

ABAQUS 中的钢筋混凝土剪力墙建模

曲哲

2006-5-29

一、试验标定

选用 ABAQUS 中的塑性损伤混凝土本构模型，分离式钢筋建模，建立平面应力模型模拟钢筋混凝土剪力墙的单调受力行为。李宏男 (2004) 本可以提供比较理想的基准试验。然而计算发现，该文中试验记录的初始刚度普遍偏小，仅为弹性分析结果的 1/5~1/8，原因不明，故此处不予采用。左晓宝 (2001) 研究了小剪跨比开缝墙的低周滞回性能，其中有一片整体墙作为对照试件，本文仅以这片墙为基准标定有限元模型。

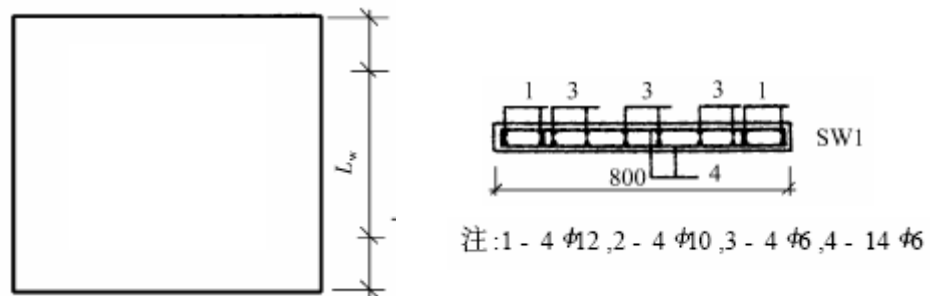
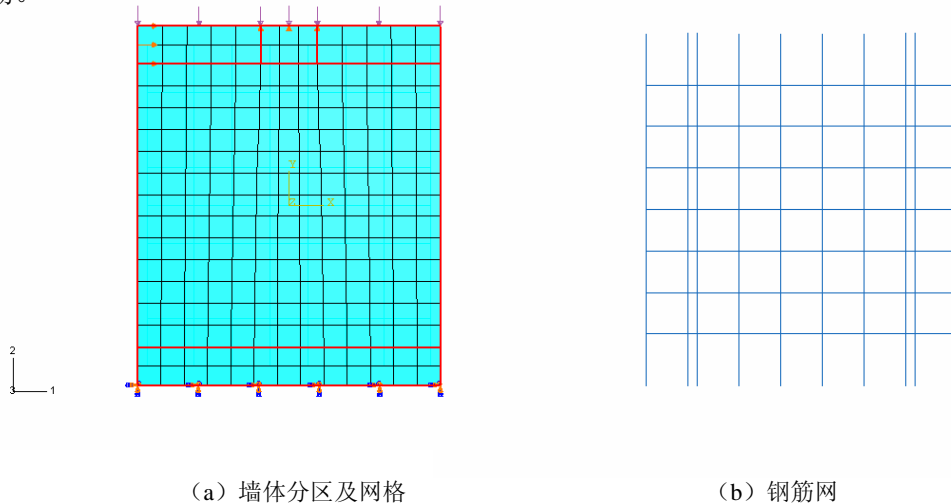


图 1: 剪力墙尺寸与配筋

该试件尺寸及配筋如图 1 所示。墙全高 750mm，宽 800mm，厚 75mm，墙内布有间距 $\phi 6@100$ 的分布钢筋，墙两端设有暗柱。混凝土立方体抗压强度为 54.9MPa，钢筋均为一级光圆筋。



(a) 墙体分区及网格

(b) 钢筋网

图 2: ABAQUS 中的有限元模型

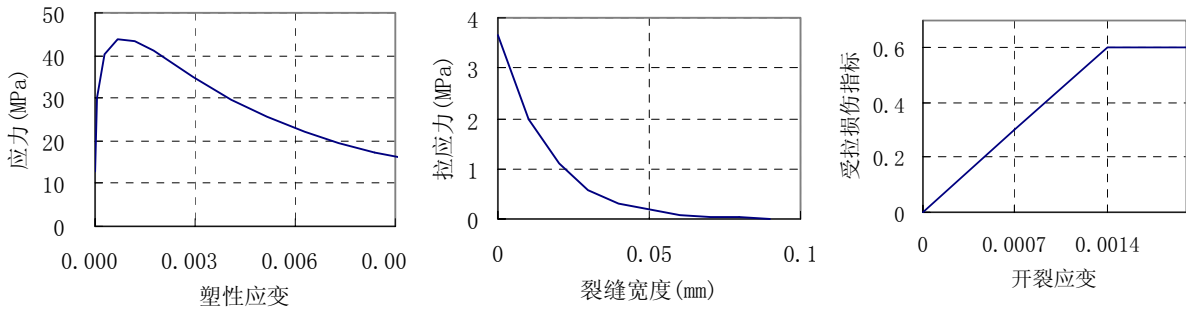
剪力墙采用平面应力八节点全积分单元，墙上下两端各加设 100mm 高的弹性梁。钢筋采用两节点梁单元，通过 Embed 方式内嵌于墙体内部。模型网格及外观如图 2 所示。墙下弹性梁底面嵌固。分析中，先在墙顶施加 160kN 均布轴压力，再在墙上方弹性梁的左端缓缓施加位移荷载。

ABAQUS 中损伤模型各参数取值如表 1、图 3 所示。未说明的参数均使用 ABAQUS 默认值。

表 1: 有限元模型材料属性

	混凝土	钢筋
材料非线性模型	Damaged Plasticity	Plasticity
初始弹性模量 (GPa)	38.1	210
泊松比	0.2	0.3
膨胀角 (deg)	50	
初始屈服应力 (MPa)	13	235
峰值压应力 (MPa)	44	
峰值压应变 ($\mu\epsilon$)	2000	
峰值拉应力 (MPa)	3.65	

注: 其中混凝土弹性模量为文献中提供的试验值, 其余均为估计值。



(a) 压应力-塑性应变曲线 (b) 拉应力-非弹性应变曲线 (c) 受拉损伤指标-开裂应变曲线

图 3: 混凝土塑性硬化及损伤参数

ABAQUS 的混凝土塑性损伤模型用两个硬化参数分别控制混凝土的拉压行为, 同时可以分别引入受压和受拉损伤指标。本文受压硬化曲线采用 Saenz 曲线 (式 1), 可用表 1 中列出的初始弹性模量、峰值应力和峰值应变唯一确定。受拉软化曲线采用 Gopalratnam 和 Shah (1985) 曲线 (式 2), 并采取江见鲸建议参数 $k=63, \lambda=1.01$, 如图 3 (b) 所示。本文模型只定义受拉损伤指标, 损伤指标随开裂应变的变化如图 3 (c) 所示, 当开裂应变小于 0.0014 时, 损伤指标线性增大, 开裂应变超过 0.0014 后, 损伤指标保持固定值 0.6。

$$\sigma_c = \frac{E_0 \epsilon_c}{1 + \left(\frac{E_0 \epsilon_0}{\sigma_0} - 2 \right) \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_t = f_t e^{-k\omega^2} \quad (2)$$

图 4 比较了采用 4 节点单元和 8 节点单元得到的剪力墙荷载-位移曲线, 并同时画出了文献中提供的荷载-位移骨架线。可见 8 节点单元模型的计算结果较 4 节点单元模型更加平滑顺畅, 下降段也比较稳定。二者在达到峰值之前差别不大, 但软化行为则相差较多。这可能与基于开裂应变定义的损伤指标引入的网格依赖性有关, 本文对此不做深入讨论。

与试验曲线相比, 有限元分析得到的荷载-位移曲线初始刚度略大, 且墙底开裂 (图中 1 点) 时刚度退化不如试验中显著, 导致之后的分析结果位移偏小。受拉侧钢筋屈服后计算得到的刚度与试验曲线比较接近, 不久主斜裂缝的出现使墙的承载力进入软化段, 被主要裂缝穿过的钢筋均进行屈服段。软化过程中墙体形成了新的主斜裂缝并最终沿这条主斜裂缝破坏。图 5、6 分别展示了剪力墙在受力全过程中关键点处的混凝土主拉应变和钢筋大主应力。

与试验曲线相比, 计算结果刚度偏差较大, 承载力基本一致。

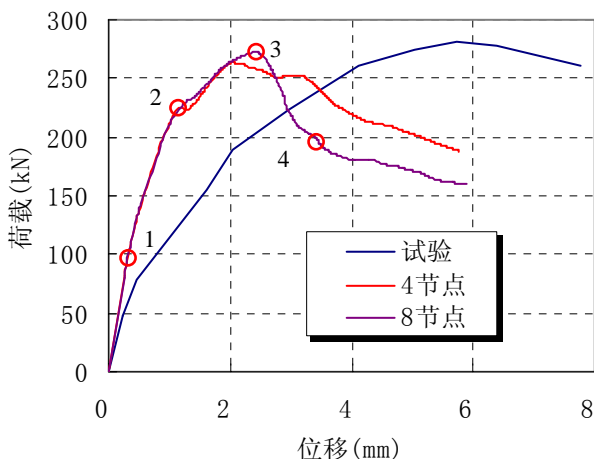


图 4: 荷载-位移曲线之比较

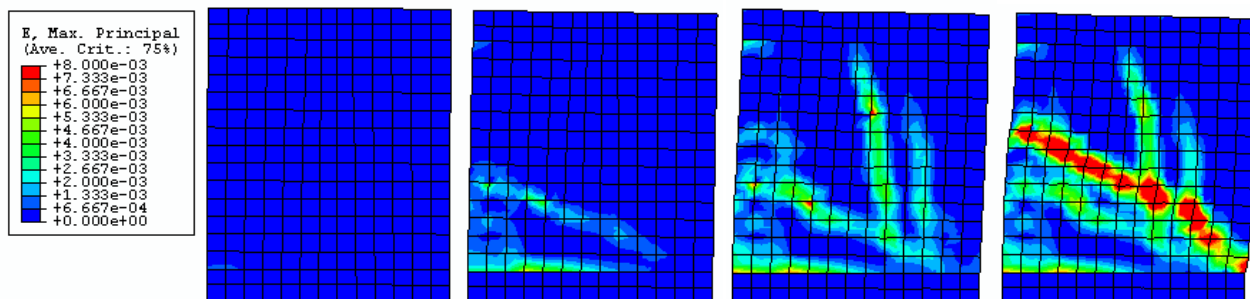


图 5: 混凝土主拉应变

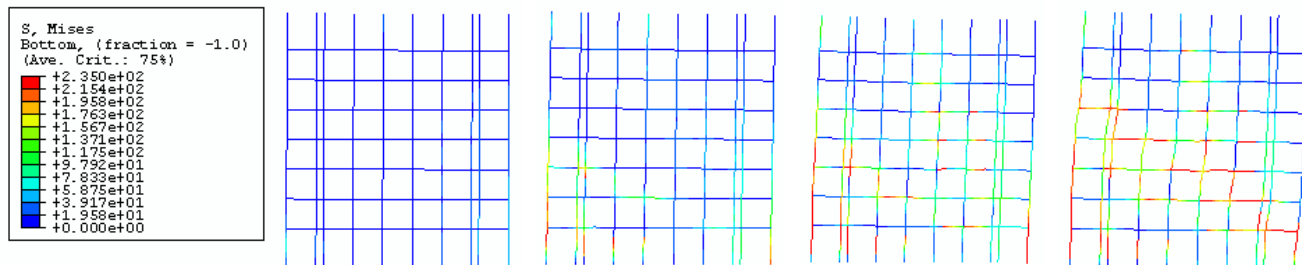


图 6: 钢筋大主应力

二、参数讨论

分析中存在两类参数。一类是有限元模型中难以从试验直接得到的参数，比如混凝土的损伤行为等，这类参数的不确定性直接影响了有限元分析结果的可靠性，也正是因为有限元模型中经常存在这类参数，利用有限元分析的结果时才需要比较慎重，并要求设计人员具有丰富的工程经验与扎实的力学概念；另一类是试件本身的参数，比如剪跨比等。关于这类参数的讨论有助于了解问题的机理。

现有的各种用于有限元分析的混凝土本构在模拟剪切行为时都不理想。本文使用的 ABAQUS 自带的塑性损伤混凝土本构也存在类似的问题。下面首先讨论对上文有限元模型中的模型参数，然后再选用一套标准参数讨论剪力墙试验的试验参数。

从上文结果可以看出，4 节点单元的计算结果与 8 节点相差不多，但可以大量节省计算成本。故这里采用 4 节点单元模型进行模型参数的讨论。

(1) 模型参数:

以上述模型为基准, 调整混凝土膨胀角、钢筋弹性模量、混凝土拉压损伤以及混凝土受拉软化曲线等参数, 分析结果如图 7-图 11 所示。

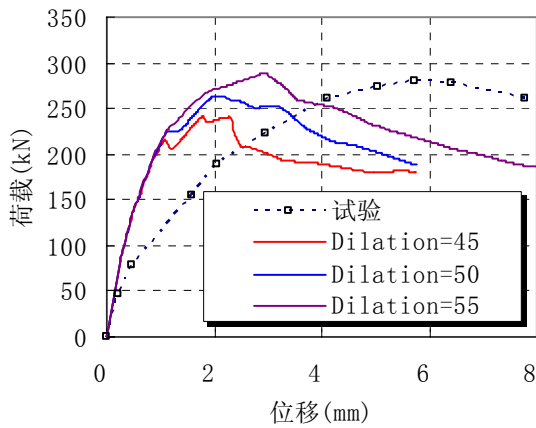


图 7: 混凝土膨胀角的影响

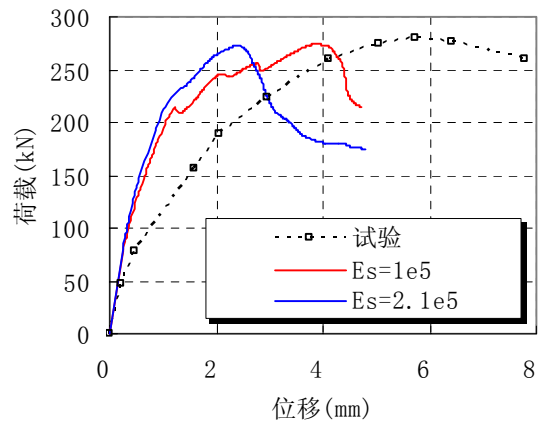


图 8: 钢筋弹性模量的影响

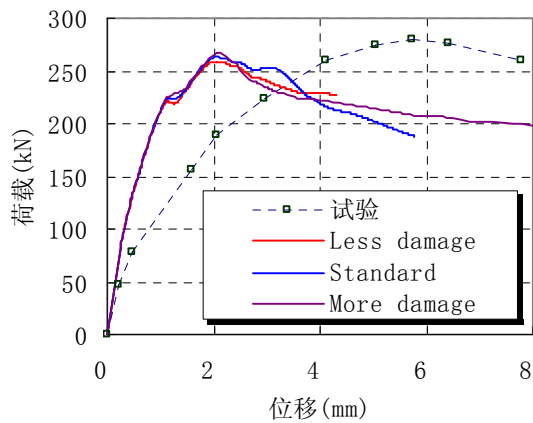


图 9: 混凝土受拉损伤指标的影响

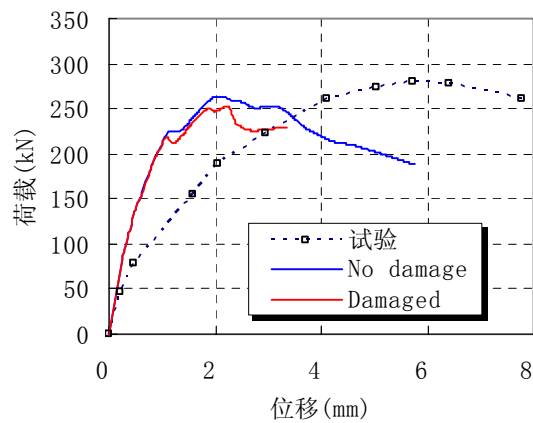


图 10: 混凝土受压损伤指标的影响

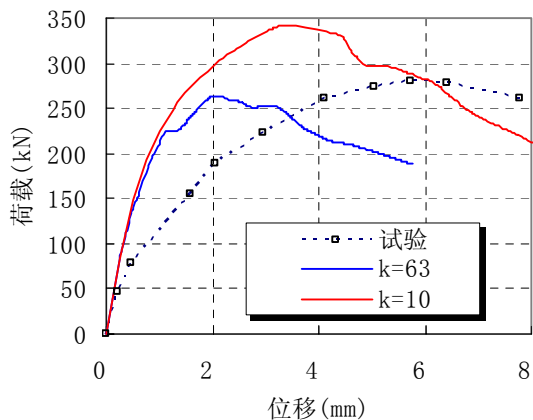


图 11: 混凝土受拉软化曲线的影响

膨胀角定义混凝土的塑性流动势面在主应力空间中开口的大小, 在剪切受力状态下, 它严重影响体积应变的发展。膨胀角越大, 剪胀现象越严重。从图 7 中可以看出, 随着膨胀角从 45 度增加到 55 度, 剪力墙的抗剪能力显著增强。

由于试验中总是或多或少的存在钢筋与混凝土之间界面的粘结滑移而模型中没有反映这一点, 所以常有人采用折减钢筋弹性模量的方法隐式的考虑钢筋滑移的影响。从图 8 可以看出, 当把钢筋弹模折减为原来的一半时, 剪力墙的开裂后的刚度有轻微的下降。

图 9、10 分别展示了混凝土的拉、压损伤指标的不同定义对剪力墙行为的影响。图 9 中，less damage 曲线代表受拉损伤指标最大为 0.2 的模型的计算结果，more damage 曲线则代表受拉最大损伤指标为 0.8 的模型计算结果。各模型中的混凝土均在开裂应变达到 0.0014 时达到最大损伤指标。图 9 显示，受拉损伤对剪力墙的行为影响不大。有趣的是，less damage 曲线反而比标准模型的曲线更低。原因不详。图 10 显示受压损伤对剪力墙的行为也有一定的影响，特别是当剪力墙进行承载力软化阶段以后。

混凝土的受拉软化行为对剪力墙的行为有重要的影响。图 10 图例中的 k 即为式 (2) 中控制受拉软化曲线形状的参数， k 越小，混凝土拉应力随裂缝宽度增大而减小得越慢。由图 10 可见，当受拉软化较慢时，剪力墙的承载能力将得到显著提高。

由以分析可见，有限元材料本构模型中有许多难以标定的参数都可能严重影响分析结果，所以在利用有限元分析结果时应该格外谨慎。

(2) 试验参数

剪力墙的受力形态受高宽比（剪跨比）的影响很大。采用与上文中矮墙完全相同的材模型，保持暗柱配筋率和墙身纵横配筋率，保持轴压比，而把墙高从 750mm 改变到 1600mm，即把剪跨比从不足 1.0 变为 2.0，得到的有限元分析结果如图 12、13、14 所示。

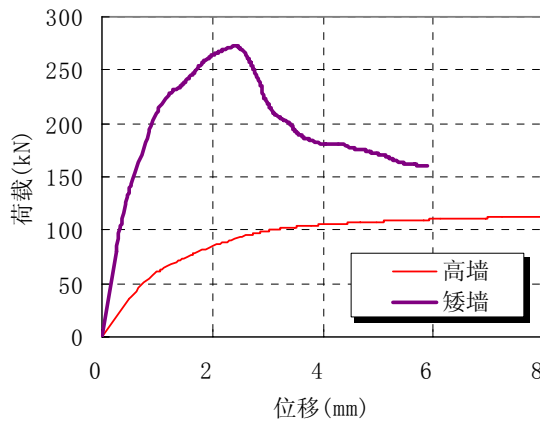


图 12: 高矮墙荷载-位移曲线之比较

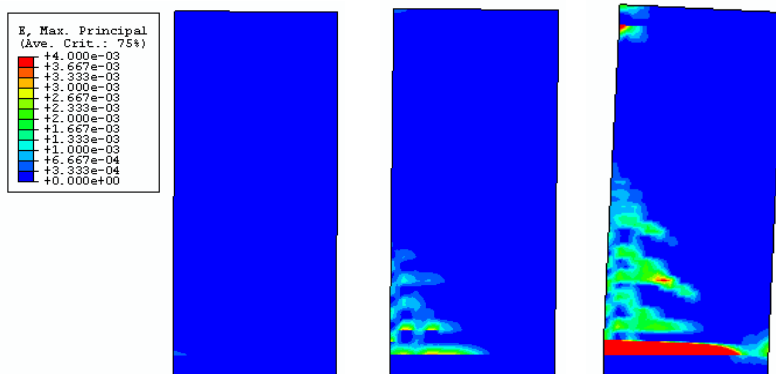


图 13: 高墙混凝土主拉应变

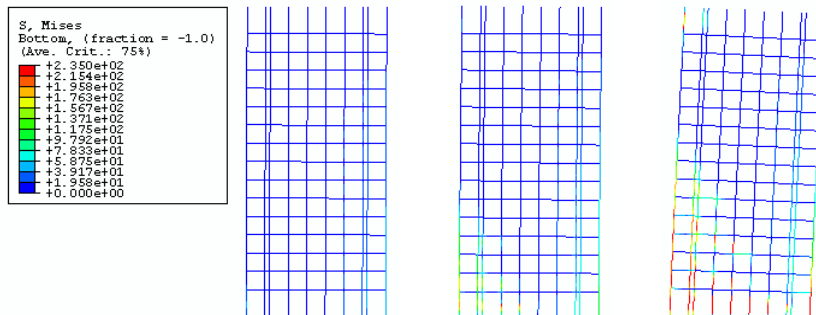


图 14: 高墙钢筋大主应力

图 12 比较了高墙（高宽比 2.0）和矮墙（高宽比 0.94）在静力推覆作用下的荷载-位移曲线。高墙承载力较低，延性较好。

从图 13 中可以看出，高墙的破坏形态与矮墙完全不同。矮墙的最终破坏由主斜裂缝的滑移控制，属于剪切破坏；而高墙则发生弯曲破坏。

下面分别讨论轴压比、分布配筋率和约束构件配筋率对矮墙受力性能的影响。

(a) 轴压比

图 15 (a) 比较了不同轴压比下矮墙的荷载-位移曲线。明显的趋势是，随着轴压比的增高，墙的抗剪承载力提高，延性下降。图 15 (b) 和 (c) 对比了不同轴压比下破坏主斜裂缝的角度。当轴压比较高时，主斜裂缝倾角明显增大，这符合经验。

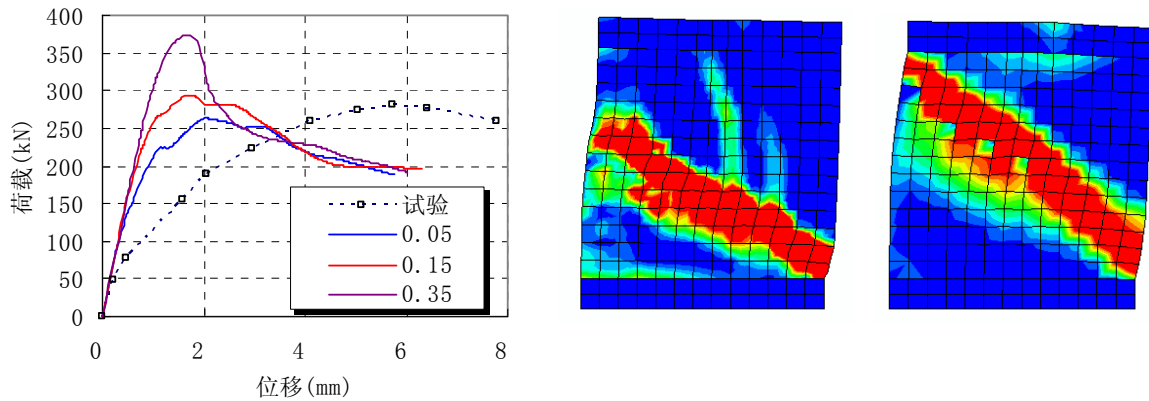


图 15: 轴压比对剪力墙的影响

(b) 分布筋配筋率

墙内分布钢筋可以有效抑制斜裂缝的发展，提高墙的抗剪承载力。图 16 显示了这一变化。随着分布钢筋配筋率的增大，墙的承载力显著提高，延性也有增强。并且当分布筋配筋率较高时，墙的破坏模式也发生了变化。图 17 显示了较高配筋率墙体的破坏过程。

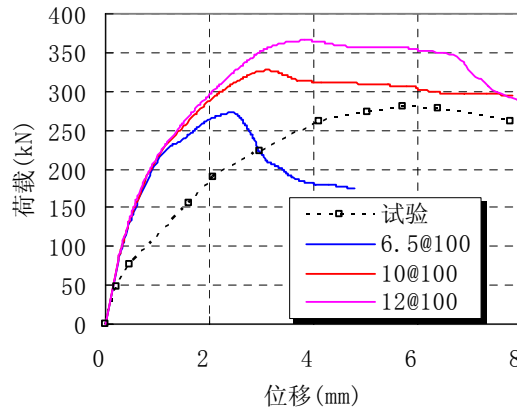


图 16: 分布筋配筋率的影响

对于分布筋配筋率较高的墙体，墙身剪切斜裂缝得到有效抑制。随着墙体侧移的不断增大，墙根部裂缝得不到边缘约束构件中纵筋的有效约束（边缘纵筋已屈服），此处裂缝不断张开并横向扩展，最终墙底部被整体剪坏。

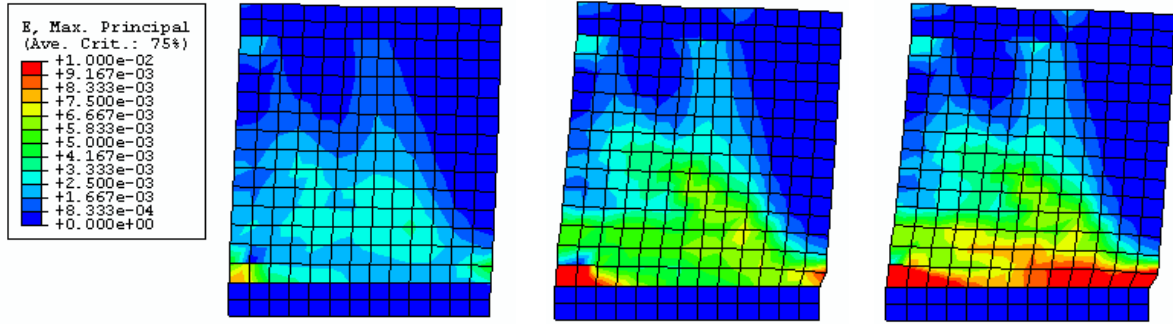
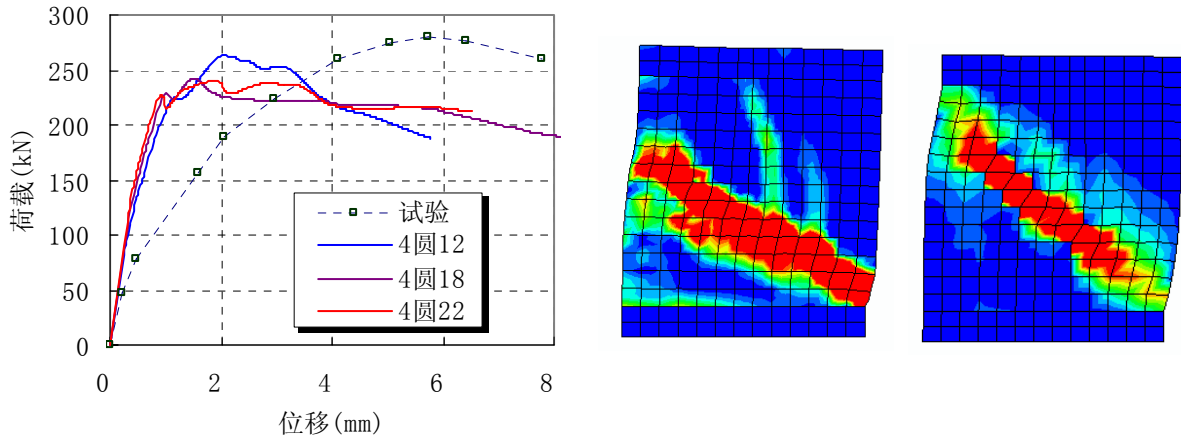


图 17: 高分布配筋率墙体的主拉应变发展过程

(c) 暗柱配筋率

如图 18 所示，增大边缘约束构件的配筋率，可以增大墙的抗侧刚度，但这方面的效果不明显。配筋较多的边缘约束构件反而降低了墙的抗剪承载力，但延性有所改善。同时，高配筋的边缘约束构件增大了墙整体的纵向配筋率，从而增大了矮墙斜裂缝的倾角。



(a) 边缘约束构件对剪力墙荷载-位移曲线的影响 (b) 弱边缘约束墙斜裂缝 (c) 强边缘约束墙斜裂缝

图 18: 边缘约束构件对剪力墙的影响

参考文献

ABAQUS (2003). ABAQUS Analysis User's Manual. US: ABAQUS, Inc.
 李宏男, 李兵 (2004). “钢筋混凝土剪力墙抗震恢复力模型及试验研究.” *建筑结构学报* 25, no. 5: 35-42.
 江见鲸, 陆新征, 叶列平 (2005). “混凝土结构有限元分析”. 清华大学出版社, 北京
 左晓宝, 戴自强, 李砚波 (2001). “改善高强混凝土剪力墙抗震性能的试验研究.” *工业建筑* 31, no. 6: 37-39.