

混凝土面板干缩应力计算的接触面模型研究*

王瑞骏, 李章浩, 陈尧隆

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

[摘 要] 基于湿度传导理论及一般外荷载作用下的接触摩擦单元理论, 经过系统分析, 建立了面板与垫层之间接触面的湿度场及干缩应力有限元计算模型。算例结果表明, 应用该模型可以获得较为准确合理的接触面湿度场及干缩应力计算结果。

[关键词] 水工结构; 混凝土面板; 干缩应力; 接触面模型; 有限元法

[中图分类号] TV 331

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)09-0141-05

国内外不少学者研究^[1~4]表明, 温度应力和干缩应力是引起面板堆石坝混凝土面板裂缝的主要原因。虽然面板表面的干缩裂缝一般不会对面板安全产生直接危害, 但这种裂缝却是诱发、加剧面板产生贯穿性裂缝的主要因素。因此, 合理而准确地计算分析混凝土面板的干缩应力, 对面板的安全防裂具有重要意义。面板的结构特点决定了面板的干缩应力取决于面板本身的湿度变化及垫层对面板的接触约束两个因素。关于垫层对面板的约束问题, 传统的面板应力分析, 或将面板与垫层视作一体进行计算, 或按弹性约束处理, 这无疑夸大了垫层对面板的约束作用, 从而使面板干缩应力的幅值增大。为此, 文献[5]提出一种按摩擦约束处理的方法, 在一定程度上考虑了面板与垫层接触面的不连续、非线性的变形特性, 比传统方法有了较大的进步, 但仍存在一些不足: 如(1)将面板与垫层之间的接触状态仅按固定和摩擦两种状态来概括, 未反映出二者之间可能出现

的自由未接触状态; (2)该方法仅给出了面板应力计算的接触面模型, 未给出与此相应的面板温度场及湿度场计算的接触面模型。本研究基于湿度传导理论及一般外荷载作用下的接触摩擦单元理论, 建立了面板与垫层之间接触面湿度场及干缩应力的有限元计算模型, 以期为准确合理地进行面板干缩应力的分析计算奠定基础。

1 接触面的湿度场计算模型

假定 M 为垫层单元中的1个节点, 与 M 点临近的面板六面体8节点单元的表面节点为1, 2, 3, 4。则由上述节点可构造1个五面体5节点接触摩擦单元 M 1234, 如图1(a)所示。如果面板单元为四面体4节点单元, 则图1(a)所示的五面体接触摩擦单元可由节点4退化至节点3, 形成1个四面体4节点接触摩擦单元, 如图1(b)所示。

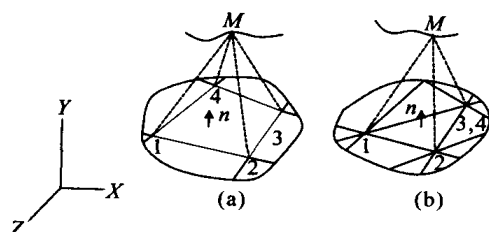


图1 点-面接触摩擦单元

a 五面体单元; b 四面体单元

Fig. 1 Point-to-surface contact friction element

a Pentahedral element; b Tetrahedral element

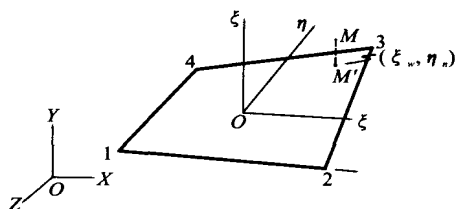


图2 接触摩擦单元的局部坐标系

Fig. 2 Local coordinate system of contact friction element

[收稿日期] 2004-12-27

[作者简介] 王瑞骏(1963-), 男, 陕西宝鸡人, 副教授, 硕士, 主要从事坝工应力及水工结构仿真研究。

在面板单元的 1234 面上建立接触摩擦单元的局部坐标系 $o\xi\eta\zeta$ 如图 2 所示。其中 ξ, η 轴位于 1234 面上, ζ 轴沿 1234 面的法线方向, 点 M 为接触点 M 沿局部坐标 ζ 轴方向在面板单元表面 1234 上的投影点, 其局部坐标为 (ξ_M, η_M) 。

当面板与垫层之间处于点-面接触状态时, 将通过接触摩擦单元在垫层与面板之间产生正交于面板单元表面 1234 方向的湿度热导。由于混凝土导湿与导热服从形式上完全一致的偏微分扩散方程, 因此根据热传导理论^[6], 从面板单元表面 1234 到垫层接触节点 M 的湿流量为

$$q^e = \begin{cases} \frac{1}{R_s}(U - U_M) & \text{固定或滑动} \\ 0 & \text{自由} \end{cases} \quad (1)$$

式中, R_s 为接触摩擦单元的接触湿阻, 可参照接触热阻的试验方法确定; U_M 为接触节点 M 的湿度; U 为垫层接触节点 M 在 1234 面上投影点 M 处的面板表面湿度。对图 1(a) 所示的五面体接触摩擦单元, U 可由面板表面节点 1, 2, 3, 4 的湿度插值确定, 即

$$U = N_1 U_1 + N_2 U_2 + N_3 U_3 + N_4 U_4 \quad (2)$$

式中, U_1, U_2, U_3, U_4 分别为面板表面节点 1, 2, 3, 4 的湿度; U_M 为垫层接触节点 M 的湿度; $N_1 \sim N_4$ 为面板表面单元 1234 的形函数, 对于图 1(a) 所示的五面体接触摩擦单元, 可用式(3)-(a)来表达; 对于图 1(b) 所示的四面体接触摩擦单元, 可用式(3)-(b)来表达^[7], 即

$$\begin{cases} N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi_M)(1 - \eta_M) \\ N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi_M)(1 - \eta_M) \\ N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi_M)(1 + \eta_M) \\ N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi_M)(1 + \eta_M) \end{cases} \quad (a)$$

$$\begin{cases} N_1 = L_{1M} \\ N_2 = L_{2M} \\ N_3 = L_{3M} \\ N_4 = 0 \end{cases} \quad (b) \quad (3)$$

式中, ξ_M, η_M 为 M 点的局部坐标, 其值介于 -1 与 1 之间; $L_{1M} \sim L_{3M}$ 为面板表面单元 123(4) 的面积坐标^[7]。

单元湿度传导矩阵可表示为:

$$[K_s]^e = \begin{cases} \frac{1}{R_s} \{N\}^e - \{N\}^{eT} & \text{固定或滑动} \\ [0] & \text{自由} \end{cases} \quad (4)$$

节点热荷载向量可表示为:

$$\{F_s\}^e = q^e \{N\}^e \quad (5)$$

式中, $\{N\}^e$ 为接触摩擦单元形函数列阵。对上述的五面体及四面体接触摩擦单元, 可分别表示为

$$\{N\}^e = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4 \ 1]^T \quad (6)$$

$$\{N\}^e = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ 1]^T \quad (7)$$

接触摩擦单元的湿度传导矩阵 $[K_s]^e$ 和节点湿度荷载向量 $\{F_s\}^e$ 可按标准的有限元集成规则, 分别集成到整体湿度传导矩阵及湿度荷载向量中去。显然, 上述模型经退化处理后也可用于二维问题。

2 接触面的干缩应力计算模型

对一般外荷载作用下两种结构材料的接触问题, 雷晓燕等^[8]曾提出一种以节点接触应力为基本未知量的接触摩擦单元理论。接触摩擦单元的刚度-约束方程为:

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ S \ C' \\ \Delta F \\ S \ a^* \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} (S \ C)'} \\ R^T S \ R \\ (S \ C)'^T \Delta \sigma \\ (I - R^T) S \ R \Delta \sigma \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta a \\ \Delta \sigma \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta a \\ \Delta \sigma \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式中, Δa 及 ΔF 分别为整体坐标系中增量节点位移矢量和增量等效节点力矢量; $\Delta \sigma$ 为局部坐标系中增量节点接触应力矢量; a^* 为约束荷载矢量; C 和 C' 为坐标转换矩阵; S, R 为导出矩阵; I 为单位向量。上述各矢量(矩阵)的具体表达式或确定方法见文献[8]。

计算时, 首先假定单元处于某种接触状态, 如固定、滑动或自由, 确定相应的约束荷载矢量 a^* , 然后按式(8)进行增量节点接触应力及接触位移的试算, 检验是否与原假定状态一致, 若一致则计算结束, 否则选试算解为新的假定状态, 进行新一轮迭代直至收敛。其中, 进行接触状态判定时, 法线方向的容许应力 $[\sigma]$ 取最大拉应力, 切线方向的容许应力 $[\tau]$ 按 Mohr-Coulomb 准则^[8]确定。

接触摩擦单元理论采用节点接触应力作为基本未知量, 使得接触应力既具有较高的精度, 又方便用于处理实际问题。研究^[8~10]表明, 这种接触摩擦单元理论对于一般外荷载作用下两种结构材料的接触问题, 具有较好的有效性和准确性。对面板堆石坝而言, 混凝土面板在湿度荷载作用下, 其干缩变形主要发生在面板表面, 变形差异主要反映在面板的长度

方向即顺坝坡方向上, 所以垫层对面板切向约束为主要约束, 此时接触面的变形主要表现出切向剪切错动变形及切向剪胀变形的特征。如果考虑到切向剪胀变形相对较小, 则与面板干缩变形相应的接触面变形, 主要呈现出由切向剪切错动变形所致的“接触摩擦”变形特征。因此上述的接触摩擦单元理论, 对于湿度荷载作用下的面板堆石坝面板与垫层之间的接触问题, 仍具有较好的有效性和适用性。

将接触摩擦单元视作各向同性体, 在湿度单调减小时, 若在时间步 Δt_i 内接触摩擦单元任一点的湿度变化为 ΔU , 则对于平面应变问题, 由 ΔU 产生的干缩应变 $\{\epsilon_s^0\}$ 为:

$$\{\epsilon_s^0\} = [\epsilon_{sx}^0, \epsilon_{sy}^0, \gamma_{sxy}^0]^T = \omega(1 + \mu)\Delta U [1, 1, 0]^T \quad (9)$$

式中, ϵ_{sx}^0 , ϵ_{sy}^0 及 γ_{sxy}^0 分别为 ΔU 在 x, y 方向产生的正应变及 xy 平面上的剪应变; ω 为收缩系数, 可取面板混凝土的收缩系数值; μ 为泊松比。

采用初应变法, 将湿度变化 ΔU 引起的应变 $\{\epsilon_s^0\}$ 视作初应变, 则由 $\{\epsilon_s^0\}$ 产生的等效节点荷载为

$$F_s^e = \iint_B [B]^T [D] \{\epsilon_s^0\} dx dy \quad (10)$$

式中, $[B]$ 为单元应变矩阵; $[D]$ 为单元弹性矩阵。

根据式(8), 考虑湿度变化作用时, 接触摩擦单元的等效单元刚度-约束方程可表示为

$$\begin{Bmatrix} 0 & (SC)^T \\ SC & R^T SR \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\sigma \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_s^e - (SC)^T \Delta\sigma \\ Sa^* - (I - R^T)SR\Delta\sigma \end{Bmatrix} \quad (11)$$

则考虑湿度变化作用时, 接触摩擦单元的等效刚度-约束矩阵 K_c 及等效荷载向量 f_{cs} 分别为

$$K_c = \begin{Bmatrix} 0 & (SC)^T \\ SC & R^T SR \end{Bmatrix}, \quad f_{cs} = \begin{Bmatrix} F_s^e - (SC)^T \Delta\sigma \\ Sa^* - (I - R^T)SR\Delta\sigma \end{Bmatrix} \quad (12)$$

式(12)所表示的接触摩擦单元的等效刚度-约束矩阵 K_c 及等效荷载向量 f_{cs} , 可按标准的有限元集成规则, 迭加到整体干缩应力计算的总刚度矩阵和总荷载向量中。接触摩擦单元干缩应力的计算过程仍可按上述的迭代方法进行, 只是将荷载步换成时间步即可。

3 算例

为便于与文献[11]所给解析法的计算结果比

较, 在图3所示的岩石基础上, 以2个叠放在一起的混凝土梁之间接触面的干缩应力问题为例进行分析。上梁(梁1)高0.5 m, 下梁(梁2)高1.0 m, 梁1和梁2长度均为10 m。设梁1初始均匀相对湿度为30%, 梁2初始均匀相对湿度为0。试分析在梁1持续干缩1年的情况下, 梁1和梁2接触面上湿度及干缩应力的分布情况。

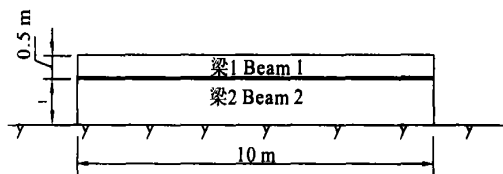


图3 2个叠放梁的几何模型

Fig. 3 Geometrical model of two laminated beams

分别按不考虑梁1、2间接触面的导湿特性, 而将两梁视作一体发生湿度传导, 及按本研究方法考虑接触面导湿特性两种情况, 计算了梁1和梁2交界面上各节点在1年末的湿度分布; 分别按不考虑接触面导湿特性、两梁胶结一体弹性变形, 及按本研究计算模型考虑接触面导湿特性且接触摩擦角分别为 40° 、 50° 和 60° 时, 进行了两梁交界面上平均温度应力的变化及分布计算。另外, 按文献[11]关于干缩应力的解析计算公式, 对两梁接触面上的平均干缩应力进行了计算。

计算中, 梁1和梁2选用相同的材料参数, 即密度为 24 kN/m^3 , 弹性模量为 $2 \times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比为 0.167, 湿度扩散系数为 $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$, 表面湿度交换系数为 $2 \times 10^{-4} \text{ m/h}$, 收缩系数为 3.5×10^{-4} 。

图4给出了按是否考虑接触面导湿特性所得到的1年末梁1和梁2交界面上相对湿度分布的计算结果。由图4可以看出, 按本研究方法计算得到的梁1和梁2接触面上各节点的相对湿度, 均小于将两梁视作一体发生湿度传导而计算得到的接触面节点相对湿度值; 而且越靠近接触面中部, 2种方法计算得到的节点相对湿度差值越大。同时还可以看出, 尽管进行了计算期1年的计算, 但由于湿度扩散系数很小, 因此在1年末接触面各节点的相对湿度仍较大。对两个叠放在一起的混凝土梁而言, 其接触面是实际存在的物理面, 一般而言, 湿度传导速率在此物理面上必然会发生一定程度的衰减。因此, 通过定性分析可以发现, 按本文方法进行两种结构接触面的湿度场计算, 可以更合理地反映接触面的导湿特性, 获得较为准确的接触面湿度场结果。

图 5 给出了按两梁一体弹性变形及按本研究方法且接触摩擦角分别为 40° 、 50° 和 60° 时, 两梁接触面平均干缩水平正应力分布的计算结果, 同时还给出了相应的解析法计算结果。由图 5 可以看出, 接触摩擦引起的两梁接触面上的干缩水平正应力中点最大, 两端为 0, 基本呈线性分布; 接触面的干缩应力与接触摩擦角有关, 接触摩擦角越大, 相应的接触面中点分布的干缩水平正应力最大值越大。接触摩擦角为 50° 时的计算结果与解析法接触面上平均干缩应力的计算结果几乎重合, 说明本研究方法关于接触面干缩应力的计算精度良好。由图 5 同时还可以

看出, 虽然考虑接触面导湿特性时所计算得到的接触面节点的相对湿度, 小于不考虑接触面导湿特性所计算得到的节点相对湿度, 但按两梁胶结一体弹性变形进行干缩应力计算时, 接触面实质上发生的是连续的弹性变形, 因此计算得到的干缩应力值要远大于按接触摩擦计算时所得到的干缩应力值, 而且也远大于按解析法计算时所得到的干缩应力值。由此说明, 接触面的存在对干缩应力具有明显的削减作用, 不考虑接触面的接触摩擦效应将使干缩应力计算结果偏大。

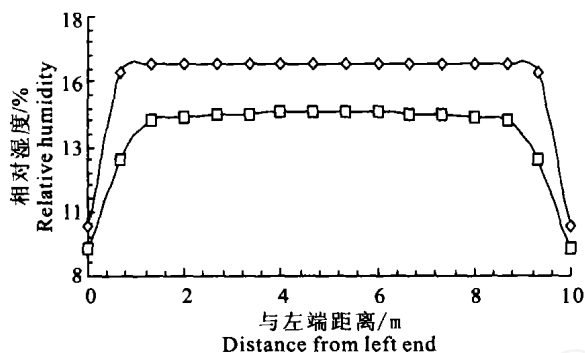


图 4 接触面相对湿度分布

- ◇ - . 不考虑接触面导湿; - □ - . 考虑接触面导湿

Fig 4 Relative humidity distribution of contact interface

- ◇ - . Leave out of consideration humidity conduction of contact in interface; - □ - . Consideration humidity conduction of contact in interface

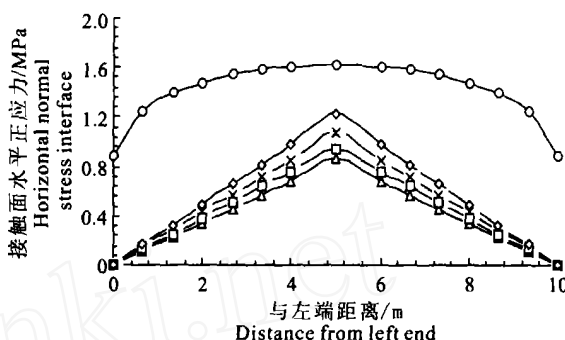


图 5 接触面干缩水平正应力分布

- ○ - . 弹性有限元解; - × - . 解析解; - △ - . 摩擦角 40° ;
- □ - . 摩擦角 50° ; - ◇ - . 摩擦角 60°

Fig 5 Shrinkage horizontal normal stress of interface

- ○ - . Elasticity FEM; - × - . Calculation formula;
- △ - . Friction angle 40° ; - □ - . Friction angle 50° ;
- ◇ - . Friction angle 60°

4 结 语

面板堆石坝混凝土面板的干缩应力, 是导致面板产生裂缝的主要原因之一。面板干缩应力的分析计算, 应建立在较为合理而有效的面板与垫层之间接触面湿度场, 及干缩应力有限元计算模型的基础上。本研究基于湿度传导理论及一般外荷载作用下的接触摩擦单元理论, 经过系统分析, 建立了面板与

垫层之间接触面湿度场及干缩应力的有限元计算模型。算例计算结果表明, 应用该模型可以获得较为准确合理的接触面湿度场及干缩应力计算结果。基于该模型, 可进行面板堆石坝整体的湿度场及干缩应力仿真计算, 从而获得较为准确合理的面板干缩应力变化及其分布规律。关于该模型在面板堆石坝面板干缩应力分析中的应用实例, 笔者将另文叙述。

[参考文献]

- [1] 麦家焯, 孙立勋. 西北口堆石坝面板裂缝成因的研究[J]. 水利水电技术, 1999, 30(5): 32- 34
- [2] 罗先启, 刘德富, 黄 峰. 西北口面板堆石坝面板裂缝成因分析[J]. 人民长江, 1996, 27(9): 32- 34
- [3] 杨德福, 马锋玲, 何树祥, 等. 混凝土面板温度收缩应力及相关参数分析[J]. 实验研究, 2002, 30(7): 59- 69
- [4] 王瑞骏, 李九红, 王党在, 等. 堆石坝混凝土面板湿度场及干缩应力研究[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 53- 57
- [5] 张国新, 彭 静. 考虑摩擦约束时面板温度应力的有限元分析[J]. 水利学报, 2001, 42(11): 75- 79
- [6] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 8- 15
- [7] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 90- 92; 112- 124; 517- 519

- [8] 雷晓燕, Swoboda G, 杜庆华 接触摩擦单元的理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 23- 32
- [9] 雷晓燕 不同材料交界面上接触应力的有限元分析[J]. 应用力学学报, 1995, 12(3): 116- 119
- [10] 雷晓燕 大位移接触摩擦单元在工程设计中的应用[J]. 华东交通大学学报, 1994, 11(1): 1- 10
- [11] 朱伯芳, 王同生, 丁宝璞, 等 水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1976 373- 383

Research on model of interface in the calculation of Shrinkage stress of concrete slabs

WANG Rui-jun, LI Zhang-hao, CHEN Yao-long

(Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Based on the theory of humidity conduction and the theory of contact-friction interface element of normal outer loads, the FEM calculation model of humidity field and shrinkage stress of interface between slabs and cushion layer is established by analyzing systematically. The example shows that quite reasonable calculation results of humidity field and shrinkage stress of interface can be obtained by the model

Key words: hydro-structure; concrete slabs; shrinkage stress; interface model; FEM

《河北林果研究》2006 年征订启事

《河北林果研究》是河北农业大学主办、国内外公开发行的学术性期刊, 主要刊登林学、果树园艺、园林绿化、蚕桑、林业经济管理专业及相关基础学科的学术论文、研究简报和专题综述, 以及对生产有重要参考价值的论文等。本刊适合农林院校师生、林、果、桑、园林专业及生物、环境等学科的科研及生产部门的科技工作者及管理人员订阅。

本刊为“中国科技核心期刊”, 为《中国林业文摘》、《中国农业文摘》、《中国生物学文摘》源刊, 并被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国科技论文统计分析》数据库全文收录, 所刊发论文多被同行科技人员引用。

本刊为季刊, 逢季末月 25 日出版。大 16 开, 每期定价 6.00 元, 全年 24.00 元。邮发代号: 18-256, 读者可到当地邮局订阅, 也可与本刊编辑部联系订阅。

通讯地址: 保定市河北农业大学东校区学报编辑部林果研究编辑室 邮编: 071001

电话: 0312-7526751, 7526750 E-mail: xuebaolin@mail.hebau.edu.cn