

文章编号:1671-8879(2015)04-0062-07

考虑腹板斜裂缝的钢筋混凝土 梁剪切变形测试分析

史国刚¹,赵 桢²,刘 钊²

(1. 东南大学 交通学院,江苏 南京 210096; 2. 东南大学 土木工程学院,江苏 南京 210096)

摘 要:为研究腹板斜裂缝对钢筋混凝土梁剪切变形的影响程度,设计制作了以大标距机械式应变计为基础的框格应变测量装置,并通过模型试验等手段开展了测试与分析。试验采用 1 组小剪跨比混凝土工字梁试件,有等高度和变高度 2 种截面形式;在每个试件的腹板外侧,布置了 5 个框格应变测量装置,通过测量每一框格 5 个杆件的应变,应用理论模型推算出不同位置处框格的弯曲应变和剪切应变,实现斜裂缝开展前后应变的连续观测。研究结果表明:框格测试装置能实现梁体剪切变形与弯曲变形精确分离;薄腹梁腹板开裂后,剪切变形在总变形中的比例超过 50%,箍筋屈服时,剪切变形可达到总变形的 90%左右;配箍率与有效抗剪高度对开裂后剪切变形有显著影响;应用框格大标距的测试方法,有助于推动弹塑性极限状态下混凝土梁抗剪刚度的深入研究。

关键词:桥梁工程;应变测量装置;斜裂缝;剪切变形;剪应变

中图分类号:U446

文献标志码:A

Test and analysis on shear deformation of reinforced concrete beams with diagonal cracks

SHI Guo-gang¹, ZHAO An², LIU Zhao²

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: To investigate the impact of inclined cracks on the shear deformation of reinforced concrete beams, long base strain gauges with mechanical dial were devised in grid pattern. Experimental tests were also conducted on beams with I-shaped cross-section and low shear span-to-height ratio. The specimens contain 2 beams with constant height and 2 beams with variable height. On the sides of the web surface, 5 rectangular panels instrumented with the tailor-made strain gauges were set to capture the mean strain continuously and to avoid the disturbance of cracking. By measuring the strains in five directions of each rectangular panel, bending and shear strains could be obtained via theoretic formulae. The results show that accurate separation between shear deformation and bending strain can be achieved by using grid strain-gauge instruments. Shear deformation accounts for more than 50% of total deformation after shear cracking and it can achieve about 90% of total deformation in stirrup yielding. The method of long base grid strain gauges is conducted to deep research on shear stiffness under elastoplastic ultimate state. 3 tabs, 9 figs, 15 refs.

收稿日期:2015-01-26

基金项目:江苏省交通科学研究计划项目(2010Y12)

作者简介:史国刚(1975-),男,江苏武进人,研究员级高级工程师,工学博士研究生,E-mail:kkbb0507@qq.com。

Key words: bridge engineering; strain-gauge instrument; diagonal crack; shear deformation; shear strain

0 引言

众所周知,钢筋混凝土(RC)梁的变形由弯曲与剪切两部分组成。在弹性阶段,RC梁的弯曲与剪切变形计算,可运用材料力学方法进行;其变形测试,可采用布置于翼缘的纵向应变计和布置于腹板的三向应变花进行测量与换算^[1-2]。但是,当RC梁开裂之后,裂缝破坏了结构的连续性,使得结构的变形较弹性阶段大幅增加^[3-4]。因此,对带裂缝RC梁的弯曲与剪切变形进行计算与测试,具有重要的理论意义与实用价值。

对于以弯曲变形为主的区域,裂缝从受拉一侧向截面内延伸,部分截面退出工作,由未开裂时的截面抗弯刚度 EI 退化到开裂后的 EI_{cr} ^[5]。对于弯曲变形的量测,可采用跨裂缝的大标距应变计测量裂缝开展前后的纵向应变变化,由于垂直于翼缘的弯曲裂缝基本不影响平截面假定,弯曲变形可通过拉、压翼缘的应变差来推算。然而,对于以剪切变形为主的区域,当RC梁的腹板出现斜裂缝时,斜裂缝对剪切变形的影响显著增加^[6-7],难以简单地从截面角度进行分析。在弹性阶段,反映剪切变形的剪切刚度用 GA 来度量,但在出现斜裂缝后,难以直接对弹性剪切刚度 GA 进行修正^[8-9]。对于具有斜裂缝梁的剪切变形量测,需要寻求新的测试手段与方法。对此,国内外有学者也进行了初步研究。意大利学者 Debernardi 等利用精度为 0.01 mm 的电位式传感器,进行了开裂前后梁体变形的连续测量^[10-11];新加坡学者 Meas 等也通过大量程的线性位移传感器对梁柱节点区的应变进行了测量^[12]。但此类传感器制作成本较高,测量精度有待提高。中国学者付广元等通过物体表面的散斑图像实现物体变形的测量,可以得到混凝土表面的位移场,从而绘制出应力场,但变形测量受到图像采集处理设备的制约,精度有待提高^[13]。谢育良等采用光弹贴片法对开裂梁体的变形进行测量,通过在梁体表面粘贴双折射材料制作的薄片,得到等倾线与等色线,从而分析各点的主应力及方向^[14],虽然此类贴片的测量范围比普通的应变片小,不容易被裂缝穿透,但仍避免不了失效问题。曲哲等通过简单投影方法和图像识别算法,开发了平面摄影变形测量系统,并应用于混凝土梁的受剪试样中,对带裂缝梁进行变形测量,能够实现试件表面的全局应变测量,但由于相片坐标提取

与空间物理坐标分析中都会引入误差,所以测量结果不太稳定^[15]。总体来说,目前对于混凝土梁在开裂前后剪切变形的测量与计算方法还不够成熟,精度不高,且稳定性有待进一步提高。

因此,为研究 RC 梁腹板出现斜裂缝之后剪切变形的测量方法,探讨剪切变形对结构总变形的贡献程度,本文开展了 4 片薄腹工字形截面带悬臂简支梁的受剪性能试验,包括等高度与变高度 2 种截面形式。

1 带斜裂缝梁的弯曲与剪切变形测量装置

1.1 测量装置设计思路及原理

为连续观测裂缝出现前后的混凝土表面应变,一般的应变传感测试元件(如应变片、钢弦应变计和光纤光栅传感器)均会在裂缝出现时因应变量程超限而损坏。为解决这一问题,本文设计了机械式大标距应变计,由机械式千分表、不锈钢夹持柄和铝合金延长杆 3 个部分组成,其测量标距为 L ,如图 1 所示。

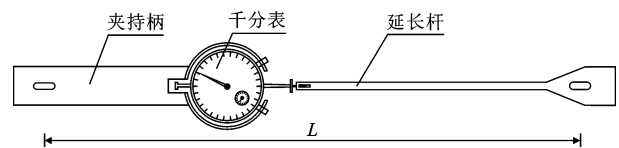


图 1 机械式大标距应变计的组成

Fig. 1 Composition of mechanical strain gauge

针对腹板斜裂缝出现位置及倾角的不确定性,借鉴应变花测试原理,将其扩展成矩形框格,如图 2 所示。将框格的 4 个角点固定在梁的侧面,通过测量框格各边与对角线的平均线应变,来推算框格内梁段的弯曲曲率和剪切角,进而得到梁段的弯曲变形和剪切变形。

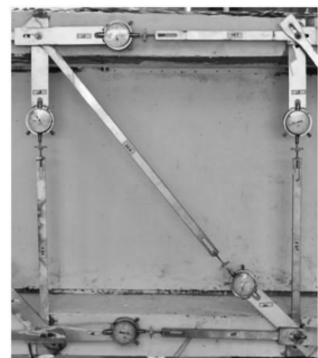


图 2 框格应变测量装置

Fig. 2 Strain measuring gauge

1.2 框格测量装置的设计

框格测量装置包含 5 个独立的机械式大标距应变计(图 2),每个应变计以机械式千分表作为测量元件,精度达 0.001 mm;自带标距调整功能,通过夹持柄和延长杆固定端的可调型固定孔,使标距的调整范围达 ± 10 mm;延长杆采用特制圆顶螺栓的螺纹进出,可以实现测试中的调表操作,调表量程可达 ± 10 mm;设计夹持柄均采用固定长度,延长杆可采用模数化设计。在 0.5~1.0 m 标距内的应变测试精度达到 $(1\sim 2)\times 10^{-6}$ 。在梁体开裂前,框格应变测量装置的精度不低于目前最常用的电阻式应变片,同时,还可以实现混凝土梁体开裂后的应变连续观测。

机械式大标距应变计需人工读数,稳定性好,可信度高。实际上,也可采用电传感器代替机械式千分表,虽能提升数据采样效率,但需采取措施防止传感器受到干扰。

2 带斜裂缝梁的弯曲与剪切变形的分析方法

在梁体侧面布置大框格应变计,可通过测量各边的应变,推算出剪切变形与弯曲变形。图 3(a)为典型矩形框格 ABCD,其长为 a 、宽为 h 。以节点 A 为原点建立如图 3(a)所示的局部坐标系, z 轴为梁体纵向, y 轴为竖向, θ 为测量装置中斜杆与 z 轴的夹角。

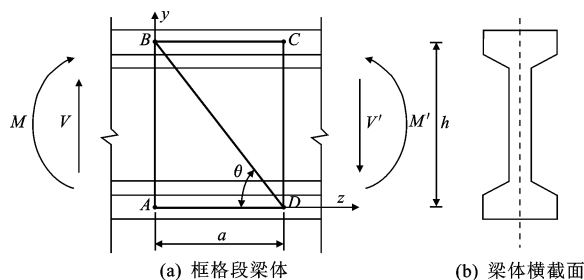


图 3 框格测试布置

Fig. 3 Grid measuring gauge

考虑图 3(a)所示的框格段梁体,受弯矩 M 、剪力 V 共同作用。为从框格量测应变中求算区域变形,有以下假设:①梁体为各向同性均质;②纵向应变 ϵ_z 取框格上下弦杆 AD、BC 的平均应变;③竖向应变 ϵ_y 取框格左右竖杆 AB、CD 的平均应变;④沿斜杆 BD 的线应变 ϵ_θ 为框格对角方向的平均应变。

矩形框格的总变形,可分为弯曲变形和剪切变形两部分,下面给出其算法。

2.1 弯曲变形

通过测量图 3(a)中框格梁段各杆件的长度变化,可以分别计算出各杆平均应变。

通过框格上下弦杆的伸长量,推算框格的平均曲率 ρ 为

$$\rho = \frac{u_B - u_T}{ah} = \frac{\epsilon_B - \epsilon_T}{h} \quad (1)$$

式中: u_T 、 u_B 和 ϵ_T 、 ϵ_B 分别为上、下杆 BC、AD 的伸长量和应变。

将曲率沿梁段长度 a (z 方向)二次积分,得到弯曲变形 f_b

$$f_b = \int_0^a \int_0^z \rho dz dz = \frac{1}{2} \rho a^2 \quad (2)$$

2.2 剪切变形

在已知 3 个方向应变 ϵ_z 、 ϵ_y 和 ϵ_θ 后,根据材料力学平面应变分析,求得梁段的平均剪切角(剪应变) r_{zy}

$$r_{zy} = \frac{\epsilon_\theta - \epsilon_z \cos^2(\theta) - \epsilon_y \sin^2(\theta)}{\sin(\theta) \cos(\theta)} \quad (3)$$

其中

$$\epsilon_z = \frac{\epsilon_T + \epsilon_B}{2} = \frac{u_T + u_B}{2a}, \epsilon_y = \frac{\epsilon_L + \epsilon_R}{2} = \frac{u_L + u_R}{2h}$$

式中: u_L 、 u_R 和 ϵ_L 、 ϵ_R 分别为左、右杆 AB、CD 的伸长量和应变。

剪切变形 f_s 等于平均剪应变与框格长度的乘积

$$f_s = r_{zy} a \quad (4)$$

则此框格的总变形即为弯曲变形与剪切变形两部分的叠加

$$f = f_b + f_s = \frac{1}{2} \rho a^2 + r_{zy} a \quad (5)$$

上述计算公式适用于等截面梁,但当变截面梁的截面高度变化率较小时,也可近似采用上述公式计算。

3 斜裂缝对梁体挠度影响的试验测试

3.1 试件设计

为研究梁体出现斜裂缝后,剪切变形与弯曲变形的测量与计算方法,本文开展了混凝土梁的剪切变形试验,力求通过试验实现梁体弯曲变形与剪切变形的剥离。试件采用 4 片工字形截面的单悬臂简支梁,梁长均为 5.4 m,等截面梁的高度为 0.8 m,变截面梁的高度为 0.4~0.8 m,见下页图 4。试验梁编号格式为:截面形式-配箍率,其中 2 片等截面梁编号为 CH-0.5 和 CH-0.4;2 片变截面梁编号为 VH-0.5 和 VH-0.4。

3.2 测试仪器布置

针对试件的设计尺寸,加工制作大框格应变计,

两种,变截面试件框格尺寸不一,具体布设形式如图5、图6所示,其中 P_1 和 P_2 分别为悬臂端和跨内加载点的荷载,对于等截面梁, $P_2=2P_1=2P$,对于变截面梁, $P_2=P_1=P$ 。

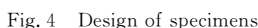


Fig. 4 Design of specimens

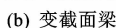
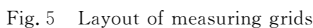


Fig. 6 Layouts of measuring gauges

(b) 变截面梁加载

Fig. 7 Loading equipment

在加载试验中,随荷载增加,通过大框格应变计

可以直接测读各条边的应变,利用式(1)和式(3)求出曲率与剪应变,再根据式(2)和式(4)求得弯曲变形与剪切变形。以试件 CH-0.5 的框格 RT-1 和 RT-5 为例,测读数据及计算结果见表 1、表 2。

表 1 试件 CH-0.5 中框格 RT-1 变形分析

Tab. 1 Deformation analysis of RT-1 of specimen CH-0.5

荷载等级/kN	框格各边应变/ 10^{-6}					曲率 $\rho/$ ($10^{-10} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)	剪应变 $r_{zy}/10^{-6}$	弯曲变形 $f_b/\mu\text{m}$	剪切变形 $f_s/\mu\text{m}$
	ϵ_T	ϵ_B	ϵ_L	ϵ_R	ϵ_θ				
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	6.00	-6.00	-17.14	-2.86	10.46	0.17	8.08	2.14	4.04
80	10.00	-14.00	-44.29	-11.43	24.41	0.34	20.59	4.29	10.30
120	20.00	-24.00	-70.00	-14.29	43.01	0.63	33.86	7.86	16.93
160	54.00	-22.00	-88.57	8.57	94.16	1.09	54.51	13.57	27.25
200	162.00	-14.00	-102.86	194.29	294.11	2.51	112.96	31.43	56.48
240	256.00	4.00	-87.14	578.57	673.07	3.60	220.62	45.00	110.31
280	316.00	12.00	-84.29	784.29	866.04	4.34	273.80	54.29	136.90
320	390.00	22.00	-75.71	1 014.29	1 086.92	5.26	334.19	65.71	167.10
360	470.00	34.00	-44.29	1 420.00	1 470.53	6.23	439.83	77.86	219.91

表 2 试件 CH-0.5 中框格 RT-5 变形分析

Tab. 2 Deformation analysis of RT-5 of specimen CH-0.5

荷载等级/kN	框格各边应变/ 10^{-6}					曲率 $\rho/$ ($10^{-10} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)	剪应变 $r_{zy}/10^{-6}$	弯曲变形 $f_b/\mu\text{m}$	剪切变形 $f_s/\mu\text{m}$
	ϵ_T	ϵ_B	ϵ_L	ϵ_R	ϵ_θ				
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	-10.00	26.67	20.00	-4.29	75.93	0.52	33.53	9.43	20.12
80	-28.33	55.00	44.29	-1.43	127.99	1.19	54.35	21.43	32.61
120	-53.33	100.00	75.71	8.57	186.56	2.19	75.30	39.43	45.18
160	-66.67	166.67	117.14	1.43	295.03	3.33	118.43	60.00	71.06
200	-31.67	290.00	378.57	11.43	619.34	4.60	223.45	82.71	134.07
240	56.67	408.33	1 054.29	31.43	1 181.19	5.02	380.36	90.43	228.22
280	115.00	488.33	1 718.57	1.43	1 696.40	5.33	530.12	96.00	318.07
320	216.67	575.00	3 204.29	-31.43	2 860.23	5.12	878.57	92.14	527.14
360	296.67	613.33	6 618.51	-105.23	5 273.10	4.52	1 582.68	81.43	949.61

依据表 1 和表 2 的分析,下页图 8 给出了荷载增长时 2 个框格(RT-1 和 RT-5)内的弯曲变形与剪切变形的变化曲线。

从图 8 可以看出,在斜裂缝出现后(P_{cr}),弯曲与剪切变形的荷载-位移曲线都出现了明显的转折点,梁体挠度迅速增加,说明斜裂缝对梁体变形有显著影响。

为了进一步分析剪切变形对总变形的贡献程

度,表 3 给出了在初裂及箍筋屈服时各框格剪切变形与总变形的比值。由表 3 可以看出,在斜裂缝开展之后,剪切变形所占的比例较大,并且随着荷载的增加,剪切变形占总变形的比值逐渐增大,甚至超过弯曲变形,在箍筋屈服之后,能达到弯曲变形的若干倍。另外,通过不同配箍率试件的对比分析可以发现,在相同的受载开裂状态,随着配箍率减小,剪切变形比例有增大的趋势。

表 3 各框格在斜裂缝开展和箍筋屈服时的剪切变形与总变形的比值

Tab. 3 Shear deformation to total deformation ratio of each grid at shear cracking and stirrup yielding

试件类型	截面梁编号	受载开裂状态	悬臂端框格		跨内框格		
			RT-1	RT-2	RT-3	RT-4	RT-5
等截面试件	CH-0.5	初裂	0.66	0.49	0.88	0.69	0.58
		箍筋屈服		0.62	0.90	0.81	
	CH-0.4	初裂	0.73	0.56	0.83	0.82	0.59
		箍筋屈服			0.90	0.87	
变截面试件	VH-0.5	初裂	0.85	0.52	0.35	0.96	0.60
		箍筋屈服				0.99	0.89
	VH-0.4	初裂	0.91	0.76	0.90	0.96	0.98
		箍筋屈服				0.98	0.99

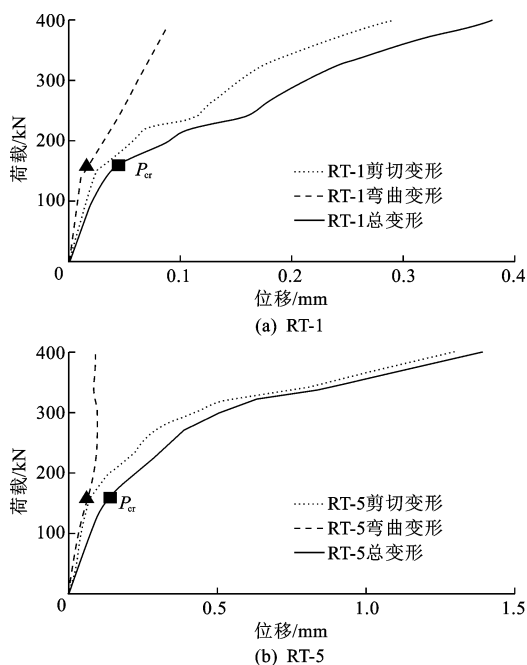


图 8 等截面梁试件(CH-0.5)的荷载-位移曲线(P_{cr} 为开裂荷载)

Fig. 8 Load-displacement of specimen CH-0.5(P_{cr} is cracking load)

图 9 给出了等截面试件 CH-0.5 与变截面试件 VH-0.5 中框格 RT-1 的剪切变形随荷载发展的曲线。可以看出,对于配箍率相同的梁,在相同荷载等级下,梁体截面越高,则剪切变形越小。

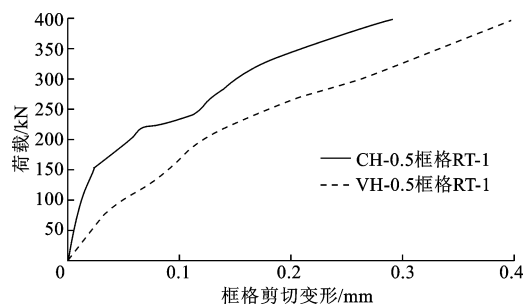


图 9 CH-0.5 与 VH-0.5 荷载-剪切变形曲线对比(框格 RT-1)

Fig. 9 Comparison of load-displacement between specimen of CH-0.5 and VH-0.5(grid RT-1)

5 结 语

(1)为实现梁体开裂后应变的连续观测,研制了以大标距机械式应变计为基础的框格应变测量装置,其位移量测精度达到 0.001 mm ,在 $0.5 \sim 1\text{ m}$ 标距内的应变测试精度达到 $(1 \sim 2) \times 10^{-6}$;通过量测框格 5 条边的应变,可达到将框格范围梁体剪切变形与弯曲变形相分离的目的。

(2)开展了等高度和变高度钢筋混凝土梁的弯曲与剪切变形测试试验,研究表明,在薄腹梁的腹板

开裂后,剪切变形占主导地位;特别是在箍筋屈服后,剪切变形迅速增加,可达到总变形的 90% 左右。

(3)在梁体斜向开裂后,配箍率是影响剪切变形的主要因素,随着配箍率的减小,剪切变形的比例逐渐增大;截面抗剪高度也是影响剪切变形的重要因素,对于配箍率相同的梁,截面越高,剪切变形越小。

(4)本文提出的试验方法,有助于推动弹塑性极限状态下混凝土梁抗剪刚度和承载力计算方法的深入研究。

参考文献:

References:

- [1] 李志强,陈以一. 方、矩形钢管混凝土剪切性能研究现状[J]. 建筑科学与工程学报,2013,30(3):62-70.
LI Zhi-qiang, CHEN Yi-yi. Research status on shearing performance of square and rectangular concrete-filled tubes[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(3): 62-70. (in Chinese)
- [2] 蒋晓曙,李 莽,任 亮,等. 光纤光栅传感器在混凝土变形及裂缝监测中的应用[J]. 施工技术,2013,42(4):52-54.
JIANG Xiao-shu, LI Mang, RENG Liang, et al. Application of fiber Bragg grating sensor in monitoring concrete deformations and cracks[J]. Construction Technology, 2013, 42(4): 52-54. (in Chinese)
- [3] 王国亮,谢 峻,傅宇方. 在用大跨度预应力混凝土箱梁桥裂缝调查研究[J]. 公路交通科技,2008,25(8):52-56.
WANG Guo-liang, XIE Jun, FU Yu-fang. Investigation research on crack of long-span prestressed concrete box girder bridges in service [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(8): 52-56. (in Chinese)
- [4] Huang C, Shen J J, Zhou M, et al. Force-based and displacement-based reliability assessment approaches for highway bridges under multiple hazard actions [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2015, 2(4): 223-232.
- [5] Debernardi P G, Taliano M. Shear deformation in reinforced concrete beams with thin web[J]. Magazine of Concrete Research, 2006, 58(3): 157-171.
- [6] 熊进刚,伍卫秀,程文灏. 钢筋混凝土短梁刚度和变形的分析与计算[J]. 建筑结构,2003,33(8):22-24.
XIONG Jin-gang, WU Wei-xiu, CHENG Wen-rang. Analysis and calculation of stiffness and deformation of short reinforced concrete beams[J]. Building Structure, 2003, 33(8): 22-24. (in Chinese)

- [7] 吕志涛,潘钻峰.斜向开裂混凝土梁的瞬时及长期剪切变形[J].建筑科学与工程学报,2010,27(2):1-9.
LU Zhi-tao, PANG Zuan-feng. Instantaneous and long-term shear deformations of inclined crack concrete beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(2): 1-9. (in Chinese)
- [8] 赵 桢.薄腹混凝土梁弹性阶段及斜裂缝开展后的剪切变形研究[D].南京:东南大学,2014.
ZHAO An. Study on the shear deformation of thin-web RC beams in elastic stage and after the formation of diagonal cracks[D]. Nanjing: Southeast University, 2014. (in Chinese)
- [9] JTG D62—2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
JTG D62—2004, Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. (in Chinese)
- [10] Debernardi P G, Guilia M, Taliano M. Shear strain in B-regions of beams in service[J]. Engineering Structures, 2011, 33(2): 368-379.
- [11] Debernardi P G, Guilia M, Taliano M. Parametric analysis of the influence of shear on the deflection of RC beams in service[J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(4): 335-350.
- [12] Meas K, Li B, Imran I. Seismic performance of lightly reinforced concrete exterior Beam-column joints[J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 15(10): 1765-1780.
- [13] 付广龙,何小元.数字散斑相关方法测定混凝土表面位移场[J].工程与试验,2010,50(1):21-23.
FU Guang-long, HE Xiao-yuan. Study on using digital speckle correlation method to test the full-field displacement of concrete surface [J]. Engineering & Test, 2010, 50(1): 21-23. (in Chinese)
- [14] 谢育良,丁大钧.钢筋混凝土梁剪跨区段应力状态研究[J].东南大学学报,1989,19(1):61-68.
XIE Yu-liang, DING Da-jun. Research on the stress state in the shear span of reinforced concrete beams [J]. Journal of Southeast University, 1989, 19(1): 61-68. (in Chinese)
- [15] 曲 哲,陆新征,叶列平,等.数字摄影测量在混凝土梁受剪性能研究中的应用[J].建筑结构学报,2006,27(增1):936-939.
QU Zhe, LU Xing-zheng, YE Lie-ping, et al. Application of the digital photogrammetry in the studies on shear behavior of concrete beams[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(S1): 936-939. (in Chinese)
- (上接第 61 页)
- ZANG Xin, LI An-qi, ZHAO Kao-zhong. Advances in assessment and retrofitting of building structures[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 1-11. (in Chinese)
- [13] 高小旺,鲍霁斌.地震作用的概率模型及其统计参数[J].地震工程与工程振动,1985,5(1):13-22.
GAO Xiao-wang, BAO Ai-bin. Probabilistic model and its statistical parameters for seismic load[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1985, 5(1): 13-22. (in Chinese)
- [14] 周锡元,曾德民,高晓安.估计不同服役期结构的抗震设防水准的简单方法[J].建筑结构,2002,32(1):37-40.
ZHOU Xi-yuan, ZENG De-ming, GAO Xiao-an. Simplified method for evaluating seismic design intensities structures with various service periods [J]. Building Structure, 2002, 32(1): 37-40. (in Chinese)
- [15] Zhou X L, Li Y M. Study on ground motion parameters of seismic appraisal for existing structures based on residual service life[J]. Advanced Materials Research, 2012, 368-373(2): 2303-2308.
- [16] 李亚琦.中国地震危险性特征分区[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,1999.
LI Ya-qi. Characteristic zoning of seismic hazard in China[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics in China Earthquake Administration, 1999. (in Chinese)
- [17] 刘恢先,卢荣俭,陈达生.修订我国地震烈度表的一个建议方案.中国科学院工程力学研究所报告集(四)[R].北京:科学出版社,1981.
LIU Hui-xian, LU Rong-jian, CHEN Da-sheng. One proposal of revising China seismic scale. Proceedings of institute of mechanics of Chinese academy of science[R]. Beijing: Science Press, 1981. (in Chinese)
- [18] Darragh R B, Huang M J, Shakal A F. Earthquake engineering aspects of strong motion data from recent California earthquakes [C]//Earthquake Engineering Research Institute. Fifth US National Conference on Earthquake Engineering Proceedings. Chicago: Earthquake Engineering Research Institute, 1994, 3: 99-108.