

加筋土数值计算的等效附加应力法*

Equivalent additional stress method for numerical analysis of reinforced soil

介玉新 李广信

(清华大学水利水电工程系, 北京, 100084)

中图法分类号 TU 43

作者简介 介玉新, 男, 1970 年生, 1993 年毕业于清华大学水利水电工程系水利水电工程建筑专业, 1998 年毕业于清华大学水利水电工程系岩土工程专业, 获博士学位, 现为清华大学水利水电工程系讲师。

1 前言*

Yang(1972)引入“等效周围压力”的概念^[1], 把三轴试验中筋的作用当成一个附加围压。加筋土试验的内摩擦角 φ 与未加筋土的内摩擦角几乎相同, 只是增加了粘聚力 c 。三轴试验中试样破坏时附加围压 $\Delta\sigma_{3f}$ 与粘聚力增量 Δc 的关系为

$$\Delta\sigma_{3f} = 2\Delta c \cdot \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (1)$$

当筋材为水平布置时, 有^[2,3]

$$\Delta c = R_f \sqrt{K_p} / 2\Delta H \quad (2)$$

式中 ΔH 为布筋间距; R_f 为试样破坏时筋材单位宽度所受的力(当三轴试验破坏为筋材拉断破坏时, R_f 即为筋材的拉断强度 R_T , 如果破坏是由于筋材过度变形引起的, R_f 就是试样破坏时筋中的应变与其模量之积)。

由式(1)、(2)可知

$$\Delta\sigma_{3f} = R_f / \Delta H \quad (3)$$

上述概念主要针对加筋土的极限平衡状态, 通常用于解释加筋土的强度机理。将这一概念加以引伸, 在加筋土的应力应变关系中考考虑筋材所能等效的附加应力的介入^[4], 这就是等效附加应力法的计算思路。

等效附加应力法的基本思路是把加筋土中筋的作用等效成附加应力沿筋的方向加在土骨架上, 取加筋土中的土体进行计算。具体地讲, 就是在有限元计算中只出现土单元, 筋的作用仅当成外力(等效附加应力)加在土单元上, 模拟筋材本身的单元并不出现。有限元计算中需要建立布筋方向上等效附加应力 $\Delta\sigma_r$ 与布筋方向上土单元应变 $\Delta\varepsilon_r$ 之间的关系如下:

$$\Delta\sigma_r = f(\varepsilon_r) \quad (4)$$

2 等效附加应力法在加筋土计算中的应用

由于比尺关系, 有限元网格划分的土单元中只包含有限层筋。如图 1, 假设土单元中只包含一层筋, 沿筋方向上土单元的伸长应变为 ε_r (压应变为正, 拉应变

为负), 筋材的应变为 ε_g , 筋中的力 T 可以通过筋材拉伸试验曲线确定。

$$T = F(|\varepsilon_g|) \quad (5)$$

于是筋所等效的附加应力为

$$\Delta\sigma_r = \frac{T}{\Delta H} = \frac{F(|\varepsilon_g|)}{\Delta H} = \frac{F(\alpha|\varepsilon_r|)}{\Delta H} \quad (6)$$

其中 ΔH 为土单元垂直于布筋方向上的边长; $\alpha = \varepsilon_g / \varepsilon_r$ 是筋中应变与土单元沿筋方向上应变的比例系数。如果筋土变形协调, 则有 $\alpha = 1$, $\varepsilon_g = \varepsilon_r$ 。

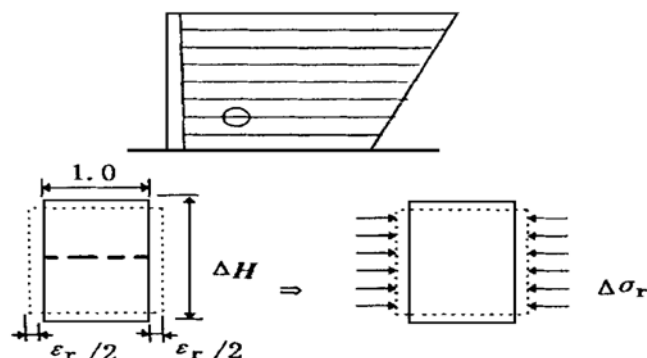


图 1 等效附加应力法的单元划分

Fig. 1 Element for equivalent additional stress method

笔者依此思路编制了有限元程序 NMFRS, 对一模型挡墙(Denver 墙)进行计算^[5]。

Denver 墙是美国克罗拉多大学的 T·H·Wu 等在室内建造的分层布筋的加筋土挡墙, 包括一个粘性土挡墙和砂土挡墙^[6]。模型墙高 304.8 cm, 长 208.3 cm, 宽 121.9 cm。加筋层数为 12 层, 除最低层间距为 17.8 cm 外, 其他各层间距均为 27.9 cm。最低和最顶层布筋长度为 198.1 cm, 其他各层均为 167.6 cm, 折返段长度 91.4 cm。Denver 挡墙的几何尺寸如图 2。

本文给出了其中的粘性土挡墙的计算成果, 计算网格如图 3(图中虚线所示的是筋的位置)。土单元采用邓肯张 $E-\mu$ 模型。

* 国家自然科学基金资助项目(No. 59479016)

到稿日期: 1998-09-24

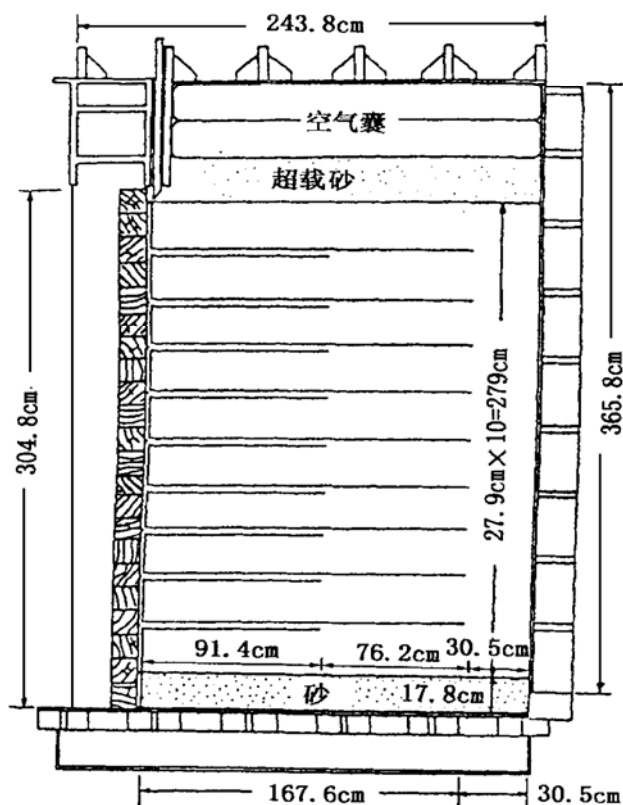


图2 Denver 墙的几何尺寸

Fig. 2 Sketch of Denver wall

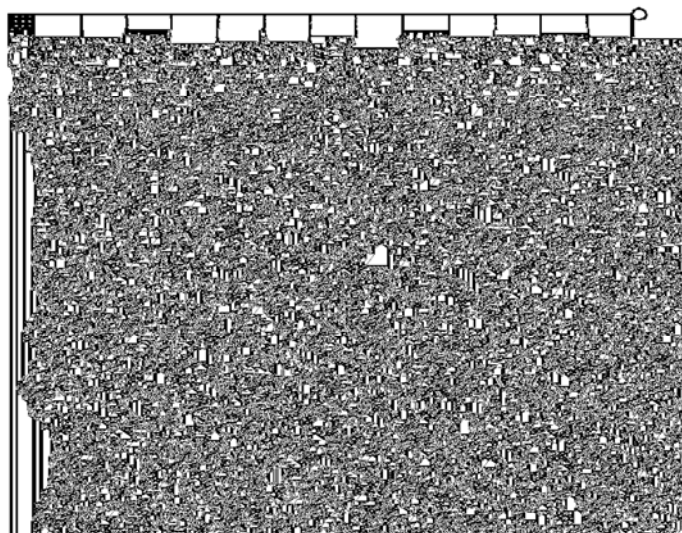


图3 有限元网格

Fig. 3 Finite element mesh

计算中只出现土单元, 没有筋单元和界面单元, 但程序要求针对每一层筋的位置输入包围该层筋的土单元编号(其中折返段也按一层筋处理)。计算过程中筋的作用就当成外力(等效附加应力)加在包围该层筋的土单元上, 其数值可以根据筋材应变 ε_s 由式(5)求得。筋中应变 ε_s 由包围筋材的土单元的应变求得

$$\varepsilon_s = \alpha \varepsilon_t \quad (7)$$

其中 α 为应变比例系数; ε_t 为土单元沿筋方向的应变, 本计算中 $\varepsilon_t = \varepsilon_x$; α 反映筋-土变形的协调情况, 也

反映了挡土墙中筋材发挥作用的程度, $\alpha = 1$ 表明筋土变形协调, $\alpha \neq 1$ 表明变形不协调, 两者间发生相对滑移。

在挡土墙中, 对每一层筋来说, 假定 α 沿筋长度方向以某一形式分布。程序中可对图4所示的两种分布形式进行计算。

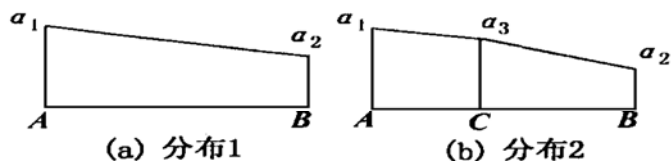


图4 应变比例系数的计算

Fig. 4 Coefficient of strain ratio

分布1假定 α 沿长度方向为直线分布(图中A、B为土工布的两端点)。已知 α_1, α_2 , 即可确定沿长度方向任一位置处筋和土的应变比例系数 α 。

分布2假定 α 沿长度方向为折线分布, C点是筋中最大应变位置, 程序可由试算和迭代自动确定。已知 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 即可求出筋中沿长度方向任一位置的 α 值。

因Denver墙中土工布模量不高, 且筋-土界面摩擦角较大, 计算中假定筋土间变形协调, 即沿长度方向 $\alpha = 1$ (分布1中 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$), 筋土变形处处相等。等效附加应力法计算结果与实测值和常规方法计算结果见图5(图中所示的是103.4 kPa作用下墙顶部的沉降和面板的侧向位移, 土单元模型采用邓肯张 $E-\mu$ 模型)。

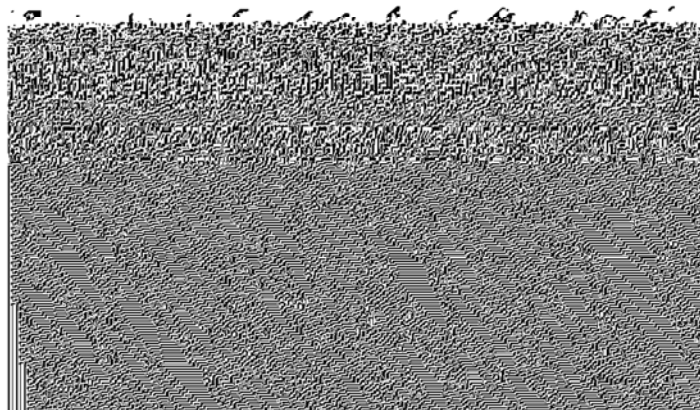
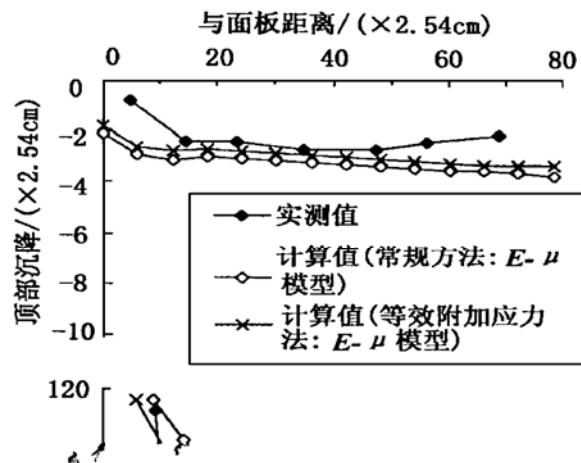


图5 加筋粘性土挡墙的计算成果

Fig. 5 Calculated results of reinforced cohesive soil retaining wall

从计算结果可以看出, 等效附加应力法用于该加筋土挡墙的计算是可行的。

对纤维加筋土, 不能分离出筋土的相互作用关系, 笔者通过试验研究, 认为筋方向上等效附加应力 $\Delta\sigma_r$ 与筋方向上应变 ε_r (压应变为正) 的关系可表示为

$$\Delta\sigma_r = \begin{cases} K_r |\varepsilon_r|^{m_r} & (\varepsilon_r < 0) \\ 0 & (\varepsilon_r > 0) \end{cases} \quad (8)$$

K_r , m_r 为计算参数, 其中 K_r 具有“模量”的性质。有关参数可以通过纤维加筋土的常规三轴试验、等向压缩试验等求得, 具体参数求取办法和有限元程序实现等内容可参看文献[5, 7, 8]。

3 结论与讨论

(1) 把筋材的作用当成外力 (等效附加应力) 加在土骨架上, 从而可用素土的本构模型计算加筋土体的应力应变关系, 这是等效附加应力法的基本思路。用该方法进行有限元计算, 单元网格划分中只出现土单元, 取消了模拟筋材的单元和筋-土之间的界面单元。该方法可以直接利用素土的本构模型, 不必针对加筋土复合体建立复合材料的本构模型。这种处理方法既大大减少了单元划分的数目, 又免除了复合材料各向异性对试验和计算所造成的种种障碍。通过引入等效附加应力, 这种方法能够反映加筋土中土骨架与筋材之间、土骨架与土骨架之间的相互作用关系, 比假定土单元与筋单元间仅通过界面联系要相对合理些 (对土钉墙、条带式加筋挡土墙等更是如此)。

(2) 在分层加筋土的等效附加应力法计算中, 应变比例系数 α 是关键所在。影响 α 的因素很多, 其取值应根据筋材与周围土体的模量比、筋-土界面性质、边界条件、加载方式及土单元应力应变状态等确定。但在一般情况下, 当筋土界面结合较好、筋材模量不高时, 忽略筋-土之间的相对位移, 认为 $\alpha=1$, 不会引起太大误差。

假定 $\alpha=1$, 即认为筋土之间没有相对滑移, 相当于假定筋与土在各点紧紧“粘结”在一起, 并不违背力的传递机理。

(3) 对加筋土的计算通常有两种思路, 一种是把筋土分开考虑, 另一种是把加筋土看成宏观上均匀的复合材料。在加筋土的复合材料方法计算中, 通常假定加筋土的宏观应力 σ 由素土的 σ_s 和筋材的 σ_g 两个微观应力组成,

$$\sigma = \eta_s \sigma_s + \eta_g \sigma_g \quad (9)$$

然后据此构造复合材料的模型 (其中 η_s 和 η_g 分别为

素土和筋材的体积系数)。由于这种复合材料拉、压模量不等, 横向、纵向模量也不相同, 所以它的本构模型非常复杂, 方程求解也很困难。其实, 将式(9)中 $\eta_g \sigma_g$ 移到等式左端, 就可得到

$$\sigma - \eta_g \sigma_g = \eta_s \sigma_s \quad (10)$$

式(10)就相当于把筋中的力当成外力对土骨架起作用。式(10)的优点是可以只研究土骨架的应力应变关系, 直接引用土体的本构模型, 不必建立复合体的模型, 这正是等效附加应力法的计算思想。

常规的复合材料分析方法中, 除假定式(9)外, 还常假定筋、土变形一致, 两者之间没有相对滑动, 以此推导加筋复合体的本构方程。这种假定与等效附加应力法计算时假定 $\alpha=1$ 是一致的。等效附加应力法把筋的作用当成外力加在土骨架上, 不但能使计算简便, 还可通过假定 $\alpha \neq 1$ 来反映筋、土变形不协调等更加一般的情况。

(4) Denver 墙试验中布筋方向为水平方向。当布筋方向为其他方向时, 同样可以用等效附加应力法的思路进行计算。只要将单元中筋材所受的力等效作用在单元节点上即可。并不局限于公式(6)。挡土墙布筋间距一般 50~70 cm, 比较密集, 用等效附加应力法进行计算是合适的。但每层筋的约束影响范围究竟有多大, 当筋、土变形不协调时 α 如何取值等, 仍需要做进一步的研究工作。

参 考 文 献

- 1 Yang Z. Strength and deformation characteristic of reinforced sand: [Dissertation]. Los Angeles, Calif: University of California, 1972
- 2 Schlosser F, Long N T. Recent results in french research on reinforced earth. Journal of the Construction Division, ASCE, 1974, 100: 223~237
- 3 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994
- 4 李广信, 陈 轮, 蔡 飞. 加筋土应力变形计算的新途径. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 46~53
- 5 介玉新. 加筋土的等效附加应力法分析及模型试验研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1998
- 6 Jonathan T H Wu. Predicting performance of the Denver walls: General report. In: Jonathan T H Wu. Proc of the International Symposium on Geosynthetic—Reinforced Soil Retaining Walls. Netherlands: Balkema Rotterdam, 1999. 3~20
- 7 介玉新, 李广信, 郑继勤. 纤维加筋土计算的新方法. 工程力学, 1999, 16(3): 81~89
- 8 介玉新, 李广信. 纤维加筋土的有限元计算. 第六届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会, 广州, 1998