

格栅加筋土挡墙流固耦合动力响应的有限元解法*

周世良, 王多垠

(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 格栅加筋土挡墙由面板、格栅和填土组成, 其流固耦合结构特性越来越引起工程界的关注。文中根据格栅加筋土挡墙筋土相互作用特点, 将土工格栅与其上下表面一定厚度的土层视为具有应变相容条件的筋土复合材料。基于自洽理论导出筋土复合材料的本构模型, 引入饱和多孔介质模型来模拟填土和筋土复合材料, 依此建立饱和水格栅加筋土挡墙结构特性数值分析的数学模型。采用 Galerkin 加权残值法推导出有限元分析方程, 利用 Newmark 逐步积分法求解该方程, 可得饱和水格栅加筋土挡墙的动力响应。

关键词: 格栅加筋土挡墙; 数值分析; 复合材料; 多孔介质

中图分类号: O344 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7329(2006)05-0038-05

FEM on Coupled Hydromechanical Dynamic Response of Geogrid Reinforced Soil Retaining Wall

ZHOU Shi-liang, WANG Duo-yin

(College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: Geogrid reinforced soil retaining wall (GRSRW) is composed of panel, geogrid and soil, its coupled hydromechanical structural characteristics are increasingly emphasized in practice. In this paper, based on the characteristics of the reinforcement-soil interaction, the geogrid and soil around it with a definite thickness were regarded as a kind of composite material with strain-compatible condition. A saturated porous media model was introduced to simulate the soil and reinforcement-soil composite material hereby and the mathematic model for numerical analysis on structural characteristics of GRSRW was built up. The FEM equations were deduced from the standard Galerkin procedure, resolving these equations, we can gain the relevant dynamic response of saturated GRSRW.

Keywords: geogrid reinforced soil retaining wall; numerical analysis; composite material; porous media

加筋土技术自问世以来, 就得到各国工程界和学术界的高度关注^[1], 作为支挡结构, 被应用于挡墙、桥台、港口岸墙和地下结构等; 作为土体的稳定体系, 被应用于道路路堤、水工坝体、边坡稳定和加固地基等。但在加筋土技术被广泛应用的同时, 加筋土工程特别是加筋土挡墙失稳、破坏的事故却时有发生, 这使人们对加筋土技术的可靠性产生了怀疑, 一些地方的政府部门也由此得出“高度较大的支挡结构不宜采用加筋土技术”之结论。

加筋土挡墙失稳和破坏的原因是多方面的, 但分析事故发生的外部环境, 我们可以发现, 水的作用是影响加筋土挡墙失稳和破坏的重要因素之一。如 Robert M. Koerner & Te-Yang Soong^[2] 在 2001 年统计分析

中发现, 国外 1984~1998 年之间出现的 26 起重大加筋土挡墙结构破坏事例, 绝大部分是在暴雨气象条件下发生的; Burwash & Frost(1991)^[3] 对加拿大的一座 9m 高的土工格栅加筋土挡墙的变形和破坏过程作了详细观测, 通过定性的分析, 认为是地表水的渗透使粘性土填料处于饱和状态, 促使加筋土挡墙的工作性状发生了变化; 国内虽然未见加筋土挡墙结构破坏的统计资料, 但加筋土支挡结构在江河流域中用作护岸工程也频频出现不同程度的破坏。这是因为地下水从物理力学和物理化学两个方面影响着加筋土挡墙的稳定, 前者表现在地下水压力使筋土复合体的有效正应力减小, 后者表现在地下水对土体的软化作用, 使土体的粘结力和摩擦力减小, 土与筋材的摩擦性能也大大

* 收稿日期: 2006-05-15

基金项目: 重庆市教委科技项目(040406)资助课题; 广东省科技厅科技项目(2003-18)资助课题

作者简介: 周世良(1972-), 男, 浙江宁波人, 副教授, 博士, 主要从事水工结构、岩土工程的教学与研究。

降低。但目前的加筋土挡墙稳定性分析方法,不管是传统的极限平衡法^[4,5]还是有限元方法,都没有考虑水对加筋土挡墙材料性质及筋土相互作用机制的影响。因此,在理论和数值模拟两个方面如何考虑流固耦合作用引起筋土复合体力学性能的改变,并对加筋土挡土结构的工作机理进行研究,是目前加筋土理论研究领域的一个难点与前沿性的课题,也是这一领域发展的必然趋势。

根据格栅加筋土挡墙筋土相互作用特点,基于自洽理论^[6]导出筋土复合材料力学模型,用来模拟格栅及其周围一定厚度的土体,再引入饱和多孔介质模型^[7-9]来模拟填土和筋土复合材料,依此建立饱和水格栅加筋土挡墙数值分析的数学模型和求解方法。本文采用的方法也可为相关学科的发展和工程应用提供分析研究方法和手段。

1 筋土复合材料力学模型

土工格栅与填料的相互作用具有如下特点:土工格栅具有网孔且表面十分粗糙,土工格栅与填料之间的界面摩擦阻力由三部分组成,即土工格栅表面与填料的摩擦力、土工格栅孔眼对填料的咬合和嵌固作用力及填料之间的摩擦力,这样土工格栅在填料之间的滑移并不在其表面,而是距土工格栅表面一定距离的填料中,即土工格栅与周围一定厚度的填土共同工作,具有应变相容特性。本文根据这一特点,将土工格栅与其上下表面一定厚度的土层视为具有一定约束条件的筋土复合材料(见图1),从而解决了筋材无厚度问题,又不需要设置接触面单元,不仅使解题方便,而且也符合实际情况。

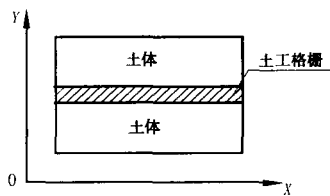


图1 筋-土复合单元

1.1 基本假定

为研究筋土复合材料的基本力学性能,可先作如下基本假设:

1) 格栅为横观各向同性均匀连续材料,材料弹性常数为 E_1 (E_{1H})、 n 和 ν_1 。 E_1 为格栅水平方向的弹性模量,即拉伸模量, n ($n = E_{1H}/E_{1V}$) 为格栅水平方向与垂直方向的模量比;

2) 土体为各向同性均匀连续材料,材料弹性常数为 E_2 、 ν_2 ;

3) 根据应变相容概念,假设格栅与土之间无相对

滑移;

4) 土体和格栅在复合状态下的性能与未复合前相同。

1.2 筋土复合材料弹性

矩阵对于平面应变问题,筋土复合材料的宏观应力和宏观应变向量:

$$\sigma = (\sigma_x, \sigma_z, \sigma_{xz})^T, \epsilon = (\epsilon_x, \epsilon_z, \epsilon_{xz})^T \quad (1)$$

各组分的微观应力和微观应变向量:

$$\begin{aligned} \sigma^{(j)} &= (\sigma_x^{(j)}, \sigma_z^{(j)}, \sigma_{xz}^{(j)})^T \\ \epsilon^{(j)} &= (\epsilon_x^{(j)}, \epsilon_z^{(j)}, \epsilon_{xz}^{(j)})^T \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $j=1,2$ 分别代表格栅和土体。

各组分和均质筋土复合材料模型的一般应力-应变关系表达式为:

$$\sigma^{(j)} = D^{(j)} \epsilon^{(j)}, (j = 1, 2) \quad (3)$$

$$\sigma = D \cdot \epsilon \quad (4)$$

式中: $D^{(j)}$ 和 D 分别为各组分和均质筋土复合材料的弹性矩阵。

根据自洽理论^[4]、复合材料定义^[10,11],并利用复合材料弹性应变能恒等定律,略去推导过程,可得筋土复合材料弹性矩阵^[12]:

$$D = \eta_2 (D^{(2)} - D^{(1)}) A^{(2)} + D^{(1)} \quad (5)$$

式中: $A^{(2)} = [\eta_2 D^{(1)} + \eta_1 D^{(2)}]^{-1} D^{(1)}$, η_j ($j=1,2$) 为筋土复合材料各组分的体积分数。

1.3 筋土复合材料屈服准则

筋土复合材料的应力-应变曲线按其变形和断裂过程,可以分为四个阶段:(1)拉筋和土体变形都是弹性的;(2)拉筋的变形仍是弹性的,但土体的变形是非弹性的;(3)拉筋和土体两者的变形都是非弹性的;(4)拉筋断裂,筋土复合材料破坏。筋土复合材料在第1阶段处于弹性状态,历时较短;在第2阶段,尽管拉筋为弹性变形,但土体已屈服,筋土复合材料处于塑性变形状态,大多数复合材料在工作状态下都处于这一阶段^[11],筋土复合材料也不例外。这就给我们提出了如何判断筋土复合材料进入塑性屈服及计算相应的塑性应变的问题,显然直接套用土体的屈服准则是不合适的。

假设筋土复合材料中拉筋处于纯拉受力状态、土体服从 Mohr - Coulomb 屈服准则,利用复合材料定义可导出用筋土复合材料宏观应力和描述拉筋方向及受力状态参数表达的屈服准则^[12]:

$$\begin{aligned} f &= (\sigma_1 - \sigma_2)^2 - (\sigma_1 + \sigma_2)^2 \sin^2 \varphi + (\zeta \sigma_0 \cos \varphi)^2 - \\ &2\zeta \sigma_0 [(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\alpha - (\sigma_1 + \sigma_2) \sin^2 \varphi] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: σ_i ($i=1,2$) 为筋土复合材料的宏观应力; $\sigma_0 = \eta_r R$; η_r 为拉筋的体积分数; R 为筋材的拉伸屈服应

力; φ 为土体的内摩擦角; α 为拉筋方向和筋土复合材料宏观大主应力方向的夹角; ζ 为描述拉筋受力状态的参数,如果 $\zeta \in (-1, 0)$,则拉筋处于弹性应力状态,筋土复合材料处于第①或第②应力状态。

2 饱水材料多孔介质模型

将格栅加筋土挡墙中填土和筋土复合材料视为固液两相饱和多孔材料,并假设两相之间无化学反应、质量交换、热交换和动量矩交换,固体和液体相微观上不可压缩,忽略流体相的粘性,视其为理想流体,固体相为各向同性弹塑性介质。在这些假设条件下,饱和材料多孔介质模型的控制场方程如下^[12]:

质量平衡方程:

$$\nabla \cdot (\varphi^s \dot{\mathbf{u}}^s + \varphi^f \dot{\mathbf{u}}^f) = 0 \quad (7)$$

动量平衡方程:

$$\rho^s \ddot{\mathbf{u}}^s = \nabla \cdot \mathbf{T}_e^s - \varphi^s \nabla p + \mathbf{a}_v \cdot (\dot{\mathbf{u}}^f - \dot{\mathbf{u}}^s) \quad (8)$$

$$\rho^f \ddot{\mathbf{u}}^f = -\varphi^f \nabla p - \mathbf{a}_v \cdot (\dot{\mathbf{u}}^f - \dot{\mathbf{u}}^s) \quad (9)$$

$$\text{扩散动量交换方程: } \hat{p}_c^f = -\mathbf{a}_v \cdot (\dot{\mathbf{u}}^f - \dot{\mathbf{u}}^s) \quad (10)$$

固相本构方程为:

$$\mathbf{T}_e^s = \mathbf{D}^s : \mathbf{E}^s, \mathbf{E}^s = \frac{1}{2}(\text{grad} \mathbf{u}^s + \text{grad}^T \mathbf{u}^s) \quad (11)$$

$$\text{液相本构方程为: } \mathbf{T}^f = -\varphi^f p \mathbf{I} \quad (12)$$

上式中 $\dot{\mathbf{u}}^s$ 、 $\dot{\mathbf{u}}^f$ 和 $\ddot{\mathbf{u}}^s$ 、 $\ddot{\mathbf{u}}^f$ 分别描述多孔固体相和孔间液体相的速度和加速度,而 \mathbf{u}^s 和 \mathbf{u}^f 分别表示多孔固体相和孔间液体相的位移, p 为孔隙压力。 ρ^α 为表观密度, φ^α 为体积分,由饱和条件有:

$$\varphi^f + \varphi^s = 1 \quad (13)$$

\mathbf{T}_e^s 为多孔固体相的有效应力, \mathbf{D}^s 为空的多孔固体相的弹塑性矩阵, \mathbf{E}^s 是线性化的拉格朗日应变张量。 \hat{p}_c^f 表达了固-液两相间流动的摩擦阻力,称为扩散阻力,系数 \mathbf{a}_v 为扩散阻力系数张量,对各向同性的两相多孔材料:

$$\mathbf{a}_v = \frac{(\varphi^f)^2 \gamma^f}{k^f} \mathbf{I} \quad (14)$$

式中: k^f 是多孔材料的水力渗透系数, γ^f 是孔隙中液体的比重。

饱和格栅加筋土挡墙数值分析的边界条件为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mathbf{u}^s = \hat{\mathbf{u}}^s & \text{on } \Gamma_{u^s} \end{array} \right. \quad (15a)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \dot{\mathbf{u}}^f = \hat{\dot{\mathbf{u}}}^f & \text{on } \Gamma_{\dot{u}^f} \end{array} \right. \quad (15b)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mathbf{t}^s = \hat{\mathbf{t}}^s & \text{on } \Gamma_{t^s} \end{array} \right. \quad (15c)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mathbf{t}^f = -\varphi^f \hat{p} \mathbf{n} & \text{on } \Gamma_{t^f} \end{array} \right. \quad (15d)$$

式中: \mathbf{t}^s 为作用在边界上的有效应力, \mathbf{t}^f 为边界上的孔隙压力。

而初始条件为:

$$\dot{\mathbf{u}}^s(0) = \dot{\mathbf{u}}_0^s, \dot{\mathbf{u}}^f(0) = \dot{\mathbf{u}}_0^f \quad (16a)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}^s(0) = \ddot{\mathbf{u}}_0^s, \ddot{\mathbf{u}}^f(0) = \ddot{\mathbf{u}}_0^f \quad (16c)$$

场方程(7)~(12)、边界条件(15)和初值条件(16)即构成了饱水格栅加筋土挡墙数值分析的一组完整的控制方程。

3 饱水格栅加筋土挡墙有限元分析方程及其解法

3.1 有限元分析方程

对上述初、边值问题采用 Galerkin 加权残值法可推导出有限元分析方程^[12]。为此,在连续平衡方程(7)中引入一罚参数 β ,使其成为:

$$\nabla \cdot (\varphi^s \dot{\mathbf{u}}^s + \varphi^f \dot{\mathbf{u}}^f) + p/\beta = 0 \quad (17)$$

β 为一大数,当 $\beta \rightarrow \infty$ 时,方程(17)与(7)等价,由方程(17)有:

$$p = -\beta \nabla \cdot (\varphi^s \dot{\mathbf{u}}^s + \varphi^f \dot{\mathbf{u}}^f) \quad (18)$$

将其代入式(8)和(9),可消去压力。设边界条件(15a)和(15b)为强制满足的边界条件,(15c)和(15d)为自然边界条件,假设 \mathbf{W}^s 、 $\bar{\mathbf{W}}^s$ 、 \mathbf{W}^f 、 $\bar{\mathbf{W}}^f$ 分别为固体相和孔间液体相运动方程和自然边界条件的权函数,则相应的加权残值表达式为:

$$\begin{aligned} & \int_v \mathbf{W}^s \{ \nabla \cdot \mathbf{T}^s + \mathbf{a}_v \cdot (\dot{\mathbf{u}}^f - \dot{\mathbf{u}}^s) - \rho^s \ddot{\mathbf{u}}^s \} dv + \\ & \int_{\Gamma_{t^s}} \bar{\mathbf{W}}^s \cdot (\hat{\mathbf{t}}^s - \mathbf{t}^s) d\Gamma + \\ & \int_v \mathbf{W}^f \{ \nabla \cdot \mathbf{T}^f - \mathbf{a}_v \cdot (\dot{\mathbf{u}}^f - \dot{\mathbf{u}}^s) - \rho^f \ddot{\mathbf{u}}^f \} dv + \\ & \int_{\Gamma_{t^f}} \bar{\mathbf{W}}^f \cdot \varphi^f (\hat{p} - p) \mathbf{n} d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

略去推导过程,可得单元平衡方程:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_n^s & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_n^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_n^s \\ \ddot{\mathbf{u}}_n^f \end{Bmatrix} + \\ & \left(\begin{bmatrix} \mathbf{A}_n & -\mathbf{A}_n \\ -\mathbf{A}_n^T & \mathbf{A}_n \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} (\varphi^s)^2 \mathbf{C}_n & \varphi^s \varphi^f \mathbf{C}_n \\ \varphi^s \varphi^f \mathbf{C}_n^T & (\varphi^f)^2 \mathbf{C}_n \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_n^s \\ \dot{\mathbf{u}}_n^f \end{Bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{K}_n & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_n^s \\ \mathbf{u}_n^f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_n^s \\ \mathbf{f}_n^f \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{式中: } [\mathbf{M}_n^s] = \int_{v_n} \rho^s [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] dv,$$

$$[\mathbf{M}_n^f] = \int_{v_n} \rho^f [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] dv,$$

$$[\mathbf{A}_n] = \int_{v_n} [\mathbf{N}]^T [\mathbf{a}_v] [\mathbf{N}] dv,$$

$$[\mathbf{K}_n] = \int_{v_n} [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}^s] [\mathbf{B}] dv,$$

$$\{C_n\} = \int_{\Gamma_n} [B]^T [D_1] [B] dv,$$

$$\{f_n\} = \int_{\Gamma_n} [N]^T \hat{t}^s d\Gamma, \{f_n\} = \int_{\Gamma_n} [N]^T \Phi^F \hat{p} \{n\} d\Gamma$$

$$[D_1] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

方程(20)对积分区域中所有单元求和,得系统方程:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\} \quad (22)$$

式中:[M]、[C]、[K]和{f}为相应单元矩阵和向量的组集。方程(22)即为饱和格栅加筋土挡墙动力响应的罚有限元公式。

3.2 求解方法

在有限元分析中,根据位移法得到的系统非线性方程就是对应于某一时刻的平衡方程,即式(22)可写为:

$$\begin{bmatrix} M^S & 0 \\ 0 & M^F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{t+\Delta t}^S(i) \\ \ddot{u}_{t+\Delta t}^F(i) \end{Bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} A & -A \\ -A & A \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} (\varphi^S)^2 C & \varphi^S \varphi^F C \\ \varphi^S \varphi^F C^T & (\varphi^F)^2 C \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \dot{u}_{t+\Delta t}^S(i) \\ \dot{u}_{t+\Delta t}^F(i) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{t+\Delta t}^{(i-1)} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_{t+\Delta t}^S(i) \\ \Delta u_{t+\Delta t}^F(i) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_{t+\Delta t}^S \\ R_{t+\Delta t}^F \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} R_{t+\Delta t}^S(i-1) \\ F_{t+\Delta t}^F(i-1) \end{Bmatrix} \quad (23)$$

采用Newmark逐步积分法求解非线性方程^[13],整理后可得:

表1 饱和格栅加筋土挡墙的材料参数

材料	固相容重 γ^s /kN·m ⁻³	液相容重 γ^l /kN·m ⁻³	弹性模量 E_s /kPa	泊松比 μ	孔隙率 n /%	内聚力 C /kPa	内摩擦角 φ /°	渗透系数 k^f /m·s ⁻¹
混凝土面板	24.0	10.0	8.15 × 10 ⁶	0.22	15.0	500.0	60.0	1.0 × 10 ⁻⁶
土体	19.0	10.0	2.20 × 10 ⁴	0.30	15.0	10.0	28.0	1.0 × 10 ⁻⁶
筋带	18.0		6.20 × 10 ⁵	0.25				

图2为加载50h后饱和挡墙的位移矢量图,可以看出,挡墙呈现“外倾”变形特征,这与不考虑流固耦合作用计算得到的挡墙大多呈现“外突”变形有明显

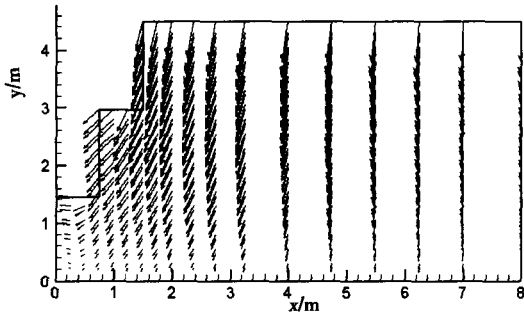


图2 加载50 h 饱和挡墙的位移矢量

$$\begin{bmatrix} c_0 \begin{bmatrix} M^S & 0 \\ 0 & M^F \end{bmatrix} + c_1 \begin{bmatrix} A + (\varphi^S)^2 \beta C & -A + \varphi^S \varphi^F \beta C \\ -A + \varphi^S \varphi^F \beta C & A + (\varphi^F)^2 \beta C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u^{S(i)} \\ \Delta u^{F(i)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_{t+\Delta t}^S \\ R_{t+\Delta t}^F \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} F_{t+\Delta t}^{S(i-1)} \\ F_{t+\Delta t}^{F(i-1)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} M^S & 0 \\ 0 & M^F \end{bmatrix} \left(-c_0 \begin{Bmatrix} u_{t+\Delta t}^{S(i-1)} \\ u_{t+\Delta t}^{F(i-1)} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} u_t^S \\ U_t^F \end{Bmatrix} \right) + c_2 \begin{Bmatrix} \dot{u}_t^S \\ \dot{u}_t^F \end{Bmatrix} + c_3 \begin{Bmatrix} \ddot{u}_t^S \\ \ddot{u}_t^F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} A + (\varphi^S)^2 \beta C & -A + \varphi^S \varphi^F \beta C \\ -A + \varphi^S \varphi^F \beta C & A + (\varphi^F)^2 \beta C \end{bmatrix} \cdot \left(-c_1 \begin{Bmatrix} u_{t+\Delta t}^{S(i-1)} \\ u_{t+\Delta t}^{F(i-1)} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} u_t^S \\ u_t^F \end{Bmatrix} \right) + c_4 \begin{Bmatrix} \dot{u}_t^S \\ \dot{u}_t^F \end{Bmatrix} + c_5 \begin{Bmatrix} \ddot{u}_t^S \\ \ddot{u}_t^F \end{Bmatrix} \quad (24)$$

上式即为饱和格栅加筋土挡墙数值分析有限元平衡方程迭代求解的基本方程。求解该方程,可得饱和格栅加筋土挡墙的动力响应。

4 算例

依据上述计算方法,对一总高度为4.5 m的三级台阶式格栅加筋土挡墙进行了计算。该挡墙为河龙高速柳城至热水段K29+307~K21+353段三级台阶式格栅加筋土挡墙的室内模型墙^[12],模型比例1:0.5。计算网格总节点数540个,总单元数487个,约束节点总数53个,每个节点4个自由度。固相约束条件为底边固定,右边水平方向约束,墙顶加载12 kN/m²;液相约束条件为底边垂直方向固定,右边水平方向固定。材料性能参数见表1。限于篇幅,仅列出部分计算结果。

差别,与工程实测也较为吻合。图3为不同加载时刻墙体孔隙水流场图,图示表明:在加载初期,挡墙内孔隙水的流速较大,待荷载稳定后孔隙水流速逐步减小;孔隙水主要流向墙面排水边界,墙顶后部的孔隙水则直接从墙顶排水边界排出。图4为不同加载时刻挡墙孔隙压力分布,联合图3可以看出:在靠近墙顶和墙前的排水边界处,孔隙水流速大,孔隙水压力相应较小,且消散快;而离排水边界越远处,孔隙水流速越小,孔隙水压力越大,且消散慢。

5 结论

根据格栅加筋土挡墙的结构特点,将土工格栅与

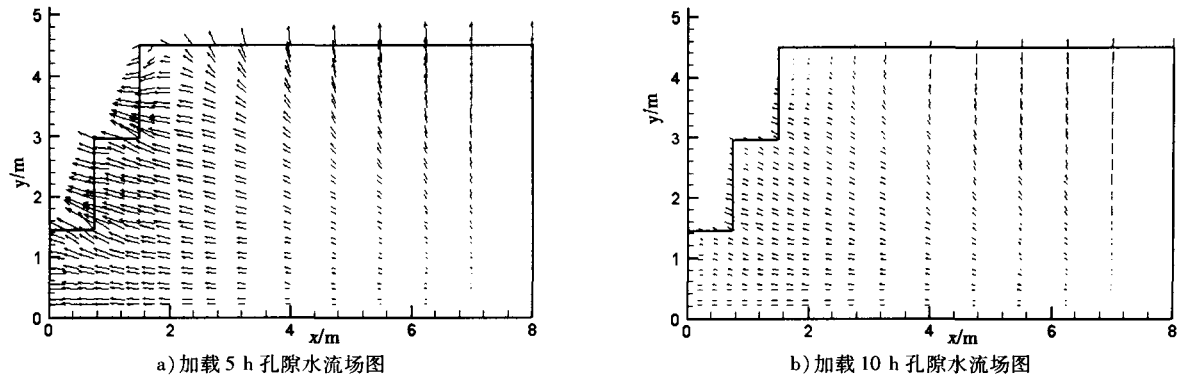


图3 孔隙水流场图

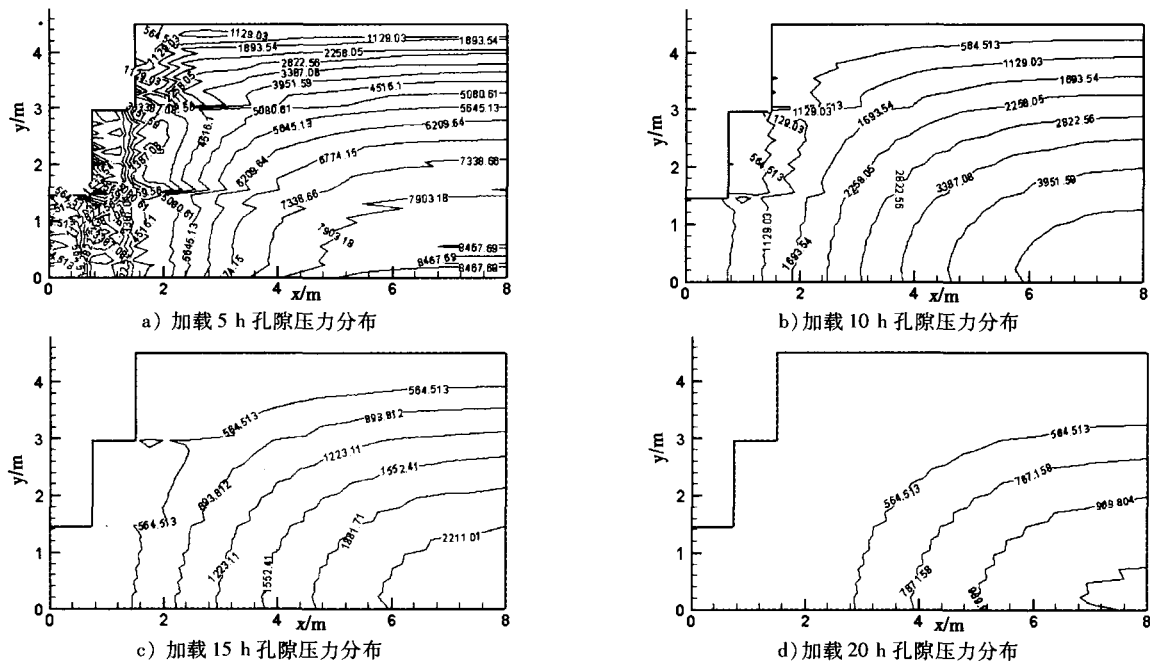


图4 孔隙压力分布图

其上下表面一定厚度的土层视为具有一定约束条件的筋土复合材料。基于自洽理论导出筋土复合材料的弹性矩阵和屈服准则,引入饱和多孔介质模型来模拟填土和筋土复合材料,依次建立了饱和格栅加筋土挡墙结构特性数值分析的数学模型。采用 Galerkin 加权残值法,由数学模型推导出有限元分析方程。采用 Newmark 逐步积分法,导出有限元平衡方程迭代求解的基本方程,求解该方程,可得饱水格栅加筋土挡墙的动力响应。

参考文献:

- [1] 何光春. 加筋土结构设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [2] Robert M. Koerner, Te - Yang Soong. Geosynthetic reinforced segmental retaining walls [J]. Geotextiles and Geomembranes,2001,19:P359 - 386.
- [3] Andrzej Sawicki. Creep of geosynthetic reinforced soil retaining walls[J]. Geotextiles and Geomembranes,1999,17:51 - 65.

- [4] JTJ015 - 91,公路加筋土工程设计规程[S].
- [5] JTJ/T239 - 98,水运工程土工织物应用技术规程[S].
- [6] Hill R. ,A self - consistent mechanics of composite materials [J]. Mech. Phys. Solids,1965(13):213 - 222.
- [7] de Boer R. 多孔介质理论发展史上的重要成果[M]. 重庆:重庆大学出版社,1995.
- [8] Bowen R M. ,Incompressible porous media by use of the theory of mixtures[J]. Internat J Engrg Sci,1980,18(1):19 - 45.
- [9] Bowen R M. ,Compressible porous media by use of the theory of mixtures[J]. Internat J Engrg Sci,1982,20(6):697 - 735.
- [10] 布赖恩·哈里斯. 工程复合材料[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [11] 郑修麟. 工程材料的力学行为[M]. 西安:西北工业大学出版社,2004.
- [12] 周世良. 格栅加筋土挡墙结构特性及破坏机理研究[D]. 重庆:重庆大学,
- [13] 王勖成,邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社,1995.