

# 钢筋混凝土深梁和浅梁的统一非线性网格模型

徐方圆, 徐 栋

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 提出将计算截面放置于结构中实现截面应力重分布分析的钢筋混凝土梁非线性网格模型方法, 该方法不仅可以分别考虑梁的抗弯机制与抗剪机制, 还可以描述钢筋混凝土浅梁和深梁从开裂至破坏的受力机理, 从而实现钢筋混凝土梁的统一分析模型。算例结果表明, 非线性网格模型不仅能较准确地计算结构的承载力, 并且能清晰地反映结构受力机制, 为设计分析提供依据。

**关键词:** 深梁; 网格模型; 非线性; 截面法; 抗剪承载力

**中图分类号:** TU375.1

**文献标志码:** A

## Unified Non-linear Grid Model for Reinforced Concrete Deep and Shallow Beams

XU Fangyuan, XU Dong

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A reinforced concrete (RC) non-linear grid model method is established by inserting the calculation section into the structure to achieve the sectional stress redistribution analysis. It considers the flexure and shear mechanism respectively, and describes the behavior of RC slender and deep beams from the cracking to the failure. Thus, it realizes a unified analysis model for RC shallow and deep beams. Several examples illustrate the accuracy of the capacity calculation by the non-linear grid model method. The grid model method can also reflect the mechanical behavior of RC beams and provide design parameters.

**Key words:** deep beam; grid model; non-linear; sectional analysis; shear capacity

钢筋混凝土梁是最常见的结构构件之一。ACI318 规范<sup>[1]</sup>将跨高比 $\leq 4$ 或剪跨比 $\leq 2$ 的梁定义为深梁;我国混凝土规范<sup>[4]</sup>将跨高比 $\leq 2$ 的简支梁和

跨高比 $\leq 2.5$ 的连续梁定义为深梁,跨高比 $> 5$ 定义为浅梁。

根据钢筋混凝土深梁和浅梁的受力特点,各国规范<sup>[1-5]</sup>采取不同的方法分析计算。钢筋混凝土浅梁的正截面抗弯计算,规范均采用基于平截面假定的截面法。钢筋混凝土浅梁的抗剪承载力主要采用 ACI318 规范的  $45^\circ$ 桁架模型、AASHTO 规范的修正压力场理论、EUROCODE2 (EC2) 规范的变角桁架模型以及我国桥梁规范<sup>[5]</sup>的脱离体模型计算。目前针对钢筋混凝土深梁的设计主要采用拉压杆模型 (STM) 方法和截面法。我国混凝土规范<sup>[2]</sup>和 1999 年之前的 ACI318 规范都是采用截面法计算深梁抗剪承载力,如 ACI318—99 规范<sup>[6]</sup>中规定深梁抗剪承载力由混凝土和正交腹部钢筋提供。但从 2002 年起,ACI318 规范建议采用拉压杆模型方法进行钢筋混凝土深梁的设计计算。不同于截面法,深梁腹部的分布钢筋并不直接作为抗剪贡献,主要用于限制斜裂缝的发展。包括 AASHTO 规范和 EC2 在内的主流国外规范也都采用拉压杆模型方法对钢筋混凝土深梁进行计算分析。这主要是由于钢筋混凝土深梁即使在弹性工作阶段也不满足平截面假定,因而截面分析方法与实际受力特点并不符合。同时,这些方法都没有很好地理解腹部水平钢筋也是抗剪钢筋<sup>[7]</sup>这一特性。

随着钢筋混凝土非线性有限元方法的不断发展,钢筋混凝土梁的有限元模型主要有分离式、组合式和整体式三种<sup>[8]</sup>。在浅梁设计分析中常采用的截面分层条带法就是一种组合式的有限元模型。它将钢筋混凝土分为许多条带,根据平截面假定,建立力的平衡方程,从而得到截面上的应力分布<sup>[9]</sup>。整体式有限元模型将开裂的钢筋混凝土单元视为连续均匀材料,并建立平衡、协调和本构关系。国外学者提出

收稿日期: 2013-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(51178335)

第一作者: 徐方圆(1987—),女,博士生,主要研究方向为钢筋混凝土深梁结构设计方法。E-mail: xfyalla@163.com

通讯作者: 徐 栋(1966—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为混凝土桥梁结构分析。E-mail: xu\_dong@tongji.edu.cn

的旋转裂缝模型<sup>[10]</sup>和固定裂缝模型<sup>[11]</sup>都属于整体式模型。

虽然钢筋混凝土梁的有限元分析方法已经可以较精确地进行钢筋混凝土浅梁从加载开始至最终破坏的抗弯全过程分析,但其并不适用于二维受力的抗剪承载力计算,更无法应用于深梁。此外,目前的钢筋混凝土梁实体有限元分析主要是针对受力状态的分析,与配筋设计采用的截面法或不考虑塑性(开裂)重分布的拉压杆模型方法的计算模型和设计理论并不统一。本文提出的钢筋混凝土梁非线性网格模型方法是同时适用于浅梁和深梁的有限元计算模型,通过将梁的抗弯与抗剪机制分别考虑能清晰反映梁的受力及破坏机制。而且,非线性网格模型方法将计算截面置于结构中,从设计角度进行截面的抗弯和抗剪承载力分析,与现行主流设计规范体系一致。

## 1 网格计算模型

网格模型是将钢筋混凝土梁沿梁高方向划分为多层条带,每一条带用纵梁模拟,各层纵梁之间通过竖杆连接,即无论深梁还是浅梁都可以用竖直放置的一片网格来模拟。例如图1a的矩形截面简支深梁可等效为图1b所示的网格模型。抗弯钢筋根据实际位置布置在网格中。

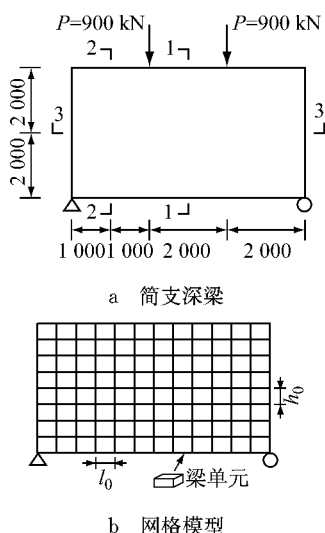


图1 简支深梁以及网格模型(单位:mm)

Fig.1 Simply-supported deep beam and grid model(unit:mm)

由此可见,网格模型是通过一系列正交梁单元组成的二维杆系结构模型来等效相应区域的结构特性,得到荷载作用下该区域的结构受力状态。采用梁单元的优势是梁单元与现行规范的配筋设计体系相

协调,而实体单元则更侧重分析。

因此,正交网格模型能否准确地反映结构的受力特点是进行分析钢筋混凝土梁的前提条件。通过弹性阶段混凝土梁的网格模型和实体模型计算得到的主要结构信息(如关键截面上的正应力、剪应力)对网格模型分析结构的受力机制进行验证。

针对图1所示的混凝土简支深梁(梁高4.0 m,跨径6.0 m,宽度0.4 m)分别建立4种计算模型(表1)。其中,网格模型1和网格模型2中的纵梁和竖杆单元的长度分别相同,但网格1的单元划分更精细。

4种模型的应力计算结果如图2~3所示,其中图2比较了深梁跨中1—1截面和2—2截面上的纵向正应力和剪应力值,图3比较了梁中心线3—3截面上的竖向正应力和剪应力值。结果显示,正交网格模型与实体模型的计算结果基本一致,因而网格模型是可以分析梁的受力特性。

表1 深梁的4种计算模型

计算模型	网格模型1	网格模型2	实体模型1	实体模型2
$l_0 \times h_0$ (mm×mm)	0.25×0.25	0.4×0.4	0.25×0.25	0.4×0.4

注: $l_0$ 和 $h_0$ 分别为网格模型中纵梁和竖杆的单元长度(图1b)

众所周知,网格模型中梁单元的刚度 $[k_c]$ 是由轴向刚度 $[k_{cN}]$ 和弯剪刚度 $[k_{cV}]$ 两部分组成的,即

$$[k_c] = [k_{cN}] + [k_{cV}] \quad (1)$$

式中: $[k_{cN}]$ 体现的是轴向力的作用; $[k_{cV}]$ 体现的是剪力和弯矩的作用;在小位移范围内,两者独立且互不影响。因此,混凝土网格模型可视为“贴合”的三层,即仅能承受轴向力的网格和仅能承受弯剪效应的弯剪网格两者“贴合”在一起,两种网格中“贴合”的单元共用同一组节点,如图4所示。轴向单元和弯剪单元“贴合”的分析思想是非线性网格模型的有限元程序实现的立足点,其意义在于:混凝土轴向开裂后,轴向单元退出工作,但弯剪网格仍然能够传递剪应力。

考虑材料非线性的非线性网格模型可视为“贴合”的三层网格,第一层为混凝土轴向网格(体现梁单元的轴向作用),第二层为剪切网格(由混凝土和剪切钢筋共同作用组成),第三层为抗弯钢筋网格(体现抗弯钢筋的贡献,并假定钢筋和混凝土可靠黏结)。随着荷载的增加,当混凝土轴向网格中的非线性单元达到混凝土抗拉极限承载力时,轴向网格中的该单元将退出工作,即“拆除”该单元。这里“拆除”的意思是将原来由混凝土承受的轴向力反向施加到结构中去,其原理与拆除斜拉索类似。

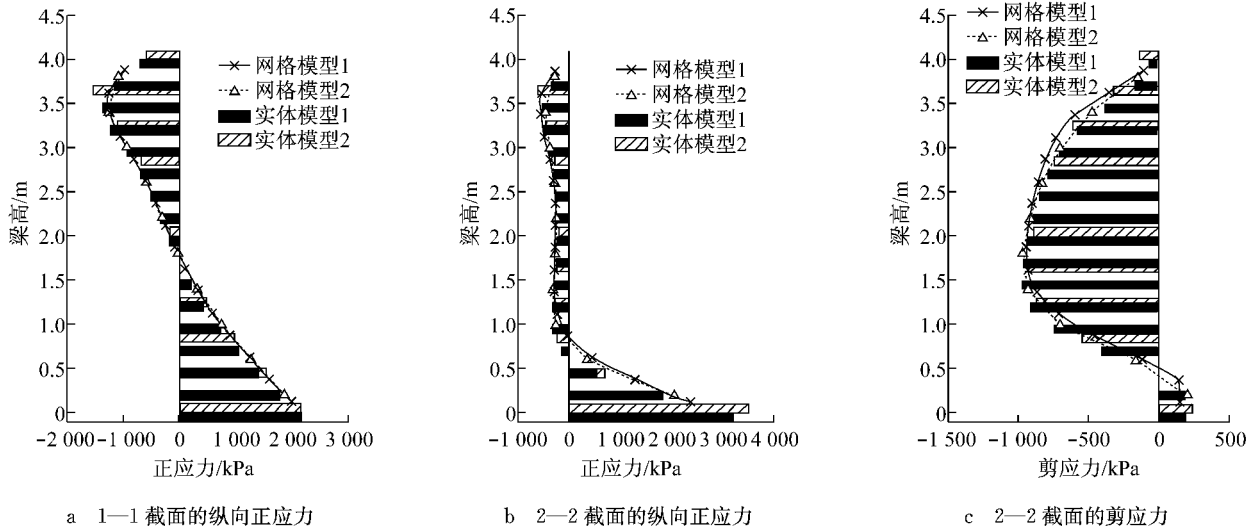


图 2 竖向截面(1—1 和 2—2)上的纵向正应力和剪应力的比较  
 Fig.2 Comparison of the normal and shear stresses on Section 1—1 and 2—2

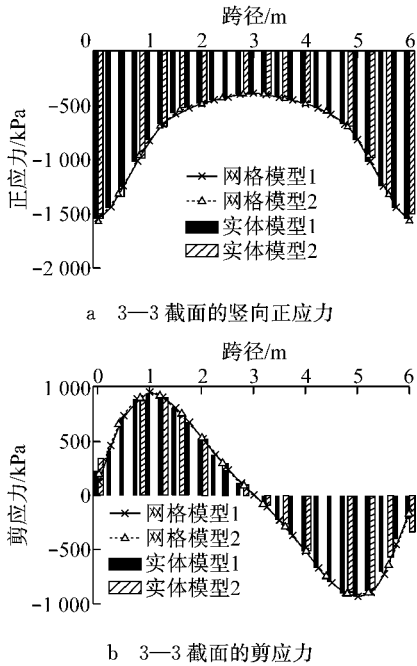


图 3 纵向截面(3—3)上的纵向正应力和剪应力的比较  
 Fig.3 Comparison of the normal and shear stresses on Section 3—3

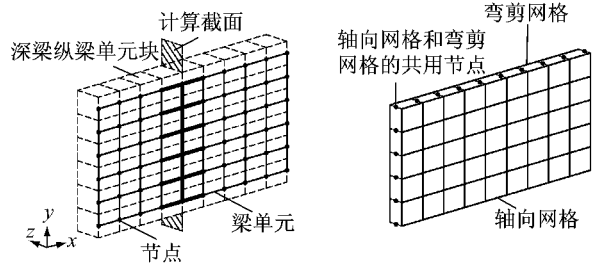


图 4 轴向网格、弯剪网格模型的“贴合”  
 Fig.4 “Glued” axial grid and shear-flexure grid

## 2 非线性网格模型的实现

### 2.1 非线性网格模型的基本思想

不管是钢筋混凝土深梁还是浅梁,到极限阶段均要经历一个从开裂到钢筋屈服再到最后混凝土被压碎的过程.对于已知配筋的浅梁截面,可以采用基于平截面假定的截面条带法,通过截面的弯矩-曲率关系得到受力全过程的截面各处应力状态,如图 5 所示.但是,对于深梁,控制截面各处应变关系的平

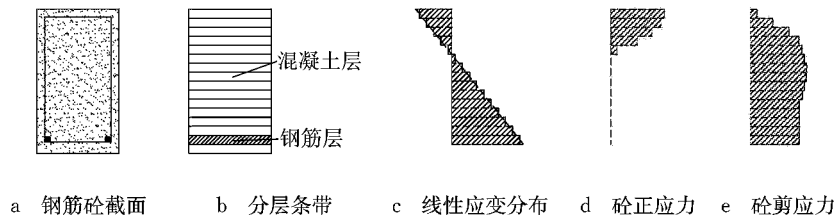


图 5 截面分层条带法  
 Fig.5 Sectional multi-layers analysis method

截面假定不再适用,故采用分层组合方法的钢筋混凝土非线性分析尚未拓展至深梁,也是该领域发展

的瓶颈之一.本文的非线性网格模型利用分层组合模型的基本思想,将计算截面放置于结构中来实现

截面分析的方法,从而实现钢筋混凝土浅梁与深梁的统一分析模型。

截面分析的前提是结构所有构件均是等强度破坏,即截面任意位置的应力变化只与同截面其他位置的应力变化有关,而与其他截面无关;这是现行规范计算设计方法的基石。基于这个前提,非线性网格模型只对设定的计算截面(在结构中可以遍历,也可取某项内力最大的截面)上的正交梁单元考虑材料非线性,而非计算截面区域的梁单元始终保持弹性状态,如图 4 所示的中间加粗标识的梁单元为非线性单元,既不影响在计算截面上的应力重分布分析,同时也不会发生结构中的内力重分布。在非线性网格计算模型中,钢筋分为抗弯钢筋和抗剪钢筋。前者通过只能承受轴向力的梁单元(即杆单元)来模拟,后者与正交的梁单元的主(拉)应力建立联系。

### 2.2 非线性网格模型的有限元程序

为了实现钢筋混凝土梁的非线性网格模型,需要编写相应的有限元程序。混凝土材料的非线性本构关系采用 Saenz 公式或 Rüs ch 公式,钢筋的非线性本构关系采用两折线(或两斜线)模型,并且只在设定的计算截面考虑材料非线性。

程序计算中,钢筋混凝土梁的破坏准则采用修正的 Mohr-Coulomb 准则<sup>[12]</sup>。网格模型中可以得到计算截面上任意一组正交梁单元的主拉应力和主压应力,据此可以判断结构是否达到极限破坏状态。对于已配剪切钢筋的梁,主拉应力超过混凝土抗拉强度极限时,抗剪钢筋发生作用,结构可以继续承载,直到计算截面上混凝土达到抗压极限强度。

非线性网格模型在荷载-位移的上升段采用增量迭代法计算承载力,在接近极限荷载时采用逐步搜索,并不考虑下降段。钢筋混凝土梁的非线性网格模型有限元计算的具体流程图如图 6 所示。通过对结构中可能的计算截面进行分析计算后,不仅可以得到钢筋混凝土梁截面包括剪切分析的从开裂到破坏的整个受力过程,而且最终极限状态下的计算结果能进一步为配筋设计提供依据。当计算截面上的主拉应力超过混凝土抗拉极限值时,可通过主拉应力来指导剪切钢筋的设计<sup>[7]</sup>。如图 7 所示,水平钢筋和箍筋共同作用提供微元体上的主拉应力  $\sigma_1$ 。

箍筋:

$$\rho_v = \frac{A_{sv}}{bs_v} = \frac{\sigma_1}{f_{sv}} \quad (2)$$

水平钢筋:

$$\rho_h = \frac{A_{sh}}{bs_h} = \frac{\sigma_1}{f_{sh}} \quad (3)$$

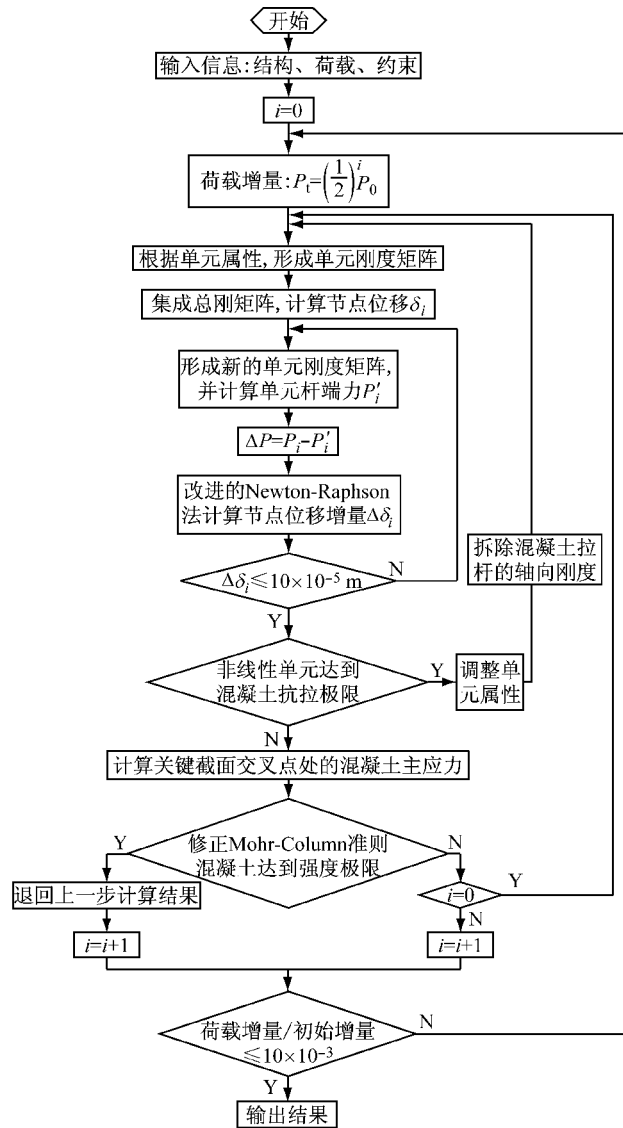


图 6 非线性网格模型承载力计算流程

Fig. 6 Flow chart of the non-linear grid model for reinforced concrete beam design

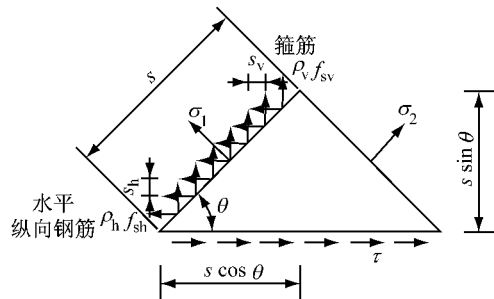


图 7 剪切钢筋设计计算图示

Fig. 7 Diagram of shear reinforcement design

式中:  $\rho_v$  和  $\rho_h$  分别为箍筋和水平钢筋配筋率;  $A_{sv}$  和  $A_{sh}$  分别为箍筋和水平钢筋面积;  $s_v$  和  $s_h$  分别为箍筋和水平钢筋间距;  $b$  为腹板宽度;  $\sigma_1$  为微元体的主拉应力;  $f_{sv}$  和  $f_{sh}$  分别为箍筋和水平钢筋屈服应力。

### 3 钢筋混凝土梁的非线性网格模型

如上所述,非线性网格模型可以用于钢筋混凝土梁的抗弯及抗剪承载力分析.以下对 3 组钢筋混凝土梁的已有试验或理论结果和非线性网格模型的计算结果进行比较.

#### 3.1 第一组:钢筋混凝土浅梁的抗弯承载力

某钢筋混凝土浅梁的跨径及截面尺寸如图 8a 所示.混凝土材料抗压强度  $f'_c$  为 23 MPa,钢筋屈服强度  $f_y$  为 357 MPa,分别采用两种钢筋布置方式,如图 8a 所示.

现有的钢筋混凝土浅梁的抗弯承载力计算方法已经相当成熟.表 2 比较了两种主筋布置形式下的非线性网格模型的承载力结果以及传统截面法和条带法的计算结果.其中,传统截面法是现行规范中采用的钢筋混凝土梁抗弯计算方法,混凝土本构关系采用的是 Rüschi 公式<sup>[13]</sup>.

选取跨中截面作为计算截面,采用截面分层条带法计算.该截面划分为 40 层条带,混凝土本构关系采用 Saenz 公式.非线性网格模型的截面划分采用如图 8b 所示的两种方式,混凝土本构关系采用的是 Rüschi 公式.由 3 种方法得到的梁承载力结果(表 2)显示,非线性网格模型计算方法与传统截面法、条带法接近;截面划分越细,网格模型计算得到的结果与传统截面法的结果越趋于一致;由于混凝土的本

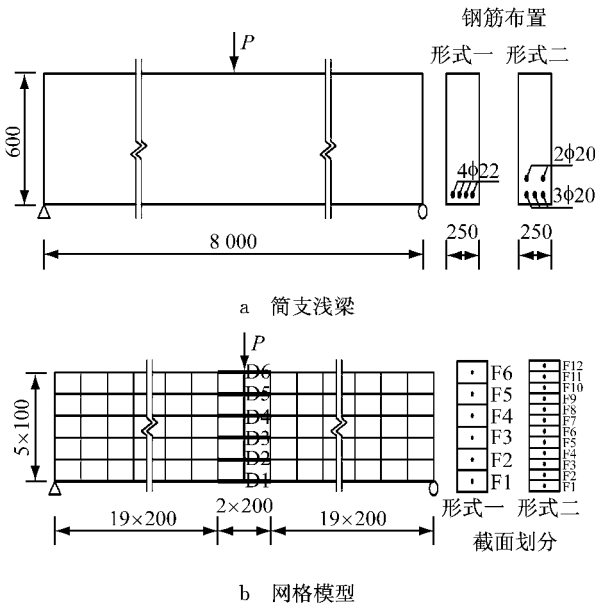


图 8 第一组钢筋混凝土浅梁(单位:mm)  
Fig.8 Group 1 of RC shallow beam(unit:mm)

构关系选取不同,条带法与截面法和网格法的计算结果略有差别.

表 2 第一组试验梁的承载力比较

方法	承载力 $P/kN$	
	钢筋布置形式一	钢筋布置形式二
截面法	136	126
条带法	143	134
网格法(截面划分形式一)	152	140
网格法(截面划分形式二)	135	128

#### 3.2 第二组:钢筋混凝土深梁的抗弯及抗剪承载力

文献[14]对 4 根钢筋混凝土深梁进行试验,如图 9 所示.这 4 根梁截面尺寸及跨径布置相同,材料信息如表 3 所示.4 根梁的试验结果为梁 ACI-I 和梁 STM-I 在跨中段发生弯曲破坏,梁 STM-H 和梁 STM-M 在剪跨段发生剪切破坏.

表 3 第二组试验梁的材料特性

试验组	$f'_c/MPa$	$f_y/MPa$		$f_u/MPa$	
		#3	#8	#3	#8
ACI-I	32	450	420	720	700
STM-I	32	450	420	720	700
STM-H	28	450	420	720	700
STM-M	28	450	420	720	700

注: $f_u$ 为钢筋极限抗拉强度.

试验梁 ACI-I(图 9a)根据 ACI318—99 规范的截面法设计,腹部箍筋和水平钢筋的抗剪贡献近似相等(由 ACI318—99 规范公式(11-30)得到的箍筋和水平钢筋的抗剪贡献系数分别为 0.48 和 0.52).试验梁 STM-I(图 9b)和试验梁 STM-H(图 9c)根据 ACI318—02 规范的拉压杆模型方法进行设计,腹部分布钢筋均满足裂缝控制要求(ACI318—02 规范公式(A-4));不同之处在于纵向主筋的位置,以及梁 STM-I 采用机械锚固,梁 STM-H 采用 90°弯折锚固.试验梁 STM-M(图 9d)在试验梁 STM-H 的基础上减少了剪跨区内的分布钢筋,即不满足裂缝控制要求.

采用非线性网格模型对梁 ACI-I 进行承载力分析.由于梁 ACI-I 是近似采用网格配筋形式<sup>[7]</sup>,当主拉应力超过了混凝土的抗拉极限,则有水平钢筋和箍筋共同承担,只要两者不屈服,即保证了斜裂缝的宽度.表 4 所示为网格模型计算得到的梁 ACI-I 弯剪段上计算截面 1—1(截面划分如图 9a)的极限抗剪承载力下的主应力值以及公式(2)和公式(3)的计

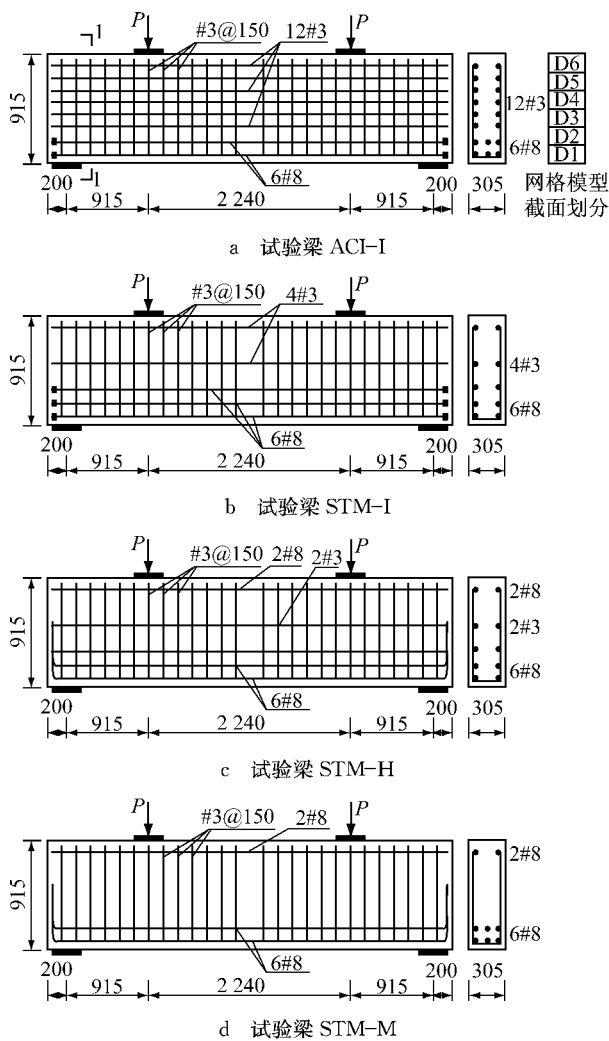


图 9 第二组钢筋混凝土深梁(单位:mm)  
Fig.9 Group 2 of RC deep beams(unit:mm)

表 4 试验梁 ACI-I 的网格模型应力结果

Tab.4 Stress results of the grid model of Beam ACI-I

截面位置	轴向正应力 $\sigma_x$ /MPa	竖向正应力 $\sigma_y$ /MPa	剪应力 $\tau$ /MPa	主压应力 $\sigma_2$ /MPa	主拉应力 $\sigma_1$ /MPa	$\sigma_1/f_{sv}$	实配 $\rho_v$	实配 $\rho_h$
D1	0(已开裂)+	-1.08	3.72	-4.30	3.22	0.007 1	0.004 7	
D2	0(已开裂)+	-1.64	5.57	-6.45	4.81	0.010 7	0.004 7	
D3	0(已开裂)+	-1.47	6.26	-7.03	5.57	0.012 4	0.004 7	0.007 7
D4	0.32	-0.06	6.32	-6.19	6.45	0.014 3	0.004 7	0.007 7
D5	-7.47	0.60	5.29	-10.08	3.22	0.007 1	0.004 7	0.007 7
D6	-16.15	0.58	3.29	-16.78	1.21	0.002 7	0.004 7	0.007 7

注: +表示单元轴向应力已达到或超过混凝土抗拉强度,但由于配置了剪切钢筋,认为单元仍能传递剪应力。

表 5 第二组钢筋混凝土深梁的承载力的试验与理论计算结果

Tab.5 Comparison of the calculation and test results of the flexural shear capacities of Group 2

试验组	$P_{试验}/kN$	$P_{网格}/kN$			$P_{ACI}/kN$		$P_{试验}/P_{网格}$	$P_{试验}/P_{截面法}$	$P_{试验}/P_{STM}$	破坏类型
		纯弯段	弯剪段	最小值	截面法	STM				
ACI-I	1 356	1 349	1 355	1 349	952	1 005	1.01	1.42	1.35	弯曲破坏
STM-I	1 134	1 217	1 232	1 217	592	903	0.93	1.92	1.26	弯曲破坏
STM-H	1 285	1 279	1 194	1 194	676	1 001	1.08	1.90	1.28	剪切破坏
STM-M	1 276	1 279	1 194	1 194	520	827	1.07	2.45	1.54	剪切破坏
平均值							1.02	1.92	1.36	
变异系数/%							6.58	21.82	9.50	

算结果.由表 4 可知,梁 ACI-I 中的分布钢筋已基本屈服,这与文献[14]中得到的裂缝位置附近的分布钢筋应变屈服结果基本一致。

对于其他 3 根梁,当水平钢筋不足时,混凝土开裂产生的水平力无处承担,只能不断往上往下延伸,直至上下缘主筋,导致剪切引起的主筋应力增大,其代价是混凝土斜裂缝的宽度无法控制.同样地,当箍筋布置不足时,混凝土开裂产生的竖直力无处承担,只能不断往左往右延伸,直至两侧的其他箍筋,导致剪切引起的箍筋应力增大,其代价是混凝土斜裂缝的宽度无法控制.所以,对于试验梁 STM-I,STM-H,STM-M 采用网格配筋的方法计算是有误差的,因为当水平钢筋(包括主筋)和箍筋都不布设时,则梁体无法形成抗剪机构.但为比较,这 3 根梁仍然采用非线性网格模型方法计算,结果如表 5 所示。

在非线性网格模型计算时,分别对纯弯段和弯剪段进行计算,得到梁 ACI-I 和梁 STM-I 中纯弯段的承载力小于弯剪段的承载力,即梁先于弯剪段在纯弯段发生弯曲破坏;梁 STM-H 和梁 STM-M 的弯剪段的承载力小于纯弯段的承载力,即梁先于纯弯段在弯剪段发生剪切破坏.计算结果显示,非线性网格模型的计算结果与试验结果最为接近,算例中拉压杆模型方法比截面法更为准确。

### 3.3 第三组:钢筋混凝土浅梁的抗剪承载力

#### 3.3.1 剪跨比较小的浅梁抗剪承载力

文献[15]对主要受剪切作用的钢筋混凝土梁进行试验,分析拉压杆模型中的混凝土压杆承载力的

影响参数. 梁 A1 与梁 A2 为相同的简支梁(图 10). 混凝土抗压强度为 22 MPa, 钢筋屈服强度分别为 407 MPa( # 6M), 441 MPa( # 10M), 455 MPa( # 13M), 462 MPa( # 22M).

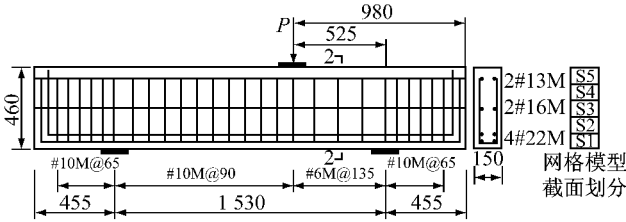


图 10 第三-1 组钢筋混凝土梁 A1(A2)(单位:mm)  
Fig.10 Group 3-1 of RC beams A1(A2)(unit:mm)

采用非线性网格模型对试验梁 A1, A2 进行承载力分析, 计算得到梁在短跨段上计算截面 2—2(截面划分如图 10)的极限抗剪承载力下的主拉应力值, 如表 6 所示. 计算显示正交网格钢筋基本都已达到屈服强度; 梁 A1, A2 的腹部水平钢筋能有效地限制裂缝发展, 并且基本接近或已达到屈服点. 表 7 比较了网格模型和拉压杆模型得到剪跨段的抗剪承载力. 由表 7 可知, 算例中非线性网格模型的计算结果和 ACI 规范中的拉压杆模型的计算结果均与试验结果接近.

表 6 第三-1 组钢筋混凝土梁的主应力及配箍率

Tab.6 Principal stresses and stirrup ratios of Group 3-1

试验梁	截面划分位置	主拉应力/MPa	计算配箍率	实际配箍率
A1, A2	S1	2.80	0.003 3	
	S2	4.01	0.004 0	0.003 2
	S3	4.11	0.004 4	(箍筋)
	S4	2.24	0.004 1	0.002 8
	S5	0.72	0.001 6	(水平)
	S6	0.58	0.000 9	

注: 计算配箍率按照公式(1),(2)计算.

### 3.3.2 剪跨比较大的浅梁抗剪承载力

文献[7]对采用网格钢筋的钢筋混凝土浅梁的

表 9 第三-2 组钢筋混凝土梁的抗剪承载力的试验与理论计算结果

Tab.9 Comparison of the calculation and test results of the shear capacities of Group 3-2

梁	$P_{试验}/kN$	$P_{计算值}/kN$				$P_{试验}/P_{计算值}$				
		ACI	AASHTO	EC2	截面法	ACI	AASHTO	EC2	截面法	网格模型
R40-1	325	192	260	231	313	1.69	1.25	1.41	1.04	0.96
R40-2	240	188	241	231	255	1.28	1.00	1.04	0.94	0.87
R40-3	245	188	241	231	255	1.30	1.02	1.06	0.96	0.88
平均值						1.42	1.09	1.17	0.98	0.91
变异系数/%						16.36	12.98	17.67	5.24	5.76

注: 截面法采用文献[7]中的“拉应力域”抗剪计算方法.

表 7 第三-1 组钢筋混凝土梁的抗剪承载力的试验与理论计算结果

Tab.7 Comparison of calculation and test results of the shear capacities of Group 3-1

试验梁	$V_{试验}/kN$	$V_{网格}/kN$	$V_{STM}/kN$	$V_{试验}/V_{网格}$	$V_{试验}/V_{STM}$
A1	251	221	215	1.14	1.17
A2	237	221	215	1.07	1.10

注:  $V$  为短跨段的剪力.

抗剪受力机制进行研究, 并进行试验验证. 3 根试验梁 R40-1/2/3 具有相同的矩形截面尺寸与钢筋布置, 如图 11 和表 8 所示.

对梁 R40-1/2/3 分别采用规范方法<sup>[1,3-4]</sup>、文献[7]的截面分析法以及非线性网格模型计算截面 3—3 的抗剪承载力, 并与试验结果进行比较, 结果如表 9 所示. 其中非线性网格模型方法没有放入任何安全系数. 截面分析法和网格模型方法的混凝土本构关系均采用 Saenz 公式. 结果显示, 截面法与网格模型的计算结果与试验结果最为接近; ACI 规范和 EC2 规范的设计方法的结果均较为保守.

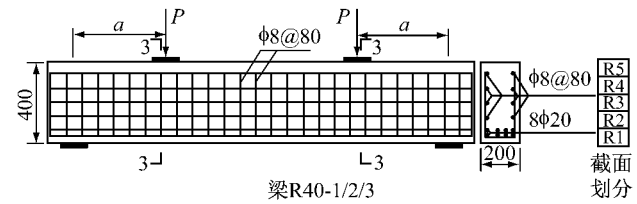


图 11 第三-2 组钢筋混凝土梁 R40-1/2/3(单位:mm)  
Fig.11 Group 3-2 of RC beams R40-1/2/3(unit:mm)

表 8 第三-2 组钢筋混凝土梁的结构设计参数

Tab.8 Structural parameters of Group 3-2

梁	$f_c/MPa$	$d/mm$	$a/mm$	$a/d$	$\rho_l/\%$	$\rho_t/\%$	$\rho_h/\%$
R40-1	30	350	690	2.0	3.6	0.63	0.63
R40-2	30	350	860	2.5	3.6	0.63	0.63
R40-3	30	350	860	2.5	3.6	0.63	0.63

注:  $d$  为有效截面高度;  $\rho_l, \rho_t, \rho_h$  分别为纵向主筋、箍筋和水平钢筋的配筋率.

## 4 结论

目前针对钢筋混凝土浅梁和深梁尚未有统一的分析计算理论,并且各国抗剪规范设计方法差别较大.非线性有限元分析方法尽管已经能较精确地分析钢筋混凝土浅梁的计算受力全过程,但非线性截面分析方法尚未拓展至不满足平截面假定的深梁.本文提出的非线性网格模型是一种针对钢筋混凝土深梁和浅梁的统一的计算模型,描述了钢筋混凝土梁从开裂至破坏的受力过程.主要结论如下:

(1)“贴合”的网格模型与实体有限元模型的计算结果一致,并且能够清晰地反映钢筋混凝土梁各部分的贡献,因而可以采用网格模型计算分析钢筋混凝土梁的受力特点.

(2)钢筋混凝土梁的非线性网格模型通过将计算截面放置于结构中,将非线性截面分析方法拓展至深梁,从而实现统一的钢筋混凝土深梁和浅梁分析模型,并与现行的设计规范一致.

(3)钢筋混凝土深梁抗弯及抗剪、浅梁抗弯及抗剪(两种剪跨比)的算例结果表明,非线性网格模型能够较好地计算钢筋混凝土深梁和浅梁的承载力,并与相关试验结果相符.相比现行其他方法,本文提出的深梁分析模型更为完善.

### 参考文献:

- [1] ACI. ACI 318-11 ACI building code requirements for structural concrete and commentary [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2011.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural of the People's Republic of China. GB 50010—2010 Code for design of concrete structure [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials Load and Resistance Factor Design. Bridge design specifications and commentary[S]. 5th ed. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.
- [4] European Committee for Standardization. EC 1992-1-1; 2004. Eurocode 2, design of concrete structures—part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [5] 中交公路规划设计院有限公司. JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.  
CCCC Highway Consultants Co. Ltd. JTG D62—2004 Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [6] ACI. ACI 318M-99 ACI building code requirements for structural concrete and commentary [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1999.
- [7] XU Dong, ZHAO Yu, LIU Chao, *et al.* Shear design of concrete beams reinforced with grid reinforcement [J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 65(2): 93.
- [8] 吕西林, 金国芳, 吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M].上海:同济大学出版社,1997.  
LÜ Xilin, JIN Guofang, WU Xiaohan. Non-linear finite element theory and application of reinforced concrete structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.
- [9] Collins M P, Mitchell D. Prestressed concrete structures [M]. Englewood; Prentice Hall Press, 1991.
- [10] Vecchio F J, Collins M P. The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear[J]. ACI Journal, 1986, 83(2): 219.
- [11] Hsu T T C, Zhang L X. Nonlinear analysis of membrane elements by fixed-angle softened-truss model[J]. ACI Journal, 1997, 94(5):483.
- [12] Nielsen M P, Hoang L C. Limit analysis and concrete plasticity [M]. 3rd ed. New York: Taylor & Francis Group, 2011.
- [13] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M].上海:同济大学出版社,2004.  
GU Xianglin. Basic principles for concrete structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2004.
- [14] Aguilar G, Matamoros A B, Parra-Montesinos G J, *et al.* Experimental evaluation of design procedures for shear strength of deep reinforced concrete beams[J]. ACI Journal, 2002, 99(4): 539.
- [15] Quintero-Febres C G, Parra-Montesinos G, Wight J K. Strength of struts in deep concrete members designed using strut-and-tie method[J]. ACI Journal, 2006, 103(4):577.