

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2013.06.036

钢筋混凝土无腹筋梁受剪承载力尺寸效应研究

何龙军, 车 轶

(大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 利用有限元软件 DIANA 中基于断裂力学的有限元模型, 对钢筋混凝土无腹筋梁进行了非线性分析。在与试验结果进行对比分析的基础上, 选取了其中一组试件, 在更大尺寸下变换不同骨料粒径、混凝土强度、截面纵筋配筋率、剪跨比进行建模。通过数值计算, 分析了截面高度和骨料粒径对钢筋混凝土无腹筋梁受剪承载力的影响, 并且改进了我国混凝土规范无腹筋构件受剪承载力公式。结果表明: 最大骨料粒径的变化对无腹筋梁受剪承载力无明显影响; 梁的破坏剪应力随截面高度增加而降低, 但破坏剪应力的降低幅度随梁高的增大而逐渐减小; 改进后的无腹筋构件受剪承载力公式能较好反映大尺寸无腹筋构件尺寸效应的影响。

关键词: 钢筋混凝土无腹筋梁; 数值模拟; 非线性静力有限元分析; 受剪承载力; 尺寸效应

中图分类号: TU375.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2013)06—0171—05

Size Effect of Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Without Stirrups

HE Long-jun, CHE Yi

(College of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The finite element software DIANA was used in a finite element model based on fracture mechanics, and the nonlinear finite element was adopted to analyze the reinforced concrete beams without stirrups. Based on the comparison analysis with test results, a group of specimens in larger size were selected for modeling in different aggregate size, concrete strength, longitudinal reinforcement ratio and shear span. According to the numerical calculations, the influence of aggregate size and depth on the ultimate shear strength of reinforced concrete beams without stirrups was discussed, and the shear design method in the Code for Design of Concrete Structures (GB 50010 – 2010) for reinforced concrete members without stirrups was improved. The results indicate that the change of the maximum aggregate size has no significant impact on the failure shear stress of reinforced concrete beams without stirrups, and the failure shear stress is gradually reduced with the increase of depth, but the variation of the shear stress failure is decreased gradually with the increase of depth. The improved shear equation of the members without stirrups can well reflect the size effect for large members.

Keywords: reinforced concrete beam without stirrups; numerical simulation; nonlinear static finite element analysis; shear capacity; size effect

0 引 言

自 1967 年 Kani 通过钢筋混凝土无腹筋梁受剪试验发现^[1], 试件名义受剪承载力(受剪承载力 V 与截面有效面积 bh_0 的比值)随着截面高度的增加而减小, 即无腹筋梁的受剪承载力存在尺寸效应。近几十年来, 国内外学者对钢筋混凝土无腹筋梁受剪性能进行了许多研究^[2-4], 均表明无腹筋梁受剪

性能存在明显的尺寸效应, 即受剪承载力随着截面高度的增大而逐渐减小。Collins 等人^[5]对近几十年来的钢筋混凝土无腹筋构件的受剪试验研究进行了总结, 发现在收集到的试件中只有 1.2% 的试件有效截面高度大于 1 000 mm, 由于实验室条件的限制, 导致对大尺寸构件的尺寸效应研究尚不充分。随着一些大型公共建筑的构件尺寸越来越大, 有必要对大尺寸钢筋混凝土无腹筋梁受剪性能的尺寸效应进

行进一步研究。

本文采用 DIANA 软件中基于断裂力学的有限元模型对无腹筋梁受剪承载力的尺寸效应及骨料粒径影响进行了研究。首先对国内外几组大尺寸无腹筋梁和不同骨料粒径混凝土梁的试件进行分析,验证有限元模型的正确性。在此基础上,利用有限元模型对梁高及混凝土骨料粒径对无腹筋梁受剪承载力的影响进行研究,并建议了我国混凝土规范无腹筋构件受剪承载力公式的改进公式。

1 有限元模型

1.1 有限单元模型

混凝土采用 QU8CQ16M 八节点四边形平面应力单元模拟,钢筋采用埋入式杆单元模拟。钢筋和混凝土之间设置为理想粘结,无粘结滑移。钢筋的本构关系采用理想弹塑性的双直线模型,在多轴应力状态下满足 Von Mises 屈服准则。

混凝土采用全应变固定角裂缝模型。DIANA 软件提供了两种方法:全刚度折减和常刚度折减。本文采用常刚度折减方法,混凝土开裂后裂缝剪切刚度按下式计算:

$$G^c = \beta G \quad (1)$$

式中: G 为开裂前的剪切刚度; β 为剪切刚度折减系数,一般采用 $\beta = 0.2$ 。

1.2 混凝土材料本构关系

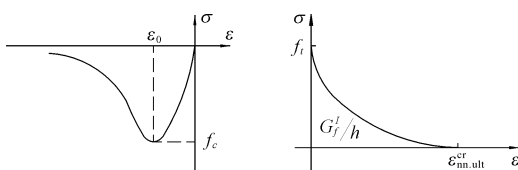
1.2.1 混凝土受压应力 - 应变关系

混凝土受压应力 - 应变关系采用 DIANA 手册中的 Thorenfeldt 曲线,如图 1(a)所示,该曲线方程为:

$$\sigma = -f_c \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \left(\frac{n}{n-1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^{nk}} \right) \quad (2)$$

其中, $n = 0.80 + \frac{f_{cu}}{17}$, $k = \begin{cases} 1 & 0 > \varepsilon > \varepsilon_0 \\ 0.67 + \frac{f_{cu}}{62} & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \end{cases}$,

f_c 为混凝土圆柱体抗压强度, ε_0 为相应的应变, f_{cu} 为立方体抗压强度。



(a) 受压应力-应变曲线

(b) 受拉指数软化模型

图 1 混凝土应力 - 应变曲线

1.2.2 混凝土受拉应力 - 应变曲线

混凝土受拉开裂前应力 - 应变关系采用线性,即:

$$\sigma = E\varepsilon, 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cr} \quad (3)$$

开裂后的应力 - 应变关系采用指数软化模型,如图 1(b)所示。该软化模型的本构关系为:

$$\frac{\sigma}{f_t} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{m,ult}^{cr}}\right)^{c_1} & 0 < \varepsilon < \varepsilon_{m,ult}^{cr} \\ 0 & \varepsilon_{m,ult}^{cr} < \varepsilon < \infty \end{cases} \quad (4)$$

其中, f_t 为混凝土圆柱体抗拉强度, $\varepsilon_{m,ult}^{cr}$ 为裂缝应变极限值, $\varepsilon_{m,ult}^{cr} = 4.226 \frac{G_f^I}{hf_t}$, 取 $c_1 = 0.31$, h 为断裂带带宽,一般取最大骨料粒径的 3 倍, G_f^I 为 I 型受拉断裂能。 G_f^I 可参照欧洲标准 CEB - FIP1990^[6] 的相关规定计算。

2 无腹筋试件的有限元分析

近年来,一些学者进行了大尺寸无腹筋梁受剪强度尺寸效应研究,先后完成了不同截面高度和不同骨料粒径无腹筋梁的受剪切破坏试验,本文采用上述有限元模型对试验进行分析,以验证数值模型分析该类问题的有效性。

2.1 大尺寸钢筋混凝土无腹筋梁受剪试验研究

2.1.1 试验概况

试验中无腹筋梁 B5N、B8N、B12N 采用三点加载方式, B6N、B10N 采用四点加载方式,如图 2 所示。试件采用 C30 商品混凝土浇筑,混凝土骨料最大粒径为 19 mm。试验参数和试验结果见表 1。有关试验详细情况参见文献[7]。

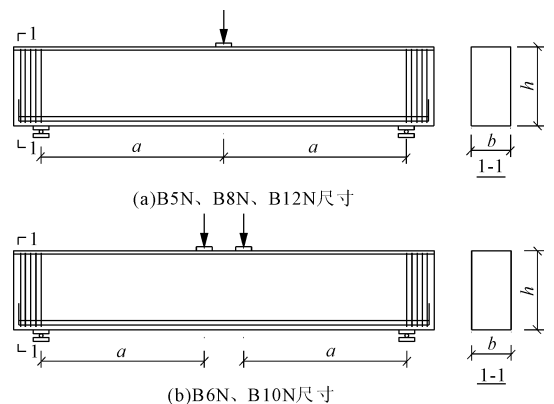


图 2 试件尺寸

2.1.2 有限元模型

根据试件的对称性,取试件的一半进行分析。不同尺寸试件的有限单元尺寸大致相等,约为 150

mm × 150 mm。图 3 给出了 B10N 和 B12N 试件的网 格剖分示意图。

表 1 试验参数以及计算结果与试验结果的对 比

试件编号	b/mm	h/mm	h_0/mm	a/h_0	f_{cu}/MPa	$\rho_s/\%$	a_g/mm	τ_{exp}/MPa	τ_{cal}/MPa	τ_{cal}/τ_{exp}
B5N	250	500	426	2.61	39.2	1.15	19	1.45	1.43	0.99
B6N	300	600	526	2.60	39.2	1.18	19	1.15	1.25	1.09
B8N	300	800	692	2.70	34.5	1.19	19	1.14	1.23	1.08
B10N	300	1000	892	2.56	42.8	1.10	19	1.07	1.15	1.07
B12N	600	1200	1092	2.55	42.8	1.11	19	0.86	0.84	0.98

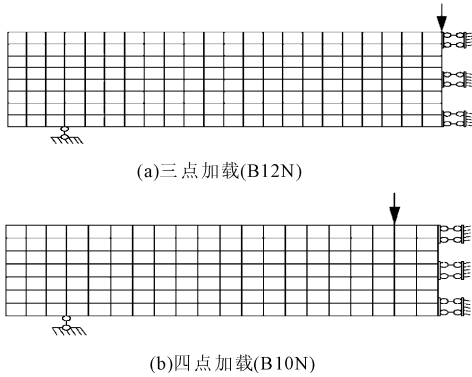


图 3 网格划分

2.1.3 分析结果

各试件的破坏剪应力计算结果与试验结果 的比较列于表 1。图 4 为典型试件在破坏时的裂 缝分布及有限元分析的裂缝图对比,图 5 为各 试件的荷载 - 跨中挠度曲线的计算结果与试 验结果比较。由上述结果求得 τ_{cal}/τ_{exp} 平均 值为 1.04, 变异系数为 0.05, 试件的破坏剪 应力有限元计算值和试验值吻合较好。有限 元分析得到的裂缝分布与实际接近, 计算的 荷载 - 挠度曲线也与试验结果基本接近, 说 明采用本文的有限元模型能够较好地模拟 无腹筋梁的剪切破坏性能。

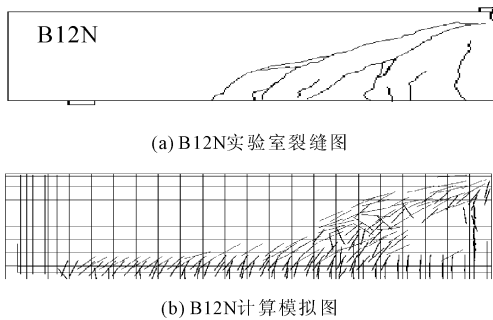


图 4 裂缝对比图

2.2 多伦多大学试验

2.2.1 试验概况

多伦多大学完成的一组试验试件的参 数如表 2。其中 BN 系列试件主要用于考查 梁截面有效高

度对试件受剪承载力的影响,S - N 系列试 件主要用于考查混凝土骨料粒径对受剪承 载力的影响,其余参数保持不变。试验的 详细情况参见文献[8 - 9]。

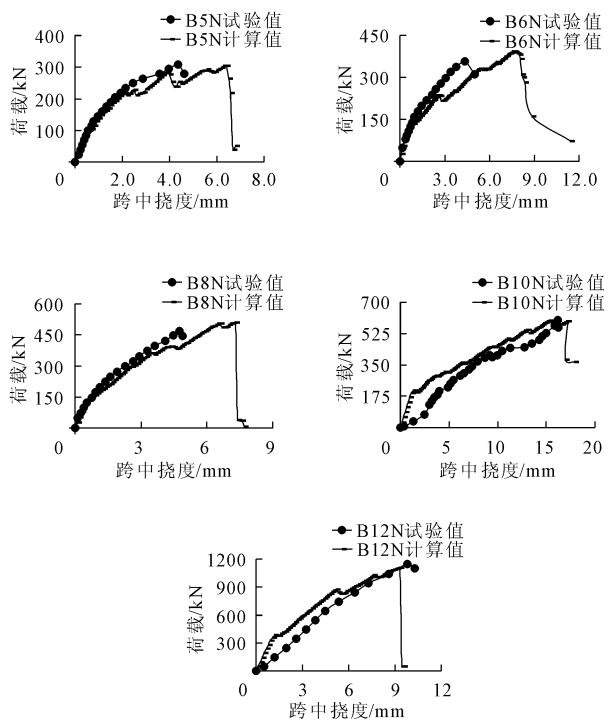


图 5 荷载 - 跨中挠度曲线

2.2.2 分析结果

采用本文的有限元模型对两组试件进 行分析,破坏剪应力计算结果与试验结果 的比较见表 2, 两组试件的 τ_{cal}/τ_{exp} 平均 值分别为 1.11、1.02, 变异系数分别为 0.09、0.07。由此可见,有限元模型能较 好地模拟尺寸效应对试件受剪承载力的 影响,以及骨料粒径对构件受剪承载力 的影响。

3 大尺寸无腹筋梁受剪承载力分析

由于受实验室条件限制,大尺寸梁的 抗剪试验较少,此外目前针对混凝土骨 料粒径大小对无腹筋梁尺寸效应影响的 试验研究尚不充分,因此采用本文的 有限元模型对截面高度和骨料粒径对 无腹筋梁

受剪承载力的影响开展进一步研究。

表 2 计算结果与试验结果的对比

试件编号	b/mm	h/mm	h_0/mm	a/h_0	f'_c/MPa	$\rho_s/\%$	a_g/mm	$\tau_{\text{exp}}/\text{MPa}$	$\tau_{\text{cal}}/\text{MPa}$	$\tau_{\text{cal}}/\tau_{\text{exp}}$
BN12	300	125	110	3.07	37.2	0.91	10	1.23	1.45	1.17
BN25	300	250	225	3.00	37.2	0.89	10	1.11	1.37	1.23
BN50	300	500	450	3.00	37.2	0.81	10	1.02	1.10	1.08
BN100	300	1000	925	2.92	37.2	0.76	10	0.77	0.75	0.97
S-10N1	122	330	280	2.89	41.9	0.83	9.5	1.07	1.20	1.12
S-10N2	122	330	280	2.89	41.9	0.83	9.5	1.12	1.20	1.07
S-20N1	122	330	280	2.89	39.2	0.83	19	1.14	1.10	0.96
S-20N2	122	330	280	2.89	38.1	0.83	19	1.12	1.10	0.98
S-40N1	122	330	280	2.89	29.1	0.83	38	1.22	1.11	0.91
S-40N2	122	330	280	2.89	29.1	0.83	38	1.02	1.11	1.09

注:表 1、表 2 中 b 、 h 、 h_0 、 a/h_0 分别为试件宽度、高度、有效高度、剪跨比; f'_{cu} 、 f'_c 、 ρ_s 、 a_g 分别为混凝土立方体抗压强度、圆柱体抗压强度、纵筋配筋率、最大骨料粒径; τ_{exp} 、 τ_{cal} 分别为试件的试验破坏剪应力、有限元计算受剪承载力。

3.1 骨料粒径对受剪承载力的影响

在文献[7]的试验数据基础上,分别考虑骨料粒径为 8 mm、16 mm 和 32 mm 以及梁高为 500 mm ~ 3 000 mm 的情况。有限元计算结果见表 3,结果表

明:当截面高度较小时,骨料粒径对受剪承载力产生微小的离散性影响,当截面高度较大时,骨料粒径对受剪承载力无明显影响。

表 3 有限元计算结果

试件编号	b/mm	h/mm	h_0/mm	a/h_0	f_{cu}/MPa	$\rho_s/\%$	τ_u/MPa ($a_g = 8$)	τ_u/MPa ($a_g = 16$)	τ_u/MPa ($a_g = 32$)
B5N	250	500	440	2.60	30.1	1.10	1.59	1.57	1.60
B6N	300	600	540	2.60	30.1	1.10	1.46	1.47	1.44
B8N	300	800	740	2.60	30.1	1.10	1.09	1.07	1.10
B10N	300	1000	940	2.60	30.1	1.10	0.92	0.93	0.93
B12N	600	1200	1140	2.60	30.1	1.10	0.78	0.75	0.77
B15N	800	1500	1440	2.60	30.1	1.10	0.66	0.66	0.66
B18N	800	1800	1740	2.60	30.1	1.10	0.56	0.55	0.55
B21N	800	2100	2040	2.60	30.1	1.10	0.48	0.49	0.48
B24N	800	2400	2340	2.60	30.1	1.10	0.43	0.42	0.43
B27N	1000	2700	2640	2.60	30.1	1.10	0.38	0.38	0.38
B30N	1000	3000	2940	2.60	30.1	1.10	0.38	0.38	0.38

3.2 截面高度对受剪承载力的影响

在文献[7]的试验数据基础上,考虑截面高度变化范围为 500 mm ~ 3 000 mm 的情况,并且剪跨比 a/h_0 分别取 2.00、2.60,混凝土强度 f_{cu} 分别取 30.1 MPa、50.1 MPa,纵向钢筋配筋率 ρ_s 分别取 1.10%、1.50%,采用本文的有限元模型进行分析,结果见图 6。

由图 6 可见,当其他条件相同时,梁的破坏剪应力随着截面高度的增加呈现明显的降低趋势,并且随着梁高度的增加,降低幅度逐渐减小。例如,在 $a/h_0 = 2.60$, $f_{cu} = 30.1$, $\rho_s = 1.10\%$ 的情况下,截面高度从 500 mm 增大到 1 200 mm 时,破坏剪应力降

低 51%;截面高度从 1 200 mm 增大到 3 000 mm,破坏剪应力只继续降低约 24%。

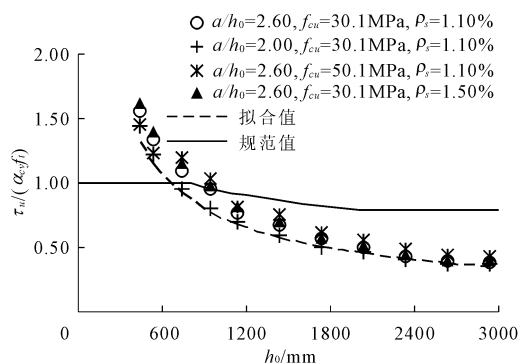


图 6 数值计算值与规范值比较

3.3 有限元计算结果与 GB 50010-2010 规范公式计算结果比较

混凝土设计规范 GB 50010-2010 给出了统一形式的无腹筋构件受剪设计公式^[10]:

$$\tau_c = \frac{V_c}{bh_0} = \alpha_{ct}\beta_h f_t \quad (5)$$

式中: $\beta_h = (800/h_0)^{1/4}$,当 $h_0 < 800$ mm时,取 $h_0 = 800$ mm,当 $h_0 > 2000$ mm时,取 $h_0 = 2000$ mm。

图6给出了按照规范公式的计算结果。由图6可见,规范中的尺寸效应系数 β_h 不能很好地反映截面高度对大尺寸试件受剪承载力的影响,当截面有效高度在1000 mm以内时,规范偏于安全,当截面有效高度超过1000 mm后规范偏于不安全,且随着截面高度的增加,严重高估其受剪承载力的程度在增加。因此规范公式需要进一步改进。

3.4 GB 50010-2010 规范公式的改进

考虑到和规范公式保持形式上的一致,本文采用如下的公式形式:

$$\tau_c = \frac{V_c}{bh_0} = \frac{1.75}{a/h_0 + 1} \left(\frac{x_1}{h_0} \right)^{x_2} f_t \quad (6)$$

采用 Levenberg-Marquardt 算法对上述计算结果(图6中的四组有限元计算值)进行多元回归分析,同时考虑到规范公式计算的安全性,偏于保守取下限数据点,得到改进后的公式如下:

$$\tau_c = \frac{V_c}{bh_0} = \frac{1.75}{a/h_0 + 1} \left(\frac{650}{h_0} \right)^{0.7} f_t \quad (7)$$

有限元计算值与改进公式计算值的比较见图6。有限元计算值与改进公式计算值的平均值分别为:1.14、1.04、1.23、1.18,变异系数分别为:0.05、0.03、0.07、0.06。可见式(7)能较好反映大尺寸无腹筋构件尺寸效应的影响。

4 结 论

(1) 采用本文的有限元模型对大尺寸无腹筋梁试验进行模拟,计算结果与试验结果吻合良好,说明采用本文的有限元模型对该类问题进行分析是可行的。

(2) 对于大尺寸无腹筋梁,结果表明最大骨料粒径的变化对无腹筋梁受剪承载力无明显影响。

(3) 试验与数值分析均表明,无腹筋梁的受剪承载力存在明显的尺寸效应,即梁的破坏剪应力随

截面高度增加而降低。梁高500 mm~3000 mm的数值分析结果表明,破坏剪应力的降低幅度随梁高的增大而逐渐减小。

(4) 我国混凝土规范无腹筋构件受剪承载力公式中的截面高度影响系数 β_h 尚不能充分反映尺寸效应影响。当截面有效高度在1000 mm以内时,规范偏于安全,当截面有效高度超过1000 mm后规范偏于不安全,且随着截面高度的增加,严重高估其受剪承载力的程度在增加。

(5) 本文在数值分析的基础上,对我国规范公式中的截面高度影响系数 β_h 进行了改进,改进后的公式能较好反映大尺寸无腹筋构件尺寸效应的影响。

参考文献:

- [1] Kani G N J. How safe are our large reinforced concrete beams[J]. ACI Journal Proceedings, 1967, 64(3): 128-141.
- [2] Bazant Z P, Kim J K. Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams[J]. ACI Journal, 1984, 84-38: 456-465.
- [3] Bazant Z P, Sun H H. Size effect in diagonal shear failure: influence of aggregate and stirrups[J]. ACI Materials Journal, 1987, 84-M27: 259-271.
- [4] Collins M P, Kuchma D. How safe are our large, lightly reinforced concrete beams, slabs and footings? [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(4): 482-490.
- [5] Collins M P, Bentz E C, Sherwood E G. Where is shear reinforcement required? A review of research results and design procedures[J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(5): 590-600.
- [6] CEB-FIP Model Code 1990[S]. CEB: CE Bull, July, 1991.
- [7] 于磊,车轶,宋玉普.大尺寸钢筋混凝土无腹筋梁受剪试验研究[J].土木工程学报,2013,46(1): 1-7.
- [8] Yoshida Y. Shear reinforcement for large lightly reinforced concrete members [D]. Toronto, University of Toronto, Canada, 2000: 11-14.
- [9] Sherwood E G. One-way Shear Behavior of Large, Lightly-Reinforced Concrete Beams and Slabs [D]. Toronto, Canada: University of Toronto, 2008: 159-165.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.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.