DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.01.19

含不规则跨尺度裂缝的钢筋混凝土厂房吊车梁结构性能分析

贾 超[1,2], 王亦欣[1], 闵巧玲[1], 李明超[1]
(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘 要: 钢筋混凝土厂房吊车梁在水电站工程建设中被广泛应用,但高寒区的低温、高风速、低湿度的环境条件易使吊车梁在施工过程中产生不规则表面裂缝,严重影响该混凝土结构的安全服役。由于裂缝尺度远远小于钢筋混凝土吊车梁结构尺度,使得现有计算方法难以有效考虑不规则、小尺度裂缝的真实形态。为解决该问题,提出了一种基于真实裂缝点云的不规则跨尺度裂缝计算方法,在无裂缝网格模型的基础上,将穿过裂缝单元的节点批量投影至裂缝曲面上,建立含精细化真实裂缝的数值模型。该方法具有不改变初始单元类型、无需对裂缝模型进行网格划分的优点,比传统的几何剖分法具有更好的适用性。通过混凝土三点弯曲及楔入劈拉试验验证了该跨尺度裂缝计算方法的正确性,并将其应用至我国高寒区钢筋混凝土吊车梁结构的安全性能分析中,为吊车梁质量评估及后续修复加固提供了有力的技术支撑。

关键词: 厂房吊车梁; 不规则裂缝; 跨尺度; 结构性能; 精细化数值模型; 安全性分析
中图分类号:TV33 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2023)01-0159-09

Structural performance analysis of reinforced concrete crane beam with irregular cross-scale cracks

JIA Chao[1,2], WANG Yixin[1], MIN Qiaoling[1], LI Mingchao[1]
(1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin* 300350, *China*;
2. *Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou* 450003, *China*)

Abstract: As a necessary structure for the construction of hydropower stations, the crane beam of reinforced concrete powerhouse is widely used in the dam engineering. However, the environmental conditions of low temperature, high wind speed and low humidity in the alpine regions easily lead to irregular surface cracks in the reinforced concrete crane beam during construction, which seriously affects the safe service of the concrete structure. The scale of irregular cracks is much smaller than the structural scale of reinforced concrete crane beams, which makes it difficult for the existing calculation methods to effectively consider the irregularity and morphological authenticity of the cracks. To solve this problem, a highly detailed simulation method for irregular cross-scale cracks based on real crack point cloud is proposed. In this method, the crack surface is represented by point clouds and embedded to the finite element meshe of the structure. The element nodes where the crack passes through are then projected to the crack surface in batches to capture the crack and its propagation path. The main advantage of the proposed method is that it does not need to change the initial element types and mesh the geometric model with cracks, which can reduce the difficulty of meshing for complex 3D models and is more applicable than conventional geometric subdivision method. Moreover, the concrete three-point bending beam and wedge-splitting experiments are conducted to verify this proposed method. Then this method is applied to the structural safety analysis of a reinforced concrete crane beam in the alpine region of China, which can provide a technical

收稿日期:2022-10-18; **修回日期**:2022-11-22
基金项目:国家自然科学基金项目(51879185)
作者简介:贾 超(1985-),男,河南郑州人,工程师,主要从事水工建筑物设计研究。
通讯作者:闵巧玲(1994-),女,湖北随州人,博士研究生,主要从事水工结构工程研究。

support for the subsequent quality assessment and reinforcement of crane beams.

Key words: crane beam of reinforced concrete powerhouse; irregular crack; cross-scale; structural performance; highly detailed simulation model; safety analysis

1 研究背景

钢筋混凝土结构广泛应用于高坝、桥梁、建筑厂房等基础设施工程中[1-3]。钢筋混凝土吊车梁作为水电站厂房的必要组成部分,对水电站的正常运行具有重要作用。但由于高寒、高风速、低湿度等恶劣的环境条件,高寒区的钢筋混凝土厂房吊车梁在施工过程中易出现不同程度的裂缝,不规则裂缝的存在降低了吊车梁结构的完整性,使得吊车梁运行过程中的安全性降低,影响其结构性能及后续使用。在设计过程中,工程人员更多地采用传统截面削减法对含裂缝的钢筋混凝土结构进行简化处理,再根据规范开展安全性分析,但该方法偏于保守,无法准确评估含真实裂缝的钢筋混凝土梁的性能,因此亟需开展考虑不规则裂缝的钢筋混凝土吊车梁的结构安全性能评估分析。

高寒地区的钢筋混凝土吊车梁裂缝成因主要分为以下几个方面:(1)塑性干缩裂缝。主要由于高寒地区空气湿度低、风速大以及外部养护条件较差,混凝土尤其是在早龄期极易产生失水收缩裂缝[4-5];(2)钢筋锈蚀膨胀裂缝。因混凝土中氯离子渗透引起钢筋锈蚀膨胀,使钢筋周边混凝土发生开裂,该类型裂缝由混凝土内部贯穿至构件表面,深度较深[6];(3)冻融裂缝。高寒地区日温差大,频繁的正负气温交替使混凝土常处于冻融循环环境中而产生裂缝[7];(4)混凝土风化或老化、厂房工程基础处理不当等原因也会使吊车梁产生裂缝。由于混凝土内部组分的复杂性以及高寒地区复杂环境条件对混凝土的影响,上述原因所导致的钢筋混凝土吊车梁裂缝具有走向曲折的特点,很难用简单的平面进行描述,多为不规则曲面;而且相比于厂房吊车梁结构尺寸来说,裂缝属于小尺度,即裂缝宽度远小于吊车梁尺寸,这也导致现有研究中鲜有考虑真实裂缝的钢筋混凝土吊车梁结构安全性能分析。

混凝土裂缝扩展模拟方法主要包括以下 3 种:分离裂缝法(discrete crack model)、弥散裂缝法(smeared crack model)、扩展有限元法(extended finite element method)。分离裂缝法通过几何分割将裂缝节点简化为边界,当裂缝尖端节点处的节点力超过拉伸强度标准时,则该节点分成两个节点,裂缝发生扩展。这种方法计算的混凝土裂缝扩展沿节点传播,因此计算网格需不断调整与重构,降低了计算效率[8-9]。弥散裂缝法通过调整材料应力-应变本构关系对裂缝扩展状态进行表征,可得到裂缝起裂到扩展的完整过程,且该方法所创建的计算模型相较于分离裂缝法计算效率更高[10-11],但无法准确获得裂缝开口位移,此外,在分析中如何合理地设置参数也未有成熟的研究结论[12-14]。扩展有限元法通过富集函数对初始裂缝进行表征,基于单位分解法对裂缝扩展过程中非连续性位移场函数进行求解[15-17],但由于在动态分析裂纹时,Heaviside 扩充函数的使用使得初始裂纹无论长度多小都必须横跨一个单元[18],且无法建立具有一定宽度的裂缝,因此该方法难以适用于大型结构体中精细化跨尺度裂缝的扩展计算。目前混凝土裂缝相关分析多集中在简单的裂缝形状扩展研究,难以有效结合工程尺度问题开展裂缝稳定性分析[19-21]。部分学者[15, 22-27]通过上述方法开展了混凝土裂缝扩展静、动力分析,计算结果与室内试验吻合较好。但总的来说,由于室内试验的试件尺寸远小于厂房吊车梁结构的尺寸,且预制裂缝大多数为规则几何形状,难以反映出工程中裂缝的真实性状,这也使得实现考虑精细化跨尺度裂缝的钢筋混凝土吊车梁安全性分析变得十分迫切。

为解决上述难题,本文提出了一种基于真实裂缝点云的跨尺度裂缝计算方法,在无裂缝的网格模型基础上,将穿过裂缝单元的节点批量投影至裂缝曲面上,建立含精细化裂缝的数值模型。该方法具有不改变初始单元类型、无需对裂缝模型进行网格划分的优点,相比于传统几何剖分法具有更好的适用性。其次通过混凝土三点弯曲及楔入劈拉试验验证了该跨尺度裂缝计算方法的正确性,最后将其应用于我国高寒地区某大坝厂房的钢筋混凝土吊车梁的结构安全性能分析中,为钢筋混凝土吊车梁的质量评估及后续修复加固提供了有力的技术支撑。

2 尺度不规则裂缝模型建立方法

2.1 理论基础

2.1.1 裂缝单元识别 在无裂缝的有限元网格模型上需对几何裂缝穿过的单元进行识别,将该单元节点批量投影至裂缝几何面上,通过删除该单元建立显式裂缝数值模型。以图 1 中的单元为例,将裂缝单元的识别方法说明如下。

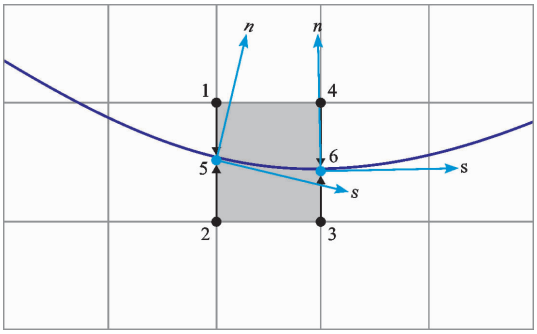


图 1　单元与裂缝几何位置判断示意图

图 1 中的单元包含 4 个节点(三维模型包含 8 个节点),各节点至裂缝面的最近点组成一组方向向量 $\boldsymbol{a}$,该最近点在裂缝几何面上的法向向量为 $\boldsymbol{n}$,则有:

$$\begin{cases}\text{节点位于裂缝几何面下部时:}\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{n}\geqslant 0\\ \text{节点位于裂缝几何面上部时:}\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{n}<0\end{cases}$$

对数值模型中所有单元的节点进行位置计算,当单元的 4 个节点均位于裂缝几何面的上部或下部时,表明裂缝几何面未穿过该单元;当单元一部分节点位于裂缝几何面的上部,另一部分节点位于裂缝几何面的下部时,表明裂缝几何面穿过了该单元,需对该单元上的节点进行后续批量投影,建立含裂缝的数值计算模型。

2.1.2　单元形函数　对于三维复杂结构,为保证计算效率与精度,多采用六面体单元进行结构性能数值分析。单个六面体单元包含8个节点,形函数沿各坐标轴呈线性变化[28],因此位移沿各坐标轴的线性变化函数 $u=u(x,y,z)$ 可写成:

$$u=a_1+a_2x+a_3y+a_4z+a_5xy+a_6xz+a_7yz+a_8xyz \tag{1}$$

根据节点处的位移值可求得单元的位移场如下:

$$u=\begin{pmatrix}1 & x & y & z & xy & xz & yz & xyz\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1y_1 & x_1z_1 & y_1z_1 & x_1y_1z_1\\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 & x_2y_2 & x_2z_2 & y_2z_2 & x_2y_2z_2\\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 & x_3y_3 & x_3z_3 & y_3z_3 & x_3y_3z_3\\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 & x_4y_4 & x_4z_4 & y_4z_4 & x_4y_4z_4\\ 1 & x_5 & y_5 & z_5 & x_5y_5 & x_5z_5 & y_5z_5 & x_5y_5z_5\\ 1 & x_6 & y_6 & z_6 & x_6y_6 & x_6z_6 & y_6z_6 & x_6y_6z_6\\ 1 & x_7 & y_7 & z_7 & x_7y_7 & x_7z_7 & y_7z_7 & x_7y_7z_7\\ 1 & x_8 & y_8 & z_8 & x_8y_8 & x_7z_8 & y_8z_8 & x_8y_8z_8\end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix}u_1\\u_2\\u_3\\u_4\\u_5\\u_6\\u_7\\u_8\end{pmatrix} \tag{2}$$

因此形函数表达式为:

$$N=\begin{pmatrix}1 & x & y & z & xy & xz & yz & xyz\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1y_1 & x_1z_1 & y_1z_1 & x_1y_1z_1\\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 & x_2y_2 & x_2z_2 & y_2z_2 & x_2y_2z_2\\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 & x_3y_3 & x_3z_3 & y_3z_3 & x_3y_3z_3\\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 & x_4y_4 & x_4z_4 & y_4z_4 & x_4y_4z_4\\ 1 & x_5 & y_5 & z_5 & x_5y_5 & x_5z_5 & y_5z_5 & x_5y_5z_5\\ 1 & x_6 & y_6 & z_6 & x_6y_6 & x_6z_6 & y_6z_6 & x_6y_6z_6\\ 1 & x_7 & y_7 & z_7 & x_7y_7 & x_7z_7 & y_7z_7 & x_7y_7z_7\\ 1 & x_8 & y_8 & z_8 & x_8y_8 & x_7z_8 & y_8z_8 & x_8y_8z_8\end{pmatrix}^{-1} \tag{3}$$

将经过裂缝的单元节点投影至裂缝表面的点云上,裂缝单元节点投影示意图见图 2。投影至裂缝表面后的单元节点为裂缝自由边界,则新的单元形函数表达式为:

$$N'=\begin{pmatrix}1 & x & y & z & xy & xz & yz & xyz\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & x_1' & y_1' & z_1' & x_1'y_1' & x_1'z_1' & y_1'z_1' & x_1'y_1'z_1'\\ 1 & x_2' & y_2' & z_2' & x_2'y_2' & x_2'z_2' & y_2'z_2' & x_2'y_2'z_2'\\ 1 & x_3' & y_3' & z_3' & x_3'y_3' & x_3'z_3' & y_3'z_3' & x_3'y_3'z_3'\\ 1 & x_4' & y_4' & z_4' & x_4'y_4' & x_4'z_4' & y_4'z_4' & x_4'y_4'z_4'\\ 1 & x_5' & y_5' & z_5' & x_5'y_5' & x_5'z_5' & y_5'z_5' & x_5'y_5'z_5'\\ 1 & x_6' & y_6' & z_6' & x_6'y_6' & x_6'z_6' & y_6'z_6' & x_6'y_6'z_6'\\ 1 & x_7' & y_7' & z_7' & x_7'y_7' & x_7'z_7' & y_7'z_7' & x_7'y_7'z_7'\\ 1 & x_8' & y_8' & z_8' & x_8'y_8' & x_7'z_8' & y_8'z_8' & x_8'y_8'z_8'\end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix}u_1'\\u_2'\\u_3'\\u_4'\\u_5'\\u_6'\\u_7'\\u_8'\end{pmatrix} \tag{4}$$

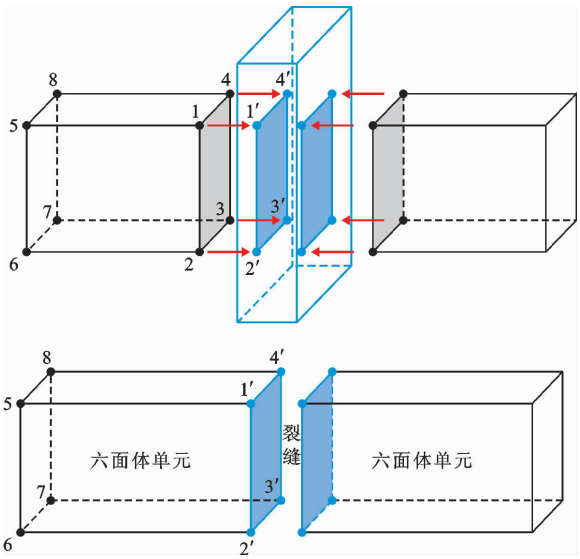


图 2 裂缝单元节点投影示意图

2.2 模型建立方法

由于实际工程中混凝土裂缝多为走向复杂的曲面,且各裂缝贯穿程度不一,这也导致了传统裂缝几何分割法只能采用自由化四面体网格划分进行含裂缝结构体的模型建立,从而大大降低了数值计算结果的精度。

为解决该问题,本文提出一种基于裂缝点云的跨尺度裂缝建模方法,在无裂缝的结构模型中,将裂缝穿过的单元节点投影至裂缝曲面上,不改变单元形式,建立起裂缝几何形状精确、计算精度高的精细化结构模型。跨尺度裂缝模型建立方法主要流程如图 3 所示,具体步骤说明如下:

第 1 步:建立无裂缝结构模型,计算裂缝曲面几何模型穿过的模型单元及对应节点。

第 2 步:将裂缝曲面离散为点云,保证点间最近距离不大于单元尺寸的 1/2。

第 3 步:计算单元节点与裂缝点云的距离,计算方法如公式(5)所示,将该单元节点投影至该裂缝点云距离最近的点上。

$$d = \min^{i}\{(x_i - x_i')^2 + (y_i - y_i')^2 + (z_i - z_i')^2\} \tag{5}$$

式中:(x_i, y_i, z_i) 为单元的节点坐标,(x_i', y_i', z_i') 为裂缝点云的坐标。

第 4 步:删除裂缝曲面穿过的单元获取裂缝自由边界,得到含裂缝的数值计算模型。

对于宽度远小于整体结构尺寸的裂缝而言,裂缝可简化为曲面,裂缝点云由裂缝曲面生成。而对于宽度较大的裂缝而言,裂缝宽度相比于整体结构尺寸不可忽略,因此裂缝点云通过建立的裂缝实体模型所抽取的外表面生成。

3 混凝土塑性损伤本构

混凝土裂缝的扩展过程可采用混凝土塑性损伤本构(concrete damaged plasticity,CDP)中的受拉损伤因子进行表征,该本构模型可用于模拟混凝土在单向荷载、循环荷载与动态荷载作用下的受压破碎及受拉开裂[29]。根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[30],混凝土单轴受压及受拉时应力 - 应变曲线如图 4 所示。

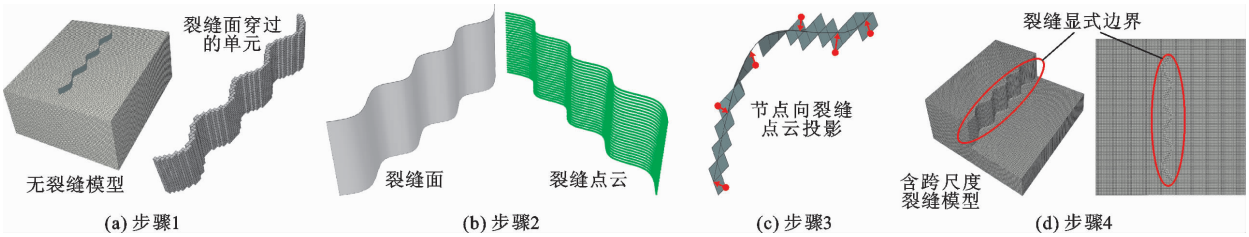
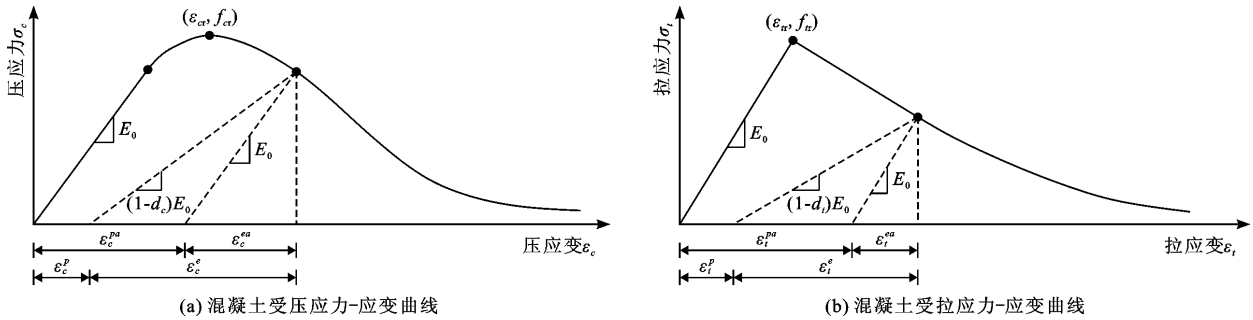


图 3 跨尺度裂缝模型建立方法主要流程示意图



(a) 混凝土受压应力-应变曲线 (b) 混凝土受拉应力-应变曲线

图 4 混凝土单轴受压及受拉时应力 - 应变曲线示意图

图 4 中 f_{cr}、f_{tr} 分别为混凝土峰值受压应力和峰值受拉应力,MPa;ε_{cr}、ε_{tr} 分别为峰值应力所对应的受压应变和受拉应变;混凝土在受压及受拉阶段塑性刚度退化分别由受压损伤因子 d_c 与受拉损伤因子 d_t 进行表征。混凝土在单向受压和受拉作用下的应力 - 应变关系式如下:

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^p) = (1 - d_c)E_0\varepsilon_c^e \quad (6)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^p) = (1 - d_t)E_0\varepsilon_t^e \quad (7)$$

式中:σ_c、σ_t 分别为混凝土单向受压与受拉时的应力,MPa;d_c、d_t 分别为混凝土受压损伤因子与受拉损伤因子;E_0 为混凝土初始弹性模量,MPa;ε_c、ε_t 分别为混凝土受压与受拉时的应变;ε_c^p、ε_t^p 为卸载后的有效受压塑性应变与有效受拉塑性应变,ε_c^e、ε_t^e 为弹性受压应变与弹性受拉应变。

4　案例验证

为验证所建立的跨尺度裂缝模型的有效性,本节采用混凝土三点弯曲梁断裂试验与混凝土楔入劈拉试验进行案例验证。

4.1　混凝土梁三点弯曲数值模拟

范向前等[31-32]开展的混凝土三点弯曲梁断裂试验中,混凝土梁的尺寸为 1 000 mm × 200 mm × 120 mm,在混凝土梁中部预制了高度为 80 mm 的贯穿型竖向裂缝。以此试验为例根据前文所述方法建立含裂缝的混凝土梁数值模型,如图 5 所示,由于预制裂缝宽度较小,裂缝点云由裂缝曲面生成。裂缝为竖向平面,对应的点云间距为单元尺寸的 1/2。通过面积等效原理将该断裂损伤本构模型[25]转换为 CDP 塑性损伤本构模型。三点弯曲梁的混凝土设计强度采用 C35 混凝土标准,混凝土材料参数见表 1。

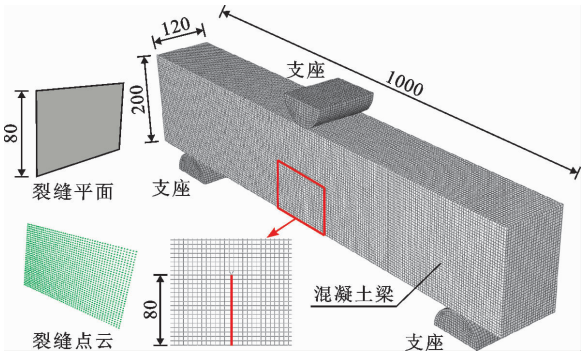


图 5　含裂缝混凝土梁案例验证数值模型(单位:mm)

试验过程中由混凝土梁上部中心处向下施加竖向荷载直至梁发生破坏,测量混凝土梁下部中心处裂缝开口宽度与上部竖向荷载之间的关系,绘制荷载 F - 裂缝口张开位移 $CMOD$(crack mouth opening displacement)曲线。为保证数值模拟与试验具有相同的荷载施加条件,底部支座跨度为 800 mm,支座与混凝土梁之间的摩擦系数取 0.35[33],上部支座位于跨中,通过位移加载方式进行控制。室内试验与数值模拟的混凝土梁最终破坏形态如图 6 所示;将 F - $CMOD$ 曲线的本文计算结果与室内试验及基于 XFEM(extended finite element method)法的数值模拟结果[25]进行对比,如图 7 所示。

由图 6 可以看出,本文数值模拟的混凝土梁断裂部位及形态与室内试验结果一致。图 7 中 F - $CMOD$ 曲线对比显示,采用 XFEM 法的曲线峰值对应的裂缝宽度大于本文计算结果,主要是由于断裂损伤本构中应力软化阶段为线性下降,而 CDP 本构中采用的是曲线下降,因而相同应力下 CDP 本构所对应的应变小于断裂损伤本构;本文方法的计算结果更接近于室内试验曲线的上升和下降趋势,室内试验的最大峰值强度为 4.55 kN,本文数值模拟的最大峰值强度为 4.75 kN,二者仅相差 4.40%,验证了上述跨尺度裂缝模型建立方法及 CDP 本构参数选取的正确性。

4.2　混凝土楔入劈拉数值模拟

李庆斌[34]针对溪洛渡拱坝混凝土进行了断裂参数试验测定,楔入劈拉试验加载装置如图 8 所示,通过现场全级配混凝土楔入劈拉试验测定了不同龄期混凝土的断裂性能。试验过程中楔入劈拉试件尺寸为 800 mm × 800 mm × 450 mm,在试件中部预制一条长度为 320 mm 的贯穿裂缝,裂缝宽度为 4.5 mm,端部呈尖状。试件混凝土不同龄期的主要力学参数测定结果见表 2。以此试验为例根据前文所述方法建立含裂缝的楔入劈拉试件数值模型,如图 9 所示,裂缝点云由裂缝外表面形成,点云间离为单元尺寸的 1/2。由图 9 可以看出数值模型中所建立的裂缝具有一定的厚度与尖端,可真实地反映出试件中预制裂缝的性状。

数值模拟中模型顶部凹槽处对称施加水平位移,底部辊轴处施加竖向约束边界。采用 CDP 本构进行楔入劈拉过程混凝土裂缝损伤模拟,当损伤因子达到 0.95 时,认为该混凝土单元失效,通过删除失效单元可反映混凝土裂缝的扩展过程。裂缝不同张开位移时混凝土试件楔入劈拉损伤云图如图 10 所示;计算出的不同龄期混凝土试件水平劈拉力(P_h) - 裂缝张开位移($CMOD$) 曲线如图 11 所示;提取 P_h - $CMOD$ 曲线中不同龄期下峰值水平劈拉力($P_{h\,max}$) 与相应的室内试验值进行比较,结果见图 12。

表 1 三点弯曲数值模型混凝土梁材料参数

本构模型	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	抗拉强度/MPa	断裂能/(N·m^{-1})	极限拉应变
断裂损伤本构[25]	31.5	0.167	2400	1.65	102.8	
CDP 本构	31.5	0.167	2400	1.65		0.0062

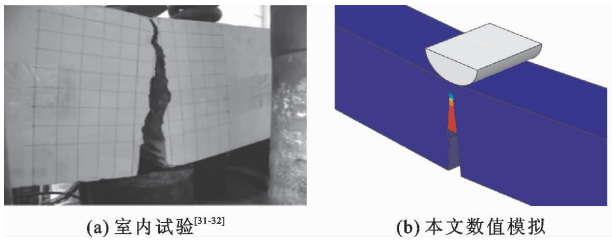


图 6 室内试验与数值模拟的混凝土梁三点弯曲破坏形式

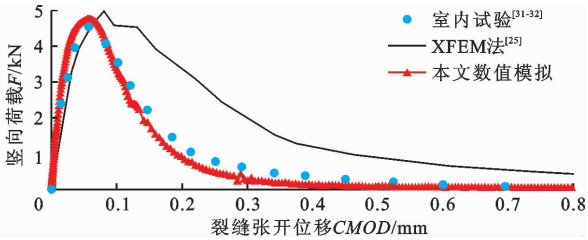


图 7 不同方法得出的混凝土梁 $F-CMOD$ 曲线对比

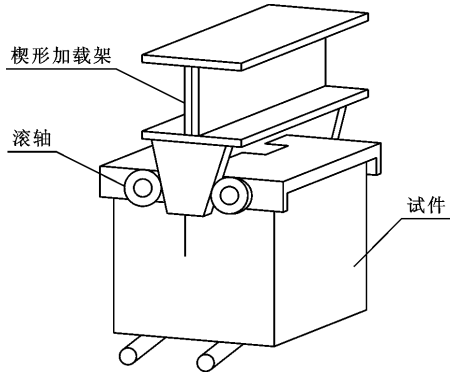


图 8 混凝土楔入劈拉试验加载装置[34]

表 2 楔入劈拉试验混凝土不同龄期的主要力学参数

龄期/d	E_0/GPa	f_{tr}/MPa	f_{cr}/MPa
28	23.0	2.70	26.64
90	25.0	3.21	30.50
180	26.2	3.24	30.75

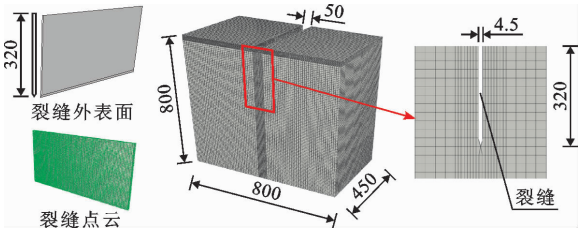


图 9 混凝土楔入劈拉试件数值模型(单位:mm)

由图 10~12 可以看出,随着加载历时的延长,混凝土裂缝沿裂缝尖端处不断向下扩展,呈现出标准的Ⅰ型断裂模式(图 10);随着龄期的增加,劈拉试件的峰值强度逐渐增大,峰值强度所对应的裂缝宽度也逐渐增大(图 11);数值模拟与室内试验中劈拉试件峰值强度随龄期的变化趋势基本吻合(图 12),龄期 180 d 的模拟峰值强度略大于试验值,二者相差 2.83%。上述模拟结果验证了本文建立裂缝跨尺度模型的方法及 CDP 本构参数选取的正确性。

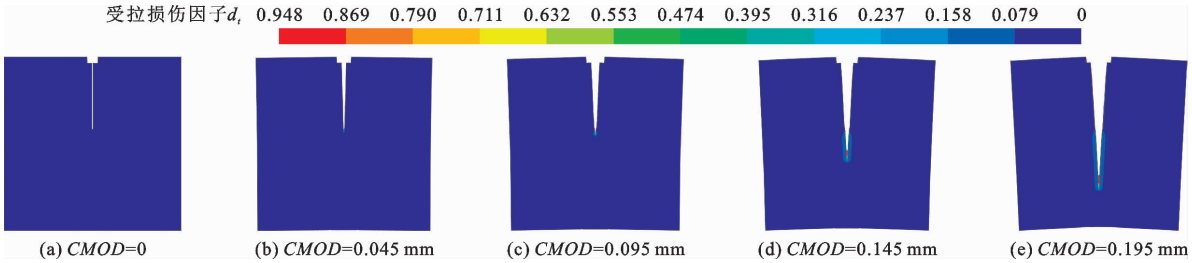


图 10 裂缝不同张开位移时混凝土试件楔入劈拉损伤云图

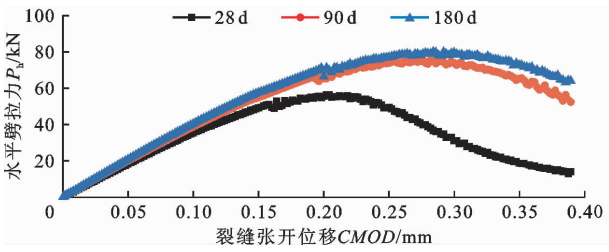


图 11 不同龄期混凝土试件 P_h-CMOD 曲线

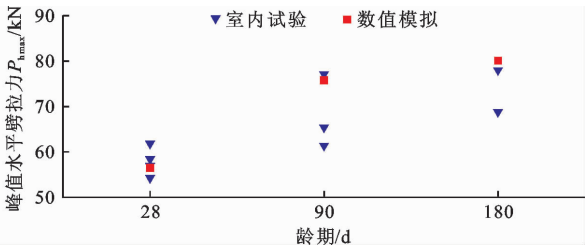


图 12 不同龄期 $P_{h\max}$ 的室内试验值与数值模拟值对比

5　工程实例分析

我国西北高寒区某碾压混凝土大坝厂房的吊车梁表面出现了大量不规则裂缝,本文以该工程为例,对含多条不规则裂缝的钢筋混凝土吊车梁开展结构安全性能分析。

5.1　裂缝三维可视化显示

根据工程现场监测的裂缝参数建立吊车梁裂缝三维可视化模型,如图 13 所示。图 13 显示吊车梁裂缝为不规则形态,且裂缝宽度远远小于结构尺寸,若采用传统截面削减方法则难以分析裂缝真实形态对结构的影响,因此采用本文提出的不规则点云投影法开展含跨尺度不规则裂缝的钢筋混凝土梁安全性能分析。

图 13　实例工程吊车梁裂缝三维可视化显示

5.2　荷载条件

吊车梁尺寸及其运行过程中的移动荷载分布如图 14 所示。吊车梁顶面分布 4 个吊车轮,轮压为 275 kN。根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)[35],荷载分项系数为 1.575;恒荷载为结构自重,分项系数为 1.3。由于移动荷载的存在,需寻找最不利轮压分布位置。

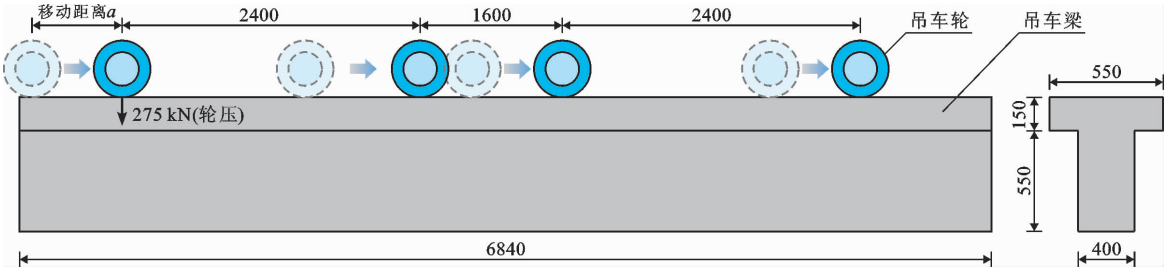


图 14　吊车梁尺寸及其运行过程中的移动荷载分布(单位:mm)

5.3　计算结果

为探寻最不利荷载位置,采用弹性本构计算钢筋混凝土吊车梁在不同吊车移动距离下的应力状态。以钢筋混凝土吊车梁裂缝尖端的拉应力大小为控制标准,当该处拉应力最大时,则吊车处于最不利轮压位置,计算结果如图 15 所示。图 15 表明最不利轮压位置为吊车移动距离 1 020 mm 处。

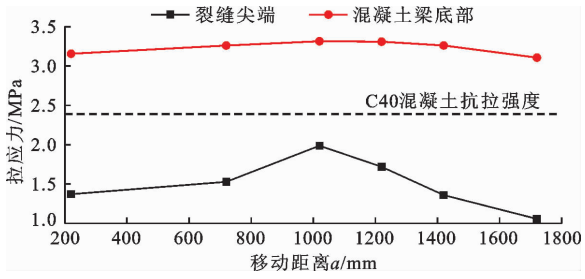


图 15　吊车移动距离与结构拉应力的关系

选取吊车移动中最不利荷载位置,采用 CDP 本构开展含裂缝下的钢筋混凝土吊车梁安全性能分析,吊车梁竖向位移、吊车梁钢筋笼 Mises 应力云图及吊车梁裂缝损伤云图数值模拟结果分别如图 16~18 所示。

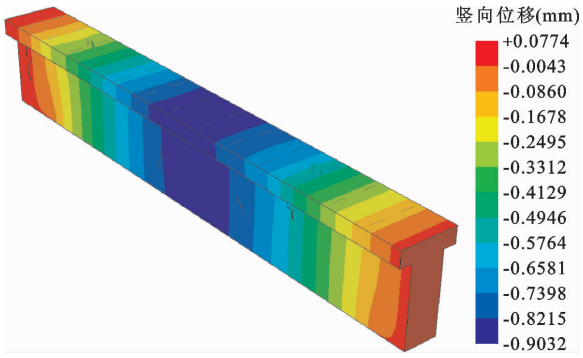


图 16　吊车梁竖向位移云图

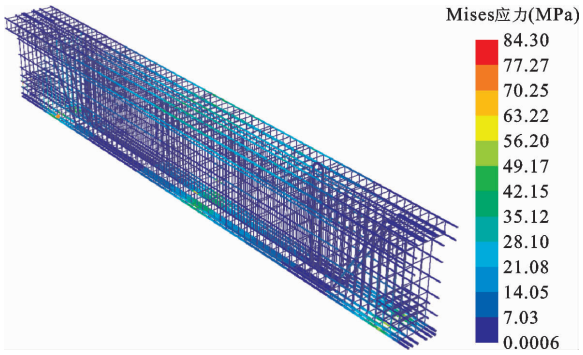


图 17　吊车梁钢筋笼 Mises 应力云图

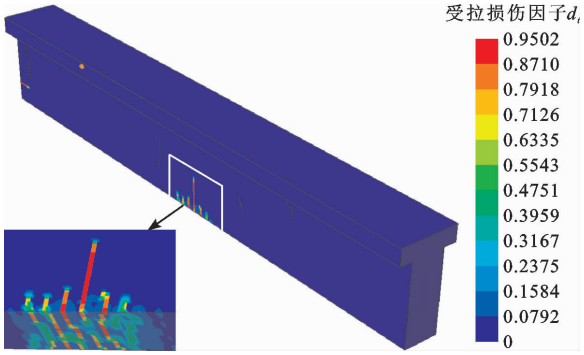


图 18 吊车梁受拉损伤云图

由图 16 ~ 18 可知,在最不利荷载作用下,钢筋混凝土吊车梁的挠度为 0.903 2 mm,钢筋笼的最大 Mises 应力为 84.30 MPa,满足结构设计要求;吊车梁底部混凝土会出现裂缝,裂缝扩展深度可达 425 mm,裂缝宽度为 0.04 mm,小于规范要求的阈值 0.4 mm[36],吊车梁已有的裂缝不会出现继续扩展的问题。

6 讨 论

混凝土结构中的裂缝问题是影响结构运行安全的重要因素,因此受到了业内工程人员的广泛关注。但由于裂缝走向的不规则性,导致现有简化裂缝分析方法难以准确描述裂缝的真实性状,在混凝土结构分析中具有一定的局限性。另一方面,裂缝的尺度远小于混凝土结构的尺度,具体表现在裂缝的宽度为毫米级别,而混凝土结构尺寸为米级别,对于大体积混凝土结构甚至超过百米级别,尺度的差距导致含裂缝的混凝土结构高质量网格划分存在难题。目前在混凝土结构裂缝的相关研究中,多以简化的平面裂缝形态进行扩展性分析[37-40],主要是由于室内试验的预制裂缝多为平面裂缝,因此在后续结构分析中也采用平面裂缝进行替代,该分析方法忽略了工程结构中裂缝走向的不规则性,无法准确根据结构中的真实裂缝性状开展精确性分析。

不同于上述方法,本文提出了考虑裂缝真实性状的精细化数值计算方法,通过点云投影建立含真实裂缝的跨尺度数值分析模型,采用混凝土受拉损伤因子表征混凝土裂缝的扩展状态,最后运用该方法对某厂房的钢筋混凝土吊车梁结构进行了安全性分析。另外,本文所提出的跨尺度裂缝数值模型的建立方法适用于多种大型混凝土结构,并可结合混凝土裂缝监测数据实时更新结构安全的计算结果,提前预警混凝土结构开裂问题,为后期修复加固工作提供技术指导。

7 结 论

高寒地区钢筋混凝土结构的表面裂缝具有普遍性,为对考虑真实裂缝形态的钢筋混凝土吊车梁进行安全性能分析,本文提出了一种基于裂缝点云的不规则跨尺度裂缝计算方法,通过混凝土三点弯曲及楔入劈拉试验验证了本文计算方法的正确性,最后将其应用于我国高寒区某厂房的钢筋混凝土吊车梁结构安全性能分析中,为吊车梁质量评估及后续修复加固提供有力的技术支撑。可得出以下结论:

(1)基于裂缝点云的跨尺度裂缝计算方法可精确描述裂缝的几何形状,该方法不改变初始单元类型且无需对裂缝模型进行网格划分,相比于传统几何剖分法具有更好的适用性。

(2)通过混凝土梁三点弯曲断裂试验与混凝土试件楔入劈拉试验的案例验证表明,裂缝点云可由裂缝曲面或裂缝外表面生成,在应用时可根据裂缝尺度灵活选择。

(3)实例吊车梁结构安全性的计算分析结果表明,施工期吊车梁上出现的裂缝稳定性较好,在吊车梁处于最不利荷载工况下不会继续扩展,同时此工况下吊车梁裂缝尖端最大应力、钢筋笼最大应力及吊车梁最大挠度均满足规范要求,不影响吊车梁的结构性能及后续使用。

参考文献:

[1] 艾亿谋,杜成斌,洪永文,等. 混凝土坝抗震加固中钢筋混凝土的动力本构模型[J]. 水利学报,2009,40(3):289 -295.
[2] 张俊娟,穆卓辉. 钢筋混凝土桥梁抗力模型的建立及应用[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(5):186 - 191.
[3] 戴永琪,刘晓青. 基于概率分析的锈蚀钢筋混凝土结构寿命预测[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(2):173 - 179.
[4] 陈肇元,崔京浩,朱金铨,等. 钢筋混凝土裂缝机理与控制措施[J]. 工程力学,2006,23(S1):86 - 107.
[5] 张 雷,王志华,佟继有,等. 养护环境对混凝土限制收缩开裂影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(3):156 - 162.
[6] CHAUHAN A, SHARMA U K. Crack propagation in reinforced concrete exposed to non-uniform corrosion under real climate[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 248, 107719.
[7] 李金玉,曹建国,徐文雨,等. 混凝土冻融破坏机理的研究[J]. 水利学报,1999,30(1):41 -49.
[8] NGO D, SCORDELIS A C. Finite element analysis of reinforced concrete beams[J]. Journal Proceedings, 1967, 64:152 - 163.

[9] BORST R, REMMERS J, NEEDLEMAN A, et al. Discrete vs smeared crack models for concrete fracture: Bridging the gap [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28(7-8): 583-607.

[10] 姜庆远,叶燕春,刘宗仁. 弥散裂缝模型的应用探讨[J]. 土木工程学报,2008,41(2):81-85.

[11] 龙渝川,张楚汉,周元德. 基于弥散与分离裂缝模型的混凝土开裂比较研究[J]. 工程力学,2008,25(3):80-84.

[12] PIROOZNIA A, MORADLOO A. Investigation of size effect and smeared crack models in ordinary and dam concrete fracture tests[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 226: 106863.

[13] BI Jihong, HUO Linying, ZHAO Yun, et al. Modified the smeared crack constitutive model of fiber reinforced concrete under uniaxial loading[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250:118916.

[14] 陶慕轩,赵继之. 采用通用有限元程序的弥散裂缝模型和分层壳单元模拟钢筋混凝土构件裂缝宽度[J]. 工程力学,2020,37(4):165-177.

[15] MOËS N, DOLBOW J, BELYTSCHKO T. A finite element method for crack growth without remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 46(1): 131-150.

[16] 胡少伟,米正祥. 基于扩展有限元法的混凝土裂缝扩展过程数值模拟[J]. 水利学报,2014,45(S1):51-56.

[17] BELYTSCHKO T, GRACIE R, VENTURA G. A review of extended/generalized finite element methods for material modeling[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2009, 17(4): 043001.

[18] 支 杰,赵丽滨. 基于 Abaqus 扩展有限元分析技术的裂纹扩展研究[C]// 北京力学会. 北京力学会第 20 届学术年会论文集,2014.

[19] SURENDRAN M, NATARAJAN S, PALANI G S, et al. Linear smoothed extended finite element method for fatigue crack growth simulations[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 206: 551-564.

[20] AGATHOS K, BORDAS S, CHATZI E. Parametrized reduced order modeling for cracked solids[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2020, 121(20), 4537-4565.

[21] PATIL R U, MISHRA B K, SINGH I V. An adaptive multiscale phase field method for brittle fracture[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 329: 254-288.

[22] PIROOZNIA A, MORADLOO A. Investigation of size effect and smeared crack models in ordinary and dam concrete fracture tests[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 226: 106863.

[23] ROTH S N, LÉGER P, SOULAÏMANI A. A combined XFEM-damage mechanics approach for concrete crack propagation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 283: 92-955.

[24] MORALES-ALONSO G, REY-DE-PEDRAZA V, GALVEZ F, et al. Numerical simulation of fracture of concrete at different loading rates by using the cohesive crack model[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018, 96, 308-325.

[25] 胡少伟,米正祥. 基于扩展有限元法的混凝土裂缝扩展过程数值模拟[J]. 水利学报,2014,45(S1):51-56.

[26] 吴智敏,董 伟,许 青. 混凝土Ⅰ-Ⅱ复合型裂缝扩展准则及扩展全过程的数值模拟[J]. 水利学报,2009,40(2):180-187.

[27] 王飞阳,黄宏伟,张东明,等. 带裂缝服役混凝土结构力学性能的多尺度模拟方法[J]. 建筑结构学报,2019,40(12):155-162.

[28] 郑继明,朱 伟,刘 勇,等. 数值分析[M]. 北京:清华大学出版,2016.

[29] 张俊涛,闵巧玲,李明超,等. 水工混凝土裂缝高强环氧砂浆修复的力学性能评价分析[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(1):152-158.

[30] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

[31] 范向前,胡少伟,陆 俊. 非标准混凝土三点弯曲梁双 K 断裂韧度试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(10):152-157.

[32] 范向前,胡少伟,朱海堂,等. 非标准钢筋混凝土三点弯曲梁双 K 断裂特性[J]. 建筑材料学报,2015,18(5):733-736+762.

[33] 徐亚宁. 高强螺栓连接的钢-混凝土组合梁界面摩擦及力学行为研究[D]. 太原:太原理工大学,2021.

[34] 李庆斌. 混凝土断裂损伤力学[M]. 北京:科学出版社出版,2017.

[35] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[36] 国家能源局. 水工混凝土建筑物缺陷检测和评估技术规程:DL/T 5251—2010 [S]. 北京:中国电力出版社,2010.

[37] 邓 涛. 混凝土重力坝裂缝扩展过程的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学,2009.

[38] 汪 洋. 高混凝土重力坝水力劈裂机理研究及设计准则探讨[D]. 北京:清华大学,2016.

[39] 卿龙邦,喻渴来,徐东强. 基于扩展有限元法的混凝土重力坝宏细观断裂数值分析[J]. 水力发电学报,2017,36(06):94-102.

[40] 贾 欣. 基于扩展有限元法的重力坝坝踵裂缝分析研究[D]. 郑州:郑州大学,2019.