

纤维聚合物加固钢筋混凝土减震柱的数值分析

范镕焯

江苏蚂蚁加固工程有限公司

摘要: 本文提出了一种共面投影法来解决钢纤维聚合物交叉点的识别问题。对含1%和2%钢纤维聚合物钢纤维聚合物的活性粉末混凝土减震柱形试样建立了数值模型。数值模型与实际试件切片的比较表明,改进的方法具有良好的模拟效果。采用改进的锚索单元模拟钢纤维聚合物与混凝土之间的黏结滑移行为。然后,模拟了含1%钢纤维聚合物的钢筋混凝土减震柱试样的单轴压缩、三轴压缩和三点弯曲,进一步研究混凝土减震柱试样的混凝土开裂和钢纤维聚合物滑移行为。数值钢筋混凝土减震柱试件在各种力学试验下的破坏模式与实验结果一致,证明了所建立的数值模型的实用性和准确性。本研究为钢筋混凝土减震柱财产的数值模拟提供了基础。

关键词: 纤维聚合物; 加固; 混凝土; 减震柱; 数值分析

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.18.012

一、引言

在过去的二十年里,对钢筋混凝土减震柱进行了许多研究,主要集中在配置、力学性能、部件性能和设计、耐高温等方面^[1]。钢筋混凝土减震柱的配置主要是通过提高钢筋混凝土减震柱的均匀性、增加基体密度、改善微观结构和钢纤维聚合物含量来提高钢筋混凝土减震柱的材料性能^[2]。对于钢筋混凝土减震柱的力学性能,以往的研究主要集中在材料尺寸效应和力学性能指标上(抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比、动态特性和应力-应变关系)。对于钢筋混凝土减震柱的构件性能和设计应用,以往的研究主要集中在钢筋的锚固性能,目前较少研究钢纤维聚合物加固钢筋混凝土减震柱的数值分析。

为了克服钢纤维聚合物识别问题,使钢纤维聚合物钢筋混凝土减震柱的数值模拟能够顺利进行,提出了一种混合全等法,利用Matlab软件实现了钢纤维聚合物向固定空间的输送,并采用共面投影法解决了输送过程中钢纤维聚合物交叉的判别问题^[3]。将数值模型的切片与实际的钢筋混凝土减震柱试样进行了比较,证明了钢纤维聚合物输送方法能够真实地模拟RPC的中观结构特征。此外,还模拟了钢筋混凝土减震柱试件的单轴压缩试验、三轴压缩试验和三点弯曲试验。对混凝土的开裂和钢纤维聚合物的滑移进行了评估。

二、实验方案

(一) 试样方法

在本研究中,采用混合全等法进行钢纤维聚合物空间位置的随机生成,它是通过全等运算生成随机数的方法之一,常用的全等法还包括加法全等法、乘法全等法和除法全等法。混合全等法是由Lehmer在1951年提出

的,它是一种利用常数的全等公式与生成的伪随机数的乘积组成的递归公式来生成均匀随机数的方法。与前面提到的其他方法相比,混合全等法具有速度快、节省内存、循环时间长、统计性能好等优点。

(二) 混凝土数值模型建立

在混凝土减震柱试样的数值模拟中,混凝土减震柱基质是混凝土材料,混凝土材料选择的本构模型是莫尔-库仑模型。计算时,将混凝土材料分成4859个小四面体,边长为7mm;因此,模型中块体之间的接触模型是库仑滑移模型。这些模型的输入参数包括密度、体积模量、剪切模量、内摩擦角、内聚力、膨胀角和抗拉强度,这些参数均通过实验获得的。

(三) 钢纤维聚合物钢纤维聚合物材料模型的选择

为了考虑钢纤维聚合物钢纤维聚合物与混凝土之间的摩擦结合力,钢纤维聚合物的模型采用了3DEC软件中的锚索模型。锚索模型既考虑了锚索本身的轴向力变形,又考虑了锚索与接触材料之间的剪切滑移,这与钢纤维聚合物与混凝土之间的受力特点比较一致,其中剪切滑移表征钢纤维聚合物在混凝土基体中的摩擦滑移,轴向力表征钢纤维聚合物被拉伸的机械过程。在模型中,钢纤维聚合物被离散成几个元素,每个元素的质量都集中在两端的节点上。钢纤维聚合物的轴向变形可以通过节点间的膨胀和收缩来实现。钢纤维聚合物和周围混凝土之间的接触是黏性的。因此,接触部分的混凝土可以承受剪力和滑移。

三、结论

(一) 单轴压缩试验的分析

图1a、b为钢纤维聚合物的剪切力和剪切位移的变化趋势。在加载的初始阶段(关键点A),钢纤维聚合物和混凝土之间的剪切力很小,分布相对杂乱。只有少数钢纤维聚合物达到最大剪应力并开始滑动,大部分钢纤维聚合物没有滑动。在关键点B,更多的钢纤维聚合物达到最大剪力,它们处于局部滑移状态。在关键点C,试样中间出现一个45°的滑移带,从左上方开始到右下方(图1b)。试样的下部出现了膨胀,也导致了钢纤维聚合物的滑移和混凝土的开裂。在关键点D,随着位移的增加,试件的右下部分和左上部分出现了比较大的位移,形成了一个大的剪切黏结。这表明该位置的混凝土出现了明显的错位。同时,右上部分也出现了应力集中。总的来说,45°滑移面的主导破坏模式在这个阶段已经完全形成。当到达关键点E时,试件呈现出沿45°滑移面的剪切运动,试件也被缩短和加宽。垂直于加载方向的裂缝扩大,试件的承载力不断下降。失效模式主要是剪切破坏,同时伴有劈裂破坏,与实验结果一致。

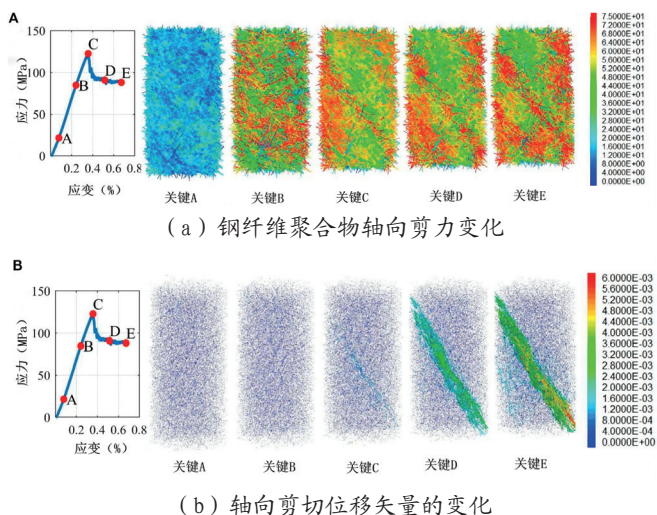
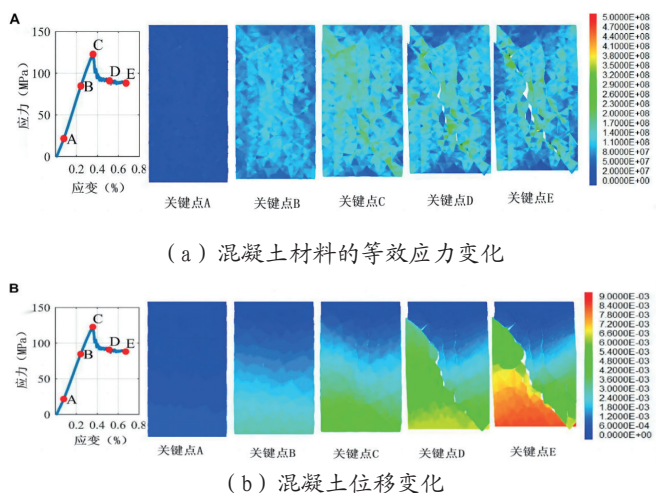
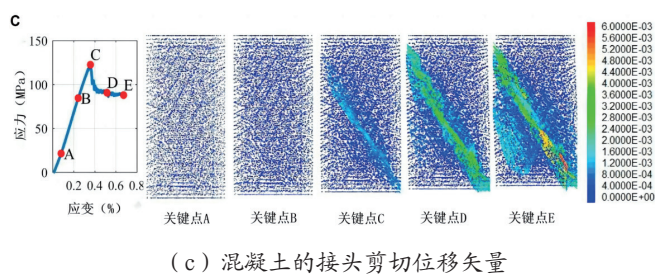


图1 单轴压缩试验中钢纤维聚合物失效

图2a-c为混凝土（即RPC基体）的等效应力变化图、位移变化图和接头的剪切滑移变化图。混凝土等效应力的变化趋势与钢纤维聚合物轴向剪力的变化趋势一致。在关键点A，混凝土的等效应力和绝对位移水平都很低，RPC试件处于压实阶段。混凝土的变形主要是弹性变形，没有发生剪切滑移。在关键点B，混凝土进入了内部裂缝的起始阶段，等效应力水平明显增加。结合钢纤维聚合物的轴向剪切力，混凝土内部出现了交错滑移。从关键点C开始，等效应力开始出现局部集中。由于试件达到了峰值应力，出现了一个方向为45°的等效应力带，图2b的位移图显示了试件上的几条垂直裂缝。同时，试块的滑动也逐渐向45°方向发生。图2c为45°方向的大滑移矢量。在关键点D，由于承载力的下降和45°方向剪切面的形成，等效应力水平略有降低，试样中间的裂缝进一步扩大。试样沿剪切面被分成两块。块体的滑动进一步加快，破坏区域沿剪切面向周边延伸。在关键点E，试样被进一步压缩，试样的局部挤压部分的等效应力很大。其他部分则相对较小。由于钢纤维聚合物提供的摩擦剪应力的存在，在0.73%的轴向应变下，试样仍能保持超过70MPa的轴向承载力。结果表明，钢纤维聚合物的存在可以抑制混凝土的运动，有效地提高RPC的强度和塑性性能。



(b) 混凝土位移变化



(c) 混凝土的接头剪切位移矢量

图2 在单轴压缩条件下混凝土的破坏特性

(二) 三点弯曲试验下混凝土数值模拟

本文构建了含1%钢纤维聚合物的RPC三点弯曲数值试样，如图3所示。立方体的尺寸为160 mm长、40 mm宽和40 mm高，以与实验程序相同的方式加载。在数值试样上表面的中间，设置一根直径为10mm的钢筋作为位移约束，而在数值试样下表面上设置两根直径为10 mm、距离试样末端20 mm的钢筋作为荷载支撑。加载方法为位移控制，加载速率为0.002mm/s。

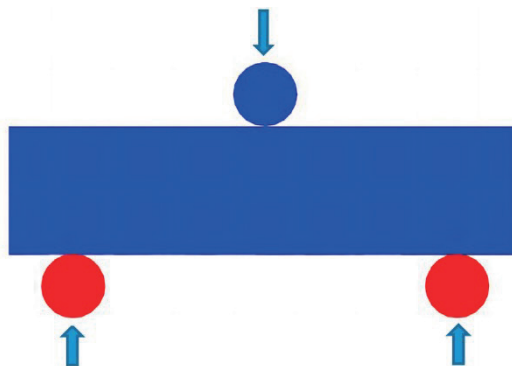


图3 三点弯曲试验荷载图

图4a、b为三点弯曲试验下钢纤维聚合物的剪切应力和剪切位移的变化趋势。在初始加载阶段，由于试样下表面受力的增加，施加在试样中性轴上的拉力逐渐增加，混凝土和钢纤维聚合物开始变形。由于钢纤维聚合物的强度高于混凝土，其变形速度不一致，导致钢纤维聚合物与混凝土之间出现相对滑动，这部分的应力主要是剪切力。从关键点A到关键点B，剪力逐渐增大，剪力带向上扩展。在关键点C，剪力带扩大到试件的上边缘，试件断开。随着连续加载，加载力呈现波浪式下降，主要是因为虽然混凝土已经开裂，但与混凝土相连的一部分钢纤维聚合物仍然提供剪切力。这防止了混凝土的进一步开裂。因此，试样在开裂后的一段时间内仍然保持较高的剩余强度。图4b显示，在初始加载阶段，钢纤维聚合物的剪切位移只发生在试样中间部分的下部，而且位移也很小。随着连续加载，中性轴的位移逐渐发展。从关键点C到关键点D，剪切带穿透试件的中间区域，剪切位移逐渐增大。

(三) 三轴压缩试验的分析

图5a、b为钢纤维聚合物的剪切力和剪切位移的变化趋势。在初始加载阶段，试样处于压实状态。混凝土和钢纤维聚合物有弹性变形，而大部分钢纤维聚合物没有滑动。在关键点B，随着混凝土的轴向压缩和径向膨

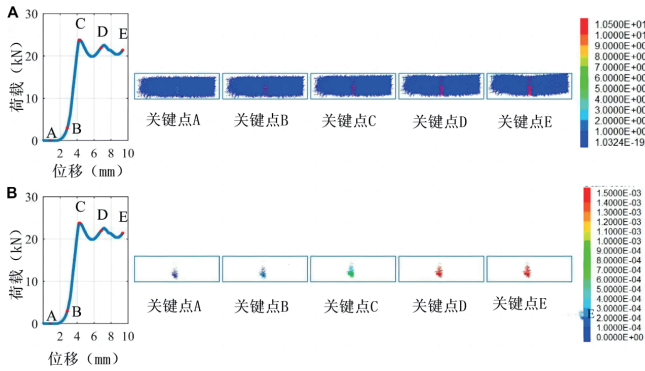
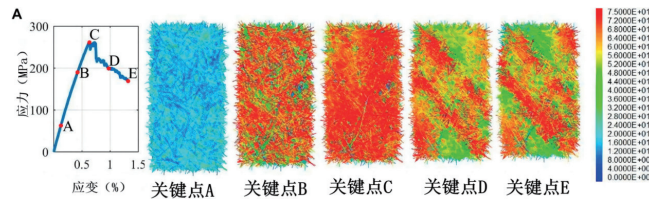
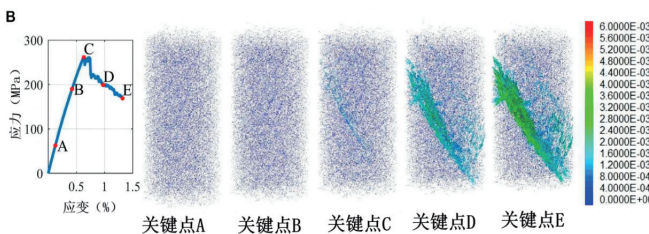


图4 三点弯曲试验

胀，附着在混凝土上的钢纤维聚合物随混凝土移动，纵向分布的钢纤维聚合物首先达到最大剪切力。虽然它们处于局部滑移状态，但也限制了混凝土的运动。图5b显示，钢纤维聚合物的滑移量仍然很小。在关键点C处，试样达到了峰值应力。随着试样的进一步压缩，更多的钢纤维聚合物达到了滑移状态，从左上角3/4位置到右下角出现了一个40°的滑移带（图5b）。同时，在试样的中部和下部出现膨胀。在关键点D，随着压缩量的进一步增加，40°剪切滑移带进一步连接，试样的运动从各点的局部滑移变为由剪切滑移带主导的运动模式。钢纤维聚合物有两条40°剪切滑移带，表明试样的40°剪切滑移面已经完全形成。在关键点E，试样开始在40°滑移面上明显移动。试件也明显缩短和加宽，试件的承载力继续下降。其破坏模式属于剪切破坏，与实验结果一致。



(a) 钢纤维聚合物轴向剪切力的变化



(b) 轴向剪切位移矢量的变化

图5 三轴压缩试验中钢纤维聚合物失效

(四) 数值结果与实验结果失效模式比较

图6为试验和数值结果之间在单轴压缩试验、三轴压缩试验和三点弯曲试验下，用1%钢纤维聚合物加固的混凝土试样的破坏模式的比较。单轴压缩试验下的试样主要为剪切破坏，并伴有垂直于加载方向的劈裂破坏。在25MPa围压下进行的三轴压缩试验中，试样主要表现为纯剪切破坏。三点弯曲试验下的试样在试样中部出现

拉伸破坏。同时，如对比图所示，试样破坏特性的数值结果与实验结果一致。这进一步验证了该方法的实用性和准确性。

从单轴压缩试验的截面分析和三轴压缩试验的截面分析中可以看出，钢纤维聚合物的存在使试样在单轴和三轴压缩过程后的残余应力分别为84.2和166.1MPa，变形量分别为0.68和1.34%。这些数值相对于试样的峰值应力只衰减了33.5%和23.8，可以看出，钢纤维聚合物的存在大大增加了活性粉末的峰值强度和残余强度。混凝土的峰值和残余强度因钢纤维聚合物的存在而大大增加。这种改善的原因是钢纤维聚合物和混凝土之间的相互作用力，它们之间的摩擦抓力改善了混凝土的剪切变形，而钢纤维聚合物的轴向力改善了混凝土基体的拉伸位移。因此，钢纤维聚合物从上述两个方面改善了钢纤维聚合物活性粉末混凝土的强度和塑性。

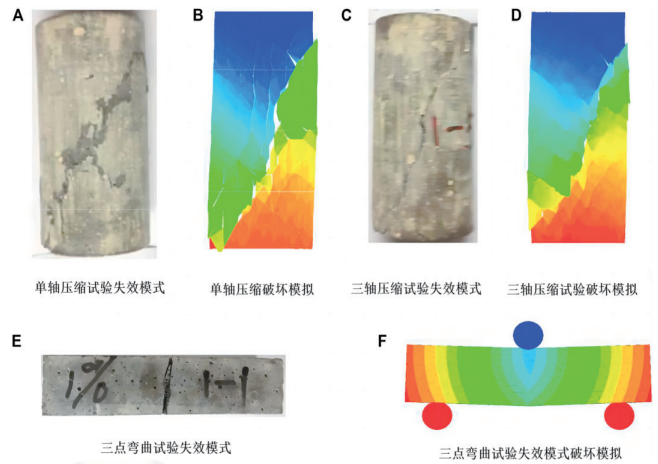


图6 1%钢纤维聚合物钢筋混凝土试样在各种力学试验下的失效模式

四、结论

(1) 在单轴压缩和三轴压缩试验中模拟了钢纤维体积含量为1%的RPC的破坏过程。模拟结果再现了钢筋混凝土减震柱试件的剪切破坏特征，通过数值模拟证实了纤维聚合物加固钢筋混凝土减震柱的宏观破坏主要是剪切破坏。

(2) 实验和数值模拟结果表明，在钢筋混凝土减震柱基体中加入钢纤维可以有效改善钢筋混凝土减震柱试样的塑性行为和强度，使试样在大变形后仍能保持较高的机械强度，证明了加入钢纤维聚合物的钢筋混凝土减震柱材料具有良好的应用前景，为钢筋混凝土减震柱性能的数值模拟研究提供了新途径。

参考文献

[1] 杜修力, 刘迪, 许成顺, 刘洪涛, 李洋. 橡胶支座在浅埋地下框架结构中的减震效果研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (10): 1761-1770+1957.
 [2] 王颖欣. BRC钢框架跷动结构减震影响分析[D]. 河北工程大学, 2013.
 [3] 唐建余, 潘文, 董卫青, 梁俊, 孙柏峰. 某超高层框架-钢筋混凝土核心筒结构减震案例分析[J]. 工业安全与环保, 2021, 47 (07): 55-59.