

DOI: 10.11779/CJGE2024S10050

强震损伤格栅墙处理地基抗液化性能离心模型试验研究

周燕国¹, 曹渊¹, 石川明², 陈云敏¹

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江大学岩土工程研究所, 浙江大学超重力研究中心, 浙江 杭州 310058;

2. 清水建设技术研究所, 日本 东京 135-8530)

摘要: 水泥土格栅墙能有效减缓被围束土体在地震作用下的剪切荷载及变形, 已广泛应用为一种高效的抗液化对策。针对其长期服役过程, 开展了两组超重力离心模型试验以研究强震历史对水泥土格栅墙内被围束土体液化响应的影响。两组模型均由 15 m 厚的易液化含黏粒砂土和 2.5 m 厚的粗砂层组成。其中, 一组模型采用水泥土格栅墙对易液化层进行加固; 另一组模型则未进行处理, 作为自由场地对照组。两组模型均经历振幅为 0.15g 的振动事件, 且在 0.15g 振动事件前, 对两组模型施加振幅为 0.4g 的振动事件作为强震历史。试验结果表明, 格栅墙在强震下主要的损伤模式表现为竖向贯穿型裂缝, 并部分伴随有局部斜向裂缝, 且外侧格室对于中心格室表现出类似于群桩基础的“遮蔽效应”。强震历史后, 格栅墙中心格室内被围束土体的超静孔压显著低于自由场地, 损伤后格栅墙仍具有良好的抗液化效果。同时, 格栅墙由于强震后整体刚度的削弱, 其与下卧粗砂层间的剪切变形显著减小。

关键词: 地震液化; 水泥土格栅墙; 地基处理; 离心机模型试验; 地震历史

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0011-05

作者简介: 周燕国(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事土动力学与地震工程、岩土工程防震减灾、地下基础设施性能设计与抗震韧性以及离心物理模拟方向的研究工作。E-mail: qzking@zju.edu.cn。

Centrifuge model tests on liquefaction mitigation performance of soil-cement grid-improved ground subjected to earthquake pre-shaking history

ZHOU Yanguo¹, CAO Yuan¹, ISHIKAWA Akira², CHEN Yunmin¹

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Institute of Geotechnical Engineering, Center for Hypergravity

Experiment and Interdisciplinary Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Technology, Shimizu

Corporation, Tokyo, Japan)

Abstract: The soil-cement grid has been widely applied as an effective liquefaction countermeasure due to its capability to effectively mitigate the shear load and deformation of the enclosed soil under seismic loadings. In terms of its long service period, two dynamic centrifuge model tests are conducted to study the effects of strong shaking history on the liquefaction responses of the enclosed soil. The model ground consists of a 15 m-thick liquefiable clayey fine sand and an underlain 2.5 m-thick coarse sand layer. The liquefiable layer is improved by the soil-cement grid in one model, while the other without any improvement affording a contrast. Both models are subjected to a sinusoidal input motion with amplitude of 0.15g. Several more severe shaking events with amplitude of 0.4g are applied to the models prior to this 0.15g event as strong shaking history. The results imply that the damage patterns of the walls are mainly vertical penetrating cracks, partly accompanied by local diagonal cracks, and the outer cells show a "shielding effect" on the center cell similar to that of a group pile foundation. After the strong vibration history, the central cell of the soil-cement grid still has satisfactory anti-liquefaction effects, leading to a much lower excess pore pressure than free field. At the same time, due to the weakening of the overall stiffness of the soil-cement grid, the shear deformation between the soil-cement grid and the underlying coarse sand layer is significantly reduced.

Key words: soil liquefaction; soil-cement grid; ground improvement; centrifuge model test; earthquake pre-shaking history

0 引言

深层搅拌工法因其施工范围小、对周围环境影响弱、适用场地类型多等突出优势, 于 20 世纪 70 年代

基金项目: 国家自然科学基金项目(51988101, 52278374, 51978613);

高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(B18047)

收稿日期: 2024-04-29

开始在世界范围内广泛应用于地基处理^[1]。该类工法主要通过将水泥等黏结剂与原土体进行搅拌混合而形成如图 1 (a) 所示的柱状固化土。现有研究表明, 离散的柱状加固体仅能有限减弱处理地基的震后沉降, 但无法有效抑制场地的液化灾害^[2-3]。在此基础上, 通过将柱状固化土相互重叠组成如图 1 (b) 所示格栅墙处理地基。格栅墙处理地基的抗液化性能已经多次在地震灾后调研中得到了验证。例如, 1995 年阪神大地震^[4-5]和 2011 年东日本大地震^[1]。相似地, 格栅式地下连续墙也常被用作抗液化桥梁基础^[6]。格栅墙对于处理地基的抗液化机理可以归纳为以下 3 点: 首先, 由于格栅墙相对于未加固土体具有更高的刚度, 可以很大程度分担地震导致的剪应力荷载, 从而达到抑制场地液化的效果; 其次, 由于格栅墙由相互重叠的柱形加固体组成, 水平方向上不存在渗流通道, 可以阻断周围未加固区域的高孔压向被加固区域迁移; 最后, 在周围区域液化发生后, 格栅墙处理地基整体可以作为一种挡土结构, 从而限制液化大变形的发生 (尤其是倾斜场地)。

在长期服役过程中, 地下结构的损坏往往具有不可逆的特性, 即通过现有技术手段进行地下结构的损伤评估和功能性恢复存在困难。在 1995 年阪神大地震中, 大量地下结构物严重损坏, 包括著名的日本大开车站“M”型破坏^[7-8], 打破了地下结构物在地震中具有较高安全性的传统观念。格栅墙作为一种地基处理手段的同时, 其主体部分格栅式形状和高于周围土体的刚度, 使其具备了类似于地下结构的地震动响应和破坏形态。相对于混凝土浇筑而成的地下基础以及地下结构, 水泥土格栅墙由于其较低的材料强度更容易在地震荷载下发生较大的塑性损伤乃至破坏。

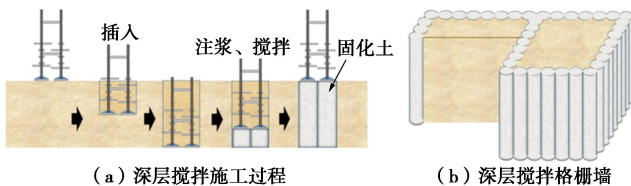


图 1 深层搅拌水泥土格栅处理地基

Fig. 1 Deep soil mixing (DSM) grid-improved ground

本研究针对自由场地和水泥土格栅墙处理地基开展了两组超重力离心模型试验。试验采用含黏粒砂土和粗砂分别作为易液化层和下卧非液化层。同时通过水泥土材料制作格栅墙模型, 对水泥土格栅墙处理地基在多次振动下的长期服役性能进行评价, 揭示了格栅墙在强振后的损伤形态和残余抗液化性能。

1 超重力模型试验

1.1 模型布置图

利用浙江大学 ZJU400 超重力离心机和机载单向振动台, 本研究在 50g 离心加速度下开展了两组超重力振动台试验。其中, 1 组采用水泥土格栅墙对易液化层进行加固 (SC), 另 1 组为未处理自由场地模型 (FF)。两组模型在原型尺度下均包含 15 m 厚的易液化层, 下覆 2.5 m 厚的致密粗砂下卧层, 如图 2 所示。

在实际工程中, 易液化场地通常会采用多格室格栅墙进行抗液化处理。而由于模型试验的有限空间, 模型中的单元格室数量存在一定限制。本文采用如图 2 所示红色区域中 2×3 的六格室格栅墙模型作为代表单元。为模拟其较高的刚度边界, 水泥土格栅墙处理地基模型在内部尺寸为 770 mm (长), 400 mm (宽) 和 500 mm (高) 的刚性箱中制作, 且格栅墙模型周围布置粗砂, 防止其周围土体发生较大程度的软化。格栅墙的内部间距为 8.25 m, 墙厚为 0.9 m, 其宽高比为 0.55, 面积置换率为 25%。自由场地模型 FF 在内部尺寸为 595 mm (长), 350 mm (宽) 和 500 mm (高) 的剪切模型箱中制作的, 其边界条件允许永久剪切变形而更接近半无限自由场地。以上两组模型均采用黏滞系数 50 倍于水的硅油进行饱和。

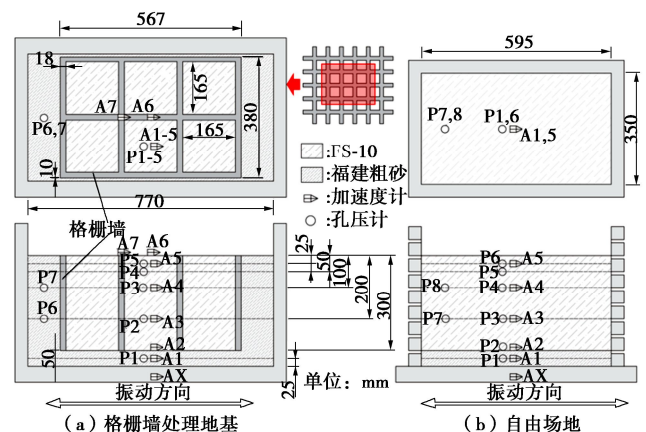


图 2 超重力离心模型试验布置图

Fig. 2 Schematic diagram of centrifuge models

1.2 试验材料

模型中易液化层和下卧非液化层分别采用福建砂+10%高岭土 (FS-10) 和福建粗砂, 且分别通过砂雨法和夯击法制作。易液化层和下卧非液化层的密实度分别为 50% 和 80%, 两者的物性参数和颗分曲线分别如表 1 和图 3 所示。本试验中采用了水泥土材料制作格栅墙模型。水泥土采用福建标准砂、高岭土、水泥 (52.5R) 和水按照比例 1.64 : 0.29 : 0.572 : 1 进行混合, 并在 25℃ 恒温环境进行养护。其 28 d 后的无侧限抗压强度约为 4 MPa, 与实际工况中 0.1~1 MPa 量级^[1]相符。同时, 水泥土的强度和小应变剪切刚度间具有统一的对应关系, 表明本文采用水泥土的刚度参数也

符合实际工况。故本文采用水泥土格栅墙模型为同质缩尺模型, 其应力、应变与原型的相似比尺为 1, 可认为其变形特性及破坏模式与原型相同。

表 1 福建砂+10%高岭土及福建粗砂物性参数表

Table 1 Physical properties of Fujian sand with Kaolin clay of 10% and Fujian coarse sand

物性参数	符号	单位	FS-10	福建粗砂
土粒密度	ρ_s	g/cm^3	2.651	2.648
最大孔隙比	e_{max}	—	1.143	0.801
最小孔隙比	e_{min}	—	0.60	0.568
细粒含量	F_c	%	15	0.2
平均粒径	D_{50}	mm	0.1578	1.31
渗透系数	k	m/s	8.04×10^{-6}	7.14×10^{-3}

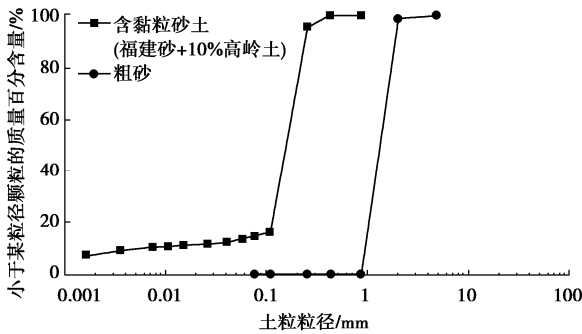


图 3 福建砂+10%高岭土及福建粗砂颗粒分曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves of Fujian sand with Kaolin clay of 10% and Fujian coarse sand

1.3 输入振动

按照表 2 设计的振动序列, 对两组超重力离心模型输入频率为 1.2 Hz、不同幅值的正弦波。输入正弦波前段为 4 圈幅值递增的不等幅正弦波, 中段为 50 圈最大幅值的等幅正弦波, 后段为 4 圈幅值递减的不等幅正弦波。本文主要对比模型 SC 中 M2 和模型 FF 中 M3 两次振动的响应规律。由于振动台输出波形存在一定高频成分, 故实际输入加速度幅值 (PBA) 略高于设计值。而相同设计 PBA 下的振动波形的阿里亚斯强度 (I_a) 基本保持一致。

表 2 振动事件

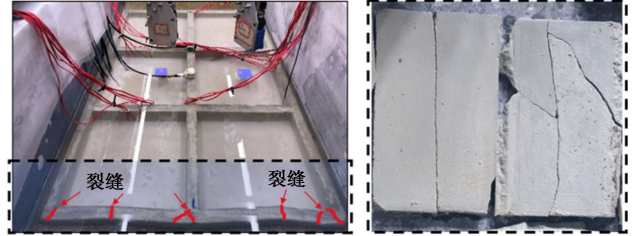
Table 2 Shaking events

模型	振动顺序	设计 PBA/g	实际 PBA/g	$I_a/(m \cdot s^{-1})$
SC	M1	0.40	0.45	32.8
	M2	0.15	0.20	7.8
FF	M1	0.15	0.22	7.4
	M2	0.40	0.50	34.6
	M3	0.15	0.21	7.0

2 格栅墙振后损伤状态

为了解格栅墙模型的振后损伤状态, 在模型试验完成停机后, 对模型 SC 进行振后开挖。通过观测发现, 水泥土格栅墙一侧最外部横向墙体 (垂直于振动方向) 发生破坏。两次振动结束后其顶部共计出现六处显性裂缝; 而埋置传感器的中部格室及另一侧格室

均保持完好。如图 4 所示, 破坏侧两面横向墙体在与纵向墙体 (平行于振动方向) 交界点及其中部位置, 均发现有竖向贯穿型裂缝, 且其中一面横向墙体还伴随有局部斜向裂缝。该斜向裂缝均未有穿越竖向贯穿裂缝现象, 表明斜向裂缝发育后于竖向贯穿裂缝。



(a) 俯视图 (b) 侧视图

图 4 水泥土格栅墙振后损伤状态

Fig. 4 Post-shaking conditions of soil-cement grid

3 格栅墙处理地基强振后残余响应

3.1 加速度

强振历史下, SC (M2) 和 FF (M3) 两组模型在 0.15g 振动事件中不同深度的加速度时程如图 5 所示。在自由场地模型 FF 中, M3 (0.15g) 振动下土体表现出显著的振动衰减现象; 以及由于强振后土体密度增加而表现出强烈的剪胀峰。

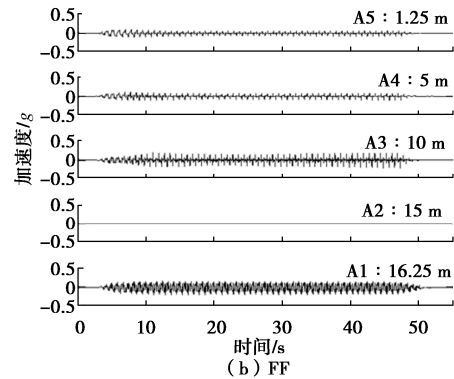
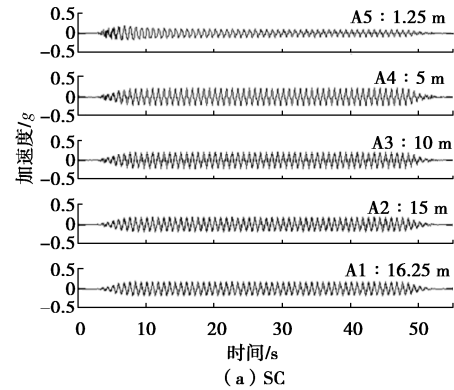


图 5 加速度时程

Fig. 5 Time histories of acceleration

在强振后格栅墙处理地基 SC 中, 被围束土体由于密实度的增加, 其加速度仅在浅层土体 (A5) 中表

现出约 50%的幅值衰减；而在其余位置均随深度变浅而表现出非液化场地典型的加速度放大现象。模型 SC 中被围束土体在 5~10 m 深度范围相对于粗砂层的加速度放大系数约为 1.27。

SC (M2) 和 FF (M23) 两组模型易液化层加速度时程相对于粗砂层加速度时程在 5%阻尼比下的响应谱比值如图 6 所示。自由场地模型 FF 在 M3(0.15g) 振动下，随着深度变浅，加速度时程中的高频成分衰减而低频成分被逐渐放大。而强振后的格栅墙处理地基 SC 加速度响应相对于下卧粗砂层几乎在全频域内表现出放大效应，即反应谱比值始终大于 1，且该数值随被围束土体深度变浅而进一步增加。同时，5 m 深度处被围束土体 (A4) 的反应谱比与格栅墙顶部 (A6) 最为接近。

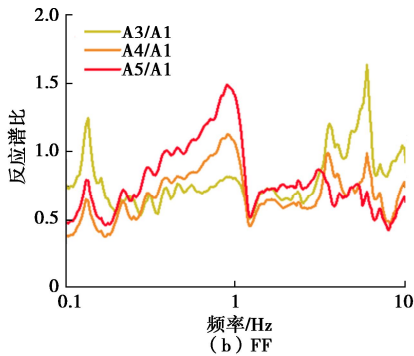
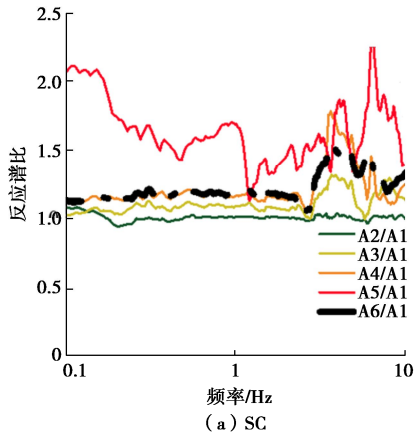


图 6 加速度反应谱比

Fig. 6 Spectral acceleration ratios

3.2 超静孔压比

在强振历史后，SC (M2) 和 FF (M3) 两组模型在 0.15g 振动事件中，不同深度的超静孔压比时程如图 7 所示。自由场地模型 FF 在强震历史后，易液化层仍在全深度发生了严重的液化现象。其超静孔压在消散过程 (约 750 s) 时突增，是由振动台异常脉冲信号导致。在未损伤格栅墙处理地基中，被围束土体的超静孔压比沿深度方向的分布规律通常表现出“束腰效应”^[9]，即被围束土体超静孔压比在格室中部深度较小，而在两端逐渐增大。而格栅墙处理地基在强振

后损伤状态下，其对超静孔压抑制效果随深度增加而逐渐增强，且相对于自由场地表现出良好的抗液化效果。该现象表明格栅墙体损伤后，由于整体质量减小导致惯性力减弱，显著减小易液化层与下卧层间的剪切荷载，进而减弱了处理地底部超静孔压的发展。

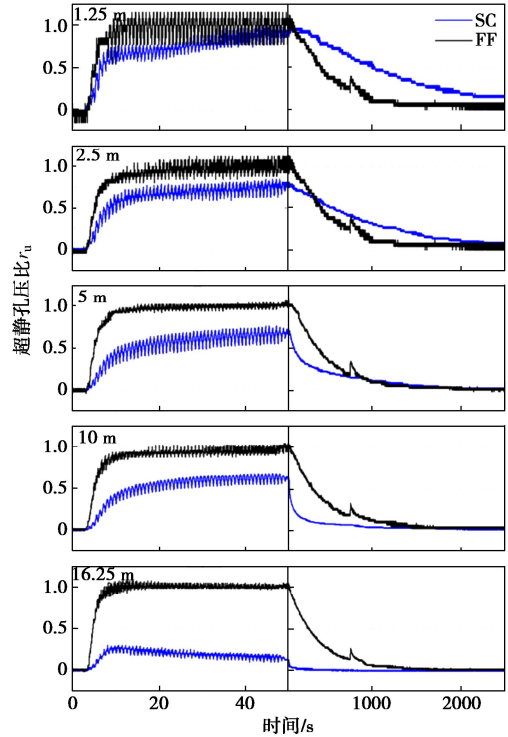


图 7 超静孔压比时程

Fig. 7 Time histories of excess pore pressure ratio

3.3 被围束土体峰值剪应变

利用加速度时程记录可得，超重力离心模型 SC 和 FF 在不同振动中剪应变峰值深度剖面如图 8 所示。

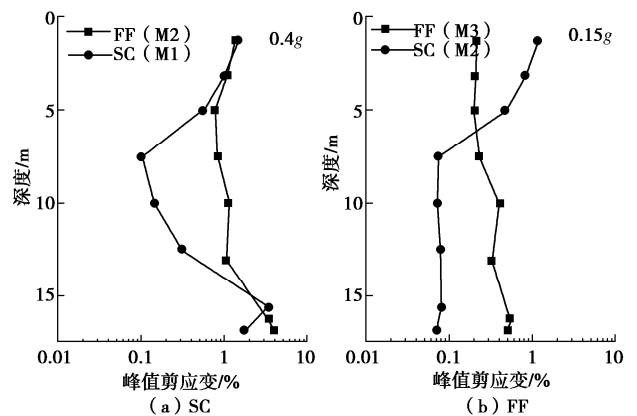


图 8 峰值剪应变剖面

Fig. 8 Profile of peak shear strain

在自由场地 FF 中，易液化层不同深度峰值剪应变较为接近，在 M2 (0.4g) 中约为 1%；在 M3 (0.15g) 中，其峰值剪应变减小至约 0.3%。格栅墙处理地基 SC (M1) 在初振下剪应变峰值深度剖面 (图 8 (a)) 表现出类似于超静孔压比的“束腰效应”^[9]。其中，

格栅墙内被围束土体中部深度 7.5 m 处的峰值剪应变均为全深度最小, 约为 0.09%, 显著低于自由场地。

在强振历史后, SC (M2) 模型在 0.15g 振动事件中, 峰值剪应变的深度剖面如图 8 (b) 所示。被围束土体上半层被围束土体峰值剪应变与 SC (M1) 相近; 而下半层被围束土体峰值剪应变则显著小于 SC (M1) 工况和自由场地 FF (M3)。尤其是格栅墙底部及下卧粗砂层中剪应变均大幅度减小, 其 16.25 m 处的峰值剪应变约为自由场地中的 15%。该现象可能由于格栅墙体的塑性损伤及破坏使得处理地基的整体刚度和质量降低, 而使得其自身惯性力及与下卧粗砂层间的刚度差异减小, 故两者在应力连续条件下的相对变形显著降低。

4 结 论

本研究通过超重力离心模型试验对水泥土格栅墙处理地基在多次振动下的长期服役性能进行研究。首先, 通过振后模型开挖的物理观测得到了水泥土格栅墙的损伤形态。其次, 对比自由场地和水泥土格栅墙处理地基强振后的加速度、超静孔压比和峰值剪应变等动力响应, 揭示了格栅墙在强振后残余抗液化性能。主要得到以下 4 点结论。

(1) 格栅墙在强振下主要的损伤模式主要表现为竖向贯穿型裂缝, 并部分伴随有局部斜向裂缝。且外侧格室对于中心格室表现出类似于群桩基础的“遮蔽效应”。

(2) 强振后格栅墙处理地基在 0.1~10 Hz 频域内均表现出放大效应。相比于自由场地中显著的振动衰减, 格栅墙内部被围束土体未发生显著软化而仍具有较高的振动幅值。

(3) 格栅墙外侧格室发生破坏后, 其中心格室仍具有良好的抗液化效果。相比于强振历史后自由场地全深度液化, 中心格室内被围束土体仅在浅层 1.25 m 处出现液化现象。

(4) 强振后格栅墙内部被围束土体区别于初振时的“束腰效应”, 仅在浅层出现相比于自由场地更大的峰值剪应变。而格栅墙由于整体刚度的削弱, 其与下卧粗砂层间的剪切变形显著减小。

参考文献:

[1] KITAZUME M, TERASHI M. The Deep Mixing Method[M]. Florida: CRC Press, the United States of America, 2013.

- [2] ISHIKAWA A, ASAKA Y. Seismic responses of column and grid-type improved grounds[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Hong Kong, R P China, 2006: 521-526.
- [3] RAYAMAJHI D, TAMURA S, KHOSRAVI M, et al. Dynamic centrifuge tests to evaluate reinforcing mechanisms of soil-cement columns in liquefiable sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(6): 04015015.
- [4] SUZUKI Y, SAITOH S, ONIMARU S, et al. Grid-shaped stabilized ground improved by deep cement mixing method against liquefaction for abuilding foundation[J]. Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1996, 44(3): 46-48.
- [5] TOKIMATSU K, MIZUNO H, KAKURAI M. Building damage associated with geotechnical problems[J]. Soils and Foundations-Special Issue, 1996, 1: 219-234.
- [6] 李 艳, 程谦恭, 张建磊, 等. 倾斜可液化场地中矩形闭合型地下连续墙桥梁基础动力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 959-966. (LI Yan, CHENG Qiangong, ZHANG Jianlei, et al. Seismic behavior of rectangular closed diaphragm walls as bridge foundations in slope liquefiable deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 959-966. (in Chinese))
- [7] 许成顺, 汪洋筱珊, 杜修力, 等. 分体柱在地下车站结构中的减震效果研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 624-633. (XU Chengshun, WANG Yangxiaoshan, DU Xiuli, et al. Seismic mitigation effects of split columns in underground station structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 624-633. (in Chinese))
- [8] 张梓鸿, 许成顺, 闫冠宇, 等. 液化夹层场地地铁车站结构离心机振动台试验方案设计[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 879-888. (ZHANG Zihong, XU Chengshun, YAN Guanyu, et al. Experimental design for dynamic centrifuge tests on a subway station structure in liquefied interlayer site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 879-888. (in Chinese))
- [9] CAO Y, KURIMOTO Y, ZHOU Y G, et al. Centrifuge model tests on liquefaction mitigation effect of soil-cement grids under large earthquake loadings[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2023, 21(9): 4217-4236.

(编校: 黄贤沙)