

建筑科学研究报告

REPORT OF BUILDING RESEARCH

1981

No. 23

允许出现裂缝的部分预应力混凝土梁 疲劳性能及计算方法

Fatigue Behaviour of Cracked Partially Prestressed
Concrete Beams and Its Calculating Method

中国建筑科学研究院
CHINESE ACADEMY OF BUILDING RESEARCH



提 要

本文通过三十六根允许出现裂缝的先张法部分预应力混凝土梁的静载和疲劳试验,较系统地研究了此类梁的疲劳性能。文中剖析了在重复荷载作用下裂缝截面处钢筋应力的变化规律、箍筋应力的规律、垂直裂缝和斜裂缝的开展和闭合以及正截面、斜截面的疲劳强度,提出了预应力钢筋和箍筋应力的疲劳验算方法和裂缝宽度的控制条件。

目 录

一、试验简介	(2)
二、正截面疲劳性能	(3)
三、垂直裂缝的开展与闭合	(9)
四、斜截面疲劳性能	(10)
五、斜截面抗裂度及斜裂缝宽度	(22)
六、经济效果分析	(23)
七、结论	(24)

Fatigue Behaviour of Cracked Partially Prestressed Concrete Beams and Its Calculating Method

Sun Huizhong, Shen Zaikang,

Liu Chengrui Ma Kunzhen, Gu Shuisheng

Abstract

Based on the static and fatigue experiments of thirty Six pieces of I-section test beams, the fatigue behaviour of partially prestressed concrete beams has been studied, the stress variation of prestressing steel in the cracking section, the stress variation of stirrups, the development and closure of flexural and inclined cracks, the fatigue strength of the normal and inclined section under repeated loading have been analyzed. Furthermore, calculating method for the stresses of prestressing steel and stirrups, and the control condition of crack width are also presented in the paper.

允许出现裂缝的部分预应力混凝土梁 疲劳性能及计算方法*

中国建筑科学研究院建筑结构研究所 孙慧中 沈在康 马坤贞

北京建工学院 刘承瑞, 一机部第一设计院 顾水生

当前, 部分预应力混凝土结构已引起了许多国家的重视, 一些国家的结构设计规范已列入了有关规定。在我国钢筋混凝土结构设计规范中对此也已有所体现, 在工程中亦有较多的应用经验, 但是, 至今对出现裂缝的部分预应力混凝土梁的抗疲劳性能研究较少。因此, 对于承受多次重复荷载作用的预应力混凝土梁, 我国规范《TJ 10—74》规定按不允许出现裂缝的原则设计。这样为了满足设计规范规定的抗裂度要求, 不仅使大多数构件配置了较多的预应力钢筋, 而且使部分预应力混凝土在疲劳构件上的应用受到了限制。因此, 系统研究此类构件的抗疲劳性能是十分必要的。

一、试验简介

允许出现裂缝的部分预应力混凝土梁是指在静力使用荷载作用下允许结构出现有限宽度的裂缝, 从而在疲劳荷载作用时梁是带裂缝工作的。

试验研究的主要目的是, 通过对不同预应力度、配筋率、剪跨比的部分预应力混凝土梁在静载及重复荷载作用下的试验研究, 分析其主筋、箍筋应力的变化规律, 正截面和斜截面的疲劳强度及裂缝宽度, 以确定部分预应力混凝土梁的合适的预应力度, 以便在保证梁具有足够的疲劳强度和满足裂缝宽度要求的前提下节省材料。

针对部分预应力混凝土梁的特点共进行了两批试验。试验梁的配筋和预应力张拉控制应力见表1。考虑到设计时梁的强度、抗裂度、变形、裂缝宽度首先要满足静力使用荷载作用下的要求, 然后满足疲劳荷载作用下疲劳强度、裂缝宽度的要求, 因此, 各试验梁的加载程序是: 加二次静载至静力使用荷载, 然后进行疲劳试验。

第一批试验梁着重研究正截面的疲劳性能, 所取用的静力使用荷载所产生的弯矩 M 为 $0.635M_p$ (M_p 为计算的静力极限弯矩)。疲劳荷载所产生的弯矩 M^* 为 $0.423 M_p$ 、 $0.5 M_p$ 、 $0.635 M_p$ 。

第二批试验梁着重研究斜截面的疲劳性能, 所取用的静力使用剪力 Q 为 $0.54Q_p \sim 0.74Q_p$ (Q_p 为实测静力极限剪力)。疲劳荷载产生的剪力 Q^* 为 $0.43 Q_p \sim 0.74 Q_p$ 。

参加专题研究工作的还有: 辽宁省建筑科学研究所 李占忠 黑龙江低温建筑科学研究所 廖淑康 河北工学院 张秀奇 曲英华 许素兰

表 1

试 件	张 拉 型 式	根 数 (根)	截 面 型 式	梁 高 h (cm)	梁 长 L (cm)	腹厚比 h _f /b	主 筋 μ_k (%)	箍 筋 μ_x (%)	剪跨比 a/h_0	张拉控制应力 σ_k (kg/cm ²)
第一批试验梁	先张法	21	I	40	340	4.4	1.92	0.73 0.92 1.10	2.7	0~0.77R _y
	后张法	1	I	119	600	6	1.02	1.02	1.8	0.67R _y
	先张法	2	I	99	600	6	1.60	1.64	2.0	0.69R _y
第二批试验梁	先张法	12	I	60	340	7.2	1.66	0.3 0.69 1.0 1.23	1.0 1.8 2.3	0~0.7R _y

二、正 截 面 疲 劳 性 能

(一) 受拉预应力钢筋应力的变化规律

鉴于部分预应力混凝土梁受拉预应力钢筋在裂缝截面处的应力状态比较复杂,因此,深入剖析在重复荷载作用下该处预应力钢筋应力的变化规律,是研究此类构件疲劳性能的关键。

出现裂缝的部分预应力混凝土梁(BYDL-2梁),裂缝截面处预应力钢筋实测应力 σ_y 在静载及重复荷载作用下的变化规律见图 1。试验表明,在相同外荷载作用下,第二次静载作用下的受拉预应力钢筋应力比第一次静载作用下的钢筋应力相应增大,而经 200 万次重复荷载作用后的钢筋应力又相应增大。由此说明,出现裂缝的部分预应力混凝土梁,经 200 万次重复荷载作用后,受拉预应力钢筋应力与不开裂梁的应力相比,钢筋应力相应地增大,其增大值由两部分组成:一部分是由于受拉区混凝土开裂,混凝土退出工作引起的;一部分是在多次重复荷载作用下产生的。

受拉混凝土开裂引起的钢筋应力增大值与构件的预应力度直接有关。图 2 绘出了采用不同张拉控制应力的 B 类梁,在疲劳试验前进行的两次静载试验的实测钢筋应力曲线。图中表明,在相同荷载作用下,具有不同预应力度的梁,由于受拉区混凝土退出工作所引起的预应力钢筋应力增大值是不同的。预应力度越高,应力增大值越小;预应力度越低,应力增大值越大。

由于预应力混凝土梁截面上所建立的有效预应力不仅取决于预应力钢筋的张拉控制应力 σ_k ,而且与截面特征有关,因此,可以采用在常用配筋率情况下的静力抗裂安全系数 $K_t =$

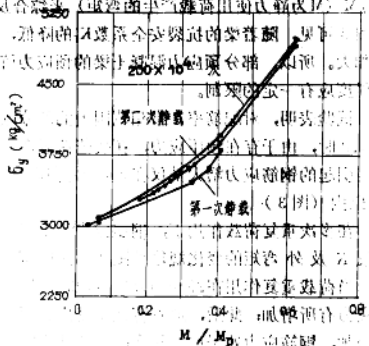


图 1 BYDL-2梁在静载及重复荷载作用下预应力钢筋的应力变化

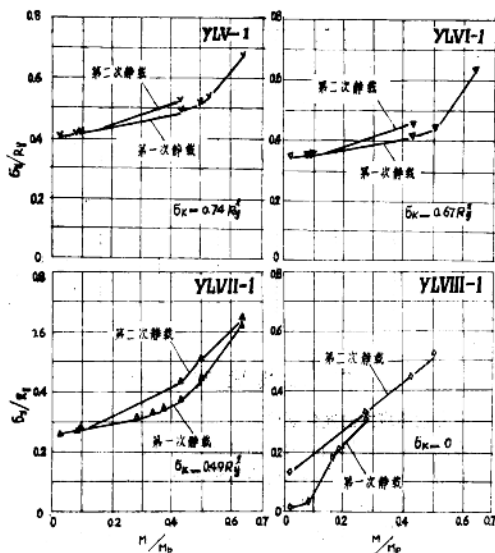


图2 B类梁在第一次、第二次静载作用下预应力钢筋的应力变化

M_p^*/M (M 为静力使用荷载产生的弯矩)来综合反映预应力度对上述钢筋应力增大值的影响。由图3可见,随着梁的抗裂安全系数 K_t 的降低,受拉区混凝土开裂引起的钢筋应力增大值逐渐加大。所以,部分预应力混凝土梁的预应力值不能降得太低,也就是梁受拉区混凝土的开裂程度应有一定的限制。

试验表明,对配筋率在常用范围内的部分预应力混凝土梁,当抗裂安全系数 K_t 控制在大于0.8时,由于存在预压应力,在疲劳荷载产生的弯矩 $M^p = 0.423M_p$ 作用下,受拉区混凝土开裂引起的钢筋应力增大量仅在300公斤/厘米²以内(图3)。

在多次重复荷载作用下,钢筋应力随重复次数 N 及外弯矩的变化规律见图4。由图可见,当荷载重复作用在20~50万次以内时,钢筋应力有所增加;此后,随着荷载重复次数逐渐增加,钢筋应力处于稳定状态;当荷载上限逐渐增大,预应力钢筋应力达到或超过预应力钢筋疲劳计算强度时,则随着重复次数的增加,预应力钢筋中的某一根将首先因疲劳脆断而退出工作,致使其余钢筋的应力急剧增长而出现明显的应力重分布现象。

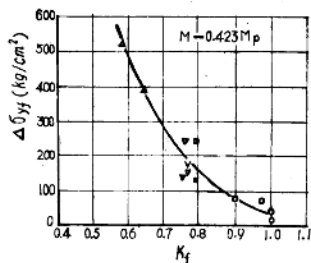


图3 受拉区混凝土开裂引起的预应力钢筋应力增大量 $\Delta\sigma_{yf}$ 与抗裂安全系数 K_t 关系

在重复荷载作用下, 梁内预应力钢筋应力变化是较为复杂的。受拉区混凝土抗裂度的降低, 会使钢筋应力增加; 受拉预应力钢筋应力损失加大, 钢筋应力降低; 受拉预应力钢筋和混凝土粘结力的逐渐破坏, 又会使钢筋应力减小; 受压区混凝土徐变的发展, 钢筋和混凝土之间发生应力重分布, 也会使钢筋应力增加。试验表明, 当钢筋应力处于稳定状态时, 经疲劳荷载 (相当于 $M^p = 0.423 M_p$ 、 $M^p = 0.5 M_p$) 重复作用200万次后的钢筋应力, 与未经重复荷载作用时钢筋应力的比为 $0.98 \sim 1.05$ 。即经疲劳荷载作用, 最大应力的增长率在5%以内。可见, 出现裂缝的部分预应力混凝土梁在多次重复荷载作用下, 裂缝截面处预应力钢筋应力变化并不大。这就为在工程上推广使用承受多次重复荷载的部分预应力混凝土梁提供了依据。

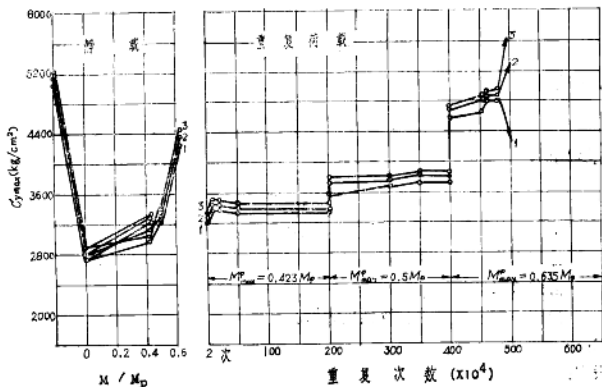


图4 YL VII梁在重复荷载作用下预应力钢筋的实测应力 σ_{max} 的变化

(二) 受拉预应力钢筋应力的计

算方法

根据受拉预应力钢筋应力的实测结果, 部分预应力混凝土梁受拉预应力钢筋的疲劳最大应力可采取以下两种计算方法:

方法一:

受拉预应力钢筋应力的计算模式是以弹性计算为基础, 考虑受拉区混凝土开裂和重复荷载对受拉预应力钢筋应力的影响。计算公式是根据以下几点近似假定建立的 (见图5)。

1. 第一次静载的 $M-\sigma_s$ 曲线由两条不同斜率的直线组成, σ_s 的突变点在 M_I 处。

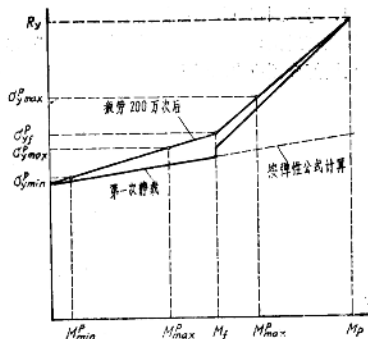


图5 部分预应力混凝土梁钢筋疲劳应力计算模式

2. 荷载重复作用 200 万次后, $M_p-\sigma_f^p$ 曲线仍由两条不同斜率的直线组成, σ_f^p 的转折点可近似地假定仍在 M_{fi} 处。

3. 出现裂缝的部分预应力混凝土梁, 经 200 万次重复荷载作用后, 受拉预应力钢筋应力由于受拉区混凝土开裂和多次重复荷载作用引起了应力增长, 其增大值是用第一次静载引起的预应力钢筋应力增量乘以受拉区开裂和疲劳影响系数 β_f 来计算的。试验表明, β_f 值在 1.06 ~ 1.44 之间变动, 设计时为偏于安全可取 1.5。

计算公式如下:

当 $M_{max}^p < M_{fi}$ 时,

$$\sigma_{fmin}^p = \sigma_f + n \frac{M_{min}^p}{J_0} y_{0f} \quad (1)$$

$$\sigma_{fmax}^p = \sigma_f + n \frac{M_{max}^p}{J_0} y_{0f} \beta_f \quad (2)$$

当 $M_{max}^p = M_{fi}$ 时,

$$\sigma_{fmax}^p = \sigma_{fi} = \sigma_f + n \frac{M_{fi}}{J_0} y_{0f} \beta_f \quad (3)$$

当 $M_{max}^p > M_{fi}$ 时,

$$\sigma_{fmax}^p = \sigma_{fi} + \frac{M_{max}^p - M_{fi}}{M_p - M_{fi}} (R_f - \sigma_{fi}) \quad (4)$$

式中 σ_{fi} ——受拉区即将开裂时的预应力钢筋应力;

M_{fi} ——抗裂弯矩, $M_{fi} = W_0(\sigma_b + \gamma R_f)$;

M_p ——静载极限弯矩;

σ_f ——预应力钢筋建立的有效预应力值。

方法二:

计算假定:

1. 平截面假定;

2. 受压区法向应力图形为三角形;

3. 受拉区混凝土不参加工作;

4. 考虑到在重复荷载作用下受压区混凝土应力值处于 0.2~0.3 R_c 范围, 混凝土疲劳变形模量可近似采用混凝土弹性模量, 则钢筋弹性模量与混凝土弹性模量比值 $n = E_s/E_c$ 。

根据部分预应力混凝土梁正截面应力状态 (图 6) 的静力平衡方程 $\sum x = 0$, 可得:

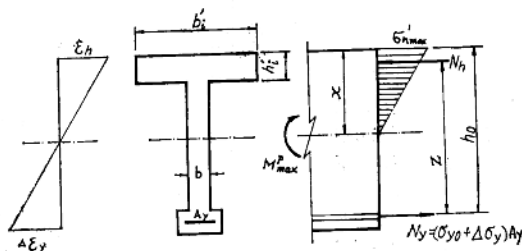


图 6 部分预应力混凝土梁正截面应力状态

$$N_h = N_y \quad (5)$$

$$\frac{b}{2x}(x^2 + 2mh_1x - mh_1'^2)\sigma_h = (\sigma_{y0} + \Delta\sigma_y)A_y \quad (6)$$

式中

$$m = \frac{b'_1 - b}{b}$$

由 $\Sigma M = 0$, 可得:

$$M_{max}^p = (\sigma_{y0} + \Delta\sigma_y)A_y \cdot z \quad (7)$$

由变形协调方程, 可得:

$$\frac{\epsilon_h}{x} = \frac{\Delta\epsilon_y}{h_0 - x} \quad (8)$$

联立求解以上方程, 即可得到如下计算公式:

当 $M_{max}^p > M_0$ 时,

$$x^3 + 3(\eta b - h_0)x^2 + 6nA_y\eta x - 6nA_y\eta h_0 = 0 \quad (9)$$

$$\eta = \frac{M_{max}^p}{\sigma_{y0}A_yb} \quad (10)$$

受压区混凝土边缘应力按下式计算:

$$\sigma_h^p = \frac{\sigma_{y0}A_y}{\frac{1}{2}bx - nA_y \frac{h_0}{x} + nA_y} \quad (11)$$

受拉区预应力钢筋应力按下式计算:

$$\sigma_s^p = \beta_s^p \left[\sigma_{y0} + n \left(\frac{h_0 - x}{x} \right) \sigma_h^p \right] \quad (12)$$

当 $M_{max}^p < M_0$ 时, 按弹性公式计算。

式中 σ_{y0} ——受拉预应力钢筋位置处, 混凝土应力为零时的钢筋应力。

M_0 ——相应于 σ_{y0} 时, 外荷载产生的弯矩。

β_s^p ——重复荷载对受拉预应力钢筋应力的影响系数, 近似地取 1。

两种计算方法的计算值与实测值的比为 0.9~1.1 (见图 7)。

(三) 混凝土应变沿截面高度的分布

试验表明, 经多次重复荷载作用后截面平均应变符合平截面假定。混凝土受压区高度变化不大 (见图 8, 9)。

(四) 正截面疲劳强度

试验表明, 梁的正截面疲劳破坏, 均系预应力钢筋疲劳脆断引起。由于钢筋的疲劳强度分散性较大, 因此, 梁的正截面疲劳破坏往往不是所有预应力钢筋同时达到疲劳极限强度, 而是从第一根受拉预应力钢筋疲劳脆断以后, 梁仍可承受数千次到数万次重复荷载。因此, 实际上, 预应力混凝土梁的疲劳破坏有一个过程, 破坏前有一定的预兆。

图 10 给出了配有冷拉 IV 级钢筋的试验梁, 在经受 200 万次重复荷载作用而疲劳破坏时, 预应力钢筋疲劳强度的修正的古德曼 (Goodman) 图。

修正的古德曼图中的斜线是根据预应力钢筋应力实测值经回归分析而得出的。分析中假定预应力钢筋的疲劳强度与最小疲劳应力近似呈线性关系。回归方程 (保证率 50%) 为

$$R_f^p = 2500 + 0.667 \sigma_{fmin}^p \quad (13)$$

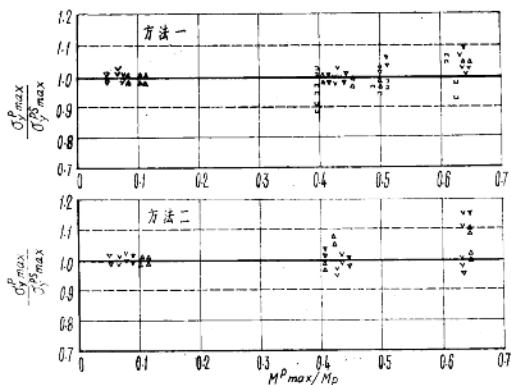


图7 受拉预应力钢筋应力的计算值与实测值之比

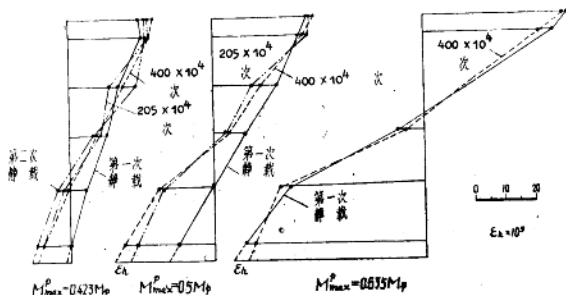


图8 试验梁(YLV-1)在静载和重复荷载作用下截面平均应变沿截面高度的分布

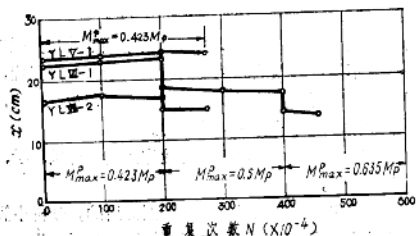


图9 试验梁中和轴高度随重复次数的变化

图10中, $\rho_f = 0.7 \sim 0.9$ 之间的二水平线为规范取值, 由图表明, 现行规范IV级钢筋疲劳强度的取值低于试验平均值。

出现裂缝的部分预应力混凝土梁的正截面疲劳强度折减系数为正截面疲劳极限弯矩 M_f^* 与静力极限弯矩 M_p 的比值, 即 $k_{fz}^* = M_f^*/M_p$ 。根据对试验梁实测 k_{fz}^* 值的回归分析, k_{fz}^* 与 $\log N$ 近似呈线性关系(图11), 回归方程如下:

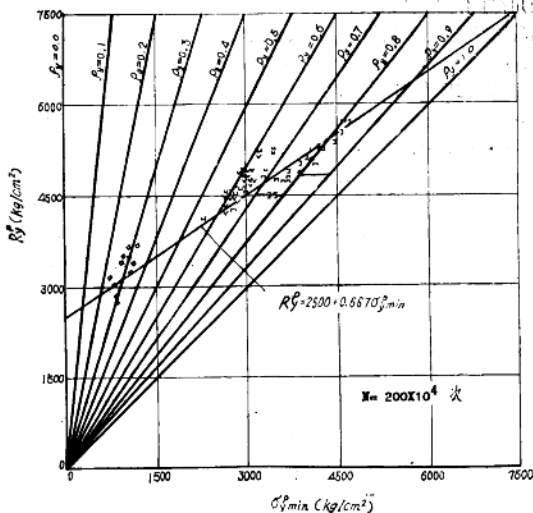


图10 B类试验梁内IV级钢筋的疲劳强度的修正古德曼图

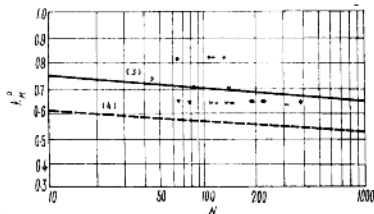


图11 正截面疲劳强度折减系数 k_M^p 与疲劳次数 N 的关系

时, 梁能安全地通过200万次重复荷载作用。

$$k_M^p = 1.0 - 0.05 \log N \quad (14)$$

式中 N —— 疲劳次数。

方程的相关系数 $r = -0.85$, 均方差 $\sigma = 0.075$ 。考虑减去二倍均方差后得:

$$k_M^p = 0.85 - 0.05 \log N \quad (15)$$

按(14)(15)计算公式计算的正截面疲劳强度折减系数 k_M^p 列于表2, 其运用范围是 $\rho = 0.6 \sim 0.8$ 。试验表明, 在疲劳荷载产生的弯矩 $M^p = 0.535 M_p$,

表2

计 算 公 式	N (万次)	k_M^p	N (万次)	k_M^p
(14)	200	0.685	400	0.67
(15)	200	0.535	400	0.52

三、垂直裂缝的开展与闭合

具有不同预应力度的试验梁, 经疲劳荷载 (相当于 $M^p = 0.423 M_p$) 重复作用200万次

后, 在静力使用荷载作用下的最大垂直裂缝宽度 δ_{fmax}^p 随静力抗裂安全系数的变化见图12。试验表明, 随着抗裂安全系数的增加, 最大垂直裂缝宽度显著减小。当 $k_r > 0.8$ 时, δ_{fmax}^p 在 0.1 毫米以内。当 $k_r = 0.5 \sim 0.8$ 时, δ_{fmax}^p 在 0.2 毫米以内。

预应力度对裂缝宽度的影响也可以用受拉区混凝土边缘的名义拉应力 σ_{s1} 来反映。在静载产生的弯矩 $M = 0.423 M_p$ 和 $M = 0.635 M_p$ 作用下, σ_{s1} 与最大垂直裂缝宽度 δ_{fmax}^p 关系见图13。试验表明, 随着 σ_{s1} 增加, 经重复荷载作用后最大裂缝宽度 δ_{fmax}^p 亦增大。而当 σ_{s1} 小于 100 公斤/厘米² 时, 最大垂直裂缝宽度 δ_{fmax}^p 在 0.1 毫米以内。试验梁在疲劳荷载 (相当于 $M = 0.423 M_p$) 作用下的计算 σ_{s1} 值在 20~60 公斤/厘米² 范围内。可见, 在经常性的重复荷载作用下, 最大垂直裂缝宽度在 0.002~0.03 毫米以内。

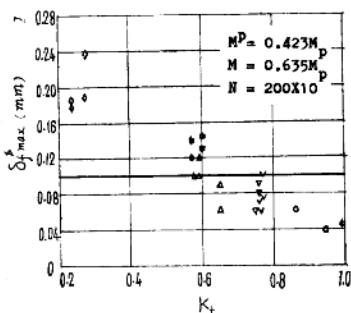


图12 试验梁最大垂直裂缝宽度 δ_{fmax}^p 与抗裂安全系数 k_r 的关系

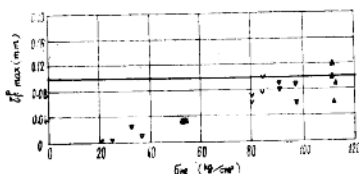


图13 试验梁最大垂直裂缝宽度 δ_{fmax}^p 与混凝土边缘名义拉应力 σ_{s1} 的关系

部分预应力混凝土试验梁经重复荷载作用后的垂直裂缝宽度, 与裂缝截面处预应力钢筋应力的增量有密切关系。应力增量为 $\Delta\sigma_r = \sigma_{fmax}^p - \sigma_{r0}$, 其中 σ_{r0} 为当受拉预应力钢筋位置处混凝土应力为零时的预应力钢筋的应力。

试验表明, 经重复荷载作用后的平均最大裂缝宽度 δ_{fmax}^p 与以 σ_{r0} 为起点的钢筋应力增量呈线性关系 (见图14)。回归方程如下:

$$\delta_{fmax}^p = (\Delta\sigma_r - 200) 59 \times 10^{-6} \quad (16)$$

方程的相关系数 $\gamma = 0.923$, 均方差 $\sigma = 0.021$ 。

试验梁经静载及重复荷载作用后, 若卸载到零, 则垂直裂缝的闭合宽度约为 0.001 毫米。

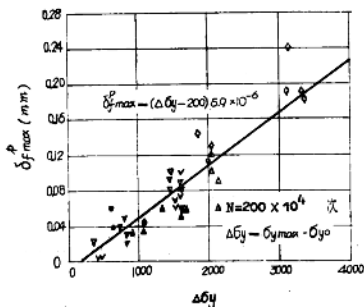


图14 试验梁最大垂直裂缝宽度 δ_{fmax}^p 与应力增量 $\Delta\sigma$ 的关系

四、斜截面疲劳性能

允许出现裂缝的部分预应力混凝土梁, 在满足斜截面静力抗剪强度和截面控制条件的情况下, 由于构件预应力度的降低, 斜截面抗裂度可能不满足规范 $\sigma_{s1} \leq 0.9 R_t$ 的要求, 即静力

使用荷载作用下斜截面可能出现斜裂缝,从而在疲劳荷载作用下斜截面是带裂缝工作的。如何保证此类构件斜截面的疲劳强度是极其重要的问题。

允许出现裂缝的部分预应力混凝土工形梁的疲劳破坏过程,总是在斜裂缝处的某一肢箍筋首先发生疲劳断裂,然后随着重复次数的增加,箍筋逐根疲劳,最后,由受压区混凝土疲劳剪压破坏或纵向预应力钢筋疲劳断裂而彻底破坏。第一根箍筋疲劳是梁达到斜截面疲劳极限状态的标志。由此可见,允许出现裂缝的预应力混凝土梁斜截面疲劳强度验算的关键是如何正确地计算出在疲劳使用荷载作用下的箍筋最大应力值和最小应力值,并控制最大应力不大于钢筋的疲劳强度。

(一) 影响箍筋应力的几个因素

1. 静载和多次重复荷载的影响

部分预应力混凝土梁在初次静荷载作用下,在斜裂缝出现前箍筋拉应力很小,甚至在局部压应力 σ_c 影响较大的部位也有时为压应力。在斜裂缝出现后,截面上承受剪力的各部分产生了内力重分布,对于部分预应力工形截面梁,箍筋承担了大部分的剪力,箍筋应力急剧增加(见图15)。而卸载以后,由于沿斜裂缝集料间互相咬合以及剪压区混凝土塑性变形,斜裂缝不能完全闭合,在箍筋中存在较大的残余应力(见图15)。在带有残余斜裂缝的情况下进行第二次静载作用,箍筋应力较初次荷载作用时的应力产生了显著的变化。在外剪力较小时,箍筋应力增长不大,当腹板中部混凝土的预压应力被外荷载产生的主拉应力抵消后,箍筋应力随外荷载线性地迅速增大。荷载增加到初次荷载的最大值时,箍筋应力与初次荷载作用下的

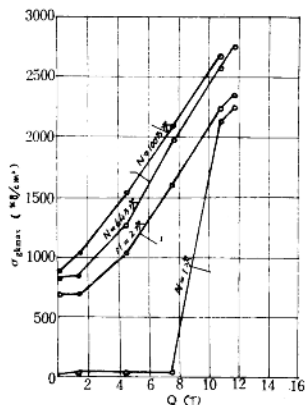


图15 ByDL-1梁箍筋最大应力 σ_{gmax} 与剪力 Q 关系

最大箍筋应力值之比 β_g^P 来表示。 β_g^P 与疲劳次数 N 的关系见图16。

通过回归分析,其回归方程为:

$$\beta_g^P = 1.103 + 0.00053N$$

实用上取 $\beta_g^P = 1.1$ 。

2. 预应力度对箍筋应力的影响

具有不同预应力度部分预应力混凝土梁,由于截面上建立的纵向预压应力减小了腹板

箍筋应力比较接近。

重复荷载作用下,由于混凝土动力徐变变形的发展,沿斜裂缝混凝土集料间咬合力的降低、箍筋与混凝土之间粘结力的逐渐破坏等原因,箍筋应力相应增加,其增大值与重复荷载大小和次数有关。箍筋应力在重复荷载作用过程中的增长,意味着箍筋是处于变幅应力状态下疲劳。

在静载和多次重复荷载作用下,箍筋应力变化的一个值得注意的规律是,经多次重复荷载作用后,箍筋应力随剪力增加的曲线走向与第二次静载下的箍筋应力走向基本一致(见图15)。应该指出,这是极为重要的一个特征,^[1]它说明必须以第二次静载作用下的箍筋应力状态作为箍筋疲劳应力计算的基础,在此基础上再考虑疲劳影响。

重复荷载对箍筋应力的影响,用重复荷载后

的箍筋最大应力值与开裂后第二次静载作用下的

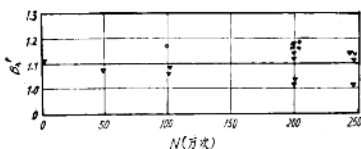


图16 重复荷载对箍筋应力的影响系数 β_K 与 N 关系

应力值愈大。

3. 配箍率对箍筋应力的影响

图18示出了 ByDL-1 梁、ByDL-2 梁、ByDL-5 梁的最大箍筋应力随剪力增长的变化规律。其预应力度相同，配箍率分别为 0.69%、1.0%、1.41%。试验表明，在斜裂缝出现前，配箍率对箍筋应力的影响并不明显。但在斜裂缝出现后，在相同的剪力值下，配箍率高的梁，箍筋最大应力值小；配箍率低的梁，箍筋最大应力值大。

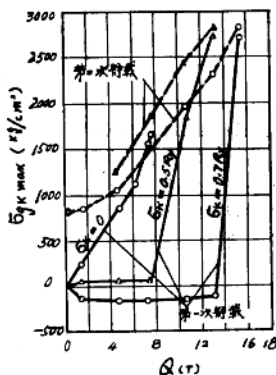


图17 箍筋应力-剪力-预应力度关系

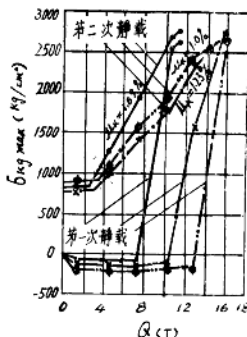


图18 箍筋应力-剪力-配箍率关系

(二) 静载和重复荷载作用下沿临界斜裂缝箍筋应力的分布

部分预应力混凝土 I 形梁沿斜裂缝的箍筋应力分布是极不均匀的 (图19)。通常位于临界斜裂缝中部的箍筋应力值最大，在加荷点附近的箍筋应力值较小。其箍筋应力分布图形呈抛物线型。产生这种现象的原因是因为加载点和支座附近存在着较大的局部压应力，以及上下翼缘混凝土的约束作用。

以第二次静载作用下最大箍筋应力与箍筋平均应力之比来表示箍筋应力分布的不均匀系数 α ，其值在 1.03~1.59 之间变动 (见图20)。 α 的平均值为 1.2。

(三) 斜截面箍筋应力计算方法

目前国内外对剪力传递机理的研究认为，剪力由以下几部分承受：未开裂混凝土，斜截面上的抗剪钢筋，沿斜裂缝集料间的相互咬合，与斜裂缝相交处纵向钢筋的暗销作用，有人

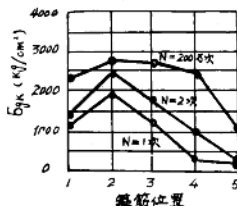
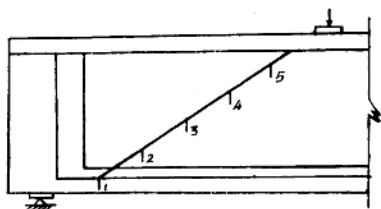


图19 ByDL-1 梁沿斜裂缝箍筋应力分布

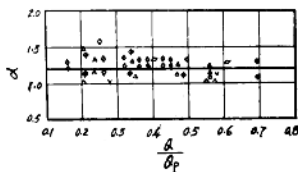


图20 箍筋应力不均匀系数 α 实测值与 $\frac{\sigma}{\sigma_p}$ 关系

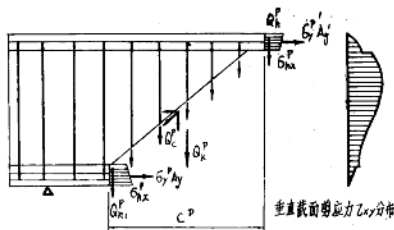


图21 箍筋应力计算模式

认为还有拱的作用。通过部分预应力工形梁的试验研究表明，在静力使用荷载作用下，最大腹剪斜裂缝几乎贯穿整个腹板部分。疲劳荷载多次重复作用后的临界斜裂缝位置仍在静载作用下的最大斜裂缝位置处，只是斜裂缝向下翼缘有所伸展，接近或到达纵向钢筋。因此，对于部分预应力混凝土工形梁，斜截面剪力可考虑由以下几部分承受：斜截面上的抗剪钢筋，沿斜裂缝集料间的相互咬合，剪压区以及下翼缘的混凝土和一部分纵筋的抗剪力。

方 法 一

由上述箍筋应力在静载和重复荷载作用下的变化规律表明，疲劳荷载作用下箍筋应力计算式应该以第二次静载作用下的箍筋应力状态作为基础，再考虑疲劳影响。第二次静载作用下的箍筋应力的计算，可以通过临界斜裂缝取出脱离体（见图21），由脱离体的内力平衡条件来建立箍筋应力的计算模式。

脱离体在外剪力作用下, 其内剪力包括箍筋的抗剪力 Q_k^P 、集料间咬合剪力 Q_c^P 、剪压区混凝土抗剪力 Q_s^P 、下翼缘混凝土和一部分纵筋抗剪力 Q_{s1}^P 。

由 $\Sigma y = 0$ 可得:

$$\begin{aligned} Q^P &= Q_k^P + Q_c^P + Q_s^P + Q_{s1}^P \\ Q_{s1}^P &= Q^P - Q_k^P - Q_c^P - Q_s^P \\ \sigma_{sk}^P &= \frac{Q^P - Q_k^P - Q_c^P - Q_s^P}{A_k \frac{C^P}{s}} \end{aligned} \quad (17)$$

由上式乘以箍筋不均匀系数 α 和疲劳影响系数 β_k^P , 即可得出在疲劳荷载重复作用 200 万次后的箍筋最大疲劳应力。

$$\sigma_{skmax}^P = \beta_k^P \cdot \alpha \frac{Q^P - Q_k^P - Q_c^P - Q_s^P}{A_k \frac{C^P}{s}} \quad (18)$$

式中: Q^P —疲劳验算荷载作用下, 计算斜截面处的剪力;

Q_k^P —荷载值等于疲劳验算荷载时的第二次静载作用下, 与斜裂缝相交的箍筋所承受的剪力;

Q_c^P —荷载值等于疲劳验算荷载时的第二次静载作用下, 沿斜裂缝集料间的相互咬合力;

Q_s^P —剪压区混凝土承受的剪力;

Q_{s1}^P —斜裂缝始端处下翼缘混凝土和一部分纵筋承受的剪力;

α —箍筋应力分布不均匀系数, 取 1.2;

β_k^P —多次重复荷载 ($N=200$ 万次) 对箍筋应力的影响系数, 取 1.1;

C^P —临界斜裂缝的水平投影长度;

A_k, S —配置在同一截面内各肢箍筋的全部截面积及箍筋间距;

下面分别讨论在荷载值等于疲劳验算荷载值的第二次静载作用下的 Q_k^P 、 Q_c^P 、 Q_s^P 、 C^P 各值的计算方法。

1. 第二次静载作用下集料咬合剪力 Q_c^P 的确定:

定量地分别确定钢筋混凝土梁中集料咬合和纵筋销栓的抗剪作用是困难的。国外一些研究者试图用简化模型的办法来确定, 但它也很难代表一个开裂的钢筋混凝土梁的实际应力状态, 因此, 要摸索集料咬合剪力值的大小及其变化规律, 用直接测定的办法是难于实现的。考虑到部分预应力混凝土 I 形梁临界斜裂缝一旦出现, 即贯通整个腹板部分, 因此可通过临界斜裂缝取出下部脱离体, 根据下部脱离体的平衡, 得出咬合力间接实测值 (见图 22)。

由 $\Sigma y = 0$, 得出

$$\begin{aligned} Q_c^P + Q_k^P + Q_{s1}^P &= Q_{s1}^P + Q_{s2}^P \\ \text{假定 } Q_{s1}^P &\approx Q_{s2}^P \\ Q_c^P &= Q_{s1}^P - Q_k^P \end{aligned} \quad (19)$$

式中 Q_{s1}^P —垂直截面上腹板部分所承受的剪力;

Q_{s2}^P —所切割的垂直截面处下翼缘所承受的剪力;

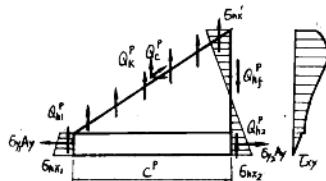


图 22 沿斜裂缝取出的下部脱离体的内力状态