

大直径高强预应力筋混凝土梁承载能力 数值分析

王 钧,李世平,苏 宇,任靖豪

(东北林业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要 目的 研究大直径高强钢绞线预应力混凝土梁受力性能,进一步扩展大直径高强预应力筋在实际工程中的应用范围. 方法 以直径为 17.8 mm 的 1860 级钢绞线作为预应力筋,普通钢筋作为非预应力筋,设计制作了 6 根大直径高强钢绞线预应力混凝土简支梁. 试验梁进行三分点加载试验,基于相关试验数据和数值分析方法,对大直径高强钢绞线预应力混凝土梁进行受弯承载力非线性研究,探讨预应力筋配筋率、非预应力配筋率、预应力筋强度指标和混凝土强度等级等参数对模拟梁构件承载力影响规律. 结果 预应力筋配筋率的提高即能够明显改善预应力混凝土梁构件变形性能,又能提高梁构件承载能力;混凝土强度等级与非预应力配筋率是影响梁构件受弯承载力的重要因素. 结论 通过对大直径高强预应力筋混凝土梁构件的参数分析,为工程实践提供依据的同时,也为其更广泛的技术应用提供设计参考.

关键词 大直径;高强钢绞线;预应力混凝土梁;承载力;数值分析

中图分类号 TU378.2

文献标志码 A

Analysis on Bearing Capacity of Large-diameter High-strength Prestressed Concrete Beams

WANG Jun, LI Shiping, SU Yu, REN Jinghao

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, China, 150040)

Abstract: The mechanical behavior of prestressed concrete beams with large diameter and high strength is studied to further extend the application scope of large diameter and high strength prestressed reinforcement in practical engineering. Using 1860 grade steel with diameter of 17.8mm as prestressed reinforcement and ordinary steel as normal reinforcement, it is designed and made 6 prestressed concrete beams with large diameter high strength steel strands. Based on the experiment test data and numerical analysis method, the nonlinear research is carried out about the flexural bearing capacity of the large diameter high strength steel strand prestressed concrete beam. It is to discuss several parameters' influence on the bearing capacity of simulated beam, such as the pres-

收稿日期:2018-10-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51778186);黑龙江省博士后科研启动基金项目(LBH-Q15011)

作者简介:王钧(1967—),女,教授,博士研究生导师,主要从事预应力混凝土组合结构等方面研究.

prestressed reinforcement ratio, the normal reinforcement ratio, the strength index of the prestressed reinforcement and the concrete strength grade and so on. The results show that the improvement of the prestressed reinforcement ratio can obviously improve the deformation performance of the prestressed concrete beam. It can also improve the bearing capacity of the beam. The strength grade of the concrete and the normal reinforcement ratio are the important factors that affect the flexural bearing capacity of the beam. By analyzing the parameters of large diameter and high-strength prestressed concrete beams, this paper provides a basis for engineering practice and a design reference for its wider application.

Key words: large-diameter; high-strength steel strand; prestressed concrete beam; ultimate bearing capacity; numerical analysis

与常规钢绞线相比, 高强钢绞线在结构中的应用可以延缓裂缝出现的时间, 增强结构抗裂性和刚度, 从而提高结构整体可靠性与稳定性^[1-2]. 将大直径钢绞线应用到预应力混凝土梁构件中, 可以显著提高截面综合配筋率, 增强结构承载能力, 使其在反复荷载作用下截面应力变化幅度相对较小, 从而增强构件的抗疲劳能力^[3-4]. 将大直径高强钢绞线应用于超高层建筑、深海工程、大型公共建筑等结构中, 不仅能够提高建筑结构的承载能力, 而且能够显著减少材料的用量, 节约资源^[5-6]. 因此, 大力推广大直径高强度钢绞线在预应力混凝土结构中的使用, 不仅会产生巨大的经济效益, 而且还能为我国建筑业的可持续发展做出巨大贡献.

目前, 国内外关于配置常规直径钢绞线(直径 15.2 mm)和高强非预应力钢筋的预应力混凝土梁构件的受力性能已做了大量试验和理论研究^[7-13], 但对于配置大直径高强钢绞线的预应力混凝土梁构件研究相对较少, 现行《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)(简称《规范》)中虽然给出了直径 17.8 mm 的 1860 级钢绞线^[14], 但

未将大直径、高强钢绞线预应力混凝土梁构件的抗弯承载力、抗裂度和裂缝宽度计算公式和方法与常规直径钢绞线预应力混凝土梁构件加以区分, 对于《规范》提供的抗弯承载力、抗裂度和裂缝宽度计算公式与方法是否适用于大直径、高强钢绞线预应力混凝土梁构件, 需作进一步探讨. 鉴于此, 为了推动大直径高强钢绞线在工程实践中的应用, 笔者设计制作了 6 根大直径高强钢绞线预应力混凝土梁构件^[15], 基于相关试验数据和数值分析方法, 进行大直径、高强钢绞线预应力混凝土梁受弯承载能力非线性研究, 分析在各参数变化下大直径高强钢绞线预应力混凝土梁承载能力变化规律, 为大直径高强钢绞线在实际工程中的应用提供数据参考.

1 试件设计与模型建立

1.1 试件设计

设计 6 根大直径、高强钢绞线预应力混凝土梁试件, 为保证试件梁的弯曲破坏, 剪跨段进行箍筋加密, 试件配筋如图 1 所示, 图中 A'_s 、 A_s 分别为受压区、受拉区纵向钢筋.

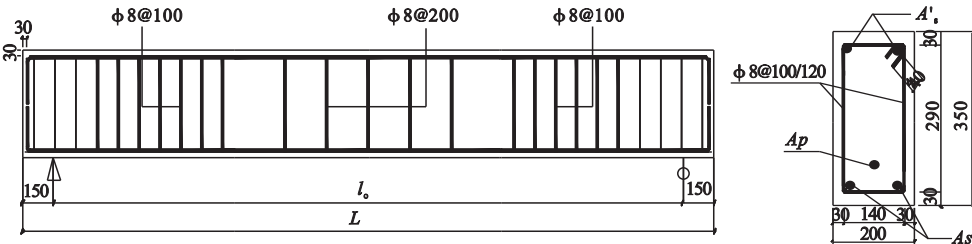


图 1 试件配筋与截面

Fig. 1 Reinforcement and section of specimen

采用 C40 混凝土,非预应力纵筋采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用 HPB300 级,预应力钢筋采用 1860 级,1×7 标准型 Φ^s17.8 低松

弛钢绞线,试件截面均为 $b \times h = 200 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$,纵筋保护层厚度均为 30 mm. 设计参数见表 1.

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	L/mm	l_0/mm	l_0/h	A_p	A_s	A'_s	$\rho_p/\%$	$\rho_s/\%$	λ	f_{pyk}/MPa
PTCB-1	4 500	4200	12	1Φ ^s 17.8	2Φ12	2Φ12	0.338	0.369	0.797	1 860
PTCB-2	4 500	4 200	12	1Φ ^s 17.8	2Φ16	2Φ12	0.333	0.727	0.688	1 860
PTCB-3	4 500	4 200	12	1Φ ^s 17.8	2Φ20	2Φ12	0.331	1.040	0.585	1 860
PTCB-4	6 000	5 700	16.29	1Φ ^s 17.8	2Φ12	2Φ12	0.338	0.369	0.797	1 860
PTCB-5	6 000	5 700	16.29	1Φ ^s 17.8	2Φ16	2Φ12	0.333	0.727	0.688	1 860
PTCB-6	6 000	5 700	16.29	1Φ ^s 17.8	2Φ20	2Φ12	0.331	1.040	0.585	1 860

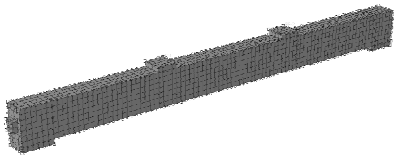
注:PTCB 定义为预应力混凝土梁;预应力筋配筋率 $\rho_p = A_p/bh_0$;非预应力筋配筋率 $\rho_s = A_s/bh_0$;λ 为预应力度; f_{pyk} 为预应力筋强度.

1.2 试验梁模型分析

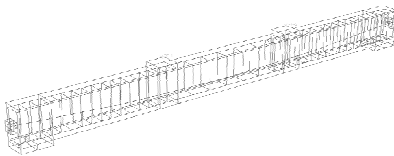
非线性分析模型在 ABAQUS 工作平台上建立^[16-18]. 混凝土与钢筋采用不同的单元类型,混凝土采用 C3D8R 六面体减缩单元,纵筋、箍筋和钢绞线采用 T3D2 桁架单元. 采用降温的方式对预应力筋施加预应力,具体方法为在编辑材料属性时,设置预应力筋的膨胀系数,通过降低预应力筋温度的方式,实现预应力筋收缩,从而达到施加预应力的目的^[19-20]. 支座与荷载施加位置设置钢垫块,

防止应力集中现象. 纵向受力钢筋采用螺纹钢筋,建模分析时忽略与混凝土之间的相对滑移. 钢筋与钢绞线采用嵌入的方式植入到混凝土中,在构件发生变形时,两者共同工作协调变形.

数值分析时网格划分的疏密程度对计算结果的精确性影响很大,综合计算成本与分析精度两方面因素,考虑如图 2(a)中所示的网格划分方案,所建模型透视图如图 2(b)所示.



(a) 模拟梁网格图



(b) 模拟梁透视图

图 2 有限元模型网格与透视图

Fig. 2 Mesh of finite element model and perspective

2 试验现象与结果分析

2.1 试验现象

采用荷载分级加载的方式对模拟梁构件施加荷载,直至受压区混凝土达到极限压应变. 以模拟梁 PTCB-5 为例,根据各个特征点的应力状态可以将受力过程分为三个阶段:当荷载小于 $0.3 P_u$ (P_u 为极限荷载)时,以跨中截面为分析对象,模拟梁应力-应变关系基本符合平截面假定,试件的荷载-挠

度曲线为直线分布,表现出良好的线弹性;继续增加荷载,当加载到 $0.78 P_u$ 时,纵向受拉钢筋屈服,跨中挠度迅速增加;继续增加荷载,接近极限荷载时,跨中截面压区混凝土达到极限压应力,模拟梁构件失去承载能力. 试验梁构件与模拟梁破坏形式对比如图 3 所示. 以跨中截面为分析对象,模拟梁纵向受拉钢筋屈服后,跨中挠度变化较为明显,这与试验分析结果相同.

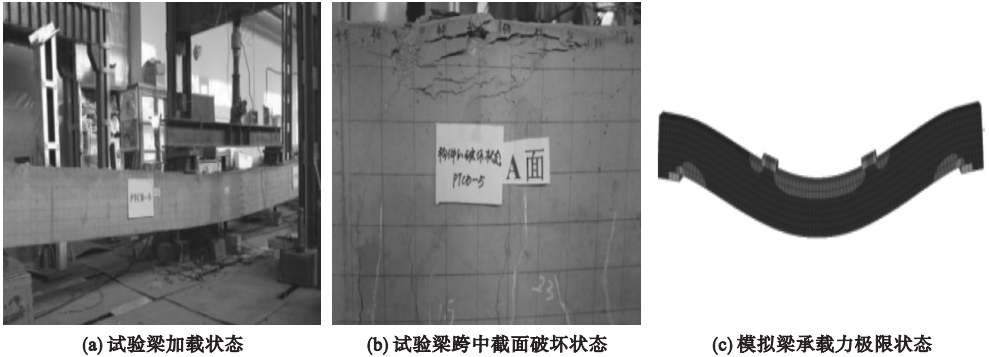


图3 试验梁与模拟梁 PTCB-5 弯曲破坏形态对比

Fig. 3 Flexural failure modes of PTCB-5 beam and simulated beam

表2 为试件开裂荷载、极限荷载实测值与模拟值对比. 由表可知, 试验实测开裂荷载与模型开裂荷载之间偏差平均值为 8.96%, 试验实测极限荷载和模型极限荷载之间偏差在 9% 以内.

表2 开裂荷载和极限荷载实测值

Table 2 Cracking load and ultimate load measured values

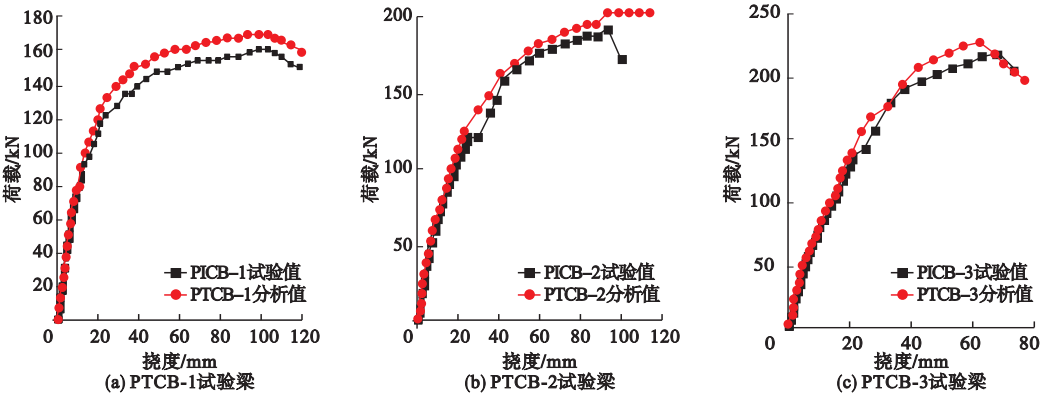
试件编号	开裂荷载			极限荷载		
	F_{cr}^t/kN	F_{cr}^m/kN	偏差/%	F_u^t/kN	F_u^m/kN	偏差/%
PTCB-1	76	82	7.89	158	168	6.3
PTCB-2	62	68	9.68	177	192	8.5
PTCB-3	57	64	12.2	219	227	3.7
PTCB-4	56	61	8.9	107	115	7.5
PTCB-5	48	52	8.3	134	143	6.7
PTCB-6	59	63	6.8	154	162	5.2

注: F_{cr}^t 、 F_{cr}^m 、 F_u^t 、 F_u^m 分别为试验实测开裂荷载、模型开裂荷载、试验实测极限荷载和模型极限荷载.

2.2 试验结果与模拟结果对比

图4 为试验梁与模拟梁荷载-挠度曲线. 对比可以看出, 混凝土开裂前试验结果与模拟结果吻合度较高, 纵向受拉钢筋屈服后, 模拟梁承载能力略高于试验梁, 引起误差的主要原因是钢筋与预应力筋以“嵌入”方式

植入到混凝土中, 忽略了混凝土与钢筋的摩擦损失和粘结滑移的影响; 试验中的边界条件不够理想, 加载过程中出现了少许滑动. 但两者的试验值与模拟值较为接近, 验证了模拟分析的可靠性.



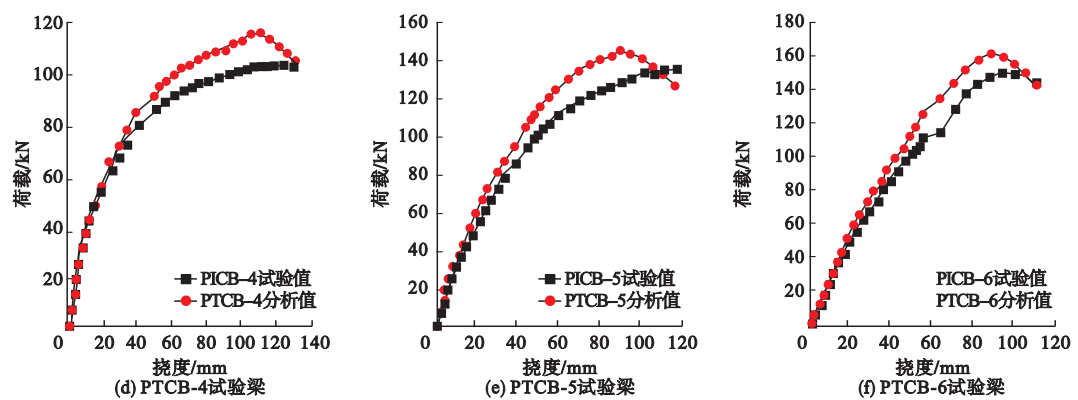


图4 试验梁与模拟梁荷载-位移曲线

Fig. 4 Bending moment deflection curves of test beam and simulated beam

极限承载力状态下6根大直径高强钢丝线预应力混凝土梁应力云图如图5所示.从图中可以看出,6根试验梁在达到极限承载

力状态时,模拟构件跨中压区混凝土均达到极限压应力,这与试验梁极限破坏现象相一致.

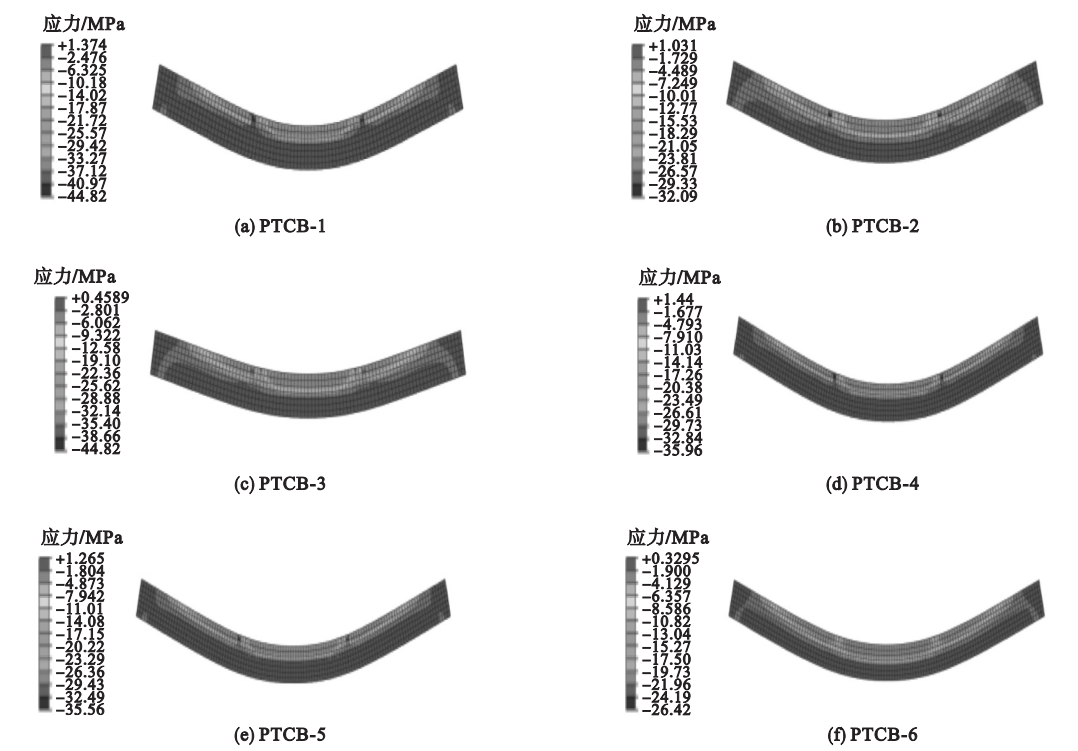


图5 极限承载力状态下试验梁混凝土压应力云图

Fig. 5 Compressive stress contour plot of test beam concrete under the limit state of bearing capacity

3 受力性能分析

3.1 模拟梁参数设计

模拟分析共设计10根长度为9.3 m的梁构件,截面均为300 mm×500 mm,非预应

力筋采用HRB400级钢筋,箍筋采用HRB300级钢筋,纵向受拉钢筋保护层厚度均为30 mm,模拟梁构件配筋如图6所示,设计参数见表3,表中 f_{pk} 表示预应力钢绞线极限强度标准值.

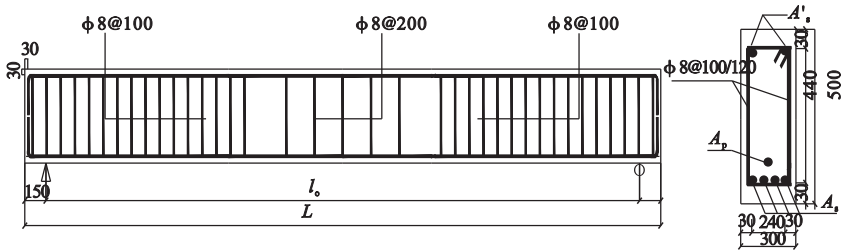


图 6 模拟梁配筋与截面

Fig. 6 Reinforcement and section of specimen

表 3 模拟梁参数

Table 3 Parameters of specimens

模拟梁编号	预应力筋直径/mm	$f_{\text{ptk}}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	受拉钢筋直径/mm	混凝土强度等级
YLP-1	17.8	1 720	20	C40
YLP-2	17.8	1 860	20	C40
YLP-3	17.8	1 960	20	C40
YLP-4	12.7	1 860	20	C40
YLP-5	15.2	1 860	20	C40
YLP-6	21.6	1 860	20	C40
YLP-7	17.8	1 860	20	C50
YLP-8	17.8	1 860	20	C60
YLP-9	17.8	1 860	16	C40
YLP-10	17.8	1 860	18	C40

3.2 数值模拟结果分析

通过数值分析可以得到大直径高强钢丝线预应力混凝土梁在不同阶段的应力状态。以 YLP-4 为例,加载之前,可以看到模拟梁“反拱”现象(见图 7(a));当承受荷载较小时,构件处于弹性工作状态,荷载-挠度曲线呈直线上升状态,此时跨中截面变形基本符合平截面假定;当加载到 $0.78 P_u$ 时,纵向受拉钢筋屈服,模拟梁构件变形趋势开始增大,(见图 7(b));当加载到极限荷载 P_u 时,跨中截面压区混凝土达到极限压应力(见图 7(c)),混凝土退出工作状态。

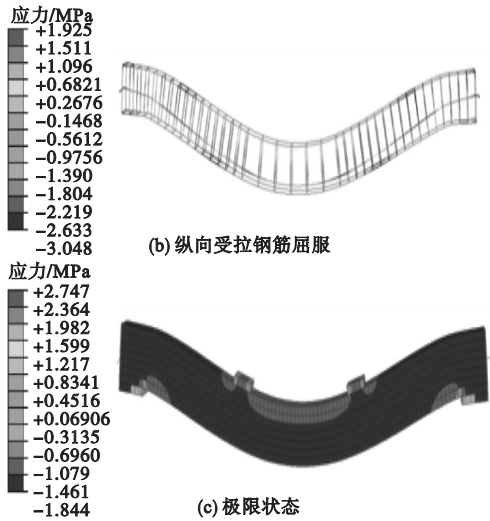
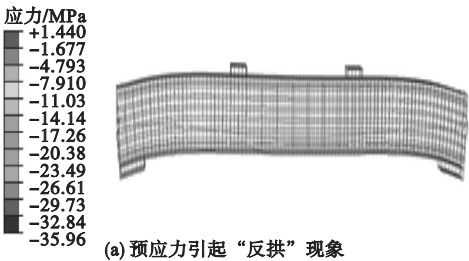


图 7 模拟梁特征点应力状态

Fig. 7 The stress state of the characteristic point of a simulated beam

3.3 混凝土强度等级对模拟梁承载力的影响

为了研究混凝土强度等级对大直径高强预应力筋混凝土梁构件受力性能的影响,



YLP-3、YLP-7 和 YLP-8 分别选取强度等级为 C40、C50 和 C60 的混凝土作为变化参数,分析得出荷载-位移曲线如图 8 所示.

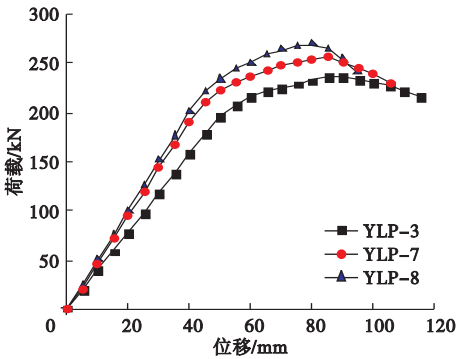


图 8 模拟梁荷载-位移关系曲线

Fig. 8 The load displacement relation curves of the simulated beam

由图 8 可以看出,随着混凝土强度等级的提高,模拟梁构件承载能力相应增强,混凝土强度等级为 C60 的模拟梁(YLP-8)相对于 C40 模拟梁(YLP-3)极限承载能力提高了 13.9%. 随着荷载的增加,混凝土强度等级高的构件比强度低的构件承载能力上升趋势更为明显,当达到极限承载力后继续加载,混凝土强度等级高的构件承载能力下降更为迅速,主要由于高强度等级混凝土容易产生脆性破坏,致使构件承载力下降趋势更为显著.

3.4 预应力筋强度指标对模拟梁承载力的影响

随着高强钢绞线材料的普及,高强钢绞线在预应力混凝土梁构件中的应用也越来越广泛,因此研究高强钢绞线对预应力混凝土梁构件的影响是非常必要的. 在模拟分析中,通过选用不同强度的预应力筋,分析其对模拟梁构件承载能力的影响, YLP-1、YLP-2 和 YLP-3 分别采用 1720 级、1860 级和 1960 级钢绞线,荷载-位移曲线如图 9 所示.

由图 9 可以看出,使用 1960 级钢绞线的梁构件较采用 1720 级钢绞线梁构件承载力提高了 6.47%. 随着荷载的增加,预应力筋强度等级高的构件承载力上升趋势更为明

显,因此采用高强度等级的预应力钢绞线能够有效地提高构件承载能力,改善构件变形性能,从而更好地发挥构件的使用性能.

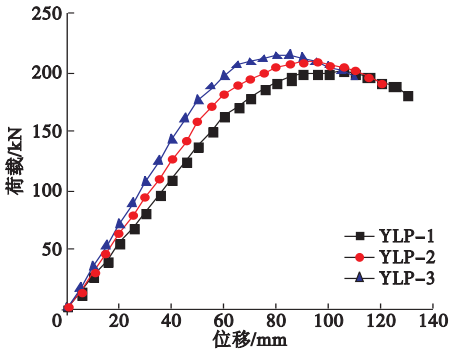


图 9 模拟梁荷载-位移关系曲线

Fig. 9 The load displacement relation curves of the simulated beam

3.5 预应力筋配筋率对模拟梁承载力的影响

预应力筋配筋率不仅影响构件的变形性能,而且也会对构件承载能力产生重要的影响. 数值分析分别选用 $\Phi^s12.7$ 、 $\Phi^s15.2$ 、 $\Phi^s17.8$ 和 $\Phi^s21.6$,强度等级为 1860 级钢绞线作为参数变量,所得荷载-位移关系如图 10 所示.

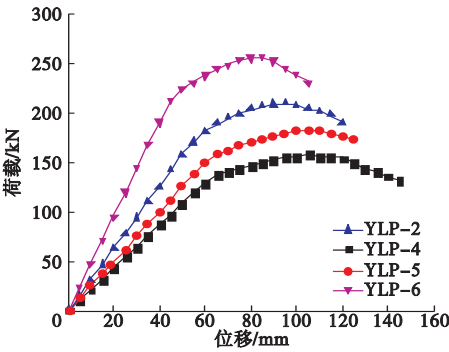


图 10 模拟梁荷载-位移关系曲线

Fig. 10 The load displacement relation curves of the simulated beam

由图 10 可以看出,预应力筋配筋率为 0.844% 的梁构件相比配筋率为 0.292% 的构件承载能力提高了 78%,变形性能减小了 32%. 采用大直径、高强钢绞线能够明显提高梁构件承载能力,改善变形性能.

3.6 非预应力筋配筋率对模拟梁承载力的影响

为了研究非预应力筋配筋率对大直径高强钢绞线预应力混凝土梁受力性能的影响,

进一步发挥非预应力筋的作用,选取截面配筋率 γ 分别为 0.912%、1.11% 和 1.33%,模拟分析所得荷载-位移曲线如图 11 所示。

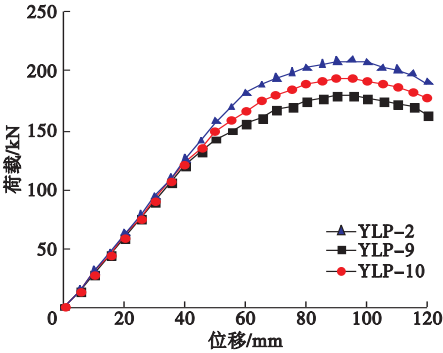


图 11 模拟梁荷载-位移关系曲线

Fig. 11 The load displacement relation curves of the simulated beam

由图 11 可以看出,通过增加非预应力筋配筋率能够提高模拟梁的承载能力,但对于模拟梁构件刚度影响较小. 对不同非预应力筋配筋率对比可以看出,混凝土开裂之前,模拟梁弯矩-位移曲线基本一致;承载能力达到极限状态时,非预应力筋配筋率 γ 为 1.33% 的模拟梁构件比 γ 为 0.912% 承载力提高了 20.2%。

4 结 论

(1) 试验结果与仿真模拟结果所得弯矩-挠度曲线与实测曲线,两者极限荷载和临界破坏状态时跨中挠度基本一致,从而证明了建模分析的可靠性。

(2) 对模拟梁构件的各参数分析表明,与传统直径强度钢绞线预应力混凝土梁构件相比,大直径高强钢绞线预应力混凝土梁构件承载能力更强,在截面尺寸相同的条件下,预应力筋配筋率为 0.844% 的梁构件相比配筋率为 0.292% 的模拟梁构件承载能力提高 78%,变形性能减小 32%。在承载能力相同条件下,采用大直径高强钢绞线能够显著地降低梁高,减少材料的用量,节约资源,从而增加建筑使用空间。

(3) 非预应力筋配筋率 α 为 1.33% 梁构件

相比 α 为 0.912% 梁构件承载力提高 16.4%;混凝土强度等级的改变对大直径、高强钢绞线预应力型钢-混凝土梁承载力影响不大。

参考文献

[1] 李富民,邓天慈,王江浩,等. 预应力混凝土结构耐久性研究综述[J]. 建筑科学与工程学报,2015,32(2):1-20.
(LI Fumin,DENG Tianci,WANG Jianghao,et al. Review of research on durability of prestressed concrete structures[J]. Journal of architecture and civil engineering,2015,32(2):1-20.)

[2] YAN Baofu, CHEN Wenbing, YU Jiayong, et al. Mode shape-aided tension force estimation of cable with arbitrary boundary conditions [J]. Journal of sound and vibration,2018,10(18):35-38.

[3] 余志武,李进洲,宋力. 普通钢筋锈蚀后预应力混凝土桥梁疲劳试验研究[J]. 公路交通科技,2014,31(4):64-72,93.
(YU Zhiwu,LI Jinzhou,SONG Li. Experimental study on fatigue behaviors of PC bridge beams with corroded steel bars[J]. Journal of highway and transportation research and development,2014,31(4):64-72,93.)

[4] YANG Yu, YONG Huadong, ZHOU Youhe. Mechanical behavior in superconducting composite wires[J]. European journal of mechanics,2018,16(2):191-202.

[5] 贾金青,孟刚,封硕,等. 预应力型钢超高强混凝土梁抗弯延性试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(4):64-70.
(JIA Jinqing,MENG Gang,FENG Shuo,et al. Flexural ductility of prestressed steel reinforced ultra-high strength concrete beams[J]. Journal of Harbin institute of technology,2015,47(4):64-70.)

[6] PACITTI A, PEIGNEY M, BOURQUIN F, et al. Experimental data based cable tension identification via nonlinear static inverse problem[J]. Procedia engineering, 2017,9(13):453-458.

[7] 谢剑,丁衍然,韩晓丹,等. 超低温下有黏结预应力混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 土木工程学报,2016,49(8):69-75,91.
(XIE Jian, DING Kanran, HAN Xiaodan, et al. Experimental study on flexural properties of bonded prestressed concrete beams under cryogenic temperatures [J]. China civil engineering journal,2016,49(8):69-75,91.)

[8] SUN Ceshi,ZHAO Yaobing, WANG Zhiqian, et al. Effects of longitudinal girder vibration on non-linear cable responses in cable-stayed bridges[J]. European journal of environmental and civil engineering,2017,10(2):94-107.

[9] 曹大富,秦晓川,袁沈峰. 冻融后预应力混凝土

- 土梁受力全过程试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(8): 38-44.
(CAO Dafu, QIN Xiaochuan, YUAN Shen-feng. Experimental study on mechanical behaviors of prestressed concrete beams subjected to freeze-thaw cycles[J]. China civil engineering journal, 2013, 46(8): 38-44.)
- [10] 戎贤, 吴海超, 刘平. 配置 600MPa 钢筋的预应力混凝土梁受弯性能研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(2): 139-143.
(RONG Xian, WU Haichao, LIU Ping. Experimental research on bending behavior of prestressed concrete beams with 600 MPa steel bars[J]. Engineering journal of Wuhan university, 2018, 51(2): 139-143.)
- [11] KANG Han, ZHAO Yong. Static behavior of a new type of cable-arch bridge[J]. Journal of constructional steel research, 2013, 10(10): 1-10.
- [12] 李富民, 袁迎曙. 腐蚀钢绞线预应力混凝土梁的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 78-84.
(LI Fumin, YUAN Yingshu. Experimental study on bending property of prestressed concrete beams with corroded steel strands[J]. Journal of building structures, 2010, 31(2): 78-84.)
- [13] 王钧, 李世平. 大尺度预应力型钢-混凝土梁承载力性能模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(1): 12-19.
(WANG Jun, LI Shiping. Simulation of bearing capacity parameters of large-scale prestressed steel reinforced concrete beams[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2019, 35(1): 12-19.)
- [14] 中华人民共和国建设部. 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.
(Ministry of Construction of the PRC. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [15] 王钧, 李婷, 任靖豪. 大直径高强钢绞线预应力混凝土梁受力性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(2): 103-110.
(WANG Jun, LI Ting, REN Jinghao. Mechanical performances of prestressed concrete beams with large-diameter high-strength steel strands[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2017, 34(2): 103-110.)
- [16] 刘巍, 徐明, 陈忠范. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J]. 工业建筑, 2014, 44(增刊1): 167-171, 213.
(LIU Wei, XU Ming, CHEN Zhongfan. Parameters calibration and damage plasticity verification of concrete model of ABAQUS[J]. Industrial construction, 2014, 44(S1): 167-171, 213.)
- [17] 齐虎, 李云贵, 吕西林. 混凝土弹塑性损伤本构模型参数及其工程应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(3): 547-554, 563.
(QI Hu, LI Yungui, Lü Xilin. Study of variables of elastic its engineering plastic damage model and application[J]. Journal of Zhejiang university(engineering science), 2015, 49(3): 547-554, 563.)
- [18] 张劲, 王庆扬, 胡守营, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 127-130.
(ZHANG Jin, WANG Qingyang, HU Shouying, et al. Parameters verification of concrete damaged plastic model of ABAQUS[J]. Building structure, 2008, 38(8): 127-130.)
- [19] 秦浩, 赵宪忠. ABAQUS 混凝土损伤因子取值方法研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(6): 27-32.
(QIN Hao, ZHAO Xianzhong. Study on the ABAQUS damage parameter in the concrete damage plasticity model[J]. Structural engineers, 2013, 29(6): 27-32)
- [20] 慕光波, 王连广, 周乐. 预应力钢骨混凝土梁非线性分析[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(6): 35-38.
(MU Guangbo, WANG Lianguang, ZHOU Le. Nonlinear analysis of prestressed steel reinforced concrete beam[J]. Sichuan building science, 2010, 36(6): 35-38.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)