

MARC 中钢筋混凝土梁受剪的有限元建模

曲哲 2006 年 5 月

以逯晔 (2006) 中的试件 LW-2a 为基准试验, 在 MARC 中建立钢筋混凝土梁的有限元模型, 讨论模型中不同的因素对分析结果的影响。

该试件为钢筋混凝土轻骨料有腹筋梁, 其几何尺寸及配筋细节如图 1 所示, 试验得到的材料参数列于表 1。图 2 所示为试验得到的裂缝分布。

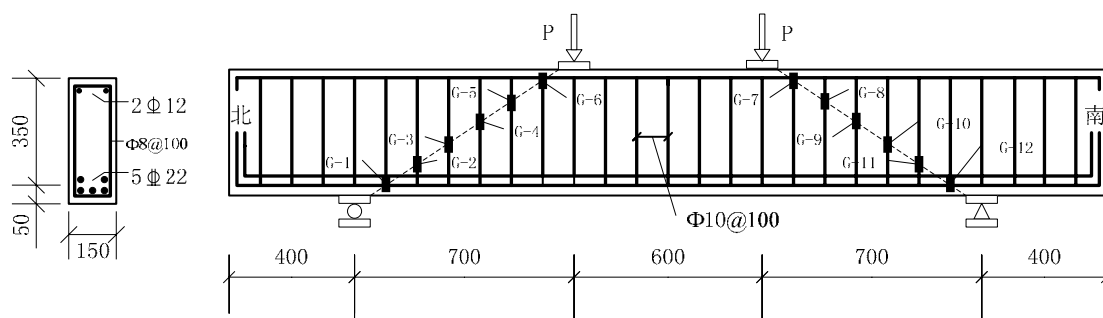


图 1: 试件构形与尺寸

表 1: 试件材性

混凝土轴压强度 (MPa)	混凝土劈拉强度 (MPa)	钢筋屈服强度(MPa)		
		φ 8	φ 12	φ 22
50.5	3.03	259	368	446

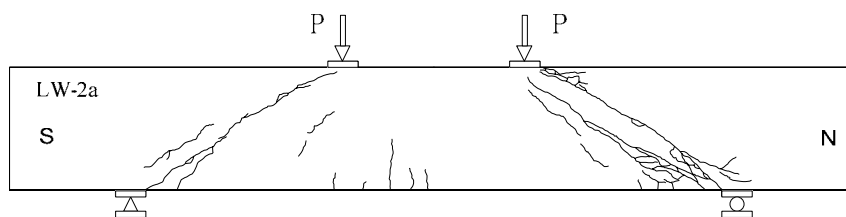


图 2: 试验裂缝图

分析中, 钢筋弹性模量取 205000MPa, 混凝土弹性模量取 27000MPa, 极限压应变 0.0038。混凝土单轴应力应变关系取 Hognestad 的建议曲线, 其中下降段参数取 0.15。混凝土的开裂行为所需的参数, critical stress 取劈拉强度 3.03MPa, 软化模量取 3000MPa。有限元模型单元尺寸为 50mm×50mm, 采用 1% 的残余力收敛准则。上述参数在以下的所有计算中均保持不变。

在 MARC 中建立平面应力半跨模型。按表 2 所列的 9 种情况进行参数讨论。主要讨论以下五个方面的差异对分析结果的影响, 即销栓作用, 钢筋模型, 纵筋滑移, 混凝土本构和裂面剪切。

表 2: 参数分析

ID	说明	销栓作用	钢筋模型	纵筋滑移	砼本构	裂面剪切
1	基准	原高 Beam	分离式	USPRNG	D-P	USHRET
2	销栓作用	加高的 Beam				
3		Truss				
4	钢筋模型		组合式			
5	纵筋滑移			无滑移		
6				弱粘结		
7	砼本构				von Miese	
8	裂面剪切					固定值
9						缩放 USHRET

(1) 基准模型

基准模型采用分离式钢筋混凝土模型，钢筋用梁单元建模，梁的高度等于钢筋直径。纵筋与混凝土的相应结点用用户自定义弹簧（USPRNG）连接，钢筋与混凝土的粘结滑移本构如式（1）。混凝土采用 Druker-Prager 模型（即 MARC 中的 Linear Mohr-Coulomb 模型），模型参数 $\alpha=0.12$ 。剪力传递系数（Shear retention）通过用户子程序 USHRET 定义如式（2）。

$$\tau = \tau_{\max} \left[\frac{s}{s_0} + \left(\frac{s}{s_0} \right)^2 \right] \quad s \leq s_0 \quad (1a)$$

$$\tau = \tau_{\max} \left[1 - 0.15 \left(\frac{s - s_0}{s_u - s_0} \right) \right] \quad s_0 < s < s_u \quad (1b)$$

其中 τ 为粘结剪应力， s 为滑移；

s_0 和 s_u 分别为峰值滑移和极限滑移，取 $s_0=0.6\text{mm}$ ， $s_u=5\text{mm}$ 。

$\tau_{\max} = 2.0\sqrt{f_c}$ 为峰值粘结剪应力。

$$\begin{aligned} \varepsilon_m \leq f_t / E_{c0} \text{ 时 } \quad \lambda &= 0.25 \\ \varepsilon_m > f_t / E_{c0} \text{ 时 } \quad \lambda &= 0.25 f_t / (\varepsilon_m E_{c0}) \geq 0.1 \end{aligned} \quad (2)$$

其中 λ 为剪力传递系数， ε_m 为垂直裂面的开裂应变， f_t 和 E_{c0} 分别为混凝土抗拉强度和弹性模量。

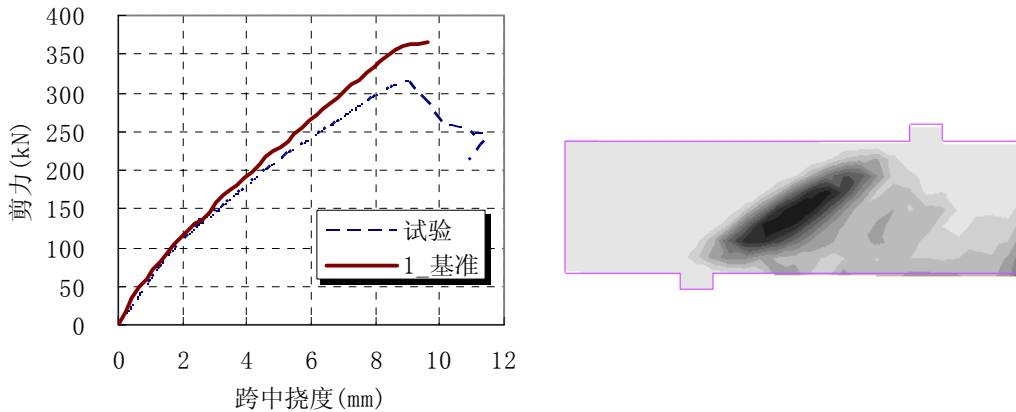


图 3: 基准模型的分析结果

(2) 销栓作用

为考察销栓作用对分析结果的影响，对基准模型中的钢筋单元作如下改动：

弱销栓：将受拉纵筋梁单元的面内高度设为 0.1mm；

强销栓：将受拉纵筋梁单元的面内高度设为钢筋直径的 10 倍，即 220mm。

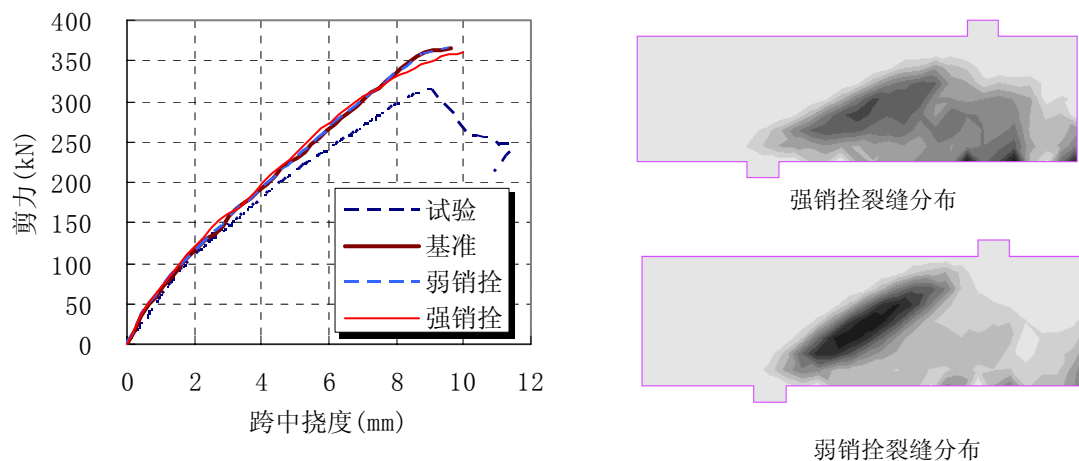


图 4：销栓作用对分析结果的影响

可见销栓作用对荷载位移曲线的影响并不大，图中三条曲线几乎重合。然而钢筋单元的抗弯刚度对于最终的裂缝形态却有较大的影响。当销栓作用较强时，斜裂缝倾角会减小，裂缝可会更加弥散。

(3) 钢筋模型

这里均假设钢筋和混凝土之间没有相对滑移。分别在 MARC 中用组合式和分离式钢筋模型进行建模。分析结果如图 5 所示。

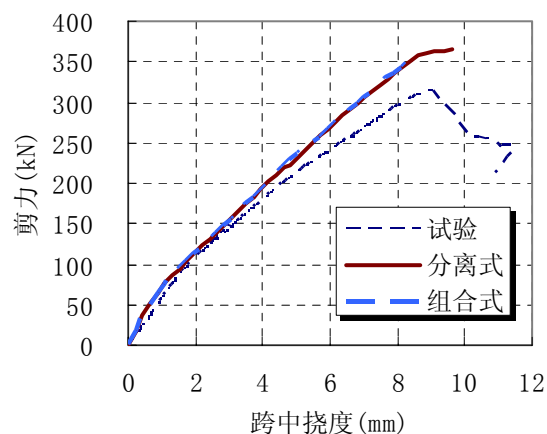


图 5：钢筋模型的影响

两条曲线几乎完全重合。然而值得注意的是，这两种模型在考虑销栓作用上实际是有差别的。分离式钢筋单元的高度设为钢筋直径，抗弯刚度大些，而组合式模型把钢筋平分到梁横截面的钢筋薄膜中，抗弯刚度小些。但这些影响远没有上一节中的剧烈。在上一节中尚看不出明显的纵筋销栓作用的影响，这里看不出差别就不足为奇了。

(4) 钢筋滑移

为考察钢筋与混凝土之间的滑移对分析结果的影响，在基准模型的基础上，作如下修改：

弱粘结：将基准模型中的峰值粘结剪应力改为原来的 0.2 倍；

不滑移：取消原来的用户自定义弹簧，代之以钢筋、混凝土相应结点之间所有自由度的完全耦合。

得到的结果如图 6 所示。

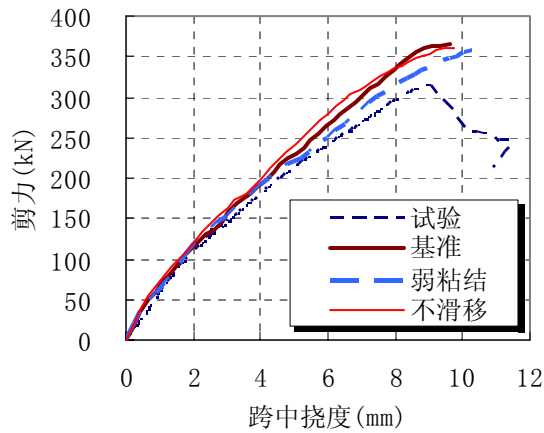


图 6：钢筋-混凝土粘结滑移的影响

可见如果削弱钢筋与混凝土之间的粘结界面，梁的刚度将受到比较明显的影响。同时注意到基准模型中采用的粘结滑移关系得到的结果与完全不滑移的情况基本一致。可见基准模型中有粘结滑移本构提供了足够的粘结。

(5) 砼本构

其他参数均不调整，只是把基准模型中的 Druker-Prager 模型改为 von Mises 模型，分析结果即如图 7 所示。

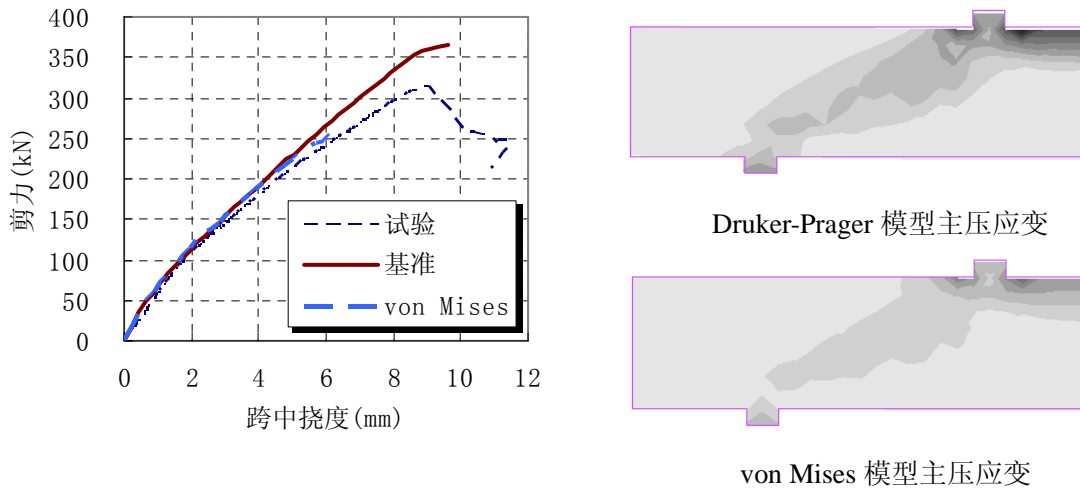
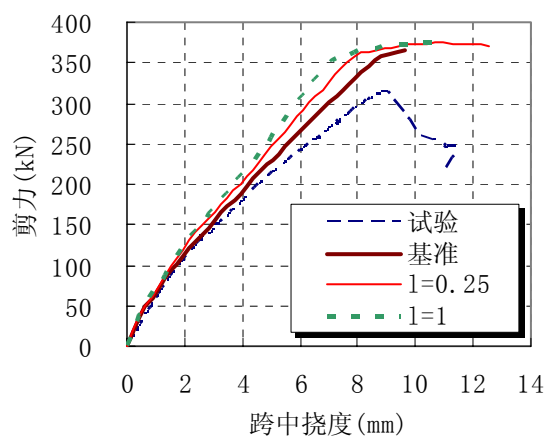


图 7：混凝土本构模型的影响

遗憾的是，von Mises 模型在剪力达到 250kN 左右时便无法收敛。图 7 中显示了两种模型在计算中止（正常结束或者不收敛）时梁内的主压应力分布。Druker-Prager 模型在加载点下混凝土的主压应变达到极限压应变（crushing strain）时停止计算，而 von Miese 模型则无法收敛时加载点下混凝土的主压应变只有 0.0029。不知为何。

(6) 裂面剪切

基准模型中剪力传递系数是开裂应变的函数，且最大为 0.25，最小为 0.1。这里，分别将剪力传递系数 λ 固定为 0.25 和 1.0，计算得到如图 8 所示的结果。从最终的裂缝分布图上可以看到，这两种情况下梁倾向于受弯破坏而非受剪破坏了。



$\lambda = 0.25$



$\lambda = 1.0$

图 8: 剪力传递系数的影响

可见剪力传递系数一方面将影响梁的刚度，另一方面将影响梁的破坏模式。在受剪分析中它是一个非常重要的参数。