论文

黄土振动促渗效应研究

王家鼎^{1,2*}, 许元珺^{1,2}, 张登飞^{1,2}, 谷天峰^{1,2}

1. 西北大学地质学系, 西安 710069;

2. 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

* 通讯作者, E-mail: wangjd@nwu.edu.cn

收稿日期: 2020-10-23; 收修改稿日期: 2021-01-26; 接受日期: 2021-02-09; 网络版发表日期: 2021-03-11

国家自然科学基金项目(批准号: 42027806、41630639)和国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC1504703)资助

摘要 在大规模高铁和重载铁路建设与运营过程中, 出现了一类新型黄土灾害, 即机车振动、降雨和干湿循环联合作用下诱发的铁路路基黄土湿陷振陷与斜坡体崩解滑移. 这对于铁路毫米级变形控制而言后果不堪设想, 严重地威胁着铁路运营与人民生命安全. 为此, 作者提出了黄土受振动、水和干湿循环等影响下的“五促效应”, 即促裂、促渗、促崩(解)、促滑和促沉效应. 本文主要探讨黄土振动促渗效应: 开展了铁路沿线黄土斜坡的机车振动波的现场采集、处理, 获得了机车振动下黄土斜坡响应规律, 其中机车振动的优势频率主要集中在18~22Hz, 最大振幅达0.4mm; 在自主研发的振动促渗仪上开展了原状黄土的机车振动促渗试验, 揭示了机车振动加快水在黄土中的渗透与提高饱和程度的振动促渗效应, 其中振动作用下饱和和渗透系数约为非振动下的1.5~20倍并在振动频率20Hz时达到最大; 开展了黄土的振动积水入渗试验, 获得了振动作用下加速水分入渗、推进湿润锋演化以及加快气体逃逸等规律, 其中振动频率、振动幅值和干密度等因素对其影响明显. 以上所揭示的黄土振动促渗效应及其主控因素为探究机车振动、降雨和干湿循环联合作用触发黄土灾害机理做出了开创性的工作.

关键词 黄土灾害, 机车振动, 五促效应, 振动促渗, 气体逃逸, 黄土滑坡

1 引言

中国的高速铁路和重载铁路无论在建设里程、建设速度和运营安全方面, 都举世瞩目. 然而在山区大规模的高铁重载建设与运营过程中, 因机车振动、气候变化及人工开挖卸载等多致灾因素耦合作用时常会发生一些新型的地质灾害: 即上有隧道变形塌方, 下有湿陷、振陷沉降, 左有滑坡变形侧挤, 右有河流冲刷滑塌牵引. 其中, 机车振动与降雨联合作用诱发斜坡变形滑移和路基沉陷最为典型(图1). 无论是滑坡侧挤铁轨而

改变轨间距还是铁轨下沉, 对于铁路毫米级变形控制标准而言, 其后果都是火车脱轨, 灾难环生, 极大地阻碍了铁路事业的快速发展. 例如, 2020年京广铁路湖南省永华段由于滑坡侧挤铁轨, 引起多节车厢脱轨倾倒(图1a), 事故造成1人死亡, 4人重伤, 123人轻伤; 2009年石太高铁因长时间强降雨, 引起斜坡滑移侧挤路基和“耦合湿振陷”地基下沉而险些发生灾难, 被铁道部列为重大事故(图1f); 陇海铁路沿线发生过不少因机车的长持时振动与降雨联合作用诱发黄土滑坡; 成昆铁路沿线发生区域性滑坡群, 铁二院位移观测滑坡前缘

中文引用格式: 王家鼎, 许元珺, 张登飞, 谷天峰. 2021. 黄土振动促渗效应研究. 中国科学: 地球科学, 51(5): 763–782, doi: 10.1360/SSTe-2020-0293

英文引用格式: Wang J, Xu Y, Zhang D, Gu T. 2021. Vibration-induced acceleration of infiltration in loess. Science China Earth Sciences, 64(4): 611–630, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9741-x>

图1 机车振动、降雨和干湿循环联合作用诱发的新型地质灾害

(a) 京广铁路永华段滑坡; (b) 山西某重铁沿线的典型滑坡; (c) 山西阳-大铁路沿线某滑坡; (d) 法国高速列车(TGV)在接近法德边境的斯特拉斯堡的路段滑坡(https://www.sohu.com/a/377989394_100016456); (e) 加拿大Ashcroft附近铁路沿线的滑坡(Huntley等, 2019); (f) 石太铁路沿线某路基沉陷; (g) 京广铁路温州段; (h) 浙江萧甬铁路余姚市牟山段路基塌陷(<http://news.cri.cn/gb/3821/2005/05/11/1245@543217.htm>)

滑速对列车振动极为敏感(李秉生等, 1987)。这类地质灾害具有“小变形、高风险”的特征, 其关键科学问题是机车振动、降雨和干湿循环联合作用引起的黄土促裂、促渗、促崩(解)、促滑和促沉效应(简称“五促效应”, 图2)。由于黄土(特别是马兰黄土 Q_3)结构疏松、具大孔隙性、力学强度差, 具备很强的水敏性和振敏性, 所以机车长持时振动使土体产生松动、开裂, 降雨会沿裂缝入渗, 加速裂缝的纵向延伸与扩展(促裂效应, 图2a); 同时长期的机车振动又会加速土体孔隙中水相的入渗与气相的逃逸(促渗效应, 图2b); 斜坡表面的土体因水、干湿循环和振动而产生崩解(促崩效应, 图2c); 当水的湿化作用达到一定程度, 就会诱发土体发生侧向滑移(促滑效应, 图2d)和竖向振陷湿陷耦合效应(促沉效应, 图2e)。这种源于实践的新型地质灾害亟待深入探索, 以期破解此类地质灾害防控技术瓶颈背后的关键科学问题。对于机车振动下黄土的促裂效应、水/干湿循环/振动联合促崩效应、水的增湿剪切促滑效应以及振陷湿陷耦合效应已开展了相关的研究工作(Wang等, 2019a, 2019b, 2019c; Zhang等, 2020a, 2020b),

本文重点针对振动促渗效应进行探讨。

大型工程遇到的土大多处于非饱和状态(地下水位之上), 对于中国西部的黄土高原地区更是如此。降雨入渗土质斜坡涉及土体孔隙中水相的渗流与气相的逃逸过程, 而水-气两相耦合渗流又取决于土的水与气的渗透特性。目前, 在土的水与气的渗透方面, 国内外学者深入探讨了土的内部因素(结构、初始干密度、湿度等)和外部环境(干湿循环、冻融循环、温度及应力等)对渗水特性(Cai等, 2014; Lake等, 2017; Romero等, 1999; Wang等, 2020; Ye等, 2012; 陈正汉, 2014; 崔颖和缪林昌, 2011; 刘奉银等, 2010; 姚志华等, 2012; 李喜安等, 2018; 张登飞等, 2018; 张登飞等, 2017)和渗气特性(Zhang等, 2020a; Chen等, 2017; Nguyen等, 2020; Zhan等, 2014; 姚志华等, 2012)的影响, 建立了考虑这些影响因素的渗气与渗水的渗透性函数。在土体的水与气两相渗流方面, 广泛进行了考虑各向异性与自重应力影响的一维土柱模型试验(詹良通等, 2017; 覃小华等, 2017; 张林等, 2019)和考虑土体水-气两相耦合(詹良通等, 2017)、固-液-气三相耦合(吴礼舟等, 2009;

图 2 “五促效应”的演化示意图

胡冉等, 2011)的渗流数值模拟研究, 探讨了降雨强度、地质结构、土体密度及初始湿度对入渗强度、湿润锋行进和土体湿度时空分布的影响(Li等, 2016; Li等, 2009; Tan等, 2018; 詹良通等, 2017; 覃小华等, 2017; 张林等, 2019); 揭示了积水入渗过程中气相阻碍入渗机制(胡冉等, 2011; Wang等, 1998; Touma和Vauclin, 1986), 研究了土的类型、干密度和初始含水率对封闭气泡含量及其逃逸的影响(吴争光和张华, 2012). 然而, 对于铁路沿线的土质斜坡, 不仅需要考虑降雨入渗过程中固-液-气的三相耦合问题, 还需要考虑机车振动作用的影响. 因为, 从土动力学理论和试验可知, 大振幅、短持时的动荷载组合与小振幅、长持时动荷载组合所产生的效果是一样的; 在机车振动作用下, 一方面会打破土中孔隙水气的吸附平衡态, 加速土体孔隙中水相的连通与原有连通气相的逃逸与溶解进程; 另一方面会迫使原已封闭气泡逃逸, 释放的渗透通道重新被水占据, 增加土体的饱和程度. 这一现象对于具有显著的动力易损性和水敏性的结构性黄土更为明显. 而现有的对振动作用下岩土体渗透性的研究多是通过先振动稳定后再进行渗透试验, 将振动作用引起土体孔隙比变化引入到Kozeny-Carman模型(Carrier, 2003)中以反映振动作用的影响(Chen等, 2014; 武军等, 2015), 这就难以揭示振动促渗效应的同步动态过程, 有关黄土的机车振动促渗效应的研究目前国内外还鲜有报道.

本文基于机车振动的现场调查, 结合自主研制的振动促渗仪, 针对湿陷性黄土开展机车振动促渗试验, 获取铁路沿线机车振动的黄土斜坡响应规律; 分析机车振动的等效频率与幅值对黄土饱和和渗透系数与积水入渗及其气体逃逸的影响, 以期深入理解振动促渗效应及其主控因素, 为揭示机车振动与降雨耦合作用诱发的黄土灾害机理奠定坚实基础.

2 研究方案与方法

2.1 试验用土

本次试验用土取自咸阳市泾阳县某斜坡侧壁的原状Q₃黄土, 取土深度1~5m. 取土过程中, 先除去表层根植土后, 在预设的取样深度处人工削取原状土块(约150mm×150mm×150mm), 标记取样的沉积方向与深度后, 立刻用2~3层厚塑料膜包裹, 以保持原状黄土的结构和湿度. 随后, 将包裹好的原状土块放在特制的防

扰动的木架内, 平稳地运回实验室. 通过三组平行试验, 测定黄土的基本物理性质指标的平均值: 天然含水率 $w_n=14.2\%$, 天然干密度 $\rho_d=1.28\sim 1.34\text{ g cm}^{-3}$, 液限 $w_L=33.6\%$, 塑限 $w_p=18.3\%$, 塑性指数 $I_p=15.3\%$. 土的粒度分布表明(图3), 试验所用的黄土主要由粉粒(73%)和黏粒(23%)组成.

2.2 黄土斜坡上列车振动荷载的现场采集

为获取机车振动荷载特征以开展黄土的振动促渗试验, 选择陇海铁路沿线宝鸡段某斜坡作为监测位置(图4a), 开展垂直于机车轨道的运行方向(Y方向)和铅垂方向(Z方向)加速度变化现场采集测定. 监测方案具体如下:

(1) 监测点布设: 依据监测位置的地形, 在保证人员安全的前提下共布设7个监测点(B0~B6, 图4b). 其中B0点埋设三向加速度传感器, 其余测点埋设两个ICP/IEPE单向组成加速度传感器.

(2) 监测机车类型: 包括客运列车和货运列车两类, 其中客运列车车型包括25A型和25G型列车, 最高时速 160 km h^{-1} ; 货运列车为重载货运列车, 车型为包括C60型和C62型敞车等, 最高时速 150 km h^{-1} .

(3) 监测数据设置: 监测过程设置的采样频率为 125 kHz , 采集12组数据, 每个通道采集数据量超过1万条.

为获取机车振动的频谱与幅值特征, 对采集的机车振动加速度信号 $a(t)$ 快速离散傅里叶变换为

$$a(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} a(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (1)$$

图3 黄土的颗粒级配累计曲线

图 4 机车振动波的现场采集

(a) 监测位置; (b) 监测点布置

式中 ω 为圆频率, T 为采样周期, $i^2 = -1$. $a(t)$ 的功能谱 $P(\omega)$ 用 $a(\omega)$ 及其复共轭 $a^*(t)$ 表示:

$$P(\omega) = \frac{1}{T} a(\omega) a^*(t), \quad (2)$$

利用傅里叶逆变换和积分定理将频率域再转化为时域. 由于变化过程中得到的数列为复数, 取其实部得到了振动幅值 A 曲线

$$A = \sum_{k=0}^{N-1} A_{d_k} \cos(\omega_k t + \varphi_{d_k}), \quad (3)$$

式中 φ_{d_k} 为初相角.

2.3 黄土振动促渗试验

为研究黄土的振动促渗效应, 自主研制了饱和振动促渗测试系统(图5a)和振动土柱促渗测试系统(图5b). 饱和振动促渗测试系统主要包括: 电磁振动台、

供水装置、TST-55渗透仪、水头与渗流量的自动采集装置, 可模拟机车振动作用下黄土的饱和和渗透过程; 振动土柱促渗测试系统主要包括电磁振动台、供水装置、土柱仪、水分计, 可模拟机车振动作用下黄土的积水入渗及其气体逃逸过程. 具体的仪器结构详见文献(许元珺, 2017).

为探讨黄土水相的加速入渗与气相的加速逃逸, 进行了两类试验, 具体如下:

(1) 饱和振动促渗试验

开展机车振动的加速饱和效应研究. 根据现场采集的加速度响应分析(3.1节), 利用电磁式振动台施加等效的机车振动荷载. 控制条件为: 正弦波施加振幅 A 为0.2、0.4mm, 频率 f 为10、15、20和25Hz的振动荷载; 考虑到实际机车振动与降雨入渗的作用次序对饱和效应影响, 进行三种作用次序试验: ①振动入渗同

图5 振动促渗测试系统
(a) 饱和振动促渗测试系统; (b) 振动土柱测试系统

步; ②先入渗后振动; ③先振动后入渗。
①试验是将天然含水率的环刀试样装入渗透仪, 在施加预定振动荷载的同时, 打开阀门将变水头管中的水对试样进行饱和。试验过程中观察、记录上部出水口的出水情况与渗水速率, 待渗水速率稳定后停止试验, 测定试样含水率。②试验是利用变水头管先对原状黄土试样进行饱和, 待渗水速率稳定后再施加预定的振动荷载。观察、记录施加振动荷载后的渗水速率与稳定时间, 待稳定后停止试验, 测定含水率。③试验是先将原状黄土试样振动24h后再进行饱和, 观察、记录出水情况、渗水速率及其稳定时间, 待稳定后停止试验, 测定其含水率。

开展机车振动下饱和和渗透系数定量测定。对饱和和原状黄土在振动作用下开展变水头渗透试验, 试验控制条件见表1。

试验时, 先将天然含水率的环刀试样进行抽气饱和(饱和度达95%以上), 再装入渗透仪。在施加预定值的振动荷载的同时, 进行常规变水头饱和和渗透试验。本文研究的Q₃黄土主要以粉粒和黏粒为主(图3), 其雷诺数 R_e 不大于10。由此, 假定在振动作用下渗透性符合达西定律, 其饱和黄土渗透系数 $k_s(\text{cm s}^{-1})$ 为

表1 振动饱和和渗透试验^{a)}

试验编号	$w_0(\%)$	$f(\text{Hz})$	$A(\text{mm})$
SPT-1-1	17.4	0	0
SPT-2-1	17.4	10	0.2
SPT-2-2			0.4
SPT-3-1	17.4	15	0.2
SPT-3-2			0.4
SPT-4-1	17.4	20	0.2
SPT-4-2			0.4
SPT-5-1	17.4	25	0.2
SPT-5-2			0.4

a) 取土深度5m。 w_0 , 初始含水率; ρ_d , 干密度; f , 振动频率; A , 振动幅值

$$k_s = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{H_1}{H_2}, \tag{4}$$

式中 a 为变水头管的截面积(cm^2), L 为试样高度(cm), H_1 与 H_2 分别为 t_1 与 t_2 时刻对应的水头高度(cm)。试验时温度对渗透系数有一定影响, 已换算成标准温度(20°C)下的渗透系数。

(2) 振动土柱积水入渗试验

为探讨机车振动加速黄土的积水入渗与气体逃逸进程, 利用电磁式振动台施加等效正弦波以模拟机车振动荷载; 利用土柱仪模拟常水头积水入渗过程, 控制的积水高度为10cm. 为考虑较大湿度范围气体加速逃逸进程, 选取较低初始含水率($w_0=6\%$)制备土柱试样; 为考虑不同深度土层的积水入渗过程, 制备2种不同干密度的土柱试样. 试验控制的条件见表2.

试验时, 先在底部铺设2cm厚的砂卵石, 按控制的干密度和初始含水率, 将配制散土按8层击实在土柱筒中. 击实完后, 在其上部铺设2cm厚的砂卵石; 在预定位置插入水分计并做好接口密封. 施加预定振动荷载的同时, 土柱顶部形成并保持10cm高的恒定水头, 开始积水入渗试验. 当截面处水分计测量值基本稳定, 且土柱底部渗水稳定, 停止试验, 测定不同截面处土柱的含水率, 以校正水分计测试结果.

3 试验结果与分析

3.1 机车振动下黄土斜坡响应分析

3.1.1 机车振动加速度变化

客运与货运列车行驶引起黄土斜坡响应的典型加速度时程($a_{y,z}-t$)曲线如图6所示. 为定量对比分析机车振动加速度特征量变化规律, 统计得到机车振动在Y

与Z方向最大加速度 $a_{y,\max}$ 和 $a_{z,\max}$, 整理出 $a_{\max}-Y$ 关系如图7所示. 可以看出:

(1) 无论垂直于轨道运行方向(Y方向)或铅垂方向(Z方向), $a_{y,z}-t$ 曲线皆呈对称分布, 反映了机车振动引起黄土斜坡响应显著周期性.

(2) 对比列车与货车的 $a_{\max}-Y$ 关系(图7a~7c与7b~7d), 发现在不同测点处货车的加速度峰值皆比客车的大, 这是由于货车轴重所致; 随着远离铁轨(Y值增大), 加速度衰减程度更为显著, 加速度较大波易衰减, 加速度较小波易传播.

(3) 无论客运列车或货运列车, 对比 $a_{y,\max}-Y$ 和 $a_{z,\max}-Y$ 曲线(图7a~7b与7c~7d), 发现Z方向列车振动较大, 反映了机车振动波在垂直于轨道运行方向传播更明显. 另外, $a_{y,z}$ 皆沿着Y方向逐渐衰减; 根据监测点B6的时程线对比发现, 二者振动加速度基本相近, 说明Z方向振动衰减更快.

3.1.2 机车振动的频谱与幅值特征

对图6的 $a_{y,z}-t$ 时程曲线进行傅里叶变换, 整理得到能量与频率的 $W-f$ 变化典型曲线如图8~9所示(Z方向为例); 进行频域积分变换, 整理得到振幅 $A-t$ 典型曲线如图10所示(以Z方向为例). 可以看出:

(1) 无论货运或者客运列车, 随着远离铁轨, 不同测点的主频段逐渐降低. 例如, 对于客运列车(图8), B0点的振动能量主要集中在13~30Hz之间, 出现多个明显峰值; 频率为18~25Hz处能量最大, 高频处能量较小; B3监测点的主频段为19~22Hz, B4监测点的主频段为15~20Hz, 到达B6监测点时振动波的主频率为22Hz. 反映了振动波传播距离越远, 高频段能量被土层吸收越多.

(2) 不同列车引起的振动频率存在较大差异. 相比于客运列车, 货运列车引起的振动优势频段分布范围较广, 最大能量主要集中在振动频率为(20±3)Hz范围内.

(3) 不同监测位置点的振动幅值时程曲线基本在10s以内振动幅值较大(图10). 在监测点B0时最大振幅达0.4mm, 当振动波传播到B6点时最大振动幅值仅为0.07mm. 这是由于机车振动能量在传播过程中不断衰减, 传播的距离越远, 能量衰减越多, 导致其振幅逐渐减小.

(4) 对比客运与货运列车的幅值时程曲线, 后者的

表 2 振动土柱积水入渗试验^{a)}

试验编号	$w_0(\%)$	$\rho_d(\text{g cm}^{-3})$	$f(\text{Hz})$	$A(\text{mm})$
SLT-1-1	6.0	1.17	0	0
SLT-1-2		1.38	0	0
SLT-2-1	6.0	1.17	15	0.2
SLT-2-2			15	0.4
SLT-2-3			20	0.2
SLT-2-4			20	0.4
SLT-2-5			25	0.2
SLT-2-6			25	0.4
SLT-3-1	6.0	1.38	15	0.2
SLT-3-2			15	0.4
SLT-3-3			20	0.2
SLT-3-4			20	0.4
SLT-3-5			25	0.2
SLT-3-6			25	0.4

a) w_0 , 初始含水率; ρ_d , 干密度; f , 振动频率; A , 振动幅值

图6 列车行驶引起黄土斜坡的加速度响应

(a) 货运列车-Y方向-B3点; (b) 货运列车-Y方向-B6点; (c) 客运列车-Z方向-B3点; (d) 客运列车-Z方向-B6点

波数较大,这是由于货运列车载重大,行驶速度较慢所致;对比货运列车B0监测点的振动幅值时程曲线发现,客运列车行驶引起的黄土斜坡初始振动幅值相比而言较小,达0.2mm;表明振动幅值的大小与列车的载重和车速具有明显关联性。

综上所述,货运和客运列车引起的振动主频率主要集中在18~22Hz,最大振幅约为0.4mm,这也是黄土机车振动促渗试验的振动荷载设定的依据。

3.2 饱和和振动促渗效应研究

为探讨振动加速黄土饱和和渗透与提升饱和程度,根据振动与入渗的三种不同作用次序试验渗流稳定后所对应的时间 t 与含水率 w ,整理得到不同振幅 A 与振动频率 f 下 t - f 和 w - f 关系见图11所示,其中 $f=0$ 表示在无振动荷载作用下常规变水头渗流稳定后对应的时间 t_0 与含水率 w_0 。引入振动加速渗透稳定时间减小率 β ($=1-t/t_0$)和振动提升饱和程度变化率 β_1 ($=1-w/w_0$),由图11整理得到 β - f 和 β_1 - f 关系见图12所示。由图11~12

可以看出:

(1) 相比于无振动下原状黄土的渗流稳定时间,在振动作用下随着振动频率的增加,对应的渗流稳定所需时间皆明显减少(图11a),其减小率 β 高达0.38~0.67(图12a)。反映了振动作用加速黄土的饱和进程效应显著,且加速进程与振动频率 f 密切相关。随着 f 的增加,渗流稳定时间呈先减小后增大的趋势,以 $f=20$ Hz体现最为明显(图中灰色阴影区域),这可能是由于试验振动频率接近与所研究黄土的固有频率(约为20Hz,王进怀,1998),使其产生共振效应所致。

(2) 振动作用对加速黄土饱和程度亦有明显的促进作用,振动作用下原状黄土稳定后含水率皆明显高于无振动作用就是其有力的证据。同样,以 $f=20$ Hz为界,当 $f<20$ Hz时随着振动频率的增加最终稳定含水量逐渐增加;反之,随之而减小。

(3) 不同振幅 A 下 t - f 和 w - f 曲线基本呈相似的变化趋势,其影响主要体现在振动饱和效应的程度上(图11):振幅愈大,渗透稳定所需的时间愈小,渗透稳定

图 7 最大加速度远离铁轨衰减规律

(a) 和(b) 传播方向的影响: (a) 货车; (b) 客车. (c) 和(d) 列车类型的影响: (c) Z方向; (d) Y方向

图 8 Z方向不同测点客运列车频谱分析

(a) B0; (b) B3; (c) B4; (d) B6

后含水率愈大, 振动饱和效应愈显著.

(4) 振动与入渗的作用次序对振动饱和效应亦有明显的影响. 对于振动加速饱和进程而言, 振动入渗同步对应的 t - f 曲线明显高于先振动后入渗的; 对于 w - f

曲线, 振动入渗同步方式的最高, 先振动后入渗方式的次之, 先入渗后振动方式的最小. 表明振动扰动与浸水扰动的双重因素作用会改变黄土内部结构, 打破了土孔隙中水气平衡状态, 加速了黄土的饱和进程与程度,

图9 Z方向不同测点货运列车频谱分析

(a) B0; (b) B3; (c) B4; (d) B6

图10 Z方向客运与货运列车振幅时程曲线

(a) B0; (b) B3; (c) B6

且振动或浸水的扰动单一因素的累积作用皆小于二者同步的叠加作用。

为探讨振动加速饱和和渗透效应, 由振动作用下饱和黄土的变水头渗透试验整理得到不同振动条件下饱和渗透系数 k_s 与时间 t 的 k_s - t 关系见图13所示。可以看出:

(1) 不同振动渗透试验工况下 k_s - t 曲线皆在无振动作用条件(SPT-1-1)之上。对于无振动条件下饱和渗透

系数量级为 $10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$, 而振动条件下对应的 k_s 量级约在 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$, 比无振动条件下高约1~2量级, 证实了振动加速饱和和渗透作用。这点对于深入剖析“长持时、小振幅”的机车振动与降雨耦合作用引发的地质灾害的触发机理, 并提出科学合理的防控技术具有不可忽视的现实意义。

(2) 振动作用下, 随着时间的推移, 饱和渗透系数 k_s 呈现两阶段变化趋势: 第一阶段 k_s - t 关系呈迅速减小, 第二阶段其关系呈缓慢减小至趋于平稳; 两阶段转折点对应的的时间基本分布在较窄的范围(图中灰色填充区域), 振幅与频率的影响不明显。这一变化趋势的可能原因是由于振动作用扰动了饱和黄土团粒间孔隙结构而发生振陷, 致使团粒间孔隙结构不断调整至稳定平衡态。

(3) 相同振幅 A 下, 随着振动频率 f 的增加, k_s - t 曲线呈先上升后下降趋势, $f=20 \text{ Hz}$ 时的曲线最高, 也就是在该频率下振动加速渗透作用最为显著。这与振动加速饱和和效应的结论相一致。

基于图13中 k_s - t 曲线第二阶段的渗透系数, 统计整理得到不同振动幅值和频率下饱和渗透系数的最小值、25%四分位数、中位数、75%四分位数及最大值, 绘制相同振动幅值下不同振动频率的饱和渗透系数箱线图如图14所示。可见, 振动作用下不同形式的统计渗透系数 k_s 皆明显地高于非振动条件; 若以无振动条件下渗透系数的中位数 k_{s0} 作为参考, 对于 $A=0.4 \text{ mm}$, $f=10, 15, 20, 25 \text{ Hz}$ 对应的 k_s 与 k_{s0} 之比 k_s/k_{s0} 分别为1.7,

图 11 振动加速黄土饱和进程与程度

 (a) $A=0.4$ mm; (b) $A=0.2$ mm

图 12 振动加速黄土饱和进程与程度的变化率

 (a) $A=0.4$ mm; (b) $A=0.2$ mm

3.3, 9.7, 5.0; 对于 $A=0.2$ mm, k_s/k_{s0} 值略有下降, 分别为 1.4, 1.9, 5.1, 4.4. 综合比较考虑所研究的机车振动促渗效应, 其分别介于 1.5~10 倍的饱和和渗透系数范围, 这为定量考虑振动引起的加速渗透效应提供了依据.

3.3 振动加速积水入渗与气体逃逸效应分析

3.3.1 无振动作用下积水入渗

由无振动下土柱的积水入渗试验(SLT-1)整理得到积水入渗过程中不同截面处体积含水率 θ_w-t 的时程线如图 15a~15b 所示. 假定顶面开始积水入渗时即达到

饱和, 不同时刻土柱的湿润锋演化进程 $h-\theta_w$ 如图 15d~15e 所示. 可以看出:

(1) 对于两种干密度的土柱体, 在积水入渗过程中各监测点最大体积含水率约为 0.34, 部分监测点的体积含水率仅达到 0.23 左右, 距饱和含水率 θ_s (分别为 0.57 和 0.49)相差较大. 说明常水头积水入渗难于使土体完全饱和, 尚存在较多封闭气泡.

(2) 不同干密度土柱的体积含水率时程线具有相似的变化规律, 皆呈现出先平缓后陡变再平缓增加的趋势(图 15a~15b). 随着干密度的增加, 同一截面处 θ_w-t

向右移动(图15c), 即监测点的 θ_w 开始增长的起始时间节点增大, 且达到稳定所需的时间增长, 即增长速率降低。这是由于干密度改变了土体孔隙中的水相渗流路径与连通性, 影响了监测点体积含水率的变化。

(3) 在积水入渗过程中, 表层土的体积含水率很快由初始值增大到最大值(诸如截面测点1), 但表层土体的饱和区与其下部的过渡区的分界不明显。持续入渗, 湿润锋向深部推进, 引起体积含水量增加, 同一时刻不同截面处的 θ_w - h 呈现阶梯状分布, 即湿润锋行进呈折线型变化趋势, 可能与土体存在封闭气泡有关(吴争光和张华, 2012)。这与积水入渗的Green-Ampt模型

假设入渗有明确的水平湿润锋面, 将湿润和未湿润的区域截然分开存在较大的差异。

(4) 不同干密度土柱的湿润锋形状基本相似; 随着干密度的增加, 同一时刻 h - θ_w 向左后退移(图15f), 即土体越致密, 水分越难入渗至深部。这是由于积水入渗黄土时, 其渗流主要由其持水特性与渗透特性决定, 而二者又与干密度密切相关。

3.3.2 振动加速积水入渗效应

基于不同振动频率和振动幅值条件下积水入渗试验, 整理得到积水入渗过程中不同截面处体积含水率

图 13 振动加速饱和和渗透效应

(a) $A=0.4$ mm; (b) $A=0.2$ mm

图 14 振动作用下饱和渗透系数统计箱型图

(a) $A=0.4$ mm; (b) $A=0.2$ mm

θ_w - t 时程线和不同时刻土柱的湿润锋演化进程 h - θ_w , 分析振动频率、振动幅值和干密度的影响. 振动频率对不同截面处的 θ_w - t 与不同时刻 h - θ_w 的影响的典型曲线如图 16 所示. 可以看出:

(1) 相比与无振动作用下不同截面处的体积含水率时程线(图 15a~15b), 振动加速水分入渗与提升土体的饱和程度的效果显著. 一方面, 振动作用提前了相同截面处土柱的湿润锋感知的起始时间, 加快了达到稳定体积含水率时的速率或进程; 另一方面, 振动作用提高了土柱的体积含水率或持水能力. 振动频率愈大, 同一截面处 θ_w 变化的起始时间愈早, θ_w 上升的速率愈快, 达到稳定后的 θ_w 愈大, 且在 $f=20\text{Hz}$ 发生共振效应

的效果越为凸显.

(2) 不同频率振动作用下土柱不同时刻的湿润锋亦呈阶梯状分布; 与无振动下的情况相比, 同一时刻振动作用使得阶梯状湿润锋明显向稳定封闭气泡状态推进, 这一特性对于 $f=20\text{Hz}$ 体现最为明显. 说明振动一方面加快了水入渗孔隙驱动气泡逃逸, 另一方面将原封闭气泡通道打开, 加快气泡排出.

(3) 振动作用下积水入渗结束后土柱也未达到饱和, 但与无振动情况相比皆有较为明显的提高; 同时, 达到底部稳定渗流的时间与之相比皆有较为显著的缩短. 例如, 在未振动的状态下土体底部达到稳定渗流所需的时间 $t_s=308\text{min}$ 、体积含水率 $\theta_w=0.34$, $f=20\text{Hz}$ 对应

图 15 无振动作用下积水入渗过程中土柱不同截面处体积含水率时程线与湿润锋演化过程

(a) $\rho_d=1.17\text{g cm}^{-3}$ 时 θ_w - t ; (b) $\rho_d=1.38\text{g cm}^{-3}$ 时 θ_w - t ; (c) 相同截面干密度对 θ_w - t 影响; (d) $\rho_d=1.17\text{g cm}^{-3}$ 时 h - θ_w ; (e) $\rho_d=1.38\text{g cm}^{-3}$ 时 h - θ_w ; (f) 相同截面干密度对 h - θ_w 影响

图 16 振动频率对土柱不同截面处体积含水率时程线与湿润锋演化过程的影响

(a) 和 (c): $\rho_d=1.17\text{g cm}^{-3}$, $A=0.2\text{mm}$; (b) 和 (d): $\rho_d=1.38\text{g cm}^{-3}$, $A=0.4\text{mm}$

的 $t_s=193\text{min}$ 、 $\theta_w=0.40$, 与之相比时间缩短了40%、饱和程度提升了15%。

振动幅值对不同截面处的 θ_w-t 与不同时刻 $h-\theta_w$ 影

响的典型曲线如图17所示。可以看出:

(1) 对比无振动情况, 振动作用下 θ_w-t 曲线随着振幅的增大而向左移动, 振幅的影响较为明显; 对比振幅

为0.2与0.4mm情况发现, 本次所研究范围的振幅对湿润锋的感知起始时间、加快饱和程度方面有提升, 但

其影响程度随之减小.

(2) 对比无振动与振动作用下不同时刻的 h - θ_w 曲

图 17 振动幅值对土柱不同截面处体积含水率时程线与湿润锋演化过程的影响

(a) 和 (c): $\rho_d = 1.17 \text{ g cm}^{-3}$, $f = 15 \text{ Hz}$; (b) 和 (d): $\rho_d = 1.38 \text{ g cm}^{-3}$, $f = 25 \text{ Hz}$

线, 振动作用下 $h-\theta_w$ 曲线明显向右下移动, 即同一时刻积水入渗的影响深度与饱和程度更大; 对比振幅为0.2与0.4mm情况发现, 同一时刻随着振幅的增大, $h-\theta_w$ 曲线整体有所下移趋势, 但下移程度不显著。

(3) 积水入渗条件下, 土体底部达到渗流稳定时间及其体积含水率皆与振幅关系密切。例如, 无振动与振

动情况相比, $\rho_d=1.17\text{ g cm}^{-3}$ 情况, 无振动时 $t_s=308\text{ min}$, $\theta_w=0.34$; 振动时($A=0.4\text{ mm}$), $t_s=266\text{ min}$, $\theta_w=0.39$, 与之相比时间缩短了14%、饱和程度提升了15%。振动下不同振幅幅值相比, 对于 $\rho_d=1.38\text{ g cm}^{-3}$ 情况, $A=0.2\text{ mm}$ 时 $t_s=800\text{ min}$ 、 $\theta_w=0.21$; $A=0.4\text{ mm}$ 时 $t_s=529\text{ min}$ 、 $\theta_w=0.22$, 与之相比时间缩短了34%、饱和

图 18 振动条件下干密度对土柱不同截面处体积含水率时程线与湿润锋演化过程的影响

(a) 和 (c): $f=15\text{ Hz}$, $A=0.2\text{ mm}$; (b) 和 (d): $f=25\text{ Hz}$, $A=0.4\text{ mm}$

程度提升了4%。

干密度对不同截面处的 θ_w - t 与不同时刻 h - θ_w 影响的典型曲线如图18所示。可以看出:

(1) 在振动作用下, 相同截面处不同干密度的 θ_w - t 曲线具有明显的差异性, 干密度对土柱积水入渗的抑制作用显著, 即振动作用下土层越致密, 积水入渗越难。

(2) 随着干密度的增加, 振动促渗效果有所降低。这是由于干密度愈大, 土体的密实程度愈高, 团粒间形成的结构更加稳定。在相同的振动条件下, 振动作用致使结构发生扰动越为困难, 致使振动促渗的程度与干密度呈负相关性。

3.3.3 振动加速气体逃逸效应

振动作用下积水入渗过程中, 孔隙内部部分连通的气体将被水分入渗驱出, 引起土体孔隙中气相的逃逸; 在土柱完全浸润且底部出现稳定渗流时仍有部分气体无法驱出, 此部分气体以不连通状态出现, 称之为封闭气泡(吴争光和张华, 2012)。为讨论振动作用加速气体逃逸效应, 由不同时刻土柱不同截面处的体积含水率 θ_w 与干密度 ρ_d , 确定出土柱不同截面处的体积含气率 θ_a , 即 $\theta_a=n(1-S_r)=n-\theta_w$, n 为孔隙率; 结合土柱的总体积 V , 即可确定积水入渗过程中土柱的内部总气体体积 $V_a(=V\theta_a)$; 当土柱底部渗流稳定后 V_a 即为封闭气泡体积 V_{as} 。由初始气体体积 V_{a0} 与积水入渗过程中逃

逸气体的体积 $V_{ac}(=V_{a0}-V_a)$ 之比, 得到积水入渗过程中气体的逃逸率 E_a (吴争光和张华, 2012), 即 $E_a=(V_{a0}-V_a)/V_{a0}$ 。根据图15~18试验结果整理得到干密度、频率和振幅对积水入渗过程中土柱气体体积变化和逃逸率的影响分别如图19~21所示。可以看出:

(1) 振动作用下积水入渗至渗流稳定过程中, 气体体积逐渐减小, 其逃逸率逐渐增加, 但减小与增加的程度皆逐渐减小; 反映了水相流动或与振动联合作用驱动土体孔隙内部气体的程度在逐渐减小。这可能与积水入渗引起土柱孔隙水与气相的连通性变化有关。对于本文研究的土柱, 初始体积含水率很低, 即体积含气率很高, 在入渗前气体处于完全连通状态, 在入渗水流的驱动下孔隙中气体易于排出, 逃逸程度明显; 随着积水入渗的进行, 土体孔隙中气体状态将由完全连通到部分连通再到气泡封闭状态逐渐过渡, 气相的连通程度逐步降低就造成气体逃逸更加困难(吴争光和张华, 2012)。

(2) 干密度 ρ_d 对气体逃逸体积和逃逸率的影响显著(图19)。 ρ_d 愈小, 积水入渗过程中土柱的气体逃逸量 V_{ac} 愈大、封闭气泡体积愈小, 气体逃逸率 E_a 愈大, 该特性对于有无振动作用皆如此。例如, 在渗透稳定后, 对于 $\rho_d=1.17\text{ g cm}^{-3}$ 土柱的气相逸出率要比 1.38 g cm^{-3} 土柱的高5~14%。反映了土层越深越难于将土中气体排出, 这也为均质土层降雨入渗的深度有限做了注脚。

(3) 相比于无振动作用的 V_a - t 和 E_a - t 曲线, 振动加

图 19 干密度对积水入渗过程中黄土土柱气体逃逸的影响

(a) 无振动; (b) $f=25\text{ Hz}$, $A=0.4\text{ mm}$

图20 振动频率对积水入渗过程中黄土土柱气体逃逸的影响

(a) $\rho_d=1.17\text{ g cm}^{-3}, A=0.2\text{ mm}$; (b) $\rho_d=1.38\text{ g cm}^{-3}, A=0.4\text{ mm}$

图21 振动幅值对积水入渗过程中黄土土柱气体逃逸的影响

(a) $\rho_d=1.17\text{ g cm}^{-3}, f=15\text{ Hz}$; (b) $\rho_d=1.38\text{ g cm}^{-3}, f=25\text{ Hz}$

速气体逃逸的效果明显(图20~21)。振动作用下积水入渗过程中土柱的气体逃逸量 V_{ae} 与逃逸率 E_a 皆有较为明显的增大, 封闭气泡体积有较为明显的减小; 但这种影响程度同时受干密度的制约, 干密度越小, 振动的作用越凸显, 反之振动的作用效果较为有限。

(4) 振动频率对气体逃逸体积和逃逸率的影响较为明显, 但其作用并非随之而单调增大; 而是随着振动频率 f 的增大, V_a - t 曲线先下移后上移; E_a - t 曲线先向上后向下移动, 反映了振动加速气体逃逸与封闭气泡的消散程度皆呈现先增大后减小趋势, 在 $f=20\text{ Hz}$ 时影

响最为明显(图20)。

(5) 振动幅值 A 对气体逃逸体积和逃逸率影响较为明显, 且影响程度随之而单调增大(图21), 即振动加速气体逃逸效应与振幅作用呈正相关关系。

4 讨论与结论

正如机车振动荷载现场分析所知, 其振动荷载呈现出“小振幅、长持时”特点; 这种振动荷载作用会对铁路斜坡土层结构产生累积扰动效应而在表层形成

微裂缝, 这种效应对于振动易损性黄土而言更为凸显. 在降雨条件下, 振动作用一方面会加速水分沿已形成的裂缝下渗, 其速率为正常入渗速率的几倍甚至十几倍(图14), 使得表层土体迅速达到高饱和度, 饱和时间大大缩短. 水分从表层向深部入渗过程中, 振动作用加速水分入渗, 即振动增加了孔隙水运动的驱动力; 同时振动会迫使土颗粒相互振动滑移, 错断了原有的粘结键, 使得原土中孔隙弱结合水转换为自由水. 这两方面的作用效应加快了达到高饱和度的速率或进程, 提高了土层湿度或持水能力(图16~18). 另一方面振动加速气体的逃逸, 即水分入渗会导致土中气压增大, 而气压增加之后, 又会反过来降低水的入渗速率; 机车振动会对土体孔隙结构发生累积扰动效应, 迫使原封闭孔隙打开将稳定气压释放, 造成封闭孔隙中气体或包裹性封闭气泡破裂而加速排出(图19~21), 使得水分向深部入渗的阻力减小、渗透通道增加, 入渗速率加速, 饱和程度提高. 可见, 黄土的机车振动加速水分入参与气体逃逸的促渗效应显著, 尤其接近于土体的自振频率体现更为明显. 这一振动促渗效应对于铁路的运营产生潜在的风险, 需要在铁路(尤其是高重铁路)沿线的地质灾害的防控中予以高度重视, 并将这种山区铁路“小变形、高风险”灾害理论提升到一个新的研究高度.

致谢 感谢崔鹏院士、彭建兵院士对本文的指导和帮助, 感谢中国铁路设计集团、中铁十七局在野外工作中的帮助.

参考文献

- 陈正汉. 2014. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究. 岩土工程学报, 36: 201–272
- 崔颖, 缪林昌. 2011. 非饱和压实膨胀土渗透特性的试验研究. 岩土力学, 32: 2007–2012
- 刘奉银, 张昭, 周冬. 2010. 湿度和密度双变化条件下的非饱和黄土渗透函数. 水利学报, 41: 1054–1060
- 吴礼舟, 张利民, 黄润秋, 许强. 2009. 非饱和土的变形与渗流耦合的一维解析分析及参数研究. 岩土工程学报, 31: 1450–1455
- 许元珺. 2017. 列车振动作用对黄土渗透性影响研究. 硕士学位论文. 西安: 西北大学
- 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 张世径, 杨校辉. 2012. 非饱和原状和重塑 Q3 黄土渗水特性研究. 岩土工程学报, 34: 1020–1027
- 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 覃小华, 章峻豪. 2012. 非饱和 Q3 黄土渗气特性试验研究. 岩石力学与工程学报, 31: 1264–1273
- 詹良通, 邱清文, 杨益彪, 徐文杰, 陈云敏. 2017. 黄土覆盖层水-气耦合运移土柱试验及数值模拟. 岩土工程学报, 39: 969–977
- 武军, 廖少明, 霍晓波. 2015. 地铁列车振动荷载对穿越泥水盾构泥膜渗透系数的影响. 岩土工程学报, 37: 1093–1104
- 胡冉, 陈益峰, 周创兵. 2011. 降雨入渗过程中土质边坡的固-液-气三相耦合分析. 中国科学: 技术科学, 41: 1469–1482
- 李秉生, 蒋爵光, 郑黎明. 1987. 列车振动与铁路边坡灾害动力学分析. 边坡稳定的岩石力学分析学术会议, 642–750
- 李喜安, 刘锦阳, 郭泽泽, 张凯旋, 孟杰. 2018. 马兰黄土孔隙结构参数与渗透性关系研究. 工程地质学报, 26: 1415–1423
- 覃小华, 刘东升, 宋强辉, 杜春兰, 王旭. 2017. 降雨条件下一维土柱垂直入渗模型试验研究及其渗透系数求解. 岩石力学与工程学报, 36: 475–484
- 吴争光, 张华. 2012. 积水入渗稳定时近饱和土中封闭气泡含量试验研究. 岩土工程学报, 34: 274–279
- 张登飞, 陈存礼, 陈惠, 刘科. 2018. 三轴应力条件下原状黄土的吸湿渗水特性. 岩土工程学报, 40: 45–50
- 张登飞, 陈存礼, 张洁, 贾亚军. 2017. 等向应力条件下非饱和原状黄土增湿渗水特性试验研究. 岩土工程学报, 40: 1344–1349
- 王进怀. 高频液压振动沉拔桩锤(无共振施工法). 1998. 中国土木工程学会土力学及基础工程学术委员会联合年会
- 张林, 张登飞, 陈存礼, 游子龙, 孙佩娜. 2019. 竖向压力作用下重塑黄土土柱压缩湿陷及渗水试验研究. 水利学报, 50: 1214–1221
- Cai G, Zhou A, Sheng D. 2014. Permeability function for unsaturated soils with different initial densities. *Can Geotech J*, 51: 1456–1467
- Carrier. 2003. Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. *J Geotechn Geoenviron Eng*, 129: 1054–1056
- Chen C, Zhang D, Zhang J. 2017. Influence of stress and water content on air permeability of intact loess. *Can Geotech J*, 54: 1221–1230
- Chen W, La Borderie C, Maurel O, Pijaudier-Cabot G, Rey-Bethbeder F. 2014. Simulation of damage-permeability coupling for mortar under dynamic loads. *Int J Numer Anal Meth Geomech*, 38: 457–474
- Huntley D, Bobrowsky P, Hendry M, Macciotta R, Elwood D, Sattler K, Best M, Chambers J, Meldrum P. 2019. Application of multi-dimensional electrical resistivity tomography datasets to investigate a very slow-moving landslide near Ashcroft, British Columbia, Canada. *Landslides*, 16: 1033–1042
- Lake C B, Yousif M A M, Jamshidi R J. 2017. Examining freeze/thaw effects on performance and morphology of a lightly cemented soil. *Cold Regions Sci Tech*, 134: 33–44
- Li P, Li T, Vanapalli S K. 2016. Influence of environmental factors on the wetting front depth: A case study in the Loess Plateau. *Eng Geol*, 214: 1–10
- Li X, Zhang L M, Fredlund D G. 2009. Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity. *Can Geotech J*, 46: 1431–1445

- Nguyen V, Pineda J A, Romero E, et al. 2020. Influence of soil microstructure on air permeability in compacted clay. *Geotechnique*, doi: 10.1680/jgeot.18.P.186
- Romero E, Gens A, Lloret A. 1999. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom Clay. *Eng Geol*, 54: 117–127
- Tan S H, Wong S W, Chin D J, Lee M L, Ong Y H, Chong S Y, Kassim A. 2018. Soil column infiltration tests on biomediated capillary barrier systems for mitigating rainfall-induced landslides. *Environ Earth Sci*, 77: 589
- Touma J, Vauclin M. 1986. Experimental and numerical analysis of two-phase infiltration in a partially saturated soil. *Transp Porous Media*, 1: 27–55
- Wang J, Zhang D, Chen C, Wang S. 2020. Measurement and modelling of stress-dependent water permeability of collapsible loess in China. *Eng Geol*, 266: 105393
- Wang J, Gu T, Zhang M, Xu Y, Kong J. 2019a. Experimental study of loess disintegration characteristics. *Earth Surf Process Landforms*, 44: 1317–1329
- Wang J, Li P, Gu Q, Xu Y, Gu T. 2019b. Changes in tensile strength and microstructure of loess due to vibration. *J Asian Earth Sci*, 169: 298–307
- Wang J, Zhang D, Wang N, Gu T. 2019c. Mechanisms of wetting-induced loess slope failures. *Landslides*, 16: 937–953
- Wang Z, Feyen J, van Genuchten M T, Nielsen D R. 1998. Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability. *Water Resour Res*, 34: 213–222
- Ye W M, Wan M, Chen B, Chen Y G, Cui Y J, Wang J. 2012. Temperature effects on the unsaturated permeability of the densely compacted GMZ01 bentonite under confined conditions. *Eng Geol*, 126: 1–7
- Zhan T L T, Yang Y B, Chen R, Ng C W W, Chen Y M. 2014. Influence of clod size and water content on gas permeability of a compacted loess. *Can Geotech J*, 51: 1468–1474
- Zhang D, Wang J, Chen C. 2020a. Gas and liquid permeability in the variably saturated compacted loess used as an earthen final cover material in landfills. *Waste Manage*, 105: 49–60
- Zhang D, Wang J, Chen C, Wang S. 2020b. The compression and collapse behaviour of intact loess in suction-monitored triaxial apparatus. *Acta Geotech*, 15: 529–548

(责任编辑: 崔鹏)