

基于有限元分析软件的缩尺模型振动台倒塌试验合理性初探

田源 土博 14

1. 引言

在世界范围内，随着各国经济实力的不断提升以及人口数目的持续增长，高层及超高层在解决城市人口居住问题的同时，已经成为了国家科技和经济实力的体现。对于高层建筑的定义，目前还缺少统一的标准，具体限定因地区和国家而异。我国在《民用建筑设计通则》^[1]中提到：建筑层数在十层及以上的住宅，以及高度大于 24m 的其它类民用建筑都属于高层建筑；“建筑高度大于 100m 的民用建筑为超高层建筑”。日本将 5-15 层建筑定义为高层建筑，超过 15 层的成为超高层建筑^[2]。国际上，1972 年在美国召开的国际高层建筑会议曾经规定四类高层建筑：9-16 层且高度不超过 50m 为第一类；17-25 层且高度不超过 75m 为第二类；26-40 层且高度不超过 100m 为第三类；40 层以上或高度超过 50m 为第四类。

随着高层建筑潮流的兴起，中国在这方面也做出了很多重要成果。根据 CTBUH^[3]统计，目前中国在建或已建成的建筑中有 6 栋排在世界前十名，而高度超过 300m 的超高层建筑数目更是占到了全世界范围的 50%。

然而，我国高层建筑蓬勃发展的同时，地震灾害频发，从而造成了巨大的生命及财产损失。自从 2008 年汶川地震以来，我国又相继发生了若干次震级较大和危害严重的地震，如 2010 年青海玉树 7.1 级地震、2013 年四川芦山 7.0 级地震、2014 年新疆于田县 7.3 级地震以及 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震等。另一方面，我国高层建筑大多建设在经济相对发达的地区，而由图 1.1 的中国地震烈度区划图^[4]可以发现，这些城市所属地区大部分都分布在 7 度和 8 度这样的中、高烈度区。因此，地震作用是高层建筑设计建设中必须考虑的重要问题。

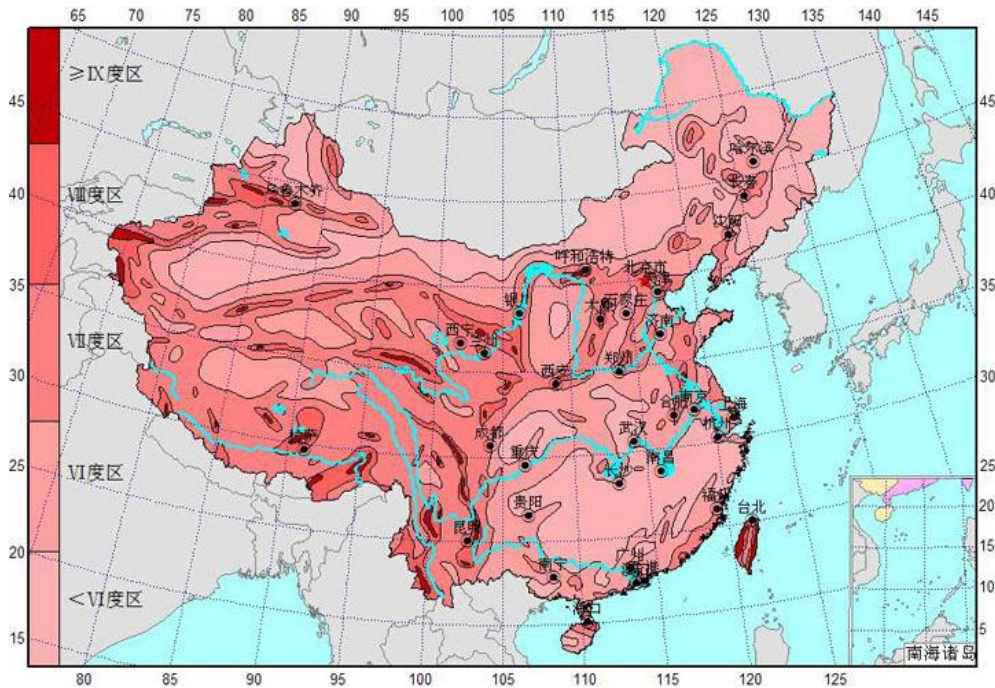


图 1.1 中国地震烈度区划图

由于上述原因，近一段时期已经有大量研究人员对高层建筑进行抗震分析的相关研究。而在建筑结构的抗震性能研究方面，最为普遍的研究方式就是进行有限元模型模拟以及试验

分析。而试验方法主要包括拟静力试验、拟动力试验和振动台试验。结构的拟静力试验方法主要是将结构在既定加载制度下进行低周往复加载,这种方法可以得到结构的恢复力特性,但是试验过程不产生惯性力且忽略了应变速度对材料性能的影响。结构的拟动力试验也称为计算机加载联机试验,将动力数值计算与拟静力位移控制加载试验相结合,克服了非线性恢复力模型及其数值模拟的困难,且可以考虑惯性力以及粘性阻尼力对结构的影响,然而仍然无法反映材料的应变率效应。振动台试验通过振动台台面对结构输入地面运动,模拟地震对结构作用的全过程,因此振动台试验对于研究结构的抗震性能有很重要的作用。但是由于振动台能力、设备安全等方面的限制,振动台试验往往采用缩尺试验,且结构很少进入倒塌状态。日本 E-Defense 近年来进行了一定数量的多层钢筋混凝土框架-剪力墙结构倒塌试验^[5],但是对于高层结构的倒塌试验研究仍然缺乏^[6]。因此,高层建筑的振动台倒塌试验逐渐受到关注。而在振动台试验合理性的研究方面,已有学者进行了一定的探讨,但是对于结构进入倒塌后的试验合理性探讨相对较少。因此,高层建筑振动台倒塌试验的合理性是一个值得研究的内容。

在已有的某十层钢筋混凝土框架-剪力墙振动台试验基础上,本文进行了缩尺模型与足尺模型的有限元模拟,并通过缩尺有限元模型的合理性保证足尺有限元模型的正确性,进而研究了缩尺振动台倒塌试验的合理性。另外,通过不同平台之间有限元模型的对比,说明了在不同平台下进行振动台试验模拟的合理性与可靠性。

2. 基于 MSC.Marc 的振动台试验建模

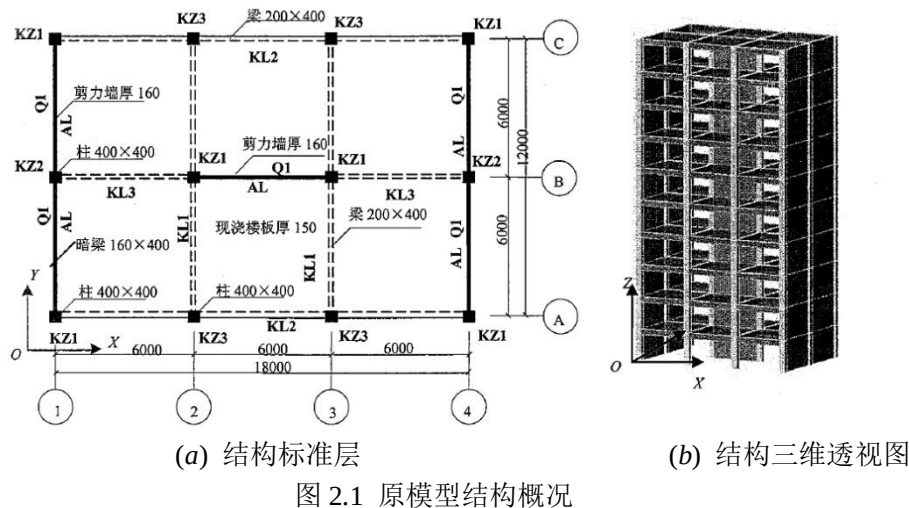
2.1 通用有限元软件 MSC.Marc 概述

作为国际上第一个通用非线性商用有限元软件, Marc 软件一直紧跟有限元方法的理论和计算机软硬件发展的最新进展,已发展成为功能强大、界面友好的有限元软件系统。它拥有丰富和完善的单元库、材料模型库和求解器,能够高效地求解各类结构的静力和动力中的线性、高度非线性问题,以及其他多场耦合问题;友好的图形用户界面和程序结构使用户应用方便;接口的开放性使用户很方便扩展程序功能^[7]。在土木工程领域,已有很多研究人员论证了 MSC.Marc 软件在结构动力弹塑性分析方面的可行性与结果的可靠性。因此,本文主要使用 MSC.Marc 软件,并结合清华大学土木工程系开发的生死单元子程序,进行试验模型的建立与模拟分析。

2.2 有限元模型建立

2.2.1 试验模型概述

该试验原型结构为一十层钢筋混凝土框架-剪力墙结构^[8],底层高度为 4.1m,其余层高均为 3.6m,结构总高度为 36.5m。平面尺寸为 12m×18m,其中横向 2 跨,纵向 3 跨,跨距均为 6m。柱截面 400mm×400mm,主梁截面为 200mm×400mm,现浇楼板板厚 150mm,剪力墙墙厚 160mm,暗梁截面为 160mm×400mm。采用抗震设防烈度 6 度(0.05g),场地类型 II 类,设计地震为第一组,选用 C30 混凝土,主筋及箍筋均采用 HRB335,原型结构如图 2.1 所示。



试验中采用 1/10 的缩尺模型，为减少重力失真现象，取加速度相似比为 1。通过实测混凝土强度与弹性模量确定应力相似常数为 0.33。试验结构采用 M7.5 级微粒混凝土与抗拉强度为 280MPa 镀锌铁丝。结构具体配筋信息以及材料参数参见文献[8]。

2.2.2 MSC.Marc 有限元模型

基于 2.2.1 节的模型信息，在 MSC.Marc 下建立缩尺结构的有限元模型，如图 2.2 所示。模型共有 4357 个节点，1740 个纤维梁柱单元和 3960 个分层壳单元。其中纤维梁柱单元采用 52 号梁单元，分层壳选用 75 号单元。同样，根据实际尺寸建立足尺结构有限元模型，节点数与单元数同上。

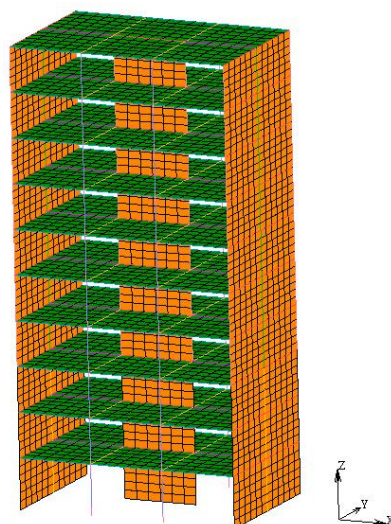


图 2.2 MSC.Marc 有限元模型

2.3 生死单元技术

在进行建筑结构的倒塌模拟时，生死单元的引入可以提高结果的可靠性。所谓生死单元技术就是在模型计算过程中，添加或移除某些单元，使其“存在”或“不存在”。生死单元的实现一般可以通过在程序中指定执行生死单元命令的条件来实现，比如规定时间点、规定

单元应变或应力限值等。实际上，杀死的单元并非真正的移走，而是将其刚度乘以一个很小的因子，并对与其相邻的单元荷载进行适当处理，已达到“移走”单元的效果。本文在基于 MSC.Marc 进行试验模拟时，将采用清华大学土木工程系基于该软件进行二次开发的子程序来实现生死单元技术。

3. 基于 OpenSees 的振动台试验建模

3.1 开源有限元程序 OpenSees 概述

开源有限元软件 OpenSees（Open System for Earthquake Engineering Simulation）是一款大型有限元计算程序。它由美国国家自然科学基金（NSF）资助、西部大学联盟“太平洋地震工程研究中心”（PEER）主导、加州大学伯克利分校（UCB）为主研发而成^[9]。自面世以来，OpenSees 已经得到了国内外大量研究学者的广泛应用和认可。凭借着软件自身开放的程序架构、丰富的单元库与材料库、强大的数值模拟功能与及时集成并更新最新研究成果的前沿理念，OpenSees 已经逐步成为地震工程领域最具影响力的开放科研平台之一。通过世界各地研究人员的共同开发，OpenSees 的功能得到不断完善，使得领域内的新技术、新成果能够得到很好的继承与应用。因此，基于开源有限元程序 OpenSees 的建筑结构弹塑性分析具有很高的科研价值与工程价值。

3.2 有限元模型的建立

由于 OpenSees 是一个基于 tcl 脚本语言的窗口程序，本身并不提供较为友好的前后处理界面，因此用户建模相对不便。目前，国内外已有很多研究人员对 OpenSees 进行了前处理功能的开发。例如，Andreas Schellenberg 和 Tony Yang 开发了基于 MATLAB 系统平台的 OpenSees Navigator^[10]，它是一款带有图形用户界面的程序，可以方便用户进行 OpenSees 二维和三维模型的建立，并支持计算结果的后处理；陈学伟博士开发了 ETABS to OpenSees（ETO）程序^[11]，通过将 ETABS 模型导出的 s2k 文件读入生成 OpenSees 程序需要的模型文件；清华大学土木工程系开发的 MSC.Marc to OpenSees（MTO）转换程序^[12]，通过导入 MSC.Marc 的模型文件（包括 dat 文件和 matcode 文件）生成 OpenSees 所需的文件，该程序主要实现了纤维梁柱单元、分层壳单元、桁架单元及 Link 单元从 MSC.Marc 到 OpenSees 的一一对应的转换。

一方面，MSC.Marc 友好的用户交互界面，可以有效的解决 OpenSees 的建模难题；另一方面，MSC.Marc 已被广泛应用于建筑结构和桥梁结构的弹塑性分析，其可靠性和准确性已得到充分验证，通过对比相同模型在 OpenSees 和 MSC.Marc 下的计算结果，可以为 OpenSees 分析结果的合理性提供保证。因此，本节中采用清华大学的 MTO 程序，将 2.2 中建立的缩尺模型进行转换得到其对应的 OpenSees 模型。

4. 有限元模拟结果与分析

4.1 试验工况概述

该试验采用 1940 年 El-Centro 的 NS 向地震动作沿结构 X 向输入。需要注意的是，由于缩尺试验的相似关系，该地震波需做时间相似调整。其具体输入制度见表 4.1，其中小振幅白噪声是为研究模型动力特性变化设置的。

表 4.1

工况	地震波类型		加速度峰值（g）		
			X 向	Y 向	Z 向
0	小震	三向白噪声	0.035	0.035	0.035

1		El-Centro 波 NS 向	0.018	0	0
2	中震	三向白噪声	0.035	0.035	0.035
3		El-Centro 波 NS 向	0.05	0	0
4		三向白噪声	0.035	0.035	0.035
5	大震	El-Centro 波 NS 向	0.125	0	0
6		三向白噪声	0.035	0.035	0.035
7		El-Centro 波 NS 向	0.25	0	0
8		三向白噪声	0.035	0.035	0.035
9		El-Centro 波 NS 向	0.5	0	0
10		三向白噪声	0.035	0.035	0.035
11		El-Centro 波 NS 向	0.75	0	0
12		El-Centro 波 NS 向	1.00	0	0
13		El-Centro 波 NS 向	1.25	0	0
14		El-Centro 波 NS 向	1.5	0	0

4.2 基本动力特性

将上述有限元模型在各自平台上进行模态分析，得到结果对比如表 4.2。其中足尺模型中的“修正后”表示将其计算得到的周期乘以时间相似常数，以保证结果具有可比性。根据对比可以发现，在振动台单向加载方向（X 方向）上，有限元模型的基本动力特性与试验相对误差可以接受，也说明了有限元模型的合理性。

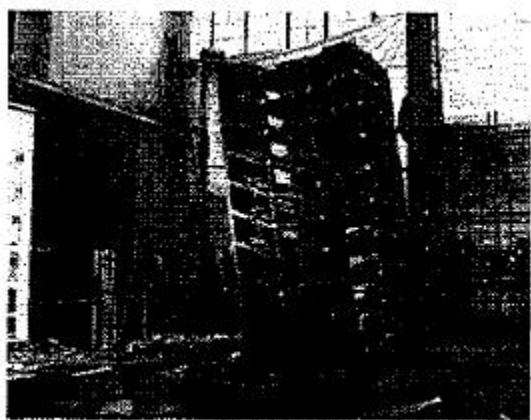
表 4.2

	实验模型	Marc 缩尺模型	Marc 足尺模型 (修正后)	OpenSees 缩尺 模型
T(X1) /s	0.40	0.34	0.38	0.31
T(X2) /s	0.11	0.09	0.09	0.10
T(Y1) /s	0.24	0.16	0.16	0.14
T(Y2) /s	0.066	0.043	0.038	0.039

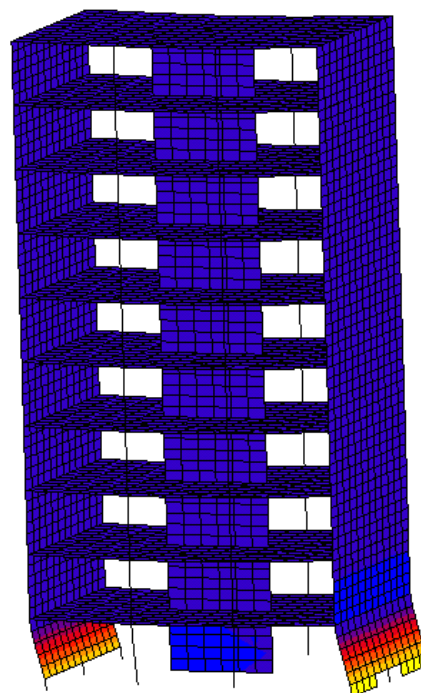
4.2 试验结果对比

4.2.1 引入生死单元的有限元分析

在 MSC.Marc 下建立的有限元模型基础上，首先对缩尺模型进行计算模拟。分析时，考虑到计算效率与计算分析的准确性，结合测试结果，发现从工况 9 开始进行计算既可以保证结果精度，又可以缩短计算时间，因此本部分及以下计算均从工况 9 开始对结构施加地震动。模拟结果显示，缩尺模型在工况 14 开始的第 2.1s 开始倒塌，实际实验的倒塌发生在第 3.85s，倒塌模式对比见图 4.1，倒塌前一工况（工况 13）计算得到的层间位移包络与试验结果对比如图 4.2 所示。可以发现，缩尺有限元模型与实际试验模型在倒塌前的破坏程度相当，且倒塌时破坏模式接近，由此可以说明缩尺有限元模型的合理性。



(a) 试验倒塌模式



(b) MSC.Marc 缩尺模型模拟结果

图 4.1 缩尺模型倒塌模式对比

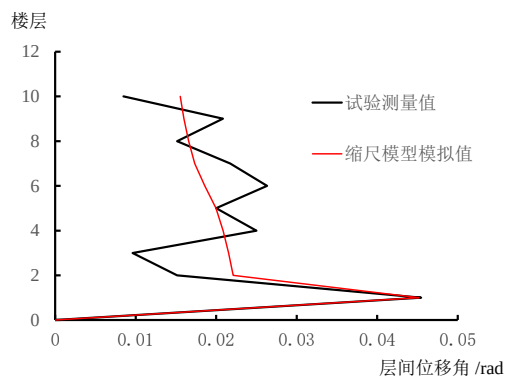


图 4.2 工况 13 层间位移角结果对比

采用同样的建模方式，建立结构的足尺有限元模型，并进行同样工况下的计算。需要注意的是，这是的地震波应该输入原始地震波，以保证相似关系。足尺有限元模型的倒塌模式如图 4.3 所示，其层间位移角包络计算结果与缩尺有限元模型计算结果的对比如图 4.4 所示。

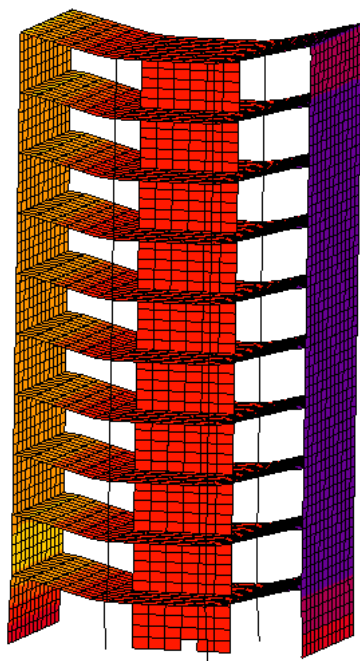


图 4.3 足尺有限元模型倒塌模式

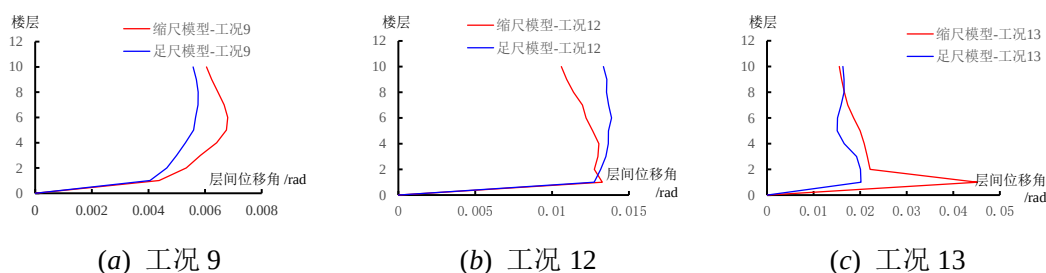


图 4.4 足尺有限元模型与缩尺有限元模型层间位移角对比

通过对比可以发现，工况 9 和工况 12 时，两有限元模型模拟结果接近，但是在倒塌前的工况 13 中，足尺有限元模型的底层侧移角明显偏小，这一点通过图 4.3 与图 4.1 的倒塌模式对比即可发现，这是由于两模型倒塌模式有一定差异。缩尺有限元模型的倒塌模式是：底层中部剪力墙底部失效，在地震动作用下，结构偏向一侧，产生较大塑性位移而无法恢复，并最终倒向一侧。而足尺有限元模型的倒塌模式为：底层中部剪力墙底部失效，造成严重的力的重新分布，进一步造成底层柱失效，使得整体发生竖向垮塌。

造成以上倒塌模式区别的原因可能是两模型的质量分布不同。缩尺模型为了满足质量的相似关系，在每层楼板上布置了大量堆载，而足尺有限元模型根据实际情况来讲，楼板上分布质量相对并不大，因此缩尺有限元模型在受到地震动作用时，层间惯性力相对足尺模型就要更大，更可能发生侧向倒塌。而足尺有限元模型层间惯性力相对小，而力的重分部影响相对更大，造成了框架柱失效。另外，由于倒塌现象本身就有一定的不确定性，所以在与这种小比例的模型比较时，有一定的区别是可能的。但是在区别之外，我们仍应注意到，在两个有限元模型分析过程中，诱发结构倒塌的原因都是由于底层中部剪力墙底部的失效，因此对于实际工程来说，二者的模拟结果都是有借鉴意义的。

4.2.2 无生死单元的不同平台计算分析

在 OpenSees 中也可以通过“remove”命令杀死单元。但是这条命令仍有很多不完善之处,例如杀死单元后对于相邻节点与相邻单元的处理方面等。另外,本小节旨在讨论不同计算平台下结果的对比情况,因此,本小节计算的算例均未采用生死单元技术(包括 MSC.Marc 的模型)。这里仅选取 OpenSees 与 MSC.Marc 下的缩尺有限元模型进行动力时程分析,得到工况 11-13 的楼层顶点位移时程曲线对比如图 4.5 所示。通过对比可以发现,一致的模型在 OpenSees 与 MSC.Marc 下的计算结果是基本一致的。因此,可以认为,如果 OpenSees 下拥有更好用的生死单元技术时,那么其在倒塌计算计算方面也是有一定可靠性的。

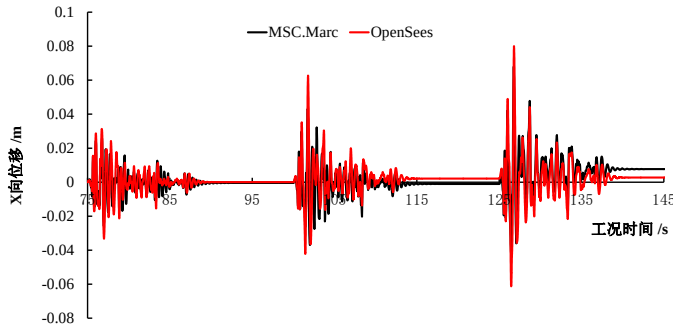


图 4.5 OpenSees 与 MSC.Marc 缩尺模型顶点位移时程曲线对比 (工况 11-工况 13)

5. 总结与展望

5.1 研究小结

本文在已有 1/10 缩尺振动台倒塌试验的基础上,完成了在 MSC.Marc 与 OpenSees 下缩尺有限元模型与足尺有限元模型的建立,并通过缩尺有限元模型与试验结果的对比,说明了建模的合理性以及生死单元技术的有效性,进而通过足尺有限元模型的模拟,对缩尺试验的合理性进行了一定的分析。合理的缩尺模型可以在一定程度上反应结构在弹塑性阶段的薄弱部位,为实际工程操作提供一定的依据。但是实际实验的缩尺比例应尽量大,以保证结果不会失真严重。另外,通过不同平台下相同有限元模型的计算对比,发现 OpenSees 同样拥有合理计算振动台倒塌试验的可行性。

5.2 讨论与展望

虽然通过本文的研究,得到了一定的相关结论。但是该研究仍存在一定的问題。首先振动台试验的基础是相似理论。而比较常用的相似理论有三种:方程式分析法、量纲分析法和似量纲分析法。方程式分析法主要通过纯数学方法,根据方程式关系来确定相似情况,相对精确。而实际问题往往较为复杂,很难找到各个物理量之间明确的函数关系,因此发展了量纲分析法。量纲分析法基于第一和第二相似定理,要求 π 数存在且唯一。但是实际问题中很难同时满足第一和第二相似定理,因此多数的振动台试验属于似量纲分析法,本文所用的试验即属于这种。似量纲分析法不要求 π 数唯一,只需要确定几个基本物理量的相似关系,其它量均从这几个基本关系推导得到。在振动台试验中,一般将长度、加速度和应力作为基本物理量。显然,这种方法较为粗糙,由于 π 数可以不唯一,将相似关系放松,于是推导出的相似比并不一定满足实际情况。但是由于操作简便,且经过研究,材料选择合适的情况下,这种方法仍是有工程与科研价值的,所以该方法仍然应用广泛。另外,振动台试验还存在重力失真、尺寸效应、加载速度等问题。上述各种情况造成了足尺有限元模型与实际缩尺试验模型并不是一个严格的相似关系。

除了试验本身存在的问题,研究框架也可能存在问题。振动台试验本身就是以足尺结构

为目标进行模拟，而在本次研究中，足尺有限元模型的一些参数反而只能根据缩尺试验进行反算得到，例如混凝土抗压强度等，这样就造成了本末倒置的情况。因此，试验在进行时就要尽量以原型模型和相似关系为基础，这样对于数值模拟研究也有一定的帮助。另外，本研究的样本数量也不够，无法考虑实际试验结果的离散性。

针对本次研究，改进思路可以参考文献[2]。其中给出了一种可能更加合理的方式，即针对相同结构进行两个不同比例的缩尺模型，进行试验研究。如果对上述研究再辅以有限元分析，我想可能得到更深入的结论。

6. 课程总结

针对土木工程领域涉及到的各种 CAE 技术，本课程进行了较为细致的介绍。一方面，课程内容使我开阔眼界，通过课程的学习，我对于土木工程领域的 CAE 相关技术有了更新的认识，甚至对于土木工程领域也有了更加全面的了解；另一方面，大作业的工作也使我对自己感兴趣的地方有了一个深入研究的机会，虽然只是一个小小的研究，并没有太多的结论，但是这个过程让我增长了知识，更多的了解了相关理论。

另外，在胡老师的“水果奖励”下，我、同学和老师之间有了更多的交流与讨论，也让我们对课程内容和作业工作都有了相对更深的了解与理解。

总之，这是一门让我印象深刻的课程，让我学到了很多，十分感谢胡老师每次课程的精心准备。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑设计通则(GB 50352-2005)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 吕西林. 复杂高层建筑结构抗震理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] CTBUH. Council on Tall Buildings and Urban Habitat[EB/OL]. <http://www.ctbuh.org>
- [4] 中国地震信息网. 地震烈度值区划图[EB/OL]. [2015-05-01].
<http://www.csi.ac.cn/publish/main/837/1075/index.html>.
- [5] Shirai K, Mastsumori T, Kabeyasawa T. 3-D dynamic collapse test of a six-story full-scale RC wall-frame building [A]. Proceedings of the 2007 Structure Congress[C], Long Beach, CA, 2007.
- [6] 陈建云, 马恒春, 周晶等. 超高层筒体结构模型振动台地震破坏试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(4): 389-395.
- [7] 陈火红, 杨剑等. 新编 MARC 有限元实例教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.8.
- [8] 汪小林. 地震作用下钢筋混凝土结构倒塌机理分析[D]. 上海: 同济大学, 2014.
- [9] PEER. OpenSees[EB/OL]. <http://opensees.berkeley.edu/>.
- [10] Schellenberg A, Yang T. OpenSees navigator[J]. 2005.
http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/workshop/neesOSworkshopSept2004_presentations/B6%20OpenSeesNavigator%20Shellenberg.pdf.

- [11] 陈学伟, 林哲. 结构弹塑性分析程序 OpenSees 原理与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.10.
- [12] 陆新征. 转换程序 MTO 应用说明[EB/OL]. (2013-09-10)[2015-05-01].
http://blog.sina.com.cn/s/blog_6cdd8dff0101mdle.html.