

Research on Compression Behavior of Aluminum Members

Guo Jing^{1#}

1. Shenzhen Nottingham Sustainable Development Research Co. Ltd, Shenzhen, China

#Email: 22838307@qq.com

Abstract

This paper describes the compression tests for square and rectangular hollow aluminum alloy columns. Test samples vary from 6061-T6 and 6063-T heat treatment of aluminum alloys. According to the report, measurement of geometric and material properties is the complete sample of load-deformation history. Local buckling failure modes were observed, including material yield and tensile failure. Further experimental data were collected from the literature. The finite element (FE) model was developed and validated with the test results, then used to perform a parameter study. Experimental and numerical results were used to evaluate the compression performance according to standards in American, Australia and New Zealand, Europe, and China.

Keywords: Aluminum Alloy; Stub Column Test; Experimental Investigation

铝合金构件抗压性能研究

郭晶¹

1. 深圳市诺丁汉可持续发展研究院有限公司, 广东 深圳 518000

摘要: 本文介绍了矩形和矩形中空铝合金短柱的压缩试验。测试样品是 6061-T6 和 6063-T 热处理铝合金。根据报告, 几何和材料性质的测量是负载变形历史的完整样本。观察了局部屈曲失效模式, 包括材料屈服和拉伸破坏。从文献收集了进一步的实验数据。利用测试结果开发和验证了有限元 (FE) 模型, 然后用于执行参数研究。实验和数值结果用于根据美国, 澳大利亚和新西兰, 欧洲和中国的标准来评估压缩性能。

关键词: 铝合金; 短柱; 实验

1 引言

在建筑结构中使用铝合金的最早例子可追溯到 20 世纪 50 年代 (Mazzolani, 1995)。从那时起, 其应用已经扩展到广泛的建筑应用中, 例如建筑外墙、屋顶系统、移动桥梁和位于潮湿环境中的结构。进一步扩大使用的关键是有效的结构设计规则, 需要由可靠的研究支撑。本研究的重点是铝合金结构截面的受压性能, 重点是在设计中应变硬化的可能开发。

在过去几十年中, 已经进行了一系列研究以检查铝合金构件的承载能力。在此介绍一些侧重于铝合金构件受压后的性能的关键研究。为了研究铝合金横截面受压能力, 对不同的横截面形状, 包括 H 型截面 (Bijlaard, Fisher, 1953), 正方形和矩形中空截面 (SHS / RHS) (Langseth, Hopperstad, 1997; Mazzolani 等人, 1996, 1997; Landolfo 等人 1999; Hassinen 2000; Mennink 2002; Zhu and Young 2006a, 2008), 槽形截面 (Mazzolani 等人 2001; Mennink 2002) 和角型截面 (Mazzolani 等人 2011), 进行了实验研究。在这些研究中产生的实验结构性能数据已被 Mazzolani 等人, Mennink (2002), 和 Zhu 和 Young (2006b) 的数值结果补充。这些数据用于评估铝合金横截面的现有设计指导, 并支持设计规范的开发。

现在已经有许多已建立的国际铝合金结构设计规范, 包括铝设计手册 (Aluminum Association (AA), 2010), 澳大利亚/新西兰标准 (AS / NZS) 1664.1: 1997 (澳大利亚标准, 1997) 1999-1-1: 2007 (CEN,

2007) 和中国规范 (2002)。这些规范为一系列结构部件和应用提供了精确的设计规则, 尽管在一些领域, 包括铝合金压缩构件的性能, 设计规范通常过于保守。在紧凑型截面的情况下, 这种保守主要归因于缺乏应变硬化的考虑。这在 BS EN 1999-1-1: 2007 (CEN 2007) 规范的附录中也得到认可, 其中他提供了包括应变硬化的替代设计方法, 从而提高设计效率。除了这些规范, 其他相关设计方法是直接强度法 (DSM)。DSM 最初由 Schafer 和 Peköz (1998) 提出, 用于冷弯型钢结构构件的设计, 并包括在美国钢铁学会 (AISI) 规范中, 用于冷成型钢结构构件的设计 (AISI, 2004); 该方法后来被应用于 Zhu 和 Young (2006b) 的铝合金结构构件。

在本研究进行的实验程序包括四种类型的挤压铝合金截面的短柱试验: SHS、RHS 和具有内部交叉加强筋的 SHS / RHS。在本研究中产生的实验数据以及从其他研究者进行的以前的测试中收集的实验数据覆盖了大范围的板元件宽度/厚度 (b/t) 比率。将实验结果与前述的四个国际规范预测的设计抗压强度进行比较。

2 实验研究

Su 等人 (2014) 在香港大学的结构实验室, 对各种铝合金横截面进行了一系列的 15 个短柱试验。试样是用热处理的铝合金 (6061-T6 和 6063-T5 级) 挤压制造。短柱的标称长度选择为较大横截面尺寸的三倍。在初始切割之后, 将试样的端部磨平, 以确保施加的载荷的均匀分布。本研究中的试样根据材料强度和横截面尺寸标记可参考 Su 等人 (2014) 的文献。

表 1. 铝合金短柱实验数据与规范设计值比较

Specimen	b/t	P_{exp} (kN)	$\frac{P_{Exp}}{P_{AA}}$	$\frac{P_{Exp}}{P_{EC9}}$	$\frac{P_{Exp}}{P_{EC9}}$	$\frac{P_{Exp}}{P_{EC9}}$
H64×64×3.0C	20.7	164.2	1.02	1.15	1.02	1.10
H64×64×3.0C-R	20.4	165.4	1.02	1.14	1.02	1.01
H70×55×4.2C	15.1	196.2	1.07	1.20	1.07	1.00
H70×55×4.2C-R	15.1	196.9	1.02	1.20	1.02	1.01
H95×50×10.5C	7.1	626.2	1.07	1.20	1.01	1.01
H120×70×10.5C	9.5	862.5	1.09	1.22	1.03	1.03
H120×120×9.0C	11.5	981.5	1.10	1.23	1.06	1.06
N95×50×10.5C	7.2	609.8	1.45	1.63	1.15	1.09
N120×70×10.5C	9.5	736.9	1.50	1.68	1.10	1.22
N120×120×9.0C	11.5	811.1	1.13	1.27	0.92	0.91
+H95×95×4.3C	9.9	585.6	1.21	1.36	1.10	1.09
+H95×95×4.3C-R	9.9	547.2	1.13	1.27	1.02	1.02
+H120×70×10.5C	4.4	1164.3	1.16	1.30	1.05	1.04
+H120×70×10.5C-R	4.4	1174.4	1.17	1.32	1.06	1.05
+N95×50×10.5C	3.2	664.8	1.66	1.86	1.37	1.11

例如, 标签 H70×55×4.2CR 定义了以下样品: 第一个字母 H 是指高强度铝合金 6061-T6, N 为正常强度铝合金 6063-T5; 标称截面具有宽度 (70mm) × 高度 (55mm) × 厚度 (4.2mm) 的尺寸; 如果在标签前面有+号, 则意味着中空部分具有与该部分的外壁相同厚度的内部横向加强件; 尺寸后面的符号 C 表示柱压缩试验。最后, 如果重复试验, 字母 R 将显示在标签中。

每个试样测量的材料性质是通过纵向拉伸试片试验和韦伯斯特硬度测量确定的。试片试验符合 AS 1391-2007 (澳大利亚标准协会 2007), ASTM E8M-97 标准 (ASTM 1997)。韦伯斯特硬度测量根据 ASTM B647-10 标准 (ASTM 2010) 进行的。结果突出了两种回火色的铝合金不同的机械性能和行为。T5

回火具有较低的屈服强度，相当大的应变硬化，较低的硬度值，但具有高的延展性；而 T6 回火具有较高的屈服强度，较不明显的应变硬化，较高的硬度值和较低的延展性。

在测试之前，选择以下四个短柱的测量其初始局部几何缺陷：H64×64×3.0C，H95×50×10.5C，H95×95×4.3CR，和 N95×50×10.5 C。将样品安装在铣床上，并通过电子数字位移传感器进行测量。

使用伺服控制的液压试验机以 0.4mm/min 的恒定速率通过位移控制向试样施加压力。对样品施加 2kN 的初始荷载以确保样品与上端板和下端板之间的充分接触。在测试期间，机器在达到极限载荷前、达到极限载荷时和测试结束前各暂停 1.5 分钟。暂停的目的是获得静态曲线。将柱在固定端之间压缩、约束旋转、扭转和弯曲。使用三个 25mm 范围（25mm）的 LVDT 来测量样品的竖向形变。它们位于上端板和下端板之间。应变计在轴向方向上以 10mm 间隔附接在所选短柱的中间，以确定轴向应变并监测局部屈曲。由于所有截面都是双重对称的，应变仪只粘附到截面四分之一周长。在测试期间，通过数据记录器以 1s 间隔记录施加的负载和来自 LVDT 和应变计的读数。实验极限荷载 P_{exp} 在表 1 中给出，也包括了将在稍后讨论的与 AA (P_{AA})，AS/NZS ($P_{AS/NZS}$)，BS EN 1999-1-1:2007 (P_{EC9}) 和中国规范(P_{CN}) 所预测的标称压缩设计强度的比较。

所有试样都由于材料屈服和非弹性局部屈曲的组合而失效；对于一些测试样品，在最终负载水平附近已观察到整体屈曲的证据。储料器部分中的局部屈曲的延迟使得能够变形到应变硬化范围中，并且使得达到的荷载显著大于屈服荷载 Af_y 。应当注意的是在一些情况下，观察到极限荷载大于 Af_u ，这是由于在压缩段中的泊松效应导致的横截面积增加而实现的。

3 设计强度与实验强度的比较

除了使用本研究中产生的铝合金短柱的测试数据之外，本研究还采用了文献中的铝合金短柱的测试数据，将他们用于评估当前一些标准，预测的横截面的抗压强度。本研究总共考虑了 346 个实验，包括 110 个方形和矩形截面。实验强度 P_{exp} 与铝设计手册（AA 2010），AS/NZS 1664.1: 1997（澳大利亚标准澳大利亚 1997），BS EN 1999-1-1: 2007（CEN 2007）和中国规范预测（2002）的标称强度进行了比较。使用测量的材料性质和几何形状进行比较，所有安全系数设置为一致，结果如图 1 所示。美国铝设计手册（AA，2010）提供了铝合金短柱的设计规则，其中，截面的合力被定义为屈服应力乘以总截面积，而减小的应力用于细长截面。AS/NZS 1664.1: 1997（澳大利亚标准，1997）的设计规范与 AA（2010）相同，但压缩构件的减小系数除外。AA 标准 (P_{exp}/P_{AA}) 和非标准样本的 AS/NZS ($P_{exp}/P_{AS/NZS}$) 的实验和预测极限荷载的平均比率为 1.19 和 1.28，相应的变异系数（COV）为 0.251 和 0.250。BS EN 1999-1-1: 2007（CEN 2007）将非延伸段的合力限制于屈服荷载，并对细长截面使用有效厚度概念，但在。本文中使用的 BS EN 1999-1-1: 2007（CEN 2007）进行的所有比较使用更合适的附件 F 方法。BS EN 1999-1-1: 2007（CEN 2007）附录 F 与试验结果的比较给出了对于非细长试样的 $P_{exp} = P_{EC9}$ 的平均值为 1.04 和相应的 COV 为 0.205。表 2 总结了四个规范的比较：总体而言，BS EN 1999-1-1: 2007 附件 F（CEN 2007）给出了柱精确预测柱塞压缩能力，而 AS/NZS 1664.1: 1997（澳大利亚标准）提供了最保守的设计强度。保守性主要归因于横截面由于应变硬化而实现比屈服荷载更大的性能的能力。由四个规范预测的失效模式都是材料屈服（在 BS EN 1999-1-1: 2007 Annex F（CEN 2007）的情况下，应变硬化余量，其通常与观察到的失效模式一致。

4 可靠性分析

本节将通过实验数据统计来评估四种不同的铝合金短柱设计方法的可靠性。可靠性分析使用安全指数 β 作为设计安全等级的指标。所采用的计算程序详见铝设计手册（AA 2010）。可靠性指数根据 AA（2010）中附录 1 第 I 部分的 1.3.2 条计算，其中材料性能和制造变量的平均值和 COV 取为 $M_m = 1.10$ （对于由屈曲

应力控制的行为) /1.00 (对于由极限应力控制的行为), $F_m = 1.00$, $V_M = 0.06$ 和 $V_F = 0.05$ 。统计参数 P_m 和 V_p 是实验-预测荷载比值的平均值和 COV, 已经包括在表 2 中。由 AA (2010)给出的校正因子 CP 用于说明少量试验的影响。AA (2010) 使用 1.2DL + 1.6LL 的载荷组合 (其中 DL 和 LL 分别表示恒定荷载和活荷载), 而 1.25DL + 1.50LL 和 1.35DL + 1.50LL 分别用于 AS/NZS 1664.1:1997 (Standards Australia 1997)和 BS EN 1999-1-1:2007 (CEN 2007)。安全系数 ϕ 取决于结构情况和采用 (考虑) 的设计规范。对于铝合金短柱, AA (2010), AS/NZS 1664.1:1997 (Standards Australia 1997)和 BS EN 1999-1-1:2007 (CEN 2007)分别假定 ϕ 为 0.90, 0.85 和 0.91。根据 AA (2010)和 AS 1170-0:2002 (Standards Association of Australia 2002)的要求, 铝合金柱的最小可靠性指数为 2.5。在本研究中, 目标可靠性指数 2.5 也适用于 BS EN 1999-1-1:2007 (CEN 2007) 以及中国规范 (2002)。因此, 如果可靠性指数大于或等于 2.5, 则设计方法被认为是可靠的。

对于 AA (2010), AS/NZS 1664.1:1997 (Standards Australia 1997), BS EN 1999-1-1:2007 (CEN 2007)和中国规范(2002) 四种现行规范的可靠性指数 β 分别为 2.32、2.61, 2.05 和 2.31。。也就是说, 只有 AS/ NZS 1664.1:1997 (Standards Australia 1997)对于铝合金短柱性能预测是可靠的。

表 2. 短柱实验强度和设计强度比较值的总结

	$\frac{P_{Exp}}{P_{AA}}$	$\frac{P_{Exp}}{P_{AS}}$	$\frac{P_{Exp}}{P_{EN}}$	$\frac{P_{Exp}}{P_{CN}}$
Mean, P_m	1.19	1.28	1.04	1.04
COV, V_p	0.251	0.250	0.205	0.086
ϕ	0.90	0.85	0.91	0.90
β	2.32	2.61	2.05	2.31

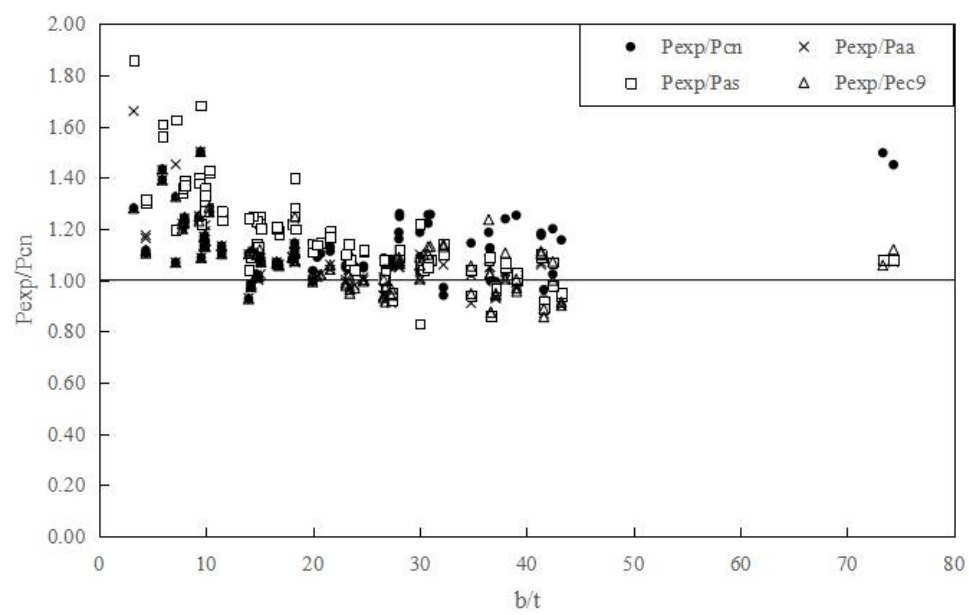


图 1 铝合金短柱实验数值与各种规范设计值的比较

5 结论

上文已经呈现了铝合金方形截面、矩形截面、以及具有内部交叉加强筋的方形和矩形截面短柱的实验。本文研究了两种铝合金类型，即 6061-T6 和 6063-T5。通过将本研究获得的实验数据，以及其他研究人员以前的试验结果相结合，得到总计 110 个不同合金回火和截面形状的铝合金短柱数据。本文对这一数据库进行分析，并将实验结果与美国、澳大利亚/新西兰标准、欧洲规范和中国规范的设计强度进行比较。对比结果发现，由于实验中，铝合金材料存在应变硬化的特征，而该特点并没有在四个设计规范中得到体现，因此，现有的四个国际设计规范对于铝合金横截面受压承载力的预测都较为保守。

参考文献

- [1] Bijlaard, P.P. , and Fisher, G.P.(1953).“Column strength of H-sections and square tubes in post buckling range of component plates.” Technical Note2994, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, DC.
- [2] Hassinen, P. (2000). “Compression strength of aluminum columns— Experimental and numerical studies.” Proc., 3rd Int. Conf. Coupled Instabilities of Metal Structures (CIMS’2000), ICP, London, 241–248.
- [3] Landolfo, R., Piluso, V., Langseth, M., and Hopperstad, O.S.(1999).“EC9 provisions for flat internal elements: Comparison with experimental results.” Light-Weight Steel and Aluminium Structures, P. Mäkeläinen and P. Hassinen, eds., Elsevier, The Netherlands, 515–522.
- [4] Langseth, M., and Hopperstad, O. S. (1997). “Local buckling of square thin-walled aluminum extrusions.” Thin-Walled Struct., 27(1), 117–126.
- [5] Mazzolani, F. M. (1995). Aluminum alloy structures, 2nd Ed., E & FN Spon, London.
- [6] Mazzolani, F. M., Faella, C., Piluso, V., and Rizzano, G. (1996). “Experimental analysis of aluminum alloy SHS-members subjected to local buckling under uniform compression.” Proc., 5th Int. Colloquium on Structural Stability, COPPE/Federal Univ. of Rio de Janeiro, Brazil, 475–488.
- [7] Mazzolani, F. M., Piluso, V., and Rizzano, G. (1997). “Numerical simulation of aluminum stocky hollow members under uniform compression.” Proc., 5th Int. Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS’97), Japan Society of Steel Construction, Nagoya Univ., Japan.
- [8] Mazzolani, F. M., Piluso, V., and Rizzano, G. (2001). “Experimental analysis of aluminum alloy channels subjected to local buckling under uniform compression.” Proc., C.T.A., Italian Conf. on Steel Construction, ACS, Milano, Italy, 1–10.
- [9] Mazzolani, F. M., Piluso, V., and Rizzano, G. (2011). “Local buckling of aluminum alloy angles under uniform compression.” J. Struct. Eng., 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000289, 173–184.
- [10] Mennink, J. (2002). “Cross-sectional stability of aluminum extrusions: Prediction of the actual local buckling behavior.” Ph.D. thesis, Dept. of Structural Design, Eindhoven Univ. of Technology, Eindhoven, Netherlands.
- [11] Su, M., Young, B. and Gardner, L. (2014) “Testing and design of aluminum alloy cross-sections in compression.” Journal of Structural Engineering, ASCE, 140(9): 04014047.
- [12] Zhu, J. H., and Young, B. (2006b). “Aluminum alloy tubular columns— Part II: Parametric study and design using direct strength method.” Thin-Walled Struct., 44(9), 969–985.