

边坡条件对重力式挡墙地震位移模式的影响^{*}

文畅平^{1,2}, 江学良^{1,2}, 杨 慧^{1,2}, 孙广臣^{1,2}

(1. 中南林业科技大学现代木结构工程材制造及应用技术湖南省工程实验室 长沙, 410018)

(2. 中南林业科技大学土木工程学院 长沙, 410018)

摘要 基于大型振动台模型试验,研究边坡条件对重力式挡墙地震位移模式及其变化方式的影响。振动台模型试验采用 2 个比尺 1:8 的基覆边坡和顺层边坡模型,支挡结构为重力式挡墙与格构式锚杆框架二级组合式结构,地震波选用大瑞人工波和 Kobe 波。研究表明,基覆边坡中重力式挡墙地震位移模式主要有 4 类,即绕墙趾向边坡外侧转动、以滑动为主的向边坡外侧滑动与绕墙趾向边坡外侧转动的耦合、以转动为主的绕墙趾向边坡外侧转动与向边坡外侧滑动的耦合以及以滑动为主的向边坡外侧滑动与绕墙趾向边坡方向转动的耦合。顺层边坡中重力式挡墙地震位移模式主要有 2 类:绕墙趾向边坡外侧转动,绕墙趾向边坡外侧转动与离开边坡土体向外侧滑动的耦合。当地震烈度大于 VII 度时,重力式挡墙才产生动位移模式。边坡条件、地震波类型及烈度对重力式挡墙地震位移模式及其变化方式的影响较大,对相对位移的影响较小。

关键词 重力式挡墙;边坡条件;地震位移模式;大型振动台模型试验;地震永久位移

中图分类号 TU435;TH825

引 言

相关研究认为^[1-4],挡墙的地震动位移模式及其变化方式影响地震土压力及其分布形式,但到目前为止,有关挡墙地震位移模式的研究还处在探索阶段,相关的文献也较少。一般认为,刚性挡墙的地震动位移模式为转动或平移^[5-9]。文献[10]认为,挡墙在地震作用下产生 3 种位移模式:平移、转动和弯曲。文献[11-12]认为,重力式挡墙、桩板式挡墙以及格构式锚杆框架结构等的位移模式主要有 4 种:滑动、转动、以滑动为主的滑动与转动的耦合以及以转动为主的转动与滑动的耦合等。张建经等^[13]、曲宏略等^[14]分别研究了重力式挡墙、预应力锚索桩板墙等地震作用下的位移模式。重力式挡墙主要产生转动以及转动与滑动的耦合 2 种位移模式;而桩板墙由于锚索的限制,其位移模式为绕嵌固段某点的转动。

支挡结构与边坡岩土体在地震作用下构成一个复杂的非线性动力系统,其位移模式及其变化特性非常复杂。关于边坡条件对挡墙地震位移模式的影响还鲜有报道,因此开展边坡条件对挡墙地震位移模式影响的研究则显得尤为重要。现有研究方法

中,大型振动台模型试验能很好再现结构在地震作用下的响应特性^[15],是结构动力特性和抗震性能研究的重要手段^[16]。为此,笔者设计 2 个大型振动台模型试验,对比研究基覆边坡、顺层边坡等边坡条件对重力式挡墙地震位移模式的影响及其变化特性。

1 大型振动台模型试验

大型振动台模型试验在招商局重庆交通科研设计院有限公司桥梁结构动力学国家重点实验室进行。大型地震模拟振动台台阵系统由德国 SCHENCK 公司生产,由一个固定台和一个移动台组成,主要技术参数见文献[11-12]。数据采集为 Dewetron2010 动态测试系统。

1.1 原型边坡

从大理至瑞丽铁路 DK10+400~DK11+535 段^[11-17]、DK10+880~DK10+930 段^[18]选择确定 2 种类型的原型边坡:厚覆盖层与基岩边坡(简称基覆边坡),厚覆盖层与顺层岩石边坡(简称顺层边坡)。基覆边坡覆盖层土性及其主要物理力学参数、边坡高度、支挡结构形式及支护方式等参见文献[11]和

^{*} 现代木结构工程材制造及应用技术湖南省工程实验室开放基金资助项目(HELFMST1707);国家自然科学基金资助项目(51404309,51408617);湖南省重点学科建设项目(2013ZDXK006);中南林业科技大学引进高层次人才科研启动基金资助项目(104-0094)

收稿日期:2015-12-16;修回日期:2016-03-09

[17]。顺层边坡覆盖层土性及其主要物理力学参数、边坡高度、支挡结构形式及支护方式等与基覆边坡相同,顺层岩石为混合岩夹花岗片麻岩,重度 $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$,黏聚力 $c = 0$,内摩擦角 $\varphi = 65^\circ$,层间指标为 $c = 95 \text{ kPa}$, $\varphi = 22^\circ$ 。

1.2 相似关系

模型试验以几何尺寸、密度和加速度作为控制量,其相似常数分别取 $C_l = 8, C_\rho = 1, C_a = 1$,模型与原型尺寸的相似比为 $1 : 8$ 。按照相似理论^[19-20]确定其余物理量的相似常数,分别参见文献[11],[17]和[18]。

1.3 模型制作

根据相似关系,2个边坡模型尺寸设计为 150 cm (高) $\times 150 \text{ cm}$ (宽),护坡坡率为 $1 : 1.25$,护坡道宽度为 25 cm 。基覆边坡和顺层边坡模型尺寸和重力式挡墙尺寸如图 1 和图 2 所示。试验采用刚性模型箱,其制作材料、方法、内空尺寸和边界处理等参见文献[11-12]以及[21]。基覆边坡、顺层边坡模型制作方法参见文献[11],[17-18]。边坡模型完成后,

总重量都小于 300 kN 且小于振动台标准荷重。两个边坡模型全貌相同,如图 3 所示。

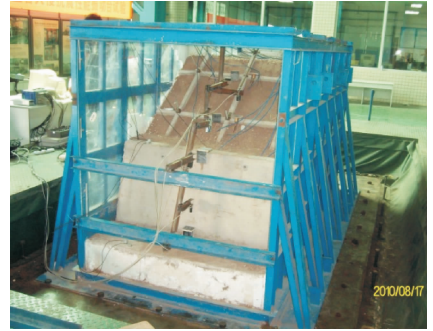


图 3 边坡模型全貌图

Fig. 3 Overall perspective of slope model

为便于比较分析,两个边坡模型都沿中轴线相同位置布设动位移计,布设位置及编号如图 1,2 所示。其中:水平向(x 向)、竖直向(z 向)动位移计分别为 4 个和 2 个。动位移计为德国米依公司生产的 ILD1401-200(000)型激光位移传感器,采样频率为 1 kHz ,线性为 $\pm 0.2\%$ 。试验以台面水平向和竖向加速度计为控制点。

1.4 地震波及加载方式

选用大瑞波和 Kobe 波作为振动台的输入波,时间压缩比为 2.83。其中,大瑞波是根据大瑞铁路沿线土层特性构造的人工合成地震波。两种地震波都采用 xz 双向(x 向和 z 向合成)加载,代号分别为 DR_{xz} 和 K_{xz} 。激振方向 x 向和 z 向如图 1,2 所示。图 4,5 分别为这两种地震波压缩后的加速度时

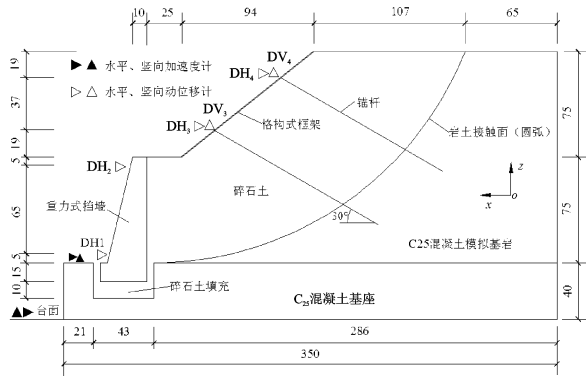


图 1 基覆边坡模型及测点位置(单位:cm)

Fig. 1 Base rock slope model and its transducers' locations(unit:cm)

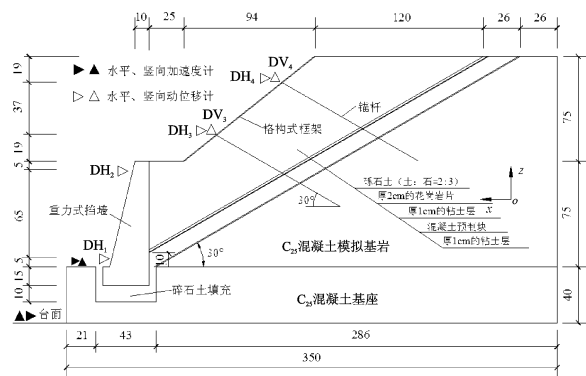
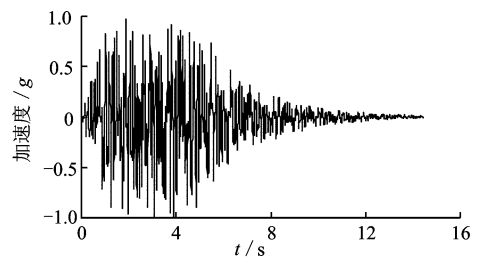


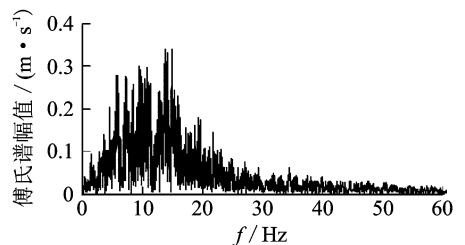
图 2 顺层边坡模型及测点位置(单位:cm)

Fig. 2 Consequent bedding rock slope model and its transducers' locations(unit:cm)



(a) 压缩大瑞波加速度时程曲线

(a) Acceleration time-history of compressed Darui synthetic seismic wave



(b) 压缩大瑞波傅氏谱

(b) Fourier spectra of compressed Darui synthetic seismic wave

图 4 压缩大瑞波加速度时程曲线及其傅氏谱

Fig. 4 Acceleration time-history and Fourier spectra of compressed Darui synthetic seismic wave

程曲线及傅氏谱。根据相关规范[22-23],将 x 向加速度峰值调整为 0.1, 0.2, 0.4 和 0.6 g , 与地震烈度 VII~X 相对应。 z 向加载的加速度峰值按 x 向的 2/3 折减^[22,24]。具体加载制度如表 1 所示。

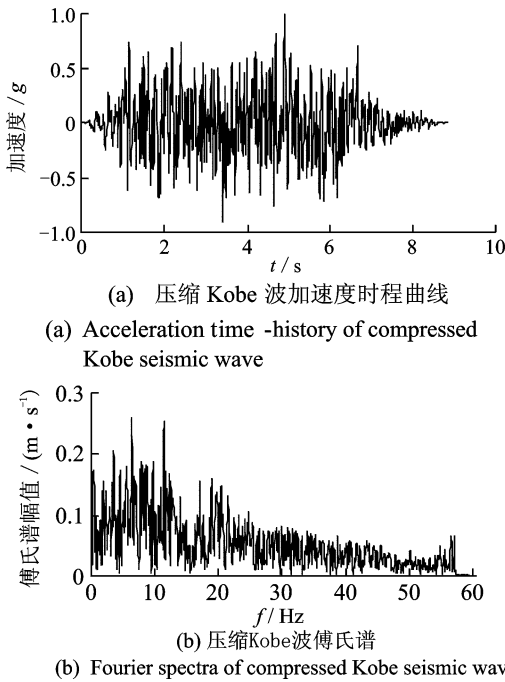


图 5 压缩 Kobe 波加速度时程曲线及其傅氏谱

Fig. 5 Acceleration time-history and Fourier spectra of compressed Kobe seismic wave

表 1 振动台模型试验加载制度

Tab. 1 Loading rule of shaking table test

序号	工况代号	加速度幅值/ g	
		x 向	z 向
1	WN $_{xz}$ - 1	—	—
2	DR $_{xz}$ - 1	0.1	0.067
3	K $_{xz}$ - 1	0.1	0.067
4	WN $_{xz}$ - 2	—	—
5	DR $_{xz}$ - 2	0.2	0.133
6	K $_{xz}$ - 2	0.2	0.133
7	WN $_{xz}$ - 3	—	—
8	DR $_{xz}$ - 3	0.4	0.267
9	K $_{xz}$ - 3	0.4	0.267
10	WN $_{xz}$ - 4	—	—
11	DR $_{xz}$ - 4	0.6	0.400
12	K $_{xz}$ - 4	0.6	0.400
13	WN $_{xz}$ - 5	—	—

WN $_{xz}$ 为时间长度不小于 48 s 的高斯平稳白噪声激振的微震试验^[25], 加速度峰值约 0.03 g ~0.05 g

2 试验结果与分析

根据动位移计与边坡模型的相对位置确定位移方向。位移为“+”时表示挡墙向边坡土体方向移动;位移为“-”时表示挡墙离开土体向边坡外侧移动。根据测点 DH₁ 和 DH₂ 的永久位移实测结果, 计算滑动位移 D_H 、墙顶位移 D_T 、转动位移 D_R 、相对位移($\sum D_T/H$, H 为墙高)和动位移比(包括滑动位移比和转动位移比)。上述参数中, D_H 和 D_T 反映挡墙位移模式, 动位移比反映挡墙地震位移模式的变化方式, 相对位移反映挡墙震后位移幅度和方向等^[11-12]。

2.1 大瑞波作用下地震位移模式分析

挡墙地震位移模式计算结果如表 2 所示。图 6 为在大瑞波 xz 双向激振下, 基覆边坡、顺层边坡中挡墙动位移模式的变化情况。

1) 当激振加速度峰值 $A_{Xmax} \leq 0.1 g$ 时, 基覆边坡、顺层边坡中挡墙的相对位移分别小于 0.052% 和 0.008%。当 A_{Xmax} 不小于 0.1 g 时, 基覆边坡挡墙相对位移分别是顺层边坡的 1.50, 1.59 和 0.84 倍。试验结果表明: 地震波烈度不大于 VII 度时, 挡墙位移量可忽略不计; 地震波烈度大于 VIII 度时, 挡墙产生动位移, 且两类边坡中的挡墙相对位移变化趋势较为接近。

2) 基覆边坡中, 当 $A_{Xmax} \geq 0.2 g$ 时, 挡墙滑动位移量分别为 -0.672, -0.984 和 -14.432 mm, D_H 和 D_R 都为负值, 滑动位移比分别为转动位移比的 0.16, 0.17 和 2.77 倍。当 $A_{Xmax} \leq 0.4 g$ 时, 重力式挡墙离开边坡土体的滑移量较小, 表明其位移模式为绕墙趾向边坡外侧转动; 当 $A_{Xmax} = 0.6 g$ 时, 挡墙位移模式为离开边坡土体向外侧滑动与绕墙趾向边坡外侧转动的耦合, 且以滑动为主。

3) 顺层边坡中, 当 $A_{Xmax} \geq 0.2 g$ 时, 挡墙滑动位移量分别为 -0.616, -1.840 和 -19.584 mm, D_H 和 D_R 都为负值, 滑动位移比分别为转动位移比的 0.14, 0.25 和 0.91 倍。当 $A_{Xmax} \leq 0.2 g$ 时, 挡墙离开边坡土体的滑移量较小, 表明其位移模式为绕墙趾向边坡外侧转动; 当 $A_{Xmax} \geq 0.4 g$ 时, 挡墙位移模式为由绕墙趾向边坡外侧转动, 逐渐转变为绕墙趾向边坡外侧转动与离开边坡土体向外侧滑动的耦合。

上述分析表明, 边坡岩土体特性不同, 挡墙地震动位移模式及其变化特性不同。

表2 大瑞波作用下挡墙地震位移模式分析

Tab. 2 Analysis of seismic displacement mode of gravity retaining wall

位置	DR _{xz} 激振加速度峰值(x向)/g	0.1	0.2	0.4	0.6
基覆 边坡	测点 DH ₁ 永久位移/mm	-0.048	-0.672	-0.984	-14.432
	测点 DH ₂ 永久位移/mm	-2.928	-4.776	-6.960	-19.640
	D _H /mm	-0.048	-0.672	-0.984	-14.432
	D _T /mm	-2.928	-4.776	-6.960	-19.640
	D _R /mm	-2.880	-4.104	-5.976	-5.208
	相对位移/%	-0.052	-0.138	-0.262	-0.613
	滑动位移比/%	1.64	14.07	14.14	73.48
	转动位移比/%	98.36	85.93	85.86	26.52
顺层 边坡	测点 DH ₁ 永久位移/mm	-0.336	-0.616	-1.840	-19.584
	测点 DH ₂ 永久位移/mm	-0.432	-5.128	-9.216	-41.112
	D _H /mm	-0.336	-0.616	-1.840	-19.584
	D _T /mm	-0.432	-5.128	-9.216	-41.112
	D _R /mm	-0.096	-4.512	-7.376	-21.528
	相对位移/%	-0.008	-0.092	-0.165	-0.734
	滑动位移比/%	77.78	12.01	19.97	47.64
	转动位移比/%	22.22	87.99	80.03	52.36

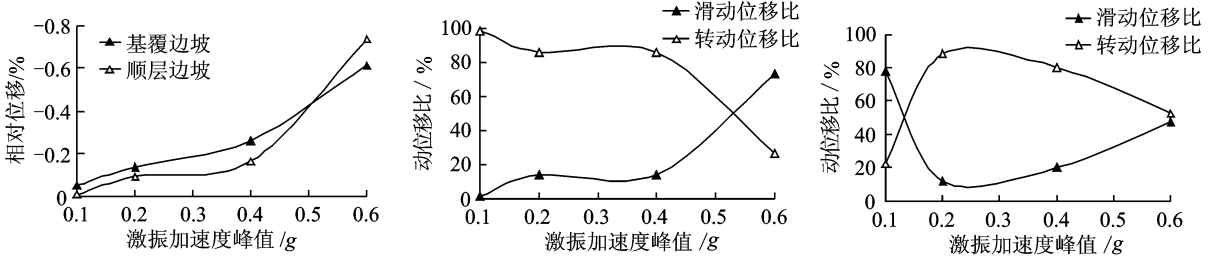


图6 大瑞波激振下挡墙位移模式变化机制

Fig. 6 Change mechanism of seismic displacement modes under DR_{xz}

2.2 Kobe 波作用下地震位移模式分析

挡墙地震位移模式计算结果如表3所示。图7为在Kobe波 xz 双向激振下,基覆边坡、顺层边坡中挡墙动位移模式变化机制。

1) 当激振加速度峰值 $A_{Xmax} \leq 0.1 g$ 时,基覆边坡、顺层边坡中挡墙的相对位移分别小于0.085%和0.046%。当 A_{Xmax} 不小于0.1g时,基覆边坡挡墙相对位移分别为顺层边坡的1.47,1.86和1.84倍。试验结果表明:地震波烈度不大于VII度时,挡墙位移量可忽略不计;地震波烈度大于VIII度时,挡墙产生动位移且两类边坡中的挡墙相对位移变化趋势一致。

2) 基覆边坡中,当 A_{Xmax} 分别为0.2g和0.4g时,挡墙滑动位移量分别为-1.760mm和-2.680mm, D_H 和 D_R 都为负值,滑动位移比分别

为转动位移比的0.61和1.80倍。当 $A_{Xmax} \leq 0.4 g$ 时,挡墙位移模式为以转动为主的绕墙趾向边坡外侧转动与向边坡外侧滑动的耦合的位移模式,逐渐转变为以滑动为主的向边坡外侧滑动与绕墙趾向边坡外侧转动的耦合的位移模式。当 $A_{Xmax} = 0.6 g$ 时,滑动位移量为-15.072mm, $D_H < 0, D_R > 0$,滑动位移比为转动位移比的1.30倍,此时重力式挡墙的位移模式为离开边坡土体向外侧滑动与绕墙趾向边坡土体方向转动的耦合,且以滑动为主。

3) 顺层边坡中,当 $A_{Xmax} \geq 0.2 g$ 时, $D_H > 0, D_R < 0$,滑动位移比不大于8.08%,滑动位移可忽略不计,此时重力式挡墙的位移模式为绕墙趾向边坡外侧转动。

上述分析表明,边坡岩土体特性不同,挡墙地震动位移模式及其变化特性同样是不同的,且地震波类型对挡墙动位移模式也产生较大影响。

表 3 Kobe 波作用下挡墙地震位移模式分析

Tab. 3 Analysis of seismic displacement mode of gravity retaining wall of bedding rock slope

位置	K _{xz} 激振加速度峰值(x 向)/g	0.1	0.2	0.4	0.6
基覆 边坡	测点 DH ₁ 永久位移/mm	-0.872	-1.760	-2.680	-15.072
	测点 DH ₂ 永久位移/mm	-4.776	-4.624	-4.168	-3.504
	D _H /mm	-0.872	-1.760	-2.680	-15.072
	D _T /mm	-4.776	-4.624	-4.168	-3.504
	D _R /mm	-3.904	-2.864	-1.488	11.568
	相对位移/%	-0.085	-0.168	-0.242	-0.305
	滑动位移比/%	18.26	38.06	64.30	56.58
顺层 边坡	测点 DH ₁ 永久位移/mm	-0.092	0.496	0.656	0.896
	测点 DH ₂ 永久位移/mm	-2.568	-6.408	-7.304	-9.296
	D _H /mm	-0.092	0.496	0.656	0.896
	D _T /mm	-2.568	-6.408	-7.304	-9.296
	D _R /mm	-2.476	-6.904	-7.960	-10.192
	相对位移/%	-0.046	-0.114	-0.130	-0.166
	滑动位移比/%	3.58	6.70	7.61	8.08
转动位移比/%	96.42	93.30	92.39	91.92	

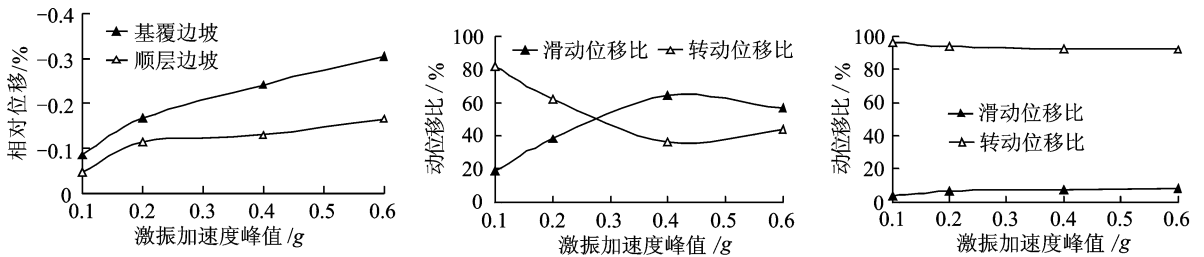


图 7 Kobe 波激振下挡墙位移模式变化机制

Fig. 7 Change mechanism of seismic displacement modes under K_{xz}

3 结 论

1) 大型振动台模型试验研究表明,重力式挡墙的地震位移模式主要有 5 类:绕墙趾向边坡外侧转动,绕墙趾向边坡外侧转动与向边坡外侧滑动的耦合,以滑动为主的向边坡外侧滑动与绕墙趾向边坡外侧转动的耦合,以滑动为主的向边坡外侧滑动与绕墙趾向边坡方向转动的耦合,以转动为主的绕墙趾向边坡外侧转动与向边坡外侧滑动的耦合。

2) 当地震烈度大于 VII 度时,重力式挡墙产生动位移模式,且随地震烈度增大,地震位移模式发生变化,地震位移模式的变化方式也发生变化。

3) 重力式挡墙地震位移模式及其变化方式随边坡条件、地震波类型的变化而变化。但是,边坡条件、地震波类型对重力式挡墙相对位移的影响较小。

参 考 文 献

[1] Veletsos A S, Younan A H. Dynamic modeling and response of soil-wall system[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1994, 120 (12):

2155-2179.
 [2] Zang J M, Shamoto Y, Tokimatsu K. Seismic earth pressure theory for retaining wall under any lateral displacement[J]. Journal of Soil and Foundations, 1998, 38(2):143-163.
 [3] Richards R, Huang C, Fishman K L. Seismic earth pressure on retaining structures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(9):771-778.
 [4] Choudhury D, Nimbalkar S S. Seismic passive resistance by pseudo-dynamic method [J]. Geotechnique, 2005, 55(9):699-702.
 [5] Choudhury D, Nimbalkar S S. Pseudo-dynamic approach of seismic active earth pressure behind retaining wall [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(5):1103-1113.
 [6] Choudhury D, Nimbalkar S S. Seismic rotational displacement of gravity walls by pseudo-dynamic method: passive case[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(3):242-249.
 [7] Azad A, Shahab Y S, PAK A. Seismic active pressure distribution history behind rigid retaining walls [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, 28 (5):365-375.
 [8] Shukla S K, Gupta S K, Sivakugan N. Active earth

- pressure on retaining wall for $c-\phi$ soil backfill under seismic loading condition[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2009, 135(5):690-696.
- [9] Greco V R. Analytical solution of seismic pseudo-static active thrust acting on fascia retaining wall[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 57(2): 25-36.
- [10] Nazarian H N, Hadjian A H. Earthquake-induced lateral soil pressures on structures [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 1979, 105(9):1049-1066.
- [11] 文畅平, 杨果林. 地震作用下挡土墙位移模式的振动台试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(7): 1502-1512.
Wen Changping, Yang Guolin. Large-scale shaking table tests study of seismic displacement mode of retaining structures under earthquake loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(7):1502-1512. (in Chinese)
- [12] 文畅平, 杨果林. 格构式框架护坡地震动位移模式的振动台试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(10):2076-2083.
WEN Changping, Yang Guolin. Shaking table model test study of seismic displacement mode of slope with anchor lattice frame structure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(10):2076-2083. (in Chinese)
- [13] 张建经, 韩鹏飞. 重力式挡墙基于位移的抗震设计方法研究—大型振动台模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(3):416-423.
Zhang Jianjing, Han Pengfei. Displacement-based aseismic design method for gravity retaining walls—large scale shaking table tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(3):416-423. (in Chinese)
- [14] 曲宏略, 张建经, 王富江. 预应力锚索桩板墙地震响应的振动台试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(2): 313-320.
Qu Honglue, Zhang Jianjing, Wang Fujiang. Seismic response of prestressed anchor sheet pile wall from shaking table tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(2):313-320. (in Chinese)
- [15] 张志, 孟少平, 周臻, 等. 振动台试验加速度积分方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(4):627-633.
Zhang Zhi, Meng Shaoping, Zhou Zhen, et al. Numerical integration method of acceleration recodes for shaking table test[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(4):627-633. (in Chinese)
- [16] 李静, 陈健云, 徐强, 等. 振动台非线性破坏模型试验影响因素[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(1):62-67.
Li Jing, Chen Jianyun, Xu Qiang, et al. Study on influencing factors of nonlinear failure model test on shaking table[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(1):62-67. (in Chinese)
- [17] 文畅平, 杨果林, 江学良, 等. 重力式与格构式组合支挡结构位移和应变地震响应的振动台试验研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(24): 183-189, 196.
Wen Changping, Yang Guolin, Jiang Xueliang, et al. Shaking table test for seismic displacement and strain responses of a combined earth retaining structure under seismic loads[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(24):183-189, 196. (in Chinese)
- [18] 文畅平, 江学良, 杨果林, 等. 二级支护边坡重力式挡墙地震动力特性的振动台试验研究[J]. *振动工程学报*, 2014, 27(3): 426-432.
Wen Changping, Jiang Xueliang, Yang Guolin, et al. Large-scale shaking table test study on seismic response characteristics of gravity retaining walls of slopes stabilized by two-stage retaining structures[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2014, 27(3): 426-432. (in Chinese)
- [19] Iai S. Similitude for shaking table tests on soil - structure-fluid model in 1g gravitational field[J]. *Soils and Foundations*, 1989, 29(1): 105-118.
- [20] 刘小生, 王钟宁, 汪小刚, 等. 面板坝大型振动台模型试验与动力分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005:9-20.
- [21] 文畅平, 江学良, 杨果林, 等. 桩板墙地震动力特性的大型振动台模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(5): 976-985.
Wen Changping, Jiang Xueliang, Yang Guolin, et al. Large-scale shaking table model test study of seismic response characteristics of sheet-pile retaining wall[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(5): 976-985. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [23] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50111—2006 铁路工程抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [24] Nouri H, Fakher A, Jones C J F P. Evaluating the effects of the magnitude and amplification of pseudo-static acceleration on reinforced soil slopes and walls using the limit equilibrium horizontal slices method[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(3): 263-278.
- [25] 黄浩华. 地震模拟振动台的设计与应用技术[M]. 北京: 地震出版社, 2008: 315-340.



第一作者简介:文畅平,男,1965年1月生,博士、教授。主要研究方向为岩土力学以及边坡与支挡结构抗震性能。曾发表《二级支护边坡重力式挡墙地震动力特性的振动台试验研究》(《振动工程学报》2014年第27卷第3期)等论文。
E-mail: wenchangping@163.com

