

基于 XFEM 的渡槽单向地震动 作用下裂纹开展分析

何祥瑞, 张 华, 纪爱丽

(淮海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 以排架渡槽为研究对象,建立了基于 ABAQUS 平台的扩展有限元法的二维橡胶支座排架渡槽线弹性计算模型。计算了不同地震波激励下渡槽结构的裂纹开裂扩展及在动态变化循环过程中渡槽结构的等效应力,对比分析了不同地震波作用下渡槽结构的裂纹开裂范围及损伤程度。研究表明:XFEM 能够较好地模拟渡槽结构的裂纹开裂和扩展情况;连梁与排架柱节点以及排架柱底部是排架渡槽的抗震薄弱部位。

关键词: 排架渡槽; 橡胶支座; 裂纹扩展; XFEM; ABAQUS; 单向地震

中图分类号:TV312

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0186-04

Analysis of crack growth of aqueduct under effect of single dimensional earthquake force based on XFEM

HE Xiangrui, ZHANG Hua, JI Aili

(College of Civil Engineering and Traffic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking bent-type aqueduct as study object, the paper established a linear elastic calculating model with two-dimensional aqueduct of rubber bearings based on ABAQUS platform with XFEM. It calculated the growth and extension of cracks and the equivalent stress of aqueduct structures during dynamic circulating process under different seismic waves, and analyzed the range of cracks and the damage degree of aqueduct structures. The results show that XFEM can better simulate the crack dehiscence and expansion of aqueduct structure. Both the joints between beam and column, and the bottom of column are the weak parts of anti-seismic of aqueduct structure.

Key words: bent-type aqueduct; rubber bearings; crack expander; XFEM; ABAQUS; single dimensional earthquake

渡槽是一种重要的交叉水工建筑物,在大型输水建筑工程中具有很重要的作用,不仅可以用于农田灌溉、城镇和工业用水以及跨流域调水,还能够用于泄洪和导流。由于渡槽的结构简单,施工便利,输水能力强,因此在我国各地的应用十分广泛。我国是世界上地震频发的国家之一,就灌区而言,有许多输水建筑物位于地震烈度 VII 度及 VII 度以上的地区,因此这些输水建筑的稳定性与安全性对整个灌区而言具有重要的影响。渡槽作为一种常见的输水建筑物,其在地震作用下的稳定及安全受到工程界广泛关注。

目前对于地震作用下渡槽结构的研究大多集中在结构的动力特性和动力响应等方面^[1-5],而关于其损伤开裂破坏的研究很少^[6-8],主要集中在渡槽施工期及运行期裂缝控制方面^[9-10]。在公开发表的文献资料中尚未见对于地震作用下渡槽裂纹扩展的研究,因此对渡槽进行地震作用下的裂纹的模拟研究是很有必要的。

本文运用 ABAQUS 有限元分析软件建立了排架渡槽的二维线弹性模型,采用附加质量法模拟水体,基于软件平台自带的扩展有限元法,计算了不同地震波激励下渡槽结构的裂纹开裂扩展及在动态变化循环过程中渡槽结构的等效应力,对比分析了不

同地震波作用下渡槽结构的裂纹开裂范围及损伤程度,得到了排架渡槽结构的抗震薄弱部位。为渡槽结构的抗震加固提供科学依据。

1 扩展有限元法基本原理

扩展有限元法^[11] (The Extended Finite Element Method, 简称 XFEM) 由 Belytschko and Black 首次提出。XFEM 是一种非常有效并且前景广阔的处理方法,能够用于模拟任意相关路径初始裂纹的开裂及扩展过程,而不必重新划分网格。该方法基于整体划分的思想,属于传统有限元方法的延伸,整体划分概念使扩展函数能够方便地插入到有限元方程中,同时间断性可以通过与额外自由度相关联的扩展函数来确定。

有限元计算网格中有一任意的裂缝(图 1),为了在常规有限元位移模式中考虑裂缝对位移的影响,对裂缝周围的结点自由度进行加强。任意一点的位移可以通过以下插值函数求得^[12]。

$$\begin{Bmatrix} u^h(x) \\ v^h(x) \end{Bmatrix} = \sum_{i \in \Omega} \phi_i(x) \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} + \sum_{j \in \Omega_r} \phi_j(x) H(x) \begin{Bmatrix} b_{1j} \\ b_{2j} \end{Bmatrix} + \sum_{m \in \Omega_A} \phi_m(x) [L]^T \begin{Bmatrix} u_m^{tip} \\ v_m^{tip} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $H(x)$ 为 Heaviside 函数,在局部坐标系(图

2) 下定义为:

$$H(x', y') = \begin{cases} 1 & y' > 0 \\ -1 & y' < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: i 为结点形函数; Ω 为整个区域; Ω_r 为裂缝完全贯穿的单元区; Ω_A 为裂尖单元区; (u_i, v_i) 为结点位移; (b_{1j}, b_{2j}) 为结点与 Heaviside 函数有关的加强自由度; (u_m^{tip}, v_m^{tip}) 为裂尖渐进位移场; $[L]$ 为缝尖局部坐标与整体坐标间的坐标转换矩阵。

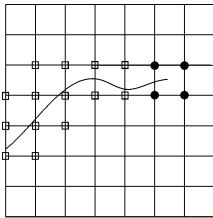


图 1 含有一任意裂纹的网格

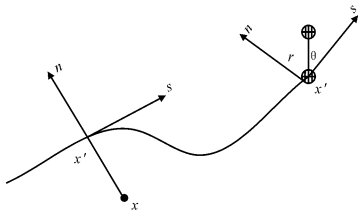


图 2 局部坐标系

对于各向同性材料的 I, II 型混合裂纹扩展问题,裂尖附近广义形式的位移展开式(N 项)^[13]可写为:

$$\begin{Bmatrix} u^{tip} \\ v^{tip} \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^M \begin{bmatrix} f_{11n} & f_{12n} \\ f_{21n} & f_{22n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_{1n} \\ k_{2n} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: k_{1n}, k_{2n} 为相应的系数。 k_{1n}, k_{2n} 给出了同性材料的 I, II 型混合裂纹扩展问题的实部和虚部, $f_{11n}, f_{12n}, f_{21n}$ 和 f_{22n} 由下式给出:

$$\begin{bmatrix} f_{11n} \\ f_{12n} \\ f_{21n} \\ f_{22n} \end{bmatrix} = \frac{r^{n/2}}{2\mu n \sqrt{2\pi}} \begin{Bmatrix} \left[k + \frac{n}{2} + (-1)^n \right] \cos\left(\frac{n}{2}\theta\right) - \frac{n}{2} \cos\left[\left(\frac{n}{2} - 2\right)\theta\right] \\ \left[k + \frac{n}{2} - (-1)^n \right] \sin\left(\frac{n}{2}\theta\right) - \frac{n}{2} \sin\left[\left(\frac{n}{2} - 2\right)\theta\right] \\ \left[k - \frac{n}{2} - (-1)^n \right] \sin\left(\frac{n}{2}\theta\right) + \frac{n}{2} \sin\left[\left(\frac{n}{2} - 2\right)\theta\right] \\ - \left[k - \frac{n}{2} + (-1)^n \right] \cos\left(\frac{n}{2}\theta\right) - \frac{n}{2} \cos\left[\left(\frac{n}{2} - 2\right)\theta\right] \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中: n 为裂纹位移展开式的项数; r 和 θ 为局部裂尖场坐标系中的极坐标; μ 为剪切模量。位移模式构造后,就可以和常规有限元方法一样,由虚功原理推导其有限元求解的基本控制方程,采用罚函数法求解基本控制方程。

2 排架渡槽裂纹开裂扩展计算实例

2.1 计算模型

以某 U 型排架渡槽为例,运用 ABAQUS 建立二维渡槽线弹性计算模型,如图 3 所示。排架渡槽单跨长 10 m,支撑排架高 20.5 m,排架柱宽 0.8 m,拉杆宽 0.3 m,连系梁高 0.6 m。采用二维实体单元对

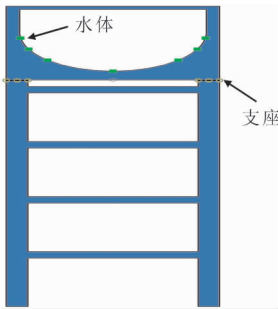
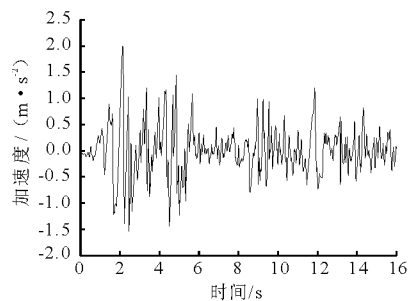


图 3 二维渡槽线弹性模型

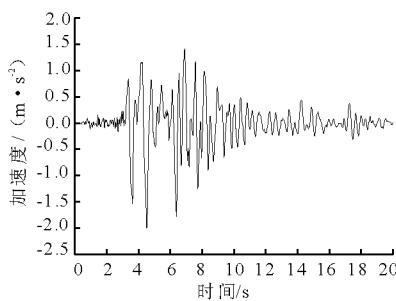
结构进行模拟,槽身截面尺寸如下:半径为 3.5 m,槽壁厚度为 0.5 m。槽身部位采用 C50 混凝土,密度 $\rho = 2\,500\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 3.45 \times 10^4\text{ MPa}$,

泊松比 $\mu = 0.167$; 支撑排架部位采用 C30 混凝土, 密度 $\rho = 2\,500\text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 3.00 \times 10^4\text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.167$ 。基于 ABAQUS 软件自带的裂纹扩展分析中的 XFEM 模式, 采用附加质量法模拟 3.5 m 水深的水体作用。

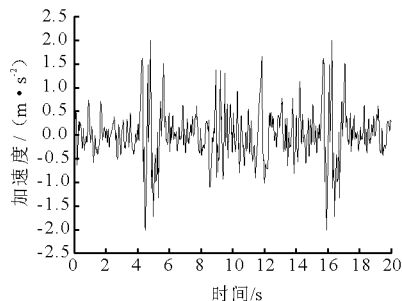
本文采用基于损伤力学演化的失效准则, 损伤起始判据为最大主应力失效准则, 如果裂纹尖端平衡后的主应力超过了任一节点上材料的抗拉强度, 裂纹随之产生并扩展。通过设置损伤起始判据、损伤演化规律及损伤稳定性控制等相关参数实现裂纹扩展, 损伤演化选取基于能量的、线性软化的及混合模式的指数损伤演化规律, 断裂能参数设置为 $GIC = G2C = G3C = 250\text{ N/m}$, 最大主应力 $\sigma_{\max} = 1.716\text{ MPa}$, 弹性模量 $E = 30\text{ GPa}$, 密度 $\rho = 2\,500\text{ kg/m}^3$, 泊松比 $\nu = 0.167$ 。



(a) EL-Centro波



(b) 阪神波



(c) 人工波

图4 地震波横向水平加速度时程曲线

2.2.1 渡槽结构动应力分析 图5、图6和图7所示为不同地震波作用下渡槽结构等效应力云图, 因地震历时是不断变化的动态过程, 因此本文仅给出了一个动态变化循环过程中结构的等效应力云图, 在整个地震波激励过程中, 结构应力处于不断地循环变化之中。在初始时刻, 随着应力的增加, 裂纹尖端的应力值达到临界应力之前不起裂, 地震历时发展, 应力值继续增大, 裂尖最大主应力达到临界值, 于是裂尖处的单元出现失效导致开裂, 最终完全开裂贯穿, 裂尖单元随着应力奇异性的消失而变为普通单元。同时, 等效应力云图反映出渡槽结构连梁两端, 连梁与排架柱节点以及排架柱底部属于抗震薄弱部位, 应在实际工程中采取一定的抗震加固措施。

2.2.2 裂纹开裂扩展分析 图8、图9和图10所示为3种地震波作用下基于 ABAQUS 平台的扩展有限元模拟分析渡槽结构的裂纹开裂扩展过程, 从图中可以看出, 渡槽结构首先在底部连梁的端部出现裂纹, 裂纹沿竖直方向扩展, 直至贯穿连梁截面, 随后其他连梁两端出现裂纹并继续扩展。连梁与排

本文中采用瑞雷阻尼, 依据不同振型计算求得结构阻尼系数中的质量系数 $\alpha = 0.8405$, 刚度系数 $\beta = 0.0018$ 。基于 ABAQUS 平台的 XFEM 功能中, ABAQUS 默认裂纹扩展方向垂直于主拉应力, 不需要额外定义扩展路径, XFEM 就能很好地模拟裂纹的扩展。

2.2 裂纹开裂扩展分析

渡槽附近场地属于 II 类场地, 设计地震烈度为 VIII 度。选用类似场地的 2 条实测地震波 (EL - Centro 波, 阪神波) 及 1 条人工波, 时间步长 $\Delta t = 0.02\text{ s}$, 时程总长 EL - Centro 波为 $T = 16\text{ s}$, 阪神波及人工地震波为 $T = 20\text{ s}$ 。调整其水平地震峰值加速度到设计峰值加速度 (0.2 g), 选取渡槽刚度较弱的横槽向输入水平方向地震荷载。图4为所输入3种地震波的横向水平加速度时程曲线。

架柱的节点出现裂纹, 排架柱底部出现裂纹且裂纹沿横向扩展, 整体结构呈现“强柱弱梁”的损伤特点。对比图8、图9和图10可知, 不同地震波作用下, 渡槽结构出现裂纹的范围及损伤程度略有不同, EL_Centro 波作用下裂纹范围较大, 损伤严重, 阪神波和人工波则相对较小。这表明地震波种类不同, 对结构造成的损伤程度不同, 但损伤区域大致相同, 抗震薄弱部位基本一致。

另外, 对比图5和图8, 图6和图9, 图7和图10可以看出, 渡槽结构裂纹的产生扩展规律与等效应力变化规律一致, 出现裂纹部位的等效应力大于其他部位。可见, XFEM 能较好地模拟渡槽结构损伤开裂位置及裂纹扩展。

3 结 论

本文基于 ABAQUS 平台的 XFEM, 建立了二维排架渡槽线弹性计算模型, 实现了地震作用下在混凝土线弹性模型中模拟渡槽结构裂纹开裂及其扩展, 为实际工程中渡槽结构的损伤破坏提供一定的

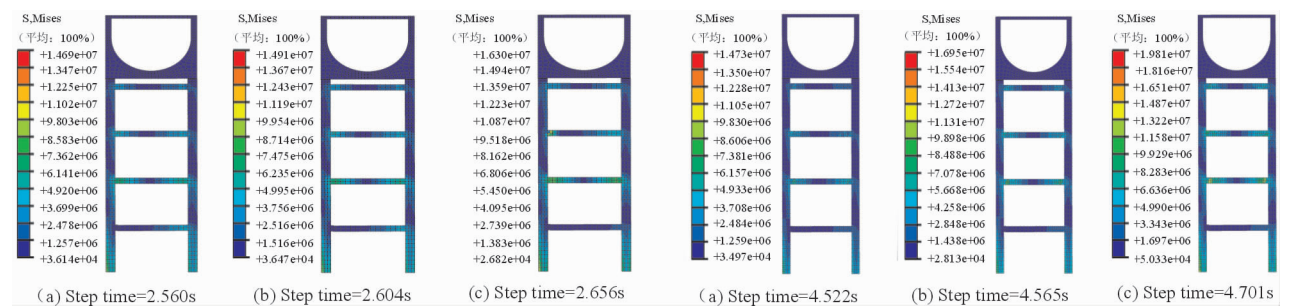


图 5 EL_Centro 波作用下渡槽结构等效应力云图 (单位: Pa) 图 6 阪神波作用下渡槽结构等效应力云图 (单位: Pa)

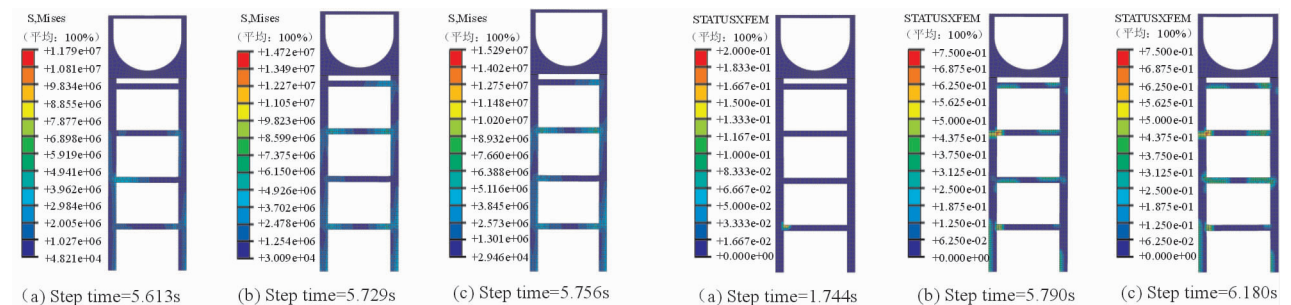


图 7 人工波作用下渡槽结构等效应力云图 (单位: Pa) 图 8 EL_Centro 波作用下渡槽结构裂纹开裂扩展过程

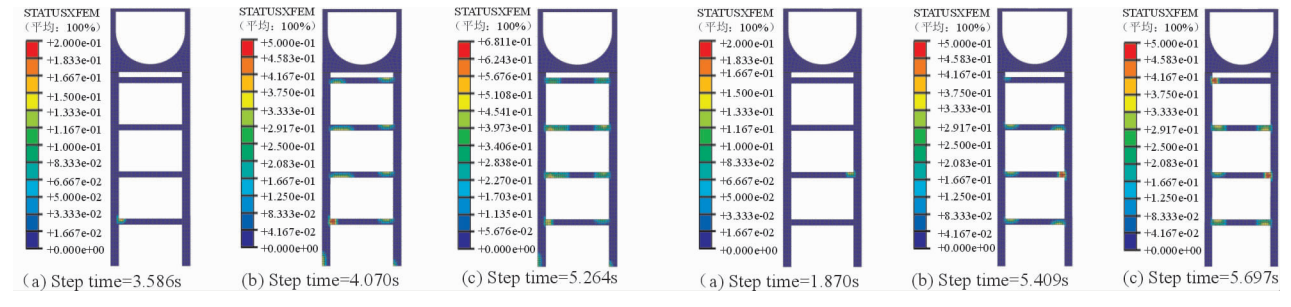


图 9 阪神波作用下渡槽结构裂纹开裂扩展过程 图 10 人工波作用下渡槽结构裂纹开裂扩展过程

借鉴。通过结构开裂破坏及等效应力云图的对比分析得到以下结论:

(1) 渡槽结构首先在连梁的端部出现裂纹并沿竖直方向扩展,直至贯穿连梁截面,随后连梁与排架柱的节点以及排架柱底部出现裂纹且裂纹沿横向扩展,整体表现为“强柱弱梁”的损伤破坏特点。渡槽结构裂纹的产生扩展规律与等效应力变化规律一致,出现裂纹部位的等效应力大于其他部位。可见, XFEM 能较好地模拟渡槽结构损伤开裂位置及裂纹扩展。

(2) 等效应力云图反映出渡槽结构连梁两端,连梁与排架柱节点以及排架柱底部属于抗震薄弱部位,应在实际工程中采取诸如在排架柱之间设置斜向支撑或通过加强梁柱节点等一系列的抗震加固措施。

(3) 地震波种类不同,渡槽结构裂纹的分布范围及损伤程度略有差异。3 种地震波激励下的开裂

破坏过程表明地震波种类不同,对结构造成的损伤程度不同,但损伤区域大致相同,抗震薄弱部位基本一致。

参考文献:

[1] 吴 轶,莫海鸿,杨 春. 大型三维矩形、U 形渡槽地震响应对比分析[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(3): 41 - 46.
[2] 吴 轶,莫海鸿,杨 春. 大型渡槽—水耦合体系动力特性分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2004,32(9): 76 - 81.
[3] 陈庆涛,李 根,张鹏飞,等. 考虑流固耦合的大型渡槽地震响应分析[J]. 水电能源科学,2010,28(2): 89 - 91.
[4] 徐建国,陈 淮,王 博,等. 考虑流固动力相互作用的大型渡槽地震响应研究[J]. 土木工程学报,2005,38(8): 67 - 73.
[5] 李遇春,李大庆,乐运国. 大型渡槽竖向动力特性及地震动力反应[J]. 人民珠江,1999, (5): 45 - 47.

束作用,本文从理论分析入手,提出基于改进的双面弹性地基梁模型,从而分析了堆载条件下的地铁隧道的纵向变形。

(3)本文分析表明:将上覆盖土假定为弹性地基,采用双面弹性地基梁模型计算的变形和内力明显比按弹性地基梁理论计算的变形和内力小。由此发现,深埋隧道应用双面弹性地基梁理论进行隧道纵向变形设计比温克尔弹性地基梁理论更加经济,符合客观规律。

(4)本文结论是基于严格的理论推导得出的,没有进行相应的模型试验以及数值模拟,在将来的研究中可进一步验证。

参考文献:

- [1] 上海市建设管理委员会. DGJ08-109-2004,城市轨道交通设计规范[S]. 北京:人民交通出版社;2003.
- [2] 戴宏伟,陈仁朋,陈云敏. 地面新施工荷载对临近地铁隧道纵向变形的影响分析研究[J]. 岩土工程学报, 2006,28(3):312-316.
- [3] 刘庆晨. 邻近施工对天津既有地铁隧道的影响及保护研究[D]. 天津:天津大学,2013.
- [4] 吴庆. 地面堆载对既有盾构隧道结构的影响研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.
- [5] 林永国. 地铁隧道纵向变形结构性能研究[D]. 上海:同济大学,2001.

- [6] 张治国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学,2011,32(7):2085-2092.
- [7] 白海卫. 新建隧道下穿施工对既有隧道纵向变形的影响和工程措施研究[D]. 北京:北京交通大学,2007.
- [8] 夏明耀,曾进伦. 地下工程设计施工手册[M]. 北京,中国建筑工业出版社,1999.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB50307-1999,地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范[S]. 北京,中国计划出版社,1999.
- [10] 李镜培,丁士君. 邻近建筑荷载对地下管线的影响分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2004,32(12):1553-1557.
- [11] 戚科骏,王旭东,蒋刚,等. 临近地铁隧道的深基坑开挖分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(S2):5485-5489.
- [12] 郑刚. 高等基础工程学[M]. 北京,机械工业出版社,2007.
- [13] Mashimo H, Ishimura T. Evaluation of the load on shield tunnel lining in gravel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2003,18(2-3):233-241.
- [14] 余占奎. 软土盾构隧道纵向设计方法研究[D]. 上海:同济大学,2006.
- [15] 孙杰,周晓智,袁磊. 基于 MATLAB 的圆形基础附加应力的数值积分求解[J]. 工业建筑,2014,44(Z1):847-849+856.

(上接第 189 页)

- [6] 聂利英,朱永虎,刘国光,等. 排架支撑式渡槽排架损伤下地震响应分析[J]. 水电能源科学,2012,30(1):100-102.
- [7] 张社荣,冯奕,王高辉. 强震作用下大型排架式 U 型渡槽的损伤破坏分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013,45(1):37-43.
- [8] 谈政,张华,傅玉珍. 基于正则化频率变化率的排架渡槽支撑体系损伤定位研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014,25(1):28-32.
- [9] 周吉顺. 大型渡槽施工裂缝控制研究[D]. 天津:天津大学,2011.

- [10] 姚雄,赵海涛,王潘绣. 大型 U 型渡槽正常运行期寒潮降温影响分析[J]. 山西建筑,2011,37(36):197-198.
- [11] 李录贤,王铁军. 扩展有限元法(XFEM)及其应用[J]. 力学进展,2005,35(1):5-20.
- [12] Liu XY, Xiao QZ, Karihaloo BL. XFEM for direct evaluation of mixed mode SIFs in homogeneous and bi-materials[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 59(8):1103-1118.
- [13] Rice J R. Elastic Fracture Mechanics Concepts for Interfacial Cracks[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 55(1):98-103.