

腐蚀钢筋再生混凝土板弯曲性能试验研究*

吴 瑾¹, 王东东¹, 吴方华²

(1 南京航空航天大学土木工程系, 南京 210016; 2 锦宸集团有限公司, 南京 210037)

[摘要] 通过 10 块不同钢筋腐蚀率、100% 再生骨料取代率的再生混凝土简支板静力试验, 研究腐蚀钢筋再生混凝土板破坏形态、承载力及跨中挠度。根据试验结果研究了再生混凝土板的承载力和挠度与钢筋腐蚀率的关系, 并提出了腐蚀钢筋再生混凝土板承载力计算公式。

[关键词] 腐蚀钢筋; 再生混凝土板; 破坏形态; 承载力; 挠度

中图分类号: TU375.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)01-0069-04

Experimental study on flexural performance of recycled concrete slabs with corroded reinforcing bars

Wu Jin¹, Wang Dongdong¹, Wu Fanghua²

(1 Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2 Jincheng Group Co., Ltd., Nanjing 210037, China)

Abstract: Based on the static experiments of 10 simple-supported recycled concrete slabs with different steel corrosion degree and 100% recycled aggregate, the failure mode, bearing capacity and mid-span deflection of recycled concrete slabs with corroded reinforcing bars were investigated. According to the results, the relationships between bearing capacity and deflection of recycled concrete slabs and steel corrosion degree were established. The calculation formula for bearing capacity of recycled concrete slabs with corroded reinforcing bars was put forward.

Keywords: corroded reinforcing bar; recycled concrete slab; failure mode; bearing capacity; deflection

0 引言

再生混凝土是指采用破碎后的废弃混凝土作为骨料制备得到的混凝土, 废弃混凝土破碎后得到的骨料称为再生骨料^[1]。随着社会经济的飞速发展, 使用再生混凝土可以有效地避免环境污染和资源浪费, 是建筑行业实现可持续发展的重要途径。钢筋混凝土受弯构件是混凝土结构构件中最基本而又最重要的构件, 深入研究再生混凝土受弯构件的基本性能对于再生混凝土在结构构件中的推广应用具有重要的意义。目前, 国内外对再生混凝土受弯构件性能已有研究^[1], 对腐蚀环境下混凝土受弯构件也有研究^[2-5], 但对腐蚀环境下再生混凝土受弯构件的研究未见报道。为了掌握再生混凝土板在不同钢筋腐蚀率下的受力性能, 得出腐蚀环境下再生混凝土板性能的退化规律, 为再生混凝土受弯构件耐久性设计和评估提供理论依据, 本文对腐蚀钢筋再生混凝土简支板进行了试验研究。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验中采用的再生混凝土粗骨料(RCA)由南京某旧水泥混凝土路面的废弃混凝土块破碎加工而成, 粒径范围为 5~31.5mm, 吸水率为 3.6%。细骨料为普通河砂, 细度模数为 2.51。水泥采用强度等

级为 42.5 的普通硅酸盐水泥。水为南京市日常用自来水。纵向受拉钢筋和分布钢筋均采用直径 8mm 的 HPB235 级圆钢筋。本试验再生混凝土设计强度为 C25, 其配合比如表 1 所示。各材料所占比例为: 水泥: 砂: 再生粗骨料: 水 = 1: 1.58: 2.58: 0.52。

再生混凝土配合比 表 1

设计强度 /MPa	水灰比 W/C	材料用量 /kg/m ³			
		再生粗骨料	砂子	水泥	水
25	0.52	1 038	636	402	208.4

1.2 构件设计与制作

本试验共设计了 10 块相同配筋率、相同混凝土抗压强度、不同钢筋腐蚀率、100% 再生骨料取代率的再生混凝土板, 其截面尺寸均为 80mm × 300mm × 2 400 mm, 受力主筋为 3 中 8, 分布筋为中 8 @ 240, 混凝土保护层厚度取 15mm。构件具体尺寸及详细配筋如图 1 所示。

为了较短时间内在实验室获得预定腐蚀率试件, 本次试验采用电解液加速腐蚀方法对再生混凝土板内的钢筋进行人工快速腐蚀, 以获得期望的目

* 国家自然科学基金项目(51279074)。

作者简介: 吴瑾, 博士, 教授, Email: wujin@nuaa.edu.cn。



图1 再生混凝土板配筋图

标腐蚀率。本次试验共设计9个目标腐蚀率试件,另外设计一个未腐蚀试件,作对比用。加速腐蚀试验使用直流稳压电源进行通电腐蚀,平均电流强度控制在2A(平均电流密度 $2.65\text{mA}/\text{cm}^2$)。根据法拉第定律,计算得到达到各目标腐蚀率所需要的通电时间。加速腐蚀完成后,将腐蚀钢筋从板中取出,经过酸洗、中和、烘干、称重,测得钢筋实际腐蚀率^[6]结果如表2所示。

再生混凝土板钢筋腐蚀率对比 表2

再生混凝土板编号	B1	B2	B3	B6	B7	B10	B4	B8	B5	B9
设计腐蚀率/%	0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0
实际腐蚀率/%	0	4.1	6.2	10.0	12.3	14.4	15.4	16.2	17.4	18.2

1.3 加载方案

本试验为简支板静载试验,两端支承长度各为150mm,板净跨为2100mm,采用两点对称加载,中部纯弯段长度为700mm。5个位移计分别置于板两端支座、跨中以及加载点处,用以测量两支座的沉降位移及跨中位置处的挠度。板跨中位置沿高度方向平均粘贴五个应变片,用以测量混凝土应变。加载及测量装置布置图如图2所示。

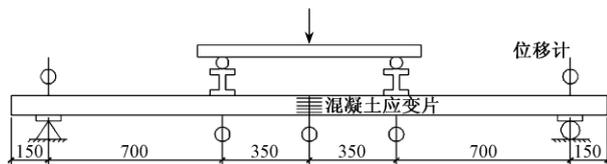


图2 加载装置示意图

2 试验结果分析

2.1 构件破坏形态

当腐蚀率较小时,如再生混凝土板B2和B3,大约在25%极限荷载时,板在纯弯段内开始出现首条裂缝,较之未锈蚀板B1,出现裂缝的荷载略有增加,但相差不大;当外荷载增加到极限承载力的50%左右时,多条裂缝相继出现,并随着外荷载的继续增加穿过形心轴沿板高不断向上延伸;当外荷载增加至极限承载力的60%~70%时,在剪弯段板腹部靠近形心轴的位置出现斜裂缝,此时纯弯段最大裂缝宽度已达到0.2mm左右;当外荷载进一步增加到约80%极限荷载时,纯弯段内的裂缝迅速变宽,宽度值约0.4~0.5mm;当荷载达到极限荷载时,纯弯段最大裂缝宽度达到1.5mm以上,跨中最大挠度达到42mm以上,此时板宣告破坏,破坏形态为适筋板弯

曲破坏,由于轻度的腐蚀增加了钢筋和混凝土之间的粘结,板极限承载力比未腐蚀板(B1)有所提高。

随着腐蚀率进一步增大,如再生混凝土板B6和B7,出现受力裂缝的荷载逐渐变小,垂直裂缝也变得稀少,间距增大,靠近支座处的斜裂缝逐渐与钢筋裂缝连接。当荷载达到极限承载力的80%时,和再生混凝土板B2和B3一样,纯弯段内的裂缝迅速变宽,跨中挠度也迅速增加,以致达到破坏,根据测量数据,相对再生混凝土板B1,再生混凝土板B6和B7的承载力出现下降。当腐蚀率继续进一步增大时,如再生混凝土板B10,B4和B8,破坏状态与B6,B7大体一致,钢筋屈服后,板跨中挠度迅速增加,很快达到破坏标准,相应的极限承载力继续下降。

当腐蚀率接近和达到本次试验的最大腐蚀率时,如再生混凝土板B5和B9,外荷载达到10%时就开始出现垂直裂缝,裂缝迅速延伸,而后与纵向裂缝很快相接;随着荷载的继续增大,板边缘部分混凝土已开始出现剥落现象,板抗弯刚度明显减弱,此时裂缝宽度也明显增大,钢筋屈服提前达到,由于钢筋的严重腐蚀导致了钢筋截面的较大损失以及钢筋与混凝土粘结的削弱,相比腐蚀率相对较低的再生混凝土板,再生混凝土板B5和B9的极限承载力明显下降。

综上所述,本试验设计的10块再生混凝土板均为弯曲破坏,在钢筋腐蚀率较小时,其受力裂缝与未腐蚀板的裂缝分布特征一致,腐蚀板的破坏形态与未腐蚀板也大致相同。此种破坏模式为适筋板破坏模式,破坏始于受拉区钢筋的屈服,随着裂缝的开展,中和轴上移,进而板挠度激增,当跨中挠度达到42mm以上时,根据板破坏的标准,板达到破坏,此类破坏具有明显的预兆。但随着钢筋腐蚀率的增加,锈胀裂缝增大,钢筋和混凝土之间的粘结性能开始出现退化,整个截面的有效面积也开始削弱,以致钢筋屈服后,混凝土板的挠度增加加快,试验板达到破坏的时间缩短,极限承载力显著下降。

2.2 板受弯承载力分析

2.2.1 截面应变分布

不同钢筋腐蚀率的再生混凝土板在纯弯段(跨中)位置处的截面应变分布如图3所示(注:由于试验仪器原因,未采集到板B6截面应变数据)。

由图3可知,在荷载作用下,再生混凝土板跨中截面应变能较好地符合平截面假定。

2.2.2 板承载力

参照《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)^[7]中承载力的确定方法,结合试验板的破坏形

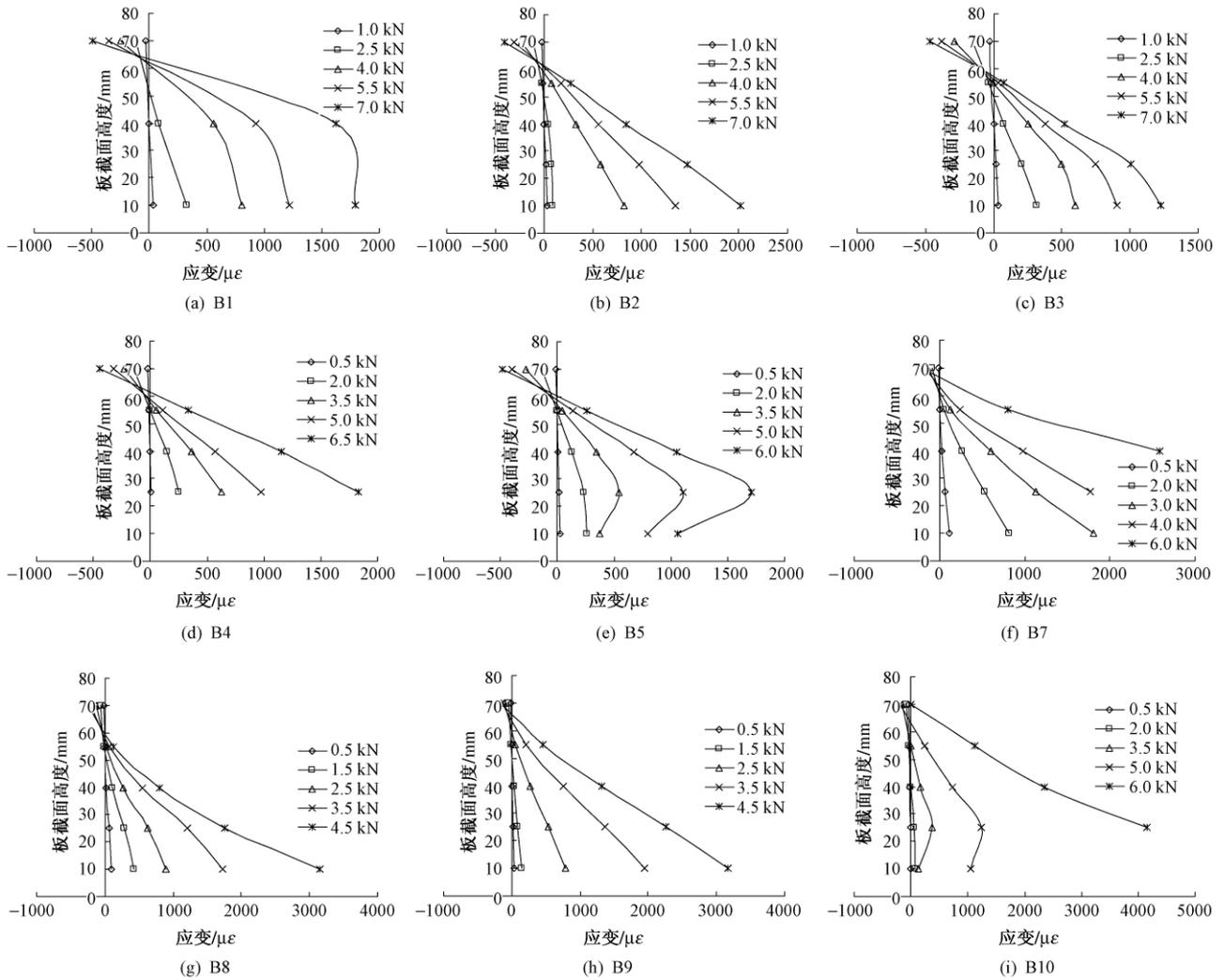


图 3 试件跨中截面应变分布图

态 取再生混凝土板中钢筋达到屈服时,再生混凝土板所承受的弯矩值 M 为极限承载力。由此得到再生混凝土板的极限承载力与钢筋锈蚀率的关系曲线,如图 4 所示。由图 4 可得,腐蚀环境下再生混凝土板承载力公式:

$$M = (-0.0008\lambda^2 + 0.0038\lambda + 0.8389)M_0$$

式中: M 为锈蚀钢筋再生混凝土板承载力; M_0 为未锈蚀再生混凝土板承载力(采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[8]中普通混凝土板的承载力计算公式进行计算); λ 为再生混凝土板的实测钢筋锈蚀率。

当钢筋锈蚀率较小(小于 6%)时,再生混凝土板的承载力较未腐蚀板有所提高,这是因为虽然腐蚀降低了钢筋的有效截面面积,但同时由于钢筋的微小腐蚀,使钢筋表面更加粗糙,反而增加了钢筋与再生混凝土的粘结性能,因此承载力在这一范围内反而有所提高。

随着钢筋的进一步腐蚀,钢筋截面的损失逐渐

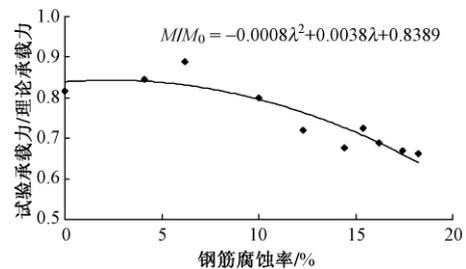


图 4 再生混凝土板承载力与钢筋锈蚀率关系

增大,钢筋表面也形成很多不均匀的锈坑,受力以后缺口处产生应力集中,使腐蚀钢筋的强度降低,加之在钢筋发生较大的腐蚀后,再生混凝土板在钢筋与混凝土的接触面上会生成疏松的锈层,导致再生混凝土保护层锈胀开裂甚至脱落,钢筋与混凝土之间的粘结性能也大大减弱,这些因素共同起作用,使得再生混凝土板的承载力开始下降,并且在钢筋锈蚀率达到 17% 左右时,再生混凝土板的承载力急剧下降。

2.3 板挠度

图 5 给出了所有构件实测的荷载-跨中挠度关系曲线(括号中为各板实际腐蚀率)。由图可见,裂缝出现前,曲线基本呈线性,随着荷载增加,裂缝不断出现,受拉区混凝土逐渐退出工作,截面刚度减小,挠度随弯矩增大加快,曲线逐渐与横轴平行。

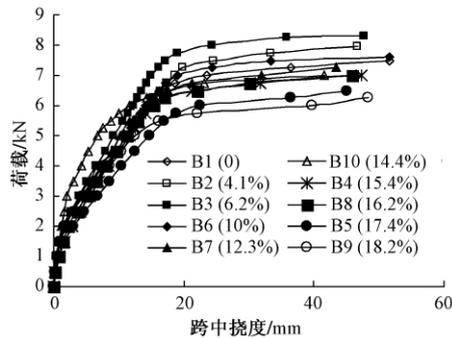


图 5 再生混凝土板荷载-跨中挠度关系曲线

在相同荷载水平下,随着钢筋腐蚀率的增加,再生混凝土板的抗弯刚度逐渐变小,挠度增大。由此可知,再生混凝土板的刚度因钢筋的腐蚀发生了一定的退化。影响普通混凝土板的短期刚度的因素主要是混凝土板的截面尺寸、截面所抵抗的弯矩标准值、纵向受拉钢筋的截面面积、混凝土抗拉强度、混凝土及钢筋的弹性模量等。由于本试验中各块板的截面尺寸、混凝土强度和配筋均相同,而再生混凝土抗拉强度、再生混凝土及钢筋的弹性模量一般认为在短期内不会发生变化,所以导致再生混凝土板刚度退化的主要原因之一是再生混凝土板和钢筋的有效截面面积减小,之二是钢筋与混凝土之间的粘结性能退化。

上述分析说明各板在钢筋腐蚀的情况下,其刚

度出现了一定程度的退化,当钢筋达到屈服后,各板的跨中挠度在一定范围内急剧增大,但荷载增大缓慢,甚至不变。由此可以得出,再生混凝土板在钢筋腐蚀的情况下,与未腐蚀板相比,延性退化很小。

3 结论

(1) 腐蚀钢筋再生混凝土板的破坏过程与普通混凝土板类似,且符合平截面假定。腐蚀钢筋再生混凝土板在钢筋屈服后表现出了很好的延性,与未腐蚀板相比,延性退化很小。

(2) 当钢筋腐蚀率较小(小于 6%)时,再生混凝土板承载力略有增加;当钢筋腐蚀率较大时,再生混凝土板承载力下降。本文根据试验结果回归了腐蚀环境下再生混凝土板承载力计算公式。

(3) 再生混凝土板发生钢筋腐蚀,出现锈胀裂缝后,其刚度会出现较大的损失,随着钢筋腐蚀率的增大,抗弯刚度下降。

参 考 文 献

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 刘冠国. 钢筋混凝土锈蚀构件性能试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [3] 卞汉兵. 海洋环境锈蚀钢筋混凝土板试验研究及理论分析[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [4] 李富民, 袁迎曙. 腐蚀钢绞线预应力混凝土梁的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 78-84.
- [5] 吕维波. 9 年期锈蚀钢筋混凝土板试验研究及分析[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [6] GB 10124—88 金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [7] GB 50152—92 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [8] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

(上接第 58 页)

(3) 通过对型钢混凝土 T 形柱抗剪机理的分析可知, 剪跨比、轴压比、配钢形式、翼缘尺寸等参数对型钢混凝土 T 形柱的抗剪强度有显著影响。剪跨比越大, 构件的抗剪承载力越小, 反之, 构件的抗剪承载力越大; 型钢混凝土 T 形柱的抗剪承载力随轴压比的增大而提高; 箍筋能够较好地约束型钢外围的混凝土, 使混凝土与型钢骨架协同工作, 明显延缓混凝土表面裂缝的产生; 翼缘部分通过对腹板的约束, 在一定程度上有利于提高 T 形柱的抗剪强度。

(4) 采用叠加法对型钢混凝土 T 形柱抗剪承载力进行计算, 其公式可用于其斜截面极限承载力计算。

参 考 文 献

- [1] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 徐亚丰, 刁晓征, 王鑫. 十字形实腹式钢骨混凝土异形柱非线性分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(7): 96-98.
- [3] CHENG-TZU, THOMAS HSU. Biaxial loaded I-shaped reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(12): 2576-2595.
- [4] 陈宗平, 薛建阳, 赵鸿铁, 等. 低周反复荷载作用下型钢混凝土异形柱的抗剪承载力分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7): 15-21.
- [5] 周建中. 钢筋混凝土不等肢 L 形截面异形柱正截面承载力的试验及理论研究[D]. 南宁: 广西大学, 2000.
- [6] 严孝钦. 异形柱纵筋最小配筋率和保护层厚度对矩形柱承载力影响[D]. 天津: 天津大学, 2000.
- [7] 胡飞鹏. 桁架式钢骨混凝土异形柱[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
- [8] JGJ 149—2006 混凝土异形柱结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.