

文章编号:1673-2049(2007)01-0047-05

圆孔蜂窝梁的力学性能

吴 迪,武 岳

(哈尔滨工业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:为了进一步推广蜂窝梁在实际中的应用,针对中国结构设计规范尚未对此结构作出规定的现状,通过 ANSYS 有限元分析软件,采用板壳元建立不同参数的圆孔蜂窝梁计算模型,对圆孔蜂窝梁的静力性能进行研究,探讨了跨度、开孔率、孔间距等参数对梁强度、刚度和稳定性能的影响,并将计算结果与相同截面的实腹式构件对比,给出了较为简化的实用设计公式,为圆孔蜂窝梁的进一步研究与应用提供了参考。

关键词:圆孔蜂窝梁;强度;刚度;稳定性;力学性能

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A

Mechanical Properties of Circular-hole Castellated Beams

WU Di, WU Yue

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to promote the application of circular-hole castellated beams in practice, aiming at current situation that China relative code doesn't present the structure, using ANSYS finite element analysis software to build up castellated beam calculation modles with different parameters, some typical circular-hole castellated beams were studied in order to analyze the influences of some crucial parameters, such as span, pore ratio and interval of holes on the strength, rigidity and overall stability of simply supported castellated beams. The results were compared with those of beams without holes and a simplified method were put forward for castellated beams design in engineering practice, which could contribute to the further analysis and application.

Key words: circular-hole castellated beam; strength; rigidity; stability; mechanical property

0 引 言

蜂窝梁是指在实腹式钢构件(如 H 型钢)的腹板上有规律地开一系列孔洞而形成的变截面构件。按照开孔形式的不同,可分为四边形孔、六边形孔、八边形孔和圆孔、椭圆形孔的蜂窝梁等。与实腹梁^[1-7]相比,蜂窝梁可节约钢材 25%~30%,节省油漆和运输安装费用 1/6~1/3^[8],且美观大方,还能

为管道设备的安装提供通过空间,因而具有较为广

阔的应用前景。
国外以往主要是对六边形孔蜂窝梁的试验和理论计算进行研究,部分国家已将相关研究成果纳入规范,而对圆孔蜂窝梁的研究较少。由于圆孔蜂窝梁能避免六边形孔蜂窝梁在孔角上的应力集中,受力性能更合理且造型优美,因此,近年来在各国得到了推广。中国也在一些工程中运用了圆孔蜂窝梁,如北京国际机场、广州火车站等。根据文献[9],同型号工字钢制作的圆孔蜂窝梁和六边形孔蜂窝梁,

收稿日期:2007-01-22

基金项目:国家自然科学基金项目(50478028)

作者简介:吴 迪(1982-),男,山东济南人,工学硕士研究生,E-mail:forseti2001@163.com。

前者承载力比后者高 10%~15%;但从工程设计的角度看,中国规范一直没有明确蜂窝梁的计算方法,这在一定程度上限制了蜂窝梁的推广^[10-12]。

笔者采用 ANSYS 有限元分析软件,对圆孔蜂窝梁的静力性能进行研究,探讨了跨度、开孔率、孔间距等参数对梁强度、刚度和稳定性能的影响,并将计算结果与相同截面的实腹式构件对比,给出了较为简化的实用设计公式。

1 有限元建模

圆孔蜂窝梁的构造如图 1 所示。在蜂窝梁的空腹部分由上翼缘或下翼缘与部分腹板所组成的 T 型截面部分称为梁桥;蜂窝梁的实腹部分称为梁墩。

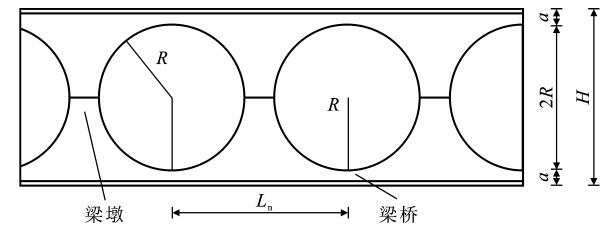


图 1 圆孔蜂窝梁
Fig. 1 Circular-hole Castellated Beam

本文中采用 ANSYS 软件进行有限元分析。采用 4 节点壳单元 Shell181 进行网格划分,孔洞周围作加密处理(图 2)。为突出孔洞构造对蜂窝梁受力性能的影响,分析中忽略焊缝和焊接残余应力的影响。

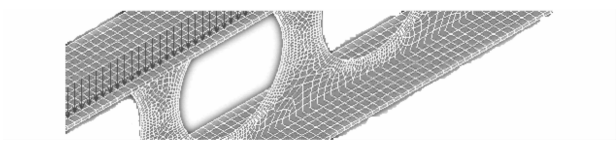


图 2 蜂窝梁有限元模型
Fig. 2 Finite Element Model of Castellated Beam

本文中以圆孔形简支钢梁为分析对象,试件截面尺寸和特性见表 1。根据工程常用情况,分别考虑了 4 种跨度、7 种开孔率和 6 种孔间距的情况,即跨度 L 分别为 9、12、15、18 m;开孔率 $2R/H$ 分别为 50%、55%、60%、65%、70%、75%、80%;孔间距 L_n 分别为 $1.0H$ 、 $1.2H$ 、 $1.4H$ 、 $1.6H$ 、 $1.8H$ 、 $2.0H$ 。因材料本构为理想弹塑性体,所以钢材的屈服强度取为 235 MPa,泊松比取 $\nu=0.3$ 。

边界支承条件采用典型的夹支支座,即梁的一端为固定铰支座,另一端为滑动支座(图 3)。固定铰支座通过约束梁腹板、下翼缘和上翼缘的 y 方向和 z 方向线位移及腹板和下翼缘相交点的 x 方向线位移来实现约束;滑动铰支座端只是不约束 x 方向

线位移,其他约束情况同固定铰支座。采用均布荷载折算成节点集中荷载的加载方式,如图 3 所示。

表 1 试件参数

Tab. 1 Specimen Parameters

试件 编号	截面尺寸/mm				跨度 L/m	截面面 积/ cm^2	截面特征参数	
	H	b	t_w	t_f			惯性矩 $I_x/10^3\text{cm}^4$	截面模 量/ cm^3
1	450	200	9	14	9	93.98	32.26	1 433.73
2	600	200	11	17	12	130.26	74.42	2 480.62
3	750	250	13	20	15	156.80	157.12	4 189.64
4	900	300	16	28	18	303.04	399.63	8 880.72

注: b 为翼缘宽度; t_w 为腹板厚度; t_f 为翼缘厚度。

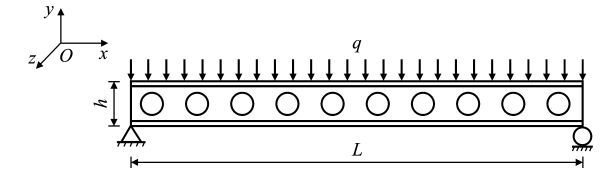


图 3 蜂窝梁的几何模型及理论加载方式
Fig. 3 Geometry Model of Castellated
Beam and Theoretical Loading Mode

2 静力强度分析

2.1 开孔率的影响

笔者定义蜂窝梁承载力由强度和刚度双控,即取梁截面进入塑性或跨中挠度达到 $L/400$ 时所对应荷载值的较小者作为蜂窝梁的承载力;定义强度承载力系数为蜂窝梁承载力 R 与相同截面实腹梁承载力 R_m 的比值。图 4 为开孔率对蜂窝梁强度承载力系数的影响曲线($L=12\text{ m}$, $L_n=1.0H$)。由图 4 可以看出,当开孔率小于 65% 时,承载力降低较小,均在同截面实腹梁的 90% 以上;当开孔率大于 75% 时,承载力下降较快,在实腹梁的 80% 以下。进一步分析表明,挠度是计算的控制指标,最大应力发生在第 1 孔(图 5)。这是因为开孔处腹板削弱较为严重,故在剪切力较大的近支座孔洞处出现应力集中。

2.2 孔间距的影响

图 6 为圆孔形蜂窝梁的孔间距对强度承载力系数的影响曲线。由图 6 可以看出,随着孔间距的增大,承载力增大,但变化不明显,即孔间距大于 $1.0H$ 时,孔间距对承载力的影响不大。

2.3 跨度的影响

图 7 为开孔率为 70% 时,蜂窝梁跨度与强度承载力系数的关系。由图 7 可以看出,跨度对承载力的影响并不明显,这说明蜂窝梁亦可应用于跨度较

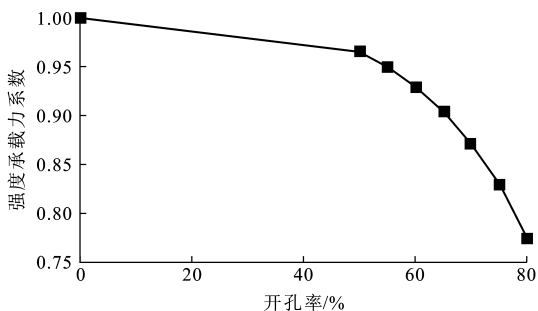


图 4 圆孔蜂窝梁强度承载力系数与开孔率的关系
Fig. 4 Relationship Between Strength Bearing Capacity Factor and Pore Ratio of Circular-hole Castellated Beams

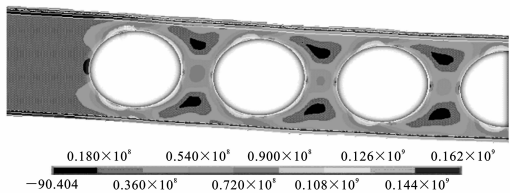


图 5 应力最大值位置(单位:Pa)
Fig. 5 Location of Maximum Stress(Unit:Pa)

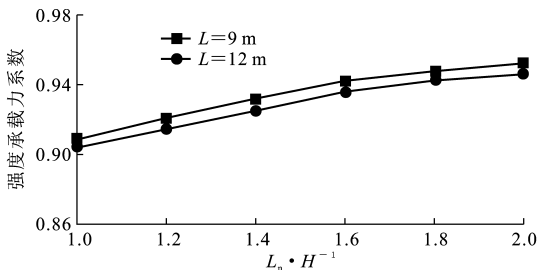


图 6 强度承载力系数与孔间距的关系
Fig. 6 Relationship Between Strength Bearing Capacity Factor and Interval of Holes

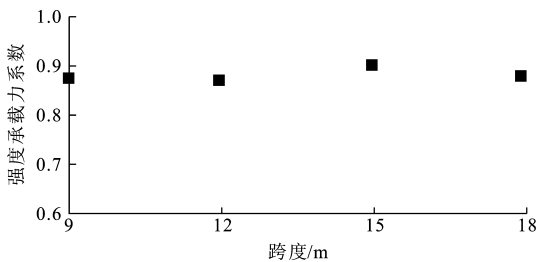


图 7 强度承载力系数与跨度的关系
Fig. 7 Relationship Between Strength Bearing Capacity Factor and Span

大的结构中。

综上所述,关于蜂窝梁结构的静力强度问题可得出如下结论:

(1)开孔率是影响蜂窝梁承载力的主要因素,工程中宜取梁高的 65%~75%。当开孔率小于 65%时,开孔对梁的承载力影响较小(相当于同截面实腹

梁的 90%以上),但由于孔太小,不美观,因而工程应用价值不大;当开孔率大于 75%时,开孔对梁的承载力削弱较大(相当于同截面实腹梁的 80%以下),且下降很快,因而经济性和安全性均不理想。

(2)孔间距对蜂窝梁的承载力影响较小,一般宜取梁高的 1~1.8 倍。孔间距不宜太小,太小则桥墩处应力过大;间距太大则失去了使用蜂窝梁的意义。

基于以上考虑,本文中初步拟定蜂窝梁的承载力计算公式为

$$R=(0.77+0.33e^{-\rho/0.52})R_m$$

式中: R 为蜂窝梁承载力; R_m 为相同截面实腹梁承载力; ρ 为开孔率。

3 整体稳定性分析

3.1 构件稳定承载力计算方法

结构(或构件)的稳定性能可以从其荷载-位移全过程曲线中得到完整的概念,这种全过程曲线要由较精确的非线性分析得出。按照拟定的参数分析方案,完成每例分析以后,给每个节点都可画出 1 条荷载-位移曲线;实际分析中只取 1 条曲线,即以迭代结束时位移最大节点的荷载-位移曲线作为代表(图 8)。从实用角度看,可只取开始一段曲线[越过第 1 个临界点(图 8 中 A 点)以后再保留一段必要的屈曲后路径]进行考察,取第 1 个临界点对应的荷载值作为结构的极限荷载,相应的结构变形模态作为屈曲模态。在本文中,主要通过受压翼缘跨中点在平面外的荷载-位移曲线确定稳定承载力。

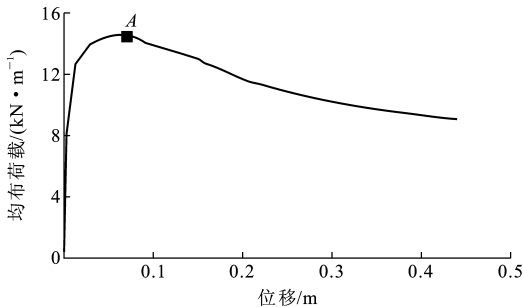


图 8 荷载-位移关系
Fig. 8 Relationship Between Load and Displacement

关于受弯构件的初始几何缺陷,以初弯曲和初偏心最具代表性。初弯曲和初偏心对受弯构件的影响都可以导致出现极值点失稳现象,使构件稳定承载力降低,2 种影响在本质上并无区别。本文中取 1 阶失稳模态时节点位移量的 1%作为初弯曲缺陷。

为验证 ANSYS 的 Shell181 单元能否准确模拟梁的稳定性能,本文中对工字形实腹梁的稳定承载

力进行了分析,并将计算结果与规范公式对比。实腹梁参数、验算结果及失稳变形见表 2 和图 9、10。

表 2 实腹梁参数

Tab. 2 Parameters of Solid-web Beams

试件 编号	跨度 L/m	梁高 H/mm	翼缘宽 度 b/mm	腹板厚度 t_w/mm	翼缘厚度 t_f/mm
A	9	450	200	9	14
B	9	400	200	8	13
C	9	600	200	11	17
D	12	600	200	11	17
E	12	400	200	8	13
F	12	450	300	11	18
G	15	600	200	11	17
H	15	450	200	8	13

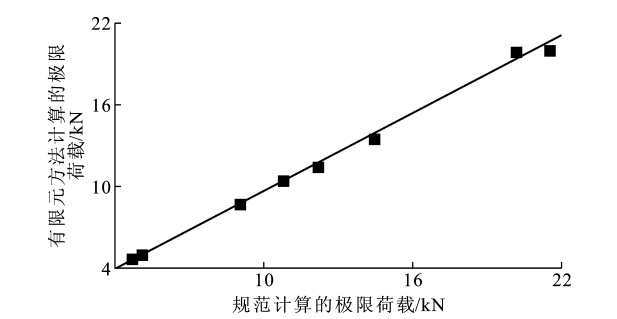


图 9 有限元分析结果与规范计算结果对比
Fig. 9 Contrast of Results from Finite Element Method and Specification

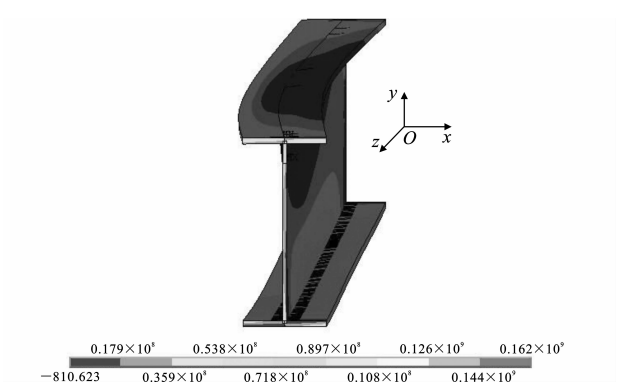


图 10 梁 A 整体失稳变形(单位:Pa)

Fig. 10 Unstability Deformation of Total Buckling of Beam A (Unit: Pa)

由图 9 可以看出,有限元分析结果与规范计算值吻合较好,因此,可以认为本文分析方法能够比较准确地反映梁的稳定性能。

3.2 圆孔蜂窝梁整体稳定性分析

3.2.1 开孔率的影响

类似第 2.1 节,笔者定义稳定承载力系数为蜂窝梁稳定承载力与相同截面实腹梁稳定承载力的比值。图 11 为开孔率对稳定承载力系数的影响曲线。

由图 11 可以看出,随着开孔率的增大,稳定承载力减小,但下降幅度不大,均可达到对应实腹梁稳定承载力的 90% 以上。这是因为梁的整体失稳是由受压翼缘侧向失稳引起,腹板的作用仅是联系上、下翼缘,使之共同作用,所以蜂窝梁的稳定承载力相对等截面实腹梁并无明显削弱。蜂窝梁最大应力往往出现在约 1/4 跨处的孔洞下缘(图 12)。这是因为该位置腹板削弱较为严重,且受弯曲、剪切、扭转的联合作用,故在孔洞处出现应力集中,但并未进入塑性状态。

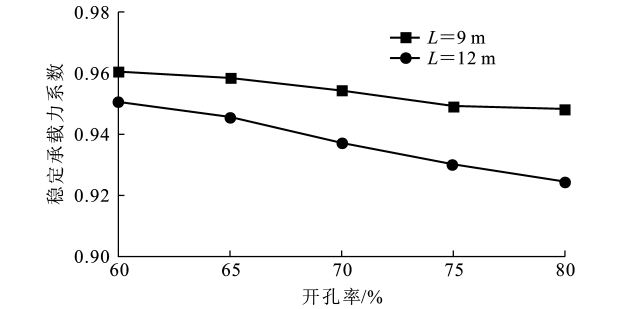


图 11 稳定承载力系数与开孔率的关系
Fig. 11 Relationship Between Stability Bearing Capacity Factor and Pore Ratio

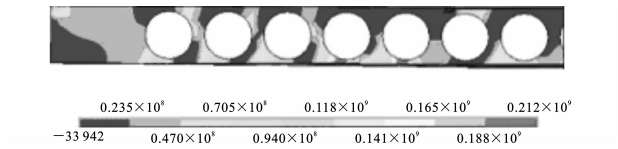


图 12 应力最大值位置(单位:Pa)

Fig. 12 Location of Maximum Stress (Unit: Pa)

3.2.2 孔间距的影响

图 13 为跨度 12 m 时,稳定承载力系数随孔间距的变化曲线。由图 13 可以看出,随着孔间距的增大,圆孔蜂窝梁的稳定承载力逐渐增大,但变化幅度很小,说明孔间距对稳定承载力的影响不大。

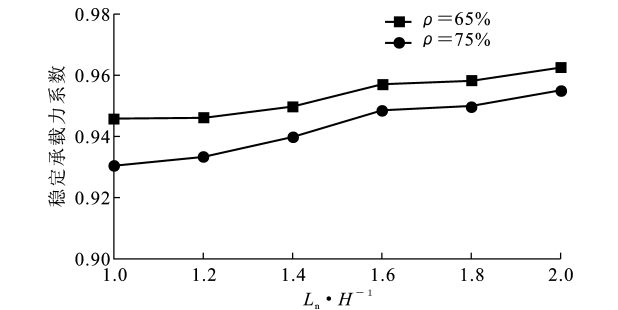


图 13 稳定承载力系数与孔间距的关系
Fig. 13 Relationship Between Stability Bearing Capacity Factor and Interval of Holes

3.2.3 跨度的影响

图 14 为开孔率 70% 时,稳定承载力系数与跨

度的关系。由图 14 可以看出,跨度对稳定承载力的影响较小,这说明蜂窝梁亦可应用于跨度较大的结构中。

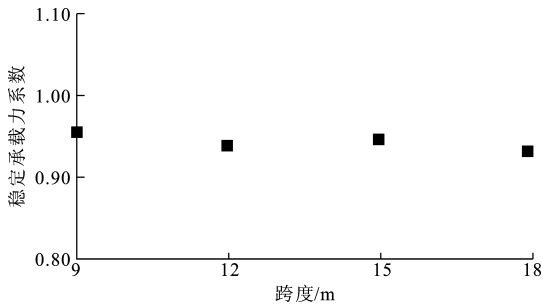


图 14 稳定承载力系数与跨度的关系

Fig. 14 Relationship Between Stability Bearing Capacity Factor and Span

综上所述,可采用此方法来近似确定圆孔蜂窝梁的稳定承载力:在满足开孔率为 65%~75%,孔间距为 1~1.8 倍梁高时,蜂窝梁的稳定承载力可先按照同截面实腹梁计算,然后将实腹梁的稳定承载力乘以折减系数 0.9 作为蜂窝梁的稳定承载力。

4 结 语

(1)圆孔蜂窝梁的开孔率和孔间距是影响其力学性能的主要参数,根据本文研究结果并参考一般工程经验,可取开孔率为梁高的 65%~75%,孔间距为梁高的 1.0~1.8 倍。

(2)满足上述条件的圆孔蜂窝梁,其强度承载力可由公式 $R=(0.77+0.33e^{-\rho/0.52})R_m$ 确定。

(3)稳定承载力的确定可先按照同截面实腹梁计算,然后将实腹梁的稳定承载力乘以折减系数 0.9 作为蜂窝梁的稳定承载力。

参考文献:

References:

[1] 王洪范,王立新. 蜂窝梁的应用和计算方法[J]. 工业建筑,1994,24(8):3-4.
WANG Hong-fan, WANG Li-xin. The Application and Calculation Method of Castellated Beams[J]. Industrial Construction,1994,24(8):3-4.

[2] 张建仁,王磊. 既有钢筋混凝土桥梁构件承载力估算方法[J]. 中国公路学报,2006,19(2):49-55.
ZHANG Jian-ren, WANG Lei. Estimated Approach to Carrying Capacity of Existing Reinforced Concrete Bridge Member[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(2):49-55.

[3] 袁旭斌,贺拴海,宋一凡. 粘贴纤维布加固 RC 梁的受弯裂缝计算方法[J]. 中国公路学报,2006,19(3):54-

58.

YUAN Xu-bin, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Calculation Method on Bending Crack in RC Beams Strengthened with FRP[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(3):54-58.

[4] 黄 侨,郑一峰,李光俊. 预弯组合梁非线性全过程分析方法[J]. 中国公路学报,2006,19(4):88-93.
HUANG Qiao, ZHENG Yi-feng, LI Guang-jun. Non-linear Whole-course Analysis Method of Preflex Composite Beam[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(4):88-93.

[5] 曹国辉,方 志. 钢筋混凝土连续宽箱梁受力性能试验[J]. 中国公路学报,2006,19(5):46-52.
CAO Guo-hui, FANG Zhi. Mechanical Behaviors Test of RC Continuous Box Girder with Wide Flange[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(5):46-52.

[6] 罗立峰. 碳纤维增强聚合物改性混凝土的冲击性能[J]. 中国公路学报,2006,19(5):71-76.
LUO Li-feng. Steel Fiber Reinforced Polymer Modified Concrete Impact Behaviors[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(5):71-76.

[7] 刘小燕,颜东煌,张 峰,等. 预应力高强混凝土梁极限承载力分析[J]. 中国公路学报,2006,19(1):58-61.
LIU Xiao-yan, YAN Dong-huang, ZHANG Feng, et al. Ultimate Load Analysis of Prestressed High-Strength Concrete Beam[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(1):58-61.

[8] 苏益声. 圆形孔与多边形孔蜂窝钢梁的试验分析[J]. 广西大学学报:自然科学版,2003,28(1):5-9.
SU Yi-sheng. The Experiment and Analysis of the Circular and Polygon Holes' Honeycombed Steel Beams[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition,2003,28(1):5-9.

[9] 罗 烈,罗晓霖. 蜂窝梁设计规范的比较研究[J]. 建筑钢结构进展,2005,7(2):43-47.
LUO Lie, LUO Xiao-lin. Comparative Research of the Design Specifications for Castellated Beam[J]. Progress in Steel Building Structures,2005,7(2):43-47.

[10] RICHARD G R. Beam Tests with Unreinforced Web Openings[J]. Struct Div,1968,94(1):1-17.

[11] BOWER J E. Recommended Design Procedures for Beams with Openings[J]. Eng J Amer Inst Steel Constr,1971,8(10):132-137.

[12] COOPER P, SNELL B. Tests on Beams with Reinforced Web Openings[J]. Struce Div,1972,98(3):11-32.