

# 基于 OpenSees 的预应力混凝土构件 弹塑性分析

陈学伟<sup>1</sup> 何伟球<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学建筑学院, 510640)

(2. 华南理工大学建筑学院高层建筑研究所, 510640)

**摘要** 近年来预应力技术得到广泛应用, 深入研究预应力混凝土结构或构件的受力及变形性能有着重要的工程意义。由于预应力混凝土构件的力学行为复杂, 因而变形的计算往往需要借助有限元模型实现。本文基于纤维单元的开源结构有限元分析程序 OpenSees, 编制了预应力混凝土构件的数值分析模型。利用该模型对两跨有粘结预应力连续梁进行受力及变形分析, 得到 P- $\Delta$  曲线, 并与参考文献的试验结果进行对比。经过分析, 可以得出以下结论: OpenSees 可以对预应力结构的进行弹塑性分析, 并且具有自由度数少, 模型直观简单等优点, 可应用于工程设计与分析。

**关键词** 预应力混凝土, 纤维模型, 非线性有限元, OpenSees

## Elasto-Plastic Analysis of Prestressed Concrete Member in OpenSees

Chen Xuewei<sup>1</sup> He Weiqiu<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering. South China University of Technology 510640.

2. Tall Building Structure Research Institute. College of Architecture and Civil Engineering.

South China University of Technology. 510640.

**Abstract** In recent years prestressed structure technology has been extensively applied, in-depth study prestressed concrete structure or component capacity and deformation properties have important significance of the engineering. Because of the prestressed concrete structures mechanical behavior is very complex, so the calculation of deformation often depends on finite element model. With the program "OpenSees", prestressed concrete structures numerical model is developed. By using this model, the two prestressed concrete continuous beams are simulated. The P- $\Delta$  curves of the results are compared with the reference test results. After analysis, the following conclusions can be drawn: the elasto-plastic analysis of prestressed structure can be carried out by the programme OpenSees, and then the numerical model has some advantages such as a few DOF, simple and intuitive, so OpenSees can be used in engineering design and analysis of prestressed concrete structure..

**Keyword** Prestressed concrete, Fiber model, Nonlinear finite element method, OpenSees

### 一、引言

目前, 预应力混凝土结构已在各种工程结构中得到广泛应用, 深入研究预应力混凝土构件及结构的受力与变形性能有着重要的工程意义。同时对预应力混凝土构件进行弹塑性分析有助于了解构件的抗震性能。随着计算机技术的发展, 借助非线性有限元模型可实现预应力结构的弹塑性模拟。

## 二、预应力混凝土结构有限元分析方法

文献[1]提出常用的数学模型是利用实体单元模拟混凝土，用桁架(truss)模拟预应力筋与普通钢筋。一般情况下，施加预应力是通过降温法去实现。实体有限元模型由于自由度数多，造成计算量大，因此模型可应用于构件的性能分析但是不适用于预应力结构的整体分析。纤维模型由于自由度数少，适用于整体结构分析。纤维单元模拟预应力混凝土构件的关键在于处理好钢筋混凝土与预应力筋的变形协调关系。文献[2]对 CFRP 与预应力筋加固的圆柱进行弹塑性分析，其中提出一种组合模型：采用纤维单元模拟钢筋混凝土，采用桁架单元模拟预应力筋，两者之间采用宏单元连接以反映两者之间变形协调关系。本文参考文献[2]提出的组合模型，利用开源有限元程序 OpenSees 对预应力构件进行弹塑性分析。

## 三、OpenSees 简介

OpenSees 全称 Open System For Earthquake Engineering Simulation, 开源的地震工程模拟系统。其程序代码是公开的，用户可以通过编程手段为系统增加新的材料本构和单元类型。程序主要用于分析结构在地震作用下的反应。其功能包括线性分析，静力和动力非线性分析，特征值计算等功能。程序的有限元单元类型丰富，结构非线性分析中主要使用非线性梁柱单元 nonlinear beam column。此单元是基于纤维模型的非线性单元，可应用于杆系结构的静力与动力非线性分析并且考虑 P-Delta 效应。OpenSees 程序自带多种的混凝土与钢筋的材料本构，如本文应用的 Kent-Scott-Park 混凝土本构模型与 Giuffrè-Menegotto-Pinto 钢筋本构模型。对于复杂非线性的预应力筋材料，OpenSees 提供多折线带滞回参数的材料本构 Hysteretic，可以根据试验的实际应力-应变曲线输入材料本构。

## 四、数值分析模型

### (一) 纤维模型与材料本构

在 OpenSees 程序中，钢筋混凝土构件截面可划分为若干个非约束混凝土纤维，约束混凝土纤维及钢筋纤维，如图 1 所示。用户可以分别定义每根纤维的位置，截面面积和材料属性。程序自动根据平截面假定得到每根纤维的应变，并通过迭代计算确保截面受力平衡。混凝土和钢筋的本构关系如图 2(a-b)所示。

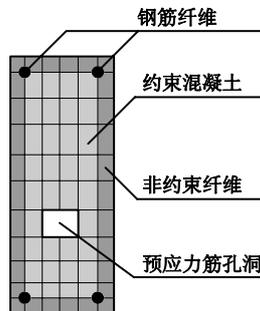
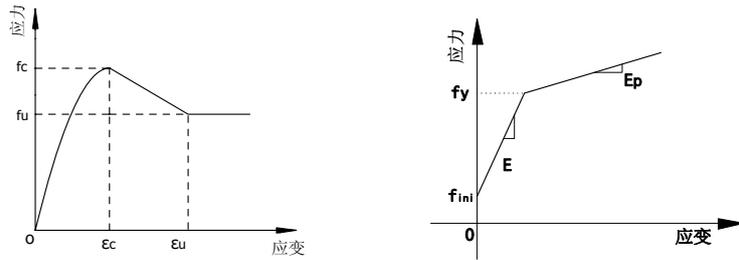


图 1 预应力混凝土矩形梁纤维截面图



(a) Kent-Scott-Park 混凝土模型 (b) Giuffrè-Menegotto-Pinto 钢筋模型

图 2 混凝土与钢筋本构关系

本文采用的混凝土本构不考虑受拉部分，Kent-Scott-Park 模型由上升段的曲线和下降段的二折线组成。<sup>[1]</sup>假设约束混凝土的抗压强度和峰值应变都与素混凝土相等，上升段曲线也相同，采用 Hognestad 的二次式  $y=2x-x^2$ 。下降段的斜线是由应力  $\sigma_c=0.5f'_c$  处的应变确定：

$$\varepsilon_{0.5} = \left( \frac{20.67 + 2f'_c}{f'_c - 6.89} + \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b''}{s}} \right) \times 10^{-3} \quad (1)$$

$f'_c$ ——混凝土的圆柱体抗压强度， $N/mm^2$ ；

$\rho_s$ ——横向箍筋对核芯混凝土（取箍筋外皮以内）的体积率；

$b''$ ——从箍筋外皮量测的约束核芯宽度；

$s$ ——箍筋间距。

C-P Lamarche 与 R. Tremblay 修正了 OpenSees 原有的 Giuffrè-Menegotto-Pinto 钢筋模型并加入初始应力属性，在 OpenSees 中杆件预应力的施加可以通过定义初始应力来实现。

## (二) 有限元模型

结构构件采用非线性梁柱纤维单元建模，单元截面特性由纤维模型确定。与普通钢筋混凝土构件不同，预应力混凝土构件中的预应力筋通常曲线布置，而对于无粘结预应力混凝土构件，无粘结筋与混凝土之间的界面滑移不可忽略，故建模时将构件划分成钢筋混凝土和预应力筋两部分，两部分之间连接可以通过不同的连接单元实现。以有粘结预应力混凝土梁为例，组合单元由三部分组成：(1)钢筋混凝土梁，(2)预应力筋，(3)刚臂，如图 3 所示。

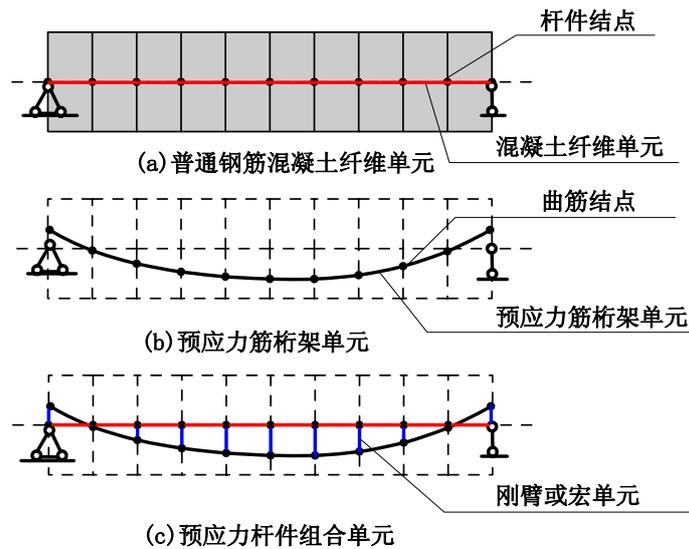


图 3 预应力混凝土构件有限元模型

钢筋混凝土与预应力筋分别建模后，将两者之间采用连接单元进行连接，形成整体。预应力筋通常为曲线，在有限元模型中可以采用足够数量的桁架单元模拟预应力筋，如

图 3(b)所示。

连接单元的形式与预应力混凝土构件的粘结情况有关。有粘结预应力构件的混凝土与预应力筋是通过刚臂连接，刚臂长度与预应力筋的偏心距有关，刚臂两端结点的 6 个自由度均进行耦合；部分粘结或无粘结预应力构件的连接单元可采用非线性剪切的宏单元，宏单元两端结点可以相对运动，模拟预应力筋与混凝土之间的滑移。

## 五、试验介绍

本文列举出文献[4]中的两跨有粘结预应力连续梁试验情况，并将与算例的计算结果进行对比。

两跨预应力连续梁试验在重庆建筑大学常规结构试验室进行。试验装置如图 4 所示，试验梁 YL3, YL4 的尺寸与配筋如图 5 所示。梁 YL3、YL4 为矩形截面，YL3 预应力筋曲线配置，YL4 为直线配置。由于 YL4 采用梁底部通长直线预应力筋来加大次弯矩的数值，因而在梁中支座顶部范围另配 2 25 非预应力筋来承受负弯矩。

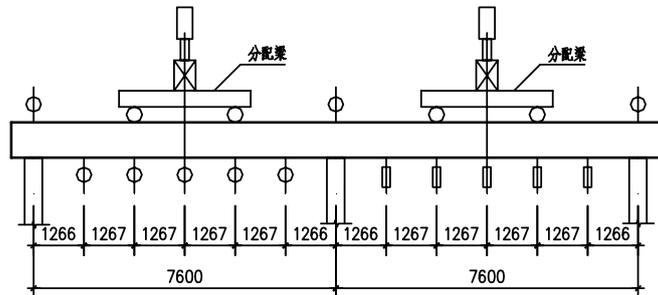


图 4 预应力混凝土梁试验装置

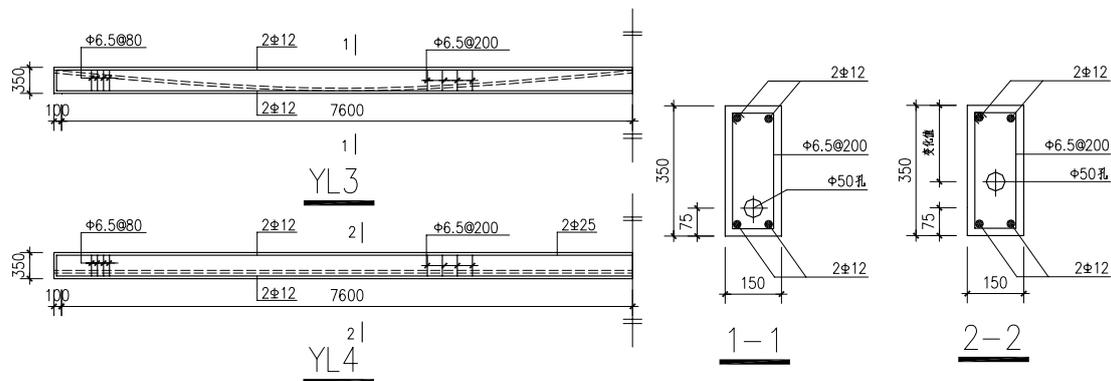


图 5 预应力混凝土梁 YL3, YL4 配筋图

混凝土材料强度指标如下：YL3 试件的混凝土的抗压强度为  $31.6 \text{ N/mm}^2$ ，抗拉强度为  $3.12 \text{ N/mm}^2$ ，弹性模量为  $3.28 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ；YL4 试件的混凝土的抗压强度为  $29.9 \text{ N/mm}^2$ ，抗拉强度为  $3.01 \text{ N/mm}^2$ ，弹性模量为  $3.24 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 。

钢筋强度指标如下：6.5 屈服强度为  $378 \text{ N/mm}^2$ ；12 屈服强度为 332；18 屈服强度为  $434 \text{ N/mm}^2$ ；25 屈服强度为  $335 \text{ N/mm}^2$ ；5 屈服强度为  $1366 \text{ N/mm}^2$ ；弹性模量均为  $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ；初始预应力取值  $350 \text{ N/mm}^2$ 。

## 六、算例分析

根据试验情况，在 OpenSees 程序中建立杆系模型，如图 6 所示。由于结构对称，模型取半结构计算，梁左端为固定铰支座，右端为固定支座。钢筋混凝土采用 nonlinear beam

column 单元，预应力筋采用 truss 单元，两者之间用 EA，EI 足够大的刚臂进行连接。

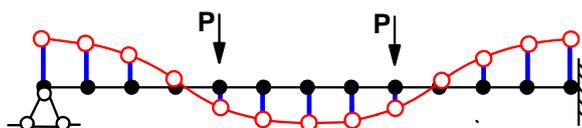


图 6 算例 YL3 有限元模型

非线性析工况分两步：第一步为力控制加载，荷载设为零，荷载步数为 10。由于预应力筋采用有初始应力的 Steel02 单元，结构在荷载为零的情况下产生初始变形。第二步为位移控制加载，控制点为跨中结点 7，设定目标位移为 70mm，荷载步数为 100 步。

非线性计算采用 Newton 迭代法，收敛准则为能量准则。

从试验和数值模拟结果可知，试验与数值分析的结果比较吻合，如图 7 所示。可见，利用基于纤维模型的非线性杆系组合单元可以较好的模拟预应力结构的弹塑性行为，并且自由度数少及计算量小，模型适宜应用于预应力结构整体分析。

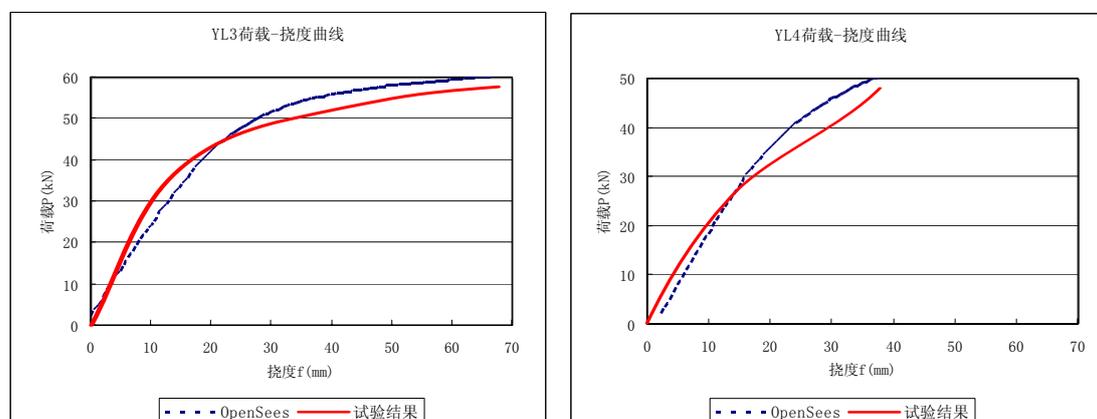


图 6 OpenSees 计算结果与试验结果对比

## 七、总结

预应力结构的弹塑性分析可以了解结构塑性挠度，裂缝开展及抗震性能等，具有重要的工程意义。本文基于开源有限元程序 OpenSees 的纤维模型，建立组合单元，对两跨预应力连续梁试验进行数值模拟。通过与试验数据进行对比，证明该组合单元能够较好地模拟预应力结构的弹塑性行为，并满足工程设计与分析的要求。此数值模型自由度数少及计算量小，可推广应用于预应力结构整体弹塑性分析。

## 参考文献

- (1) 江见鲸, 陆新征, 混凝土结构有限元分析[M].北京:清华大学出版社,2005
- (2) Zhenyu Zhu, Joint Construction And Seismic Performance Of Concrete-Filled Fiber Reinforced Polymer Tubes, North Carolina State University, 2004
- (3) Silvia Mazzoni, Frank McKenna, Michael H. Scott, Gregory L. Fenves, et al. Open System for Earthquake Engineering Simulation User Command-Language Manual, University of California, Berkeley, 2006
- (4) 王正霖, 简斌. 两跨预应力混凝土连续梁的试验分析. 土木工程学报. 1999, Vol.32(2)
- (5) 汪训流, 叶列平. 往复荷载下预应力混凝土结构的数值模拟. 工程抗震与加固改造. 2006, Vol.28 (6)