

文章编号:1673-2049(2017)02-0103-08

# 大直径高强钢绞线预应力混凝土梁受力性能

王 钧, 李 婷, 任靖豪

(东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:**为探讨大直径高强钢绞线预应力混凝土梁的受力性能,进行了6根以直径17.8 mm的1860级钢绞线作为预应力钢筋和HRB400级钢筋作为非预应力钢筋的后张预应力混凝土梁在竖向荷载作用下的受力性能试验。对预应力混凝土梁中钢绞线和非预应力钢筋应力、混凝土应变以及短期最大裂缝宽度和跨中挠度等试验数据进行分析。结果表明:采用大直径高强钢绞线作为预应力钢筋的预应力混凝土梁工作性能良好,大直径高强钢绞线预应力混凝土梁受弯破坏形式和挠曲模式与普通预应力混凝土梁基本相同;试验梁跨中控制截面符合平截面假定,极限承载力可按照现行规范的正截面抗弯理论计算,按照现行规范计算的试验梁裂缝宽度和挠度与实测值吻合较好。

**关键词:**大直径高强钢绞线;预应力混凝土梁;极限承载力;裂缝宽度;刚度

**中图分类号:**TU378.2

**文献标志码:**A

## Mechanical Performances of Prestressed Concrete Beams with Large-diameter High-strength Steel Strands

WANG Jun, LI Ting, REN Jing-hao

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

**Abstract:** In order to explore the mechanical performance of prestressed concrete beam with large-diameter high-strength steel strand, the stress performance tests of six post-tensioning prestressed concrete beams under vertical loads were conducted. The prestressed concrete beams were made of 1860 grade steel strand with 17.8 mm diameter as prestressed reinforcement and HRB400 grade steel bars as non-prestressed tendons. The test data about pre-stressed concrete beam, such as the stress of steel strand and non-pre-stressed reinforcement, concrete strain, maximum crack width in short term, mid-span deflection and so forth were analyzed. The results show that the work performance of prestressed concrete beam with large-diameter high-strength steel strands as prestressed reinforcement is well. The flexural failure form and flexural mode of prestressed concrete beam with large-diameter high-strength steel strand is almost same with ordinary pre-stressed concrete beam. The mid-span control section of test beam meets the plane cross-section assumption, and the ultimate bearing capacity can be calculated according to the specification of normal section bending theory. The calculated crack width and deflection of test beam according to current specification agree well with the measured value.

**Key words:** larger-diameter high-strength steel strand; prestressed concrete beam; ultimate bearing capacity; crack width; stiffness

收稿日期:2016-09-26

基金项目:黑龙江省博士后科研启动基金项目(LBH-Q15011);黑龙江省应用技术与开发计划项目(2013G0763)

作者简介:王 钧(1967-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jun. w. 619@163. com.

0 引言

由于中国基础设施的主要结构材料是钢筋混凝土,多年来钢筋和线材一直在建筑用钢消耗中占最大比重。2010 年中国钢筋产量  $1.4\times 10^8$  t,2011 中国钢筋用量已达  $1.67\times 10^8$  t,其中主要以 500 MPa 级以下的中低强钢筋为主,极限强度标准值最高可达 1 860 MPa 甚至 1 960 MPa 的高强预应力钢筋所占比重极小。大直径高强钢绞线抗拉强度高,能够有效控制预应力梁的截面尺寸,充分发挥结构材料性能和节约钢材,符合中国建筑结构节能减排政策。高强钢筋的推广已经成为建筑行业发展的必然趋势,现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[1]</sup>(以下简称《规范》)淘汰了 HPB235 低强度钢筋,新增直径 17.8 mm 的 1860 级高强钢绞线以及 500 MPa 级钢筋,鼓励采用高强钢筋作为受力主导钢筋予以推广应用,走节约型发展道路。

《规范》中虽然加入了直径 17.8 mm 的 1860 级钢绞线,但目前中国建筑中通常应用的钢筋直径大小及强度等级都偏低,对于《规范》提供的抗弯承载力计算公式、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构件需作进一步探讨。鉴于此,本文研究设计制作配有大直径高强钢绞线的预应力混凝土梁试件,分析非预应力钢筋配筋率、跨高比等参数对梁承载力、平均裂缝

间距、短期最大裂缝宽度以及跨中挠度的影响,为大直径高强钢绞线预应力混凝土梁的推广应用提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

共设计 6 根大直径高强钢绞线预应力混凝土梁试件,均采用 C40 混凝土,非预应力纵筋采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用 HPB300 级钢筋,预应力钢筋采用 1860 级、1×7 标准型  $\Phi^s17.8$  低松弛钢绞线,曲线布置,一端张拉后张法施工,张拉控制应力  $\sigma_{con}$  均为  $0.7f_{ptk}$  ( $f_{ptk}$  为预应力钢筋极限抗拉强度标准值),预应力采用低回缩锚具施加,预应力强度比  $\lambda$  为  $0.586\sim 0.797$ ,  $\lambda=f_{pyk}A_p/(f_{yk}A_s+f_{pyk}A_p)$ ,其中  $f_{yk}$ ,  $f_{pyk}$  分别为非预应力受拉钢筋和预应力钢筋屈服强度标准值,  $A_s$ ,  $A_p$  分别为非预应力受拉钢筋和预应力钢筋截面面积。波纹管采用塑料波纹管,内径为 50 mm。试件截面宽度  $b$  为 200 mm,高度  $h$  为 350 mm,跨度为  $L$ ,计算跨度为  $l_0$ ,纵筋保护层厚度均为 30 mm。为保证试件的弯曲破坏,剪跨段进行箍筋加密,具体试件配筋如图 1 所示(图 1 中,  $A'_s$  为受压区纵向钢筋截面面积),详细设计参数如表 1 所示。

1.2 材性试验

在浇筑试验梁时制作立方体标准试块,并与试

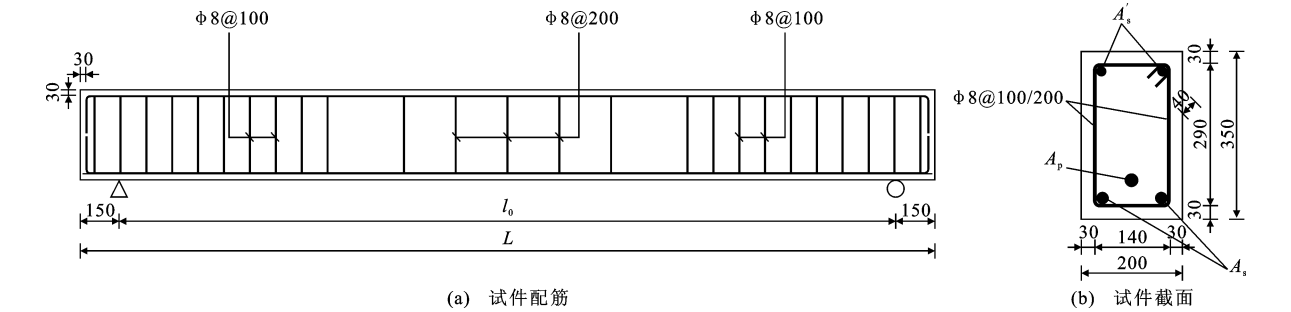


图 1 试件配筋与截面 (单位:mm)  
Fig. 1 Reinforcement and Section of Specimen (Unit:mm)

表 1 试件参数  
Tab. 1 Parameters of Specimens

试件编号	$L/mm$	$l_0/mm$	$l_0/h$	预应力钢筋型号	非预应力受拉钢筋型号	受压区纵筋型号	$\rho_p/\%$	$\rho_s/\%$	$\lambda$	$f_{pyk}/MPa$
PTCB-1	4 500	4 200	12.00	1 $\Phi^s17.8$	2 $\Phi$ 12	2 $\Phi$ 12	0.338	0.369	0.797	1 860
PTCB-2	4 500	4 200	12.00	1 $\Phi^s17.8$	2 $\Phi$ 16	2 $\Phi$ 12	0.333	0.727	0.688	1 860
PTCB-3	4 500	4 200	12.00	1 $\Phi^s17.8$	2 $\Phi$ 20	2 $\Phi$ 12	0.331	1.040	0.585	1 860
PTCB-4	6 000	5 700	16.29	1 $\Phi^s17.8$	2 $\Phi$ 12	2 $\Phi$ 12	0.338	0.369	0.797	1 860
PTCB-5	6 000	5 700	16.29	1 $\Phi^s17.8$	2 $\Phi$ 16	2 $\Phi$ 12	0.333	0.727	0.688	1 860
PTCB-6	6 000	5 700	16.29	1 $\Phi^s17.8$	2 $\Phi$ 20	2 $\Phi$ 12	0.331	1.040	0.586	1 860

注: $\rho_p$  为预应力钢筋配筋率; $\rho_s$  非预应力钢筋配筋率。

验梁同条件养护,养护龄期达到 28 d 时测试立方体标准试块平均抗压强度  $f_{cu}$ ,并根据《规范》计算混凝土轴心抗压强度  $f_c$  和抗拉强度  $f_t$  以及弹性模量  $E_c$ ,具体数值列于表 2。从制作试验梁的同批钢筋和钢绞线中截取试件,做原材料材性试验,得到钢筋和钢绞线的屈服强度  $f_y$ 、极限强度  $f_u$  以及弹性模量  $E_y$ ,见表 3。

表 2 混凝土力学性能参数

Tab. 2 Mechanical Performance Parameters of Concrete				
强度等级	$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_c/\text{MPa}$	$f_t/\text{MPa}$	$E_c/\text{MPa}$
C40	49.8	37.8	3.39	34 500

表 3 钢筋及钢绞线力学性能实测值

Tab. 3 Mechanical Performance Measured Values of Steels and Steel Strand			
材料	$f_y/\text{MPa}$	$f_u/\text{MPa}$	$E_y/\text{MPa}$
HRB400(Φ 12)	432	594	201 000
HRB400(Φ 16)	442	598	201 000
HRB400(Φ 20)	445	615	201 000
1860 级钢绞线 Φ17.8	1 735	1 923	196 300

1.3 试验装置与加载

预应力试验梁的受弯试验采用在三分点处两点集中加载,为防止混凝土局部压碎,在加载点处设宽 150 mm、厚 25 mm 的钢垫板。在梁的侧面与顶面和钢筋以及钢绞线表面贴有应变片,以测量加载过程中应变的变化规律。将位移传感器置于梁的两端支座、跨中以及加载点对应的位置,以测量试验梁挠度随荷载的变化规律。裂缝宽度变化借助裂缝测宽仪测量,观察试验梁的宏观破坏。

采用单调静力分级加载试验方案,在正式加载前先进行预加载,使试件进入正常工作状态,同时检测各仪器、仪表工作情况,然后卸载。在试件开裂前,每级所施加荷载约为  $0.02F_u$  ( $F_u$  为跨中极限荷载),持荷 10 min,以使试件在荷载作用下的变形得到充分发展,同时记录试验现象,测量裂缝宽度,观察裂缝发展,试件开裂后每级所施加的荷载约为  $0.05F_u$ ,试件达到屈服荷载后采用位移控制加载,直到试件破坏。试件加载装置如图 2 所示。

1.4 试验现象

6 根大直径高强钢绞线预应力混凝土梁均为适筋梁,根据各试件的荷载-挠度曲线,可将试件的受力过程大致分为 3 个阶段:第 1 阶段为弹性工作阶段,当荷载小于  $0.3M_u$  ( $M_u$  为极限弯矩实测值)时,试件的荷载-挠度曲线为直线,表现出良好的线弹性;第 2 阶段为带裂缝工作阶段,当弯矩为  $0.3M_u \sim 0.5M_u$  时,在试件纯弯段下边缘出现竖向弯曲微裂



图 2 加载装置

Fig. 2 Loading Device

缝,初始宽度在 0.04 mm 左右,随着荷载的增加,由于钢筋和混凝土的黏结与应力传递,试件下边缘不断出现新的竖向弯曲裂缝,并不断向上延伸,裂缝数量和宽度持续增加,当加载到  $0.57M_u \sim 0.8M_u$  时,试件纯弯段裂缝基本出全,随着荷载的继续增加,裂缝宽度不断扩大,高度不断延伸;第 3 阶段为破坏阶段,当荷载大于  $0.8M_u$  时,试件纵筋屈服,挠度急剧增加,并伴随有混凝土崩裂的声音,新裂缝不再出现,纯弯段裂缝继续向上扩展,当达到极限弯矩时,纯弯段受压区混凝土在受压纵筋位置出现水平裂缝,最终受压区混凝土被压碎,试验梁破坏。试验梁 PTCB-5 破坏形态见图 3。



(a) 整体



(b) 局部

图 3 试验梁 PTCB-5 弯曲破坏形态

Fig. 3 Flexural Failure Modes of Test Beam PTCB-5

1.5 试验结果

各试验梁实测开裂荷载  $F_{cr}$ 、极限荷载  $F_u$  见表 4,各试验梁荷载-挠度曲线见图 4,试验梁 PTCB-1

表 4 开裂荷载和极限荷载实测值

Tab. 4 Measured Values of Cracking Load and Ultimate Load

试件编号	PTCB-1	PTCB-2	PTCB-3	PTCB-4	PTCB-5	PTCB-6
$F_{cr}/\text{kN}$	76	62	57	53	45	55
$F_u/\text{kN}$	158	177	219	102	130	145

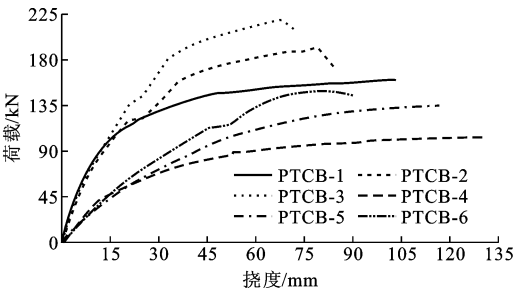


图 4 试验梁荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection Cures of Test Beams

的钢筋和钢绞线荷载-应变增量曲线见图 5。

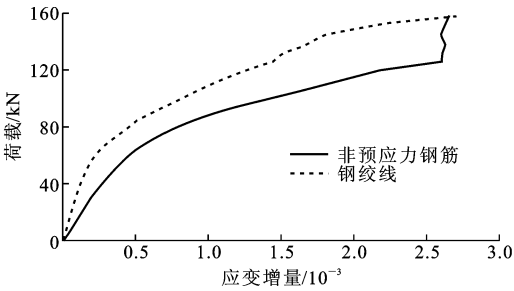


图 5 试验梁 PTCB-1 跨中截面受拉纵筋、钢绞线荷载-应变增量曲线

Fig. 5 Load-strain Increment Curves of Longitudinal Tensile Reinforcement and Steel Strand at Mid-span Section of Test Beam PTCB-1

从表 4 和图 5、6 可知：在试验梁纵向受拉钢筋屈服前，荷载-挠度曲线呈线性增长趋势，屈服后位移增加加快；试验梁的跨高比  $l_0/h$  越小，其开裂荷载、屈服荷载和极限荷载呈增长趋势；当跨高比  $l_0/h$  不变时，试验梁的非预应力钢筋配筋率越小，其开裂荷载、屈服荷载和极限荷载呈减小趋势。由参考文献[1]中数据可知，大直径高强钢绞线相对于常规直径钢绞线（直径为 15.2 mm）其承载能力提高 30% 左右，因此在试验梁加载过程中，大直径高强钢绞线在试验梁出现裂缝后能够持续承受较大的荷载，进而能够减缓非预应力钢筋进入屈服阶段，达到改善构件延性性能的目的；大直径高强钢绞线与试验梁协同工作良好，由参考文献[1]中数据可知，大直径高强钢绞线预应力混凝土梁承载力较配置常规直径钢绞线（直径为 15.2 mm）的试验梁承载力提高

13% 左右，同时构件破坏前有明显预兆，纯弯段受压区混凝土在受压钢筋位置附近出现水平细小裂纹，最终受压区混凝土被压碎。

2 正截面受弯承载力计算

2.1 基本假定

2.1.1 梁跨中控制截面应变分布

以试验梁 PTCB-3 为例，各级荷载  $F_N$  作用下梁跨中控制截面的应变分布如图 6 所示。从图 6 可知：试验梁跨中控制截面应变沿梁高基本符合平截面假定；随着荷载增加，跨中控制截面中和轴的位置应变变化不明显。

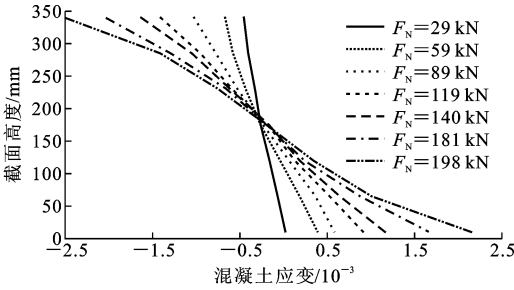


图 6 试验梁 PTCB-3 跨中控制截面应变分布

Fig. 6 Strain Distributions at Mid-span Control Section of Test Beam PTCB-3

2.1.2 混凝土应力-应变关系

当  $\epsilon_c \leq \epsilon_0$  ( $\epsilon_c$  为混凝土压应变,  $\epsilon_0$  为混凝土压应力达到  $f_c$  时的压应变,  $\epsilon_0 \geq 0.002$ ) 时(上升段), 有

$$\sigma_c = f_c [1 - (1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0})^n] \tag{1}$$

式中:  $\sigma_c$  为混凝土压应变为  $\epsilon_c$  时的混凝土压应力。

当  $\epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$  ( $\epsilon_{cu}$  为正截面混凝土极限压应变,  $\epsilon_{cu} \leq 0.0033$ ) 时(水平段), 有

$$\sigma_c = f_c \tag{2}$$

$$n = 2 - \frac{1}{60} (f_{cu,k} - 50) \tag{3}$$

$$\epsilon_0 = 0.002 + 0.5 (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \tag{4}$$

式中:  $n$  不大于 2;  $f_{cu,k}$  为立方体抗压强度实测值。

混凝土应力-应变关系如图 7 所示。

2.1.3 非预应力钢筋应力-应变关系

当  $\epsilon_s \leq \epsilon_y$  ( $\epsilon_s$  为非预应力钢筋拉应变,  $\epsilon_y$  为非预应力钢筋拉应力达到屈服强度  $f_y$  时的拉应变) 时(上升段), 有

$$\sigma_s = \epsilon_s E_s \tag{5}$$

式中:  $E_s$  为钢筋弹性模量实测值;  $\sigma_s$  为非预应力钢筋拉应变为  $\epsilon_s$  时的非预应力钢筋拉应力。

当  $\epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$  ( $\epsilon_{su}$  为非预应力钢筋极限拉应变,

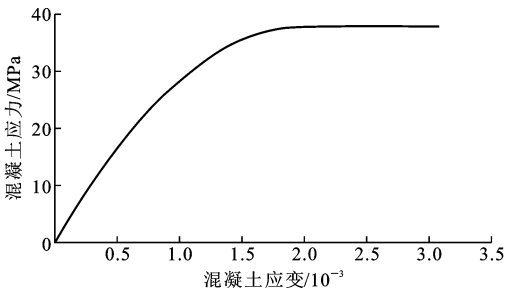


图 7 混凝土应力-应变关系

Fig. 7 Stress-strain Relationship of Concrete

$\epsilon_{su}=0.01, \epsilon_y=f_y/E_s$ 时(水平段),有

$$\sigma_s=f_y \tag{6}$$

钢筋应力-应变关系如图 8 所示。

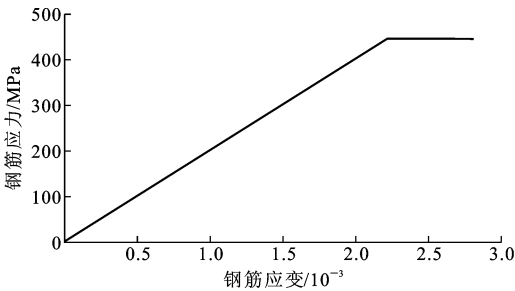


图 8 钢筋应力-应变关系

Fig. 8 Stress-strain Relationship of Steel Bar

2.1.4 钢绞线应力-应变关系

当  $\epsilon_p \leq \epsilon_{py}$  ( $\epsilon_p$  为钢绞线拉应变,  $\epsilon_{py}$  为钢绞线拉应力达到钢绞线实测名义屈服强度  $f_{py}$  时的拉应变) 时(上升段),有

$$\sigma_p = \epsilon_p E_p \tag{7}$$

式中:  $\sigma_p$  为钢绞线拉应力;  $E_p$  为钢绞线弹性模量实测值。

当  $\epsilon_{py} < \epsilon_p \leq \epsilon_{pu}$  ( $\epsilon_{pu}$  为钢绞线极限拉应变,  $\epsilon_{pu} = 0.01$ ) 时(水平段),有

$$\sigma_p = f_{py} \tag{8}$$

式中:  $f_{py} = 1\,735\text{ MPa}$ 。

钢绞线应力-应变关系如图 9 所示。

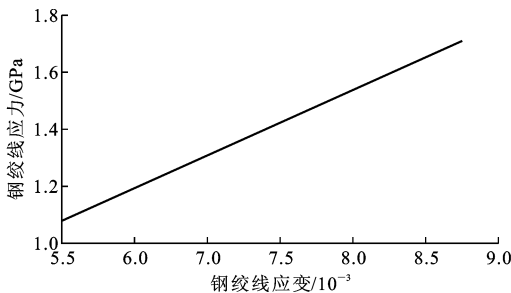


图 9 钢绞线应力-应变关系

Fig. 9 Stress-strain Relationship of Steel Strand

综上所述,试验梁的正截面计算符合《规范》规定的基本假定。

2.2 正截面受弯承载力计算

依据试验统计结果和跨中截面满足平截面假定,大直径高强钢绞线预应力混凝土梁抗弯性能与一般预应力混凝土梁基本相同。大直径高强钢绞线预应力混凝土适筋梁正截面破坏状态以受压区混凝土被压碎和受拉钢筋屈服为标志,其正截面受弯承载力仍可采用《规范》中正截面理论建立的公式计算。式(9)依据跨中截面内对受压钢筋位置弯矩平衡建立,式(10)依据跨中截面内力平衡建立<sup>[2-10]</sup>。

$$M \leq f_y A_s (h_0 - a'_s) + \sigma_{py} A_p (h_p - a'_s) -$$

$$\alpha_1 f_c b x \left( \frac{x}{2} - a'_s \right) \tag{9}$$

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s + f_{py} A_p - f'_y A'_s \tag{10}$$

式中:  $\alpha_1$  为系数,取值为 1.0;  $h_p$  为预应力钢筋合力点至截面受压边缘的距离;  $M$  为试验梁截面弯矩;  $f'_y$  为受压区钢筋抗压强度设计值;  $h_0$  为截面有效高度;  $a'_s$  为受压纵筋合力点至截面受压边缘的距离;  $x$  为混凝土受压区高度;  $\sigma_{py}$  为受拉区钢绞线抗拉屈服强度实测平均值。

试验梁极限承载力实测值  $F_u^t$  与计算值  $F_u^c$  对比结果见表 5。

表 5 极限承载力实测值与计算值对比

Tab. 5 Comparison of Measured and Calculated Values of Ultimate Carrying Capacity						
试件编号	PTCB-1	PTCB-2	PTCB-3	PTCB-4	PTCB-5	PTCB-6
$F_u^t/\text{kN}$	158	177	219	102	130	145
$F_u^c/\text{kN}$	135	168	207	100	123	152
$F_u^t/F_u^c$	1.170	1.054	1.058	1.020	1.057	0.954

参考文献[9],得到直线型布置大直径高强钢绞线预应力梁的承载力实测值与计算值,见表 6。

表 6 根据文献[9]得到的极限承载力实测值与计算值

Tab. 6 Measured and Calculated Values of Ultimate Carrying Capacity Based on Reference [9]			
试件编号	PTCB-1	PTCB-2	PTCB-3
$F_u^t/\text{kN}$	183	186	174
$F_u^c/\text{kN}$	168	168	168
$F_u^t/F_u^c$	1.089	1.107	1.036

由表 5、6 可知,试验梁正截面承载力实测值与计算值之比的平均值为 1.061,标准差为 0.056 4,变异系数为 0.053 2。可见,大直径高强钢绞线预应力混凝土梁正截面承载力可按照现行规范公式进行计算。

3 裂缝宽度计算

3.1 平均裂缝间距计算

大直径高强钢绞线预应力混凝土梁的平均裂缝间距  $l_{cr}$  按照《规范》给出的公式计算<sup>[11-13]</sup>, 即

$$l_{cr}=1.9c_s+0.08\frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \tag{11}$$

$$d_{eq}=\frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \tag{12}$$

$$\rho_{te}=(A_s+A_p)/(0.5bh) \tag{13}$$

式中:  $d_i$  为受拉区第  $i$  种钢筋的公称直径;  $n_i$  为受拉区第  $i$  种钢筋的根数, 对于有黏结预应力钢绞线, 取钢绞线束数;  $c_s$  为最外层纵向受拉钢筋外边缘至混凝土受拉区底边的距离;  $d_{eq}$  为受拉区纵向普通钢筋和钢绞线的等效直径;  $\rho_{te}$  为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率;  $v_i$  为受拉区第  $i$  种钢筋的相对黏结特性系数, 带肋钢筋  $v_i=1.0$ , 后张法预应力钢绞线  $v_i=0.5$ 。

试验梁平均裂缝间距实测值  $l_{cr}^t$  与计算值  $l_{cr}^c$  对比结果见表 7。

表 7 平均裂缝间距实测值与计算值对比  
Tab. 7 Comparison of Measured and Calculated Values of Average Crack Spacing

试件编号	PTCB-1	PTCB-2	PTCB-3	PTCB-4	PTCB-5	PTCB-6
$l_{cr}^t/\text{mm}$	187.92	167.04	157.86	195.60	167.79	148.53
$l_{cr}^c/\text{mm}$	195.76	168.11	150.29	195.76	168.11	150.29
$l_{cr}^t/l_{cr}^c$	0.960	0.994	1.050	0.999	0.998	0.988

由表 7 可知, 本文试验 6 根大直径高强钢绞线预应力混凝土简支梁平均裂缝间距实测值与计算值之比的平均值为 0.998, 标准差为 0.026 7, 变异系数为 0.026 8。可见, 大直径高强钢绞线预应力混凝土梁平均裂缝间距按照现行规范公式计算具有较高的精确度。

3.2 最大裂缝宽度计算

试验梁最大裂缝宽度按照《规范》规定的方法进行计算, 由于试验是在短期荷载作用下完成, 所以最大裂缝宽度计算不考虑长期荷载的影响, 在确定了平均裂缝间距计算公式后, 大直径高强钢绞线预应力混凝土简支梁纯弯段纵向受拉钢筋水平位置处最大裂缝宽度  $\omega_{max}$  计算公式如下<sup>[13-16]</sup>

$$\omega_{max}=\tau_s\omega_m \tag{14}$$

$$\omega_m=\alpha_c\Psi\frac{\sigma_s}{E_s}l_{cr} \tag{15}$$

$$\Psi=1.1-0.65\frac{f_{tk}}{\rho_{te}\sigma_s} \tag{16}$$

式中:  $f_{tk}$  为混凝土抗拉强度标准值;  $\tau_s$  为短期裂缝宽度扩大系数, 取  $\tau_s=1.66$ ;  $\alpha_c$  为裂缝间混凝土自身伸长对裂缝宽度的影响系数, 对于受弯构件统一取  $\alpha_c=0.77$ ;  $\Psi$  为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均系数,  $0.2\leq\Psi\leq1.0$ 。

预应力混凝土构件受拉区纵向钢筋的等效应力  $\sigma_s$  为

$$\sigma_s=\frac{M_k-N_{p0}(z-e_p)}{(A_p+A_s)z} \tag{17}$$

式中:  $M_k$  为按荷载标准组合计算的弯矩值;  $N_{p0}$  为计算截面上混凝土法向预应力等于 0 时的预加力;  $z$  为受拉区纵向普通钢筋和预应力钢筋合力点至截面受压区合力点的距离;  $e_p$  为计算截面上混凝土法向预应力等于 0 时预加力  $N_{p0}$  作用点至受拉区纵向预应力钢筋和普通钢筋合力点的距离。

综上所述, 大直径高强钢绞线预应力混凝土梁短期最大裂缝宽度计算公式为

$$\omega_{max}=\tau_s\alpha_c\Psi\frac{\sigma_s}{E_s}(1.9c_s+0.08\frac{d_{eq}}{\rho_{te}}) \tag{18}$$

采用上述计算公式, 试验梁最大裂缝宽度实测值  $\omega_{max}^t$  与计算值  $\omega_{max}^c$  对比结果见表 8。

表 8 最大裂缝宽度实测值与计算值对比  
Tab. 8 Comparison of Measured and Calculated Values of Maximum Crack Widths

试件编号	$F/F_u$	$\omega_{max}^t/\text{mm}$	$\omega_{max}^c/\text{mm}$	$\omega_{max}^t/\omega_{max}^c$
PTCB-1	0.633	0.22	0.231	0.952
PTCB-2	0.588	0.22	0.233	0.944
PTCB-3	0.521	0.21	0.200	1.050
PTCB-4	0.715	0.20	0.195	1.026
PTCB-5	0.615	0.21	0.200	1.050
PTCB-6	0.634	0.20	0.201	0.995

注:  $F$  为达到最大裂缝宽度  $\omega_{max}^t$  时试验梁的承载力实测值。

由表 8 可知, 大直径高强钢绞线预应力混凝土简支梁正常使用极限状态下, 最大裂缝宽度实测值与计算值之比的平均值为 1.003, 标准差为 0.043 0, 变异系数为 0.042 9。试验梁最大裂缝宽度实测值与计算值平均相对误差为 3.91%, 可知大直径高强钢绞线预应力混凝土梁最大裂缝宽度按照现行规范公式计算是可靠的。

4 跨中挠度计算

在满足跨中平截面假定的基础上, 由结构力学计算方法得出大直径高强钢绞线预应力混凝土简支梁跨中挠度  $f$  的计算公式为

$$f=S\frac{M_kJ_0^2}{B_s} \tag{19}$$

式中: $S$  为与支撑条件、荷载形式有关的挠度系数,按照试验的加载方式,计算得出  $S=0.1065$ ;  $B_s$  为试验梁的短期刚度。

试验梁短期刚度  $B_s$  按照《规范》中允许出现裂缝的预应力混凝土受弯构件短期刚度计算公式进行计算<sup>[16-19]</sup>,即

$$B_s=\frac{0.85E_cI_0}{\kappa_{cr}+(1-\kappa_{cr})\omega}$$

(20)

$$\kappa_{cr}=\frac{M_{cr}}{M_k}$$

(21)

$$\omega=1.0+\frac{0.21}{\alpha_E\rho}-0.7$$

(22)

式中: $\omega$  为刚度降低系数;  $I_0$  为试验梁换算截面惯性矩;  $M_{cr}$  为预应力混凝土受弯构件正截面的开裂弯矩;  $\kappa_{cr}$  为  $M_{cr}$  与  $M_k$  的比值,当  $\kappa_{cr}>1.0$  时,取  $\kappa_{cr}=1.0$ ;  $\alpha_E$  为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值;  $\rho$  为纵向受拉钢筋配筋率,对于后张灌浆预应力混凝土受弯构件,  $\rho=(A_p+A_s)/(bh_0)$ 。

试验梁正常使用极限状态下,取  $F=0.6F_u$  时,跨中挠度实测值  $l_t$  与计算值  $l_c$  对比结果见表 9。

表 9 短期跨中挠度实测值与计算值对比  
Tab. 9 Comparison of Measured and Calculated Values of Short-term Mid-span Deflections

试件编号	PTCB-1	PTCB-2	PTCB-3	PTCB-4	PTCB-5	PTCB-6
$l_t/\text{mm}$	14.11	16.69	19.92	22.98	30.93	31.92
$l_c/\text{mm}$	14.59	16.45	18.90	20.49	29.95	30.00
$l_t/l_c$	0.967	1.015	1.054	1.122	1.033	1.064

由表 9 可知,大直径高强钢绞线预应力混凝土简支梁在  $F=0.6F_u$  时跨中挠度实测值与计算值之比的平均值为 1.042,标准差为 0.047 4,变异系数为 0.045 5。试验梁跨中挠度实测值与计算值的平均相对误差为 5.35%,可知大直径高强钢绞线预应力混凝土梁的短期刚度及跨中挠度可按照现行规范规定的公式进行计算。

5 结 语

(1)大直径高强钢绞线预应力混凝土梁具有较高的承载力,试验梁破坏前,纯弯段受压区混凝土在受压钢筋位置附近出现水平裂缝,最终该处混凝土被压碎,有明显的预兆。

(2)在试验梁开裂前,荷载-挠度曲线呈线性增长趋势,开裂后屈服前,试验梁挠度增加相对开裂前较快,荷载增加相对开裂前较慢,试验梁屈服后挠度增加较快,荷载增加缓慢。

(3)大直径高强钢绞线预应力混凝土梁跨中正

截面符合平截面假定,可按照现行规范抗弯理论计算公式计算其跨中正截面承载力。

(4)按照现行规范中的正常使用阶段裂缝宽度计算理论及抗弯刚度计算理论,计算大直径高强钢绞线预应力混凝土梁的裂缝宽度和跨中挠度,其计算值与实测值吻合较好。

参考文献:  
References:

[ 1 ] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010,Code for Design of Concrete Structures[S].

[ 2 ] 程东辉,俞永志,董志鹏.无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁力学性能[J].建筑科学与工程学报,2016,33(1):30-37.  
CHENG Dong-hui, YU Yong-zhi, DONG Zhi-peng. Mechanical Properties of Unbonded Prestressed Recycled Coarse Aggregate Concrete Beam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 30-37.

[ 3 ] 杜毛毛.配 500 MPa 钢筋后张有粘结预应力混凝土梁受弯性能研究[D].上海:同济大学,2010.  
DU Mao-mao. Flexural Behavior of Post-tensioned Bonded Prestressed Concrete Beams with 500 MPa Steel Bars[D]. Shanghai: Tongji University, 2010.

[ 4 ] 杨 剑,方 志.超高性能混凝土梁正截面承载力[J].中国铁道科学,2009,30(2):23-30.  
YANG Jian, FANG Zhi. Normal Section Bearing Capacity of Ultra High Performance Concrete Beam[J]. China Railway Science, 2009, 30(2): 23-30.

[ 5 ] SHIN K J, LIM J H, OH Y S, et al. An Experimental Study on the Flexural Behaviour of RC Beams Strengthened with High-strength Bars[J]. Magazine of Concrete Research, 2007, 59(7): 469-481.

[ 6 ] MAST R F, DAWOOD M, RIZKALLA S H, et al. Flexural Strength Design of Concrete Beams Reinforced with High-strength Steel Bars[J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(5): 570-577.

[ 7 ] 孟 刚,贾金青,王吉忠.预应力超高强混凝土简支梁抗弯性能分析[J].哈尔滨工程大学学报,2013,34(5):575-580.  
MENG Gang, JIA Jin-qing, WANG Ji-zhong. Study on Flexural Behavior of Prestressed Ultra-high Strength Concrete Beams[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(5): 575-580.

[ 8 ] 张利梅.高效预应力混凝土梁受力性能及延性研究[D].大连:大连理工大学,2004.  
ZHANG Li-mei. Investigation of Performance Under



- Loads and Ductility of Prestressed High Strength Concrete Beams [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [9] 栾奕. 大直径高强钢绞线与混凝土粘结锚固性能试验研究与分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- LUAN Yi. Experiment and Analysis of Bond-anchorage Properties of Large-diameter High-strength Steel Strand and Concrete [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.
- [10] 王钧, 邬丹, 郑文忠. 预应力 H 型钢混凝土简支梁正截面受力性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(6): 22-27.
- WANG Jun, WU Dan, ZHENG Wen-zhong. Experimental Research on Flexural Mechanical Behavior of Simple Prestressed H-steel Reinforced Concrete Beam [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(6): 22-27.
- [11] PADMARAJIAH S K, RAMASWAMY A. Crack-width Prediction for High-strength Concrete Fully and Partially Prestressed Beam Specimens Containing Steel Fibers[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(6): 852-861.
- [12] 赵勇, 王晓锋, 程志军, 等. 高强钢筋混凝土梁短期裂缝计算方法评析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 50-57.
- ZHAO Yong, WANG Xiao-feng, CHENG Zhi-jun, et al. Calculational Method for Short-term Crack of Reinforced Concrete Beams with High-strength Steel Bars[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(1): 50-57.
- [13] 张利梅, 赵顺波, 黄承逵. 预应力高强混凝土梁抗裂度和裂缝宽度试验研究[J]. 建筑结构, 2004, 34(8): 45-48.
- ZHANG Li-mei, ZHAO Shun-bo, HUANG Cheng-kui. Experimental Study on Cracking Strength and Crack Width of Prestressed High-strength Concrete Beams[J]. Building Structure, 2004, 34(8): 45-48.
- [14] 高瑞平, 邱洪兴, 胡涛, 等. HRB500 级钢筋混凝土梁裂缝宽度试验研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(3): 66-70.
- GAO Rui-ping, QIU Hong-xing, HU Tao, et al. Experimental Research on Crack Width of HRB500 Steel Bars RC Beams [J]. Industrial Construction, 2010, 40(3): 66-70.
- [15] 金伟良, 陆春华, 王海龙, 等. 500 级高强钢筋混凝土梁裂缝宽度试验及计算方法探讨[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3): 16-23.
- JIN Wei-liang, LU Chun-hua, WANG Hai-long, et al. Experiment and Calculation of Crack Width of Reinforced Concrete Beams with 500 MPa Steel Bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(3): 16-23.
- [16] 易伟建, 杨晓, 李琼. HRB500 级钢筋混凝土梁裂缝与变形性能试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(8): 110-114.
- YI Wei-jian, YANG Xiao, LI Qiong. Experimental Study on Crack and Flexural Behavior of Full Scale Reinforced Concrete Beams with HRB500 Steel Bars [J]. Building Structure, 2011, 41(8): 110-114.
- [17] 周建民, 陈硕, 王晓锋, 等. 高强钢筋混凝土梁短期变形计算方法研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(4): 503-509.
- ZHOU Jian-min, CHEN Shuo, WANG Xiao-feng, et al. Calculation Methods of Short-term Deformation of Concrete Beams with High Strength Steel Bars [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(4): 503-509.
- [18] 朱虹, 董志强, 吴刚, 等. FRP 筋混凝土梁的刚度试验研究和理论计算[J]. 土木工程学报, 2015, 48(11): 44-53.
- ZHU Hong, DONG Zhi-qiang, WU Gang, et al. Experimental Study and Theoretical Calculation on the Flexural Stiffness of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(11): 44-53.
- [19] 周建民, 董理. 配置高强钢筋混凝土梁抗弯刚度的研究[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2010, 28(6): 842-848.
- ZHOU Jian-min, DONG Li. A Research on Stiffness of Concrete Members Reinforced by High Strength Rebars [J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2010, 28(6): 842-848.