

钢筋混凝土梁裂缝分布受保护层厚度影响试验研究

管俊峰^{*1,2}, 赵顺波^{1,2}, 黄承逵¹

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 华北水利水电学院 土木与交通学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 通过12根保护层厚度不同的钢筋混凝土梁试验,量测了正常使用各级荷载下受拉区内不同高度梁侧面处的裂缝间距与裂缝宽度.分析了混凝土保护层厚度变化对平均裂缝间距和平均裂缝宽度的影响规律,结果表明:底面至侧面 $1.5a_s$ 范围内,平均裂缝间距和平均裂缝宽度随保护层厚度 c 的增加而增加,确定了裂缝宽度最大值的出现位置: $c=60\sim 70$ mm时在梁底面; $c=40\sim 50$ mm时在梁底面,但梁腹处裂缝也有一定宽度; $c=20\sim 30$ mm时在梁腹.研究了保护层厚度不同的钢筋混凝土梁受拉区范围内不同高度处与钢筋重心水平对应的混凝土侧表面裂缝宽度之间的比值关系,通过理论分析与试验数据拟合,提出了该比值的计算方法,比较结果表明计算值与实测值吻合较好.

关键词: 钢筋混凝土;梁;混凝土保护层厚度;裂缝分布;裂缝宽度比

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A

0 引言

我国现行的各混凝土结构设计规范 DL/T 5057—1996^[1]、JTJ 267—98^[2]、GB 50010—2002^[3]、JTG D 62—2004^[4]都没有明确给出钢筋混凝土梁受拉区内任意位置处与钢筋水平处对应的混凝土侧表面裂缝宽度换算关系的计算方法,仅铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范 TB 10002.3—2005中给出了钢筋混凝土受弯构件中和轴到受拉边缘的距离与中和轴到受拉钢筋重心的距离之比:板取1.20,梁取 $1.10^{[5]}$.美国混凝土结构设计规范(ACI 318—95)中规定:对于板式钢筋混凝土受弯构件,其底面裂缝宽度与钢筋重心水平对应的侧面裂缝宽度的比值近似可取为1.35;对于梁式构件近似可取为 $1.20^{[6]}$.而对于保护层厚度变化的钢筋混凝土梁受拉区内不同高度处裂缝宽度的计算,目前还没有可应用的公式.

我国学者前期进行的裂缝宽度试验研究表

明^[7]:在其他条件基本相同时,混凝土受弯构件钢筋水平处对应的混凝土侧表面的平均裂缝间距和平均裂缝宽度表现出随钢筋底保护层和侧保护层厚度的增大而增大的规律.国外学者 Frosch 的钢筋混凝土梁裂缝宽度计算模型中,裂缝宽度由底面最大值向中和轴方向线性减小^[8].Frantz 等观测了实际工程中大尺寸钢筋混凝土倒 T 形梁,发现裂缝宽度在梁腹处达到最大值,且远大于钢筋重心水平处的裂缝宽度^[9].Beeby 进行的裂缝理论分析表明:裂缝宽度随保护层厚度的增大而增大,但当距离钢筋较远时,裂缝宽度则主要取决于截面曲率,而与保护层厚度无关^[10].由国内外裂缝相关的文献调研可知:先期进行的钢筋混凝土受弯构件保护层厚度变化对裂缝宽度影响规律的研究主要局限在钢筋重心水平对应的混凝土侧表面与底表面;对于保护层厚度变化的钢筋混凝土受弯构件受拉区内不同高度处裂缝宽度扩展变化规律的统一认识尚未形成,相应的试验研究未见较详细的报道.

收稿日期: 2008-06-06; 修回日期: 2010-07-25.

基金项目: 河南省杰出青年科学基金资助项目(04120002300);河南省高校创新人才培养工程培养对象基金资助项目(豫教高[2004]294号).

作者简介: 管俊峰*(1980-),男,博士;赵顺波(1964-),男,河南省高校特聘教授,博士生导师;黄承逵(1941-),男,教授,博士生导师.

由此,本文通过12根其他条件基本相同而保护层厚度变化的钢筋混凝土梁的试验,研究受拉区内不同高度处裂缝间距与裂缝宽度随保护层厚度的变化规律,确定裂缝宽度最大值出现的位置,提出保护层厚度变化的钢筋混凝土梁受拉区内任意点处与钢筋重心水平处裂缝宽度比值的计算公式,实现受拉区内不同高度处与钢筋重心水平处裂缝宽度值之间的换算。

1 试验概况

本次试验梁其他条件基本相同,控制截面的有效高度 h_0 基本不变,使得曲率变化对钢筋重心

水平处裂缝扩展的影响基本一致.保护层厚度 c 从20~70 mm变化,重点观察 c 对钢筋混凝土梁受拉区内不同位置处的裂缝间距与裂缝宽度的影响规律。

构件制作时,在支座处和剪跨段分别焊接 $\phi 8$ 短钢筋,保证试验梁底保护层和侧保护层相同.试验梁的设计截面尺寸和实测材料性能列入表1.试验中量测了正常使用各级荷载下出现的各条裂缝在梁底面钢筋重心处的裂缝间距与裂缝宽度,以及梁侧面 na_s ($n=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, \dots$; a_s 为纵向受拉钢筋重心至梁底面的距离)高度处裂缝间距与裂缝宽度^[11].

表1 试验梁的设计截面尺寸、实际配筋情况及实测材料性能

Tab.1 Design size and actual reinforcement arrangement and experimental concrete properties of tested beams

编号	b/mm	h/mm	l/m	c/mm	纵向受力钢筋			混凝土	
					nd	f_y/MPa	E_s/GPa	f_{cu}/MPa	f_{ts}/MPa
BC20-1	135	445	3.0	20	2 $\phi 14$	409.4	192	44.9	2.64
BC20-2	135	445	3.0	20	2 $\phi 14$	409.4	192	44.9	2.64
BC30-1	135	455	3.0	30	2 $\phi 14$	409.4	192	44.9	2.64
BC30-2	135	455	3.0	30	2 $\phi 14$	409.4	192	39.3	2.61
BC40-1	170	465	3.1	40	2 $\phi 18$	381.1	190	39.3	2.61
BC40-2	170	465	3.1	40	2 $\phi 18$	381.1	190	39.3	2.61
BC50-1	185	475	3.1	50	2 $\phi 20$	399.4	188	39.3	2.61
BC50-2	185	475	3.1	50	2 $\phi 20$	399.4	188	39.3	2.61
BC60-1	200	485	3.2	60	2 $\phi 22$	368.3	201	46.5	3.04
BC60-2	200	485	3.2	60	2 $\phi 22$	368.3	201	46.5	3.04
BC70-1	220	500	3.3	70	2 $\phi 25$	366.7	194	44.9	2.64
BC70-2	220	500	3.3	70	2 $\phi 25$	366.7	194	44.9	2.64

2 试验结果分析

2.1 裂缝宽度延伸长度范围内的变化规律

本次试验发现:保护层厚度的变化使得裂缝扩展沿截面高度方向出现了3种变化规律:(1) $c=60\sim 70$ mm的构件,保护层厚度相对较大,钢筋约束区域的发展受到钢筋与曲率的双重影响,底面至侧面钢筋重心和钢筋重心至裂缝尖端宽度值近似线性减小,最大裂缝宽度出现在梁底面而没有出现在梁腹(如图1(a)).(2) $c=40\sim 50$ mm的构件,裂缝宽度最大值出现在梁底面,但梁腹处裂缝也有一定宽度.裂缝延伸长度范围内宽度值并非线性减小(如图1(b)).(3) $c=20\sim 30$ mm的构件,受纵向受拉钢筋的有效约束,裂缝宽度在 a_s 附近较小,随着裂缝不断向中和轴方向延伸,

受拉钢筋的约束作用不断减小,裂缝宽度在梁腹处达到最大值,而后逐渐减小(如图1(c)).

从实测资料来看:对于 $c=60\sim 70$ mm的构件裂缝宽度沿截面高度方向按底面至侧面 a_s 处、超过 a_s 处至裂缝尖端可分别认为是直线递减变化.对于 $c=40\sim 50$ mm的构件:底面至侧面钢筋重心处、侧面钢筋重心至纵向受拉钢筋有效约束区^[11~14]边缘、超出钢筋有效约束区后裂缝宽度可分别认为是直线递减变化.对于 $c=20\sim 30$ mm的构件:底面至侧面钢筋重心处为直线递减变化;侧面钢筋重心至纵向受拉钢筋有效影响区边缘为直线递增变化;超出钢筋有效影响区后为直线递减变化。

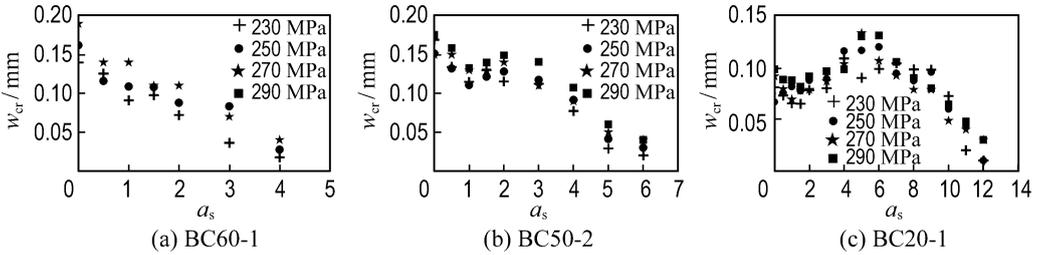


图 1 保护层厚度变化的钢筋混凝土梁裂缝宽度沿截面高度方向变化规律

Fig. 1 Change regularity of crack width along the depth of normal section of RC beams with different concrete cover thickness

2.2 受拉区内不同高度处 l_{cr} 随 c 的变化规律

本次保护层厚度变化钢筋混凝土试验梁的主裂缝一般都延伸到纵向受拉钢筋有效影响区 A_{te} 的边缘或者超出 A_{te} [11~13]。 A_{te} 内实测平均裂缝间距 l_{cr} 都为同一值,且随着保护层厚度的增加呈线性增加的趋势(如图 2(a)),其线性相关系数为 0.849。当超过 h_{te} ,小保护层构件的 l_{cr} 变大,大保护层构件的 l_{cr} 基本不变。取延伸到最高处的裂缝为统计对象,则所有梁的 l_{cr} 基本在同一水平变化(如图 2(b))。

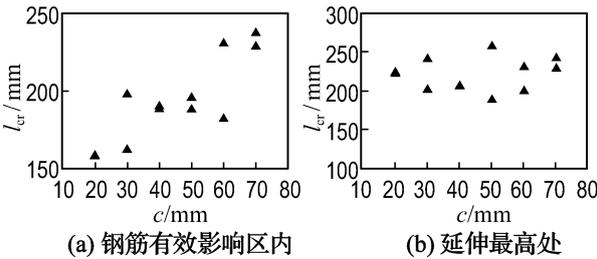


图 2 平均裂缝间距 l_{cr} 随保护层厚度 c 变化规律

Fig. 2 Variation of l_{cr} with c

2.3 受拉区内不同高度处 w_{cr} 随 c 的变化规律

图 3 给出了相同荷载水平条件下,实测底面及侧面各个位置处平均裂缝宽度随保护层厚度增加的变化规律。底面至侧面 $1.5a_s$ 处,平均裂缝宽度基本上呈随保护层厚度的增加而呈线性增加的趋势。超过 $1.5a_s$ 位置后该规律不成立。

2.4 裂缝宽度扩大系数的统计分析

本次保护层厚度变化试验梁的 147 条主裂缝在底面和受拉区不同位置处的 w_i/w_{cr} 的统计分析表明(见概率分布直方图 4):底面(711 个数

据)、 $0.5a_s$ (726 个数据)、 a_s (749 个数据)、 $1.5a_s$ (726 个数据)、 $2a_s$ (716 个数据)、 $3a_s$ (685 个数据)、 $4a_s$ (572 个数据),各位置处的 w_i/w_{cr} 基本上都符合正态分布。离散系数依次为 0.361、0.360、0.373、0.375、0.389、0.397、0.413,按 95% 的保证率考虑,裂缝宽度扩大系数 τ_s 依次为 1.594、1.592、1.614、1.621、1.650、1.654、1.678。若取钢筋重心水平处的 τ_s 为基准值 1,则受拉区内各位置处 τ_s 的比值依次为 0.99 : 0.99 : 1.00 : 1.00 : 1.02 : 1.03 : 1.04。

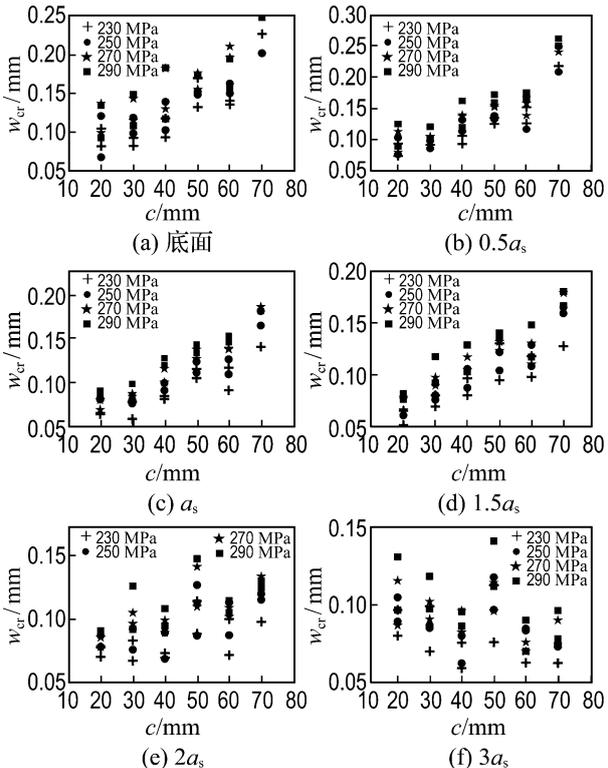
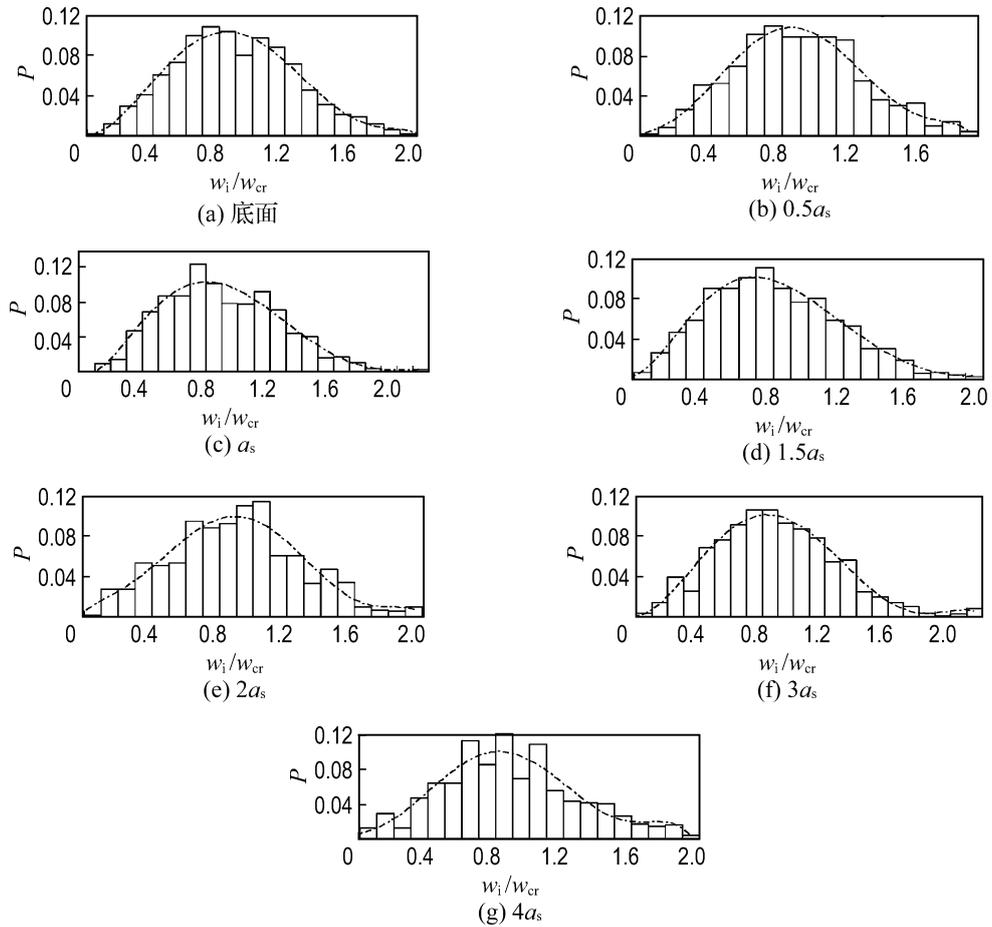


图 3 平均裂缝宽度 w_{cr} 随保护层厚度 c 变化规律

Fig. 3 Variation of w_{cr} with c

图4 w_i/w_{cr} 概率分布直方图Fig. 4 Probability distribution histogram of w_i/w_{cr}

3 c 变化的 w_i 与 w_1 比值的计算方法

(1) $c=60\sim 70$ mm

采用文献[11]和文献[14]的推导思路,可得钢筋混凝土受弯构件的底表面裂缝宽度 w_0 与钢筋重心水平处梁侧面裂缝宽度 w_1 比值 β_1 的计算公式为 $\beta_1 = (h-x)/(h_0-x) = 1+a_s/(0.61h_0)$, 进一步可得到底面到侧面 a_s 距离内各点处的裂缝宽度 w_i 与 w_1 比值的统一计算公式为

$$\beta_i = 1 + 1.64 \frac{a_s - y}{h_0} k \quad (1)$$

式中: y 为距离梁底面的垂直距离; k 为计算模式及试验数据修正系数. $y \in [0, a_s]$ 时, $k = 1.6$; $y \in [a_s, 0.6h]$ 时, $k = 0.83$.

(2) $c=40\sim 50$ mm

$y \in [0, a_s]$ 时, 采用式(1)计算, $k = 1.35$.

考虑截面高度、钢筋排列方式及曲率对裂缝延伸的影响,引入参数 h/a_s , 式(1)调整为

$$\beta_i = 1 + 1.64 \left(\frac{a_s - y}{h_0} \right) / \left(1.12 + 0.08 \frac{h}{a_s} \right) \quad (2)$$

$y \in [a_s, h_{te}]$ 时, h/a_s 取定值 10. $y \in [h_{te}, 0.5h]$ 时, h/a_s 取实际值.

(3) $c=20\sim 30$ mm

$y \in [0, a_s]$ 时, 采用式(1)计算, $k = 2.5$.

$y \in [a_s, h_{te}]$ 时, 采用式(1)计算, 在 a_s 处取 $k = 1$; 在 $5a_s$ 处取 $k = 2.76$; 其他位置 k 按计算点高度比线性插值计算.

考虑测点到钢筋距离对裂缝扩展的影响,引入参数 $(y-a_s)/h$, 钢筋有效影响区外各点与钢筋水平处裂缝宽度比值由式(1)调整为

$$\beta_i = \lambda \left(1 + 0.001 \frac{h}{a_s} + \omega \frac{y - a_s}{h} \right) \times \left(1 + 1.64 \frac{a_s - y}{h_0} \right) \quad (3)$$

对于 $c = 20 \text{ mm}$ 的构件, $\lambda = 2.2, \omega = 1.5$; 对于 $c = 30 \text{ mm}$ 的构件, $\lambda = 2.0, \omega = 1.1, y \in [h_{te}, 0.5h]$.

(4) 实测值与计算值的比较

设正常使用各级荷载作用下, 保护层厚度变化的钢筋混凝土梁底面裂缝宽度的平均值 $w_{cr,0}$ 与钢筋水平对应的混凝土侧表面裂缝宽度的平均值 $w_{cr,1}$ 的比值为 β_1 . 实测值 β_1 与计算值 β_1^G 比值 β_1/β_1^G 的平均值为 0.99, 离散系数为 0.11.

Gergely 等著名的底面裂缝宽度计算公式与侧面裂缝宽度计算公式的比值为^[15]

$$\beta_1^G = \sqrt[3]{\frac{a_s}{t_s}} \left(\frac{h-x}{h_0-x} \right) \left(1 + \frac{t_s}{h_0-x} \right) \quad (4)$$

式中: t_s 为最外排钢筋重心到底面的距离.

保护层厚度变化的钢筋混凝土梁实测值 β_1 与式(4)计算值 β_1^G 比值 β_1/β_1^G 的平均值为 0.93, 离散系数为 0.16. 可见式(1)精度优于式(4) (如图5).

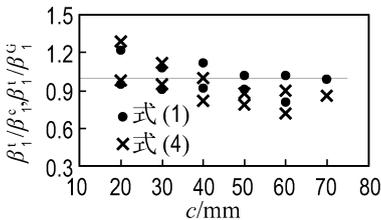


图5 底面处实测值与计算值比较

Fig. 5 Comparison of test value to calculated value at bottom surface

保护层厚度变化的钢筋混凝土梁实测正常使用各级荷载下 $0.5a_s$ 处 $w_{cr,0.5}/w_{cr,1}$ 比值 β_2^G 、 $1.5a_s$ 处 $w_{cr,1.5}/w_{cr,1}$ 比值 β_3^G 、 $2a_s$ 处 $w_{cr,2}/w_{cr,1}$ 比值 β_4^G 、 $3a_s$ 处 $w_{cr,3}/w_{cr,1}$ 比值 β_5^G 、 $4a_s$ 处 $w_{cr,4}/w_{cr,1}$ 比值 β_6^G 、 $5a_s$ 处 $w_{cr,5}/w_{cr,1}$ 比值 β_7^G 、 $6a_s$ 处 $w_{cr,6}/w_{cr,1}$ 比值 β_8^G 、 $7a_s$ 处 $w_{cr,7}/w_{cr,1}$ 比值 β_9^G 、 $8a_s$ 处 $w_{cr,8}/w_{cr,1}$ 比值 β_{10}^G 与相应的计算值 $\beta_2^G \sim \beta_{10}^G$ 的比较结果均见表2.

表2 受拉区内实测值 β_i 与计算值 β_i^G 的比较

Tab. 2 Comparison of measured value β_i to calculated value β_i^G in tensile zone

计算位置	β_i/β_i^G	
	平均值	离散系数
$0.5a_s$	1.05	0.08
$1.5a_s$	1.00	0.13
$2a_s$	0.96	0.11
$3a_s$	0.99	0.14
$4a_s$	0.97	0.15
$5a_s$	0.97	0.11
$6a_s$	1.02	0.09
$7a_s$	1.12	0.08
$8a_s$	1.23	0.01

4 结 论

(1) 通过式(1)、(2)、(3)可以计算受拉区不同高度处与钢筋水平处裂缝宽度的比值.

(2) 底面至侧面 $1.5a_s$ 范围内, 平均裂缝间距和平均裂缝宽度随保护层厚度的增加而呈增加的趋势.

(3) $c=60\sim70 \text{ mm}$ 时最大裂缝宽度出现在梁底面. $c=40\sim50 \text{ mm}$ 时最大裂缝宽度出现在梁底面, 但梁腹处裂缝也有一定宽度. $c=20\sim30 \text{ mm}$ 时最大裂缝宽度出现在梁腹, 需在受拉区内配置一定的构造钢筋来控制梁腹裂缝的扩展.

参考文献:

[1] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 5057—1996 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1996

[2] 中华人民共和国交通部. JTJ 267—98 港口工程混凝土结构设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 1998

[3] 中华人民共和国建设部. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002

[4] 中华人民共和国交通部. JTG D 62—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

[5] 中华人民共和国交通部. TB 10002.3—2005 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005

[6] ACI Committee 318. ACI 318—95 Building Code Requirements for Structural Concrete and

- Commentary [S]. Michigan: American Concrete Institute, 1995
- [7] 蓝宗建,王清湘. 混凝土保护层厚度对钢筋混凝土构件裂缝宽度影响的试验研究[R] // 钢筋混凝土结构研究报告选集. 北京:中国建筑工业出版社, 1994: 90-101
- [8] FROSCHE R J. Another look at cracking and crack control in reinforced concrete [J]. **ACI Structural Journal**, 1999, **96**(3):437-442
- [9] FRANTZ G C, BREEN J E. Cracking on the side faces of large reinforced concrete beams [J]. **ACI Journal**, 1980, **77**(5):307-313
- [10] BEEBY A W. The prediction of crack widths in hardened concrete [J]. **The Structural Engineer**, 1979, **57**(1):9-17
- [11] 管俊峰. 钢筋混凝土结构仿真模型试验理论与应用研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010
- [12] 赵顺波,管俊峰,张学朋,等. 钢筋混凝土梁裂缝分布型试验研究及统计分析[J]. **工程力学**, 2008, **25**(12):141-146
- [13] 赵顺波,管俊峰,张学朋,等. 截面高度对钢筋混凝土梁裂缝分布影响的试验研究[J]. **水利学报**, 2009, **40**(1):88-93
- [14] 管俊峰,赵顺波,黄承逵. 钢筋混凝土梁裂缝分布受配筋影响的试验研究[J]. **武汉理工大学学报**, 2009, **31**(11):56-60
- [15] GERGELY P, LUTZ L A. Maximum crack width in reinforced concrete flexural members [C] // **Causes, Mechanism, and Control of Cracking Concrete, SP-20**. Michigan: American Concrete Institute, 1968:87-117

Experimental study of crack distribution of reinforced concrete beams influenced by thickness of concrete cover

GUAN Jun-feng^{*1,2}, ZHAO Shun-bo^{1,2}, HUANG Cheng-kui¹

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: Based on the tests of 12 reinforced concrete (RC) beams with different concrete covers, the crack spacing and crack width at various heights in the tensile region were measured under several loadings of serviceability state. The effects of concrete cover variation on average crack spacing and average crack width at different heights were analyzed, and the results show that in the range of the bottom surface to $1.5a_s$, the average crack spacing and the average crack width increase with the thickness of concrete cover c increasing. The positions of maximum crack width were given: occurring at the bottom surface for RC beams with $c = 60-70$ mm; with $c = 40-50$ mm also occurring at the bottom surface, but at the web of beam it is wider; occurring at the web with $c = 20-30$ mm. The relationships of crack widths at any position in the tensile zone and at the reinforcement level on the side surface of beam were studied, and by theoretical and statistical analyses, a method is proposed to calculate the ratios of crack widths between any position and the reinforcement level on the side surface of reinforced concrete beams with different thickness of concrete cover. The results of comparisons show that the proposed formulas agree well with the test data.

Key words: reinforced concrete; beams; thickness of concrete cover; crack distribution; ratio of crack width