

粉土填充屋顶花园减震性能初探

刘建宏¹, 贾传果², 刘彦星²

(1. 山西省城乡规划设计研究院有限公司, 山西 太原 030001; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 随着城市化的快速推进, 屋顶花园优势凸显, 但屋顶花园导致结构顶层地震作用倍增, 这影响其在新建和既有建筑中的推广应用. 震害研究表明, 粉土液化有耗能潜力, 且具有耗能强、带宽长的特点, 但地基液化还很难用于减震设计. 提出基于粉土液化的屋顶花园减震方法, 即利用饱和粉土液化后表现出的黏滞流体特性, 通过合理设计把屋顶花园变成调谐液体阻尼器. 进行了一系列屋顶花园减震单层结构模型的自由振动试验, 并利用振动台试验验证了其有效性. 从可液化、可减震和可设计三个角度讨论了粉土填充屋顶花园减震功能拓展的可行性, 为进行系统研究并最终形成一种经济、环保、简单、实用的结构减震控制方法奠定了基础.

关键词: 屋顶花园 减震性能 粉土液化 等效阻尼比

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0310-07

Primary research on seismic performance of roof garden with silt

LIU Jianhong¹, JIA Chuanguo², LIU Yanxing²

(1. Shanxi Urban and Rural Planning and Design Institute Co., Ltd., Taiyuan 030001, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: With quickly pushing forward to urbanization, the advantages of roof gardens are becoming obvious. Nevertheless, roof garden also causes enormous increase of its vertical load and horizontal earthquake action, which hinders its application to newly-built and existing buildings. According to earthquake damages and previous research, it is observed that liquefaction of saturated silt exhibits favorable energy-dissipation potential of longer bandwidth. But it is difficult to directly apply liquefaction of foundation to seismic design. Proposes a novel seismic mitigation method, which transmutes the silt-filled roof garden into a tuned liquid damper by considering the viscous fluid property of liquefied silt. A series of free-vibration tests were conducted. And then shaking table tests were carried out to valid the feasibility of the seismic mitigation method. Investigated the viability of the seismic mitigation function extension of the silt-filled roof garden in terms of its liabilities to liquefaction, energy-dissipation and design, which laid the foundation of systematically investigation and development of an economical, environmentally-friendly, simple and practical seismic mitigation method.

Key words: roof garden seismic mitigation silt liquefaction equivalent damping ratio

随着城市化快速推进, 建筑密集, 城市可绿化面积减少, 屋顶花园发展迅速. 作为建筑的“第五面”, 屋顶花园可以有效的增加绿化面积, 具有保温隔热、收集雨水等作用. 同时屋顶花园使结构重力荷载和地震作用倍增. 若能利用屋顶花园进行减震设计, 新建房屋可降低其地震作用, 对于既有房屋还可大幅降低增设屋顶花园改造设计的难度.

近几十年来, 世界各地的灾难性地震屡屡发生大规模的地基液化现象^[1]. 大量的地基液化现象及其引起的地下工程与地面结构的严重破坏, 造成了巨大的财产损失和人员伤亡. 通过大量液化现象表明, 地震液化对工程结构有加震和减震的双重作用. 1995 年日本阪神地震中, Port 和 Rokko 人工岛发生大面积液化现象, 人工岛周边(液化侧扩区)房屋破坏严重, 但人工岛中部(液化非侧

扩区)结构震害极少^[2]。1976年唐山地震有“湿震(液化区)不坏,干震(非液化区)坏”的说法,表明地基土液化可耗散地震能量,反而减轻了工程结构的震害。因此,砂土或粉土液化有耗能减震潜力,震害的严重性和易发性也恰恰反映了液化具有耗能强、带宽长的特点。

地基液化可以通过隔震和耗能机理减轻上部结构的震害,但还很难直接用于结构的减震设计。同时若非液化土层强度不足以支撑上部结构,反而可能加剧结构震害。若能把原本不利的粉土从建筑物的底部转移至建筑物顶部,即可很好地利用粉土振动液化的耗能减震特性。粉土(较砂土更适宜种植)填充屋顶花园可以成为实现这一转移的载体。饱和粉土液化后呈黏滞流体,所填充的屋顶花园即可形成类似调谐液体阻尼器(TLD)的减震效果。这既可利用粉土液化的耗能潜力,又可实现屋顶花园从负重到减震的功能转变。

国内外许多学者致力于减震理论和方法的研究,并取得了大量的成果。然而在大量工程应用中也暴露出了阻尼器减震能力上的一些问题。在屋顶花园减震方面,有学者提出采用叠层钢板橡胶垫或其他支座作为连接装置,将屋顶花园支承在主要结构体系上形成一个减震系统^[3]。这种做法可实现一定的减震效果,但设备装置的连接构造比较复杂,除了叠层钢板橡胶支座外,还需要在屋顶上增加一个类似“花盆”的钢筋混凝土容器。

前期的一些学者证实了屋顶花园填充粉土具有良好的减震效果,但目前利用液化的非黏性土进行消能减震的研究较少,并距实际的应用还有众多的问题:(1)需要对液化的加强方法和触发条件进行研究,确保在地震发生时粉土能产生液化;(2)非黏性土发生液化后,需要优化其耗能性能和研究其耗能机理;(3)需要研究粉土填充屋顶花园动力特性及简化设计方法。从可液化、可减震和可设计三个角度讨论了粉土填充屋顶花园减震功能拓展的可行性,为进行系统研究并最终形成一种经济、环保、简单、实用的结构减震控制方法奠定了基础。

1 粉土填充屋顶花园减震机理及其可行性分析

1.1 粉土填充屋顶花园减震机理

为方便后文描述,对将会用到的结构模型命名及质量比定义如下:

(1)非控模型:在设计结构模型顶部增加质量

与粉土减震装置的质量相同的质量块;

(2)有控模型:在设计结构模型的顶部设置可液化粉土减震装置;

(3)质量比:有控模型中粉土质量与有控模型总质量比值。

粉土填充屋顶花园减震系统的设计思路是在屋顶花园中使用饱和粉土作为种植土壤,利用粉土液化的耗能能力来减小结构的在地震作用下的响应,把绿化环境和结构减震统一起来,如图1所示。在地震过程中实现类似调谐液体阻尼器的减震效果。

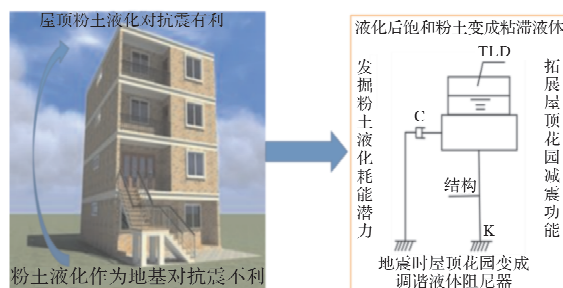


图1 粉土填充屋顶花园系统

Fig. 1 The Silt-filled Roof Garden System

粉土填充屋顶花园减震系统兼具调谐液体阻尼器和黏滞阻尼器的减震机制。其一,地震作用下饱和粉土发生液化现象,液化后的粉土呈流动状态,随结构晃动时对容器壁产生动压力,达到一定的减震效果,这个过程类似TLD的减震机制;其二,具有很大的黏性流动的混合土体及存在一定的时差的不同土层在晃动时,晃动幅度伴随着土层深度的增加而逐渐减小,各层土变形之前存在较大阻尼力^[4],有一定的耗能效果,故又具有黏滞阻尼器的工作机制。

1.2 粉土填充屋顶花园可行性分析

有文献^[5]指出波浪在淤泥质海床面上传播时会引起巨大能量衰减:在印度的Kerala,入射到淤泥滩上的台风浪只需4~8个波长的距离就可以完全被衰减掉;黄河口烂泥湾的消波现象,使之成为渔民的避风港。淤泥质海床与饱和粉土有近似的动力特性,这也表明饱和粉土具有潜在的耗能减震能力。

为分析粉土填充屋顶花园减震的可行性,在重庆大学振动台试验室进行了单层板柱结构模型的振动台试验,如图2所示。

模型中钢板尺寸为950 mm×800 mm×100 mm,质量约为590 kg,通过4根M30的螺杆与振动台连接,螺杆与振动台和钢板的连接均为刚接,螺杆总长为1 000 mm,自由丝级为700 mm。有控

模型的钢板上部固定有机玻璃腔体,腔体尺寸 $800\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$. 腔体内装有总质量为 96.2 kg 的饱和粉土. 饱和粉土采用水沉法制备,粉土质量为 74.2 kg ,水质量为 23.8 kg . 非控模型的钢板上部固定同质量的钢板,以对比粉土填充屋顶花园模型的减震效果.



图2 振台试验装置图

Fig. 2 Photo of experimental device

图3给出了单层板柱模型在El Centro波(N-S分量,幅值 0.1 g)和Taft波(幅值 0.1 g)的顶层加速度反应时程. 试验结果表明:屋顶花园粉土可在地震作用前期发生液化;屋顶花园中填充的粉土具有良好的减震效果. 试验表明屋顶花园采用粉土填充减震是可行的.

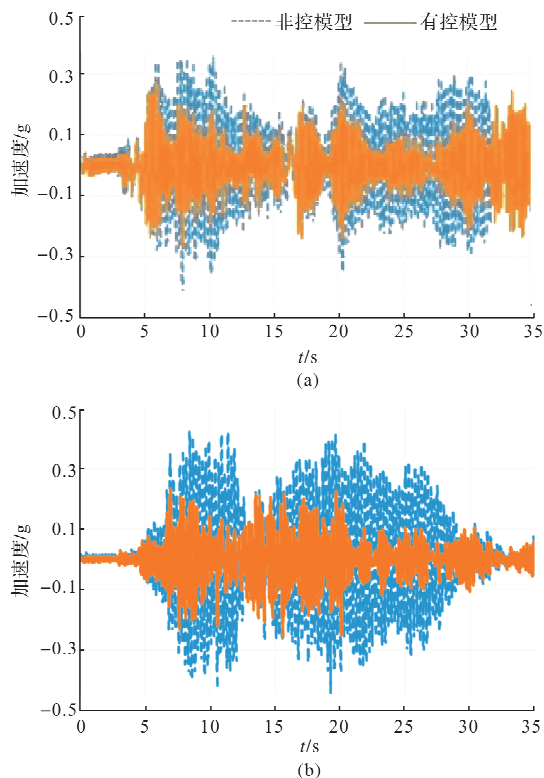


图3 粉土减震屋顶花园结构地震反应时程:

(a)El Centro波 0.1 g , (b)Taft波 0.1 g

Fig. 3 Seismic acceleration time-history curves of the structure with silt-filled roof garden

2 粉土填充屋顶花园的自由振动试验

2.1 试验方案

试验中主要考虑对粉土填充屋顶花园减震性能影响的四个因素:配重、结构刚度、水平加载位移、饱和粉土深度. 为了得到各项参数对减震效果的影响规律,设计了如图4所示的试验模型,并进行了一系列自由振动试验. 试验模型包括地钢板、楼层钢板、螺杆柱和有机玻璃容器. 为使试验模型底部稳固,试验时在地钢板上堆放 200 kg 铅板. 为实现不同的楼层刚度,楼层钢板分别采用4、6、8根M12的螺杆与地钢板连接,螺杆中间自由丝段长度为 700 mm . 通过改变楼层配重实现不同的楼层质量. 楼层钢板、有机玻璃及其固定装置总重为 107 kg . 自由振动试验在重庆大学振动台实验室完成.



图4 自由振动试验模型

Fig. 4 Free vibration experimental model

模型设计时,箱体中的流体采用纯水代替,箱体中流体晃动频率可通过Housner模型^[7]简单计算. 如图5所示为随箱体液体深度 h 和受力方向长度 a 与流体一阶晃动频率之间变化的关系. 由图5可知,水箱长度超过 0.5 m 时,液体一阶晃动频率速度变化趋于缓慢,为减小流体晃动频率由于水箱长度变化产生的影响,取水箱长度 0.6 m . 当水箱水深 0.2 m ,受力方向长度 0.6 m 时,液体一阶晃动频率计算值为 1.01 Hz . 对结构模型选取 1 Hz 为基准进行设计. 水箱尺寸取为 $600\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,流体的深度取值为 0.2 m .

结构的等效阻尼比计算方法可参考文献^[6]中自由振动试验结构阻尼比计算,模型试验用结构的等效阻尼比来表示试验模型的减震效果. 振动试验过程中,突然释放预先给箱体结构顶部施加的初始位移,箱体即产生水平方向自由振动,同时用加速度传感器记录箱体顶点加速度衰减时程曲线.

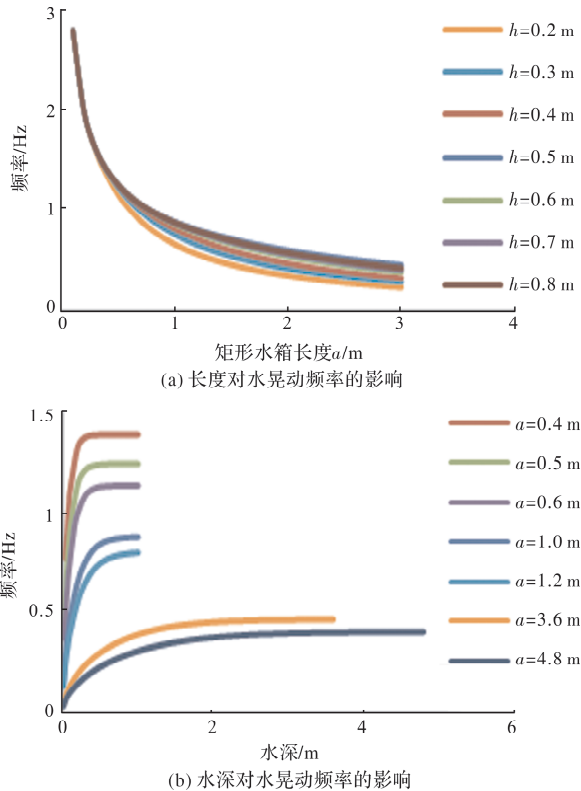


图5 箱体长度和水深对水晃动频率的影响

Fig. 5 Box body length and water depth effects on water sloshing frequency

2.2 饱和粉土减震和纯水 TLD 减震试验对比

图6给出纯水 TLD 减震和饱和粉土减震单层结构模型的自由振动试验结果. 试验结果表明: 纯水 TLD 减震模型在满足调谐条件时呈现典型的谐波效应; 在不满足调谐条件时, 减震效果较差; 试验过程中, 纯水 TLD 模型出现严重的碎波现象, 影响其减震性能的稳定; 相比而言, 饱和粉土减震模型带宽长、性能稳定、减震效果好. 产生这种情况其原因在于: 纯水 TLD 模型主要通过水的晃动对箱壁产生动压力, 达到一定减震的效果; 而饱和粉土不仅有流体与箱壁相互作用, 同时饱和的粉土流动过程呈现出的滞变特性也可提升其减震性能.

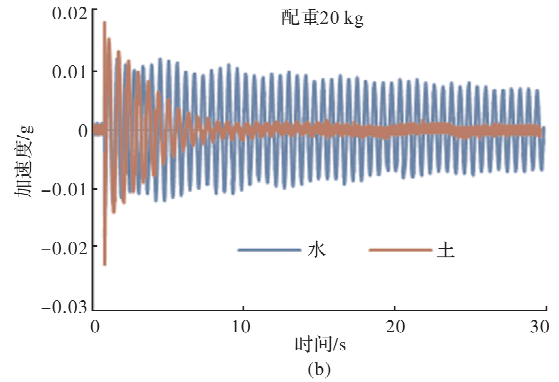
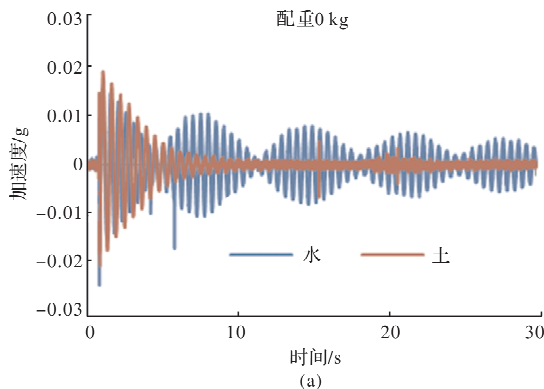


图6 不同配重模型顶部加速度时程曲线

Fig. 6 The acceleration response of the single-storey structure with different masses

2.3 饱和粉土减震模型参数分析

研究了位移加载幅值、土的深度、螺杆数与等效附加阻尼比的关系. 图7所示为, 附加配重、螺杆数和土深度一定时, 位移加载幅值与等效附加阻尼比的变化曲线. 阻尼比随着水平加载位移的增加, 有减小的趋势, 但幅度变化小, 可忽略饱和粉土减震模型由于水平加载位移对其减震效果的影响, 说明饱和粉土减震模型具有稳定的减震效果, 等效附加阻尼比不会随着加载幅值的改变而改变.

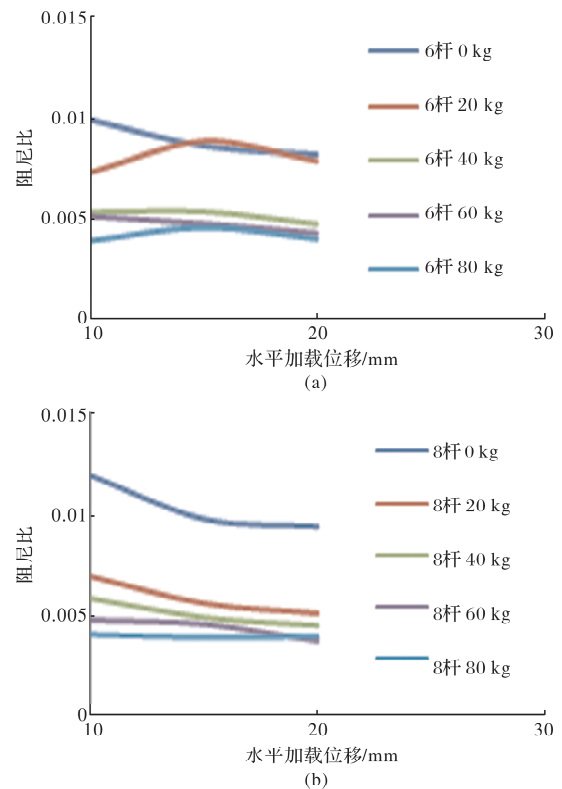


图7 加载幅值与阻尼比关系曲线

Fig. 7 The relation curve of the equivalent damping ratio and the displacement amplitude

模型等效附加阻尼比与土深度的变化曲线在附加配重和螺杆数量一定时,如图8所示。由图8可知,等效附加阻尼比随着饱和粉土深度的增加逐渐增大,从图中也可以看出当土的深度达到一定范围时,等效附加阻尼比随配重的增大而减小,即等效附加阻尼比随质量比的增加而增加。

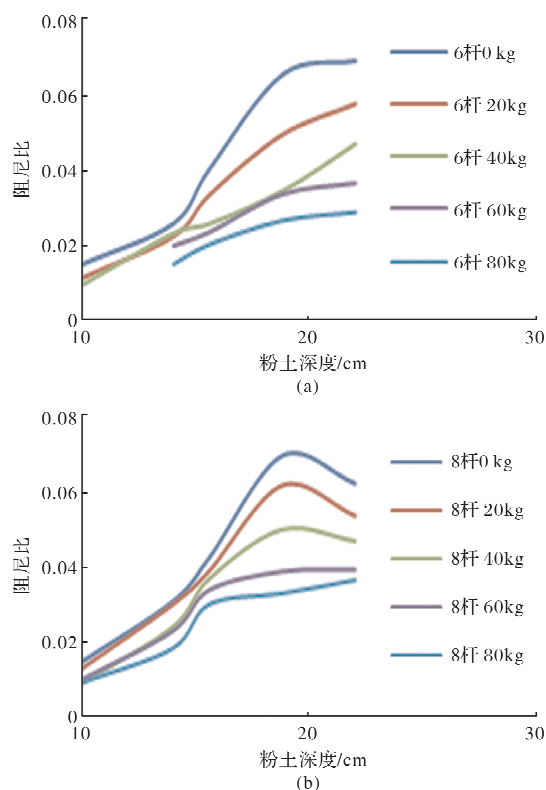


图8 阻尼比与粉土深度关系曲线

Fig. 8 The relation curve of the equivalent damping ratio and the depth of the saturated silt

3 粉土填充屋顶花园的中型振动台试验

振动台试验采用与自由振动试验类似的试验模型,试验模型的螺杆直接采用三角形钢板固定在振动台台面上。中型振动试验在重庆大学岩土实验室完成。饱和土深度取为0.2 m,假设液化粉土为均质黏性流体,采用Housner模型可计算得液体一阶晃动频率为1.039 Hz,土容重取 1850 kg/m^3 ,土总重为42.92 kg。对结构在试验过程中分别输入了El Centro波、Taft波和正弦波三种激励。

在试验过程中可以观察到,饱和粉土在地震作用下很快液化,说明在实际应用中屋顶花园中的粉土能够较快发挥减震能力。在外部激励接近1.2 Hz时,结构发生共振,液化粉土表面可以观察到明显的波动现象。

(1)地震波激励下有控结构与非控结构顶部加速度时程对比曲线如图9所示。

(2)在正弦波激励下,各频率有控模型与非控模型结构顶部加速度时程曲线对比如图10所示。

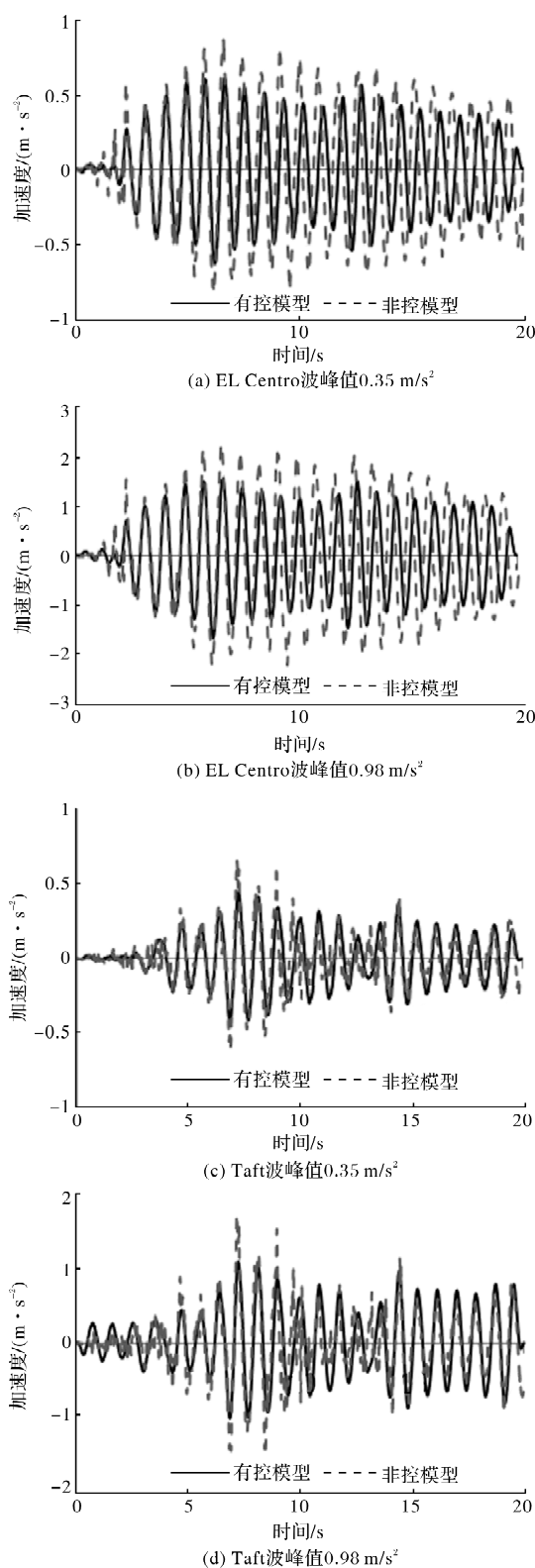


图9 20 cm土深时结构顶部加速度时程曲线

Fig. 9 The acceleration curve of the roof with the soil depth of 20 cm

根据模型试验结果显示, 取各工况有控与非控模型对应的顶部加速度最大响应值, 计算得到该工况下有控模型相对于非控模型的减震率为

减震率=[(A₀-A_T)/A₀]×100% (1)

式中: A₀、A_T 为非控模型和有控模型顶部的加速度最大响应值。

结构顶部最大加速度值以及对应的减震率计算结果如表 1 所示。

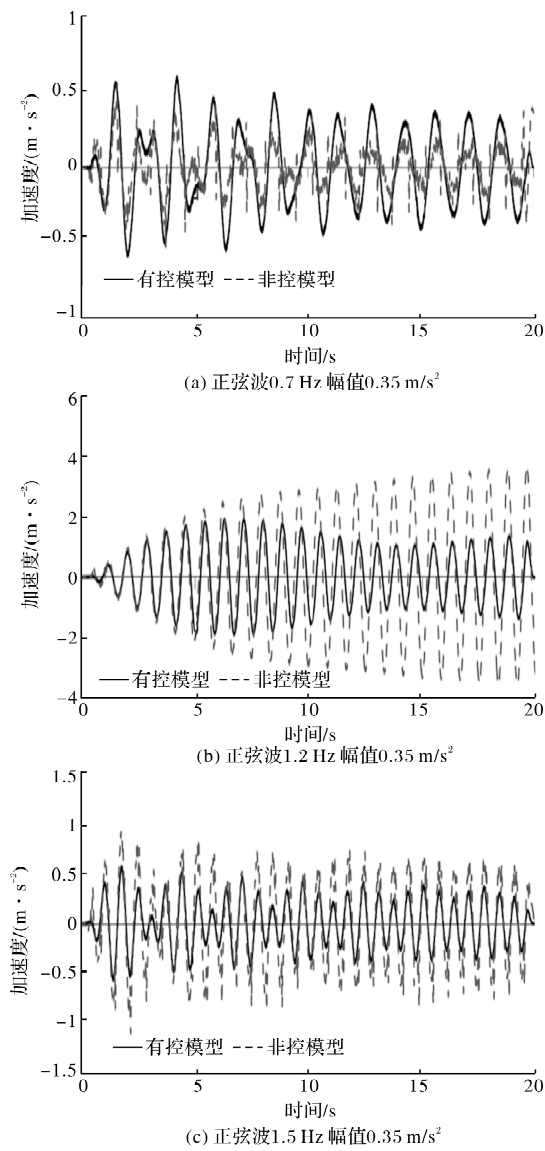


图 10 20 cm 土深时结构加速度时程曲线

Fig. 10 The acceleration curve of the roof with the soil depth of 20 cm

在 Taft 波和 EL Centro 波作用情况下, 模型试验有很好减震效果, 减震率最低为 29.72%, 最高可达到 41.53%。减震效果较好有两点原因: 一是粉土减震模型振动时能吸收较多能量, 并存在

较大的阻尼作用; 二是饱和粉土减震模型的减震频带较宽, 而地震波的频谱成分很复杂, 因而能产生较好的减震效果。

表 1 土深 20 cm 时试验结果

Tab. 1 Test results at 20 cm soil depth

地面输入及幅值	结构峰值加速度/(m/s ²)		减震率/%
	非控结构	有控结构	
正弦波 0.7Hz 0.35 m/s ²	0.557	0.601	-7.97
正弦波 1.2Hz 0.35 m/s ²	3.340	1, 928	42.27
正弦波 1.5Hz 0.35 m/s ²	0.912	0.568	38.00
El Centro 波 0.35 m/s ²	0.858	0.602	29.72
El Centro 波 0.98 m/s ²	2.218	1.529	31.76
Taft 波 0.35 m/s ²	0.747	0.447	40.25
Taft 波 0.98 m/s ²	1.858	1.086	41.53

4 结论

利用粉土液化后的动力特性, 提出了粉土填充屋顶花园减震系统的构想, 设计并进行了自由振动试验和中型振动台试验。结果表明:

- (1)在地震作用下饱和粉土很快发生液化, 粉土能够快速发挥减震能力。
- (2)试验模型结果显示饱和粉土等效附加阻尼比随粉土质量比的增加而增加。
- (3)试验模型在水平地震作用下具有较好的减震效果。尤其结构自身频率和激励频率相近时, 在正弦波激励下, 模型减震的效果最好。
- (4)由自由振动试验结果可知, 试验模型的减震机理与 TLD 不同, 所研究的粉土填充屋顶花园减震系统较 TLD 有更好的减震效果。

参考文献 References

[1] 陈国兴,金丹丹,常向东,等. 最近 20 年地震中场地液化现象的回顾与土体液化可能性的评价准则[J]. 岩土力学, 2013, 34(10):2737-2755.
CHEN Guoxing , JIN Dandan , CHANG Xiangdong ,

- et al. Review of soil liquefaction characteristics during major earthquakes in recent twenty years and liquefaction susceptibility criteria for soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(10):2737-2755.
- [2] 刘惠珊. 1995 年阪神大地震的液化特点[J]. *工程抗震*, 2001, 3(1):22-27.
- LIU Huishan. Liquefaction characteristics of the Great Hanshin earthquake in 1995 [J]. *Earthquake Resistant*, 2001, 3(1):22-27.
- [3] MATTA E, STEFANO A. Seismic performance of pendulum and translational roof-garden TMDs [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2009, 23(3):908-921.
- [4] SAGLAM S. Cyclic response of saturated silts [J]. *Soil Dynamic & Earthquake Engineering*, 2014, 61: 164-175.
- [5] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- QIAN Ning, WAN Zhaohui. *Sediment movement mechanics* [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd, 2003.
- [6] 李英民, 杨溥. 建筑结构抗震设计[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2011
- LI Yingmin, YANG Pu. *Seismic design of building structure* [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2011.
- [7] 刘云贺, 胡宝柱, 闫建文, 等. Housner 模型在渡槽抗震计算中的适用性[J]. *水利学报*, 2002, 33(9): 94-99.
- LIU Yunhe, HU Baozhu, YAN Jianwen, et al. Application of housner model in aqueduct seismic calculation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(9): 94-99.

(编辑 桂智刚)