

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用

主讲: 陈学伟
华南理工大学
土木与交通学院博士研究生
高层建筑结构研究所

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

主要内容

- PERFORM-3D软件简介
- 工程实例一: 珠海天朗海峰超高层结构抗震性能分析
- 工程实例二: 中洲观光门架结构抗震性能分析
- 工程实例三: 盛德大厦改建工程抗震性能分析
- 总结

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

PERFORM-3D的软件简介

PERFORM-3D(Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structure)三维结构非线性分析与性能评估软件, 它的前身为美国加州大学Berkeley分校的Prof Granham H Powell开发的Drain-2DX和Drain-3DX, 是一个致力于研究抗震设计的非线性软件工具。通过使用以变形为基础或者以强度为基础的极限状态来对复杂结构进行非线性分析, 其中包括错综布置的剪力墙结构。

PERFORM-3D为用户提供了—个复杂地震工程工具来进行静力弹塑性Pushover分析和动力弹塑性时程分析。



G.H. Powell

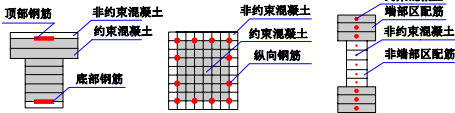
华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

PERFORM-3D的单元模型

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, 梁柱纤维截面如图所示:



华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

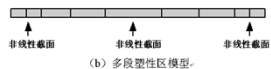
PERFORM-3D的单元模型

梁柱单元模型

PERFORM-3D的梁柱构件提供构件的截面组装机能。这个功能可以使不增加自由度的情况下增加梁柱单元的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机能, 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以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, 在截面组装机能可以加入剪切模拟梁的非线性剪切变形及剪切破坏。



(a) 端部塑性区模型



(b) 多段塑性区模型

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

PERFORM-3D的单元模型

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, 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, 如图所示。

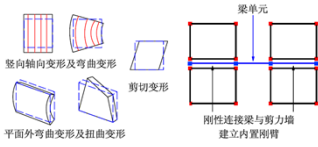


图3 剪力墙分层单元示意 图4 剪力墙内置刚臂

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲：陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

PERFORM-3D的材料本构

□ 钢筋材料本构

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，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

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲：陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

PERFORM-3D的材料本构

□ 混凝土材料本构

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。该模型的混凝土应力-应变关系由5个参数确定，与截面形状和钢筋的配置有关。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

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲：陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

PERFORM-3D的建模方法

□ PERFORM-3D前处理系统 ETP v1.0

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麻烦，例如建立纤维截面，需要手动输入各纤维的材料编号、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。因此本文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、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所示。

PERFORM-3D前处理系统 软件界面

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲：陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

PERFORM-3D的建模方法

PERFORM-3D 梁柱纤维截面划分

PERFORM-3D剪力墙截面与配筋定义

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲：陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

PERFORM-3D的建模方法

结构的PERFORM-3D模型的总节点数为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。

导入PERFORM-3D后结构模型三维图

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲：陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

PERFORM-3D的建模方法

□ 结构弹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。

PERFORM-3D 地震工况设置

华南理工大学
华南理工大学高层建筑研究所
PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用
主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会
可靠的工程抗震设计(结构安全和国家利益)
2008-11-26(广州·琶洲)

主要内容

- PERFORM-3D软件简介
- 工程实例一: 珠海天朗海峰超高层结构抗震性能分析
- 工程实例二: 中洲观光门架结构抗震性能分析
- 工程实例三: 盛德大厦改建工程抗震性能分析
- 总结

华南理工大学
华南理工大学高层建筑研究所
PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用
主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会
可靠的工程抗震设计(结构安全和国家利益)
2008-11-26(广州·琶洲)

珠海天朗海峰超高层结构抗震性能分析

天朗海峰国际中心为集商业、住宅为一体的多功能建筑。包含裙楼以及两座主楼, 其中裙楼为商业功能, 地上四层, 占地地面4597 m²; 两栋主楼为商住楼, 地上58层, 各主楼占地面积727.3 m²; 该结构拥有三层地下室, 占地面积11000 m²。整座建筑利用功能形体组成一种海中灯塔的综合体。塔体顶部有明确简洁的收头造型, 商业空间形成一种沉实的基座, 有遨游于海洋的暗示, 总体形象干净简练、含而不露, 具有内在的自信格调; 建成后将成为珠海的地标之一。

工程设计基准期为50年, 抗震设防烈度为7度, 设计基本地震加速度值为0.1g, 地震分组为第一组, 抗震设防类别为丙类, 结构安全等级为二级, 场地特征周期 $T_g = 0.45s$ 。

(a) 效果图

(b) ETABS模型图

华南理工大学
华南理工大学高层建筑研究所
PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用
主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会
可靠的工程抗震设计(结构安全和国家利益)
2008-11-26(广州·琶洲)

珠海天朗海峰超高层结构抗震性能分析

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, 结构平面布置如图所示。

华南理工大学
华南理工大学高层建筑研究所
PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用
主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会
可靠的工程抗震设计(结构安全和国家利益)
2008-11-26(广州·琶洲)

珠海天朗海峰超高层结构抗震性能分析

弹性时程分析选取了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所示。

华南理工大学
华南理工大学高层建筑研究所
PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用
主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会
可靠的工程抗震设计(结构安全和国家利益)
2008-11-26(广州·琶洲)

珠海天朗海峰超高层结构抗震性能分析

结构的PERFORM-3D模型的总结点数为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。

导入PERFORM-3D后结构模型三维图

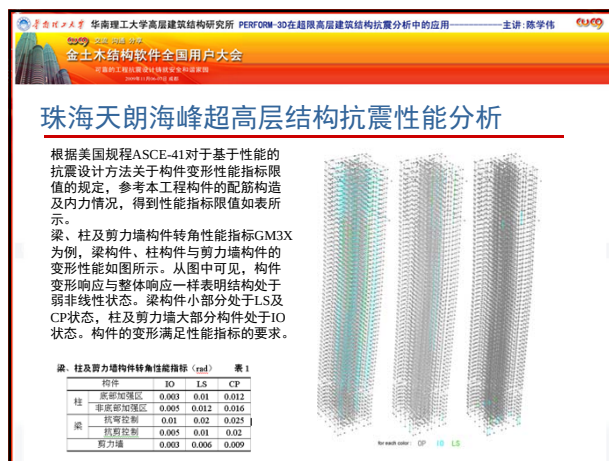
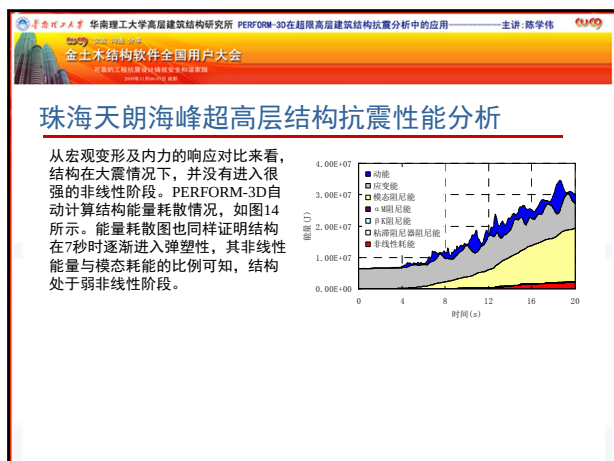
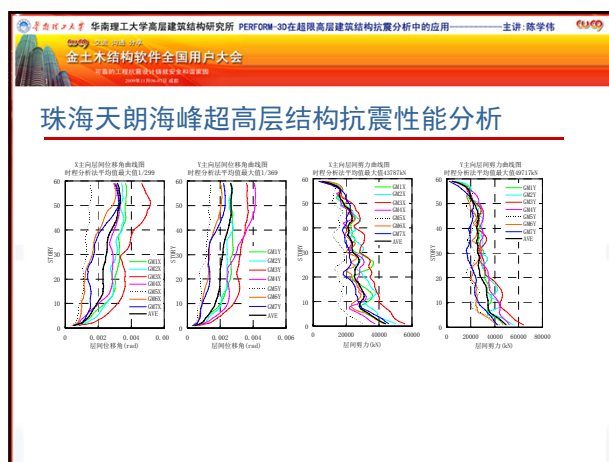
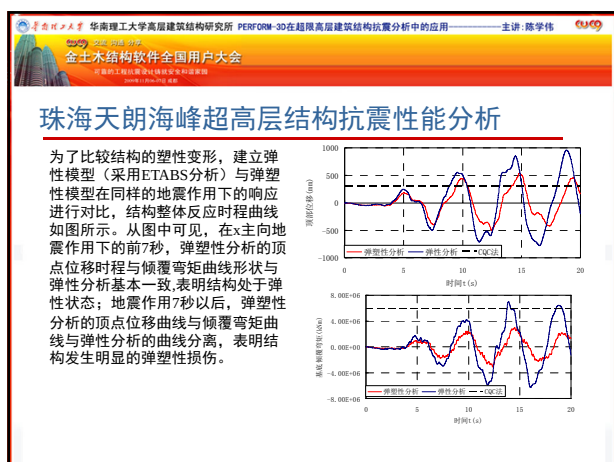
华南理工大学
华南理工大学高层建筑研究所
PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用
主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会
可靠的工程抗震设计(结构安全和国家利益)
2008-11-26(广州·琶洲)

珠海天朗海峰超高层结构抗震性能分析

(a) $T=0.0s$ (b) $T=6.92s$ (c) $T=10.28s$ (d) $T=14.76s$ (e) $T=17.48s$ (f) $T=19.44s$

图 GM3X工况下结构变形响应全过程



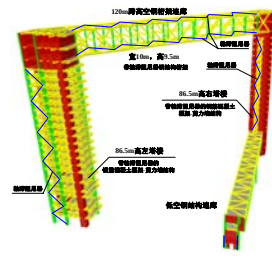
华南理工大学
金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

为了满足观光门架的特殊造型要求以及保证结构使用的安全性和舒适度，主塔楼采用带粘滞阻尼器的钢筋混凝土框架-剪力墙结构，120m大跨度高空连廊采用带粘滞阻尼器的钢桁架结构，90m长（分两跨36m和54m）高空连廊采用钢桁架结构。

两边主塔楼顶部设置了弹性钢筋混凝土筒体，因此结构在顶部出现刚度及承载力突变情况。且由于主塔楼顶部设置弹性钢筋混凝土筒体及其大跨度钢桁架，导致其与相应下一层发生质量突变。

结构左塔楼最大高宽比约0.8，结构右塔楼最大高宽比约0.5，均出现规范规定A级高度钢筋混凝土结构5.0的要求。



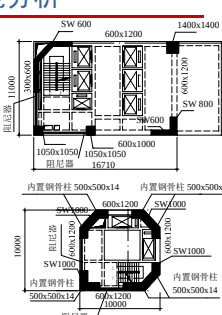
华南理工大学
金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

观光门架属于特殊的超限高层，国内针对此类结构的自振特性以及地震响应研究较少。为了保证结构的承载力和正常使用，在基于概念设计的基础上，对结构提出了以下抗震加强措施：

(1)左右塔楼结构平面布置图如图所示。由于结构造型的特点，两边的主塔楼必须承受大跨度高空连廊传来的巨大弯矩，为了保证弯矩能有效均匀地传递给主塔楼，在主塔楼与高空钢桁架交接处设置内置钢管框架的弹性钢筋混凝土筒体，仅开启连廊门洞满足建筑使用要求。同时为保证塔楼顶部刚度及承载力的适当过渡，弹性钢筋混凝土筒体设置至于高空钢桁架下弦交接处以下一层；钢管框架设置至于钢筋混凝土筒体以下两层。

(2)为了保证结构具有良好的抗扭刚度，主塔楼平面规则，四周角部尽量全设置墙厚为600-800mm的L形墙，有效保证结构整体抗扭刚度。

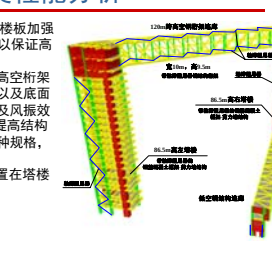


华南理工大学
金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

(3)高空钢桁架端部设置200mm钢筋混凝土楼板加强区，双层双向配筋，配筋率不少于0.3%，以保证高空钢桁架与主塔楼的可靠传力。

(4)由于高空桁架跨度达到120m，为了保证高空桁架在地震作用下的安全性，在高空桁架顶面以及底面设置阻尼器，以减少地震作用引起的振动及风振效应。结构中设置68个100级的粘滞阻尼器提高结构在地震作用下的性能水平。阻尼器采用两种规格，设置在高空桁架的阻尼器阻尼系数C取2500kN/(m/s) α ，阻尼指数 α 取为0.4，而设置在塔楼上的阻尼器C为2000 kN/(m/s) α ， α 取0.3。



华南理工大学
金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

针对结构超限以及不规则情况，结构分析中采用了基于性能的抗震设计方法。根据延性（非延性）构件的性能水平的阶段，把结构的性能水平分为以下4个阶段：充分运行阶段（简称OP）、基本运行阶段（IO）、生命安全阶段（LS）、接近倒塌阶段（CP）。

根据该工程结构各部位的重要程度，分别设定了三水准下的抗震性能目标，见表1。

可以看出，由于顶部加强区落地剪力墙以及连廊钢桁架等构件的重要性，其性能目标高于其他构件。为确保抗震性能目标的实现，采用不同软件进行了弹性和弹塑性分析。

依据美国规程ASCE-41中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，得到主要构件变形性能指标限值如表2所示。

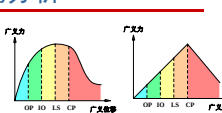


表1 不同构件在各阶段抗震性能目标

区域	构件	抗震性能目标			
		小震	中震	大震	
主塔	高空桁架	OP	OP	IO	
	低空桁架	OP	OP	IO	
	剪力墙	OP	OP	IO	
（连廊桁架5层）	桁架	OP	OP	IO	
	梁端	OP	OP	IO	
	梁端	OP	IO	LS	
	梁端	OP	IO	LS	
	梁端	OP	IO	LS	
	梁端	OP	IO	LS	
主塔	梁端	OP	IO	LS	
	梁端	OP	IO	LS	

华南理工大学
金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

结构在小震及中震作用下，通过承载力验算可知构件处于弹性工作状态，因此其静力分析及动力分析均采用弹性模型。采用PKPM系列的2007年版SATWE和美国CSI公司的ETABS 9.2.0中文版进行计算。

结构在大震作用下，部分构件进入弹塑性工作状态，因此计算软件采用基于纤维模型理论的结构弹塑性分析软件PERFORM-3D V4.0.3。为了了解塔楼结构的抗侧能力，对两个塔楼进行了静力弹塑性分析，对整体结构进行动力弹塑性分析，评估结构及构件是否满足性能指标。

为了验证阻尼器在各水准地震作用下的功效，在动力分析中，分别建立设置阻尼器与未设置阻尼器的模型进行分析对比。

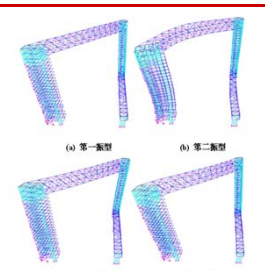


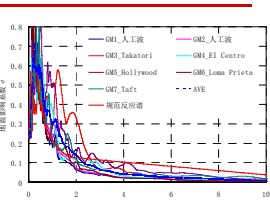
图4 结构前四阶振型

Fig.4 The Former Four Mode Shapes of Structure

华南理工大学
金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

各地震波主波反应谱曲线与规范反应谱曲线对比如图4所示。由图中可见，在场地卓越周期 $T_g=0.35s$ 及结构自振周期 $T=2.46s$ 附近，规范反应谱与地震波反应谱平均值吻合程度高，符合抗震规范对地震波选取的要求。由于结构体型的特殊性，其高空桁架必须考虑竖向地震作用，因此选取的地震波均按三向地震输入。地震波分别采用了0°（X方向）、90°（Y方向）、45°、135°等4个方向进行多角度地震输入，以更好地考察结构的抗震性能。



5

中南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析



图 15 PERFORM-3D 建模前处理程序 KIPV1.1 程序界面图

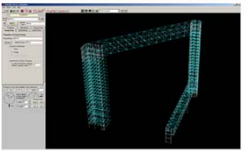


图 16 Perform-3D 模型图

中南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

静力弹塑性分析结果

对两主塔楼分别进行静力弹塑性分析,以定性把握塔楼结构的抗侧承载力性能。推覆分析时,不考虑阻尼器的贡献,且两主塔楼均去除高空及低空钢桁架,但在主塔楼顶部施加高空桁架传递至塔楼的竖向荷载。推覆荷载分布采用倒三角分布模式。分析后得到的顶部位移与基底剪力的曲线如图17所示。

通过对比分析可得,左塔楼结构的屈服点的基底剪力 F_{yield} 约为12700kN,大震弹性分析得到左塔楼结构的基底剪力 F 约为10301kN, $F_{yield} > F$ 从宏观上表明左塔楼结构具有较好的结构抗侧承载力,满足左塔楼结构在大震作用下的抗侧需求。右塔楼结构的屈服点的基底剪力 F_{yield} 约为20000kN,大震弹性分析得到右塔楼结构的基底剪力 F 约为9801kN, $F_{yield} > F$,从宏观上表明右塔楼结构具有较好的结构抗侧承载力,满足右塔楼结构在大震作用下的抗侧需求。

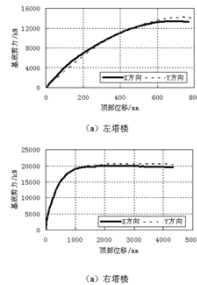


图 17 两个塔楼顶部位移与基底剪力曲线

中南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

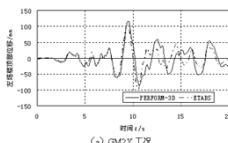
金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

动力弹塑性时程分析主要研究结构在大震作用下的整体响应以及结构关键部位,包括底部竖向构件以及顶部加强竖向构件的地震响应,连梁破坏情况以及高空连廊的地震响应等。综合分析超限情况对结构抗震性能的影响。

为了判断弹塑性分析结果的可靠性和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,对共在相同地震作用下的响应进行对比。

GM2Y地震波工况下左塔楼顶部位移如图(a)所示。从图中可见,由于设置了粘滞阻尼器,结构弹塑性分析的顶点位移形状与弹性分析基本接近,表明结构未发生明显的弹塑性损伤。



(a) GM2Y 工况

中南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

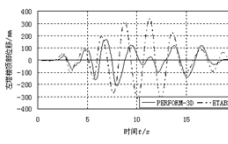
GM3Y地震波工况下左塔楼顶部位移如图18(b)所示。从图中可见,在地震作用下的前 $0.8s$,弹塑性分析的顶点位移形状与弹性分析基本接近,表明结构处于弹性状态;地震作用 $0.8s$ 以后,弹塑性分析的顶点位移曲线与弹性分析的曲线分离,表明结构发生比较大的弹塑性损伤。从曲线形状分析可知,随着时间的增加,波峰间距逐渐变大,表明结构塑性损伤增加,刚度下降引起结构周期变长。

大震作用下结构整体响应结果如表8所示。设置了阻尼器后结构最大层间位移角为 $1/398$,同时通过设置阻尼器与否的对比可知阻尼器对结构的抗震性能有着较显著的提高。结构的大震响应满足规范要求。

表 8 大震作用下结构整体性能表

Table 8 Structural Performance under Severe Earthquakes

作用方向	是否设置阻尼器	是	否
层间位移角 μ_{max}		1/398	1/285
整体位移 mm		147.92	175.01
底部总剪力 kN		13504	17815
底部总倾覆弯矩 $kN\cdot m$		701967	811950



(b) GM3Y 工况

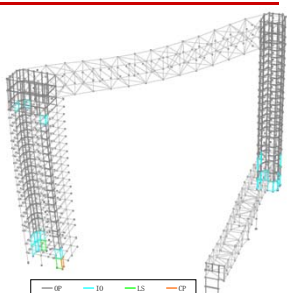
中南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

同时通过提取构件在时程分析中的最大内力值,可以验证顶部加强区以及非顶部加强区的墙肢以及连梁、框架柱的受弯、受剪承载力分别满足性能目标。

对可屈服构件进行变形验算,以GM3Y为例大震作用下结构的剪力墙肢的变形性能状态如图(a)所示。由分析结果可以得到,剪力墙受弯薄弱部位主要集中在主塔楼的底部。左塔底层剪力墙抗弯变形处于LS状态,L形墙肢处于CP状态为最薄弱部位。剪力墙受弯变形性能基本处于大震有限屈服状态。



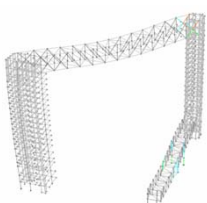
(a) 剪力墙肢变形性能状态

中南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

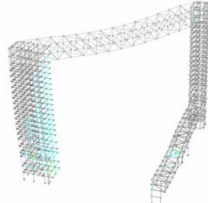
金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

框架柱基本处于0P状态,与塔楼相接钢撑进入LS状态,低空连廊的钢柱及钢撑进入I0状态,如图(b)所示。框架梁受弯薄弱部位主要集中在左塔楼中下部3~12层,如图(c)。框架梁受弯变形最大值接近LS状态限值。框架梁受弯变形性能基本处于大震有限破坏状态。可以看出可屈服构件的变形性能基本满足大震作用下的性能目标。



(b) 框架柱、钢柱和钢撑变形性能状态



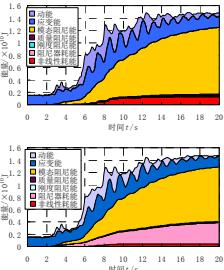
(c) 框架梁和钢梁变形性能状态

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用 主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

由分析结果可见,结构顶部加强剪力墙区以及以下一层,在大震作用下的地震响应均在设定的性能目标以内。关键连接部位,包括高空桁架与塔楼连接的楼板加强区,塔楼受拉剪力墙肢的损伤程度在接受的范围之内。高空桁架构件无应力超限,钢桁架构件承载力均满足大震不屈服工况下的内力需求。钢桁架构件处于大震不屈服状态。钢桁架未出现失稳应力超限,满足稳定性要求。在大震作用下结构的整体耗能情况(以GM3Y为例)如图所示:从图中可以看出未设置阻尼器时,结构非线性耗能占总体耗能的8.5%,设置阻尼器后,结构非线性耗能占总体耗能的3.0%,阻尼器耗能占总体耗能的23%,显示阻尼器对提高结构减振的作用。



华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用 主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

中洲观光门架结构抗震性能分析

小结:通过多个有限元软件建立弹性模型对结构进行小震中震地震响应分析,并通过基于纤维模型的PERFORM-3D软件对结构进行静力及动力弹塑性分析,得到结构的地震响应以及构件的变形性能。具体结论如下:

- (1)小震和中震的弹性分析可以看出,结构层间位移角均满足规范要求。竖向构件以及高空桁架满足承载力要求,钢构件没有出现失稳状态,通过中震弹性和中震不屈服的组合分析,可以判定结构能够满足既定的性能目标。
- (2)进行静力弹塑性分析,得到的屈服基底剪力与整体结构大震弹性算得的基底剪力对比,表明塔楼结构具有很好的抗侧性能,从宏观上反映塔楼满足结构大震的受力与变形需求。
- (3)比较弹性分析以及弹塑性分析的计算结果发现,弹塑性分析结果合理,设置了粘滞阻尼器以后,构件非线性损伤减小。结合位移和内力的分析结果,可以判断整体结构及构件满足既定的变形性能目标。
- (4)在分析模型中通过设置阻尼器与未设置阻尼器的分析对比,验证了设置阻尼器对结构抗震性能有着显著的提高效果。

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用 主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

主要内容

- PERFORM-3D软件简介
- 工程实例一:珠海天朗海峰超高层结构抗震性能分析
- 工程实例二:中洲观光门架结构抗震性能分析
- 工程实例三:盛德大厦改建工程抗震性能分析
- 总结

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用 主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

盛德大厦改建工程抗震性能分析

广州盛德大厦超限高层建筑为一改建工程,原结构设计为地下2层,地上32层框架—剪力墙结构,已建地上4层,长×宽约36m×30m,结构已建部分设计依据主要为国家89系列结构规范,如图所示。现在原已建结构的基础上进行新鉴定和改建设计,为满足现行国家02系列结构规范使用要求,改建方案为部分框支剪力墙结构体系,结构设计年限50年,长×宽约36m×30m,主体结构地下2层,地上裙房6层,主楼37层,于第7层通过梁式转换,主塔楼结构高度为119.0m,属于B类高度超高层建筑



华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用 主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

盛德大厦改建工程抗震性能分析

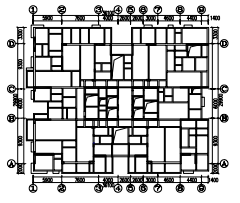
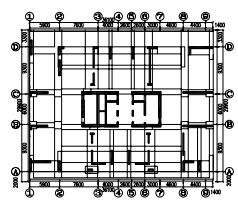


图2 转换层结构布置图

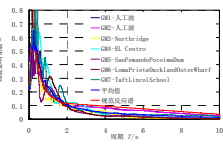
图3 标准层结构布置图

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用 主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

盛德大厦改建工程抗震性能分析

工程设计基准期为50年,抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度值为0.1g,地震分组为第一组,场地类别为二类场地,抗震设防类别为丙类,结构安全等级为二级,场地特征周期 $T_g = 0.35s$ 。根据《抗规》并参考《地震安全性评价报告》,各阶段地震作用下分析参数如表所示。



地震烈度	多遇地震	偶遇地震	罕遇地震
P	63%	10%	2%
α_{max}	0.08	0.23	0.50
T_g/s	0.45	0.45	0.45
地面加速度峰值/cm/s ²	35	110	220

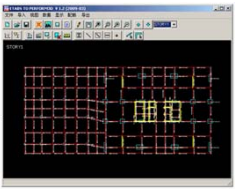
华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲：陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

盛德大厦改建工程抗震性能分析

考虑到结构的重要性，采用美国CSI公司研究的抗震设计非线性软件PERFORM-3D进行弹塑性时程分析及推覆分析。其工程分析结果得到广大工程界的认可。但前后处理不适宜复杂的高层结构的建模，笔者开发了PERFORM-3D复杂结构建模前处理程序ETP V1.1程序。

ETP能够详细读取ETABS或SAP2000程序的几何模型构件截面及弹性材料信息，还能够提供图形界面实现很方便的输入梁、柱及剪力墙的截面配筋与材料非线性设置，再经过数据处理导入PERFORM-3D程序中，从而实现复杂高层结构的非线性模型的建模。ETP的界面如图所示。

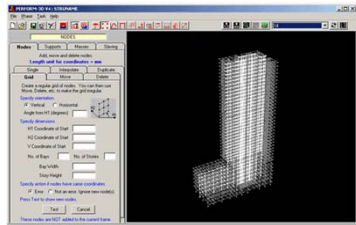


华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲：陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

盛德大厦改建工程抗震性能分析

为了真实考虑结构配筋的影响，整个弹塑性分析模型的钢筋按结构初步设计配筋进行输入。本工程采用7条地震波，分别按0度、90度进行双向弹塑性时程分析，并以平均值结果进行结构抗震性能评估。



华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲：陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

盛德大厦改建工程抗震性能分析

根据计算结果分析可知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，如图10所示。典型构件的变形满足性能指标的要求。

该结构在大震作用下仍处于弱非线性状态的原因是改建后方案对结构规定了更为严格的抗震性能指标，并且对原已建部分根据现行规范进行了加强改造，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。

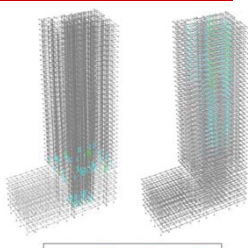


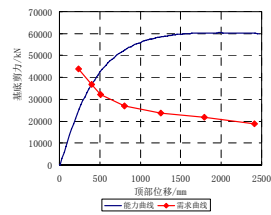
图 10 GM4 地震波下构件变形性能图

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲：陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

盛德大厦改建工程抗震性能分析

基于该弹塑性分析模型，在倒三角形荷载作用下进行了推覆分析作为弹塑性时程分析的参考，结构X方向推覆能力谱曲线如图11所示。能力曲线与需求谱曲线的交点坐标：38700kN，397.5mm；需求层间位移角：1/202；与需求点相对应的加载步/总加载步：20/100。



华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲：陈学伟

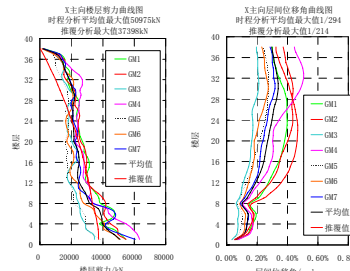
金土木结构软件全国用户大会

盛德大厦改建工程抗震性能分析

分析结果表明大震作用下的结构变形性能满足需求谱需求，结构达到大震作用下的抗倒塌性能目标。

结构整体弹塑性时程分析及推覆分析的部分计算指标对比如图12所示。

上述两种分析结果的对比表明结构在推覆分析和弹塑性时程分析下的整体变化趋势一致及对应数值相近，即大震作用下的结构整体弹塑性时程分析结果是可信的。



华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑工程抗震分析中的应用——主讲：陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

盛德大厦改建工程抗震性能分析

盛德大厦改建设计工程需用在原已建部分结构的基础上进行合理的改造并采取更为严格的抗震性能措施，以满足改建方案在现行抗震规范下结构抗震能力要求。通过该工程基于性能抗震设计，可以得出以下结论：

- (1) 小震结构弹性分析可以看出，结构层间位移角等满足设定的性能要求并小于结构规范限值。通过中震弹性和中震不屈服的内力组合对主要竖向和转换梁等构件分析，可以判定结构能够满足设定的性能目标。
- (2) 通过大震作用下整体结构弹塑性时程分析与推覆分析结果对比，可知结构整体的弹塑性时程分析结果是可信的。
- (3) 大震作用下结构构件变形图和层间位移角满足设定的相应性能目标以及从结构整体的推覆曲线最大值都可以看出，结构具有很好的抗侧性能。
- (4) 合理改造与加固后的改建结构方案具有很好的抗震能力，满足现行《抗规》要求

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑结构抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

主要内容

- PERFORM-3D软件简介
- 工程实例一: 珠海天朗海峰超高层结构抗震性能分析
- 工程实例二: 中洲观光门架结构抗震性能分析
- 工程实例三: 盛德大厦改建工程抗震性能分析
- 总结

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑结构抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

总结

- PERFORM-3D为工程师提供了强大的结构非线性分析手段, 可以实现基于变形能力的性能设计;
- PERFORM-3D提供了构件截面变形量测功能, 可以对构件的变形指标进行评估;
- 结合能量耗散图, 构件变形性能, PUSH-OVER分析结果, 弹塑性与时弹性时程曲线对比, 可以对弹塑性分析结果的合理进行判断;
- PUSH-OVER分析有一定局限性, 但可以作为评估结构整体抗侧能力的方法;
- 通过输入实配钢筋量的纤维模型可以反映配筋加强部位的影响;
- PERFORM-3D结合纤维模型理论, 将基于性能的抗震设计理论变成工程实践;

华南理工大学 华南理工大学高层建筑结构研究所 PERFORM-3D在超限高层建筑结构抗震分析中的应用——主讲:陈学伟

金土木结构软件全国用户大会

谢谢大家!