荷载的加速度时程曲线见图 6。

试验时,加速度计和动土压力盒的数据分别通过 IMC CS-5008-N 型和优泰 uT8916FRS-DY 型动态数据采集仪实时采集。每级荷载加载后对模型的外表面进行仔细观察,查看是否有裂缝出现,并对模型进行拍照、量测裂缝位置与宽度,绘制裂缝分布图。

表 5 试验的加载方案

Table 5 Loading plan for the experiment

序号	工况代号	加速度峰值/g	序号	工况代号	加速度峰值/g
1	WC-1	0.025	8	WC-9	0.225
2	WC-2	0.050	9	WC-10	0.250
3	WC-3	0.075	10	WC-11	0.275
4	WC-4	0.100	11	WC-12	0.300
5	WC-6	0.150	12	WC-13	0.325
6	WC-7	0.175	13	WC-14	0.350
7	WC-8	0.200			

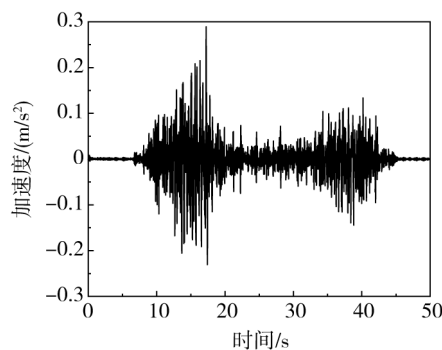


图 6 输入地震荷载的加速度时程曲线 (PGA = 0.025 g)

Fig. 6 Acceleration time history curves of input seismic load (PGA = 0.025 g)

2 试验结果与分析

2.1 地震荷载下加筋粉土路基的破坏形式

每级荷载加载后对模型的外表面进行了仔细观察。地震荷载下素粉土路基的裂缝发展与分布见图7。素粉土路基模型的裂缝首次出现在加速度峰值PGA为0.250g的荷载加载后,这些裂缝将模型顶面分割成3块(1[#]、2[#]、3[#]),见图7(a);随着荷载提高至0.275g,裂缝开始扩展、加深,而且2[#]块出现了明显下沉,与1[#]、3[#]块间的差异沉降达8mm,见图7(b);当荷载进一步增大到PGA为0.3g后,3[#]块内部出现了一条新的裂缝,靠近路基中心线侧的部分土体出现碎块化并伴随严重的沉陷破坏,见图7(c)。试验后模型顶面和坡面的裂缝位置分布见图7(d)和(e);模型顶面存在4条宽度较大的主裂缝,其中裂缝I、裂缝II是由最初的2条裂缝发展而来的,并随着地震荷载的增加逐渐加深、加宽;裂缝III、IV是在PGA为0.3g的荷载加载过程中形成的,是模型急剧破坏的表现。从裂缝的发展方向上看,这4条裂缝基本上都是沿路基纵向发展,贯穿整个模型;模型的主要沉陷区和破碎区基本一致。模型坡面上也有2条裂缝V、裂缝VI,其中裂缝V是在加速度峰值PGA为0.25g的荷载加载后出现,位置在93%压实度区内,该裂缝近似一条水平线;裂缝VI沿路基高度方向斜向发展,贯穿路基96%压实度区和94%压实度区,见图7(e)。

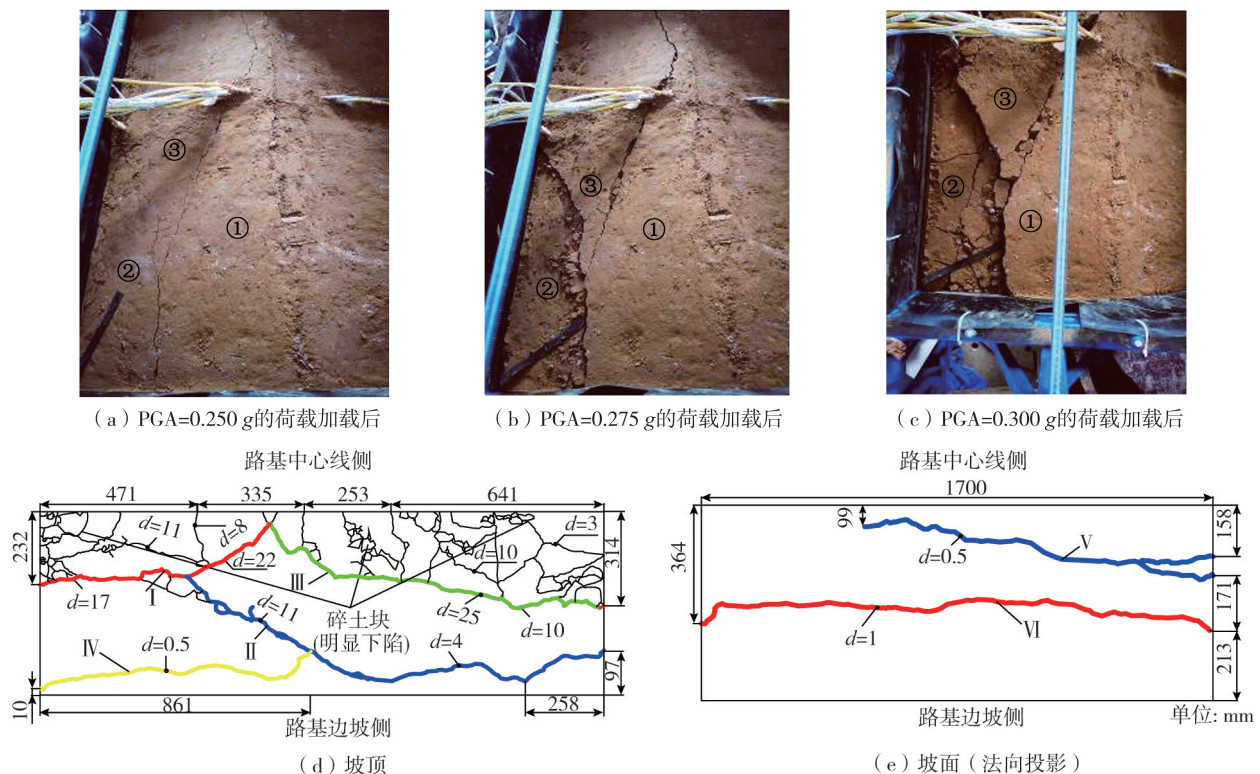


图7 素粉土路基模型的裂缝发展与分布

Fig.7 Development and distribution of cracks in the model of pure silt subgrade

按与素粉土路基相同的加载方案对加筋粉土路基进行了震动试验。当荷载加载到PGA为0.325g后,加筋粉土路基的顶面与坡面均出现了一条细微的纵向裂缝;当荷载增大到PGA为0.35g时,裂缝在沿路基长度方向上进一步发展并贯通。考虑到输入荷载已远高于依托工程抗震设防烈度所对应的加速度峰值(0.2g),试验中止。加筋粉土路基模型的裂缝分布情况见图8。路基顶面的裂缝位于距路基中心线约 $1/3B$ (B 为模型顶面宽度)、距路肩边缘的距离为 $0.49H \sim 0.65H$ (H 为路基高度)处,裂缝宽度约为0.5mm,走向沿路基纵向;路基边坡坡面上的裂缝位于 $0.35H$ 处、93%压实度区内,裂缝宽度为0.1~0.2mm,其走向也沿路基纵向。

由2个模型的破坏过程与结果对比可知,当荷载加载到PGA为0.35g后,加筋粉土路基模型虽然也出现了裂缝,但模型仍保持有较好的完整性,且路面处未产生明显沉降。可见加筋后的粉土路基有良好的抗震性能,不仅可以满足工程设防需要,并在大震条件下也可以保证路基具有良好的完整性。

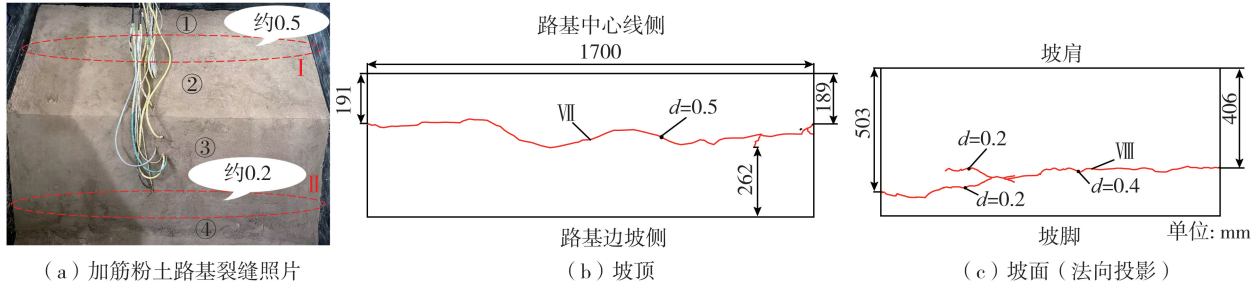


图 8 加筋粉土路基模型裂缝分布

Fig. 8 Crack distribution of reinforced silt subgrade model

2.2 加筋对粉土路基加速度响应的影响

以输入荷载的加速度峰值为基准计算各测点的加速度放大倍数。不同峰值荷载下素粉土路基内加速度放大倍数在路基高度方向的分布曲线见图 9。图中的 ζ 为相对高度, $\zeta = h/H$, H 为路基高度, h 为测点距路基底面的高度。可以看到,地震荷载下素粉土路基中 2 个测线处的加速度放大倍数均随地震荷载的增加而减小,相同荷载下则随路基高度的增加而非线性增大,同一高度下路基中心线侧与边坡侧加速度峰值的差值发展曲线见图 9。由图可知,在 4 个高度处路基中心线侧的加速度峰值均大于边坡侧;在靠近模型底部位置 ($0.3H$) 的测点,差值始终较低且稳定;随着高度增加,路基中心线侧与边坡侧的加速度差值总体上呈增大趋势;但当地震荷载峰值加载到 PGA 为 $0.20 \sim 0.25 g$ 、模型开始开裂、破坏时,各条曲线均出现了明显波动。可见,地震荷载下路基中心线侧土体动响应要大于边坡侧土体,并随荷载增加两者间的差异增大,表明地震荷载下模型内部土体单元的运动不一致,这必然会导致土体单元间出现剪切破坏。

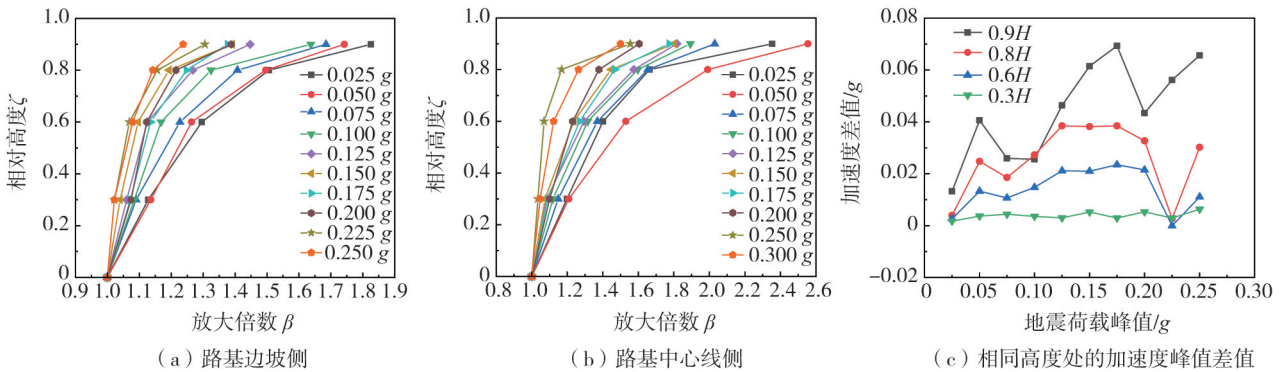


图 9 素粉土路基内水平加速度放大倍数分布曲线

Fig. 9 Distribution curves of horizontal acceleration amplification factor in pure silt subgrade

不同荷载峰值下加筋粉土路基的加速度放大倍数分布曲线见图 10。由图可知,加筋粉土路基中的加速度放大倍数分布规律与素粉土路基基本相同,但也有些差别。当荷载峰值 PGA 为 $0.025 g$ 时,5 个测点间的加速度放大倍数增长率最大,曲线较平坦;当荷载峰值增大后,同一输入荷载下 5 个测点间的加速度放大倍数增长率减小,曲线变陡,且当从荷载 PGA 为 $0.050 g$ 增加到 PGA 为 $0.275 g$ 时,相应的分布曲线比较集中;当荷载进一步增加到 $0.300, 0.325, 0.350 g$ 时,曲线的斜率进一步增大、曲线变平且趋于直线型。可见,地震荷载越大,模型在高度方向上的分布越接近。加筋粉土路基中心线侧与边坡侧加速度峰值的差值发展曲线见图 10(c)。可以看到,除了在 $0.6H$ 处,其他位置的加速度差值均接近于 0,表明加筋后路基边坡侧和路基中心线侧具有相近的加速度响应。这充分说明加筋可以提高路基模型的整体刚度,缓解路基的变形。甚至在荷载强度达到素粉土路基承载极限 PGA 为 $0.250 g$ 时,加筋粉土路基内外两侧的加速度峰值仍然非常接近。随着荷载进一步提高,路基边坡侧的加速度响应开始超过路基中心线侧,并且曲线波动程度显著提高,模型中心线侧的加速度响应与边坡侧的加速度响应差异逐渐增大。

再以素粉土路基的加速度响应为基准,计算 2 个模型相同位置的加速度峰值比值。 $0.025 \sim 0.250 g$ 范围内 2 个模型加速度响应峰值的比值发展曲线见图 11。由图 11(a) 可知,边坡侧 4 条曲线的数值基本上都大于 1.0,表明加筋土路基的加速度峰值在整个加载过程均大于素粉土路基,而且越靠近模型顶部,2 个模型边坡侧的加速度差值越大。而路基中心线侧的 4 条曲线更为紧凑一些,数值也是在 1.0 左右来回波动,表明在路基中心线侧 2 个模型的加速度响应比较接近,见图 11(b)。

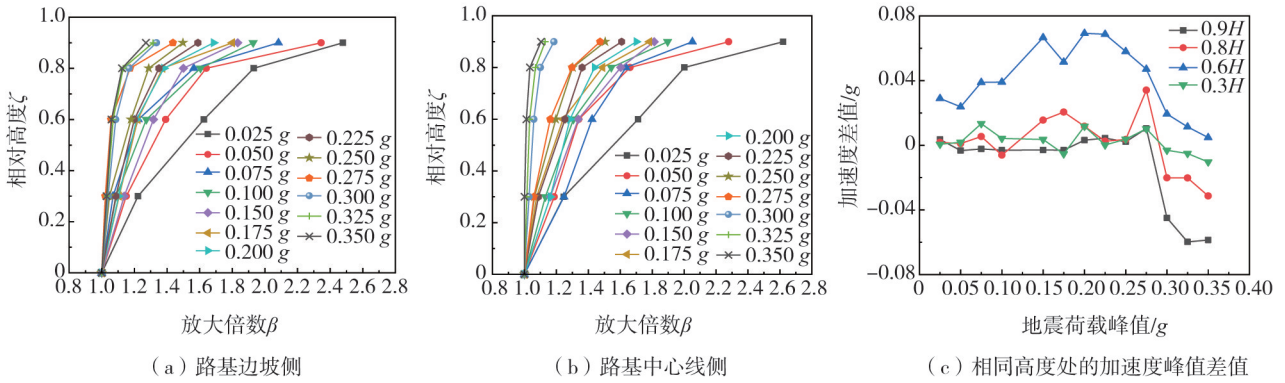


图 10 加筋粉土路基内水平加速度放大倍数分布曲线

Fig. 10 Distribution curves of horizontal acceleration amplification factors inside reinforced silt subgrade

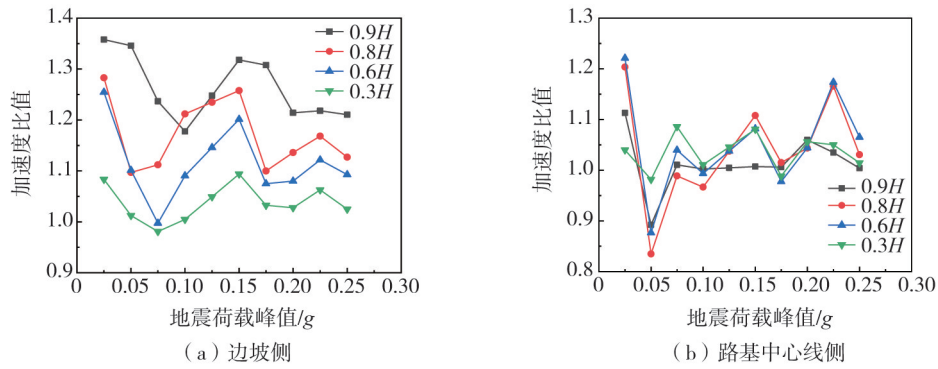


图 11 2 组模型内的加速度峰值差异分布曲线

Fig. 11 Distribution curves of peak acceleration differences between two sets of models

2.3 加筋对粉土路基动土压力的影响

素粉土路基内动土压力峰值的分布与发展曲线见图 12。由于素粉土路基模型开裂破坏后,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只有 PGA 小于 0.25 g 时的数据。模型内竖向动土压力峰值在高度方向上的分布曲线见图 12(a)。分析可知,在地震荷载作用下,随测点高度的增加,竖向动土压力峰值均呈先减小后增大的“<”型,当荷载较小时(PGA 小于 0.2 g),路基顶部(P-1 测点)的竖向动土压力最大,路基底部处(P-3)次之,中间最小;随着荷载进一步增大,路基底部的竖向动土压力快速增大,曲线的下半部分明显倾斜。模型内部竖向动土压力峰值在路基横断面方向上的分布曲线见图 12(b)。由图可知,随地震加速度峰值 PGA 增大,各测点的动土压力值增加,测点间的差值增大,各级荷载下的最大动土压力峰值在 P-4 测点处取得;在路基横断面方向上(由内向外,由路基中心线侧向路基边坡侧)动土压力峰值呈“先增大后减小”的分布形态,且这一规律随输入荷载的增加而更明显。动土压力峰值随地震加速度峰值 PGA 增加的发展曲线见图 12(c)。各测点的动土压力峰值均随地震加速度的增加而非线性增大。

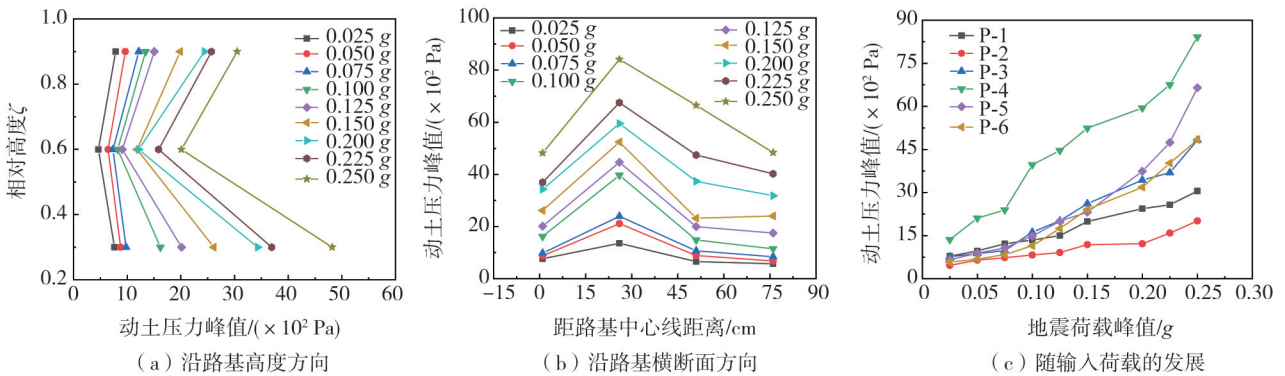


图 12 素粉土路基的动土压力峰值分布与发展曲线

Fig. 12 Peak distribution and development curves of dynamic soil pressure on pure silt subgrade

不同荷载峰值下加筋粉土路基模型内竖向动土压力峰值的分布见图 13,与图 12 对比可知,两者不管是在分布模式还是在发展趋势方面都有非常相似的规律。但加筋粉土路基内各测点的曲线始终保持比较紧凑

的关系,这主要是由于加筋后路基具有更好的整体性,在地震荷载下土体单元间能保持比较协调的运动,而素粉土路基在动荷载下的整体性较差,不同测点间动土压力的变化也较大。

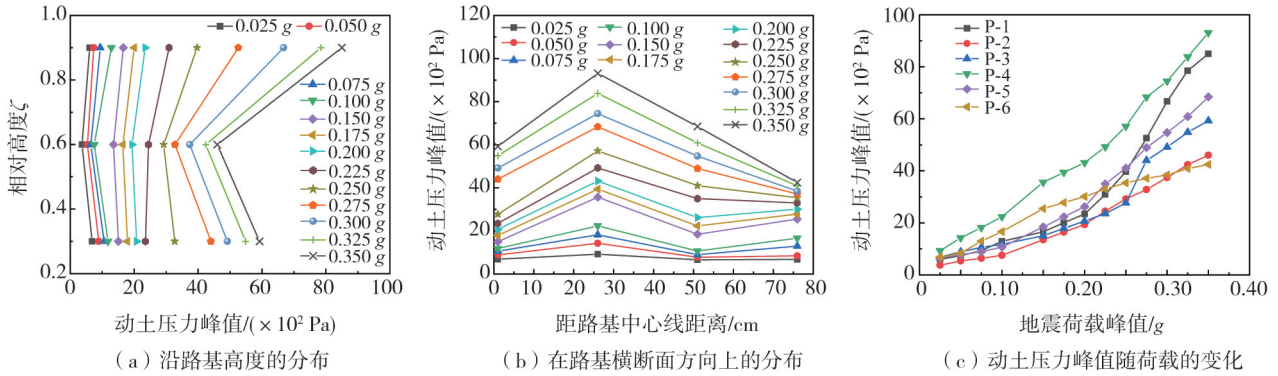


图 13 加筋粉土路基内动土压力峰值的分布与发展规律

Fig. 13 Distribution and development law of peak dynamic earth pressure in reinforced silt subgrade

3 加筋对粉土路基抗震性能的影响机理分析

粉土具有抗剪强度低、颗粒间黏结性差、动荷载下易产生位移甚至液化的特点。这一特点在上述振动台试验中得到充分体现。随着地震荷载增加,素粉土路基模型产生裂缝并逐渐发育、扩展,随后路基顶面出现严重破碎、沉陷。而在粉土路基中加入多层筋材后,筋材不仅可以约束粉土的位移,提高粉土的强度和整体性,而且成层的筋材还可以发挥“骨架”作用,在裂缝出现时分担部分荷载,从而有效地提高土体的抗裂性能,抑制了裂缝的扩展,因此加筋后的粉土路基可以承受更大的地震荷载,不仅产生裂缝的时机更晚,而且裂缝更少、更细微,保证了路基路面在遭受地震荷载冲击后仍有很好的完整性,不仅可以达到工程结构“小震不坏、中震可修、大震不倒”抗震设防要求,而且能够保证大震后路基性能的正常发挥。

将路基模型内部的动响应规律(图 10、图 13)和模型裂缝分布(图 8)结合起来,可获得地震荷载下加筋粉土路基的破坏过程,见图 14。随着地震荷载增加,路基的动响应增大,但不同位置的加速度响应不同,地震荷载下路基上部的动响应大于下部、路基中心线侧的动响应大于边坡侧,这种差异将导致构成路基的土颗粒的加速度和速度都不一致,土颗粒之间出现拉应力和剪应力;当地震荷载增加到一定程度后,位于同一高度的土颗粒之间因加速度不同导致的拉应力和剪应力就可能超过土颗粒之间的抗拉抗剪强度而产生破坏;虽然加筋可以有效增加边坡侧土体的强度和整体性,但由于路基不同部位的压实不同,造成路基内部存在薄弱区(93%压实度区),从而裂缝首先在薄弱区(93%压实度区)和加筋体的末端开始,见图 14(a),并随地震荷载的持续与增加,裂缝将向上向下扩张,见图 14(b),并最终从坡面和路基顶面溢出、贯通,形成完整的滑裂面,见图 14(c)。

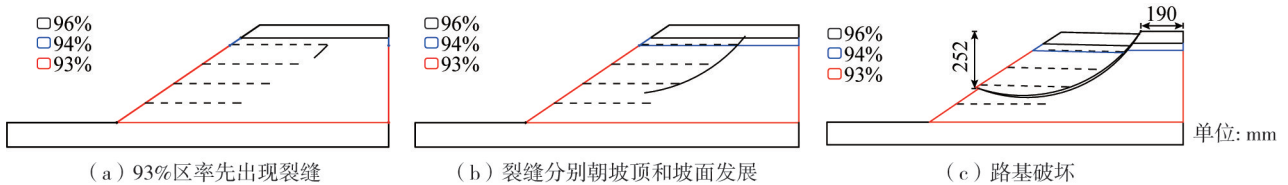


图 14 路基边坡滑动面发展过程推测

Fig. 14 Speculation of development process of sliding surface of subgrade slope

结合上述滑裂面的发展过程与实测位置,可将滑裂面简化为圆弧,建立稳定性分析模型并采用条分法计算稳定性系数见图 15。计算时,筋材的贡献通过作用滑体上的拉力体现;地震荷载可采用拟静力法处理,将其简化为作用于滑块重心上的水平力(E_{hsi})和竖向力(E_{vsi}),分别按(1)和式(2)^[20]计算:

$$E_{hsi} = C_i C_z A_h \psi_j W_i / g \tag{1}$$

$$E_{vsi} = C_i C_z A_v W_i / g \tag{2}$$

式中: A_h 和 A_v 分别为水平、竖向地震峰值加速度; C_i 为抗震重要性修正系数,一般根据构筑物重要程度取 0.8~1.7; C_z 为综合影响系数,取 0.25; ψ_j 为高度增大系数; E_{hsi} 为作用于计算土体质心处的水平地震作用力; E_{vsi} 为作用于计算土体重心处的竖向地震作用力, W_i 为第 i 个土条重力。

地震荷载下加筋粉土路基的稳定性系数可按式(3)进行计算:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n \{[(W_i + E_{vsi}) \cos \theta_i \tan \varphi_i + c_i B] R\} + \sum_{j=1}^m T_{GCj} y_j}{\sum_{i=1}^n (W_i + E_{vsi}) \sin \theta \cdot R + \sum_{i=1}^n Q_i y_{Q_i}} \quad (3)$$

式中: c_i 、 φ_i 为第*i*个土条底部土体的黏聚力和内摩擦角; T_{GCj} 为第*j*层土工合成材料设计抗拉强度; Q_i 为第*i*个土条所受地震水平力; y_{Q_i} 为第*i*个土条重心距滑弧圆心的垂直距离; y_j 为第*j*层土工合成材料距滑动弧圆心的垂直距离。

基于式(3),通过多次试算后可获得2个模型在不同地震荷载下的稳定性系数,见图16。随着地震荷载的增加,2种方案下路基的稳定性系数均呈下降趋势;但相同地震荷载下,加筋4层土工格栅后路基的稳定性系数均高于素粉土路基,稳定性系数的增幅为6%~9%,增幅随地震荷载的增加而减小;素粉土路基在地震荷载加速度峰值达到0.25*g*时趋于极限状态,而加筋土路基在0.325*g*时才接近极限状态,与试验结果有较好的吻合度。可见,在路基边坡侧加入土工格栅是提高粉土路抗震性能的有效措施。因此,在高抗震设防地区的路基建设中,若在路基边坡侧填料内铺设若干层高强土工格栅,将其设为加筋土结构,不仅可以提高地震荷载下路基的整体稳定性,还可以增强对路基中部土体的约束,避免路基产生沉陷破坏,为震后道路功能的正常发挥提供保障,但从破裂面的位置也可以看到,筋材长度不应小于0.65*H*,并还应有足够的锚固长度。

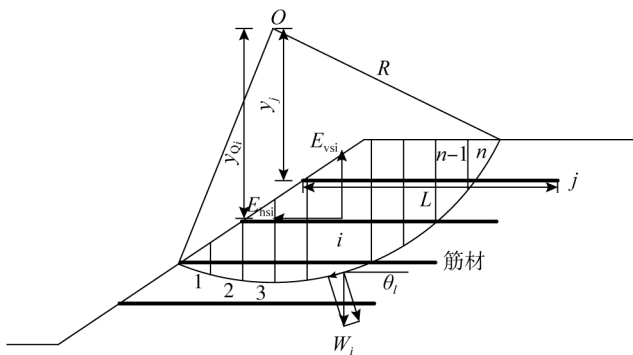


图15 地震荷载下路基边坡稳定性计算模型

Fig. 15 Calculation model of stability of subgrade slopes under seismic loads

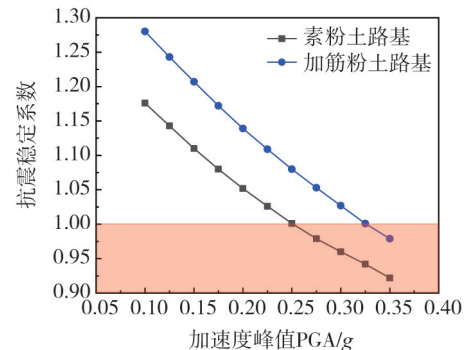


图16 地震荷载下路基的稳定性系数发展曲线

Fig. 16 Development curves of stability coefficient of subgrade under seismic load

4 结论

为提高粉土路基的抗震性能,本文通过振动台试验对比性地研究了素粉土路基和加筋粉土路基的动响应特性,得到以下主要结论:

1)素粉土路基在地震荷载加速度峰值加载到0.25*g*后逐渐出现开裂、破碎和沉陷式破坏;在路基边坡侧加入4层土工格栅后,可有效提高粉土路基的抗震能力,且当地震荷载加速度峰值加载到0.35*g*后模型虽也产生裂缝,但路基模型保持良好的完整性。

2)地震荷载下加筋粉土路基和素粉土路基具有基本相同的加速度响应规律,加速度放大倍数均随路基高度的增加而非线性增大;随地震荷载的增加,加速度放大倍数的增幅减小,且路基边坡侧的放大倍数较中心线侧大,但加筋粉土路基的差异要小一些。

3)地震荷载下2组模型的动土压力分布与发展规律基本相同,均在路基高度方向上呈“两边大,中间小”的形态,在沿路基横断面方向上表现为路基中心线侧的动土压力大于边坡侧。

4)加筋可以有效提高其影响区内粉土的强度和路基的整体性,但受路基结构影响,地震荷载下路基的潜在破裂面会在加筋体末端和低压实度区内形成。

5)依托工程采用素粉土填筑路基时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对粉土路基进行处治,路基会有更好的抗震性能。实际工程应用时,筋材的长度不应小于0.65*H*,并还应有足够的锚固长度。

参考文献:

- [1] 李方圆,董林,夏坤,等. 细粒含量对砂土液化势影响探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(2): 244-251.
LI Fangyuan, DONG Lin, XIA Kun, et al. Discussion on the effects of fines content on liquefaction potential of sandy soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(2): 244-251. (in Chinese)
- [2] 景立平,崔杰,李立云,等. 徐州市棠张镇饱和粉土液化性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(6): 160-164.
JING Liping, CUI Jie, LI Liyun, et al. Experimental study on liquefaction behavior of saturated silt in Tangzhang Town, Xuzhou City[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2004, 24(6): 160-164. (in Chinese)
- [3] 刘红帅,宋东松,冯震. 砂土液化剪切波速判别方法的对比分析[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(4): 105-112.
LIU Hongshuai, SONG Dongsong, FENG Zhen. Comparative analysis of shear wave velocity discrimination methods for sand liquefaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(4): 105-112. (in Chinese)
- [4] 刘干斌,谢琦峰,高京生,等. 动荷载作用下重塑黏质粉土的弹性变形研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10): 255-260.
LIU Ganbin, XIE Qifeng, GAO Jingsheng, et al. Dynamic characteristics of saturated remolded clayey silt[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(10): 255-260. (in Chinese)
- [5] 董林,夏坤,李少华,等. 剪切波速液化判别方法对粉砂及粉土适用性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(2): 225-232.
DONG Lin, XIA Kun, LI Shaohua, et al. Study on applicability of V_s -based liquefaction potential assessment methods for silty sands and silts[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(2): 225-232. (in Chinese)
- [6] WANG Y K, CAO T C, GAO Y F, et al. Experimental study on liquefaction characteristics of saturated Yellow River silt under cycles loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 163: 107457.
- [7] YUAN J, WANG Y, ZHAN B, et al., Comprehensive investigation and analysis of liquefaction damage caused by the M_s 7.4 Maduo earthquake in 2021 on the Tibetan Plateau, China.[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 155: 107191. (in Chinese)
- [8] 吴红权,上官萍,阙云,等. 福建省典型填土路基施工的机械碾压组合[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 542-548.
WU Hongquan, SHANGGUAN Ping, QUE Yun, et al. Mechanical rolling combination of typical filling subgrade in Fujian Province[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2018, 46(4): 542-548. (in Chinese)
- [9] 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): 14-17.
SHEN Aiqin, ZHENG Nanxiang, SU Yi, et al. Study on compaction mechanism and construction technology of sand-bearing low liquid limit silt filling subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4): 14-17. (in Chinese)
- [10] 马万权,沈康鉴,李海平,等. 含砂低液限粉土路基冲击压实技术研究[J]. 公路, 2008(2): 130-132.
MA Wanquan, SHEN Kangjian, LI Haiping, et al. Research on impact compaction technology of low liquid limit silt subgrade with sand[J]. Highway, 2008(2): 130-132. (in Chinese)
- [11] 安鸿飞,商玉洁,李婕,等. 粉土路基压实控制指标的分析研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(1): 206-211.
AN Hongfei, SHANG Yujie, LI Jie, et al. Analysis and research on compaction control index of silt subgrade[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(1): 206-211. (in Chinese)
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] 刘铭杰,彭丽云. 改良粉土在高速公路路基中的适用性研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(增刊2): 809-814.
LIU Mingjie, PENG Liyun. Research on the applicability of improved silt in highway subgrade[J]. Building Structure, 2020, 50(Sup. 2): 809-814. (in Chinese)
- [14] 刘路路. 基于再生聚酯纤维的粉土路基改良性能研究[D]. 南京:东南大学, 2021.
LIU Lulu. Research on silt subgrade improvement performance based on recycled polyester fiber[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [15] 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 of shear resistance of geogrid-reinforced silt soil[J]. Building Materials World, 2012, 33(4): 121-123. (in Chinese)
- [16] 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. (in Chinese)
- [17] 高海军,董丁明,赵琪,等. 循环荷载作用下加筋土路基动力响应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 208-215, 230.
GAO Haijun, DONG Dingming, ZHAO Qi, et al. Study on dynamic response of reinforced soil subgrade under cyclic loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 208-215, 230. (in Chinese)
- [18] GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
GB 18306—2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [19] 林宇亮,杨果林,钟正. 不同压实度铁路路堤边坡地震响应振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3285-3291.
LIN Yuliang, YANG Guolin, ZHONG Zheng. Shaking table test on seismic response of railway embankment slopes with different compaction degrees[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3285-3291. (in Chinese)
- [20] JTG B02—2013 公路工程抗震规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2013.
JTG B02—2013 Specification of seismic design for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese)