

# 复合格宾土工格栅加筋土挡墙模型振动台试验

蔡晓光<sup>1,2,3</sup>, 王学鹏<sup>1</sup>, 李思汉<sup>1,2,3</sup>, 黄鑫<sup>1,2,3,4</sup>, 路彤<sup>5</sup>, 徐洪路<sup>4</sup>

(1. 防灾科技学院地质工程学院, 河北 三河 065201; 2. 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室, 河北 三河 065201; 3. 中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室, 河北 三河 065201; 4. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 5. 河北省地震局唐山地震监测中心站, 河北 唐山 063000)

**摘要:**复合格宾土工格栅加筋土挡墙已被广泛应用于公路、铁路工程。为探究复合格宾土工格栅加筋土挡墙的动力响应,开展了复合格宾土工格栅加筋土挡墙振动台模型试验,研究在地震荷载作用下挡墙的加速度放大系数、竖向沉降、水平位移等动力特性。试验结果表明:当地震动峰值加速度为 0.8g 时,挡墙处于整体稳定状态;加速度在墙后填土中沿墙高呈现非线性增大的趋势,与《公路工程抗震设计规范》中规定的趋势一致;顶部竖向沉降最大值为 3.48 mm,沉降墙高比为 0.174%,远小于美国 AASHTO 规范的 2% 限值;随着输入地震动时程峰值的增大,挡墙水平位移沿墙高逐渐增加,墙体变形模式由转动为主过渡到平移、转动耦合,地震永久位移达到了墙高的 1.06%。

**关键词:**复合格宾土工格栅加筋土挡墙; 振动台试验; 加速度放大系数; 竖向沉降; 水平位移

**中图分类号:** U417.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)03-0767-09

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.03.019

## 引言

复合格宾土工格栅加筋土挡墙采用格宾网箱作为墙面板,格宾网和土工格栅作为加筋材料,标准砂作为回填料,因其具备施工简单、碳排放量低、造价经济等优点,被广泛应用于公路、铁路、机场、城市交通等领域中。国内外一些学者对加筋格宾挡墙进行了一些研究,Ghionna 等<sup>[1]</sup>通过对两种不同型号的复合格宾土工格栅加筋土挡墙进行足尺试验,修建了 3.6 m 墙高的包裹式加筋土挡墙,对挡墙施加荷载直至破坏。李昀等<sup>[2]</sup>依托湘潭-衡阳高速公路加筋格宾挡墙实例,通过大型模型试验表明:加筋格宾挡墙具有良好的抗震性能,对输入的加速度具有明显的放大效应且水平位移随输入地震动增加而增大,但增速逐渐减小。林宇亮等<sup>[3]</sup>通过对柔性网面土工格栅加筋土挡墙施加循环荷载,研究挡墙的工作机理,得到面板水平位移、土压力等响应特征。黄向京等<sup>[4]</sup>通过双绞合六边形金属网加筋格宾挡墙振动台试验研究表明:新型加筋土结构具有良好的抗震性能,在地震作用力下呈整体变形特性。林宇亮等<sup>[5]</sup>通过绿色加筋格宾挡墙工程特性试验研究表明:挡墙面板变形在地震动的输入过程中出现弹塑性,且

沉降变形大于最大总残余位移。2009 年福建温福铁路滑坡治理项目客运专线 DK246+182~+420 段右侧 20 m 山体边坡,使用了复合式加筋格宾土单向聚酯土工格栅加筋土结构,有效治理了滑坡问题<sup>[6]</sup>。

综上所述,目前这种新型加筋土挡墙结构在地震动作用下的动力响应仍未有明确的结论。鉴于此,设计复合格宾土工格栅加筋土挡墙,开展不同地震动和相似比下的振动台模型试验,探究模型的动力响应随输入地震动的变化规律。本文重点研究了复合格宾土工格栅加筋土挡墙在地震荷载作用下的加速度放大系数、顶部沉降、水平位移等分布规律。

## 1 试验设备

模型试验在防灾科技学院“中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室”的三向电液伺服地震模拟振动台上进行,具体参数如表 1 所示。加速度数据主要采用 16 通道的 INV3060S 型(东方所)采集仪采集,位移、竖向沉降数据由 128 通道的 DH3820 型(东华)采集仪采集。本实验所用模型箱尺寸为 300 cm×150 cm×230 cm(长×宽×高),模型箱两

收稿日期: 2021-11-06; 修订日期: 2022-04-20

基金项目: 地震科技星火项目(XH204402); 中央高校基本科研业务费专项项目(ZY20215107); 廊坊市科技支撑计划项目(2021013172)。

表1 振动台参数

Tab. 1 Shaking table parameters

技术指标	参考值
台面尺寸	300 cm × 300 cm
振动模式	正弦波, 随机波, 地震波
频率范围	0.4~80 Hz
最大位移	X: ±20 cm; Y: ±15 cm
最大速度	X: 80 cm/s; Y: 70 cm/s
最大加速度	X: 2.0g(满载); Y: 2.0g(满载)

侧由钢板和透明有机玻璃制作而成, 便于观察和记录试验现象, 如图1所示。



图1 模型箱

Fig. 1 Model box

## 2 试验模型

### 2.1 相似比设计

根据振动台的使用性能和模型箱尺寸, 为准确反映实际工程的工程特性, 按照 Buckingham  $\pi$  定理<sup>[7]</sup>对复合格宾土工格栅土挡墙模型试验进行相似设计, 采用 1:2.5 和 1:5 的相似比, 推导出模型的主要相似参数, 如表2所示。

表2 试验相似比

Tab. 2 Experiment similarity ratio

序号	变量	相似关系	相似比(原型:模型)	
			1:2.5	1:5
1	几何尺度 $L$	$C_L$	2.50	5.00
2	加速度 $A$	$C_a = 1$	1.00	1.00
3	弹性模量 $E$	$C_E = C_L$	2.50	5.00
4	持续时间 $t$	$C_T = C_L^{0.5}$	1.58	2.24
5	密度 $\rho$	$C_\rho = 1$	1	1
6	应力 $\sigma$	$C_\sigma = C_L$	2.50	5.00
7	速度 $V$	$C_v = C_L^{0.5}$	1.58	2.24
8	频率 $\omega$	$C_\omega = C_L^{-0.5}$	0.63	0.45

### 2.2 模型材料

复合格宾土工格栅加筋土挡墙的面板由格宾网

箱错缝搭接而成, 实际工程中常用的格宾笼高度一般为 0.5 或 1.0 m, 考虑振动台的承载能力和模型箱尺寸, 将复合格宾土工格栅加筋土挡墙的相似常数定义为 1:5 和 1:2.5。因此采用了 20 cm 高的格宾箱, 格宾网的网孔尺寸为 6 cm × 8 cm。为防止在施工过程中面板填料外漏, 故采用粒径为 80~150 mm 的不易风化、水解的河卵石进行填充。筋材采用了格宾网和土工格栅两种, 单数层每层布设格宾网, 偶数层(F2, F4, F6, F8 和 F10)采用格宾网和土工格栅复合体。根据试验相似比设计, 对加筋材料进行相似处理。由于格宾网绞合而成, 无法剔除网丝来满足相似比, 故采用市场上提供的直径最小为 2.0 mm 的格宾网, 如图2所示。对土工格栅进行了剃肋处理, 剔除 2/3 数量的肋来满足试验要求, 如图3(a)所示。材料拉伸试验结果如表3所示。墙后填土采用标准砂,  $d_{30}=0.29$  mm,  $d_{60}=0.37$  mm,  $C_u=2.01$ ,  $C_c=1.26$ ,  $G_s=2.86$ , 为级配不良中砂。通过相对密度试验得最大干密度  $\rho_{\max}=1.99$ , 最小干密度  $\rho_{\min}=1.52$ , 颗粒分布曲线如图4所示。

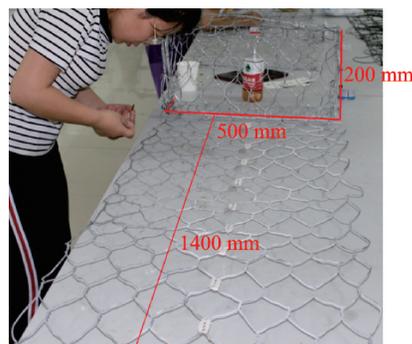
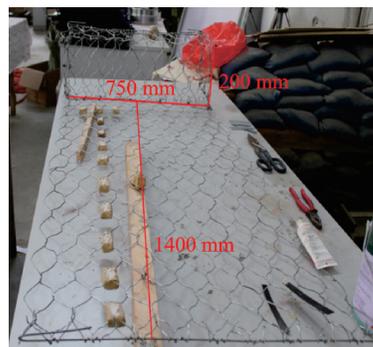
(a) 500 mm 格宾网箱  
(a) Gabion meshbox of 500 mm(b) 750 mm 格宾网箱  
(b) Gabion meshbox of 750 mm

图2 格宾网箱

Fig. 2 Gabion meshbox

### 2.3 监测方案

在进行动力反应参数测量时, 在挡墙墙后填土加筋区中间位置和墙顶处共安装 12 个加速度计, 面板每 20 cm 处和顶部靠近面板处每 30 cm 位置共安

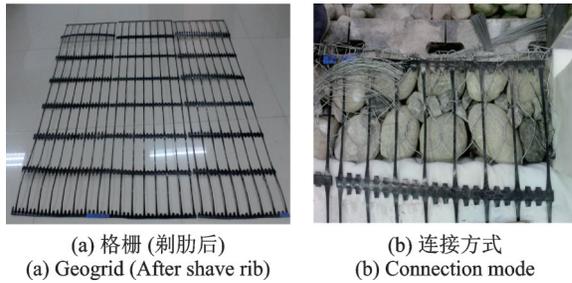


图 3 土工格栅试验图  
Fig. 3 Test graph of geogrid

表 3 材料拉伸试验结果

**Tab. 3 Test results of material tensile**

类型	拉伸强度/(kN·m <sup>-1</sup> )			弹性模量/ MPa
	2% 伸长率	5% 伸长率	极限 状态下	
格宾网	15.4	19.1	28.1	140
土工格栅	18.2	36.7	57.9	20

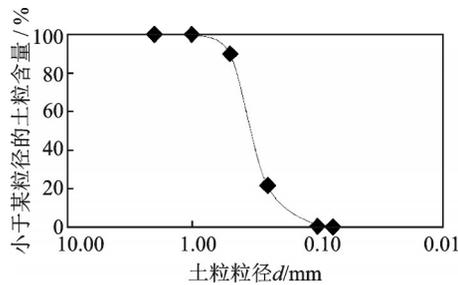


图 4 粒度分布曲线

Fig. 4 Distribution curve of particle size

装 14 个顶杆位移计,用来测量墙体变形和加速度特性。试验模型传感器布置如图 5 所示。

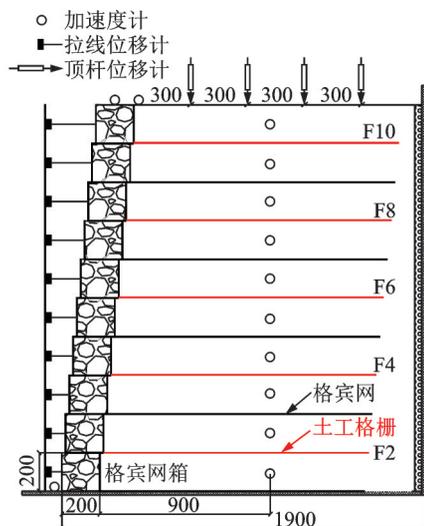


图 5 传感器布置图(单位:mm)

Fig. 5 Arrangement diagram of sensors (Unit:mm)

### 2.4 模型制作

试验模型面板由格宾网箱错缝搭接而成,网箱采用河卵石填充而成,填充孔隙率不大于 30%。为了减少试验时模型箱侧壁对输入地震波的反射,在

模型箱振动方向的后壁处贴厚度为 80 mm 的海绵。填筑墙后填土时,为保证回填土填筑相对密实度达到 70%,每填筑 10 cm 用振动器夯实一次。每层土挡墙填 20 cm 土层,为了更好地观察挡墙内竖向沉降,在上部铺 0.5 cm 蓝砂作为标记。每偶数层格宾网箱搭建完成后,根据格宾网箱的大小对应平铺土工格栅,格栅前端通过节点连接(绑扎),加筋末端采用无节点连接,如图 3(b)所示。模型搭建完成,如图 6 所示。



图 6 模型试验图(搭建完成)

Fig. 6 Test graph of model (construction completed)

### 2.5 测试工况

为了进一步探究复合格宾土工格栅加筋土挡墙的抗震性能,本次振动台试验采用 2008 年汶川地震卧龙波(WL)和 1940 年美国帝王谷地震 El-Centro 波(EI),在测试过程中经过处理和归一化后输入,为了解加筋土结构在地震作用下的动力特性,进一步明确加筋土结构的状态,并在每组地震动结束后输入白噪声(WN)进行扫频,按顺序输入地震动进行试验,试验工况如表 4 所示。

表 4 加载工况

**Tab. 4 Loading working conditions**

序号	输入波形	PGA/g	相似比	输入地震动
1,2	WL,EI	0.1	5	WL 0.1g,EI 0.1g
3,4	WL,EI	0.1	2.5	WL 0.1g,EI 0.1g
5,6	WL,EI	0.2	5	WL 0.2g,EI 0.2g
7,8	WL,EI	0.2	2.5	WL 0.2g,EI 0.2g
9,10	WL,EI	0.4	5	WL 0.4g,EI 0.4g
11,12	WL,EI	0.4	2.5	WL 0.4g,EI 0.4g
13,14	WL,EI	0.6	5	WL 0.6g,EI 0.6g
15,16	WL,EI	0.6	2.5	WL 0.6g,EI 0.6g
17,18	WL,EI	0.8	5	WL 0.8g,EI 0.8g
19,20	WL,EI	0.8	2.5	WL 0.8g,EI 0.8g

### 3 振动台试验现象及分析

#### 3.1 震害现象

图7为试验时墙后填土的竖向沉降变化。可以看出,竖向沉降总体呈现靠近面板临空面处的沉降比模型中间位置的沉降大,相比格宾墙面,墙面后的加筋土发生整体下沉。如图8所示,输入地震动时程峰值为 $0.8g$ 时,挡墙面板只是有零星石块掉落,整体处于稳定状态,体现了复合格宾土工加筋土挡墙优良的抗震性能。

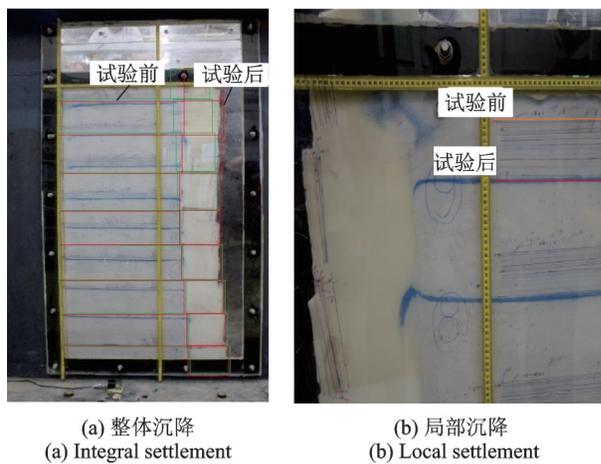


图7 竖向沉降  
Fig. 7 Vertical settlement



图8 墙面碎石掉落  
Fig. 8 Gravel falling down from wall surface

#### 3.2 加速度响应

图9为输入WL 0.8g 1:2.5地震动时,挡墙顶部加速度计监测的加速度时程曲线图。通过在不同高度采集的峰值加速度和振动台台面输出的峰值加速度的比值来确定加速度放大系数。均方根(Root Mean Square, RMS)加速度通过描述整个地震周期

间由地震产生的能量,能更好地反映整个地震过程的特性。RMS计算方法如下式所示:

$$\text{RMS} = \left[ \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} a^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中  $a(t)$  为加速度时程;  $t_d$  为持时。

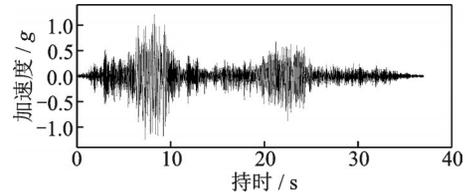


图9 加速度时程  
Fig. 9 Time histories of acceleration

对加速度放大系数的取值,国内规范《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)<sup>[8]</sup>中规定挡墙高度小于12 m时,系数为1;《公路工程抗震设计规范》(JTG B02—2013)<sup>[9]</sup>中加速度放大系数 $\psi_i$ 沿墙高呈现折线型,如下式所示:

$$\psi_i = \begin{cases} \frac{1}{3} \frac{h_i}{H} + 1.0, & 0 \leq h_i \leq 0.6H \\ \frac{3}{2} \frac{h_i}{H} + 0.3, & 0.6H \leq h_i \leq H \end{cases} \quad (2)$$

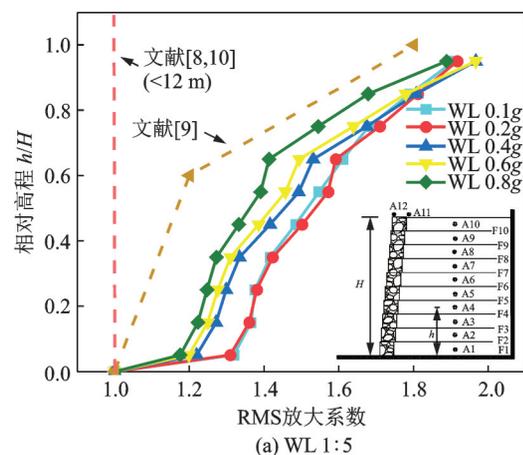
式中  $h_i$  为土挡墙墙趾至第  $i$  截面的高度;  $H$  为挡墙高度。

而国外规范<sup>[10]</sup>中规定加速度放大系数 $\alpha$ 如下式所示:

$$\alpha = 1 + 0.01H \left( 0.5 \frac{F_v S_1}{k_{\max}} \right)^{-1} \quad (3)$$

式中  $F_v$  为场地因子;  $S_1$  为周期为1 s的谱加速度;  $k_{\max}$  为最大加速度;当墙高小于6.1 m时,加速度放大系数约为1。

加速度放大系数沿墙高( $H$ )分布如图10所示,挡墙模型在各工况下内部加速度分布不均匀,且墙越高,加速度放大效应越明显,整体放大系数在1.54~



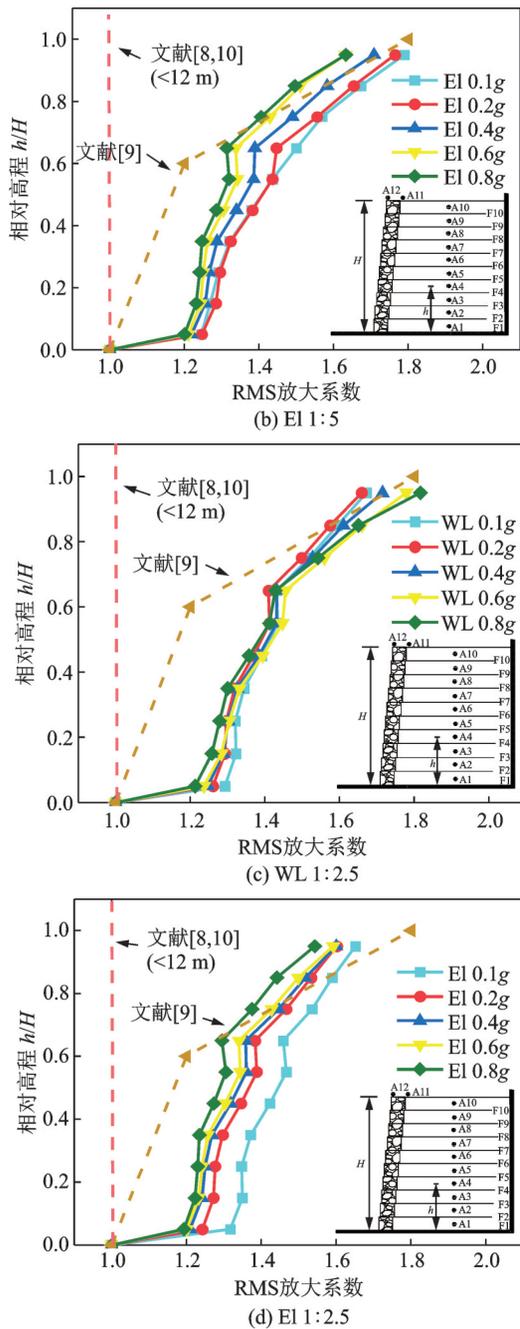


图 10 加速度放大系数

Fig. 10 Amplification factor of acceleration

1.97 之间,各位置均大于文献[8,10]规定的放大系数 1。通过对比图 10(c)和(d)发现,在输入不同地震波时,加速度放大效应不同,这是由于不同地震动的频谱特性不同;对比图 10(a)和(c)发现,不同相似比作用下,挡墙的加速度放大效应差异较大,这是因为在输入地震之前进行了相似处理,导致输入地震波的持时不同。土体对地震动的放大作用总体上呈现随地震动强度增加而减小的趋势,反映了土体非线性对地震动的影响特征与 Li 等<sup>[11]</sup>的试验结果一致,原因是随着地震动强度增加,受土体非线性特性的影响,土体阻尼比增大,导致加速度放大效应减弱。

如图 10 所示,挡墙模型内部加速度放大系数规律与文献[9]中的放大系数相比,整体趋势相近。在

WL 1:5 时,试验各位置放大系数均大于规范值;在 WL 1:2.5 时,中下部位置 ( $<0.8H$ ) 的试验值大于规范值,顶部 ( $>0.8H$ ) 试验值在规范值附近;在 EI 1:5 和 EI 1:2.5 时,下部位置 ( $<0.65H$ ) 的试验值大于规范值,而上部 ( $>0.65H$ ) 试验值小于规范值。

### 3.3 竖向沉降分析

图 11 为 WL 0.8g 1:2.5 地震动作用下顶部位移计实测竖向沉降时程曲线。在输入 0.1g 时,通过顶杆位移计记录的沉降量变化不大;输入 0.2g 时,各位置处沉降迅速增加,如图 12 所示。以相似比为 1:5 时 EI 波各工况为例,各位置处沉降的增幅如表 5 所示。如图 12 所示为竖向沉降规律,可以看出:加筋区 30 和 120 cm 处的沉降值大于中心位置 (60 和 90 cm 处),其原因是面板和回填土向临空面移动导致靠近面板的填土疏松,使其靠近面板处的沉降偏大。而 120 cm 处是因为靠近非加筋区,非加筋区侧壁是海绵,在振动情况下发生挤压,导致土体向非加筋区迁移,靠近非加筋区处沉降较大,与 Cai 等<sup>[12]</sup>的研究结果一致。

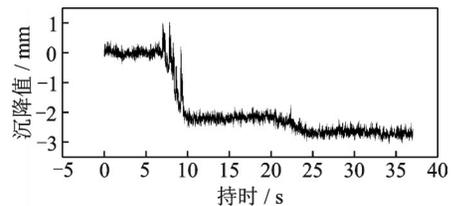
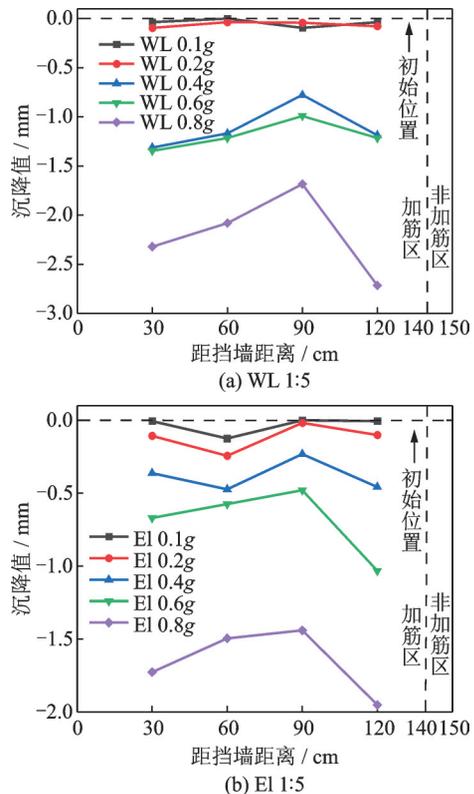


图 11 竖向沉降时程

Fig. 11 Time history of vertical settlement



(b) EI 1:5

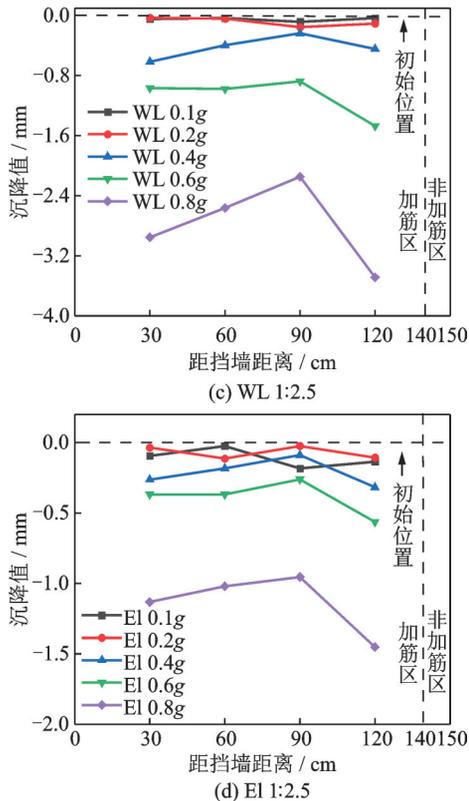


图12 竖向沉降规律

Fig. 12 Pattern of vertical settlement

表5 不同位置处的沉降增幅

Tab. 5 Increasing amplitude of settlement at different locations

峰值加速度范围	沉降增幅/%			
	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm
0.2g~0.4g	238.32	95.06	1183.35	352.47
0.4g~0.6g	85.08	20.31	107.79	125.82
0.6g~0.8g	157.61	160	200.21	89.05

现阶段各类型挡墙顶部的沉降容许值如表6所示。通过不均匀沉降值  $\Delta x/H$  (沉降值/墙高) 来判断沉降大小,本次试验复合格宾土工格栅土挡墙在试验工况结束之后,挡墙顶部沉降最大值为 3.48 mm,占墙高的 0.174%,远小于 AASHTO<sup>[13]</sup> 规范建议的 2% 墙高,体现了加筋土挡墙良好的沉降抑制作用。

表6 沉降容许值

Tab. 6 Admissible values of settlement

规范	墙面形式	沉降限值	$\Delta x/H$ (不均匀沉降)	适用领域
AASHTO <sup>[13]</sup>	整体现浇式	52 mm	0.2%	公路
	预制模块式	-	0.5%	
	格宾式	-	2%	
BS8006 <sup>[14]</sup>	预制模块式	-	0.67%	全部领域
	半椭圆形面板	-	-	
FHWA <sup>[10]</sup>	预制模块式	0.5% <i>H</i>	-	桥台

3.4 水平位移分析

图13为输入 WL 0.8g 1:2.5 地震动时 F9 层拉线位移计监测到的水平位移时程图。由图13可知,振动结束后的位移并未恢复到初始位置,而是存在一定的残余位移,振动时最大位移值大于残余位移,这一现象与 Ling 等<sup>[15]</sup> 报道的试验结果一致。图14为残余位移和转角沿墙高的分布规律,转角为残余位移与墙高之比。随着输入峰值加速度的增大,地震残余位移和转角也随之增大,表明墙体变形模式在地震作用下表现为平移和转动的耦合。

为探究在地震作用下挡墙的变形模式,通过 Li

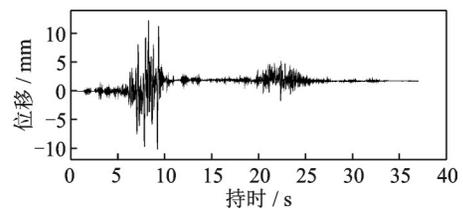
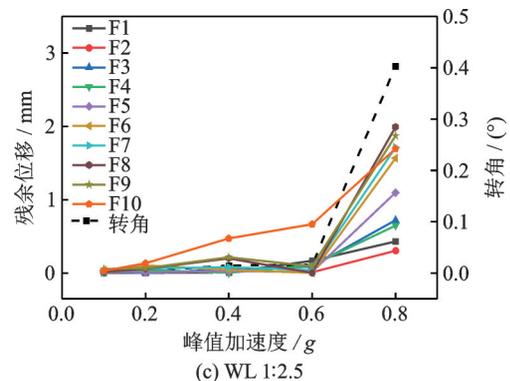
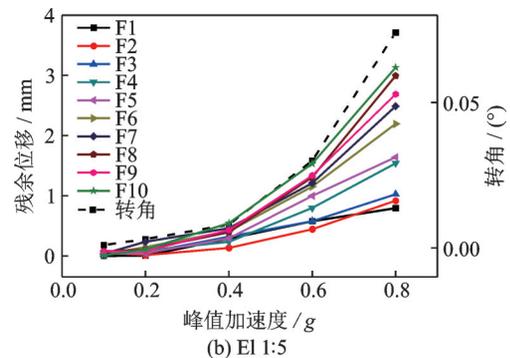
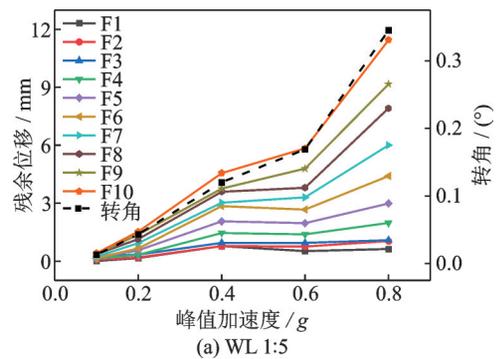


图13 水平位移时程

Fig. 13 Time history of horizontal displacement



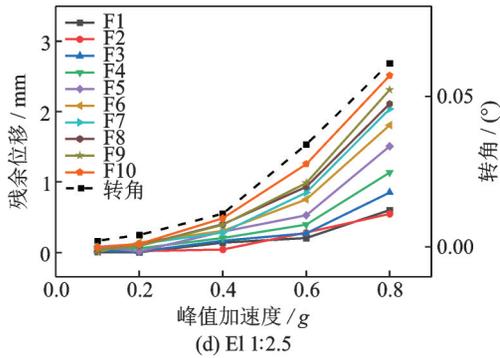


图 14 残余位移和转角沿墙高的分布

Fig. 14 The distribution of residual displacement and rotation angle along the wall height

等<sup>[16]</sup>提出的变形模式来定义挡墙的变形。将挡墙面板的底部和顶部的水平残余位移分别用 $D_B$ 和 $D_T$ 表示,如图 15 所示。分别定义 $(D_T - D_B)/D_T$ 和 $D_B/D_T$ 为挡墙位移中的转动百分比和平移百分比。图 16 比较了不同地震波和不同相似比下挡墙面板的变形模式。挡墙随着输入加速度的增大,其变形由转动为主过渡为平移、转动耦合模式。

多位学者<sup>[17-19]</sup>研究了加筋土挡墙的位移破坏标准,为挡墙灾害评价和震后修复提供了重要依据。李思汉等<sup>[19]</sup>统计了国内外各规范中不同面板类型挡

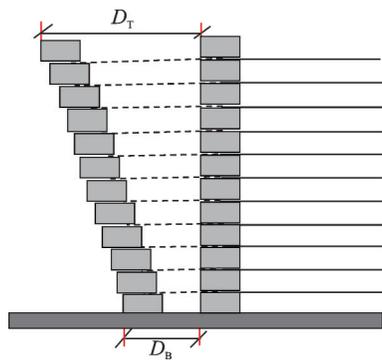
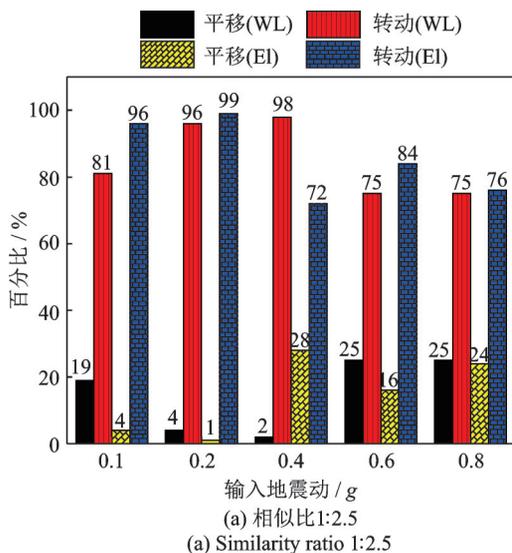


图 15 变形模式

Fig. 15 Deformation mode



(a) Similarity ratio 1:2.5

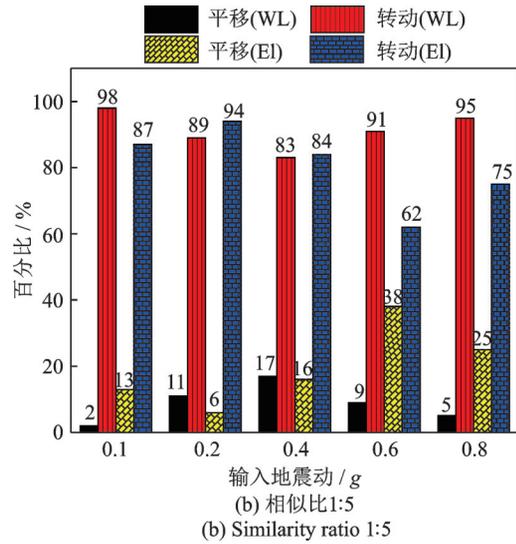


图 16 平移、转动变形占比

Fig. 16 Proportion of translation and rotation deformation

墙的位移指数(水平位移与挡墙高度的比值),如表 7 所示。墙体总残余位移取所有工况的残余位移之和,在试验结束之后挡墙的残余位移为 19.09 mm,达到墙高的 1.06%,未达到位移破坏标准,整体处于稳定状态。

表 7 挡墙水平位移<sup>[19]</sup>

Tab. 7 Horizontal displacement of RSRW<sup>[19]</sup>

规范/标准	墙面形式	最大水平位移/mm	$\Delta x/H$
NCMA	模块式面板	-	3.5%
FHWA	所有	-	0.9%~4%
AASHTO	混凝土面板	25	-
EN14475	模块式面板	50	-
	格宾墙面	100	-
	格宾墙面	-	1.3%(3 m内)
WSDOT	混凝土面板	-	0.4%(3 m内)
	包裹式(永久)	-	0.7%(3 m内)
	包裹式(暂时)	-	2.5%(3 m内)
NGG	所有	-	0.1%~0.3%
PWRC	所有	300	3%
BS8006	所有	-	0.5%
Geoguide 6	所有	-	0.5%

## 4 结论

(1)复合格宾土工格栅加筋土挡墙具有良好的抗震性能,在 0.8g 峰值加速度下挡墙的残余位移为 1.06% $H$ ,挡墙仍处于整体稳定状态。

(2)复合格宾土工格栅加筋土挡墙的加速度放大系数为 1.54~1.97,沿墙高呈非线性分布,与文献[9]趋势相近,其数值在小于 0.6H(墙高)处大于规范值。

(3)复合格宾土工格栅土挡墙在输入 0.8g 峰值加速度时沉降值最大为 3.48 mm,不均匀沉降值为 0.174%,远小于文献[13]建议的 2%,体现了加筋土挡墙良好的沉降抑制作用。

(4)随输入峰值加速度的增加,挡墙水平位移沿墙高增大,顶部位移达到最大值。挡墙变形模式由转动为主过渡为平移、转动耦合。

#### 参考文献:

- [1] Ghionna V N, Fioravante V, Vicari M. Full scale test on a retaining wall with nonuniform reinforcements[A]. 7th International Conference on Geosynthetics (7ICG) [C]. Nice, France, 2002: 279-282.
- [2] 李响, 杨果林, 林宇亮, 等. 水平地震作用下加筋格宾挡土墙动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1930-1935.  
Li Yun, YANG Guolin, LIN Yuliang, et al. Dynamic characteristics of reinforced Gabion walls subjected to horizontal seismic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1930-1935.
- [3] 林宇亮, 杨果林, 李响, 等. 加筋格宾挡墙在重复荷载作用下动变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 4027-4033.  
LIN Yuliang, YANG Guolin, LI Yun, et al. Test study on dynamic deformation behavior of reinforced Gabion retaining wall under cyclic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 4027-4033.
- [4] 黄向京, 王祥, 王维, 等. 双绞合六边形金属网加筋格宾挡墙地震动力特性试验研究[J]. 公路工程, 2009, 34(5): 5-9.  
HUANG Xiangjing, WANG Xiang, WANG Wei, et al. Analysis on seismic behavior of double twist hexagonal wire mesh terramesh reinforced retaining wall subjected to excitations[J]. Highway Engineering, 2009, 34(5): 5-9.
- [5] 林宇亮, 杨果林, 李响, 等. 绿色加筋格宾挡墙工程特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3113-3119.  
LIN Yuliang, YANG Guolin, LI Yun, et al. Test study of engineering properties of green reinforced Gabion retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3113-3119.
- [6] 路彤. 复合式格宾土工格栅加筋土挡墙动力特性振动台试验分析[D]. 三河: 防灾科技学院, 2019.  
LU Tong. Shaking table test analysis of dynamic characteristics of composite Gabion and geogrid reinforced soil retaining wall[D]. Sanhe: Institute of Disaster Prevention, 2019.
- [7] 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.
- [8] 许振中, 廖蜀樵, 倪燕平, 等. 铁路工程抗震设计规范: GB 50111—2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.  
Xu Zhenzhong, Liao Shuqiao, Ni Yanping, et al. Code for seismic design of railway engineering: GB 50111—2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [9] 鲍卫刚, 李建中, 陶夏新, 等. 公路工程抗震设计规范: JTG B02—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.  
Bao Weigang, Li Jianzhong, Tao Xiaxin, et al. Specifications of seismic design for highway engineering: JTG B02—2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [10] Berg R R, Christopher B R, Samtani N C, et al. Design of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes-volume I: FHWA-NHI-10-024—2009[S]. Washington, D.C.: Federal Highway Administration, 2009.
- [11] Li S H, Cai X G, Xu H L, et al. Dynamic behaviour of reinforced soil retaining wall under horizontal seismic loading[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 569(1): 012001.
- [12] Cai X G, Li S H, Xu H L, et al. Shaking table study on the seismic performance of geogrid reinforced soil retaining walls[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(4): 6668713.
- [13] Steudle K T, Horsley J. AASHTO LRFD bridge design specifications: LRFDUS-7—2014[S]. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014.
- [14] British standard code of practice for strengthened, reinforced soils and other fills: BS 8006—2010[S]. London: British Standards Institution, 2010.
- [15] Ling H I, Asce M, Mohri Y, et al. Large-scale shaking table tests on modular-block reinforced soil retaining walls[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(4): 465-476.
- [16] Li S H, Cai X G, Jing L P, et al. Lateral displacement control of modular-block reinforced soil retaining walls under horizontal seismic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 141: 106485.
- [17] 蔡晓光, 李思汉, 黄鑫. 双级加筋土挡墙动力特性振动台试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 200-207.  
CAI Xiaoguang, LI Sihan, HUANG Xin, Shaking table tests on dynamic characteristics of two-stage reinforced soil-retaining wall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 200-207.
- [18] 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 J J, Han P F. 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.

[19] 李思汉,蔡晓光,景立平,等.加筋土挡墙变形特性研究进展[J].世界地震工程,2019,35(4):114-124.

LI Sihan, CAI Xiaoguang, JING Liping, et al. Research progress on deformation characteristics of reinforced soil retaining wall[J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(4): 114-124.

## Shaking table test on the model of reinforced soil retaining wall with composite Gabion and geogrid

CAI Xiao-guang<sup>1,2,3</sup>, WANG Xue-peng<sup>1</sup>, LI Si-han<sup>1,2,3</sup>, HUANG Xin<sup>1,2,3,4</sup>, LU Tong<sup>5</sup>, XU Hong-lu<sup>4</sup>

(1.College of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China;

2.Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe 065201, China;

3.Key Laboratory of Building Damage Mechanism and Defense, China Earthquake Administration, Sanhe 065201, China;

4.Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

5.Tangshan Earthquake Monitoring Center Station of Hebei Earthquake Agency, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** The composite Gabion and geogrid reinforced soil retaining wall (GGRSRW) has been widely used in highway and railroad projects. Shaking table test of GGRSRW are carried out to analyse actual dynamic responses. The dynamic characteristics such as acceleration amplification factor, vertical settlement and horizontal displacement of the retaining wall under seismic load are studied. The results show that the retaining wall is in an overall stable state when the peak value of input acceleration is  $0.8g$ . The acceleration amplification factor increases nonlinearly along the wall height ranges from 1.54 to 1.97, which is similar to the trend of the specifications of seismic design for highway engineering. The maximum vertical settlement of the model is 3.48 mm. The ratio of the settlement to height is 0.174%, which is far less than the 2% limit of the American AASHTO standard. As the input ground motion increases, the horizontal displacement of the retaining wall gradually increases along the wall height. The wall deformation mode changes from rotation to translation and rotation coupling. The total residual displacement reaches 1.06% of the wall height.

**Key words:** composite Gabion and geogrid reinforced soil retaining wall; shaking table test; acceleration amplification coefficient; vertical settlement; horizontal displacement

作者简介: 蔡晓光(1979—),男,博士,教授。电话: 15003166920; E-mail: caixiaoguang123@163.com。

通讯作者: 李思汉(1992—),男,博士,讲师。电话: 18730659598; E-mail: lisihan@st.cidp.edu.cn。