

水平地震作用下加筋格宾挡土墙动力特性试验研究

李 昀, 杨果林, 林宇亮

(中南大学土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 通过大型的模型试验, 研究了以红砂岩为填料在水平地震作用下加筋格宾挡土墙的动力特性。双绞合六边形金属格宾网由 PVC 包裹, 并镀锌防腐, 网面单元尺寸为 80 mm×100 mm。输入地震波采用 ELCE__NS 地震波和 HACHI__EW 地震波, 峰值分别为 0.342g 和 0.183g。试验得出了加筋格宾挡墙在不同峰值的水平地震激励下的第一层、第三层、第五层墙顶面处的水平加速度、竖向加速度、水平动位移、竖向动位移峰值响应和沿墙高方向动应力峰值响应。通过对加筋格宾挡土墙的结构分析和抗震试验, 可以得出加筋格宾挡土墙为优良的抗震结构, 这为加筋格宾挡土墙的抗震设计提供依据。

关键词: 加筋格宾挡土墙; 动力特性; 双绞合六边形金属格宾网; 红砂岩

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2009)12 - 1930 - 06

作者简介: 李 昀 (1975 -), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, 从事新型支挡结构理论与工程应用研究。E-mail: liyun2007@mail.csu.edu.cn。

Dynamic characteristics of reinforced gabion walls subjected to horizontal seismic loading

LI Yun, YANG Guo-lin, LIN Yu-liang

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Large model tests are conducted on reinforced gabion walls filled with red sandstone under horizontal seismic loading to investigate the dynamic response of walls. PVC-coated heavy galvanized of double twisted hexagonal wire mesh is used in the tests, and the cells of wire mesh specimens have a dimension of 80 mm×100 mm. Input seismic waves are ELCE__NS and HACHI__EW, and the peaks are 0.342g and 0.183g respectively. The horizontal acceleration, vertical acceleration, dynamic horizontal displacement, dynamic vertical displacement, and dynamic stress peaks response of the first layer, the third layer, the fifth layer of reinforced gabion walls are achieved in the model tests under different peaks of horizontal earthquake incentives. The reinforced gabion walls are proved to be excellent aseismatic structures by the structural analyses and aseismatic experiments. The test results provide a reasonable basis for the aseismatic design of reinforced gabion walls.

Key words: reinforced gabion wall; dynamic response; double twisted hexagonal wire mesh; red sandstone

0 引 言

地震是一种自然现象, 它对人们的生命和财产造成巨大损失, 据统计, 地球上每年大约发生 500 万次地震, 其中有感地震 (里氏 2~4 级) 大约有 15 万次, 造成严重破坏的地震 (里氏 5 级) 近 20 万次, 毁灭性地震 2 次。20 世纪全世界发生过 20 多万次 7 级以上的大地震, 死亡 100 多万人, 我国占有其中的 3 次, 死亡 44 万人。我国是一个多地震国家, 历史上在邢台、唐山、通海、昭通、甘孜、海城、海原、华县等地区都发生过比较严重的地震。四川汶川发生的 8.1 级地震造成的生命和财产损失是有目共睹的, 同时, 四川汶川地震造成交通全部瘫痪。为了尽量减少地震时对

人类带来的损失, 一个重要的方面就是进行工程抗震。尽管对建筑、桥梁、地下结构的抗震性能的有一定的研究, 但对于支挡结构的抗震性能的研究还很少^[1-5]。为了保证交通的畅通, 对路基及其支挡结构进行抗震试验, 研究路基及其支挡结构的抗震性能, 为指导路基及支挡结构进行抗震设计具有重要的理论意义和实际意义。本试验以潭衡西线高速公路及武广客运专线新型支挡结构为工程背景, 进行加筋格宾新型支挡结构的抗震性能试验研究。

基金项目: 湖南省交通厅科技项目 (200612)

收稿日期: 2008 - 08 - 19

1 加筋格宾挡土墙模型试验简介

试验在中南大学高速铁路建造技术国家工程实验室的电液伺服加载系统上进行。最大负载50 t, 最大加速度1.0g($1g=9.8\text{ m/s}^2$), 最大速度为0.4 m/s, 最大位移为 $\pm 250\text{ mm}$ 。

模型试验结果的可靠性取决于试验模型是否真实地再现原型结构体系的实际工作状态。由于土体材料的物理力学性质十分复杂, 在应变水平较低时就开始出现非线性, 并且其性质随土体的组分、应力状态、荷载水平和加载频率、历时和历史等的不同而变化, 很难找到一种能全面考虑这些特性和影响因素的模拟材料, 因此, 试验采用工程现场所用的红砂岩为模型材料, 以模型长度、质量密度和加速度为控制量, 按 Buckingham π 定理导出了各物理量之间的相似关系。模型主要相似常数见表 1。

表 1 模型主要相似常数

Table 1 Primary similitude coefficients of model			
物理量	相似关系	相似常数	备注
长度 L	C_l	2.500	控制量
密度 ρ	C_ρ	1.000	控制量
加速度 a	C_a	1.000	控制量
速度 v	$C_v = C_\rho^{1/4} C_l^{3/4}$	1.988	
位移 u	$C_u = C_\rho^{1/2} C_l^{3/2}$	3.953	
黏聚力 c	$C_c = C_\rho C_l$	2.500	
内摩擦角 φ	$C_\varphi = 1$	1.000	
时间 t	$C_t = C_\rho^{1/4} C_l^{3/4}$	1.988	
频率 ω	$C_\omega = C_\rho^{-1/4} C_l^{-3/4}$	0.503	

试验所用模型箱长 3.0 m, 宽 0.85 m, 高 2.0 m, 如图 1 所示。它是由钢板、角钢、槽钢等焊接而成的框架, 底面、一个侧面、一个端面用钢板固定在角钢上, 另一个侧面用钢化有机玻璃固定在角钢上, 一个端面用于制作新型挡墙墙面, 顶面用于在墙顶施加竖向荷载, 在模型箱端部的靠近底板水平位置制作成与 MTS 作动器连接的连接件, 用美国 MTS 公司生产的伺服作动器给加筋格宾挡土墙施加水平地震荷载^[6-7]。

在模型箱内模拟工程实际情况, 按比例尺寸分五层填筑每层高度为 0.4 m 的加筋格宾挡墙。

在进行动力特性参数测量时, 在第一层、第三层、第五层墙顶面板上分别布置两个加速度、位移 941B 型拾震器 (一个水平、一个竖向), 用 DASP 数据采集系统进行数据的自动采集。为测得动应力的分布情况, 在加筋挡墙中共埋设动土压力盒, 在墙面安排了

百分表, 用于测试其累计变形与沉降值。



图 1 模型箱及模型挡墙

Fig. 1 Model box and model retaining wall

加筋格宾挡墙结构及元器件布置如图 2 所示。挡墙加筋是使格宾网纵向受力。加筋格宾网是采用意大利 MACCAFERRI 公司的产品, 其镀层钢丝中钢丝直径为 2.7 mm, 格宾网网孔型号为 80 mm $\times$ 100 mm。加筋格宾挡墙的格宾笼组合成型构件如图 3 所示。格宾网筋材试验结果如表 2 所示。

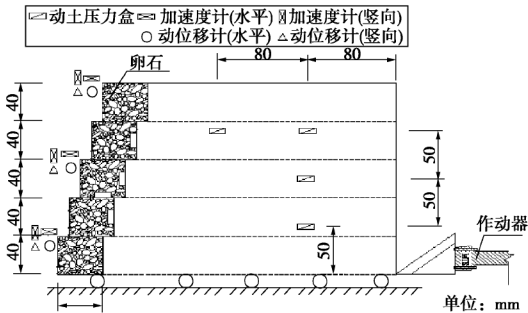


图 2 加筋格宾挡土墙及元器件布置图

Fig. 2 Layout of model retaining wall and instruments

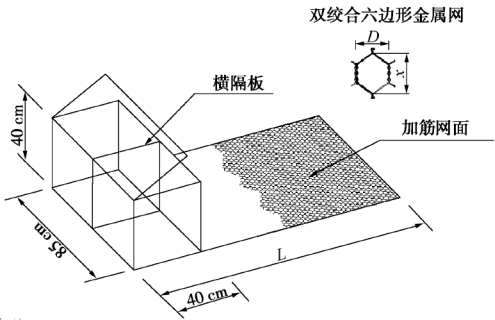


图 3 加筋格宾笼组合成型构件

Fig. 3 Reinforced gabion combination component

表 2 格宾网筋材试验结果

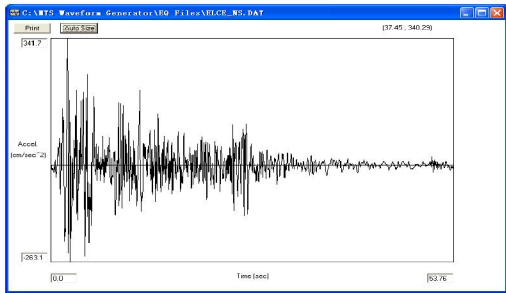
Table 2 Test results of wire mesh

筋材	2%伸长率的拉伸强度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	5%伸长率的拉伸 强度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	断裂时的拉伸 强度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	最大负荷下伸长率 /%
格宾网(2.7 mm)	16.1	21.1	49.8	22.1

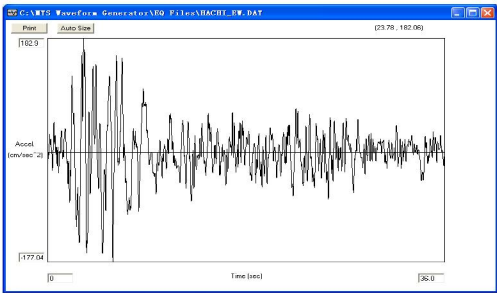
表 3 红砂岩的主要物理性能指标

Table 3 Index properties of red sandstone

填筑挡墙时 含水率/%	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	黏聚力/kPa	内摩擦角 ($^{\circ}$)	最优含 水率/%	最大干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
14.65	2.74	41.78	25.14	16.64	25	21	18.13	1.73



(a) ELCE_NS



(b) HACHI_EW

图 4 输入地震波

Fig. 4 Input earthquake waves

加筋格宾挡墙的面墙用 100~200 mm 的坚硬石头充填。

填料采用潭衡西线高速公路十二标现场所用的红砂岩,其主要物理力学性能如表 3 所示。填筑时保证红砂岩填筑时的压实率达到 95% 以上。

2 试验设备及方法

加筋格宾挡土墙模型试验采用美国 MTS 公司生产的 500 kN 伺服激振器模拟地震荷载,试验时对模型箱底板面施加水平地震波激振力。输入地震波采用 ELCETRO 波(ELCE, 1940 年, NS 向)和 HACHINOHE 波(HACHI, 1968 年, EW 向),峰值分别为 0.342g 和 0.183g,见图 4。地震时地面水平运动加速度一般要比竖向地面运动加速度大,而结构物通常抵抗竖向荷载的能力比抵抗侧向变形的能力要强,因此,很多情况下,主要是考虑水平地震作用的影响。为探讨水平地震荷载对加筋土挡墙动力响应的影响,本试验进行了不同峰值的水平地震激励(ELCE_NS 地震波分别为 0.17g, 0.34g, 0.51g, 0.68g, HACHI_EW 地震波分别为 0.09g, 0.18g, 0.27g, 0.36g)。

参考依据为中华人民共和国国家标准建筑抗震设计规范(GB 50011—2001)。

3 水平抗震试验结果及分析

加筋格宾挡墙在不同峰值的水平地震激励下的第一层、第三层、第五层墙顶面处的水平加速度、竖向加速度、水平动位移、竖向动位移峰值响应,加速度和位移响应峰值如表 4、表 5 所示,动应力响应峰值如表 6、表 7 所示,沿墙高加速度放大倍数如图 5,图 6 所示,沿墙高方向动应力响应峰值如图 7 所示。由此可得如下结论^[8-11]:

(1) 加筋格宾挡土墙具有很好的抗震性能,在大于 0.6g 地震激励下,加筋土挡土墙并没有出现明显的破坏。

(2) 由图 5 可知,加筋格宾挡土墙内对输入加速度有明显的放大效应。沿墙高方向水平加速度放大倍数的增量坡度比较平缓,随着墙高的增大,水平加速度有增大的趋势。各质点对 ELCE_NS 地震波的放大倍数为 1~1.88 倍,对 HACHI_EW 地震波的放大倍数为 1~2.78 倍。由此可见,在不同地震波作用下,加速度响应有着明显的差异,其原因在于各种地震波的频谱特性存在较大的差异。

(3) 从图 6 也可以看出,墙面板的水平加速度放大倍数随振幅增大呈现明显的递减趋势,变化基本上为线性的。一个理想的具有线弹性和线性阻尼的系统不管其输入的加速度是多少,其放大曲线都是一致的。

这种现象可能与土的剪应变增大, 刚度降低和阻尼增大有关。随着输入地震动强度的增加, 土体表现出明显的非线性特性, 土层的滤波作用逐渐增强, 这样使得加速度峰值有递减趋势。

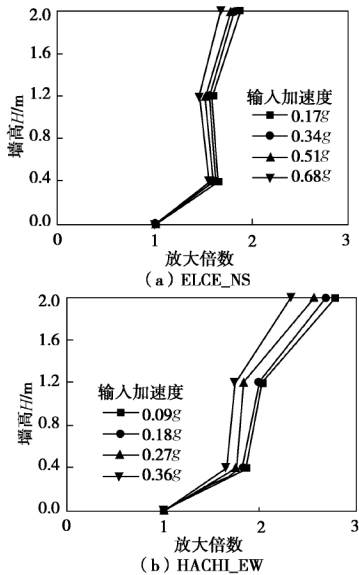


图 5 在不同水平向地震激励下水平加速度沿墙高的放大倍数
Fig. 5 Magnification of horizontal acceleration with wall height under different levels of horizontal earthquake incentives

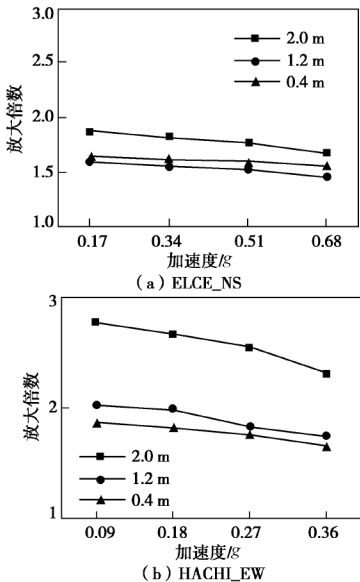


图 6 沿墙高方向水平加速度放大倍数
Fig. 6 Magnification of horizontal acceleration with wall height

(4) 在水平地震激励下, 对竖向位移特性影响不大, 竖向位移沿墙高慢慢变小, 墙底最大; 水平位移随输入加速度的增加而增加, 但增量坡度变得平缓; 竖向加速度随输入加速度的增加而增加。

(5) 由表 4、表 5 中的竖向加速度峰值响应得知, 当输入水平加速度为 ELCE_NS 地震波时, 其竖向加速度峰值可达到台面输入水平加速度的 47%~53%; 当输入水平加速度为 HACHI_EW 地震波时, 其竖向加速度峰值可达到台面输入水平加速度的 44%~56%。

表 4 加速度和位移响应峰值 (ELCE_NS)

Table 4 Peaks of acceleration and displacement response (ELCE_NS)					
输入地震波峰值/ g	测试点墙高位置/ m	水平加速 度响应 峰值/g	水平位移 响应峰 值/mm	竖向加速 度响应 峰值/g	竖向位移 响应峰 值/mm
0.17	2.0	0.32	43.52	0.08	1.30
	1.2	0.27	44.32	0.07	2.43
	0.4	0.28	44.25	0.07	3.87
0.34	2.0	0.62	82.67	0.16	3.90
	1.2	0.53	84.36	0.15	4.02
	0.4	0.55	88.57	0.16	6.65
0.51	2.0	0.91	108.64	0.27	4.12
	1.2	0.78	106.85	0.26	4.04
	0.4	0.82	108.32	0.26	7.45
0.68	2.0	1.14	106.45	0.36	4.15
	1.2	0.99	105.65	0.35	5.26
	0.4	1.06	118.69	0.35	7.86

表 5 加速度和位移响应峰值 (HACHI_EW)

Table 5 Peaks of acceleration and displacement response (HACHI_EW)					
输入地震波峰值/ g	测试点墙高位置/ m	水平加速 度响应 峰值/g	水平位移 响应峰 值/mm	竖向加速 度响应 峰值/g	竖向位移 响应峰 值/mm
0.09	2.0	0.25	45.58	0.04	1.39
	1.2	0.18	44.37	0.05	1.42
	0.4	0.17	47.25	0.04	4.08
0.18	2.0	0.48	90.67	0.10	2.52
	1.2	0.36	84.36	0.10	2.45
	0.4	0.33	87.55	0.09	6.48
0.27	2.0	0.69	101.64	0.15	2.86
	1.2	0.49	105.81	0.14	3.56
	0.4	0.47	106.22	0.14	6.54
0.36	2.0	0.84	110.42	0.20	2.84
	1.2	0.63	108.66	0.18	2.73
	0.4	0.59	120.55	0.19	6.89

(6) 由表 6~7 及图 7 可知, 动应力响应峰值随着输入加速度的增加而增加, 且增量坡度变得越来越陡; 墙高 $H/2$ 以下动应力沿墙高方向变化不大, 在

$H/2$ 处动应力最小; 随着墙高的增大, 动应力也随之增加, 在 $3H/4$ 处达到最大。此表说明水平地震波对柔性网面土工格栅加筋挡土墙所造成最大损伤在离墙顶 $H/2$ 以内。

表 6 动应力响应峰值 (ELCE_NS)

Table 6 Peaks of dynamic stress response (ELCE_NS)	
动土压力盒	动应力响应峰值/kPa
墙高位置/m	0.17g 0.34g 0.51g 0.68g
1.5	78.6 120.1 189.3 374.5
1.0	32.4 63.2 145.6 146.8
0.5	36.8 82.7 218.8 192.5

表 7 动应力响应峰值 (HACHI_EW)

Table 7 Peaks of dynamic stress response (HACHI_EW)	
动土压力盒	动应力响应峰值/kPa
墙高位置/m	0.09g 0.18g 0.27g 0.36g
1.5	66.5 99.2 286.3 370.5
1.0	67.7 90.4 172.5 212.8
0.5	66.8 98.7 288.6 240.6

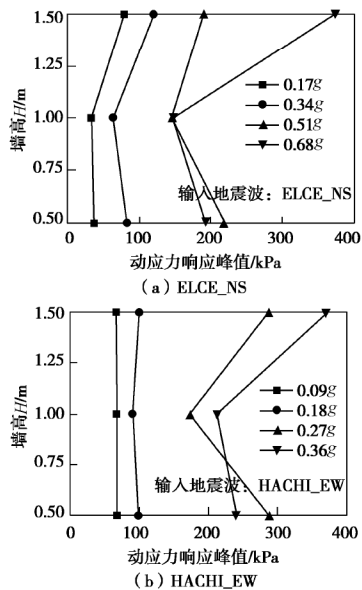


图 7 沿墙高方向动应力响应峰值

Fig. 7 Peaks of dynamic stress response with wall height

对试验结果及新型加筋格宾支挡结构进一步分析讨论如下:

加筋格宾结构为优良的抗震结构。由于加筋格宾结构为柔性结构, 当遭遇强烈地震时, 结构能够发生弹塑性变形, 具备较好的抗震能力, 良好的变形能力和消耗地震能量的能力, 不容易发生倒塌等工程事故, 结构具有良好的抗震性能。

加筋格宾结构有优良的构造措施。格宾挡墙的格

宾箱本身及格宾箱与网面之间, 层与层之间的网面, 具备的可靠抗震构造措施, 满足抗震设防的要求。

加筋格宾挡土墙为结构隔震体系。隔震体系具备的四个基本特征: ①载特性: 隔震体系应具有较大的竖向承载能力, 在结构物正常使用状态下或地震时, 安全地支承着上部结构的所有重量和使用荷载, 并具备较大的竖向承载力安全系数。②震特性: 隔震体系应具有可变的水平刚度, 在强风和微小地震时具备足够的水平刚度不影响使用要求。在中、强地震时其水平刚度较小, 上部结构水平滑动, 使结构体系变为柔性的隔震体系, 其结构基本周期大大延长。远离上部结构的自振周期, 也远离地面场地的特征周期, 从而把地面震动有效地隔开, 明显地降低上部结构的地震反应。③位功能: 隔震体系具有水平弹性恢复力, 使隔震结构体系在地震中具有瞬时自动复位功能, 地震后上部结构回复至初始状态, 满足正常使用要求。④尼消能特性: 隔震体系应具有足够的阻尼, 即隔震体系的水平荷载与水平位移关系曲线的包围面积较大, 具有较大的消能能力。加筋格宾结构基本具备以上四个隔震基本特征, 所以为隔震结构体系。

加筋格宾结构能承受地震烈度为 8 度的地震荷载。试验证明, 当施加地震烈度为 8 度的水平加速度 ($0.2g \times 3 = 0.6g$) 时^[12], 加筋格宾结构没有发生倒塌、滑动、鼓肚等损坏现象。

4 结 论

(1) 加筋格宾结构为优良的抗震结构, 能承受地震烈度为 8 度的地震荷载。

(2) 加筋格宾挡土墙内对输入加速度有明显的放大效应。沿墙高方向水平加速度放大倍数的增量坡度比较平缓, 随着墙高的增大, 水平加速度有增大的趋势。

(3) 在不同类型地震波作用下, 加筋格宾挡墙墙面板的加速度响应有着明显的差异。

(4) 墙面板的水平加速度放大倍数随振幅增大呈现明显的递减趋势。

(5) 输入水平地震波时, 加筋格宾挡墙的竖向加速度峰值可达到台面输入水平加速度的 50% 左右。

需要指出的是, 本文采用 1:2.5 比尺的缩尺试验, 由此将引起试验相似误差。当模型变形较小时, 相似误差是可以忽略的, 临近破坏时, 试验反映的定性规律也是适用的。此外, 加筋格宾挡土墙在地震作用下的动力响应是一个十分复杂的问题, 其动力响应特征和变化规律还需要进一步的研究。尽管如此, 本文的试验为验证理论与数值分析的研究成果、改进或提出

合理的计算模型和分析方法提供了丰富的试验数据。试验结果有助于揭示挡墙在地震作用下的失稳机制, 为加筋格宾挡土墙的抗震设计提供了有益的参考。

参考文献:

- [1] 程火焰, 周亦唐, 钟国强. 加筋土挡土墙地震动力特性研究[J]. 公路交通科技, 2004, **21**(9): 16 - 20. (CHENG Huo-yan, ZHOU Yi-tang, ZHONG Guo-qiang. Study on the seismic properties of the reinforced soil retaining wall[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, **21**(9): 16 - 20. (in Chinese))
- [2] 刘华北. 水平与竖向地震作用下土工格栅加筋土挡墙动力分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(5): 594 - 599. (LIU Hua-bei. Analysis on seismic behavior of geogrid-reinforced retaining wall subjected to horizontal and vertical excitations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(5): 594 - 599. (in Chinese))
- [3] 刘华北. 地震作用下模块式面板土工合成材料加筋土挡墙的内部稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(2): 278 - 283. (LIU Hua-bei. Internal stability analysis of segmental geosynthetic-reinforced soil retaining walls subjected to seismic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(2): 278 - 283. (in Chinese))
- [4] 杨有海. 地震作用下加筋土挡墙稳定性分析[J]. 兰州铁道学院学报(自然科学版), 2002, **21**(4): 9 - 11. (YANG You-hai. Stability analysis on the reinforced earth retaining wall under earthquake loadings[J]. Journal of Lanzhou Railway University (Natural Sciences), 2002, **21**(4): 9 - 11. (in Chinese))
- [5] 甘亚南, 李庆华, 王冬梅. 双面加筋挡土墙结构在高烈度地震区应用的研究[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2004, **23**(4): 310 - 314. (GAN Ya-nan, LI Qing-hua, WANG Dong-mei. Application of double-sided ribbed earthen screen wall in earthquake zone of high earthquake intensity[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science), 2004, **23**(4): 310 - 314. (in Chinese))
- [6] 杨果林, 李海深, 王永和. 加筋土挡墙动力特性模型试验与动力分析[J]. 土木工程学报, 2003, **36**(6): 105 - 110. (YANG Guo-lin, LI Hai-shen, WANG Yong-he. Model test on reinforced earth retaining wall under cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, **36**(6): 105 - 110. (in Chinese))
- [7] 李海深, 杨果林, 邹银生. 加筋土挡墙动力特性分析[J]. 中国公路学报, 2004, **17**(2): 28 - 32. (LI Hai-shen, YANG Guo-lin, ZOU Yin-sheng. Analysis of dynamic character of reinforced earth retaining wall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, **17**(2): 28 - 32. (in Chinese))
- [8] LING H I, LIU H, MOHRI Y. Parametric studies on the behavior of reinforced soil retaining walls under earthquake loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2005, **131**(10): 1056 - 1065.
- [9] LING H I, MOHRI Y, LESHCHINSKY D, et al. Large-scale shaking table tests on modular-block reinforced-soil retaining walls[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2005, **131**(4): 465 - 476.
- [10] LIU H, LING H I. A unified elastoplastic-viscoplastic bounding surface model of geosynthetics and its applications to GRS-RW analysis[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2007, **133**(7): 801 - 815.
- [11] LING H I, LIU Hua-bei, KALIAKIN V N. Analyzing dynamic behavior of geosynthetic-reinforced soil retaining walls[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2004, **130**(8): 911 - 920.
- [12] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese))