

# 锈蚀 HRB500 钢筋混凝土板抗弯性能试验研究

方亮<sup>1,2</sup>,周云<sup>1†</sup>,易督航<sup>3</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082; 2. 湖南农业大学 工学院,湖南 长沙 410128;

3. 西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031)

**摘要:**采用通电方式对配置 HRB500 级钢筋和普通钢筋的混凝土板进行加速锈蚀,并对锈蚀钢筋混凝土板进行抗弯承载力试验研究.对比分析了不同锈蚀程度下钢筋混凝土板的破坏形态、抗弯承载能力、荷载-挠度曲线.同时,通过试验研究了锈蚀钢筋受拉性能和黏结性能随锈蚀程度不同的变化规律.考虑板内不同锈蚀程度的钢筋可能发生受拉屈服或黏结滑移破坏,提出锈蚀钢筋混凝土板抗弯承载力计算方法.经过对比分析,试验结果与计算模型吻合良好,锈蚀板抗弯承载力计算值与试验值之比的平均值为 1.019,标准差为 0.081.

**关键词:**HRB500 级钢筋;锈蚀;钢筋混凝土板;抗弯承载力

**中图分类号:**TU375.2

**文献标志码:**A

## Experimental Study on Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Slabs with HRB500 Bars

FANG Liang<sup>1,2</sup>, ZHOU Yun<sup>1†</sup>, YI Duhang<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Engineering College, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The reinforced concrete slabs using HRB500 rebar and ordinary steel rebar were corroded by artificial accelerated method, and four-point bending test was applied on these corroded slabs. The failure modes, flexural capacity, load-deflection curves of the slabs were analyzed by comparing test specimens under different corrosion degree. This study further investigated the relationship between corrosion ratio and deterioration of tensile capacity and bond behavior of corroded steel. Considering the occurrence of reinforcement yielding and bond-slip due to different corrosion degree, a calculation method of flexural bearing capacity of corroded reinforced concrete slab was proposed. A good agreement between calculated values and tested results of the corroded reinforced concrete slab was achieved. The average ratio of calculated values to test results was 1.019, and the standard deviation was 0.081.

**Key words:** HRB500 bars; corrosion; reinforced concrete slab; flexural bearing capacity

\* 收稿日期:2019-11-20

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51878264), National Natural Science Foundation of China(51878264);湖南省科技厅科技进步与创新项目(201912), Science and Technology Progress and Innovation Project of the Department of Transportation of Hunan Province(201912);长沙市科技计划项目(kq1801010), Science and Technology Project of Changsha(kq1801010)

**作者简介:**方亮(1981—),女,湖南益阳人,湖南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: zhouyun05@hnu.edu.cn

钢筋混凝土结构中运用强度高、性能好的钢筋,既能提高构件受力性能、改善其使用功能,又方便拓展结构设计方法,还可以节省材料,具有十分明显的经济效益. 20 世纪 80 年代起国外普遍采用设计强度 400 MPa 以上的高强钢筋;欧美国家、日本等 20 世纪 90 年代以来对设计强度达 500 MPa 的钢筋进行了大面积的推广应用<sup>[1]</sup>. Apostolopoulos 等<sup>[2-3]</sup>研究了锈蚀对 S500 级钢筋疲劳性能的影响. Sumpter 等<sup>[4-5]</sup>通过对比试验研究了配置高强钢筋和普通钢筋的混凝土梁,认为使用高强钢筋可提高抗剪承载力. 我国对高强度钢筋的研发和应用起步稍晚,但随着我国建筑用钢筋体系不断完善,HRB500 级系列高强钢筋已进入规范,并制定了“加快淘汰 335 MPa、优先使用 400 MPa,积极推广 500 MPa 螺纹钢”的技术路线<sup>[6]</sup>,因此全国各研究机构 and 高校进行了大量试验研究. 沈宇<sup>[7]</sup>、徐风波<sup>[8]</sup>、李琼<sup>[9]</sup>分别通过试验对配置 HRB500 级钢筋的混凝土梁的抗弯承载力、正常使用开裂和挠度问题进行了研究. 张艇<sup>[10]</sup>对 HRB500 级钢筋混凝土简支梁和连续梁的受弯及受剪性能进行了试验研究. 江涛<sup>[11]</sup>对配置 HRB500 级钢筋的混凝土框架结构进行了静力试验研究. 于秋波<sup>[12]</sup>通过试验研究了配置 HRB500 级钢筋的部分预应力混凝土梁的受力特点和破坏形态. 王铁成等<sup>[13-14]</sup>研究了高强钢筋混凝土构件在静力荷载作用下的抗弯、抗剪性能和低周往复荷载作用下的抗震性能. 丰见政<sup>[15]</sup>对比研究了配置 HRB500 级钢筋混凝土梁常温下和高温后的力学性能. 金伟良等<sup>[16]</sup>对锈蚀 HRB500 级钢筋混凝土构件的受力性能进行了试验研究. 总结来看,因钢筋锈蚀引起的混凝土结构耐久性问题研究周期长、试验离散性较大,因此目前针对配置 HRB500 级钢筋的混凝土构件耐久性问题研究较少<sup>[17]</sup>. 另外,结合市场调查和工程实际情况发现,HRB500 级系列钢筋仅在沿海较发达地区使用较多,中部地区普及程度仍然较低. 本次试验通过对加速锈蚀后的钢筋混凝土足尺板进行静力抗弯试验,结合同等条件下混凝土内锈蚀钢筋的黏结强度和抗拉强度,对比分析锈蚀对配置 HRB500 级钢筋混凝土板抗弯性能的影响,为高强钢筋混凝土构件耐久性设计以及高强钢筋在工程中进一步推广应用提供更多数据支持和研究依据.

## 1 试验设计

### 1.1 试件设计制作

为了研究锈蚀钢筋混凝土板的受弯性能,设计

制作了 16 块钢筋混凝土足尺板. 板长 2 300 mm,计算跨度 2 100 mm,截面  $b \times h = 700 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ . 足尺板试件根据混凝土和钢筋强度等级不同分为 4 组,配置详见表 1. 板内分布筋均采用 HRB400 级钢筋,直径 6 mm. 试件纵筋伸出板端便于通电锈蚀时钢筋串联. 另外设计 16 块材料、配筋与足尺板一一对应的小板(如图 1 所示),与足尺板同期制作完成. 试件混凝土拌和采用标号 42.5 的普通硅酸盐水泥,粗骨料为最大粒径 30 mm 的卵石,细骨料为普通河砂. 设计强度为 C40 的混凝土,配合比为: $m_{\text{水泥}} : m_{\text{砂}} : m_{\text{石}} : m_{\text{水}} = 1 : 1.49 : 2.68 : 0.47$ ;设计强度为 C50 的混凝土,配合比为: $m_{\text{水泥}} : m_{\text{砂}} : m_{\text{石}} : m_{\text{水}} = 1 : 1.49 : 2.23 : 0.326$ ,使用萘系减水剂. 足尺板与小板试件均在室内自然养护成型. 试件混凝土与钢筋强度标准值详见表 2、表 3.

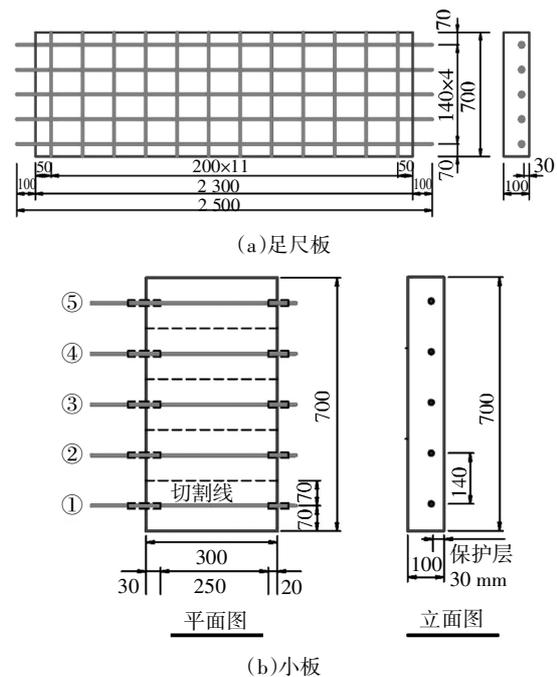


图 1 试件尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig.1 Geometric dimensions and reinforcements of specimen(unit:mm)

### 1.2 试件通电锈蚀

钢筋混凝土板加速锈蚀试验方案如图 2 所示. 为使足尺板和小板锈蚀环境和程度一致,每块足尺板 and 对应小板的纵筋串联,接入直流电源正极(足尺板横向分布钢筋做绝缘和防锈处理);不锈钢棒接入直流电源负极. 试件表面覆盖吸水海绵,通过喷洒淡水保证电化学反应持续进行. 本次试验采用 24 V 外接直流电源,通过调节回路中可变电阻,改变回路

电流大小,保持腐蚀电流密度基本恒定在 $(0.1\pm 0.02)$  mA/cm<sup>2</sup>. 锈蚀过程中,定时记录锈蚀回路的电流值,累计试件总通电量,推算钢筋的锈蚀程度,并根据量测结果确定锈蚀时长,确保达到预计锈蚀率. 试验设计钢筋锈蚀程度分为4个等级:0%、5%、10%和15%. 足尺板 S1-1H 和小板 X1-1H 因通电时长超出预计,钢筋锈蚀程度以实际测量值为准.

表 1 足尺板和小板试件参数

Tab.1 Parameters of specimens

试件编号	混凝土	钢筋	直径/mm	预计锈蚀率/%
S1-1C/X1-1C	C40	HRB400	12	0
S1-1L/X1-1L	C40	HRB400	12	5
S1-1M/X1-1M	C40	HRB400	12	10
S1-1H/X1-1H	C40	HRB400	12	15
S2-1C/X2-1C	C50	HRB400	12	0
S2-1L/X2-1L	C50	HRB400	12	5
S2-1M/X2-1M	C50	HRB400	12	10
S2-1H/X2-1H	C50	HRB400	12	15
S1-2C/X1-2C	C40	HRB500E	14	0
S1-2L/X1-2L	C40	HRB500E	14	5
S1-2M/X1-2M	C40	HRB500E	14	10
S1-2H/X1-2H	C40	HRB500E	14	15
S2-2C/X2-2C	C50	HRB500E	14	0
S2-2L/X2-2L	C50	HRB500E	14	5
S2-2M/X2-2M	C50	HRB500E	14	10
S2-2H/X2-2H	C50	HRB500E	14	15

注:S表示足尺板;X表示小板.

表 2 混凝土力学性能

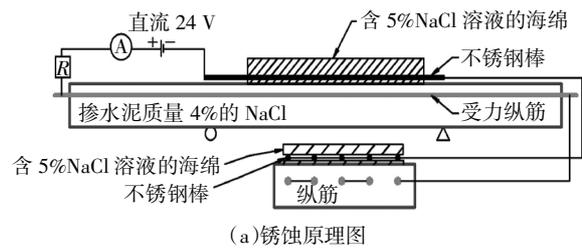
Tab.2 Mechanical properties of concrete

混凝土	立方体抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa
C40	46.8	3.185
C50	52.8	4.543

表 3 钢筋力学性能

Tab.3 Mechanical properties of steel bar

钢筋	直径/mm	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa	伸长率/%
HRB400	12	487.3	619.4	22.73
HRB500E	14	563.0	726.6	25.53



(a) 锈蚀原理图



(b) 试件锈蚀照片

图 2 通电加速锈蚀试验

Fig.2 Accelerated corrosion test

### 1.3 试验方案

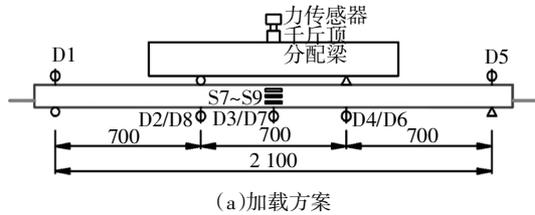
足尺板静力抗弯试验、钢筋混凝土拉拔试验和钢筋拉伸试验均在湖南农业大学土木工程实验室进行.

足尺板静力抗弯承载力试验采用四点加载方式(如图 3 所示). 加载制度依据《混凝土结构试验标准方法》(GB 50152—2012)分级加载. 试件测点布置情况如图 3 所示: 板底跨中和 1/3 跨段处贴混凝土应变片(S1~S6), 板侧贴混凝土应变片(S7~S9)测应变; 板底跨中和两个 1/3 跨段边缘处设置位移计(D2~D4 和 D6~D8), 支座中点处板顶设千分表(D1, D5)测位移. 为尽量避免足尺板在加载过程中发生扭转, 用 2 对长度 800 mm 的条形钢支座作为四点加载时的支撑, 板与支座盖板间的缝隙用水泥净浆填满. 小板完成锈蚀后, 按图 1(b)所示切割线, 将小板切割成 5 个试块. 1 号、2 号块破型取出锈蚀钢筋用于单向拉伸试验; 3~5 号块用于钢筋混凝土的黏结性能测试.

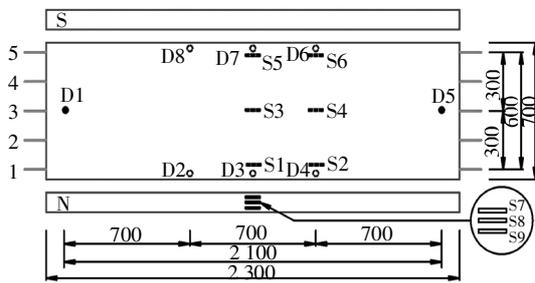
钢筋单向拉伸试验使用 WAW-600D 电液伺服万能试验机加载, 依据《钢筋混凝土用钢材试验方法》(GB/T 28900—2012)进行.

锈蚀钢筋混凝土的黏结性能测试采用半梁式拉拔试验方法进行. 加载方案及试验情况详见图 4, 通过在拉拔装置中加设钢辊支, 模拟实际受弯构件中

纵筋偏心受拉的情况. 为防止钢辊支与试件接触位置过早出现局压破坏, 加垫硬质橡胶条. 使用 WAW-600D 电液伺服万能试验机加载, 加载方案采用位移控制, 加载速率 0.5 mm/min, 在试件自由端架设位移计. 试验过程中记录钢筋受到的拉力  $N$ , 以及试件自由端钢筋与混凝土的位移.



(a) 加载方案



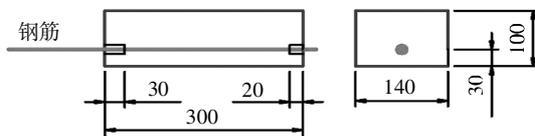
(b) 测点布置



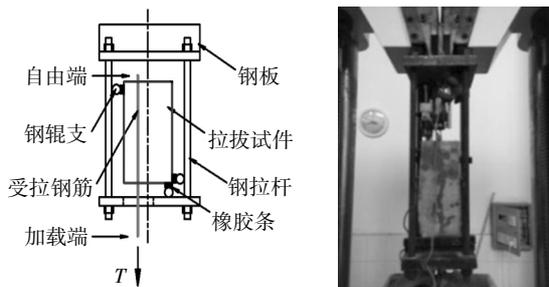
(c) 加载现场照片

图 3 四点加载抗弯试验(单位:mm)

Fig.3 Four-point bending test(unit:mm)



(a) 拉拔试件



(b) 加载方案



(c) 加载现场照片

图 4 钢筋拉拔试验(单位:mm)

Fig.4 Steel pull out test(unit:mm)

## 2 锈蚀钢筋受力性能

### 2.1 钢筋锈蚀情况

钢筋的锈蚀程度均用锈蚀率衡量. 将试件破型取出锈蚀钢筋并进行酸洗和打磨除锈, 测量钢筋长度和质量, 根据式(1)计算锈蚀率.

$$\eta = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为钢筋的锈蚀率, %;  $m_0$  为钢筋锈蚀前质量, g, 按钢筋长度乘以标准线密度计算获得;  $m$  为锈蚀钢筋除锈后质量, g.

混凝土内的钢筋往往出现不均匀锈蚀, 同一根钢筋远离保护层一侧锈蚀情况较轻, 靠近保护层的一侧锈蚀较严重(如图 5 所示).

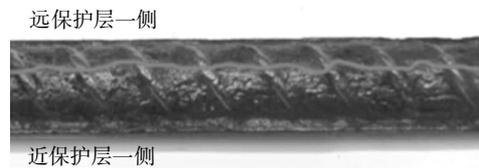
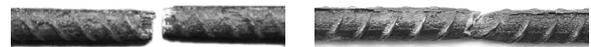


图 5 混凝土内钢筋不均匀锈蚀

Fig.5 Non-uniform corrosion of bar in concrete

### 2.2 钢筋拉伸试验结果

锈蚀钢筋拉伸断裂往往在截面削弱严重的坑蚀位置, 且钢筋锈蚀越严重, 破坏时越突然, 颈缩现象越不明显(如图 6 所示). 对比不同锈蚀率钢筋的荷载-位移曲线(如图 7 所示), 可发现屈服平台随锈蚀率增大而逐渐缩短.



(a) HRB400

(b) HRB500E

图 6 锈蚀钢筋拉伸断裂

Fig.6 Tensile failure of corroded bars

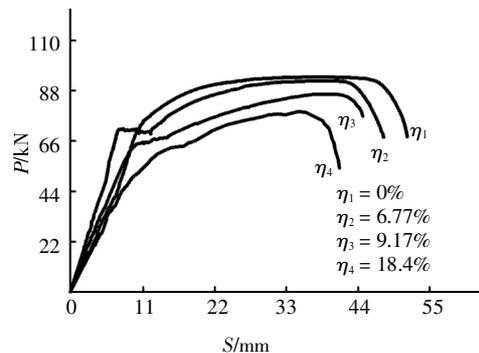


图 7 HRB500 钢筋拉伸荷载-位移曲线

Fig.7 Load-deflection curves of HRB500 bars

钢筋拉伸试验结果详见表 4. 对比试验结果可知 HRB500E 级钢筋锈蚀后强度及变形性能的变化规律与 HRB400 级钢筋的基本一致. 钢筋屈服强度、极限强度和伸长率都随锈蚀率增加而明显下降 (如图 8~图 10 所示), 锈蚀后钢筋强度可按回归公式(2)(3)计算.

$$\frac{f_{y,N}}{f_{y,C}} = 1 - \delta_y \eta, \delta_y = 0.013. \quad (2)$$

$$\frac{f_{u,N}}{f_{u,C}} = 1 - \delta_u \eta, \delta_u = 0.011. \quad (3)$$

式中:  $f_{y,C}$ 、 $f_{y,N}$  分别为未锈蚀和锈蚀后钢筋屈服强度, MPa;  $f_{u,C}$ 、 $f_{u,N}$  分别为未锈蚀和锈蚀后钢筋极限强度, MPa;  $\delta_y$ 、 $\delta_u$  分别为锈蚀钢筋屈服强度和极限强度的回归系数.

表 4 钢筋拉伸试验结果  
Tab.4 Results of tensile test

试件编号	钢筋	直径/mm	实测锈蚀率/%	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率/%
T1C			0	487.3	619.4	22.73
T1-1L1			6.64	460	593	13.11
T1-1L2			6.24	429	573	14.52
T1-1M1			12.29	365	505	13.55
T1-1M2			15.88	352	470	12.01
T1-1H1			21.42	335	401	9.07
T1-1H2	I	12	23.01	326	380	8.33
T2-1L1			5.24	484	610	16.88
T2-1L2			4.21	441	569	17.31
T2-1M1			10.55	439	593	13.26
T2-1M2			11.01	401	539	14.17
T2-1H1			12.11	431	569	12.58
T2-1H2			14.57	429	558	10.93
<hr/>						
T2C			0	563.0	726.6	25.53
T1-2L1			4.91	565	741	17.71
T1-2L2			6.77	537	724	20.37
T1-2M1			9.67	506	679	16.03
T1-2M2			10.58	537	694	13.42
T1-2H1			12.73	505	686	13.16
T1-2H2	II	14	16.57	451	628	11.72
T2-2L1			4.73	578	730	21.33
T2-2L2			6.12	538	708	18.67
T2-2M1			9.17	484	625	16.69
T2-2M2			11.20	493	615	15.36
T2-2H1			14.67	440	577	12.70
T2-2H2			18.40	439	580	9.75

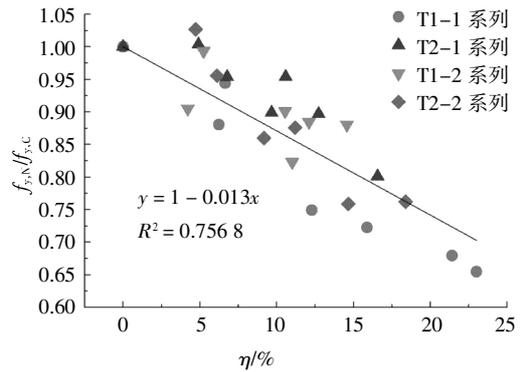


图 8 钢筋屈服强度与锈蚀率关系  
Fig.8 Yield strength variation with the corrosion ratio

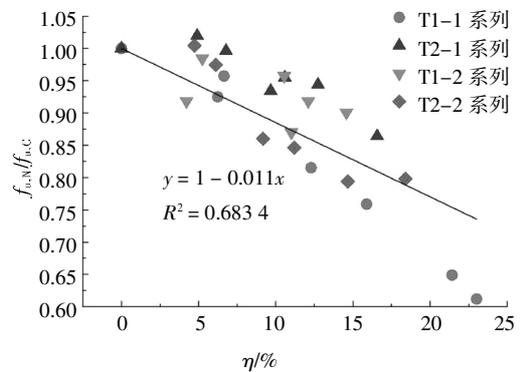


图 9 钢筋极限强度与锈蚀率关系  
Fig.9 Ultimate strength variation with the corrosion ratio

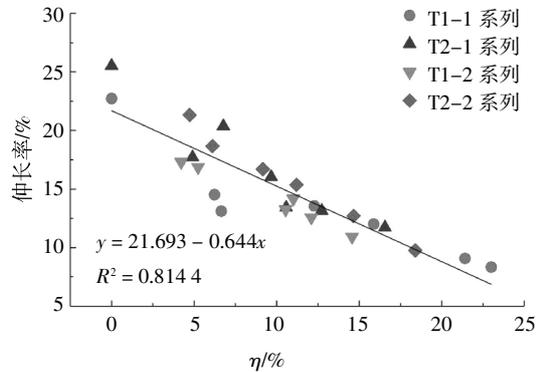


图 10 钢筋伸长率与锈蚀率关系  
Fig.10 Elongation variation with the corrosion ratio

### 2.3 拉拔试验结果

锈损拉拔试件的锈胀裂缝主要在底部保护层处沿纵筋方向开展(如图 11 所示). 试验结果详见表 5. 破坏形式主要有: 弯剪破坏、劈裂破坏、局压破坏和钢筋拉断(如图 12 所示). 锈蚀率较低、锈胀裂缝较小时, 试件出现类似受弯构件的弯剪裂缝. 在自由端附近的钢辊支处先出现沿正截面的竖向裂缝, 向上发展后与纵向劈裂裂缝连通(如图 12(a)所示). 锈蚀率较高、锈胀裂缝较宽时, 试件出现劈裂破坏, 劈裂

表 5 拉拔试验结果

Tab.5 Results of pull out test

编号	混凝土	钢筋	直径/mm	$\eta/\%$	$P/\text{kN}$	$\tau/\text{MPa}$	$k_r$
B1-1C	C40	HRB400	12	0	56.5	5.995	1.000
B1-1L3	C40	HRB400	12	4.5	57.5	6.101	1.018
B1-1L4	C40	HRB400	12	4.2	54.3	5.761	0.961
B1-1L5	C40	HRB400	12	6.4	50.0	5.305	0.885
B1-1M3	C40	HRB400	12	12.8	47.6	5.051	0.843
B1-1M4	C40	HRB400	12	12.1	28.0	2.971	0.496
B1-1M5	C40	HRB400	12	14.3	19.3	2.048	0.342
B1-1H3	C40	HRB400	12	19.7	7.8	0.828	0.138
B1-1H4	C40	HRB400	12	23.0	—	—	—
B1-1H5	C40	HRB400	12	26.5	—	—	—
B1-2C	C40	HRB500E	14	0	77.0	7.003	1.000
B1-2L3	C40	HRB500E	14	2.3	78.6	7.148	1.021
B1-2L4	C40	HRB500E	14	5.6	69.0	6.275	0.896
B1-2L5	C40	HRB500E	14	4.0	72.1	6.557	0.936
B1-2M3	C40	HRB500E	14	7.8	56.5	5.138	0.734
B1-2M4	C40	HRB500E	14	10.5	45.2	4.111	0.587
B1-2M5	C40	HRB500E	14	9.0	50.3	4.575	0.653
B1-2H3	C40	HRB500E	14	11.7	34.9	3.174	0.453
B1-2H4	C40	HRB500E	14	14.8	30.6	2.783	0.397
B1-2H5	C40	HRB500E	14	13.3	33.6	3.056	0.436
B2-1C	C50	HRB400	12	0	71.6	7.597	1.000
B2-1L3	C50	HRB400	12	2.0	78.9	8.372	1.102
B2-1L4	C50	HRB400	12	4.4	69.0	7.321	0.964
B2-1L5	C50	HRB400	12	4.8	70.2	7.448	0.980
B2-1M3	C50	HRB400	12	7.5	68.2	7.236	0.953
B2-1M4	C50	HRB400	12	8.9	62.0	6.578	0.866
B2-1M5	C50	HRB400	12	9.4	63.1	6.695	0.881
B2-1H3	C50	HRB400	12	12.4	45.2	4.796	0.631
B2-1H4	C50	HRB400	12	13.6	30.2	3.204	0.422
B2-1H5	C50	HRB400	12	15.5	19.3	2.048	0.270
B2-2C	C50	HRB500E	14	0	92.5	8.412	1.000
B2-2L3	C50	HRB500E	14	2.2	100.5	9.140	1.087
B2-2L4	C50	HRB500E	14	4.3	95.8	8.713	1.036
B2-2L5	C50	HRB500E	14	5.7	77.7	7.066	0.840
B2-2M3	C50	HRB500E	14	6.7	67.4	6.130	0.729
B2-2M4	C50	HRB500E	14	8.1	52.0	4.729	0.562
B2-2M5	C50	HRB500E	14	7.8	59.6	5.420	0.644
B2-2H3	C50	HRB500E	14	11.7	33.0	3.001	0.357
B2-2H4	C50	HRB500E	14	12.9	35.6	3.238	0.385
B2-2H5	C50	HRB500E	14	14.6	19.4	1.764	0.210

面混凝土保留较清晰的钢筋肋痕迹, 肋间有少量挤压破碎的混凝土粉末(如图 12(b)所示). 混凝土强度等级 C40 的试件 B1-2L5 劈裂破坏时辊支附近混凝土局部压碎(如图 12(c)所示). 钢筋强度等级

HRB400 的试件 B2-1L3 钢筋拉断(如图 12(d)所示). 可知, 当锈蚀率较小时, 试件可能出现混凝土受压或钢筋受拉破坏. 试件 B1-1H4、B1-1H5 因锈胀裂缝过宽而损坏.



图 11 拉拔试件照片

Fig.11 Photo of pull out specimens

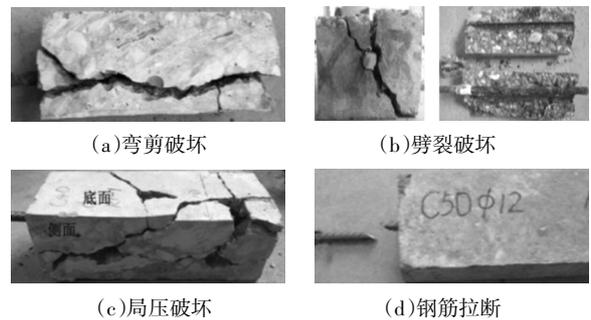


图 12 拉拔试验破坏形态

Fig.12 Failure model of pull out test

钢筋与混凝土的黏结强度  $\tau$  按式(4)计算.

$$\tau = \frac{N}{\pi dl}. \quad (4)$$

式中:  $N$  为钢筋所受拉力,  $N$ ;  $d$  为钢筋的直径,  $\text{mm}$ ;  $l$  为黏结长度,  $\text{mm}$ , 本次取 250  $\text{mm}$ .

相对黏结强度  $k_r$  为同系列试件中锈蚀试件与未锈蚀试件的黏结强度之比(如图 13 所示). 为简化计算, 不考虑锈蚀率较低时黏结力的提高. 通过回归分析得到  $k_r$  与锈蚀率之间的关系如式(5). 锈蚀率较低时  $k_r$  取 1.0, 使计算结果偏于安全.

$$k_r = \frac{\tau_N}{\tau_c} = \begin{cases} 1, & \eta \leq 2.6\%; \\ 1.13 - 0.05\eta, & \eta > 2.6\%. \end{cases} \quad (5)$$

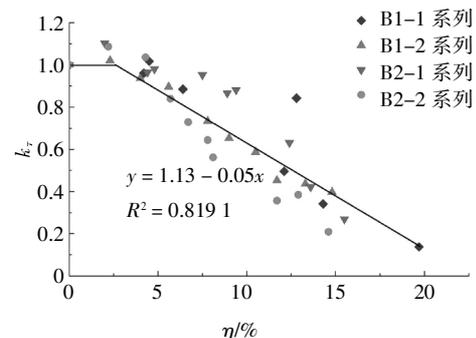


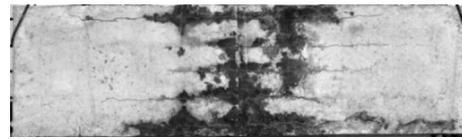
图 13 钢筋黏结强度与锈蚀率关系

Fig.13 Bonding strength variation with the corrosion ratio

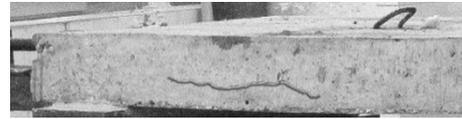
### 3 抗弯承载力试验结果

#### 3.1 试件锈蚀情况

足尺板试件裂缝多出现在板底部对应纵筋的位置,并沿纵向从试件跨中向两端开展(如图14所示)。足尺板侧向保护层厚度较大,但也有部分板侧面对应纵向钢筋位置处出现纵向裂缝(S1-1M、S1-2H、S2-2M、S2-2H)。锈胀裂缝情况详见图15(纵向)。钢筋锈蚀情况详见表6。



(a)板底锈胀开裂



(b)板侧锈胀开裂

图14 锈蚀板照片

Fig.14 Photos of corroded slabs

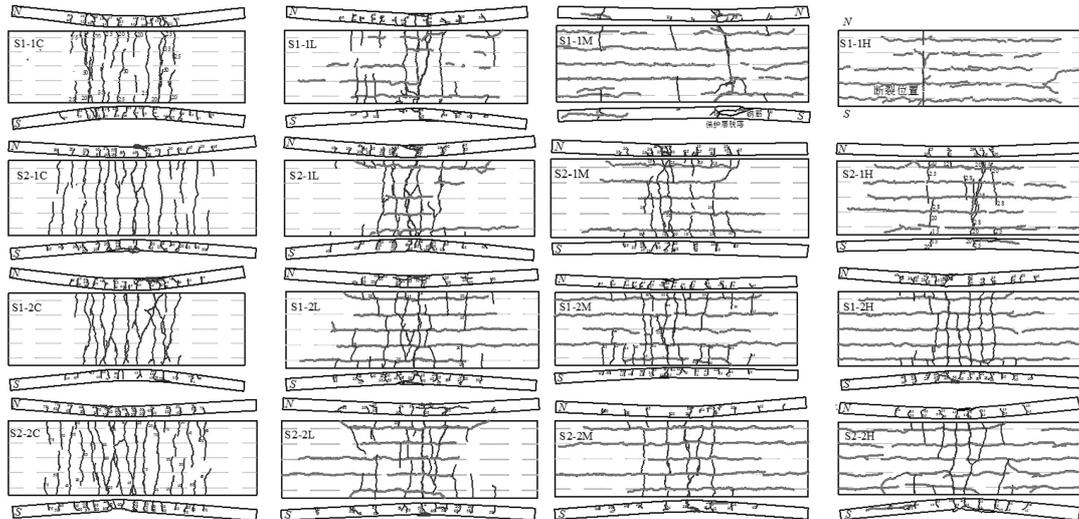


图15 试件锈胀裂缝及受弯破坏情况

Fig.15 Crack pattern of tested specimens

表6 板抗弯试验结果

Tab.6 Results of bending test

编号	受拉钢筋锈蚀率/%					平均锈 蚀率/%	开裂荷 载/kN	极限荷 载/kN	跨中挠 度/mm	$M_{u,exp}$ /(kN·m)	$k_M$	$k_D$	$M_{u,calc}$ /(kN·m)	$\frac{M_{u,calc}}{M_{u,exp}}$
	1	2	3	4	5									
S1-1C	0	0	0	0	0	0	14.0	58.86	68.66	20.60	1	1	16.47	0.799
S1-1L	6.43	5.12	5.38	5.74	7.99	6.13	18.0	41.70	61.40	14.60	0.709	0.894	15.28	1.044
S1-1M	15.98	14.92	15.50	16.56	18.29	16.25	14.0	28.50	27.08	9.98	0.484	0.394	10.75	1.077
S1-1H	15.90	17.58	20.13	25.83	23.10	20.50	—	9.40	3.51	3.29	0.160	0.051	4.00	1.216
S1-2C	0	0	0	0	0	0	15.0	81.80	106.61	28.63	1	1	24.44	0.854
S1-2L	5.99	5.04	5.38	5.46	6.98	5.77	16.0	68.50	70.14	23.98	0.838	0.658	23.08	0.962
S1-2M	9.05	9.30	8.26	9.39	10.20	9.24	15.0	60.50	72.97	21.18	0.740	0.685	22.05	1.041
S1-2H	17.07	13.46	10.30	13.62	16.55	14.20	15.0	52.38	56.28	18.33	0.640	0.528	20.00	1.091
S2-1C	0	0	0	0	0	0	18.0	61.57	71.93	21.55	1	1	16.61	0.771
S2-1L	7.60	5.25	4.31	4.52	7.36	5.80	12.0	46.47	45.01	16.26	0.755	0.626	15.31	0.943
S2-1M	12.39	9.70	8.89	8.94	11.79	10.34	16.0	39.60	32.53	13.86	0.643	0.452	14.40	1.039
S2-1H	20.10	12.68	13.55	14.54	19.58	16.09	14.0	29.50	23.42	10.33	0.479	0.326	10.23	0.990
S2-2C	0	0	0	0	0	0	16.0	85.48	78.29	29.92	1	1	26.43	0.883
S2-2L	7.43	6.59	5.59	6.80	6.84	6.65	15.0	71.38	74.89	24.98	0.835	0.957	22.82	0.914
S2-2M	13.63	10.30	9.37	10.40	11.62	12.27	14.0	62.54	61.59	21.89	0.732	0.787	21.51	0.983
S2-2H	12.03	12.81	13.32	17.15	21.23	15.30	14.0	54.87	52.77	19.20	0.642	0.674	17.80	0.927

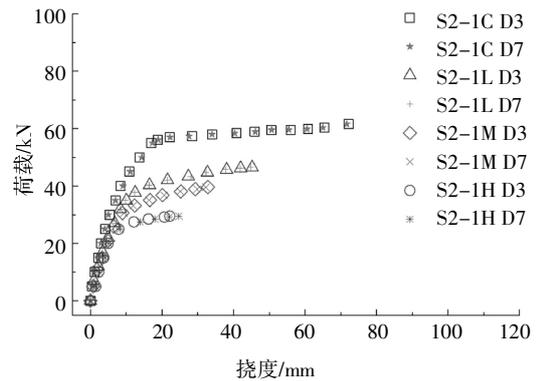
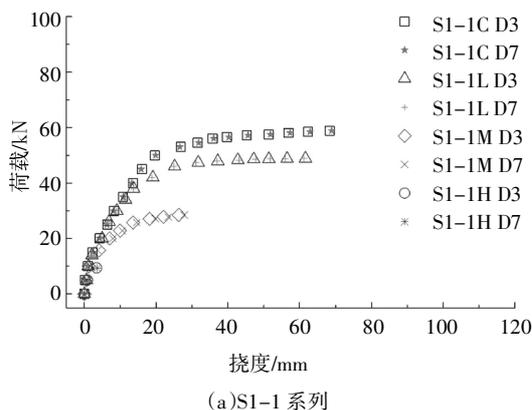
注:\*表示试件跨中挠度取图3中D3号点和D7号点的平均值。

### 3.2 抗弯破坏形态

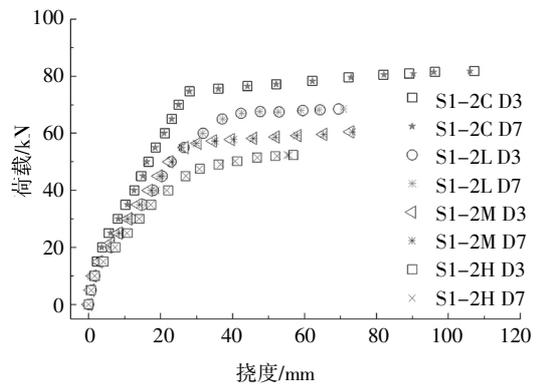
锈蚀钢筋混凝土板受弯的破坏模式以受压区混凝土压碎破坏为主,破坏过程仍分为 3 个阶段:整体工作阶段(弹性)、带裂缝工作阶段(塑性发展)、破坏阶段.对比图 15 中不同试件受力裂缝(横向)情况,未锈蚀钢筋混凝土板受弯破坏时,板底和板侧产生丰富的受弯裂缝;钢筋锈蚀构件破坏时,受弯裂缝数量减少.同系列试件,锈蚀率越高,试件破坏时产生的受力裂缝减少越明显.加载过程中,受弯裂缝开展会因既有锈胀裂缝而改变方向.随锈蚀率增大,板底受力裂缝开展趋于集中,或产生一条主裂缝.此情况在钢筋强度较低的 S1-1 和 S2-1 系列试件中更为明显.当锈蚀率过高时,由于板底出现横向发展的锈胀裂缝,如试件 S1-1M 和 S1-1H 受力裂缝与横向锈胀裂缝重合,其中试件 S1-1H 因锈蚀率过大,且板底横向锈胀裂缝开展充分,试件在加载初期就沿横向锈胀裂缝发生断裂.

### 3.3 试件荷载-挠度曲线

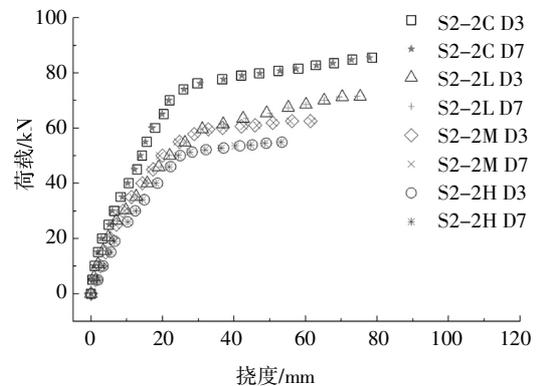
图 16 所示为试件 S、N 两侧跨中荷载-挠度曲线(D3,D7).同系列试件在加载初期的整体工作阶段,未锈蚀试件的荷载-挠度曲线斜率最大,试件曲线斜率随锈蚀率增大出现不同程度的减小;同系列试件中,未锈蚀试件的屈服阶段最明显,锈蚀试件的屈服过程明显变短.配置普通 HRB400 级钢筋的试件,当锈蚀率达到 15%左右时,基本无明显的屈服阶段;配置 HRB500E 级高强钢筋的试件,屈服阶段随锈蚀率增大而变短的幅度较小.试件 S1-1M 和 S2-1H 板侧的锈胀裂缝,在加载后期不断发展,且与受力裂缝相互影响,使板出现了轻微的扭转,表现为试件 D3 和 D7 处位移差略大.分析试验结果(表 6)可知,锈蚀率对试件的开裂荷载影响较小.试件抗弯承载力和跨中挠度值都随钢筋锈蚀率增大而减小.



(b)S2-1 系列



(c)S1-2 系列



(d)S2-2 系列

图 16 荷载-挠度曲线

Fig.16 Load-midspan deflection curves

### 3.4 锈蚀率对抗弯性能的影响

定义相对抗弯承载力  $k_M$  为同系列试件中锈蚀试件抗弯承载力与未锈蚀试件抗弯承载力之比(见表 6).通过回归分析可知,试件抗弯承载力随锈蚀率增大而呈线性减小(如图 17 所示).对比配置 HRB400 和 HRB500E 级钢筋试件的  $k_M$  曲线,前者的斜率较后者的大 44%.说明配置 HRB500E 级钢筋的试件,抗弯承载力随锈蚀率增大下降较缓慢,锈蚀后的剩余抗弯承载能力较强.

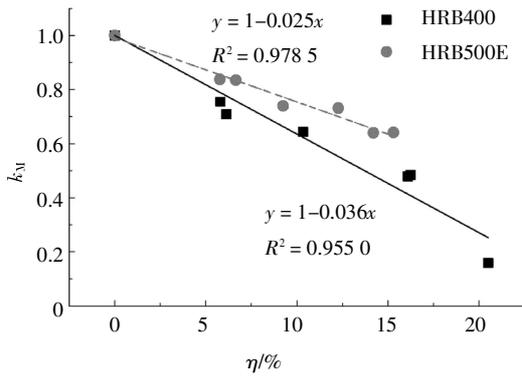


图 17 抗弯承载力与锈蚀率的关系

Fig.17 Flexural capacity variation with the corrosion ratio

钢筋混凝土足尺板刚度随锈蚀率增加而减小,表现为试件峰值荷载时的跨中挠度随钢筋锈蚀率增加而减小.定义相对跨中挠度  $k_D$  为同一系列试件中,锈蚀后试件的跨中挠度与未锈蚀试件的跨中挠度之比(见表6).试件跨中挠度值随锈蚀率增大的变化较为离散,但通过对挠度数据进行分析可知,锈蚀后抗弯试件的挠度变化基本符合线性减小的变化规律(如图18所示).对比配置HRB400和HRB500E级钢筋试件的  $k_D$  曲线,跨中挠度下曲线斜率分别为4.34%和2.6%,即随锈蚀率增大,前者跨中挠度下降率较后者快66.9%(如图18所示).配置HRB500E级钢筋的试件,跨中挠度随锈蚀率增大下降较为缓慢,锈蚀后的变形性能更好.

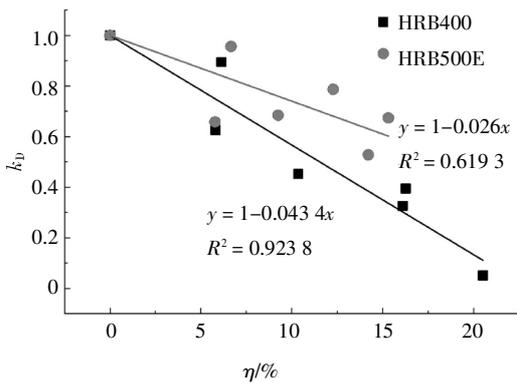


图 18 跨中挠度与锈蚀率的关系

Fig.18 Mid-span deflection variation with the corrosion ratio

### 3.5 混凝土应变

图19、图20分别是试件S2-2H混凝土的荷载-应变图和跨中截面混凝土的应变沿截面高度变化的情况.随锈蚀率增大,钢筋可能发生黏结滑移,但通过比较分析发现,钢筋屈服或发生黏结滑移破坏前,试件发生弯曲变形基本符合平截面假定.

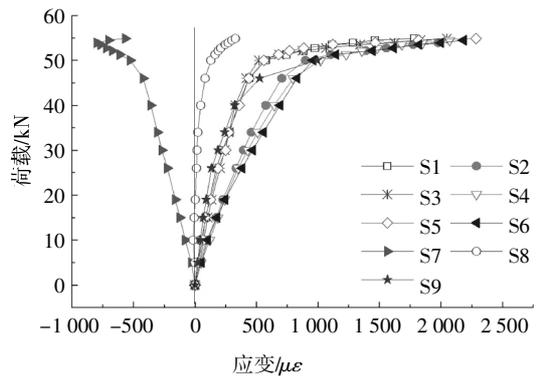


图 19 S2-2H 板混凝土应变

Fig.19 Strain of concrete in S2-2H

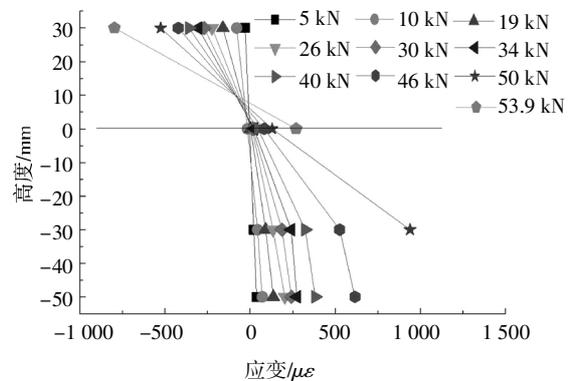


图 20 不同荷载下应变沿截面高度的分布

Fig.20 Strain distribution along height of cross sections under different loads

## 4 抗弯承载力计算

### 4.1 试件破坏模式

随着锈蚀增加,钢筋的(名义)屈服强度和钢筋与混凝土的黏结性能都会下降,试件受弯时可能出现钢筋受拉屈服或黏结滑移2种破坏情况:

$$\begin{cases} F_{y,c} \geq F_{\tau,c}, \text{黏结滑移破坏;} \\ F_{y,c} < F_{\tau,c}, \text{屈服破坏.} \end{cases} \quad (6)$$

$$F_{y,c} = f_{y,c} \frac{\pi d^2}{4}, \quad (7)$$

$$F_{\tau,c} = \bar{\tau}_c \pi d l_b. \quad (8)$$

式中:  $F_{y,c}$  为钢筋的屈服拉力, N;  $F_{\tau,c}$  为钢筋与混凝土的黏结力, N;  $f_{y,c}$  为受拉钢筋的屈服强度, MPa, 按式(2)计算;  $d$  为受拉钢筋的直径, mm, 取钢筋的公称直径;  $\bar{\tau}_c$  为受拉钢筋与混凝土的平均黏结强度, MPa, 按式(5)计算;  $l_b$  为受拉钢筋的计算黏结长度, mm.

### 4.2 承载力计算

经过试验验证, 锈蚀钢筋混凝土受弯构件仍基

本符合平截面假定. 考虑试件中受拉钢筋锈蚀不均匀, 抗弯承载力计算公式可写为:

$$M_{n,c} = \alpha_1 f_c b (h_0 - \frac{x}{2}), \quad (9)$$

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n F_{t,i}}{\alpha_1 f_c b}. \quad (10)$$

式中:  $M_{n,c}$  为试件的抗弯承载力,  $N \cdot mm$ ;  $\alpha_1$  为等效系数, 混凝土强度等级不高于 C50 时取 1.0;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度, MPa;  $b$  为试件截面宽度, mm;  $h_0$  为试件截面有效高度, mm;  $F_{t,i}$  为每根受拉钢筋提供的抗拉承载力, N, 取  $F_{y,c}$  和  $F_{r,c}$  中的较小值;  $n$  为受拉钢筋根数.

足尺板抗弯试验采用四点加载方式, 因此计算黏结长度  $l_b = 700$  mm. 试件承载力试验值与计算值的统计分析详见表 6, 所有试件抗弯承载力的计算值与试验值之比的平均值为 1.067, 标准差为 0.113. 其中锈蚀板抗弯承载力的计算值与试验值之比的平均值为 1.019, 标准差为 0.081, 说明计算值与试验结果吻合较好.

## 5 结 论

采用通电方式对配置高强钢筋和普通钢筋的混凝土板进行加速锈蚀; 通过锈蚀钢筋抗拉试验、锈蚀钢筋混凝土拉拔试验以及锈蚀钢筋混凝土板抗弯试验, 对比研究锈蚀对高强钢筋混凝土板抗弯性能的影响, 并根据试验结果对锈蚀板抗弯承载力进行了计算.

1) 通过锈蚀钢筋单向拉伸试验测得 HRB500E 级和 HRB400 级锈蚀钢筋的屈服强度、极限强度和伸长率均随锈蚀率增加呈线性减小.

2) 锈蚀 HRB500E 级和 HRB400 级钢筋半梁式拉拔试验结果表明: 当锈蚀率 < 2.6% 时, 可不考虑锈蚀对钢筋与混凝土黏结强度的增大影响; 锈蚀率 > 2.6% 时, 钢筋与混凝土黏结强度随锈蚀率增大而线性减小.

3) 配置 HRB500E 级和 HRB400 级钢筋的混凝土板, 锈蚀后抗弯性能变化规律基本一致, 即钢筋锈蚀率增大, 试件抗弯承载力和变形性能退化明显. 其中, 试件抗弯承载力和跨中挠度都随锈蚀率增大而线性减小. 且随锈蚀率增大, 配置 HRB400 级钢筋的试件, 承载力下降较快, 跨中挠度减小更显著; 而配置 HRB500E 级钢筋的试件, 钢筋锈蚀后的剩余抗弯

承载能力和变形性能都较强.

4) 考虑板内纵筋锈蚀程度不统一, 建立锈蚀钢筋混凝土板受弯破坏模式的判别方法, 再利用平衡关系, 计算锈蚀钢筋混凝土板抗弯承载力. 计算结果与试验结果吻合良好.

## 参考文献

- [1] 王来其, 刘文峰. 500 MPa 级钢筋混凝土结构的研究进展[J]. 青岛理工大学学报, 2012, 33(2): 26—30.  
WANG L Q, LIU W F. Research development on reinforced concrete structures with 500 MPa fine grained steel bars [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2012, 33(2): 26—30. (In Chinese)
- [2] APOSTOLOPOULOS C A. Mechanical behavior of corroded reinforcing steel bars S500s tempcore under low cycle fatigue [J]. Construction and Building Materials, 2006, 21(7): 1447—1456.
- [3] APOSTOLOPOULOS C A, PASIALIS V P. Use of quality indices in comparison of corroded technical steel bars B500c and S500s on their mechanical performance basis [J]. Construction and Building Materials, 2007, 22(12): 2325—2334.
- [4] SUMPTER M S. Behavior of high-performance steel as shear reinforcement for concrete beams [D]. Raleigh, NC: North Carolina State University, 2007: 145.
- [5] SUMPTER M S, RIZKALLA S H, ZIA P. Behavior of high-performance steel as shear reinforcement for concrete beams [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(2): 171—177.
- [6] 徐海滨. HRB500 钢筋预应力超高性能混凝土梁受力性能研究. [D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2015: 1—4.  
XU H B. Research on the performance of HRB500 bars reinforced prestressed ultra-high performance concrete beams [D]. Beijing: College of Architecture and Civil Engineering of BJUT, 2015: 1—4. (In Chinese)
- [7] 沈宇. HRB500 级钢筋混凝土板受弯性能的试验研究与有限元分析[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2007: 1—13.  
SHEN Y. Experiment and finite element analysis of reinforced concrete slabs with HRB500 steel bars [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2007: 1—13. (In Chinese)
- [8] 徐风波. HRB500 级钢筋混凝土梁正截面受力性能试验及理论研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2007: 1—12.  
XU F B. Experimental and theoretical research on flexural behavior of reinforced concrete beams with HRB500 bars [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2007: 1—12. (In Chinese)
- [9] 李琼. HRB500 级钢筋混凝土足尺梁裂缝宽度的试验与理论研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2009: 1—16.  
LI Q. Experimental and theoretical study on crack widths of full scale reinforced concrete beams with HRB500 bars [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2009: 1—16. (In Chinese)

- [10] 张艇. HRB500 级钢筋混凝土构件受力性能的试验研究[D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2004: 1—13.  
ZHANG T. Experimental study on the mechanical properties of HRB500 reinforced concrete members [D]. Zhengzhou: College of Civil Engineering, Zhengzhou University, 2004: 1—13. (In Chinese)
- [11] 江涛. HRB500 级钢筋混凝土框架结构静载试验研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2009: 1—11.  
JIANG T. The static experimental study of the HRB500 reinforced concrete frames [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2009: 1—11. (In Chinese)
- [12] 于秋波. HRB500 级钢筋部分预应力混凝土梁受力性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(4): 527—530  
YU Q B. Experimental study on flexural behavior of prestressed concrete beams using the HRB500 steel bars as nonprestressed reinforcement [J]. Building Structure, 2009, 39(4): 527—530. (In Chinese)
- [13] 王铁成, 李艳艳, 戎贤. 配置 500 MPa 钢筋的混凝土梁受弯性能试验 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2007, 40(5): 507—511.  
WANG T C, LI Y Y, RONG X. Test for bending behavior of reinforced concrete beam with 500 MPa steel bar [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2007, 40(5): 507—511. (In Chinese)
- [14] WANG T C, LIU X, ZHAO H L. Experimental research on seismic behavior of shaped columns reinforced with high-strength steel bars under cyclic loading [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19(4): 982—993.
- [15] 丰见政. HRB500 级钢筋混凝土适筋梁常温及高温后的力学性能试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学土木工程学院, 2017: 1—6.  
FENG J Z. The experimental study on the mechanical properties of HRB500 reinforced concrete beams at normal temperature and high temperature [D]. Qingdao: School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, 2017: 1—6. (In Chinese)
- [16] 金伟良, 袁迎曙, 卫军, 等. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 260—275  
JIN W L, YUAN Y S, WEI J, *et al.* Durability theory and design method of concrete structure under chloride environment [M]. Beijing: Science Press, 2011: 260—275. (In Chinese)
- [17] 徐庆元, 段俊, 肖祖材, 等. 桥上纵连板式无砟轨道 HRB500 钢筋概率 S-N 曲线研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2018, 45(3): 110—114.  
XU Q Y, DUAN J, XIAO Z C. Research on probabilistic S-N curve of HRB500 reinforcing bar of longitudinal connected slab track on bridge [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(3): 110—114. (In Chinese)

(上接第 83 页)

- [12] 王培军, 朱立, 王庆华, 等. 库侧卸料筒仓内物料流动及侧压力分布实验研究[J]. 中国粉体技术, 2016, 22(2): 1—6.  
WANG P J, ZHU L, WANG Q H, *et al.* Experimental studies on flow pattern and wall pressure distribution in wall discharged silo [J]. China Powder and Technology, 2016, 22(2): 1—6. (In Chinese)
- [13] 梁斌昌. 基于离散元的筒仓卸料模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学力学与土木工程学院, 2018: 43—70.  
LIANG B C. Study on silo discharges simulation base on DEM [D]. Xuzhou: School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, 2018: 43—70. (In Chinese)
- [14] 张逮见. 筒承式立筒群仓结构模型模拟地震振动台试验研究 [D]. 郑州: 河南工业大学土木建筑学院, 2010: 14—72.  
ZHANG L J. Study of shaking table tests on the model of cylindrical-supporting group silos structures [D]. Zhengzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, 2010: 14—72. (In Chinese)
- [15] 郭坤鹏. 筒仓贮料压力分布机制及地震易损性研究 [D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2016: 19—32.  
GUO K P. Lateral pressure distribution and seismic vulnerability assessment of circular reinforced concrete silo [D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2016: 19—32. (In Chinese)
- [16] 许启铿, 王录民, 丁永刚. 筒承式粮食立筒仓结构模态及地震反应分析[J]. 世界地震工程, 2015, 31(3): 55—61.  
XU Q K, WANG L M, DING Y G. Modal and earthquake response analysis of cylinder-supported grain silo structures [J]. World Earthquake Engineering, 2015, 31(3): 55—61. (In Chinese)
- [17] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010: 19—20.  
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Planning Press, 2010: 19—20. (In Chinese)
- [18] 王录民, 张昊, 张逮见, 等. 地震作用下立筒群仓贮料侧压力试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(2): 175—178.  
WANG L M, ZHANG H, ZHANG L J, *et al.* Experimental study on lateral pressures acting on the wall of a group of granular silos induced by earthquakes [J]. Sichuan Building Science, 2012, 38(2): 175—178. (In Chinese)
- [19] GB 50077—2017 钢筋混凝土筒仓设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017: 7—11.  
GB 50077—2017 Standard for design of reinforced concrete silos [J]. Beijing: China Planning Press, 2017: 7—11. (In Chinese)