

DOI: 10.7672/sgjs2026080132

# 增大截面加固先张法预应力混凝土 空心板试验研究\*

王东妹<sup>1</sup>, 王佳伟<sup>2</sup>, 李万德<sup>3</sup>(1. 宁波市高等级公路建设管理中心, 浙江 宁波 315000; 2. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院,  
辽宁 沈阳 110870; 3. 辽宁省交通规划设计院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110166)

[摘要] 为研究增大截面加固法对先张法预应力混凝土空心板的加固效果, 选取4片某高速公路服役20年且技术状态相同的先张法预应力混凝土空心板, 对其中3片分别采用3种不同的增大截面加固法进行加固, 之后分别进行3分点单调静力加载试验, 对比分析未加固梁与加固梁的开裂荷载、极限承载力、破坏模式及刚度退化规律。结果表明: 对于未加固梁, 局部预应力失效段发生了斜截面受剪破坏, 采用增大截面加固法进行加固后的试件开裂荷载和极限承载力得到有效提高, 斜截面抗剪承载力不足问题得到改善, 加固梁最终均呈现正截面受弯破坏, 极限承载力较未加固梁分别提高40%、58%、60%。

[关键词] 预应力; 空心板; 加固; 破坏试验; 承载力; 刚度退化

[中图分类号] U445.7

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0132-07

## Experimental Study on Prestressed Concrete Hollow Slabs with Pretensioning Method by Increasing Section

WANG Dongmei<sup>1</sup>, WANG Jiawei<sup>2</sup>, LI Wande<sup>3</sup>

(1. Ningbo High-grade Highway Construction Management Center, Ningbo, Zhejiang 315000, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China;

3. Liaoning Provincial Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110166, China)

**Abstract:** To investigate the strengthening effect of the section-enlarging strengthening method on prestressed concrete hollow slabs with pretensioning method, four prestressed concrete hollow slabs with pretensioning method under identical technical condition, which had been in service on an expressway for 20 years, were selected. Three of them were strengthened using three different section-enlarging strengthening schemes respectively, and then three-point monotonic static loading tests were carried out separately. The cracking load, ultimate bearing capacity, failure mode and stiffness degradation law of the unstrengthened beams and the strengthened beams were compared and analyzed. The results show that the unstrengthened beams suffer from shear failure at the oblique section in the local prestress-deficient region. For the specimens strengthened by increasing section method, the cracking load and ultimate bearing capacity are effectively improved, and the insufficient shear capacity at the oblique section is remedied. All strengthened beams finally exhibited flexural failure at the normal section, with the ultimate bearing capacity increased by 40%, 58% and 60% respectively compared with the unstrengthened beams.

**Keywords:** prestress; hollow slabs; strengthening; destructive tests; bearing capacity; stiffness degradation

## 0 引言

混凝土空心板具有预制方便、工艺成熟等优点, 适用于中小跨径桥梁, 因此被广泛应用于公路桥梁建设中。随着桥梁荷载等级提高、重车作用频

\* 辽宁省交通科技项目(202437)

[作者简介] 王东妹, 高级工程师, E-mail: 315169210@qq.com

[通信作者] 王佳伟, 教授, 硕士生导师, E-mail: 18809859622@163.com

[收稿日期] 2025-11-23

繁等因素影响,大量服役空心板开始出现承载力不足问题。对于此类空心板,如直接进行拆除重建,成本高且周期长。如采用适当的加固技术对其进行加固,能在保证其服役期内安全的同时避免浪费。因此,关于混凝土空心板加固技术的研究开始引起广泛关注<sup>[1]</sup>。

目前对结构加固技术的研究大多以模型试验为主,包括缩尺模型试验和足尺模型试验。模型试验中,试件的设计参数与实际结构存在一定差异,难以准确模拟长期运营结构中材料退化、混凝土徐变、预应力损失、疲劳损伤等诸多问题<sup>[2-4]</sup>,因此有必要针对实桥梁板进行加固技术的试验验证。采用实桥梁板进行承载力验证及加固技术研究的试验机会较少,试验成本也相对较高,其中涉及实桥梁板构件的拆除、运输、试验环境建设、构件加固施工等多方面试验条件限制,因此国内外采用旧桥构件进行加固技术的研究尚不多见。

袁爱民等<sup>[5]</sup>利用高速公路拆下的2片20m跨径预应力混凝土空心板梁进行足尺模型破坏试验,归纳了腹板带纵向裂缝的预应力混凝土空心板受力性能的一般规律。季广军<sup>[6]</sup>利用旧桥拆除的16m跨径钢筋混凝土空心板进行了桥面铺装层植筋加固与体外预应力加固的试验研究,结果表明,体外预应力加固可显著提高结构抗弯刚度。李宏志等<sup>[7]</sup>利用服役10年的旧桥预应力混凝土空心板进行了碳纤维布抗弯加固研究,结构抗弯承载力提高45%。石书卿<sup>[8]</sup>对14m跨径预应力混凝土空心板进行了原梁破坏试验并进行了粘贴钢板、碳纤维板加固,加固梁较未加固梁承载力分别提高72.7%,60.6%。

本文选取某高速公路服役20年的同一座桥上的4片未开裂且技术状态相似的16m跨径预应力混凝土空心板为测试对象,在存梁现场建设反力架试验装置,针对服役预应力混凝土空心板进行极限承载力验证和增大截面加固技术试验研究,对比分析3种不同增大截面加固方法的效果。研究成果可

为该类桥梁极限承载力评定和类似桥梁加固技术的研究提供技术参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验梁参数

#### 1.1.1 未加固梁参数

未加固梁(B0)计算跨径为15.5m,板高为0.70m,斜交角为90°,采用C40混凝土,纵向普通钢筋采用HRB335级 $\phi 12$ 钢筋,箍筋采用R235级 $\phi 8$ 钢筋;预应力钢绞线采用 $\phi 15.24(7\phi 5)$ 高强、低松弛钢绞线,其标准抗拉强度为1860MPa,张拉控制应力为1395MPa。试验梁截面尺寸及配筋如图1所示。

#### 1.1.2 加固梁参数

为了研究不同增大截面加固方法的加固效果,本文采用3种增大截面加固方案对试件进行加固,各方案加固用混凝土设计强度等级均为C50,纵向钢筋和箍筋均为HRB335级 $\phi 12$ 钢筋。加固方案如下。

1)加固梁1(RB1)。对试验梁剪弯区的梁顶及梁侧增大混凝土加固区面积,凿除原梁纵筋处混凝土,新增箍筋两端勾住原梁纵筋与梁顶新增纵筋,采用本方案的加固梁属于适筋梁。试验梁尺寸及配筋如图2a所示。

2)加固梁2(RB2)。对试验梁剪弯区的梁顶、梁侧及梁底增大混凝土加固区面积,凿除原梁纵筋处混凝土,梁侧新增双肢箍筋与横向钢筋环向闭合,采用本方案的加固梁属于适筋梁。试验梁尺寸及配筋如图2b所示。

3)加固梁3(RB3)。对试验梁剪弯区梁顶开槽,在空心腔内绑扎箍筋、交叉筋和纵向钢筋后填充混凝土,采用本方案的加固梁属于适筋梁。试验梁尺寸及配筋如图2c所示。

### 1.2 试验加载及测量

由于本次试验的实桥预应力混凝土空心板试件尺寸较大,为避免运输造成不必要的试件损伤,直接在构件存放现场进行试验,试验荷载通过反力

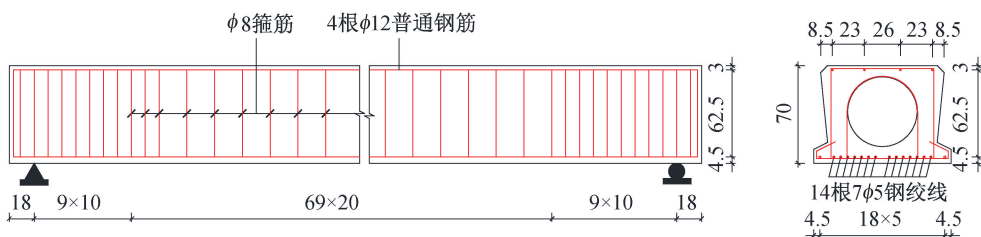


图1 未加固梁尺寸及配筋(单位:cm)

Fig. 1 Dimension and reinforcement of unstrengthened beam (unit: cm)

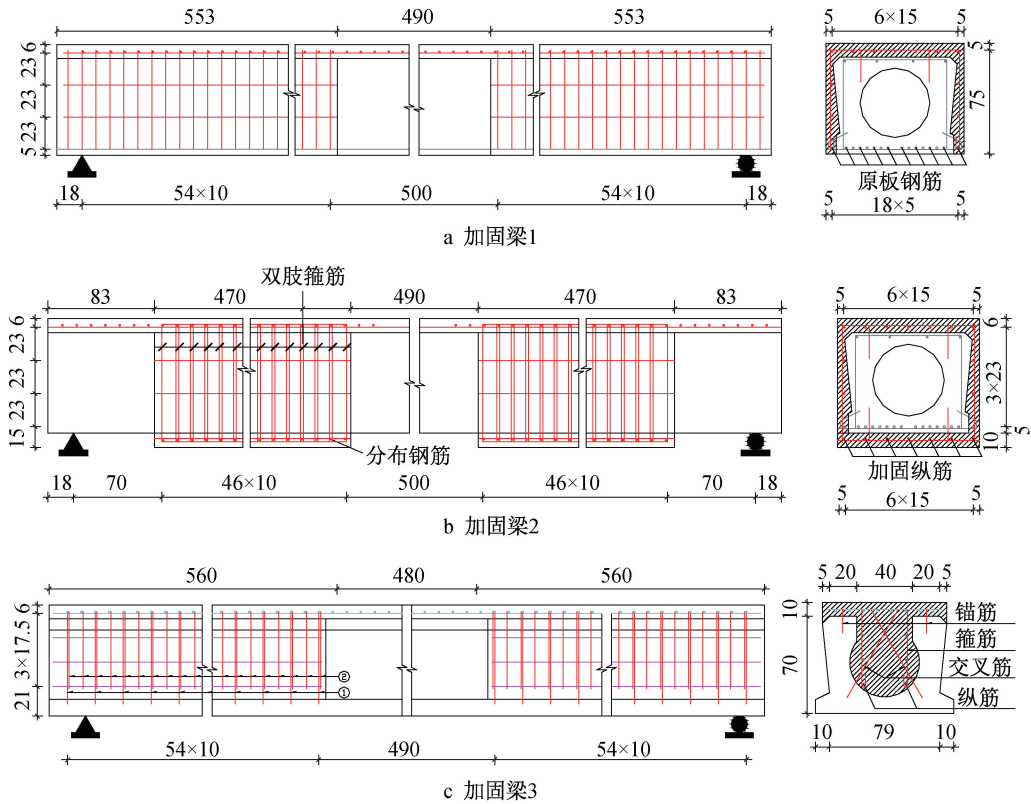


图2 加固梁RB1~RB3尺寸及配筋(单位:cm)

Fig. 2 Dimension and reinforcement of strengthened beams RB1~RB3 (unit: cm)

架和千斤顶进行施加,反力架安装在现浇混凝土刚性基础之上。试验梁加载位置及测点布置如图3所示,具体如下:①在结构支点、8分点、4分点、跨中共9处布设位移计,用于测量记录试验过程中试件的挠度变化;②在结构4分点、跨中共3处,沿截面高度布设应变计,用于测量混凝土应变随梁高变化;③在结构剪弯区域布置截面下缘、中性轴、上缘应变花测点。

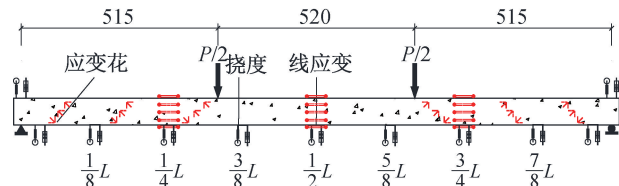


图3 试验梁加载位置及测点布置(单位:cm)

Fig. 3 Loading position and measuring points arrangement of test beam (unit: cm)

## 2 试验现象

### 2.1 未加固梁试验现象

未加固梁最终破坏状态如图4所示。试验过程中,未加固梁在加载至293.5kN时跨中附近出现第1条受弯裂缝,之后随着荷载不断增加,梁体在两加载点间受弯裂缝逐渐增多,加载至413.3kN时,梁端预应力钢绞线与混凝土间出现相对滑移,试验梁

出现预应力钢绞线黏结滑移破坏。继续加载至427.0kN时,梁体在剪弯区段开始出现垂直向上发展且长度较短的细微裂缝,随着荷载增大,剪弯区原垂直裂缝逐渐向加载点方向倾斜,形成弯剪裂缝。继续加载至559.0kN时,梁体腹部主斜裂缝形成,斜向长度为1.76m,最大裂缝宽度为2.00mm,根据GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》中对梁承载力的判断标准,可判定该梁已达到承载力极限状态。鉴于梁体完整,未产生明显破坏特征,继续对其进行加载。最终未加固梁加载至565.7kN时,结构发生破坏,梁体发生劈裂,斜裂缝中上部形成塑性铰区域,受压区混凝土开裂并被压碎,结构最终破坏形态为斜截面受剪破坏。先张法预应力混凝土空心板采用梁端预应力钢绞线进行失效处理可能导致其失效段区域发生黏结滑移破坏而引起结构发生受剪破坏,进而未能充分发挥结构抗弯承载能力<sup>[9]</sup>。

### 2.2 加固梁试验现象

加固梁最终破坏状态如图5所示。试验过程中,RB1, RB3外包混凝土在剪弯区最先出现由弯矩影响产生的垂直向上发展的细微受弯裂缝,随后当荷载分别加至392.0, 408.6, 402.1kN时, RB1~RB3跨中截面附近出现细微受弯裂缝。当加载至490,



图4 未加固梁破坏状态

Fig. 4 Failure mode of unstrengthened beam

651kN时, RB1, RB3梁端钢绞线与混凝土间出现相对滑移, 试验梁出现黏结破坏。RB1~RB3分别加载至792.1, 894.9, 907.3kN时, 跨中截面预应力钢绞线达到屈服强度, 跨中受压区混凝土达到极限应变, 在加载点处梁顶混凝土出现纵向水平裂缝, 随之混凝土被压碎, 最终破坏状态属于以弯矩作用为主的正截面受弯破坏。采用增大截面法加固增大了试验梁的抗剪承载力, 有效阻止斜裂缝发展; 同时, 增大了结构的抗弯刚度, 减小了梁体变形, 延缓了预应力钢绞线滑移出现时间, 可使结构有效发挥其抗弯承载能力。



a RB1



b RB2



c RB3

图5 加固梁RB1~RB3破坏状态

Fig. 5 Failure mode of strengthened beams RB1~RB3

### 3 试验数据分析

#### 3.1 荷载-挠度曲线分析

试验梁跨中荷载-挠度曲线如图6所示。可看

出, 加固梁挠度在全受力阶段明显小于未加固梁, 极限位移 $RB3 > RB2 > RB1 > B0$ , 加固梁开裂前刚度较未加固梁有较大程度提高, 开裂后结构进入非线性变形阶段, 加固梁挠度变化速率同样比未加固梁小, 即加固梁开裂后刚度也得到提升。B0与RB1~RB3混凝土截面开裂时跨中截面挠度分别为25.26, 25.75, 24.95, 21.70mm, 结构破坏时跨中挠度分别为156.82, 206.95, 227.00, 253.00mm, 加固梁与未加固梁相比表现出更好延性。

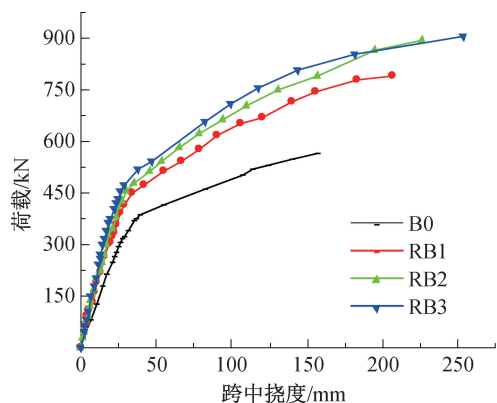


图6 试验梁跨中荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-deflection curves of test beams midspan

#### 3.2 荷载-应变曲线分析

B0各控制截面上、下缘混凝土应变测试结果如图7所示, 可看出, 其荷载-应变曲线在试验荷载为293.5kN时出现拐点, 混凝土应变增长速率随荷载增大而变快, 试验荷载下开裂时跨中混凝土下缘拉应变为 $319\mu\epsilon$ 。随着荷载增加, 结构开裂后至破坏阶段截面中性轴位置随之上移, 未加固梁最终破坏时跨中上缘压应变为 $1416\mu\epsilon$ 。

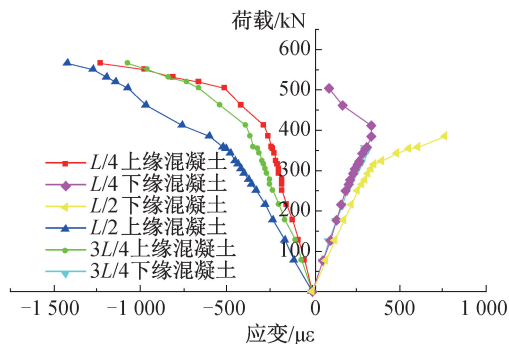


图7 试验梁B0荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curves of test beam B0

B0主斜裂缝处主应变测点数据如图8所示, 可看出, 其位于中性轴处应变测点8在加载至392.0kN时主拉应变急剧升高, 此时主斜裂缝处对应斜截面混凝土迅速开裂。

RB1各控制截面上、下缘混凝土应变测试结

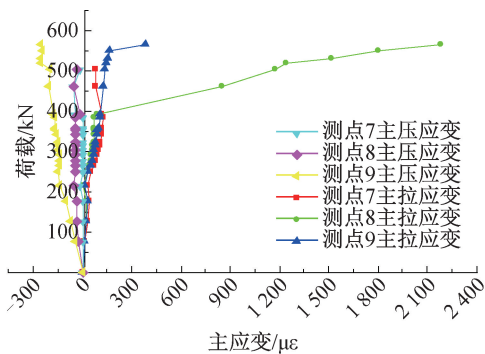


图8 试验梁 B0 荷载-主应变曲线

Fig. 8 Load-principal strain curves of test beam B0

果如图 9a 所示,可看出,其荷载-应变曲线在 392.0kN 时出现拐点,混凝土应变增长速率随荷载增大而变快,试验荷载下开裂时跨中混凝土下缘拉应变为  $399\mu\epsilon$ 。由于增大了混凝土截面,跨中截面中性轴位置较未加固梁升高约 10cm,随着荷载增加,结构开裂后至破坏阶段截面中性轴位置随荷载增大而上移,加固梁最终破坏时跨中上缘压应变为  $2\ 003\mu\epsilon$ 。

RB2 各控制截面上、下缘混凝土线应变测试结果如图 9b 所示,可看出,其荷载-应变曲线在 408.6kN 时出现拐点,混凝土应变增长速率随荷载增大而变快,试验荷载下开裂时跨中混凝土下缘拉应变为  $443\mu\epsilon$ 。由于增大了混凝土截面,跨中截面中性轴位置较未加固梁升高约 15cm,随着荷载增加,结构开裂后至破坏阶段截面中性轴位置随荷载增大而上移,加固梁最终破坏时跨中上缘压应变为  $2\ 308\mu\epsilon$ 。

RB3 各控制截面上、下缘混凝土线应变测试结果如图 9c 所示,可看出, RB3 荷载-应变曲线在 402.1kN 时出现拐点,混凝土应变增长速率随荷载增大而变快,试验荷载下开裂时跨中混凝土下缘拉应变为  $592\mu\epsilon$ 。由于增大了混凝土截面,跨中截面中性轴位置较未加固梁升高约 10cm,随着荷载增加,结构开裂后至破坏阶段截面中性轴位置随荷载增大而上移,加固梁最终破坏时跨中上缘压应变为  $1\ 977\mu\epsilon$ 。

RB1 应变花测点测试结果如图 10a 所示,可看出,其最大主拉应变出现在中性轴下方的测点 7 处,该测点沿梁纵向拉应变较大,主拉应变随荷载增大呈逐渐增大趋势,加载至 392kN 时开裂,梁体开裂后在 592.0kN 后增长速度加快。

RB2 应变花测点测试结果如图 10b 所示,可看出,其最大主拉应变出现在中性轴位置测点 8 处,在加载至 575kN 时开裂,开裂后在 621kN 后增长速度

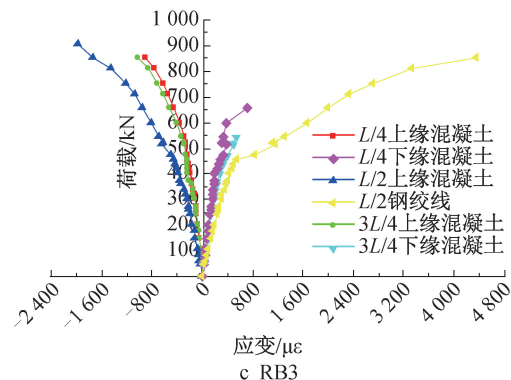
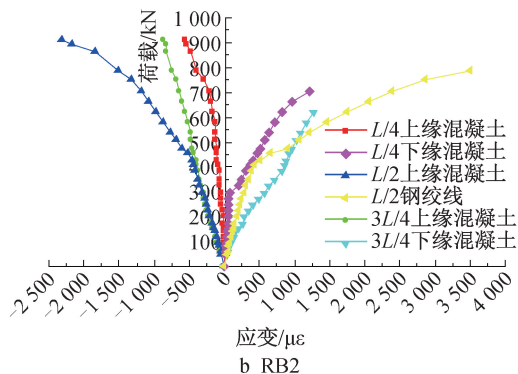
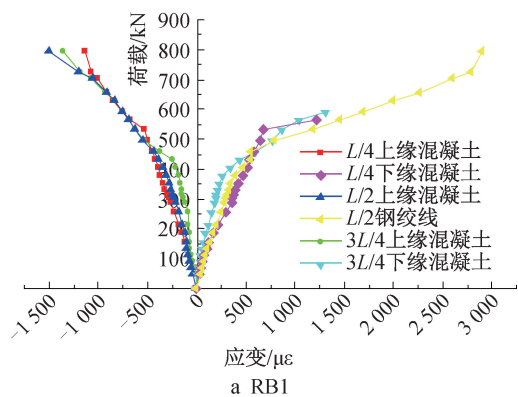


图9 试验梁 RB1~RB3 荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of test beams RB1~RB3

加快。

RB3 应变花测点测试结果如图 10c 所示,可看出,其最大主拉应变出现在中性轴位置测点 8 和中性轴上方测点 9 处,加载至 709.5kN 时梁体开裂,开裂后在 809.2kN 后增长速度加快。

### 3.3 刚度退化分析

为研究试验梁在加载过程中的刚度退化规律<sup>[10]</sup>,对结构挠度变化进行分析,将实测荷载-挠度关系进行多项式曲线拟合,如图 11 所示。结构开裂后进入非线性变形阶段,采用 5 次多项式进行曲线拟合,拟合度均为 99% 以上,近似认为多项式拟合曲线参数为结构非线性变形方程。

挠度变化率反映了结构的刚度退化程度,同等荷载条件下,挠度变化率越大,刚度退化越快。根

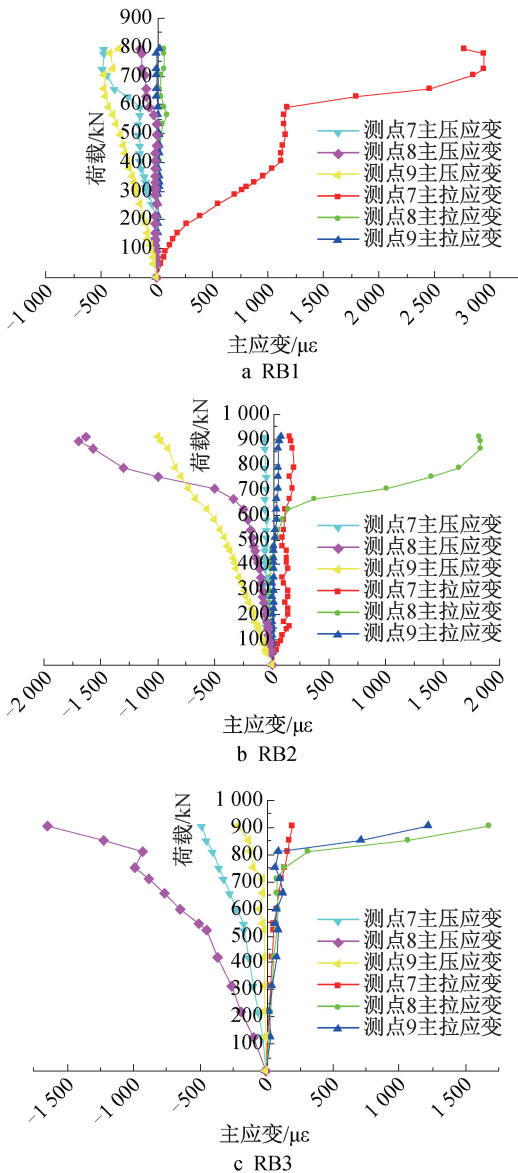


图 10 试验梁 RB1~RB3 荷载-主应变曲线

Fig. 10 Load-principal strain curves of test beams RB1~RB3

据拟合方程微分结果求得实测荷载-挠度变化率曲线(见图 12),根据图 12 中曲线规律可将未加固梁与加固梁抗弯刚度退化过程划分为 3 个阶段。

1) 阶段 I 为常函数变形阶段(OA 段),此阶段结构处于弹性工作状态,结构挠度变化率  $RB3 < RB2 < RB1 < B0$ ,相差不大。

2) 阶段 II 为未加固梁及加固梁开裂后纯弯段刚度退化阶段(AB 段),该阶段结构纯弯段裂缝发展较快,并逐渐趋于稳定。当纯弯段受弯裂缝趋于稳定时梁体内剪弯段抗弯刚度大于纯弯段,剪弯段较之前将承受更大内力分配比例,结构出现以剪弯段刚度退化为为主的过渡阶段 BC,由于结构剪弯段具有一定抵抗刚度退化的变形能力,因此过渡阶段的

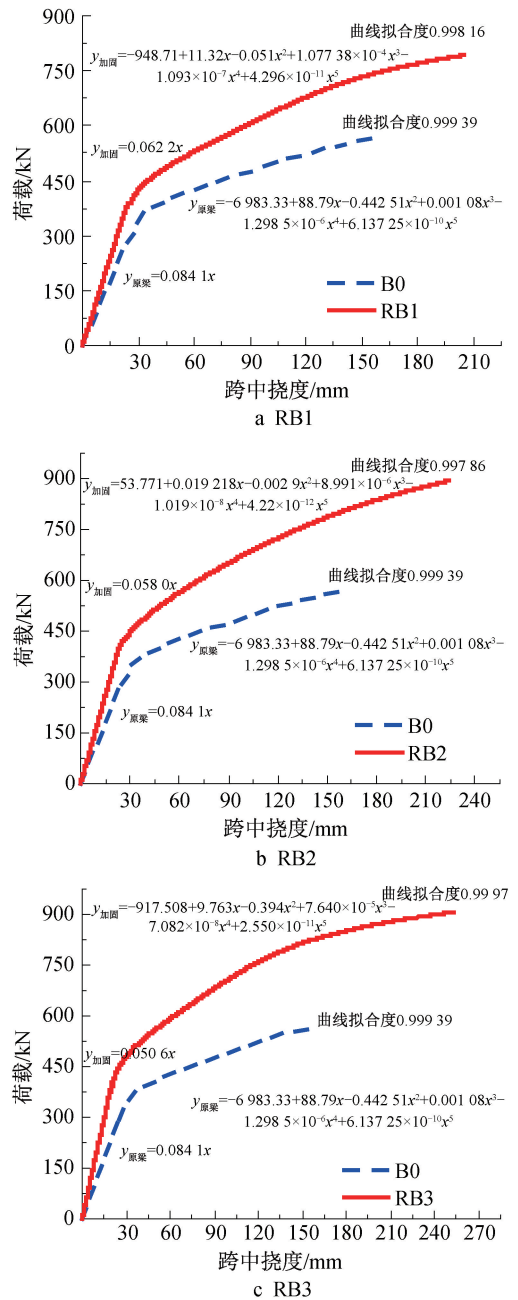


图 11 试验梁 RB1~RB3 荷载-挠度拟合曲线

Fig. 11 Load-deflection fitting curves of test beams RB1~RB3

挠度变化率相对稳定。RB1 与 RB3 进入 BC 段的荷载相近,但 RB3 的 C 点较 RB1 明显出现延迟,体现了 RB3 剪弯段更强的刚度维持能力。RB2 的抗弯刚度下降速度最慢,未出现明显的阶段 II 过程,较为平顺即过渡到阶段 III 直至结构破坏。

3) 在阶段 III(CD 段),结构剪弯段和纯弯段裂缝均有所发展,结构整体抗弯刚度在全梁段内开始退化,直至破坏。

如图 12 所示,阶段 II 中加固梁荷载变化幅度  $RB3 > RB2 > RB1 > B0$ ,而挠度变化率  $RB3 < RB2 < RB1 <$

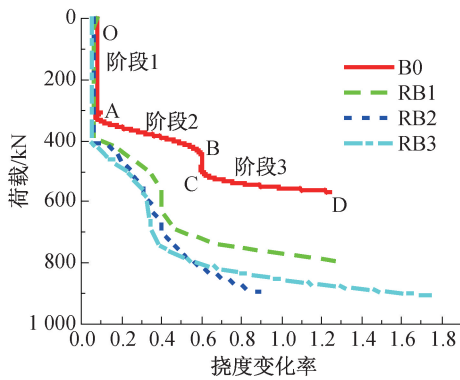


图 12 试验梁荷载-挠度变化率曲线

Fig. 12 Load-deflection change rate curves of test beams

B0,说明加固梁在阶段 II 提高了结构抵抗刚度退化的能力,减小挠度变化率并延迟了结构进入 C 点的荷载,提前发挥了部分剪弯段抵抗刚度退化的作用,从而提高了结构的极限承载力。结构进入阶段 III 后加固梁跨越荷载范围比未加固梁大。

#### 4 结语

1)对于类似旧桥先张法预应力混凝土空心板,采用预应力钢绞线失效处理的截面应重视斜截面抗剪承载力验算,并应增强预应力失效段处截面抗弯构造措施,避免结构发生脆性破坏。

2)采用增大截面加固方法解决了原结构斜截面抗剪承载力不足而提前出现结构脆性破坏的问题。采用增大截面法加固梁充分利用了原结构材料性能,发挥了结构的极限承载潜力,极限承载力提高幅度达 40%,58%,60%。

3)通过对荷载-挠度曲线进行高次多项式拟合得出曲线拟合度 99%的近似荷载-挠度曲线方程,通过对拟合方程求导研究了结构分 3 阶段的刚度变化规律,加固梁的主要作用在于结构进入裂缝发展稳定阶段前减小了刚度退化的速率并延长了结构进入刚度稳定阶段的荷载区间,从而提高了原结构的极限承载力。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 赵卫国,薛文.先张法预应力混凝土空心板梁纵向裂缝分析[J].公路,2006,51(10):52-53.  
ZHAO W G, XUE W. Analysis of longitudinal cracks in pretensioned prestressed concrete hollow slab beam [ J ]. Highway,2006,51(10):52-53.
- [ 2 ] 周宏宇,李振宝.钢筋混凝土梁抗弯性能尺寸效应试验研究[J].结构工程师,2012,28(6):113-116.

ZHOU H Y,LI Z B. Experimental study on the size effect on RC beam flexural behaviors[J]. Structural engineers,2012,28(6):113-116.

- [ 3 ] 沈明燕,钟新谷,刘学伟.混凝土箱梁腹板竖向预应力损失的模型试验研究[J].工程力学,2010,27(9):168-174.  
SHEN M Y,ZHONG X G,LIU X W. Experimental study on the loss of vertical prestress in the webs of concrete box girders[ J ]. Engineering mechanics,2010,27(9):168-174.
- [ 4 ] GRASSL P,GRÉGOIRE D,ROJAS SOLANO L,et al. Meso-scale modelling of the size effect on the fracture process zone of concrete[J]. International journal of solids and structures,2012,49(13):1818-1827.
- [ 5 ] 袁爱民,沙扬峰,何雨,等.腹板带纵向裂缝的预应力混凝土空心板梁剩余承载力试验研究[J].土木工程学报,2015,48(S1):22-28.  
YUAN A M,SHA Y F,HE Y,et al. Experimental studies on the ultimate flexural capacity for prestressed concrete hollow beams with longitudinal cracks in webs [ J ]. China civil engineering journal,2015,48(S1):22-28.
- [ 6 ] 李广军.桥面铺装层植筋加固与体外预应力加固空心板梁的试验研究[J].公路,2013,58(4):60-63.  
JI G J. Experimental study on strengthening hollow slab beam with planting reinforcement and external prestress on bridge deck pavement[ J ]. Highway,2013,58(4):60-63.
- [ 7 ] 李宏志,赵卓,周洪文,等.碳纤维布加固旧桥预应力混凝土空心板的破坏荷载试验研究[J].河南科学,2006,24(5):733-736.  
LI H Z,ZHAO Z,ZHOU H W,et al. Destructive test research of CFS reinforced pre-stressed concrete hollow slab [ J ]. Henan science,2006,24(5):733-736.
- [ 8 ] 石书卿.先张预应力混凝土空心板梁承载能力试验及维修对策研究[D].天津:天津大学,2013.  
SHI S Q. Experimental study on bearing capacity and maintenance countermeasures of pre-tensioned prestressed concrete hollow slab beams [ D ]. Tianjin: Tianjin University,2013.
- [ 9 ] 叶见曙.结构设计原理[M].5版.北京:人民交通出版社,2021.  
YE J S. Principles of structural design [ M ]. 5th ed. Beijing: China Communications Press,2021.
- [ 10 ] 邹毅松.预应力砼空心板抗弯刚度衰减规律的试验研究[C]//第八届全国结构工程学术会议论文集(第 II 卷),1999.  
ZHOU Y S. Experimental study on the degradation law of flexural stiffness of prestressed concrete hollow slabs [ C ]//Proceedings of the 8th National Symposium on Structural Engineering (Volume II),1999.