

姓名：谢昭波

学号：2016280002

基于 Opensees 与 OpenGL 开发的 约束混凝土柱推覆分析程序

1、选题背景：

1.1、推覆分析：

推复分析方法是符合水平地震力分布规律的侧立模式，采用逐步增加水平测力的静力弹塑性分析，得到结构的弹塑性承载力-位移关系全过程，并有等效单自由度体系确定强震下的目标位移，进而获得强震作用下的结构弹塑性地震响应^[1]。

推覆分析方法作为一种建筑构件弹塑性地震相应的简化近似计算方法和抗震性能评价方法已得到广泛应用。

1.2、Opensees：

OpenSees^[2]的全称是 Open System for Earthquake Engineering Simulation。Opensees 是一个开源程序，它提供的纤维单元对模拟钢筋混凝土结构是目前较通用的方法，模拟钢筋混凝土结构更为准确，但 Opensees 官网目前还没推出较好的用户界面和前后处理功能，对于没学过 Tcl/TK 编程语言的用户来说，使用起来还是存在一定的难度。

1.3、约束混凝土模型：

近二十年来，很多学者都在研究约束混凝土本构，并给出很多新的混凝土本构模型^[3-7]如：钱稼茹、MPP、UC、SR 等约束混凝土模型，却几乎没有一个有限元软件使用这些混凝土本构。

1.4、OpenGL：

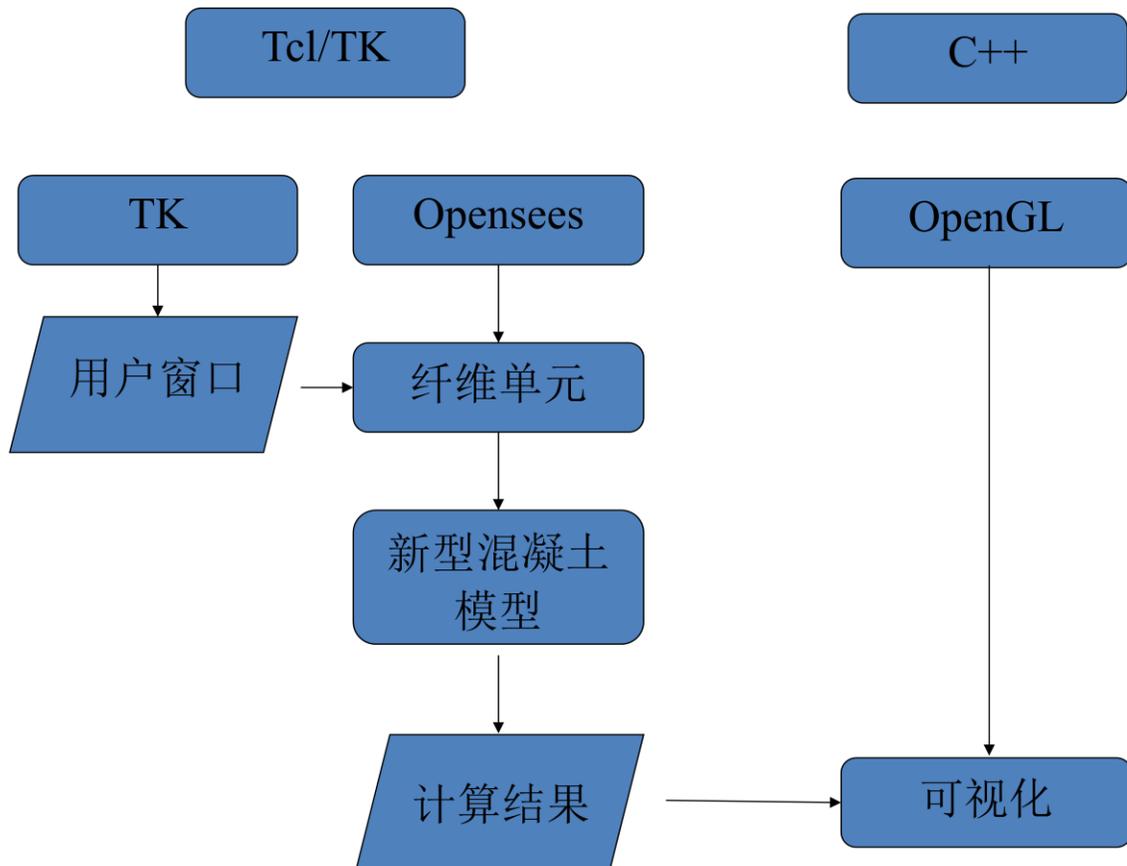
OpenGL^[8]是近几年发展起来的一个性能卓越的三维图形标准，它是在 SGI 等多家世界著名的计算机公司的倡导下，以 SGI 的 GL 三维图形库为基础制定了一个通用共享的开放式三维图形标准。

值得一提的是，随着 Microsoft 公司在 Windows NT 和 windows 95 中提供了 OpenGL 标准及 OpenGL 三维图形加速卡，OpenGL 将在微机中有广泛地应用，同时也为广大用户提供了在微机上使用以前只能在高性能图形工作站上运行的各种软件的机会。系统所采用的即为 OpenGL 图形平台。

2. 研究内容：

研究主要内容是编写一个能自定义约束混凝土模型、用户界面简洁以及可视化的约束混凝土柱推覆分析程序。这次研究主要使用了 Opensees 本身提供的纤维梁模型，并输入近年来学者所发表的约束混凝土模型，来进行约束混凝土柱推覆分析。使用纤维梁单元的单元数远小于实体单元。而结果接近于实验值，但对于长细比过大或过小的柱，纤维模型结果不准确或误差较大，而且纤维梁不能计算出混凝土的破坏机理以及其它细节。

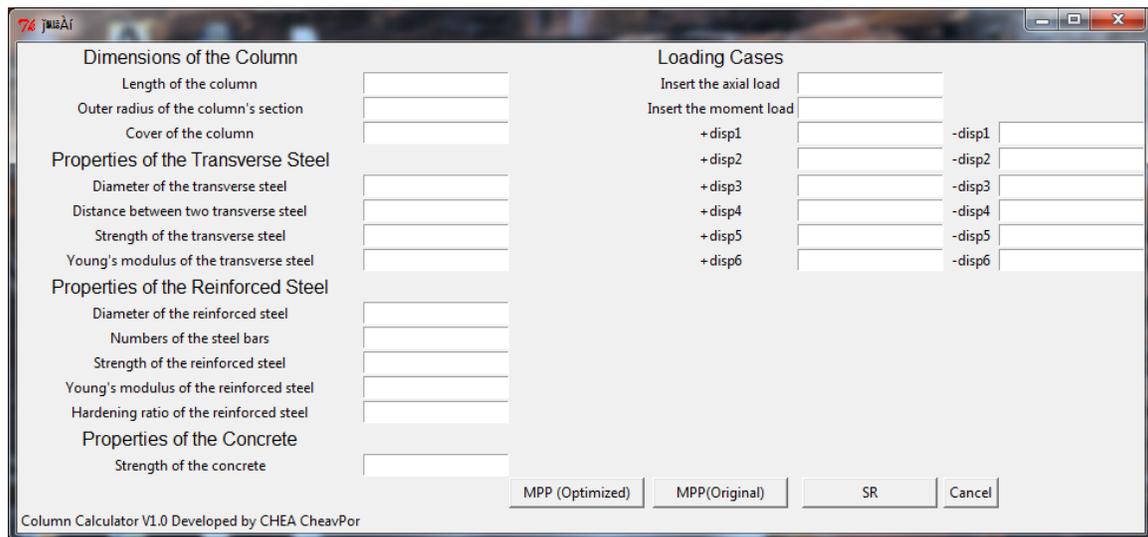
本次研究主要用到两种编程语言（TK/Tcl 语言和 C++ 语言），其技术路线如下：



2.1、用户窗口模块：

用户窗口模块使用了 Tcl/Tk 语言中的 Tk 命令，简洁易用。用户可以在上面输入柱的尺寸、混凝土属性、纵筋与箍筋属性、以及加载制度等信息。本次实验使用了 Tckit 打包以上窗口脚本文件成 exe 文件。

用户界面可以选择调用不同混凝土模型进行计算。用户界面可以直接调用 Opensees 的脚本文件进行计算。同时，在用户界面所输入的信息将会保存到硬盘上供后处理建模时使用。

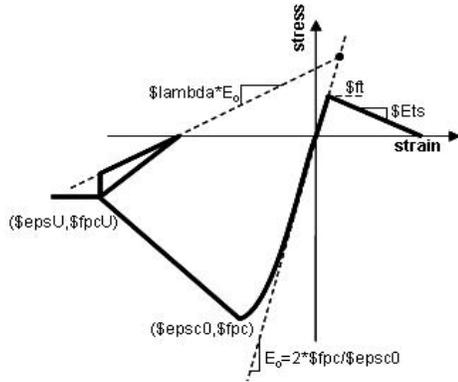


2.2、计算模块：

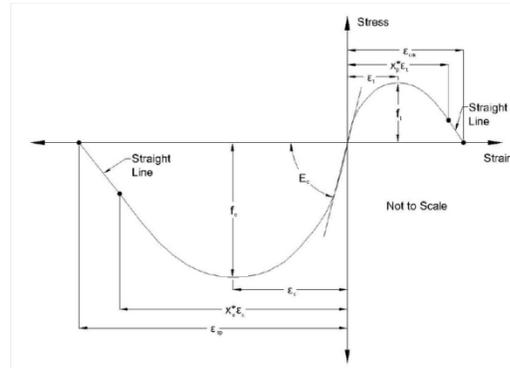
计算模块采用 Opensees 作为计算平台，选用纤维梁单元进行计算。

SR 和 MPP (Original) 材料分别采用了 Opensees 自带的 Concrete02 和 Steel01。极限强度和衰减至极限强度的 50%以及对应的应变值分别根据 SR 和 MPP 给出的公式进行计算得出。

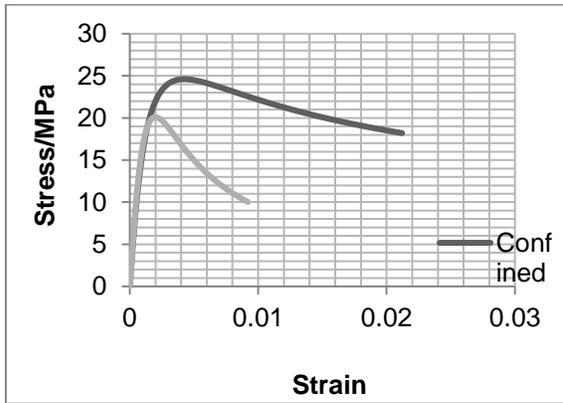
MPP (Optimized) 直接采用 Opensees 里自带的 Mander 模型 (Concrete07 Chang & Mander 1994)，这个模型对之前 MPP 模型的一些不合理处进行改善。



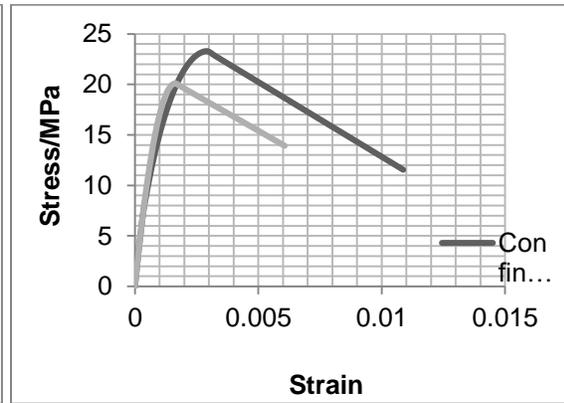
Concrete02



Concrete07

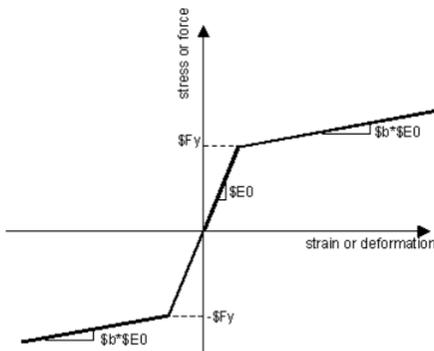


MPP 模型

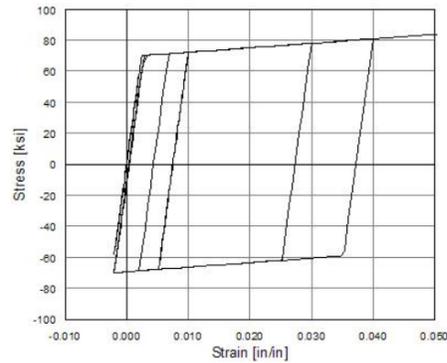


SR 模型

纵向钢筋采用了 Steel01 本构模型。箍筋的效应已考虑在约束混凝土模型里，所以没有单独的建立箍筋模型。



Steel01 Material -- Hysteretic Behavior of Model w/o Isotropic Hardening



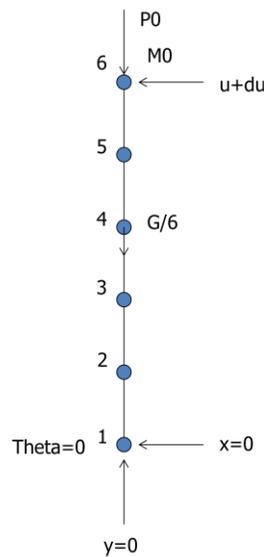
Steel01 Material -- Hysteretic Behavior of Model with Isotropic Hardening in Compression

Steel01 单轴本构和滞回本构

在计算过程会使用了一些迭代方法和条件、编号法、和几何变形计算等方法如下：

```
#Geometric transformation
  geomTransf PDelta 1
#Analysis method
  constraints Penalty 1e20 1e20;
  numberer RCM;
  system BandGeneral ;
  test NormDisplncr 1.0e-4 100 1;
  algorithm KrylovNewton;
  integrator LoadControl 0.1;
  analysis Static;
```

分析对象模型是一个 6 节点的模型，5 个纤维梁单元。在 6 节点处施加轴力和初始弯矩。同时第 6 个节点施加水平位移。柱的重力将分布到每个节点上。限制 1 节点的所有自由度，1 节点所有自由度的位移与转角为 0.

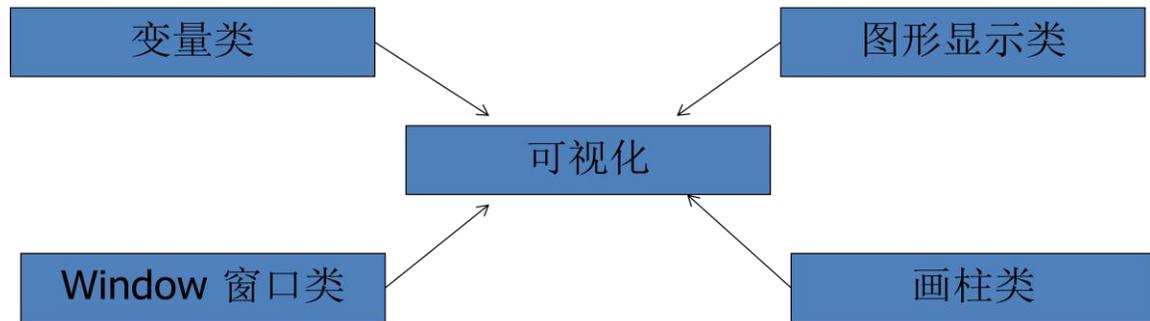


柱模型示意图

2.3、可视化模块：

前处理所存储的柱尺寸以及钢筋信息以及 OpenSees 计算结果的每个节点数据将被提取并导入 OpenGL 进行图形处理。

在可视化这部分一共创建了 4 个类如图所示：



其中的 window 窗口类可以采用 VC2012 或其它版本自带的向导。这样可以大大减少建模时间。

将前处理所输入的柱尺寸信息以及计算结果数据导入变量类，变量类是用来存储生成可视化程序需要的所有变量。

画柱类是用来画出每个循环的柱体包括：柱体的形状、变形、颜色等。画柱类将从变量类提出每一时刻柱体的变形和对应的应力。画柱类里有画混凝土函数、画钢筋函数、画柱顶函数等多个函数。

图形显示类是用来把画好的柱显示到屏幕上。其中可以调柱体显示的视角，光源位置，深度测试等其它功能。

调柱体显示的视角、投影和窗口：

```
glViewport(0,-100,width,height);  
glMatrixMode(GL_PROJECTION);  
glLoadIdentity();  
gluPerspective(60.0f, (GLfloat)width/(GLfloat)height,1.0f,10000.0f);  
glMatrixMode(GL_MODELVIEW);  
glLoadIdentity();
```

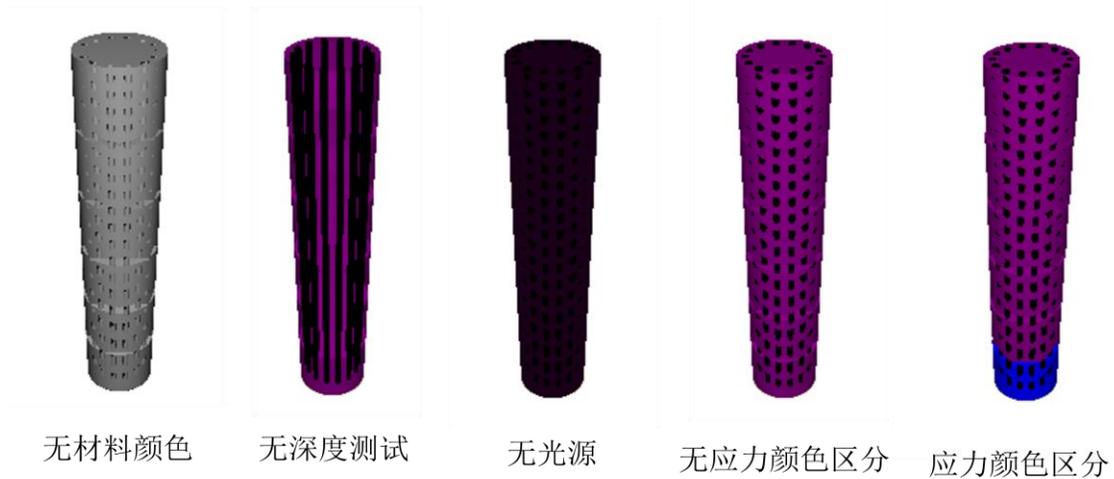
调柱的光源和光源位置：

```
GLfloat ambientLight[]={0.2f,0.2f,0.2f,1.0f};  
GLfloat diffuseLight[]={0.8f,0.8f,0.8f,1.0f};  
GLfloat specularLight[]={1.0f,1.0f,1.0f,1.0f};  
GLfloat lightPos[]={0.0f,300.0f,120.0f,1.0f};  
GLfloat spotLightPos[]={0.0f,0.0f,300.0f,1.0f};  
GLfloat spotDir[]={0.0f,0.0f,-1.0f};  
glEnable(GL_LIGHTING);  
glLightfv(GL_LIGHT0,GL_AMBIENT,ambientLight);  
glLightfv(GL_LIGHT0,GL_DIFFUSE,diffuseLight);  
glLightfv(GL_LIGHT0,GL_SPECULAR,specularLight);
```

```
glLightfv(GL_LIGHT0, GL_POSITION, lightPos);  
glEnable(GL_LIGHT0);
```

启用深度测试、使点线面光滑、材料颜色等功能：

```
glEnable(GL_DEPTH_TEST);  
glEnable(GL_BLEND);  
glEnable(GL_POINT_SMOOTH);  
glEnable(GL_LINE_SMOOTH);  
glEnable(GL_POLYGON_SMOOTH);  
glEnable(GL_COLOR_MATERIAL);
```



3、未完成工作：

前处理模块工作：

- 在用户界面显示柱模型以便检查模型。
- 添加其他形状的柱体不限于圆柱。

计算模块工作：

- 添加更多的混凝土和钢筋模型。
- 添加其它迭代方法，若一种迭代方法不收敛可自动调用其它方法。

后处理模块工作：

- 显示位移-力的数据和曲线。

- 可以用鼠标和键盘进行调换视角。

4、参考资料：

- [1] 陆新征, 张万开, 柳国环. 基于推覆分析的 RC 框架地震倒塌易损性预测[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(4):1-6.
- [2] 地震工程模拟开放系统 The Open System for Earthquake Engineering Simulation
<http://opensees.berkeley.edu/>
- [3] 钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(10):1369-1373.
- [4] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8):1804-1826.
- [5] Saatcioglu M, Razvi S R. Strength and Ductility of Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(6):1590-1607.
- [6] Légeron F, Paultre P. Uniaxial Confinement Model for Normal- and High-Strength Concrete Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2):241-252.
- [7] Salamat A H, Razvi S R, Saatcioglu M. Confined Columns under Eccentric Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(11):1547-1556.
- [8] Shreiner D, Sellers G, Kessenich J M, et al. OpenGL Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL, Version 4.3, 8th Edition[J].
- [9] "OpenSees Navigator," Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA. Web address: <http://peer.berkeley.edu/OpenSeesNavigator/>. Accessed: June. 22, 2011.
- [10] 陈学伟 林哲. 结构弹塑性分析程序 OPENSEES 原理与实例(附光盘)[M]. 建筑工业出版社, 2014.