

一种复合砼结构界面应力数值分析新方法

甘贤军,* 易志坚, 杨庆国

(重庆交通学院 土木建筑学院, 重庆 400074)

摘要: 笔者借鉴断裂力学的概念和方法, 利用叠加原理和有限元方法得到复合结构在开裂瞬间和发展过程中界面应力分布规律, 避开了有限元程序难以模拟裂纹从萌生发展这一过程中, 为界面应力分析提供了一种新方法。

关键词: 断裂力学; 叠加原理; 界面应力; 新方法

中图分类号: O346.1; TU311.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-716X(2004)05-0023-04

钢筋砼材料的应用已 100 多年的历史, 是现今应用最广泛的建筑材料之一, 涉及的工程领域包括工业及民用建筑工程、桥梁工程、水利工程、地下工程等等。

然而, 砼材料存在着其自身无法克服的弱点: 从微观上来看, 砼内部存在很多微小缺陷和损伤, 因此宏观上必然表现为名向异性的特点。就单轴而言, 其拉压本构关系不对称, 抗拉强度仅为抗压强度的百分之十几, 所以对于普通钢筋砼结构, 在很小的荷载下构件即开裂, 因此其带裂纹工作(指宏观裂纹)是不可避免的。普通钢筋砼构件开裂后, 工作性能开始劣化, 结构刚度降低, 甚至影响到耐久性^[1]。

为了提高钢筋砼结构的承载力和使用性能, 文献[2]基于断裂力学提出了一种新型钢筋砼复合结构: 在砼梁下表面粘贴抗拉强度高的材料以改善砼结构的整体性能。理论和实验研究表明, 相比于普通砼结构, 钢筋砼复合结构开裂荷载提高, 在相同荷载下裂纹宽度、高度都减小较多, 极限荷载大幅度提高。

复合钢筋砼结构相对于普通钢筋砼而言无疑是一大改进, 可以较大程度上克服普通钢筋砼一些弊病, 但它面临着另外一个问题: 即开裂后, 粘贴层与砼界面能否保持粘结完好, 是否可以共同工作? 另外, 实际工程中有很多旧结构在进行加固时, 也常采取在受拉面粘贴钢板或碳纤维这一方式以获得更大的承载力, 粘结界面问题也同样存在。显然, 只有知道粘结界面的剪应力、拉应力变化分布规律, 才能保证复合新结构和旧结构加固设计的合理和可靠。

现有文献主要集中在探讨开裂前砼和粘贴材料层之间界面应力分布规律, 对开裂瞬间及裂纹扩展过程中界面应力变化情况的研究还未见报导。

基于以上情况, 笔者借鉴了断裂力学的概念和方法, 提出了一种分析复合砼结构开裂后、粘结界面应力的方法。本方法运用了叠加原理和现代有限元技术, 具有概念清晰、操作简单的特点; 得出的结论和实际情况吻合较好, 对工程实践具有一定的参考价值。

1 粘结界面的应力

砼开裂瞬间, 裂纹处砼的应力立即释放, 处于裂缝附近的粘贴层的拉应力发生突增, 虽然抗拉强度高的粘贴材料在这种情况下不会发生断裂, 但是, 裂缝附近的粘贴层拉应力剧增必须通过界面来传递。因此, 界面应力必然也要激增, 其数量级能达开裂前的十几倍甚至更高。由于界面强度不高^[3], 因此界面出现裂纹是不可避免的。

随着界面裂纹进一步发展, 可能出现粘贴层失效, 甚至整个粘贴层剥离; 另一方面, 由于粘贴层在裂纹处应变突然增大, 而对应部位的砼要回缩, 于是, 裂纹处的粘贴层与砼曲率半径不一致, 必然导致在垂直于梁轴方向位移也不协调, 结果导致在沿垂直于梁轴方向的拉应力突增, 这样, 更是促进了界面裂纹的生长。

在这种情况下, 依据传统弹性力学的方法建立平衡方程、物理方程和协调方程进而求解界面应力大小以及分布规律的困难巨大, 甚至是不可能的, 因此必然要另觅其它途径。

* 收稿日期: 2003-12-03; 修订日期: 2004-01-07

作者简介: 甘贤军(1975-), 男, 江西萍乡人, 硕士研究生, 主要从事桥梁结构工程研究。

2 断裂力学中求解应力强度因子的方法^[4]

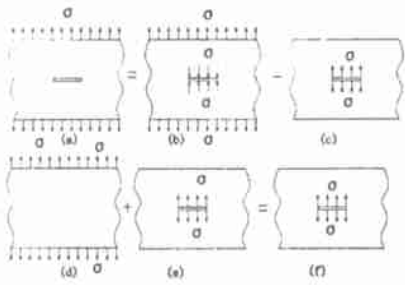


图1 求解应力强度因子图示

断裂力学计算具有中心穿透裂纹的无限大板在无限远处作用均匀拉伸应力的应力强度因子时认为:用数值相等的均布压力作用在裂纹面上引起的裂纹尖端应力强度因子与在无限远处作用均匀拉伸应力的应力强度因子是等效的,分析过程如下:对于图 1(a) 的无限板,在裂纹面上施加两组平衡力,其中一组大小等于 σ ,方向为促使裂纹闭合的均布力,另一组均布力的大小也等于 σ ,方向与前一组相反.这样一来,就可以把图 1(a) 的受载情况转化为图 1(b) 和图 1(c) 的两种受载情况的叠加而不改变受力和变形情况.进一步分析可知,图 1(b) 的情况实际上就是图 1(d) 的无裂纹板.这是因为若在图 1(d) 的无裂纹板,应用截面法沿着原裂纹假想地截出一条穿透性“裂纹”来,然后在截出的“裂纹”面上施加该截面的内力 σ_i (大小等于作用在无限远处的均布拉力),显然此即图 1(b) 的板,而图 1(d) 的无裂纹板的应力强度因子等于 0,所以图 1(a) 无限板的应力强度因子等于与图 1(f) 的应力强度因子.此即求解应力强度因子的一种方法.

笔者就是借鉴这种思想用于解决复合砼结构在砼开裂过程中界面应力的求解.

3 运用断裂力学概念和叠加原理进行界面应力分析的新方法

3.1 砼结构裂纹产生发展特点和有限元方法的局限性

对于钢筋砼构件,荷载增大过程,即是裂纹的萌生及动态扩展的过程.砼本身的缺陷分布具有一定的随机性,裂纹具体在哪个截面出现是不确定的,只能给定一个大致范围,因而纯粹用解析方法是无力为力的.

有限单元法经过几十年的发展和应用,已经可以解决过去因边界条件复杂而无法求解的弹塑性问题.但现在利用有限元通用程序模拟裂纹的萌生及动态扩展,必然要涉及到在运算过程中对单元网格

重新划分,而这使得程序对系统和资源的要求是非常高的,处理起来非常棘手.由于砼的微裂纹的存在,其本身在受荷前就存在微观缺陷,而缺陷分布不可知,而裂纹总是首先从最薄弱处开展.这样给数值模拟带来了巨大的困难.

3.2 基于断裂力学思想的界面应力分析的新方法

当复合钢筋砼构件开裂后,裂缝附近的砼不再继续承担拉应力,即应力释放到 0.为了求解裂纹附近粘结界面的应力,基于上述的断裂力学处理裂纹的思想和方法,将此时的实际情况等效为在完好结构中假想有一条“裂纹”,并在“裂纹”面上作用一组内力,大小等于完好结构开裂荷载作用下“裂纹”面的内力,方向为促使裂纹张开,其几何位置、高度与真实裂纹一致.

这样,在外荷载和“裂纹”面的内力作用下,裂纹处的砼应力为 0,与真实结构的应力状态是完全一致的.显然这个原理与断裂力学计算具有中心穿透裂纹的无限大板在无限远处作用均匀拉伸应力的应力强度因子的原理是相同的.

所以计算实际结构的界面应力,就可以按两个过程分别求解完好结构在外荷载作用下的界面应力和已有裂纹的结构在一组上述“裂纹”面的内力作用下的界面应力,然后进行叠加即求得实际结构界面的应力状态.

以上两个过程通过现有的有限元技术很容易实现.不断给外荷载一个增量,不断改变裂纹高度,重复上述两个过程即可求得裂纹发展情况下实际结构界面的应力状态.

4 算 例

下面依据上面提出的方法计算复合砼结构在纯弯状态下(图 2) 砼裂纹萌生及其扩展过程中界面应力规律.

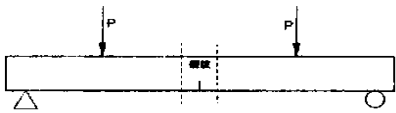


图 2 简支梁受力简图

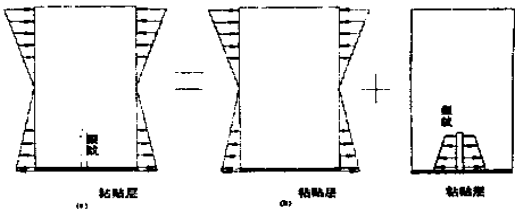


图 3 应力等效示意图

根据弹性力学,易知只有沿梁长度以及高度方向有应力,而沿梁宽度方向的应力是可以忽略的,且

荷载都平行梁高方向, 于是可采用平面应力模型来求解, 其应力解可以满足工程要求精度; 开裂后, 因为其裂纹大都是穿透裂纹(指因为荷载而产生), 所以在整个过程中用平面应力模型不会引起太大的误差. 图 2 表示在一定程度的荷载作用下, 梁跨中已经产生第一条裂纹. 于是总可以如图 3 取出一包含裂纹面的区域. 其脱离体受力情况如图 3(a); 图 3(b) 表示荷载加载到裂纹出现前的瞬间受力状态, 注意此时裂纹不存在; 图 3(c) 的情况表示为一垂直作用于裂纹面上的应力场, 应力值大小等于图 3(b) 相同位置的应力值, 但方向为使得裂纹张开. 实际受力情况为: 荷载加到裂纹出现瞬间, 裂纹面上应力立即释放为 0. 图 3(b) 和图 3(c) 迭加得到裂纹面处应力为 0, 正好相当于裂纹面的出现瞬间的情况. 因此实际裂纹开裂瞬间应力场可由图 3(b) 和图 3(c) 应力场迭加得到, 后两种情况甚为简单, 利用有限单元法易于实现.

MSC.Patran 是 MSC 公司开发的有限元程序前后处理器, 其界面比较友好; Msc. Nastran 作为求解器, 在静力、动力分析领域也是非常优秀的, 下面利用这两个软件对模型进行建模和数值计算.

以简支梁四点弯曲情况为例, (图 4) 研究在纯弯段裂纹出现瞬间界面的应力分布规律. 梁的尺寸为 $1000 \times 100 \times 100\text{mm}$. 为简便起见, 不考虑纵向钢筋的影响. 砼弹性模量取为 $3.5 \times 10^4 \text{Pa}$, 纤维粘贴层取为 $2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$, 厚度为 1mm , 砼极限抗拉强度为 6MPa . 根据材料力学知道, 当荷载为 1000N 时梁下缘即已经开裂. 假定裂纹处于跨中, 长度为 10mm .

模型划分为 66400 个矩形单元, 67284 个节点.



图 4 有限元模型

裂纹附近单元加密, 沿梁长度方向单元尺寸由两头向跨中递减, 沿梁高方向单元尺寸由上到下递减, 跨中下部单元最小尺寸为 $0.04 \times 0.04\text{mm}$.

1) 首先计算完好结构在 $P = 1000\text{N}$ 作用时应力场. 模型如下(图 5). 采用 MSC 公司 Nastran 求解. 得出包含虚拟裂纹单元沿梁轴方向的单元应力值.

2) 在图 4 模型的基础上于跨中预设一条裂纹, 高度为 10mm . 将上一步得出包含虚拟裂纹处单元 X 方向单元力(应力 \times 梁厚), 作为单元边荷载施加于裂纹两边单元(利用 patran 中的“场”可方便施加变化的分布力). 位移条件同上. 图 6 为裂纹附近单元划分情况. 红色的是砼单元, 蓝色的为粘贴层单元.

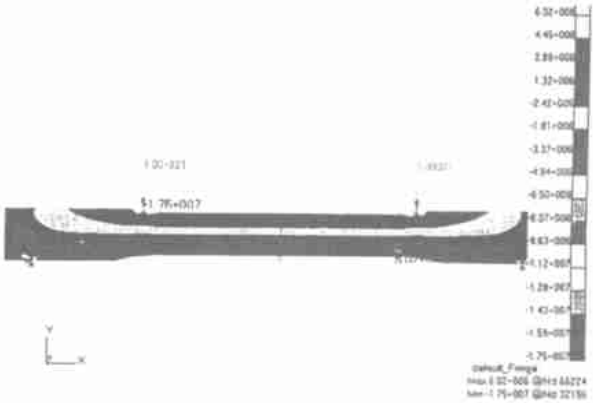


图 5 X 方向应力云图

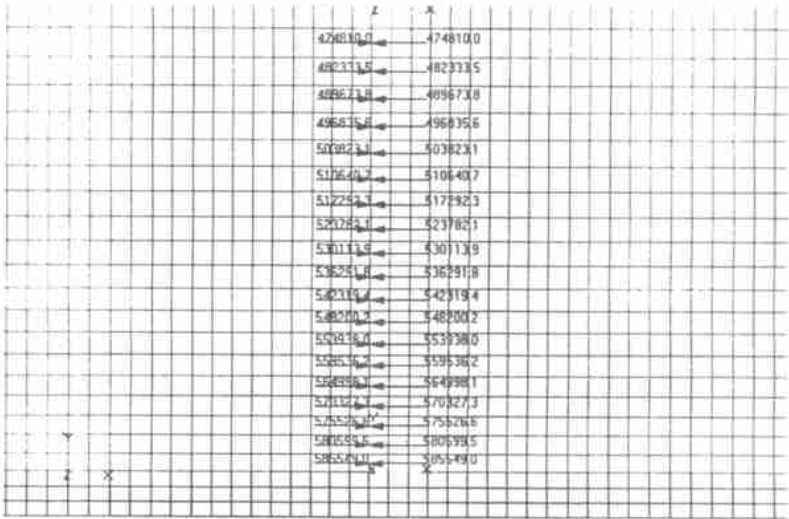


图 6 裂纹处局部模型

图功能把砼与粘贴层界面上的节点剪应力、垂直于梁轴方向(Y 方向)的拉应力绘成曲线(图 7、图 8)。

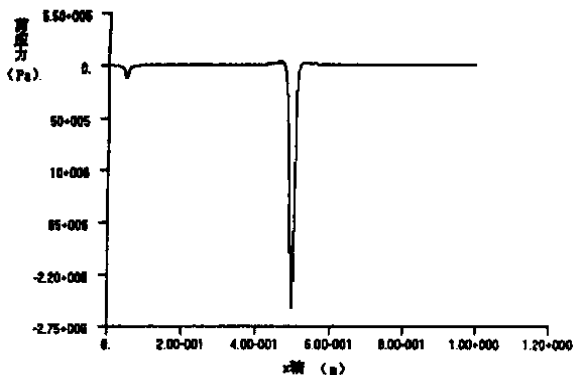


图 7 界面剪应力图

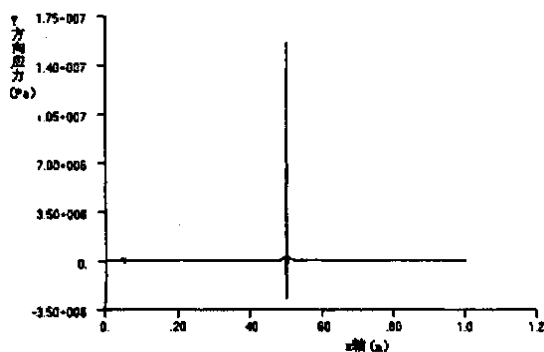


图 8 界面 Y 方向拉应力图

4) 应力叠加. 显然 1) 步情况下纯弯段剪应力以及 Y 方向拉应力都等于 0, 所以对于裂纹处截面应力值即为 3) 步所得值. 由图 7、图 8 可以看出开裂瞬间应力集中较严重, 有可能出现早期界面撕裂或粘贴层拉断等问题.

作者考虑了不同的粘贴层材料对界面应力的影响, 发现粘贴层材料弹性模量越大, 界面应力越大. 由于篇幅关系, 没有把考虑不同粘贴层材料的应力图绘出. 因此在加固设计时选择粘贴层材料的过程中不能光考虑其强度指标, 认为弹性模量越大越好, 这样一个后果可能是界面先于最终的弯曲破坏, 使得砼、粘贴层材料都不能发挥出储备强度, 造成材料的浪费. 鉴于以上的分析, 建议在选择粘贴层材料的时候应考虑与砼变形协调性能.

5 结 语

依据上述方法很方便地给出了开裂瞬间以及开裂过程中界面应力变化规律, 为研究砼复合结构工作性能提出了一条新路. 同时, 根据给出的应力变化规律可以给我们在新结构或加固设计时选择外粘贴层材料提供了依据, 以免出现早期的界面破坏.

参考文献:

- [1] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [2] Z J Yi, Q G Yang, Z W Li. A New Reinforced Concrete (RC) Composite Structure Based On Principles Of Frature Mechanics[A], Damage & Fracture Mechanics VII Compute Aide Assessment & Control [C], WIT PRESS 2003 Southampon Boston UK.
- [3] 叶列平, 方团卿, 杨勇新, 等. 碳纤维布在混凝土梁受弯加固中抗剥离性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2003, 33 (2): 61~65.
- [4] 洪起超. 工程断裂力学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.

A new method of computing interface's stress for composite concrete structure

GAN Xian-jun, YI Zhi-jian, YANG Qing-guo

(School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: According to the concept from mechanics of fracture and stacking principle, Applying the method of finite element, in this paper getting the distribution law of stress of interface between concrete and stickup layer, avoiding the process of crack producing and developping which can not be simulated by FEA, providing a new way to find out the distribution law of stress of interface between concrete and stickup layer.

Key words: mechanics of fracture; stacking principle; stress of interface; new method