

文章编号:1673-2049(2011)01-0053-05

大保护层混凝土梁的裂缝试验

李志华¹, 苏小卒², 赵 勇²

(1. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:采用两点对称集中的同步分级加载方式,对 4 根配置 500 MPa 钢筋的大保护层混凝土梁进行了静载试验,观测试件的裂缝发展过程,了解此类构件的裂缝特点;同时,结合另外 24 根大保护层混凝土梁的试验数据,建议了此类构件的裂缝间距及裂缝宽度的计算公式,并根据配置表层钢筋或箍筋的混凝土梁试验结果,对大保护层混凝土梁提出了裂缝宽度控制建议。分析结果表明:配置 500 MPa 钢筋的大保护层混凝土梁裂缝发展规律与普通钢筋混凝土梁基本相同,但在正常使用状态下,混凝土构件的裂缝宽度较大,难以满足规范要求;按照中国现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)对大保护层混凝土梁进行裂缝宽度验算得到的计算值普遍大于实测值。

关键词:钢筋混凝土梁;大保护层;裂缝宽度;静载试验;裂缝间距

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A

Experiment on Crack of Thick-cover Reinforced Concrete Beams

LI Zhi-hua¹, SU Xiao-zu², ZHAO Yong²

(1. School of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, Jiangsu, China;
2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: 4 thick-cover concrete beams reinforced with 500 MPa steel bars were tested under two-point symmetrical concentrated static-loading to observe the details of crack development on these beams and investigate their cracking characteristics, meanwhile, combining the existing test data of 24 thick-cover reinforced concrete beams, the revised calculation formulas for crack spacing and crack width were suggested. Furthermore, based on the test results of the concrete beams with skin reinforcements or stirrups, the design recommendations were proposed for crack control of reinforced concrete beams with thick concrete cover. Analysis results show that the cracking behavior of the thick-cover concrete beams reinforced with 500 MPa steel bars is similar to that of the common reinforced concrete flexural members, but under the state of serviceability, the crack widths of these beams are usually larger and can't meet the demands of code. The calculated crack widths of thick-cover concrete beams using the formulas adopted in current Chinese *Code for Design of Concrete Structures* (GB 50010—2002) usually exceed the experiment crack widths.

Key words: reinforced concrete beam; thick-cover; crack width; static-loading experiment; crack spacing

0 引言

处于较差环境中的构件由于耐久性的要求需要较大的保护层厚度。根据规范^[1-2]的规定,在一些情况下构件需要的最小保护层厚度达到甚至超过50 mm,这将导致构件在正常使用状态下的裂缝宽度增加,可能难以满足规范要求。特别是对于配置500 MPa钢筋的混凝土梁,由于其正常使用状态下的钢筋应力可能较大,在保护层厚度较大的情况下,如何控制裂缝宽度使其满足规范要求将是一个突出的问题,因此研究大保护层钢筋混凝土梁的使用性能是有意义的。王清湘等^[3]和童保全^[4]曾进行过配置普通钢筋的大保护层混凝土梁裂缝试验研究,国外的学者^[5-6]也曾进行过大保护层混凝土梁的裂缝试验研究。为了使保护层厚度较大的混凝土梁能够在工程中应用,GB 50010—2002(以下简称规范)中要求保护层厚度大于40 mm的构件应采取有效的防裂构造措施;文献^[7]中从耐久性角度考虑,规定当保护层实际厚度超过30 mm时,可取30 mm代入规范中公式计算裂缝宽度。本文中笔者主要通过配置500 MPa钢筋的大保护层混凝土梁受弯性能试验,研究此类构件的裂缝特点,并结合已有大保护层混凝土梁的试验数据,评估现行混凝土结构设计规范中裂缝宽度公式的适用性并提出修正建议;同时,根据配置表层钢筋或箍筋的混凝土梁试验结果,对大保护层混凝土梁提出裂缝宽度控制建议。

1 试验研究

试件为4根配置500 MPa钢筋的大保护层混凝土梁,设计时主要考虑混凝土强度、纵向受拉钢筋直径和配筋率等参数。所有试件均正位浇注,反位加载(图1,便于观测受拉底面的裂缝,其中 P 为施加荷载)。试件配筋及参数见图2、表1,图2中受压钢筋(③号筋)为 $2\Phi 16$ 。

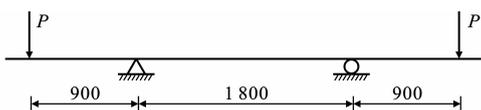


图1 试件加载(单位:mm)

Fig. 1 Loading of Specimens (Unit:mm)

试件分2批浇注(每种强度的混凝土各为一批),每批浇注后各留置3组(每组3个)边长为150 mm的立方体混凝土试块,并与试验构件同条件养护。每种钢筋取3个试样。试件试验时,进行了材料性能试验,各试块混凝土立方体强度的平均值

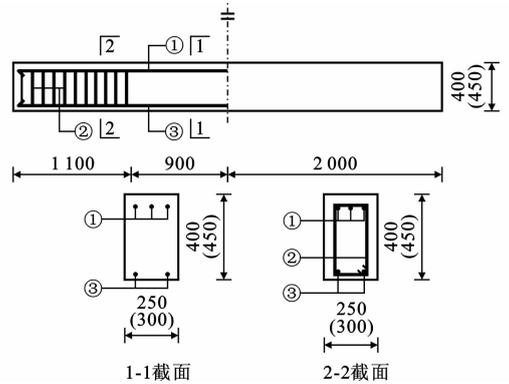


图2 试件尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions and Reinforcements of Specimens (Unit:mm)

f_{cu} 见表1。钢筋实测力学性能指标见表2。

表1 各试件的参数

Tab. 1 Parameters of Specimens

试件编号	f_{cu}/MPa	b/mm	h/mm	L/mm	混凝土保护层厚度/mm	配筋情况	
						①号筋	②号筋
CB5-1	34.01	251	402	4 000	59	2 $\Phi 25$	$\Phi 10@100$
CB5-2	34.01	303	454	4 000	56	2 $\Phi 32$	$\Phi 10@60$
CB5-3	56.16	255	406	4 000	59	3 $\Phi 25$	$\Phi 10@60$
CB5-4	56.16	254	403	4 000	57	2 $\Phi 32$	$\Phi 10@60$

注: b 、 h 、 L 分别为试件的宽度、高度和长度。

表2 钢筋实测力学性能指标

Tab. 2 Measured Mechanical Property Indices of Steel Bars

钢筋型号	$\Phi 25$	$\Phi 32$
抗拉屈服强度标准值 f_{yk}/MPa	500	500
抗拉屈服强度实测值 f_y/MPa	495	530

各试件所经历的裂缝发展过程基本相同。加载至 $0.1P_u$ (P_u 为计算极限荷载)左右时,截面未开裂,试件表现为弹性变形特征;荷载加至 $0.2\sim 0.3P_u$ 时,可在纯弯段底面及两侧面发现一条或多条裂缝,宽度很小,侧面裂缝高度一般可达到梁高的 $1/4\sim 1/3$ 。随着荷载的进一步增大,纯弯段裂缝逐渐增多,并逐渐延伸,宽度也逐渐加大,斜裂缝出现。荷载加至 $0.5P_u$ 左右时,裂缝基本上不会再出现新裂缝。典型裂缝分布如图3所示(图3中的数字表示加载级别,两虚线间的区段为试件纯弯段),试件的裂缝发展比较整齐,间距比较均匀。荷载达到 P_u 时,跨中附近一条裂缝宽度迅速增加,最终试件因受压区混凝土被压碎而破坏。

2 试验结果分析

2.1 平均裂缝间距

按规范中公式计算本文试验梁的平均裂缝间距

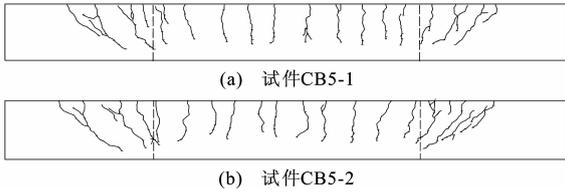


图 3 部分试件的侧面裂缝

Fig. 3 Side Crack of Some Specimens

l_{cr} , 其实测值 l_{cr}^0 均小于计算值 l_{cr}^{cl} (表 3)。按规范中公式计算本文 4 根及文献[3]、[4]中 24 根大保护层混凝土梁(保护层厚度不小于 40 mm)的平均裂缝间距, l_{cr}^0/l_{cr}^{cl} 与保护层厚度 c 的关系见图 4。可见, 对于 $40\text{ mm} \leq c \leq 65\text{ mm}$ 的钢筋混凝土梁, 按规范中公式计算的平均裂缝间距普遍偏大; 对于 $c > 65\text{ mm}$ 的钢筋混凝土梁, 由于此时按规范取 $c = 65\text{ mm}$ 计算, 计算值与实测值吻合较好, 但离散性较大。按规范中公式且取实际保护层厚度(当 $c > 65\text{ mm}$ 时仍取实际的 c) 计算此 28 根大保护层混凝土梁的平均裂缝间距 l_{cr}^0 , l_{cr}^0/l_{cr}^{c2} 与保护层厚度 c 的关系见图 5。对于 $c > 65\text{ mm}$ 的钢筋混凝土梁, l_{cr}^0/l_{cr}^{c2} 的均值为 0.82。由此可以认为, 规范中公式过大地考虑了保护层厚度对裂缝间距的影响。

表 3 平均裂缝间距实测值与文献[1]计算值的比较

Tab. 3 Comparisons Between Measured Values and Calculated Values in Reference [1] for Average Crack Spacing

试件编号	l_{cr}^0/mm	l_{cr}^{cl}/mm	$l_{cr}^0 \cdot (l_{cr}^{cl})^{-1}$
CB5-1	179.10	215.10	0.83
CB5-2	168.35	216.20	0.79
CB5-3	153.59	182.58	0.84
CB5-4	148.77	190.78	0.78

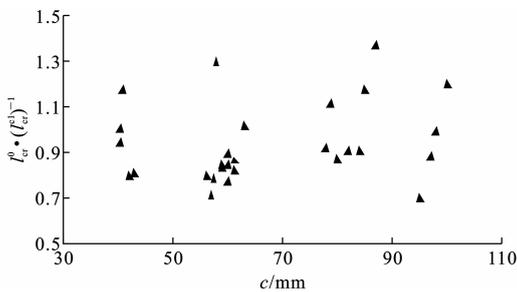


图 4 c 与 l_{cr}^0/l_{cr}^{cl} 的关系

Fig. 4 Relation of c and l_{cr}^0/l_{cr}^{cl}

根据上述 28 根梁的试验结果并采用规范中的裂缝间距计算模式, 由最小二乘法得大保护层混凝土梁的平均裂缝间距 l_{cr} 的计算公式为

$$l_{cr} = 1.57c + 0.07 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \quad (1)$$

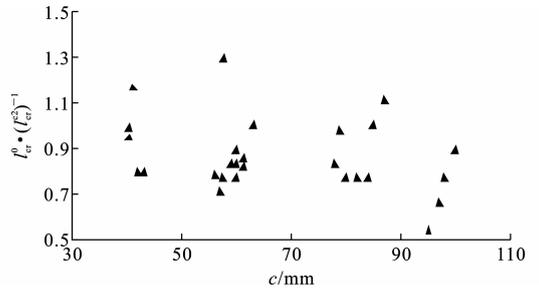


图 5 c 与 l_{cr}^0/l_{cr}^{c2} 的关系

Fig. 5 Relation of c and l_{cr}^0/l_{cr}^{c2}

式中: d_{eq} 为等效钢筋直径; ρ_{te} 为受拉钢筋有效配筋率。

按式(1)计算(取 c 的实际值)此 28 根梁的平均裂缝间距, 实测值与计算值之比的均值为 1.02, 变异系数为 0.184。可见, 大保护层混凝土梁的平均裂缝间距可按式(1)计算。

按文献[7]中的方法计算上述 28 根钢筋混凝土梁的平均裂缝间距, 其实测值 l_{cr}^0 比计算值 l_{cr}^{c3} 偏大 28% 左右。 l_{cr}^0/l_{cr}^{c3} 与保护层厚度 c 的关系见图 6。可见, 平均裂缝间距计算值与实测值的偏差随混凝土保护层厚度的增大而增大, 当 $c > 65\text{ mm}$ 时, 一些试验点的 l_{cr}^0/l_{cr}^{c3} 将达到甚至超过 1.5。按文献[7]中的方法计算 65 根^[8-9] $c > 30\text{ mm}$ 钢筋混凝土梁的平均裂缝间距, 其中 4 根梁的 $c > 40\text{ mm}$, 实测值与计算值的比较见图 7。可见, 按该方法计算 $30\text{ mm} \leq c \leq 40\text{ mm}$ 钢筋混凝土梁的平均裂缝间距, 计算值与实测值吻合较好; 对于 $c > 40\text{ mm}$ 的钢筋混凝土梁, 计算结果普遍偏小。

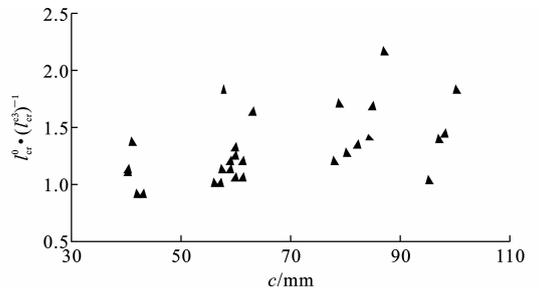


图 6 c 与 l_{cr}^0/l_{cr}^{c3} 的关系

Fig. 6 Relation of c and l_{cr}^0/l_{cr}^{c3}

2.2 平均裂缝宽度

按规范中公式计算本文试验梁的平均裂缝宽度 w_{cr} , 其实测值 w_{cr}^0 普遍小于计算值 w_{cr}^{cl} , w_{cr}^0/w_{cr}^{cl} 的均值为 0.70。按规范中公式计算本文 4 根及文献[3]中 14 根大保护层混凝土梁(保护层厚度不小于 40 mm)的平均裂缝宽度, w_{cr}^0/w_{cr}^{cl} 的均值为 0.85。按文献[7]中的方法计算此 18 根大保护层混凝土梁

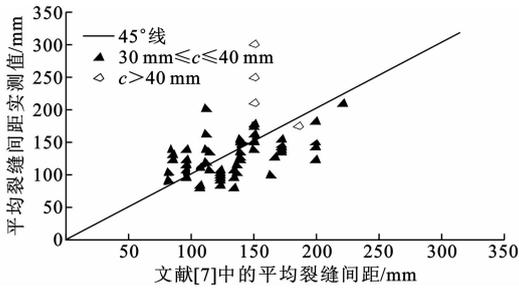


图7 平均裂缝间距实测值与文献[7]计算值的比较
Fig. 7 Comparisons Between Measured Values and Calculated Values in Reference [7] for Average Crack Spacing

的平均裂缝宽度 w_{cr}^c , w_{cr}^0/w_{cr}^c 的均值为 1.20。

试验结果表明,对于配置 500 MPa 钢筋的大保护层混凝土梁,钢筋应变不均匀系数 ψ 的计算表达式仍为 $\psi = 1.1(1 - M_c/M_s)$,其中 M_c 为混凝土所承受的抗裂弯矩, M_s 为构件截面所承受的弯矩。取 $M_c = 0.292f_{tk}bh^2$ ^[10],考虑收缩影响,将其乘以系数 0.8^[11],可推导出 ψ 的表达式为

$$\psi = 1.1 - \frac{0.65f_{tk}}{\sigma_{sk}\rho_{te}} \quad (2)$$

式中: f_{tk} 为混凝土抗拉强度; σ_{sk} 为钢筋应力。

本文中取反映裂缝间混凝土伸长对裂缝宽度影响的系数 $\alpha_c = 0.85$,并采用规范中的裂缝宽度计算模式,则大保护层混凝土梁的平均裂缝宽度的计算公式为

$$w_{cr} = 0.85 \left(1 - \frac{0.65f_{tk}}{\sigma_{sk}\rho_{te}} \right) \frac{\sigma_{sk}}{E_s} (1.57c + 0.07 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}) \quad (3)$$

式中: E_s 为钢筋弹性模量,计算时取实际的保护层厚度。

按式(3)计算此 18 根大保护层混凝土梁的平均裂缝宽度,实测值与计算值之比的均值为 0.92,变异系数为 0.222。

对本文中 4 根大保护层混凝土梁的裂缝分析表明,混凝土梁纯弯段的裂缝宽度基本上呈正态分布,若考虑 95% 的保证率,则短期裂缝扩大系数 $\tau_s = 1.59$,略小于普通混凝土梁的扩大系数 1.66,而文献[3]中的试验结果为 $\tau_s = 1.43$ 。由于试验资料尚少,应进一步累积资料后对其加以修正。

3 裂缝宽度控制措施

本文的试验结果表明,试件在正常使用阶段的短期最大裂缝宽度均超过了规范中允许的裂缝宽度限值,不能满足使用性能要求。为了达到在工程中应用大保护层混凝土梁的目的,规范要求保护层厚

度大于 40 mm 的构件应采取有效的防裂构造措施;文献[7]中从耐久性角度对此类构件裂缝宽度的计算方法进行了规定,这种计算方法的实质是取保护层标准厚度为 30 mm 来确定裂缝间距,加大保护层厚度仅作为结构在侵蚀环境下的一种防护措施。笔者根据有关试验结果,提供了 2 种控制裂缝宽度的方法。

3.1 配置表层钢筋

苏小卒等^[12]完成了配置表层钢筋的混凝土梁裂缝试验,表层钢筋为 HPB235。结果表明,在试件的混凝土保护层中配置表层钢筋虽增加了裂缝数量,但可减小平均裂缝间距和短期最大裂缝宽度,且表层钢筋越密则这种作用越显著。根据试验结果,并参考欧洲规范 EN 1992-1-1:2002^[13]中表层钢筋的构造要求,建议对于保护层厚度超过 50 mm 的混凝土梁,在平行和垂直于梁中受拉钢筋的 2 个方向,表层钢筋的面积 A_{sv} 均不应小于 0.01 倍的截面受拉区原保护层的面积,且相邻表层钢筋的间距不应大于 150 mm。表层钢筋的配置方式见图 8。

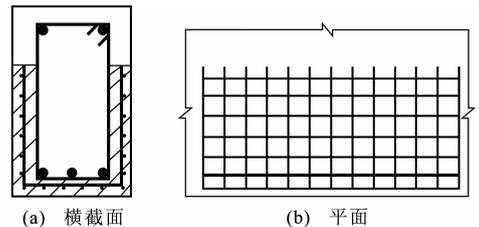


图8 表层钢筋配置

Fig. 8 Details of Skin Steel Bar

3.2 配置箍筋

试验结果^[14]表明,箍筋对裂缝位置具有导向作用,裂缝多出现在箍筋位置附近,且箍筋间距对裂缝间距有一定影响。试件 LW1(纯弯段配置箍筋)与试件 B5F2(纯弯段未配置箍筋)的裂缝形态比较见图 9(两虚线间的区段为试件纯弯段)。可见,纯弯段配置箍筋的混凝土梁其裂缝发展比较整齐,裂缝间距比较均匀(裂缝间距基本与箍筋间距一致)。笔者的相关研究结果表明,箍筋间距对裂缝间距有一定影响,选取适当的箍筋间距可以减小裂缝间距,从而达到控制裂缝宽度的目的。

4 结语

(1)配置 500 MPa 钢筋的大保护层混凝土梁的裂缝发展规律与普通钢筋混凝土梁的基本相同。在正常使用状态下,构件的裂缝宽度较大,难以满足规范要求,而且按现行混凝土结构设计规范对此类构

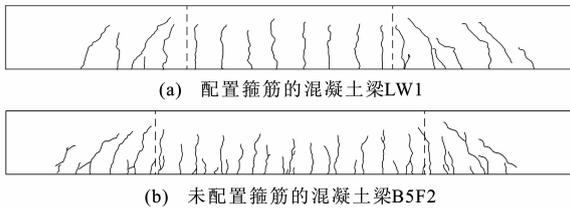


图9 配置与未配置箍筋试件的侧面裂缝比较

Fig. 9 Comparisons of Side Crack for Specimens with and Without Stirrups

件进行裂缝宽度验算,计算值均大于实测值。

(2)对于保护层厚度 $40\text{ mm} \leq c \leq 65\text{ mm}$ 的钢筋混凝土梁,按现行《混凝土结构设计规范》中公式计算的平均裂缝间距普遍偏大;对于 $c > 65\text{ mm}$ 的钢筋混凝土梁,由于规范规定此时取 $c = 65\text{ mm}$ 计算,计算值与实测值吻合较好;对于 $c \geq 40\text{ mm}$ 的钢筋混凝土梁,按修正计算公式(1)计算的平均裂缝间距与试验结果吻合较好;按《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01—2004)中方法计算的结果普遍偏小,当 $c > 65\text{ mm}$ 时,一些试验点的实测值与计算值之比将达到甚至超过 1.5。

(3)在混凝土保护层中配置表层钢筋能有效控制裂缝宽度。建议保护层厚度大于 50 mm 时,在平行和垂直于梁中受拉钢筋的 2 个方向,表层钢筋的面积均不应小于 0.01 倍的截面受拉区原保护层的面积,且相邻表层钢筋的间距不应大于 150 mm 。

(4)箍筋间距对裂缝间距有一定影响,选取适当的箍筋间距可以减小裂缝间距,从而达到控制裂缝宽度的目的。

参考文献:

References:

- [1] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [2] SL/T 191—96, 水工混凝土结构设计规范[S].
SL/T 191—96, Design Code for Hydraulic Concrete Structures[S].
- [3] 王清湘, 赵顺波. 大保护层钢筋混凝土受弯构件裂缝控制的试验研究[J]. 大连理工大学学报, 1993, 33(5): 566-575.
WANG Qing-xiang, ZHAO Shun-bo. Research on Crack Control of RC Beams with Large Concrete Cover [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1993, 33(5): 566-575.
- [4] 童保全. 大保护层钢筋混凝土受弯构件裂缝开展的试

验研究[J]. 水运工程, 1985(6): 52-55.

TONG Bao-quan. Research on Cracking Behavior of RC Beams with Large Concrete Cover [J]. Port & Waterway Engineering, 1985(6): 52-55.

- [5] HOGNESTAD E. High Strength Bars as Concrete Reinforcement, Part 2: Control of Flexural Cracking [J]. Journal of the PCA Research and Development Laboratories, 1962, 4(1): 46-63.
- [6] KAAR P H, MATTOCK A H. High Strength Bars as Concrete Reinforcement, Part 4: Control of Cracking [J]. Journal of the PCA Research and Development Laboratories, 1963, 5(1): 15-38.
- [7] CCES 01—2004, 混凝土结构耐久性设计与施工指南[S].
CCES 01—2004, Guide to Durability Design and Construction of Concrete Structures[S].
- [8] CLARK A P. Cracking in Reinforced Concrete Flexural Members [J]. Journal of American Concrete Institute, 1956, 52(8): 851-862.
- [9] CHI M, KIRSTEIN A F. Flexural Cracks in Reinforced Concrete Beams [J]. Journal of American Concrete Institute, 1958, 54(4): 865-878.
- [10] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.
GU Xiang-lin. Basic Principles of Reinforced Concrete Structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2004.
- [11] 丁大钧. 钢筋混凝土构件抗裂度、裂缝和刚度[M]. 南京: 南京工学院出版社, 1986.
Ding Da-jun. Resistance Cracking Moment, Crack and Stiffening Effect in Reinforced Concrete Members [M]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology Press, 1986.
- [12] 苏小卒, 李志华, 赵勇, 等. 配筋表层钢筋的混凝土梁裂缝和刚度试验探讨研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 62-67.
SU Xiao-zu, LI Zhi-hua, ZHAO Yong, et al. Experimental Research on Crack Width and Stiffness of Reinforced Concrete Beams with Skin Reinforcement [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(1): 62-67.
- [13] EN 1992-1-1: 2002, Eurocode 2: Design for Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings[S].
- [14] MAKHLOUF H M, MALHAS F A. The Effect of Thick Concrete Cover on the Maximum Flexural Crack Width Under Service Load [J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(3): 257-265.