

大尺度预应力型钢-混凝土梁承载力性能模拟

王 钧,李世平

(东北林业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要 目的 研究大尺度预应力型钢-混凝土梁构件受力性能,进一步扩展大尺度预应力型钢-混凝土梁构件工程应用范围. 方法 通过对已有试验的预应力型钢-混凝土梁建模分析,验证建模分析可靠性. 设计7根大尺度预应力型钢-混凝土梁构件,考虑到型钢翼缘对混凝土的约束效应的影响,将混凝土分为“核心”区与“非核心”区,采用不同的本构关系模型,以综合配筋率 β 、型钢含钢量 α 、混凝土强度等级为参数变量,分析加载过程中预应力型钢-混凝土梁的力学特性. 结果 综合配筋率为1.34%的梁构件比综合配筋率为1.04%的梁构件承载力提高19.3%;型钢含钢量为2.36%梁构件相比为1.93%梁构件承载力提高11.3%;混凝土强度等级的改变对大尺度预应力型钢-混凝土梁承载力影响不大. 结论 预应力型钢-混凝土梁构件建模分析中,采用考虑核心约束作用的新型建模分析方法,模拟结果更为精确,为工程实践提供依据的同时,也为大尺度预应力型钢-混凝土梁更广泛的技术应用提供设计参考.

关键词 大尺度;预应力型钢-混凝土梁;核心约束;受弯承载力;数值模拟

中图分类号 TU378.2 文献标志码 A

Simulation of Bearing Capacity Parameters of Large-Scale Prestressed Steel Reinforced Concrete Beams

WANG Jun, LI Shiping

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, China, 150040)

Abstract: In order to study the mechanical behavior of large-scale prestressed steel reinforced concrete beams and extend the scope of its application, the model of the existing prestressed steel reinforced concrete beams was built and the reliability of modeling analysis was verified. Based on the analysis, 7 large-scale prestressed steel reinforced concrete beams were designed. Considering the constraints of steel flange to concrete, concrete is divided into two parts: core area and non-core area, using different constitutive relation models. Parameter variables, including comprehensive reinforcement ratio, steel content of section steels and concrete strength grade, were used to analyze the mechanical properties of the prestressed steel reinforced concrete beam during the loading process.

收稿日期:2018-04-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51778186);黑龙江省博士后科研启动基金项目(LBH-Q15011)

作者简介:王钧(1967—),女,教授,博士,博士研究生导师,主要从事预应力混凝土组合结构方面研究.

It is shown that the beam bearing with the comprehensive reinforcement ratio (β) of 1.34% is 19.3% higher than that of β of 1.04%. Compared to the beam with the steel quantity (α) of 1.93%, the beam bearing with α of 2.36% has a 11.3% increment. The changes of concrete strength grade have little effect on the large-scale prestressed steel reinforced beams' bearing capacity. During the modeling and analysis of the prestressed steel reinforced concrete beam, a new modeling analysis method is adopted to consider the core constraints, which makes the simulation results more accurate. It provides the basis for the engineering practice. At the same time, it also provides a design reference for the wider application of large scale prestressed steel reinforced concrete beams.

Key words: large-scale; prestressed steel reinforced concrete beam; core constraints; flexural capacity; numerical simulation

预应力型钢-混凝土结构是在普通型钢-混凝土结构的基础上,将预应力技术应用到型钢-混凝土结构中形成的一种组合结构形式,它能够充分地发挥预应力混凝土结构和型钢-混凝土结构各自的优良特性^[1]. 利用型钢-混凝土技术提高结构的承载力,利用预应力技术增强结构的适用性,从而更好地发挥结构的综合性能^[2]. 预应力型钢-混凝土这一结构形式,是对传统预应力混凝土结构和型钢-混凝土结构的综合应用,它具有承载力高,强度、延性和耗能能力强,在高层、套建增层及地下结构等各个领域都具有广阔的工程应用前景^[3-5]. 近些年来,国内外的学者对不同形式的型钢-混凝土梁构件的承载能力基础理论及试验方法展开了研究^[6-10],结果表明H型钢翼缘能够对核心混凝土提供有效的约束作用,使得承载能力相对于普通预应力混凝土梁提高显著. 但试验构件一般截面尺寸相对较小. 与大尺度构件相比,截面设计相对差别较大,反映大尺度

预应力型钢-混凝土梁在工程实践相对复杂条件下的受力性能相对困难. 数值分析是试验条件限制下进行大量的变参数分析常用的研究方法,也是寻求构件性能规律行之有效的研究策略. 笔者为了充分地研究大尺度预应力型钢-混凝土简支梁承载性能,采用数值分析方法对文献[11]中已有试验的预应力型钢-混凝土梁构件进行模拟,验证数值分析的可靠性. 基于此分析,设计7根大尺度预应力型钢-混凝土梁,考虑到型钢翼缘对混凝土的约束作用,将混凝土分为“核心”区和外围“非核心”区,分别采用不同的本构关系模型,分析不同参数变量对大尺度预应力型钢-混凝土梁承载力的影响规律. 提出对于大尺度预应力型钢-混凝土梁构件更为实用的建模分析方法,为工程实践提供依据.

1 试验梁参数设计与模型分析

1.1 混凝土本构关系模型

图1为约束效应模型示意图.

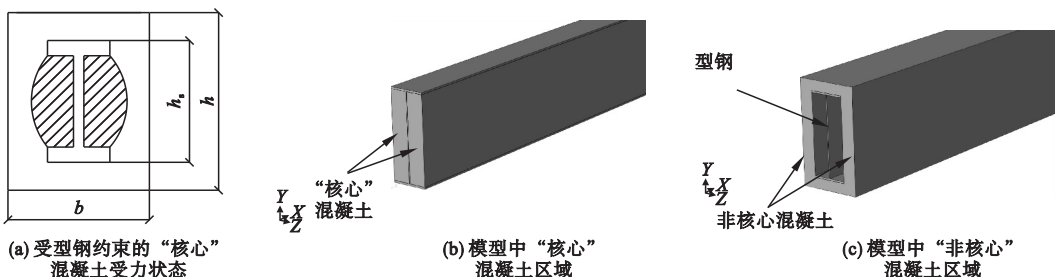


图1 约束效应模型示意图

Fig. 1 Sketch of constraint effect model

由于型钢翼缘对混凝土的约束作用,使混凝土形成“核心”区(见图1(a)).当预应力型钢-混凝土梁发生变形时,“核心”区混凝土在三向压力作用下强度提高,从而增强了梁受弯承载力.参照文献[12]中的区域约束混凝土理论并结合有限元分析方法,将混凝土划分为“核心”区和“非核心”区(见图(b)、(c)),两部分采用不同的本构关系模型.“核心”混凝土采用受侧向约束混凝土损伤本构关系模型^[13],”非核心”区混凝土采用聂建国教授提出的本构关系模型^[14].

1.2 单元选择和模型建立

使用 ABAQUS 软件建立有限元模型,具体

建模过程如图2所示.模型采用力加载方式,使用牛顿-拉夫森迭代法加强试验模型的收敛性.混凝土采用以拉伸破坏和压缩破坏为主导的弹塑性损伤模型;型钢、钢筋和预应力筋采用弹塑性模型.混凝土部分采用 C3D8R 二次六面体单元,型钢采用 S4R 壳单元,钢筋和预应力筋采用 T3D2 桁架单元.在建模分析时忽略钢筋与混凝土结构之间的黏结滑移,将纵筋与箍筋组成的钢筋骨架以嵌入方式植入到混凝土中.型钢与混凝土之间应用“小滑动”设置,以在型钢与混凝土两种材料形成的界面上设置摩擦系数的方式,分析接触面上摩擦力的作用.

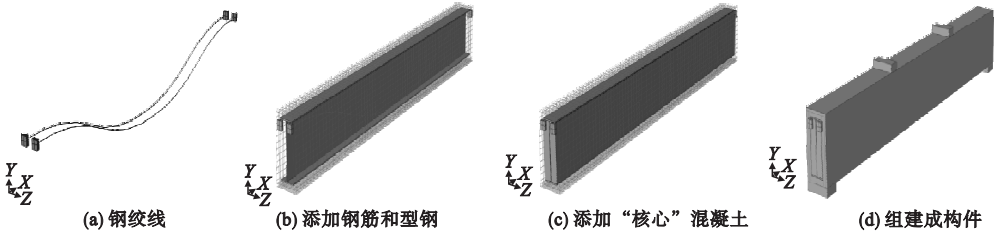


图2 模拟梁有限元模型

Fig. 2 Finite element model of simulated beam

建模分析时为了防止应力集中现象,在加载点和支座处布置钢垫板,设置参考点与钢垫板之间耦合约束作用,将集中力施加到参考点上.模拟梁构件加载时采用静力分级加载的加载方式.梁底设置约束以确保仅发生单一方向的转动,同时对弯剪区段进行了箍筋加密,确保构件受力后不发生剪切破坏.

1.3 已有试验梁模型建立

选取文献[11]中4根试验梁构件作为模型,进行有限元分析.在距试验梁梁底

115 mm处布置预应力筋,试验构件截面参数如表1所示,表中 β 为预应力筋与非预应力筋综合配筋率,试验梁的截面尺寸如图3所示.

表1 试验梁参数

Table 1 Parameter of test beams

试件编号	$\beta/\%$	预应力度	混凝土强度等级
PSRCB1	1.16	0.654	C40
PSRCB2	1.62	0.494	C40
PSRCB3	1.16	0.654	C50
PSRCB4	1.16	0.654	C60

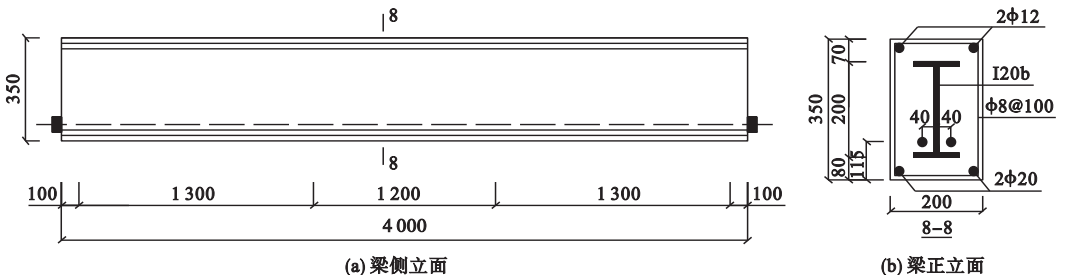


图3 试件配筋图

Fig. 3 Details of specimens

2 预应力型钢 - 混凝土梁模型分析

2.1 试验与分析结果对比分析

以模拟梁 PSRCB1 为例,分析其在加载过程中的应力变化.模拟得到梁构件各个特征点应力分布云(见图 4).试验梁构件采用力的加载方式加载,直至受压区混凝土达到极限压应变.当加载到 $0.7P_u$ (极限承载力)

左右时,纵向受拉钢筋屈服(见图 4(a))所示;当加载到 $0.8P_u$ 左右时,型钢下翼缘达到屈服应力(见图 4(b));继续加载,接近极限荷载时,预应力型钢 - 混凝土梁跨中压区混凝土达到极限压应变(见图 4(c)).以跨中截面为分析对象,观察在加载过程中跨中挠度变化趋势,当超过 $0.7P_u$ 时,跨中挠度变化较为明显,这与试验过程中跨中挠度增加迅速的现象相吻合.

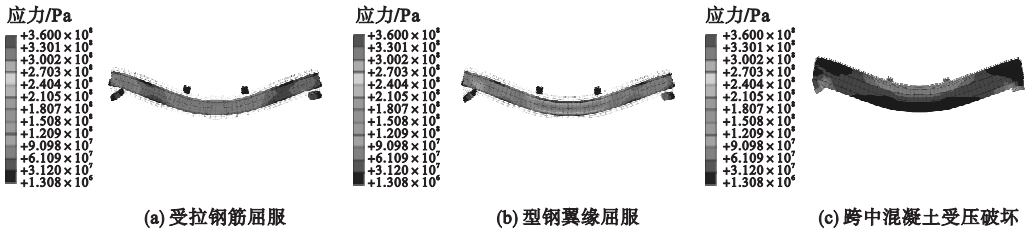


图 4 模拟梁应力状态

Fig. 4 Stress state of simulated beam

为突出核心约束混凝土对梁构件的整体受力性能影响,建立两种梁构件模型:“核心”约束效应的梁构件模型,即考虑型钢翼缘对混凝土约束效应的影响,和非“核心”约束效应的梁构件模型,即不考虑型钢翼缘对混凝土约束效应的影响^[15-16].将两种分析结果与试验实测结果对比,试验梁极限弯矩实测值与分析值如表 2 所示,“核心”约束效应的梁构件模型的极限弯矩 M_u^s 与试验实测结果 M_u^t 偏差在 10% 以内,而非“核心”约束效应的梁构件模型的极限弯矩 M_u^0 与实测结果

M_u^t 偏差为 17% 左右.

表 2 试验梁极限弯矩实测值与分析值

Table 2 Comparison of test and analysis values for the test beams

梁号	$M_u^s /$ (kN·m)	$M_u^c /$ (kN·m)	$M_u^0 /$ (kN·m)	$(M_u^s - M_u^t) / M_u^t$ / %
PSRCB-1	172.58	185.24	198.87	7.30
PSRCB-2	202.48	219.77	241.86	8.54
PSRCB-3	189.79	206.87	220.42	9.01
PSRCB-4	196.65	213.11	230.57	8.37

图 5 分别为 PSRCB-1、PSRCB-3 和 PSRCB-4 的弯矩 - 挠度曲线.

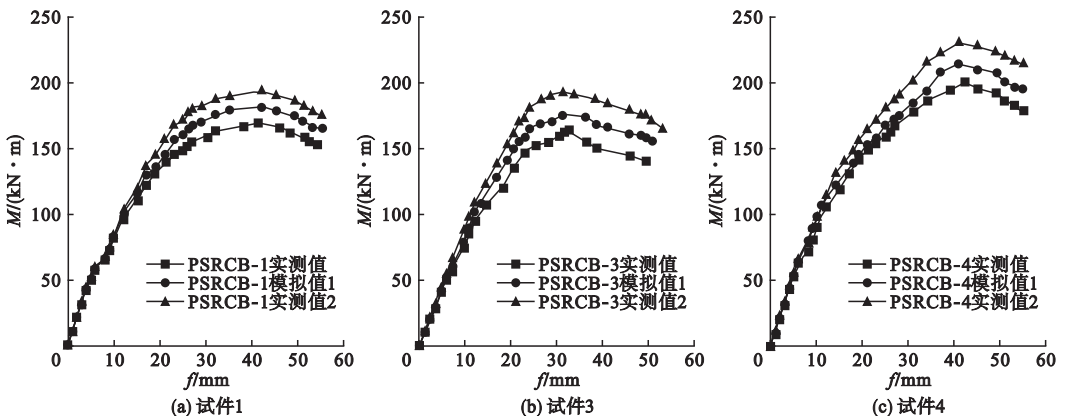


图 5 试件弯矩 - 跨中挠度曲线

Fig. 5 Moment-vertical displacement curves of specimens

由图5分析可知,考虑“核心”约束效应的模拟梁所得模拟值1和非“核心”约束的模拟梁所得模拟值2与实测结果相比,“核心”约束效应所得模拟值更为接近实测结果,两者上升曲率、极限荷载和临界破坏状态时跨中挠度基本一致。

2.2 误差分析

基于数值分析与试验差别,引起误差的主要因素:①模型分析建立在材料线弹性、均质、各向同性的基本假定的条件下,而试验构件所用材料不能够充分满足基本假定的要求;②钢筋部分以“嵌入”方式植入到混凝土中,忽略了混凝土与钢筋的摩擦损失和黏结滑移的影响。考虑“核心”约束效应的模拟梁所得模拟结果与文献[6]的实测曲线较为吻合,分析采用核心约束梁构件模型能够较好地体现出力作用下的结构变形,证明了此建模分析方法的可靠性,为进一步分析大尺度预应力型钢-混凝土梁构件承载力奠定基础。

3 大尺度预应力型钢-混凝土梁模型建立

3.1 模拟梁设计与建模

基于对已有预应力型钢-混凝土梁构件数值模拟的可靠性分析,按《组合结构设计规范》(JGJ138—2016)设计要求,设计7根大尺度预应力型钢-混凝土梁,截面尺寸为 $1\,500\text{ mm} \times 2\,500\text{ mm}$,长为 21.6 m ,箍筋采用 $10@150$,考虑构造要求,沿梁高度方向每隔 200 mm 设置一根纵向腰筋,布置两排纵向受拉钢筋,箍筋采用双肢箍。加载方式为三分点对称加载,预应力钢筋采用 $\Phi^{s}21.6$ 低松弛1860级钢绞线,张拉控制应力为 $0.75f_{pk}$,模拟梁构件截面基本参数如表3所示。

参照已验证的预应力型钢-混凝土梁的迭代计算方法、屈服准则、单元分析类型、弹塑性损伤模型和网格划分等基本分析方式建立分析模型,以确保建模分析的精准性与可靠

性。选取文献[17-18]中混凝土、钢筋及钢绞线力学性能实测值作为有限元分析数据,选取文献[19]中型钢板力学性能实测值作为分析所用材料的基本力学性能参数值。

表3 模拟梁参数

Table 3 The parameters of the simulated beams

梁号	H型钢/mm	混凝土强度等级	预应力筋
L-1	2 000 × 850 × 20 × 60	C40	36Φ ^s 21.6
L-2	2 000 × 850 × 20 × 60	C40	48Φ ^s 21.6
L-3	2 000 × 850 × 20 × 60	C40	68Φ ^s 21.6
L-4	2 000 × 850 × 20 × 60	C50	68Φ ^s 21.6
L-5	2 000 × 850 × 20 × 60	C60	68Φ ^s 21.6
L-6	2 000 × 850 × 20 × 40	C40	68Φ ^s 21.6
L-7	2 000 × 850 × 20 × 50	C40	68Φ ^s 21.6

3.2 模拟梁分析过程

以模拟梁L-1为例,分析模拟梁在加载过程中的应力变化。模拟梁的各个特征点应力状态如图6所示。当承受荷载相对较小时,型钢与纵向受拉钢筋处于弹性状态。此时通过同一截面不同位置上的点应力应变状态,验证了跨中梁截面应力-应变关系基本符合平截面假定。随着荷载的增加,纵向受拉钢筋应力不断增大,当加载到 $0.68M_u$ 时,纵向受拉钢筋屈服(见图6(a));当加载到 $0.8M_u$ 时,型钢下翼缘进入屈服状态(见图6(b));继续增加荷载,接近极限弯矩时,跨中混凝土达到极限压应变,视为跨中混凝土被压碎,大尺度预应力型钢-混凝土梁失去工作性能(见图6(c))。

根据文献[20]计算模拟梁抗弯承载力,将模拟梁构件承载力计算值与分析值绘制成表4,表中 M_u^c 为模拟梁承载能力计算值; M_u^a 为模拟梁承载能力分析值。对比大尺度预应力型钢-混凝土梁计算结果与分析结果可以得出:7根预应力型钢-混凝土梁的弯矩模拟平均值与弯矩计算平均值差值为6.7%,标准差 $\sigma = 20.25$ 。

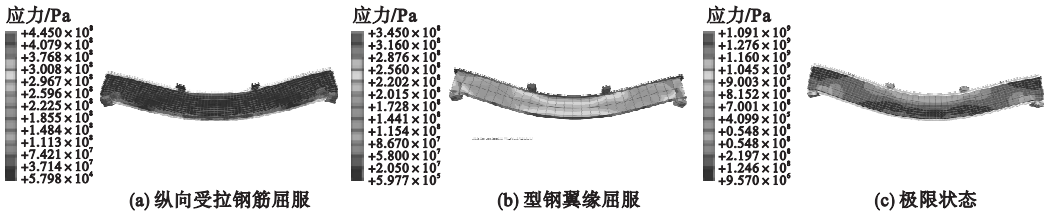


图 6 模拟梁应力状态

Fig. 6 Stress state of simulated beam

表 4 模拟梁承载力计算值与分析值比较

Table 4 Comparison of calculation and analysis values for the simulated beams

梁号	$M_u^c / 10^3 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$	$M_u^a / 10^3 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$	$(M_u^a - M_u^c) / M_u^c / \%$
L-1	94.96	99.64	4.93
L-2	102.06	107.23	5.07
L-3	113.30	121.10	6.88
L-4	116.50	123.54	6.04
L-5	117.94	128.06	8.58
L-6	101.81	109.83	7.88
L-7	108.00	116.24	7.63

4 大尺度预应力型钢 - 混凝土梁承载能力参数分析

4.1 型钢含钢量对模拟梁极限承载力的影响

型钢含钢量是影响预应力型钢 - 混凝土梁承载能力的主要因素之一. 以型钢含钢量为唯一变化参数, 模拟得到梁构件型钢含钢量 α 分别为 1.93%、2.15% 和 2.36% 的弯矩 - 挠度曲线如图 7 所示.

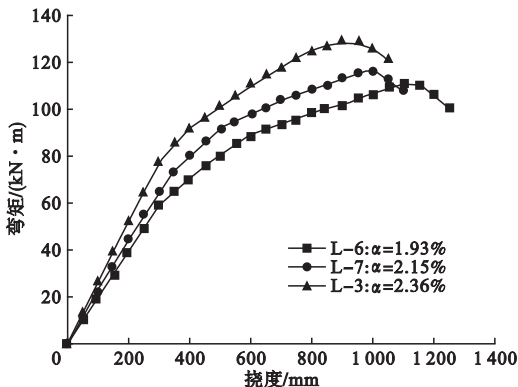


图 7 模拟梁弯矩 - 挠度曲线

Fig. 7 Moment-verticle displacement curves of simulated beam

由图 7 可知, 型钢含钢量 α 为 2.36% 相

比 α 为 1.93% 梁构件承载力提高 11.3%. 组合梁构件的承载能力随着型钢含钢量的增加而增大, 含钢量越大, 模拟梁构件抗变形能力越强, 极限承载能力越高.

4.2 综合配筋率对模拟梁极限承载力的影响

以综合配筋率作为变化参数, 得到综合配筋率 β 分别为 1.04%、1.15% 和 1.34% 的弯矩 - 挠度曲线 (见图 8). 由图 8 可知, 综合配筋率 β 为 1.34% 的梁构件相比 β 为 1.15% 和 1.04% 的梁构件承载力分别提高分别为 7.62% 和 19.3%; 随着综合配筋率 β 增加, 构件承载能力相应地增强, 从弯矩 - 挠度曲线可以看出, 综合配筋率高的梁构件弯矩 - 挠度曲线上升趋势更明显, 抗变形能力越强.

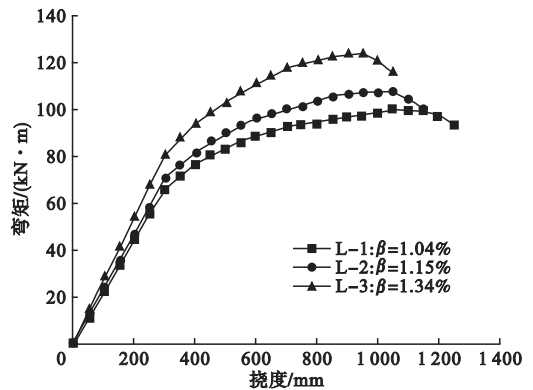


图 8 模拟梁弯矩 - 挠度曲线

Fig. 8 Moment-verticle displacement curves of simulated beams

4.3 混凝土强度等级对模拟梁极限承载力的影响

以混凝土强度等级作为变化参数, 模拟得到混凝土强度等级分别为 C40、C50 和 C60 的弯矩 - 挠度曲线 (见图 9).

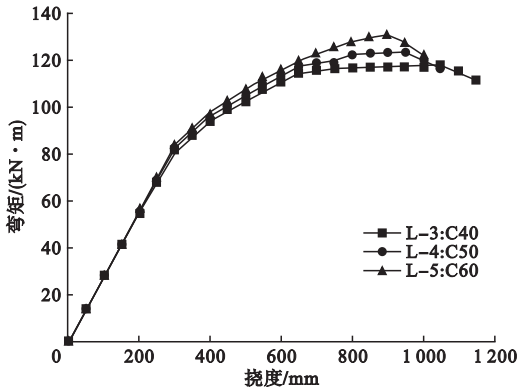


图9 模拟梁弯矩-挠度曲线

Fig. 9 Moment-vertical displacement curves of simulated beams

由图9可知,混凝土强度等级为C60的梁构件比强度等级为C40的梁构件承载力提高5.75%,由弯矩-挠度曲线可看出混凝土强度等级的改变对大尺度预应力型钢-混凝土梁构件承载能力影响不大;当模拟梁超过极限承载力后,由于高强混凝土容易产生脆性破坏,致使高强度等级的梁构件比低强度等级的梁构件承载力下降趋势更显著。

5 结论

(1) 基于型钢翼缘对混凝土约束效应的影响,在模拟分析中提出将混凝土分为“核心”区与“非核心”区,采用不同的本构关系,建立数值分析模型。

(2) 对已有试验梁建立“核心”约束效应和非“核心”约束效应的构件模型,将两种模型所得分析结果与试验结果进行对比,结果表明,采用“核心”约束效应的模拟梁所得弯矩-挠度曲线与实测曲线更为接近,证明了采用“核心”约束效应模型可使分析结果更为精确。

(3) 利用数值分析方法研究了型钢含量、综合配筋率和混凝土强度等级等参数对大尺度预应力型钢-混凝土梁承载力的影响。分析结果表明,综合配筋率 β 为1.34%的梁构件比 β 为1.04%的梁构件承载力提高19.3%;型钢含量 α 为2.36%梁构件相

比 α 为1.93%梁构件承载力提高11.3%;混凝土强度等级的改变对大尺度预应力型钢-混凝土梁承载力影响不大。

参考文献

- [1] GHAFORI E, MOTAVALLI M. Flexural and interfacial behavior of metallic beams strengthened by prestressed bonded plates [J]. Composite structures, 2013, 101(15): 22-34.
- [2] LIU H, XIANG T, ZHAO R, et al. Research on non-linear structural behaviors of prestressed concrete beams made of high strength and steel fiber reinforced concretes [J]. Construction & building materials, 2008, 23(1): 85-95.
- [3] GHALLAB A, BEEBY A W. Factors affecting the external prestressing stress in externally strengthened prestressed concrete beams [J]. Cement and concrete composites, 2005, 27(9): 945-957.
- [4] PARK W S, YUN H D. Seismic behaviour of steel coupling beams linking reinforced concrete shear walls [J]. Engineering structures, 2005, 27(7): 1024-1039.
- [5] PADMARAJIAH S K, RAMASWAMY A. Flexural strength predictions of steel fiber reinforced high-strength concrete in fully/partially prestressed beam specimens [J]. Cement & concrete composites, 2004, 26(4): 275-290.
- [6] 贾金青, 孟刚, 封硕, 等. 预应力型钢超高强混凝土梁抗弯延性试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(4): 64-70.
(JIA Jinqing, MENG Gang, FENG Shuo, et al. Flexural ductility of prestressed steel reinforced ultra-high strength concrete beams [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2015, 47(4): 64-70.)
- [7] 王琨, 袁沈峰, 曹大富, 等. 套建层预应力型钢混凝土组合框架罕遇地震下抗倒塌性能分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(2): 248-255.
(WANG Kun, YUAN Shenfeng, CAO Dafu, et al. Anti-collapse performance of out-jacketing PSRC frame for adding stories under severe earthquakes [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(2): 248-255.)
- [8] 李文昌, 王钧, 刘英明. 内置H型钢预应力混凝土组合梁受弯性能非线性分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(3): 473-479.
(LI Wengchang, WANG Jun, LIU Yingming. Nonlinear analysis of flexural behavior in encased H-steel prestressed concrete composite beam [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(3): 473-479.)
- [9] 阎石, 吴禹墨, 陈鑫, 等. 贯穿式方钢管混凝土

- 土-H型钢梁柱节点抗震性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(2):193-202.
(YAN Shi, WU Yumo, CHEN Xin, et al. Clapboard-through-type concrete-filled square steel tube column and H-shaped steel beam [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2017,33(2):193-202.)
- [10] 李莉,薛素铎,曹万林. 高强混凝土-型钢组合剪力墙抗震性能非线性有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2008,24(5):788-793.
(LI Li, XUE Suduo, CAO Wanlin. Nonlinear finite element analysis of seismic behavior of high strength concrete and steel composite shear walls[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2008,24(5):788-793.)
- [11] 傅传国,李玉莹,梁书亭. 预应力型钢混凝土简支梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(3):62-73.
(FU Chuanguo, LI Yuying, LIANG Shuting. Experimental study on simply supported prestressed steel reinforced concrete beams [J]. Journal of building structures,2007,28(3):62-73.)
- [12] 张根俞,梁书亭,朱筱俊,等. 考虑约束效应的型钢混凝土梁抗弯承载力计算分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2009,39(3):569-573.
(ZHANG Genyu, LIANG Shuting, ZHU Xiaojun, et al. Analysis on bend bearing capacity of steel-encased concrete beams considering the effect of confinament [J]. Journal of southeast university(natural science edition),2009,39(3):569-573.)
- [13] 王怀亮,宋玉普. 受侧向约束混凝土的内时损伤本构模型[J]. 工程力学,2007,24(12):120-127.
(WANG Hailiang, SONG Yupu. Endochronic damage constitutive model for confined concrete [J]. Engineering mechanics,2007,24(12):120-127.)
- [14] 聂建国,王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学,2013,30(4):59-67.
(NIE Jianguo, WANG Yuhang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures [J]. Engineering mechanics,2013,30(4):59-67.)
- [15] 秦浩,赵宪忠. ABAQUS 混凝土损伤因子取值方法研究[J]. 结构工程师,2013,29(6):27-32.
(QIN Hao, ZHAO Xianzhong. Study on the ABAQUS damage parameter in the concrete damage plasticity model [J]. Structural engineers,2013,29(6):27-32.)
- [16] 周晓娜,徐杰,连峰,等. 预应力型钢混凝土梁受弯性能非线性分析[J]. 山东建筑大学学报,2009,24(4):316-320.
(ZHOU Xiaona, XU Jie, LIAN Feng, et al. Non-linear analysis of prestressed steel reinforced concrete beam subject to bending [J]. Journal of Shandong jianzhu university,2009,24(4):316-320.)
- [17] 李凯文,王玉玲,万鑫,等. 实腹式型钢混凝土十字形柱抗震性能研究[J]. 建筑结构,2015,45(22):80-84.
(LI Kaiwen, WANG Yuling, WAN Xin, et al. Research on seismic behavior of solid-web steel reinforced high-performance concrete cross-shaped column [J]. Building structure,2015,45(22):80-84.)
- [18] 王钧,李婷,任靖豪. 大直径高强钢绞线预应力混凝土梁受力性能[J]. 建筑科学与工程学报,2017,34(2):103-110.
(WANG Jun, LI Ting, REN Jinghao. Mechanical performances of prestressed concrete beams with large-diameter high-strength steel strands [J]. Journal of architecture and civil engineering,2017,34(2):103-110.)
- [19] 邵永健,郁文,陈宗平,等. 实腹式型钢混凝土梁受扭性能试验研究[J]. 建筑结构,2013,43(8):58-62.
(SHAO Yongjian, YU Wen, CHEN Zongping, et al. Experimental study on torsional behavior of solid web steel reinforced concrete beams [J]. Building structure,2013,43(8):58-62.)
- [20] 王钧,邬丹,郑文忠. 预应力H型钢混凝土简支梁正截面受力性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(6):22-27.
(WANG Jun, WU Dan, ZHENG Wenzhong. Experimental research on flexural mechanical behavior of simple prestressed H-steel reinforced concrete beam [J]. Journal of Harbin institute of technology,2009,41(6):22-27.)