

文章编号: 1002-0268 (2011) 01-0056-06

缓粘结部分预应力混凝土 T 梁 裂缝宽度的试验研究

周先雁, 冯 新

(中南林业科技大学 土木工程与力学学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为了研究缓粘结预应力混凝土构件的受力性能和使用性能, 采用 2 种不同的方式制作了缓粘结预应力筋, 即采用增强纤维塑料布缠绕的方式和 PVC 塑料管灌浆的方式, 并对 3 根缓粘结部分预应力混凝土 T 梁进行了试验研究和理论分析, 得到了试验梁在荷载作用下的裂缝发展和分布规律, 以及荷载与最大裂缝宽度之间的关系。在试验研究的基础上, 结合裂缝宽度的影响因素、试验梁的特性和国家现行标准规范, 建立了缓粘结部分预应力混凝土梁最大裂缝宽度的计算公式, 且计算结果与试验结果吻合较好。

关键词: 桥梁工程; 部分预应力混凝土 T 梁; 试验研究; 缓粘结

中图分类号: TU448.35; TU378.8

文献标识码: A

Experimental Research on Crack Width of Retard-bonded Partially Prestressed Concrete T-beams

ZHOU Xianyan, FENG Xin

(College of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha Hunan 410004, China)

Abstract: In order to research mechanical behavior and service property of retard-bonded prestressed concrete members, retard-bonded prestressed strands were made in two ways (the prestressed tendons wrapped with reinforced fiber plastic films and the PVC plastic pipe with grouting). Experimental research and theoretical analysis of three retard-bonded partially prestressed concrete T-beams were carried out to obtain the crack propagation and distribution pattern as well as the relationship between load and maximum crack width under static loadings. Based on the experiment results, considering the effect factors of crack width, the characteristic of test beams and national current specification, the calculation formulas of the maximum crack width of retard-bonded partially prestressed concrete beams under static loading were proposed, and the calculated results are identical with the test results.

Key words: bridge engineering; partially prestressed concrete T-beam; experimental research; retard-bond

0 引言

预应力混凝土的出现是混凝土技术的一次飞跃, 根据施工工艺不同, 后张法预应力混凝土分为无粘结和有粘结 2 种预应力体系。缓粘结预应力混凝土是近 20 年出现的一种新型的预应力体系, 它把有粘

结和无粘结预应力混凝土结合起来, 扬长避短, 即无须预留孔道, 无须灌浆, 施工时与无粘结预应力体系一样, 施工完成后, 包裹在预应力筋周围的缓凝材料缓慢凝结硬化, 最终达到与有粘结预应力体系相同的效果。它实现了施工简便, 抗震性能较好, 结构安全可靠的统一, 是一种新型独特的预应力形

式^[1-2]。对于允许出现裂缝的预应力混凝土结构, 控制裂缝的开展宽度是部分预应力混凝土结构设计中重要内容, 因为裂缝超过一定宽度时, 会给结构带来严重的安全隐患, 在易腐蚀的恶劣环境中, 控制裂缝数量和宽度显得更为重要^[3-7]。国内外对预应力混凝土构件的裂缝宽度进行了一定的研究, 但尚不充分, 特别是缓粘结部分预应力混凝土梁裂缝宽度的试验研究在国内外鲜见报道。因此, 本文通过自行研制缓凝砂浆, 采用 2 种不同的方式制作了缓粘结预应力筋, 其中, 一种采用增强纤维塑料布缠绕的方式, 另一种采用 PVC 塑料管以灌浆的方式。本文并对 3 根缓粘结部分预应力混凝土梁进行了裂缝宽度的试验研究。

1 试验设计

本文共制作了 3 根缓粘结预应力混凝土梁, 试验梁采用相同的截面尺寸以及相同的混凝土配合比, 其基本情况如表 1 所示。试验梁编号中, 第 1 个字母 R 表示缓粘结预应力混凝土梁; 第 2 个字母表示预应力筋的配置方式, C 表示钢绞线为曲线形式, S 表示钢绞线为直线形式; 第 3 个字母表示缓粘结预应力筋的制作方式, C 表示缠绕, G 表示灌浆。

表 1 试验梁的详细配筋情况

Tab. 1 Prestressed strands for beam specimens

试验梁编号	配筋情况/mm			备注
	钢绞线	HRB335	PPR	
RC-C	1 根(1×7)	3φ12	0.63	曲线配置钢绞线
RC-G	1 根(1×7)	3φ12	0.63	
RS-G	1 根(1×7)	3φ12	0.63	直线配置钢绞线

(1) PPR 为试验梁的预应力度:

$$PPR = M_p / M_u,$$

其中, $M_u = A_p f_{py} (h_p - x/2) + A_s f_y (h_s - x/2)$,

$$M_p = A_p f_{py} (h_p - x/2),$$

式中, A_p 和 A_s 分别为预应力钢绞线和普通受拉钢筋的面积; f_{py} 和 f_y 分别为预应力钢绞线抗拉强度和钢筋屈服强度。

(2) 曲线布筋方程为:

$$y = 2.6839 \times 10^{-5} x^2 - 0.14684x + 250.$$

试验梁全长 6.2 m, 计算跨度为 6 m, 跨高比为 15:1。通过手工的方式制成了 3 根缓粘结预应力筋, 每根长约 7.0 m, 布筋形式既有直线布筋也有曲线布筋。预应力筋采用 1860 级的 7 股标准钢绞线, 普通受力钢筋采用 HRB335 级钢筋, 箍筋和架力筋均为直径 6 mm 的 HPB235 级钢筋, 箍筋在纯弯段内的间

距为 200 mm, 在其他区段内的间距为 100 mm, 梁端支座 200 mm 区段内, 箍筋加密, 间距为 50 mm, 钢筋的净保护层厚度为 15 mm。试验所用钢筋的实测力学性能详见表 2。预应力筋的张拉控制应力取为 $0.75f_{pk}$, 钢筋应变片布置在加载点和跨中截面处钢筋下表面。试验梁的加载装置、外形尺寸以及配筋情况详见图 1 和图 2, 其中试验梁中钢绞线曲线配置的形式详见图 3。为了满足锚固端局部抗压要求, 在锚固端和张拉端放置 15 mm 厚的钢垫板, 为了防止混凝土局部压碎, 在试验梁支座和加载点处放置了 10 mm 厚的钢垫板。

表 2 钢筋的实测力学性能

Tab. 2 Experimental mechanical behaviour of steels

钢筋种类	公称直径/mm	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	伸长率/%	弹性模量 E /GPa
钢绞线	15.20	-	1 860.0	5.6	195
HRB335	12.0	371.7	559.6	22.3	198
HPB235	8.0	332.3	476.3	35.2	212
	6.0	301.4	452.0	37.5	210

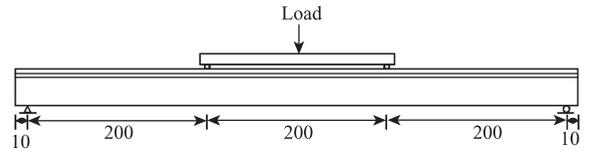


图 1 试件外形尺寸及加载简图 (单位: cm)

Fig. 1 Beam dimensions and loading (unit: cm)

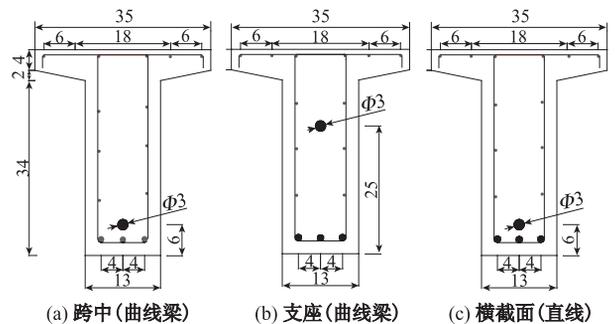


图 2 截面尺寸和配筋图 (单位: cm)

Fig. 2 Section dimensions and layout of prestressed strands (unit: cm)

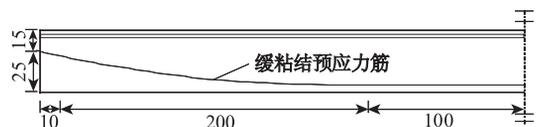


图 3 曲线布筋图 (单位: cm)

Fig. 3 Layout of curved prestressed strands (unit: cm)

缓粘结部分预应力混凝土梁所用混凝土强度为 C50，配合比为：水：水泥：砂：碎石：高效减水剂 = 174.8：460：700：1 050：4.6 kg。混凝土的力学性能详见表 3。

表 3 混凝土实测力学性能指标

Tab. 3 Measured mechanical properties of concrete

龄期/d	抗压强度平均值 f_{cu}/MPa	轴心抗压强度 f_c/MPa	弹性模量 $E_c/$ ($\times 10^4 \text{ MPa}$)
9	48.67	-	-
28	59.87	47.42	3.92
90	65.23	54.46	4.11

2 试验结果分析

2.1 裂缝分布

在试验过程中，随着荷载的增加至开裂荷载，试验梁纯弯段梁底首先出现第一批裂缝，一般有 1 ~ 3 条，此时裂缝宽度微小。当荷载继续增加，裂缝的数量开始增加且长度向上延伸，裂缝宽度也逐渐增加。当梁处于卸载过程时，已开展的裂缝减小，微裂缝甚至基本闭合。3 根缓粘结预应力混凝土试验梁在钢筋屈服时的裂缝平均间距在 92 ~ 101 mm 之间，缓粘结部分预应力混凝土试验梁由于预应力筋的约束作用，裂缝数量在体内非预应力钢筋屈服后基本稳定，随着荷载的增加，几条主裂缝基本同时发展，这明显与无粘结预应力混凝土梁不同（裂缝一旦出现，随着荷载的增加，一条主裂缝迅速发展，直至梁被破坏），它与有粘结预应力混凝土梁极其相似。这说明缓粘结预应力筋与周围混凝土有着较好的粘

结作用。试验梁在极限状态时的裂缝分布如图 4 所示。

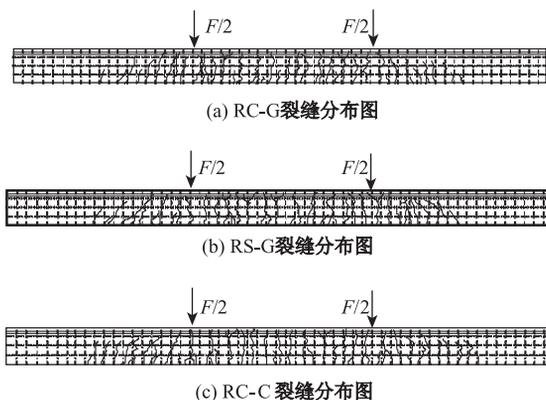


图 4 极限状态时试验梁裂缝分布

Fig. 4 Fracture distribution of test beams in limit state

2.2 荷载与裂缝宽度的关系

本试验采用三分点分级加载，在试验梁开裂后的每级荷载完成时暂停 30 min，用 50 倍光学显微镜和裂缝对比卡相结合的方法测量裂缝的宽度。试验研究发现，试验梁的开裂弯矩主要与有效预应力有关，有效预应力越大，开裂弯矩越大，反之则开裂弯矩越小。裂缝闭合弯矩与裂缝曾经开展的宽度、消压弯矩、裂面接触效应以及持荷时间有关，裂缝曾经开展的宽度越大，裂面接触效应产生的混凝土压应力越大，持荷时间越长，裂缝越难闭合，闭合弯矩越小，反之则裂缝闭合弯矩越大。通过 3 根缓粘结部分预应力混凝土梁裂缝闭合性能的试验研究，得到裂缝闭合平均应力为 2.96 MPa。试验梁加载至开裂到裂缝闭合整个过程中典型的弯矩 - 最大裂缝宽度曲线如图 5 所示。

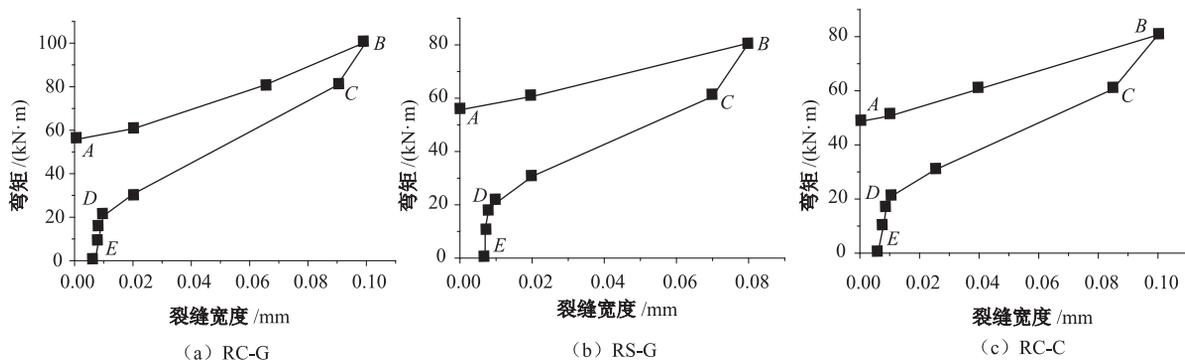


图 5 试验梁弯矩 - 最大裂缝宽度曲线

Fig. 5 Bending moment-maximum crack width curve of test beams

由图 5 可以看出，试验梁加载时的弯矩 - 最大裂缝宽度曲线近似一条直线段 AB，荷载与裂缝宽度大致呈线性关系；卸载时的弯矩 - 最大裂缝宽度曲线近似由 3 条直线段组成，卸载初始阶段为短直线

段 BC，斜率较大，荷载下降时裂缝宽度减小并不多，这主要是由于混凝土应变的滞后引起的；第 2 阶段为较长近似直线段 CD，裂缝宽度随荷载卸载量的增加而线性减小；当裂缝减小到某一宽度 (0 ~

0.01 mm) 时, 即使继续卸载裂缝的宽度变化也很小, 此阶段弯矩 - 最大裂缝宽度曲线为近似垂直于横轴的一直线段 DE 。故直线段 CD 与直线段 DE 的交点即为裂缝闭合点。

3 最大裂缝宽度计算公式的修正

3.1 裂缝宽度的影响因素

从国内外已有的试验研究表明, 影响裂缝宽度的主要因素有: 受拉钢筋应力 σ_{ss} 、受拉钢筋直径 d 、配筋率 ρ 、保护层厚度 c 、混凝土标号 (或抗拉强度)、钢筋粘结特征以及构件的受力特征等^[8-9]。参考现行国家标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)^[10]中最大裂缝宽度计算公式, 本文不考虑保护层厚度的影响, 对于混合配筋的部分预应力混凝土梁, 这些组合钢筋的粘结特征不同, 特别是缓粘结部分预应力混凝土梁, 缓粘结预应力筋与一般的钢绞线又不相同, 所以需要对其表面形状系数进行修正。考虑到缓粘结预应力混凝土梁的特性, 它在混凝土浇注和预应力筋张拉时与后张法无粘结预应力混凝土梁极为相似, 等待缓凝砂浆凝结硬化并达到一定的强度后, 它的受力性能又和后张法有粘结预应力混凝土梁基本相同, 所以对缓粘结预应力筋的表面形状系数暂取为 1.4。根据缓粘结部分预应力混凝土梁的受力性质, 缓粘结预应力筋所施加的预应力是偏心作用的长期荷载, 并且离校核截面的中性轴有一定的距离, 这种情况对于控制梁底的裂缝开展是有利的, 因此本文对规范中最大裂缝宽度计算公式的参数 C_3 进行修正, C_3 暂取为 0.8。

3.2 纵向受拉钢筋应力分析

缓粘结部分预应力混凝土梁开裂截面的计算简图如图 6 所示。

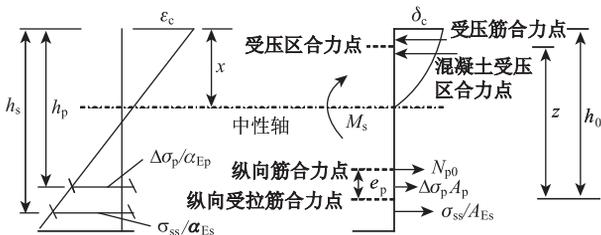


图 6 开裂截面计算简图

Fig. 6 Calculation diagram of cracked section

图 6 中分析计算方法采用了以下假定: (1) 截面变形符合平截面假定; (2) 受压区混凝土取三角形应力图; (3) 不考虑受拉区混凝土参加工作, 拉

力全部由受拉筋承担。

按照图 6, 由所有的力对受压区合力作用点力矩为零的平衡条件可得:

$$M_s = N_{p0}(z - e_p) + (\Delta\sigma_p A_p + \sigma_{ss} A_s)z, \quad (1)$$

由图 6 中的几何关系并引入参数 $\alpha = \frac{\Delta\sigma_p}{\sigma_{ss}}$ 可得:

$$\frac{h_p - x}{h_s - x} = \alpha \frac{E_s}{E_p} = \frac{\Delta\epsilon_p}{\epsilon_s}. \quad (2)$$

由式 (1) 和式 (2) 可得到纵向受拉钢筋应力 σ_{ss} :

$$\sigma_{ss} = \frac{M_s - N_{p0}(z - e_p)}{(\alpha A_p + A_s)z}, \quad (3)$$

式中, N_{p0} 为混凝土法向应力为零时纵向预应力筋和普通钢筋的合力; z 为受拉区纵向普通钢筋和预应力筋合力点至截面受压区合力点的距离; e_p 为 N_{p0} 作用点到纵向受拉预应力筋和普通钢筋的合力之间的距离; A_p 为纵向受拉预应力筋的面积; A_s 为纵向受拉普通钢筋的面积; $\Delta\sigma_p$ 为某裂缝宽度的荷载作用下预应力筋有效应力的增值, 此时的荷载值是按零应力荷载 (此处零应力荷载表示普通钢筋水平处的压应力为零) 作为计算起点的增值。

要求出纵向受拉钢筋应力 σ_{ss} , 只需先求出参数 α , 而 E_s 和 E_p 都是已知的常数, 所以只需要求出 $\Delta\epsilon_p/\epsilon_s$ 即可。缓粘结预应力筋和普通受拉钢筋的实测应变及其线性回归如表 4 及图 7 所示。

表 4 缓粘结部分预应力混凝土梁 $\Delta\epsilon_p/\epsilon_s$ 的实测结果

Tab. 4 Experimental result of $\Delta\epsilon_p/\epsilon_s$ of retard-bonded partially prestressed concrete beams

试验梁	位置	$\Delta\epsilon_p/\epsilon_s$	$\Delta\epsilon_p/\epsilon_s$ 的平均值	变异系数
RC-G	L/2	0.64	0.73	0.0316
	L/3	0.76		
RS-G	L/2	0.78	0.73	0.0316
	L/3	0.76		
RC-C	L/2	0.63	0.73	0.0316
	L/3	0.78		

为简化计算, 对公式 (2) 中近似取 $x = 0.4h_s$, 可得到:

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{\epsilon_s} = \frac{h_p - x}{h_s - x} = \frac{h_p - 0.4h_s}{0.6h_s}. \quad (4)$$

代入本文试验数据得到 $\Delta\epsilon_p/\epsilon_s = 0.74$, 可以看出此值与表 4 中数据相当吻合, 所以参数 α 的计算公式如下:

$$\alpha = \frac{(h_p - 0.4h_s)E_p}{0.6h_s E_s}. \quad (5)$$

根据《桥规》(JTG D62)^[10]推荐的公式, 取 z 为下式:

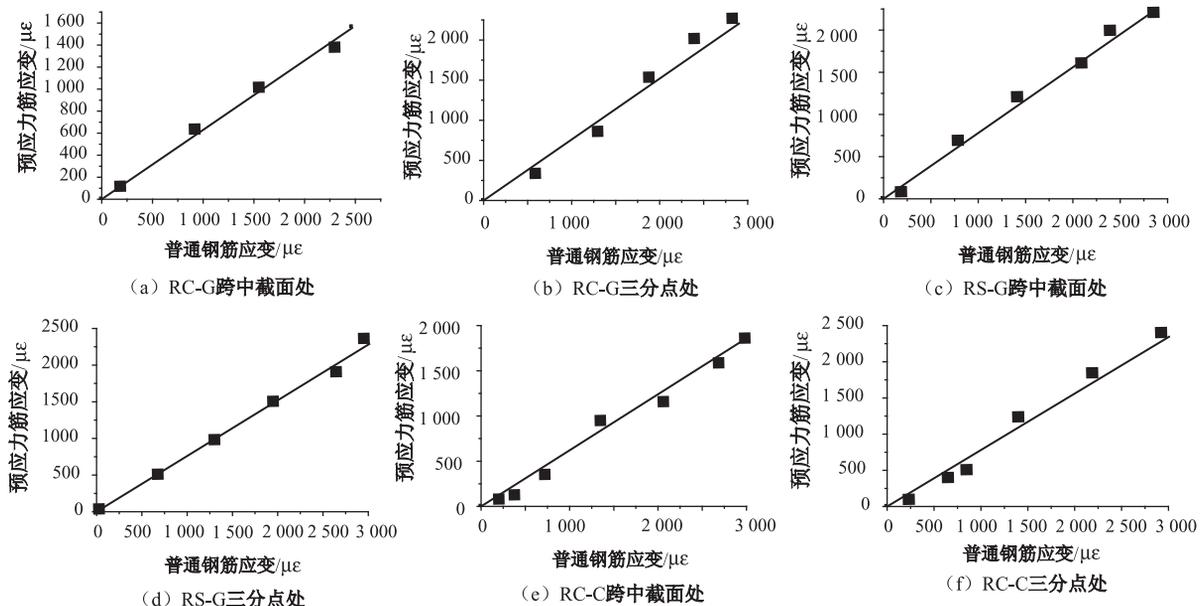


图7 缓粘结预应力筋应变与普通钢筋应变关系的曲线

Fig. 7 Relations of strain of retard-bonded prestressed strands with common steel tendons

$$z = \left[0.87 - 0.12(1 - \gamma'_f) \left(\frac{h_0}{e} \right)^2 \right] h_0, \quad (6)$$

$$e = e_p + M_s / N_{p0}, \quad (7)$$

$$\gamma'_f = \frac{(b_f - b) h_f}{b h_0}, \quad (8)$$

式中, γ'_f 为受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值; b_f 、 h_f 分别为受压区翼缘的宽度、厚度; h_0 为预应力筋和普通钢筋的合力作用点到截面顶边的距离。

3.3 最大裂缝宽度计算公式

通过以上的分析与计算, 缓粘结部分预应力混凝土梁(配置普通带肋钢筋)在短期荷载作用下最大裂缝宽度计算公式为:

$$W_{tk} = C_1 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left(\frac{30 + d_e}{0.28 + 10\rho} \right), \quad (9)$$

$$C_1 = \frac{1.4n_1 d_1 + n_2 d_2}{(n_1 + n_2) d_e}, \quad (10)$$

式中, C_1 为考虑混凝土与钢筋的粘结特征对裂缝的影响参数; n_1 为缓粘结预应力筋的根数; n_2 为普通带肋钢筋的根数; d_1 为预应力筋的等代直径, 其数值可按预应力筋的布置情况确定; d_2 为普通带肋钢筋的直径; d_e 为预应力筋和普通钢筋的等效直径, $d_e = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i d_i}$, n_i 为受拉区的普通带肋钢筋、预应力筋的

根数, d_i 为受拉区的普通带肋钢筋的公称直径、预应力筋的等代直径。

把本试验中缓粘结部分预应力混凝土梁的相关试验数据代入式(9)得到下式:

$$W_{tk} = \frac{37.995}{0.28 + 10\rho} \times \frac{\sigma_{ss}}{E_s}. \quad (11)$$

为了验证本文修正最大裂缝宽度计算公式的正确性, 在普通钢筋屈服前, 分别按国家现行《桥规》(JTG D62)中的公式和本文修正的公式计算缓粘结部分预应力混凝土梁的最大裂缝宽度, 并与实测值进行比较分析, 详细结果见表5, 表中 W_{tk} 表示修正公式计算的最大裂缝宽度值, W'_{tk} 表示规范公式计算的最大裂缝宽度值, W_{tk}^e 表示最大裂缝宽度实测值。

表5 最大裂缝宽度的计算值与实测结果

Tab. 5 Calculation and experimental results of maximum crack width

试验梁	$M_s /$ (kN·m)	$W_{tk} /$ mm	$W'_{tk} /$ mm	$W_{tk}^e /$ mm	$\frac{W'_{tk}}{W_{tk}}$	$\frac{W_{tk}^e}{W_{tk}}$
RC-G	87.62	0.167	0.132	0.15	0.88	1.113
	107.62	0.242	0.177	0.21	0.843	1.152
	127.62	0.318	0.244	0.28	0.871	1.136
RS-G	87.62	0.162	0.131	0.16	0.819	1.013
	107.62	0.236	0.175	0.22	0.795	1.073
	127.62	0.312	0.240	0.28	0.857	1.114
RC-C	67.62	0.098	0.071	0.09	0.789	1.089
	87.62	0.171	0.132	0.15	0.88	1.14
	107.62	0.247	0.187	0.22	0.85	1.123
	127.62	0.323	0.279	0.34	0.821	0.95

由表5可见, 现行规范公式计算的最大裂缝宽度与实测值之比的平均值为0.841, 其变异系数为

0.033 4; 修正公式计算的最大裂缝宽度与实测值之比的平均值为 1.090, 其变异系数为 0.063 8; 虽然规范公式计算值的波动程度较修正公式计算值小, 但规范公式的计算值与裂缝实测值相差太大, 故修正公式计算值与实测值更为吻合。因此本文修正的最大裂缝宽度计算公式用于缓粘结部分预应力混凝土梁是可行的。

4 结语

(1) 得到了试验梁的裂缝发展分布规律、试验梁的开裂弯矩和裂缝闭合弯矩, 求出了弯矩与最大裂缝宽度之间的大致关系, 并计算出缓粘结部分预应力混凝土梁裂缝闭合时的压应力为 2.96 MPa。

(2) 根据《桥规》(JTG D62) 推荐的最大裂缝宽度计算公式, 结合试验梁的特性对公式中的一些参数进行了修正。基于裂缝宽度公式中参数的修正, 提出了缓粘结部分预应力混凝土梁最大裂缝宽度的计算公式, 且计算值与实测值吻合较好。

缓粘结预应力混凝土是最近出现并迅速发展起来的一种新型预应力体系, 因此, 有待于今后进一步深入系统的试验研究, 这对预应力混凝土技术的发展应用有着非常积极的意义。

参考文献:

References:

- [1] 赵建昌, 王起才, 李永和. 超效缓凝砂浆与缓粘结预应力混凝土构件试验研究 [J]. 土木工程学报, 2003, 36 (8): 57 - 62.
ZHAO Jianchang, WANG Qicai, LI Yonghe. Experimental Research on Super-retard-setting Mortar and Retard-bonded Prestressed Concrete Beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36 (8): 57 - 62.
- [2] 吕志涛, 孟少平. 现代预应力设计 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1998: 8 - 15.
LÜ Zhitao, MENG Shaoping. Modern Prestress Design [M]. Nanjing: Southeastern University Press, 1998: 8 - 15.
- [3] SCHAPERLY R A. On the Mechanics of Crack Closing and Bonding in Linear Viscoelastic Media [J]. International Journal of Fracture, 1989, 39 (1): 163 - 189.
- [4] 张为民. 后张预应力混凝土构件裂缝分析及防治 [J]. 铁道建筑技术, 2005 (S1): 218 - 219.

- ZHANG Weimin. Analysis and Prevention on Cracks of Post-tensioned Prestressed Concrete Members [J]. Railway Construction Technology, 2005 (S1): 218 - 219.
- [5] 杜进生, 赵益鹏. 无粘结部分预应力混凝土梁的受力性能分析 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (3): 60 - 63.
DU Jinsheng, ZHAO Yipeng. Analysis on Mechanical Character of Unbonded Partial Prestressed Concrete Beams [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (3): 60 - 63.
- [6] 潘伟兵. 长大桥梁的裂缝影响分析 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (1): 60 - 63.
PAN Weibing. Analysis on the Impact of Crack of Long and Huge Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (1): 60 - 63.
- [7] 蓝宗建, 庞同和, 刘航, 等. 部分预应力混凝土梁裂缝闭合性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 1998, 19 (1): 33 - 40.
LAN Zongjian, PANG Tonghe, LIU Hang, et al. Experimental Research on Crack Closing of Prestressed Concrete Beams [J]. Journal of Building Structures. 1998, 19 (1): 33 - 40.
- [8] 赵国藩. 预应力混凝土、钢筋混凝土及混凝土构件抗裂性通用算法 [J]. 土木工程学报, 1964 (2): 1 - 16.
ZHAO Guofan. A General Calculating Method of Crack Resistance about Prestressed Concrete, Reinforced Concrete and Concrete Structural Members [J]. China Civil Engineering Journal, 1964 (2): 1 - 16.
- [9] 赵国藩, 廖婉卿, 王健. 部分预应力混凝土及钢筋混凝土构件的裂缝控制 [J]. 土木工程学报, 1982, 15 (4): 11 - 17.
ZHAO Guofan, LIAO Wanqing, WANG Jian. Crack Control of Partially Prestressed and Reinforced Concrete Structural Members [J]. China Civil Engineering Journal, 1982, 15 (4): 11 - 17.
- [10] 中华人民共和国交通部. JTG D2 - 2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
P. R. China. Ministry of Communications. JTG D2 - 2004 Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.