

侵蚀与荷载耦合作用下砼梁承载力与延性试验

孙洋^{1,2},刁波¹,张笑¹,郑晓宁¹

(1. 北京航空航天大学 土木工程系,北京 100191, sunyang@ce.buaa.edu.cn;

2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室,广州 510640)

摘要:为探明冻融循环、氯离子侵蚀和硫酸根离子侵蚀与荷载的耦合作用对钢筋混凝土构件承载力和变形的影响,通过室内模拟试验,对持续荷载下侵蚀梁、无荷载下侵蚀梁以及无荷载无侵蚀梁的正截面剩余承载力、延性、破坏机理进行研究.结果表明:荷载与侵蚀环境共同作用加剧了梁的力学性能退化,且持载水平越高,承载力下降越多,延性降低幅度越大;在400次冻融循环过后,预加荷载为70% F_u 的混凝土梁的破坏形式由延性破坏转变到脆性破坏.对钢筋混凝土结构承载力和使用寿命进行预测时,应该考虑使用荷载和环境作用的共同影响.横向裂缝对混凝土梁剩余承载力存在影响,要特别关注腐蚀环境中带裂缝工作的高持载梁的耐久性.

关键词: 侵蚀环境;荷载;混凝土梁;承载力;延性;试验研究

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)12-1972-05

Experimental study on bearing capacity and ductility of reinforced concrete beam in multi-aggressive and loading coupling

SUN Yang^{1,2}, DIAO Bo¹, ZHANG Xiao¹, ZHENG Xiao-ning¹

(1. Department of Civil Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China, sunyang@ce.buaa.edu.cn;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A simulative experiment was carried out for researching the influence of freeze-thaw cycles, chloride penetration, sulfate penetration and loading on the bearing capacity and deformation of the reinforcement members. The residual bearing capacity of normal section of bond strength, ductility and failure mechanism of loading-erosion beams, unloading-erosion beams and unloading-non-erosion beams was were discussed. The experimental results show that the coupling effect of loading and aggressive environment accelerate the degradation of mechanical properties and ductility of beams, and the higher the loading, the more the degradation. The failure forms of reinforcement concrete beam changes from ductile failure to brittle failure under the condition of 70% F_u loading. When to predict the bearing capacity and service life of reinforcement structure, the coupling effect of loading and aggressive environment should be concerned. The experimental results also show that the transverse crack is an influential factor for residual bearing capacity, so the durability of beams with transverse cracks and heavy load under the aggressive environment should be paid more attention.

Key words: aggressive environment; loading; reinforced concrete beam; bearing capacity; experimental study

目前对于混凝土构件耐久性的试验研究主要

集中在锈蚀钢筋混凝土梁在三分点加载作用下的受力情况和失效模式上^[1-9]. 囿于客观条件,多数研究基于一般假设,如钢筋锈蚀过程先于施加试验荷载,忽略了混凝土的力学性能劣化等因素.而在实际工程中,构件的腐蚀是在结构承受荷载的过程中发生的;混凝土不仅本身力学性能退化严重,还会令其对钢筋的保护作用大大降低,加速钢

收稿日期: 2009-02-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50778010);北京市自然科学基金资助项目(8092020);亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金(2009KA03).

作者简介: 孙洋(1982—),男,博士研究生;

刁波(1958—),女,教授,博士生导师.

筋锈蚀^[10];同时粘结性能的退化导致钢筋的塑性性能难以充分发挥,降低结构延性^[5].因此在研究钢筋混凝土构件耐久性退化规律,以及进行结构使用寿命预测时,应该同时考虑使用荷载与环境作用的共同影响,并将混凝土耐久性对结构承载力与使用寿命的影响充分考虑.本文试验模拟了冻融循环、混合溶液侵蚀与外荷载的耦合作用,在承载力分析时同时考虑混凝土、钢筋材性劣化,钢筋锈蚀,以及混凝土与钢筋的粘结强度退化的影响,以期得到更接近构件实际运行情况的结论.

1 试 验

1.1 构件设计

采用 5 组共 10 根矩形截面梁,试件的截面尺寸 $b \times h = 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,跨度 $l = 700 \text{ mm}$.纵筋和箍筋均采用直径为 6 mm 的 HRB235 级钢筋.混凝土采用商品混凝土,掺加了缓凝高效减水剂和 F 类 I 级粉煤灰;水、胶质量比为 0.44.具体配比见表 1.

表 1 混凝土配合比

掺料	水泥	水	砂	石	外加剂	粉煤灰
掺量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	323	175	771	1 066	7.4	75

1.2 试验步骤

1)对梁预加弯曲荷载.梁养护完成后,将其分为 5 组,其中 1 组为原型梁(梁-参考),不经侵蚀和冻融循环试验,仅通过三分点静载试验,获取未经腐蚀梁的正截面极限承载力,作为基准值.其余 4 组采用自行设计的加载装置(见图 1)对其预加不同水平的荷载:第 1 组不加载(梁-0),第 2 组加载至梁刚刚出现裂缝(梁-0.2),第 3、4 组分别施加原型梁极限荷载的 50%(梁-0.5)和 70%(梁-0.7).

2)受荷梁在侵蚀溶液中的冻融试验.将加载后的 4 组梁(梁-0/0.2/0.5/0.7)放入冻融箱进行冻融试验,试验参照文献[11]中的“快冻法”进行,每个冻融循环周期为 4 h,控制试件中心温度分别在 $(-17 \pm 2)^\circ\text{C}$ 和 $(8 \pm 2)^\circ\text{C}$,冻融循环次数为 400.侵蚀性溶液为质量分数为 3% 的氯化钠和 5% 硫酸钠组成的混合溶液.每冻融循环 50 次测量记录裂缝高度、宽度数值,观察梁体表观状态并记录.

3)冻融循环后进行梁的两点静载试验,加载点与支座位置同试验步骤 1),以获取其正截面剩余承载力.

1.3 试验现象

随着冻融循环试验的进行,各组梁的表观形态不断发生变化.当冻融循环完成 100 次后,各组梁表面生成细裂纹,渐有混凝土呈片状脱落.当冻融循环完成 200 次后,梁表面不再光滑,渐有颗粒脱落,边、角处脱落较快,初始横向裂缝变宽、延伸;梁-0.5/0.7 两组梁有新的横向裂缝出现.250 次冻融循环后,梁-0.7 出现纵向锈胀裂缝,宽 0.05 mm.当冻融循环完成 300 次后,各组梁表面微裂缝、脱落遍体遗散,横向裂缝继续变宽、延伸.350 次冻融循环后,梁-0.5 出现纵向锈胀裂缝,宽 0.05 mm;梁-0.7 纵向锈胀裂缝宽度 0.08 mm.当冻融循环完成 400 次后,梁表面混凝土变得比较疏松,轻轻拨动即可剥落,大面积骨料露出.梁-0.5 纵向锈胀裂缝宽度 0.07 mm;梁-0.7 纵向锈胀裂缝宽度 0.10 mm.

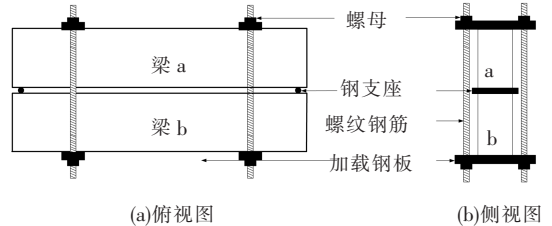


图 1 持续荷载加载示意图

各组梁在静载试验时的破坏程度和类型不尽相同.

梁-参考:未经冻融,呈现典型的适筋梁弯曲破坏特征.

梁-0:经过 400 次冻融循环但未施加持续荷载,开裂荷载与原型梁基本相同,破坏过程与参考组梁相似,极限荷载相近.

梁-0.2/0.5:梁纯弯段受拉区混凝土已经出现弯曲裂缝,而且冻融循环过程中裂缝不断延伸.静力加载试验过程中,随着荷载增加,原有裂缝基本没有变化,加载全过程都没有新的裂缝产生.当加载至极限荷载的 80% 左右时,钢筋屈服,某条裂缝突然加宽,并向上发展,最终受压区混凝土被压碎,梁发生延性破坏.

梁-0.7:梁的破坏表现为弯曲破坏伴随着粘结破坏.破坏始于纵向钢筋界面的粘结失效;接近极限荷载时,原有的某处裂缝突然变宽延伸而破坏.此时梁破坏更加突然,出现纵向钢筋被拉断的脆性破坏.

2 结果与分析

2.1 腐蚀梁的剩余承载力

经历了冻融与侵蚀之后的静载试验的结果称

为剩余承载力.表2给出了静力试验结果,分析可知,相对于参考梁的承载力,在经过混合侵蚀溶液侵蚀以及400次冻融循环之后,其余4组混凝土梁的承载力有不同程度的下降.其中未预加荷载的梁-0承载力下降不多,下降4.7%.预加荷载水平越高,剩余承载力降低越多,其中梁-0.7的剩余承载力下降最多,下降29%.这种差异是钢筋锈蚀程度与混凝土损伤程度不同的直接反映.

一方面是持续荷载作用对混凝土梁剩余承载力的影响.分析认为在冻融循环试验过程中,预加荷载对混凝土梁的持续作用加速了混凝土中钢筋锈蚀速度与混凝土的损伤,原因是预加荷载使得受拉区混凝土出现横向宏观裂缝,且在冻融试验过程中保持张开;预加荷载打破了骨料界面与水泥浆体的原始状态,形成初始损伤,硫酸盐侵蚀产物(钙矾

石和石膏)的膨胀作用又加剧了这一情形,造成混凝土更加疏松,力学性能下降;受拉区混凝土在拉力作用下密实性降低.以上三点削弱了混凝土的抗渗性,从而加快钢筋锈蚀速度,荷载愈大,锈蚀愈快.而钢筋锈蚀对受弯构件承载力的影响体现在3个方面:钢筋截面面积减小;钢筋屈服强度降低;钢筋与混凝土之间粘结性能的退化.当锈蚀量较小时,尽管粘结性能产生了退化,但还能够在钢筋和混凝土之间建立起足够的粘结应力^[12],使钢筋的强度得到充分的发挥.此时,梁承载力的下降主要取决于钢筋强度的下降.当锈蚀量较大时,粘结性能的退化已不能在钢筋与混凝土之间建立起足够的粘结应力,钢筋的强度不能得到充分的发挥,梁的承载能力下降主要受粘结性能的影响,而钢筋强度的退化不起控制作用^[3].

表2 静载试验结果

编号	屈服荷载/kN		极限荷载/kN		δ_y/mm		δ_u/mm		破坏形式	
	梁 a	梁 b	梁 a	梁 b	梁 a	梁 b	梁 a	梁 b	梁 a	梁 b
梁-参考	50.2	49.9	63.4	62.1	7.98	8.20	17.57	18.80	延性	延性
梁-0	46.7	48.5	60.8	58.8	8.55	7.99	16.38	16.45	延性	延性
梁-0.2	44.8	44.9	53.3	52.2	7.4	7.35	13.81	14.80	延性	延性
梁-0.5	42.7	43.0	49.6	48.4	8.24	8.35	14.01	15.33	延性	延性
梁-0.7	40.9	41.2	43.7	45.0	10.01	10.56	11.59	12.09	脆性	脆性

注: δ_y 为屈服荷载对应的跨中挠度, δ_u 为极限荷载对应的跨中挠度.

另一方面是横向裂缝对混凝土梁剩余承载力的影响.对于钢筋混凝土结构来说,裂缝数量及其宽度对钢筋锈蚀都有影响.首先,裂缝加快了氯离子的渗透,进而加快了腐蚀的发生,即腐蚀开始时间提前.其次,随着预加载水平的提高与冻融循环的进行,梁的初始横向裂缝的高度、宽度以及数量都在增加,为硫酸根离子和水的渗透提供了通路,加速了混凝土的劣化.混凝土内部疏松及微裂缝的增加,降低了保护层的质量,使得氧气及水分的供给量增多,又加快了钢筋锈蚀速度.试验结束后将钢筋凿出观察,裂缝处的钢筋锈蚀更为严重.这种不均匀的锈蚀容易产生应力集中,是梁发生脆性破坏的隐患.

综上,预加荷载与侵蚀性离子、冻融循环的耦合作用加剧了混凝土保护层损伤与钢筋锈蚀;因预加荷载产生的梁体横向裂缝在试验过程中不断延伸、开展、增多,加剧了侵蚀性离子、氧气与水分的渗透,进而使钢筋锈蚀的开始时间提前,钢筋锈蚀程度加剧.预加荷载水平越高,这种加剧作用越大,最终混凝土梁的剩余承载力下降就越大.

2.2 混凝土应变

试验测定了5组梁的跨中延应变片长度上的

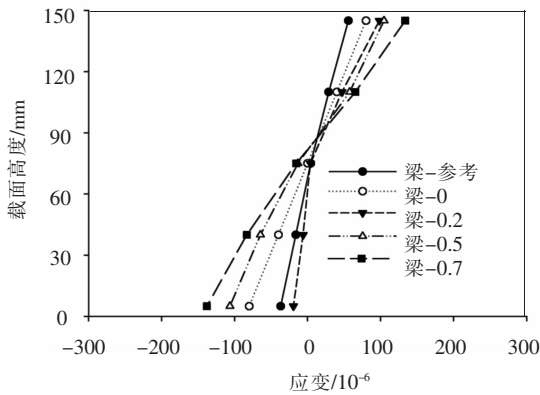
混凝土平均应变(应变片断裂后以受拉钢筋应变代替).限于篇幅只列出在开裂、屈服和极限荷载下的情况(见图2).观察发现:在开裂荷载下,跨中截面受拉、压区应变呈现很好的线性关系,完全符合平截面假定.随着荷载增加,截面受压区混凝土还能很好地符合线性分布,可以认为基本符合平截面假定.其中原型梁(梁-参考)与不受荷载梁(梁-0)对比,二者差别不明显.而将受荷载梁(梁-0.2/0.5/0.7)与原型梁对比,发现受荷载梁的截面中轴高度在较低的荷载水平之下就开始发生变化,这主要是因为受荷载梁在冻融循环过程中已经有了初始裂缝,卸荷后裂缝闭合,在静载作用下只需很小的荷载就再次张开,引起应力重新分布,加速了裂缝的开展和梁整体的破坏.

2.3 腐蚀梁的延性

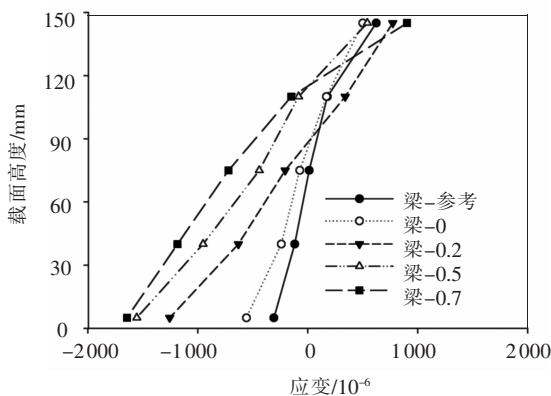
5组混凝土梁的荷载-挠度曲线见图3.观察可知,在混合侵蚀环境下,经过400次冻融循环,梁的延性都有不同程度的下降;且预加载水平越高,延性下降越多,特别是预加载梁-0.7的破坏形式从延性破坏变为脆性破坏.分析认为梁的延性性能与粘结性能、钢筋的塑性性能发展有密切的关系.在钢筋锈蚀率较小情况下,钢筋能充分发

挥强度,粘结性能的退化不多甚至还有小幅提高,这对钢筋塑性性能的发挥和结构的延性的影响不大,如梁-0 相比梁-0.2/0.5/0.7,钢筋锈蚀率不大,粘结性能退化不明显.一旦锈蚀率增大,钢筋屈服比增大,塑性性能下降^[5];加之粘结性能的退化导致钢筋塑性性能不能发挥,结构的延性也就得不到充分发挥,甚至完全丧失.

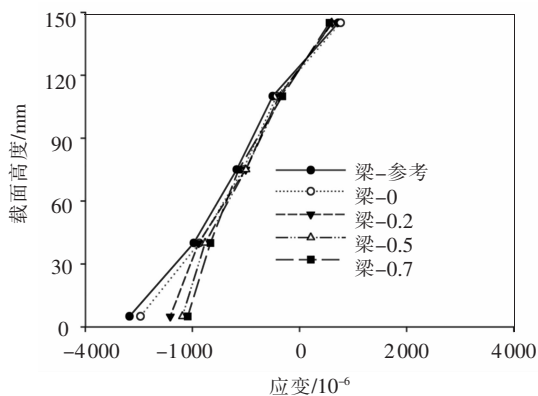
屈服荷载的挠度之比 Δ_u / Δ_y ,即延性系数也随着预加荷载水平的提高而明显降低.由此可以判断,如果配筋满足适筋破坏要求,钢筋屈服强度、混凝土强度等级等因素对截面屈服曲率的影响不大,即构件的屈服状态类似.但上述因素对截面极限曲率的影响很大,即关系到构件的破坏形态(截面延性比的大小).



(a)开裂荷载



(b)屈服荷载



(c)极限荷载

图 2 5 组梁跨中截面混凝土应变

2.4 腐蚀梁的跨中挠度

图 4 对比了屈服荷载和极限荷载对应的跨中挠度,观察可知,梁屈服荷载对应的挠度从总体趋势上看略有增加.但计算发现,相应于极限荷载和

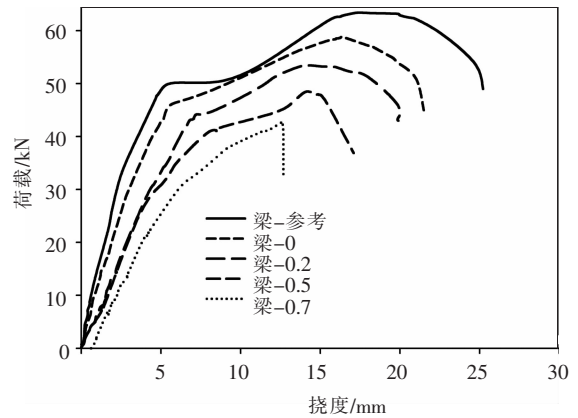


图 3 5 组梁的荷载-挠度曲线

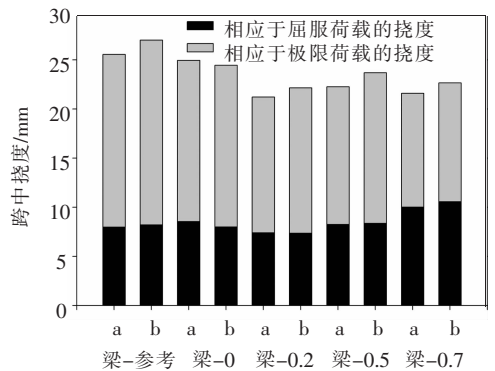


图 4 屈服荷载与极限荷载下 5 组梁的跨中挠度

3 结 论

1)综合考虑混合侵蚀环境、荷载、冻融循环三者的耦合作用对混凝土梁正截面承载力的影响.在混合侵蚀与冻融环境下,混凝土梁的正截面承载力会降低,较不受荷载作用时下降 4.7%;持续荷载下的混凝土梁劣化更加严重,正截面承载力下降 16%~29%,荷载水平越高,承载力下降越多.

2)随着预加荷载水平的提高,混凝土梁的延性降低.随着预加荷载水平的提高,混凝土梁的受弯破坏形式会发生变化.在 400 次冻融循环过后,预加荷载为 70% F_u (梁-0.7)的混凝土梁的破坏形式由适筋延性破坏转变到脆性破坏.

3)横向裂缝对梁的剩余承载力有一定的影响,会加速混凝土保护层质量的劣化,进而加速构

件劣化. 因此对有较高持续荷载作用和有较大裂缝存在的梁, 如果处在腐蚀环境下有着极大的安全隐患, 有可能发生钢筋突然断裂的脆性破坏, 这对结构的安全性是非常不利的.

参考文献:

- [1] RODRIGUEZ J, ORTEGA L M, CASAL J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement[J]. *Construction and Building Materials*, 1997, 11(4): 239 - 248.
- [2] PRITPAL S, MANGAT, MAHMOUD S, *et al.* Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement [J]. *ACI Structural Journal*, 1999, 96(1): 149 - 158.
- [3] 袁迎曙, 余索. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化 [J]. *建筑结构学报*, 1997, 18(4): 51 - 57.
- [4] 何世钦, 贡金鑫. 负载钢筋混凝土梁钢筋锈蚀及使用性能试验研究[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2004, 34(4): 474 - 479.
- [5] 金伟良, 陈驹, 吴金海, 等. 海洋环境侵蚀作用下混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2004, 38(5): 603 - 609.
- [6] STANISH K, HOOTON R D, PANTAZOPOULOU S D. Corrosion effects on bond strength in reinforced concrete

- [J]. *ACI Structural Journal*, 1999, 96(2): 915 - 922.
- [7] TONES-ACOTA A A, MARTINGEZ-MADRID M. Residual life of corroding reinforced concrete structures in marine environment [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15(4): 344 - 353.
- [8] CORONELLI D, GAMBAROVA P. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams; modeling guidelines [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(8): 1214 - 1224.
- [9] VU K A T, STEWART M G, MULLARD J A. Corrosion-induced cracking: experimental data and predictive models [J]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(5): 719 - 726.
- [10] 张平生. 混凝土状况对钢筋锈蚀的影响及原因 [J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 1998, 30(1): 5 - 8.
- [11] GBJ 82—85. 普通混凝土长期性能和耐久性试验方法 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1985.
- [12] 何世钦, 贡金鑫. 钢筋混凝土梁中锈蚀钢筋粘结性能的试验研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(12): 2167 - 2170.

(编辑 魏希柱)

(上接第 1869 页)

2) 当正向偏心距达 8 mm 后, 所有构件均发生畸变与整体弯曲的相关屈曲模式. 对卷边弯起角度 $\theta \leq 90^\circ$ 的槽钢构件, 畸变屈曲降低了构件的极限承载力, 并导致在相同的正向偏心荷载作用下, 先出现畸变屈曲的构件承载力明显低于后出现畸变屈曲的构件承载力. 在偏心荷载作用下, 卷边弯角为钝角的各构件承载力之间的差别很小.

参考文献:

- [1] HANCOCK G J, MURRAY T M, ELLIFRITT D S. Cold-formed steel structures to the AISI specification [M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 2001.
- [2] NAS 2004. North American specification for the design of cold-formed steel structural members [S]. Washington D C: American Iron and Steel Institute, Canadian Standards Association, 2004.
- [3] AS/NZS 4600:1996. Cold-formed steel structures [S]. Sydney: Standards Australia, 1996.
- [4] YOUNG B. Design of channel columns with inclined edge stiffeners [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60(2): 183 - 197.
- [5] YOUNG B, HANCOCK G J. Compression tests of channels with inclined simple edge stiffeners [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(10): 1403 - 1411.
- [6] 陈骥. 冷弯薄壁槽钢斜卷边对截面畸变屈曲的影响

和构件的稳定承载力 [C] // 中国钢协结构稳定与疲劳分会 2004 年学术交流会. 太原: 太原理工大学, 2004: 76 - 87.

- [7] 王春刚, 张耀春. 直接强度法计算冷弯薄壁斜卷边槽钢轴压柱的承载力 [J]. *工业建筑*, 2006, 36(1): 71 - 74.
- [8] 王春刚, 张耀春. 冷弯薄壁斜卷边槽钢轴压构件的稳定性能分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(12): 14 - 19.
- [9] 王春刚, 张耀春, 张壮南. 冷弯薄壁斜卷边槽钢受压构件的承载力试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2006, 27(3): 1 - 9.
- [10] ZHANG Yaochun, WANG Chungang, ZHANG Zhuangnan. Tests and finite element analysis of pin-ended channel columns with inclined simple edge stiffeners [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63(3): 383 - 395.
- [11] DUBINA D, UNGUREANY V. Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members [J]. *Thin-Walled Structures*, 2002, 40(3): 239 - 262.
- [12] YOUNG B, RASMUSSEN K J R. Shift of effective centroid of channel columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(3): 289 - 299.
- [13] RUSCH A, LINDNER J. Remarks to the direct strength method [J]. *Thin-Walled Structures*, 2001, 39(9): 807 - 820.

(编辑 魏希柱)