网络出版时间:2015-04-13 12:59 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.05.017 网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150413.1259.017.html

# 裂缝对渗流场影响的数值模拟方法研究

## 高 笑,李宗利,李 洋

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】研究裂缝对渗流场影响的数值模拟方法,为岩石、混凝土等材料裂缝渗流场的变化研究提供 支持。【方法】在等效连续介质模型框架下提出渗透系数张量修正法,并基于流量等效原理推导出修正单元的渗透系 数张量矩阵。应用有限元分析软件,分别建立裂缝位于构件边界和构件内部时的分析模型,应用渗透系数张量修正 法得到的渗透系数张量表达式定义裂缝单元的渗透特性,将模拟所得渗流场与裂缝真实存在的数值分析结果进行比 较,并通过改变修正单元的尺寸分析渗透系数张量修正法对单元尺寸的依赖性。【结果】修正单元为 10 倍裂缝宽度 时,与精确解相比,各分析模型所得渗流量及相应断面孔隙水压的误差均小于 0.5%。就单元尺寸依赖性而言,为满 足工程精度要求,从渗流量角度分析,修正单元的尺寸应不大于 600 倍裂缝宽度;从孔隙水压角度分析,修正单元的 尺寸应不大于 200 倍裂缝宽度。【结论】所建立的等效处理方法合理可行,当修正单元的尺寸不大于 200 倍裂缝宽度 时,无论是渗流量还是孔隙水压,该处理方法均能满足工程精度要求。

[关键词] 裂缝;渗流场;数值模拟;渗透系数张量修正法;单元尺寸

[中图分类号] TV223.4 [文献标志码] A

码] A [文

[文章编号] 1671-9387(2015)05-0222-07

# Numerical simulation method for effect of cracks on seepage field

#### GAO Xiao, LI Zong-li, LI Yang

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study focused on numerical simulation method for the impact of cracks on seepage field to support the research of variations in seepage field of rock or concrete caused by cracks. [Method] Based on the equivalent continuum model and equivalent flow principle, modified permeability tensor method was proposed and the permeability tensor matrix of the modified element was derived. Then, using finite element software, numerical model with a boundary crack or an inner crack was built. The seepage fields of established model were compared to models with real cracks and element size was modified to analyze the effect of element size on this method. [Result] Compared with the exact solution, the error of the seepage flux and the corresponding pore water pressure of the models with modified elements of 10 times of the crack width was less than 0.5%. To meet the precision requirement in engineering, from the view of seepage flux, fixed element size should be no more than 200 times of the crack width. [Conclusion] The proposed method was reasonable and feasible. Considering both seepage flux and pore water pressure, the proposed method can meet the engineering precision requirements when modified element size was no more than 200 times of the crack width.

[收稿日期] 2013-12-13

[作者简介] 高 笑(1987-),男,陕西佳县人,在读硕士,主要从事水利水电工程设计研究。E-mail:gaoxiao1119@sina.cn

<sup>[</sup>基金项目] 国家自然科学基金项目(51379178,50779057);中央高校基本科研业务费专项(ZD2012015)

<sup>[</sup>通信作者] 李宗利(1967-),男,陕西凤翔人,教授,博士生导师,主要从事水工结构与岩土工程稳定分析理论、水工金属结构设计 理论与方法研究。E-mail:zongli02@163.com

Key words: cracks; seepage field; numerical simulation; modified permeability tensor method; element size

高坝、地下洞室等结构的渗流场数值分析是目 前研究的重要课题之一。岩体和混凝土自身存在着 裂缝,这些裂缝控制着其周围的渗流场。目前处理 裂缝效应的模型[1-2]主要有3种,分别是等效连续介 质模型、离散介质模型和双重介质模型,这3种模型 都只是考虑已有裂缝的渗流问题,却忽略了岩体或 混凝土在力的作用过程中新生裂缝对其渗流的影 响。尤其是在渗流-应力或损伤分析中,裂缝是动态 发展的,势必引起渗流场的局部变化,严格地讲需要 重新划分网格,但实际上很难做到。目前国内外就 动态裂缝扩展对应力场影响的研究已有成熟方法, 最具代表性的有 Rots<sup>[3]</sup>基于旋转裂缝模型的劲度 矩阵修正法及 Bazant 等<sup>[4]</sup> 基于裂纹带模型的损伤 折减法等,但是考虑动态扩展裂缝对渗流场影响的 研究成果却很少。杨天鸿等[5-6]从细观力学角度,针 对岩体裂缝引入突变系数修正裂缝单元的渗透性 能,但并不能体现裂缝所产生渗流的各向异性,突变 系数的取值也缺乏理论或试验支撑。

等效连续介质模型<sup>[7-9]</sup>将裂缝中的水流等效到 研究体中,在分析过程中可不用重新划分网格。而 渗透系数张量是将研究体作为等效连续渗透介质的 重要参数,在很大程度上决定了渗流场分析的正确 与否。对裂隙岩体渗透系数张量的研究现已较为成 熟,Long等<sup>[10]</sup>应用连续介质理论得到了裂缝性岩 体的等效渗透率张量,但却忽略了基岩的渗透性。 李亚军等<sup>[11]</sup>依据流量等效原理,得到含有多条裂缝 的等效渗透率张量的数学模型。刘建军等<sup>[12]</sup>基于 流量等效原理,推导出含裂缝岩块的渗透系数张量。 荣冠等<sup>[13]</sup>应用能量叠加原理得到节理岩体的渗透 系数张量,虽强调了节理的连通性,但却忽略了基岩 以及非连通节理对节理岩体渗透性的影响。姚军 等<sup>[14]</sup>基于流量等效原理,应用边界元算法得到了裂 缝性多孔介质网格块的等效渗透率张量。以上理论 都是将裂缝的渗透性等效到整个研究体或表征体元 中,并未从数值模拟的单元层次考虑裂缝对渗透性 的影响。可见需结合考虑裂缝与基质体的渗透特 性,研究裂缝单元的渗透系数张量,通过修正裂缝单 元的渗透性,则可体现出裂缝对混凝土或岩体渗流 场的影响。为此,本研究基于等效连续介质模型,利 用流量等效原理,综合考虑基质与裂缝的渗透特性, 修正裂缝单元的渗透系数张量,而数值分析模型并 不重新划分网格,以此体现裂缝的存在及其对渗流 场的影响,以期为考虑裂缝存在及其发展对岩石、混 凝土等材料渗流场影响的数值分析研究提供参考。

#### 1 裂缝单元的渗透系数张量

含有裂缝的单元,即修正单元,在产生裂缝之前 其渗透系数张量为各向同性,之后变为各向异性,且 以裂缝的扩展方向为渗流主方向(下文中的主方向 均为裂缝扩展方向)。由于垂直裂缝方向的研究体 结构变化很小,认为垂直渗流主方向的渗透系数保 持不变,因此只需修正裂缝单元主方向的渗透系数。

基于流量等效原理,通过修正单元的流量,等于 通过裂缝的流量与通过完整单元的流量除去裂缝流 量所剩部分(下称残缺单元)流量之和。裂缝与单元 相比很小,且完整单元的渗透系数也远小于裂缝的 渗透系数,则可以用通过完整单元的流量代替通过 残缺单元的流量,因此通过修正单元的流量代替通过 戏缺单元的流量,因此通过修正单元的流量等于通 过裂缝与完整单元的流量之和。单元的流量以流出 流量计算,任意单元的流量等于主方向(裂缝方向) 和垂直主方向流量之和。又因垂直主方向的渗透系 数保持不变,所以修正单元主方向流量等于裂缝流 量与完整单元主方向流量之和,等效原理示意图如 图1所示,图中1、2、3、4 为单元节点编号,5、6 为裂 缝两端位置点编号。



图 1 修正单元等效原理图 Fig. 1 Equivalent principle of modified element

裂缝修正单元的流量等效原理为:

①如图 1(a)所示,修正单元主方向  $\zeta$ 流出的流 量  $q'_{\zeta}$ (以四面体单元为例,取单宽计算,下同)为:

$$q'_{\zeta} = -k_{\zeta}' \frac{\partial h_{14}}{\partial n_{\zeta}} l_{14} \sin \theta_1 - k_{\zeta}' \frac{\partial h_{34}}{\partial n_{\zeta}} l_{34} \sin \theta_2 \,. \tag{1}$$

式中: $k_{\xi}$ '为修正单元等效之后主方向的渗透系数, m/s; $l_{14}$ 、 $l_{34}$ 分别为节点 1 与 4、3 与 4 的距离,m;  $h_{14}$ 、 $h_{34}$ 分别为单元边界  $l_{14}$ 、 $l_{34}$ 位置处的平均水头, m; $n_{\xi}$ 为渗流主方向; $-\partial h_{14}/\partial n_{\xi}$ 、 $-\partial h_{34}/\partial n_{\xi}$ 分别为 单元边界  $l_{14}$ 、 $l_{34}$ 在主方向的水力梯度; $\theta_{1}$ 、 $\theta_{2}$ 分别为 主方向与  $l_{14}$ 、 $l_{34}$ 的夹角(《90°)。

②如图 1(b)所示,完整单元主方向 $\zeta$ 流出的流 量  $q_{\zeta}$ "为:

$$q_{\zeta}'' = -k_{\zeta}'' \frac{\partial h_{14}}{\partial n_{\zeta}} l_{14} \sin \theta_1 - k_{\zeta}'' \frac{\partial h_{34}}{\partial n_{\zeta}} l_{34} \sin \theta_2 \,. \tag{2}$$

式中: $k_{\xi}$ "为完整单元主方向的渗透系数,m/s;其余同上。

③如图 1(c)所示,裂缝的流量  $q_f$  为:

$$q_f = -k_f \frac{h_6 - h_5}{l_{56}} b, \qquad (3)$$

$$k_f = \frac{\gamma b^2}{12\mu} \,. \tag{4}$$

式中: $k_f$  为裂缝渗透系数,由立方定律<sup>[15-16]</sup> 得到, m/s; $h_5$ 、 $h_6$  分别为由节点水头插值所得裂缝扩展末 端、扩展始端的水头,m; $l_{56}$ 为裂缝长度,m;b 为裂缝 宽度,m; $\gamma$  为水的重度,N/m<sup>3</sup>; $\mu$  为水的黏度, (N•s)/m<sup>2</sup>。

④由 
$$q_{\zeta}' = q_{\zeta}'' + q_{f}$$
,得:  
 $k_{\zeta}' = k_{\zeta}'' + k_{f} [b(h_{6} - h_{5})/l_{56}]/$   
 $(l_{14} \sin \theta_{1} \cdot \partial h_{14}/\partial n_{\zeta} + l_{34} \sin \theta_{2} \cdot \partial h_{34}/\partial n_{\zeta})$ 。(5)  
由于修正单元在等效之后,可视为均匀材料,目

由于修止単元在等效之后,可视为均匀材料,且 单元相对较小,修正单元各位置在裂缝扩展方向的 水力梯度以及裂缝在其扩展方向的水力梯度相差很小,可取相等,则(5)式可表示为:

$$k_{\zeta}' = k_{\zeta}'' + k_f b / L_{\circ}$$
(6)

式中: $L = l_{14} \sin \theta_1 + l_{34} \sin \theta_2$ ,为位于裂缝两侧且距 裂缝最远两节点到裂缝的距离之和。

⑤由(6)式求出修正单元渗流主方向渗透系数  $k_{\xi}'$ ,因垂直裂缝扩展方向的材料结构特性未发生变 化,则垂直渗流主方向渗透系数 $k_{\xi}'$ 不变,取混凝土 渗透系数,即 $k_{\eta}' = k_{\xi}''$ ,则可得修正单元在局部坐标 系( $\zeta$ , $\eta$ )下的渗透系数张量如(7)式所示。经坐标转 化,则可得修正单元在整体坐标系(x,y)下的渗透 系数张量如(8)式所示。

$$\boldsymbol{K}' = \begin{bmatrix} k_{\varsigma}' & 0\\ 0 & k_{\eta}' \end{bmatrix}, \tag{7}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{xy} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} = \lambda^{T} \mathbf{K}' \lambda \,. \tag{8}$$

式中: $k_{xy} = k_{yx}$ 。 $\lambda$ 可按下式计算:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}.$$
(9)

式中:α为整体坐标系 *x* 轴与局部坐标系 ζ 轴的夹角。

## 2 算例验证

为验证以上理论的正确性与精确度,用有限元 大型商业软件 ABAQUS 对图 2 两算例进行数值模 拟分析。算例 1 裂缝位于混凝土构件边界;算例 2 裂缝位于混凝土构件内部。裂缝宽为 0.08 mm,长 为 0.5 m,与水平方向夹角  $\alpha$ =36.87°,裂缝位置(A、 B)、荷载( $p_1$ 、 $p_2$ )及分析断面 I - I(x=0.2 m)、 II - II(x=0.4 m)、II - III(x=0.7 m)、IV - IV (x=0.3 m)、V - V(x=0.7 m)的位置等详见图 2。



图 2 裂缝位置不同的算例 1、2 数值模拟示意图(单位:m)
Fig. 2 Modeling cases 1 and 2 with different crack locations (Unit:m)
算例 1,2 模型参数:构件尺寸 1 m×1 m;混凝 土密度 ρ=2 400 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量 E=20 GPa,泊松

比v=0.167,除修正单元之外的混凝土渗透系数  $k=1\times10^{-10}$  m/s,各向同性;裂缝渗透系数各向异性,主方向渗透系数 $k_f=4.589\times10^{-3}$  m/s(由(4)式 求得),取15°水的黏度 $\mu=0.114\times10^{-4}$ (N·s)/m<sup>2</sup>、 重度 $\gamma=9$  810 N/m<sup>3</sup>,垂直主方向的渗透系数取混 凝土的渗透系数(考虑了裂缝与混凝土接触面的渗 流,取混凝土渗透系数更为合理);构件左侧、右侧分 别作用1000和100 Pa的均匀水压力,并以孔隙水 压力形式施加于模型相应边界;左、右侧为透水边 界,上、下侧为不透水边界;固定构件的水平位移、竖 向位移及角位移;修正单元、较大规则单元均采用孔 压/位移耦合的CPE8RP 四边形八节点平面应变单 元,过渡单元采用孔压/位移耦合的CPE6MP 三角 形六节点平面应变单元;用 Soils(固结)分析步进行 稳态渗流分析。本研究只分析裂缝对渗流场的影

响,不考虑重力对渗流场的影响。

首先,分别建立算例1、2裂缝真实存在的模型, 将裂缝视为一种嵌入在非裂缝单元边界的均质材料 单元,其主方向渗透系数按式(4)计算,单元的尺寸 为裂缝宽度,这样处理实际上是精确计算,可作为精 确解,为下文中算例1、2含有修正单元模型的模拟 结果的检验标准。算例1有42020个单元、86669 个节点,算例2有37902个单元、78423个节点。 然后,分别建立算例1、2修正单元为10倍裂缝宽度 的模型,即 N=L/b=10,修正单元主方向渗透系数 为4.589×10<sup>-6</sup> m/s,算例1有1626个单元、3625 个节点,算例2有1910个单元、4189个节点。算 例1、2精确解模型与相应含有修正单元模型的网格 划分、单元分布以及模拟所得渗流场见图3、4。

입 가격 특히 감독 행사에서 전설적 가지만 듯 방법에서 영양적 가지만 못 방법에 관계적 지방에 가지만 등 정하여 입지가 지않는 것이 성식 가격을 벗어야 듯 것이 가
는 동생의 감독, 제가도는 동생이는 동안하는 것에야? 한 동안이로서 절성이는 동안이 집 수 있다. 것을 다 말했는 것을 하는 것을 하는 것이 못 하는 것을 하는 것이 못 하는 것을 다 나라.
비행하는 가격이 없는 것은 것은 것이다. 그는 것은 것
입 구방 안에서, 승규는 방법화가 구방 방에서 모든 사람이 있다. 구방 방에서 모든 것 같았다. 구방 방에서 모든 것 같았다. 가동안에 구방 안에서는 것 같은 사람들이 있는 것이 것 않는 것 같았다.
성장 이렇게 수 있다. 지수는 정말 이렇게 하는 것을 가지 않는 것을 만들는 것을 하는 것을 하는 것을 만들는 것을 하는 것을 수 있다. 것을 수 있는 것을 수 있는 것을 하는 것을 하는 것을 하는 것을 수 있는 것을 하는 것을 수 있다. 것을 수 있는 것을 수 있는 것을 수 있는 것을 수 있는 것을 수 있다. 것을 수 있는 것을 수 있다. 것을 수 있는 것을 수 있다. 것을 수 있는 것을 수 있다. 것을 수 있는 것을 수 있다. 것을 것을 수 있는 것을 수 있는 것을 수 있는 것을 수 있는 것을 수 있다. 것을 것을 것을 수 있는 것을 것을 수 있는 것을 수 있는 것을 것을 수 있다. 것을 것을 것을 것을 것을 것을 것을 것을 것을 수 있는 것을 것을 것을 수 있다. 것을
이 것은 것에 많은 것을 많이 많은 것에 들고 있는 것이다. 말에 있는 것에서 가지 않는 것이 들었다. 것이 많은 것이 많은 것이 많은 것이 같은 것이 없는 것이 없는 것이 없는 것이 없는 것이 없다.
성 가슴 Malety 10 TEN 등에 가슴 사람을 하는 것 같아. 등에 가슴 10 TEN 등에 가슴
승규는 것이 모양 물건에 다른 경험이 있는 모양님께 다른 전성이 있는 모양이 가지나면 방법이 있는 모양이 가지 못했어? 이 것은 것이 못 물건가 지않는 것이 모양이 있는 것을 것이다.
이제이 집중하는 방법적인 이 방법에 집안했던 것 같아요. 이 정말 집안 했는 것 같은 것은 것 같이 가 없는 것 같은 것 같은 것 같아요. 것 같이 가 있는 것 같은 이 가 있는 것 같이 것 같이 것 같이 것 같이 것 같아요. 것 같이 것 같이 것 같아요. ????????????????????????????????????
a state and the state of t
방법이 가지 않는 것을 가지도 못했던 해외에 도둑을 가지도 못했던 것을 했다. 것은 것을 가지 않는 것을 가지 않는 것을 가지 않는 것을 했다. 것을 것 같아요. 한 것을 했다. 한 것을 하는 것을 가지도 못했다.
[[14][14] 이상동방 이 특별님 [[14][14]] 이 정도에 가장되는 이상 방문 이상동문에서 귀엽을 이상동문에 가장되는 것으로 이상동문에서 귀엽을 이상 중도에 가장되는 것 같은 것이 있다.
25 - MEREN 27 - MEREN CHEREN - MEREN 27 - MEREN (MEREN) 28 - MEREN (MEREN) 28 - MEREN (MEREN 2007) 28 - MEREN (MEREN 2007)
nie werzen er werzen en er werzen er en er er en er

图 3 算例 1 精确解模型和修正单元模型的 网格划分及其渗流场

Fig. 3 Meshing and seepage field of models of exact solution and modified elements of case 1

算例1含有修正单元的模型模拟所得单宽流量 为1.182×10<sup>-11</sup> m<sup>3</sup>/s,相应的精确解为1.179×  $10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s。算例2含有修正单元的模型模拟所得 单宽流量为1.049×10<sup>-11</sup> m<sup>3</sup>/s,相应的精确解为 1.047×10<sup>-11</sup> m<sup>3</sup>/s。经计算可得算例1、2修正单元 为10倍裂缝宽度的模型模拟所得单宽渗流量 q 与 其相应精确解相比,误差分别为0.29%和0.21%, 图 4 算例 2 精确解模型和修正单元模型的 网格划分及其渗流场

Fig. 4 Meshing and seepage field of models of exact solution and modified elements of case 2
都远小于工程允许误差(5%)。从图 3(a)、(b)和图 4(a)、(b)可以看出,算例 1、2 中修正单元为 10 倍裂 缝宽度模型模拟所得渗流场与其相应精确解整体上

差别很小。算例1中断面 $I - I \ \Pi - \Pi$ 和 $\Pi - \Pi$ 孔隙水压的对比见图 5,算例2中断面N - N和 V - V孔隙水压的对比见图6。

图 5 算例 1 修正单元为 10 倍裂缝宽度模型相应断面的孔隙水压 Fig. 5 Section pore water pressure of case 1 with modified element of 10 times of the crack width

图 6 算例 2 修正单元为 10 倍裂缝宽度模型相应断面的孔隙水压

Fig. 6 Section pore water pressure of case 2 with modified elements of 10 times of the crack width

由图 5 可以看出,在断面 I − I、II − II 和 III − II,算例 1 修正单元为 10 倍裂缝宽度模型模拟所得 孔隙水压与精确解相应位置的孔隙水压相比,最大 误差依次约为 0.12%,0.47%,0.32%,均远小于工 程允许误差。由图 6 可以看出,在断面 IV − IV 和 V − V,算例 2 修正单元为 10 倍裂缝宽度模型模拟 所得孔隙水压与精确解相应位置的孔隙水压相比,最 大误差分别约为0.29%和 0.38%,远小于工程允许误 差。可见,无论裂缝位于构件边界还是内部,应用式 (5)~(9)对裂缝单元的渗透系数张量进行等效处理, 用以分析裂缝对渗流场的影响,该方法合理可行。

### 3 单元大小局限性分析

以上两算例虽验证了应用式(5)~(9)对修正单 元的渗透系数张量进行等效处理的可行性,但其修 正单元为裂缝宽度 10 倍这一数量级,修正单元相对 较小。为此,将算例 1、2 中的修正单元依次放大到 裂缝宽度的 100,200,300,400,600,700 和 800 倍, 分别从渗流量和孔隙水压角度,研究单元大小对该 等效处理方法的影响。

算例 1、2 中相应修正单元主方向渗透系数见表 1,各模型建立方法(包括网格划分、单元分布)与修 正单元为 10 倍裂缝宽度类似,且渗流场分布与相应 精确解相似,这里不再重复。依据分析的需要,图 7 仅给出算例 1 部分模型断面,即断面 I − I、II − II 和III − III 的孔隙水压对比结果,图 8 仅给出算例 2 部分模型断面,即断面 IV − IV 和 V − V 的孔隙水压 对比结果。算例 1、2 各模型模拟所得的渗流量如表 1 所示。

表 1 修正单元大小为 N 倍裂缝宽度的主方向渗透系数 k<sub>x</sub> 以及相应模型计算的流量

Table 1 Principal permeability coefficient of modified elements for N times of crack width and seepage flux

	$(\times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	算例 1 Case 1		算例 2 Case 2	
裂缝宽度倍数(N) Times of crack width		流量/ (×10 <sup>-11</sup> m <sup>3</sup> ・s <sup>-1</sup> ) Flux	误差/% Error	- 流量/ (×10 <sup>-11</sup> m <sup>3</sup> • s <sup>-1</sup> ) Flux	误差/% Error
100	45.89	1.194	1.29	1.060	1.28
200	22.945	1.203	2.05	1.068	2.05
300	15.297	1.210	2.67	1.073	2.46
400	11.473	1.212	2.86	1.079	3.10
600	7.648	1.230	4.37	1.095	4.55
700	6.556	1.237	4.93	1.100	5.10
800	5.736	1.243	5.44	1.106	5.67
精确解 Exact value		1.179	_	1.047	_

由表1可得,算例1修正单元为100,200,300, 400,600,700,800倍裂缝宽度时,各模型的渗流量 与其精确解相比,误差分别为1.29%,2.05%, 2.67%,2.86%,4.37%,4.93%和5.44%;算例2 修正单元为100,200,300,400,600,700倍裂缝宽度 时,各模型的渗流量与其精确解相比,误差分别为 1.28%,2.05%,2.46%,3.10%,4.55%和5.10%。 可见仅从渗流量角度考虑,要满足工程精度(误 差<5%)要求,当裂缝位于构件边界时,修正单元应 不大于700倍裂缝宽度;当裂缝位于构件内部时,修 正单元应不大于600倍裂缝宽度;当构件边界和内 部都有裂缝时,修正单元应不大于600倍裂缝宽度。



图 7 算例 1 修正单元为 N 倍裂缝宽度的模型相应断面孔隙水压示意图

Fig. 7 Section pore water pressure of casel with modified elements of N times of the crack width

<del>na na na na na n</del> a katika katika katika da
동생님은 방법은 방법은 동생은 것을 것을 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다
[10][11][27][27][27][27][27][27][27][27][27][27
<u>그는 것 같은 것 같은 것 같은 것 같은 것 같은 것은 것은 것을 하는 것 같은 것 같</u>

图 8 算例 2 修正单元为 N 倍裂缝宽度的模型相应断面孔隙水压示意图

Fig. 8 Section pore water pressure of case 2 with modified elements of N times of the crack width

由图 7 可以看出,算例 1 修正单元为 300,400 倍裂缝宽度的模型与其相应位置的精确解相比,在 断面 I 一 I,最大误差依次约为 1.19%,1.32%;在 断面 II 一 II,最大误差依次约为 4.86%,5.86%,且 均在裂尖附近位置但并不在裂尖;在断面 III 一 III,最 大误差依次约为 2.88%,3.15%。由图 8 可知,算 例 2 修正单元为 200,300 倍裂缝宽度的模型与其相 应位置的精确解相比,在断面 N - N,最大误差依次 约为 3.52%,4.11%;在断面 V - V,最大误差依次 约为 4.78%,5.61%。可见仅从孔隙水压角度考 虑,要满足工程精度(误差<5%)要求,当裂缝位于 构件边界时,修正单元应不大于 300 倍裂缝宽度;当 裂缝位于构件内部时,修正单元应不大于 200 倍裂 缝宽度;当构件边界和内部都有裂缝时,修正单元应 不大于 200 倍裂缝宽度。

综上可知,同时考虑渗流量和孔隙水压,应用式 (5)~(9)对不大于 200 倍裂缝宽度的修正单元进行 等效处理,可以满足工程精度要求。

4 结 论

1)在荷载作用下,构件边界或内部产生裂缝,在 等效连续介质模型不变网格框架下,依据流量等效 原理修正裂缝单元的渗透系数张量以体现裂缝对构 件渗流场的影响,是合理可行的。

2)本研究提出的渗透系数张量修正法受到修正 单元大小的影响。仅从渗流量角度,修正单元尺寸 应不大于 600 倍裂缝宽度;仅从孔隙水压角度,修正 单元尺寸应不大于 200 倍裂缝宽度;二者同时考虑, 则要求修正单元不大于 200 倍裂缝宽度。

#### [参考文献]

[1] 宋晓晨,徐卫亚. 裂隙岩体渗流概念模型研究 [J]. 岩土力学, 2004,2(2):226-231.
Song X C, Xu W Y. A study on conceptual models of fluid flow in fractured rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,2(2): 226-231. (in Chinese)
[2] 祝云华,刘新荣,梁宁慧,等. 裂隙岩体渗流模型研究现状与展

望 [J]. 工程地质学报,2008,16(2):178-183. Zhu Y H, Liu X R, Liang N H, et al. Current research and prospects in modeling seepage field in fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Engineering Geology,2008,16(2):178-183. (in Chinese)

- [3] Rots J G. Computational modeling of concrete fracture [M]. Delft:Technische Hogeschool Delft,1988.
- [4] Bazant Z P, Oh B H. Crack band theory for fracture of concrete [J]. Materials and Structure, 1983, 16:155-177.
- [5] 杨天鸿,唐春安,朱万成,等. 岩石破裂过程渗流与应力耦合分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(4):489-493.
   Yang T H, Tang C A, Zhu W C, et al. Coupling analysis of

seepage and stress in rock failure process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 489-493. (in Chinese)

- [6] 杨天鸿,屠晓利,於 斌,等. 岩石破裂与渗流耦合过程细观力 学模型 [J]. 固体力学学报,2005,26(3):333-337.
  Yang T H, Tu X L, Yu B, et al. A micromechanical model for simulating the coupling of fracture and flow of rock [J]. Acta Mechanica Solida Sinica,2005,26(3):333-337. (in Chinese)
- [7] 张有天,张武功. 裂隙岩石渗透特性渗流数学模型及系数量测
   [J]. 岩石力学,1982(8):41-52.
   Zhang Y T,Zhang W G. Seepage mathematical model and coefficient measurement of fractured rock [J]. Chinese Journal of

ficient measurement of fractured rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics,1982(8):41-52. (in Chinese)

- [8] Oda M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses [J]. Water Resources Research, 1986, 22(13):1845-1856.
- [9] Snow D T. Anisotropic permeability of fractured media [J].Water Resources Research, 1969, 5(6): 1273-1289.
- [10] Long J C S, Remer J S, Wilson C R, et al. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures [J]. Water Resources Research, 1982, 18(3):645-658.
- [11] 李亚军,姚 军,黄朝琴,等.裂缝性油藏等效渗透率张量计算 及表征单元体积研究[J].水动力学研究与进展,2010,25 (1):1-7.

Li Y J, Yao J, Huang Z Q, et al. Calculation of equivalent permeability tensor and study on representative element volume for modeling fractured reservoirs [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(1):1-7. (in Chinese) [12] 刘建军,刘先贵,胡雅礽,等.裂缝性砂岩油藏渗流的等效连续 介质模型 [J].重庆大学学报:自然科学版,2000,23(S1): 158-160.

> Liu J J, Liu X G, Hu Y R, et al. The equivalent continuum media model of fracture sandstone reservoir [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(S1): 158-160. (in Chinese)

 [13] 荣 冠,周创兵,王恩志. 裂隙岩体渗透系数张量计算及其表 征单元体积初步研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2007,26
 (4):740-746.

Rong G, Zhou C B, Wang E Z. Preliminary study of permeability tensor calculation of fractured rock mass and its representative elementary volume [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4), 740-746. (in Chinese)

- [14] 姚 军,李亚军,黄朝琴,等.裂缝性油藏等效渗透率张量的 边界元求解方法 [J]. 油气地质与采收率,2009,16(6):80-83.
  Yao J,Li Y J,Huang Z Q,et al. Calculation of equivalent permeability tensors of fractured reservoirs using boundary element method [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2009,16(6):80-83. (in Chinese)
- [15] Bear J. Dynamics of fluids in porous media [M]. New York: Elsevier, 1972.
- [16] 田开铭,万 力. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价
  [M].北京:学苑出版社,1989.
  Tian K M, Wan L. Research and evaluation of the permeability of anisotropic fractured media [M]. Beijing: Academy Press, 1989. (in Chinese)

(上接第 221 页)

[14] 朱训国,杨 庆.膨胀岩的判别与分类标准 [J]. 岩土力学, 2009,30(2):174-177.

Zhu X G, Yang Q. The standards on discrimination and classification of expansive rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(2):174-177. (in Chinese)

[15] 崔宗婧.工程膨胀土的判别与分类问题研究 [J]. 科技信息, 2011(27):710,732.

Cui Z J. Testing study on discrimination and classification of expansive soil in engineering [J]. Science & Technology Information,2011(27):710,732. (in Chinese)

[16] 杨 洋.膨胀土判别和膨胀潜势分类研究 [D]. 武汉:中国科 学院武汉岩土力学研究所,2005.

Yang Y. Expansive soil discrimination and classification re-

search of expansion potential [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)

[17] 国家计划委员会.GBJ 112-87 膨胀土地区建筑技术规范 [S].北京:中国计划出版社,1989.

> State Planning Commission. GBJ 112-87 Construction technical specification of expansive soil region [S]. Beijing: China Planning Press, 1989. (in Chinese)

 [18] 徐则民,黄润秋,唐正光,等. 黏土矿物与斜坡失稳 [J]. 岩石 力学与工程学报,2005,24(5):729-740.
 Xu Z M, Huang R Q, Tang Z G, et al. Clay mineral and failure

Au Z M, Huang K Q, Iang Z G, et al. Clay mineral and failure of slopes [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(5):729-740. (in Chinese)