

引文格式:张鹏程,郑少锋,王权民,等. 钢筋桁架混凝土梁弯剪性能数值模拟研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(3): 37-47.

ZHANG Pengcheng, ZHENG Shaofeng, WANG Quanmin, et al. Numerical simulation study on flexural and shear behavior of concrete beam with steel-bar truss[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(3): 37-47.

DOI:10.19815/j.jace.2023.12094

## 钢筋桁架混凝土梁弯剪性能数值模拟研究

张鹏程<sup>1,2</sup>, 郑少锋<sup>1</sup>, 王权民<sup>3</sup>, 卫振海<sup>4</sup>, 林新强<sup>5</sup>, 廖金杰<sup>5</sup>, 陈平阳<sup>6</sup>

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 福建省滨海土木工程数字仿真重点实验室, 福建 厦门 361005; 3. 闽南科技学院 土木工程学院, 福建 泉州 362332; 4. 中国人民解放军国防大学 联合勤务学院, 北京 100858; 5. 厦门雅众建设集团有限公司, 福建 厦门 361006; 6. 福建磊鑫集团有限公司, 福建 厦门 361006)

**摘要:**通过在普通混凝土梁钢筋笼中加焊斜腹筋可以制成钢筋桁架来承担施工荷载,从而免设支架支撑。为研究钢筋桁架免支模施工是否会影响梁的后期受力性能,建立了钢筋桁架混凝土梁与普通钢筋混凝土梁的精细有限元模型,分析对比其性能差异。结果表明:对于一般的简支梁,为免支模所增加的斜钢筋用量约为原梁钢筋总量的12%,施工阶段钢筋桁架可只承担其自重施工荷载,相应的受力钢筋最大强度应力比不大于0.2;钢筋桁架不改变梁受拉钢筋面积,建成后梁正截面受弯承载力提高,延性更好;斜截面受剪与设置弯起钢筋效果相同,可按照规范公式计算。

**关键词:** 钢筋混凝土梁; 钢筋桁架; 斜腹筋; 受弯性能; 受剪性能; 数值模拟

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2025)03-0037-11

## Numerical simulation study on flexural and shear behavior of concrete beam with steel-bar truss

ZHANG Pengcheng<sup>1,2</sup>, ZHENG Shaofeng<sup>1</sup>, WANG Quanmin<sup>3</sup>, WEI Zhenhai<sup>4</sup>,  
LIN Xinqiang<sup>5</sup>, LIAO Jinjie<sup>5</sup>, CHEN Pingyang<sup>6</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 2. Fujian Key Laboratory of Digital Simulations for Coastal Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 3. School of Civil Engineering, Minnan Science and Technology College, Quanzhou 362332, Fujian, China; 4. Joint Logistics College, China People's Liberation Army National Defence University, Beijing 100858, China; 5. Xiamen Yazhong Construction Group Co., Ltd., Xiamen 361006, Fujian, China; 6. Fujian Leixin Construction Co., Ltd., Xiamen 361006, Fujian, China)

**Abstract:** By welding diagonal web reinforcement in the steel cage of ordinary concrete beams, the steel-bar truss can be made to bear construction loads, so as to avoid the support of the brackets. In order to study whether the use of steel-bar truss without formwork construction will affect the later stress performance of the constructed beams, a detailed finite element model was established to analyze and compare the performance differences between reinforced concrete truss beams and ordinary reinforced concrete beams. The results show that for general simply supported beams,

收稿日期: 2023-12-05

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金项目(12072302); 国家杰出青年科学基金项目(52125806);

福建省住建厅科学技术计划项目(2022-K-264); 厦门市建设科技计划项目(XJK2023-1-2)

作者简介: 张鹏程(1972-), 男, 工学博士, 副教授, E-mail: zpcchina@xmu.edu.cn.

the amount of diagonal steel bars added to avoid formwork is about 12% of the total amount of steel bars in the original beam. During the construction phase, the steel-bar truss can only bear its own weight construction load, and the maximum strength stress ratio of the corresponding stressed steel bar is not greater than 0.2. The steel-bar truss does not change the area of tensile steel bars in the beam, and after completion, the bending capacity of the beam cross-section is increased, resulting in better ductility. The effect of inclined section shear is the same as that of setting bent steel bars, and can be calculated according to the standard formula.

**Key words:** reinforced concrete beam; steel-bar truss; diagonal web reinforcement; flexural behavior; shear behavior; numerical simulation

**Author resume:** ZHANG Pengcheng(1972-), male, PhD, associate professor, E-mail: zpcchina@xmu.edu.cn.

## 0 引言

普通钢筋混凝土梁的钢筋笼由纵筋、箍筋绑扎成平行四边形网格<sup>[1]</sup>,可变形,如果增设斜腹筋,焊接成三角形空间网格的钢筋桁架结构就会具备刚度与承重能力。梁钢筋桁架可按照现行《钢结构设计标准》<sup>[2]</sup>进行设计,钢筋焊接、加工都有相应的技术标准<sup>[3]</sup>。

桁架钢筋笼可在工地钢筋棚中直接加工,钢筋笼外挂包模板后作为“预制件”,吊装就位连接钢筋后,泵送现浇混凝土完成施工。一般可采取柱、梁、板混凝土分别浇筑的施工方式,梁的桁架钢筋笼只承担自身混凝土浇筑荷载,简支于两端竖向构件,梁下不需要搭架支撑。施工全程只需要钢筋工,购买商品混凝土完成浇筑即可。与传统现浇工艺相比,不再需要搭设满堂脚手架,以及现场制模、绑扎钢筋,这可节省大量劳动力成本。

国内已有学者将钢筋桁架应用于楼板,研究新型楼板的力学性能<sup>[4-6]</sup>。本文研究钢筋桁架应用于混凝土梁和将普通梁钢筋笼改造为免支撑桁架钢筋笼的方法。针对普通框架梁的钢筋笼,设计适宜的斜腹筋构造,制成钢筋桁架结构,分析施工阶段钢筋受力变形。内置钢筋桁架,在原梁配筋的基础上增设斜腹筋,斜腹筋与纵筋、箍筋相连接,相当于桁架的斜腹杆。

参考国内外学者对钢筋混凝土力学性能的研究方法<sup>[7-10]</sup>,分析采用新工艺施工和钢筋桁架对梁受力性能的影响,为钢筋桁架混凝土梁的受弯性能和受剪性能建立理论依据,以便为进一步工程应用提供参考。根据试验梁建立梁受弯破坏有限元模型,试验与数值模拟相结合,对比普通梁与钢筋桁架混凝土梁的破坏形态、荷载-跨中挠度曲线、受弯承载

力,分析斜腹筋的影响和作用机理;建立普通梁与钢筋桁架混凝土梁受剪破坏模型,对比不同剪跨比下梁的破坏形态、荷载-跨中挠度曲线、受剪承载力,分析斜腹筋对受剪承载力的影响。

## 1 钢筋桁架设计

### 1.1 技术原理

在普通梁的角部纵筋与若干道箍筋之间加焊斜向钢筋,可制成空间网格钢筋桁架结构,如图 1 所示。借助该桁架结构的承载力,可以承担梁混凝土浇筑荷载。梁钢筋桁架两端简支于支座,梁模板可以通过螺栓吊挂于钢筋桁架上(图 2),不再需要梁下设支柱。

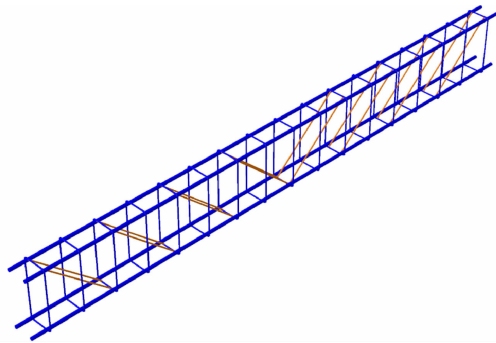


图 1 梁钢筋桁架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of beam steel-bars truss

桁架钢筋笼在混凝土浇筑时受到的竖向荷载包括混凝土、模板、钢筋及施工人员与设备的重量,荷载可按《建筑施工模板安全技术规范》<sup>[11]</sup>的规定计算,将竖向均布荷载分配、换算为集中力作用于桁架节点。桁架钢筋在施工阶段受力越小越好,通常安排梁、板混凝土分别浇筑,即梁钢筋桁架只承担梁自身混凝土的浇筑荷载,当梁混凝土达到相当强度后,由钢筋混凝土梁来承担所负板的浇筑荷载。

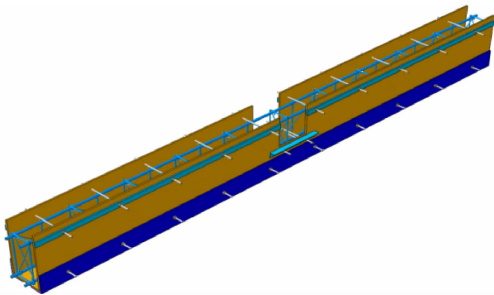


图 2 吊挂模板示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hanging formwork

1.2 构造设计

一般梁钢筋笼为正交六面的框笼,仅在侧面增设桁架斜吊箍的情况下,因其余四面仍为平行四边形区格,仍可变形,一定间隔布置交叉定形钢筋。梁顶、底平面有模板、挂模螺栓以及箍筋在桁架出平面形成有利约束,一般不需要增加斜筋。

以一实际工程框架梁为例,跨度 3 450 mm,截面为 200 mm×400 mm,混凝土强度等级为 C30,钢筋为 HRB400,纵筋直径 20 mm,箍筋直径 8 mm,间距 200 mm。

斜腹筋宜采用外套封闭斜吊箍,较易施工。外套封闭斜吊箍指用适宜边长的矩形封闭的箍筋形式,斜挎在已经绑扎完成的钢筋笼上,再对桁架节点进行施焊连接。钢筋桁架焊接需满足《混凝土结构设计规范》<sup>[1]</sup>中对钢筋焊接的要求,以免因加焊而影响截面未来受力性能。

斜腹筋直径取 8 mm(同箍筋),步距取 400 mm。钢筋桁架截面高度为 350 mm。斜吊箍与角纵筋、相重叠的箍筋点焊为一体作为桁架节点。增设斜腹筋前后梁截面示意图如图 3 所示,图 3(a)为普通配筋,图 3(b)为在普通配筋上增加配置直径 8 mm 斜腹筋的钢筋桁架。

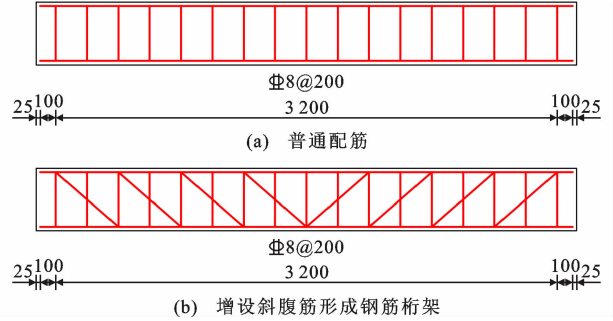


图 3 混凝土梁增设斜腹筋示意图 (单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of adding diagonal web reinforcement to concrete beam (unit: mm)

1.3 数值分析

采用 ABAQUS 软件建立钢筋桁架模型,钢筋的弹性模量为  $2\times10^5$  MPa,泊松比为 0.30。施工荷载按梁单独浇筑工况,350 mm 高钢筋桁架,上弦节点作用竖直向下集中力 0.70 kN。浇筑荷载为 0.70 kN@400 mm,集中荷载作用于节点<sup>[12]</sup>。桁架下弦左右两端支座设置为固定铰支座。桁架钢筋平面内、外的计算长度系数均按实际约束条件取值,计算简图如图 4 所示。

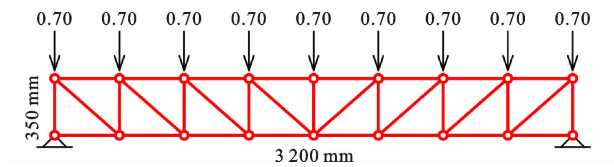


图 4 钢筋桁架计算简图(单位:kN)

Fig. 4 Calculation diagram of steel-bar truss (unit: kN)

计算得出钢筋桁架的应力云图如图 5 所示。表 1 为钢筋桁架的计算结果,强度应力比、稳定应力比取桁架中同类钢筋所有杆段的最大值,均满足《钢结构设计标准》<sup>[2]</sup>对轴心受力构件的强度、稳定性以及长细比的要求。钢筋桁架的跨中挠度为 1.46 mm,约为跨度的 1/2 000。桁架中新增的斜腹筋全为受拉杆件,无需考虑压杆稳定,所需的斜腹筋直径较小,增加的斜腹筋为 4.27 kg,约为原普通钢筋笼总钢筋质量的 12%。

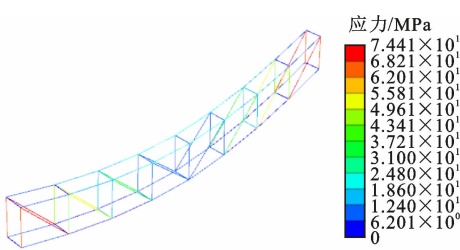


图 5 钢筋桁架应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of steel-bar truss

表 1 钢筋桁架受力情况

Table 1 Stress condition of steel-bar truss

钢筋类型	最大强度应力比	最大稳定应力比
纵筋	0.06	0.07
箍筋	0.18	0.76
斜腹筋	0.21	

适筋梁的最小配筋率 0.2%;最大配筋率限值为 2.1%。算例混凝土梁的纵向钢筋配筋率为 0.8%,钢筋桁架中弦杆纵筋的强度应力比最大值为 0.06,箍筋、斜腹筋杆件强度应力比最大值为 0.21。

简支钢筋桁架的受弯承载力、受剪承载力可按

公式(1)、(2)验算。均匀分布的竖向集中荷载作用下,跨中截面上、下弦杆达到弹性极限,由平衡条件可以得到,钢筋桁架的受弯承载力可根据式(1)计算。剪力最大为支座处,支座处斜腹杆达到弹性极限,受剪承载力可按(2)计算。

$$M_{ut}=f_yA_s h_t \tag{1}$$

$$V_{ut}=f_{yx}A_{sx}\sin(\alpha) \tag{2}$$

式中: $M_{ut}$ 为钢筋桁架受弯承载力; $V_{ut}$ 为钢筋桁架受剪承载力; $f_y$ 为纵筋抗拉强度; $A_s$ 为角部纵筋面积; $h_t$ 为钢筋桁架高度; $f_{yx}$ 为斜腹筋抗拉强度; $A_{sx}$ 为斜腹筋面积; $\alpha$ 为斜腹筋方向与水平方向的夹角。

建立不同截面、跨度的梁钢筋桁架有限元模型,求解得到不同规格框架梁对应的钢筋桁架受力情况。常用框架梁截面、跨度满足承担施工浇筑荷载的钢筋桁架所需最小直径如表 2 所示。框架梁实际配筋面积通常远大于表中数值,将角部纵筋用作桁架的上、下弦杆即可。

表 2 常用混凝土梁截面钢筋直径

Table 2 Common concrete beam section reinforcement diameter

$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$d_1/\text{mm}$	$d_2/\text{mm}$	$d_3/\text{mm}$
200	300	3 000	12	8	8
200	400	4 000	12	8	8
200	450	4 500	12	8	8
250	500	5 000	12	8	8
250	550	5 500	14	8	8
300	600	6 000	14	8	8
300	650	6 500	14	8	8
300	700	7 000	14	10	10
300	750	7 500	16	10	10
300	800	8 000	16	10	10

注: $b$ 为梁宽度; $h$ 为梁高度; $l$ 为梁跨度; $d_1$ 为纵筋直径; $d_2$ 为箍筋直径; $d_3$ 为斜腹筋直径。

1.4 工程实例

装配钢筋笼技术已在实际工程取得应用,福建省三明市雅众集团综合楼采用该技术进行施工,选取综合楼顶层①—②轴线区域作为该技术工程试用区域,梁钢筋笼在原有配筋的基础上增设斜腹筋,焊接形成桁架式钢筋笼,通过连接件与模板套装完成后进行吊装,其工程应用如图 6 所示。可以看出,混凝土浇筑过程中梁底无支架支撑,未见明显变形,证明了梁钢筋笼作为桁架结构进行数值分析的有效性,其承担浇筑荷载。

由于斜腹筋的增量较小,相比于传统现浇工艺,增加少量的材料费,减少了搭设脚手架、现场制



(a) 桁架钢筋笼吊装 (b) 浇筑中梁底未支撑

图 6 桁架与钢筋笼技术的工程应用

Fig. 6 Engineering application of truss reinforcement cage technology

模、绑扎钢筋等工序,可节省大量人工费。装配钢筋笼的制作既可在工厂内完成,也可在工地现场制作。钢筋笼在工厂加工利于流水线高效率生产,在专用设备上加工时钢筋笼尺寸定位精准、误差小、质量好。在工厂制作完成的钢筋笼由于具有足够刚度,在运输、安装过程中不易变形。同时减少了现场加工、绑扎钢筋的时间,所需的钢筋笼可提前预制好,有利于加快工程进度和提高生产效率。

2 钢筋桁架混凝土梁受弯性能

2.1 数值模型

研究组前期对钢筋桁架混凝土梁的受弯性能进行了试验研究,浇筑了 2 根混凝土梁试件,混凝土强度等级为 C30,试件测试的混凝土抗压强度为 30.08 MPa,钢筋选用 HRB400,保护层厚度为 25 mm,上部纵筋为 2 $\Phi^R$ 12,下部纵筋为 2 $\Phi^R$ 18。普通混凝土梁试件 C30-0 如图 7(a)所示。C30-8 配筋为在 C30-0 的基础上设置了直径 8 mm 的斜腹筋,如图 7(b)所示。对其进行四点受弯加载,支座中心与梁端水平距离 150 mm,剪跨比为 2.8。试验加载如图 8 所示。

采用 ABAQUS 软件建立图 7 所示的 2 根四点受弯数值模型,数值模型根据试验梁的参数建立,加载与边界条件保持一致,与研究组已完成的试验研究结果进行对比。

钢筋材料本构选用双折线模型定义,应力从 0 增加到钢材屈服强度时属于弹性阶段,应力-应变曲线为直线段,斜率为钢材的弹性模量  $E_s$ 。应力从屈服强度增加至抗拉强度时,直线斜率为  $0.01E_s$ 。

钢筋应力-应变( $\sigma\epsilon$ )曲线方程为

$$\sigma=\begin{cases} E_s\epsilon & 0\leq\epsilon\leq\epsilon_y \\ f_y+0.01E_s(\epsilon-\epsilon_y) & \epsilon_y<\epsilon\leq\epsilon_u \end{cases} \tag{3}$$

式中: $E_s$ 为钢筋弹性模量; $f_y$ 为钢筋屈服强度; $\epsilon_y$ 为钢筋屈服应变; $\epsilon_u$ 为钢筋达到抗拉强度的应变。



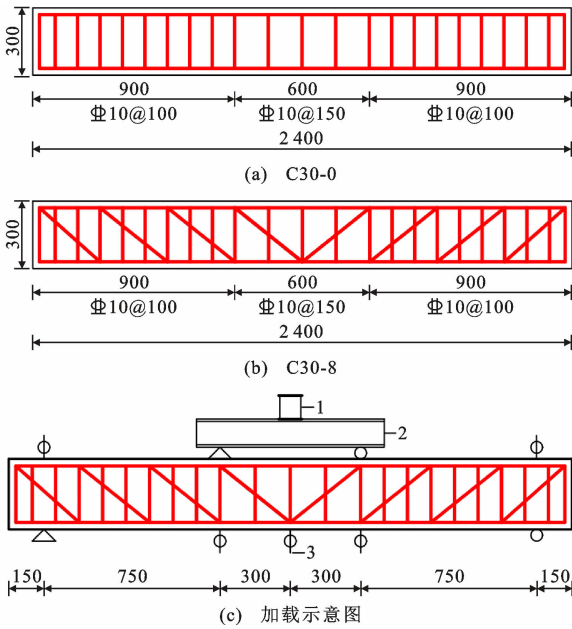


图 7 钢筋桁架混凝土梁增设斜腹筋示意图(单位:mm)

Fig. 7 Schematic diagram of adding diagonal web reinforcement to steel-bars truss concrete beams(unit: mm)



图 8 试验加载

Fig. 8 Test loading

混凝土材料选用 ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型(CDP)定义,本构关系根据《混凝土结构设计规范》确定 C30 混凝土应力-应变曲线。塑性参数参考文献[13]、[14],如表 3 所示。

表 3 混凝土塑性参数

Table 3 Plastic parameter of concrete

$\Psi/(^{\circ})$	$e$	$f_{b0}/f_{c0}$	$K$	$\nu$
30	0.1	1.16	0.667	0.005

注: $\Psi$ 为膨胀角; $e$ 为偏心率; $f_{b0}$ 、 $f_{c0}$ 分别为初始等效双轴抗压屈服应力和初始单轴抗压屈服应力; $K$ 为不变量应力比; $\nu$ 为黏性系数。

混凝土单轴受拉应力-应变曲线方程为

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \epsilon \quad (4)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t (1.2 - 0.2x^5) & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_t} \quad (6)$$

$$\rho_t = \frac{f_t^*}{E_c \epsilon_t} \quad (7)$$

式中: $E_c$ 为混凝土弹性模量; $\rho_t$ 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数值; $f_t^*$ 为混凝土的单轴抗拉强度; $\epsilon_t$ 为与  $f_t^*$  对应的混凝土峰值拉应变; $d_t$ 为混凝土单轴受拉损伤演化参数; $\alpha_t$ 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段参数。

混凝土单轴受压应力-应变曲线方程为

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \epsilon \quad (8)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\rho_c = \frac{f_c^*}{E_c \epsilon_c} \quad (10)$$

$$n = \frac{E_c \epsilon_c}{E_c \epsilon_c - f_c^*} \quad (11)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \quad (12)$$

式中: $\rho_c$ 为混凝土单轴受压应力-应变曲线下降段参数值; $f_c^*$ 为混凝土单轴抗压强度; $\epsilon_c$ 为与单轴抗压强度  $f_c^*$  对应的混凝土峰值压应变; $d_c$ 为混凝土单轴受压损伤演化参数; $\alpha_c$ 为混凝土单轴受压应力-应变曲线下降段参数。

梁通过支座板与支座相连,将支座底中心点与底面耦合,限制中心点的位移条件,使边界条件为左端固定铰接,右端滑动铰接。梁在加载点处设置加载板,加载板面上中心点与平面耦合,对加载板施加竖向位移。加载板与梁、支座板与梁的相互作用定义为面与面接触,法向定义为“硬接触”,可以传递压力但不可传递拉力;切向为“摩擦”接触,摩擦因数为 0.2。

混凝土单元选用 C3D8R,为八节点线性六面体单元、减缩积分。钢筋单元选用 T3D2,为二节点线性三维桁架单元。综合考虑计算精度与效率,混凝土网格尺寸取 25 mm×25 mm,钢筋网格尺寸取 25 mm×25 mm。钢筋均采用 HRB400 带肋钢筋,且试验梁破坏前未出现纵筋与混凝土黏结破坏而发生明显滑移,相对滑移量较小。因此,钢筋与混凝土相互作用可简化定义为钢筋作为内置区域嵌入混凝土,假定钢筋与混凝土之间不发生相对滑移。图 9 为普通混凝土梁和钢筋桁架混凝土梁四点受弯数值模型。

## 2.2 荷载-跨中挠度曲线

将梁数值模拟和试验得到的荷载-跨中挠度曲线分别进行对比,如图 10 所示。从 C30-0 和 C30-8 模拟和试验的荷载-跨中挠度曲线可以看出,普通混

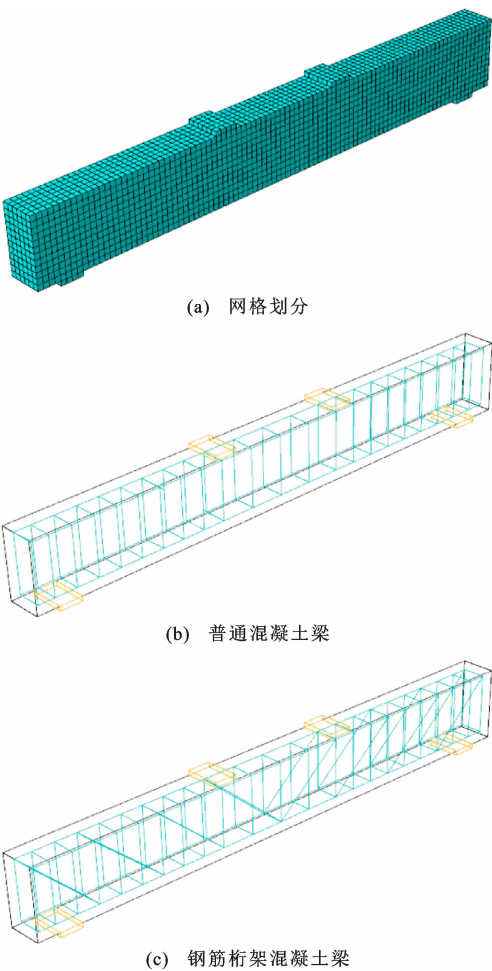


图 9 数值模型

Fig. 9 Numerical model

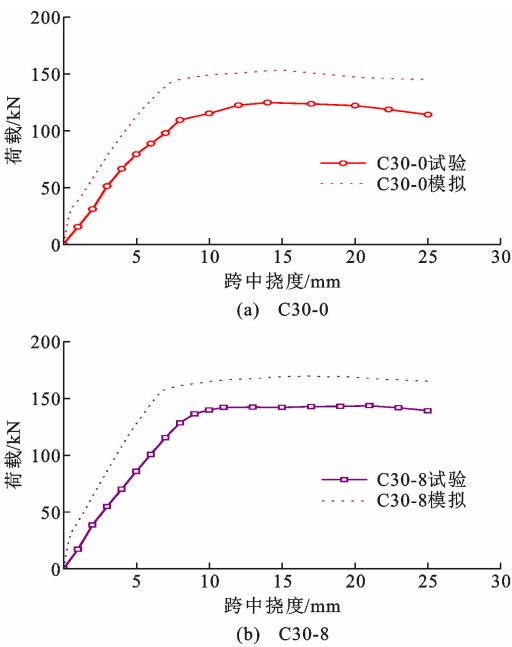


图 10 梁的跨中挠度曲线

Fig. 10 Middle span deflection curves of beams

凝土梁当受拉钢筋屈服时,承受弯矩接近极限弯矩。配置斜腹筋可在梁跨中截面受拉区对截面提供拉力,使 C30-8 受到的弯矩达到 C30-0 极限弯矩后还可以继续增大,具有更好的受弯承载能力。试验与数值模拟曲线都表明,C30-8 从屈服到极限荷载经历了更大的位移,延性更好。

数值模拟和试验得到的曲线存在误差,表现为数值模拟曲线的极限荷载和刚度偏大,误差在合理范围之内。就整体趋势而言,数值模型可以较好地表现出配置斜腹筋对梁荷载-跨中挠度曲线的影响,与试验结果对比验证了数值模型的有效性。

数值模拟和试验曲线存在差别,数值模型计算得到的梁刚度相对于试验结果表现出一定程度的偏大,主要原因为:

(1)数值模型混凝土材料假定为均质材料,空间内均匀无缺陷。

(2)相互作用采用内置区域,假定钢筋与混凝土在变形的过程中未发生相对滑移,钢筋和混凝土单元位移协调变形,协同工作性能良好。

(3)弯曲变形过程中,受拉区混凝土仍然为连续体,可以承受拉力。材料模型中用单元刚度的降低来模拟实际的混凝土局部压碎和开裂,因此混凝土压碎和开裂区域相应的混凝土单元刚度降低明显,但仍然具有一部分的刚度,未降低到 0;内力仍然可以在这些单元之间传递,使混凝土的应力分布偏于均匀,刚度得到更充分的利用。

试件 C30-0、C30-8 的数值模拟曲线整体趋势与试验结果接近。数值模拟曲线较好地体现出 C30-8 与 C30-0 的区别,即受弯承载力、刚度更高。数值模拟与试验的极限荷载两者在合理误差范围内。

2.3 破坏形态

当荷载加至 141.8 kN 时,C30-0 受拉钢筋发生屈服,混凝土、钢筋的应力云图如图 11(a)、(b)所示。当荷载加至 155.5 kN 时,C30-8 受拉钢筋发生屈服,混凝土、钢筋的应力云图如图 11(c)、(d)所示。

钢筋桁架混凝土梁的受弯破坏模式和普通钢筋混凝土梁相似,发生正截面破坏,受拉钢筋屈服,受压区混凝土发生破坏。应力云图中纯弯段混凝土受压区和加载板作用区由于压应变较大,此时等效应力较大,与试验梁破坏时的混凝土压坏区域相符合。C30-8 的受拉钢筋屈服后,斜腹筋受力进一步增大,使截面所受弯矩可以继续增大。

荷载达到 150 kN 时接近极限荷载,此时混凝土

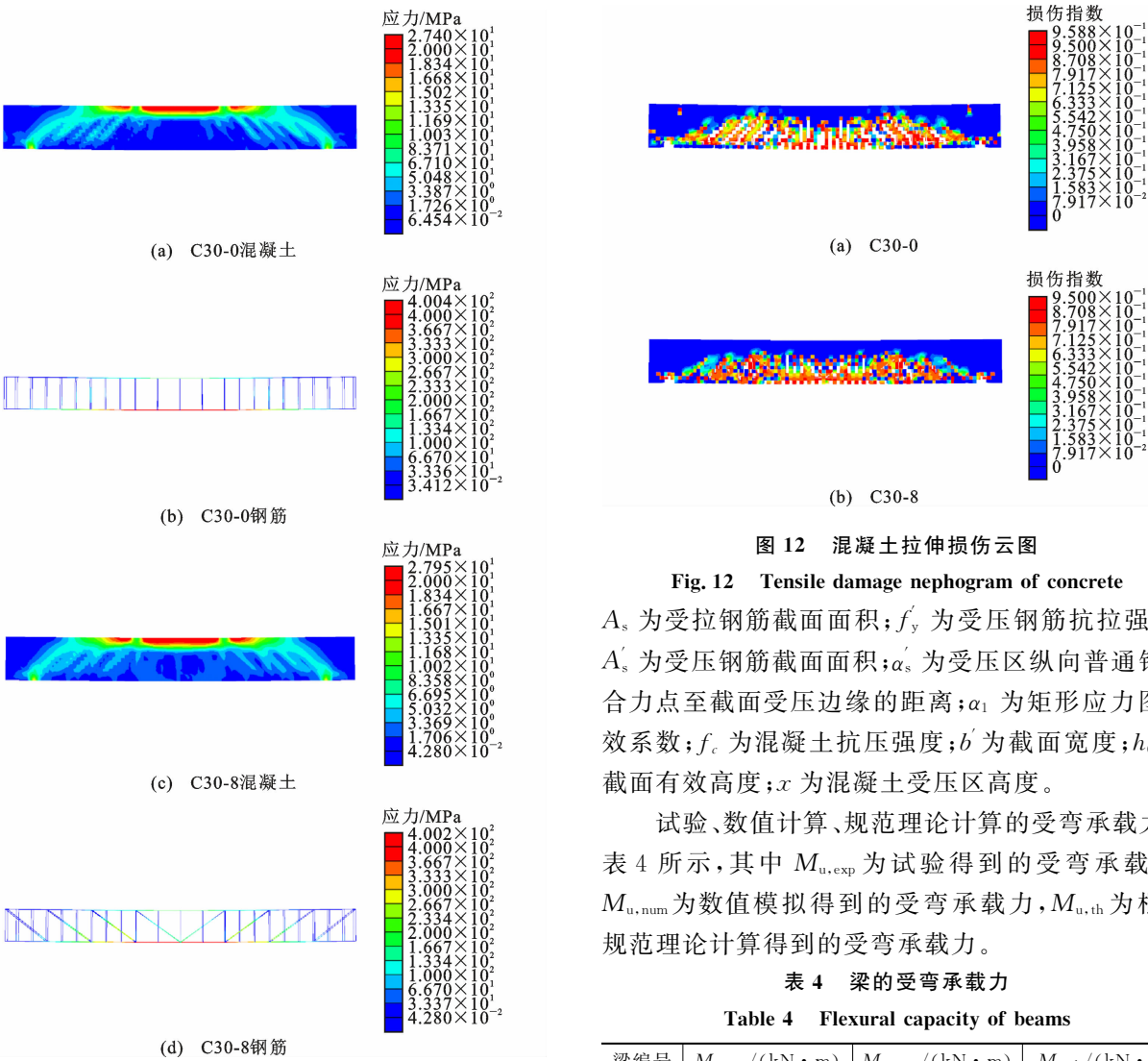


图 11 梁的应力云图

Fig. 11 Stress nephogram of beams

土拉伸损伤云图如图 12 所示。在场输出中使用状态变量选项删除拉伸损伤指数大于 0.9 的混凝土单元,拉伸损伤程度大表明此处混凝土受拉造成刚度下降,反映混凝土裂缝发展的趋势。

混凝土拉伸损伤分布规律与试验结果相符合,拉伸损伤指数较大的单元分布、演化趋势与受弯试验梁弯曲裂缝发展规律一致。C30-8 的损伤程度较低,对应试验加载时裂缝宽度、长度较小。

2.4 正截面受弯承载力计算

按照《混凝土结构设计规范》<sup>[1]</sup>进行梁的受弯承载力理论计算,即

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s - f_y' A_s' \tag{13}$$

$$M_u = \alpha_1 f_c b' x (h_0 - \frac{x}{2}) + f_y' A_s' (h_0 - \alpha_s') \tag{14}$$

式中: $M_u$  为受弯承载力; $f_y$  为受拉钢筋抗拉强度;

图 12 混凝土拉伸损伤云图

Fig. 12 Tensile damage nephogram of concrete

$A_s$  为受拉钢筋截面面积; $f_y'$  为受压钢筋抗拉强度; $A_s'$  为受压钢筋截面面积; $\alpha_s'$  为受压区纵向普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离; $\alpha_1$  为矩形应力图等效系数; $f_c$  为混凝土抗压强度; $b'$  为截面宽度; $h_0$  为截面有效高度; $x$  为混凝土受压区高度。

试验、数值计算、规范理论计算的受弯承载力如表 4 所示,其中  $M_{u,exp}$  为试验得到的受弯承载力,  $M_{u,num}$  为数值模拟得到的受弯承载力,  $M_{u,th}$  为根据规范理论计算得到的受弯承载力。

表 4 梁的受弯承载力

Table 4 Flexural capacity of beams			
梁编号	$M_{u,exp}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{u,num}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{u,th}/(\text{kN} \cdot \text{m})$
C30-0	46.5	57.5	47.6
C30-8	53.6	63.6	47.6

试验与规范理论的受弯承载力较为接近。数值模型受弯承载力相对于试验结果偏大,但在合理范围以内。

3 钢筋桁架混凝土梁受剪性能

3.1 数值模型

通过试验与数值模拟进行受弯性能研究,可以得出数值模拟与试验的受弯承载力在合理范围之内,钢筋桁架混凝土梁的 ABAQUS 有限元模型能较好地反映斜腹筋的影响和梁的受力情况,可以作为研究的有效手段。在此基础上,建立数值模型研究钢筋桁架混凝土梁的受剪性能,探究增设斜腹筋对受剪性能的影响。

前文受弯性能分析中梁发生受弯破坏,设计破坏模式为斜截面剪切破坏的简支梁 SC30-0、SC30-8



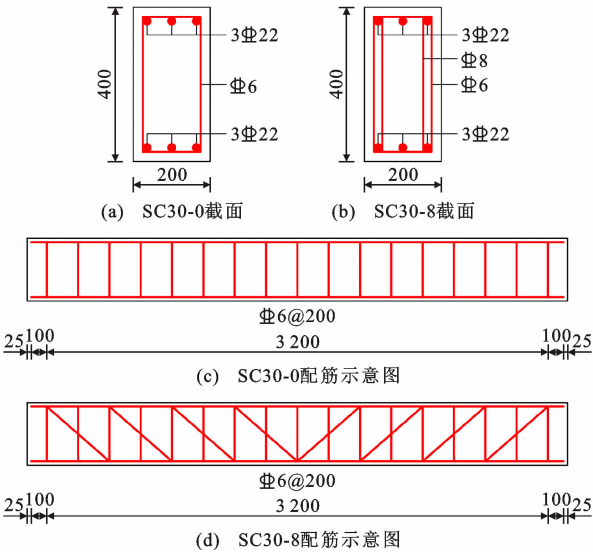


图 13 梁的配筋图(单位:mm)

Fig. 13 Reinforcement drawing of beams (unit: mm)

如图 13 所示。混凝土强度等级为 C30, 钢筋选用 HRB400。数值模型建立同第 2.1 节, 改变数值模型中加载板位置, 使竖向荷载的作用点发生改变。梁的剪跨比  $\lambda$  分别为 2.0、2.8、3.6, 分析不同剪跨比下混凝土梁的荷载-跨中挠度曲线, 探究配置斜腹筋对混凝土梁受剪性能的影响。

3.2 破坏形态

不同剪跨比下, 梁发生斜截面剪切破坏, 混凝土斜裂缝沿着加载点-支座连线方向开展, 斜截面破坏时受拉钢筋未屈服。SC30-0 和 SC30-8 的拉伸损伤云图如图 14 所示。

由图 14 可知, SC30-8 主斜裂缝发展得到了明显抑制, SC30-0 剪压区混凝土受到压应力和剪应力共同作用, 截面沿着主斜裂缝发生破坏。由于斜腹筋受拉, 具有抑制混凝土受拉和斜裂缝发展的作用, SC30-8 的拉伸损伤比 SC30-0 小, 失效单元区域较小, 分布更分散。

3.3 荷载-跨中挠度曲线

梁的极限荷载  $P_u$  如表 5 所示。可以看出, SC30-0、SC30-8 的极限荷载随剪跨比的增大而降低。配置斜腹筋可提高混凝土梁受剪承载力, 当剪跨比为 2.0、2.8、3.6 时, 配置斜腹筋的梁极限荷载分别提高了 6.7%、15.5%、17.0%。当剪跨比为 3.6 时, 剪力作用区段最大, 斜腹筋受拉抑制斜截面破坏, 配置斜腹筋的梁极限荷载提升最大, 对混凝土受剪承载力改善最为明显。

图 15 为不同剪跨比梁的荷载-跨中挠度曲线。配置斜腹筋使梁斜截面受剪承载力提高。由于配置

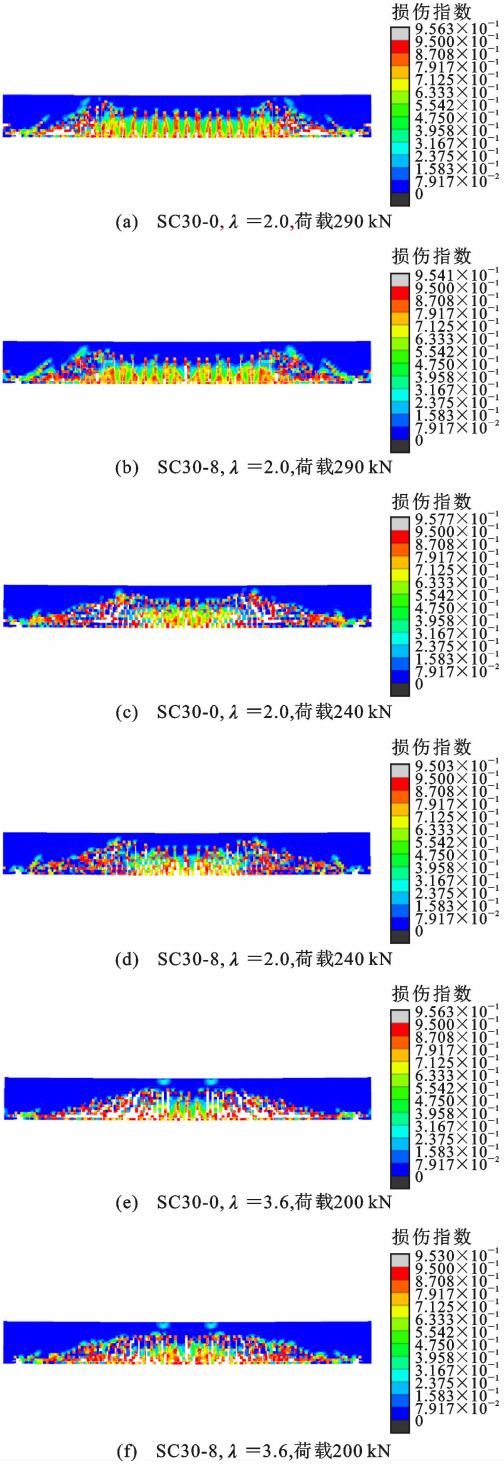


图 14 混凝土拉伸损伤云图

Fig. 14 Tensile damage nephogram of concrete

的斜腹筋在梁内起到了抑制混凝土受拉、斜裂缝发展的作用, 使得斜截面破坏更延缓。达到极限荷载后, SC30-8 相比 SC30-0 荷载降低更缓慢, 降低幅度更小。与受弯试验荷载-挠度曲线相似, 配置斜腹筋使梁斜截面受剪破坏后曲线下降段更平缓, 普通梁破坏后承载力会迅速降低。

荷载-跨中挠度曲线随剪跨比变化的曲线如图



表 5 梁的极限荷载

Table 5 Ultimate load of beams

梁编号	剪跨比	$P_u/\text{kN}$
SC30-0	2.0	299.6
SC30-8		319.6
SC30-0	2.8	242.2
SC30-8		279.7
SC30-0	3.6	212.7
SC30-8		248.9

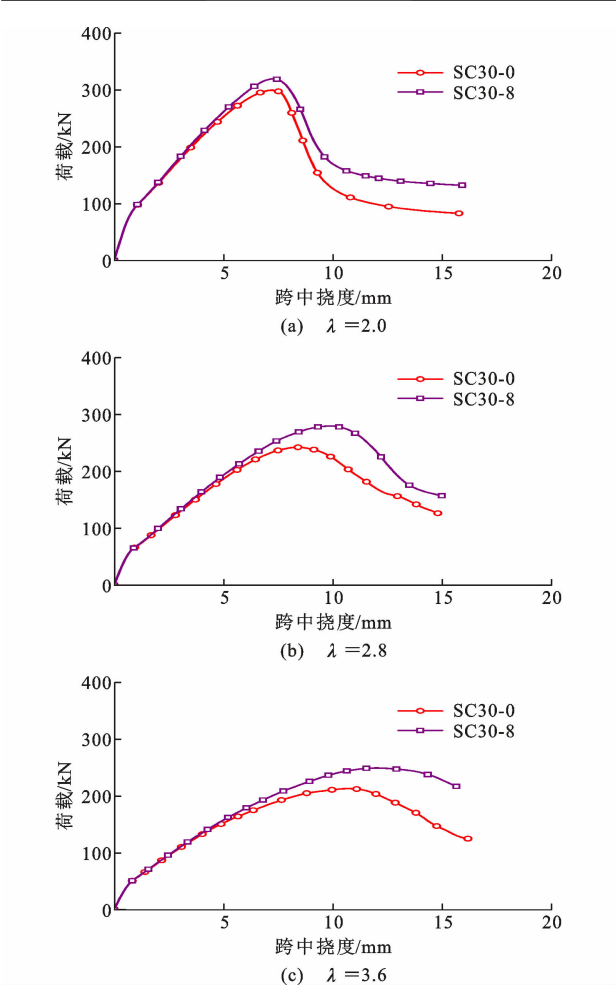


图 15 梁跨中挠度曲线对比

Fig. 15 Comparison of middle span deflection curves of beams

16 所示。当剪跨比为 2.0 时,梁的受剪承载力最高。随着剪跨比的增大,梁截面受到的最大弯矩增大,危险点的单元体正应力和切应力组合的等效应力更大,对梁受剪承载力的影响表现为受剪承载力随着剪跨比的提高而降低。

3.4 斜截面受剪承载力计算

按《混凝土结构设计规范》<sup>[1]</sup>对梁进行受剪承载力计算,并与数值模型承载力对比。斜腹筋的影响根据规范中弯起钢筋对受剪承载力的作用计算。

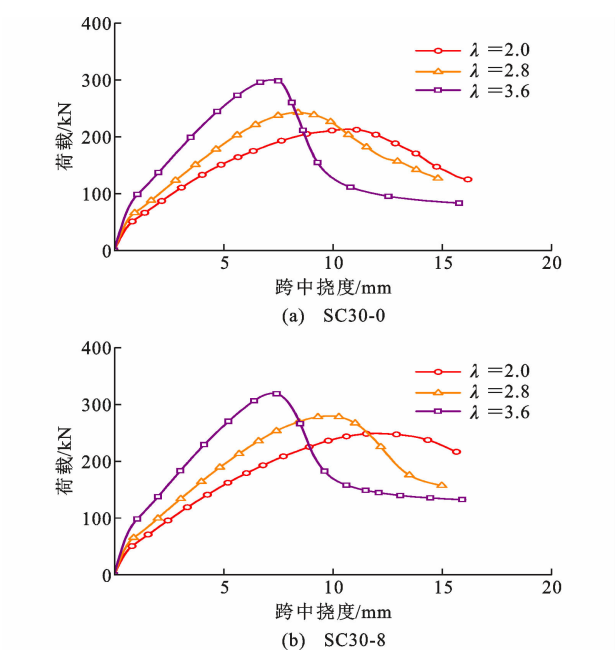


图 16 不同剪跨比梁挠度曲线

Fig. 16 Deflection curves of beams with different shear span ratios

$$V_u = \alpha_{cv} f_t b' h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.8 f_y A_{sb} \sin(\alpha_s) \quad (15)$$

$$\alpha_{cv} = \frac{1.75}{\lambda + 1} \quad (16)$$

式中: $V_u$  为受剪承载力; $\alpha_{cv}$  为截面混凝土受剪承载力系数; $f_t$  为混凝土抗拉强度; $f_{yv}$  为箍筋抗拉强度; $A_{sv}$  为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积; $s$  为箍筋间距; $A_{sb}$  为同一截面内弯起钢筋截面面积; $\alpha_s$  为弯起钢筋与构件纵轴线夹角。

梁的受剪承载力如表 6 所示,其中  $V_{u,num}$  为数值模拟的受剪承载力, $V_{u,th}$  为根据规范理论计算的受剪承载力。数值模拟的两组梁承载力与规范计算值接近。斜腹筋与纵筋连接可靠,能够有效传力,对梁受剪承载力的贡献可按弯起钢筋计算。

表 6 梁的受剪承载力

Table 6    Shear capacity of beams				
梁编号	剪跨比	$V_{u,num}/\text{kN}$	$V_{u,th}/\text{kN}$	$(V_{u,num} - V_{u,th})/V_{u,th}/\%$
SC30-0	2.0	149.8	131.0	14.4
SC30-8		159.8	152.1	5.1
SC30-0	2.8	121.1	112.6	7.6
SC30-8		139.9	133.7	4.6
SC30-0	3.6	106.4	100.6	5.8
SC30-8		124.4	121.7	2.3

4 结 语

(1)对于一般的梁,施工阶段桁架钢筋承担施工

荷载时强度、稳定性、跨中挠度均满足要求。增加的斜腹筋用量相当于用钢量提高 12%；梁角部纵筋作为施工受荷桁架受力筋，其最大强度应力比一般低于 0.2，产生的应力为梁的自重荷载作用效应，不会对后期建成结构受力性能产生不利影响。

(2) 钢筋桁架混凝土梁较普通混凝土梁受弯性能更好，在屈服阶段钢筋桁架混凝土梁持荷变形能力更强，延性更好。有限元模拟的荷载-跨中挠度曲线、应力分布规律与试验结果相符合，验证了模型的有效性。

(3) 钢筋桁架混凝土梁较普通混凝土梁受剪性能更好，斜腹筋对受剪承载力的贡献可按规范中弯起钢筋的作用计算。

(4) 桁架式梁钢筋笼技术所需要的工艺、材料均为现有，可以实现装配钢筋笼模板体系和免设支撑的预期目标，而且可提升梁的受弯性能和受剪性能。

## 参考文献：

## References:

- [1] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.  
Code for design of concrete structures: GB 50010—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [2] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.  
Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [3] 钢结构焊接规范:GB 50661—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.  
Code for welding of steel structures: GB 50661—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [4] 王元清,袁 霞,张延年,等. 钢筋桁架混凝土双向叠合楼板承载性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(3):385-397.  
WANG Yuanqing, YUAN Xia, ZHANG Yannian, et al. Analysis of loading capacity of steel bar truss and concrete superimposed two-way slab[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2014, 30(3): 385-397.
- [5] 李雄彦,孙彤彤,常卫华,等. 可拆卸钢筋桁架快装板施工阶段受力性能[J]. 北京工业大学学报,2018,44(4):561-567.  
LI Xiongyan, SUN Tongtong, CHANG Weihua, et al. Mechanical properties of the steel-bars truss

rapid assembled floor of detachable formwork during construction stage[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(4): 561-567.

- [6] 刘文政,崔士起,刘传卿,等. 预应力混凝土钢桁架叠合板受弯性能试验与理论研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(8):95-106.  
LIU Wenzheng, CUI Shiqi, LIU Chuanqing, et al. Experimental and theoretical study on bending behavior of prestressed concrete composite slabs with steel trusses[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(8): 95-106.
- [7] 程东辉,王楷文,宋 超. 预应力再生混凝土叠合梁受弯性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(2):52-60.  
CHENG Donghui, WANG Kaiwen, SONG Chao. Experimental study on flexural behavior of prestressed recycled concrete composite beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(2): 52-60.
- [8] 蔡自伟,邓博予,张 智,等. 高强超高延性混凝土梁弯剪性能理论分析与数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版),2022,50(5):652-666.  
CAI Ziwei, DENG Boyu, ZHANG Zhi, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of flexural and shear behavior for high-strength engineered cementitious composite beams[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(5): 652-666.
- [9] 马恺泽,马煜东,邢国华,等. 配筋超高性能混凝土梁受剪性能研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(12):179-188.  
MA Kaize, MA Yudong, XING Guohua, et al. Study on shear behavior of reinforced ultra-high performance concrete beams[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(12): 179-188.
- [10] ROUPHAEL D, VIEUX-CHAMPAGNE F, SIEFFERT Y, et al. Shear behavior of reinforced concrete beams with wire rope shear reinforcement[J]. Materials and Structures, 2023, 56(6): 114.
- [11] 建筑施工模板安全技术规范:JGJ 162—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.  
Technical code for safety of forms in construction: JGJ 162—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [12] 谢 楠,张 坚,张 丽,等. 基于影响面的混凝土浇筑期施工荷载调查和统计分析[J]. 工程力学,2015,32(2):90-96.  
XIE Nan, ZHANG Jian, ZHANG Li, et al. Surveys

and statistical analyses of construction loads during concrete placement based on influence surface[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 90-96.

[13] 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, 82.

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, 82.

[14] 张 飞,马建勋,南 燕. 混凝土塑性损伤模型参数的选取与验证计算[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(1):7-11, 29.

ZHANG Fei, MA Jianxun, NAN Yan. Parameters selection and verification calculation of concrete plastic damage model[J]. China Concrete and Cement Products, 2021(1): 7—11, 29.