

陈剑波,完海鹰.基于分灾模式的钢筋混凝土梁抗弯加固性能评估方法[J].地震工程学报,2019,41(5):1147-1154.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1147

CHEN Jianbo, WAN Haiying. An Evaluation Method of Flexural Strengthening Performance of Reinforced Concrete Beams Based on Damage-Reduction Mode[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1147-1154. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1147

基于分灾模式的钢筋混凝土梁 抗弯加固性能评估方法

陈剑波¹, 完海鹰²

(1. 南京交通职业技术学院, 江苏 南京 211188; 2. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对当前钢筋混凝土梁抗弯加固性能评估法未考虑不同建筑结构的抗灾差异, 所求得的各项承载力参数不够客观, 从而造成评估结果与实际检测结果差异大, 评估精度低的问题, 提出基于分灾模式的钢筋混凝土梁抗弯加固性能评估方法。计算梁底初始拉应变、梁正截面极限抗弯承载力和钢筋混凝土梁正截面荷载挠度, 然后设计分灾模式的钢筋混凝土梁抗弯加固, 通过分析载荷与压应变、载荷与挠度以及剪力与位移变化, 得到钢筋混凝土梁抗弯加固后各项承载力参数, 输入各项梁承载力参数到 ANSYS 通用程序, 利用该程序结合钢筋混凝土梁抗弯加固性能进行评估。通过进行仿真实验, 结果表明加入分灾元件的钢筋混凝土梁抗弯加固性能有明显提高。将本文方法评估结果与实验实际评估结果对比可知, 提出的评估方法与实际检测结果基本一致, 评估精度准确性较高。

关键词: 分灾模式; 钢筋混凝土梁; 抗弯; 加固; 性能; 评估方法

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1147-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1147

An Evaluation Method of Flexural Strengthening Performance of Reinforced Concrete Beams Based on Damage-Reduction Mode

CHEN Jianbo¹, WAN Haiying²

(1. Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, Jiangsu, China;

2. Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: The current method of evaluating the flexural strengthening performance of reinforced concrete beams does not consider the difference in the disaster resistance of different buildings; thus, the bearing capacity parameters obtained are not objective enough, and as a result, the evaluation results are different from the actual test results and the evaluation accuracy is low. Considering the above, a method based on damage-reduction mode is proposed for evaluating the flexural strengthening performance of reinforced concrete beams. The initial tensile strain at the bot-

收稿日期: 2018-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509065); 2018年度江苏省高等学校自然科学研究面上项目(18KJB560010); 江苏高校“青蓝工程”资助项目(2019-2022)

第一作者简介: 陈剑波(1979-), 男, 广西玉林人, 硕士, 副教授, 研究方向: 建筑结构设计、建筑施工。E-mail: 416632082@qq.com。

通信作者: 完海鹰(1960-), 男(满族), 安徽合肥人, 硕士, 教授, 研究方向: 混凝土结构、钢结构研究与设计。

tom of the beam, the ultimate bending capacity of the normal section of the beam, and the load deflection of the normal section of the reinforced concrete beam are calculated, and the flexural strengthening of the reinforced concrete beam is simulated based on the damage-reduction mode. Then the parameters of the bearing capacity of reinforced concrete beams after flexural strengthening are obtained and inputted to general program ANSYS; then, the flexural strengthening performance of reinforced concrete beams is evaluated using the program. The simulation results show that the flexural strengthening performance of reinforced concrete beams with damage-reduction elements is significantly improved. Moreover, the evaluation results of this method are basically consistent with the actual evaluation results from experiment, and the evaluation accuracy is high.

Keywords: damage-reduction mode; reinforced concrete beam; bending resistance; reinforcement; performance; evaluation method

0 引言

近年来地震等灾害频发,将避灾技术应用到建筑设计中,逐渐成为相关研究学者的关注热点^[1]。钢筋混凝土梁受到地震灾害等冲击荷载作用后,会严重影响其承载能力及耐久性,采取一些可靠方法对其进行抗弯加固处理,不仅可以提高梁的强度,使建筑物更加安全,还可以提高梁的耐久性与刚度,增加建筑物稳定性以及增加建筑物抗灾能力^[2]。对钢筋混凝土梁进行抗弯加固可以避免建筑物重建造成的人力、财力以及物力损失^[3]。目前在钢筋混凝土梁抗弯加固方面已具有相关研究成果^[4]。但是对于不同建筑物,需要结合建筑物的具体情况选择最优抗弯加固方法,因此研究一种有效的抗弯加固性能评估方法具有重要意义^[5]。在钢筋混凝土梁结构体系中加入分灾元件,提高结构分灾性能,既不会破坏钢筋混凝土梁结构主要功能,又可在地震等灾害下发挥分灾作用,确保整体建筑系统的正常使用^[6]。

本文设计一种基于分灾模式的钢筋混凝土梁抗弯加固方法,利用该方法对钢筋混凝土梁进行抗弯加固,不仅经济效益强、施工简单,而且抗弯加固后可维持建筑原有使用功能,再通过 ANSYS 通用程序对该方法的性能进行评估,验证了分灾模式,提高了钢筋混凝土梁抗弯加固效果。

1 分灾模式的钢筋混凝土梁抗弯加固性能评估

分灾模式的基本思路是:在已有结构之外加设分灾单元,将其作为结构抗震的第一道防线,在正常使用阶段,新增设的分灾单元基本上不参与原结构的正常工作,当遭遇小于设防烈度的“小震”时,分灾单元就会分担一部分的地震剪力,与原有结构共同抵抗地震作用,这样就达到了“小震不坏”设防目标;当

遭遇大于设防烈度的“大震”作用时,分灾单元将首先出现大量的塑性铰(在框架结构中主要出现在分灾构件的梁端和柱端),消耗掉一部分的地震能量,随着分灾单元大量塑性铰的出现甚至分灾构件的破坏,整体结构的动力特性也将改变,一般是刚度减小,周期增大,则结构的地震反应就会减小,这样就实现了保护原有结构、提高整个结构抗震性能的目标,也就达到了“大震不倒”的目的。基于分灾模式的抗震加固示意图如图 1 所示。

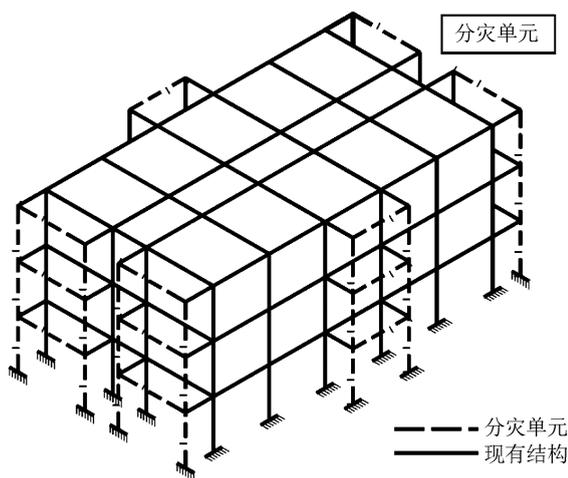


图 1 基于分灾模式的抗震加固示意图

Fig.1 Schematic diagram of seismic reinforcement based on disaster-reduction mode

1.1 分灾模式的钢筋混凝土梁承载力计算

1.1.1 计算梁底初始拉应变

假设分灾模式的钢筋混凝土梁抗弯加固后符合平截面设定^[7-8]。计算加固后钢筋混凝土梁底初始拉应变时,假设梁底受拉钢筋未达到屈服程度,利用三角形分布算法计算梁底初始拉应变,依据《混凝土结构规范》计算分灾模式的钢筋混凝土梁底正截面极限抗弯承载力与钢筋应力应变关系^[9-10]。

分灾模式抗弯加固后梁底的极限荷载依据梁底初始拉应变评价,计算钢筋混凝土梁抗弯加固梁底初始拉应变,通过梁截面受压高度和截面惯性矩联合求得;采用单一材料的换算截面代替梁未开裂时的钢筋混凝土截面计算^[11]。截面受压区高度公式如下:

$$z_0 = \frac{bh^2 + 2(\alpha_E - 1)(A_s h_0 + A'_s a'_s)}{2bh + 2(\alpha_E - 1)(A_s + A'_s)} \quad (1)$$

式中: b 表示钢筋混凝土梁宽; h 表示钢筋混凝土梁高; h_0 表示钢筋混凝土理论梁高; z_0 表示受压区理论高度; a'_s 表示受压钢筋合力作用点与受压边缘间距; A_s 表示受拉钢筋截面面积; A'_s 表示受压钢筋截面面积; α_E 表示分灾系数。

截面惯性矩公式如下:

$$I_0 = \frac{1}{3}bz_0^3 + \frac{1}{3}b(h - z_0)^3 + (\alpha_E - 1)A_s(h - z_0)^2 + (\alpha_E - 1)A'_s(z_0 - a'_s)^2 \quad (2)$$

式中: I_0 表示分灾模式钢筋混凝土梁截面惯性矩。

根据式(1)和式(2)计算钢筋混凝土梁抗弯加固梁底初始拉应变,公式如下:

$$\epsilon_i = \frac{W(h - z_0)}{0.85E_c I_0} \quad (3)$$

式中: W 表示加入荷载情况下生成的弯矩; E_c 表示混凝土弹性模量; ϵ_i 表示初始拉应变。

1.1.2 计算梁正截面极限抗弯承载力

由于分灾模式下,分灾单元会承担一部分的地震剪力,则在不同应变范围内,整理结构的受力状态不同,分灾模式的钢筋混凝土梁中混凝土合力计算公式如下:

$$C = k_1 f_c b z_0 = \begin{cases} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \frac{\epsilon_c^2}{3\epsilon_0^2} \right) f_c b z_0 & 0 < \epsilon_c < \epsilon_0 \\ \left(1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_c} \right) f_c b z_0 & \epsilon_0 < \epsilon_c < \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ϵ_0 表示混凝土峰值应力相对应应变,依据《混凝土结构规范》选择相应数值; ϵ_c 表示受压边混凝土压应变; ϵ_{cu} 表示受压区混凝土边缘到达极限压应变时应变; k_1 为常数系数; f_c 为受压区混凝土边缘到达极限压应力,此时应变混凝土合力作用点与受压区边缘间距 y_c 公式如下:

$$y_c = \begin{cases} \frac{4\epsilon_0 - \epsilon_c}{12\epsilon_0 - 4\epsilon_c} z_0 & 0 < \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ 1 - \frac{3 - \frac{\epsilon_0^2}{2\epsilon_c^2}}{6 - 2\frac{\epsilon_0}{\epsilon_c}} z_0 & \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (5)$$

依据《混凝土结构规范》中合力作用点位置相同可得公式如下:

$$\gamma_1 = \begin{cases} \frac{4\epsilon_0 - \epsilon_c}{6\epsilon_0 - 2\epsilon_c} & 0 < \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ 2 - \frac{\frac{\epsilon_0^2}{\epsilon_c^2}}{6 - 2\frac{\epsilon_0}{\epsilon_c}} & \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (6)$$

式中: γ_1 为不同受压区混凝土压应变率。

依据《混凝土结构规范》中合力大小相同可得公式如下:

$$\alpha_1 = \frac{\gamma_1}{k_1} \quad (7)$$

式中: α_1 为单位长度受压区混凝土的压应变率; k_1 为受灾区长度。

通过以上计算获取不同受压区混凝土压应变的 α_1 与 γ_1 。当钢筋混凝土梁抗弯加固后水平方向平衡时,梁正截面极限抗弯承载力为:

$$C + \sigma'_s A'_s = f_y A_s + f_{tu} A_f \quad (8)$$

式中: f_y 表示钢筋屈服强度; f_{tu} 表示分灾强度; σ'_s 表示受压钢筋应力; A_f 表示抗弯加固强度。以此计算梁正截面极限抗弯承载力。

1.1.3 计算钢筋混凝土梁正截面荷载挠度

假设分灾模式钢筋混凝土梁外荷载为 M ,钢筋混凝土相应界限挠度用 σ_{cr} 、 σ_y 、 σ_c 及 σ_{cu} 表示,则梁外荷载为 M 时荷载挠度计算公式为:

$$\sigma_{cr} = \frac{M}{M_{cr}} \quad (0 \leq M \leq M_{cr}) \quad (9)$$

$$\sigma_y = \sigma_{cr} + \frac{M - M_{cr}}{M_y - M_{cr}} (\sigma_y - \sigma_{cr}) \quad (M_{cr} \leq M \leq M_y) \quad (10)$$

$$\sigma_c = \sigma_y + \frac{M - M_y}{M_c - M_y} (\sigma_c - \sigma_y) \quad (M_y \leq M \leq M_{cr}) \quad (11)$$

$$\sigma_{cu} = \sigma_c + \frac{M - M_c}{M_{cu} - M_c} (\sigma_{cu} - \sigma_c) \quad (M_c \leq M \leq M_{cu}) \quad (12)$$

式中: M_{cr} 表示开裂弯矩; M_y 表示构件受力钢筋屈服时梁的弯矩; M_c 表示受压区混凝土边缘到达极限压应力时梁的弯矩; M_{cu} 表示受压区混凝土边缘到达极限压应变时梁的弯矩;

1.2 基于分灾模式的钢筋混凝土梁抗弯加固设计

采用分灾模式实现钢筋混凝土梁抗弯加固设计过程中,通过在原有结构周围施加由分灾构件、分灾子结构以及分灾构造措施等组成的分灾元件,由分

灾元件及原有结构构成抗弯加固的分灾模式钢筋混凝土梁。基于分灾模式的抗弯加固设计见图 2。

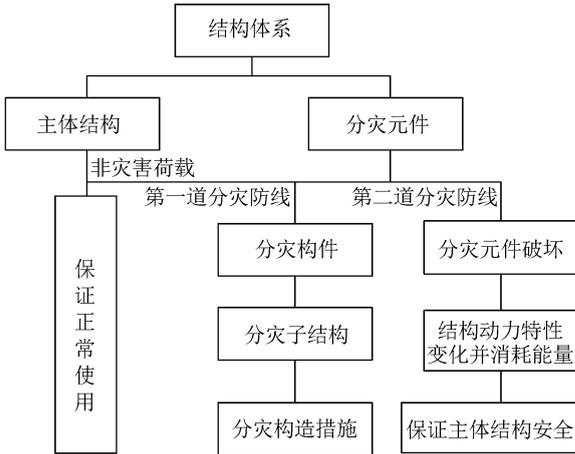


图 2 基于分灾模式的抗弯加固设计图

Fig.2 Design of flexural reinforcement based on disaster-reduction mode

从图 2 可以看出,整个抗弯加固结构主要包括主体结构与分灾元件两部分,主体结构可有效满足梁正常使用功能;分灾元件在受到破坏时不会影响整体结构的使用并且可快速修复。分灾元件主要由第一道分灾防线和第二道分灾防线组成。分灾子结构组成分灾构件,在地震发生时采取相应的分灾构造措施。分灾元件可分担地震等灾害带来的冲击,结构动力特性发生变化并消耗一定的能量,使在灾害中原有结构免受或少受破坏,进而达到保护整体建筑结构的目的。

1.3 分灾模式的钢筋混凝土梁抗弯加固性能评估

考虑到混凝土梁具有开裂、压碎、塑性等复杂力学行为,三维情况下无法有效分析混凝土梁抗弯加固后的力学特性^[12]。因此利用 ANSYS 通用程序对分灾模式的钢筋混凝土梁抗弯加固性能进行评估^[13]。设置钢筋混凝土梁长为 3.4 m,截面尺寸为 300 mm×150 mm(高×宽),采用 C30 混凝土,梁的钢筋保护层厚度为 30 mm,纵筋采用 HRB335 级热轧钢筋,箍筋为 HRB235。钢筋混凝土梁结构的有限元模型如图 3~图 4 所示。

对钢筋混凝土梁进行材料非线性分析过程实质为,模拟分灾模式抗弯加固构件从加载到极限荷载至构件破坏的极限承载力分析过程^[14]。将上小节获取的承载力参数输入 ANSYS 通用程序后,通过该程序估算与试算后,整个加载过程如下:

- (1) 由初始构件加载至出现裂缝;
- (2) 由构件出现裂缝加载至钢筋屈服;

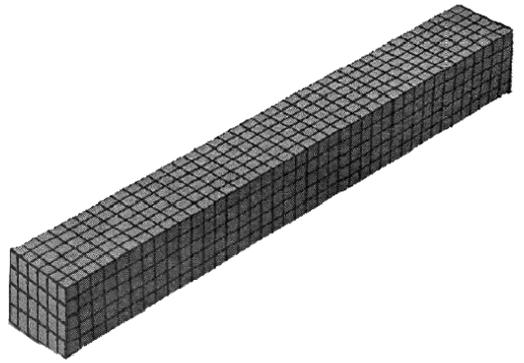


图 3 普通钢筋混凝土结构的三维有限元模型

Fig.3 Three-dimensional finite element model of the general reinforced concrete structure

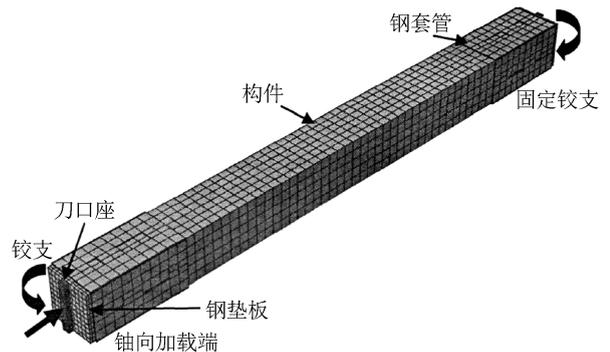


图 4 基于分灾模式的钢筋混凝土结构三维有限元模型

Fig.4 Three-dimensional finite element model of reinforced concrete structure based on disaster-reduction mode

- (3) 由钢筋屈服加载至构件出现大范围裂缝;
- (4) 由构件出现大范围裂缝加载至构件破坏。

ANSYS 通用程序中四个阶段的载荷步长设定列于表 1。

表 1 四个阶段的载荷步长设定

Table 1 Load step setting in four stages

钢筋混凝土梁受力状态	荷载步长/kg	
	最小值	最大值
由初始构件加载至出现裂缝	600	3 000
由构件出现裂缝加载至钢筋屈服	2	50
由钢筋屈服加载至构件出现大范围裂缝	1	4
由构件出现大范围裂缝加载至构件破坏	0.5	2

由以下两种情况判断整体结构是否到达极限状态:

(1) ANSYS 通用程序计算过程中分灾元件最大拉应力到达极限抗拉强度,则说明分灾元件已经受损,整体钢筋混凝土梁已经被破坏。

(2) ANSYS 通用程序计算过程中荷载步长减少至 0.5 kg 时,ANSYS 通用程序无法继续收敛时,

说明钢筋混凝土梁已经形成塑性变形,到达极限状态整体受到破坏,则评估程序结束。

2 实验分析

为测试本文基于分灾模式的钢筋混凝土梁抗弯加固性能评估方法的准确性,在某高校实验室浇筑混凝土强度等级为 C30 的基于抗灾模式钢筋混凝土梁 6 根,室内养护,龄期 30 天。同批浇筑的试验梁留取立方体试块、棱柱体试块和钢筋,测定留取样本的屈服强度与极限强度。混凝土与钢筋力学性能列于表 2 与表 3。

表 2 混凝土力学性能

Table 2 Mechanical properties of concrete

混凝土等级	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
C30	60.7	34.9

表 3 钢筋力学性能

Table 3 Mechanical properties of reinforcement bars

直径 D/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
7	251	387	202
10	306	517	204
20	412	628	203

设定其中一根梁为对照梁,用 L0 表示。剩余五根梁加构分灾元件,分别为 L1, L2, L3, L4, L5。并将以上实验参数输入 ANSYS 通用程序进行实验对比。

实验过程中放置压力传感器在加力架与分配梁间,利用分配梁加入集中荷载,于实验梁中左端的三分之一处。挠度采用电子百分表测量,各测试点应变利用数字式静态应变仪测量。

在 5 根梁中分别加入与原框架横向抗侧刚度比值为 2~4 间、承载力比值为 1~2 间的分灾元件。分灾元件具体尺寸列于表 4,分灾元件配筋和承载力参数列于表 5。

2.1 载荷与压应变分析

实验实际评估对照梁 L0 的载荷与压应变关系如图 5 所示,采用分灾模式抗弯加固钢筋混凝土梁 L3 的载荷与压应变关系如图 6 所示。

分析图 5 可知,对照梁 L0 受到载荷力越大,钢筋混凝土的压应变值越大,当其发生的压应变值最大值 2×10^{-3} 时,受到载荷力为 26 t 左右。

表 4 分灾元件具体尺寸及数量

Table 4 Specific dimensions and quantities of disaster-reduction components

柱截面尺寸 / (mm×mm)	纵筋	纵筋数量	箍筋
580×580	Φ16	8	Φ8@100/200

表 5 分灾元件配筋和承载力

Table 5 Reinforcement and bearing capacity of disaster-reduction components

梁号	截面尺寸 / (mm×mm)	钢筋面积 /mm ²	承载力 /kN	与原结构承载力比值
L1	380×750	800	169.2	1.67
L2	380×750	700	148.3	1.66
L3	350×700	600	116.4	1.23
L4	350×700	550	94.83	1.22
L5	350×650	350	52.91	1.18

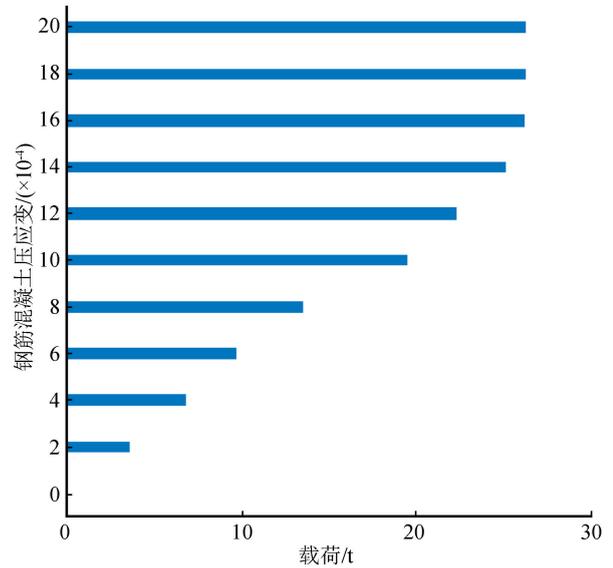


图 5 对照梁 L0 混凝土荷载与压应变关系

Fig.5 Relationship between load and compressive strain of contrast beam L0

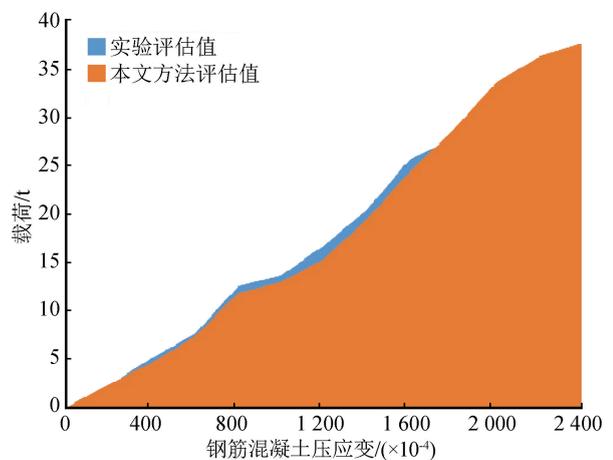


图 6 分灾模式下梁 L3 混凝土荷载与压应变关系

Fig.6 Relationship between load and compressive strain of beam L3 under disaster-reduction mode

分析图 6 可知,采用本文方法评估 L3 混凝土荷载与压应变结果与实验实际评估结果基本一致,且在 L3 梁发生压应变值为 2×10^{-3} 时,实际受到载

荷力为 32.3 t,说明采用分灾模式的钢筋混凝土梁的载荷力有所提高。

2.2 载荷与挠度分析

钢筋混凝土梁的挠度可用于表示梁的屈服度,受到载荷越大时其挠度就越大,屈服度就越大,因此评估钢筋混凝土梁的挠度也是评价钢筋混凝土梁抗弯加固性能的重要指标。图 7 和图 8 分别为受灾前后 L3 梁的载荷与挠度变化结果。

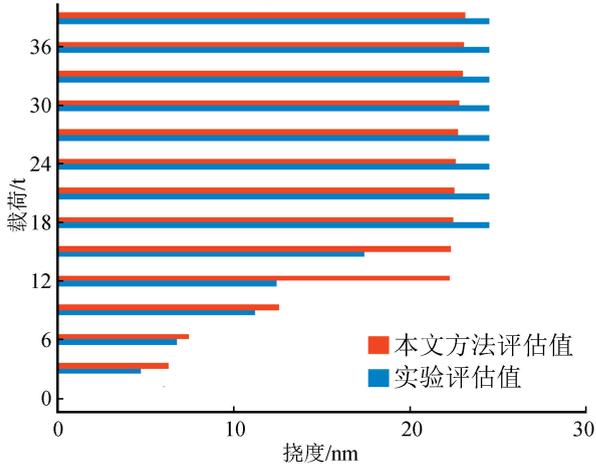


图 7 未受灾时 L3 梁的荷载与挠度曲线

Fig.7 Load and deflection curves of beam L3 without disaster

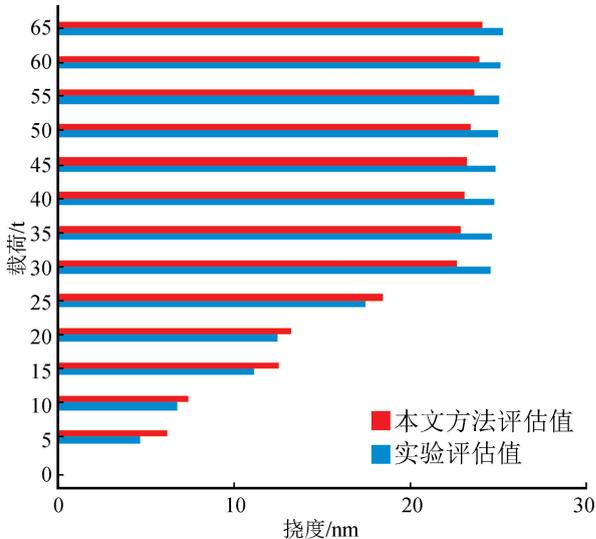


图 8 受灾时 L3 梁的荷载与挠度曲线

Fig.8 Load and deflection curves of beam L3 under disaster

从图 7 可以看出,当钢筋混凝土梁未受灾时,本文方法分析 L3 梁载荷与挠度结果与实验实际得到的结果基本相同,仅在载荷为 15 t 和 12 t 时相差较大。

分析图 8 可以看出,当钢筋混凝土梁受到灾害时,采用分灾元件的 L3 梁载荷力有所提升。图中显示采用本文方法评估的载荷挠度曲线与实验评估值基本一致,且对比图 7 和图 8 可知,分灾模式提高了 L3 梁的承载力。本文方法用于评估钢筋混凝土梁受到灾害时的评估精度更高,也验证了加入分灾单元后,基于分灾模式的钢筋混凝土梁结构具有更佳的抗震性能。

2.3 剪力与位移变化分析

钢筋混凝土梁底部剪力的不同对钢筋混凝土梁位移变化影响不同,实验比较本文方法评估和实际评估,加入分灾元件后五根钢筋混凝土梁底部剪力与位移变化。由于实验篇幅的限制,实验仅对 L1、L2 和 L3 的剪力与位移变化情况做出具体分析,结果分别如图 9~图 11 所示,且为表现分灾元件对钢筋混凝土梁抗弯加固效果,将对照梁 L0 的实验评估结果作为实验参照。

从图 9 可以看出,本文方法评估钢筋混凝土梁抗弯加固性与实验实际评估结果较为接近,均评估得到梁底部剪力与位移变化成正比关系,且比较实验实际对 L1 梁和对照梁 L0 的分析结果可知,L1 梁含有分灾元件相对对照梁 L0 的底部剪力较高一些,说明采用分灾模式加固钢筋混凝土梁能提升抗弯加固性能。

同样从图 10 可以看出,本文方法评价 L2 梁的位移变化与底部剪力结果与实验评价结果几乎一致,说明本文方法评估钢筋混凝土梁的抗弯加固性良好。同样可知采用分灾元件的 L2 梁和对照 L0

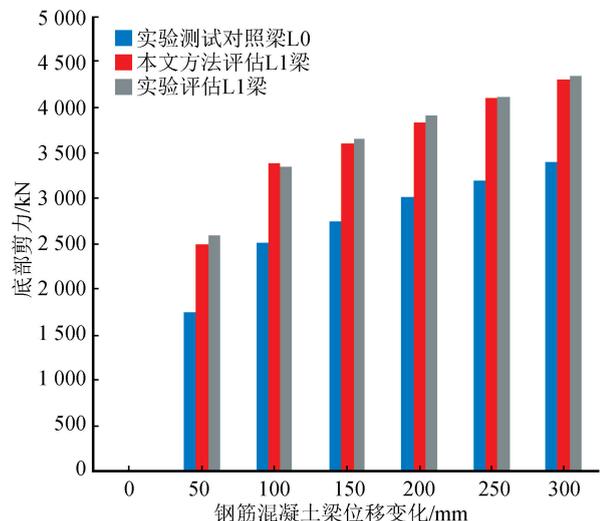


图 9 分灾模式下梁 L1 与对照梁 L0 对比图

Fig.9 Comparison of beam L1 and contrast beam L0 under disaster-reduction mode

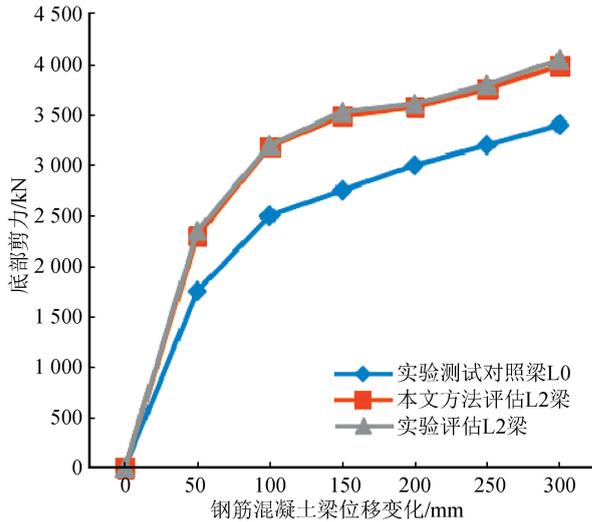


图 10 分灾模式下梁 L2 与对照梁 L0 对比图

Fig.10 Comparison of beam L2 and contrast beam L0 under disaster-reduction mode

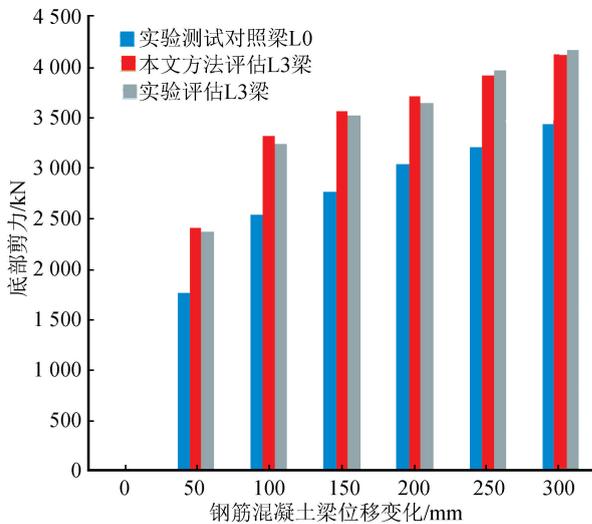


图 11 分灾模式下梁 L3 与对照梁 L0 对比图

Fig.11 Comparison of beam L3 and contrast beam L0 under disaster-reduction mode

梁在变化位移相同时, L2 梁相较 L0 的底部剪力较高, 说明加入分灾元件的分灾模式钢筋混凝土梁可提高抗弯加固性能。

从图 11 可清楚观察到, 本文方法和实验实际评估 L3 梁的底部剪力随位移变化结果相似, 表明本文方法在用于评估分灾模式下钢筋混凝土梁抗弯加固性上精度较高。

综合以上实验结果可知, 本文方法评估钢筋混凝土梁抗弯加固性能与实际操作得到结果基本一致, 且将本文方法用于受灾后的评估效果要优于受灾前, 说明本文方法可用于恶劣环境下, 且评估精度

较高。

3 结论

分灾模式目前被广泛应用在各类工程中, 大量实际工程表明采用分灾模式对建筑物进行抗弯加固是完全可行的。本文设计一种基于分灾模式的钢筋混凝土梁抗弯加固方法, 利用该方法对钢筋混凝土梁抗弯加固, 不仅经济效益强、施工简单, 而且抗弯加固后可维持建筑原有使用功能, 通过 ANSYS 通用程序对分灾模式下钢筋混凝土梁抗弯加固性能进行评估。实验结果表明, 加入分灾元件的钢筋混凝土梁抗弯加固性能有明显提高, 应用本文方法对钢筋混凝土梁进行抗弯加固性能评估与实验实际评估结果基本一致, 验证了本文评估方法的评估准确性, 说明了该评估方法可用在实际的钢筋混凝土梁抗弯加固性能评估, 为实际工程保证高施工质量提供良好依据。

参考文献 (References)

- [1] 刘乐, 秦子鹏, 李刚, 等. BFRP 加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(2): 53-58, 66.
LIU Yue, QIN Zipeng, LI Gang, et al. Experimental Study on Bending Resistance Properties of RC Beams Strengthened with BFRP[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(2): 53-58, 66.
- [2] 周淑春, 吕恒林, 吴元周, 等. CFRP 加固中(重)度劣化钢筋混凝土梁抗弯性能[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 62-69.
ZHOU Shuchun, LÜ Henglin, WU Yuanzhou, et al. Flexural Behavior of Middle(Serious) Deteriorated RC Beams Strengthened with CFRP[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(1): 62-69.
- [3] 李赛野, 李磊. 一种 ECC 加固 SRAM 空间可靠性评估算法[J]. 微电子学, 2016, 46(2): 267-272.
LI Saiye, LI Lei. An Evaluation Algorithm for ECC Strengthened SRAM Spatial Stability [J]. Microelectronics, 2016, 46(2): 267-272.
- [4] 许颀, 黄靓. FFRP 加固钢筋混凝土梁的受弯性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3): 104-109.
XU Qi, HUANG Liang. Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FFRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(3): 104-109.
- [5] 吕文龙, 许勇, 沈朝勇, 等. 钢丝网复合砂浆加固受火后钢筋混凝土框架梁的抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(6): 169-176.
LÜ Wenlong, XU Yong, SHEN Chaoyong, et al. Seismic Behavior of RC Frame Beams after Fire Strengthened with Ferrocement[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, 37(6): 169-176.
- [6] 褚少辉, 赵士永, 赵存宝. 基于 ANSYS 的玄武岩纤维布加固混

- 凝土梁有限元分析[J].工程抗震与加固改造,2017,39(3):125-130,90.
- CHU Shaohui,ZHAO Shiyong,ZHAO Cunbao.Finite Element Analysis of Concrete Beam with Externally Bonded BFRP Sheets Based on ANSYS[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2017,39(3):125-130,90.
- [7] 胡克旭,侯梦君,高皖扬.不同保护措施下 CFRP 加固混凝土梁耐火性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(6):138-144.
- HU Kexu,HOU Mengjun,GAO Wanyang.Experimental Study on Fire Performance of CFRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams with Different Protection Schemes[J].Journal of Harbin Institute of Technology,2018,50(6):138-144.
- [8] 徐玉野,郑顺盈,董毓利,等.薄壁 U 形钢板加固受火后钢筋混凝土梁受力性能研究[J].建筑结构学报,2017,38(3):58-66.
- XU Yuye,ZHENG Shunying,DONG Yuli, et al.Mechanical Performance of Reinforced Concrete Beams after Fire and Strengthened with Thin-Walled U-Shaped Steel Plate[J].Journal of Building Structures,2017,38(3):58-66.
- [9] 曹芙波,尹润平,王晨霞.复合加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验[J].重庆大学学报(自然科学版),2017,40(7):9-18.
- CAO Fubo,YIN Runping,WANG Chenxia.Experiments on the Bending Performance of Composite Reinforced Concrete Beam[J].Journal of Chongqing University(Natural Science Edition),2017,40(7):9-18.
- [10] 曹芙波,尹润平,王晨霞.复合加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验[J].重庆大学学报(自然科学版),2017,40(7):9-18.
- CAO Fubo,YIN Runping,WANG Chenxia.Experiments on the Bending Performance of Composite Reinforced Concrete Beam[J].Journal of Chongqing University (Natural Science Edition),2017,40(7):9-18.
- [11] 张晶晶,窦远明,张硕.不同加固方式对钢筋混凝土梁抗弯性能的影响[J].硅酸盐通报,2017,36(12):4014-4019.
- ZHANG Jingjing,DOU Yuanming,ZHANG Shuo.Effect of Different Reinforcement Methods on the Bending Performance of Reinforced Concrete Beams[J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2017,36(12):4014-4019.
- [12] 韩之江,郭文龙,刘志华,等.预加力对预应力混凝土梁抗弯刚度影响试验[J].中国公路学报,2016,29(7):103-109.
- HAN Zhijiang,GUO Wenlong,LIU Zhihua, et al.Experiment on Effect of Pre-Tension on Flexural Stiffness of Prestressed Concrete Beam[J].China Journal of Highway and Transport,2016,29(7):103-109.
- [13] 柴少峰,王平,王峻,等.钢筋混凝土构件修复加固与抗震性能比较[J].地震工程学报,2013,35(4):872-876.
- CHAI Shaofeng,WANG Ping,WANG Jun, et al.Repairing and Strengthening of Reinforced Concrete Members and Study of Its Seismic Performance[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(4):872-876.
- [14] 裘哲俊,李俊华,池玉宇,等.常温及火灾后型钢混凝土梁柱节点加固试验研究[J].建筑结构,2017,47(9):33-39.
- QIU Zhejun,LI Junhua,CHI Yuyu, et al.Experimental Study on Performance of SRC Beam-Column Joints Strengthened by CFRP under Normal Temperature and after Exposure to Fire[J].Building Structure,2017,47(9):33-39.