

文章编号:1673-2049(2019)04-0055-08

混合配筋混凝土梁抗弯疲劳试验

朱 鹏,许家婧,屈文俊

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:为了研究混合配筋(混合配置FRP筋和钢筋)混凝土梁的抗弯疲劳性能,设计了4根混合配筋混凝土梁(1根梁承受静力荷载,3根梁承受等幅疲劳荷载),进行了疲劳试验。结果表明:混合配筋混凝土梁抗弯疲劳破坏始于受拉钢筋的疲劳断裂,GFRP筋断裂或者基体开裂剥落,随后压区顶部混凝土压碎;破坏时纯弯段出现1条或2条主裂缝,钢筋疲劳断口光滑,未出现静力拉断时的屈服和颈缩现象;GFRP筋疲劳破坏未出现静力受拉破坏时纤维“扫帚”型破坏模式;疲劳加载后构件产生不可恢复的残余挠度,残余挠度随着疲劳次数和疲劳上限荷载的增加而增大;疲劳过程中纯弯段基本不出现新裂缝,均是沿已有初始裂缝扩展;基于有效惯性矩法的刚度计算值和基于刚度解析法的刚度计算值均大于试验值,偏于不安全;基于EN 1992-1-1:2004提出的刚度预测模型相对偏差均在10%以内,且刚度计算值小于试验值,偏于安全。

关键词:混合配筋混凝土梁;FRP筋;疲劳试验;抗弯刚度

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Experiment on Fatigue Flexural Behaviors of Hybrid Reinforced Concrete Beams

ZHU Peng, XU Jia-jing, QU Wen-jun

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the fatigue flexural behaviors of hybrid (combination of FRP bars and steel bars) reinforced concrete beam, four beams (one beam was subjected to static loading and three beams were subjected to fatigue loading) were designed, and the fatigue test was carried out. The results show that the fatigue failure of the specimen starts with fatigue fracture of one tension steel bar, followed by the broken or matrix stripping of GFRP bars, and ends with concrete crushing at the top. One or two major cracks occur when flexural fatigue failure occurs. The fatigue fracture surface of steel bars is smooth, and no yielding or necking occurs. The fatigue failure mode of GFRP bars is different with the broomlike failure mode in static tensile test. The irrecoverable residual deflection of component occurs after fatigue loading. The residual deflection increases with the upper limit of fatigue loading and fatigue cycles. Cracks propagate along the existing cracks, and no new crack occurs in the pure bending zone during fatigue process. The calculation values of flexural stiffness based on effective moment of inertia and the calculations values of flexural stiffness based on stiffness analytic method are both larger than the test results, which is unsafe. The relative deviation of proposed flexural stiffness based on EN 1992-1-1:2004 is less than 10%, and the calculation values of flexural stiffness are less than the

收稿日期:2018-12-10

基金项目:国家重点研发计划专项项目(2017YFC0703000);国家自然科学基金项目(51678430)

作者简介:朱 鹏(1981-),男,河南新乡人,讲师,工学博士,E-mail:pzhu@tongji.edu.cn。

test results and safer.

Key words: hybrid reinforced concrete beam; FRP bar; fatigue test; flexural stiffness

0 引言

传统钢筋混凝土结构具有优良的力学性能和使用性能,但混凝土中的钢筋易发生锈蚀,继而引起抗力衰减,出现耐久性失效问题。混凝土结构的耐久性失效首先表现在截面角区钢筋锈蚀引起的混凝土胀裂^[1]。因此,笔者提出了等耐久性的混合配筋截面,即将耐腐蚀的碳纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)筋放置于混凝土梁截面的边角区域或截面受拉区的下排,易锈蚀的钢筋放置于截面内部或受拉区上排的混合配筋设计方法,该方法克服了普通钢筋混凝土梁耐久性差及 FRP 筋混凝土梁使用性能差的缺点,实现了混凝土截面的等耐久性。已有不少学者进行了混合配筋混凝土梁静力性能的相关研究^[2-8]。庞蕾等^[2]研究了 AFRP 筋与钢筋混合配筋混凝土梁的受弯性能,包括挠度、强度及延性等。试验表明,梁从加载到开裂保持线弹性,开裂后构件刚度减小,仍保持线性直到受拉钢筋屈服,随后达到最大承载力;当 AFRP 筋的用量不超过总配筋量的一半时,混合配筋混凝土梁的正常使用性能及强度均能获得令人满意的结果。Aiello 等^[3]对 AFRP 筋和钢筋混合配筋混凝土梁在正常使用极限状态和承载力极限状态下的受弯性能进行了试验研究,认为钢筋和 FRP 筋的混合配筋形式从变形角度考虑是有利的,与纯 FRP 筋混凝土梁相比,钢筋的使用避免了梁在正常使用状态下出现过大的挠度和裂缝宽度。Qu 等^[4]进行了混合配筋混凝土梁(GFRP 筋和钢筋)受弯性能的试验研究,提出了混合配筋混凝土梁受弯承载力的计算公式,并提出了跨中挠度和裂缝宽度的计算公式。

铁路桥梁、公路桥梁、铁路轨枕、吊车梁等结构除承受静载作用外,还承受车辆、吊车等重复荷载的长期作用。重复荷载作用引起构件应力不断发生变化,在经历足够多的荷载循环作用后,疲劳损伤不断累积,导致结构可能发生疲劳破坏,疲劳破坏没有明显预兆,破坏突然。因此,结构的疲劳问题已成为工程设计中不可忽视的问题^[9-11]。本文旨在对等耐久性混合配筋混凝土梁的抗弯疲劳性能进行研究。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计了 4 根试验梁 SF, FF, FF2, FF3, 尺寸均

相同,长 2 200 mm,宽 180 mm,高 250 mm,具体尺寸及配筋情况见图 1。梁顶部配筋为 2 根 10,梁底角部为 2 根 GFRP 纵筋,直径为 8 mm(SF, FF1, FF2)或 10 mm(FF3),中间为 2 根 HRB400 级钢筋,直径为 16 mm(SF, FF1, FF2)或 20 mm(FF3)。箍筋均采用 HRB400 级钢筋,直径为 8 mm。纯弯段和弯剪区段内箍筋间距分别为 100 mm 和 75 mm,支座附近箍筋适当加密,间距为 60 mm。

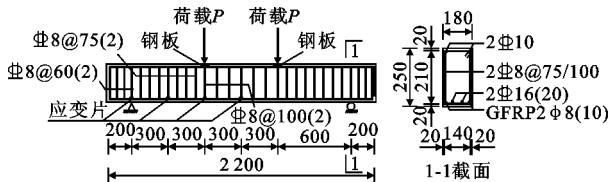


图 1 试验梁尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Size and Reinforcement of Test Beam (Unit:mm)

钢筋拉伸试验依照《金属材料拉伸试验:第 1 部分:室温试验方法》^[12],GFRP 筋拉伸试验依照《纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法》^[13],试验结果见表 1。疲劳试验前混凝土轴心抗压强度为 30.2 MPa,弹性模量为 28.4 GPa。

表 1 钢筋和 GFRP 筋力学性能

Tab. 1 Mechanical Performance of Steel Bars and GFRP Bars

材料型号	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
Φ8 钢筋	464	580	192
Φ10 钢筋	541	643	191
Φ16 钢筋	450	611	188
Φ20 钢筋	510	627	194
Φ8 GFRP 筋		1 210	46
Φ10 GFRP 筋		1 163	44

1.2 加载制度和测量方案

疲劳试验加载装置为 250 kN MTS 液压伺服疲劳试验机。试验梁简支,四分点加载,加载点下及支座处放置钢板,防止混凝土局部破坏。加载程序由静载阶段、疲劳阶段和破坏阶段三部分组成。静载阶段采取分级加载,每级荷载取 0.1P_u(P_u为试验梁的极限承载力,可根据文献^[4]计算混合配筋混凝土梁 P_u),加载至疲劳荷载上限值。接近开裂荷载时,加载级改为 0.05P_u。加载完毕后,分级卸载至 0。此加载卸载过程重复 3 次,使试件的初裂完整。疲劳阶段采用力控制加载,荷载波形为等幅正弦交变荷载。各试验梁疲劳加载情况如表 2 所示。

考虑到在最大应力水平低于静载强度的 75% 时,加载频率在 1~15 Hz 间对疲劳强度的影响很小^[14]。试验梁 FF1 的加载频率由 4 Hz(100 万次疲劳前)调整为 6 Hz(100 万次后)。在疲劳至 1 万次、3 万次、5 万次、10 万次、20 万次、30 万次、50 万次、80 万次、100 万次、150 万次、200 万次时停止疲劳加载,测量试件的残余变形;随后进行 1 次从 0 到疲劳荷载上限值的静力加载,记录各测点的应变、挠度和裂缝宽度。试验梁 FF1 加载至 130 万次时,观察到挠度和裂缝宽度有明显增长,所以在 130 万次时停止加载,增加了 1 次从 0 到疲劳荷载上限值的静力加载,之后继续疲劳加载。若疲劳 200 万次梁仍未破坏,停止疲劳加载,采用静载分级加载,直至破坏。

混凝土应变片是标距为 10 cm 的胶基电阻应变片,每根试验梁的跨中混凝土表面布置 6 个应变片。钢筋和 GFRP 筋应变片均采用标距为 5 mm 的胶基电阻应变片,筋材应变片布置见图 1。试验时在跨中和 2 支座截面处布置 Keyence 激光位移计。所有应变、荷载和位移等数据均通过美国国家仪器公司 NIPXIe-1082 机箱配套 PXIe-4330 采集卡采集。

表 2 疲劳加载信息

Tab. 2 Fatigue Loading Information

试件 编号	配筋型号		上限荷载	下限荷载	频率/Hz
	受拉钢筋	受拉 GFRP 筋	P_{\max}/kN	P_{\min}/kN	
FF1	2 Φ 16	2 Φ 8	66.5	13.3	4(a)
			(0.5 P_u)	(0.1 P_u)	6(b)
FF2	2 Φ 16	2 Φ 8	79.8	13.3	6
			(0.6 P_u)	(0.1 P_u)	
FF3	2 Φ 20	2 Φ 10	107.8	19.6	6
			(0.55 P_u)	(0.1 P_u)	

注:a 表示 100 万次前;b 表示 100 万次后。

2 试验结果分析

2.1 疲劳破坏形态

2.1.1 试件破坏形态

梁的破坏模式见图 2。静载试验梁的破坏形态是典型的受弯破坏,破坏始于受拉钢筋的屈服,随着钢筋屈服,试验梁的跨中挠度增大,GFRP 筋表面树脂层剥离,受压区混凝土压碎,见图 2(a)。

FF1 疲劳寿命是 135.4 万次,听到钢筋脆断声音后梁立即破坏,2 根钢筋断裂,2 根 GFRP 筋折断,混凝土压碎,纯弯段有 1 条主裂缝[图 2(b)]。FF2 疲劳寿命是 46.1 万次,听到钢筋脆断声音后梁立即破坏,1 根钢筋疲劳断裂,1 根 GFRP 筋折断,1 根 GFRP 筋树脂剥离,混凝土压碎,纯弯段有 1 条

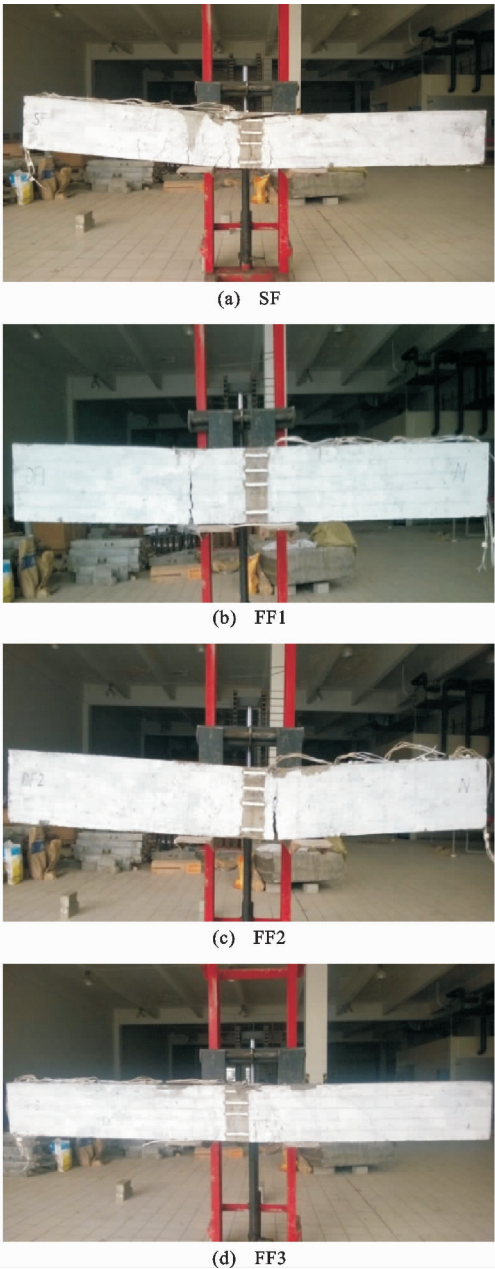


图 2 试件破坏模式

Fig. 2 Failure Modes of Specimens

主裂缝[图 2(c)]。FF3 疲劳寿命是 167.8 万次,听到 1 根钢筋脆断声音后梁仍然承受了约 100 次的重复荷载,随后另 1 根钢筋断裂,2 根 GFRP 筋树脂层产生纵向裂缝,混凝土压碎,梁随之破坏,纯弯段有 2 条主裂缝[图 2(d)]。梁疲劳破坏时混凝土压碎并不是混凝土发生疲劳破坏,而是钢筋疲劳断裂瞬间,混凝土无法承受既有荷载而发生压碎。

2.1.2 筋材破坏形态

疲劳试验结束后,将试验梁受拉区混凝土凿掉,使梁底面受拉筋材完全露出。试验梁筋材的破坏模式见图 3。疲劳试验梁破坏均始于受拉区 1 根钢筋

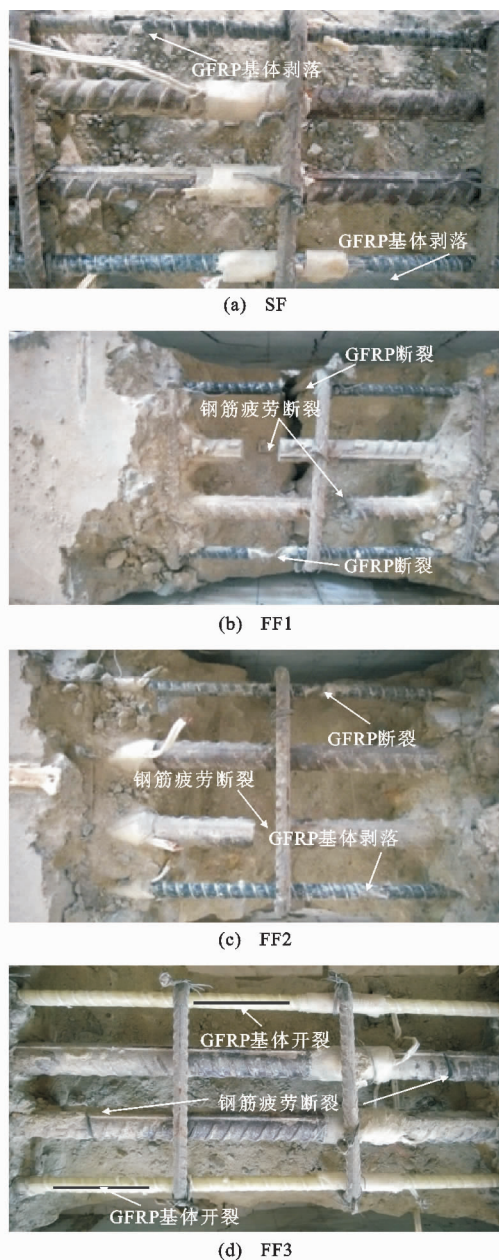


图3 筋材破坏模式

Fig. 3 Failure Modes of Reinforcement Bars

的疲劳断裂,3根梁钢筋疲劳破坏位置均在纯弯段主裂缝所在截面附近,钢筋拉断处裂缝宽度和挠度突然增大,GFRP筋折断或表面树脂层产生裂缝或剥离,混凝土压碎,梁随之破坏。

筋材拉伸试验中钢筋的拉断具有明显的屈服和颈缩特征,并且整个断口形式为粗糙、不平整的。疲劳断裂的钢筋并没有显现出屈服和颈缩的外观特征,同时断口整体形式较为平整,如图3(b),(c),(d)所示。钢筋疲劳断口分为疲劳源、光滑区、粗糙区^[15]。FF1和FF3均有2根受拉钢筋疲劳断裂,其中1根钢筋断口光滑平整,1根钢筋断口略有粗糙。

试验梁FF1,FF2疲劳破坏时由于1根钢筋首先疲劳破坏退出工作,拉区GFRP筋无法承受突增的荷载发生折断。FF1疲劳破坏时GFRP筋断口较为平整,靠近树脂层的纤维局部被拉毛,主要是因为FF1的荷载水平较低,疲劳寿命较长,GFRP筋疲劳源能够充分开展,平整断口面积较大。FF2中1根GFRP筋表面树脂层剥离,主要是因为FF2疲劳荷载水平较高,疲劳寿命短,GFRP筋疲劳源未能充分开展,而树脂层抗剪强度较低,重复荷载作用下,树脂层容易被混凝土剥坏。FF3的GFRP筋没有折断,表面树脂沿拉伸方向有微小裂缝,主要是因为FF3的GFRP筋应变在疲劳全过程中较小,其承担的应力较低,直至破坏时才显著增大。试验梁承受疲劳荷载时,GFRP筋未发生静力拉伸试验中纤维蓬松发散的典型破坏模式,是因为疲劳过程中GFRP筋应力远低于其抗拉极限强度,不会发生纤维拉断破坏。

2.2 梁跨中挠度

特定疲劳次数后,卸载至0 kN时测量的挠度定义为残余挠度。残余挠度和上下限荷载作用下跨中挠度随疲劳循环比变化见图4。由图4可以看出:随着疲劳次数的增加,上限荷载挠度和下限荷载挠度均增大。重复荷载作用下初始阶段跨中残余挠度随疲劳次数增长较快。随着疲劳次数的增多,梁残余挠度增大。FF1在疲劳130万次后,残余挠度增长较快,残余挠度从宏观上反映了卸载后构件的塑性变形,表明疲劳130万次时材料性能和构件性能均不断劣化。比较图4(a),(b)可知:相同疲劳次数后FF2的残余挠度大于FF1,这主要是受荷载水平的影响,FF1,FF2疲劳上限荷载分别为 $0.5P_u$, $0.6P_u$ 。这与马达洛夫^[16]的研究结果一致:残余挠度随荷载和重复次数的增加而增长。

2.3 混合配筋混凝土梁疲劳抗弯刚度计算

疲劳加载前,静载预裂后,梁FF1初始裂缝分布见图5(a),图中虚线未标注数字的裂缝即为初始裂缝,1w表示1万次疲劳后持荷状态出现裂缝, $\boxed{1w}$ 表示1万次疲劳后卸载时裂缝,其余以此类推。特定疲劳次数停机后,卸载时测量裂缝发展,随后进行1次从0到上限荷载 P_{max} 的静力加载,测量裂缝发展。由图5(a)可以看出:纯弯段在疲劳过程中基本不产生新裂缝,大多是沿着已有初始裂缝发展。静载预裂后弯矩和刚度分布示意图5(b),裂缝分布影响刚度分布。本节推荐的抗弯刚度计算公式是构件纯弯段的截面平均刚度。

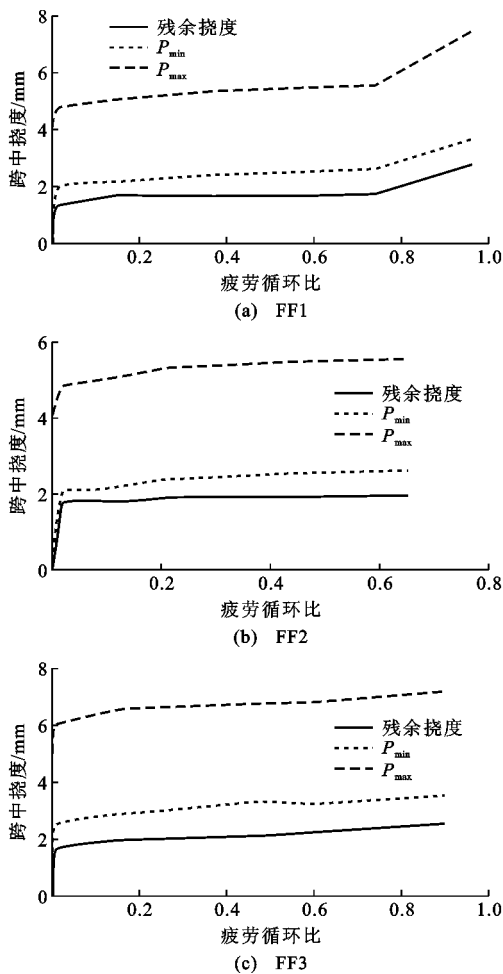


图 4 不同疲劳次数后跨中挠度

Fig. 4 Midspan Deflections After Different Fatigue Cycles

2.3.1 基于试验结果的抗弯刚度计算

承受多次重复荷载作用的钢筋混凝土梁总挠度

可以分为 3 个组成部分:静力荷载长期作用产生的挠度、重复荷载产生的弹性挠度以及多次重复荷载产生的残余挠度^[16]。本试验不考虑由静载长期作用产生的挠度,故第 n 次疲劳荷载作用下跨中总挠度 f_n 可分为残余挠度 f_{rn} 和弹性挠度 f_{ln} ,即

$$f_n = f_{rn} + f_{ln} \quad (1)$$

由材料力学公式计算的构件弹性挠度为

$$f_{ln} = K \frac{M_a L^2}{B_n} \quad (2)$$

式中: K 为与荷载形式、支撑条件有关的挠度系数; M_a 为计算截面的最大弯矩; L 为净跨; B_n 为 n 次疲劳加载后的截面抗弯刚度。

针对跨度为 L 的简支梁,采取四分点加载,加载点荷载均为 $P/2$,离支座距离均为 a' ,跨中弹性挠度可由式(3)计算

$$f_{ln} = \frac{Pa'}{48B_n} (3L^2 - 4a'^2) \quad (3)$$

经过特定疲劳次数后,静力加载至疲劳荷载上限值时跨中总挠度和残余挠度均可实测,因此由式(1)可计算出由荷载作用产生的弹性挠度。由式(4)可求出梁疲劳抗弯刚度

$$B_n = \frac{Pa' (3L^2 - 4a'^2)}{48f_{ln}} \quad (4)$$

2.3.2 基于有效惯性矩法的抗弯刚度计算

Balaguru 等^[17]在 1982 年提出了理论模型计算钢筋混凝土梁疲劳荷载作用下的刚度,式(5)~(8)给出了 n 次重复荷载作用后受压区混凝土残余应变 $\epsilon_{cr,n}$ 、弹性模量 $E_{c,n}$ 、断裂模量 $f_{r,n}$ 及开裂弯矩 $M_{cr,n}$

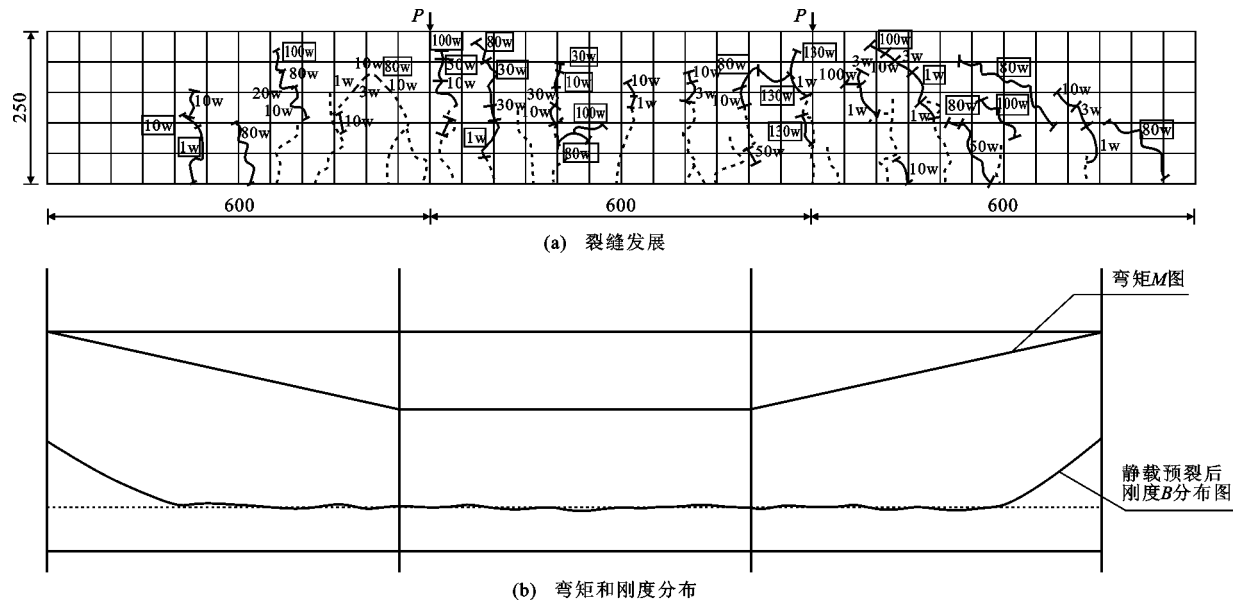


图 5 试验梁 FF1 裂缝发展、弯矩和刚度分布 (单位:mm)

Fig. 5 Distribution of Cracks, Bending Moment and Stiffness of Test Beam FF1 (Unit:mm)

的计算公式

$$\varepsilon_{cr,n} = 129\sigma_m t^{1/3} + 17.8\sigma_m \Delta\sigma_{cr} n^{1/3} \quad (5)$$

$$E_{c,n} = \sigma_{max} / (\frac{\sigma_{max}}{E_c} + \varepsilon_{cr,n}) \quad (6)$$

$$f_{r,n} = f_r [1 - \frac{\lg(n)}{10.954}] \quad (7)$$

$$M_{cr,n} = \frac{I_g f_{r,n}}{kd} \quad (8)$$

$$k = \sqrt{(n_s \rho_s + n_f \rho_f)^2 + 2(n_s \rho_s + n_f \rho_f)} - (n_s \rho_s + n_f \rho_f) \quad (9)$$

式中: σ_m 为混凝土平均应力; $\Delta\sigma_{cr}$ 为混凝土应力幅; σ_{max} 为混凝土最大应力; t 为疲劳加载时间; E_c 为混凝土初始弹性模量; f_r 为混凝土断裂模量; I_g 为未开裂截面惯性矩; kd 为换算截面受压区高度; d 为截面有效高度; $n_s = E_s/E_c$, E_s 为钢筋弹性模量; $n_f = E_f/E_c$, E_f 为 GFRP 筋弹性模量; $\rho_s = A_s/(b'd)$, A_s 为受拉钢筋面积, b' 为截面宽度; $\rho_f = A_f/(b'd)$, A_f 为受拉 GFRP 筋面积。

2007 年, Bischoff^[18] 提出了一个既适用于钢筋混凝土梁又适用于 FRP 筋混凝土梁的有效截面惯性矩计算公式, 根据文献[4], 该公式适用于混合配筋混凝土梁。因此, 本文以 Bischoff 提出的公式为依据, 给出了重复荷载作用下混合配筋混凝土梁截面有效惯性矩的计算公式, 见式(8)~(11)。根据 Zhu 等^[19] 的研究结果, 疲劳荷载作用下中和轴高度变化不大, 计算时认为中和轴高度不变。式(12)给出了 n 次重复荷载后梁截面抗弯刚度 B_n 。

$$I_{cr,n} = \frac{1}{3} b' (kd)^3 + (n_{s,n} A_s + n_{f,n} A_f) d^2 (1-k)^2 \quad (10)$$

$$I_{e,n} = \frac{I_{cr,n}}{1 - (1 - I_{cr,n}/I_g)(M_{cr,n}/M_a)^2} \leq I_g \quad (11)$$

$$B_n = E_{c,n} I_{e,n} \quad (12)$$

式中: $n_{s,n} = E_s/E_{c,n}$, $n_{f,n} = E_f/E_{c,n}$; $I_{cr,n}$ 为 n 次疲劳加载后开裂截面惯性矩; $I_{e,n}$ 为 n 次疲劳加载后截面有效惯性矩。

2.3.3 基于刚度解析法的抗弯刚度计算

中国《混凝土结构设计规范》^[20] 根据典型的弯矩-曲率关系, 采用刚度解析法给出了钢筋混凝土受弯构件短期刚度计算公式(13)。考虑到在重复荷载作用下钢筋应力不断改变, 从而使钢筋与混凝土间的黏结破坏, 因而将重复荷载作用下裂缝间钢筋的应变不均匀系数 φ 调整为 1。

$$B = \frac{E_s A_s d^2}{1.15\varphi + 0.2 + 6n_s \rho_s} \quad (13)$$

对于混合配筋混凝土梁, 考虑钢纵筋和 GFRP

纵筋对刚度的贡献, n 次疲劳加载后的刚度计算公式见式(14)

$$B_n = \frac{(E_s A_s + E_f A_f) d^2}{1.15\varphi + 0.2 + 6(n_{s,n} \rho_s + n_{f,n} \rho_f)} \quad (14)$$

2.3.4 本文模型

以上 3 种疲劳抗弯刚度计算结果见图 6。由图 6 可知: 基于有效惯性矩法的刚度计算值和基于刚度解析法的刚度计算值均大于试验值, 偏于不安全。本文在欧洲规范 EN 1992-1-1: 2004^[21] 计算钢筋混凝土受弯构件短期刚度的基础上, 提出一种疲劳荷载作用下混合配筋混凝土梁短期刚度的计算方法。欧洲规范钢筋混凝土受弯构件短期刚度计算方法采用的是对曲率进行插值的方法, 得到如下刚度表达式

$$B = B_0 / \{ (M_{cr}/M_a)^2 + [1 - (M_{cr}/M_a)^2] \frac{B_0}{B_{cr}} \} \quad (15)$$

式中: B_0 为未开裂截面刚度, $B_0 = E_c I_g$; B_{cr} 为开裂截面刚度, $B_{cr} = E_c I_{cr}$, I_{cr} 为开裂截面惯性矩; M_{cr} 为开裂弯矩。

规范给出的短期刚度未考虑疲劳荷载的影响, 为了定量反映重复荷载对梁截面抗弯刚度的变化, 引入疲劳刚度修正系数 $g(n)$ 对欧洲规范中梁的短期刚度进行修正, $g(n)$ 考虑循环次数的影响。

$$B_n = \frac{B}{g(n)} \quad (16)$$

$$g(n) = a \lg(n) + b \quad (17)$$

式中: a, b 为待定系数。

对于疲劳试验梁 FF3, 根据式(15)计算出构件的短期刚度, 在疲劳 1 万次、3 万次、5 万次、10 万次、20 万次、30 万次、50 万次、80 万次、100 万次、150 万次时得到 10 个基于试验值的刚度, 非线性拟合出 $a = 0.0497$, $b = 1.036$, 从而得到疲劳荷载作用下混合配筋混凝土梁抗弯刚度的修正计算公式为

$$B_n = \frac{B}{0.0497 \lg(n) + 1.0362} \quad (18)$$

通过式(18)计算试验梁 FF1, FF2 在疲劳荷载下的刚度并与基于试验的刚度进行比较, 结果见图 6。不考虑最后 5% 疲劳寿命阶段, 3 种方法的计算刚度和试验刚度的相对偏差统计结果见表 3, 4, 正值表示刚度计算值大于试验值, 负值表示刚度计算值小于试验值。由表 3, 4 可以看出: 本文提出的刚度预测模型相对偏差均在 10% 以内, 且刚度计算值小于试验值, 偏于安全。

3 结 语

(1) 混合配筋混凝土梁抗弯疲劳破坏始于受拉

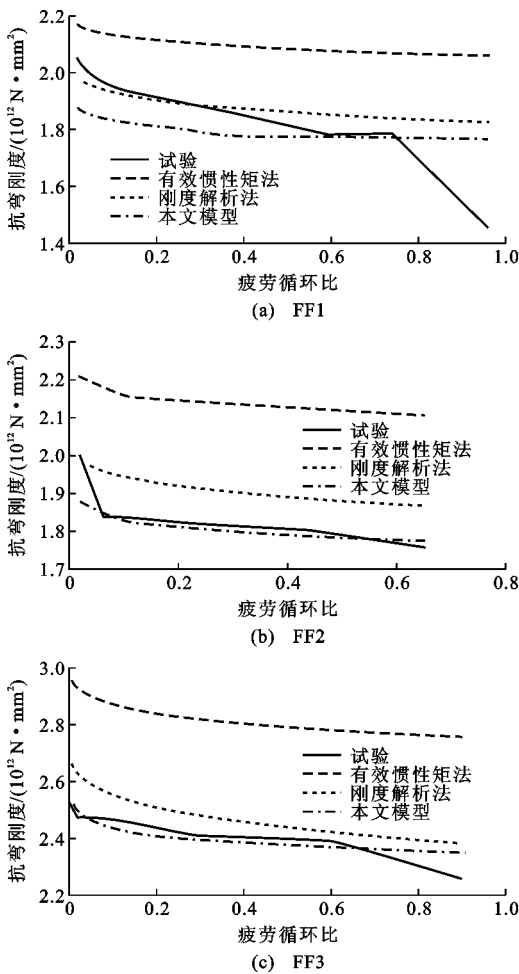


图 6 不同计算方法的抗弯刚度比较

Fig. 6 Comparison of Flexural Stiffness by Different Methods

表 3 FF1 疲劳抗弯刚度预测模型计算值和试验值相对偏差

Tab. 3 Relative Deviation Between Calculated Values of Prediction Model and Test Values of Fatigue Flexural Stiffness of FF1			
疲劳次数	3 种不同方法的刚度相对偏差/%		
	文献[17]	GB 50010—2010	本文模型
1 万次	4. 07	—5. 06	—8. 84
3 万次	5. 66	—3. 78	—8. 45
5 万次	7. 44	—2. 29	—7. 29
10 万次	8. 68	—1. 40	—6. 63
20 万次	10. 07	—0. 50	—5. 73
50 万次	12. 70	1. 13	—4. 38
80 万次	16. 50	3. 99	—0. 38
100 万次	15. 89	3. 12	—0. 87

钢筋的疲劳断裂,GFRP 筋断裂或者基体开裂剥落,混凝土压碎。钢筋疲劳断口光滑,未出现静力拉断时屈服和颈缩现象;GFRP 筋未出现静力受拉破坏时的纤维“扫帚”型破坏模式。

表 4 FF2 疲劳抗弯刚度预测模型计算值和试验值相对偏差

Tab. 4 Relative Deviation Between Calculated Values of Prediction Model and Test Values of Fatigue Flexural Stiffness of FF2			
疲劳次数	3 种不同方法的刚度相对偏差/%		
	文献[17]	GB 50010—2010	本文模型
1 万次	10. 37	—0. 97	—5. 95
3 万次	18. 56	6. 34	—0. 34
5 万次	17. 12	5. 79	—0. 50
10 万次	17. 62	5. 17	—0. 83
20 万次	17. 48	4. 62	—0. 98
30 万次	19. 63	6. 17	—0. 88

(2)疲劳加载后构件会产生不可恢复的残余挠度,残余挠度随着疲劳次数和疲劳上限荷载的增加而增大。

(3)基于有效惯性矩法的刚度计算值和基于刚度解析法的刚度计算值均大于试验值,偏于不安全。本文提出的刚度预测模型相对偏差均在 10% 以内,且刚度计算值小于试验值,偏于安全。

参考文献:

References:

[1] 庞 蕾. 截面等耐久性混合配筋混凝土构件受力性能研究[D]. 上海:同济大学,2016.
PANG Lei. Investigation of Concrete Members Reinforced with Steel and FRP Bars for Sectional Equal Durability[D]. Shanghai:Tongji University,2016.

[2] 庞 蕾,屈文俊,李 昂. 混合配筋混凝土梁抗弯计算理论[J]. 中国公路学报,2016,29(7):81-88.
PANG Lei,QU Wen-jun,LI Ang. Calculation of Flexural Strength for Concrete Beams Reinforced with Hybrid (FRP and Steel) Bars[J]. China Journal of Highway and Transport,2016,29(7):81-88.

[3] AIELLO M A,OMBRES L. Structural Performances of Concrete Beams with Hybrid (Fiber-reinforced Polymer-steel) Reinforcements[J]. Journal of Composites for Construction,2002,6(2):133-140.

[4] QU W J,ZHANG X L,HUANG H Q. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars[J]. Journal of Composites for Construction,2009,13(5):350-359.

[5] LEUNG H Y,BALENDRAN R V. Flexural Behaviour of Concrete Beams Internally Reinforced with GFRP Rods and Steel Rebars[J]. Structural Survey, 2003,21(4):146-157.

[6] LAU D,PAM H J. Experimental Study of Hybrid FRP Reinforced Concrete Beams [J]. Engineering

- Structures, 2010, 32(12): 3857-3865.
- [7] REFAI A E, ABED F, AL-RAHMANI A. Structural Performance and Serviceability of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 518-529.
- [8] PANG L, QU W J, ZHU P, et al. Design Propositions for Hybrid FRP-steel Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(4): 04015086.
- [9] 宋玉普. 混凝土结构的疲劳性能及设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- SONG Yu-pu. Fatigue Behavior and Design Principle of Concrete Structures[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [10] 查全璠, 肖建庄. 钢筋混凝土梁疲劳性能国内外研究综述[J]. 世界桥梁, 2004(3): 30-34.
- ZHA Quan-fan, XIAO Jian-zhuang. An Overview of Domestic and Foreign Researches of Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams[J]. World Bridges, 2004(3): 30-34.
- [11] CEB-FIP, Fib Model Code for Concrete Structures 2010[S].
- [12] GB/T 228. 1—2010, 金属材料拉伸试验: 第 1 部分: 室温试验方法[S].
- GB/T 228. 1—2010, Metallic Materials — Tensile Testing — Part 1: Method of Test at Room Temperature[S].
- [13] GB/T 30022—2013, 纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法[S].
- GB/T 30022—2013, Test Method for Basic Mechanical Properties of Fiber Reinforced Polymer Bar[S].
- [14] ACI 215R-74-1992, Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading[S].
- [15] REED-HILL R E. Physical Metallurgy Principles[M]. New Delhi: Affiliated East-west Press, 2008.
- [16] 马达洛夫 N A. 钢筋混凝土受弯构件在重复荷载下的性能研究[M]. 谢君斐, 译. 北京: 科学出版社, 1964.
- MADALOV N A. Flexural Performance of Steel Reinforced Concrete Members Under Cyclic Load[M]. Translated by XIE Jun-fei. Beijing, Science Press, 1964.
- [17] BALAGURU P N, SHAH S P. A Method of Predicting Crack Widths and Deflections for Fatigue Loading[J]. ACI Special Publication, 1982, 75(5): 153-175.
- [18] BISCHOFF P H. Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(5): 752-767.
- [19] ZHU P, XU J J, QU W J, et al. Experimental Study of Fatigue Flexural Performance of Concrete Beams Reinforced with Hybrid GFRP and Steel Bars[J]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21(5): 04017036.
- [20] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [21] EN 1992-1-1; 2004, Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-1; General Rules and Rules for Buildings[S].