

文章编号:1673-2049(2012)03-0040-09

# 高强钢绞线网加固 RC 梁抗弯性能的数值分析

黄 华<sup>1,2</sup>, 刘伯权<sup>1</sup>, 贺拴海<sup>2</sup>, 吴 涛<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**以河北沧州某大桥加固工程为背景,在**高强不锈钢绞线网-渗透性聚合物砂浆**加固的 T 形钢筋混凝土梁抗弯试验研究基础上,采用有限元程序对其进行数值分析,研究混凝土强度、原梁纵筋配筋率、钢绞线用量、二次受力等因素对加固性能的影响。分析结果表明:加固构件屈服承载力、极限承载力和屈服挠度随混凝土强度、原梁纵筋配筋率、高强钢绞线用量的提高而有所增长,但极限挠度有所降低,构件延性变差;二次受力加固构件以首次受荷发生屈服为界限,未屈服构件受持载程度影响不大,而屈服构件随持载程度增大,力学性能得到较大提升;加固构件最终破坏的模式受纵筋配筋率、钢绞线用量、混凝土强度等因素的影响而有所区别。

**关键词:**高强钢绞线网;聚合物砂浆;抗弯性能;数值分析;RC 梁;混凝土强度

中图分类号:U445.72

文献标志码:A

## Numerical Analysis on Flexural Performance of Strengthened RC Beam with High Strength Stainless Steel Wire Mesh

HUANG Hua<sup>1,2</sup>, LIU Bo-quan<sup>1</sup>, HE Shuan-hai<sup>2</sup>, WU Tao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the tests conducted to investigate the flexural behavior of strengthened reinforced concrete (RC) T-beams with stainless steel wire mesh and permeability polymer mortar which took the reconstruction project of a bridge in Cangzhou, Hebei Province as the project background, the finite element program was used to analyze the flexural performance of strengthened T-beams. The influences of concrete strength, longitudinal reinforcement ratio, amount of stainless steel wire and secondary loads on the flexural performance were discussed. The analytical results show that with the increase of the concrete strength, longitudinal reinforcement ratio and amount of high strength stainless steel wire, yield capacity, ultimate capacity and yield deflection are improved, but the ultimate deflection decreases and the ductility of members wanes. The performance of the strengthened members under secondary load is bounded by which can yield under first load or not. If it could not yield before strengthening, the influence of the magnitude of the first load on the performance of the strengthened members is negligible, otherwise, the performance of the strengthened members is promoted greatly with the increase of the magnitude of the first load. The final failure modes of the strengthened members

收稿日期:2012-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51078037);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090205120008);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012JC026);陕西省自然科学基金研究计划项目(2012JQ7024);

中国博士后科学基金项目(2012M511956)

作者简介:黄 华(1979-),男,江苏常州人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:huanghua23247@163.com。

are affected by the longitudinal reinforcement ratio, the amount of stainless steel wire, concrete strength and so on.

**Key words:** high strength stainless steel wire mesh; polymer mortar; flexural performance; numerical analysis; RC beam; concrete strength

0 引 言

近年来,加筋高性能砂浆加固技术在各国得到了越来越广泛的应用,比较典型的有河北沧州东关大桥加固工程、北京三元桥主体加固工程、中国美术馆加固改造工程等。各国学者对采用该加固技术加固的钢筋混凝土矩形梁抗弯性能进行了试验研究<sup>[1-5]</sup>,而对于中小跨径的 T 形梁桥抗弯加固性能的研究较少。本文中笔者依据河北沧州东关大桥 20 m 跨 T 形梁桥的原桥设计及加固方案,采用截面缩尺比例 1 : 2、跨长 6.6 m 的大比例模型梁,进行抗弯加固试验研究<sup>[6-12]</sup>。由于试验费用高、试验中所考虑的影响参数较少等原因,试验数据相对缺乏。因此在以上抗弯加固试验研究基础上,利用通用有限元程序 ANSYS 建立模型,对影响加固梁抗弯性能的各参数进行数值分析,进一步研究加固构件工作时的力学性能。

1 抗弯加固 T 形梁试验

T 形梁加固试件参数见表 1,截面尺寸及配筋如图 1 所示。试件简支,跨中两点对称加载,纯弯段长度 2 m,加载方式为单调加载。其中对比梁直接加载至破坏;Ⅰ类加固梁首先进行加固,加固养护后进行破坏试验,直接加载至破坏;Ⅱ类加固梁首先加载到一定荷载水平,然后卸载进行加固,加固养护后进行破坏试验,直接加载至破坏。

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens					
试件编号	试件类型	混凝土强度/MPa	梁底纵筋型号	加固钢绞线型号	净跨/m
RCBF-1	Ⅱ类加固梁	40.13	12Φ14	4Φ3.2	6.1
RCBF-2	对比梁	40.13	12Φ14		6.1
RCBF-3	Ⅰ类加固梁	25.57	12Φ14	4Φ3.2	6.1
RCBF-4	Ⅱ类加固梁	37.73	12Φ14	4Φ3.2	6.1
RCBF-5	Ⅰ类加固梁	23.14	12Φ14	4Φ3.2	6.1

试验梁主要试验结果见表 2,其中, $M_c$  为开裂弯矩, $M_y$  为屈服弯矩,即钢筋混凝土梁拉区钢筋屈服时的弯矩实测值; $M_u$  为极限弯矩,即钢筋混凝土梁试验过程中所能测得的最大跨中弯矩; $\Delta_y$  为对应于  $M_y$  时的实测跨中挠度; $\Delta_u$  为对应于  $M_u$  时的

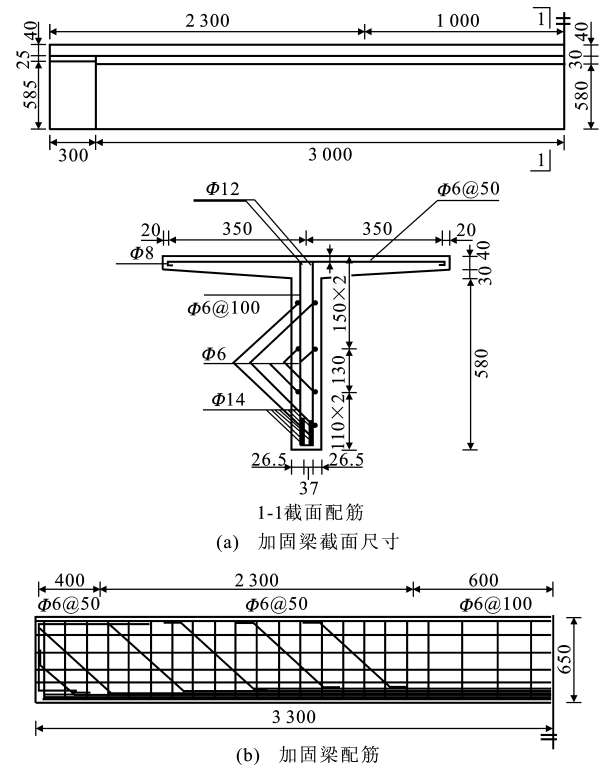


图 1 试验梁截面尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Section Sizes and Reinforcements of Test Beams (Unit:mm)

表 2 主要试验结果

Tab. 2 Main Test Results

试件编号	$M_c /$ (kN · m)	$M_y /$ (kN · m)	$M_u /$ (kN · m)	$\Delta_y /$ mm	$\Delta_u /$ mm	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$
RCBF-1		440.75	602.70	24.58	166.91	1.367	6.790
RCBF-2	30.75	430.50	584.25	23.48	175.28	1.357	7.460
RCBF-3	30.75	451.00	553.50	24.60	169.47	1.227	6.890
RCBF-4		420.25	603.72	21.35	199.87	1.436	9.360
RCBF-5	41.00	399.75	512.50	25.00	145.30	1.282	5.812

实测跨中挠度。T 形梁加固方案如图 2 所示。

2 抗弯加固 T 形梁试验模拟

2.1 有限元模型的建立

有限元模型中,混凝土选择 Solid65 单元、William-Warnke 五参数破坏准则、Mises 屈服准则、关联流动法则和多线性随动强化准则(MKIN),单轴抗压应力-应变曲线采用 Hongnestad 模型,混凝土裂缝采用弥散裂缝模式;钢筋及钢绞线选择 Link8

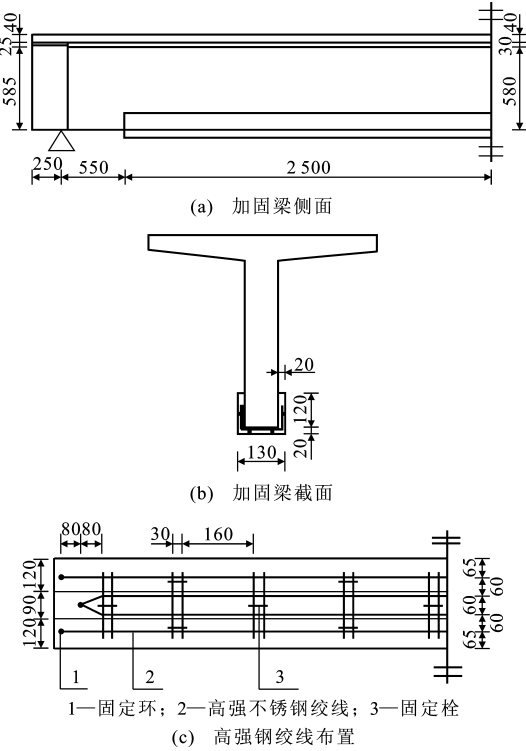


图 2 加固方案(单位:mm)

Fig. 2 Strengthening Schemes (Unit:mm)

单元、多线性随动强化准则(KINH)、Mises 屈服准则和关联流动法则;支座及垫板单元选择 Solid45 和双线性随动强化准则(BKIN)<sup>[13-14]</sup>。混凝土强度见表 1,泊松比为 0.2;钢筋及钢绞线强度见表 3,泊松比为 0.25。裂缝间剪力传递系数:闭合,0.75;张开,0.35。

表 3 钢筋及钢绞线强度

Tab. 3 Strength of Steel Bar and Stainless Steel Wire

研究对象	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
钢筋	14.0	385.57	583.68
	12.0	450.81	719.18
	8.0	548.28	574.27
	6.5	553.17	579.08
钢绞线	3.2		1 606.00

为缩短计算时间,节省计算费用,有限元分析采用 1/4 模型,为防止应力集中,在加载点以及支座处设置钢板,加载点钢筋加密,模型如图 3 所示,编号为 FEMF-J。图 3 中纵筋只有 3 根,而原梁中有 6 根,此处每根钢筋的截面面积为 2 根直径 14 mm 的截面面积之和,主要是为了避免纵筋受拉区有限元模型单元划分过细,造成在低应力状态下计算发散,板面分布钢筋也做了同样处理,且不考虑钢筋与混凝土之间的粘结滑移。由于此次 T 形梁抗弯加固试验中钢绞线拉断,没有发现明显的剥离破坏对整

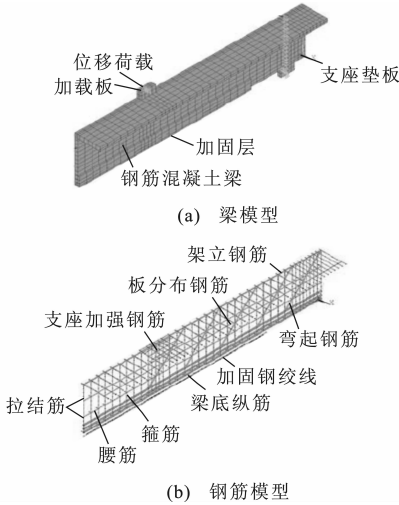


图 3 加固梁有限元模型(1/4 模型)

Fig. 3 Finite Element Models of Strengthened Beams (1/4 Model)

个梁起控制作用,故此处假设加固层粘结良好,不会发生局部剥离破坏。

2.2 抗弯加固试验数值分析结果

T 形梁抗弯加固数值分析结果见表 4。由表 4 可以看出,有限元计算结果与加固梁试验平均值吻合良好,除钢绞线拉断时挠度相差较大外,其他特征值的相对误差均在 5%以内,且除极限荷载外,相对误差均不大于 1%。

加固梁数值计算曲线与试验曲线对比见图 4。由图 4 可见,数值计算的弯矩-跨中挠度曲线、弯矩-拉区纵筋应变曲线、弯矩-钢绞线应变曲线与试验曲线均吻合良好,有限元模型很好地反映了加固构件的受力破坏过程,计算结果可作为加固试验的有益补充,同时可用于抗弯加固的深入研究。

3 抗弯加固梁有限元参数分析

在抗弯加固梁数值模拟的基础上,对影响加固承载力的各因素进行参数分析,主要考虑混凝土强度、纵筋配筋率、钢绞线用量、持载程度等对抗弯加固的影响。有限元模型建立同 FEMF-J,均采用 1/4 模型,具体分析如下。

3.1 混凝土强度对加固性能的影响

混凝土强度参数模型中混凝土强度采用表 1 中的 25.57 MPa 和 40.13 MPa 以及假定的 50 MPa 三个强度等级,钢筋设置与试验梁完全相同,纵筋配筋率为 3.16%,加固钢绞线数量为 16 根,跨中两点对称加载,加固计算结果见表 5。

由表 5 可见,加固构件屈服荷载非常接近,随混

表 4 加固梁数值分析结果与试验结果的对比

Tab. 4 Comparisons Between Numerical Analysis Results and Test Results of Strengthened Beams

试件编号	屈服荷载/(kN·m)	钢绞线拉断荷载/(kN·m)	极限承载力/(kN·m)	屈服挠度/mm	钢绞线拉断挠度/mm	极限挠度/mm
RCBF-3	451.00	512.50	553.50	24.60	86.52	169.47
RCBF-5	399.75	481.75	512.50	25.00	84.90	145.30
RCBF-1	440.75	522.75	602.70	24.58	98.47	166.91
RCBF-4	420.25	492.00	603.72	21.35	78.93	199.87
FEMF-J	436.00	512.83	598.57	24.55	101.50	180.43
与试验均值的 相对误差/%	-0.30	0.74	2.03	-0.71	16.4	0.94

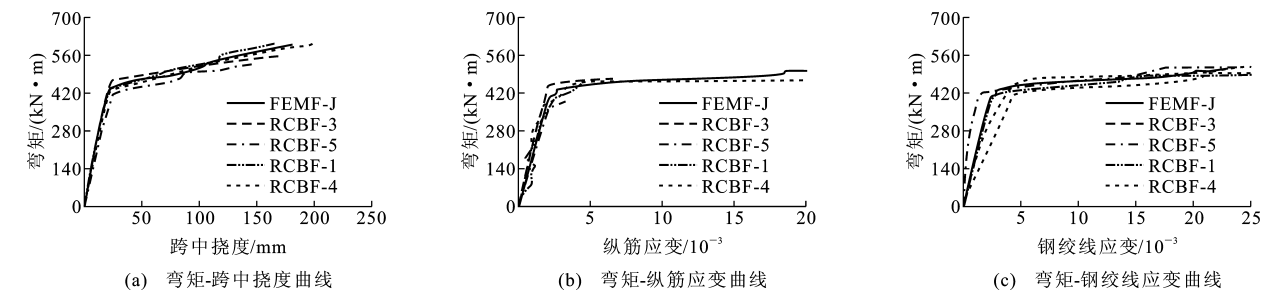


图 4 加固梁数值计算曲线与试验曲线对比

Fig. 4 Comparisons Between Numerical Calculation Curves and Test Curves of Strengthened Beams

表 5 混凝土强度对抗弯加固梁的影响

Tab. 5 Influences of Concrete Strength on Flexural Strengthened Beams

试件编号	屈服荷载/(kN·m)	钢绞线拉断荷载/(kN·m)	极限承载力/(kN·m)	屈服挠度/mm	钢绞线拉断挠度/mm	极限挠度/mm	延性系数
FEMF-25	436.58		589.04	24.81		111.85	4.51
FEMF-40	440.12	607.38	660.26	24.18	105.76	157.70	6.52
FEMF-50	442.74	602.23	686.22	24.53	106.47	188.39	7.68

凝土强度提高略有增长,此时挠度亦非常接近;但混凝土强度最低的构件在加固钢绞线没有发生拉断之前混凝土即达到最大抗压强度而破坏,后两者钢绞线拉断荷载、挠度均非常接近;混凝土破坏时梁极限承载力随混凝土强度提高而增大,以 FEMF-25 构件为参考,极限承载力分别提高 12.09%,16.50%,随混凝土强度增大,极限承载力增幅降低,极限挠度增长的趋势与构件极限承载力增长趋势相同,分别为 41.13%,68.43%,而延性系数增大,构件延性得到大幅改善。

不同混凝土强度的加固梁数值计算曲线如图 5 所示。由图 5 中的弯矩-跨中挠度曲线可见,不同混凝土强度的加固构件弯矩随跨中挠度增长发展趋势基本相同,只是破坏先后有差距。钢绞线和纵筋的应变发展趋势也基本一致,曲线几乎重合,但破坏时最大应变随混凝土强度提高而增大。

**3.2 原梁纵筋配筋率对加固性能的影响**

纵筋配筋率参数模型中混凝土强度采用表 1 中强度为 40.13 MPa 的混凝土,纵筋配筋率分别为

2.11%,3.16%,4.21%,加固钢绞线数量为 16 根,跨中两点对称加载。有限元模型加固计算结果如表 6 所示。

由表 6 可见,纵筋配筋率对加固构件极限承载力发展趋势影响非常明显:以纵筋配筋率为 2.11% 的构件为参考,屈服荷载分别提高 46.15%,84.47%,屈服挠度分别提高 21.51%,22.16%;钢绞线拉断荷载随纵筋配筋率提高分别增长 35.25%,62.89%,但挠度较为接近;混凝土破坏时梁极限承载力随纵筋配筋率提高分别增长 29.51%,62.78%,但极限挠度却随纵筋配筋率提高而有很大降低,分别下降 17.77%,26.01%,同时延性系数依次减小,说明梁的延性降低,脆性增大。

不同纵筋配筋率的抗弯加固梁有限元计算曲线如图 6 所示。由图 6 中的弯矩-跨中挠度曲线可见,相同荷载作用下,加固构件跨中挠度随纵筋配筋率增长而降低,极限破坏时纵筋配筋率最大的梁挠度最低,延性最差。钢绞线和纵筋的应变发展趋势基本相同,随纵筋配筋率的增大,应变增长减缓,构件

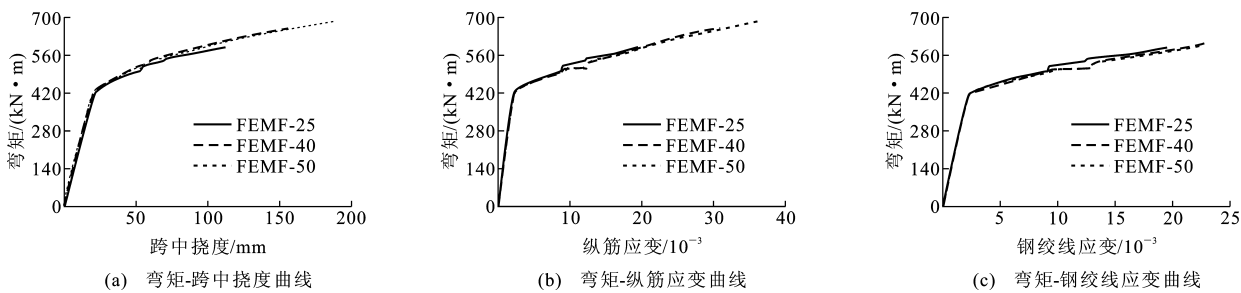


图 5 不同混凝土强度的抗弯加固梁数值计算曲线

Fig. 5 Numerical Calculation Curves of Flexural Strengthened Beams with Different Concrete Strength

表 6 纵筋配筋率对抗弯加固梁的影响

Tab. 6 Influences of Longitudinal Reinforcement Ratios on Flexural Strengthened Beams

试件编号	屈服荷载/(kN·m)	钢绞线拉断荷载/(kN·m)	极限承载力/(kN·m)	屈服挠度/mm	钢绞线拉断挠度/mm	极限挠度/mm	延性系数
FEMF-2. 11	301. 14	449. 07	509. 80	19. 90	112. 84	191. 77	9. 64
FEMF-3. 16	440. 12	607. 38	660. 26	24. 18	105. 76	157. 70	6. 52
FEMF-4. 21	555. 52	731. 47	766. 28	24. 31	115. 98	141. 90	5. 84

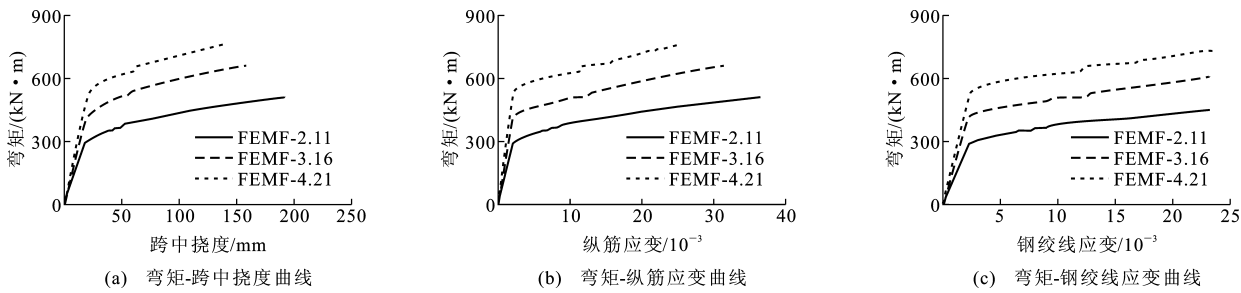


图 6 不同纵筋配筋率的抗弯加固梁的数值计算曲线

Fig. 6 Numerical Calculation Curves of Flexural Strengthened Beams with Different Longitudinal Reinforcement Ratios

承载力提高。

3.3 钢绞线用量对加固性能的影响

钢绞线用量参数模型中混凝土强度采用表 1 中

强度 40.13 MPa 的混凝土,纵筋配筋率为 3.16%,加固钢绞线数量分别为 4,8,16,24 根,跨中两点对称加载。有限元模型加固计算结果见表 7。

表 7 钢绞线用量对抗弯加固梁的影响

Tab. 7 Influences of Amounts of Stainless Steel Wire on Flexural Strengthened Beams

试件编号	屈服荷载/(kN·m)	钢绞线拉断荷载/(kN·m)	极限承载力/(kN·m)	屈服挠度/mm	钢绞线拉断挠度/mm	极限挠度/mm	延性系数
FEMF-4	436. 00	512. 83	598. 57	24. 55	101. 50	180. 43	7. 35
FEMF-8	442. 55	552. 98	613. 13	24. 33	105. 07	170. 09	6. 99
FEMF-16	440. 12	607. 38	660. 26	24. 18	105. 76	157. 70	6. 52
FEMF-24	442. 44	630. 11	679. 16	23. 27	117. 62	165. 38	7. 11

由表 7 可见,钢绞线用量对加固构件承载力发展的影响主要表现在构件屈服后,其屈服强度略有提高,主要是纵筋用量较多,对构件屈服强度起着控制作用。以钢绞线用量为 4 根的构件作为参考,钢绞线拉断荷载随钢绞线用量提高分别增长 7.83%,18.44%,22.87%,挠度分别提高 3.52%,4.20%,15.88%;最终混凝土压碎破坏时梁极限承载力随纵筋配筋率提高分别增长 2.43%,10.31%,13.46%,

但极限挠度却随纵筋配筋率提高而有所降低,分别下降 5.73%,12.60%,8.34%,同时,构件延性系数减小,说明梁的延性有所降低,脆性增大。

不同钢绞线用量的加固梁数值计算曲线如图 7 所示。由图 7 可见:不同钢绞线用量的加固梁屈服前弯矩-跨中挠度、弯矩-纵筋应变、弯矩-钢绞线应变曲线基本重合,这主要是由于 T 形梁自身纵筋配筋较多,纵筋的屈服对梁的屈服起控制作用;梁屈服

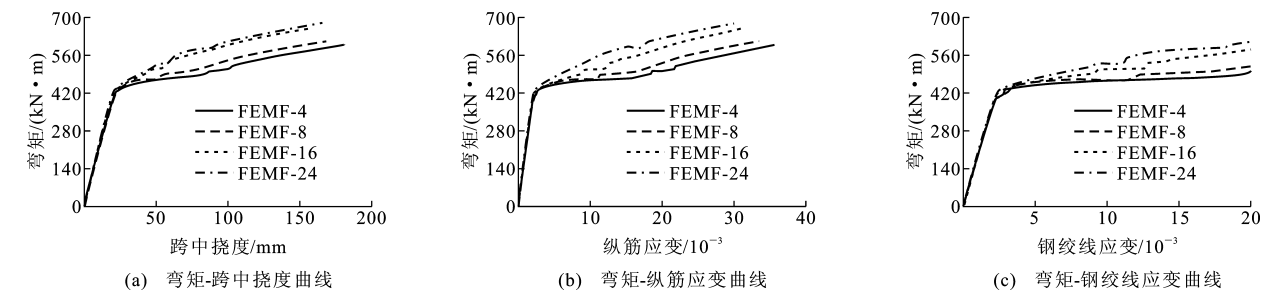


图 7 不同钢绞线用量的抗弯加固梁的数值计算曲线

**Fig. 7 Numerical Calculation Curves of Flexural Strengthened Beams with Different Amounts of Stainless Steel Wire**

后,相同荷载作用下,加固构件跨中挠度随钢绞线用量增长而降低,极限破坏时钢绞线用量最大的梁挠度最小,延性最差;钢筋和钢绞线的应变发展趋势基本相同,相同荷载作用下随钢绞线用量的增大而缓慢增长,加固钢绞线拉断荷载、极限荷载均随钢绞线用量增大而提高。

**3.4 二次受力对加固性能的影响**

根据试验结果可知,完整梁加固与预裂梁卸载加固性能非常接近,此处仅考虑持载程度对构件加固性能的影响。

有限元模型混凝土强度采用表 1 中强度为 40.13 MPa 的混凝土,纵筋配筋率为 3.16%,加固钢绞线数量分别为 4,8,16 根,跨中两点对称加载。持载程度分别为加载点挠度 5,10,20,30 mm 四种。其中前 2 种梁加固前未屈服,计为Ⅲ类梁,后 2 种梁加固前已发生屈服,计为Ⅳ类梁。持载加固通过 ANSYS 中单元生死功能实现,有限元模型加固计算荷载和挠度特征值见表 8。

由表 8 可见,Ⅲ类梁屈服荷载非常接近,并没有

表 8 持载程度对抗弯加固梁的影响

Tab. 8 Influences of Different Secondary Loads on Flexural Strengthened Beams								
试件编号	梁类别	屈服荷载/ (kN·m)	钢绞线拉断荷载/ (kN·m)	极限承载力/ (kN·m)	屈服挠度/mm	钢绞线拉断挠度/ mm	极限挠度/mm	延性系数
FEMF-4-5	Ⅲ类	450.11	618.07	634.86	33.36	167.14	187.44	5.62
FEMF-4-10		450.12	619.00	637.02	27.20	169.85	190.94	7.02
FEMF-8-5		449.52	638.81	654.05	25.08	168.76	186.36	7.43
FEMF-8-10		448.27	635.07	653.64	25.32	167.22	188.36	7.43
FEMF-16-5		446.41	677.84	689.03	25.72	167.78	180.48	7.02
FEMF-16-10		447.11	676.68	687.13	26.92	170.32	182.05	6.76
FEMF-4-20	Ⅳ类	420.62	552.32	625.40	22.90	96.30	173.01	7.56
FEMF-4-30		420.87	598.85	627.99	22.42	147.72	181.16	8.08
FEMF-8-20		420.62	574.58	651.71	22.90	102.76	182.83	7.98
FEMF-8-30		420.89	617.08	643.96	22.42	147.75	177.75	7.93
FEMF-16-20		420.62	623.39	672.69	22.90	116.47	165.76	7.24
FEMF-16-30		420.89	661.22	677.19	22.42	157.93	173.56	7.74

注:FEMF- $x$ - $y$  中  $x$  为钢绞线数量, $y$  为持载程度。

随持载程度和加固钢绞线用量增加而出现增大的现象,这仍然是由于梁屈服受原梁纵筋控制所致。与表 7 中对应的未持载加固构件相比,屈服荷载有一定程度的提高,增幅在 1.29%~3.24%之间。Ⅳ类梁屈服荷载基本相同,为未加固梁的屈服荷载,屈服挠度也一样。

Ⅲ类梁钢绞线拉断时的荷载受持载程度的影响不大,但随钢绞线用量的增加而提高,以 4 根钢绞线加固梁为参考,平均增幅分别为 2.98%,4.49%;与表 7 中对应的未持载加固梁相比,拉断荷载增幅在 11.41%~20.70%之间,且随钢绞线用量增加,增幅降低。Ⅳ类梁钢绞线拉断时的荷载要低于Ⅲ类梁,但随持载程度提高,拉断荷载却增大,这与原梁纵筋的强化程度、混凝土应力发展程度、钢绞线应力发展以及截面中和轴位置均有关。以 4 根钢绞线加固梁为参考,持载 20 mm 的梁拉断荷载增幅分别为 4.03%,12.87%;持载 30 mm 的梁拉断荷载增幅分别为 3.04%,10.41%,随钢绞线用量增加,增幅增大,但随持载程度增加,拉断荷载增幅略有降低。与表 7 中对应的未持载加固梁相比,持载 20 mm 的梁

提高幅度在 2.64%~7.70% 之间;持载 30 mm 的梁提高幅度在 8.86%~16.77% 之间,随钢绞线用量增加,增幅降低。

Ⅲ类梁最终发生混凝土压碎破坏时的极限荷载同样受持载程度的影响不大,但随钢绞线用量增加而提高,以 4 根钢绞线加固梁为参考,平均增幅分别为 3.06%,8.20%;与表 7 中对应的未持载加固梁相比,极限荷载增幅在 4.07%~6.67% 之间,极限荷载提高幅度要远小于拉断荷载。Ⅳ类梁极限荷载同样低于Ⅲ类梁,但随持载程度提高,极限荷载变化不大。以 4 根钢绞线加固梁为参考,持载 20 mm 的梁极限荷载增幅分别为 4.21%,7.56%;持载 30 mm 的梁极限荷载增幅分别为 2.54%,7.83%,随钢绞线用量增加,增幅增大。与表 7 中对应的未持载加固梁相比,持载 20 mm 的梁提高幅度在 1.88%~6.29% 之间;持载 30 mm 的梁提高幅度在 2.56%~5.03% 之间。

Ⅲ类梁屈服挠度相似,与表 7 中对应的未持载加固构件相比,挠度有一定程度的提高,增幅在 3.08%~35.89% 之间,钢绞线用量较低的梁挠度增幅稍大。Ⅳ类梁屈服挠度基本相同,为未加固梁的屈服挠度。

Ⅲ类梁钢绞线拉断时的挠度受持载程度及钢绞线用量的影响甚微,挠度几乎相等;与表 7 中对应的未持载加固梁相比,拉断荷载增幅在 58.64%~67.34% 之间,且随钢绞线用量增加,增幅略有下降。Ⅳ类梁钢绞线拉断时的挠度要低于屈服前加固的梁,但随持载程度提高,拉断挠度增大。以 4 根钢绞线加固梁为参考,持载 20 mm 的梁拉断挠度增幅分别为 6.71%,20.94%;持载 30 mm 的梁拉断挠度增幅分别为 0.02%,6.91%,随钢绞线用量和持载程度的增加,增幅均降低。与表 7 中对应的未持载加固梁相比,持载 20 mm 的梁提高幅度在 -5.12%~10.13% 之间;持载 30 mm 的梁提高幅度在 40.62%~49.33% 之间,随钢绞线用量和持载程度增加,增幅提高,但持载 20 mm 的梁除 16 根钢绞线加固外,挠度要低于未持载加固梁。

Ⅲ类梁最终混凝土压碎时的极限挠度同样受持载程度的影响不大,但随钢绞线用量增加而减小,以 4 根钢绞线加固梁为参考,极限挠度分别减小 0.96%,4.18%;与表 7 中对应的未持载加固梁相比,极限挠度增幅在 3.89%~15.44% 之间,随钢绞线用量增加而增幅提高,且极限挠度提升幅度要远小于拉断挠度。Ⅳ类梁极限挠度要低于Ⅲ类梁,但

随持载程度提高,极限挠度增大。与表 7 中对应的未持载加固梁相比,持载 20 mm 的梁提高幅度在 -4.11%~7.49% 之间;持载 30 mm 的梁提高幅度在 0.40%~10.06% 之间,随钢绞线用量增加,增幅提高,但持载 20 mm 的 4 根钢绞线加固梁挠度要低于未持载加固梁。

不同持载程度下的加固梁有限元计算曲线如图 8 所示。由图 8 中的弯矩-跨中挠度曲线可见,屈服前构件受力性能几乎相同,Ⅲ类梁屈服荷载受持载程度和钢绞线用量的影响都很小,曲线几乎重合;Ⅳ类梁屈服荷载要明显低于Ⅲ类梁。加固构件屈服后的一段范围内,Ⅳ类梁在相同荷载作用下的挠度要大于Ⅲ类梁,说明Ⅳ类梁延性要好,并且挠度均比对应钢绞线用量下的未持载加固梁大,持载加固梁延性要好。最终持载加固梁弯矩-跨中挠度曲线走向重合,不同持载程度的加固梁极限荷载和极限挠度大致相同,但随钢绞线用量增加而增大。

由图 8 中的弯矩-纵筋应变曲线可见,构件屈服前应变发展几乎相同,屈服后应变发展大致分为 2 组,Ⅲ类梁应变发展要慢于Ⅳ类梁,但各组梁应变发展大致相同。与对应钢绞线用量的未持载加固梁相比,应变发展要缓慢。

由图 8 中的弯矩-钢绞线应变曲线可见,随持载程度提高,钢绞线参与受力时间越晚,应变发展越慢,且都慢于对应未持载加固梁。Ⅲ类梁在加固构件屈服后的应变发展趋势几乎相同,曲线几乎重合,均慢于Ⅳ类梁,且Ⅳ类梁应变发展随持载程度增加而放缓。

## 4 结 语

(1)加固构件屈服荷载随混凝土强度提高略有增长,屈服挠度非常接近;混凝土强度低的构件在钢绞线拉断之前可能发生混凝土压碎破坏;梁极限承载力和极限挠度随混凝土强度提高而增大。

(2)随原梁纵筋配筋率提高,屈服强度大幅提高,但屈服挠度的增加幅度减小;钢绞线拉断荷载随纵筋配筋率提高而增长,但挠度较为接近;梁极限承载力随纵筋配筋率提高而增长,但极限挠度却随纵筋配筋率提高而有很大降低,梁的延性降低,脆性增大。

(3)钢绞线用量对加固构件承载力发展的影响主要表现在构件屈服后,其屈服强度略有提高;钢绞线拉断荷载及挠度均随钢绞线用量提高而增长,且增幅增大;梁极限承载力随纵筋配筋率提高而增长,

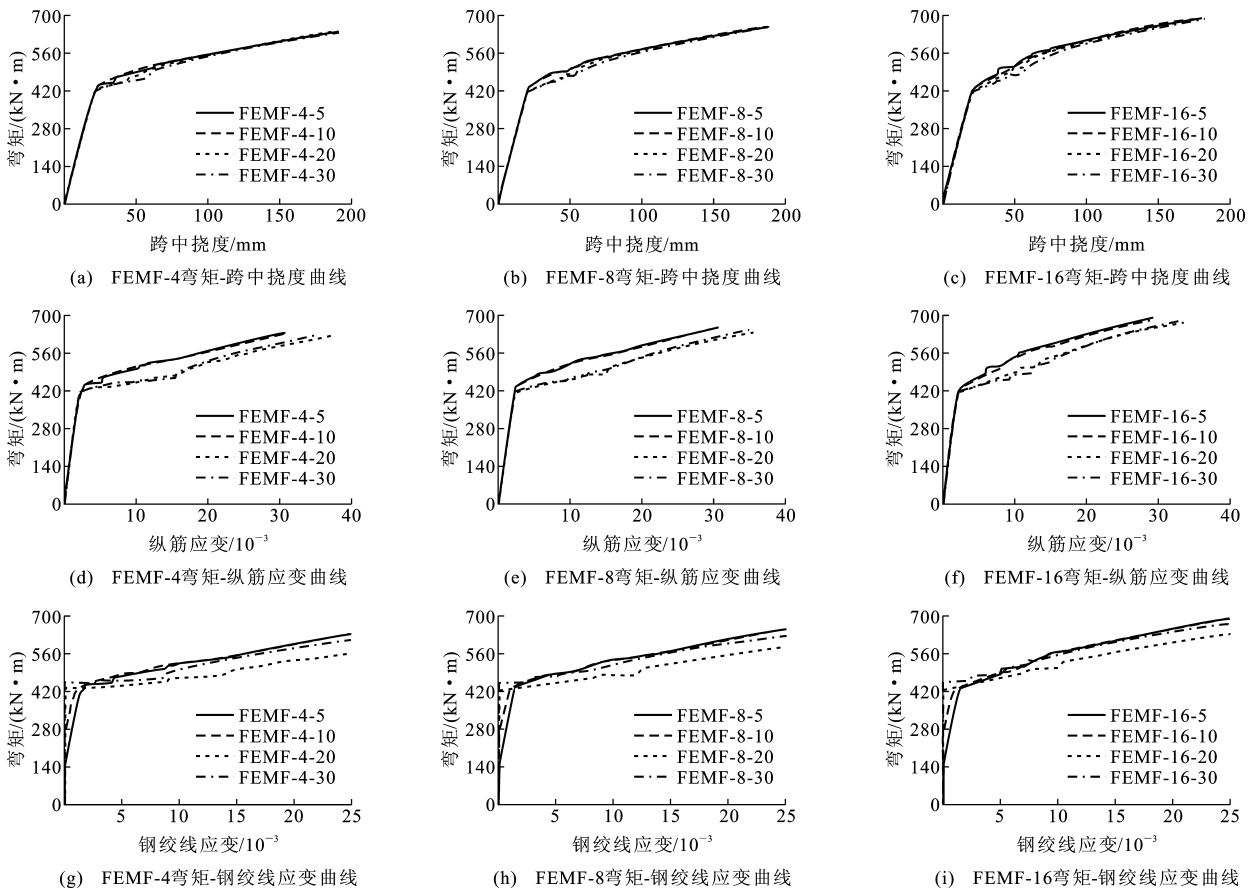


图 8 持载抗弯加固梁的数值计算曲线

Fig. 8 Numerical Calculation Curves of Flexural Strengthened Beams with Different Secondary Loads

但极限挠度先增加而后降低,梁的延性降低,脆性增大。

(4)加固梁的受力性能可分为屈服前加固和屈服后加固 2 类,屈服荷载、屈服挠度、钢绞线拉断荷载、钢绞线拉断挠度、极限承载力、极限挠度的影响各不相同。

参考文献:

References:

[1] ONG K C G,PARAMSIVAM P,LIM C T E. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Ferrocement Laminates[J]. Journal of Ferrocement, 1992,22(4):331-342.

[2] PARAMSIVAM P,ONG K C G,LIM C T E. Ferrocement Laminates for Strengthening RC T-beams [J]. Cement and Concrete Composites, 1994,16(2): 143-152.

[3] 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.

NIE Jian-guo, WANG Han-bing, ZHANG Tian-shen,et al. Experimental Study on Flexural Behavior

of RC Beams Strengthened with Stainless Steel Wire Mesh and Permeability Polymer Mortar[J]. Journal of Building Structures,2005,26(2):1-9.

[4] 曾令宏. 复合砂浆钢丝网加固混凝土梁试验研究与理论分析[D]. 长沙:湖南大学,2006.

ZENG Ling-hong. Experimental Study and Theoretical Analysis on Strengthening Reinforced Concrete Beams with High-performance Ferrocement [D]. Changsha: Hunan University,2006.

[5] 卜良桃. 高性能复合砂浆钢筋网加固 RC 梁的性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2006.

BU Liang-tao. Research on the Performance of the RC Beams Strengthened with High Performance Ferrocement[D]. Changsha: Hunan University,2006.

[6] 黄 华,刘伯权,邢国华,等. 高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆加固的 T 型梁桥试验[J]. 中国公路学报,2007,20(4):83-90

HUANG Hua, LIU Bo-quan, XING Guo-hua, et al. Experiment on RC T-type Beam Bridge Strengthened with High Strength Stainless Steel Wire Mesh and Permeability Polymer Mortar[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(4):83-90.



- [7] 黄 华,邢国华,刘伯权,等. 高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆加固梁抗弯承载力试验研究[J]. 工业建筑,2007,37(3):106-110,119.  
HUANG Hua, XING Guo-hua, LIU Bo-quan, et al. Experiment on Flexural Capacity of RC Beams Strengthened with Stainless Steel Wire Mesh and Permeability Polymer Mortar [J]. Industrial Construction, 2007, 37(3): 106-110, 119.
- [8] 黄 华,刘伯权,刘卫铎. 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层与 RC 结构黏结面性能试验[J]. 中国公路学报,2009,22(3):70-75.  
HUANG Hua, LIU Bo-quan, LIU Wei-duo. Experiment on Bond Performance Between Reinforced Layer with Steel Wire Mesh and Polymer Mortar and RC Structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(3): 70-75.
- [9] 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.  
HUANG Hua, LIU Bo-quan, LIU Wei-duo. Bond-slip of Reinforced Layer with Steel Wire Mesh and Polymer Mortar[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(5): 71-75.
- [10] 刘 鸣,刘伯权,邢国华. 钢绞线网-复合砂浆加固钢筋混凝土梁的受弯性能[J]. 交通运输工程学报,2011,11(4):10-16.  
LIU Ming, LIU Bo-quan, XING Guo-hua. Flexural Performance of RC Beam Strengthened with High-strength Steel Wire Mesh and Polymer Mortar Overlay[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(4): 10-16.
- [11] 黄 华,刘伯权,吴 涛. 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固 RC 梁的端部剥离破坏研究[J]. 中国公路学报,2012,25(1):101-106.  
HUANG Hua, LIU Bo-quan, WU Tao. Research on Debonding Failure at Plate-end of RC Beams Strengthened with High Strength Steel Wire Mesh and Polymer Mortar[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 101-106.
- [12] 郭 彤,李爱群,姚秋来,等. 钢绞线网片-聚合物砂浆加固钢筋混凝土箱梁试验[J]. 中国公路学报,2010,23(2):36-42.  
GUO Tong, LI Ai-qun, YAO Qiu-lai, et al. Experiment on Reinforced Concrete Box-girder Strengthened by Steel Stranded Wire Mesh and Polymer Mortar[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2): 36-42.
- [13] PADMARAJAIAH S K, RAMASWAMY A. A Finite Element Assessment of Flexural Strength of Prestressed Concrete Beams with Fiber Reinforcement [J]. Cement and Concrete Composites, 2002, 24(2): 229-241.
- [14] 江见鲸,陆新征,叶列平. 钢筋混凝土结构有限元分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.  
JIANG Jian-jing, LU Xin-zheng, YE Lie-ping. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

## 《空间结构》2013 年征订通知

《空间结构》是由国家教育部主管、浙江大学主办的全国性专业科技期刊,1994 年创刊,面向国内外公开发行人。《空间结构》主要刊载空间结构的理论研究、分析设计、试验与实测、建筑造型、施工工艺、管理经验、工程实例、信息报道及有特色的空间结构工程照片等方面的内容。读者对象为科研单位、设计院、生产施工单位、质检管理部门的科技人员及大专院校师生。

《空间结构》为季刊,大 16 开本,96 页,每期定价 15 元,全年共 60 元。本刊兼营广告,10 月起征订下一年度广告。《空间结构》自办发行,请直接汇款至本编辑部订阅,发行组收到汇款后即寄发票并按期寄给订户,务请在汇款用途栏内注明订购《空间结构》份数及年限。订购款按以下方式汇寄:

开户行:工商银行杭州市浙大分理处

电 话:(0571)87952414(带传真)

账 号:1202024619914482876

邮 编:310006

账 户:浙江大学《空间结构》杂志编辑部

E-mail: kjjgzz@163.com

地 址:杭州玉泉浙江大学空间结构研究中心《空间结构》杂志编辑部