



FRP加固负载混凝土柱轴压性能有限元分析

佟长霖¹, 史德纯²

(1. 大连大学, 辽宁大连 116000; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 采用有限元方法对不同负载应力水平下短期加载的纤维增强塑料 (FRP) 布约束混凝土柱轴压性能进行分析, 并与已有试验结果做了比较。分析表明: 选择合理的分析模型, 可以较好地预测FRP布约束混凝土柱轴心受压性能。在此基础上, 分析了不同带载应力水平下配筋率、混凝土强度、FRP约束刚度等参数对FRP约束混凝土柱承载力和变形的影响。

关键词: 纤维增强塑料; 轴压; 有限元

中图分类号: TQ 050.4²

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0046-04

Finite element analysis of axial behavior of FRP-confined concrete columns with sustained load

TONG Chang-lin¹, SHI De-chun²

(1. Dalian University, Dalian 116000, China; 2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The behavior of short-term axially preloaded concrete columns with FRP confinement under axial loading is simulated using finite element method, and the computing results are compared with the test ones. The comparisons show that proper analysis model can accurately simulate the axial compressive property of FRP-confined concrete columns. Then a parameter analysis is carried out to investigate the impact of longitudinal reinforcement ratio, volumetric lateral reinforcement ratio, concrete strength and restrain stiffness of FRP on the bearing capacity of columns and the load-strain curve under different preloading stress levels.

Key words: FRP; axial compression; finite element method

既有结构的维修与加固是世界上普遍关注的课题。纤维增强塑料 (FRP) 因其轻质、高强、便于施工等因素被认为是最具前途和最经济的结构加固技术, 具有广泛的应用前景。但现有研究大多未考虑负载的影响。本文采用有限元方法对多种带载应力水平下短期加载的FRP约束混凝土短柱轴心受压性能进行了模拟, 并与已有试验结果进行比较。分析表明: 选择合理的分析模型, 可以较好地预测FRP布约束混凝土轴心受压性能。

模型对FRP布约束混凝土柱的轴心受压性能进行全过程分析, 建立的分析模型如图1所示。

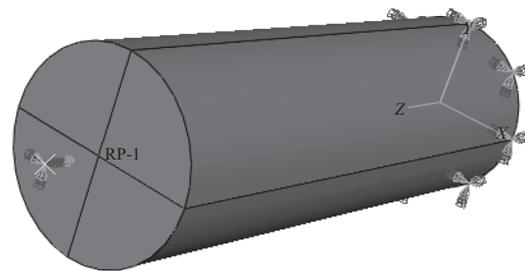


图1 计算模型

1 有限元模型

1.1 分析模型

采用大型非线性有限元程序建立三维有限元

混凝土采用塑性损伤模型 (concrete damaged plasticity model)。该模型假定混凝土有两种失效机制: 受拉开裂和压碎破坏, 但该模型没有引入盖

收稿日期: 2012-03-19

作者简介: 佟长霖 (1987—), 男, 硕士研究生, 从事工民建方面的学习和研究。

帽来考虑混凝土的塑性体积压缩响应, 这个不足导致其对于FRP约束下的混凝土变形预测存在一定的误差。混凝土的单轴应力-应变关系分别采用过镇海提出的受压本构模型^[1]和江见鲸提出的受拉本构模型^[2]。由于模型中涉及FRP与混凝土、混凝土与钢筋的相互作用, 选择收敛性较好的八节点六面体完全积分单元(C3D8)来模拟混凝土。

钢筋采用软件提供的两节点空间桁架单元(T3D2)来模拟, 该单元可用来模拟空间内只承受轴向力作用的线状结构, 不考虑弯矩或垂向荷载方向的力, 应力-应变关系采用理想弹塑性模型, 通过“嵌入对象”将钢筋骨架嵌入到混凝土中。该方式模拟的钢筋受力状况可单独显示, 较增强层方式直观, 便于后处理。

外包FRP布采用软件的四节点膜单元(M3D4)模拟, 该单元只有面内刚度, 没有抗弯刚度。纤维材料设为各向异性, 只考虑其纤维方向的强度, 应力-应变关系为理想弹性, 这样膜单元就只能承受由混凝土膨胀而引起的环向拉力作用, 符合FRP在约束混凝土中的受力状况, 其环向应力云图如图2所示。根据已有试验结果: 当粘结胶的质量较好及施工质量有保证时, 胶层在加载过程中不会脱开, 据此本文在计算中认为混凝土单元和纤维布单元节点位移协调, 不考虑两者之间的粘结滑移。

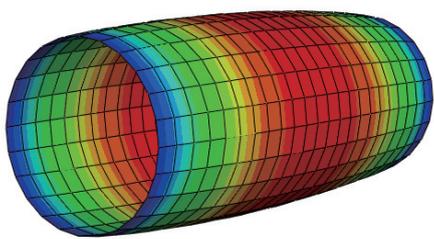


图2 FRP受力云图

关于负载加固, 主要是解决FRP应变滞后的问题。本文采用软件的“单元生死”方法模拟负载问题。在程序中设置2个分析步: 第1个分析步采用力加载方式用于施加预先设定的轴向力, 此时FRP材料设为“死”, 不考虑其对整体刚度的贡献, 混凝土处于单轴受压状态; 第2个分析步采用位移加载方式, 此时FRP单元设为“生”, 其开始参与受力, 混凝土处于三向受力状态。引入

生死单元以后, 不需要在计算过程中重新划分单元网格, 在计算之前即可将钢材、混凝土和碳纤维布的单元网格完全确定好, 而只是在计算中移除或加入FRP单元, 从而大大简化了问题。

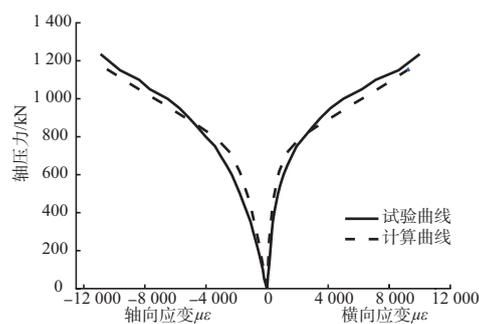
1.2 边界条件

柱两端均设为固定端, 为了更方便地提取第2阶段施加的荷载, 将柱顶与预先设置的参考点耦合, 把柱顶的边界条件施加到参考点上即可, 在参考点上施加力或位移荷载。具体设置见图1, 试件分为了4部分, 是为了达到最佳的网格质量对试件进行的分割。

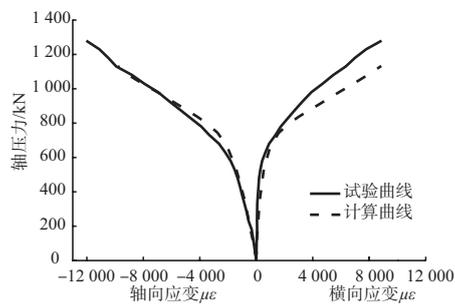
计算中若出现以下两种情况之一, 则认为达到破坏极限状态, 计算中止: 1)FRP达到试验时的断裂应变; 2)迭代不收敛, 将加载步长达到软件规定的下限值时仍不收敛, 则认为已经产生了很大的塑性变形而达到破坏极限状态。本次分析中, 所有算例均因情况1而终止计算。

2 试验结果对比与分析

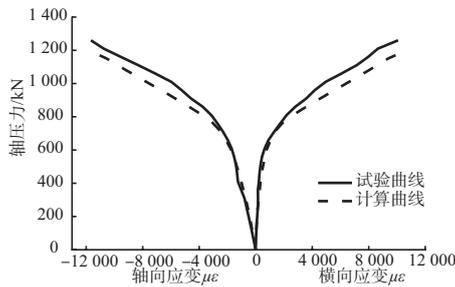
利用前文建立的有限元分析模型, 通过“单元生死”的方法来模拟负载情况下FRP约束混凝土柱的轴压性能。本文主要与金建平^[3]所做的第2组试验, 即负载加固直径150 mm钢筋混凝土短柱试验数据进行对比, 试验参数参考文献[3]。轴心受压全过程的轴力-应变曲线的计算结果与试验结果对比见图3。由对比图可知, 极限承载力计算值与试验值非常接近, 计算曲线与试验曲线的发展趋势也基本相同, 除个别试件外, 曲线拐点和峰值荷载点也基本一致, 可以说吻合程度较好, 所以本文建立的有限元模型模拟可以较好地反映混凝土柱的轴压性能。



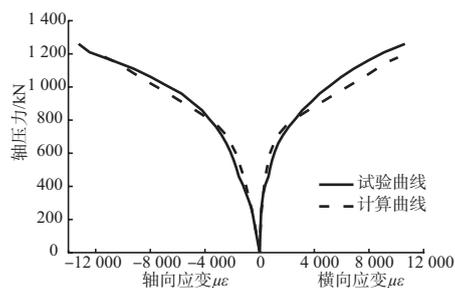
a) BSO



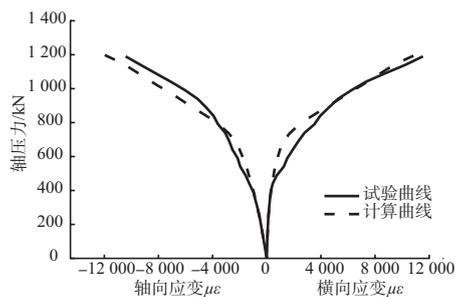
b) BS2



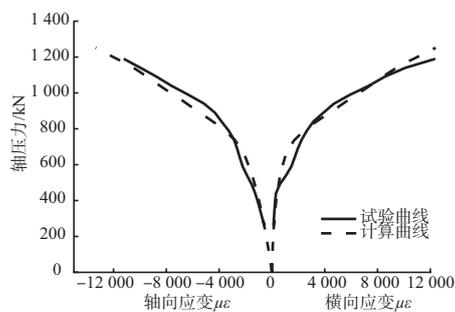
c) BS4-1



d) BS4-2



e) BS6-1



f) BS6-2

图3 轴向荷载-应变全曲线的预测结果与试验结果对比

3 参数分析

为了进一步了解FRP约束荷载钢筋混凝土柱的轴压性能，在前文分析模型的基础上对纵筋配筋率、体积配箍率、混凝土强度、FRP约束刚度等因素展开参数分析。计算的基本参数为直径 $D=150\text{ mm}$ ；高度 $H=500\text{ mm}$ ； $E_{\text{frp}}=250\text{ GPa}$ ；钢筋弹性模量取为 $2.0 \times 10^5\text{ MPa}$ ，箍筋屈服强度为 235 MPa ，间距取 92 mm ，纵筋屈服强度为 335 MPa ，沿圆周均匀布置6根；混凝土保护层取 20 mm ；FRP断裂时对应的环向应变取 0.011 。

3.1 配筋率

在荷载应力水平为0.6的情况下，取混凝土强度为 35 MPa ，FRP厚度为 0.111 mm 。首先考察纵筋配筋率的影响，箍筋直径取 6 mm ，变化纵筋的横截面积，分别取 $10, 20, 30, 40, 50, 60\text{ mm}^2$ ，分析纵筋配筋率对FRP荷载加固混凝土柱承载力的影响，计算结果如图4所示；其次考察体积配箍率对荷载加固柱承载力的影响，取纵筋直径为 8 mm ，变化箍筋面积，依次取 $5, 10, 15, 20, 25, 30\text{ mm}^2$ ，计算结果如图5所示。由图5可知，FRP带载加固混凝土柱的承载力与纵筋配筋率和体积配箍率均近似呈线性关系。

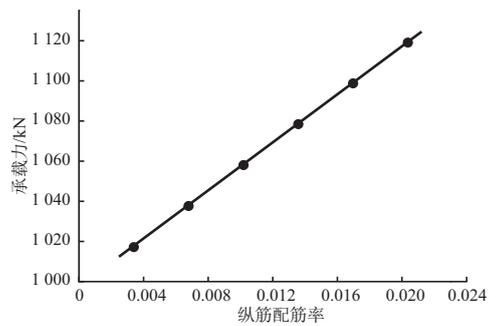


图4 承载力与纵筋配筋率关系曲线

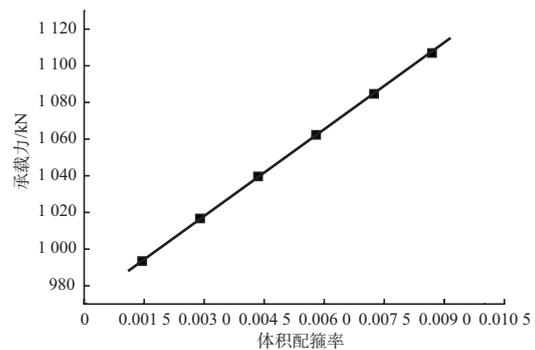


图5 承载力与体积配箍率关系曲线

3.2 混凝土强度

混凝土强度依次取25, 35, 45, 55 MPa, FRP厚度为0.222 mm, 为了消除钢筋影响, 此处不配置任何钢筋, 分别在带载应力水平为0, 0.2, 0.5和0.8的情况下进行计算, 计算结果如图6和图7所示, 其中 f_{cej} 为FRP约束负载混凝土极限抗压强度计算值, f_c 为未约束混凝土抗压强度值。

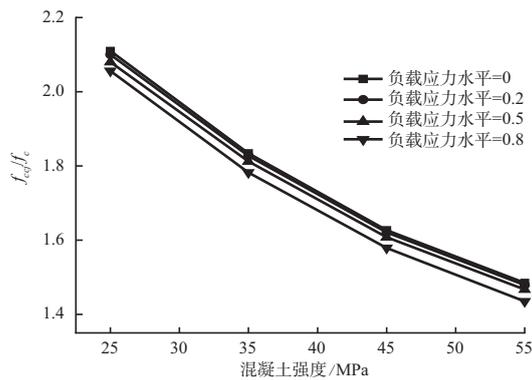


图6 f_{cej}/f_c 随 f_c 变化规律

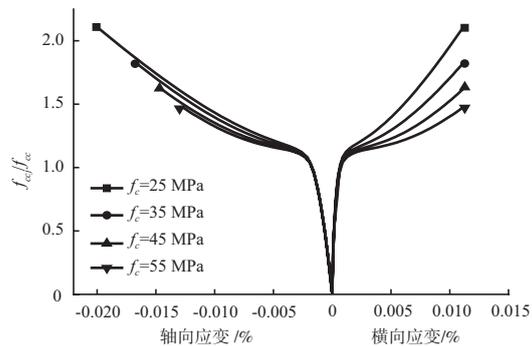


图7 f_{cej}/f_c 随应变变化规律 $n_0=0.5$

由图6可以看出, 随着混凝土强度的提高, 无论负载应力水平高低, FRP加固后强度的提高幅度都逐渐降低, 例如在负载水平为0.5下, 对于混凝土强度为25 MPa和55 MPa的混凝土, 极限应力的提高幅度由108%下降到47%; 但混凝土强度的不同对于带载应力水平对混凝土提高幅度的影响并不明显; 由图6还可知, 随着带载应力水平的提高, 降低幅度有逐渐加快的趋势, 说明在较高应力水平下, 混凝土的强度衰减较快。由图7可看出, 随着混凝土强度的提高, 其纵向变形能力逐渐降低, 所以对于高强混凝土柱的加固, 除了承载力的提高, 还要考虑其变形能力的改善。

3.3 FRP约束刚度和带载应力水平

通过计算可知FRP的弹性模量与其厚度乘积相

同时对相同截面的混凝土柱约束效果是一致的, 这可以归结为FRP约束刚度的影响。为此, FRP厚度依次取0.111 mm、0.222 mm和0.333 mm, 这与固定FRP厚度而变化其弹性模量是等效的。混凝土强度取35 MPa, 分别计算在0, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75和0.90的负载应力水平下混凝土柱的极限强度, 计算结果见图8, 图9为负载水平0.6时的提高幅度-应变曲线。

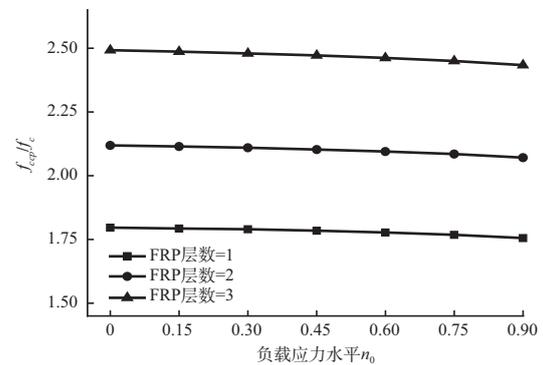


图8 带载应力水平对承载力的影响

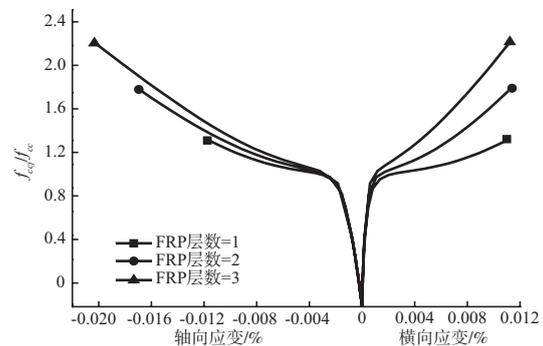


图9 f_{cej}/f_c 随应变变化规律 $n_0=0.6$

由图8可知, 随着FRP层数的增加, 混凝土柱极限强度的提高幅度明显增加; 无论包裹层数多少, 混凝土强度的提高幅度都随着负载应力水平的提高而单调降低, 当负载水平达到0.75时, 降低幅度为5%左右; 随着FRP层数增加, 降低的幅度未见有减小的趋势, 这可能预示着较高负载水平下, 加固效果并不会因FRP用量的增加而改善。由图9可知, 负载水平为0.6时, 混凝土的轴向应变随着FRP层数的增加仍得到了较大的提高, 这和直接约束加固情况下是一致的, 所以当负载水平不太大时, 仍可通过加大FRP的约束刚度而达到更好的变形能力。

(下转第60页)