

降雨入渗对路基动力响应的变化规律研究

陈善雄, 宋瑞军, 余 飞, 李 剑

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 研究降雨入渗条件下高速铁路路基动力响应的变化规律对于识别路基潜在病害, 保障路基稳定性有显著意义。通过 1:1 大型现场模型激振试验, 探讨高速铁路在降雨入渗条件下其内部动力响应的变化规律。研究表明, 与正常工况相比, 软化工况下的加速度和动应力均减小, 越靠近路基表层, 衰减量越明显, 在路基表层, 加速度和动应力的衰减量达到 50% 左右。软化工况下, 沿路基中心沿深度方向上, 动应力的衰减规律与加速度不同的是, 动应力在软硬界面上出现界面效应, 导致动应力在软硬交界处略有增大。动应力在路基中传播时存在应力扩散现象, 造成路基下部的动应力幅值大于路基上部的现象。随着激振频率的增加, 同一深度加速度衰减量先增大后减小, 频率为 19.1 Hz 时达到最大值, 动应力在距路基表面 0.35 m 内衰减量逐渐增大, 0.35 m 以下与加速度规律相似。

关键词: 路基工程; 降雨入渗; 现场模型试验; 软化工况; 动力响应; 衰减量

中图分类号: U 416

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)增 2-4212-08

The change rules of dynamic response on subgrade under the rainfall infiltration

CHEN Shanxiong, SONG Ruijun, YU Fei, LI Jian

(State Key Laboratory of Geomechanics Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: It is significant to study the change rules of dynamic response on high speed railway subgrade under the condition of rainfall infiltration, which can identify the potential disease and guarantee the stability of subgrade. Therefore, the change rules are discussed through the 1:1 large-scale model test. Research suggests the acceleration and dynamic stress of the softening condition are both reduced compared with the normal condition. The more close to the subgrade surface, the reduction is more obvious, and the reduction of the acceleration and dynamic stress are reached about 50% on the subgrade surface. In the softening condition, the dynamic stress is slightly increased because the interface effect appears between the soft and hard interface, and it is different from the attenuation rules of the acceleration. The dynamic stress propagation on subgrade appears stress diffusion phenomenon that causes the dynamic stress amplitude on the lower part of the subgrade is larger than the upper. With the increase of the excited frequency, the acceleration attenuation is increased first and then decreased in the same depth, and reaches the maximum value at 19.1 Hz. The dynamic stress is increased gradually from the surface of subgrade 0.35 m, with the similar acceleration law under 0.35 m.

Key words: subgrade engineering; rainfall infiltration; test of the field model; softening condition; dynamic response; decrement

收稿日期: 2016-06-16; 修回日期: 2017-04-13

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2015CF363)

Supported by the Financial Supports from the Natural Science Foundation of Hubei Province(Grant No. 2015CF363)

作者简介: 陈善雄(1965-), 男, 博士, 1986 年毕业于华中科技大学结构力学专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事特殊土工程特性及地质灾害防治技术方面的教学与研究工作。E-mail: sxchen@whrsm.ac.cn. 通讯作者: 宋瑞军(1990-), 男, 现为硕士研究生。E-mail: 398449801@qq.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0656

1 引言

降雨是一种常见的天气现象，也是诱发众多路基工程事故的重要因素之一^[1-3]。高速铁路基的防排水系在其长达 30 a 的服役期间，经过车辆及环境荷载双重作用下很容易发生开裂。降雨等水分浸入到路基当中，使得土体含水量增大，浸润面抬高，并且原属于非饱和土体的一部分转化为饱和土体，导致抗剪强度降低^[4]，同时造成路基填料性能逐渐蜕化、路基的动力响应加剧以及累积变形增加，严重影响路基结构的稳定性。

因此，刘兴旺^[5]着手研究降雨、地下水入侵等灾变条件下路基填料的力学特性及动力响应规律。王强等^[6]通过三轴试验得出干燥的砂土路基在浸水后会产生一定量的湿陷变形，并降低路基的变形模量。苗雷强^[7]通过实验研究得出土体强度指标(*c*)值随含水率变化以最优含水率为转折点，提高压实度可有效减小土体的湿化变形。N. H. Thorn 和 S. F. Brown^[8]研究得出含水量的少量增加不仅加剧了累积应变的发展速率，还使得累积应变发展的最终值大大增加，同时，路基的刚度也会随着路基含水量状态的变化而改变^[9]。尤其是在循环荷载振动过程中，土体孔压上升，有效应力减少，抗剪强度减低，变形增加明显^[10-12]，进而导致边坡失稳、沉降超量、路基封闭层翻浆冒泥、轨道结构层开裂等一系列病害。

以上研究都是围绕土体的力学性能随含水量的改变而做的一些室内试验，不能准确反映路基整体的力学性能及动力响应规律。进而，浙江大学通过大型室内试验研究水位上升和干湿循环对路基动力特征和累计变形的影响规律，得出水位上升对路基动土压力、弹性变形和累积变形的影响较大，干湿循环对路基动土压力的影响较大^[13]。陈仁朋等^[14]研究水位变化情况下高速铁路基的变形特性。得出路基地下水水位第一次循环极大地加剧了路基的累积变形，而多次循环下路基累积变形变化较小。商拥辉和董晴^[15]通过数值模拟研究了降雨入渗对软土路基的影响，得出在持续降雨的情况下，软土路基的位移、应力、孔压比、饱和度会发生较大的改变，并在坡底出现塑性区。虽然室内模型实验和数值模拟都能较好地反映土体的力学性能及变化规律，但由于数值模拟的复杂性和真实土体颗粒的离散性等

特点，以及土体与模型箱的边界效应等，都会对试验产生一定影响，其数据不能完全反映现场路基整体的动力响应特性。而大型现场实验能弥补室内模型试验及数值模拟的不足之处，同时国内外学者对于降雨条件下高速铁路基动力响应的现场实验研究相对较少。因此，本文通过 1:1 大型现场模型激振试验深入探讨在降雨入渗条件下高速铁路基内部动力响应的变化规律，具有极其重要的现实意义。

2 试验方案

2.1 路基结构及填料基本土工性质

现场模型激振试验路基表层 0.4 m，由灰土填筑而成；路基底层 2.6 m，由素土填筑而成；路基底宽 13.5 m，顶面宽 6 m，填筑施工共分 11 层进行，具体路基结构见图 1。路基填料物理性质指标见表 1，路基填筑压实度及动态变形模量 E_{vd} 见表 2，土体级配曲线和相关数据见图 2 及表 3。

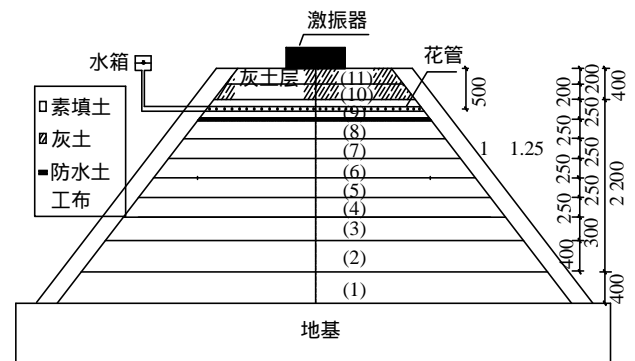


图 1 试验路基横断面布置图(单位：mm)

Fig.1 The cross-sectional map of subgrade(unit：mm)

表 1 路基填料物理性质指标

Table 1 Parameters of seepage property for sandstone

填料	最大干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	最优含水 率/%	相对密 度	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数
素土	1.89	20.6	2.53	41.30	27.13	14.17

表 2 路基填筑压实度及 E_{vd} 数据

Table 2 Data table of subgrade compaction and E_{vd}

土层 编号	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	E_{vd} / MPa	压实度	土层 编号	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	E_{vd} / MPa	压实度
1	1.57	45.79	0.83	7	1.63	52.34	0.86
2	1.58	46.58	0.84	8	1.68	72.33	0.89
3	1.63	49.50	0.86	9	1.00	46.68	0.85
4	1.60	48.90	0.85	10	1.63	51.57	0.86
5	1.66	66.78	0.88	11	1.66	63.31	0.88
6	1.65	58.54	0.87				

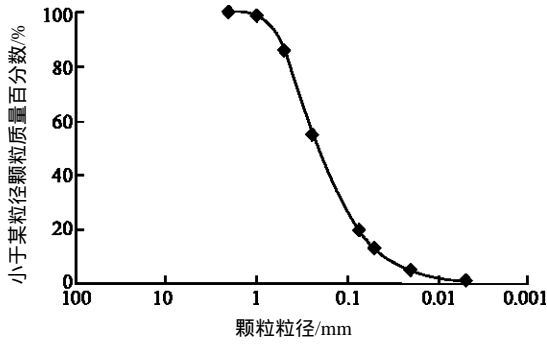


图 2 填料颗粒粒径级配曲线

Fig.2 Table of grading curve of soil

表 3 土体级配曲线相关数据表

Table 3 Data table of grading curve

d_{10}/mm	d_{50}/mm	d_{60}/mm	C_u	C_c
0.048	0.12	0.29	6.04	1.03

注： $C_u = d_{60}/d_{10}$ ， $C_c = d_{30}^2 / (d_{60}d_{10})$

从图 2 及表 3 可以看出， C_u 与 C_c 能同时满足 $C_u > 5$ 和 $1 < C_c < 3$ 两个条件，所以，土样级配良好。根据《土的分类标准》(BJ145—90)，土样中大于 0.075 mm 的土粒含量超过 50%，又因为土样中小于 0.075 mm 粒径的细粒含量在 15% ~ 50% 范围内，同时，根据相关工程经验及现场观察，该土为粉质黏土。

2.2 入渗控制系统及传感器布置位置

试验路基的入渗控制系统由砂垫层、进排水花管、水箱组成。入渗层位于灰土层下部(第 9 层)0.4 ~ 0.65 m 处，沿路基断面，入渗层中间设置有进水花管，花管上布置有直径为 10 mm 的进水孔，具体断面形式及详细构造如图 1，3 所示。

入渗水量以路基表层(灰土层)饱和为止，可通过理论计算得到，并可由预埋的含水量计监测校核。

路基内部不同深度处布置了加速度传感器、动土压力盒、含水量计，以监测路基内部动力响应的变化规律。传感器的具体布置位置如图 4 所示。

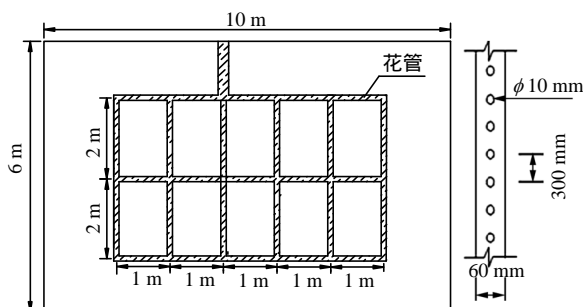


图 3 进排水花管网及现场铺设示意图

Fig.3 The diagram water inlet and outlet pipeline and scene

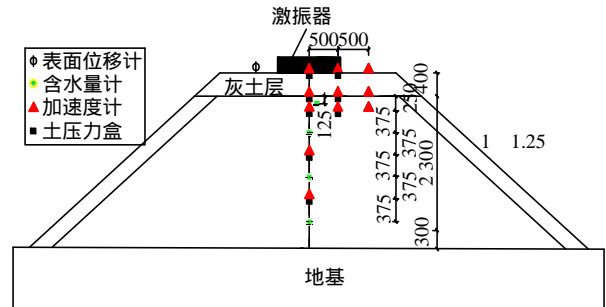


图 4 试验路基传感器埋设示意图(单位：mm)

Fig.4 The diagram of sensor laying place on subgrade (unit : mm)

2.3 加载及数据采集系统

(1) 加载系统

为解决现实路基动力响应的功能需求，本试验自行研制了 ZDJ20 型机械式振动试验机(见图 5)，



(a)



(b)

图 5 ZDJ20 型振动试验机及活动液压站

Fig.5 ZDJ20 vibration fatigue machine and movable hydraulic station

该加载系统由反力装置、激振器、液压泵组成。同时，加载系统的激振参数范围见表 4。

表 4 加载系统的激振参数范围

Table 4 The buffeting parameters of load system

数值	振动频率/Hz	激振力/kN	板低动应力/kPa	对应的承压板/mm
最小值	5	0.73	0.93	1 000(方板)
最大值	35	35.79	93.04	700(圆板)

本次激振器对应的激振频率(Hz)计算公式：

$$f = \frac{Q_B}{Q_M} n_D \frac{0.85^2}{60} = 0.022 \ 4n_D \quad (1)$$

式中： Q_B 为主泵排量(12 mL/r)， Q_M 为振动马达排量(6 mL/r)， n_D 为电机额定转速(1 440 rpm)。

激振力计算公式：

$$F = mr\omega = mr (2\pi f)^2 \quad (2)$$

式中： mr 为振动系统偏心距(0.74 kgm)。同时激振力与激振频率对应曲线见图 6，激振器能够提供的激振参数范围如表 5 所示。

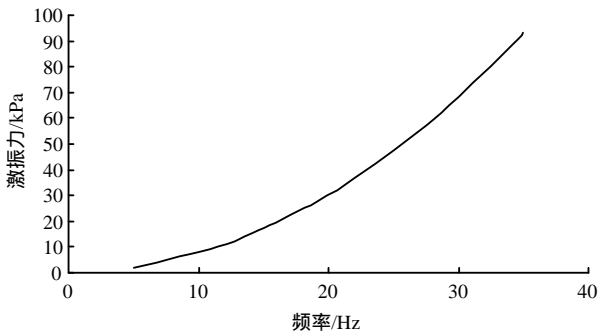


图 6 激振力与激振频率对应曲线

Fig.6 The curve of exciting force and exciting frequency

表 5 现场试验工况

Table 5 The conditions of field tested

工况	工况说明	振动频率/Hz	动应力/kPa
正常工况	路基填筑完成	10 ~ 30	10 ~ 68
软化工况	路基表层(灰土层) 浸水饱和	15 ~ 30	17 ~ 68

(2) 数据采集系统

试验配备了完整的数据采集系统，最大采样频率为 1 000 Hz，能完整地测出路基中动态响应的波形，同时监测动土压力、振动速度、弹性变形、累积变形、加速度、以及孔隙水压力等多个指标。该系统可与电脑相连接，对动态信号进行实时采集、存储、显示。动态应变数据采集系统如图 7 所示。

2.4 激振方案

现场试验主要探讨正常运行和病害条件下路基



图 7 动态应变数据采集系统

Fig.7 The data acquisition system of dynamic strain gauge

动力响应的差异，考虑灰土层性能弱化后，在不同动应力水平、激振频率作用下的动力响应特征。具体试验工况如表 5 所示。

3 正常工况与软化工况下路基动力响应的变化规律

由于轨道不平顺问题，列车驶过轮轨时会对钢轨产生垂向和横向应力，与此同时，会产生对钢轨有一定周期性的震动，而震动频率与列车轴重、机车车辆动态特性、轨道平顺度、轨道结构、列车速度等因素有关，其中影响频率的最直接因素是列车的运行速度。国内外学者以对列车运行速度与震动频率有了较详尽的研究，研究表明：列车运行速度为 0 ~ 360 km/h 时，其震动频率主要分布在 0 ~ 50 Hz 范围内。徐翔^[16]对 CHR2 型动车组以 60.6, 77.6, 203.5, 275, 293 km/h 进行现场实测，结果表明，低速的频率段在 10 Hz 以内，高速的频率段在主要分布在 10 ~ 30 Hz 范围内；徐进^[17]通过大型路基模型试验，进一步研究了列车不同运行速度与频率关系。文中给出了 5 个不同的列车运行速度与震动频率的关系曲线，大频率与速度关系见图 8 与表 6。

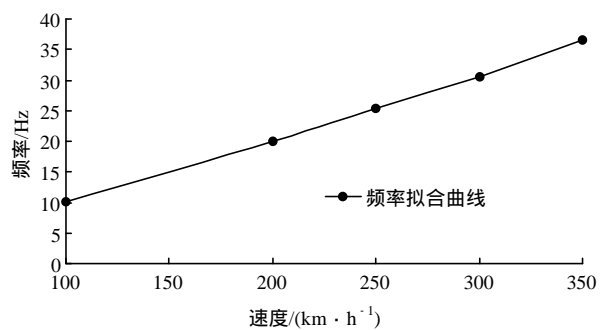


图 8 大频率与速度关系

Fig.8 The figure of relationship between frequency and velocity

表 6 大频率与速度关系

Table 6 The relationship between frequency and velocity

速度/(km · h ⁻¹)	频率/Hz
100	10.2
200	20.0
250	25.4
300	30.6
350	36.5

本文选取 15.1, 19.1 和 25 Hz 三个激振频率, 分别对应 150~250 km/h 的车速。分析对比正常工况与软化工况下路基的加速度、动应力变化数据, 从而得出降雨入渗条件下路基动力响应的变化规律。

根据此次试验, 定义路基动力衰减量 θ 为

$$\theta = \frac{\sigma_{ZC} - \sigma_{rh}}{\sigma_{ZC}} \quad (3)$$

式中: θ 为衰减量(%), σ_{ZC} 为正常工况深度 H 处的动应力幅值(kPa), σ_{rh} 为软化工况深度 H 处的动应力幅值(kPa)。

式(3)用来说明软化工况幅值相对于正常工况的减小程度, 本公式同时适用于加速度。

3.1 加速度沿路基深度方向变化规律

表 7 与图 9 为 3 种激振频率下正常工况与软化工况的加速度幅值沿路基深度方向变化数据与曲线。

表 7 正常工况与软化工况加速度沿路基深度方向衰减量

Table 7 The reduction of acceleration along the roadbed depth in the conditions of normal and disaster

路基中心处				
传感器层位	深度/m	衰减量/%		
		频率 15.1 Hz	频率 19.1 Hz	频率 25 Hz
11 层	0.10	49	53	43
10 层	0.35	57	64	48
9 层	0.66	34	43	39
6 层	1.47	52	59	55
3 层	2.24	9	11	4.0

距路基中心水平距离 0.5 m 处				
传感器层位	深度/m	衰减量/%		
		频率 15.1 Hz	频率 19.1 Hz	频率 25 Hz
11 层	0.10	74	79	74
10 层	0.35	64	67	61
9 层	0.66	56	61	70

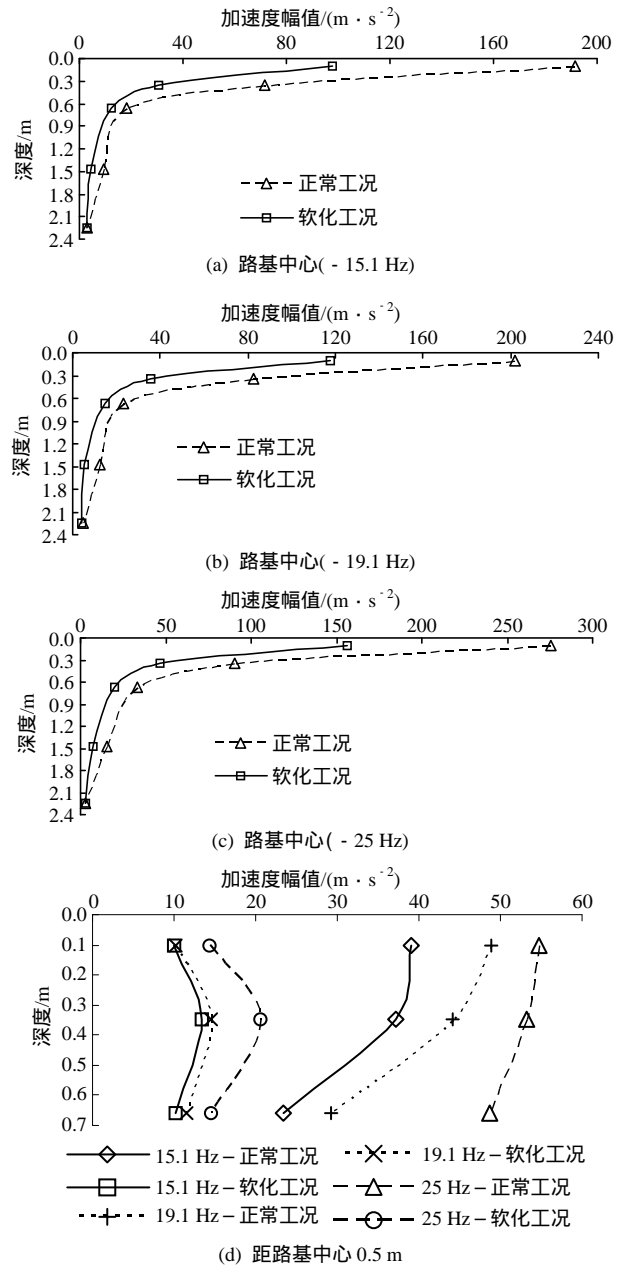


图 9 正常工况与软化工况加速度沿路基深度方向变化曲线

Fig.9 The varying curves of acceleration along the roadbed depth in the conditions of normal and disaster

从表 7 及图 9 可以看出, 激振频率为 15.1, 19.1 和 25 Hz 时, 正常工况与软化工况的加速度幅值沿路基深度方向变化规律总体趋于一致, 都呈负指数衰减, 且随着激振频率的增加, 相同深度处的加速度衰减量先增大后减小, 激振频率为 19.1 Hz 时达到最大值; 与正常工况相比, 距路基表面 0.35 m 处, 软化工况的加速度衰减量最大, 分别达到 57%, 64% 和 48%。随着深度的不断增加衰减量逐渐减小, 0.6 m 以下, 衰减量明显较小, 这是由于本路基刚度较小, 阻尼较大, 因此, 加速度在沿路基深度方向传播时, 会在表层迅速衰减。

距路基中心水平距离 0.5 m 处，沿深度方向上，正常工况加速度幅值随着土层深度的增加而减小，软化工况加速度幅值先增大后减小；与正常工况相比，软化工况下 3 种激振频率的加速度在 11 层(距路基表面 0.1 m)处的衰减量最大，分别达到了 74%，79%，74%，10 层次之，表明越靠近路基表面，软化工况的加速度较正常工况减小得越明显；同时，随着激振频率的增加，同层位衰减量在激振频率为 19.1 Hz 时达到最大值。

3.2 动应力沿路基深度方向变化规律

表 8 与图 10 为正常工况与软化工况动应力沿路基深度方向变化数据与曲线。

表 8 正常工况与软化工况动应力沿路基深度方向衰减量
Table 8 Reduction of dynamic stress along the roadbed depth in the conditions of normal and disaster

路基中心处				
传感器层位	深度/m	衰减量/%		
		频率 15.1 Hz	频率 19.1 Hz	频率 25 Hz
11 层	0.10	50	52	54
10 层	0.35	67	70	75
9 层	0.66	30	47	41
6 层	1.47	40	50	48
3 层	2.24	30	27	21

距路基中心水平距离 0.5 m 处				
传感器层位	深度/m	衰减量/%		
		频率 15.1 Hz	频率 19.1 Hz	频率 25 Hz
11 层	0.10	43	30	44
10 层	0.35	41	40	42
9 层	0.66	20	20	21

从表 8 及图 10 可以看出，较正常工况相比，软化工况下，3 种激振频率表层动应力幅值衰减量较大，都达到了 50% 以上，在距路基表面 0.35 m 处达到最大值，分别为 67%，70% 和 75%；距路基表面 0.35 m 以上，随着激振频率的增大，动应力衰减量逐渐增大，0.35 m 以下，动应力衰减量先增大后减小，19.1 Hz 时最大；从图 10 中可以明显看出，软化工况衰减曲线在 0.3~0.6 m 范围发生弯折现象，这是由于 8 层与 9 层之间土体刚度差较大，引发界面效应，使得弱化层(0.35~0.66 m)处的动应力幅值不但没有减小，反而有增大的趋势，且随着频率的增加越来越明显，而在弱化层之下，软化工况的动

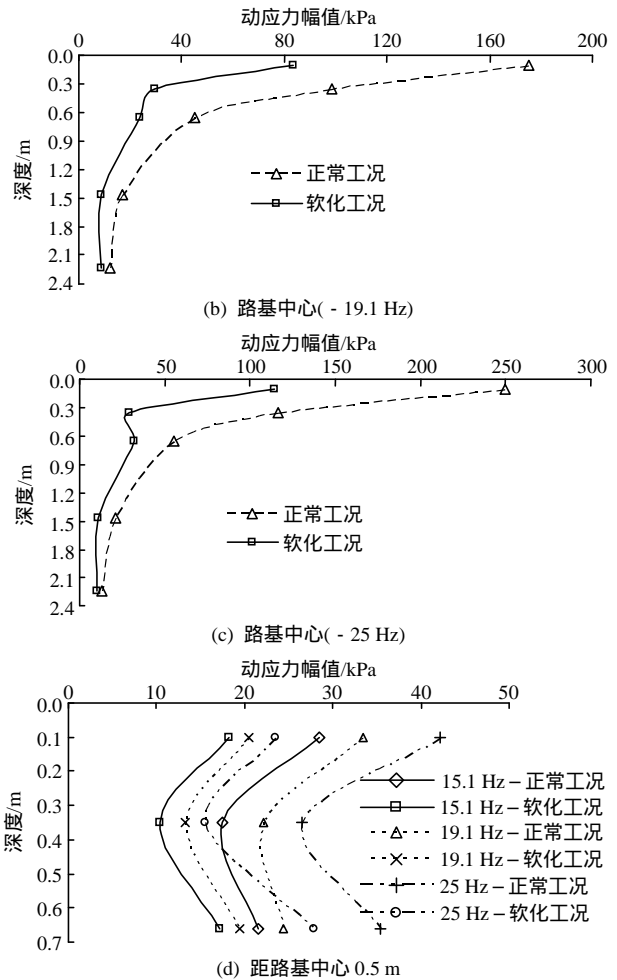
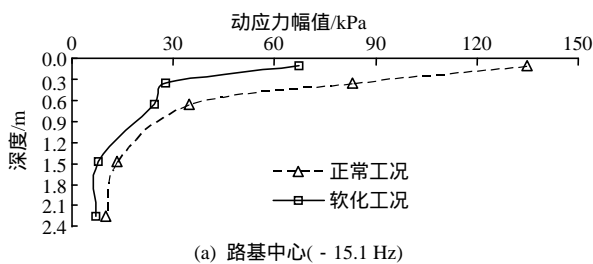


图 10 正常工况与软化工况动应力沿路基深度方向变化曲线

Fig.10 The varying curves of dynamic stress along the roadbed depth in the conditions of normal and disaster

应力幅值的衰减量明显减小。

距路基中心水平距离 0.5 m 处，沿深度方向上，正常工况与软化工况曲线变化趋势总体趋于一致；随着深度的增加，动应力幅值先减小后增加，这是由于动力波在传递过程中存在一定的应力扩散角，而深度为 0.66 m 处的测点正好位于应力扩散角范围之内，因此此处的动应力幅值较 0.33 m 处大；激振频率的改变对路基深度 0.1 m 以内影响较大，以下部分变化不明显。

3.3 加速度及动应力幅值沿路基中心横向变化规律

表 9 与图 11 为正常工况与软化工况下加速度及动应力沿路基中心横向变化数据与曲线。

从表 9 和图 11 可以看出，3 种频率下正常工况与软化工况总体衰减趋势相同，随着距离路基中心水平距离的增加，加速度幅值大幅减小，在距路基中心 0.5 m 处，各频率下衰减量达到最大值，分别为 74%，79%，74%，说明加速度沿路基横向要比

表 9 正常工况与软化工况加速度及动应力沿路基中心横向的衰减量

Table 9 The reduction of acceleration and dynamic stress along the roadbed transverse in the conditions of normal and disaster

加速度沿路基中心横向变化数据(距路基表面 0.1 m)				
传感器层位	距中心水平距离/m	衰减量/%		
		频率 15.1 Hz	频率 19.1 Hz	频率 19.1 Hz
11 层	0.0	49	53	43
	0.5	74	79	74
	1.0	41	48	44

动应力沿路基中心横向变化数据(距路基表面 0.35 m)				
传感器层位	距中心水平距离/m	衰减量/%		
		频率 15.1 Hz	频率 19.1 Hz	频率 25 Hz
10 层	0.0	67	70	70
	0.5	41	40	36

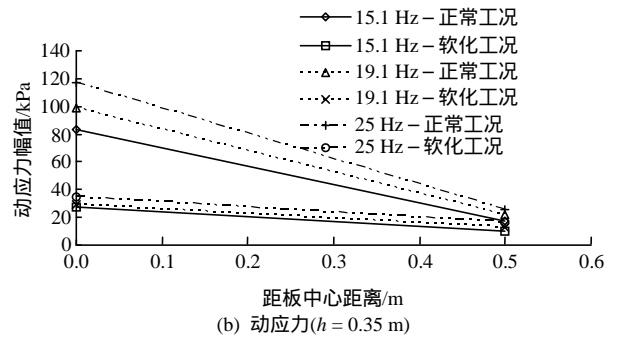
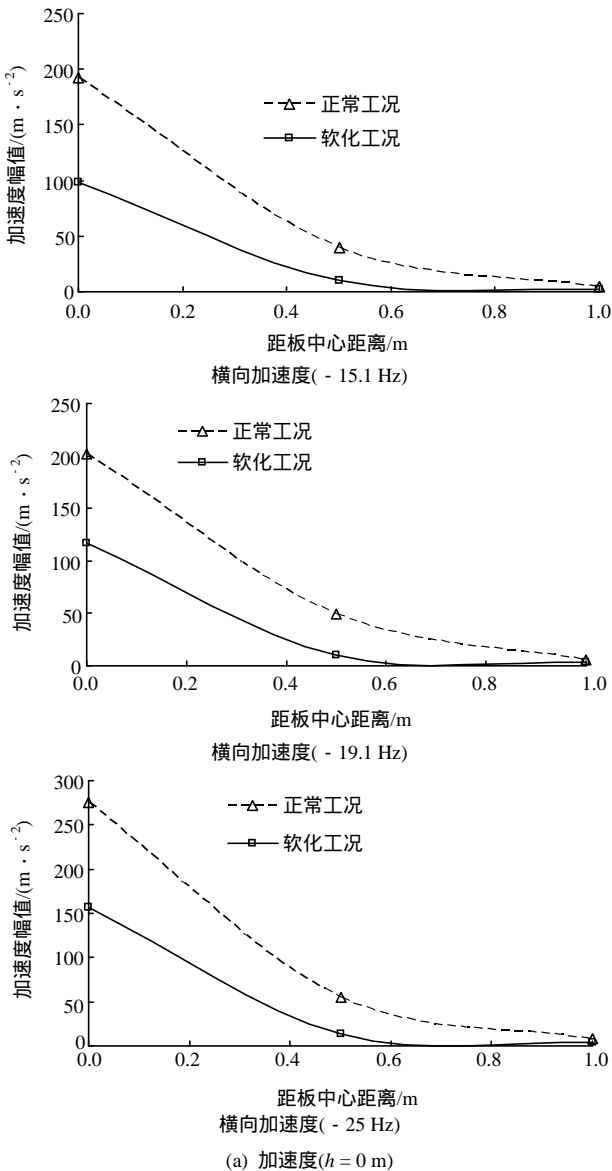


图 11 正常工况与软化工况加速度及动应力沿路基中心横向变化曲线

Fig.11 The varying curves of acceleration and dynamic stress along the roadbed transverse in the conditions of normal and disaster

深度方向衰减迅速得多；随着激振频率的增大，加速度衰减量先增大后减小，在 19.1 Hz 时达到最大值。

各激振频率下，2 种工况的动应力曲线总体变化趋势一致，动应力幅值均随着距路基中心水平距离的增加而减少，且路基中心处动应力衰减量相对加速度更大；动应力衰减量随频率增加变化不明显。

4 结 论

(1) 在激振中心处，沿路基深度方向上，软化工况的加速度幅值较正常工况进一步减小，越靠近路基表面，软化工况的加速度幅值较正常工况的衰减量越明显。在距离激振中心 0.5 m 处，沿路基深度方向上，软化工况的加速度在软硬交界面上出现了增大，而后随深度增加减小的规律。

(2) 与加速度衰减规律基本类似，在路基中心处，沿深度方向上，软化工况的动应力较正常工况进一步减小，越靠近路基表面，衰减量越明显；不同的是，软化工况的动应力在软硬交界面处出现了略有增大的现象。

(3) 动应力在路基中的传播存在应力扩散效应。距离路基中心 0.5 m 处的深度方向上，路基深部(0.66 m)的动应力幅值较浅部(0.35 m)大。

(4) 与正常工况相比，软化工况下加速度和动应力沿路基横向的减小速度较深度方向快得多，且动应力较加速度减小得更快。

(5) 随着激振频率的增加，沿路基深度方向，相同深度处的加速度衰减量先增大后减小，且激振频率为 19.1 Hz 时达到最大值，沿水平方向规律相同；在距路基表面 0.35 m 以上，沿路基深度方向，

动应力衰减量逐渐增大, 0.35 m 以下, 动应力衰减量先增大后减小, 频率为 19.1 Hz 时最大, 沿水平方向变化不明显。

参考文献(References) :

- [1] 纵 岗, 梅 岭, 姜朋明, 等. 降雨入渗作用下土质边坡稳定性分析[J]. 长江大学学报自然科学版: 理工旬刊, 2013, 10(12): 56–59.(ZONG Gang, MEI Ling, JIANG Pengming, et al. Soil slope stability analysis under the condition of rainfall infiltration[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science, 2013, 10(12): 56–59.(in Chinese))
- [2] 李龙起, 罗书学, 魏文凯, 等. 降雨入渗对含软弱夹层顺层岩质边坡性状影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1 772–1 778.(LI Qilong, LUO Shuxue, WEI Wenkai, et al. Model tests of rainfall infiltration effect on bedding rock slope with weak interlayer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1 772–1 778.(in Chinese))
- [3] 豆红强, 韩同春, 龚晓南. 降雨条件下考虑裂隙土孔隙双峰特性对非饱和土边坡渗流场的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 2): 4 373–4 379.(DOU Hongqiang, HAN Tongchun, GONG Xiaonan. Effects of bi-modal characteristics of fractured soil pore on seepage field of unsaturated soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.2): 4 373–4 379.(in Chinese))
- [4] 孙必雄. 降雨入渗对非饱和土路基稳定性的影响研究[J]. 路基工程, 2015, (1): 129–132.(SUN Bixiong. Study on effect of rainfall infiltration on stability of unsaturated soil subgrade[J]. Subgrade Engineering, 2015, (1): 129–132.(in Chinese))
- [5] 刘兴旺. 降雨入渗条件下路基稳定性分析[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2006.(LIU Xingwang. Factors analysis of subgrade stability due to rainfall infiltration[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2006.(in Chinese))
- [6] 王 强, 刘仰韶, 傅旭东. 路基砂土湿化变形的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(4): 21–27.(WANG Qiang, LIU Yangshao, FU Xudong. Experimental study on the wet deformation of roadbed sand[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(4): 21–27.(in Chinese))
- [7] 苗雷强. 重载铁路路基湿化动力特性试验研究[博士学位论文][D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.(MIAO Leiqing. Research on wetting dynamic characteristics of heavy haul-railways subgrade[Ph. D. Thesis][D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2014.(in Chinese))
- [8] THOM N H, BROWN S F. Effect of moisture on the structural performance of a crushed-limestone road base[M]. [S. l.]: [s. n.], 1987: 50–56.
- [9] LOUISE. The influence of suction changes on the stiffness of railway formation[Ph. D. Thesis][D]. Southampton: University of Southampton, 2011.
- [10] MAREE J H, FREEME C R, VAN ZIJL N, et al. The permanent deformation of pavements with untreated crushed stone bases as measured in heavy vehicle simulator tests[J]. Australian Road Research, 1982, 11(PT4): 16–28.
- [11] HAYNES J H, YODER E J. Effects of repeated loading on gravel and crushed stone base course materials used in the AASHO road test[J]. Highway Research Record, 1963, (3): 15–27.
- [12] BARKSDALE R D. Laboratory evaluation of rutting in base course materials[C]// Proceedings of the Third International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement. [S. l.]: [s. n.], 1972: 161–174.
- [13] 赵 星. 水位变化对高速铁路基动力特性及累积变形特性的影响研究[博士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2014.(ZHAO Xing. The influence of water level variation on dynamic performance and cumulative deformation of subgrade[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.(in Chinese))
- [14] 陈仁朋, 赵 星, 蒋红光, 等. 水位变化对无砟轨道路基变形特性影响的研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(3): 87–93.(CHEN Renpeng, ZHAO Xing, JIANG Hongguang, et al. Model test on deformation characteristics of slab track-subgrade under changes of water level[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(3): 87–93.(in Chinese))
- [15] 商拥辉, 董 晴. 基于我国南方连续降雨对软土路基影响的研究[J]. 北方交通, 2010, (8): 3–5.(SANG Yonghui, DONG Qing. Study on influence continuous rainfall on soft soil subgrade in southern part of our country[J]. Northern Communications, 2010, (8): 3–5.(in Chinese))
- [16] 徐 翔. 高速铁路路基动力响应的现场测试及物理模型试验研究[博士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2014.(XU Xiang. Study on field measurement and full-scale model test on dynamic response of high-speed railway subgrade[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.(in Chinese))
- [17] 徐 进. 高速铁路路基模型试验系统研究与动力分析[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2012.(XU Jin. Research on model test system of high speed railway subgrade and dynamics analysis[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2012.(in Chinese))