

DOI: 10.11779/CJGE201801012

弹性索理论在加筋土挡墙结构设计中的应用研究

王宗建^{1, 2}, 马书文^{*2}, 唐小双², 吴近明², 智贤平¹, 卢 谅¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘要: 在差异沉降现象下, 现阶段关于加筋土挡墙面板与筋材连接处的结点应力及筋材的变形情况的研究尚少。例如软土地区地基较软处加筋土挡墙易发生差异沉降, 其相关理论的不完善也导致了加筋土挡墙的区域适用性降低。为完善加筋土挡墙的设计理论, 运用弹性索理论为理论基础, 以加筋土挡墙面板与筋材的连接处为研究对象, 结合现有的加筋土挡墙变形及其土压力计算理论, 提出了一套差异沉降下加筋土挡墙筋材应力分布及其变形曲线的计算方法。通过理论分析, 并结合室内模型试验数据验证了该方法的可行性和准确性。该方法具有计算简便, 适用广泛等特点, 能够较好地解释面板与筋材连接处的破坏形式, 对完善加筋土挡墙的设计理论, 特别是沉降控制设计方面具有一定的意义。

关键词: 加筋土挡墙; 节点应力; 弹性索理论; 差异沉降; 侧向土压力

中图分类号: TU433 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)01-0122-08

作者简介: 王宗建(1979-), 男, 辽宁大连人, 教授, 主要从事岩土工程等方面的教学和研究工作。E-mail: wangzongjiansky@163.com。

Application of elastic cable theory in design of reinforced earth structure

WANG Zong-jian^{1,2}, MA Shu-wen², TANG Xiao-shuang², WU Jin-ming², ZHI Xian-ping¹, LU Liang¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of River & Ocean Engineering, Chongqing

Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Under differential settlement, the researches on the joint stress between the reinforced earth retaining wall panel and the reinforced materials and the deformation of the reinforced materials at the present stage are few. For example, differential settlement is prone to occur in the reinforced soil retaining wall of soft soil foundation, and the imperfection of the related theory also leads to the low regional applicability of reinforced soil retaining wall. In order to improve the design theory of the reinforced earth retaining wall, the elastic cable theory is regarded as the theoretical basis. For the joints between the reinforced earth retaining wall and the reinforced materials, based on the existing theories for the deformation and earth pressure of reinforced earth retaining wall, a set of methods for the stress distribution and deformation curves of the reinforced soil retaining wall are established under differential settlement. The feasibility and accuracy of the method are verified through the theoretical analysis and the experimental data of the indoor model. The proposed method has the advantages of simple calculation and wide application, and it can be used to explain the failure mode of the connection between the panel and the reinforced materials. It is of certain guiding significance for the design theory of the reinforced earth retaining wall, especially in the design of settlement control.

Key words: reinforced earth retaining wall; joint stress; elastic cable theory; differential settlement; lateral earth pressure

0 引言

差异沉降现象会造成加筋土挡墙的面板与筋材的断裂、分离, 进而导致面板失稳和墙体无法正常工作的后果^[1] (图 1, 2)。这与常规设计的加筋土挡墙中筋材的最大应力位置(滑体破裂面附近)^[2-3]有所不同, 工程设计规范中关于面板与筋材连接处的抗拉强度要求也没有做明确的规定^[4]。

近年来, 随着加筋土技术的快速发展, 其先后在

公路、桥梁、水运、边坡^[5]等行业得到了广泛应用和推广^[6]。其中加筋土挡墙的应用取得了很好的经济效益, 发挥了较好的工程性能^[7-8]。随着加筋土挡墙技术的不断发展, 相关的理论研究^[9]不断细分深入, 对应

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679018, 51409025); 重庆市博士后科研项目(xm2015074, xm2015076)

收稿日期: 2016-11-10

*通讯作者(E-mail: 976131833@qq.com)

的模型试验研究^[10-11]、加筋土的设计计算理论及数值分析^[12]等方面的研究也不断地深化。但加筋土挡墙的设计仍主要基于极限平衡^[13]、有限元等数值计算的方法, 对于加筋土挡墙局部破坏的破坏形式的研究比较少。



图1 加筋土挡墙实际变形破坏图示

Fig. 1 Actual deformation and failure of reinforced earth retaining wall

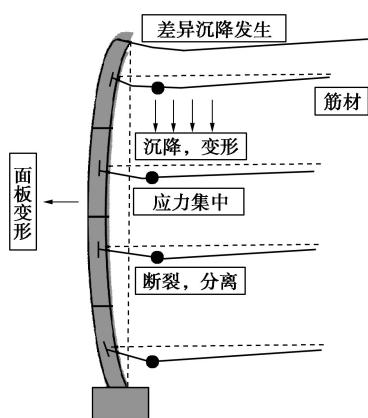


图2 加筋土挡墙变形破坏示意图

Fig. 2 Sketch of deformation and failure of reinforced earth retaining wall

近年来加筋土结构在差异沉降中的应用研究, 较成熟的研究成果不多见, 研究的方向大多在筋土界面的相互作用机理、筋材的力学特性以及现场沉降观测等方面。而对于差异沉降下加筋土结构相关理论的研究尚少, 尤其是在预测某一特定情况下差异沉降加筋土结构的变形规律、受力情况等方面, 相关的理论研究更是少见。本文通过弹性索理论对加筋土挡墙结构在差异沉降下筋材的变形形态、应力分布进行理论分析, 提出一套差异沉降下加筋土挡墙筋材应力分布及其变形曲线的计算方法。结合室内模型试验, 验证了本文研究成果的可行性和准确性, 为加筋土挡墙结构的设计提供必要的分析理论和计算方法。

1 加筋土挡墙结构设计的理论研究

1.1 弹性索理论的相关参数研究

弹性索理论在实际桥梁工程设计中应用广泛, 例如悬索桥设计中计算悬索在荷载作用下的变形特性。然而悬索桥只是弹性索理论的一个特例, 即索的两个固定端在同一水平线上, 一般情况下的悬索变形形态如图3所示。

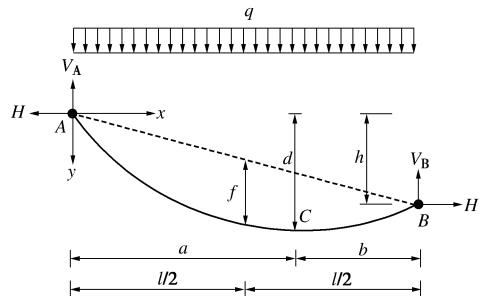


图3 悬索变形形状图示

Fig. 3 Deformation of elastic cable

图3中: A 点与 B 点为索的两个固定端; H 为索的水平张力; V_A 为索中 A 点的支座反力; q 为索所受的均匀荷载; h 为 A,B 两固定端的竖向距离; f 为跨中挠度; l 为索 AB 的跨度。

建立直角坐标系, 计算 A,B 两点所受 x 轴, y 轴方向张力^[14]分别为

$$\{T_x(x), T_y(x)\} = \left\{ H, V_A - \int_0^x q dx \right\} \quad (1)$$

由边界条件可解得

$$y(x) = \frac{q}{2H} x(l-x) + \frac{h}{l} x \quad , \quad (2)$$

式中, 水平张力 H 为未知参数。

如图3可知曲线过点

$$(x, y) = \left(\frac{l}{2}, \frac{h}{2} + f \right) \quad , \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中, 可得跨中挠度 f 的表达式为

$$f = \frac{ql^2}{8H} \quad . \quad (4)$$

通过上述分析可进一步得到 A,B 两固定端的支座反力分别为

$$\begin{aligned} V_A &= \frac{ql}{2} \left(1 + \frac{h}{4f} \right) , \\ V_B &= \frac{ql}{2} \left(1 - \frac{h}{4f} \right) . \end{aligned} \quad (5)$$

此时, 索中变形最低点 C 与固定端 A 的垂直间距 d 的表达式为

$$d = f + \frac{h}{2} \left(1 + \frac{h}{8f} \right) \quad . \quad (6)$$

由式(1)中 x 轴与 y 轴方向张力分量的分布情况, 通过三角函数关系, 可解得索张力 T 随 x 变化的表达

式为

$$T = H \sqrt{1 + \left[\frac{8f}{l^2} \left(\frac{l}{2} - x \right) + \frac{h}{l} \right]^2} \quad . \quad (7)$$

1.2 弹性索理论应用于加筋土挡墙结构中的研究

差异沉降变形与弹性索的变形有以下出入：二者受力状态相似，挠度曲线不同，差异沉降变形是弹性索变形的一个特例。一般情况下，加筋土挡墙中筋材在面板附近形成悬空的凹形曲线，该段筋材受到的拉应力较大，若超过其抗拉极限值，就会发生断裂破坏。为了研究加筋土挡墙的破坏形式，本节选取面板附近筋材悬空部分作为研究对象，对其进行受力分析。为了简化计算提出以下假设：①墙后土压力由筋材承受，面板只起到装饰及防漏土的作用，不提供额外的抗力。即假设面板会将所承受的侧向土压力全部传递至板后的筋材；②将筋材所受的竖向力简化为均布荷载 $q^{[15]}$ ；③忽略填料与面板接触处的摩擦力。

由以上假设可得出筋材的受力图，如图 4 所示。

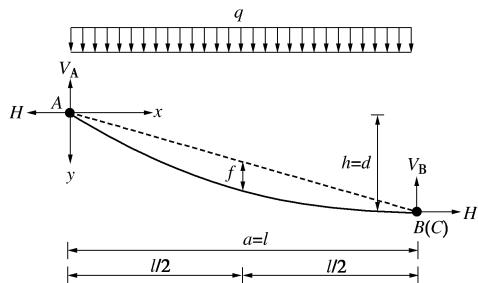


图 4 差异沉降段筋材受力、变形曲线

Fig. 4 Stress and deformation curve of reinforced materials in differential settlement section

图 4 中： A 点为面板与筋材的连接点； $B(C)$ 点为筋材的差异沉降最大点，其后筋材的沉降量一致，不再进行讨论； l 为筋材弯曲变形段的水平投影长度； h 为筋材的变形沉降量； f 为筋材弯曲段的跨中挠度； V_A ， V_B 分别为 A, B 两点筋材的竖向反力，其他参数如弹性索理论。

用静力平衡条件对筋材受力形式进行分析：

B 点为筋材悬空（其下方无外力作用）的临界点，其下部填料对筋材支持力为 0，即

$$V_B = 0 \quad , \quad (8)$$

由竖直方向上的静力平衡可以得到

$$V_A = ql \quad , \quad (9)$$

由力矩平衡条件 $\sum M = 0$ ，可以得到

$$\frac{ql^2}{2} = Hh \quad . \quad (10)$$

至此，引入弹性索理论对筋材进行受力分析。将筋材的受力情况与弹性索理论的一般情况进行对比，

可以看到简化后的筋材受力为弹性索理论计算的一种特殊情况，该状态下 B, C 两点重合，有

$$b = 0, h = d \quad . \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (6) 得

$$h = 4f \quad . \quad (12)$$

将式 (7) 作适当处理，将节点张力转换为节点应力，求得筋材的应力分布状态如下：

$$T = \frac{H}{A} \sqrt{1 + \left[\frac{2h}{l^2} \left(\frac{l}{2} - x \right) + \frac{h}{l} \right]^2} \quad , \quad (13)$$

式中， A 为筋材的截面面积。工程中沉降量 h 、截面面积 A 通常为已知参数，筋材的水平拉力 H 和筋材弯曲段的水平投影长度 l 为未知参数。

1.3 修正后的弹性索理论参数 H, l 的求解

(1) 侧限条件下挡墙的相关参数求解

图 4 中筋材的受力形式相当于侧限的加筋土挡墙，侧限的作用效果相当于挡墙处于静止土压力状态，挡墙面板无水平位移，因此，土压力对筋材的变形和应力分布不造成影响。

未知参数 H, l 的推导过程如下：

将式 (10) 代入式 (2) 中，消去水平张力 H ，得到变形曲线 y 的表达式为

$$y = 4f \left[\frac{x}{l} - \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right] + \frac{h}{l} x \quad , \quad (14)$$

对 x 求导得

$$\frac{dy}{dx} = \left[4f \left(\frac{1}{l} - \frac{2x}{l^2} \right) + \frac{h}{l} \right] \quad . \quad (15)$$

根据胡克定律，可求得由于筋材水平张力增量 $(H - H_0)$ 及温度变化 Δt 引起的筋材长度变化 ΔS_1 为

$$\Delta S_1 = \frac{H - H_0}{EA} l + \alpha \cdot \Delta t \cdot l \quad . \quad (16)$$

式中 E 为筋材的弹性模量； A 为筋材的截面面积； α 为筋材的线膨胀系数； Δt 为温差。本文中筋材的初始水平张力 H_0 为 0。

根据式 (10) 的筋材变形曲线确定筋材在荷载作用下的几何伸长，由于初始状态下筋材是平铺的，即初始伸长 S_0 为 0，所以筋材长度变化 ΔS_2 为

$$\Delta S_2 = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} dx \quad . \quad (17)$$

由于筋材的变形属于小垂度变形， $(dy/dx) \ll 1$ ，运用 Taylor 级数展开法将上式中的根号项展开，若取前两项，式 (17) 变为

$$\Delta S_2 = \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \quad . \quad (18)$$

令式 (16) 和式 (18) 相等，有

$$H = \frac{EA}{l} \left[\frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx - \alpha \cdot \Delta t \cdot l \right] . \quad (19)$$

将式(15)代入式(19), 有

$$H = EA \left(\frac{2h^2}{3l^2} - \alpha \cdot \Delta t \right) . \quad (20)$$

将式(10)和式(20)联立, 有

$$\frac{ql^2}{2h} = EA \left(\frac{2h^2}{3l^2} - \alpha \cdot \Delta t \right) . \quad (21)$$

忽略温差效应影响, 式(21)经整理得

$$l = 4 \sqrt{\frac{EAh^3}{192q}} . \quad (22)$$

将式(22)代入式(13), 得到筋材结点张力 T 的表达式为

$$T = \frac{2Eh^2}{3l^2} \sqrt{1 + \left[\frac{2h}{l^2} \left(\frac{l}{2} - x \right) + \frac{h}{l} \right]^2} . \quad (23)$$

式中 E 为筋材的弹性模量, 可由拉伸试验测得; h 为筋材变形的沉降值, 通常为设计控制值; l 为筋材弯曲段的水平投影长度, 为待求参数。

(2) 无侧限条件下挡墙的相关参数求解

与侧限加筋土挡墙相比, 无侧限加筋土挡墙的墙面板有侧向土压力作用。因此, 对于一般加筋土挡墙结构来说, 在面板与筋材的连接处, 筋材的受力由差异沉降引起的水平张力 H 和侧向土压力 E_a 组成, 由此得到筋材结点处受水平向合力 H_1 为

$$H_1 = H + E_a , \quad (24)$$

式中, 水平张力 H 可由式(20)求得。

E_a 的计算方法参考现行的相关规范^[3], 有

$$E_{ai} = K_i W_i S_x S_y . \quad (25)$$

式中 E_{ai} 为第 i 层筋材所承受的墙后土压力; S_x , S_y 分别为面板的长度、宽度; K_i 为 Z_i 处土压力系数, 当 $Z_i \leq 6$ m 时, 有

$$K_i = K_0 \left(1 - \frac{Z_i}{6} \right) + K_a \frac{Z_i}{6} , \quad (26)$$

当 $Z_i > 6$ m 时, 有

$$K_i = K_a , \quad (27)$$

式中, K_0 , K_a 分别为填料的静止土压力系数和主动土压力系数; W_i 为第 i 层筋材所受法向压力, 表达式为

$$W_i = \gamma Z_i + q_1 , \quad (28)$$

式中, Z_i 为墙顶至第 i 层加筋材料的距离, γ 为填料重度, q_1 为均布荷载。

联立式(21)、(24)、(25), 有

$$H_1 = EA \frac{2h^2}{3l^2} + K_i W_i S_x S_y , \quad (29)$$

式中, 水平张力合力 H_1 和筋材弯曲段的水平投影长度

l 为待求参数。

2 模型试验

2.1 试验装置

本次试验在木制模型槽中进行, 该模型槽装置的内壁尺寸为 72 cm×35 cm×70 cm, 其中 72 cm×70 cm 的侧面为钢化玻璃制成, 可以由此观察试验中筋材随填料沉降而发生变形的过程, 并可在沉降稳定后画出筋材变形的实测曲线。模型简图如图 5 所示。

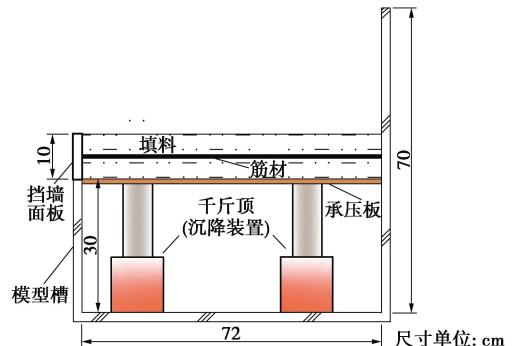


图 5 试验模型简图

Fig. 5 Diagram of test model

加筋土挡墙由面板、筋材及填料(土体)组成, 整个墙体由承压板托起约 30 cm, 承压板连接其下的 3 个千斤顶作为沉降发生装置, 千斤顶由同一个液压管控制, 可实现同步升降以模拟填料与墙面板的差异沉降。根据试验模型尺寸及受力大小选择适当的材料作为挡墙的加筋体, 本文使用纱网模拟加筋土挡墙的筋材, 尺寸为 35 cm×10 cm×1 cm 的木板模拟挡墙面板。填料装填速度控制为每 cm 高度上装填 4 kg, 并在钢化玻璃面铺设 5 cm×5 cm 红砂网格线以便观察沉降过程中填料及筋材的变形情况。

试验装置实体图如图 6 所示。

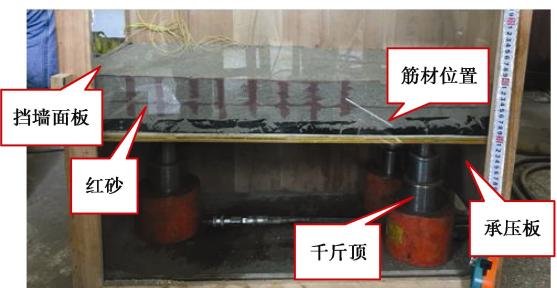


图 6 试验模型实物图

Fig. 6 Physical diagram of test model

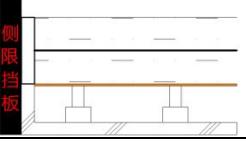
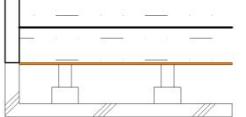
2.2 试验方案

如图 6 所示, 模拟加筋土挡墙的差异沉降, 选取两种不同形式的加筋土挡墙: #1 加筋土挡墙为侧限挡墙; #2 加筋土挡墙为无侧限挡墙。试验测得该两种挡

墙在不同沉降量下筋材的应力分布及变形状态, 将试验数据与本文的理论计算结果相对比, 检验该方法的可行性和准确度。试验挡墙的尺寸如表 1 所示。

表 1 加筋土挡墙的试验尺寸

Table 1 Experimental dimensions of reinforced earth retaining wall

挡墙 编号	面板高 度/cm	筋材间距 /cm	面板 约束	图例
#1	10	10	侧限	
#2	10	10	无侧限	

面板的宽度为模型槽的内壁宽度 35 cm, 板后填料沉降量每增加 3 cm 停止沉降, 变形稳定后测一次数据, 其中筋材的应力由筋材上的应变片测得, 每条筋材布设 4 个应变测量点, 筋材变形由钢尺在钢化玻璃面测得(精确到 mm)。由此绘制实测的筋材变形及应力分布曲线, 并同理论计算进行比较。达到以下 3 种状态试验终止: ①板后填料无法继续沉降; ②筋材断裂, 面板失稳; ③沉降量达到 12 cm, 即千斤顶无法继续下降。

2.3 试验材料的物理力学特性

(1) 填料的物性试验

填料(砂土)的物性试验: 包括筛分试验、比重试验、直接剪切试验和击实试验, 参照《土工试验方法标准》^[16]进行。

填料的颗粒级配试验采用筛分法, 颗粒级配曲线如图 7 所示。填料的比重试验采用比重瓶法测定, 填料的比重 G_s 为 2.55。

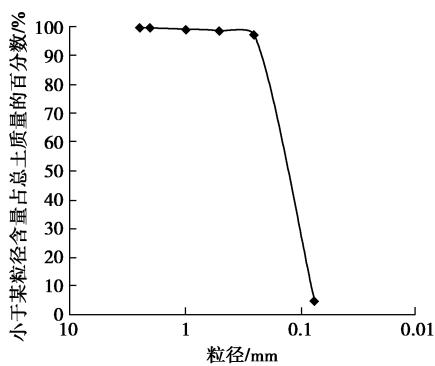


图 7 填料颗粒级配曲线

Fig. 7 Distribution curve of particle sizes

填料的抗剪强度用直接剪切仪测定, 抗剪强度曲线如图 8 所示, 填料的黏聚力 c 为 18.7 kPa, 内摩擦角 φ 为 34.7°。

填料的击实试验采用轻型标准击实仪进行试验,

最大干密度为 1.816 g/cm³, 最小干密度为 1.516 g/cm³, 最优含水率为 13.8%, 湿密度为 1.785 g/cm³。

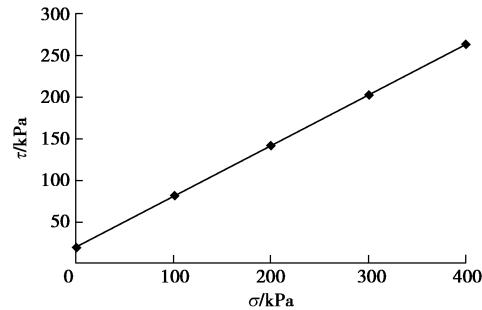


图 8 填料的抗剪强度曲线

Fig. 8 Shear strength curve of filler

(2) 筋材的拉伸试验

本文在拉伸试验仪上进行标准的拉伸试验, 具体步骤可参照如《土工织物—宽幅拉伸试验》^[17]等规范。试验所用筋材的尺寸为 20 cm×5 cm, 为了消除拉伸弯矩的影响, 本文采用对筋材正反两面均贴应变片的方法来测试筋材的应变, 测试的应变为

$$\varepsilon_{\text{测}} = (\varepsilon_{\text{正}} + \varepsilon_{\text{反}})/2 \quad (30)$$

根据筋材在不同拉力状态下的测试数据计算筋材的实际应变和测试应变($\mu\varepsilon$), 作出实际应变和测试应变的关系图, 拟合实际应变、测试应变的关系函数如图 9 所示。

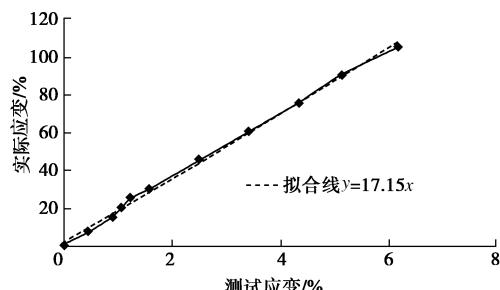


图 9 筋材的实际应变与测试应变关系曲线

Fig. 9 Relationship between actual strain and test strain of reinforced materials

由图 9 知, 实际应变与测试应变的线性关系式为

$$\varepsilon_{\text{实}} = 17.15\varepsilon_{\text{测}} \quad (31)$$

由于筋材的厚度无法准确测出, 故本文求取筋材的线弹性模量 E_t (t 为筋材厚度, 本文取 $t=0.1$ cm) 以找到应力应变关系。计算过程如下:

单位厚度筋材的应力 σ 为

$$\sigma = E \cdot 1 \cdot \varepsilon_{\text{实}} = E \cdot 17.15\varepsilon_{\text{测}} \quad , \quad (32)$$

线弹性模量 E_t 的表达式为

$$E_t = F/b/\varepsilon_{\text{实}} \quad , \quad (33)$$

式中, F 为所施加的拉力值, b 为筋材宽度(5 cm)。

计算结果如图 10 所示。

由图 10 可知, 筋材的平均线弹性模量 E_t 为 25.3 kN/m。

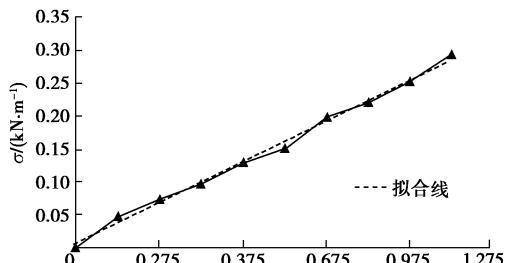


图 10 筋材的应力应变曲线

Fig. 10 Stress strain curves of steel bars

2.4 试验过程

试验过程如下: ①图 5 所示, 安放加筋土挡墙的墙面板, 承压板由千斤顶升至预设位置, 板上铺一层塑料薄膜以防止漏砂; ②在承压板上分层装填填料并保证压实度均匀, 在钢化玻璃面铺设 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 红砂网格线以便观察沉降过程中填料及筋材的变形情况(如图 6); ③铺设的墙后筋材装有事先贴好的双面应变片, 每层筋材设 4 个测量点, 挡墙装填完毕的实物图如图 6 所示; ④待挡墙自稳定后, 测试一次应变片的数据作为初始值; ⑤控制千斤顶缓慢沉降, 每沉降 3 cm 读取一次应变片的数据, 并用钢尺在钢化玻璃面测得筋材变形, 如此直至试验结束。

3 试验结果及分析

图 11, 12 分别为侧限、无侧限加筋土挡墙沉降 3 cm 状态下筋材的实际变形状况。



图 11 侧限加筋土挡墙的实际变形形态

Fig. 11 Actual deformation of reinforced earth retaining wall with lateral restriction



图 12 无侧限加筋土挡墙的实际变形形态

Fig. 12 Actual deformation of reinforced earth retaining wall without lateral restriction

由图 11, 12 中筋材的变形可看出: 近面板处的筋材变形类似于悬索效应中材料的变形, 越靠近面板筋材的应力越大。如果上覆荷载足够大或者沉降量较大, 筋材的应力就可能超过自身的抗拉极限发生断裂, 致使挡墙无法正常工作。

随着差异沉降的增加, 板后筋材的变形越来越明显, 板后的筋材悬空段长度也不断增长, 悬索效应越来越明显, 筋材所受的拉力也越来越大。

根据试验数据, 运用本文 1.2 节及 1.3 节的理论研究成果, 计算并做出各种状态下筋材的变形曲线。试验挡墙模拟的沉降量取值分别为 3, 6, 9, 12 cm, 两组试验中筋材的变形曲线实测值与理论计算值的对比图如图 13, 14 所示。

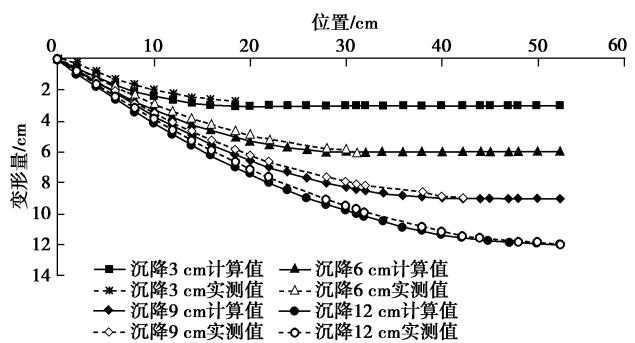


图 13 #1 墙体筋材的变形曲线对比图

Fig. 13 Comparison of deformation curves of bars of first retaining wall

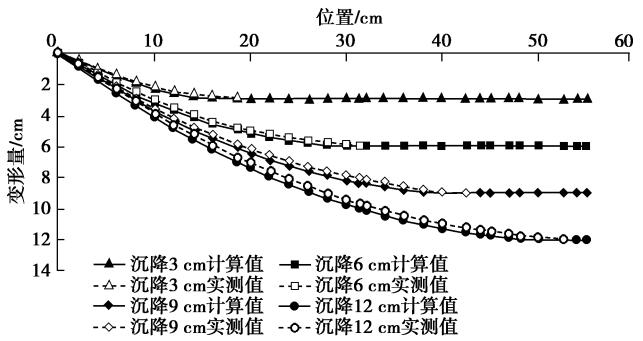


图 14 #2 墙体筋材的变形曲线对比图

Fig. 14 Comparison of the deformation curves of second wall bars

由图 13, 14 可看出: 关于筋材的变形特性, 理论计算值和实际测量值基本保持一致, 即将修正后的弹性索理论应用到在差异沉降下加筋土挡墙中筋材的变形研究是可行的。

挡墙模拟试验中, 筋材的应力实测值由应变片测量值计算; 理论值由文中 1.3 节的理论分析计算。沉降量取值分别为 3, 6, 9, 12 cm, 筋材所受应力的实测值与理论计算值的对比如图 15, 16 所示。

由图 15, 16 可以看到, 筋材应力的实测值与理论

值基本一致, 运用本文的计算方法计算差异沉降下加筋土挡墙中筋材的应力分布是可行的。

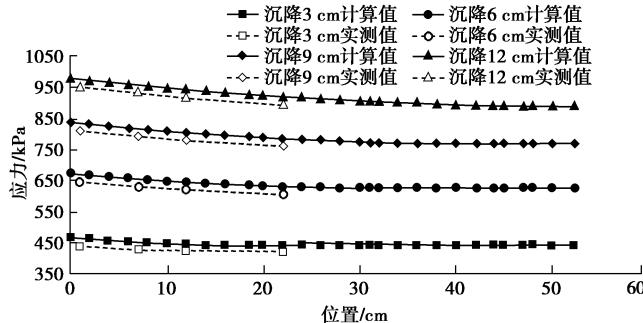


图 15 #1 挡墙筋材应力分布对比图

Fig. 15 Comparison of stress distribution of first retaining wall

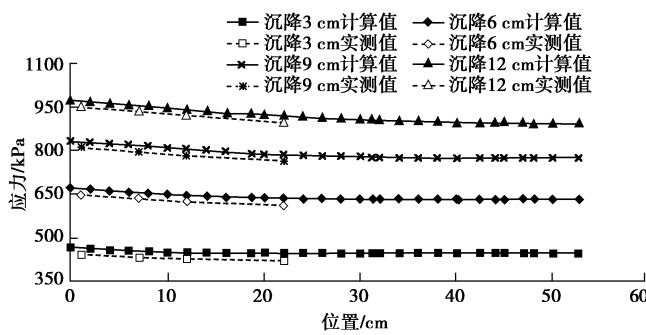


图 16 #2 挡墙筋材应力分布对比图

Fig. 16 Comparison of stress distribution of second retaining wall

4 结 论

针对目前加筋土挡墙在差异沉降情况下容易在面板与筋材连接处发生应力集中—断裂—分离的现象, 本文运用了修正后的弹性索理论来分析挡面板与筋材连接处受力变形情况, 提出了一套筋材变形及应力的计算方法。该方法可用于加筋土挡墙结构中的沉降控制设计, 以及面板与筋材连接处筋材抗拉强度(连接强度)的计算, 对完善加筋土挡墙的设计理论具有一定的意义。另外, 本文通过室内试验验证了该计算方法的可行性和准确性。

(1) 根据在差异沉降条件下, 加筋土挡墙面板附近筋材的变形及受力情况, 本文对弹性索理论进行了修正, 并提出了一套差异沉降下加筋土挡墙筋材应力分布及其变形曲线的计算方法。

(2) 由室内模型实验的差异沉降数据得到的面板附近筋材的实测变形曲线, 与本文提出的修正后的弹性索变形曲线(图 4)基本一致。

(3) 通过两组室内试验, 分别对侧限加筋土挡墙和无侧限加筋土挡墙的筋材受力及变形特性进行观察, 试验中加筋土挡墙在差异沉降下筋材的变形及应力分布和本文提出的理论计算方法得出的结果基本保持一致, 即将修正后的弹性索理论运用到加筋土挡墙

结构设计中是可行的。

(4) 本文所讨论的筋材变形具有悬索形状, 这种变形相对比较“规整”, 筋材所受的竖向力也可简化为均布荷载。而实际工程中筋材的变形尚存在突变或不规则形状的可能性, 故本文的理论研究成果仅适用于近似悬链线的筋材变形情况, 对非悬索线变形情况尚待论证。

本文关于加筋土挡墙的理论假定和模型假定基于模型实验, 与实际工程中加筋土挡墙差异沉降破坏的差异性应进一步深入研究。

参 考 文 献:

- [1] 魏丽敏, 张军乐, 何群. 差异沉降对加筋土挡墙筋带内力与变形的影响[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(5): 89 - 93. (WEI Li-min, ZHANG Jun-le, HE Qun. Influence of differential settlement on internal force and deformation of the reinforcement in reinforced earth retaining wall[J]. China Railway Science, 2004, 25(5): 89 - 93. (in Chinese))
- [2] 山西省交通厅. 公路加筋土工程设计及施工规范汇编[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993. (Transportation Department of Shanxi Province. Compilation of engineering design and construction specification for highway reinforced soil[M]. Beijing: China Communications Press, 1993. (in Chinese))
- [3] 长沙铁道学院.湖南省加筋土支撑结构设计与施工规程(暂行)[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1994. (Changsha Railway Institute. Design and construction rules of reinforced soil retaining structure in hunan province (temporary)[M]. Changsha: National University of Defense Technology, 1994. (in Chinese))
- [4] JTJ015—91 公路加筋土工程设计规范[S]. 1993. (JTJ015—91 Design code for highway reinforced earth engineering[S]. 1993. (in Chinese))
- [5] WEN X, JIANG J, ZHANG C, et al. Experimental study on performance of multidirectional geogrid and its application in engineering of high slope[J]. Journal of Wuhan University of Technology Mater (Sci Ed), 2014, 29(4): 704 - 711.
- [6] 何光春. 加筋土工程设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000. (HE Guang-chun. Design and construction of reinforced earth engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2000. (in Chinese))
- [7] 王荣芳, 曹霞. 加筋土挡土墙在石环公路工程中的应用[J]. 市政技术, 2013(4): 40 - 42. (WANG Rong-fang, CAO Xia. Application of reinforced earth retaining wall in stone ring highway engineering[J]. Municipal Technology, 2013(4): 40 - 42. (in Chinese))

- [8] 黄国伟, 方鸿琪. 加筋土挡土墙结构的应用[J]. 工程勘察, 2000(6): 38 - 40. (HUANG Guo-wei, FANG Hong-qi. Application of reinforced earth retaining wall structure[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2000(6): 38 - 40. (in Chinese))
- [9] SONG Y, ZHENG Y, TANG X. Study on the FEM design of reinforced earth retaining wall with geogrid[J]. Engineering Sciences, 2010(3): 71 - 80.
- [10] ZHANG M X, ZHOU H. Model test on sand retaining wall reinforced with denti-strip inclusions[J]. Science China Technological Sciences, 2008, 51(12): 2269 - 2279.
- [11] CHEN Q, HE C R, ZHU F Q. Field measurement sand pullout tests of reinforced earth retaining wall[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004(2): 165 - 172.
- [12] WANG C, LUAN M, ZHU Z. Model test and numerical analysis on long-term mechanical properties of stepped reinforced retaining wall[J]. Transactions of Tianjin University, 2012, 18: 62 - 68.
- [13] OUYANG C J, XU Q, HE S M, et al. A generalized limit equilibrium method for the solution of active earth pressure on a retaining wall[J]. Journal of Mountain Science, 2013(6): 1018 - 1027.
- [14] Japan Society of Civil Engineers. Structural mechanics formula set[M]. 1st ed. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 1986.
- [15] 王祥, 徐林荣. 双级土工格栅加筋土挡墙的测试分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 220 - 224. (WANG Xiang, XU Lin-rong. Testing and analysis of reinforced earth retaining wall with double grade geogrid[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 220 - 224. (in Chinese))
- [16] GB/T 50123 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T 50123 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [17] British Standard. BS EN ISO 10319 Geotextiles Widewidth tensile test[S]. London: British Standard Institution, 2008.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创刊于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)