

持续引领AEC行业创新 致力服务中国更多用户

2009-03 ISSUE. 1

北京市海淀区首体南路9号主语国际2号楼 100048

CKS
软件
电子期刊
Electron Magazine

总第3期

体验SAFE V12中文版增强特性

系列技术专题讲座：Pushover分析在结构抗震计算中的应用

岩土工程数值计算分析技术高级研讨班（第一期）

ETABS荣获全国优秀工程勘察设计行业奖

CUC

首届结构软件全国用户大会完美闭幕

牛年伊始，金土木人娱乐竞技

目 录

公司动态

SAFE V12隆重发布	2
“Pushover分析在结构抗震计算中的应用”专题研讨班	6
岩土工程数值计算分析技术高级研讨班 (第一期)	7
CUC'08金土木首届结构软件全国用户大会完美闭幕	8
ETABS中文版荣获全国优秀工程勘察设计行业奖计算机软件二等奖	10
2008年冬华北地区培训班圆满结束	10
ArchiCAD 全国巡回免费培训	10
牛年伊始,金土木人娱乐竞技	10

产品介绍

SAP2000 V12 桥梁特性	11
Plaxis 岩土有限元分析系列软件	13

论文著作

SAFE V12 — 楼板及基础底板系统分析设计的完美解决方案	14
基于纤维模型的超高层钢筋混凝土结构弹塑性时程分析及工程应用	17

常见问题

	21
--	----

回顾2008

	24
--	----

文章征集

	25
--	----

编 辑: 张 伟

美 术: 张翠莲

址 址: 北京市海淀区首体南路9号主语国际2号楼
 客服热线: 010-88383866-401
 技术支持: 010-88383866-200
 传 真: 010-88381056
 电 邮: sales@bjcks.com (销售)
 support@bjcks.com (技术)
 网 址: www.bjcks.com www.archicad.net.cn
 邮 编: 100048

基于纤维模型的超高层钢筋混凝土结构弹塑性时程分析及工程应用

韩小雷^{1,2)} 陈学伟¹⁾ 林生逸¹⁾ 何伟球¹⁾ 郑宜¹⁾ 吴培烽¹⁾ 毛贵牛¹⁾

(1. 华南理工大学高层建筑结构研究所 广州 510640; 2. 华南理工大学

(2. 亚热带建筑科学国家重点实验室 广州 510640)

摘要 基于纤维模型理论利用PERFORM-3D软件实现了复杂超高层建筑结构的弹塑性时程分析并进行构件变形性能评估。针对PERFORM-3D建立高层结构模型的复杂性,开发了PERFORM-3D前处理程序ETP使之能够方便地准确地建立弹塑性模型。分析表明,基于纤维模型的整体结构弹塑性分析法是一种高效可行的方法,不但宏观上得到结构整体响应,而且微观上得到构件内力及变形和纤维的应力及应变。通过工程实例,得到整体结构响应、构件的变形及结构能量耗散情况,研究按我国现行规范进行设计的超高层混凝土结构在罕遇地震作用下的非线性变形及受力特点。

关键词 弹塑性时程分析 PERFORM-3D 超高层结构基于性能阻尼

1、前言

基于性能的抗震设计方法是抗震设计的一个新的发展方向,它的特点是使抗震设计从宏观定性的目标向具体量化的多重目标过渡。基于性能的抗震设计的关键在于选取正确的弹塑性分析方法。弹塑性时程分析法是目前最可靠的方法之一。该方法逐渐被工程界所应用,如文献[1]采用ABAQUS进行弹塑性分析,文献[2]采用LS-DYNA进行弹塑性分析等。上述方法均采用通用有限元软件对复杂结构进行分析,该方法已经逐步完善但仍存在以下不足:不能宏观得到构件的变形与直接进行性能评估;不能直接得到结构能量耗散时程曲线等。针对上述问题, Powell教授[3]在DRAIN-3DX的基础上开发了基于纤维单元的基于性能的抗震分析软件PERFORM-3D。本文采用PERFORM-3D软件对一复杂的剪力墙超高层钢筋混凝土结构进行弹塑性时程分析并进行性能评估。

2、PERFORM-3D单元模型

2.1 梁柱单元模型

PERFORM-3D提供多种梁柱单元模型,包括塑性铰模型及纤维模型。本文工程实例梁柱均采用纤维模型。纤维模型梁柱单元有以下特点:基于平截面假定,将梁柱的内力-变形关系转化成混凝土与钢筋的应力-应变关系;铁木辛柯梁单元,可考虑剪切变形;自由的纤维划分输入方式,可以输入约束混凝土及非约束混凝土纤维,可以输入复杂组合截面,梁柱纤维截面如图1所示:

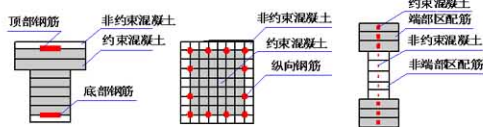


图1 梁、柱及剪力墙纤维示意图

PERFORM-3D的梁柱构件提供构件的截面组装功能,这个功能可以使不增加自由度的情况下增加梁柱单元延长度方向的积分点数,提高计算精度与效率。基于不同的构件组装,梁柱单元分为两种模型,端部塑性区模型及多段塑性区模型,如图2所示。模型合理的单元划分,采用端部塑性区模型可保证精度的前提下节约计算时间。对于受剪力较大的梁构件,在截面组装时可以加入剪切铰模拟梁的非线性剪切变形及剪切破坏。

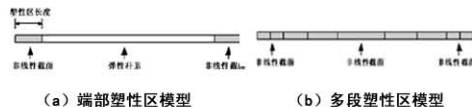


图2 梁柱构件组装示意图

2.2 分层剪力墙模型

PERFORM-3D中采用宏观分层单元来模拟剪力墙构件[4],如图3所示,一维纤维单元模拟剪力墙的平面内压弯效应,非线性或线性剪切本构模拟剪力墙的平面内剪切效应,平面外弯曲、平面外剪切及扭转效应均采用弹性本构模拟。剪力墙的特点是在纤维截

面定义时可以采用约束混凝土与非约束混凝土纤维来模拟端部约束区与非端部约束区。剪力墙与梁的刚接是采用刚臂连接,如图4所示。

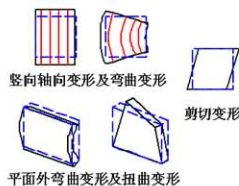


图3 剪力墙分层单元示意

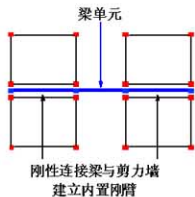


图4 剪力墙内置刚臂

3、材料本构模型

3.1 钢材本构模型

PERFORM-3D的钢材本构分为屈曲钢材本构及非屈曲钢材本构。钢筋一般采用非屈曲钢材本构[5],因为结构的延性设计主要是建立在结构钢筋经历反复的大塑性应变依然能够维持较高的应力水平基础上的,并要求钢筋通常不会发生拉断等脆性破坏。本文采用受力钢筋主要为HRB400,钢筋本构取值如图5所示。

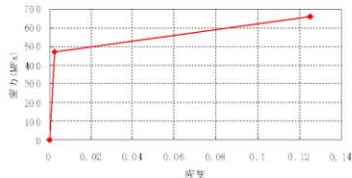


图5 钢筋应力-应变关系

3.2 混凝土本构模型

目前在宏观模型中最为常用的约束混凝土的单轴受压应力应变关系是Mander应力应变关系[6]。该模型的混凝土应力应变关系由5个参数确定,与截面形状和箍筋的配置有关。根据Mander模型的公式、混凝土材料强度平均值及弹性模量值,可计算得到本工程所采用不同箍筋约束情况下的混凝土材料本构曲线,如图6所示。

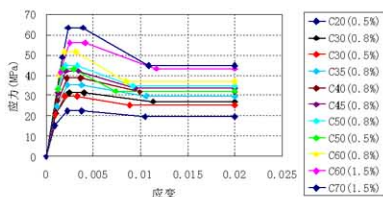


图6 不同体积配箍率下的约束混凝土应力-应变关系

3.3 恢复力模型

在循环荷载的作用下,非线性构件耗散能量,耗散能量的大小为滞回环所包围的面积,因此滞回环的大小和形状将很大程度上影响结构的响应。PERFORM-3D中能量退化参数可以人为的指定,它将取决于最大变形,PERFORM-3D自动调整卸载-加载刚度来给出要求的能量退化,能量退化系数一般通过实验或数值模拟得出。

3.4 阻尼

弹性结构的耗散能量通常是通过各种机械能,通常在分析中被模拟为粘滞阻尼;如果结构屈服,它的能量将会更直接的通过非线性行为耗散,构件的耗散能量通过滞回环的面积来衡量,滞回耗散的能量并不能完全涵盖结构的耗能,结构仍然有大量的弹性能量耗散,弹性能量的耗散仍然模拟为粘滞阻尼,在动力弹塑性时程分析中结构的粘滞阻尼采用Rayleigh阻尼来模拟。文献[7]指出塑性铰模型与纤维模型在阻尼中的区别:塑性铰模型在初始线弹性段不存在附加阻尼,塑性铰形成后通过滞回环才产生附加阻尼;基于多折线的材料本构的纤维模型在构件变形的全过程,随着纤维的开裂,屈服及破坏,附加阻尼自动计算。后者在阻尼的数值模拟中定义后者优于前者。

3.5 时程积分算法

动力平衡方程 $M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = R$ 经过一个时间步长 Δt , 动力平衡方程为: $M\Delta\ddot{u} + C\Delta\dot{u} + K\Delta u = \Delta R$, 此方程可以通过 Step-by-step 方法求解,方程中具有三个未知量 $(\Delta\ddot{u}, \Delta\dot{u}, \Delta u)$, 因此需要对方程求解过程进行假设,并且方程解为近似的。当然目前有多种 Step-by-step 的求解方法,PERFORM-3D 采用 Constant Average Acceleration (CAA) 方法。

4、工程实例

4.1 工程概况

基于PERFORM-3D软件,对某超高层结构进行7度罕遇地震下的动力弹塑性分析[8]。结构采用现浇钢筋混凝土部分框支剪力墙结构,其中中部核心筒剪力墙及四周角部剪力墙直接落地,部分剪力墙在转换层通过梁式转换结构转换为框支柱。满跨转换梁采用普通钢筋混凝土梁,因塔楼剪力墙窗洞而形成的非满跨转换梁采用型钢混凝土梁。结构高度182.5m,结构平面布置如图7所示。

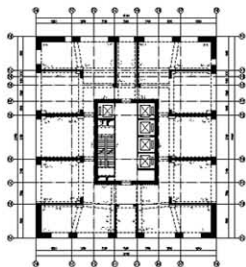


图7 结构平面布置图

4.2 选取地震波

弹塑性时程分析选取了2组人工波及5组天然波。建立结构ETABS弹性模型,采用20组双向天然波样本进行试算,将40个地震工况的基底剪力与反应谱的基底剪力进行对比,挑选出满足我国建筑抗震设计规范(GB50011-2001)的要求,即单个时程分析计算基底剪力结果应大于反应谱法结果的65%,时程分析的基底剪力结果的平均值应大于反应谱法结果的80%。各地震波主波反应谱曲线与规范反应谱曲线对比如图8所示。

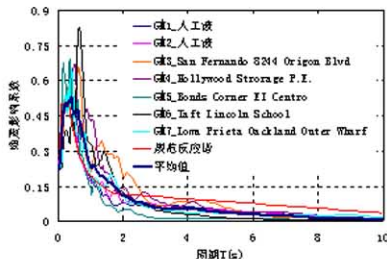


图8 时程分析选用地震波的反应谱与规范反应谱对比图

4.3 整体模型的建立

PERFORM-3D软件虽然分析功能强大,但是从科研性软件过渡而来,前处理输入模型非常烦琐,例如建立纤维截面,需要手动输入各纤维束的材料编号、面积、截面相对坐标值等。面向构件数量及带配筋信息的截面的数量非常巨大的复杂高层结构,运用该建模方法是非常困难的。因此开发了本文具有输入配筋的图形界面的PERFORM-3D软件前处理程序ETP(ETABS TO PERFORM-3D),能够导入结构设计软件ETABS模型的几何信息、荷载信息、结点质量、截面信息、刚性隔板信息及支座条件。前处理程序界面如图9所示。这样既可以提高PERFORM-3D非线性模型的建模速度与准确性,又可以保证结构计算模型的一致性。结构配筋信息采用PKPM计算的配筋量结合抗震规范构造要求得到的初步配筋结果,再通过前处

理的图形界面进行细化修改。前处理程序根据构件截面属性、配筋、构件长度自动归并纤维截面类型及构件组装类型,减小非线性模型的复杂性,提高计算效率。结构采用刚性楼板假设及楼层集中质量源。

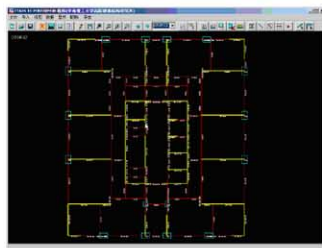


图9 PERFORM-3D前处理程序ETP界面

结构的PERFORM-3D模型的总结点数7453,梁纤维截面数为422,柱纤维截面数为50,剪力墙纤维截面数为590,梁柱构件类型数为456,剪力墙构件类型数为590,梁单元数为9021,柱单元数为956,剪力墙单元数为4171。

4.4 分析设置

结构弹塑性分析之前进行竖向荷载标准组合工况分析。竖向荷载采用ETABS导入的竖向荷载施加。由于建立的是非线性模型,竖向荷载分析需要采用荷载控制的静力弹塑性分析。该分析结果作为时程分析的初始状态并在时程分析中考虑P- Δ 效应。

结构阻尼采用瑞利阻尼,第一及第二振型的阻尼比为0.05。计算步长为0.02s,总时间为20s,分析子步为200步,分7组地震波共14个工况进行时程分析。

5、计算结果

5.1 结构的整体响应

以GM3X地震波工况为例,结构响应的整体变形及梁构件变形全过程如图10所示。

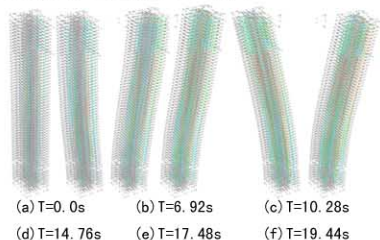


图10 GM3X工况下结构变形响应全过程

为了比较结构的塑性变形,建立弹性模型(采用ETABS分析)与弹塑性模型在同样的地震作用下的响应进行对比,结构顶部位移与基底倾覆弯矩如图11

12所示。从图中可见,在x主向地震作用下的前7秒,弹塑性分析的顶点位移时程与倾覆弯矩曲线形状与弹性分析基本一致,表明结构处于弹性状态;地震作用7秒以后,弹塑性分析的顶点位移曲线与倾覆弯矩曲线与弹性分析的曲线分离,表明结构发生明显的弹塑性损伤。

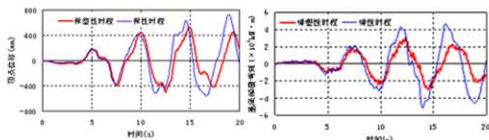


图 11 GM3X工况下结构顶点位移时程图

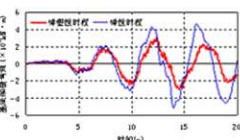


图 12 GM3X工况下结构基底倾覆弯矩时程图

随着时间的增加,两者的差距逐渐增加,弹性模型的顶点位移为726mm,弹塑性模型的顶点位移为538mm,弹性模型的倾覆弯矩为 $5.15 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}$,弹塑性模型的倾覆弯矩为 $3.12 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

从宏观变形及内力的响应对比来看,结构在大震情况下,并没有进入很强的非线性阶段。PERFORM-3D自动计算结构能量耗散情况,如图13所示。能量耗散图也同样证明结构在7秒时逐渐进入弹塑性,其非线性能量与模态耗能的比例可知,结构处于弱非线性阶段。

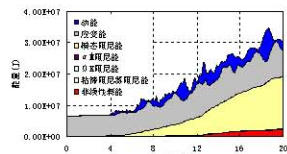


图 13 GM3X工况下结构能量耗散时程图

其它地震工况的分析结果不再详细列出,图14、15为7个地震波两个方向作用下的结构整体响应。由图可见,结构满足规范规定的弹塑性分析的层间位移角限值1/100。

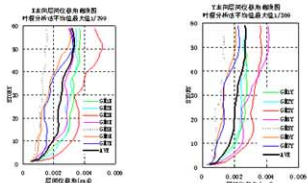


图 14 各地震工况下结构层间位移角图

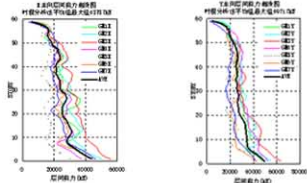


图 15 各地震波工况下结构楼层层间剪力图

5.2 结构的构件响应

根据美国规程ASCE-41[9]对于基于性能的抗震设计方法关于构件变形性能指标限值的规定,参考本工程构件的配筋构造及内力情况,得到性能指标限值如表所示。

梁、柱及剪力墙构件转角性能指标 (rad) 表1

构件	IO	LS	CP
柱	底部加强区	0.003	0.01
	非底部加强区	0.005	0.012
梁	抗弯控制	0.01	0.02
	抗剪控制	0.005	0.01
剪力墙	0.003	0.005	0.009

以GM3X为例,梁构件、柱构件与剪力墙构件的变形性能如图所示。从图中可见,构件变形响应与整体响应一样表明结构处于弱非线性状态。梁构件小部分处于LS及CP状态,柱及剪力墙大部分构件处于IO状态。构件的变形满足性能指标的要求。

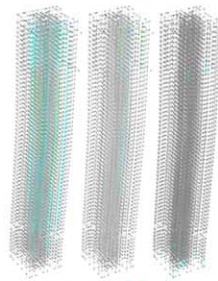


图 16 GM3X地震波工况下构件变形性能图

结构在大震作用下仍处于弱非线性状态的原因是建筑结构位于海边城市,其设计风压为 0.90 kN/m^2 ,结构的配筋情况由风荷载控制,其配筋量可实现中震不屈服。因此,结构在7度烈度区的罕遇地震作用下,不出现很明显的非线性变形,处于弱非线性阶段。

6、结语

基于性能的设计方法的关键在于结构弹塑性分析方法,而基于纤维模型的弹塑性时程分析方法是目前最可靠且效率高的方法之一。PERFORM-3D软件能够建立结构弹塑性模型,完成基于性能的抗震设计;

PERFORM-3D的科研性比较强,输入实际工程结构比较烦琐,通过对其进行ETABS导入及图形界面输入配筋的二次开发,使其能运用于实际工程当中。

PERFORM-3D能提供大量的分析结果,包括整体响应,构件响应及能量耗散情况。其中,构件的转角变形测量结果与构件变形性能指标相对应,可用于评估构件的变形性能及工作状态。