

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0900

地震作用下加筋土挡墙水平位移分区计算理论

卢 谅^{1,2,3}, 何林耀^{1,2}, 王宗建⁴, KATSUHIKO ARAI⁵

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
3. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 4. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;
5. 福井大学 建筑建设工学部, 日本 福井 9108507)

摘 要: 在地震作用下, 加筋土挡墙作为一种柔性结构, 常因水平位移过大影响其正常使用, 因此, 提出一种有效的解析方法来计算加筋土挡墙在地震作用下的水平位移显得尤为重要。基于动力作用下墙后填土的不同运动特性, 将地震作用下加筋土挡墙水平位移进行分区计算, 并讨论了不同区域影响土体位移的关键因素。分别以 Mindlin 位移理论和拟动力法为基础, 以筋土无相对位移为前提, 提出了地震作用下不同区域位移的计算方法, 并分析了未考虑筋土相对位移对计算结果的影响。该方法通过离心模型试验得到进一步验证, 可用于大多数加筋土挡墙的地震动力分析中, 可为加筋土挡墙的动力设计和稳定性分析提供一定的依据。

关 键 词: 加筋挡墙; 水平位移; 分区方法; 拟动力法; 筋材拉力

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 02-0401-10

Partition calculation theory of horizontal displacement in reinforced earth retaining wall under earthquake

LU Liang^{1,2,3}, HE Lin-yao^{1,2}, WANG Zong-jian⁴, KATSUHIKO ARAI⁵

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. Key Laboratory for Special Area High Way Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;

4. College of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

5. Faculty of Construction and Infrastructure Engineering, University of Fukui, Fukui 9108507, Japan)

Abstract: As a flexible structure, reinforced earth retaining walls have been widely used in the field of civil engineering. However, excessive horizontal displacement of reinforced earth retaining wall due to earthquake could affect its service performance. Therefore, it is very important to develop an effective analytical method to calculate the horizontal displacement of reinforced earth retaining wall under earthquake. The reinforced earth retaining wall was divided into two regions for calculation based on the different movement characteristics of the backfill behind the wall. The key factors affecting the horizontal displacement of the reinforced earth retaining wall in different regions were discussed. Based on Mindlin displacement theory and pseudo-dynamic method, the calculation method of horizontal displacement in different regions under the earthquake, under the assumption of no soil-reinforcement relative slippage, was proposed and the influence of soil-reinforcement relative slippage on calculated results was studied. This method is further verified by centrifuge model test and can be used in the seismic dynamic analysis of general reinforced earth retaining walls. This provides basis for the dynamic design and stability analysis of reinforced earth retaining walls.

Keywords: reinforced earth retaining wall; horizontal displacement; partition method; pseudo-dynamic; tension of reinforcement

1 引 言

目前加筋土挡墙作为一种柔性结构已被广泛运

用于公路、铁路、水利、港口等各个领域, 并取得了良好的经济效益^[1-2]。由于筋材、土体、面板复杂的结构特性以及动力荷载的多样性, 导致加筋土挡

收稿日期: 2020-06-28

修回日期: 2020-11-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 51679018); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金 (No. 300102219514); 重庆市研究生科研创新项目 (No. CYB19017)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51679018), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, CHD (300102219514) and the Graduate Scientific Research and Innovation Foundation of Chongqing (CYB19017).

第一作者简介: 卢谅, 女, 1978 年生, 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

墙的动力响应和破坏形式复杂多样。例如在汶川、阪神等重大的地震灾害中,加筋土挡墙出现了整体位移或者局部垮塌等多种破坏形式^[3]。由此可见,挡墙水平位移往往是重要的挡墙性能评价指标。

近年来,各国学者对各种条件下加筋土挡墙水平位移进行了大量研究。在理论研究上,杨广庆等^[4]将加筋土挡墙视为悬臂梁推导了重力作用下加筋土挡墙水平位移计算方法。Liu^[5]、李婷^[6]等考虑将加筋土挡墙划分为两个区域,分别计算了两个区域的水平位移,结果表明加筋区域的位移也是加筋挡墙整体位移的重要组成部分。以上方法均是考虑在静力作用下的挡墙位移计算。王丽艳等^[7]根据瑞利-里兹法和拟静力法推导了地震作用下加筋土挡墙水平位移的计算方法。然而现阶段,采用拟动力法对加筋土挡墙的动力研究尚少。随着计算机技术的发展,基于有限元或者离散元等数值模拟方法也被广泛地运用于加筋土挡墙动力研究中,这为研究加筋土挡墙的动力响应提供了有力的支撑。刘华北^[8]、陈建峰^[9]、Jia^[10]和 Chaudhary^[11]等均利用数值模拟分析了各类加筋土的水平位移。在试验研究上,Liu 等^[12]针对筋材和填土长期蠕变对加筋土挡墙变形影响的问题开展了模型试验,并运用有限元进行了验证。徐鹏等^[13]利用大型振动台对加筋土挡墙在地震作用下的位移进行了测试,得出了当加速度超过一定值后位移会出现陡增的结论。Yazdandoust^[14]进行了一组加筋土挡墙的振动台试验,得出了使挡墙塑性位移显著增加的地震阈值加速度。朱宏伟等^[15]采用大型振动台模型试验对土工袋挡墙进行了动力分析,研究了土工袋挡墙坡度变化引起的位移变化规律。Anastasopoulos 等^[16]通过一系列小型振动台试验,得出了加筋土挡墙面板在地震加速度下的位移变化规律。但振动台试验由于设备的负载能力、模型框的尺寸等方面因素的限制,往往需要进行缩尺试验来模拟工程实际,其物理参数依靠相似比来确定,这常常由于不能真正反映原型特性而出现较大的偏差,目前解决该问题行之有效的方法是土工离心模型试验。

土工离心模型试验是将模型置于高速旋转的离心机中,使 $1/N$ 缩尺的模型在 Ng 离心加速度的空间进行试验,补偿因模型缩尺带来的试验误差,使模型的应力、应变、变形和破坏机制与原型相同,比缩尺下的物理模型更接近于实际。目前国内外均进行了大量的离心机模型试验^[17-18],其结果与实际工程模拟较好,对工程实践具有重大的指导意义。

本文基于地震作用下加筋土挡墙不同区域位移

性质的不同,将加筋土挡墙的位移发生区域分为加筋区和未加筋区。在加筋区内,通过计算筋材的拉伸位移得出该区域的水平位移。在未加筋区内,利用拟动力法计算出该区域的水平位移。这种方法能够考虑地震作用的时程性,能够较为精确地计算出各加速度下挡墙的水平位移。通过与离心机模型试验相关数据进行对比,验证了计算理论的可行性和合理性,可为加筋土挡墙的动力分析提供指导和借鉴意义。

2 地震作用下加筋土挡墙位移模型

在地震作用下,对于普通挡土墙,靠近挡墙的墙后填土区域和远离面板的填土区域具有明显不同的水平位移值^[19]。对于加筋土挡墙而言,由于加筋区域的复合刚度和未加筋区域填土的刚度有明显差异,可以将这两个区域分别划分为加筋区和未加筋区,如图 1 所示。因此,地震作用下加筋土挡墙的整体位移 u 可以分为两部分,加筋区域位移 u_1 和未加筋区域位移 u_2 。对于加筋区域位移 u_1 ,假设筋材与土体无相对位移,因此,这部分位移相当于筋材的拉伸量。对于未加筋区域位移 u_2 ,可视作加筋区土体承受地震作用下土压力而引起的位移。下面将分开计算这两部分位移。

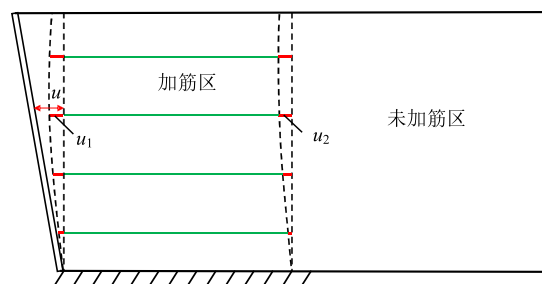


图 1 填土位移分区

Fig.1 Division of deformation region of backfill

2.1 加筋区位移计算

加筋区域位移 u_1 的关键是求得地震作用下各层筋材的拉力分布。现阶段多数研究认为,筋土切应力是影响筋材拉力的主要因素,通常假定筋土切应力方向不变,从而得出筋材拉力自面板到筋材末端依次递减的结论^[20]。然而试验研究表明,在地震作用下筋材拉力呈现先递增后递减的趋势^[21],因此,考虑筋土切应力方向的变化是研究地震作用下筋材拉力的关键。在动力作用下沿滑动面可以将筋材大致分为两个区域,自由段和锚固段,如图 2 所示。有研究表明^[22-23],加筋土挡墙在外力作用下由

于土的不均匀位移会产生土拱。自由段内由于土拱效应明显,导致筋材有向外拔出的趋势,致使筋材切应力朝向面板;而在锚固段内土拱效应不明显,筋土摩擦作用主要抑制筋材被拉出,此时筋材切应力背向面板。首先假设筋材上切应力连续,则每层筋材上自由段与锚固段分界线(即滑动面)上切应力为0。其次令自由段的每层筋材水平长度分别为 l_{11} 、 l_{21} 、 l_{31} ,锚固段的每层筋材水平长度分别为 l_{12} 、 l_{22} 、 l_{32} ,筋材总长度为 l ,加筋土挡墙高度为 H ,滑动角为 α (取为 $45^\circ + \varphi/2$),每层筋材拉伸量为 u_{11} 、 u_{12} 、 u_{13} 。

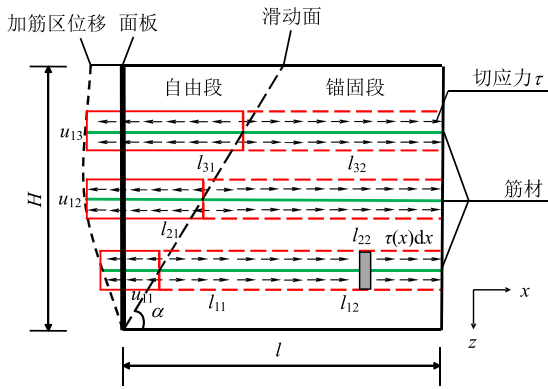


图2 自由段和锚固段范围分布

Fig.2 Distribution of free segment and anchored segment

加筋区域位移可由筋材的拉伸长度来近似计算,因此必须先求得筋材的拉力。这里先引入如图3所示的半无限弹性体,弹性模量为 E ,剪切模量为 G ,泊松比为 ν , F_i 为弹性体中作用的集中力, W_i 为距离集中力 F_i 作用点 d 长度处弹性体的位移。

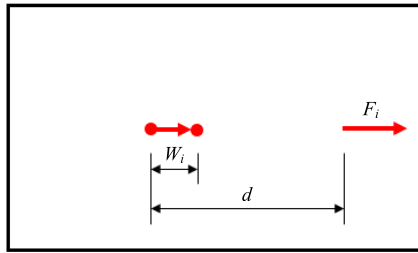


图3 Mindlin 位移解计算简图

Fig.3 Sketch of Mindlin's solution

根据 Mindlin 位移理论^[24]:

$$W_i = \frac{F_i(1+\nu)(3-2\nu)}{2\pi Ed} = \frac{F_i(3-2\nu)}{4\pi Gd} \quad (1)$$

因此,将加筋土视为半无限弹性体,令自由段与锚固段分界点为锚固段的计算原点(此处 $x=0$),对于每一层筋材水平面任一点的位移可以看做由无

数个微单元的集中力 $2\tau(x)Bdx$ 作用下引起。由式(1)可知,对于每个微单元引起自由段与锚固段分界点处土体的位移 W_i 为

$$W_i = \frac{2B\tau(x)dx(3-2\nu)}{4\pi Gx} \quad (2)$$

式中: B 为筋材宽度; G 为土体的剪切模量; ν 为土体的泊松比; x 为集中力与计算点的距离。为了简化计算,本文仅考虑弱震作用下加筋土挡墙的动力响应,因此,可做如下几点假设:

(1) 土和筋材为各向同性的线弹性材料,即土的剪切模量、泊松比和筋材的弹性模量在理论分析中视为常数。

(2) 对于筋土界面分析,认为剪切应力是引起土体和筋材位移的主要原因,忽略其他力对筋材和土体的位移影响,筋土之间无相对位移。

(3) 筋材末端剪切应力和轴向力接0,因此,将筋材铺设长度视为无限长。

由式(2)可知,整个锚固段切应力对计算原点引起的位移 W 为

$$W = \sum W_i = \int_0^\infty \frac{(3-2\nu)B}{4\pi G} \frac{\tau(x)}{x} dx \quad (3)$$

根据胡克定律,计算原点筋材的拉伸量 u'_1 为

$$u'_1 = \int_0^\infty \frac{1}{E_a A} (T_{\max} - 2B \int \tau(x) dx) dx \quad (4)$$

式中: $T_{\max}$ 为端点处筋材拉力; A 为筋材的截面面积; E_a 为筋材的弹性模量。

根据锚固段的筋土位移一致性($W = u'_1$),得出

$$\int_0^\infty \frac{(3-2\nu)B}{4\pi G} \frac{\tau(x)}{x} dx = \int_0^\infty \frac{1}{E_a A} (T_{\max} - 2B \int \tau(x) dx) dx \quad (5)$$

对式(5)求三阶导化简,得到二阶变系数齐次微分方程为

$$\tau'' + \frac{4\pi x G}{E_a A(3-2\nu)} \tau' + \frac{8\pi G}{E_a A(3-2\nu)} \tau = 0 \quad (6)$$

令:

$$\frac{4\pi G}{E_a A(3-2\nu)} = t \quad (7)$$

式(6)可化简为

$$\tau'' + tx\tau' + 2t\tau = 0 \quad (8)$$

已知边界条件 $x \rightarrow \infty$, $\tau = 0$; $x = 0$, $\tau = 0$, $N(x) = T_{\max}$ (N 为筋材轴向拉力)。可由式(8)解得筋材切应力沿长度方向的分布为

由边界条件:

$$\left. \begin{aligned} u_{21}(z)|_{z=H} &= 0 \\ u_{21}'(z)|_{z=H} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

将式(21)代入式(22)可算得

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= -\frac{k_h ac + a}{24} H^4 + \frac{k_h ab}{60} H^5 \\ C_2 &= -\frac{5}{360} k_h ab H^6 + \frac{k_h ac + a}{30} H^5 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

将式(23)代入式(21)可得位移 $u_{21}(z)$ 为

$$u_{21}(z) = \frac{-k_h ab}{360 E_w I} z^6 + \frac{k_h ac + a}{120 E_w I} z^5 + \left(-\frac{k_h ac + a}{24 E_w I} H^4 + \frac{k_h ab}{60 E_w I} H^5 \right) z + \left(-\frac{5 k_h}{360 E_w I} ab H^6 + \frac{k_h ac + a}{30 E_w I} H^5 \right) \quad (24)$$

2.2.2 由剪力引起的位移 u_{22}

对于悬臂梁, 剪力 $v(z)$ 和切应力 τ 满足关系如下:

$$\frac{d\tau}{dz} = \frac{v(z)}{L} \quad (25)$$

其中:

$$\tau = G_w \frac{du_{22}(z)}{dz} \quad (26)$$

式中: G_w 为加筋墙体剪切模量, 按照文献[4]取值。

$$v(y) = \int_0^y p(z) dz = \frac{-k_h ab}{3} y^3 + \frac{k_h ac + a}{2} y^2 \quad (27)$$

同样将式(27) $v(y)$ 中的变量 y 替换成 z , 再将式(25)、(27)代入式(26), 化简可得

$$u_{22}(z) = \frac{-k_h ab}{60 G_w L} z^5 + \frac{k_h ac + a}{24 G_w L} z^4 + C_1 z + C_2 \quad (28)$$

将式(27)代入式(22)所示的边界条件, 可得

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{k_h ab}{12 G_w L} H^4 - \frac{k_h ac + a}{6 G_w L} H^3 \\ C_2 &= -\frac{k_h ab}{15 G_w L} H^5 + \frac{k_h ac + a}{8 G_w L} H^4 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

将式(29)代入式(28), 可得

$$u_{22}(z) = \frac{-k_h ab}{60 G_w L} z^5 + \frac{k_h ac + a}{24 G_w L} z^4 + \left(\frac{ab}{12 G_w L} H^4 + \frac{ac + a}{6 G_w L} H^3 \right) z - \frac{ab}{15 G_w L} H^5 + \frac{ac + a}{8 G_w L} H^4 \quad (30)$$

综上所述, 加筋土挡墙的总水平位移为

$$u = u_1 + u_{21}(z) + u_{22}(z) \quad (31)$$

2.3 参数取值

2.3.1 土的剪切模量 G

根据砂土模量的退化曲线, 土的剪切模量 G 与土的剪切应变有关。本文用初始剪切模量 G_0 来近似考虑土的剪切模量, 初始剪切模量 G_0 满足:

$$G_0 = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{k p_a (\sigma_n / p_a)^n}{2(1+\nu)} \quad (32)$$

式中: p_a 为大气压强; σ_n 为竖向应力, 这里取为 γh_i ; k 和 n 为非线性指标, 按文献[5]取值。

2.3.2 无量纲常数 K

无量纲常数 K 取值按文献[25]取值, 对于砂土, 滑移面上筋材拉力总和满足:

$$\sum_{i=1}^n T_i = k_h W_s - \frac{[(\cos \alpha \tan \varphi F_s) - \sin \alpha] W_s}{(\tan \varphi \sin \alpha / F_s) + \cos \alpha} \quad (33)$$

式中: F_s 为安全系数; W_s 为滑动楔形体总重量。

无量纲常数 K 满足:

$$K = \frac{2 \sum_{i=1}^n T_i}{\gamma H^2} \quad (34)$$

2.3.3 筋土复合模量 E_w 、 G_w

对于筋土复合模量 E_w 、 G_w , 按照文献[4]取值:

$$E_w = \left[\frac{(1-t)E}{1-\nu^2} + \frac{tE_a}{1-\nu_a^2} \right] (1-\nu_{hz}^2) \quad (35)$$

$$G_w = \frac{E_w}{2(1+\nu_{hz})} \quad (36)$$

式中: E 、 E_a 分别为土和筋材的弹性模量和拉伸模量; ν 、 ν_a 、 ν_{hz} 分别为土的泊松比、筋材的泊松比以及筋土等效泊松比。

2.4 理论验证

Liu 等^[5]针对静力作用下加筋土挡墙的位移提出了一种考虑筋土相对位移的计算方法, 并与 Damians 等^[27]数值计算的结果进行了对比。对比分析有加筋土挡墙模型参数如下: 挡墙高度为 16.7 m, 筋材拉伸模量为 44 000~132 000 kN/m, 靠近地基的 5 层筋材长度为 15.5 m, 其他筋材长度为 12 m。未加筋区和加筋区采用不同性质的填土, 未加筋区的填土重度为 20.8 kN/m³, 破裂角为 41°, 加筋区的填土重度为 21.8 kN/m³, 破裂角为 44°, 非线性常数 k 为 168, n 为 0.385 7。为了进一步分析本文基于不考虑筋土相对位移假设提出的理论方法(式(31))在静力作用下的适用性, 取地震水平加速度系数 k_h 为 0, 填土、筋材、复合泊松比分别为 0.15、

0.25、0.25,并结合上述参数进行了对比,具体对比结果如图5所示。

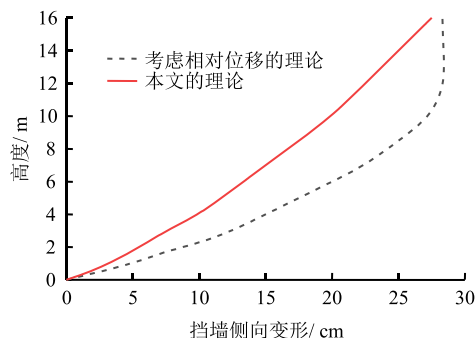


图5 两种理论对比

Fig.5 Comparison between two theories

通过对比可以看出:在静力作用下,本文以未考虑筋土相对位移为前提计算得到的挡墙位移比考虑相对位移计算得到的挡墙位移小,两种计算结果的差异在25%以下。由此可见,本文的计算理论可用于静力作用下挡墙位移计算中。

3 离心模型试验

3.1 试验概述

加筋土离心模型试验在400g·t大型离心机上进行,具体参考文献[28]。试验在钢制模型土工槽内进行,如图6所示,模型槽的内部尺寸为1500 mm×300 mm×500 mm(长×宽×高)。地基和墙后填土采用硅砂填筑,填筑时均分层压实,相对密度分别为 $D_r = 100\%$ 和 $D_r = 80\%$ 。根据模型箱与原型挡墙尺寸大小,选定模型相似比为50。

试验开始时,先施加离心加速度。离心加速度以5g/min的速度从0增加到50g。离心加速度达到50g后,等所测得的位移和应变测量值处于稳定状态时,开始施加地震加速度。然后施加地震加速度,试验共设置了7级地震加速度,其施加方式从0.2g

到0.8g逐级增加,加速度波形图参见文献[28]。各测点位移和应变以每次地震加速度施加后的稳定值为准。

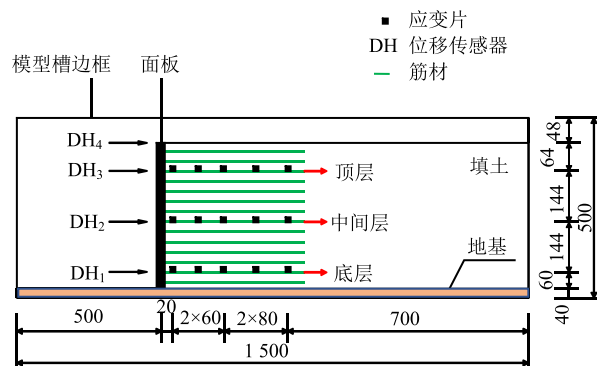


图6 试验模型简图(单位: mm)

Fig.6 Diagram of test model (unit: mm)

3.2 测量元件布设

3.2.1 回填土

填料的颗粒级配试验采用筛分法,参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)[29]进行颗粒级配曲线如图7所示。填料的其他物理参数如表1所示。

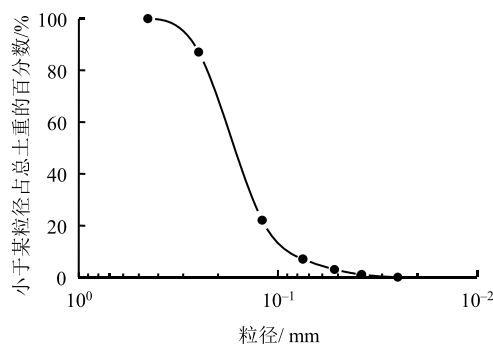


图7 颗粒级配曲线

Fig.7 Soil gradation curve

表1 填料物理参数

Table 1 Physical parameters of filling

填料名称	密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	各成分含量/%			平均粒径 /mm	最大干密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最小干密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 ($^\circ$)
		硅	砂	黏土					
硅砂	2.637	0.0	93.9	6.1	0.145	1.591	1.217	19.7	40.6

3.2.2 筋材

试验用筋材采用聚乙烯制材料制成,按照规范要求[30]进行拉伸试验,筋材具体筋材几何尺寸和物理力学参数如表2所示。

表2 筋材几何尺寸和物理力学参数

Table 2 Geometrical and physical parameters of reinforcement

宽度 /mm	厚度 /mm	2%伸长率拉伸强度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	5%伸长率拉伸强度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	极限拉伸强度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
300	0.5	20	40	64

3.3 测量元件布设

试验的测量元件包括应变片和位移传感器。为了观察筋材受力分布情况,试验共铺设了3层应变片,每层设置了5个应变片,如图8所示。同时为了测量挡墙面板侧向位移,在墙面上设置了4个位移传感器,如图9所示。

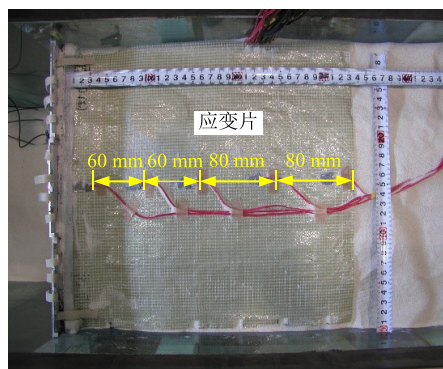


图8 应变片布置图

Fig.8 Layout of strain gauges

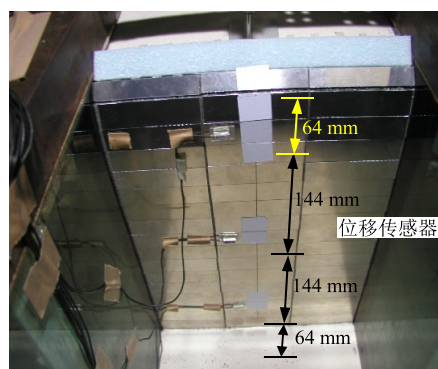


图9 位移传感器布置图

Fig.9 Layout of displacement sensor

3.4 试验结果

试验发现:在不同地震加速度下,筋材拉力分布和挡墙位移分布总体趋势基本一致。因此,为说明在地震作用下加筋区域位移和挡墙总水平位移沿墙高的变化规律,选取同一地震加速度($0.8g$)时筋材拉力和挡墙位移试验数据进行分析,分别如图10和图11所示。

3.4.1 筋材拉力

随着地震加速度的增加,各测点处筋材拉力值均逐渐增加。在地震加速度低于 $0.5g$ 时,各测点最大拉力值位于从左向右第2个应变片处。在地震加速度超过 $0.5g$ 时,拉力最大值开始向右移动。如图10所示,当地震加速度达到 $0.8g$ 时,各测点筋材拉力沿墙高和筋材铺设方向均呈现中间大、两端小的趋势。

3.4.2 挡墙位移

随着地震加速度的增加,同一墙高处面板变形逐渐增加。挡墙整体呈现中上部较大、其余位置较小的“鼓胀”位移模式。当地震加速度达到 $0.8g$ 时,最大累积位移量大致出现在挡墙 $0.9H$ 处,如图11所示。

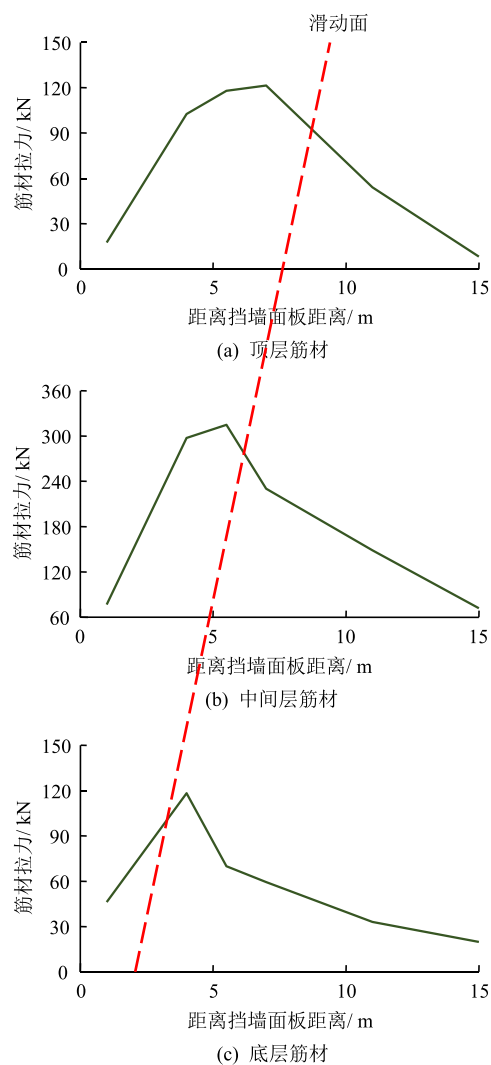


图10 加速度为 $0.8g$ 筋材拉力值

Fig.10 Reinforcement tensile force distribution ($0.8g$)

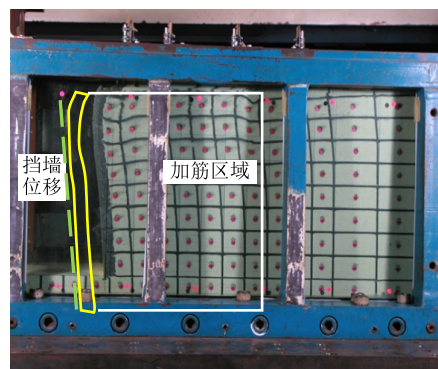


图11 加筋土挡墙峰值变形

Fig.11 Peak displacement of reinforced earth retaining wall

4 对比与分析

为了验证理论的合理性,同时得到随着加速度变化加筋区位移和总水平位移的变化规律,将筋材拉力分布和挡墙位移分布的试验值和理论值换算成试验原型数据进行对比分析。

4.1 筋材拉力分布

根据试验测得的应变乘以筋材拉伸模量求得筋材拉力,得到地震加速度作用下各层筋材沿铺设长度方向的拉力变化情况,如图 12 所示,与式 (12) 计算所得的各层筋材拉力值进行对比。由图可知:

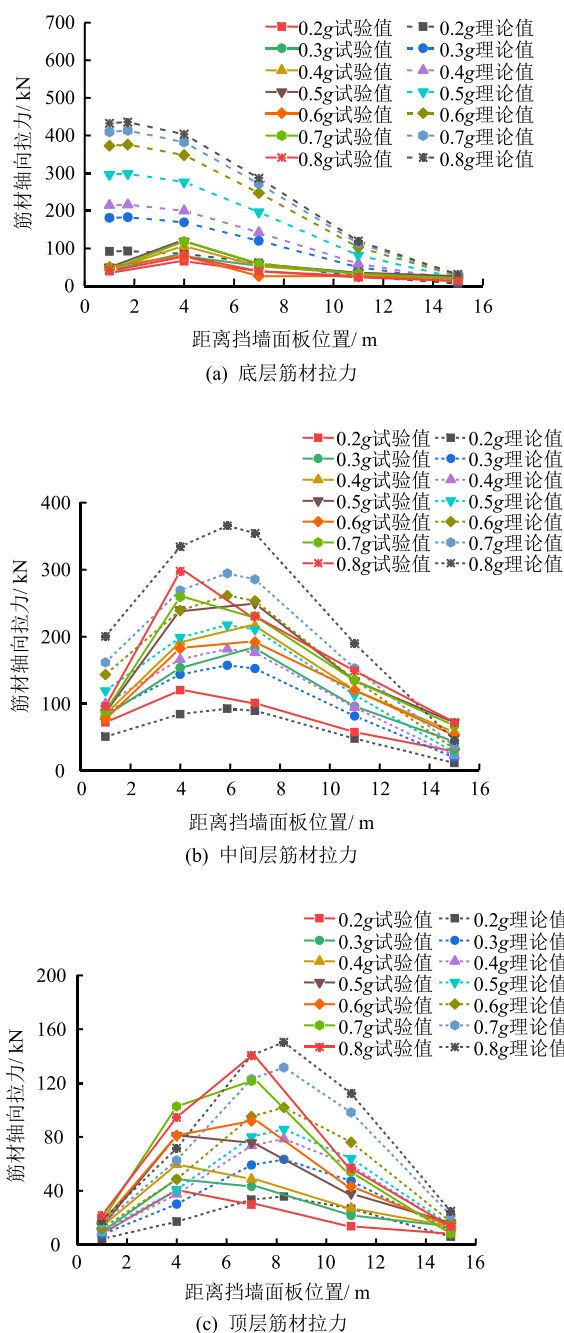


图 12 筋材沿长度方向的拉力分布
Fig.12 Tensile force distribution along the reinforcement length

(1) 筋材拉力沿铺设方向呈现先增大后减小,在滑动面附近出现最大值的趋势,本质上是由于位于自由段和锚固段的土体具有明显的运动趋势差异,会导致切应力反向,这在前面关于筋材拉力理论推导时已有体现。

(2) 随着地震加速度增加,筋材拉力变化呈现单调递增的趋势,这是由于地震加速度的增加引起土体运动趋势增加,进而引起筋土切应力和筋材拉力增加。

(3) 对于中间层和顶层筋材而言,试验值和理论值符合较好。而对于底层筋材而言,计算值明显偏大,这可能是由于筋材拉力最大值的计算是基于土压力线性增加的假设,从而导致其计算值偏大。

4.2 挡墙位移分布

将地震作用下 4 个位移传感器测得的挡墙累积位移值进行汇总,得到了不同地震加速度下加筋土挡墙侧向位移沿墙高的分布,如图 13 所示,与公式 (31) 计算得到挡墙位移的理论值进行对比。由图可知:

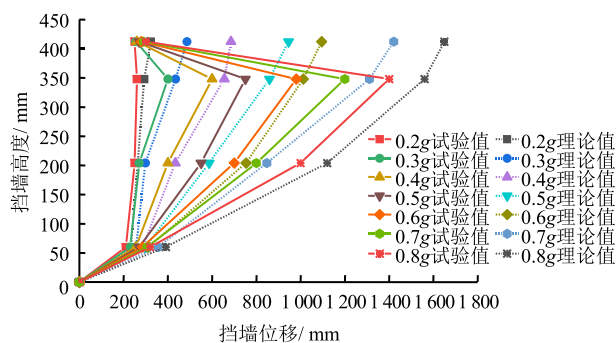


图 13 挡墙位移沿墙高的分布
Fig.13 Displacement distribution along the wall height

(1) 在地震作用下,挡墙水平位移沿墙高呈现单调递增的趋势,这是由于挡墙底端为固定约束,整体可视为悬臂梁,这与前文 2.2 节的分析一致。对于顶部,由于要使筋材起到永久锚固的作用,顶端筋材要足够长,因此,模型试验中顶部筋材采取返包形式,这种形式相当于对端部施加了约束,造成位移的减小。

(2) 随着地震加速度的增加,挡墙动位移呈现单调递增的趋势。这是由于随着地震加速度的增加,动土压力增加,继而导致挡墙侧向位移的增加。

(3) 理论的位移值略高于试验值,一方面可能是由于土压力线性增加的假设,导致加筋区域位移计算值偏大;另一方面则可能是由于模型顶端有一定约束,而计算中是假设为悬臂梁结构,其顶部为

自由端。

综上所述, 试验和理论均表明挡墙位移总体沿墙高自下而上呈现逐渐增大的趋势, 二者较为吻合。

5 结 论

运用 Mindlin 位移理论和拟动力法对加筋土挡墙的加筋区域和未加筋区域两部分位移分别进行计算, 从而提出地震作用下加筋土挡墙的水平位移计算理论。为了验证理论的合理性, 本文对比了大型离心模型试验结果, 测得筋材拉力分布和挡墙位移分布。本文结论主要有以下几点:

(1) 首先, 基于 Mindlin 位移理论, 利用筋材拉伸与土体位移一致性条件, 结合地震作用下筋材拉力最大值的相关理论, 提出了一种计算挡墙加筋区域位移的理论方法。然后, 运用拟动力法, 结合悬臂梁位移计算理论, 提出了一种计算挡墙未加筋区域位移的理论方法。结合上述对挡墙加筋区域和未加筋区域分区计算位移理论, 提出了地震作用下加筋土挡墙的水平位移计算方法。

(2) 运用离心模型试验得到的不同地震加速度下筋材的拉力分布和挡墙位移结果进行对比分析, 验证了在同一地震加速度下, 筋材拉力沿铺设方向呈现先增大后减小, 在破裂面附近出现最大值的趋势。挡墙位移则沿高度方向大体呈现单调递增的趋势。

(3) 随着地震加速度的增加, 各层筋材拉力均逐渐增加, 但最大值位置逐渐向右移动, 这表明滑移面随着地震加速度增加逐渐向右移动。挡墙位移则随着地震加速度增大而增大。

参 考 文 献

- [1] 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 between netted and packaged reinforced soil retaining walls and recommendations for seismic design[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(11): 2072-2080.
- [2] 郑俊杰, 张军, 马强, 等. 路桥过渡段桩承式加筋路堤现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 34(2): 355-362.
ZHENG Jun-jie, ZHANG Jun, MA Qiang, et al. Experimental investigation of geogrid-reinforced and pile-supported embankment at bridge approach[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 34(2): 355-362.
- [3] 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 earth reinforcement[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(7): 1-8.
- [4] 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): 159-163.
YANG Guang-qing, ZHOU Min-juan, ZHANG Bao-jian. Study on the horizontal deformation of reinforced retaining walls of soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(7): 159-163.
- [5] LIU H B, YANG G Q. Analytical method for the lateral displacements of steel-reinforced soil walls on stiff foundations with incremental panel facings[J]. *Geotechnique*, 2015, 65(9): 728-739.
- [6] 李婷, 苏谦, 刘宝, 等. 加筋土挡墙水平位移解析计算与参数分析[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 51-60.
LI Ting, SU Qian, LIU Bao, et al. Analytical calculation and parametric analysis of lateral displacement of reinforced earth retaining walls[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(5): 51-60.
- [7] 王丽艳, 陈国兴, 井合进. 地震作用下土工格栅加筋土挡墙水平变形的拟静力算法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 28-34.
WANG Li-yan, CHEN Guo-xing, JING He-jin. Pseudo-static method for horizontal deformation of geo-grid reinforced earth retaining wall under earthquake[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(3): 28-34.
- [8] 刘华北. 考虑蠕变、地震效应的土工格栅砂性土加筋挡墙弹塑性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 128-132.
LIU Hua-bei. Elasto-plastic finite element analysis of geogrid-reinforced sandy soil retaining walls considering effect of creep and earthquake[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(6): 128-132.
- [9] 陈建峰, 田丹, 柳军修. 刚/柔性组合墙面加筋土挡墙内部破坏机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2353-2360.
CHEN Jian-feng, TIAN Dan, LIU Jun-xiu. Internal failure mechanism of reinforced soil walls with rigid/flexible facings[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(7): 2353-2360.
- [10] JIA X L, XU J L, SUN Y H, et al. Deformation analysis of reinforced retaining wall using separate finite element[J]. *Discrete Dynamics in Nature & Society*, 2018(1): 1-9.
- [11] CHAUDHARY B, HAZARIKA H, NISHIMURA K. Effects of reinforcement on the performance of breakwater foundation subjected to earthquake loadings[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 11(2): 186-197.
- [12] LIU H B, WANG X Y, SONG E X. Long-term behavior of GRS retaining walls with marginal backfill soils[J].

- Geotextiles and Geomembranes**, 2009, 27(4): 295-307.
- [13] 徐鹏, 蒋关鲁, 邱俊杰, 等. 整体刚性面板加筋土挡墙振动台模型试验研究[J]. **岩土力学**, 2019, 40(3): 998-1004.
- XU Peng, JIANG Guan-lu, QIU Jun-jie, et al. Shaking table tests on reinforced earth retaining walls with full-height rigid facing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 998-1004.
- [14] YAZDANDOUST M. Investigation on the seismic performance of steel-strip reinforced-soil retaining walls using shaking table test[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2017, 97: 216-232.
- [15] 朱宏伟, 姚令侃, 陈晓龙, 等. 土工格栅返包土工袋加筋土挡墙的地震响应分析及设计建议[J]. **岩土工程学报**, 2015, 39(2): 319-326.
- ZHU Hong-wei, YAO Ling-kan, CHEN Xiao-long, et al. Seismic behaviors and design recommendations of ecological bag-reinforced retaining wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 39(2): 319-326.
- [16] ANASTASOPOULOS I, GEORGARAKOS T, GEORGI-ANNOU V, et al. Seismic performance of bar-mat reinforced-soil retaining wall: shaking table testing versus numerical analysis with modified kinematic hardening constitutive model[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2010, 30(10): 1089-1105.
- [17] WANG L P, ZHANG G, ZHANG J M. Centrifuge model tests of geotextile-reinforced soil embankments during an earthquake[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2011, 29(3): 222-232.
- [18] 李浩, 罗强, 张良, 等. 衡重式加筋土路肩挡墙土工离心模型试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2014, 36(3): 458-465.
- LI Hao, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Centrifugal model tests on shoulder balance weight retaining wall with reinforced earth[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(3): 458-465.
- [19] RICHARDS R, HUANG C, FISHMAN K L, et al. Seismic earth pressure on retaining structures[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2000, 125(9): 771-778.
- [20] 刘续, 唐晓武, 申昊, 等. 加筋土结构中筋材拉拔力的分布规律研究[J]. **岩土工程学报**, 2013, 35(4): 800-804.
- LIU Xu, TANG Xiao-wu, SHEN Hao, et al. Stress distribution of reinforcement of reinforced soil structures under drawing force[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(4): 800-804.
- [21] CAO L C, XIAO F U, WANG Z J, et al. Seismic responses of the steel-strip reinforced earth retaining wall with full-height rigid facing from shaking table test[J]. **Journal of Mountain Science**, 2018, 15(5): 1137-1152.
- [22] 郑俊杰, 罗先国, 付海平, 等. 基于 H&R 土拱模型的桩承式加筋路堤分析[J]. **华中科技大学学报(自然科学版)**, 2019, 47(1): 50-54.
- ZHENG Jun-jie, LUO Xian-guo, FU Hai-ping, et al. Analysis of geosynthetic-reinforced pile-supported embankment based on H&R soil arching model[J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2019, 47(1): 50-54.
- [23] 吕伟华, 缪林昌, 王非. 基于不完全土拱效应的土工格栅加固机制与设计方法[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(3): 632-639.
- LÜ Wei-hua, MIAO Lin-chang, WANG Fei. Mechanism of geogrid reinforcement based on partially developed soil arch effect and design method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(3): 632-639.
- [24] 尤春安. 全长粘结式锚杆的受力分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2000, 19(3): 79-81.
- YOU Chun-an. Mechanical analysis on wholly grouted anchor[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(3): 79-81.
- [25] 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 slice method for analyzing the stability of the reinforced retaining wall under seismic load[J]. **China Railway Science**, 2009, 30(1): 36-40.
- [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] DAMIANS I P, BATHURST R J, JOSA A, et al. Numerical analysis of an instrumented steel reinforced soil wall[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2014, 15(1): 04014037.
- [28] TSUJI S, TATTA N, WANG Z J, et al. Seismic performance of geotextile-reinforced soil wall with double facing system: dynamic centrifuge model test[J]. **Geosynthetics Engineering Journal**, 2011, 26: 47-54.
- [29] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of People's Republic of China. GB/T50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [30] 吕静, 郑宇英, 徐路, 等. GB/T 15788—2017 土工合成材料 宽条拉伸试验方法[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2017.
- LÜ Jing, ZHENG Yu-ying, XU Lu, et al. GB/T 15788—2017 Geosynthetics—Wide-width tensile test[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2017.