

DOI: 10.11779/CJGE202002016

# 预应力返包式加筋土挡墙的动力响应分析

卢 谅<sup>1, 2, 3</sup>, 张均均<sup>2, 5</sup>, 马书文<sup>2, 4</sup>, 王宗建<sup>6</sup>, 陈志雄<sup>1, 2, 4</sup>

(1. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 3. 特殊地区公路工程教育部重点实验室(长安大学), 陕西 西安 710000; 4. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心(重庆大学), 重庆 400045;  
5. 信息产业电子第十一设计研究院科技股份有限公司, 四川 成都 610066; 6. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

**摘要:** 在地震作用下, 返包式加筋土挡墙作为一种柔性结构常因侧向变形较大或局部产生破坏而影响其正常使用。为解决该问题, 提出了预应力返包式加筋土挡墙结构。为完善预应力返包式加筋土挡墙的设计理论, 运用拟动力法和附加应力法理论, 以预应力返包式加筋土挡墙作为研究对象, 结合现有的加筋土挡墙侧向动土压力和侧向位移计算理论, 提出了一套用于计算预应力返包式加筋土挡墙侧向动土压力和侧向位移的理论公式。结合室内振动台模型试验验证了所提理论方法的可行性和合理性。该方法计算简洁, 适用性广, 能够较好地计算预应力返包式加筋土挡墙的侧向动土压力和侧向位移, 对完善预应力返包式加筋土挡墙的设计理论具有一定的指导和借鉴意义。

**关键词:** 预应力返包式加筋土挡墙; 拟动力法; 侧向动土压力; 侧向位移; 模型试验

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)02-0344-10

作者简介: 卢 谅(1978—), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程等方面的研究工作。E-mail:  
luliangsky@163.com。

## Dynamic response of prestressed wrap-reinforced earth retaining walls

LU Liang<sup>1, 2, 3</sup>, ZHANG Jun-jun<sup>2, 5</sup>, MA Shu-wen<sup>2, 4</sup>, WANG Zong-jian<sup>6</sup>, CHEN Zhi-xiong<sup>1, 2, 4</sup>

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Fundamental Research Funds for the Central Universities (Chang'an University), Xi'an 710000, China; 4. National Joint Engineering Research Center for Prevention and Control of Environmental Geological Hazards in the TGR Area (Chongqing University), Chongqing 400045, China; 5. The IT Electronics Eleventh Design & Research Institute Scientific and Technological Engineering Corporation Limited, Chengdu 610066, China; 6. College of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Under the action of earthquakes, as a flexible structure, the wrap-reinforced retaining wall structure can not be used normally because of large lateral deformation or local damage. The prestressed wrap-reinforced earth retaining wall, in which prestress is applied in geosynthetics in order that it is pilled in advance, is proposed. In order to improve the design theory of prestressed reinforced earth retaining walls, taking the pseudo-dynamic method and the additional stress method as the theoretical basis, the reinforced earth retaining wall with prestressing back-pack is investigated. Based on the existing theory of lateral dynamic earth pressure and lateral displacement of reinforced earth retaining wall, a set of theoretical formulas for calculating the lateral dynamic earth pressure and lateral displacement of prestressed wrap-reinforced earth retaining walls are proposed. The accuracy and reliability of the method are verified by shaking table model tests. The proposed method has the advantages of simple calculation, wide application, and can be used to calculate the lateral dynamic earth pressure and lateral displacement of retaining walls, and it is of a certain significance of guiding and reference for the design theory of prestressed wrap-reinforced earth retaining walls.

**Key words:** prestressed wrap-reinforced earth retaining wall; pesudo-dynamic method; lateral dynamic earth pressure; lateral displacement; model tests

## 0 引言

20世纪60年代法国工程师Henri Vidal首先提出了加筋土概念。此后, 随着大量加筋土工程的建设与

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679018, 51778092); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102219514); 重庆市基础科学与前沿技术研究专项项目(cstc2017jcyjA1410); 重庆市研究生科研创新项目(CYB19017)

收稿日期: 2019-01-08

发展, 加筋土挡土墙凭借其优良的抗震性能引起了国内外众多学者的广泛关注<sup>[1-4]</sup>, 相应的应用和理论研究逐渐深入。

在理论研究中, 计算地震作用下挡墙的侧向土压力常采用 Okabe<sup>[5]</sup>和 Mononobe<sup>[6]</sup>提出的拟静力法。此后, 国内外学者通过大量的振动台模型试验验证了拟静力法的准确性<sup>[7-16]</sup>。Deepankar 等<sup>[17]</sup>用拟静力法分析了地震作用下墙后填土内摩擦角和黏聚力对加筋挡土墙内部稳定性的影响。Syed 等<sup>[18]</sup>用拟静力法分析海滨地区加筋挡土墙在水压力与地震力同时作用下挡土墙的动力性能。Basha 等<sup>[19]</sup>用拟静力法分析了加筋挡土墙的内部稳定性, 并提出了验算挡墙内部稳定性的计算公式。赵炼恒等<sup>[20]</sup>采用拟静力法推导加筋强度下边坡临界高度和边坡高度下临界加筋强度的计算公式。蒋建清等<sup>[21-22]</sup>采用拟静力水平条分法推导出筋材拉力、所需筋材长度和界限配筋率的理论计算公式。然而拟静力法在计算地震作用下挡墙的侧向动土压力时没有考虑到地震作用的时程效应。因此, 为了克服拟静力法在挡墙地震计算中的不足, Steedman 等<sup>[23]</sup>和 Zeng 等<sup>[24]</sup>首次提出了拟动力法, 用于计算地震作用下挡土墙的侧向动土压力, 并通过离心模型试验结果验证了拟动力法的可行性。此后, 国内外学者采用拟动力法对挡土墙的抗震性进行了大量研究。Choudhury 等<sup>[25-27]</sup>考虑挡墙的水平地震加速度和垂直地震加速度, 并通过拟动力法分析研究了挡墙的主动土压力与被动土压力。Ruan 等<sup>[28]</sup>利用拟动力法计算了地震作用加筋土挡墙的地震安全系数。程亚男等<sup>[29]</sup>通过拟动力法对加筋土挡土墙进行计算, 提出了筋材拉力的计算公式。然而, 这些方法计算加筋土挡墙的侧向动土压力时没有考虑挡墙剪切模量沿高度的变化。

基于以上分析, 针对传统的柔性加筋土挡墙在地震作用下常因侧向变形较大或局部产生破坏而失去其正常使用价值, 故提出了预应力返包式加筋土挡墙以解决该难题。针对该新型挡墙返包式加筋土挡墙, 本文首先考虑挡墙剪切模量沿高度的变化, 运用拟动力法对预应力返包式加筋土挡墙的侧向动土压力分布进行了理论推导。然后对已有的位移理论进行修正, 提出了预应力返包式加筋土挡墙的位移计算理论。最后结合室内模型试验, 验证了侧向动土压力和位移计算理论的可行性和合理性, 为返包式加筋土挡墙结构的设计提供一定的指导和借鉴意义。

## 1 理论分析

### 1.1 侧向动土压力计算

考虑挡墙剪切模量对于地震波波速的影响, 本文采用拟动力法对预应力返包式加筋土挡墙单元的侧向

土压力进行分析, 如图 1 所示。根据介玉新等提出的等效附加应力法<sup>[30-31]</sup>, 即把加筋土结构中筋材的作用等效成外力加在土骨架上。预应力加筋的作用是使筋材提前受拉, 产生预应力, 提高结构整体性, 对土体起到显著的约束作用, 可考虑为附加模量矩阵的增加。取加筋土中的土体单元进行计算, 随后又对等效附加应力法进行改进, 在土的弹性模量矩阵上加入附加模量矩阵。计算时考虑预应力返包式加筋土挡墙的破裂面为朗肯破裂面。

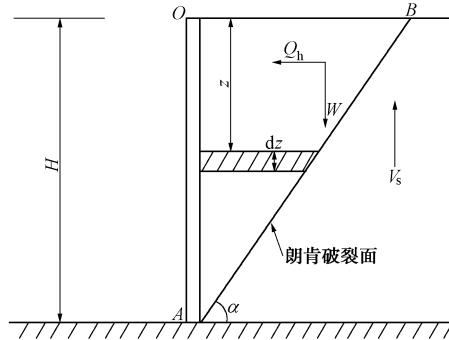


图 1 侧向动土压力计算

Fig. 1 Calculation of lateral dynamic earth pressure

地震波在挡土墙中传播, 其  $t$  时刻深度为  $z$  的水平地震加速度为<sup>[23, 25]</sup>

$$a_h(z, t) = k_h g \sin \omega \left( t - \frac{H-z}{V_s} \right) , \quad (1)$$

式中,  $k_h$  为水平地震系数,  $\omega$  为地震波频率,  $V_s$  为地震波波速,  $g$  为重力加速度。

式 (1) 并未考虑挡土墙模量对地震波传播速度的影响。然而实际工程中, 挡墙模量沿墙高的变化对地震波波速是有影响的, 因此本文假定挡墙剪切模量沿挡墙高度呈线性变化, 即

$$G(z) = Kz , \quad (2)$$

式中,  $K$  为常数,  $z$  为挡墙高度。

此时沿墙高传播的地震波波速为

$$V_s(z) = \sqrt{G(z)/\rho} , \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为土体密度。

在加筋土挡墙中, 筋材对土体的摩擦作用沿着土体颗粒进行传播, 可以考虑将摩擦力当作附加应力作用于土体颗粒, 进而使整个土体的弹性模量增加。因此, 在加筋土挡墙中, 只需考虑筋材对土体产生的附加模量。根据介玉新的附加模量矩阵原理, 可知附加模量计算公式为

$$E = \frac{4a(b-1)\varepsilon_r^{b-2}}{H} , \quad (4)$$

式中,  $a, b$  均为常数, 可由试验得到,  $H$  为挡土墙高度,  $\varepsilon_r$  土体单元应变。

则预应力返包式加筋土挡墙的剪切模量沿墙高的

变化公式为

$$G(z) = Kz + \frac{4a(b-1)\varepsilon_r^{b-2}}{2(1+\nu)H} \quad . \quad (5)$$

为方便计算, 令

$$M = \frac{4a(b-1)\varepsilon_r^{b-2}}{2(1+\nu)H} \quad . \quad (6)$$

假设土体本身的泊松比不变, 那么  $M$  为常数,  $K$  为常数。

将式 (5), (6) 代入式 (3) 可得地震波的波速为

$$V_s(z) = \sqrt{\frac{Kz + M}{\rho}} \quad . \quad (7)$$

对筋材施加预应力, 让筋材提前受力, 当施加的应力在筋材的弹性范围内, 可以认为筋材受到预应力只引起附加模量矩阵的增加, 进而增加土体结构整体的弹性模量, 即只引起常数  $M$  的变化。

假定在同一返包层中地震波的传播速度保持不变, 可以得到在第  $i$  层的传播速度为

$$\Delta t_i = \int_{h_i}^{h_{i+1}} \frac{dz}{V_s} = \int_{h_i}^{h_{i+1}} \frac{dz}{\sqrt{\frac{(Kz + M)}{\rho}}} \quad , \quad (8)$$

式中,  $h_i$  为第  $i$  层筋材的高度。

根据式 (1) 可以得到沿墙高不同返包层的水平加速度为

$$a_{h_i}(z, t) = k_h g \sin \omega(t - \Delta t_i) \quad . \quad (9)$$

因此,  $t$  时刻深度为  $z$  处的水平地震力可表示为

$$q_h(z, t) = m(z)a_{h_i}(z, t) \quad , \quad (10)$$

式中,  $m(z)$  为土体单元的质量, 其计算公式为

$$m(z) = \frac{\gamma}{g \tan \alpha} \frac{H-z}{dz} \quad . \quad (11)$$

挡墙的侧向土压力计算公式为

$$Q_h = \int_0^H q_h(z, t) dz \quad . \quad (12)$$

根据式 (8) ~ (11) 可以得到第  $i$  层的侧向动土压力为

$$\begin{aligned} Q_{hi} &= \int_{h_i}^{h_{i+1}} \frac{\gamma}{g \tan \alpha} \frac{H-z}{dz} a_{h_i}(z, t) dz \\ &= \int_{h_i}^{h_{i+1}} \frac{\gamma}{g \tan \alpha} k_h g \sin \omega(t - \Delta t_i) dz \quad . \quad (13) \end{aligned}$$

## 1.2 侧向位移计算

杨广庆等<sup>[32]</sup>、吕鹏等<sup>[33]</sup>提出, 将加筋土挡土墙墙体等效成各向异性的弹性体, 并视其为  $L$  宽度的悬臂梁。因此本文考虑将返包式加筋土挡墙也看成整体长度为  $L$  的悬臂梁, 其受到的水平土压力可由式 (12) 计算得到, 本文只考虑计算纯弯曲情况下的水平位移。其侧向位移计算公式为

$$u_h(y) = A \frac{k_h \gamma}{10 E_h L^3} (y^5 - 5H^4 y + 4H^5) \quad , \quad (14)$$

式中,

$$A = \frac{(2i-1) \sin \omega(t - \Delta t_i)}{2I^2 \tan \alpha} \quad .$$

式中  $I$  为筋材层总层数, 考虑极限状态下位移的计算, 故可另  $\sin \omega(t - \Delta t_i) = 1$ ;  $k_h$  为地震土压力系数;  $\gamma$  为土的重度;  $E_h$  为水平方向的弹性模量;  $H$  为挡墙高度。

其水平向弹性模量将为

$$E_h = E_s + E \quad , \quad (15)$$

式中,  $E_s$  为土体的弹性模量,  $E$  为附加模量, 可由式 (4) 得到。

因此, 预应力返包式加筋土挡土墙的水平位移计算公式为

$$u_h(y) = A \frac{k_h \gamma}{10(E_s + E)L^3} (y^5 - 5H^4 y + 4H^5) \quad . \quad (16)$$

## 2 振动台模型试验

预应力返包式加筋土挡墙是将土工格栅或土工织物等筋材端部回折将填土分层返包直至墙顶, 然后对筋材施加预拉力。为了研究预应力返包式加筋土挡墙在地震作用下的动力响应, 本文开展了预应力返包式加筋土挡墙的振动台模型试验。

### 2.1 试验材料

试验采用的自制钢模型箱尺寸为 1200 mm × 300 mm × 900 mm (长 × 宽 × 高), 质量约为 0.5 t, 如图 2 所示。试验模型尺寸为 800 mm × 300 mm × 600 mm (长 × 宽 × 高), 采用土压力计、加速度计、应变片分别测量预应力返包式加筋土挡墙的侧向动土压力、挡墙内部加速度以及筋材的应变, 其布置方式如图 3 所示, 预应力装置如图 4 所示, 其作用为: 通过转动前壁螺杆处的螺栓带动后壁向面板移动, 后壁带动筋材有向挡墙面板运动的趋势, 筋材又在土体锚固下保持静止, 由此筋材将产生预拉力。

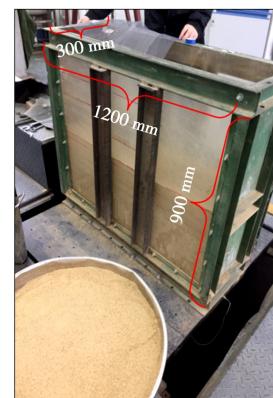


图 2 自制模型箱

Fig. 2 Customized model box

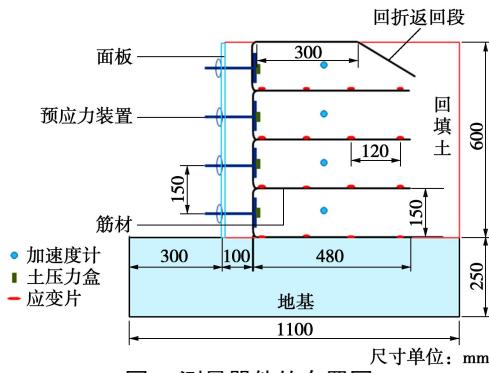


图 3 测量器件的布置图

Fig. 3 Layout of measuring devices

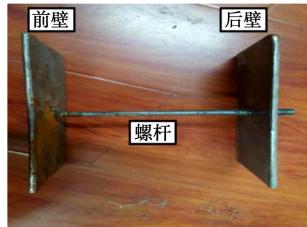


图 4 预应力装置

Fig. 4 Prestressed devices

试验中采用尼龙纱网作为加筋材料, 其材质为玻璃丝, 丝径为 24 mm, 目数为 20, 克重为 120 g/m<sup>2</sup>。通过在拉伸试验仪上对筋材进行标准的拉伸试验, 以获得筋材的力学参数。具体步骤按照《土工织物—宽幅拉伸试验》等规范, 试验结果如图 5 所示。试验所用粗砂的物理力学参数: 密度为 1.771 g/cm<sup>3</sup>, 内摩擦角  $\varphi$  为 33.4°, 黏聚力  $c$  为 0, 不均匀系数  $C_u$  为 2.5, 曲率系数  $C_c$  为 1.28。级配曲线如图 6 所示。

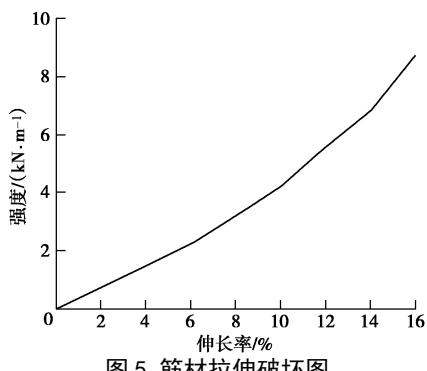


图 5 筋材拉伸破坏图

Fig. 5 Tensile failure of reinforcement

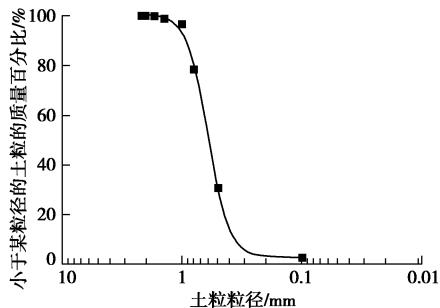


图 6 砂的级配曲线

Fig. 6 Gradation curve of sand

## 2.2 模型相似关系

为了使模型试验能够反映原型结构的物理关系和破坏形态, 需要使试验模型与原型保持一定的相似关系<sup>[34-35]</sup>, 本文根据模型箱尺寸与实际挡墙尺寸的比例, 选择相似比为 1/10, 具体如表 1 所示。

表 1 物理相似常数取值

Table 1 Values of physical similarity constants

物理量	相似关系	相似常数	本模型物理量取值
长度	$C_L$	1/10	试验模型长度为工程中的 1/10
弹性模量	$C_E$	1/10	试验模型筋材弹性模量为工程中的 1/10
密度	$C$	1	试验模型填料密度与工程中一致
泊松比	$C$	1	试验模型与工程中泊松比一致
黏聚力	$C_c$	1	试验模型与工程中黏聚力一致
内摩擦角	$C$	1	试验模型与工程中内摩擦角一致

根据上述相似关系, 考虑到工程中常用的土工格栅抗拉强度为 60~120 kN/m, 模型试验中选用的细纱网的抗拉强度约为 10 kN/m, 符合相似关系。试验所用填料为粗砂, 黏聚力为 0, 满足黏聚力相似关系。模型试验与足尺试验常用的粗砂相同, 满足内摩擦角相似比为 1 的条件。由于试验模型的设计参数与原型参数完全满足相似关系非常困难<sup>[36]</sup>, 因此进行模型试验设计时应确保较多的满足相似比关系, 尽可能地反映原型的力学特性与运动特性。

## 2.3 试验方案

为了研究预应力的施加及其大小对返包式加筋土挡墙抗震性能的影响。本次试验共分为 3 种工况, 分别是未施加预应力, 施加中等预应力及施加较大预应力; 同时考虑地震波频率的变化, 共分 6 组模型试验。试验方案见表 2。

表 2 模型试验工况

Table 2 Model test condition

试验组	筋材预应力	频率/Hz
#1	无	3
#2	无	6
#3	中等	3
#4	中等	6
#5	大	3
#6	大	6

注: 筋材的预应力大小通过螺栓转动前进的位移决定, 大预应力定义为螺栓转动前进 15 mm, 中等预应力定义为螺栓转动前进 8 mm。

## 2.4 试验步骤

(1)先在模型箱侧壁涂上凡士林及铺设聚四氟乙烯薄膜以减少模型箱侧壁对土体的摩擦。

(2) 在模型槽底部铺设 250 mm 厚的试验用砂, 充分压实, 作为返包式加筋土挡墙的地基。

(3) 铺设筋材, 每层筋材铺设长度为 480 mm, 同时预留出 450 mm 长的返包段, 随后通过预留的筋材包裹预应力装置的后壁, 预应力装置的前壁作为加筋土挡墙的面板。

(4) 压实回填土, 直至四层筋材返包完成。

(5) 施加预应力: 通过转动前壁螺杆上的螺栓带动后壁向挡墙面板移动, 带动筋材有向前移动的趋势, 继而使筋材产生预拉力。挡墙模型如图 7 所示。

(6) 施加简谐地震波, 如图 8 所示, 持续时间 9 s。

(7) 待挡墙变形稳定后, 再施加下一级加速度, 加速度施加顺序依次为 0.3g, 0.6g, 0.9g, 1.2g。



图 7 预应力返包式加筋土挡墙模型

Fig. 7 Model for prestressed wrap-reinforced earth retaining walls

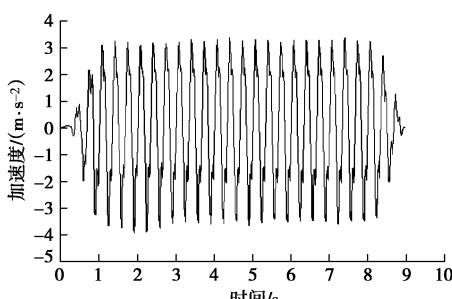


图 8 简谐地震波

Fig. 8 Simple harmonic seismic waves

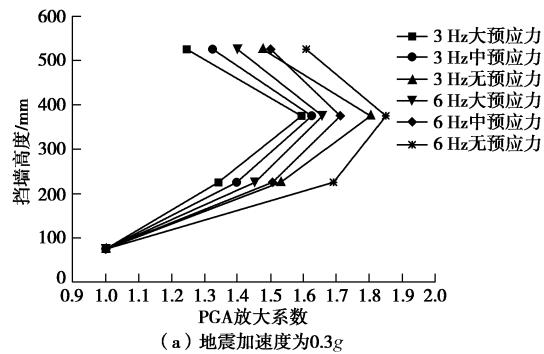
注意, 试验中为确保最上层筋材返包段的稳定, 将顶层返包段延长并斜埋入砂土中, 如图 3 所示, 将筋材埋入砂中一定深度。

## 2.5 模型试验结果和分析

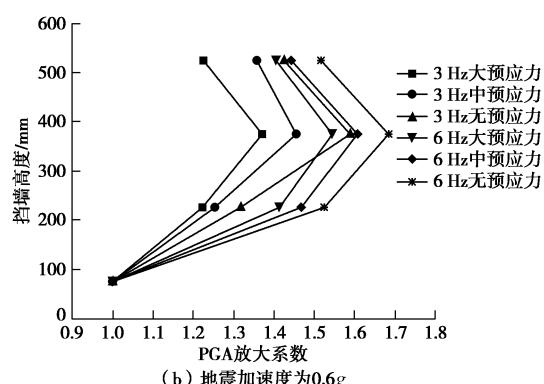
### (1) 加速度放大系数分析

定义加筋土挡墙内任一点的峰值加速度与挡墙底部的峰值加速度之比为 PGA 放大系数, 得到加筋土挡墙的 PGA 放大系数沿墙高的分布情况, 如图 9 所示。图 9 给出了在不同震级和不同预应力大小作用下, 高度为 600 mm 的返包式加筋土挡墙各测点的 PGA 放大

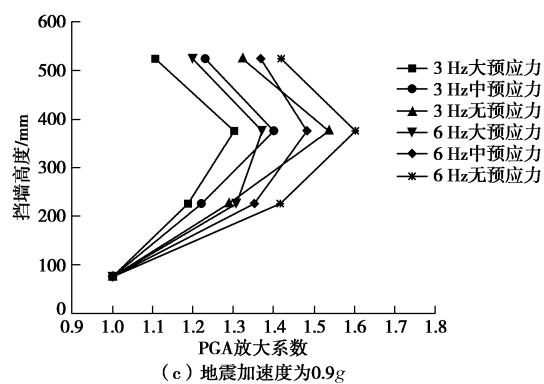
系数沿墙高的变化规律。



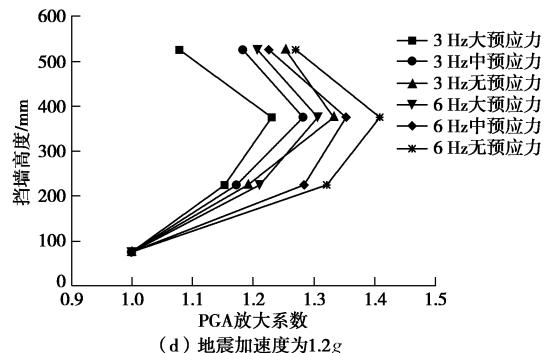
(a) 地震加速度为 0.3g



(b) 地震加速度为 0.6g



(c) 地震加速度为 0.9g



(d) 地震加速度为 1.2g

图 9 PGA 放大系数分布

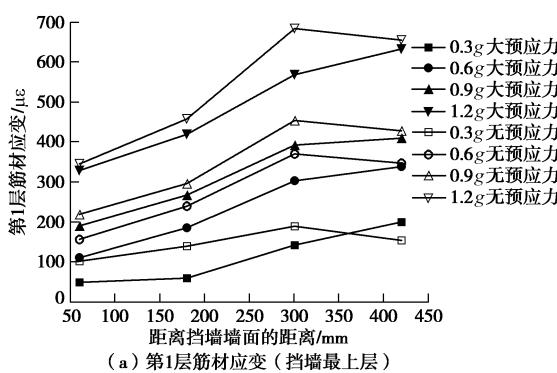
Fig. 9 Distribution of PGA amplification coefficient

从图 9 可以看出:①加筋土挡土墙的 PGA 放大系数沿墙高从下往上先增加后减小, 且挡墙顶部的 PGA 放大系数始终大于挡墙底部。具体原因为: a) 地震加

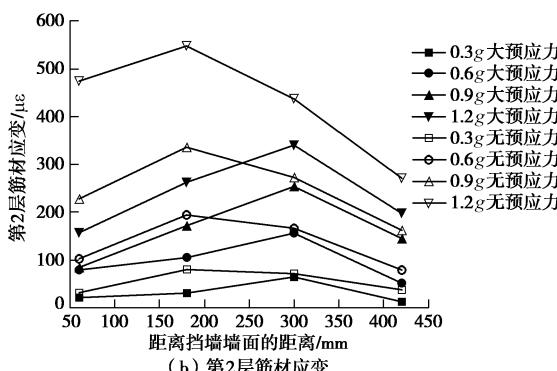
速度沿挡墙内部传播时被放大, 导致挡墙内上部的加速度增加; b) PGA 放大系数代表了挡墙内部加速度的放大效应, 加速度的放大效应由地震能量决定。由于在振动过程中, 挡墙顶端的侧向变形较大, 耗散了较多的地震能量, 减小了加速度的放大效应, 故在挡墙上部 PGA 放大系数有减小的趋势。②当筋材施加预应力后, 加筋土挡墙沿墙高的 PGA 放大系数均小于未加预应力的加筋土挡土墙。这是由于对筋材施加预应力后, 筋材本身提前受拉, 使筋材与土体发生相对变形产生摩擦力, 摩擦力沿着土体颗粒向周围扩散, 产生“围压效应”, 改变了土体的受力特性, 提高了挡墙整体的刚度, 使挡墙内部扩散角增大, 对地震波的扩散效应增加。③随着地震加速度的增加, 预应力的施加对减小 PGA 放大系数沿墙高分布作用也越明显。④随着地震加速度频率的增加, 同一高度处, 其加速度大小增加, 其 PGA 放大系数也有提高, 但是 PGA 放大系数沿墙高的总体分布规律保持一致。表明地震加速度频率的增加虽然会使得加筋土挡墙内部的加速度有一定的增加, 但 PGA 放大系数随墙高的增加呈现先增加后减小的趋势不变。

## (2) 筋材应变分析

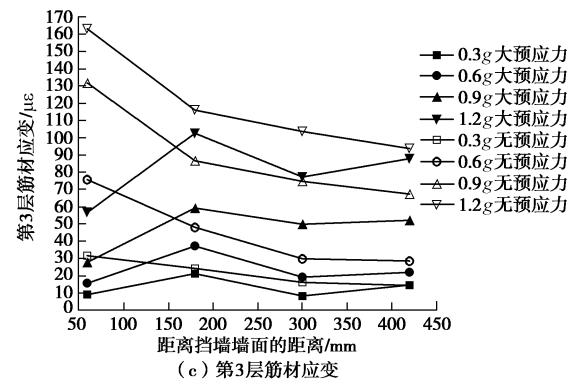
将筋材各测点应变数据进行分析, 取每个测点的最大值进行分析, 如图 10 所示, 即图 10 给出了不同预应力、不同高度下, 筋材应变沿长度方向变化趋势图。



(a) 第1层筋材应变(挡墙最上层)



(b) 第2层筋材应变



(c) 第3层筋材应变

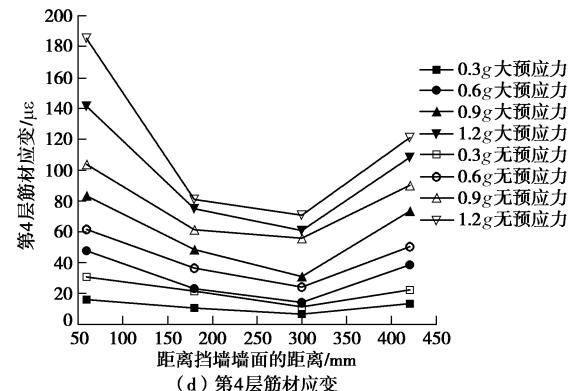


图 10 筋材沿筋长方向的应变分布

Fig. 10 Distribution of strain of reinforcement along its length

由图 10 可发现:①当对预应力返包式加筋土挡墙施加地震加速度时, 处于锚固区的筋材首先发挥作用, 在土压力的作用下, 筋材发生变形, 产生应变, 且每层筋材应变峰值点的位置连线似一倾斜直线, 这与加筋土挡墙的变形机理(每层筋材的峰值应变出现在破裂面上或其附近位置处)一致。②从上往下, 每层筋材应变峰值向挡墙墙面移动。并且, 与施加预应力时筋材应变相比, 未施加预应力时筋材应变峰值点位置普遍更靠近挡墙墙面。

假定每层筋材测得的应变峰值点连线为挡墙破裂面, 如图 11 所示, 筋材应变最大值从上往下逐渐向挡墙墙面移动。对比施加预应力前后破裂面位置可知: 施加预应力后加筋土挡墙的主动区范围增加, 挡墙抗滑能力提高, 表明预应力的施加可以有效提高加筋土挡墙的抗震稳定性。

## (3) 侧向动土压力分析

将各测点得到的动土压力进行分析, 选择同一时刻下 4 个测点均值最大的数据为分析对象, 并将其绘于图 12, 得到预应力返包式加筋土挡土墙的侧向动土压力的分布。图 12 对比了不同震级和不同预应力作用下, 高度为 600 mm 的预应力返包式加筋土挡土墙侧向土压力沿墙高的分布。

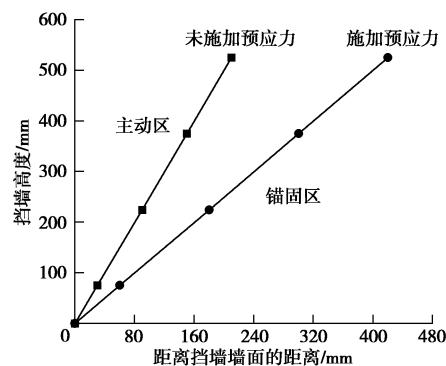


图 11 反包式加筋土挡墙破裂面曲线

Fig. 11 Curves of failure surface of wrap-reinforced earth retaining walls

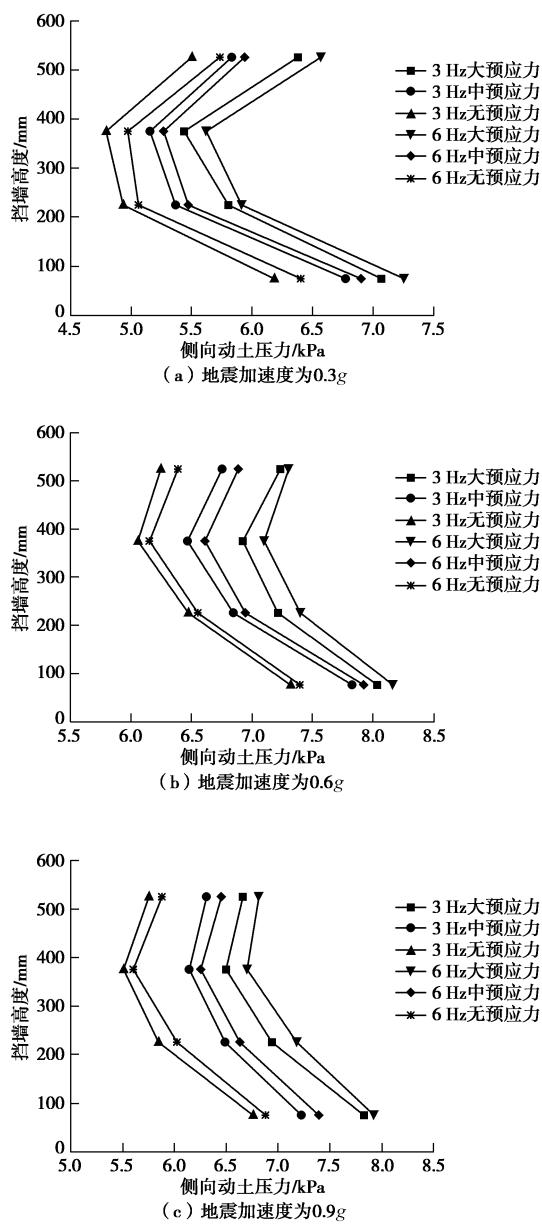


图 12 侧向动土压力沿墙高的分布

Fig. 12 Distribution of lateral dynamic earth pressure along wall height

由图 12 可发现:①预应力返包式加筋土挡墙在不同震级和不同预应力作用下,其侧向动土压力沿墙高从下往上均表现为先逐渐减小后增加,中下部侧向动土压力较大。这是由于震动过程中,由于加筋土挡墙的侧向变形为中间大两端小,因此中间部分将会耗散更多的地震能量,导致侧向动土压在挡墙上部有增加的趋势。②随着地震加速度的增加,返包式加筋土挡墙的侧向动土压力并不是随之线性增加的,这是由于挡墙在振动过程中变形会消耗地震波的能量,导致侧向变形大的位置处的侧向动压力小。③随着地震频率的增加,同一高度的侧向动土压力增加幅度较小,同时地震加速度频率的变化没有改变侧向动土压力的分布规律,表明地震波频率对挡土墙侧向动土压力的影响较小。

## 2.6 模型试验与理论结果对比

理论公式是基于极限平衡状态下进行推导的,因此本节选取结构破坏时的状态为对比研究对象。通过试验发现当地震加速度达到  $1.2g$  时,预应力返包式加筋土挡墙因变形较大,处于破坏极限状态。此时,挡墙的侧向动土压力分布如图 13 所示。从图 13 可以看出:侧向动土压力的理论结果和试验结果均表现为沿墙高从下往上逐渐降低。

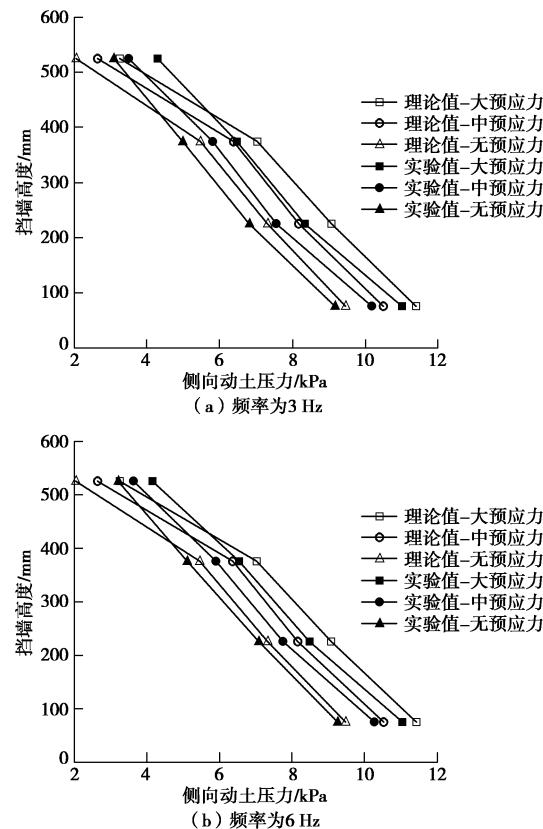
图 13 极限状态下侧向动土压力分布曲线对比 ( $1.2g$ )

Fig. 13 Comparison of distribution curves of lateral dynamic earth pressure under limit state ( $1.2g$ )

由图 13 可发现:①当返包式加筋土挡土墙处于极

限破坏状态时, 沿着挡墙高度, 测得的侧向动土压力逐渐减小, 与图 12 侧向动土压力的分布有所不同, 这是因为挡墙顶部变形较大, 导致地震波能量的耗散, 因此使得顶端侧向动土压力最小。②理论值与试验值变化趋势相符; 挡墙前三层侧向动土压力值相近, 顶层侧向动土压力值变化较大, 理论值与试验值相差较大。这是因为在试验中, 为了确保顶层筋材在振动过程中不至脱落而对顶层返包层进行了如图 3 所示的返包处理。因此, 在同样的地震加速度下, 试验测得侧向变形小于通过理论计算得到的侧向变形, 根据库仑土压力理论可知, 变形越大所测得主动土压力越小, 因此理论计算测得侧向土压力会略微偏小。

由于试验条件的限制, 试验中仅测量了预应力返包式加筋土挡墙结构顶点侧向位移。为了对比研究理论与试验结果的异同, 本节运用式(16)计算了预应力返包式加筋土挡墙顶点位移, 将其计算结果和试验结果列于表 3 中。通过对比发现: 理论计算结果与试验测量值相近, 且二者差值百分比不超过 10.0%, 因此验证了理论公式的适用性, 即可以为工程实践提供一定的指导。

表 3 预应力返包式加筋土挡墙顶端位移

Table 3 Top displacements of prestressed wrap-reinforced earth retaining walls

试验工况	试验值 /mm	理论值 /mm	差值 /mm	差值百分比 /%
#1	53.8	56.9	4.1	7.7
#3	46.3	48.9	3.6	5.6
#5	43.3	45.1	3.9	6.9

### 3 结 论

针对地震荷载作用下, 返包式加筋土挡墙常因变形过大而影响其正常使用问题, 提出预应力返包式加筋土挡墙。本文运用拟动力法和附加应力法作为理论基础, 研究挡墙的侧向动土压力和顶点侧向位移; 通过振动台试验对挡墙模型进行研究, 验证理论公式的可行性与合理性, 以及研究预应力返包式加筋土挡墙的抗震性能。由理论及试验研究得到如下 6 点结论。

(1) 与未施加预应力的返包式加筋土挡墙相比, 筋材受到预应力后, 筋材与土体之间产生的摩擦力会增强土体颗粒之间的连接, 增强挡墙整体的刚度, 提高挡墙的抗震稳定性。

(2) 施加预应力后, 同一测点处, 筋材的应变减小; 预应力返包式加筋土挡墙的破裂面向非加筋区移动, 其主动区范围增加, 挡墙抗滑裂能力增强。

(3) 考虑挡墙剪切模量沿墙高的变化, 将筋材与

预应力对土体的作等效为附加模量, 运用拟动力法和附加应力法推导出侧向动土压力理论公式, 简化了动土压力的计算, 且除挡墙顶点外, 同一测点处理理论值与实验值最大差异不超过 10.0%, 验证了理论公式的可行性。

(4) 预应力加筋土挡墙侧向位移理论计算时, 考虑了筋材与预应力对附加模量的影响以及侧向动土压力系数沿墙高的变化。理论计算结果与试验结果相差不超过 2.0%, 这说明计算预应力返包式加筋土挡墙最大(顶点)侧向位移时考虑附加模量的变化是合理的。

(5) 本文主要集中在预应力对加筋土结构的抗震动力响应和整体稳定性能的定性研究上, 而预应力装置对返包式加筋土挡墙结构影响的定量研究尚不十分明确, 有待进一步研究。

(6) 本文仅通过小型振动台模型试验对预应力加筋土挡墙结构动力性能开展研究, 其工程效益尚待实践验证。

### 参考文献:

- [1] SAKAGUCHI M A. Study of the seismic behavior of geosynthetic reinforced walls in Japan[J]. Geosynthetics International, 1996, 3(1): 13 - 30.
- [2] MATSUO O, TSUTSUMI T, YOKOYAMA K, et al. Shaking table tests and analyses of geosynthetic reinforced soil retaining walls[J]. Geosynthetics International, 1998, 5(1/2): 97 - 126.
- [3] NOVA-ROESSIG L, SITAR N. Centrifuge model studies of the seismic response of reinforced soil slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(3): 388 - 400.
- [4] 李广信. 地震与加筋土结构[J]. 土木工程学报, 2016, 49(7): 1 - 8. (LI Guang-xin. Earthquake and reinforced soil structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(7): 1 - 8. (in Chinese))
- [5] OKABE S. General theory on earth pressure and seismic stability of retaining wall and dam[J]. Proc Civil Engrg Soc, Japan, 1924, 10(6): 1277 - 1323.
- [6] MONONOBE N. On determination of earth pressure during earthquake[C]// Proc World Engineering Congress. Tokyo, 1929: 177 - 185.
- [7] RICHARDSON G N, FEGER D, FONG A, et al. Seismic testing of reinforced earth walls[J]. Journal of the Technical Engineering Division, 1977, 103(1): 1 - 17.
- [8] FYTAKI M, OGAWA N, SATO M, et al. Experiments about seismic performance of reinforced earth retaining wall[C]//

- Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering. [S.l.]: Elsevier Science, Ltd., 1996: 53 - 56.
- [9] BATHURST R J. Shaking Table Model Study on the Dynamic Response of Reinforced Soil Walls[C]// Proc 7th Int Geosynthetic Conf. Nice, 2002: 99 - 102.
- [10] 朱宏伟, 姚令侃, 刘兆生, 等. 地震作用下柔性挡墙变形特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2829 - 2838. (ZHU Hong-wei, YAO Ling-kan, LIU Zhao-sheng, et al. Deformation characteristics of flexible retaining wall under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2829 - 2838. (in Chinese))
- [11] 朱宏伟, 姚令侃, 张旭海. 两种加筋土挡墙的动力特性比较及抗震设计建议[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2072 - 2080. (ZHU Hong-wei, YAO Ling-kan, ZHANG Xu-hai. Comparison of dynamic characteristics of two reinforced earth retaining walls and suggestions for seismic design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 2072 - 2080. (in Chinese))
- [12] 王丽艳, 陈国兴, 高鹏, 等. 可液化土中格栅加筋土挡墙地震变形特性大型振动台试验[J]. 中国公路学报, 2014, 27(9): 25 - 31. (WANG Li-yan, CHEN Guo-xing, GAO Peng, et al. Large-scale shaking table test on seismic deformation characteristics of grille reinforced earth retaining wall in liquefiable soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(9): 25 - 31. (in Chinese))
- [13] 周健, 谢鑫波, 姜炯, 等. 包裹式加筋土挡墙的变形特性及影响因素研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 148 - 154. (ZHOU Jian, XIE Xin-bo, JIANG Jiong, et al. Deformation characteristics and influencing factors of encapsulated reinforced earth retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 148 - 154. (in Chinese))
- [14] 杨果林, 王永和. 加筋土挡墙在重复荷载作用下的模型试验与动态响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1541 - 1546. (YANG Guo-lin, WANG Yong-he. Model test and dynamic response analysis of reinforced earth retaining wall under repeated loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1541 - 1546. (in Chinese))
- [15] 杨果林, 肖宏彬, 王永和. 加筋土挡墙动变形特性试验与疲劳损伤分析[J]. 振动工程学报, 2002(2): 53 - 57. (YANG Guo-lin, XIAO Hong-bin, WANG Yong-he. Dynamic deformation test and fatigue damage analysis of reinforced earth retaining wall[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002(2): 53 - 57. (in Chinese))
- [16] 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 and dynamic analysis of dynamic characteristics of reinforced earth retaining wall[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(6): 105 - 110. (in Chinese))
- [17] CHOUDHURY D, NIMBALKAR S S. Pseudo-dynamic approach of seismic active earth pressure behind retaining wall[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2006, 24(5): 1103 - 1113.
- [18] AHMAD S M, CHOUDHURY D. Pseudo-dynamic approach of seismic design for waterfront reinforced soil-wall[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(4): 61 - 70.
- [19] BASHA B M, BABU G L S. Earthquake resistant design of reinforced soil structures using pseudo-static method[J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2009, 2(3): 565 - 572.
- [20] 赵炼恒, 李亮, 杨峰, 等. 加筋土坡动态稳定性拟静力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1904 - 1917. (ZHAO Liang-heng, LI Liang, YANG Feng, et al. Quasi-static analysis of dynamic stability of reinforced soil slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1904 - 1917. (in Chinese))
- [21] 蒋建清, 杨果林. 加筋土挡墙地震稳定性分析的水平条分方法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 36 - 40. (JIANG Jian-qing, YANG Guo-lin. Horizontal slicing method for seismic stability analysis of reinforced earth retaining walls[J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 36 - 40. (in Chinese))
- [22] 蒋建清, 邹银生. 复杂动力作用下加筋土挡墙内部稳定性分析[J]. 中南公路工程, 2007, 32(1): 51 - 54. (JIANG Jian-qing, ZOU Yin-sheng. Internal stability analysis of reinforced earth retaining wall under complex dynamic action[J]. Central South Highway Engineering, 2007, 32(1): 51 - 54. (in Chinese))
- [23] STEEDMAN R S, ZENG X. The influence of phase on the calculation of pseudo-static earth pressure on a retaining wall [J]. Géotechnique, 1990, 40(1): 103 - 112.
- [24] ZENG X, STEEDMAN R S. On the behaviour of quay walls in earthquakes[J]. Géotechnique, 1993, 43(3): 417 - 431.
- [25] CHOUDHURY D, NIMBALKAR S S. Seismic passive resistance by pseudo-dynamic method[J]. Géotechnique, 2005, 55(9): 699 - 702.

- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] RUAN X, SUN S. Seismic stability of reinforced soil walls under bearing capacity failure by pseudo-dynamic method[J]. Journal of Central South University, 2013, **20**(9): 2593 – 2598.
- [29] 程亚男, 孙树林, 阮晓波, 等. 加筋土挡墙地震稳定性的拟动力分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(12): 3573 – 3579. (CHENG Yan-an, SUN Shun-lin, RUAN Xiao-bo, et al. Pseudo-dynamic analysis of seismic stability of reinforced earth retaining walls[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(12): 3573 – 3579. (in Chinese))
- [30] 介玉新, 李广信. 加筋土数值计算的等效附加应力法[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(5): 614 – 616. (JIE Yu-xin, LI Guang-xin. Equivalent additional stress method for numerical calculation of reinforced soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(5): 614 – 616. (in Chinese))
- [31] 介玉新, 王乃东, 李广信. 加筋土计算中等效附加应力法的改进[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊 1): 129 – 132. (JIE Yu-xin, WANG Nai-dong, LI Guang-xin. Improvement of the equivalent additional stress method in the calculation of reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S1): 129 – 132. (in Chinese))
- [32] 杨广庆, 周敏娟, 张保俭. 加筋土挡土墙水平位移研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(7): 1248 – 1252. (YANG Guang-qing, ZHOU Min-juan, ZHANG Bao-jian. Study on horizontal displacement of reinforced earth retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(7): 1248 – 1252. (in Chinese))
- [33] 吕 鹏, 杨广庆, 庞 巍, 等. 包裹式土工格栅加筋土挡墙水平位移研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(增刊 2): 973 – 976. (LÜ Peng, YANG Guan-qing, PANG Wei, et al. Study on horizontal displacement of encapsulated geogrid reinforced earth retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(S2): 973 – 976. (in Chinese))
- [34] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998. (YUAN Wen-zhong. Similarity Theory and Static Model Test[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998. (in Chinese))
- [35] 张鲲鹏, 陈哲武. 结构试验相似理论研究及实例分析[J]. 低温建筑技术, 2015, **37**(7): 42 – 45. (ZHANG Kui-peng, CHEN Zhe-wu. Similar theoretical study and case analysis of structural test[J]. Low Temperature Building Technology, 2015, **37**(7): 42 – 45. (in Chinese))
- [36] 陈红娟, 李小军, 闫维明, 等. 锯末混合土场地模型振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(11): 2068 – 2077. (CHEN Hong-juan, LI Xiao-jun, YAN Wei-ming, et al. Shaking table test study on model of sawdust mixed soil site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(11): 2068 – 2077. (in Chinese))

## 欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司（原冶金勘察研究总院）主办的学术—技术类双月刊，是中国科技核心期刊、中国科学引文数据库来源期刊、中国核心期刊（遴选）数据库收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊，多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富，理论结合实际，适于从事岩

土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行，双月刊，大16开本，双月20日出版。每期定价10.0元，全年60元。邮发代号18-153。全国各地邮局均可订阅，也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告，价格适中，印制精良，注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址：河北省保定市东风中路1285号《勘察科学技术》编辑部，邮编：071069。

Tel: 0312-3020887, 3094054; Fax: 0312-3034561。

E-mail: kckxjs@163.com。