

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201611071



# 预压比对预应力钢绞线-聚合物砂浆 加固 RC 板受弯性能的影响

张世江<sup>1</sup>, 陈海<sup>1</sup>, 刘阳<sup>1,2</sup>, 叶勇<sup>1,2</sup>, 柴振岭<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 建立预应力钢绞线-聚合物砂浆加固钢筋混凝土(RC)板的有限元分析模型,并采用已有的试验数据对模型的准确性进行验证.利用有限元模型研究不同工况、预压比,以及预应力度对加固板受弯性能的影响.分析结果表明:采用生死单元可较好模拟混凝土板的二次受力效应;在二次受力条件下,预应力钢绞线可达到与一次受力相近的加固效果;当预压比较小( $\leq 0.1$ )时,由于混凝土损伤较小,试件变形属于弹性变形,可按一次受力情况考虑,当预压比较大( $\geq 0.1$ )时,由于混凝土损伤较大,试件进入塑性,需考虑二次受力的影响.

**关键词:** 预应力钢绞线; 钢筋混凝土板; 受弯加固; 数值模拟; 生死单元

中图分类号: TU 378

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2018)02-0186-06

## Study on Preloading Ratio on Flexural Behavior of RC Slabs Strengthened With Prestressed Strand and Polymer Mortar

ZHANG Shijiang<sup>1</sup>, CHEN Hai<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1,2</sup>,  
YE Yong<sup>1,2</sup>, CHAI Zhenling<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** A finite element (FE) model for reinforced concrete (RC) slabs strengthened with prestressed strand and polymer mortar is established. The FE model is validated by available test results. The validated FE model is then used to study the influence of different load conditions, preloading ratios and prestress degree on the flexural behavior of the strengthened RC slabs. The FE analysis indicates: the birth and death of element can simulate effectively the influence of secondary load. Under the condition of secondary load, the reinforcement of prestressed strand is similar to that under the condition of primary load. When the preloading ratio is less than 0.1, the specimen deforms elastically due to the minor damage in the concrete, and the secondary load effect can be neglected. When preloading ratio is greater than 0.1, plastic deformation occurs in the specimen due to considerable damage in the concrete, and the secondary load effect should be taken into account.

收稿日期: 2017-11-20

通信作者: 刘阳(1982-),男,副教授,博士,主要从事工程结构抗震减灾的研究. E-mail:lyliuyang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378228, 51578254, 51308236);福建省自然科学基金资助项目(2015J01212, 2014J05061);福建省泉州市科技计划项目(2015Z142)

**Keywords:** prestressed strand; reinforced concrete slabs; flexural strengthening; numerical simulation; birth and death of element

钢绞线-聚合物砂浆加固混凝土板具有加固层薄、施工简便快捷和加固效果良好等优点,在既有建筑结构的加固中得到广泛的研究与应用<sup>[1-3]</sup>. 聂建国等<sup>[4]</sup>将高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆用于受弯构件加固,研究加固构件的受弯承载力、刚度和裂缝分布. 吴刚等<sup>[5]</sup>采用 P-SWR 加固技术对混凝土梁进行预应力高强钢丝绳受弯加固试验. 文献[6-7]对预应力钢绞线加固钢筋混凝土板、梁的受弯性能进行试验研究. 张盼吉<sup>[8]</sup>对钢绞线加固钢筋混凝土板的受弯性能进行试验研究. 郭俊平等<sup>[9]</sup>采用不同预应力水平的预应力高强钢绞线网对钢筋混凝土板进行了加固试验. 文献[10-11]针对现有钢绞线网片-聚合物砂浆加固工艺存在的锚固问题,提出改进的端部锚固措施. 但是,目前关于对二次受力工况下预应力钢绞线-聚合物砂浆加固钢筋混凝土梁的研究还较少、尚不深入. 因此,本文采用有限元程序 ABAQUS 建立预应力钢绞线-聚合物砂浆加固钢筋混凝土板的有限元分析模型,采用生死单元模拟实际工程中钢筋混凝土板的二次受力效应,研究不同预压比及预应力度对预应力钢绞线-聚合物砂浆加固钢筋混凝土板受弯性能的影响.

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 模型概况

加固板的尺寸和配筋,如图 1 所示. 模型截面尺寸(宽度×厚度)为 1 000 mm×100 mm,跨度为 3 200 mm(净跨 3 000 mm). 受拉纵筋为 10 $\phi$ 10,屈服强度 335 MPa,极限强度 380 MPa,弹性模量 200 GPa. 分布钢筋为 $\phi$ 6@250,各试件的配筋均相同. 钢绞线直径为 4 mm,弹性模量为 155 GPa,屈服强度为 1.32 GPa,极限抗拉强度为 1.86 GPa. 混凝土设计强度等级为 C30,弹性模量为 30 GPa. 聚合物砂浆强度等级 C40,弹性模量为 23 GPa. 每块板用 9 根钢绞线加固,聚合物砂浆层厚 20 mm.

### 1.2 模型建立

建立的有限元模型与接触对设置,如图 2 所示. 钢筋与钢绞线采用空间二节点线性桁架单元(T3D2)模拟,混凝土与砂浆采用 8 节点线性 6 面体减缩积分单元(C3D8R)模拟. 砂浆厚度方向的网格尺寸为 5 mm,角钢肢宽的网格尺寸为 10 mm,混凝土板、钢绞线、角钢长度方向及砂浆长度方向的网格尺寸为 50 mm.

图 2 中:接触 1 为混凝土板与砂浆的接触;接触 2 为钢绞线与砂浆的接触;接触 3 为锚固钢板与钢绞线、混凝土板的接触. 锚固钢板与混凝土板、钢绞线之间设定为绑定接触,以模拟实际中的强锚固作用. 试验中,由于钢绞线滑移产生的破坏较少,钢绞线充分发挥其极限抗拉强度,故钢绞线与砂浆之间采用绑定接触. 通过降温法模拟钢绞线上施加的预应力.

### 1.3 材料本构模型

钢筋与钢绞线的本构关系采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[12]</sup>中的简化关系,如图 3 所示. 钢筋采用理想弹塑性模型,钢绞线采用双斜线模型. 混凝土的本构关系采用适用于 ABAQUS 有限元的混凝土受压与受拉应力-应变关系<sup>[13]</sup>,如图 4 所示. 图 3、4 中: $\sigma_u$  为峰值应力; $\sigma_{ys}$ 、 $\sigma_{yc}$  分别为钢绞线和碳素钢屈服应力; $\sigma_e$ 、 $\epsilon_e$  分别为弹性极限应力和应变; $\sigma_t$ 、 $\epsilon_t$  分别为受拉屈服应力和应变; $\epsilon_y$  为屈服应变; $\epsilon_u$  为峰值应变. 采用塑性损伤模型,模拟混凝土在受力时,由于累积变形而引起结构内部损伤发展<sup>[14]</sup>. 砂浆与混凝土具有相似的力学性能<sup>[15-16]</sup>,砂浆的本构关系

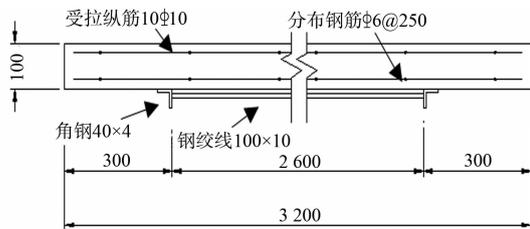


图 1 加固板截面尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions and reinforcement details of strengthened RC slab (unit: mm)

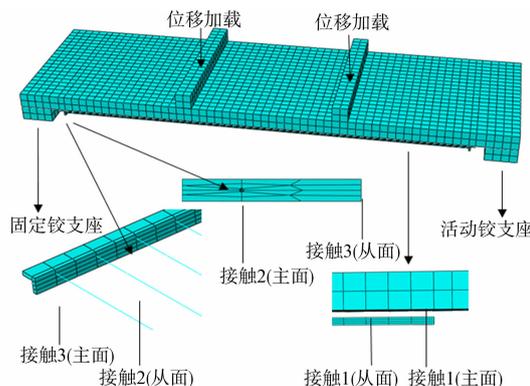


图 2 有限元模型与接触对设置

Fig. 2 FEM model and contact pairs

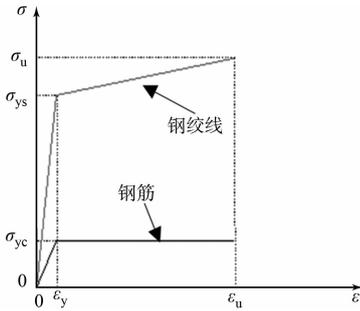


图3 钢筋与钢绞线的应力-应变关系曲线  
Fig. 3 Curves of stress-strain relationships of steel bar and strand

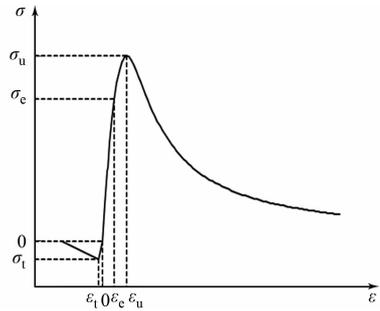


图4 混凝土应力-应变关系曲线  
Fig. 4 Curves of stress-strain relationships of concrete

采用同等强度的混凝土应力-应变关系. 文中采用损伤塑性模型以模拟砂浆的塑性损伤.

1.4 模型参数

参考已有的研究,定义工况为试件加固时钢筋混凝土板的受力状况, I类板为一次受力加固板,即直接加固的试件; II类板为二次受力加固板,即先预加载,保持荷载不变进行加固后,再加载的试件<sup>[4]</sup>.

预应力度  $\alpha^{[9]}$  为  $\alpha = f_w / f_u$ . 其中:  $f_w$  为施加的预应力的大小;  $f_u$  为钢绞线极限抗拉强度. 预压比  $\lambda$  为  $\lambda = \Delta_c / \Delta_u$ . 其中:  $\Delta_c$  为钢筋混凝土板预压跨中位移;  $\Delta_u$  为达到承载力极限时跨中位移.

各模型的主要参数,如表1所示.

表1 模型主要参数

1.5 边界条件及加载制度

对于预应力钢绞线-聚合物砂浆加固钢筋混凝土板构件,采用两端支座铰接,三等分点除竖向外,约束其他方向的自由度. 采用位移控制模式进行加载. 加载阶段分为试件预加载、预应力施加和试件加载阶段.

Tab. 1 Parameters of finite element models

模型编号	工况	$\alpha$ /MPa	$\lambda$
RCPS-0	对比板	—	—
RCPS-1	I类板	0	—
RCPS-2	I类板	0.25	—
RCPS-3	I类板	0.45	—
RCPS-4	I类板	0.65	—
RCPS-5	II类板	0	0.20
RCPS-6	II类板	0.25	0.20
RCPS-7	II类板	0.45	0.20
RCPS-8	II类板	0	0.10
RCPS-9	II类板	0	0.05

1.6 生死单元

通过 ABAQUS 程序中提供的生死单元技术,在初始分析步中,将模型中砂浆与钢绞线设为死单元,并在随后分析步中重新激活,以此模拟实际工程中钢筋混凝土板的持荷加固工况.

由于 ABAQUS 在激活加固单元时是在该单元的原始位置激活,与受力后混凝土板单元之间变形不协调,故需通过确定加固单元变形后的相应位置再予以激活. 文中通过设置轻质高强、完全弹性且具有追踪功能的备份单元,用以确定混凝土板在持荷时加固单元的位置.

2 有限元模型的验证

为验证模型的可靠性,通过已有试验结果<sup>[7-9]</sup>对提出的预应力钢绞线-聚合物砂浆加固混凝土板有限元模型进行验证,各试件的主要参数,如表2所示. 表2中:  $L$  为混凝土板长度;  $B$  为混凝土板宽度;  $H$  为混凝土板厚度;  $f_y$  为混凝土板纵筋屈服强度;  $f_{yh}$  为钢绞线极限强度;  $f_{ck}$  为混凝土抗压强度;  $P_{ue}$  为抗弯承载力试验值;  $P_{uc}$  为抗弯承载力计算值.

表2 试件主要参数及试验结果

Tab. 2 Test parameters and results

模型编号	$L$ /mm	$B$ /mm	$H$ /mm	$f_y$ /MPa	$f_{yh}$ /MPa	$f_{ck}$ /MPa	$P_{ue}$ /kN	$P_{uc}$ /kN	$P_{ue}/P_{uc}$	数据来源
RCS-4	3 200	500	100	326.8	1 850.0	42.27	44.33	44.56	1.005	文献[9]
B2	3 200	500	100	248.0	1 432.0	28.50	26.46	28.44	1.075	文献[8]
RCP-2	3 200	500	100	280.0	1 706.3	40.80	45.50	44.35	0.975	文献[7]

数值计算结果与试验结果对比,如图5所示. 图5中:  $P$  为荷载;  $\Delta$  为位移. 由图5可知:有限元计算得到的弯矩-跨中挠度曲线与试验结果吻合良好,表明模型具有较好的计算精度.

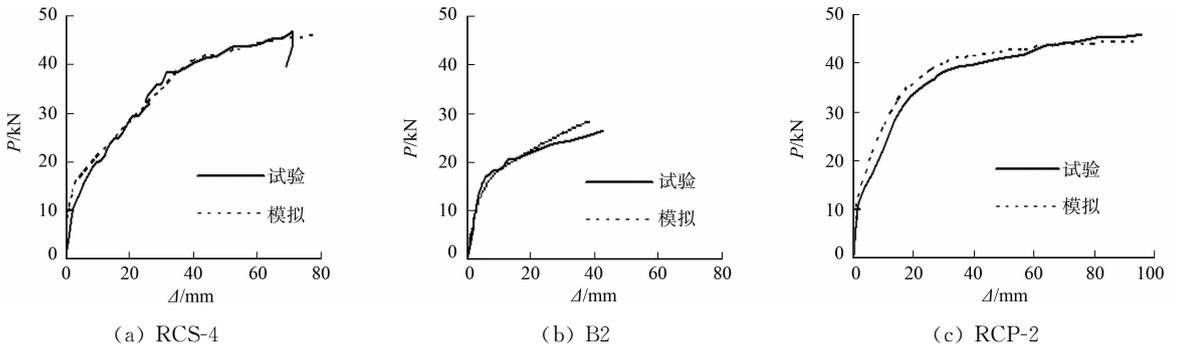


图 5 有限元计算结果与已有试验结果对比

Fig. 5 Comparison between FE and experimental results

文献[7]中加固板纯弯段的试验结果与有限元计算结果破坏形态的对比,如图 6 所示.由图 6 可知:试验与有限元模型的破坏形态相近,均在板跨中处发生变形.当实际工程中锚固质量不能保证时,可能出现砂浆层的剥离破坏,难以充分发挥钢绞线的抗拉强度.而模型中假设混凝土与砂浆层粘结良好,界面不发生破坏,这是由于文中模型并非研究混凝土与砂浆的界面粘结性能,故未定义界面的粘结破坏.

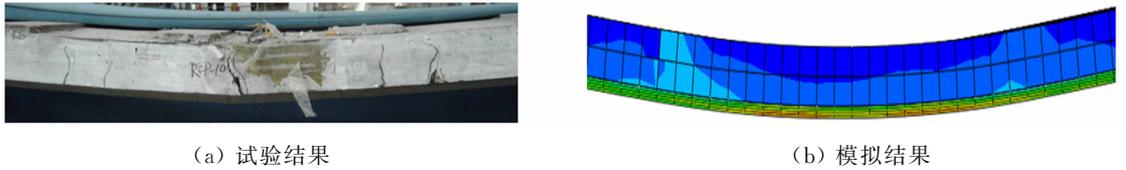


图 6 有限元模型与试验破坏形态对比

Fig. 6 Comparison of failure model between FE and experimental results

### 3 有限元计算结果及分析

屈服荷载定义为板纵筋开始屈服时的荷载,对应荷载-挠度曲线第二次转折的荷载值<sup>[8]</sup>,极限荷载按文献[12]规定确定,对应文中模拟为挠度达到跨度的 1/50 时的荷载值.

#### 3.1 不同工况的影响

记板的屈服荷载为  $P_y$ ,因未定义钢筋及钢绞线的破坏,模型承载力未降低,所以,极限荷载以挠度达到跨度的 1/50 时对应的荷载  $P_{1/50}$  表示.

不同工况下模型的屈服荷载-预应力度曲线,如图 7 所示.由图 7 可知:随着预应力度增大,持荷加固板的  $P_y$  逐渐接近直接加固板.直接加固板 RCPS-1,RCPS-2,RCPS-3 的  $P_y$  分别为 25.76,29.90,32.77 kN,相应采用生死单元的持荷加固板 RCPS-5,RCPS-6,RCPS-7 的  $P_y$  分别为 24.27,28.58,32.00 kN,承载力分别下降 5.78%,4.41%,2.35%.表明二次受力工况对钢筋混凝土板承载力具有一定的影响,预应力的施加可改善实际工程中二次受力的影响,且随着预应力度水平的提高,加固效果更明显.

#### 3.2 不同预应力度影响

不同预应力度时,试件的特征荷载,如表 3 所示.由表 3 可知:随着预应力度提高,试件的极限承载力逐渐提高,且提高幅度逐渐减小.这是由于对钢绞线施加预应力就相当于在梁的受拉区域产生了预压应力,梁底的混凝土受拉需要先抵消这部分压应力.然而,随着钢绞线逐渐达到极限抗拉强度,试件承载能力达到极限.

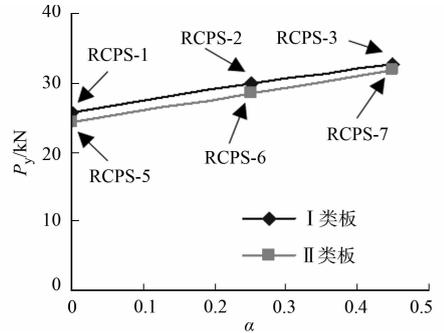


图 7 不同工况下的屈服荷载-预应力度曲线

Fig. 7 Curves of yield load-prestress degree under different loading model

表 3 模型特征荷载

Tab. 3 Characteristic load of slabs

模型编号	$P_y$ /kN	$P_{1/50}$ /kN
RCPS-0	17.04	18.10
RCPS-1	25.76	28.88
RCPS-2	29.90	32.81
RCPS-3	32.77	34.84
RCPS-4	34.42	35.66
RCPS-5	24.27	27.36
RCPS-6	28.58	31.66
RCPS-7	32.00	34.32
RCPS-8	29.20	32.27
RCPS-9	29.52	32.58

不同预应力度下,试件的荷载-跨中挠度曲线,如图8所示.由图8可知:同一荷载下,RCPS-1~RCPS-4的挠度明显小于对比板RCPS-0,且随着预应力的提高,板的挠度逐渐减小.RCPS-0的荷载-跨中挠度曲线第二次转折时,跨中挠度为32.22 mm,板中纵筋完全屈服.相同荷载下,RCPS-1~RCPS-4的跨中挠度分别为18.57,10.56,3.03,0.77 mm,可见,预应力钢绞线加固能显著提高梁的抗弯刚度.随着预应力水平的提高,板的屈服承载力及极限承载力显著提高.

预应力度对钢绞线-聚合物砂浆加固混凝土板的影响曲线,如图9所示.由图9可知:随着预应力度增加,预应力度对钢绞线-聚合物砂浆加固混凝土板的影响逐渐减小.与RCPS-1,RCPS-2,RCPS-3相比,RCPS-4的承载力提升分别为13.61%,20.64%,23.48%.可见,当预应力度小于0.45时,钢绞线-聚合物砂浆加固混凝土板的承载力随预应力度增大而增大;当预应力度超过0.45时,钢绞线-聚合物砂浆加固混凝土板的承载力基本保持不变,这主要是由于随着预应力度增大,钢绞线的抗拉强度逐渐发挥,试件承载力逐渐提高;当钢绞线的抗拉强度充分发挥时,试件承载力基本保持不变.

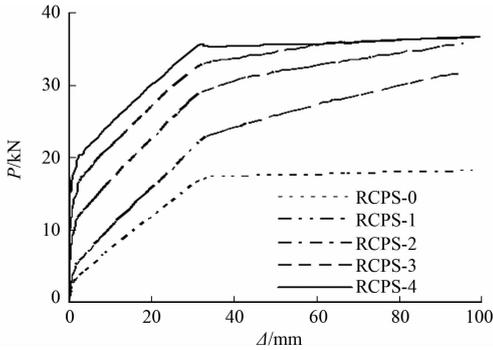


图8 不同预应力度下的荷载-跨中挠度曲线  
Fig. 8 Curves of load-midspan deflection under different prestress degrees

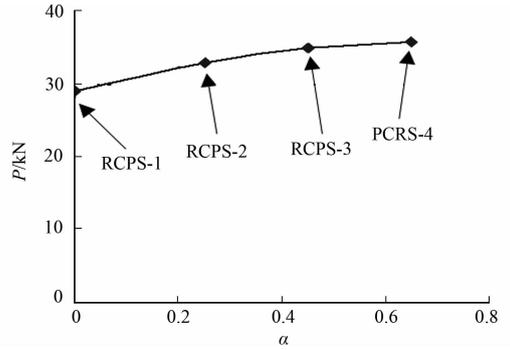


图9 预应力度影响曲线  
Fig. 9 Curves of effect of prestress degree

### 3.3 荷载-应力关系分析

不同预压比时,钢绞线的荷载-应力曲线,如图10所示.由图10可知:RCPS-3,RCPS-7在荷载最大时,钢绞线的应力为1.86 GPa,达到其极限抗拉强度,钢绞线的强度得以充分发挥,试件承载力达到极限,RCPS-7承载力接近RCPS-3.

### 3.4 不同预压比的影响

不同预压比下的荷载-跨中挠度曲线,如图11所示.由图11可知:RCPS-6,RCPS-7的初始刚度与RCPS-0基本相同,当加载位移达到10 mm时,RCPS-6,RCPS-7刚度与荷载迅速提高,并最终接近RCPS-2,RCPS-3.这是由于未加固时,试件RCPS-6,RCPS-7相当于未加固试件RCPS-0,随着钢绞线与砂浆单元的激活,钢绞线-聚合物砂浆参与试件受力.

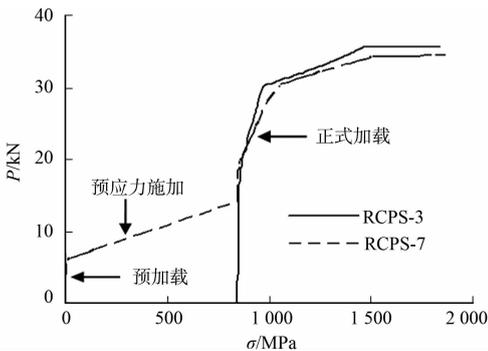


图10 钢绞线的荷载-应力曲线  
Fig. 10 Load-stress curves of strand

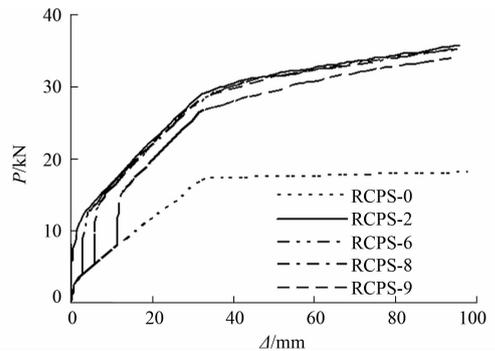


图11 不同预压比下的荷载-跨中挠度曲线  
Fig. 11 Load-midspan deflection curves under different preloading ratio

RCPS-9,RCPS-8,RCPS-6的极限承载力分别为32.58,32.27,31.66 kN,相比于RCPS-2分别降低了0.70%,1.64%,3.51%.可见,随着预压比的增大,试件的极限承载力逐渐降低.这是因为随着预压

比的增大,加固时混凝土的损伤也随之增大.同时,由于试件是在原位加固,达到极限承载力时钢绞线的变形减小,钢绞线强度的利用率降低.因此,试件的极限承载力逐渐降低.

当预压比低于0.1时,RCPS-8极限承载力降低0.73%;当预压比达到0.2时,RCPS-6极限承载力降低3.51%.这说明在预压比低于0.1时,预应力钢绞线也能达到一次受力相近的加固效果,结构受力可按照一次受力情况考虑;而当预压比高于0.1时,由于混凝土的损伤较大,需要考虑二次受力的影响.

## 4 结论

1) 采用生死单元技术,可有效地模拟预应力钢绞线-聚合物砂浆加固混凝土板的受弯性能.

2) 与直接加固板相比,持荷加固板的极限承载力有所降低,同一荷载下挠度增大.

3) 当预压比低于0.1时,预应力钢绞线加固板的承载力能接近直接加固板的承载力,结构受力可以按照一次受力情况考虑.但当预压比高于0.1时,由于承载力降低较大,需要考虑二次受力的影响.

4) 与未加固试件相比,采用预应力钢绞线-聚合物砂浆加固钢筋混凝土板的屈服承载力及极限承载力得到显著提高,同一荷载下,挠度降低.

## 参考文献:

- [1] 王亚勇,姚秋来,巩正光,等. 高强钢绞线网-聚合物砂浆在郑成功纪念馆加固工程中的应用[J]. 建筑结构,2005(8):41-42.
- [2] 姚秋来,王亚勇. 高强钢绞线网-聚合物砂浆复合面层加固技术应用:北京工人体育馆改建工程[J]. 工程质量,2007(3B):46-50.
- [3] 韩建平,陈军. 无黏结后张预制混凝土梁柱自复位节点基本力学特性分析[J]. 地震工程与工程振动,2013,33(6):47-52. DOI:10.13197/j. eeev. 2013. 06. 47. hanjp. 007.
- [4] 聂建国,王寒冰,张天申,等. 高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆抗弯加固的试验研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(2):1-9. DOI:10.3321/j. issn:1000-6869. 2005. 02. 001.
- [5] 吴刚,蒋剑彪,吴智深,等. 预应力高强钢丝绳抗弯加固钢筋混凝土梁的试验研究[J]. 土木工程学报,2007,40(12):17-27. DOI:10.3321/j. issn:1000-131x. 2007. 12. 003.
- [6] 聂建国,陶巍,张天申. 预应力高强不锈钢绞线网-高性能砂浆抗弯加固试验研究[J]. 土木工程学报,2007,40(8):1-7. DOI:10.3321/j. issn:1000-131x. 2007. 08. 001.
- [7] 周孙基. 高强不锈钢绞线-渗透性聚合灰浆加固钢筋混凝土板的研究[D]. 北京:清华大学,2004.
- [8] 张盼吉. 钢绞线加固钢筋混凝土板的试验研究[D]. 天津:河北工业大学,2006.
- [9] 郭俊平,邓宗才,林劲松,等. 预应力高强钢绞线网加固钢筋混凝土板的试验研究[J]. 土木工程学报,2012,45(5):84-92. DOI:10.15951/j. tmgcxb. 2012. 05. 022.
- [10] 林加惠. 钢绞线网片-聚合物砂浆加固RC梁受弯性能试验研究[D]. 厦门:华侨大学,2014.
- [11] 林加惠,郭子雄,黄群贤. 钢绞线张拉应力实用控制方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2014,35(6):707-710. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.06.0707.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [13] 黄华,刘伯权,刘卫铎. 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层粘结滑移[J]. 长安大学学报(自然科学版),2009,29(5):71-75.
- [14] 聂建国,王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学,2013,30(4):59-67.
- [15] LI Zhaoxia, HUANG Yaoping. Effect of strain rate on the compressive strength surface cracking and failure mode of mortar[J]. Materials Journal, 1998,95(5):512-518.
- [16] 常留红,陈建康. 单轴压缩下水泥砂浆本构关系的试验研究[J]. 水利学报,2007,38(2):217-220. DOI:10.3321/j. issn:0559-9350. 2007. 02. 014.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)