

配置 HTRB600 高强箍筋的混凝土柱延性系数模拟研究

董勃

江苏建研建设工程质量安全鉴定有限公司, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ERA.2025120042

摘 要 : 基于 OpenSees 非线性有限元平台, 模拟了配置 HTRB600 高强箍筋的混凝土柱延性系数。首先, 运用迭代算法得到核心区混凝土的峰值应力及应变从而间接考虑箍筋对核心区混凝土的约束作用, 在此基础上建立的有限元模型取得了较好的模拟效果。然后, 设计了 4 组混凝土柱构件, 通过该模型模拟柱的延性系数, 研究了配置 HTRB600 高强箍筋的混凝土柱抗震性能。研究表明: 1) 在箍筋的体积配箍率合适时, HTRB600 高强箍筋能有效提高混凝土柱的延性。高强混凝土强度高、延性差, 配置 HTRB600 高强箍筋是保证其延性的有效措施。2) 规范中通过密配井字复合箍来提高柱轴压比限值的措施, 对于 HTRB600 箍筋仍然适用。在**高强混凝土柱中密配 HTRB600 井字复合箍, 具有更高的性价比。**

关键词 : HTRB600 高强箍筋; 延性系数; OpenSees; 高强混凝土; 轴压比限值

Simulation Study on Ductility Coefficient of Concrete Columns Reinforced with HTRB600 High-Strength Stirrups

Dong Bo

Jiangsu Jianyan Construction Engineering Quality and Safety Appraisal Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract : Based on the OpenSees nonlinear FE platform, the ductility coefficient of concrete columns reinforced with HTRB600 high-strength stirrups was simulated. Firstly, an iterative algorithm was used to obtain peak strength and strain of core concrete, which indirectly considering the constraint effect of stirrups. Based on this, a FE model which achieved appropriate simulation results was established. Then, four sets of concrete columns were designed. Based on the model, the ductility coefficient of the columns was simulated and the seismic performance of concrete columns reinforced with HTRB600 high-strength stirrups was studied. Research has shown that: 1) HTRB600 high-strength stirrups can significantly improve the ductility of concrete columns on the condition of appropriate volume ratio of stirrups. The utilization of HTRB600 high-strength stirrups is an effective measure to improve the ductility of high-strength concrete, which has high strength and poor ductility. 2) The measure of utilizing dense cross-shaped composite hoops, by which the limit value of axial compression ratio of column improved, is applicable to HTRB600 stirrups. Utilizing dense cross-shaped composite hoops of HTRB600 is comparatively effective to reinforce high-strength concrete.

Keywords : HTRB600 high-strength stirrups; ductility coefficient; OpenSees; high-strength concrete; limit value of axial compression ratio

引言

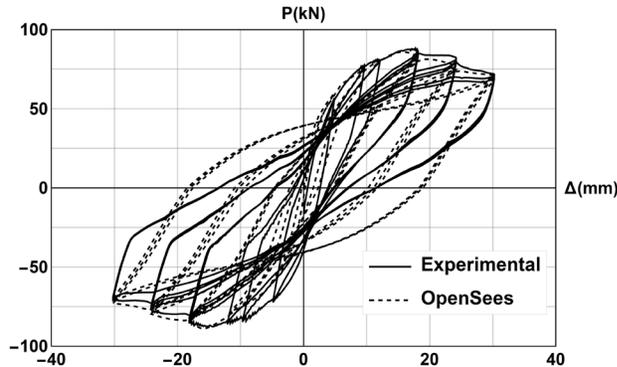
我国的混凝土结构设计规范在版本修订和升级的过程中逐渐增加了有关**高强钢筋**的内容。1996年《混凝土结构设计规范》局部修订中首次列入了400MPa级**高强钢筋**; 2002年的《混凝土结构设计规范》^[1]倡导将HRB400钢筋作为主力钢筋使用; 2010版《混凝土结构设计规范》^[2]也已列入500MPa级**高强钢筋**, 其抗拉强度设计值为435MPa。2016年的江苏省地方标准《热处理带肋**高强钢筋**混凝土结构技术规程》DGJ32/TJ 202-2016^[3], 列入了600MPa级**高强钢筋**, 其钢筋牌号为HTRB600和HTRB600E, 抗拉强度设计值为520MPa。该标准从钢筋材料性能、结构分析和极限状态计算、构造规定等方面针对600MPa级**钢筋**在混凝土结构中的运用做出了规定。

针对配置HTRB600**高强钢筋**的混凝土柱抗震性能, 国内的研究方向主要是通过拟静力试验来测试其滞回曲线, 从骨架曲线、强度与刚度退化、延性与耗能能力等参数, 比较其与配置普通**钢筋**的混凝土柱抗震性能。研究大多针对HTRB600**高强钢筋**用作柱的纵筋, 对于将其用作柱箍筋的研究尚不多。本文基于OpenSees非线性有限元平台, 应用文献^[4]中的方法建立有限元模型, 以延性系数作为主要指标, 研究配置HTRB600**高强箍筋**的混凝土柱的抗震性能。

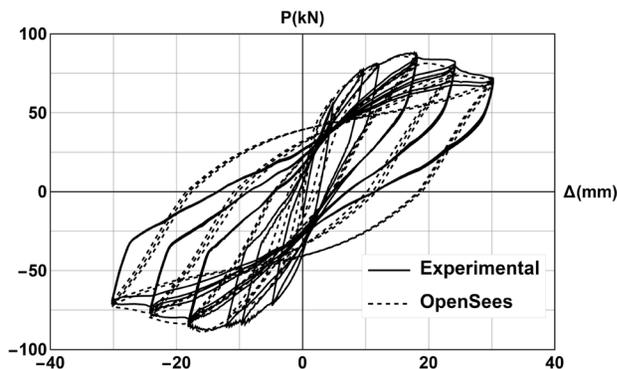
一、基于 OpenSees 的有限元模型

(一) 数值模型

文献^[4]中建立的数值模型基于 OpenSees 非线性有限元分析平台,由1个零长度剪切弹簧单元、8个非线性梁柱单元和1个零长度转动弹簧单元串联组成,综合考虑了柱底塑性铰区钢筋的黏结-滑移效应和构件的剪切变形,采用与实验相同的加载路径,模拟了柱顶侧向力-侧向位移的滞回曲线。图1给出了 OpenSees 数值模型与进行拟静力实验测得的滞回曲线对比,验证了该模型对于模拟配置高强钢筋的混凝土柱滞回曲线具有较好的准确性。



(a) 试件 Z3 的模拟滞回曲线与实测曲线对比



(b) 试件 Z9 的模拟滞回曲线与实测曲线对比

图1 数值模型与实验实测的滞回曲线对比^[4]

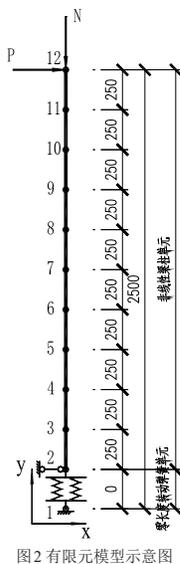


图2 有限元模型示意图

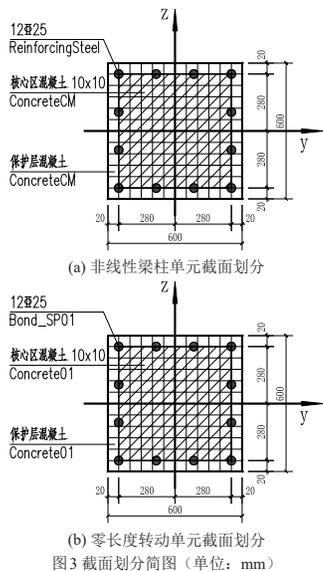


图3 截面划分简图 (单位: mm)

在此基础上,本文根据构件的尺寸、配筋建立的有限元模型见图2。从柱底向上,分别是1个零长度转动弹簧单元和10个非线性梁柱单元。每个非线性梁柱单元有4个积分截面,每个截面纤维的划分如图3(a)所示。核心区混凝土划分为10x10共100个纤维,材料采用 ConcreteCM 模型,其本构关系按文献中的方法采用迭代算法计算出约束混凝土的相关参数;保护层混凝土位于核心区混凝土纤维周边,共划分为44个纤维,材料采用 ConcreteCM 模型,其本构关系为无约束的混凝土参数;柱中的钢筋采用 Reinforcing Steel 材料模拟。柱底设置的零长度转动弹簧单元,目的是模拟塑性铰区的转动变形,其截面划分如图3(b)所示,截面划分数量与非线性梁柱单元相同,区别在于钢筋用 Bond_SPO1 材料代替。

(二) 模型相关参数

本文模拟的钢筋混凝土柱,其混凝土强度等级为 C40 和 C60,保护层混凝土材料的本构关系根据《混凝土结构设计规范(2015年版)》GB50010-2010附录 C 中的规定取值,强度均采用标准值,其主要参数如表1所示。根据文献中介绍的迭代算法,通过提高核心区混凝土的抗压强度及其对应应变从而间接考虑箍筋对核心区混凝土的约束作用,其主要参数如表2所示。

本文模拟的混凝土柱纵筋均为 HTRB600 钢筋,其屈服强度、极限强度按江苏省地方标准《热处理带肋高强钢筋混凝土结构技术规程》DGJ32/TJ 202-2016中给定,且均采用标准值,其主要参数如表3所示。表3中给出的屈服时钢筋滑移量 S_y 和破坏时滑移量 S_u 两个参数,为零长度转动弹簧单元中采用的 Bond_SPO1 材料参数,本文根据文献^[5]在大量拉拔试验数据的基础上给出的拟合公式计算得出。

模型首先进行柱顶轴力 N 的加载,通过改变 N 的大小来模拟不同的轴压比。轴力加载完毕后,通过在图2中的12节点处施加水平位移 Δ 进行加载,同时记录12节点的横向恢复力 P 来获得柱顶力-位移曲线。根据 P- Δ 曲线,采用延性系数 μ 来定量评估试件的抗震性能,其计算公式如下:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

其中, Δ_u 为极限位移,取为承载力下降至最大荷载的85%时对应的位移;

Δ_y 为屈服位移,如图4所示,过零点做一条割线 OA 使图中两块阴影部分的面积 $S_1=S_2$,割线与过 P_{max} 点的水平线的交点 A 所对应的位移值。

表1 保护层混凝土参数

混凝土等级	抗压强度 f_{pc} (MPa)	抗压强度对应应变 e_{pc} ($\times 10^{-6}$)	初始切线模量 E_c ($\times 10^4$ MPa)	抗拉强度 f_t (MPa)	抗拉强度对应应变 e_t ($\times 10^{-6}$)	形状参数 r_c	形状参数 r_t
C40	26.8	1588.8	3.25	2.39	104.36	3.254	3.254
C60	38.5	1769.0	3.60	2.85	114.70	5.504	5.504

表2 核心区混凝土参数

混凝土等级	箍筋 A_{sv}	峰值应力时箍筋应力 f_{hcc} (MPa)	有效侧向约束应力 f_{lc} (MPa)	峰值应力 f_{cc} (MPa)	强度提高比率 f_{cc}/f_{c0}	形状参数 r_c
C40	C8@100(4)	310.99	0.794	33.44	1.25	1.4378
	D8@100(4)	316.57	0.808	33.49	1.25	1.4330
	C10@100(4)	394.01	1.580	35.91	1.34	1.2763
	D10@100(4)	570.46	2.288	37.60	1.40	1.2110
	C12@100(4)	399.61	2.325	37.68	1.41	1.2085
	D12@100(4)	598.60	3.482	39.90	1.49	1.1537
C60	C8@100(4)	279.15	0.712	46.18	1.20	1.8851
	D8@100(4)	281.05	0.717	46.20	1.20	1.8814
	C10@100(4)	377.83	1.515	49.37	1.28	1.5267
	D10@100(4)	462.64	1.855	50.43	1.31	1.4525
	C12@100(4)	398.16	2.316	51.71	1.34	1.3321
	D12@100(4)	591.51	3.441	54.35	1.41	1.2457

注：表中 C 表示 HRB400 级钢筋，D 表示 HTRB600 级钢筋。

表3 钢筋材料参数、黏结-滑移 Bond_SP01 材料参数

钢筋等级	直径 d_b (mm)	屈服强度 f_y (MPa)	极限强度 f_u (MPa)	初始弹性模量 E_s (GPa)	强化起始点模量 E_{sh} (GPa)	强化起始点应变 e_{sh} ($\times 10^{-3}$)	峰值应变 e_{ult} ($\times 10^{-3}$)	屈服时滑移量 S_y (mm)	破坏时滑移量 S_u (mm)
600	25	600	750	200	9.59*	12.38*	89.64*	0.8252	28.8830

注：其中 * 标注的数据为文献^[4]根据 HTRB600 钢筋的抗拉强度试验所得的实测数据。

限值柱的轴压比上限是保证其具有必要的延性的重要措施。

二、结果分析与讨论

(一) 配置 HTRB600 与 HRB400 箍筋的柱延性系数对比

《混凝土结构设计规范(2015年版)》GB50010-2010规定,柱受剪承载力计算时柱箍筋的抗拉强度设计值不大于360MPa,即其他因素相同时,将柱的箍筋等级由HRB400提高至HTRB600对于柱的受剪承载力计算值并没有提高。规范的受剪承载力计算采用弹性设计,在中大震下进入弹塑性阶段后,配置HTRB600高强箍筋能否提高混凝土柱的抗震性能,其提高的幅度有多大仍待研究。

本节设计了两组混凝土柱试件,分别采用普通混凝土(C40)和高强混凝土(C60)。柱截面均为600×600mm,柱高2.5m,剪跨比4.42,钢筋保护层厚度20mm。将轴压比和箍筋强度作为变量,用上文建立的有限元模型模拟试件的P-Δ曲线,并计算出延性系数,两组试件的配筋情况及延性系数模拟结果见表4、表5所示。对比分析及结论如下:

1. 配筋相同时,混凝土柱的延性系数随轴压比增大而减小。轴压比从0.50提高到0.75,柱的延性系数下降10%~27%。因此,

2. 配筋和轴压比相同时,混凝土柱的延性系数随混凝土强度等级的提高而减小。混凝土等级从C40提高到C60,柱的延性系数下降21%~37%。高强混凝土强度高、延性差,需要采取更严格的措施来保证其延性,配置HTRB600高强箍筋是措施之一。

3. 箍筋等级从HRB400提高至HTRB600,混凝土柱的延性系数提高程度不一。当箍筋体积配箍率不高(如表中0.75%)时,延性系数的提高程度小于1%;随着体积配箍率提高(如表中1.19%),延性系数提高约10%~40%。其中对于C40混凝土柱,延性系数提高幅度在30%以上;对于C60混凝土柱,延性系数提高幅度在10%以上。

由表2可知,箍筋的体积配箍率不高(如箍筋直径为8)时,HRB400和HTRB600箍筋的抗拉强度均未有效发挥,混凝土达到峰值应力时箍筋应力约280MPa~315MPa,低于钢筋的屈服强度,此时即使采用HTRB600箍筋,其提供的侧向约束应力也未有明显提高。当箍筋直径增加至10后,HRB400箍筋应力约380MPa~395MPa,HTRB600箍筋应力约460MPa~570MPa,接近两种钢筋的屈服强度,此时HTRB600箍筋强度高的优势得以体现。因此,在体积配箍率合适时,HTRB600高强箍筋能有效提高混凝土柱的延性。

表4 配置 HTRB600 与 HRB400 箍筋的柱延性系数对比 (混凝土等级 C40)

编号	轴压比	轴力 N(kN)	纵筋配置 A_s	纵筋配筋率 ρ (%)	箍筋配置 A_{sv}	箍筋体积配箍率 ρ_{sv} (%)	延性系数模拟结果	延性系数提高(%)		
1	0.50	3438	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	3.193	3.218	0.78
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	5.167	7.279	40.87
2	0.60	4126	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	3.020	3.043	0.76
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	4.501	5.872	30.46
3	0.65	4469	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.950	2.973	0.78
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	4.332	5.608	29.46

4	0.70	4813	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.881	2.903	0.76
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	4.210	5.434	29.07
5	0.75	5157	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.832	2.846	0.49
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	4.101	5.307	29.41

注：表中 C 表示 HRB400 级钢筋，D 表示 HTRB600 级钢筋。

表5 配置 HTRB600 与 HRB400 箍筋的柱延性系数对比（混凝土等级 C60）

编号	轴压比	轴力 N(kN)	纵筋配置 A_s	纵筋配筋率 ρ (%)	箍筋配置 A_{sv}		箍筋体积配箍率 ρ_{sv} (%)	延性系数模拟结果	延性系数提高 (%)	
1	0.50	4950	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.480	2.487	0.28
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.709	4.564	23.05
2	0.60	5940	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.341	2.347	0.26
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.329	3.819	14.72
3	0.65	6435	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.283	2.289	0.26
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.224	3.638	12.84
4	0.70	6930	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.254	2.260	0.27
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.130	3.492	11.57
5	0.75	7425	12D25	1.64	C8@100(4)	D8@100(4)	0.75	2.235	2.241	0.27
					C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.052	3.398	11.34

注：表中 C 表示 HRB400 级钢筋，D 表示 HTRB600 级钢筋。

（二）轴压比限值下密配 HTRB600 井字复合箍的柱延性系数

《混凝土结构设计规范（2015年版）》GB50010-2010 规定，当沿柱全高采用密配井字复合箍（箍筋间距不大于 100mm、肢距不大于 200mm、直径不小于 12mm）时，轴压比限值可增加 0.10。为了研究按规范的上述要求密配 HTRB600 井字复合箍的混凝土柱的抗震性能，本节设计了普通混凝土（C40）和高强混凝土（C60）两组试件，模拟并比较了密配 HTRB600 井字复合箍且轴压比限值增加 0.10 后柱的延性系数。两组试件的配筋情况及延性系数模拟结果详表 6、表 7 所示。对比分析及结论如下：

表6 轴压比限值下密配井字复合箍的混凝土柱延性系数（混凝土等级 C40）

编号	轴压比	轴力 N(kN)	纵筋配置 A_s	纵筋配筋率 ρ (%)	箍筋配置 A_{sv}		箍筋配箍率 ρ_{sv} (%)	延性系数		延性系数提高 (%)	
1	0.65	4469	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	4.332	5.608	24.08	45.22
	0.75	5157			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	5.375	8.144		
2	0.75	5157	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	4.101	5.307	18.29	32.84
	0.85	5845			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	4.851	7.050		
3	0.85	5845	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.702	4.799	12.64	20.13
	0.95	6532			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	4.170	5.765		
4	0.90	6188	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.451	4.475	9.01	12.85
	1.00	6876			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	3.762	5.050		
5	0.95	6532	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.214	4.126	4.32	5.26
	1.05	7220			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	3.353	4.343		

注：表中 C 表示 HRB400 级钢筋，D 表示 HTRB600 级钢筋。

表7 轴压比限值下密配井字复合箍的混凝土柱延性系数（混凝土等级 C60）

编号	轴压比	轴力 N(kN)	纵筋配置 A_s	纵筋配筋率 ρ (%)	箍筋配置 A_{sv}		箍筋配箍率 ρ_{sv} (%)	延性系数		延性系数提高 (%)	
1	0.65	6435	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.224	3.638	32.23	59.87
	0.75	7425			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	4.263	5.816		
2	0.75	7425	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	3.052	3.398	27.20	53.88
	0.85	8415			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	3.882	5.229		

3	0.85	8415	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	2.858	3.198	14.42	39.56
	0.95	9405			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	3.270	4.463		
4	0.90	8910	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	2.722	3.023	9.74	28.81
	1.00	9900			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	2.987	3.894		
5	0.95	9405	12D25	1.64	C10@100(4)	D10@100(4)	1.19	2.564	2.806	8.42	21.95
	1.05	10395			C12@100(4)	D12@100(4)	1.73	2.780	3.422		

注：表中C表示HRB400级钢筋，D表示HTRB600级钢筋。

3. 密配 HTRB600 井字复合箍对柱延性系数的提高幅度随混凝土等级提高而增大。混凝土等级 C40 时，密配 HTRB600 箍筋对延性系数提高的百分数约为 5%~45%；混凝土等级 C60 时，该百分数约为 22%~60%。与普通混凝土柱相比，在高强混凝土柱中采用密配 HTRB600 井字复合箍以提高其轴压比限值，具有更高的性价比。

三、结语

本文基于 OpenSees 有限元平台，建立了配置 HTRB600 高强箍筋的混凝土柱数值模型。设计了 4 组构件，通过数值模拟构件的

延性系数来量化构件的抗震性能，研究了配置 HTRB600 高强箍筋的混凝土柱抗震性能。结果表明：

1. 建立的非线性有限元模型，运用迭代算法得到核心区混凝土的峰值应力及应变从而间接考虑箍筋对核心区混凝土的约束作用。与实测滞回曲线对比，模拟效果较好。

2. 在箍筋的体积配箍率合适时，HTRB600 高强箍筋能有效提高混凝土柱的延性。高强混凝土强度高、延性差，配置 HTRB600 级高强箍筋是保证其延性的有效措施。

3. 规范中通过密配井字复合箍来提高柱轴压比限值的措施，对于 HTRB600 箍筋仍然适用。在高强混凝土柱中密配 HTRB600 井字复合箍，具有更高的性价比。

参考文献

- [1] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范 GB50010-2002[S]. 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范 GB50010-2010(2015年版)[S]. 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3] 江苏天舜金属材料集团有限公司, 东南大学土木工程学院. 苏 DGJ32/TJ 202-2016 热处理带肋高强钢筋混凝土结构技术规程 [S]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2016.
- [4] 董勃. 配置 HTRB600 级高强钢筋的混凝土柱抗震性能研究 [D]. 东南大学, 2018.
- [5] Zhao J, Sritharan S. Modeling of Strain Penetration Effects in Fiber-Based Analysis of Reinforced Concrete Structures[J]. *Ac Structural Journal*, 2007, 104(2): 133-141.