

DOI: 10.11779/CJGE2023S20021

饱和黄土隧道围岩地震液化特征的振动台试验研究

马为功¹, 王兰民², 许世阳^{2,3}, 李登科⁴, 柴少峰²

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国地震局工程力学研究所
中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 4. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 以兰合铁路某在建隧道为工程背景, 对其黄土段开展了 1:20 大比例尺饱和黄土围岩地震液化的系列振动台试验, 揭示了土-结构相互作用对隧道衬砌周围土体液化势的影响规律。研究结果表明: 土-结构相互作用显著提高了隧道衬砌周围土体的液化势, 当遭遇地震荷载时, 围岩会先于同一水平地层土体而产生液化; 激励地震加速度 a_{\max} 的较小时 ($a_{\max} = 1.0 \text{ m/s}^2$), 同一水平高度靠近衬砌结构土体的动剪应力峰值 $\tau_{d,\max}$ 、动孔隙水压力峰值 $U_{d,\max}$ 、和加速度峰值 $a_{p,\max}$ 都要比远离衬砌结构的大, 具有明显的放大效应; 随着激励地震加速度 a_{\max} 的增大至接近围岩液化阶段时, 动孔隙水压力 U_d 的放大效应明显, 而剪应力 $\tau_{d,\max}$ 和加速度 $a_{p,\max}$ 的放大效应减小或者消失。同时上述结果中围岩土体加速度的变化特征, 揭示了前期相关数值分析研究存在的不足。

关键词: 黄土隧道; 液化势; 振动台试验; 动剪应力

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0171-06

作者简介: 马为功(1984—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事隧道与地下工程抗震优化等方面的研究工作。

E-mail: mwgmr@163.com。

Shaking table tests on seismic liquefaction characteristics of soil surrounding tunnels in saturated loess stratum

MA Weigong¹, WANG Lanmin², XU Shiyang^{2,3}, LI Dengke⁴, CHAI Shaofeng²

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 4. China Railway Northwest Science Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the previous numerical and theoretical analyses, a series of shaking table tests with scale of 1:20 for seismic liquefaction analysis of saturated surrounding loess are carried out to simulate the loess section of a tunnel under construction on the Lanzhou-Hezuo Railway in China. The results show that the soil-structure interaction significantly increases the liquefaction potential of the soil near the tunnel linings, and the surrounding soil will produce liquefaction before the soil of the same level when subjected to seismic loads. When the peak acceleration of seismic loads a_{\max} is minor (i. e., $a_{\max} = 1.0 \text{ m/s}^2$), the peaks of dynamic shear stress $\tau_{d,\max}$, dynamic pore water pressure $U_{d,\max}$, and acceleration $a_{p,\max}$ near the lining structure are larger than those far away from the lining at the same level height, and have obvious amplification effects. With the increase of a_{\max} to near the liquefaction stage of surrounding soil, the amplifying effects of dynamic pore water pressure U_d are obvious, while the amplifying effects of shear stress $\tau_{d,\max}$ and acceleration $a_{p,\max}$ decreases or disappear. In particular, the variation characteristics of the acceleration of the surrounding soil reveal the deficiency of the previous numerical simulations.

Key words: loess tunnel; liquefaction potential; shaking table test; dynamic shear stress

0 引 言

饱和黄土在振动荷载作用下黄土体内孔隙水压力增大, 同时黄土颗粒成分能有效减缓孔隙水压力的消散, 致使土体骨架有效应力降低, 从而产生大变形和超孔隙水压力, 最终致使黄土产生液化^[1]。王兰民^[2]

对饱和黄土液化开展了深入研究, 同时基于室内土动力学试验和现场 SPT 测试, 给出了深度范围在 20 m 内饱和黄土液化的初判和详判方法。部分研究成果已

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U1939209)

*通信作者 (wanglm@gsdzj.gov.cn)

被《甘肃省建筑抗震设计规程: DB62/T25—3055—2011》和《地下结构抗震设计标准: GB/T51336—2018》采纳。结合对饱和黄土液化方面的深入研究,笔者认为在地震作用下黄土地下工程围岩同样可能像其他可液化地层一样,会产生液化现象。

地下工程往往是由围岩和支撑结构两者组成并相互作用的体系。地层既是承载结构的基本组成部分,又是荷载的主要来源,这种合二为一的作用机理与地面结构是完全不同的^[3-4]。基于以上认识和早期工程实践,一般认为地下结构由于围岩在地震中提供的多维约束作用,对其破坏很小。然而近年来几次大的地震中地下结构的严重破坏,频发的黄土隧道翻浆冒泥、仰拱开裂等病害,警示我们必须对黄土隧道,尤其是饱和段落的振动液化问题给予足够的重视^[5]。

在这类地区修建的黄土隧道,由于开挖使得黄土围岩应力重新分布,有效围压降低。同时隧道开挖提供的新的地下水通道,使得围岩含水率增加,力学特性降低^[6]。

根据以上黄土隧道的典型病害和围岩特征,基于前期数值模拟与理论分析得出的研究结果^[7],进一步通过系列振动台试验,开展了饱和黄土隧道地震围岩液化特征的分析。

1 黄土隧道围岩液化势研究

1.1 水平自由场地液化势特征

对于地面下某深度处动剪应力 τ_d , Seed 等^[8]依据水平地面下土体刚体运动提出了便于工程运用的简化方法。其关键为根据式(1)正确确定动剪应力折减系数 r_d 的值。

$$r_d = \frac{\tau_{d,\max} g}{\sigma_y a_{s,\max}} \quad (1)$$

式中: r_d 为动剪应力折减系数; $\tau_{d,\max}$ 为地面下某点的最大地震水平剪应力; g 为重力加速度; σ_y 为地面下某一点的竖向应力。如果获得 r_d 值,则可以根据式(1)得到某次地震时地面以下某点的 $\tau_{d,\max}$ 或者动剪比 a_s 。

随后许多学者开展了 r_d 相关的相关研究。目前公认的特征水平场地地面下的 r_d 随深度 z 变化的有^[9]

$$r_d = 1.0 - 0.015z \quad (z \leq 30.5 \text{ m}), \quad (2)$$

$$r_d = \begin{cases} 1.0 - 0.00765z & (z \leq 9.15 \text{ m}) \\ 1.174 - 0.0267z & (9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m}) \end{cases} \quad (3)$$

由式(2),(3)可以得知,地面下可液化土体,其 r_d 值随着埋深的增加逐渐减小。由于在某次地震中其水平场地地表峰值加速度 $a_{s,\max}$ 容易确定, g 为定值,因此从另一方面来看, r_d 又表征地面下某点在地震过

程中遭受动剪应力 $\tau_{d,\max}$ 的大小。所以从 r_d 的变化趋势入手,可以判断饱和黄土隧道围岩在水平地震荷载作用下的液化特征。

1.2 黄土隧道场地围岩液化势特征

基于以上理论,根据式(1),选取不同的地震加速度记录从土层底部输入,选取不同黄土地层及不同的深度,选取不同的力学模型参数,组合得出了饱和黄土隧道围岩的 r_d 随埋深 h 的变化特征^[7]。

研究得出隧道衬砌周围 1 m 范围内围岩的平均动剪应力折减系数 r_d 随埋深 h 的变化特征,见图 1。其 r_d 值比同一埋深水平场地 r_d 值显著增大,同时其随埋深 h 的增加而减小,且其减小速率逐渐放缓,当 h 大于 60 m 时, r_d 变化趋于稳定^[7]。这说明隧道结构的存在显著提高了其围岩的液化势,且埋深越小,其围岩液化势越高。

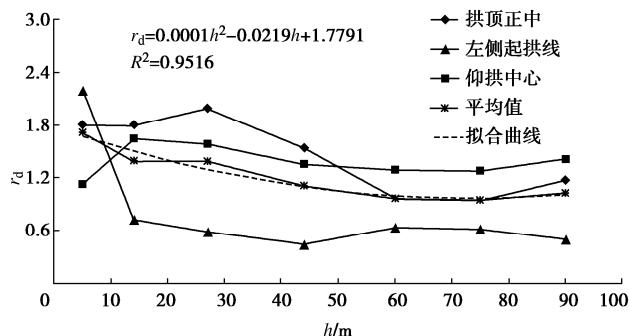


图1 隧道周边 1 m 范围内的 r_d 随埋深 h 的变化趋势^[7]

Fig. 1 Tendency of r_d of surrounding soils within range of 1 m outside tunnel excavation contour with buried depths h ^[7]

2 振动台模型试验

2.1 工程背景

为进一步验证前期理论分析与数值模拟相结合得到的隧道围岩液化势特征,便于试验中在地震动荷载作用下的黄土隧道围岩液化与实际工程比较,进一步开展了大比例为 1:20 的振动台试验。该试验以正在建设的兰州至合作铁路某隧道黄土段(夏河县境内)为背景,其场地照片见图 2。该隧道处于高烈度地震区,设计基本地震动峰值加速度为 0.20g,相当于地震基本烈度Ⅷ度,地震动反应谱特征周期分区为 0.45 s。该隧道进口段约 270 m 洞身 17.7% 上坡穿越 Q₃ 黄土段落。其中隧道上部自洞口向洞内其埋深从 8 m 增加到 37 m。随后穿越土石分界面,进入弱富水区板岩地层(预测该段正常涌水量为 117.1 m³/d,最大涌水量为 351.3 m³/d)。

其中本研究最为关注的 Q₃ 黄土地层具有如下特征:为分布于河流高阶地上更新统洪积黄土,厚度 8~

60 m, 淡黄色, 稍湿—潮湿, 稍密—中密, II级普通土; 预测该段正常涌水量为 13.1 m³/d, 最大涌水量为 39.2 m³/d, 隧道施工中出现点状渗水, 土石界面成线状或股状流水。



图 2 隧道场地地貌
Fig. 2 Landform of tunnel site

2.2 振动台试验

振动台试验在中国地震局兰州地震研究所(甘肃省地震局)黄土地震工程重点实验室进行。振动台台面尺寸为 4 m×6 m, 可进行水平和垂直双向耦合地震模拟, 振动台总共由 28 台伺服电机驱动。

试验采用刚性模型箱, 其箱体尺寸为 2.8 m(长)×1.4 m(宽)×1.9 m(高)。试验中在模型箱的内壁上贴两层塑料膜, 并在左右两侧铺设 20 cm 厚的海绵, 以减小模型箱对土体的侧向约束。其前后侧的 20 cm 厚的有机玻璃, 既保证了模型箱的刚度, 又便于观察模拟地震试验过程中模型的破坏过程和现象。具体见图 3。



图 3 饱和黄土隧道振动台试验
Fig. 3 Shaking-table tests of saturated loess tunnel

试验中模型围岩黄土取自兰州至合作铁路某黄土隧道正在施工掌子面, 土体物理力学参数见表 1。模型填筑时采用逐层夯实填筑, 确保模型干密度与隧道掌子面情况一致。

模型不同含水层的分布见图 4(a), 上部土层与现场隧道掌子面含水率相当, 下部 70 cm 厚为饱和黄土, 含水率 w 为 30.9%。其通过在模型箱底部铺设 5 cm

的中砂层, 砂层中铺设均匀开有小孔的直径 1.5 cm 的塑料管, 将塑料管接出模型顶部土层约 1.2 m。从管口控制总水量缓慢注水, 水从底部砂层在反压作用下逐渐自下向上渗流, 经过 9 d 达到试验要求的饱和高度。

2.3 传感器布设和地震波施加

模型传感器布设如图 4 所示, 均布设在垂直于隧道轴中心的断面上。图中 A 表示加速度计, S 表示动剪切应力传感器, P 表示动孔隙水压力计。

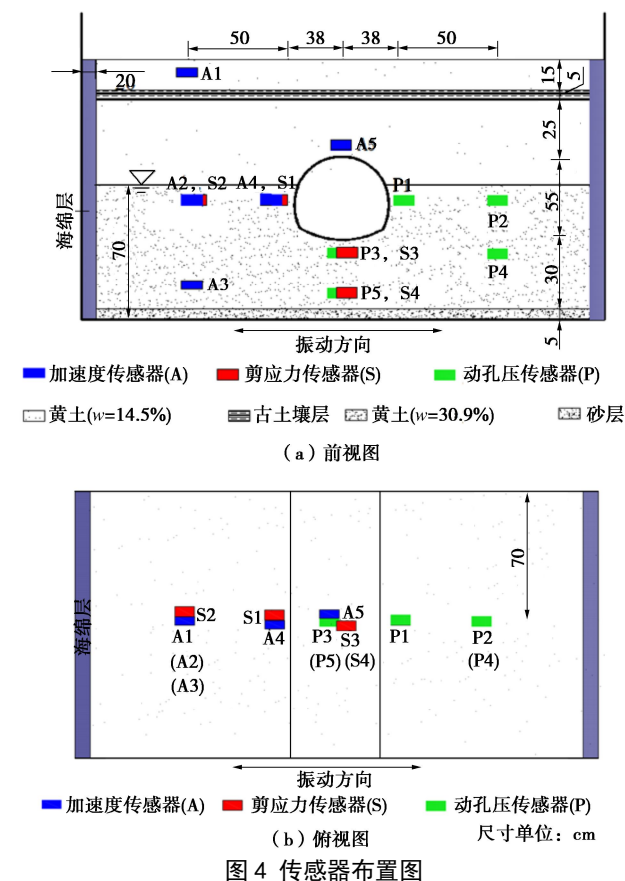


图 4 传感器布置图
Fig. 4 Layout of sensors on middle section of linings

2019 年 10 月 28 日, 甘肃省夏河县发生了 M 5.7 级地震, 震源深度为 10 km。本次试验采用中国地震局工程力学研究所强震观测中心提供的 2019 年夏河地震波, 见图 5。试验中考虑隧道遭受多遇地震、设防地震和罕遇地震, 对其峰值加速度 a_{\max} 进行调整, a_{\max} 从 1 m/s² 开始, 逐级增加 1 m/s² 进行加载, 至 4 m/s² 时饱和土体出现明显液化特征后停止加载。根据动三轴试验获得的原样土动孔压消散规律, 在两级加载中间设置 40 min 间隔期, 可使得上一级液化孔压消散到 5% 以内, 以尽量减小前一级结果对后一级试验的影响。

3 结果与分析

3.1 剪应力变化特征分析

表 1 隧道现场黄土物理特性

Table 1 Physical properties of in-site loess					
孔隙比 e	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水率 $w/\%$	黏粒 $d \leq 0.005$	粉粒 $0.005 < d \leq 0.075$ (mm)	砂粒 $0.075 < d \leq 0.25$ (mm)
0.86	1.45	17.2%	16.8%	67.7%	14.5%

当激励地震波峰值加速度 $\tau_{d,max}=1.0\text{ m/s}^2$ 时，位于同一水平高度的点 S1 和 S2，其靠近衬砌结构的点 S1 的动剪应力峰值 $\tau_{d,max}$ 明显大于远离衬砌结构的点 S2 的峰值，见图 6（a）。说明此阶段的围岩受结构与土相互作用显著，隧道结构的存在使得围岩承受的动剪应力 τ_d 增大。此规律与前期数值模拟的动剪应变结果相吻合，见图 7。

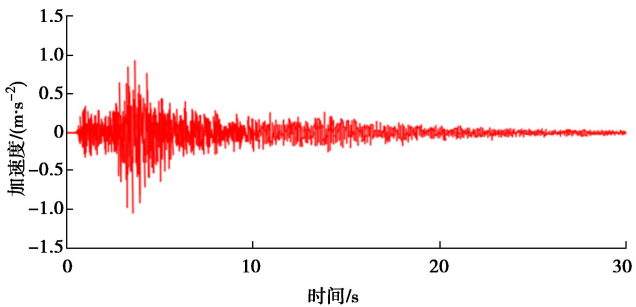
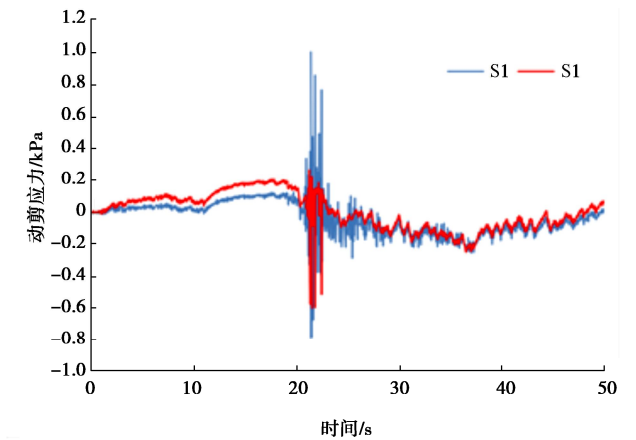
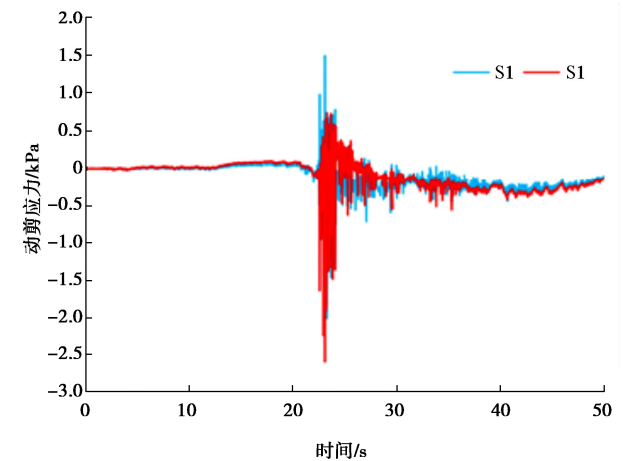


图 5 2019 年夏河地震地震波

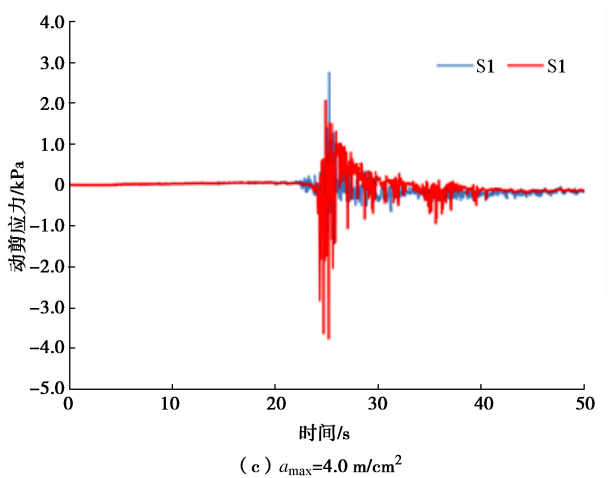
Fig. 5 Seismic waves of 2019 Xiahe earthquake



(a) $a_{\max}=1.0\text{ m/cm}^2$



(b) $a_{\max}=2.0\text{ m/cm}^2$



(c) $a_{\max}=4.0\text{ m/cm}^2$

图 6 S1 和 S2 位置动剪应力时程曲线

Fig. 6 Time histories of dynamic shear stresses at points S1 and S2

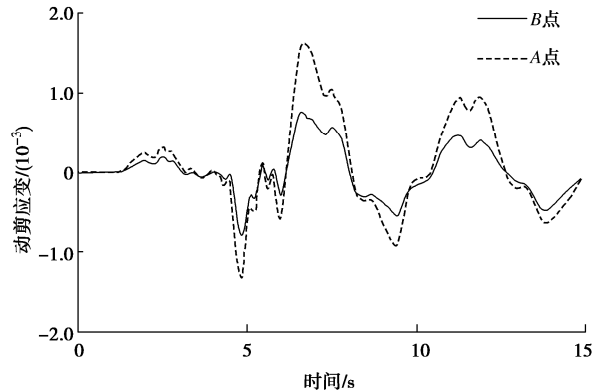


图 7 动剪应变时程曲线（A 靠近衬砌，B 远离衬砌）^[7]

Fig. 7 Dynamic shear strains of soils (A is near tunnel, and B is far)^[7]

当激励 a_{\max} 为 2.0, 3.0, 4.0 m/cm^2 时，此时位于同一水平高度的点 S1 和 S2, S1 的动剪应力峰值 $\tau_{d,max}$ 小于远离衬砌结构的点 S2 的峰值，见图 6（b），（c）。结合图 8 的动孔隙水压力变化分析，其原因可能为：靠近隧道的点动孔隙水压力上升较快也较大，由于动孔压的升高，靠近衬砌结构土体的剪切模量降低；在数值模型中建立的土体为弹塑性材料，其不能体现变形模量随着动孔压的增高而减小的现象。

3.2 动孔隙水压力特征分析

当激励地震波峰值加速度 $a_{\max}=2.0\text{ m/cm}^2$ 时，其动孔隙水压力的时程曲线如图 8 所示。由图 8（a）可以得知，位于同一水平高度的点 P1 和 P2，靠近衬砌结构的位置 P1，其动孔压上升更快，且值也更高。图 8（b）中的 P3 和 P4 点具有同样的规律。

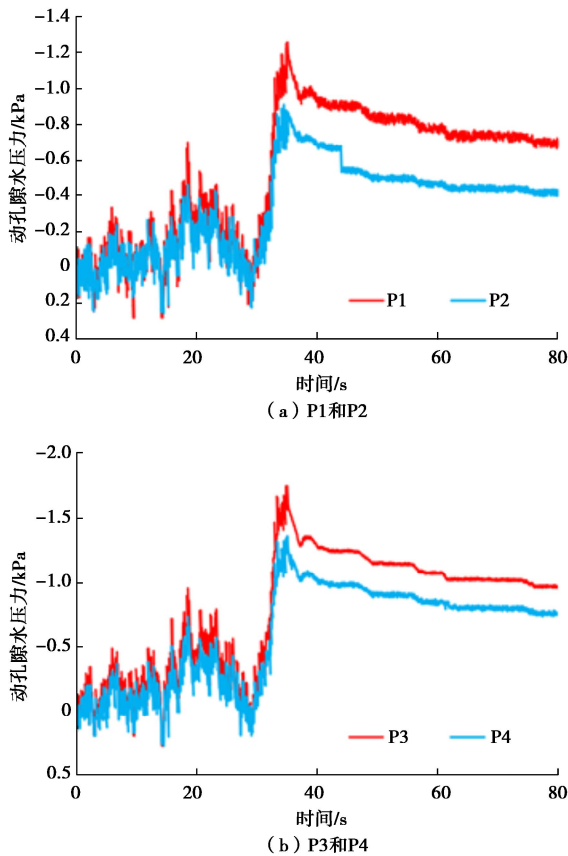


图 8 动孔隙水压力时程曲线 ($a_{\max} = 2.0 \text{ m/cm}^2$)

Fig. 8 Time histories of dynamic pore water pressure ($a_{\max} = 2.0 \text{ m/cm}^2$)

图 9 为模型中 4 个孔压监测点 P1、P2、P3 和 P4 点的峰值动孔压比 R_u (动孔隙水压力 U_d 与有效围压之比 σ'_0)。通常当 R_u 大于 0.7 时, 认为黄土产生液化^[1]。由图 9 可知, 从 a_{\max} 为 1 m/cm^2 开始, 靠近衬砌结构的 P1 和 P3 点的 R_u 大于远离衬砌的 P2 和 P4 点, 且随着 a_{\max} 增大, 差值越明显。当 a_{\max} 达到 3.0 m/cm^2 时, 靠近衬砌结构的 P1 和 P3 点先产生液化; 当 a_{\max} 达到 4.0 m/cm^2 时, 远离衬砌结构的 P2 和 P4 点产生液化。该结果与 Ding 等^[10]开展的地下结构在砂土液化中的振动台研究结果相似。

3.3 加速度变化特征分析

在模型中按照不同高度及距离衬砌结构不同的位置总计布设 5 个加速度传感器 (见图 4), 以观察并比较不同位置的加速度响应。图 10 为各个测点峰值加速度 $a_{p,\max}$ 随激励地震波的峰值加速度 a_{\max} 的变化特征。从 A2 和 A3 点的变化分析, $a_{p,\max}$ 随 a_{\max} 的增大, 其增大速率略微减小, 但不明显, 说明具有较高线形相关性。共同处于衬砌最大跨水平高度的 A4 和 A2 比较, 说明土-结构相互作用随着 a_{\max} 的增大, 对加速度的影响较为显著, 这和前期相关研究结果^[4, 7]存在差异。特别是当 $a_{\max} = 3.0 \text{ m/cm}^2$ 时, A1 和 A5 的几乎未随着

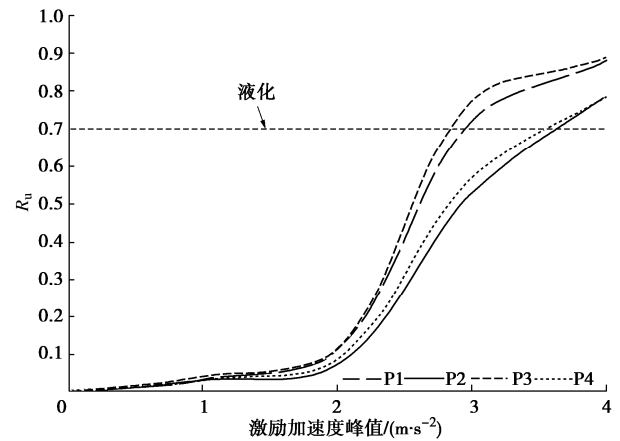


图 9 动孔隙水压力比 R_u 随 a_{\max} 变化特征曲线

Fig. 9 Variation of ratio R_u of dynamic pore water pressure and effective vertical stress with a_{\max}

a_{\max} 的增大而增大, 甚至 A4 的 $a_{p,\max}$ 反而出现明显的减小。值得注意的是, 这个阶段正好是 3.2 节根据动孔压判断衬砌周围围岩产生液化的阶段。

分析影响该阶段 $a_{p,\max}$ 异常的最大因素应该为振动引起土体孔压显著增高, 进而引起土体强度显著减小, 流动性增强, 即产生液化, 致使土体传播地震波的能力减弱, 模型内土体加速度 $a_{p,\max}$ 相对减小^[1, 10]。而数值分析中土体采用弹塑性材料^[7], 未考虑动孔压的增长对土体物性参数带来的变化, 即弹塑性材料本构不能很好地模拟土体液化过程中随着孔压增长而引起的应力应变关系的变化。

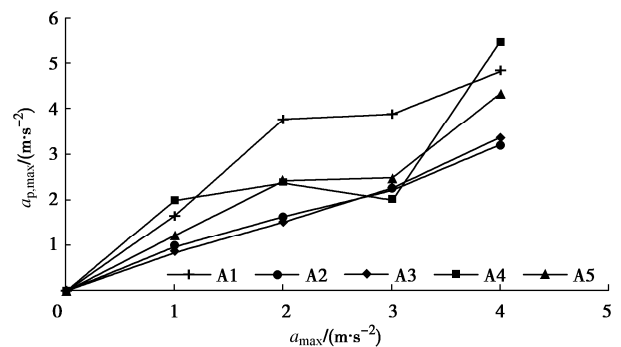


图 10 测点峰值加速度 $a_{p,\max}$ 随激励地震波的 a_{\max} 的变化特征

Fig. 10 Variation of peak accelerations $a_{p,\max}$ of monitoring points with a_{\max} of exerted seismic waves

图 11 为不同激励 a_{\max} 下的加速度放大系数沿高度 h (即 A1、A2 和 A3) 的变化特征。可以看出, A2 和 A3 点不但没有放大, 反而减小, 可能是由于在振动箱内周边铺设塑料膜和海绵, 减小了加速度的传递。模型顶部 A1 点的放大作用明显, 当 $a_{\max} = 2.0 \text{ m/cm}^2$ 时, 其放大系数为 1.89, 最大; 随后随着激励加速度的 a_{\max} 增大呈现逐渐减小状态, 当 $a_{\max} = 4.0 \text{ m/cm}^2$ 时, 其放大系数为 1.30, 最小。

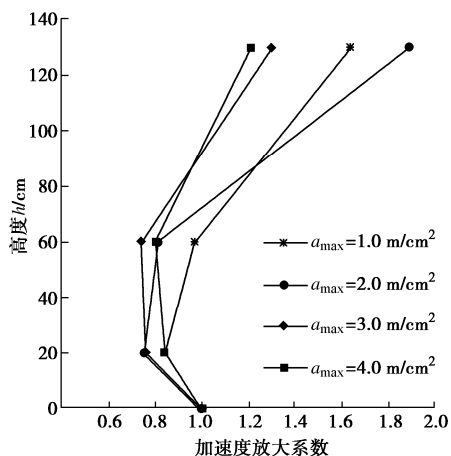


图 11 加速度放大系数沿高度 h 变化特征

Fig. 11 Variation of amplification factors of peak accelerations with height h

4 结 语

该研究以正在建设的兰合铁路某隧道黄土段为背景,开展了 1:20 的大比例饱和黄土隧道液化振动台试验研究,得出以下 4 点结论。

(1) 土-结构相互作用显著提升了其周围土体的液化势;地震时,衬砌周围土体会比远离衬砌的土体先液化。

(2) 激励地震加速度较小时,靠近衬砌结构的土体动剪应力比远离衬砌结构的要大;随着激励地震加速度的增大,靠近衬砌结构的动剪应力比远离衬砌结构的要小。

(3) 动孔隙水压力的变化与动剪应力的表现不同;靠近衬砌结构的土体动孔压比远离衬砌结构的要大,且随着地震加速度的增大,其趋势增大。

(4) 土-结构相互作用对靠近衬砌结构土体加速度影响显著,具有明显的放大效应;同时模型顶部土体的放大效应最为明显,呈现处随着激励加速度 a_{\max} 增大而逐渐减小的趋势。

参考文献:

- [1] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003. (WANG Lanmin. Loess Dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 王兰民. 黄土地层大规模地震液化滑移的机理与风险评估[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 1-19. (WANG Lanmin. Mechanism and risk evaluation of sliding flow triggered by

liquefaction of loess deposit during earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 1-19. (in Chinese))

- [3] 李德武, 马为功. 二次衬砌施作时机的弹粘塑性有限元分析[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(4): 6-9. (LI Dewu, MA Weigong. Elasto-viscoplastic finite element analysis of the installation time of a secondary lining[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(4): 6-9. (in Chinese))
- [4] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (GUAN Baoshu. Key Points of Tunnel Engineering Design[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [5] 许新桩. 陕北黄土地区铁路隧道基底病害机理分析及治理措施[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(9): 17-19. (XU Xinzhuang. Mechanism analysis and treatment measures of railway tunnel foundation disease in loess area of northern Shaanxi[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 11(9): 17-19. (in Chinese))
- [6] 来弘鹏, 谭智鹏, 孙玉坤, 等. 富水黄土隧道施工过程围岩水分迁移规律研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(1): 150-161. (LAI Hongpeng, TAN Zhipeng, SUN Yukun, et al. Study on law of water migration in surrounding rock during construction of water-rich loess tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(1): 150-161. (in Chinese))
- [7] MA W G, WANG L M, WANG P, et al. The variation characteristics of dynamic shear stress reduction coefficient r_d in loess tunnel stratum[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 174: 108192.
- [8] SEED H B, IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(9): 1249-1273.
- [9] 张克绪. 岩土地震工程及工程振动[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (ZHANG Kexu. Geotechnical Earthquake Engineering and Engineering Vibration[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [10] DING X M, ZHANG Y L, WU Q, et al. Shaking table tests on the seismic responses of underground structures in coral sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 109: 103775.

(编校: 孙振远)