

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.04.015

635 MPa 级热轧高强钢筋普通混凝土梁 抗剪性能试验研究

叶帆¹, 刘用^{1,2}, 王静峰^{1,2}, 沈奇罕^{1,2}, 丁兆东^{1,2}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:为研究 635 MPa 级热轧高强钢筋混凝土梁的抗剪性能, 文章选取 9 根试件进行抗剪试验, 得到不同参数对试件抗剪承载力的影响规律。结果表明: 试件抗剪承载力随着试件剪跨比的减小, 混凝土强度、纵筋强度、箍筋强度以及箍筋配箍率的增大而提升; 随着试件剪跨比的减小, 试件剪切延性会变差, 而随着混凝土强度、纵筋和箍筋强度以及箍筋配箍率的增大, 试件的剪切延性也随之增强。基于现行规范中钢筋混凝土梁抗剪承载力计算方法, 计算 635 MPa 级热轧高强钢筋混凝土梁抗剪承载力, 并与试验结果进行对比, 结果表明我国规范高估了 635 MPa 高强钢筋混凝土梁的抗剪承载力, 但用于设计时仍有一定安全度, 而美国规范对高强钢筋混凝土梁抗剪承载力的预测结果偏于保守。在我国规范抗剪承载力计算方法的基础上, 考虑纵筋影响和高强箍筋与混凝土匹配性, 提出了修正的抗剪承载力计算方法, 其计算结果准确度较高。该研究结果为 635 MPa 级高强钢筋混凝土梁在实际工程中的应用提供了理论依据。

关键词:635 MPa 级热轧高强钢筋; 抗剪性能; 剪切延性; 承载力计算方法

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)04-0538-09

Experimental study on shear performance of reinforced concrete beams with 635 MPa hot-rolled high-strength steel bars

YE Fan¹, LIU Yong^{1,2}, WANG Jingfeng^{1,2}, SHEN Qihan^{1,2}, DING Zhaodong^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to study the shear performance of reinforced concrete beams with 635 MPa hot-rolled high-strength steel bars, nine specimens are selected for shear tests and the influence of different parameters on the shear capacity of the specimens is obtained. The research results indicate that the shear capacity of the specimen increases with the decrease of the shear span ratio of the specimen and the increase of the concrete compressive strength, longitudinal reinforcement strength, stirrup strength and stirrup ratio. As the shear span ratio of the specimen decreases, the shear ductility of the specimen will deteriorate; however, as the concrete compressive strength, longitudinal reinforcement strength, stirrup strength and stirrup ratio increase, the shear ductility of the specimen will also increase. The shear capacity of reinforced concrete beams with 635 MPa hot-rolled high-strength steel bars was calculated based on the current specifications and compared with the tested results. It is shown that the Chinese standard overestimates the shear capacity of reinforced concrete beams with 635 MPa high-strength steel bars, but there is still a certain degree of safety when used in design. The

收稿日期:2023-11-24; **修回日期:**2024-01-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52108130); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0838)

作者简介:叶帆(1996—), 男, 安徽无为, 合肥工业大学硕士生;

刘用(1991—), 男, 安徽淮北, 博士, 合肥工业大学讲师, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: yongliu@hfut.edu.cn;

王静峰(1976—), 男, 安徽合肥, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师。

US standard tends to be conservative for predicting the shear capacity of reinforced concrete beams with 635 MPa high-strength steel bars. Finally, based on the Chinese standard, considering the influence of longitudinal reinforcement and the compatibility between high-strength stirrups and concrete, a revised shear capacity calculation method for reinforced concrete beams with 635 MPa high-strength steel bars is proposed, and the calculated results agree well with the test results. This research provides a theoretical basis for the application of reinforced concrete beams with 635 MPa high-strength steel bars in practical engineering.

Key words: 635 MPa hot-rolled high-strength steel bars; shear performance; shear ductility; shear capacity calculation method

近年来,有关节能减排的呼声越来越高,建筑行业作为能源消耗较高的行业面临着巨大压力,而钢筋混凝土结构作为建筑行业最为普遍的结构形式更是首当其冲。使用高强纵筋和箍筋作为钢筋骨架,可有效提高构件的承载力,降低构件的截面面积,减少建筑材料的使用,对实现节能减排、绿色环保具有重要的战略意义^[1]。

作为主要的水平受力构件,高强钢筋混凝土梁是高强钢筋的主要应用形式之一。目前,针对高强钢筋混凝土梁受弯性能的研究较多,已有研究分析了600 MPa级高强钢筋与混凝土的匹配性,提出了高强钢筋在应用规范公式时的强度折减系数^[2]。但是,目前针对高强钢筋混凝土梁抗剪性能的研究较少。文献[3]提出可反映梁抗剪能力的梁拱抗剪模型,研究HRB500级高强箍筋混凝土梁的抗剪承载力和变形能力,其结果表明,高强箍筋对梁的抗剪承载力和变形能力的影响并不显著;文献[4]开展6根HRB500级高强箍筋混凝土梁的抗剪试验,基于已有的试验数据提出了抗剪承载力强度计算公式;文献[5]开展6根HRB500级高强钢筋活性粉末混凝土简支梁的抗剪试验,研究表明剪跨比、配箍率和纵筋配筋率均可影响构件的抗剪性能,其中剪跨比的影响尤为明显;文献[6]对12根配置HRB500级高强箍筋的T形截面混凝土梁的抗剪斜裂缝进行了试验研究,结果表明混凝土强度、配箍率以及加载方式会影响斜裂缝的种类、分布和宽度,并验算国内规范抗剪斜裂缝宽度的计算公式;文献[7]开展19根HRB500级高强箍筋混凝土梁的抗剪试验研究,通过研究发现在剪跨比为3时,构件的3种破坏形态均有可能发生,且高强箍筋混凝土可较大程度上提高构件的剪切延性系数和抗剪承载力;文献[8]开展4根HRB600级钢筋混凝土梁的抗剪试验,结果表明我国现行规范计算梁的斜截面受剪承载力偏于保守,并且我国规范相比

于欧美规范,斜截面承载力的计算公式差异较大;文献[9]对9个配置HRB500级高强钢筋和普通强度钢筋的混凝土梁进行静力加载试验,结果表明高强钢筋对钢筋混凝土梁的抗剪性能有明显的提升效果,并且在一定程度上可抑制构件剪切裂缝的开展。由此可见,高强钢筋混凝土梁抗剪性能的研究主要集中在500 MPa及以下强度等级的高强钢筋,较少学者研究了600 MPa级高强钢筋与不同类型混凝土梁的抗剪性能,但没有考虑两者之间的匹配性,对600 MPa及以上强度等级的高强钢筋混凝土梁抗剪性能的研究还不够充分。

综上所述,本文开展了9根635 MPa级热轧高强钢筋混凝土梁抗剪性能试验,深入研究试件的剪跨比、混凝土强度、纵筋强度、箍筋强度以及箍筋配箍率等参数对试件抗剪承载力的影响规律。在分析我国与美国规范钢筋混凝土梁抗剪承载力计算方法适用性的基础上,考虑纵筋影响和高强钢筋与混凝土的匹配性,提出了修正的抗剪承载力计算方法,为其在实际工程的推广应用提供了理论依据。

1 试验方案

1.1 试件设计

本文抗剪试验共设计9个试件,标准试件尺寸与配筋构造如图1所示。试件截面尺寸均为150 mm×300 mm,梁长为2 800 mm。箍筋直径均为8 mm,纵筋直径均为14 mm,其中所有试件的上排架立钢筋均使用HRB400级普通钢筋。混凝土保护层厚度为25 mm,支座的支承中心到试件边缘的距离为200 mm。

试验参数主要包括混凝土强度、梁剪跨比、纵筋强度、箍筋强度和箍筋间距等,试件参数信息见表1所列。表1中:P表示HRB400级普通钢筋;R表示HRB635级高强钢筋。

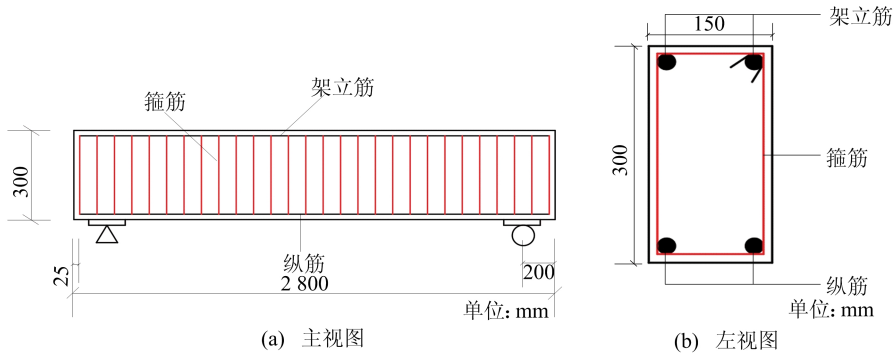


图 1 试件示意图

表 1 试件基本参数

试件编号	混凝土强度等级	剪跨比	架立筋	箍筋	纵筋	配箍率/%
CBS-01	C40	1.2	2P14	R8@100	2R14	0.67
CBS-02	C50	1.2	2P14	R8@100	2R14	0.67
CBS-03	C50	1.0	2P14	R8@100	2R14	0.67
CBS-04	C50	2.0	2P14	R8@100	2R14	0.67
CBS-05	C50	2.0	2P14	P8@100	2R14	0.67
CBS-06	C50	2.0	2P14	R8@100	2P14	0.67
CBS-07	C50	1.5	2P14	R8@100	2R14	0.67
CBS-08	C50	1.0	2P14	R8@80	2R14	0.84
CBS-09	C50	1.0	2P14	R8@120	2R14	0.56

1.2 材性试验

试验主要材料为混凝土和钢筋,混凝土强度等级包括 C40 和 C50。为测定混凝土的力学性能,每种强度等级的混凝土在浇筑试件的同时预留 3 个 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试块,并进行同等条件的养护。按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)^[10] 规定,得到立方体抗压强度后,经计算得到试块的轴心抗压强度和抗拉强度,计算公式为:

$$f_{cm} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,m} \quad (1)$$

$$f_{tm} = 0.395f_{cu,m}^{0.55} \quad (2)$$

其中: $f_{cu,m}$ 为混凝土立方体抗压强度实测值; f_{cm} 为混凝土轴心抗压强度实测值; f_{tm} 为混凝土轴心抗拉强度实测值; α_{c1} 为混凝土棱柱体与立方体抗压强度之间的比值,取为 0.76; α_{c2} 为高强混凝土的脆性折减系数,取为 1.00。混凝土具体的材料性能见表 2 所列。

表 2 混凝土材料性能

混凝土强度等级	$f_{cm}/$ MPa	$f_{cu,m}/$ MPa	$f_{tm}/$ MPa	弹性模量/ MPa
C40	31.2	46.6	2.39	32 600
C50	36.9	57.1	2.64	34 800

为获取试验中钢筋的力学性能,根据《金属材

料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[11] 规定对试验所用钢筋取样并进行拉伸试验。测得的钢筋屈服强度、抗拉强度、弹性模量见表 3 所列。

表 3 钢筋材料性能

钢筋种类	直径/mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ (10^5 MPa)
HRB635	8	631.40	841.19	2.01
	14	641.50	885.25	2.05
HRB400	8	407.51	552.61	2.00
	14	417.29	575.12	2.00

1.3 加载方案与测量方案

试验装置如图 2 所示。试验采用液压千斤顶进行加载,并使用分配梁分荷,用于模拟施加于梁两侧的集中荷载。试验前先进行预加载,确保仪器正常工作并消除加载装置中的间隙,然后估算试件的极限承载力,并采用分级加载制度进行加载,在达到估算极限承载力的 50% 前,每级施加的荷载为估算的极限承载力的 10%,当荷载值达到估算值的 50% 后,每级施加的荷载为估算值的 5%。在试验后期,试件的裂缝急剧开展,液压千斤顶继续加载,但是压力传感器的示数不再增加甚至有所减小,当外荷载低于极限承载力 85%

时,可视为试件已经完全失效,并立即停止加载。

本试验的测量内容主要包括施加荷载、试件变形和箍筋应变。试验中位移计的布置方案为:2个支承点处各布置1个,用于测量支座处的虚位移;跨中处、加载点处以及跨中与加载点的中间处各布置1个,用于测量试件该处的变形。每个试件在箍筋上共布置6个应变片,在试件两侧的加载点、支承点以及支承点与加载点连线中点处分别布置3个应变片。试件的位移计及应变片布置如图2、图3所示。

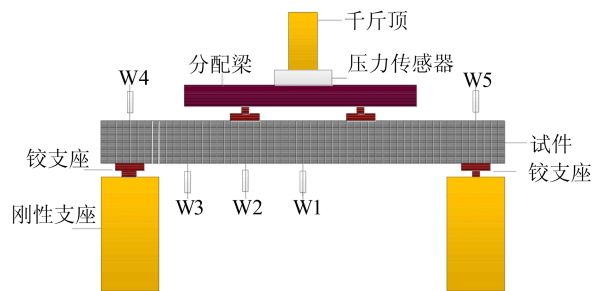


图2 试验装置示意图

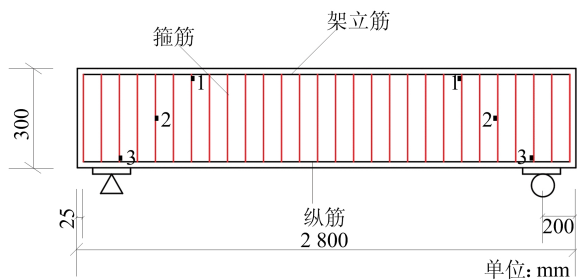


图3 钢筋笼应变片分布图

2 试验现象与破坏模式

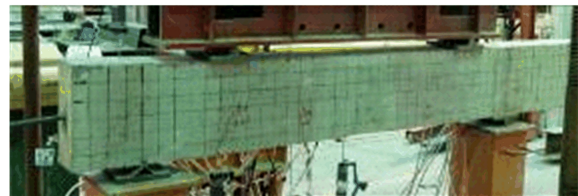
在竖向荷载的作用下,各试件的破坏模式基本相同,发生的破坏均为剪压破坏,本文以标准试件 CBS-02 为例介绍试件不同加载时期的破坏情况如图4所示。在试件加载初期,整个试件处于弹性阶段,试件表面没有裂缝出现(图4a)。当加载到75 kN时,在试件2个加载点间的纯弯段出现竖向裂缝,该竖向裂缝出现于梁纯弯段的底部,且迅速发展超过梁高中间的位置(图4b)。当加载到92 kN时,试件加载点到支承点的剪跨区开始出现腹剪斜裂缝。随着荷载的继续施加,斜裂缝不断开展并且斜裂缝周边出现小斜裂缝,且宽度不断增加(图4c)。

当加载到140 kN时,左侧加载点附近出现3条明显裂缝。在加载到260 kN时,突然发生响

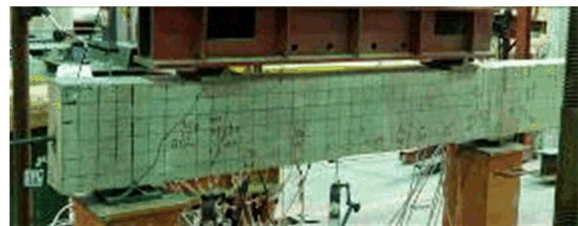
声,试件的承载力突然下降,左侧加载点处混凝土被压碎,部分微小裂缝依然可以闭合(图4d)。继续加载,竖向裂缝和斜向裂缝延伸在一起,宽度不断增大。最后试件承载力下降到最大承载力85%左右时,斜裂缝贯穿,加载点处混凝土出现剥落,试件破坏,停止加载,此时破坏形态如图4e所示。



(a) 加载前期



(b) 纯弯段竖向裂缝



(c) 剪跨区斜裂缝



(d) 峰值荷载时裂缝分布



(e) 下降到85%时承载力裂缝分布

图4 CBS-02 试件不同加载时期的破坏情况

不同配箍率的试件承载力下降到最大承载力85%时,所对应的破坏形态如图5所示,可以看出,试件 CBS-07、CBS-08 和 CBS-09 剪跨区的斜

裂缝数量呈现递增的趋势,这可能是由于配箍率较高的试件,其箍筋间距更小,因此对混凝土的约束作用更强,使得斜裂缝分布更加均匀。



(a) 试件CBS-07破坏图



(b) 试件CBS-08破坏图



(c) 试件CBS-09破坏图

图 5 不同试件破坏示意图

3 荷载-挠度曲线及剪切延性

3.1 荷载-挠度曲线整体分析

635 MPa 热轧高强钢筋混凝土梁抗剪的荷载-挠度曲线主要包括:① 弹性阶段,钢筋和混凝土基本处于弹性阶段,混凝土基本未开裂,一些细

微小裂缝在卸载后,也可以迅速闭合,试件的刚度几乎没有发生变化,荷载-挠度曲线呈线性关系;② 弹塑性阶段,随着加载的不断进行,混凝土因为其抗拉性能较弱,受拉区混凝土开裂,受拉区纯弯段出现竖向裂缝,使得试件刚度降低,但因为试件的挠度和裂缝宽度发展稳定,所以荷载-挠度曲线仍近似呈线性关系,直到试件达到峰值承载力;③ 下降阶段,试件在达到峰值承载力之后,荷载-挠度曲线迅速下降,但是由于箍筋的套箍作用,在一定程度上延缓了曲线的下降,提高了试件的延性。

3.2 荷载-挠度曲线影响因素分析

各个试件的荷载-挠度曲线及极限承载力如图 6 所示。

由图 6a 可知,在试件加载初期,两试件初始刚度大致相等,荷载跨中挠度曲线变化规律类似。可以明显看出,试件 CBS-01 率先达到开裂荷载,进入到弹塑性阶段,这是因为 CBS-01 混凝土强度低,抗拉强度较小,所以更早发生开裂。整个加载过程中,试件 CBS-02 的极限承载力相比于试件 CBS-01 提升了 4.23%,这是由于混凝土强度提高得并不大,故其极限承载力提高得并不明显。加载结束后,可以看出试件 CBS-02 跨中挠度明显高于试件 CBS-01。这说明高强钢筋在搭配强度等级更高的混凝土时,可提高试件的延性。

由图 6b 可知,相比于混凝土强度,箍筋强度的改变对试件承载力的影响更加明显。使用高强钢筋作为箍筋的试件 CBS-04 极限承载力相比于试件 CBS-05 提高了 37.79%。这是由于试件的剪力主要是由箍筋承担,提高箍筋强度可显著提高箍筋承担的剪力。

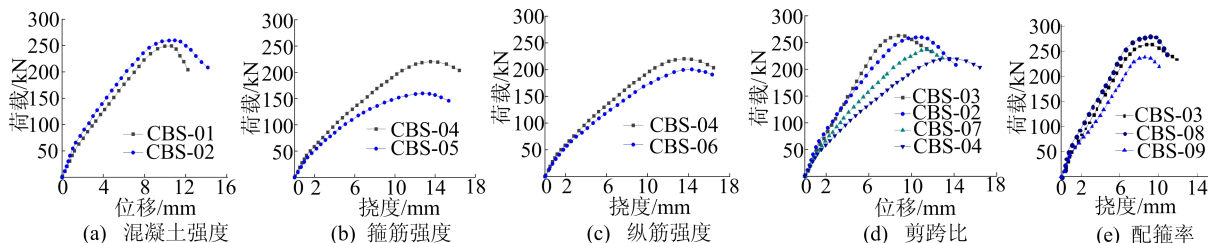


图 6 试件荷载-挠度曲线

由图 6c 可知,相较于试件 CBS-04,试件 CBS-06 只是将纵筋换成了 400 MPa 的普通钢筋。相比之下,试件 CBS-04 极限承载力比试件 CBS-06 提高了 9.84%。这是由于试件在抗剪切过程中,纵筋起到的销栓作用可以提高试件的承载力^[10],但是

相比于箍筋,其提升抗剪承载力的程度相对较小。

由图 6d 可知,试件剪跨比越低,其抗剪承载力就越高。相比于剪跨比为 2.0 的试件 CBS-04,剪跨比为 1.5、1.2、1.0 的试件 CBS-07、CBS-02、CBS-03 的抗剪承载力分别提高 7.4%、18.0%、19.4%。

由图 6e 可知,试件 CBS-09 的配箍率(即箍筋间距)为 0.56%,试件 CBS-03、CBS-08 配箍率分别为 0.67%、0.84%。与试件 CBS-09 相比,试件 CBS-03、CBS-08 的抗剪承载力分别提高 10.2%、16.8%。这是由于试件在相同剪跨区内配置的箍筋数量越多,箍筋提供的剪力越大。

3.3 剪切延性及其分析

为探究混凝土梁的剪切延性,本文引入剪切延性系数这一指标来进行描述。参照受弯构件延性的计算方法,本文引入 2 个剪切延性系数^[12],计算式为:

$$\mu_1 = \Delta_u / \Delta_y, \quad \mu_2 = A_u / A_y \quad (3)$$

其中: Δ_u 为荷载下降段中 $0.85P_{\max}$ 对应的挠度; Δ_y 为梁初始屈服点 Y 所对应的挠度; A_u 为荷载下降至 $0.85P_{\max}$ 的荷载-挠度曲线与挠度轴围成的面积; A_y 为初始屈服点 Y 和原点间的荷载-挠度曲线与挠度轴围成的面积。

初始屈服点 Y 可通过几何作图法^[13]来确定:过原点 O 作出荷载-挠度曲线的切线 OA 交峰值荷载的水平线于点 A,作点 A 平行于荷载轴的垂线交曲线于点 B,连接 OB 交水平线于点 C,过点 C 作挠度轴的垂线,交曲线于点 Y,点 Y 即为初始屈服点,如图 7 所示。

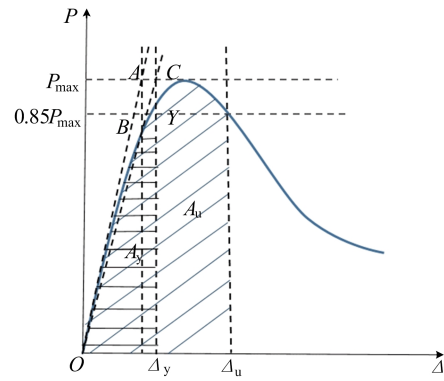


图 7 剪切延性系数定义示意图

根据式(3)以及试验结果,得出本试验梁的剪切延性系数,结果见表 4 所列。

由表 4 可知,剪跨比从 1.0 增加到 1.2、1.5、2.0 时, μ_1 从 1.84 增加到 1.94、2.13、2.47,分别提高了 5.43%、15.80%、34.20%, μ_2 从 2.43 增加到 2.59、3.05、3.24,分别提高了 6.60%、25.50%、33.30%。

随着剪跨比的增大, μ_1 和 μ_2 均有一定程度的提高。这主要是由于构件的剪跨比越高,试验梁开裂的斜裂缝长度就越大,克服混凝土间黏聚力所消耗的能量也就越大,使得构件的剪切延性更高。

表 4 635 MPa 高强钢筋混凝土梁剪切延性系数

试件编号	混凝土强度等级	纵筋强度/MPa	箍筋强度/MPa	配箍率/%	剪跨比	Δ_u /mm	Δ_y /mm	μ_1	μ_2
CBS-09	C50	635	635	0.56	1.0	10.5	6.5	1.62	2.19
CBS-03	C50	635	635	0.67	1.0	12.0	6.5	1.84	2.43
CBS-08	C50	635	635	0.84	1.0	12.3	5.9	2.08	2.73
CBS-02	C50	635	635	0.67	1.2	13.4	6.9	1.94	2.59
CBS-01	C40	635	635	0.67	1.2	13.1	7.2	1.82	2.47
CBS-07	C50	635	635	0.67	1.5	16.1	7.6	2.13	3.05
CBS-04	C50	635	635	0.67	2.0	18.3	7.4	2.47	3.24
CBS-05	C50	635	400	0.67	2.0	17.2	7.8	2.21	2.98
CBS-06	C50	400	635	0.67	2.0	18.9	8.1	2.34	3.12

箍筋的配箍率从 0.56% 增加到 0.67%、0.84% 时, μ_1 从 1.62 增加到 1.84、2.08,分别提高了 13.60%、28.40%, μ_2 从 2.19 增加到 2.43、2.73,分别提高了 10.96%、24.70%。由此可见,配箍率的提升可有效提高 μ_1 和 μ_2 的大小。这是由于在混凝土梁斜裂缝出现之后,主要由箍筋承担试件的剪力,并且约束住混凝土,抑制混凝土的进一步开裂,提高了构件的延性。

箍筋和纵筋强度等级的提升,在一定程度上也

可改善构件的剪切延性。当纵筋强度等级从 400 MPa 提升到 635 MPa, μ_1 从 2.34 提高到 2.47,提高了 5.60%, μ_2 从 3.19 提高到 3.24,提高了 3.84%。当箍筋强度等级从 400 MPa 提升到 635 MPa, μ_1 从 2.21 提高到 2.47,提高了 11.80%, μ_2 从 2.98 提高到 3.24,提高了 8.72%。相比于纵筋,箍筋对抑制斜裂缝的贡献更大,因此箍筋强度的提高对构件剪切延性的提升更加明显。

当混凝土强度等级从 C40 提升到 C50, μ_1 从

1.82提升到 1.94,提升了 6.60%, μ_2 从 2.47 提升到 2.59,提升了 4.90%。说明对于混凝土材料本身而言,强度增加会导致其脆性增大,但是梁构件延性会随之提高。这是由于混凝土强度的提升可增强混凝土与高强箍筋间的匹配性,在一定程度上提高了构件的延性。

4 荷载-箍筋应变规律

本文选取试件上加载点(测点 1)、加载点与支承点连线中点(测点 2)和支承点(测点 3)的应变数据,根据应变数据绘制出各试件的荷载-箍筋应变曲线如图 8 所示。

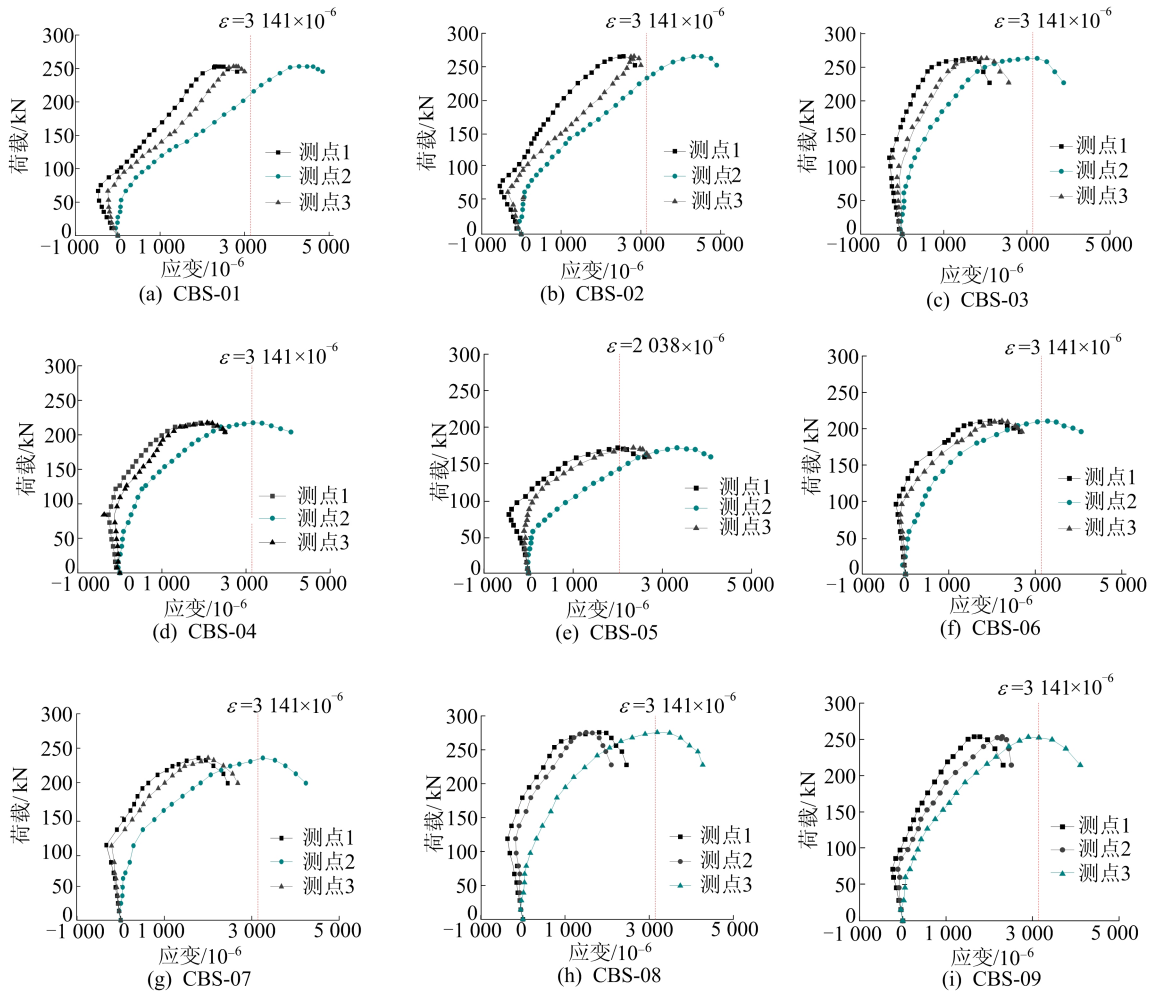


图 8 荷载-箍筋应变曲线

由图 8 可知,各试件的箍筋应变变化规律大致相似。在施加荷载相等的情况之下,测点 1 和测点 3 处箍筋的应变相对较小,而测点 2 处的箍筋应变则明显更大。这是因为测点 1 和测点 3 处的混凝土破坏较少,且应力主要是由混凝土承担,所以这 2 处箍筋所受荷载较小,其应变也就相对较小。而测点 2 处于箍筋与斜裂缝的交汇处,当混凝土开裂之后,试件在此处的抗剪角色主要是由箍筋来扮演。此处箍筋所受的应力较大,其应变相较于其他 2 处也就更大。

各个试件测点 2 处箍筋应变规律见表 5 所列,试件在达到最大承载力时,测点 2 处的箍筋应变 ϵ_2

与箍筋屈服应变 ϵ_1 的比值均大于 1,说明测点 2 处的箍筋在试件达到峰值承载力前已经完全屈服。

表 5 试件测点 2 箍筋应变

试件编号	$\epsilon_1/10^{-6}$	$\epsilon_2/10^{-6}$	$\epsilon_3/10^{-6}$	ϵ_2/ϵ_1	ϵ_3/ϵ_2
CBS-01	3 141	4 288	4 850	1.37	1.13
CBS-02	3 141	4 517	4 900	1.44	1.08
CBS-03	3 141	3 245	3 884	1.03	1.20
CBS-04	3 141	3 166	4 068	1.01	1.28
CBS-05	2 038	3 328	4 085	1.63	1.23
CBS-06	3 141	3 285	4 060	1.05	1.24
CBS-07	3 141	3 254	4 238	1.04	1.30
CBS-08	3 141	3 190	4 271	1.02	1.34
CBS-09	3 141	3 147	4 103	1.01	1.30

同时,试件承载力下降到最大承载力 85%时测点 2 处箍筋应变 ϵ_3 与最大承载力时箍筋应变 ϵ_2 的比值在 1.08~1.34 之间,说明试件在达到最大承载力后很快就发生破坏。此外,从图 8 可以看出,使用普通强度箍筋的 CBS-05 在试件破坏之前,3 个位置处的箍筋均发生屈服,这说明普通箍筋与混凝土的匹配性较好,箍筋在加载过程中完全发挥了效力。但可以看出使用高强箍筋的其他试件,测点 1 和测点 3 这 2 处的箍筋在试件破坏前均未屈服。由此可见,高强箍筋与混凝土的匹配性较差,在加载过程中并未完全发挥效力。而规范中对箍筋抗剪承载力的计算,一般是考虑箍筋已经完全屈服,因此按照规范来计算高强箍筋的抗剪承载力,可能与实际承载力有一定的偏差,故需要对现有规范进行进一步的修正。

5 抗剪承载力的计算

我国规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[15]中钢筋混凝土梁抗剪承载力计算式为:

$$V = \alpha_{cv} f_t b h_0 + f_{yv} (A_{sv}/s) h_0 \quad (4)$$

其中: α_{cv} 为斜截面受剪承载力系数,取 $1.75/(\lambda+1)$, λ 为构件计算截面的剪跨比, λ 可取为 a/h_0 ,当 $\lambda < 1.5$ 时 λ 均取 1.5,当 $\lambda > 3$ 时 λ 均取 3, a 为施加的集中荷载作用点处到支座截面的距离; f_{yv} 为箍筋的抗拉强度; f_t 为混凝土抗拉强度; b_0 为构件截面的宽度; h_0 为构件截面的有效高度; A_{sv} 为构件同一截面内各肢箍筋的全部截面面积,一般有 $A_{sv} = n A_{sv1}$, n 为同一截面内箍筋的肢数, A_{sv1} 为单肢箍筋的截面面积; s 为构件沿长度方向上的箍筋间距。

将钢筋和混凝土强度的实测值和设计值分别代入式(4),计算可得到钢筋混凝土梁的实际承载力计算值 V_{GB1} 和设计承载力计算值 V_{GB2} ,其结果见表 6 所列,其中 V_u 为试验实测抗剪承载力。 V_{GB1}/V_u 为 1.062~1.212,平均值为 1.114,变异系数为 0.046; V_{GB2}/V_u 为 0.801~0.924,平均值为 0.844,变异系数为 0.046。表明采用我国规范中钢筋混凝土梁抗剪承载力计算方法高估了 635 MPa 高强钢筋混凝土梁的抗剪承载力,但采用材料设计强度进行设计时仍具有一定安全储备。

表 6 抗剪承载力规范计算结果与试验结果对比

试件编号	V_u	V_{GB1}	V_{GB2}	V_{AC11}	V_{AC12}	V_1	V_2	V_{GB1}/V_u	V_{GB2}/V_u	V_{AC11}/V_u	V_{AC12}/V_u	V_1/V_u	V_2/V_u
CBS-01	237.16	251.81	191.58	211.40	177.68	237.16	179.71	1.062	0.808	0.891	0.749	1.000	0.758
CBS-02	240.81	261.38	196.65	215.73	181.34	240.02	179.05	1.085	0.817	0.896	0.753	0.997	0.744
CBS-03	245.39	261.38	196.65	215.73	181.34	243.82	182.24	1.065	0.801	0.879	0.739	0.994	0.743
CBS-04	218.94	246.26	187.76	215.73	181.34	218.94	164.98	1.125	0.858	0.985	0.828	1.000	0.754
CBS-05	158.27	185.65	141.74	155.12	135.32	165.33	124.01	1.173	0.896	0.980	0.855	1.045	0.784
CBS-06	203.25	246.26	187.76	215.73	181.34	214.77	161.66	1.212	0.924	1.061	0.892	1.057	0.795
CBS-07	240.12	261.38	196.65	215.73	181.34	235.46	175.22	1.089	0.819	0.898	0.755	0.981	0.730
CBS-08	276.15	304.10	232.51	258.45	217.20	271.71	205.73	1.101	0.842	0.936	0.787	0.984	0.745
CBS-09	235.13	261.38	196.65	215.73	181.34	225.23	166.58	1.112	0.836	0.917	0.771	0.958	0.708

美国规范 ACI 318—14^[16]中规定的钢筋混凝土梁抗剪承载力的计算公式为:

$$V_A = V_c^A + V_s^A \quad (5)$$

$$V_c^A = \left(0.16 \sqrt{f_c} + 17.2 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (6)$$

$$V_s^A = \frac{A_{sv} f_{yv}}{s} d \quad (7)$$

其中: f_c 为混凝土圆柱体抗压强度; ρ_w 为纵向钢筋配筋率; b_w 为腹板宽度; d 为从受压边缘纤维至纵向受拉钢筋重心的距离; V_u 为截面乘系数的剪力; M_u 为所考虑截面的乘系数的弯矩。而 V_c^A 的计算稍显复杂,文献[16]中规定,为了简化计算,可将式(6)简化为:

$$V_c^A = 0.16 \sqrt{f_c} b_w d \quad (8)$$

根据上述公式,将钢筋和混凝土强度的实测值和设计值分别代入,计算可得到钢筋混凝土梁的实际承载力计算值 V_{AC11} 和设计承载力计算值 V_{AC12} ,其结果见表 6 所列, V_{AC11}/V_u 为 0.879~1.061,平均值为 0.938,变异系数为 0.056; V_{AC12}/V_u 为 0.739~0.892,平均值为 0.792,变异系数为 0.064。这表明美国规范中钢筋混凝土梁抗剪承载力计算方法对 635 MPa 高强钢筋混凝土梁抗剪承载力的预测较为保守,且离散型较大。

文献[14]通过试验数据拟合出纵筋销栓作用力为 $0.43 A f_v / (\lambda + 1)$,其中: A 为受拉纵筋的截面面积; f_v 为纵筋的抗拉强度。本文在我国规范

基础上,提出系数 k 考虑高强箍筋与混凝土的匹配性,通过对试验结果进行回归拟合,得到 635 MPa 级热轧高强钢筋混凝土梁的抗剪承载力公式为:

$$V = 0.43Af_v/(\lambda + 1) + \alpha_{cv}f_tbh_0 + kf_{yv}\frac{A_{sv}}{s}h_0 \quad (9)$$

$$k = 0.183\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_c}\right)^2 - 0.612\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_c}\right) + 1.156 \quad (10)$$

采用材料强度实测值和设计值,按照式(9)计算梁抗剪承载力分别为 V_1 和 V_2 ,见表 6 所列。 V_1/V_u 为 0.958~1.057,平均值为 1.002,变异系数为 0.029。由此可知,所提的高强钢筋混凝土梁抗剪承载力计算公式准确度较高,与试验结果吻合较好,可适用于 635 MPa 级高强钢筋混凝土梁抗剪承载力的计算。

6 结 论

1) 剪力作用下,635 MPa 级热轧高强钢筋混凝土梁的荷载-挠度曲线可大致分为弹性阶段、塑性阶段以及荷载下降阶段;本文参数范围内高强钢筋混凝土梁均发生剪切破坏。

2) 影响 635 MPa 级热轧高强钢筋混凝土梁抗剪承载力的主要因素为混凝土强度、试件剪跨比、纵筋和箍筋强度及箍筋配箍率。随着试件剪跨比的减小,混凝土强度、箍筋和纵筋强度、配箍率的增大,635 MPa 热轧高强钢筋混凝土梁抗剪承载力也随之增大。

3) 相比于使用 400 MPa 的普通钢筋梁,635 MPa 热轧高强钢筋混凝土梁表现出了较好的延性。随着试件剪跨比的减小,试件延性会变差,而随着混凝土强度、纵筋和箍筋强度以及箍筋配箍率的增大,试件的延性也随之增强。

4) 我国规范高估了 635 MPa 高强钢筋混凝土梁的抗剪承载力,但用于设计时仍有一定安全度。而美国规范对高强钢筋混凝土梁抗剪承载力的预测结果偏于保守。本文考虑纵筋的销栓作用和高强箍筋与混凝土的匹配性,提出了 635 MPa 级热轧高强钢筋普通混凝土梁抗剪承载力的修正计算方法,经验证计算结果与试验结果吻合较好。

材,2012(6):41-42.

- [2] 郑如良,马鸣. 高强钢筋混凝土简支梁抗弯性能试验研究与数值计算[J]. 山西建筑,2017,43(8):34-36.
- [3] 付李,尹强圣,王浩,等. 高强箍筋对普通混凝土梁抗剪性能的影响机理[J]. 工程力学,2023,40(8):126-137.
- [4] 白家荣. 高强箍筋高强混凝土梁受剪性能试验研究及有限元分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2009.
- [5] 金凌志,周家亮,李月霞,等. 高强钢筋活性粉末混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(增刊 2):277-285.
- [6] 王铁成,董春敏,王蕊. 配高强箍筋的 T 形截面混凝土梁的斜裂缝宽度试验研究[J]. 吉林大学学报(工学版),2006,36(4):451-455.
- [7] 易伟建,吕艳梅. 高强箍筋高强混凝土梁受剪试验研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(4):94-101.
- [8] 陈晨. 600 MPa 级钢筋混凝土构件受力性能试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.
- [9] SUMPTER M S, RIZKALLA S H, ZIA P. Behavior of high-performance steel as shear reinforcement for concrete beams[J]. ACI Structural Journal,2009,106(1):171-177.
- [10] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:1-31.
- [11] 国家市场监督管理总局. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2021:1-72.
- [12] 金凌志,李月霞,祁凯能,等. 高强钢筋 RPC 简支梁抗剪承载力及延性研究[J]. 工程力学,2015,32(增刊 1):209-214,225.
- [13] 曹霞,唐婷,王华阳,等. 不同纵筋率高强钢筋 RPC 梁抗剪承载力及剪切延性试验研究[J]. 铁道标准设计,2017,61(4):74-78.
- [14] 秦卫红,惠卓,张普,等. 钢-纤维复合纵筋和玄武岩纤维复合纵筋混凝土梁受剪承载力试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(11):209-220.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019:1-261.
- [16] America Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete; ACI 318—14 [S]. Detroit: America Concrete Institute,2014:261-264.

(责任编辑 吴 亮)

[参 考 文 献]

- [1] 朱东明. 浅谈推广应用高强钢筋的意义和作用[J]. 上海建