

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.003

高强轻骨料混凝土梁受剪性能分析

魏 慧, 吴 涛, 王 洁

(长安大学 建筑工程学院, 西安, 710061)

摘要: 高强轻骨料混凝土具有强度高、自重轻、抗冻抗渗性能好等诸多优点, 具有良好的应用前景, 但其弹性模量低, 脆性破坏显著。收集了大量轻骨料混凝土梁受剪性能试验结果, 通过 LC40 强度等级将其分为普通强度轻骨料混凝土梁和高强轻骨料混凝土梁, 结合各国规范建议方法和典型统计模型对其承载能力进行计算, 并与试验结果进行对比分析。研究表明: 轻骨料混凝土梁的受剪承载力低于同等级的普通混凝土梁, 且随着混凝土强度的提高, 轻骨料混凝土梁的受剪承载力提高幅度减小, 建议依据强度差异选取不同的混凝土强度折减系数用于规范设计。

关键词: 高强轻骨料混凝土; 梁; 受剪承载力; 计算模型; 对比分析

中图分类号: TU 375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0012-05

Shear behavior of high-strength lightweight aggregate concrete beams

Wei Hui, Wu Tao, Wang Jie

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, P. R. China)

Abstract: High-strength lightweight aggregate concrete (HSLAC) with high-strength, light-weight and good frost resisting property and impermeability has the better application prospect, but its low modulus leads to brittle failure. A large number of domestic and abroad shear test data of lightweight aggregate concrete beams were collected, and through the strength grade LC40 divided the test specimens into the normal strength lightweight aggregate concrete (LAC) beams and HSLAC beams. The paper combined the national specification recommended method with the typical statistical model to calculate the carrying capacity of beams, and also presents their comparison with experiment results. Research shows that the shear bearing capacity of LAC beams is lower than the normal weight concrete beams with same strength level, and the increased range of shear bearing capacity of LAC beams is decreased with the increase of concrete strength. The reasonable reduced concrete strength coefficients should be proposed to be used in the design specification according to the different intensity.

Key words: high-strength lightweight aggregate concrete; beams; shear capacity; calculation model; contrastive analysis

高强轻骨料混凝土具有轻质高强、耐久耐火性能高、隔热保温性能好、抗冻抗渗性能优等特点等, 具有良好的应用前景。但因骨料强度低和内部孔隙

率大导致其抗剪问题突出。国内外学者虽针对剪切问题进行了大量的试验研究和理论分析, 且提出了多种抗剪模型, 但由于混凝土材料的离散性和抗剪

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51578072); 陕西省科技统筹创新工程计划(2015KTZDSF03-04); 西安市科学技术(CXY1512(6))

作者简介: 魏 慧(1990-), 女, 博士生, 主要从事钢筋混凝土结构抗震研究, (E-mail) weihuichd@163.com。

吴 涛(通信作者), 男, 教授, (E-mail) wutao@chd.edu.cn。

机理的复杂性, 始终未得到统一结论。另一方面, 高强轻骨料混凝土的破坏模式和普通混凝土存在本质差异, 故深入明确强度提高对构件抗剪能力的影响, 对进一步了解高强轻骨料混凝土构件抗剪问题的特性具有重要的理论意义和实际价值。

大量试验表明^[1-3], 轻骨料混凝土梁在单调加载条件下, 斜截面破坏形态和普通混凝土梁基本相同, 可分为斜拉破坏、剪压破坏及斜压破坏三种。其受剪承载力主要由截面尺寸、配箍率、剪跨比、纵筋配筋率和混凝土强度等因素共同控制, 此外加载方式、支撑条件等也有一定影响。中国对轻骨料混凝土梁的研究主要集中在 20 世纪 80 年代, 针对轻骨料混凝土梁的抗剪性能专门成立了抗剪专题协作组, 研究表明: 由于骨料强度较低, 轻骨料混凝土截面破坏主要由于骨料被剪坏, 导致截面剪力传递能力降低, 因此, 轻骨料混凝土梁抗剪承载力低于同等级强度的普通混凝土梁, 并针对剪压破坏形态提出了受剪承载力计算公式。

21 世纪以来, 生产技术迅速发展, 中国研究者开展了强度等级高于 LC40 的高强轻骨料混凝土梁受剪性能研究。高强骨料的产生使混凝土强度得到大幅度提高, 但规范并未考虑混凝土强度等级的提高对梁受剪能力的影响。因而, 对混凝土强度发展引起的轻骨料混凝土梁受剪承载力的差异应进行分析。

1 轻骨料混凝土梁受剪性能试验概况

学者们进行的轻骨料混凝土梁斜截面受剪性能试验大致可分为 3 大部分: 1) 中国抗剪专题协作组。20 世纪 80 年代, 中国抗剪专题协作组所完成的轻骨料混凝土梁受剪性能试验研究, 由于受生产技术限制, 所采用的轻骨料强度较低, 混凝土强度等级集中在 LC20~LC30, 未达到高强轻骨料混凝土。最终试验结果表明, 普通钢筋混凝土梁受剪承载力高于同等强度等级的轻骨料混凝土梁; 2) 20 世纪 60 年代至 90 年代, 学者们进行的轻骨料混凝土梁受剪试验。轻骨料混凝土在美国、挪威、英国、日本等国家受到广泛关注, 起步较早, 该段时间进行的轻骨料混凝土梁受剪试验的混凝土强度等级集中在 LC30~LC50; 3) 中国高强轻骨料混凝土梁。近年来, 中国学者同样进行了高强轻骨料混凝土梁的受剪试验研究, 并取得了较好的成果。清华大学逯晔、叶列平

等完成了强度等级为 LC40~LC50 的高强轻骨料混凝土梁抗剪试验, 研究了混凝土强度、剪跨比、配箍率、纵筋配筋率等参数影响, 并提出了砂轻混凝土无腹筋梁斜向开裂荷载和抗剪极限荷载的计算公式。在此基础, 建议了砂轻混凝土无腹筋梁和有腹筋梁的简化抗剪计算公式。

2 受剪模型简介

2.1 各国规范

2.1.1 《轻骨料混凝土结构设计规程》(JGJ12—2006) 轻骨料混凝土梁破坏形态与普通混凝土基本相同, 目前, 中国《轻骨料混凝土结构设计规程》仅是在普通混凝土梁受剪承载力计算的基础上, 将混凝土项进行折减:

$$V_{cs} = \frac{1.5}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (1)$$

式中, λ 为计算截面的剪跨比, 可取 $\lambda = a/h_0$, a 为集中荷载作用点至支座或节点边缘的距离, 当 $\lambda < 1.5$ 时, 取 $\lambda = 1.5$; 当 $\lambda > 3$ 时, 取 $\lambda = 3$ 。该公式是在中国《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010) 基础上, 将混凝土项乘以折减系数 0.857 得到的, 未区分全轻和砂轻。

2.1.2 美国 ACI318—11 规范 和中国规范类似, 在普通钢筋混凝土梁受剪计算公式的基础上, 对混凝土项进行折减。混凝土项简化计算公式为:

$$V_c = 0.167 \sqrt{f'_c} b h_0 \quad (2)$$

其中, 剪跨比取值不得小于 1, 对于砂轻混凝土对 $\sqrt{f'_c}$ 进行 0.85 的系数折减, 对于全轻混凝土折减系数为 0.75。箍筋项与中国规范相同, 取:

$$V_s = f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (3)$$

2.1.3 欧洲规范 EC2 对于普通钢筋混凝土无腹筋梁按公式(4)计算, 有腹筋梁按公式(5)计算。

$$V_n = V_c = [0.18k_1(100\rho_b f_{ck})^{\frac{1}{3}}] b_w d \geq 0.035k_1^{1.5} \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (4)$$

$$V_n = \text{Max}[V_c, (\rho_v f_{yv} \cot \theta) b_j d] \leq \nu_c \frac{f_{ck}}{1.5} / (\cot \theta + \tan \theta) \quad (5)$$

式中: $k_1 = 1 + (200/d)0.5 \leq 2$; ρ_b 为纵筋配筋率, 且 $\rho_b \leq 0.02$; $\nu_c = 0.6(1 - f_{ck}/250)$; $j = 0.9$; $1 \leq \cot \theta \leq 2.5$ 。对于轻骨料混凝土, 在普通混凝土梁计算的基础上乘以折减系数, 折减系数取值见公式(6)。

$$\mu = 0.4 + 0.6\rho/2200 \quad (6)$$

折减系数,箍筋项保持不变。

式中: μ 为折减系数, ρ 为纵向钢筋配筋率。

2.2 统计模型

2.1.4 英国规范 BS8110:1997^[4]

$$V_{cs} = 0.79(100\rho)^{1/3} \left(\frac{400}{h_0}\right)^{1/4} \left(\frac{f_{cu}}{25}\right)^{1/3} bh_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (7)$$

由于影响钢筋混凝土梁抗剪承载力的因素众多,剪切机理复杂,且混凝土材料的离散性大,至今难以形成力学概念清晰的统一计算公式。目前,对于混凝土梁大都是通过简单的受力分析,在大量试验数据基础上线性回归,并考虑各影响因素显著性,提出半经验半理论公式。本文介绍以下几种公式,见表 1。

式中:纵筋配筋率不大于 0.03,对于强度等级为 25 MPa 及以上的轻骨料混凝土,混凝土项乘以 0.8 的

表 1 受剪计算模型

提出时间	提出人	具体模型	备注
1968	Zutty ^[12]	$\frac{V_u}{bh_0} = 2.2 \left(\frac{f_c \rho}{\lambda}\right)$	未考虑尺寸效应
1984	Bazant and Kim ^[13]	$\frac{V_u}{bh_0} = \frac{0.83}{\sqrt{1 + \frac{h_0}{25d_a}}} \sqrt[3]{\rho} \sqrt{f_c} + 249 \sqrt{\frac{\rho}{\lambda^5}}$	应用断裂力学确定尺寸效应
1987	Bazant and Sun ^[14]	$\frac{V_u}{bh_0} = 0.54 \frac{1 + \sqrt{\frac{5.08}{d_a}}}{\sqrt{1 + \frac{h_0}{25d_a}}} \sqrt[3]{\rho} \sqrt{f_c} + 249 \sqrt{\frac{\rho}{\lambda^5}}$	考虑尺寸效应
1996	Kim and Park ^[15]	$\frac{V_u}{bh_0} = 3.5 \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 0.008h_0}} + 0.18\right) f_c'^{a/3} \rho^{3/8} \left(0.4 + \frac{1}{\lambda}\right)$	提出新的尺寸效应系数
1978	李寿康和俞永言 ^[16]	$\frac{V_u}{bh_0} = \frac{0.04(2 + 100\rho)}{\lambda - 0.3} f_{ck}$	未考虑尺寸效应

注: V_u 为抗剪极限荷载; f_c' 为混凝土圆柱体抗压强度; ρ 为纵筋配筋率; λ 为剪跨比; h_0 为截面有效高度; b 为截面宽度; d_a 为骨料

最大粒径, $f_{ck} = 0.7f_{cu}$, $\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{h_0}{25d_a}}}$ 为考虑尺寸效应影响的系数。

3 轻骨料混凝土梁承载力计算

收集国内外 106 组轻骨料混凝土梁抗剪试验数据^[2-3,5,6-11],利用上述受剪模型进行计算,统计结果见表 2,图 1 给出了各类模型与试验值比值随轻骨料混凝土抗压强度的分布情况,表 2 中将 $f_{cu} < 40$ MPa 的试验梁定义为低强轻骨料混凝土梁, $f_{cu} \geq 40$ MPa 定义为高强轻骨料混凝土梁。

表 2 模型计算统计结果

计算模型	低强轻骨料混凝土梁		高强轻骨料混凝土梁		均值比值 (低强/ 高强)
	均值	方差	均值	方差	
	中国规范	1.767	0.377	1.442	
美国规范	2.499	0.996	2.200	1.231	1.136
欧洲规范	2.077	0.906	1.950	1.121	1.065
英国规范	1.745	1.016	1.638	1.316	1.065
Zutty	1.432	0.410	1.353	0.481	1.058
Bazant and Kim	0.958	0.086	0.956	0.082	1.002
Bazant and Sun	0.943	0.083	0.942	0.080	1.001
Kim and Park	1.036	0.054	0.901	0.057	1.150
李寿康和俞永言	1.118	0.064	0.804	0.048	1.391

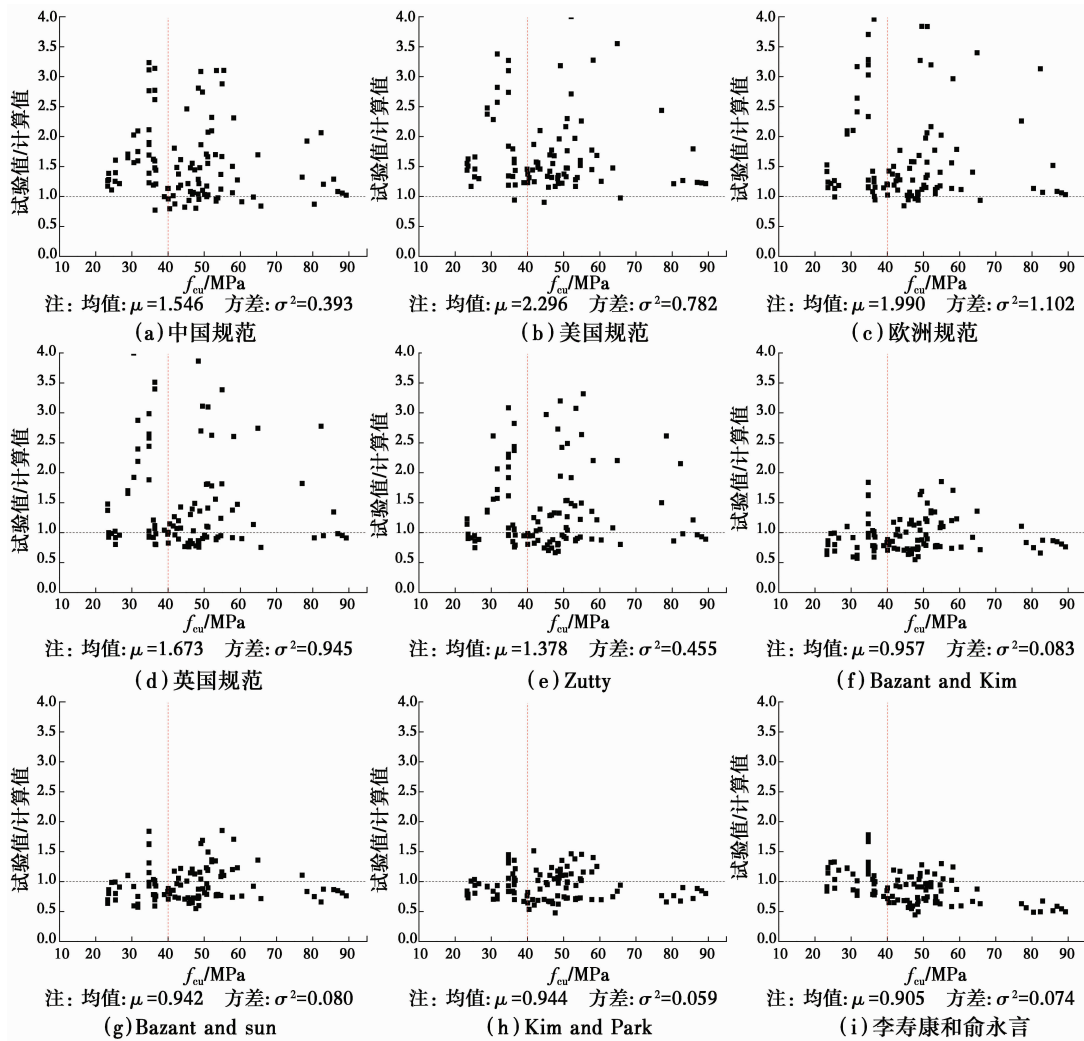


图 1 试验值与计算值对比

4 对比分析

由表 2 和图 1 可见: 1) 各国规范建议公式所得计算结果较为安全, 各个统计模型计算值接近试验值, 吻合较好; 2) 各个统计模型计算结果表明: 轻骨料混凝土梁试验值小于计算值, 表明同等参数条件下, 轻骨料混凝土梁受剪承载力略低于普通混凝土梁; 3) 由各国规范计算结果可见, 高强轻骨料混凝土梁试验值与计算值的比值较低强度轻骨料混凝土梁有所减小, 同时, 采用各个统计模型所得的低强度轻骨料混凝土梁的比值高于高强轻骨料混凝土梁计算结果, 因而, 随着混凝土强度的提高, 轻骨料混凝土梁的受剪承载力提高幅度减小; 4) 由表 2 最后一列对比发现, 采用中国规范和美国规范对高强轻骨料混凝土梁受剪承载力计算时, 较低强度计算结果偏于不安全。因而, 采用中国规范对高强轻骨料混凝土

梁受剪能力进行计算和设计时, 应对混凝土项做进一步折减。

5 结论

1) 各国规范建议方法和典型统计模型分别能较好的用于轻骨料混凝土梁受剪设计与承载能力预测。

2) 同等参数条件下, 轻骨料混凝土梁受剪承载力略低于普通混凝土梁, 同时, 随着混凝土强度的提高, 轻骨料混凝土梁的受剪承载力提高幅度减小。

3) 分析表明: 采用我国规范对高强轻骨料混凝土梁受剪能力进行计算与设计时, 应对混凝土项做进一步折减。

参考文献:

[1] 刘作华, 卫纪德, 朱聘儒. 钢筋轻骨料混凝土有腹筋梁

- 抗剪强度的建议计算公式与分析[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1981(1): 48-65.
- [2] 邵永健, 朱聘儒, 顾万黎. 高强轻骨料混凝土梁承载力的研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(8): 86-88.
- [3] Salandra, Miguel, Shuaib H, et al. Shear capacity of High-Strength Lightweight Concrete Beams[J]. ACI Structural Journal, 1989, 86(6): 697-704.
- [4] British Standards Institution. BS 8110: Part 1: structural use of concrete, code of practice for design and construction [Z]. London: British Standards Institution, 1997.
- [5] 叶列平, 孙海林, 陆新征, 等. 高强轻骨料混凝土结构性能、分析与计算[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [6] 逮晔, 叶列平, 孙海林, 丁建彤. 高强轻骨料混凝土梁抗剪承载力的试验分析与计算[J]. 建筑结构, 2008, 38(05): 16-21.
- [7] 刘沐宇, 尹华泉, 丁庆军, 胡曙光. 高强轻集料钢筋混凝土梁抗剪性能试验[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(03): 46-48.
- [8] Ivey Don L, Buth E. Shear capacity of lightweight concrete beams [J]. ACI Journal, 1967, 64(10): 634-643.
- [9] Yasuo M, Akira I. Flexural and shear strength of reinforced high-strength lightweight concrete beams [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1986, 8: 267-274.
- [10] Clarke J. L. Shear strength of lightweight aggregate concrete beams: design to Bs 8110 [J]. Magazine of Concrete Research, 1987, 39(141): 205-213.
- [11] Thorenfeld E, Stemland H. Shear capacity of lightweight concrete beams without shear reinforcement [Z]. Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Kristiansand, Norway, 2000: 330-341.
- [12] Russo G, Somma G, Mitri D. Shear strength analysis and prediction for reinforced concrete beams without stirrups[J]. Structural Engineering, 2005, 131(1): 66-74.
- [13] Bazant Z P, Kim J K. Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams [J]. ACI Journal, 1984, 81(5): 456-468.
- [14] Bazant Z P, Sun H H. Size effect in diagonal shear failure: influence of aggregate size and stirrups[J]. ACI Material Journal, 1987, 84(4): 259-272.
- [15] Kim J K, Park Y D. Prediction of shear strength of reinforced concrete beams without Web reinforcement [J]. ACI Material Journal, 1996, 93(3): 213-222.
- [16] 李寿康, 喻永言. 钢筋混凝土简支梁考虑剪跨比的抗剪强度计算[J]. 同济大学学报, 1978, (1): 81-93.

(编辑 胡 玲)