

侧向荷载下钢筋混凝土圆形桥墩抗裂性能研究

樊文才, 张 南, 阙水杰

(南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 在分析钢筋混凝土构件抗裂性能材料力学原理的基础上, 对比研究了截面抵抗矩塑性影响系数 γ 的计算方法和取值; 考虑混凝土截面开裂时截面高度对其塑化系数 α 影响, 根据圆形截面上力和力矩的平衡原理, 推导了圆形钢筋混凝土桥墩在横向静载作用下的压弯模型开裂荷载计算公式; 基于撞击荷载作用下材料动态本构关系, 提出桥墩动态抗裂性能分析模型与开裂荷载计算方法; 通过钢筋混凝土圆形桥墩模型的侧向静载及撞击试验对该方法和计算公式进行了验证, 并讨论了轴向力对钢筋混凝土圆形截面抗裂性能的影响。

关键词: 圆形截面; 抗裂性能; 塑化系数; 塑性影响系数; 撞击

中图分类号: U443.22-0319.56

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)04-0514-04

Research on Anti-Cracking Performance of RC Circular Pier under Lateral Load

FAN Wen-cai, ZHANG Nan, QUE Shui-jie

(College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, Jiangsu, China)

Abstract Based on analysis of anti-cracking performance on RC structure by material mechanics, contrastive study of the calculation formula and data of the plastic influence coefficient of concrete under bending moment was conducted. Taking the impact of section height during cracking on plastic parameter α into consideration, the calculation formula about cracking load of RC circular bridge pier pressure-bending model under lateral load was obtained based on balance principle of force and moment on circular section. Dynamic crack resistance model of piers and cracking load calculation were gained based on dynamic constitutive relationship of materials under impact load. The above method and calculation formula were verified by test of RC circular bridge pier model under lateral load and the impact of axial load on crack resistance property of RC circular section was discussed.

Key words circular section; anti-cracking performance; plastic parameter; plastic influence coefficient; collision

由于钢筋混凝土圆形桥墩在桥梁美学、抗剪强度及多次循环荷载下良好的延性和承载力等方面表现出的优良性能, 在城市立交桥和高架桥设计中, 目前较多采用钢筋混凝土圆形截面柱式墩^[1]。

桥梁服役期间遭受车辆的撞击作用, 国内现行的桥梁规范^[2]将其视为偶然荷载; 美国 AASHTO 规范将其计算为等效静态侧向撞击力。对于城市立交桥和高架桥, 其上部结构的竖向荷载和频繁作用的侧向水平力会使桥墩产生裂缝, 进而对其耐久性甚至承载力造成显著影响, 随着时间的推移这种“内伤”带来的隐患会逐步显现出来。业内对于混凝土构件抗裂性能的计算, 主要集中在矩形、T 型和工字型截面, 而圆形截面的研究则相对较少, 且主要采用简化的材料力学方法^[3-6], 因此对圆形桥墩在侧向荷载下的开裂机理、裂缝开展模式及开裂荷载计算方法的深入分析和研究具有理论和工程实际意义。

1 材料力学计算方法

传统方法是引入截面抵抗矩的塑性影响系数 γ , 定义为截面弹塑性抵抗矩与弹性抵抗矩之比, 正截面的曲线应力分布假定为直线分布形式, 此时受拉区边缘混凝土的应力为 $\gamma \cdot R_t$ 。

大量的深入研究表明: 截面受力性质、截面高度、混凝土强度及配筋率都对混凝土构件的抗裂性能产生影响, 体现在截面抵抗矩塑性影响系数 γ 的取值上。截面塑化系数 α 与截面高度密切相关且成反比关系; 截面抵抗矩塑性影响系数 γ 的计算则取决于 α 值。在计算圆形或环形钢筋混凝土构件开裂荷载时, γ 的选取在基本值 γ_m 的基础上通常考虑了截面高度对其的影响。

目前, 对于圆形截面抵抗矩塑性影响系数基本值 γ_m 的计算常见以下 3 种表达式, 分别为赵国藩的公式 (1)^[3]、彭天明的公式 (2)^[5] 和我国 GB

收稿日期: 2010-03-23 修订日期: 2010-05-28

作者简介: 樊文才 (1985-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事桥梁结构工程、桥梁耐撞性能学习与研究。E-mail: fanwencai2007@126.com.

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

50010—2002《混凝土结构设计规范》^[7] 建议采用的公式 (3):

$$\gamma_m = 1.65 - 0.15 \times \frac{d}{D} \tag{1}$$

$$\gamma_m = 1.7 - 0.1 \times \frac{d}{D} \tag{2}$$

$$\gamma_m = 1.6 - 0.24 \times \frac{d}{D} \tag{3}$$

式中: 参数 d 和 D 分别表示圆形截面和环形截面的内径和外径, 如图 1。

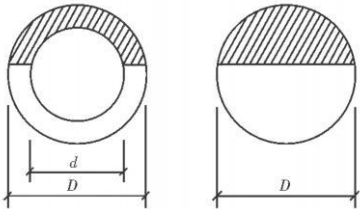


图 1 环形、圆形截面 γ 计算简图

Fig 1 Calculation diagram of γ on circular and ring section

根据截面高度的影响系数 ϵ_h , 对截面抵抗矩塑性影响系数 γ 进行修正, 国内常见确定截面高度影响系数的计算方式如式 (4)、式 (5) 及表 1。

$$\epsilon_h = 0.8 + \frac{50}{D} \tag{4}$$

$$\epsilon_h = 0.7 + \frac{120}{D}, 400 \leq D \leq 1600 \tag{5}$$

式中: 直径 D 的单位以 mm 计。

表 1 截面高度影响系数 ϵ_h

Tab 1 Influence factor ϵ_h on sectional depth

直径 D /mm	≤ 200	300	500	1 000	$\geq 1\ 500$
混凝土	1.05	1.00	0.90	0.85	0.80
钢筋混凝土	1.10	1.05	0.95	0.9	0.85

廖婉卿和赵国藩曾分别根据公式 (4)、表 1 对公式 (1) 的基本值 γ_m 进行修正得到 γ_1 、 γ_2 ; 彭天明利用公式 (2) 计算基本值 γ_m , 并按照表 1 修正得到 γ_3 ; GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》建议采用公式 (3)、公式 (5) 计算截面抵抗矩塑性影响系数 γ_4 (图 2)。

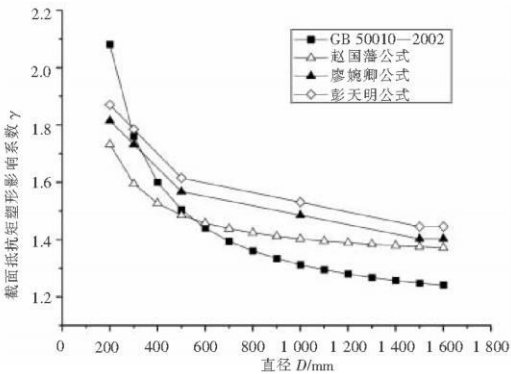


图 2 圆形截面截面抵抗矩塑性影响系数 γ

Fig 2 Influence factor γ of plasticity of resistance moment on circular section

构件的开裂荷载计算表达式, 如式 (6)、式 (7):

受弯截面: $M_f = \gamma \cdot R_t \cdot W_0 \tag{6}$

压 - 弯截面: $M_f = (\gamma \cdot R_t + \frac{N}{A}) \cdot W_0 \tag{7}$

2 侧向静载下钢筋混凝土圆形桥墩开裂荷载计算

基于材料力学方法分析构件抗裂性能, 截面弹性抵抗矩的计算有两种途径: 一是不考虑纵筋的影响采用素混凝土模型; 另一是根据折算系数将受拉钢筋截面折算为混凝土截面。材料力学虽简化了计算分析过程, 但对于纵筋对截面抗裂性能的影响和贡献予以极大近似, 因此在截面抗裂性能分析中有必要对钢筋和混凝土分别考虑, 建立钢筋混凝土圆形桥墩压弯模型开裂荷载计算的精确分析模型。

2.1 基本假定

构件临近开裂状态极限时, 截面做如下假定:

- 1) 钢筋混凝土圆形截面应变符合平截面假定。
- 2) 受压区混凝土应力图呈三角形、受拉区混凝土应力图呈梯形分布 (图 3)。
- 3) 沿圆周的单根钢筋简化为等效薄壁钢环, 且其应力图呈三角形分布。

等效薄壁钢环壁厚 $t_s = \frac{\rho r}{2g}$, $g = \frac{r_s}{r}$, 其中: ρ 为

圆形桥墩截面纵筋配筋率; r_s 为等效薄壁钢环壁厚中心 (桥墩纵筋中心) 至截面圆心距离; r 为钢筋混凝土圆形桥墩的截面半径。

4) 圆形截面受拉区边缘混凝土极限拉应变为:

$$\epsilon_{tk} = \frac{f_{tk}}{E_c}$$

其中: f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值; E_c 为混凝土的弹性模量。

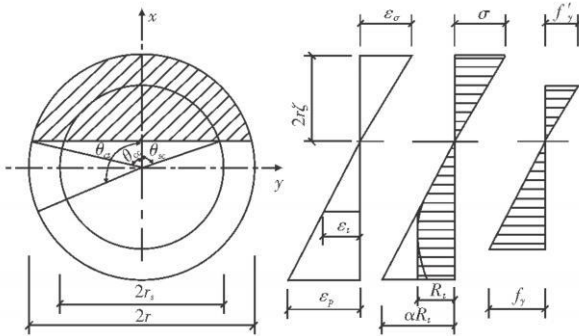


图 3 圆形截面抗裂分析计算简图

Fig 3 Calculation diagram of analysis of anti-cracking load of circular section

2.2 开裂状态时截面中和轴计算

混凝土构件达到开裂状态时, 假定截面受压区高度 $x_f = 2r\xi$; 受拉区混凝土已经进入塑形状态, 截面抵抗矩塑性影响系数 γ 与塑化系数 α 密切相关,

引入混凝土结构设计规范^[7]对 γ 的修正系数, 分析截面高度对塑化系数的修正:

$$\alpha = (0.7 + \frac{120}{D}) \times 2$$

令: $\Delta = \frac{\text{受拉塑性区高度}}{\text{受拉区高度}} = \frac{h_p}{2r(1-\xi)} = \frac{\alpha-1}{\alpha}$

则: 受拉混凝土塑性区高度为:

$$h_p = \Delta \cdot 2r(1-\xi)$$

受拉混凝土塑性区起点坐标为:

$$\begin{cases} x = \Delta \cdot 2r(1-\xi) - r \\ \theta_{\alpha} = \arccos[2\Delta(1-\xi) - 1], 0^{\circ} \leq \theta_{\alpha} \leq 180^{\circ} \end{cases} \quad (8)$$

受拉混凝土弹性区高度: $h_e = (1-\Delta) \cdot 2r(1-\xi)$

则: 截面上混凝土区域任一点的应力为:

$$\sigma_{\theta} = \begin{cases} f_t \cdot \frac{\cos\theta - (1-2\xi)}{2(1-\Delta)(1-\xi)}, & 0 < \theta \leq \theta_{\alpha} \\ -f_t, & \theta_{\alpha} < \theta \leq \pi \end{cases} \quad (9)$$

等效薄壁钢环上任一点应力为:

$$\sigma_{\theta} = \frac{g \cos\theta - (1-2\xi)}{g + (1-2\xi)} \cdot \gamma f_s \frac{E_s}{E_c} \quad (10)$$

则: 混凝土应力的合力为:

$$N_c = \sum_{i=1}^n \sigma_i A_i = \int_{\theta_0}^{\pi} \sigma_{\theta} dA$$

式中: $dA = 2r^2 \sin^2\theta \cdot d\theta$, 对上式经过积分整理得到混凝土应力合力表达式:

$$N_c = 2r^2 f_t \left\{ \frac{\frac{\sin^3\theta_{\alpha}}{3} - (1-2\xi)(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta_{\alpha}}{4})}{(1-\Delta)(1-\xi)} + (\theta_{\alpha} - \pi - \frac{\sin 2\theta_{\alpha}}{2}) \right\} \quad (11)$$

则: 等效薄壁钢环应力的合力为:

$$N_s = \sum_{i=1}^n \sigma_i A_i = 2 \int_0^{\pi} \sigma_{\theta} dA$$

式中: $dA = \frac{1}{2} \rho r^2 d\theta$, 对上式经过积分整理得到薄壁钢环应力合力表达式:

$$N_s = 2r^2 f_t \left[\rho r^2 \pi \frac{E_s}{E_c} \frac{2\xi - 1}{g + (1-2\xi)} \right] \quad (12)$$

根据截面上力的平衡可得方程:

$$N_c + N_s = N_{\text{轴力}} \quad (13)$$

对于桥墩式压弯模型, 轴向力 $N_{\text{轴力}}$ 是桥梁上部结构传来荷载为已知值, 则由式 (11) ~ 式 (13) 可解得截面达到开裂状态时的 ξ 值, 即确定圆形截面的中和轴位置。

2.3 开裂状态时截面弯矩计算

混凝土应力合力对截面中心的弯矩:

$$M_c = \int_{\theta_0}^{\pi} dA \cdot x = \int_0^{\pi} \sigma_{\theta} 2r^2 \sin^2\theta \cdot d\theta \cdot r \cos\theta$$

将式 (9) 带入上式经积分整理可得:

$$M_c = r^3 f_t \left\{ \frac{\frac{\cos\theta_{\alpha} \sin^3\theta_{\alpha}}{4} + \frac{1}{4}(\frac{\theta_{\alpha}}{2} - \frac{\sin 2\theta_{\alpha}}{4}) \frac{\sin^3\theta_{\alpha}}{(1-2\xi)} + \frac{3}{(1-\Delta)(1-\xi)} + \frac{2}{3} \sin^3\theta_{\alpha} \right\} \quad (14)$$

等效薄壁钢环应力合力对截面中心的弯矩:

$$M_s = \int_A dA \cdot x = 2 \int_0^{\pi} \sigma_{\theta} \frac{1}{2} \rho r^2 \cdot d\theta \cdot r \cos\theta$$

将式 (10) 带入上式经积分整理可得:

$$M_s = r^3 f_t \rho \pi \frac{E_s}{E_c} \frac{g}{g + (1-2\xi)} \quad (15)$$

则: 截面达到开裂状态时的抗弯承载力即开裂弯矩:

$$M = M_c + M_s \quad (16)$$

根据截面中和轴位置即相对受压区高度值 ξ 带入公式 (8) 解得 θ_{α} , 由式 (14) 和式 (15) 分别计算全截面开裂时混凝土与钢筋等效的薄壁钢环的弯矩值, 式 (16) 对二者求和则得到圆形截面的开裂荷载。

3 侧向撞击下钢筋混凝土圆形桥墩开裂荷载计算

根据文献 [8], 动载作用下钢筋混凝土构件正截面承载力计算方法和公式与静载相同, 只需考虑材料强度的动态提高系数。由式 (10)、式 (12)、式 (14) 及式 (15) 可知: 侧向撞击下桥墩开裂计算只需求解混凝土的动态抗拉强度 f_t 即可, 对于撞击作用下混凝土的应变率效应, 根据文献 [9] 对材料平均应变率的定义及计算模型求解。

受拉区混凝土的平均应变率为:

$$\bar{\dot{\epsilon}}_c(x, t) = 0.5 |\bar{\dot{\epsilon}}_c(0, t)| \quad (17)$$

式中: $\bar{\dot{\epsilon}}_c(0, t)$ 表示开裂截面外边缘混凝土应变率。

根据欧洲规范 CER Makar 修正公式及朱伯龙·刘祖华关于混凝土抗拉强度动态提高系数的率型经验公式, 分别计算混凝土动态抗拉强度提高系数 k_{td} :

$$k_{td} = (\dot{\epsilon}_c / \dot{\epsilon}_{cs})^{1.016 \delta} \quad (18)$$

$$k_{td} = (\dot{\epsilon}_c / \dot{\epsilon}_{cs})^{\gamma} \quad (19)$$

$$k_{td} = 1.7 + 0.2154 \times \log_{10} \dot{\epsilon}_c \quad (20)$$

式中: $\dot{\epsilon}_c$ 为混凝土动态应变率; $\dot{\epsilon}_{cs}$ 为混凝土准静态应变率, $3 \times 10^{-6} s^{-1}$; $\delta = 1/(10 + 0.6 f_{ct})$ (f_{ct} 表示混凝土立方体试样准静态抗拉强度); $\gamma = 1/(1 + 0.8 f_{ct})$, f_{ct} 同上。

则, 侧向撞击下混凝土抗拉强度为:

$$f_{td} = k_{td} f_t \quad (21)$$

对于桥墩在侧向车辆撞击下的抗裂性能分析, 仍可按照式 (13)、式 (16) 计算, 只需将式 (11) ~ 式 (12)、式 (14) 及式 (15) 中混凝土静态抗拉强度 f_t

替换为动态值 f_{td} 即可。

4 试验研究与计算分析

试验中所用圆形钢筋混凝土桥墩模型由承台、墩身和盖梁 3 部分组成, 其中圆形墩身高 1 200 mm, 直径 250 mm; 因试验条件限制, 将其约束条件模拟为承台端固支、盖梁端铰结, 并预加轴压力 258 kN, 其轴压比侧向静载为 0.113, 侧向撞击为 0.100。圆形桥墩模型和相关参数如图 4 及表 2。

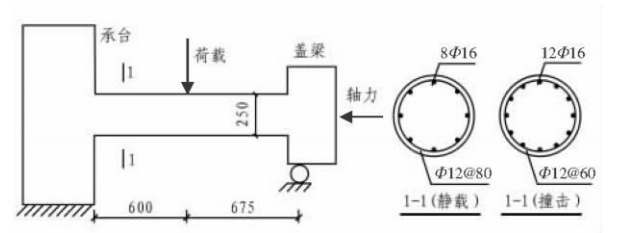


图 4 桥墩试验模型
Fig 4 Bridge pier test model

表 2 桥墩模型试验参数

Tab 2 Test parameters of bridge pier model MPa					
纵筋		箍筋		混凝土	
配置	屈服强度	配置	屈服强度	弹性模量	抗压强度
Φ16	370	Φ12@80	300	2.1×10^5	51.3
					3.5×10^4

4.1 侧向静载试验与结果分析

以 0.5 t 级数逐步递增加载, 同时采用裂缝测定仪观察裂缝出现情况。加载至 11.5 t 时, 桥墩跨中底部出现垂直裂缝其宽度为 0.06 mm; 由本文方法式 (16) 计算该桥墩模型截面开裂时正截面承载力 $M = 19.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 其中纵筋提供弯矩由式 (15) 计算 $M_s = 5.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 占总承载力的 25.9%, 对截面的抗裂作用明显。对于材料力学方法, 由式 (7) 计算 M 。

根据结构力学固简支梁模型, 横向荷载作用点处弯矩与力关系式 $F = \frac{2l^3}{a^2b(3l-a)} \cdot M$, 可计算开裂时荷载作用点承受的集中力 F 。则试验值与理论计算结果对比如表 3。由表 3 可见, 本文方法计算结果与试验值吻合较好, 且偏于安全。

表 3 开裂荷载结果对比
Tab 3 Contrast of cracking loads

类型	计算值		相对误差 /%
	$M / (\text{kN} \cdot \text{m})$	F / kN	
试验值	—	107.8	—
本文方法	19.7	104.2	-3.3
系数 γ_1	17.8	94.2	-12.6
系数 γ_2	18.3	96.8	-10.2
系数 γ_3	18.5	97.9	-9.2
系数 γ_4	18.2	96.3	-10.7

对于钢筋混凝土圆形桥墩抗裂性能的分析, 本文方法的计算值能与试验结果较好吻合, 且比传统

材料力学方法相比计算精度更高; 在公式 (15) 中若令轴向力 $N_{\text{轴力}} = 0$, 根据本文方法计算该试验中圆形钢筋混凝土桥墩模型的侧向荷载作用处截面的开裂弯矩仅为 $1.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 试验中的轴压力对桥墩开裂性能贡献率高达 41.6%; 当轴压比提到 0.142 时, 其抗裂性能则提高 63.1%, 压应力的存在延缓了截面上裂缝的出现, 轴向压力对圆形截面抗裂性能影响显著 (图 5)。

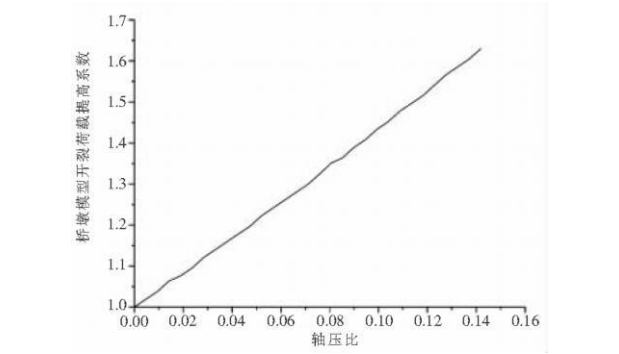


图 5 轴向压力对抗裂性能的影响
Fig 5 Elevated coefficient about cracking load under different axial load

4.2 侧向撞击试验与结果分析

根据桥墩模型 2 侧向撞击试验结果, 工况 2 时桥墩底部出现 0.03 mm 宽度裂缝, 此时根据圆形截面外边缘混凝土应变时程曲线, 计算受拉区混凝土平均应变率为 0.135 s^{-1} 。

表 4 桥墩动态抗裂性能参数

Tab 4 Dynamic parameters of bridge pier under collision			
项目	CEB 规范	Malvar 修正	朱伯龙·刘祖华
k_d	2.65	1.31	1.51
f_{cd} / MPa	5.11	2.52	2.91
$M / (\text{kN} \cdot \text{m})$	34.2	25.6	28.1
F / kN	180.9	135.4	148.6

桥墩 2 静载时计算其开裂弯矩为 $21.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 表 4 计算结果显示: 由于材料的动态应变率效应, 撞击作用下桥墩抗裂性能明显提高, 其值分别为 56.2%, 16.9%, 28.3%, 不同率型公式对其影响较大。

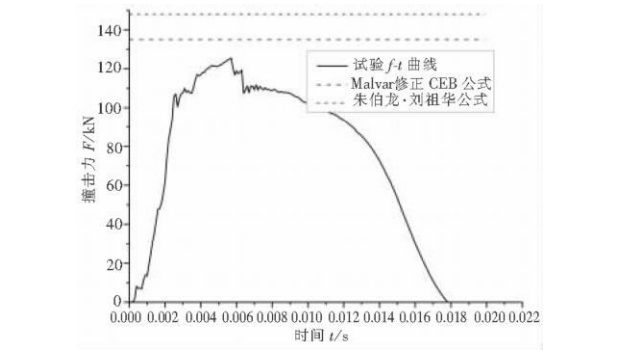


图 6 侧向撞击下桥墩开裂荷载
Fig 6 Cracking load of pier under lateral collision

很好地反映了加铺层、夹层材料与结构层的工作状态,为以后加铺层的理论分析与设计提供了参考。

2)室内模拟试验表明,玻纤格栅、FHGS格栅、聚酯玻纤布和橡胶沥青应力吸收层均能明显延缓反射裂缝的扩展速度,对裂缝的出现和扩展起到很好的抑制作用,从而延长了沥青混凝土加铺层的使用寿命。

3)就所对比的玻纤格栅、FHGS格栅、聚酯玻纤布和橡胶沥青应力吸收层等4种材料而言,模拟试验研究表明,在抑制反射裂缝方面聚酯玻纤布和橡胶沥青应力吸收层的效果较差、玻纤格栅和FHGS格栅的效果相当。虽然加铺玻纤格栅的效果稍好于FHGS格栅,主要是由于室内小型模拟试验存在的尺寸效应所导致,考虑到FHGS格栅的抗车轮荷载作用下的剪切能力和抗施工割破能力要明显好于玻纤格栅,且其效果较好,因此,推荐在水泥路面“白改黑”和半刚性防反射裂缝的实际工程中,采用FHGS格栅效果会好很多。有条件的情况下,可以和橡胶沥青应力吸收层同时使用。

(上接第517页)

分析表明:侧向撞击下,桥墩的抗裂性能与材料动态性能密切相关,图6显示:Malvar修正CEB材料率型经验公式计算结果与试验中的撞击力时程曲线峰值较为吻合,材料动态率型经验公式对计算结果有较大影响。

5 结论

钢筋混凝土构件抗裂性能的分析,传统方法通过引入截面抵抗矩塑性影响系数 γ ,根据材料力学的原理和方法进行计算。笔者根据开裂截面上内力平衡原理,推导了圆形截面开裂荷载计算公式,为钢筋混凝土圆形桥墩压弯作用下的抗裂性能分析提供了新思路和方法。

对于钢筋混凝土圆形桥墩抗裂性能的分析,本文方法的计算值与传统方法相比能与试验结果较好吻合,相对误差仅为3.3%。

纵筋对钢筋混凝土截面抗裂性能的贡献明显,试样中桥墩模型截面开裂时纵筋提供弯矩 M_s 占开裂荷载的25.9%,本文计算模型精确且与截面受力相符。

轴向压力对圆形截面抗裂性能影响显著,文中桥墩试验模型的轴压比0~0.14范围内,桥墩抗裂性能提高系数与轴压比呈近似线性关系。

考虑材料的应变率效应,计算侧向撞击下钢筋混凝土圆形桥墩的开裂荷载,本文开裂荷载计算结

参考文献:

- [1] 李淑明,许志鸿,蔡喜棉.土工织物对复合式路面结构内力影响分析[J].中国公路学报,2006,19(1):28-31
- [2] 倪富健,尹应梅,高明生.聚酯玻纤布防荷载型反射裂缝室内模拟试验[J].东南大学学报:自然科学版,2007,31(1):128-131.
- [3] 王朝辉,王选仓,杨维国.格栅加筋沥青加铺层结构轮载疲劳模拟对比试验[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(6):16-20.
- [4] 杨斌,陈栓发,廖卫东,等.STRATA应力吸收层对加铺层荷载及温度应力的影响分析[J].公路交通科技,2005,22(9):27-30
- [5] 于斌,曹百岗,杨军.荷载型反射裂缝室内模拟试验研究[C]//2009年国际橡胶沥青大会中文论文集.南京:江苏省地质测绘院印刷厂,2009:70-74.
- [6] 李善强,王选仓.沥青加铺层反射裂缝发展疲劳试验模拟研究[J].中外公路,2009,29(2):190-193
- [7] 杨德生.水泥路面沥青加铺层反射裂缝成因及分析[J].西部交通科技,2009,20(2):52-57
- [8] 元松,谈至明.沥青路面荷载型反射裂缝疲劳断裂分析[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(10):1352-1357
- [9] 黄金,吴进良,李鑫,等.旧水泥路面沥青加铺层反射裂缝应力分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2010,29(2),203-206.

果与开裂状态时撞击力时程曲线峰值较为接近,且材料动态率型经验公式对计算结果有较大影响,动态撞击力与静态荷载等效方法有待更深入的研究。

参考文献:

- [1] 徐贱云,王健生,铃木计夫.多次循环荷载作用下钢筋混凝土柱的性能[J].土木工程学报,1991,24(3):57-70
- [2] JTG D 62-2004公路钢筋混凝土和预应力混凝土桥涵设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [3] 赵国藩.钢筋混凝土构件抗裂性能和最大裂缝宽度的试验和计算方法[J].建筑结构学报,1980,1(4):1-17.
- [4] 丁自强.水工钢筋混凝土构件截面抵抗矩塑性系数的计算[J].郑州工学院学报,1980,1(1):57-70.
- [5] 彭天明.关于混凝土和钢筋混凝土受弯构件正截面抗裂计算塑性系数 γ 值的几个问题[J].华东水利学院学报,1979,7(3):45-57
- [6] 黄侨,张树仁,王昌武.钢筋混凝土圆形截面偏心受压构件的抗裂性能及裂缝宽度试验研究[J].中国公路学报,1996,9(1):66-74
- [7] 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
- [8] 陈肇元,施岚清.钢筋混凝土梁在静速和快速变形下的弯曲性能[C]//清华大学抗震抗暴工程研究室.钢筋混凝土结构构件在冲击荷载下的性能:第4集.北京:清华大学出版社,1986.
- [9] 许琦.侧向冲击下钢筋混凝土圆形桥墩动力性能研究[D].南京:南京工业大学,2009