

基于纤维模型的超高层钢筋混凝土结构弹塑性时程分析

韩小雷^{1,2}, 陈学伟¹, 林生逸¹, 何伟球¹, 郑 宜¹, 吴培峰¹, 毛贵牛¹

(1 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510640;

2 华南理工大学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, 开发了其前处理程序 ETP, 使之能够方便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高效可行, 不但宏观上可得到结构整体响应, 而且微观上可得到构件的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, 可用于研究按我国现行规范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

Elasto-plastic time-history analysis of super high-rise RC structure based on fiber model

Han Xiaolei^{1,2}, Chen Xuwei¹, Lin Shengyi¹, He Weiqiu¹, Jack Cheang¹, Wu Peifeng¹, Mao Guiniu¹

(1 School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2 Key Laboratory of Subtropic Architecture Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Elasto-plastic time-history analysis and component deformation performance evaluation of complex super high-rise building structure can be realized by the program PERFORM-3D based on the theory of fiber model. In order to reduce the complexity of tall building structure modeling, a pre-processing program named ETP was proposed. The research showed that elasto-plastic analysis of the whole structure based on fiber model was an efficient and successful method. In macro sense, the response of the whole structure can be gained. And in micro sense, component internal force and deformation as well as the stress and strain of the fiber can be gained. Combining with an engineering example, the results of the whole structure response, component deformation and energy dissipation can be used for the research of the elasto-plastic deformation and stress characteristics of the super high-rise building structure designed according to current codes under rare earthquake.

Keywords: elasto-plastic time-history analysis; PERFORM-3D; super high-rise building structure; performance-based

0 前言

基于性能的抗震设计方法是抗震设计的一个新发展方向, 其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, 其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[1]采用 ABAQUS 软件, 文[2]采用 LS-DYNA 软件, 对复杂结构进行弹塑性分析等。该方法已逐步完善, 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, 文[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。文中采用 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。

1 PERFORM-3D 单元模型

1.1 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, 文中梁柱均采用纤维模型。纤维

模型梁柱单元有以下特点: 1) 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; 2) 铁木辛柯梁单元, 可考虑剪切变形; 3) 自由的纤维划分输入方式, 可以输入约束及非约束混凝土纤维, 也可以输入复杂组合截面。梁柱纤维截面见图 1。

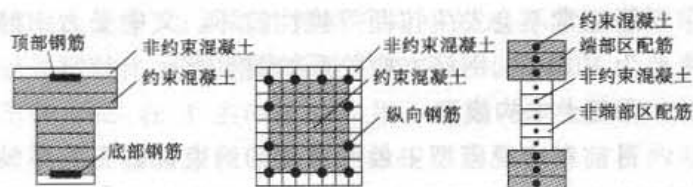


图 1 梁、柱及剪力墙纤维示意图

PERFORM-3D 的梁柱构件提供构件的截面组装功能, 这个功能可以在不增加自由度的情况下增加梁柱单元沿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。并采用了

端部塑性区模型,可在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。

1.2 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],见图 3。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。剪力墙与梁采用刚臂连接,见图 4。

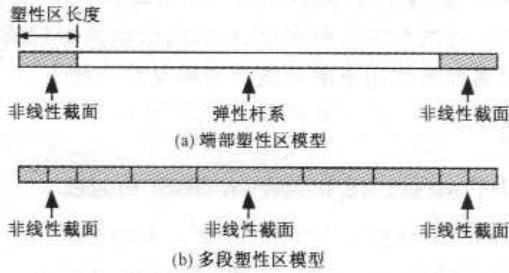


图 2 梁柱构件组装示意图

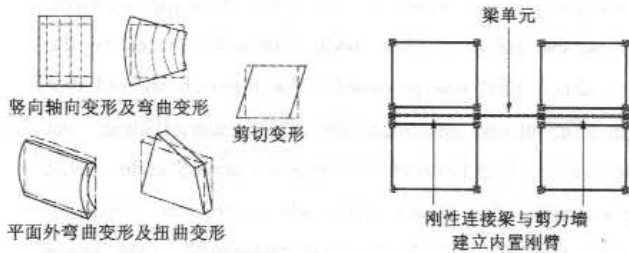


图 3 剪力墙分层单元示意

图 4 剪力墙内置刚臂

2 材料本构模型

2.1 钢材本构模型

PERFORM-3D 的钢材本构关系分为屈曲及非屈曲两种。钢筋一般采用非屈曲钢材本构关系^[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。文中受力钢筋主要为 HRB400,钢筋本构关系如图 5 所示。

2.2 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关系曲线,如图 6 所示,图中括号内数值为体积配箍率。

2.3 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

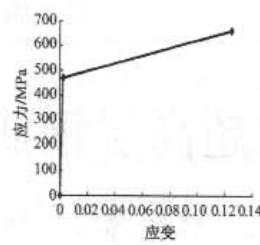


图 5 钢筋应力-应变关系

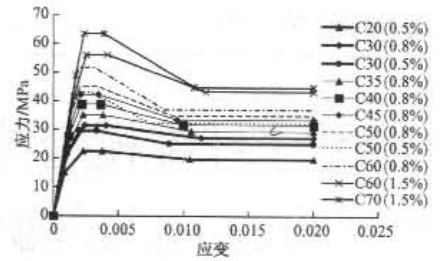


图 6 不同体积配箍率下的约束混凝土应力-应变关系

小和形状将在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指定,它将取决于最大变形,如图 7 所示。PERFORM-3D 自动调整卸载-加载刚度来给出要求的能量退化,能量退化系数等于退化后滞回环的面积除以无退化的滞回环的面积。能量退化系数一般通过试验或数值模拟得出。根据 Mander 模型的卸载刚度退化规律定义出混凝土材料各强度区段的能量退化系数,如图 8 所示。钢筋材料在各强度区段的能量退化系数均为 1.0。

3 工程实例

3.1 工程概况

某超高层塔楼结构为地面以上两栋基本相同的 58 层超高层商住楼。总高度为 185.2m,平面尺寸为 26.1m × 28.9m,高宽比为 7.1;采用现浇钢筋混凝土部分框支剪力墙结构,其中中部闭合式核心筒剪力墙及四周角部剪力墙直接落地,部分剪力墙在首层通过梁式转换结构直接支承于框支柱上。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。

底层筒体剪力墙最大厚度为 600mm,沿高度逐步减少至 450mm;四周剪力墙墙厚 800mm,沿高度方向厚度不改变;框支柱的最大截面为 1 400 × 1 200,型钢转换梁尺寸为 600 × 1 000,混凝土转换梁尺寸为 900 × 1 000。竖向构件的混凝土等级分八级逐步变换,其中底层(框支层)墙柱混凝土等级为 C70,层 38 以上墙柱混凝土等级为 C30。结构平面布置如图 9 所示。

3.2 选取地震波

基于 PERFORM-3D 软件,对该工程进行 7 度罕遇

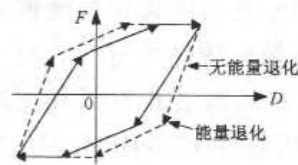


图 7 能量退化滞回环示意图

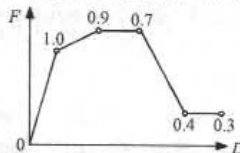


图 8 混凝土退化系数

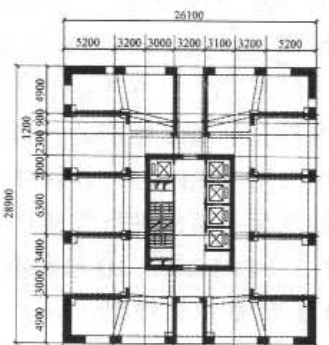


图 9 结构平面布置图

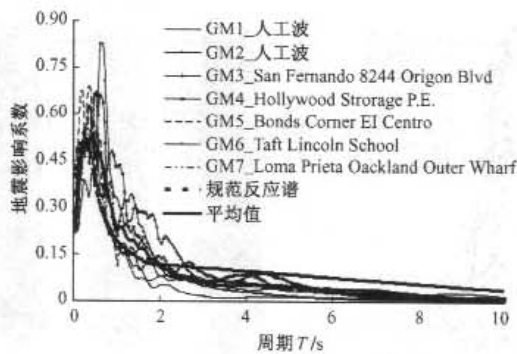


图 10 时程分析选用地震波的反应谱与规范反应谱对比图

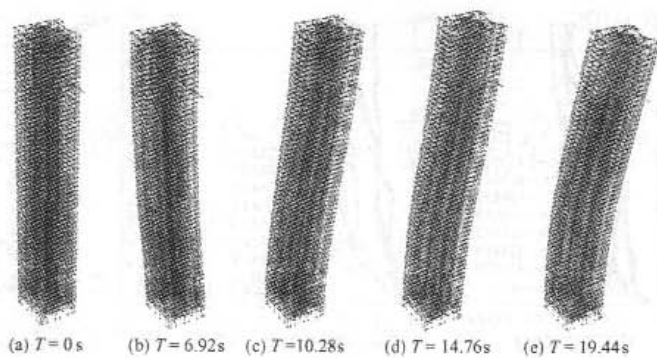


图 11 GM3X 工况下结构变形响应全过程

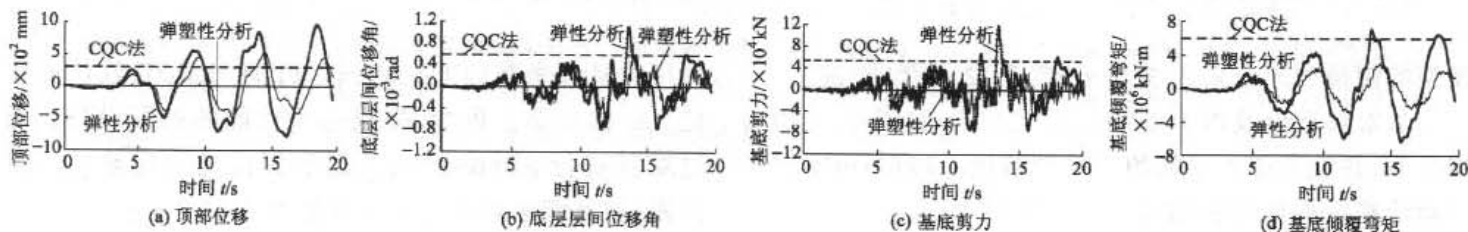


图 12 GM3X 工况与 CQC 法计算得到结构响应时程图

地震下的动力弹塑性分析^[8],分析时选取了 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进行对比。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)(简称抗震规范)要求的,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%,挑选出满足要求的地震工况。各地震波主波反应谱曲线与规范反应谱曲线对比见图 10。

3.3 整体模型的建立

PERFORM-3D 软件前处理输入模型非常繁琐,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。对于构件数量及带配筋信息的截面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、节点质量、截面信息、刚性隔板信息及支座条件。

运用 ETP 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。

结构的 PERFORM-3D 模型的总节点数为 7 453,梁、柱及剪力墙纤维截面数分别为 422, 50, 590,梁、柱、剪

力墙构件类型数为 456,590,梁柱及剪力墙单元数分别为 9 021, 956, 4 171。

3.4 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 $P-\Delta$ 效应。

结构阻尼采用瑞利阻尼,第 1,2 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。

4 计算结果

4.1 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 11 所示。

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,结构整体反应时程曲线如图 12 所示。从图中可见,在 X 主向地震作用下的前 7s,弹塑性分析的顶点位移时程和倾覆弯矩曲线形状与弹性分析的基本一致,表明结构处于弹性状态;地震作用 7s 以后,弹塑性分析的顶点位移曲线、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。

随着时间的增加,两者的差距逐渐增大,弹性、弹塑性模型的顶点位移分别为 726, 538mm,弹性、弹塑性

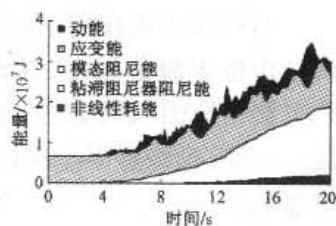


图 13 GM3X 工况下结构能量耗散时程图

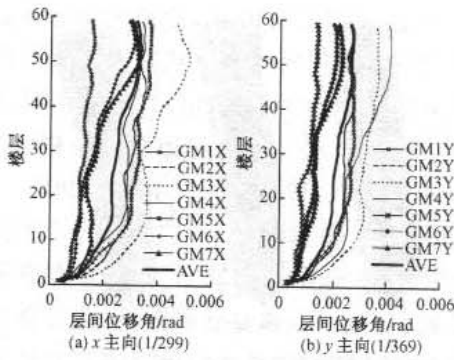


图 14 各地震波工况下结构层间位移角

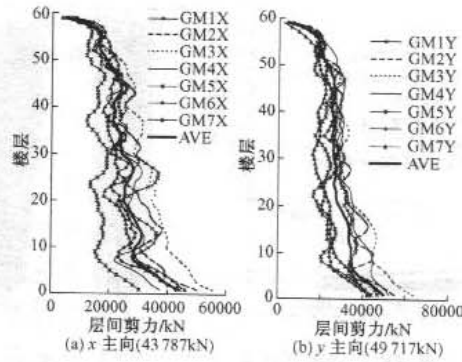


图 15 各地震波工况下结构楼层层间剪力

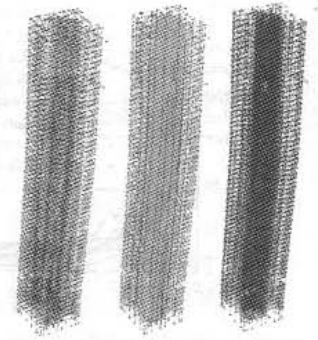


图 16 构件变形性能图

模型的倾覆弯矩分别为 5.15×10^6 , 3.12×10^6 kN·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。图 13 也同样证明结构在 7s 时逐渐进入弹塑性,由其非线性耗能与模态阻尼能的比例可知,结构处于弱非线性阶段。

图 14,15 为 7 条地震波两个方向作用下的结构整体响应,括号内数值为时程分析法的平均值最大值。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。

4.2 结构的构件响应

按美国规程^[9]对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,参考该工程构件的配筋构造及内力情况,得到性能指标限值见表 1。

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	0.012
	非底部加强区	0.005	0.012	0.016
梁	抗弯控制	0.01	0.02	0.025
	抗剪控制	0.005	0.01	0.02
剪力墙		0.003	0.006	0.009

以 GM3X 地震波工况为例,梁、柱与剪力墙构件的变形性能如图 16 所示。从图可见,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(生命安全)及 CP(接近倒塌)状态,柱及剪力墙大部分构件处于 IO(基本运行)状态。构件的变形满足性能指标的要求。

结构在大震作用下仍处于弱非线性状态的原因是该结构位于海边城市,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。

5 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。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。

基于纤维模型的弹塑性时程分析法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。

参 考 文 献

- [1] 汪大绥,李志山,李承铭,等.复杂结构弹塑性时程分析在 ABAQUS 软件中的实现[J].建筑结构,2007,37(5):92-95.
- [2] 赵富莉,黄坤耀.上海香格里拉酒店扩建工程超限高层建筑抗震设计[J].建筑结构,2005,35(11).
- [3] GRAHAM H. POWELL. A state of the art educational event performance based design using nonlinear analysis[R]. Computers and Structures Inc., 2007.
- [4] KUTAY ORAKCAL, LEONARDO MASSONE. Analytical modeling of reinforced concrete walls for predicting flexural and coupled-shear-flexural responses[R]. PEER, 2006, 07.
- [5] 徐培福,傅学怡,王翠坤,等.复杂高层建筑设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [6] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. ACI Journal, 1984, 114(8):1804-1826.
- [7] MICHAEL WILLFORD, ANDREW WHITTAKER, RON KLEMENCIC. Recommendations for the seismic design of high-rise buildings [R]. CTBUH-Publication, 2008.
- [8] 韩小雷,何伟球,等.天朗海峰国际中心结构可行性报告[R].华南理工大学高层建筑结构研究所,2008.
- [9] ASCE/SEC41-46 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings[S]. USA: American Society of Civil Engineers, 2007.

广州南站正式开通运营

2010 年 1 月 30 日由北京市建筑设计研究院和铁四院、英国 TFP 设计公司合作设计的广州南站正式开通运营。广州南站位于广州市番禺区,站房总建筑面积 48.6 万 m^2 ,是铁道部和广东省合作建设的特大型综合交通枢纽和重点工程,是武广高速铁路的重要组成部分,也是广州 2010 年亚运会配套工程之一。