

# 细晶高强钢筋混凝土圆柱抗震性能有限元分析

钟华<sup>1</sup> 徐文平<sup>2</sup> 葛文杰<sup>3</sup>

1 保利江苏房地产发展有限公司, 江苏南京 210018

2 东南大学 土木工程学院, 江苏南京 211189

3 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏扬州 225127

**【摘要】:** 选用 ABAQUS 软件对 500MPa 级的细晶高强钢筋混凝土圆柱在低周反复荷载作用下的抗震性能进行全过程有限元仿真分析, 模型为塑性损伤模型, 并将模拟计算比对实验数据, 吻合较好, 研究成果可以为实际工程和理论提供借鉴和参考。

**【关键词】:** 混凝土圆柱; 500MPa 细晶高强钢筋; 低周反复试验; 抗震性能; 恢复力模型

## Finite analysis on the seismic behavior of circular concrete column with fine-grained high strength rebar

Zhong Hua<sup>1</sup>, Xu WenPing<sup>2</sup>, Ge WenJie<sup>3</sup>

(1. Poly Jiangsu real estate development Co., Ltd, NanJing 210018, China; 2. College of Civil Engineering, Southeast University, NanJing 211189, China;

3. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** The finite element simulation analysis software ABAQUS software is used to simulate the seismic performance of the whole process of the concrete cylinder column under low cyclic loading. The plastic damage model was adopted, and the simulated result show good agreement with tested result. The relevant research results can provide reference for practical engineering and theory.

**Keywords:** circular concrete column, 500Mpa fine-grained high strength rebar, cyclic loading test, seismic behavior, restoring force model.

## 引言

就目前而言, 在广大地区, 地震灾害一直是土木行业面临的巨大挑战, 我们从不断的失败中总结相关的禁烟和教训, 不断提高抗震质量, 健全抗震理论体系。道路桥梁作为运输线实际上也是生命线, 一旦交通线路尤其是高铁线路在地震中发生问题, 面临的的就是成千上万的人员伤亡和财产损失, 道路的抢修难度也远比普通建筑的维修难度要大得多。桥梁和高铁线路大多采用混凝土圆柱基础, 在地震中, 圆柱地基失效就是桥梁和高铁通道在震害中最为常见的问题, 除了地基失效以外, 也有可能是上部结构在地震中产生巨大的惯性力, 对桩基造成剪切和弯曲破坏, 甚至存在桩基在设计时抗震性能就没有满足相应的要求, 在面对强大地震来袭时, 直接发生破坏<sup>[1][2]</sup>。

因为混凝土圆柱在实际工作中处于压弯共同作用下, 其力学性能分析中同时包含混凝土和筋材的材料非线性性质<sup>[3]</sup>, 由于钢筋和混凝土可能会发生相对的滑移, 这样一来混凝土圆柱的承载能力计算和受力分析就变得格外的困难。就目前比较普遍的两种方法是试验研究和有限元分析研究两种。<sup>[4][5]</sup>本文中采用的是有限元分析方法进行研究, 对细晶高强钢筋混凝土圆柱在水平荷载作用下的力学性能进行探索。在实际的分析过程中包含着十分复杂的非线性分析, 有限元软件 ABAQUS 在这一方面具有很大的优势, 它内置了多种类型的材料和单元模型。所以选用 ABAQUS 进行分析是非常恰当的。对各种印象因素进行分类对比实验, 研究混凝土圆柱的滞回和骨架曲线变化特征<sup>[6]</sup>。

## 1 分析模型的建立

ABAQUS 软件具有一定的局限性, 其本身自带的混凝土塑性损伤模型比较适用于钢筋混凝土结构单调加载、循环加载或动载下的力学行为, 并且还要求在低围压的条件下, 但相较于混凝土弥散开裂模型其应用范围要更大一些, 也适用于更多的对象。当然, 同时需要注意的是这种模型也不是万能的, 依然存在着不适用的对象, 比如 ABAQUS 里面的三维梁单元 B31、B32 和 B33。

本实验中进行有限元模拟分析时, 混凝土材料所选用的模型均为 ABAQUS 中的塑性损伤模型。模型本身采用的是三维实体单元模拟核心部分混凝土, 分析时采用的是收敛性比较好的一次单元, 因为试件本身所包含的各种材料之间相互作用, 这样就很容易导致最后计算分析时不收敛。

在选取钢筋的单元时, 采用的是 ABAQUS 本身自带的桁架单元(truss element), 桁架单元也可以用来模拟在只承受轴向力情况下的平面以及空间里线状结构, 不考虑弯矩或垂向荷载的作用。对于钢筋单元, 则是采用二节点线性桁架单元(2-node straight truss)中的空间单元 T3D2 来模拟钢筋, 此时沿单元的应力是固定常量, 确定位置和位移选择用内插法。为了使模拟的钢筋较 rebar 方式更为直观, 所以选用的是嵌入桁架, 这种方法可以单独显示其应力变化和变形云图, 极大地方便了后续结果的处理。

当选取混凝土模拟单元时, 均采用 8 节点的六面体线性减缩积分单元 C3D8R, 名称中“减缩积分”准确的说是单元具有相对规则的形状时, 所有 Gauss 积分点的数量之和不足以对单元

刚度矩阵中的中的多项式进行精准的积分，而对于三维的一系列问题，六面体单元总能以最低的成本给出相对较好的模拟计算结果。

根据实际的实验情况构件建立如图 1 的有限元模型。加载梁的区域设立了刚性垫块，因此，在模拟时建立的有限元模型中的加载作用区域也建立了刚性垫块，并且设置其刚度为无限大，这样也是为了避免应力集中导致计算结果无法收敛而出现错误。模拟过程中的边界条件设置为构件底座和底面部位全部自由度耦合，位于加载梁端部的刚性垫块与参考点（RP1）耦合线位移自由度，用以施加水平位移和水平力作用。考虑加载梁时，其顶面部位根据轴压比定值施加固定数值的轴向均布面荷载，这样可以使得模拟分析更加接近实际工作情况。

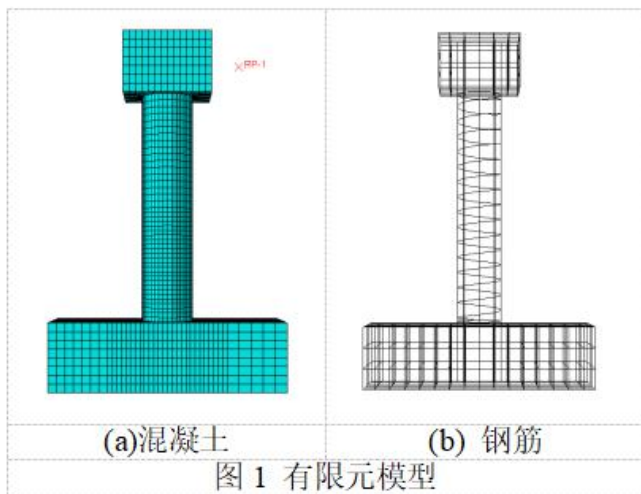


图 1 有限元模型

本试验中的主要目的是将普通钢筋和细晶高强钢筋的性能在原柱中的影响作对比，在此基础之上，将配筋率、箍筋间距、轴压比和钢筋种类作为影响因素，探讨其对混凝土圆柱的实际抗震性能的影响。其中，前三者的相关研究较多，反而是对钢筋种类的对比比较少，所以在进行试验结果与模拟分析结果对比时，以 HRBF500 级细晶高强钢筋混凝土圆柱和普通钢筋混凝土圆柱进行结果对比为重点。

## 2 实验数据与模拟分析数据对比

### 2.1 滞回曲线与试验结果对比

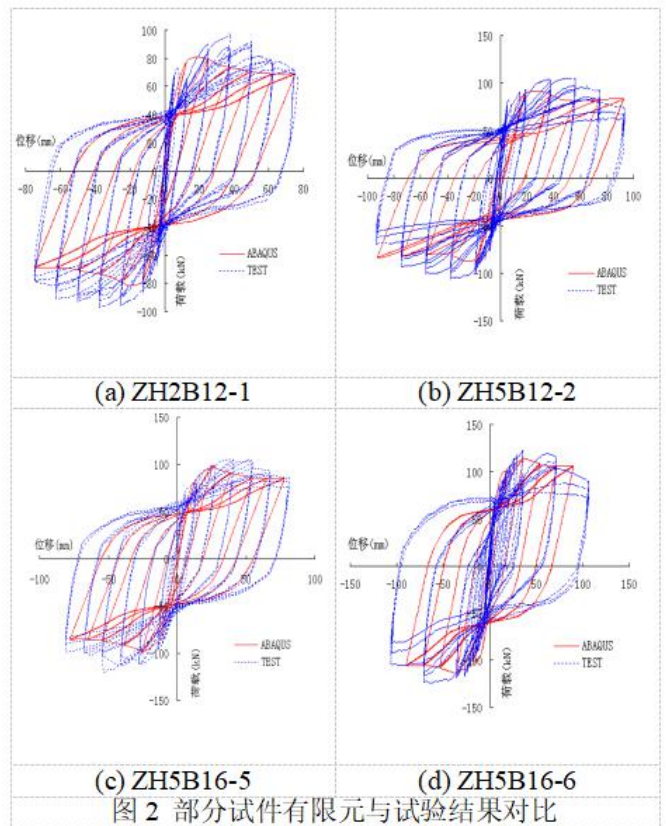


图 2 部分试件有限元与试验结果对比

图 2 中，选取了部分试件的滞回曲线与实验结果曲线相对比。实验曲线 2，模拟曲线为红色，可以看出，两者有着很好的相似度，轮廓基本相同。总的来看，实验数据曲线总是完全包含模拟曲线，即实验数据中的峰值荷载总是略大于模拟出来的荷载峰值，原因是试件真正破坏的位置是根部以上一段距离的某个截面，而非是在根部截面。此外，普通钢筋混凝土圆柱的滞回曲线与细晶高强钢筋混凝土圆柱变化规律相同。在实验过程中，荷载不断增大，纵向受力筋屈服，这是试件的整体刚度迅速下降，在图上表示为曲线的斜率大幅度减小，在图中可以很清楚的看出这一点。从这一点看，模拟分析的确能够比较好的实现对圆柱的滞回性能的分析。各试件具体参数和数据对比图如表 1 所示。

| 圆柱编号     | 主筋      | 主筋配筋       | 箍筋     | 主筋配筋率 | 轴压比 | $F_{u,e}/\text{kN}$ | $F_{u,s}/\text{kN}$ | $\left  \frac{F_{u,e} - F_{u,s}}{F_{u,e}} \right $ |
|----------|---------|------------|--------|-------|-----|---------------------|---------------------|--|
| ZH2B12-1 | HRB335  | 8B12       | A6@100 | 0.94% | 0.2 | 96.99               | 85.10               | 12.3%  |
| ZH5B12-2 | HRBF500 | 8D12       | A6@100 | 0.94% | 0.2 | 105.23              | 97.09               | 7.7%   |
| ZH2B8-3  | HRB400  | 8 $\Phi$ 8 | A6@100 | 0.42% | 0.2 | 84.19               | 72.31               | 14.1%  |
| ZH5B8-4  | HRBF500 | 8D8        | A6@100 | 0.42% | 0.2 | 90.57               | 76.34               | 15.7%  |
| ZH2B16-5 | HRB335  | 8B16       | A6@100 | 1.67% | 0.2 | 112.61              | 103.31              | 8.3%   |
| ZH5B16-6 | HRBF500 | 8D16       | A6@100 | 1.67% | 0.2 | 128.45              | 123.59              | 3.8%   |

注：A 表示 HPB235 级钢筋，B 表示 HRB335 级钢筋， $\Phi$  表示 HRB400 级钢筋，D 表示 HRBF500 级钢筋， $F_{u,e}$  为试验实测值， $F_{u,s}$  为模拟值。

从上表中可以看出，实验数据相对于模拟数据，总是会偏大一些，差值在 10% 左右波动。对比钢筋强度不同的试件，可以看出，随着钢筋强度的增长，极限荷载会有略微的增长，不过增长数值不太明显。钢筋强度相同的情况下，随着配筋率的不断增加，极限荷载也随之增加，增长幅度相较于钢筋强度的增加更加明显，所以，提高主筋配筋率对于承载能力的增长效果更好。

## 2.2 骨架曲线与试验结果对比

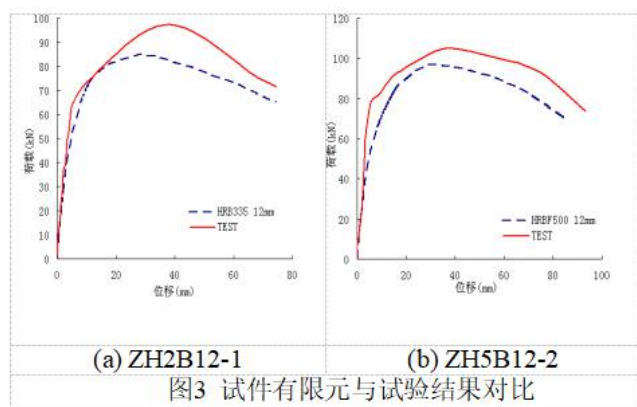


图3 试件有限元与试验结果对比

将模拟分析曲线与实验过程中曲线进行对比如图 3 所示。从图 3 中可以对比看出，实验中的骨架曲线明显比模拟中的骨架曲线峰值更大，将模拟分析曲线完整的包含在其中，两者的变形规律非常的相似，整体曲线吻合度较好，说明使用 ABAQUS 软件分析骨架曲线，可以获得很好的效果。将 ZH2B12-1 试件与 ZH5B12-2 试件曲线进行对比，可以发现，在模拟分析中，钢筋的强度增加，极限荷载会得到很大的提高，而实际上，在实验过程中两者的极限荷载比较接近，没有形成加大的差距。

## 3 试件应力云图

以试件 ZH5B12-2 为例，给出了试件处于初始裂缝阶段、屈服阶段以及极限阶段的混凝土和钢筋应力云图，简单的表现了在实际

受力过程中其应力分布情况和发展情况。

混凝土处于初裂阶段时，试件 ZH5B12-2 最外侧纵筋应力值 75MPa 左右。在后续加载过程中，随着施加荷载的逐渐增大，最外侧受拉的一根钢筋最先屈服，之后实验改为以位移的量控制荷载加载过程。在反复加载试验中，最外侧受压的混凝土达到极限压应变被压坏，混凝土外围的保护层发生剥落现象。此时，除中性轴处的两根钢筋以外，其余的钢筋都已经进入屈服状态。达到极限阶段时，其根部塑性铰区域箍筋也进入屈服阶段，试件中的纵向钢筋最大应力也达到了 577MPa。

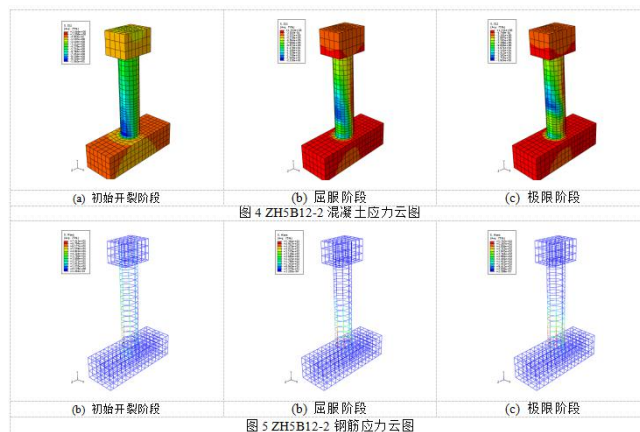


图4 ZH5B12-2 混凝土应力云图

图5 ZH5B12-2 钢筋应力云图

## 4 小结

采用有限元软件 ABAQUS 对 500MPa 级的细晶高强钢筋混凝土圆柱在低周反复荷载作用下的抗震性能进行了仿真分析，得到了如下结论：

- (1) 简单的介绍了混凝土圆柱应用 ABAQUS 软件进行模拟分析的可行性，并且描述了模型建立的过程和相关的要点。
- (2) 建立的 ABAQUS 模拟计算模型比较符合实际情况，较为完整地模拟了试件的整个试验过程，将模拟结果与实验结果相对比时，可以发现数据吻合度较好。
- (3) 提高主筋的配筋率对于提高极限荷载的效果相较于提高钢筋强度要更好。相较于普通钢筋，HRBF500 级细晶高强钢筋混凝土圆柱具有更高的强度和刚度。

## 参考文献：

- [1] 王青桥,韦晓,王君杰.桥梁桩基震害特点及破坏机理.震灾防御技术.2009年2期:167~173.
- [2] 刘惠珊.桩基震害及原因分析—日本阪神大地震的启示.工程抗震,1999年1期:37~43.
- [3] 张国军,吕西林,刘伯权.高强混凝土框架柱的恢复力模型研究[J].工程力学,2007,24(3):83~90.
- [4] 陈云涛.钢筋混凝土结构恢复力特性的分析研究和数字化:[学位论文].同济大学,2002.
- [5] 蓝宗建.混凝土结构设计原理 [M].南京:东南大学出版社,2003.
- [6] 王全凤,郑济坤.HRBF500 级钢筋混凝土柱恢复力模型[S].中国科技论文在线, 2011,6(8):585~589.