

引用格式:孙晓光. 重复荷载作用下低合金钢筋力学性能[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(35): 305-309
Sun Xiaoguang. Mechanical properties of low alloy steel bars under repeated loading[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(35): 305-309

重复荷载作用下低合金钢筋力学性能

孙晓光

(大庆油田公司物资检测中心,大庆 163159)

摘要 主要通过建立低合金构件有限元模型,以割线弹性模量、荷载挠度、裂缝特征、残余变形为指标,研究重复荷载作用下低合金构件的力学性能。测试结果表明,在25、35 kN 工况重复荷载作用下,随着荷载次数不断增加,低合金钢筋构件的割线弹性模量因构件中存在残余应变而不断衰减,荷载挠度由0.5 mm 逐渐增大至2.0 mm。当重复荷载75 万次数、重复荷载值在25~35 kN 内逐渐增加时,低合金钢筋构件的裂缝逐渐增加,平均裂缝宽度由0.09 mm 增加至0.23 mm 并呈现整体逐渐增加、局部不稳定波动的发展趋势。

关键词 低合金钢筋 重复荷载 割线弹性模量 荷载挠度 裂缝特征

中图分类号 TU375; **文献标志码** A

工程建设中混凝土结构使用的钢筋主要包括热轧钢筋和冷加工钢筋这两大类。其中,热轧钢筋的强度低、能耗高,造成了较大的资源消耗^[1]。冷加工钢筋主要分为冷拔钢丝、冷轧螺纹等种类,这类钢筋在经过冷加工之后,结构强度能够得到大幅度的提升,具有较大的优势,但与普通钢筋构件相同的是,都需要考虑施工中的踩踏、锚固段等问题。目前通常采用降低钢筋抗拉强度应力值或者提高钢筋与混凝土粘结的方式来应对此问题,但这样处理成本较高,且在实际操作中对工艺的要求较高、工期较长。

为解决工程建设实际问题,各种新型冷加工钢筋应运而生,低合金钢筋通常与低碳钢结合制作双钢筋就是其中综合性能优势较强的一种,具有较好的抗腐蚀作用^[2,3]。该技术最早由奥地利一家公司提出并申请专利,接着发达国家先后斥巨资设立课题,研究各种低合金高性能的钢筋,开发抗腐蚀钢筋混凝土材料,Zhao 等^[4]将热轧钢筋冷却工艺应用于低合金钢筋,研究其抗腐蚀性能,尽管获得了一些研究成果,但存在对不同荷载工况下的低合金钢筋荷载挠度计算不准确的问题。后来中国学者也先后加入低合金钢筋等新型钢材料的研究队伍中。付培茂等^[5]对复合板加工中的低合金钢板进行了研究,分析化学成分对其的影响,但未对钢筋构件的裂缝

特征进行研究;秦斌等^[6]研究了低合金钢焊接过程中产生的力学性能可以对钢筋构件的弹性模量进行准确分析,但研究的全面性较差,忽略了对钢筋构件残余变量的分析。

针对上述方法中存在的问题,研究重复荷载作用下低合金钢筋力学性能,并以钢筋构件割线弹性模量、荷载挠度、裂缝特征、残余变形为指标进行实验分析,可对钢筋构件的力学性能进行准确分析。开展重复荷载作用下低合金钢筋结构的力学性能研究,对新型钢筋的推广应用和工程建设的发展均具有极为深远的意义。

1 低合金钢筋结构有限元模型的建立

研究主要是基于已取得的钢筋结构力学性能分析成果,在重复荷载作用下分析低合金钢筋结构力学性能,研究重复荷载对建筑结构力学性能的影响。

模型分析是检验数值理论的主要可参考依据^[7]。由于混凝土建筑结构材料具有弹塑性、不均匀性等特点,因此采用建立有限元结构模型的方式,对低合金钢筋结构进行精细化设计。

假设低合金钢筋和混凝土之间具有较强的黏结力,即低合金钢筋和混凝土的形变产生具有一致性,在这种条件下采用形状函数进行动力性能分析^[8,9]。钢筋混凝土单元的总位能可表示为

$$E = e_c + e_s + W \tag{1}$$

式(1)中: e_c 为混凝土应变能; e_s 为低合金钢筋应变能; W 为外荷载位能。

将钢筋混凝土的节点位移向量表示为 y , 钢筋

2019年5月22日收到
2017年黑龙江省教育厅科研项目(11531444)和大庆油田有限责任公司项目(Q/SY DQ2017-128)资助
作者简介:孙晓光(1970—),男,汉族,黑龙江大庆人,工程师。研究方向:检测技术与仪器。E-mail: dqsunxiaoguang@126.com

结构位移与应变关系矩阵表示为 A , 低合金钢筋的弹性矩阵和混凝土弹性矩阵分别表示为 M_1 和 M_2 , 结合位移插值函数分析, 式(1)可表示为

$$E = \frac{1}{2}y^T \left(\int A \cdot M_1 + \int A \cdot M_2 \right) \tag{2}$$

根据式(2), 则可以得到钢筋混凝土结构的有限元模型, 表示为

$$Q = E(G_1 + G_2) \tag{3}$$

式(3)中: G_1 为低合金钢筋的刚度矩阵; G_2 为混凝土刚度矩阵; Q 为等效节点荷载向量。

在钢筋混凝土结构有限元模型建立过程中, 采用单元网格划分方式将几何模型转化为有限元模型^[10,11]。为确保模型的精度, 研究采用多次单元网格划分方式进行分析, 保证网格密度, 从而保证模型计算精度, 低合金钢筋构件有限元模型见图 1。

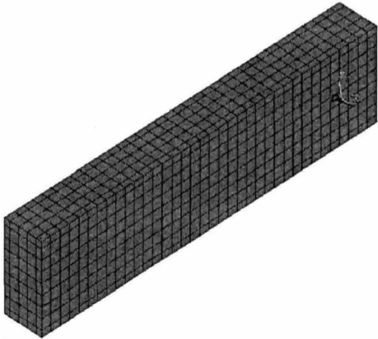


图 1 低合金钢筋构件的有限元模型
Fig. 1 Finite element model of low alloy steel bars

研究采用的有限元模型共包含 2 000 个单元、2 100 个节点, 在重复荷载作用下对低合金钢筋结构力学性能进行分析时, 需要输入截面面积、强度、弹性模量等参数。基于上述有限元模型建立低合金钢筋构件, 分别在 25、35 kN 荷载这两种不同工况下, 对有限元模型进行重复荷载加载, 来获得低合金钢筋的力学性能分析结果。

2 试验材料与分析指标

2.1 试验材料

实验选取的低合金钢筋试件的力学性能参数如表 1 所示。

在试验开始前, 采用加载荷载幅值为 3 MPa 来测试低合金钢筋构件的承载力, 并计算标准构件的抗拉强度。

2.2 分析指标

2.2.1 割线弹性模量

研究与规范弹性模量测试方法不同的是需要考虑重复荷载作用下低合金钢筋构件的残余应变影响, 因此提出割线弹性模量, 即在每次重复荷载作用

下

表 1 力学参数
Table 1 Mechanical parameters

参数名称	数值
弹性模量/MPa	1.95×10^5
控制应力/MPa	1 022
混凝土强度/等级	C30
极限强度/MPa	1 345
屈服强度/MPa	335
轴中心抗压强度/MPa	51.84

计算弹性模量时, 将荷载次数对应的残余应变和荷载应变相加, 获取每次荷载时的割线弹性模量, 进而得出混凝土残余应变与割线弹性模量之间的关系。割线弹性模量计算公式为

$$P = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{(\beta_2 - \beta_1) + \Delta\phi} \tag{4}$$

式(4)中: $\Delta\phi$ 为残余应变; $(\beta_2 - \beta_1)$ 为荷载应变; α_1 和 α_2 分别为最小应力和最大应力。

在 25、35 kN 荷载工况下, 在荷载(50 ~ 90)万次内, 分别测试不同荷载次数时低合金钢筋构件的割线弹性模量。

2.2.2 荷载挠度

在研究重复荷载作用对钢筋构件挠度变化的影响时, 主要以荷载挠度为衡量指标, 即每次荷载加载时低合金钢筋对于本次初始加载值的相对值。初始加载值是指在 1 kN 荷载作用时的低合金钢筋挠度绝对值。

在 25、35 kN 荷载工况下, 在荷载次数为(50 ~ 75)万次内, 分别测试不同荷载次数时低合金钢筋构件的荷载挠度。

2.2.3 裂缝特征

在 25、35 kN 荷载工况下, 以重复荷载 75 万次为例, 测试重复荷载作用下钢筋构件的形变特点, 记录重复荷载值及平均裂缝宽度。

2.2.4 残余变形

在 25、35 kN 荷载工况下, 对钢筋构件进行(50 ~ 90)万次重复荷载测试, 绘制钢筋构件的残留变形状态变化。

3 有限元计算结果分析

3.1 割线弹性模量与荷载次数的关系

在 25、35 kN 工况下、荷载(50 ~ 90)万次内, 不同荷载次数时割线弹性模量的分析结果见图 2。

从图 2 可知, 在重复荷载(50 ~ 90)万次内, 随着荷载次数的不断增加, 25、35 kN 荷载工况下低合金钢筋构件的割线弹性模量均逐渐下降、不断衰减, 呈现负相关趋势, 这可能是因为构件中存在的残余应变发生了累加效应所致。

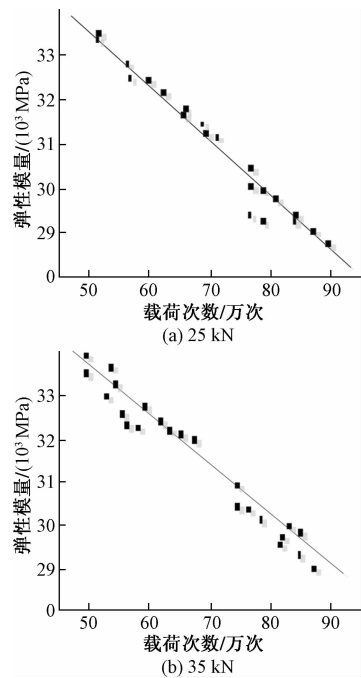


图 2 不同荷载值时割线弹性模量与荷载次数关系
Fig. 2 Relationship between secant elastic modulus and load number under different loads

3.2 荷载挠度与荷载次数的关系

荷载次数为(50~90)万次,荷载挠度上、下限为0.1、2.1 mm,在25、35 kN荷载工况下,不同荷载次数时荷载挠度的分析结果见图3。

从图3可知,在荷载次数为90万次的重复荷载作用下,低合金钢筋构件的荷载挠度呈现不断上升的趋势,且在25、35 kN荷载工况两种条件下,挠度均能够由0.5 mm上升至2.0 mm,与荷载次数呈现正相关趋势。

3.3 裂缝宽度与重复加载值

测试并记录在重复荷载作用下钢筋构件的变形和裂宽数据,并标记不同荷载次数下的裂缝开裂情况,得到裂宽测试结果,如图4和表2所示。

表 2 裂宽测试数据

Table 2 Deformation and crack width test data		
裂缝编号	加载值/kN	裂缝宽度/mm
1	25	0.09
2	26	0.08
3	27	0.09
4	28	0.12
5	29	0.11
6	30	0.09
7	31	0.17
8	32	0.19
9	33	0.12
10	34	0.18
11	35	0.23

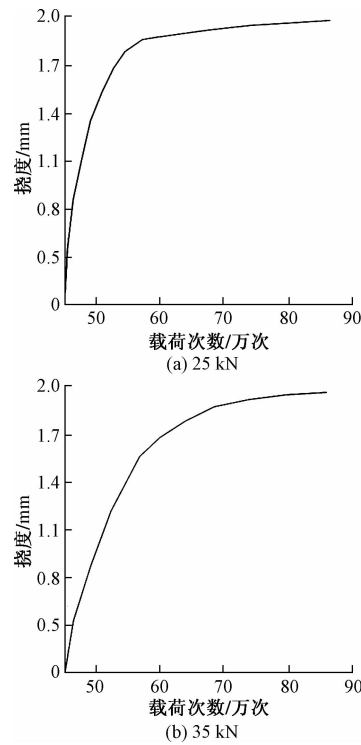


图 3 不同荷载值时荷载挠度与荷载次数关系
Fig. 3 Relationship between load-deflection and load number under different loads

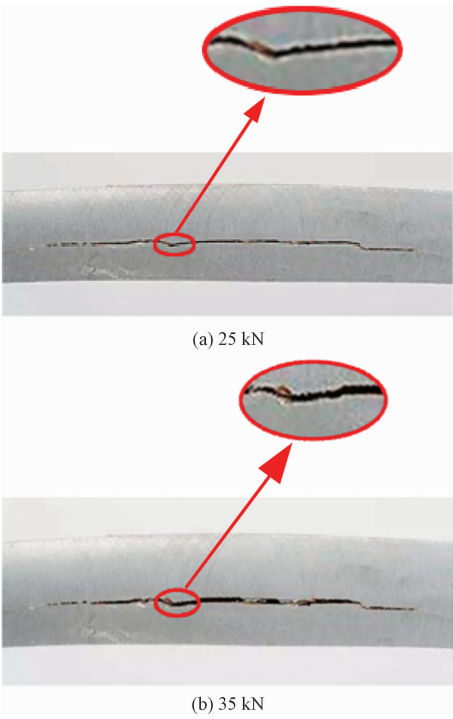


图 4 不同荷载工况下裂缝变形测试结果
Fig. 4 Results of fracture deformation under different load working conditions

分析图4和表2可以看出,低合金钢筋构件的最大裂缝在不断地发生变化,且变化幅度不稳定,与

普通钢筋混凝土构件不同,普通钢筋混凝土构件的主裂缝出现后,裂缝分布基本稳定,裂缝宽度随着荷载作用的增大呈现线性发展趋势,且会在可承受最大荷载点时迅速发展,构件被破坏。而低合金钢筋构件在产生第一批裂缝时,还会在第一批与第二批裂缝之间出现裂缝,裂缝较为密集。随着荷载值以及荷载次数的增加,裂缝呈缓慢线性发展,裂缝宽度逐渐增加。此外,相对于普通钢筋构件,低合金钢筋构件的裂缝宽度较小,低合金钢筋构件的裂缝宽度最大不超过 0.23 mm。

3.4 残余变形与重复加载值

在 25、35 kN 荷载工况下,荷载次数为(50~90)万次,不同工况下的残余变形如图 5 所示。

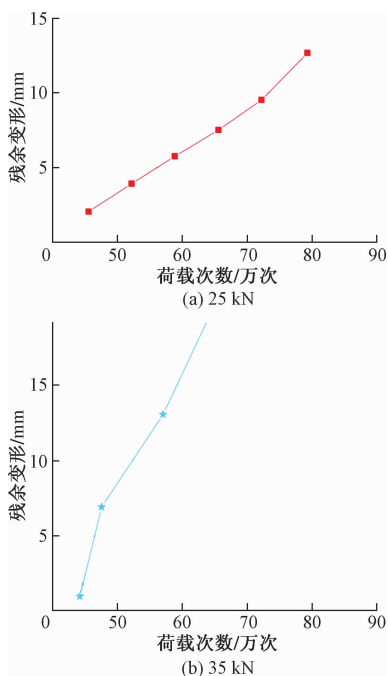


图 5 不同荷载工况下残余变形测试结果

Fig. 5 Residual deformation test results under different load working conditions

分析图 5 可知,在 25 kN 的荷载工况下,钢筋构件的残余变形持续到 80 万次荷载时结束,最大残余变形值为 12.6 mm;而在 35 kN 的荷载工况下,钢筋构件的残余变量只持续到 62 万次结束,最大残余变形值为 19.8 mm。

4 结论

构建了低合金钢筋构件的有限元模型,以该模型为基础,在 25、35 kN 荷载工况下,以割线弹性模量、荷载挠度、裂缝宽度和残余变量为测试指标,对低合金钢筋构件结构的力学性能进行了分析。

(1)在荷载(50~90)万次内,低合金钢筋构件

的割线弹性模量与荷载次数呈现负相关关系,不断发生衰减。

(2)在荷载次数为(50~75)万次内,低合金钢筋构件的荷载挠度与荷载次数呈现正相关关系,不断增加。

(3)当重复荷载 75 万次数、重复荷载值在 25~35 kN 时,随着重复荷载值的不断增加,低合金钢筋构件的平均裂缝宽度由 0.09 mm 增加至 0.23 mm,并呈现整体逐渐增加、局部不稳定波动的发展趋势,此与普通混凝土构件裂缝的稳定发展情况不同。此外,随着重复荷载值的不断增大,裂缝数量的开裂程度逐渐增加。

(4)当荷载工况为 25~35 kN 时,残余变量的最大值分别为 12.6、19.8 mm。

参考文献

- 1 赵 军, 缪昌国, 阳小超, 等. 考虑收缩徐变的施工期大跨砼结构内力分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(5): 252-256
Zhao Jun, Miao Changguo, Yang Xiaochao, et al. A research of large span concrete structure reliability considering creep and shrinkage during construction[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(5): 252-256
- 2 王富平, 蔺鹏臻, 柳兴成. 铁路混凝土箱梁钢筋锈蚀后其挠度和裂缝宽度取值[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(28): 240-245
Wang Fuping, Lin Pengzhen, Liu Xingcheng. Deflection and crack width of railway concrete box girder after the rebar corrosion[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(28): 240-245
- 3 孙玉军, 胡道功, 张 怀, 等. 青藏高原东北缘岩石圈变形方式的动力学模拟研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 22(6): 2383-2393
Sun Yujun, Hu Daogong, Zhang Huai, et al. Dynamic simulation of lithosphere deformation patterns in the northeast margin of Qinghai-Xizang plateau [J]. Progress in Geophysics, 2017, 22(6): 2383-2393
- 4 Zhao C, Kingkam W, Ning L, et al. Effect of deformation temperature on the microstructure and mechanical properties of high-strength low-alloy steel during hot compression[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(8): 4129-4139
- 5 付培茂, 刘在龙, 王 岩, 等. 化学成分对轧制复合基层用低合金钢力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 6(10): 140-150
Fu Peimao, Liu Zailong, Wang Yan, et al. Effect of chemical composition on mechanical properties of low alloy steel for rolling composite base [J]. Hot Working Technology, 2018, 6(10): 140-150
- 6 秦 斌, 齐彦昌, 曹建春, 等. 马氏体不锈钢与低合金钢异质焊接接头的组织与力学性能[J]. 金属热处理, 2017, 42(5): 68-74
Qin Bin, Qi Yanchang, Cao Jianchun, et al. Microstructure and mechanical properties of dissimilar steel welded joint of martensite stainless steel and low alloy steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(5): 68-74
- 7 宋世荣, 卢贵清, 方 剑. 欧亚板块均衡大地水准面异常及其动力学特征[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 1029-1033

Song Shirong, Lu Guiqing, Fang Jian. Isostatic geoid anomaly of Eurasian plate and its dynamic characteristics [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(3): 1029-1033

8 邢心魁, 李 亚, 雷震霖, 等. 预应力钢绞线动态力学拉伸性能及本构关系[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(7): 228-233

Xing Xinkui, Li Ya, Lei Zhenlin, et al. Dynamic mechanical tensile properties and constitutive relationship of prestressed steel strand[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(7): 228-233

9 邓恩峰, 宗 亮, 丁 阳. 钢结构集成模块建筑新型节点力学性能研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(7): 89-90

Deng Enfeng, Zong Liang, Ding Yang. Mechanical properties of innovative connection for integrated modular steel construction [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(7): 89-90

10 许文波, 王震亮, 唐建云. 特低渗透油田裂缝形态监测及短宽缝压裂技术[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 311-318

Xu Wenbo, Wang Zhenliang, Tang Jianyun. Fracture morphology monitoring and short-wide fracture fracturing technology in ultra-low permeability oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 311-318

11 Lu J, Yu S, Qiao X, et al. Experimental study on low cyclic loading tests of steel plate shear walls with multilayer slits[J]. International Journal of Steel Structures, 2018, 18(4): 1-9

Mechanical Properties of Low Alloy Steel Bars Under Repeated Loading

SUN Xiao-guang

(Center of Material and Equipment Testing, Daqing Oil Field Co., Daqing 163159, China)

[Abstract] The mechanical properties of low-alloy components under repeated loads were studied by establishing finite element models of low-alloy components and taking secant modulus of elasticity, load deflection, crack characteristics and residual deformation as indicators. The test results show that the secant modulus of elasticity of low-alloy steel members decreases with the increase of loading times under the repeated loading conditions of 25 kN and 35 kN, and the load deflection increases from 0.5 mm to 2.0 mm. When the number of repeated loads is 750 000 and the value of repeated loads is gradually increased in the range of 25 ~ 35 kN, the cracks of low alloy reinforced concrete members increase gradually, and the average crack width increases from 0.09 mm to 0.23 mm, showing a trend of overall increase and local instability fluctuation.

[Key words] low alloy steel bar repeated loading secant modulus of elasticity load-deflection crack characteristics