

文章编号: 1000-4750(2009)06-0147-06

# RC 梁三维多向裂缝实验研究及数值模拟

韩 涛, \*安雪晖

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 在钢筋混凝土结构中, 已存在裂缝对新裂缝的产生和发展有影响, 从而对结构承载力性能亦有影响。为研究三维情况下裂缝交叉扩展的机理及其对结构承载力性能的影响, 该文设计截面为正六边形对称配筋的钢筋混凝土梁实验, 通过变换加载面和加载方式使梁分别产生竖直方向贯通的弯曲裂缝以及两种方向的剪切斜裂缝, 并使各裂缝在空间相互交叉。通过实验, 观察三维多向裂缝交叉扩展过程, 测量梁各阶段荷载-挠度曲线, 最后分析裂缝交叉扩展相互作用机理及其对梁构件承载力的影响的基本规律。针对多向裂缝相互作用机理建立三维多向固定裂缝模型, 数值模拟结果表明该模型能够模拟多向裂缝交叉情况及其相互作用影响。

**关键词:** 钢筋混凝土; 实验; 数值模拟; 多向裂缝; 三维

**中图分类号:** TU528.571; TV32 **文献标识码:** A

## EXPERIMENTAL RESEARCH AND NUMERICAL SIMULATION OF 3D MULTI-DIRECTIONAL CRACKING IN RC BEAM

HAN Tao, \*AN Xue-hui

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Existing cracks in RC structure influence the formation and propagation of new cracks, thus affect the behavior of the whole structure. Experiments on RC beams with regular hexagon cross section were carried out to study the mechanism of multi-directional cracking and its influence on the bearing capacity. Five-stage loading was applied. Bending cracks were designed to occur during the first 2 stages, penetrating the whole cross section, then, changing loading condition, diagonal shear cracks were designed to cross the existing bending cracks during the next three stages. Multi-directional Crack propagations were observed, and reaction-displacement curves were recorded in experiments. The mechanism of 3D multi-directional cracking and its influence on bearing capacity were discussed, and a 3D fixed multi-crack model was developed. Adopting the newly developed model, a finite element analysis was performed. A comparison between numerical and experimental results shows that this model can be applied to analyze multi-directional cracking.

**Key words:** reinforced concrete; experiment; numerical simulation; multi-directional cracking; 3D

通常钢筋混凝土相关实验研究主要是对几乎没有初始缺陷的构件或结构进行的。而实际钢筋混凝土结构可能与实验室条件下的构件存在很大差别, 此外混凝土结构性能随时间推移而下降, 在结

构的生命周期中还可能遭遇超过预期的荷载而引起损伤。混凝土浇筑凝固后很快将遭受温度荷载、碱集料反应和干燥收缩, 这些将在混凝土结构承担预期结构荷载前引起开裂<sup>[1]</sup>。超过预期的荷载情况

收稿日期: 2007-04-26; 修改日期: 2009-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(50309006)

作者简介: 韩 涛(1978—), 男, 山西人, 博士, 从事钢筋混凝土结构非线性有限元计算研究、水利政策应用研究(E-mail: hantao@mwr.gov.cn);

\*安雪晖(1968—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 博导, 从事混凝土结构生命周期性能预测、非线性有限元计算、先进混凝土制造及筑坝技术等方面研究(E-mail: anxue@tsinghua.edu.cn).

也可能引起更多的裂缝。由于混凝土是一种路径相关材料,当前荷载导致的开裂、应力/应变状态和残余变形可能在下次加载过程中起关键作用<sup>[2]</sup>。分析带裂缝损伤的钢筋混凝土结构承载力性能首先要解决已存在裂缝在后续承载力分析中的作用与影响。

东京大学的学者通过先引入初始裂缝的方式进行非正交裂缝相互作用的研究。Tamura 等<sup>[3-5]</sup>研究了钢筋混凝土梁在轴向拉伸情况下的抗剪能力。Pimanmas 等<sup>[6]</sup>通过反向施加弯曲荷载的方式引入穿过整个梁截面的垂直裂缝,然后施加剪切荷载产生多向裂缝。Pimanmas 等<sup>[7-8]</sup>还通过预设裂缝装置研究初始预设裂缝对结构开裂和承载力的影响。上述实验结果均表明钢筋混凝土结构中已存在的初始裂缝对新产生裂缝及结构承载力有较大影响。以上实验均以矩形截面钢筋混凝土梁为实验研究对象,其应力状态为二维状态。实际结构中裂缝之间的交叉是在三维空间中进行的,需要研究三维状态下裂缝空间交叉相互影响机理。本文设计截面为六边形对称配筋的钢筋混凝土梁,通过变换加载面和加载方式使梁分别产生竖直方向贯通的弯曲裂缝以及两种方位的剪切斜裂缝,各裂缝在空间交叉,形成真实三维状态的多向裂缝。通过实验观察钢筋混凝土构件中三维多向裂缝交叉扩展现象,分析多向裂缝交叉作用机理及其对构件承载力的影响。在此基础上研究建立了能够分析三维多向裂缝相互作用的固定裂缝模型,通过对实验进行数值模拟,证明该模型能够应用于多向裂缝问题的分析。

## 1 实验设计

设计横截面为正六边形的梁实验,梁尺寸和配筋情况如图 1 所示。

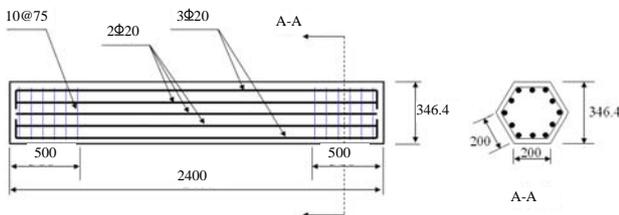


图 1 1 号梁尺寸和配筋示意图 /mm

Fig.1 Sketch of dimensions and bars of beam No.1

设计两根相同尺寸的钢筋混凝土梁,1 号梁采用普通混凝土,强度等级为 C30,2 号梁采用自密实混凝土,强度等级为 C40。主筋均为 HRB335,其中 1 号梁主筋直径为 20mm,2 号梁为 25mm。箍

筋 HPB235,直径均为 10mm。篇幅所限,以 1 号梁为例作详细介绍,2 号梁作简要说明。

设计加载过程如图 2 所示,其中右侧截面图数字 1—6 为加载表面的编号,加载过程中转动梁时各表面相对位置不变,具体实验步骤如下:

1) 弯曲 1: 在 5 面上施加两点弯曲荷载使梁纯弯段底部出现竖直裂缝,裂缝发展至梁截面高度的 1/2—2/3 时卸载。

2) 弯曲 2: 将梁倒置,在 6 面施加同样的两点弯曲荷载使竖直裂缝基本贯通,然后卸载。

3) 剪切 1: 将梁旋转至 3 面朝上,在 3 面上施加单点剪切荷载至产生基本贯穿梁加载点至支座位置的剪切斜裂缝后卸载。

4) 剪切 2: 将梁再次旋转至 2 面朝上,在 2 面上施加单点荷载至产生新剪切裂缝,斜裂缝发展到基本贯穿梁加载点至支座位置时卸载。

5) 剪切 3: 将梁反向旋转回到 3 面朝上位置,重新在 3 面施加单点剪切荷载直至梁发生剪切破坏。实验过程中记录梁开裂过程和荷载、挠度等信息,分析实验中多向裂缝交叉及其对结构承载力的影响。

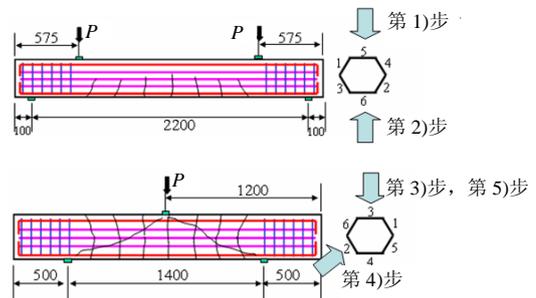


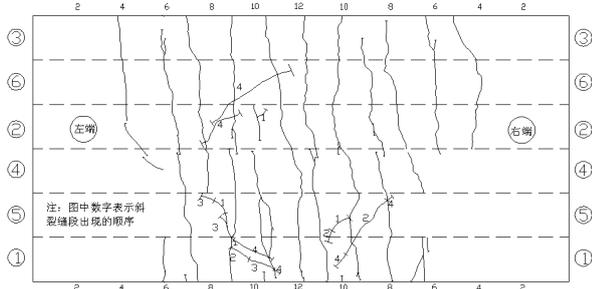
图 2 1 号梁加载全过程示意图

Fig.2 Sketch of loading processes of beam No.1

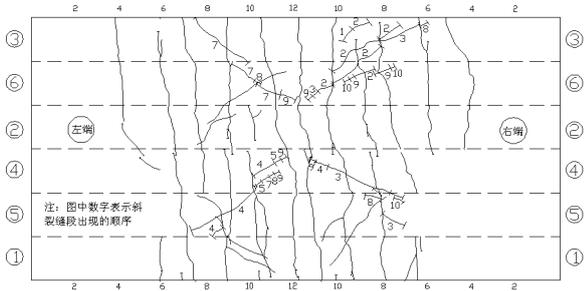
## 2 实验结果

1 号梁开裂过程和裂缝开展情况如下:两次弯曲荷载作用产生基本连通的竖直裂缝,如图 3 中竖直方向基本连续的实线所示。在第一次剪切荷载作用下出现剪切斜裂缝,如图 3(a)所示斜裂缝发展至接近连通梁加载点与支座。第二次施加剪切荷载,在梁两端均出现明显斜裂缝,形成基本连通梁加载点和支座的斜裂缝。此外还出现一些斜裂缝分支,斜裂缝发展情况比第一次严重,梁右端比左端略严重,如图 3(b)所示。第三次剪切与第一次剪切加载面相同,原先的剪切斜裂缝进一步发展并出现新斜裂缝分支。其中梁右端斜裂缝发展较多,也较分散,

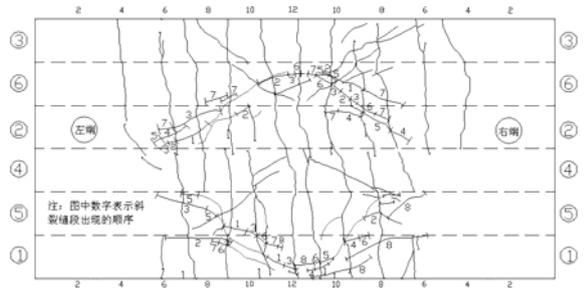
显得杂乱；而梁左端斜裂缝分支相对较集中，最终梁在左端破坏，如图 3(c)、图 3(d)所示。



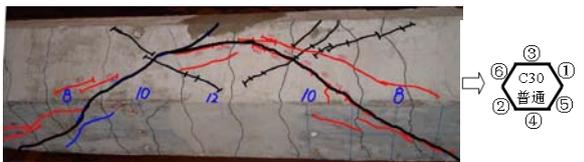
(a) 第一次剪切作用下裂缝开展情况示意图



(b) 第二次剪切作用下裂缝开展情况示意图



(c) 第三次剪切作用下裂缝开展情况示意图



(d) 最终剪切破坏时 6-2 面裂缝开展情况

注：图 3 中(a)–(c)是将梁 6 个侧面展开后的裂缝开展情况示意图，符号①–符号⑥为梁 6 个表面的编号，与图 2 中编号对应。

图 3 剪切裂缝开展情况示意图

Fig.3 Sketch of cracking process under shear loading

将梁沿 3 表面、4 表面的中心轴线切割开，观察梁内部裂缝交叉情况，如图 4 所示，其中虚线框所示存在多向裂缝空间交叉情况。2 号梁开裂情况与 1 号梁类似，不再赘述。

两根梁实验各阶段的荷载值如表 1 所示。

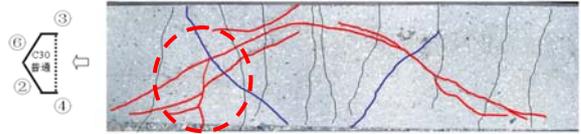


图 4 1 号梁剖面裂缝情况

Fig.4 Crack propagations on cross section of beam No.1

表 1 各次加载荷载值  $F$  /kN

Table 1 Loads of different stages in experiments

梁号	弯曲 1	弯曲 2	剪切 1	剪切 2	剪切 3
1 号	360	320	385	415	480
2 号	320	380	440	525	625

对比三次剪切过程梁出现贯穿斜裂缝情况下的荷载值，可见混凝土梁在出现贯穿斜裂缝后换面加载，抗剪承载力没有降低反而在出现新贯穿斜裂缝时荷载有所提高；第三次剪切回到第一次剪切加载面，在已有贯穿斜裂缝的情况下加载，结构没有立即失效，随着斜裂缝的进一步扩展出现新斜裂缝分支，达到剪切破坏时荷载值相对第一次剪切出现贯穿裂缝时荷载值有较大幅度的提高。

### 3 实验分析

通过实验分析结构出现多向裂缝情况有如下几方面主要表现和影响作用：

1) 初始裂缝影响下新裂缝的出现、停止与转向。由于在施加第一次剪切荷载时已经存在弯曲竖直裂缝，最初剪切荷载产生的斜裂缝多数是从梁底部某条弯曲裂缝上出现的弯剪裂缝，如图 5 所示。开始出现斜裂缝时，其发展长度较短，遇到另一条竖直裂缝时，斜裂缝转向竖直裂缝方向而停止。

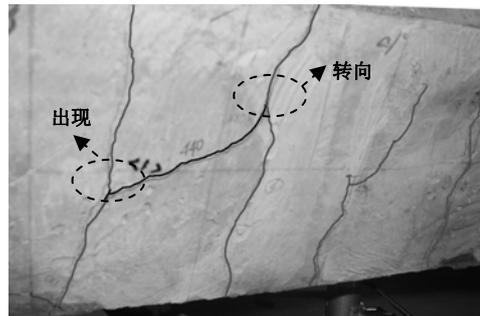


图 5 初始斜裂缝出现与中止

Fig.5 Appearance and stop of shear crack

2) 非正交裂缝的交叉扩展及相互影响。斜裂缝发展遇到弯曲竖直裂缝时可能转为一段竖直裂缝发生错动，接着出现另一段斜裂缝，如图 6 中斜裂缝段<1>、斜裂缝段<2>及中间的竖直裂缝段<4>，整体上看形成一个象字母“Z”的裂缝，称为 Z 型

裂缝。之后继续加载，从前面 Z 型裂缝中间段上部出现新的斜裂缝段<3>，它与斜裂缝段<1>及中间较小的一段垂直裂缝段形成一个新的 Z 型裂缝。这是在加载过程中原 Z 型裂缝位置应力状态发生变化导致的。

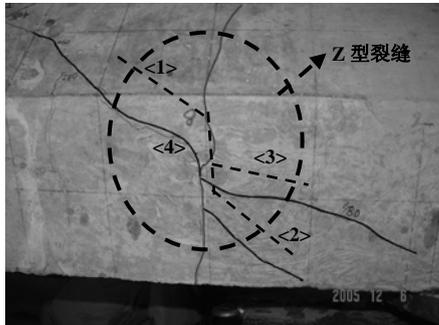


图 6 Z 型裂缝  
Fig.6 Z-shape crack

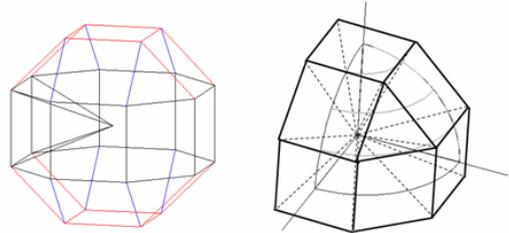
3) 斜裂缝扩展与失效路径形成过程及承载力性能影响。相比无损伤的梁的剪切破坏过程来讲，有初始裂缝的梁在剪切破坏过程中斜裂缝扩展速度较慢，且不是从支座到加载点连续的裂缝，而是在各初始裂缝之间逐段形成的，并呈 Z 型不连续形态，其抗剪承载力较高。在剪切荷载进一步提高时，Z 型裂缝逐渐滑移，局部应力状态变化而产生图 3(c) 所示斜裂缝新分支。斜裂缝路径不连续改变了其抗剪性能，而局部裂缝分支分散了该区域的应力分布情况，使剪力传递途径增多，从而延缓了该区域斜裂缝的扩展，最终某些裂缝段完全连通形成失效路径。复杂的斜裂缝路径和分散的裂缝使应力得以分散，改变了剪力传递性能，从而在一定程度上改变了抗剪承载力性能。

#### 4 数值模拟

从实验分析来看，多向裂缝交叉时存在明显的相互作用。而目前常用的有限元数值模拟方法如固定裂缝或旋转裂缝方法难以模拟多向裂缝问题。固定裂缝方法中裂缝一旦产生便保持不变，无法模拟同一位置产生新开裂和裂缝方向转变的情况，易产生剪力锁死问题<sup>[9]</sup>；旋转裂缝模型中裂缝方向随主应力方向变化而变化，没有反映非正交裂缝间的相互影响，特别是已有裂缝对新裂缝的阻碍影响。

多向固定裂缝模型通常认为当裂缝与主应力之间的角度大于某一角度时，则在新的主应力下生成新的开裂本构矩阵，同时不再考虑原有的裂缝。这样，主应力和裂缝方向之间的夹角被限制在一定

范围内，可以模拟更加复杂的开裂行为<sup>[10]</sup>。考虑到多向固定裂缝方法的优势，本文采用东京大学 Maekawa 教授等开发的非线性钢筋混凝土有限元程序(COM3)作为数值分析工具，并在原程序基础上设计建立了三维多向固定裂缝模型，通过该模型中多向裂缝的判断选择过程模拟实际多向裂缝的交互作用现象。新建立的三维多向固定裂缝模型为考虑空间多向裂缝问题，在开裂后建立多个空间裂缝坐标系。采用图 7(a)所示多面体方式近似划分空间区域，每个棱锥体代表一个裂缝坐标轴方向所控制的开裂区域，认为该区域内能且只能产生一条裂缝。取上述空间多面体与球体空间 1/8 区域相对应的部分，如图 7(b)所示。三维多向固定裂缝模型存在 13 个独立坐标轴，每个独立坐标轴可对应一个裂缝面方向，因此模型最多模拟同一积分点上出现 13 条相互交叉的空间裂缝的情况。



(a) 多面体划分空间区域 (b) 1/8 球体空间划分区域

图 7 裂缝坐标系控制区域示意图

Fig.7 Sketch of zones dominated by crack coordinates

分析多向裂缝时认为张开位移最大的裂缝为当前激活状态裂缝，并按照此裂缝所在坐标系进行计算。计算中根据当前三维应力状态判断主应力方向和开裂情况，与当前采用的裂缝方向对比判断是否产生新裂缝或裂缝方向发展转变，从而反映裂缝交叉时的相互影响。模型中新裂缝产生或转向不仅与主应力方向有关，而且与主应力大小相关。如图 8

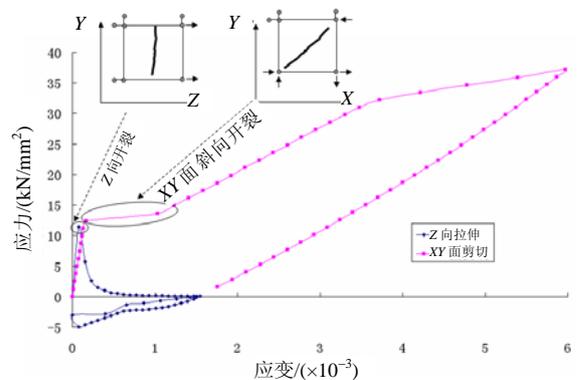


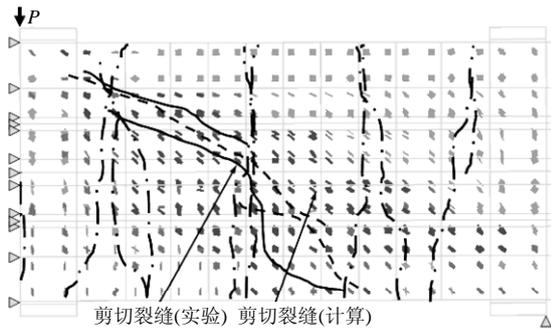
图 8 Z 向拉伸后 XY 面剪切应力-应变关系曲线

Fig.8 Shear stress-strain relationship curve on XY plane after tensile loading on Z coordinate axis

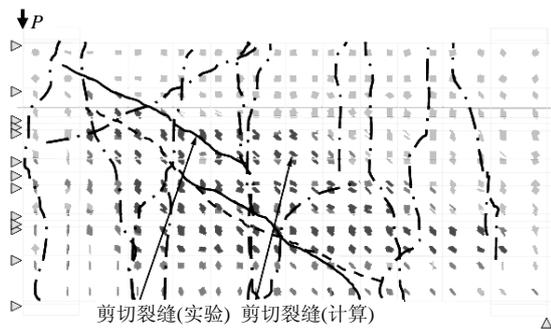
所示，立方体单元  $Z$  向拉伸后  $XY$  面剪切，首先产生  $Z$  轴方向的裂缝，然后在剪切作用下产生  $XY$  面内剪切斜裂缝。新裂缝方向与原有裂缝方向非正交，当主应力达到混凝土抗拉强度时才出现。

计算钢筋混凝土应力时将开裂后钢筋混凝土分成带裂缝的混凝土和钢筋网两部分分别计算。开裂后混凝土应力又由垂直于裂缝方向的拉伸硬化模型、平行于裂缝方向的压缩模型和沿裂缝面剪力传递模型分别计算，单向拉、单向压和剪切的本构关系与原程序相同，可参考文献[1]。

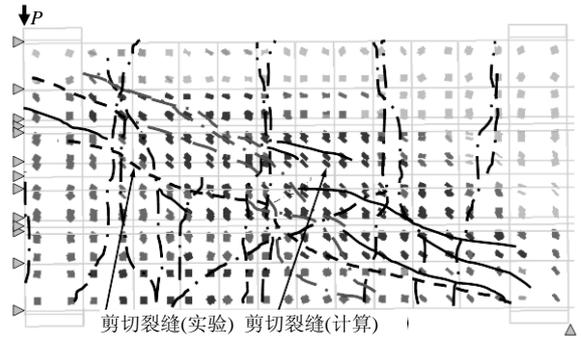
采用新建的三维多向固定裂缝模型对实验进行数值模拟，按照实验梁一半长度建立有限元模型，材料参数和配筋率等条件与实验相同。按照实验加载过程进行计算，选取中间一层单元然后截取平面图观察计算的裂缝结果(各个积分点裂缝方向呈现的是立方体在截面上的投影)，如图 9(a)~图 9(c)中所示分别为三次剪切加载后裂缝开展情况计算结果与实验结果对比图。图 9 中网格以及单元内积分点上立方体块为计算结果，立方体块长、宽相同，厚度约为长度的 1/10，代表空间内裂缝面，其中厚度方向代表裂缝宽度方向。计算中立方体块颜色深浅代表裂缝宽度(即张开应变)大小，颜色浅则宽度小，颜色深则宽度大。实线与虚线为当前加载步实验中主要裂缝方向，两种线条分别表示梁的两侧表面观察结果；点划线表示当前加载步之前梁两侧表面已存在的裂缝。



(a) 第一次剪切加载后裂缝开展情况对比



(b) 第二次剪切加载后裂缝开展情况对比



(c) 第三次剪切加载后开裂情况对比

— (--) 当前加载步实验中产生的梁表面裂缝(另一侧表面);  
 - - - 当前加载步前实验已存在的裂缝;  
 ▲(▶) 边界约束。

图 9 剪切加载计算与试验结果对比

Fig.9 Comparison of calculation and experiment results under shear loadings

计算结果与实验结果对比分析可见: 1) 在加载过程中新裂缝产生、裂缝转向均受到已有裂缝影响，计算结果表明斜裂缝产生过程不连续，裂缝分支多、范围大，形成贯通性斜裂缝过程复杂，这些现象与实验结果相符; 2) 如图 10 所示为各次剪切加载的荷载-挠度曲线计算与实验结果的对比，各次剪切加载过程计算结果与实验结果相近，表明数值模拟能够较好地模拟各次加载过程的荷载和变形情况; 3) 通过对实验进行数值模拟表明新建立的三维多向固定裂缝模型能够通过本构关系反映多向裂缝间的相互影响作用。

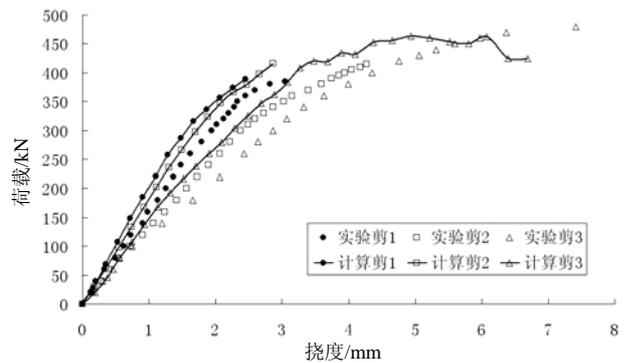


图 10 1 号梁剪切荷载-挠度曲线对比

Fig.10 Comparison of load-displacement curves of beam No.1

### 5 结论

通过三维情况下多向裂缝交叉扩展实验研究了裂缝空间交叉的相互作用及其对承载力性能的影响。数值模拟结果表明，采用多向固定裂缝模型可以模拟多向裂缝间相互作用。通过实验研究和相应数值模拟得到如下主要结论：

(1) 非正交裂缝交叉扩展时, 初始裂缝的存在对新裂缝有多方面影响, 总体来讲是阻碍新裂缝的扩展, 改变新裂缝扩展方向, 使新裂缝无法直接穿越, 而形成 Z 型裂缝。

(2) 初始裂缝的存在导致新产生非正交裂缝无法直接穿越原有裂缝, 在结构中使新产生的裂缝被中断、变向和分散。初始竖直裂缝改变了斜裂缝的发展方式和轨迹, 阻碍了失效路径的形成, 导致最终形成的失效路径复杂、不连续, 裂缝被分散从而使应力分散, 改变了剪力传递性能, 在一定程度上改变了梁抗剪承载力性能。

(3) 本文建立了能够模拟多向裂缝交叉情况及其相互作用的三维多向固定裂缝模型, 数值模拟结果表明该模型能够模拟多向裂缝交叉扩展过程及其对结构承载力性能的影响。

#### 参考文献:

- [1] 柳柄康, 吴胜兴, 周安. 工程结构鉴定与加固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.  
Liu Bingkang, Wu Shengxing, Zhou An. Identification and strengthening of engineering structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese)
- [2] Maekawa K, Pimanmas A, Okamura H. Nonlinear mechanics of reinforced concrete [M]. London and New York: Spon Press, 2003.
- [3] Tamura T, Shigematsu T, Hara S, Nakano S. Experimental analysis of shear strength of RC beams subjected to axial tension [J]. Concrete Research and Technology, JCI, 1991, 2(2): 153—160.
- [4] Tamura T, Shigematsu T, Nakashiki K. About the increase in shear capacity of reinforced concrete beam under axial tension [J]. Proceedings of the 54th JSCE Annual Convention, 1999, 5: 608—609. (in Japanese)
- [5] Yamada K, Kiyomiya O. Shear resistance of reinforced concrete beams with initial penetrating cracks [J]. Proceedings of JCI, 1995, 17(2): 791—796. (in Japanese)
- [6] Pimanmas A, Maekawa K. Influence of pre-cracking on reinforced concrete behavior in shear [J]. J Mater Conc Struct and Pavements, 2001, 50(669): 227—291.
- [7] Pimanmas A, Maekawa K. Control of crack localization and formation of failure path in RC members containing artificial crack device [J]. Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, 2001, 52(683): 173—186.
- [8] Pimanmas A, Maekawa K, Fukuura N. Crack propagation control with pre-existing slits and cracks in concrete [C]. Proceedings of the 1st Fib Congress 2002. OSAKA, 2002, Session 13: 207—216.
- [9] Zimmermann T, Li Y J. Numerical simulation of smeared crack propagation in geomaterials: An evaluation of the rotating crack model [C]. Proceedings Application of Computer methods in Rock Mechanics. Xi'an, China, 1993: 123—127.
- [10] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
Jiang Jianjing, Lu Xinzheng, Ye Lieping. Finite element analysis of concrete structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)