文章编号: 1000-4750(2010)Sup.I-0059-09

基于宏观单元的结构非线性分析方法、算例及 工程应用

*陈学伟^{1,2},韩小雷^{1,2},林生逸¹

(1. 华南理工大学高层建筑结构研究所,广东,广州 510640; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室,广东,广州 510640)

摘要:罕遇地震作用下结构和构件进入塑性阶段而会发生弹塑性损伤,正确的模拟结构进入非线性状态后的力学行为对评价结构的抗震安全性具有重要的意义。该文采用纤维单元及多弹簧单元等宏观单元对CFRP混凝土构件、预应力混凝土梁及剪力墙进行构件弹塑性分析,并与试验结果进行对比,表明宏观单元对混凝土构件弹塑性模拟的适用性。该文对采用纤维单元对足尺钢框架振动台试验进行数值分析,表明经过构件层次的力学行为校对后的纤维单元模型能准确预测结构在大震作用下的响应及倒塌前的破坏行为。通过大量算例结果和试验结果对比,说明基于宏观单元的非线性分析方法可以准确模拟整体结构与构件的非线性行为。最后通过两个工程实例说明了宏观单元可以应用于复杂工程整体结构非线性分析中,具有实际工程应用意义。

中图分类号: TU355 文献标识码: A

NOLINEAR STRUCTURE ANALYSIS METHODS, EXAMPLES AND ENGINEERING APPLICATIONS BASED ON MACROSCOPIC ELEMENTS

*CHEN Xue-wei^{1,2}, HAN Xiao-lei^{1,2}, LIN Sheng-yi¹

(1. Tall Building Structure Research Institute, South China University of Technology Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: Structures and components may enter a nonlinear stage in a strong earthquake, and the precise prediction for the nonlinear behavior of structures in earthquakes is important to assess the earthquake resistant safety of the structures. In this paper, the nonlinear analysis based on a macroscopic element for different components such as CFRP concrete components, pre-stressed components and shear walls are carried out. The comparison between the analysis results and that of experiments indicated that the nonlinear analysis based on macroscopic elements can precisely simulate the nonlinear behavior of concrete components. The fiber element can also precisely simulate the nonlinear behavior of the whole structure, which is indicated through a numerical analysis of a shake-table test of a full scale steel frame. The feasibility of simulating the nonlinear behavior of the whole structure by macroscopic elements is verified through numerical comparisons between analysis results and experiments results. At last, the engineering applications indicate that a macroscopic element is practical in engineering.

Key words: structures of high-rising buildings; structural elasto-plastic analysis; fiber element; macroscopic elements; nonlinear analysis; shear wall; engineering application

收稿日期: 2009-03-26; 修改日期: 2010-01-05

基金项目: 广东省自然科学基金项目(06105416)

作者简介:*陈学伟(1983-), 男, 广东人, 博士生, 主要从事高层建筑结构抗震分析研究(E-mail: dinochen1983@yahoo.com.cn);

韩小雷(1964一),男,江苏人,教授,博士,主要从事高层建筑结构抗震分析研究(E-mail: xlhan@scut.edu.cn);

林生逸(1984-),男,广东人,硕士生,主要从事高层建筑结构抗震分析研究(E-mail: aleaper@qq.com).

随着我国经济的发展,对建筑结构的抗震性能 评估有了更高的要求。常规结构线弹性分析方法已 经很难满足结构抗震分析的要求。因此如何正确的 对结构进行非线性分析,准确的预测结构在罕遇地 震作用下的非线性行为,成为结构性能设计中的重 点问题。结构非线性分析模型可分为微观模型和宏 观模型两种,其中微观模型直接用实体或者板壳单 元等模拟结构或构件,虽然微观模型力学原理清 晰,但存在建模难、计算量大,试验分析校正困难 等问题,所以很难用于模拟大型整体结构。与微观 模型相对应的是宏观模型, 宏观单元具有自由度 少, 计算量小等优点。纤维模型与多弹簧模型是基 于材料本构层次的有限元分析方法,纤维模型与多 弹簧模型可以模拟较好地描述结构构件非线性受 力性能,并且计算量小,试验分析校正相对简单, 适用于整体结构弹塑性分析。

1 基于纤维单元的杆系构件分析

1.1 概述

纤维模型就是将杆件沿长度方向划分若干积 分区段[1],积分点上截面划分成若干纤维,每个纤 维均为单轴变形及受力,程序自动根据平截面假定 得到每根纤维的应变,并通过单元部迭代计算,确 保单元沿长度积分点处截面变形与抗力平衡,积分 得到单元柔度矩阵再回到结构层次进行迭代计算, 其理论明确且迭代计算收敛速度快。纤维模型具有 以下优点:1) 纤维模型将构件截面划分为若干混凝 土纤维和钢筋纤维,通过用户自定义每根纤维的截 面位置、面积和材料的单轴本构关系,可适用于任 意截面形状; 2) 纤维模型可以准确考虑轴力和(单 向或双向)弯矩的相互关系; 3) 由于纤维模型将截 面分割,因而同一截面的不同纤维可以有不同的单 轴本构关系,这样就可以采用更加符合构件受力状 态的单轴本构关系,如可模拟构件截面不同部分受 到侧向约束作用(如箍筋、钢管或外包碳纤维布)时 的受力性能。

1.2 基于宏观单元有限元程序

基于纤维模型的结构非线性分析方法在国外 已经应用很多, OpenSEES (Open System For Earthquake Engineering Simulation)程序^[2]便是基于 纤维模型的有限元程序的代表。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。此单元是基于柔度法纤维模型的非线 性单元。OpenSEES程序自带多种的混凝土与钢筋 的材料本构,如图1所示,如Kent-Scott-Park混凝土 本构模型与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。PERFORM-3D为基于纤维 模型和塑性铰模型的三维结构非线性分析与性能 评估商业软件^[3]。该软件的纤维截面包括梁柱纤维 截面及基于分层理论的纤维剪力墙纤维截面,如图 2所示。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。 PERFORM-3D适用于对大型整体结构进行非线性 分析。







笔者基于 OpenSEES 程序建立了预应力混凝土

构件的数值分析宏观模型^[4]。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。为了合理考虑 预应力混凝土的真实情况,在该宏观模型中,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,纤维截面划分如图3所示,组 合单元由三部分组成:1)钢筋混凝土梁;2)预应 力筋;3)刚臂或宏观单元,如图4所示。







concrete component

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。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观单元, 宏观单元两端结点可以相对运动,通过合理的剪切 本构可以模拟预应力筋与混凝土之间的滑移。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,得到荷载-挠度曲线,并与文献[5]的试验 结果进行对比。对比可知试验与数值分析的结果比 较吻合,如图 5 所示。可见利用基于纤维模型的非 线性杆系组合单元适用于模拟预应力结构的弹塑 性行为,该模型适用于带预应力混凝土构件的结构 整体分析。



2 基于多竖向弹簧单元的剪力墙 分析

2.1 概述

剪力墙非线性分析模型可分为微观模型和宏 观模型两种,其中微观模型计算量大,试验分析校 正困难,难以应用到整体结构分析中。宏观模型中 剪力墙多采用弹簧组合单元来模拟,可较好地描述 整体结构非线性受力性能,计算量小,试验分析校 正相对简单,适用于整体结构弹塑性分析。

2.2 剪力墙宏观单元

目前主要的剪力墙宏观单元有:Kabeyasawa等人^[6]通过对足尺七层框剪结构进行拟动力试验研究,将剪力墙理想化成三竖线单元(TVLEM)。为解决TVLEM的弯曲弹簧与两边柱杆元相协调的问题,Vulcano和Bertero^[7]提出了一个修正模型多竖向弹簧单元(MVLEM),如图6所示。MVLEM的建模方法是将剪力墙横截面划分为若干份,每个区域以拉压弹簧来模拟,拉压弹簧的属性由混凝土与钢筋的材料本构来确定。混凝土与钢筋的材料本构通过

计算公式转化为拉压弹簧的骨架曲线的关键点数 值。恢复力曲线是由骨架曲线及恢复力模型参数共 同确定,如图7所示。恢复力模型参数比较稳定, 对于普通混凝土剪力墙结构,参数取值为 α =1.0、 β =1.5、 γ =1.05、 δ =0.5^[8]。该单元的剪切变形与压弯 变形不相关,二维MVLEM在距离底部*cL*的地方设 置一个剪切弹簧反映剪切变形,共3个自由度。三 维MVLEM设置3个水平弹簧,包括双向剪切弹簧及 扭转弹簧,共6个自由度。剪切弹簧恢复力可采用 线弹性本构或DRAIN-2D的剪切本构,如图8所示, 其中 Q_y 、 Δ_y 分别是剪力墙单元的剪切屈服力及剪切 屈服变形。水平弹簧的高度系数*c*,要根据预计的 单元曲率分布来确定,Vulcano取不同的*c*(*c*=0、 *c*=0.2、*c*=0.3、*c*=0.4)进行试算,发现*c*=0.4时结果最 好。本文采用*c*值为0.4。



图 6 MVLEM3D 单元模型 Fig.6 MVLEM3D model e component



图 7 竖向弹簧恢复力模型







周往复试验进行校正,发现单元能够很好地模拟剪 力墙结构。Fichinger M等^[8]在DRIAN-2D的基础上, 在 OpenSEES 里写入基于弹簧本构的 MVLEM 3D 单元,与 1:3 剪力墙振动台试验对比后,发现 MVLEM 3D 单元能很好的反映剪力墙动力特性。 笔者的研究基于 Fichinger M 开发的 MVLEM 3D 单 元对某酒店剪力墙试验进行数值模拟。

2.3 算例

笔者对4个剪力墙试件进行低周往复荷载试验研究^[9-10],并进行数值模拟。试件1一试件4墙高为 1.9m,试件截面配筋图如图9-图10所示。经过 OpenSEES分析得到剪力墙水平力与水平位移滞回 曲线如图11所示。





Fig.9 Dimension and details of Specimen.1 and Specimen.2









笔者对OpenSEES计算结果进行图形后处理, 显示剪力墙单元每根弹簧的弹塑性状态,如图12 所示。





从图12可见,MVLEM单元表述了剪力墙的破 坏机制,塑性变形主要发生在底部,塑性变形时, 先是钢筋进入屈服阶段,然后两侧混凝土被压坏退 出工作,压坏部分从两侧向中间扩展,最后由于底 部大部分混凝土被压坏,钢筋屈服,抗侧能力下降 导致整片墙破坏。

通过数值结果对比,表明滞回曲线与骨架曲线 能够较好地吻合,按现有规范设计的试件的滞回曲 线吻合程度良好。剪力墙宏观单元能够在一定精度 上反映剪力墙的非线性行为,包括中和轴移动,剪 切变形影响、局部塑性状态及破坏机制等。优化划 分形式可以减少自由度数,节约计算时间。该宏观 单元模型适用于带剪力墙的高层结构的整体非线 性分析。

3 基于纤维单元的整体结构分析

由构件分析中可见宏观单元可以较好的模拟 结构弹塑性行为,并且具有自由度少,计算量小及 容易校正等优点,可以应用于整体结构分析当中。 为验证纤维单元进行整体结构分析的可靠性,笔者 对钢框架结构进行静力及动力弹塑性分析。

该框架结构为钢框架+压型钢板混凝土楼板的 结构体系,详细参数见文献[11]。该框架的非线性 分析是14WCEE(第14届世界地震工程会议)与 NIED(日本防灾科学技术研究所兵库抗震工学研究 中心)联合举办的2007年度预测性分析比赛的题目。 比赛要求对该足尺钢框架结构进行振动台试验预 测性分析,提交分析结果并与振动台试验结果进行 对比,以结果的准确性作为评判的标准。笔者参加 了这次比赛,并荣获3D科研组第三名^[12]。

在进行钢框架振动台试验之前,NIED 对钢梁、 组合梁及钢柱进行低周往复荷载试验,笔者采用 OpenSEES 对构件试验进行数值分析以便确定纤维 单元的不确定参数。构件分析结果与试验结果对比 如图 13 所示。

该框架利用OpenSEES平台进行动力弹塑性分 析,分析过程分小震、中震、大震三部分。数值模 型采用瑞利阻尼,第一振型与第二振型采用阻尼系 数为0.02,地震作用及分析步长为0.02s。时程分析 三向地震作用按实际地震波输入。求解方法采用 Newmark直接积分法,α=0.5,β=0.25,收敛准则 为能量准则。

振动台试验测得结构在 0.6×Takatori 地震波激励下楼层相对位移时程、楼层绝对加速度时程,并计算到相应楼层剪力时程与倾覆弯矩时程。将

OpenSEES 计算得到上述反应的最大值与试验结果^[12]进行对比,如图 14 所示。



frame components



图 14 OpenSEES 分析得到结构响应与试验结果对比(y 向) Fig.14 Comparison of the structure response between experiment and OpenSEES (y-direction)

结构变形预测稍有偏差,电算结果表明侧向变 形集中在首层,而试验结果表明侧向变形比较均 匀,楼层绝对加速度、楼层倾覆弯矩与楼层剪力基 本与试验一致。

振动台试验中结构在 1.0×Takatori 地震波激励 下倒塌,倒塌瞬间(*t*=6.24s)快照如图 15 所示,可见, 首层出现最大层间变形,柱端出现局部屈曲导致结 构整体倒塌,如图 16 所示。OpenSEES 模拟结构 6.26s 倒塌,倒塌瞬间结构变形如图 17 所示。



图 15 倒塌快照 Fig.15 Photo Shot of Collapse



图 16 柱端局部屈曲 Fig.16 Local Buckling of Column End





由分析对比可知,程序计算得到结构在中震下 的最大响应与试验实测结果基本吻合,程序预测结 构倒塌时间与试验实测时间非常吻合。通过分析, 表明该模型能准确反映结构的弹塑性及屈曲行为, 能准确评估结构抗震性能,了解结构破坏机制。该 框架计算模型为三维模型,共78个节点,100个非 线性梁柱纤维单元,地震作用时程分析步长0.02s, 步数为2500。计算机CPU为Intel(R)Pentium(R) Processor 1.50GHz,内存为760MB,计算时间仅为 25min。可见,研究结果表明基于纤维模型的整体 结构弹塑性分析方法可以通过比较少的自由度,很 好地反映结构弹塑性行为,节约计算时间,高效的 完成整体结构抗震性能分析。

4 基于纤维单元分析的工程应用

4.1 某超限高层工程抗震性能分析

利用PERFORM-3D(基于纤维单元的性能评价 分析软件),对某59层超高层结构进行7度罕遇地震 下的动力弹塑性时程分析^[13]。结构采用现浇钢筋混 凝土部分框支剪力墙结构,平面结构布置如图18所 示,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。时程分析选用的时程波对应反应谱与我 国抗震规范反应谱对比如图19所示。地震波的选取 满足规范的条文要求。



Fig.18 Configuration of an super high rise building



图 19 时程分析地震波的反应谱与规范反应谱对比图 Fig.19 Comparison between spectrums of waves and code

结构弹塑性分析之前进行竖向荷载标准组合静力工况分析。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-A*效应。结构阻尼采用瑞利阻尼,第一振型及第二振型的阻尼比为 0.05。计算步长为 0.02s,总时间为 20s,分析最大迭代步数 为 200,分 7 组地震波共 14 个工况进行时程分析。

为了比较结构的塑性变形,建立该结构的弹性 模型(采用设计软件 ETABS 建模分析)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 位移对比如图 20 所示。从图 20 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 7s 以后,弹塑性分析的顶点位移曲线与弹 性分析的曲线分离,表明结构发生明显的弹塑性损 伤。随着时间的增加,两者的差距逐渐增加。



Fig.20 The time history curve of the structure vertex displacement under GM3X

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 21 所示。能量耗散图也同样证明结构在 7s 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。原因是该建筑位于沿 海城市,基本风压较大,结构满足抗风要求混凝土 结构所需的配筋量使结构在中震作用下保证基本 弹性,结构在大震作用下弹塑性损伤不大。



图 21 GM3X 工况下结构能量耗散时程图 Fig.21 Energy dissipation under GM3X

4.2 某超限连体高层结构抗震性能分析

某超限连体高层结构由相距120m的两个高 86.5m的主塔楼和上下两个连廊组成^[14],高空连廊 跨度为120m,低空连廊跨度为90m,与高空连廊夹 角为45°。主塔楼采用带粘滞阻尼器的钢筋混凝土框 架剪力墙结构,高空连廊采用带粘滞阻尼器的钢筋混凝土框 架剪力墙结构,高空连廊采用带粘滞阻尼器的钢筋 架结构,低空连廊采用纯钢桁架结构。该结构体形 特殊,存在大跨度连体,刚度不连续等多项超限, 结构的地震响应复杂。在小震和中震弹性分析基础 上,采用PERFORM-3D软件对整体结构进行大震动 力弹塑性时程分析。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)与弹塑性模型在相同地震作用下的响 应对比。

地震工况 GM3Y 作用下左塔楼顶部位移如 图 22 所示。从图 22 中可见,在地震作用下的前 6s, 弹塑性分析的顶点位移时程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 6s 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。



Fig.22 Comparison of the displacement curve of the top storey between elastic and inelastic analysis

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 23 所示,由分析结果可以得到, 剪力墙抗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 状态为最簿弱部位。剪力墙抗弯变形性能基 本处于大震有限屈服状态。



图 23 GM3Y 工况下剪力墙变形状态 Fig.23 Deformation states of the shear walls in GM3Y case

由上述工程实例分析可见,基于纤维模型的弹 塑性时程分析方法是稳定可靠且效率高的方法。基 于纤维单元的非线性分析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等情况。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。利 用基于纤维单元有限元软件建立结构弹塑性模型, 能进行基于性能的抗震设计。

5 结论

基于宏观单元的非线性分析方法可以准确模 拟结构与构件的弹塑性行为,并且与微观模型相比 具有自由度少,计算量小的优点。本文采用基于宏 观单元的分析程序OpenSEES与PERFORM-3D,对 大量的算例进行研究,包括采用纤维单元对CFRP 混凝土构件、预应力混凝土构件和剪力墙构件进行 弹塑性分析,通过分析结果和试验结果对比,说明 了纤维单元宏观上模拟混凝土结构构件的非线性 力学行为,特别是构件的内力及变形特点。同时, 本文利用纤维单元较为精确的模拟了一足尺钢框 架振动台试验,说明基于宏观模型非线性分析方法 可以用于整体结构动力弹塑性分析之中,经过构件 的弹塑性分析的校对,整体动力弹塑性分析可以得 到与试验吻合程度较高的计算结果。文章最后给出 基于纤维模型的实际工程弹塑性分析算例,再次说 明宏观单元可以在大型结构抗震分析中的适用性, 具有实际工程应用意义。

参考文献:

- Fabio F Taucer, Enrico Spacone. A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures [R]. USA: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1991.
- [2] McKenna F, Fenves G L. The OpenSEES Command Language Primer [R]. USA: Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, University of California, 2000.
- [3] Graham H Powell. A state of the art educational event performance based design using nonlinear analysis [R]. Computers and Structures Inc., 2007.
- [4] 陈学伟,何伟球.基于 OpenSEES 的预应力混凝土构 件弹塑性分析[J].工业建筑,2007(增刊):67-71.
 Chen Xuewei, He Weiqiu. Elasto-plastic analysis of prestressed concrete member in OpenSEES [J]. Industrial Construction, 2007(Supplement): 67-71. (in Chinese)
- [5] 王正霖, 简斌. 两跨预应力混凝土连续梁的试验分析
 [J]. 土木工程学报, 1999, 32(2): 25-30.
 Wang Zhenglin, Jian Bin. Experiments and analysis of two-span prestressed concrete continuous beams [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(2): 25-30. (in Chinese)
- [6] Kabeyasawa T. US-Japan cooperative research on R/C full - scale building test, Part 5: Discussion of dynamic response system [C]. Proceeding of 8th WCEE, USA: WCEE, 1984.
- [7] Vulcano A, Bertero V V. Analytical model for predicating the lateral response of RC shear wall: evaluation of their reliability [R]. USA: EERC - 87/19, 1987.
- [8] Fischinger M, Isaković T. Benchmark analysis of structural wall [C]. Proceeding of 12th WCEE, New Zealand: WCEE, 2000.
- [9] 韩小雷,陈学伟,戴金华.基于 OpenSEES 的剪力墙低

周往复试验的数值分析[J]. 华南理工大学学报自然科 学版, 2008, 36(12): 7-12.

Han Xiaolei, Chen Xuewei, Dai Jinhua. Numerical analysis for low-cyclic loading test of shear walls based on OpenSEES [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(12): 7–12. (in Chinese)

- [10] 韩小雷,陈学伟,吴培烽. OpenSEES 的剪力墙宏观单元的研究[J]. 世界地震工程,2008,24(4):76-81.
 Han Xiaolei, Chen Xuewei, Wu Peifeng. Research on the shear wall macro-element of OpenSEES [J]. World Earthquake Engineering, 2008, 24(4):76-81. (in Chinese)
- [11] 韩小雷,陈学伟,郑宜. 足尺钢框架振动台试验及动力弹塑性数值模拟[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(6):134-141.
 Han Xiaolei, Chen Xuewei, Jack CHEANG. Dynamic experiment and numerical simulation of a full scale steel frame [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(6): 134-141. (in
- [12] National research institute for earth science and disaster prevention. Blind Analysis Contest 2007 results of the contest [Z]. http://www.blind-anlaysis.jp/index_e.htm, appendix e.pdf. 2007-12-21.

Chinese)

- [13] 韩小雷,陈学伟,林生逸. 基于纤维模型的超高层钢 筋混凝土结构弹塑性时程分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(2): 13-16.
 Han Xiaolei, Chen Xuewei, Lin Shengyi. Elasto-Plastic time-history analysis of super high-risee RC structure based on fiber model [J]. Building Structure, 2010, 40(2): 13-16. (in Chinese)
- [14] 陈学伟,韩小雷,林生逸.中洲中心二期结构抗震性能分析[J].建筑结构学报,2010,31(2):43-51.
 Chen Xuewei, Han Xiaolei, Lin Shengyi. Performance-based seismic design of Zhongzhou Phrase II structure
 [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2):43-51. (in Chinese)