

智利地震钢筋混凝土高层建筑震害 对我国高层结构设计的启示

周 颖, 吕西林

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:2010 年 2 月 27 日在南美洲智利发生的 8.8 级大地震,造成了钢筋混凝土高层建筑的严重破坏,这是近年来现代钢筋混凝土高层建筑经历的最大地震,引起了国内外工程设计人员的广泛关注。以智利高层建筑结构体系特点入手,分别介绍了智利地震中钢筋混凝土剪力墙高层建筑、立面收进复杂高层建筑、连体复杂高层建筑、带消能减震支撑超高层建筑、带金属球颗粒阻尼器高层建筑的震害现象。研究表明:智利高层结构剪力墙厚度与中低层结构剪力墙厚度相近,造成剪力墙轴压比过大,在此次地震中发生严重破坏;智利国家规范在钢筋混凝土剪力墙设计中参考美国规范,但允许对边缘约束构件设计予以放松,是造成剪力墙破坏的另一原因。另外从此次大地震中复杂高层和消能减震结构的表现来看,我国仍需加强对复杂及超限高层的抗震性能研究,加强消能减震技术在我国高层及超高层中的应用。

关键词:智利地震; 钢筋混凝土; 高层建筑; 复杂高层; 剪力墙; 消能减震; 震害

中图分类号:TU312.3 **文献标志码:**A

Lessons learnt from damages of reinforced concrete tall buildings in Chile Earthquake and revelations to structural design in China

ZHOU Ying, LU Xilin

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An 8.8 magnitude earthquake hit Chile on 27 February 2010 and caused a lot of damages to reinforced concrete (RC) tall buildings. It is the maximum earthquake that modern RC tall buildings have suffered in the world, which has attracted the global attentions of structural engineers and earthquake engineers. The structural characteristics of Chilean RC tall buildings were introduced first. Then this paper analyzed damage patterns of shear wall buildings, a complex tall building with setbacks, a multi-tower connected complex building, a super-tall building with energy dissipation braces, and a tall building with metal ball particle energy dissipation system. It is found that in Chile the widths of the shear walls for tall buildings are almost the same as those for low-rise or middle-rise buildings. The axial compression ratios of the shear walls are very high which caused the serious damages to shear walls. In Chilean codes, the design of shear walls refers to US code but permits the design flexibility of boundary element in shear walls, which is another important reason that caused the damages to shear walls. And from the seismic performance of complex tall buildings and energy dissipation buildings in Chile earthquake, the study on the complex tall buildings should be strengthened and the application of energy dissipation technology in tall building is suggested to be widely promoted.

Keywords: Chile Earthquake; reinforced concrete; tall building; complex tall building; shear wall; energy dissipation; damage

基金项目:国家自然科学基金项目(51078274, 51022140006),北京市科技计划重大项目(D09050600370000)。

作者简介:周颖(1978—),女,甘肃古浪人,副研究员。E-mail:yingzhou@tongji.edu.cn

通讯作者:吕西林(1955—),男,陕西岐山人,教授。E-mail:lxlst@tongji.edu.cn

收稿日期:2010 年 12 月

0 前言

2010年2月27日在南美洲智利发生了8.8级特大地震,根据智利官方报道^[1],截止2010年4月7日,在此次大地震中,死亡486人、失踪79人、海啸致使80万人受伤或无家可归,总损失达300亿美元。这是继1985年3月3日8.0级地震后,智利再一次遭受8.0级以上强烈地震的袭击,给智利国家和人民造成了巨大的经济和财产损失。

智利是一个高度城市化的国家,其中85%的居民居住在城市,50%的居民集中住在Santiago、Valparaiso-Viña del Mar、Concepción-Talcahuano三个大城市,因而城市中的高层以及超高层建筑林立,并在此次地震中经历了8.8级地震的考验。这是近年来现代钢筋混凝土高层建筑经历的最大地震,又因智利地处南美洲西侧,与美国、加拿大同样涉及美洲板块与太平洋板块的交界区域。因此,智利地震高层建筑震害调查及对混凝土结构设计规范的修订工作引起全世界地震工程和结构工程人员的极大关注。

本文以智利高层建筑结构体系特点入手,分别介绍智利地震中钢筋混凝土剪力墙高层建筑、复杂高层建筑、消能减震建筑的震害现象,分析造成震害的深层次原因,为我国钢筋混凝土高层建筑结构设计提出建议和启示。

1 智利高层结构体系特点

过去智利的高层办公楼和住宅建筑都以剪力墙结构为主,近年来办公楼建筑逐渐采用框架-剪力墙结构,而住宅建筑仍以剪力墙结构为主。图1为智利某高层办公楼结构平面图及立面照片,图2为智利典型高层住宅结构平面图及立面照片。可以看出,剪力墙在智利高层结构中是最主要的抗侧力构件。

2 高层建筑震害现象及分析

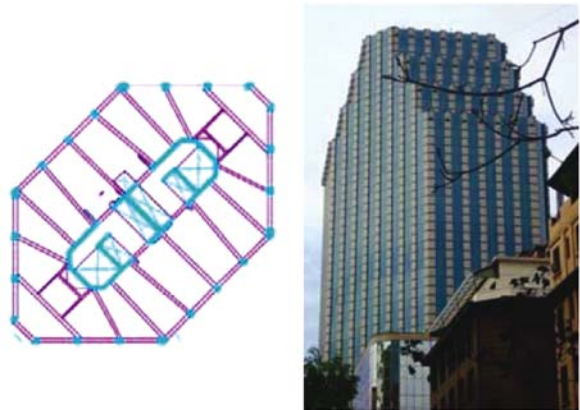
2.1 钢筋混凝土高层结构震害及分析

在2010年智利地震中,钢筋混凝土高层结构的普遍震害现象主要表现为剪力墙混凝土受压破坏和剪力墙钢筋的外鼓屈曲与拉断破坏两种^[2]。

2.1.1 剪力墙混凝土的破坏

图3所示为智利某高层钢筋混凝土剪力墙的典型破坏情况,据统计此次震害有数千片剪力墙发生类似破坏^[3]。其破坏模式以拉压破坏为主、剪切破坏为辅。

智利是较早在钢筋混凝土多层和高层建筑中采



(a) 平面图

(b) 立面照片

图1 智利某高层办公楼结构平面图及立面照片

Fig.1 Elevation and plan layout of an office building in Chile



(a) 平面图

(b) 立面照片

图2 智利典型高层住宅结构平面图及立面照片

Fig.2 Elevation and plan layout of a typical residential building in Chile



(a) 某剪力墙顶部破坏



(b) 某剪力墙根部破坏

图3 钢筋混凝土剪力墙的破坏^[3]

Fig.3 Damages of reinforced concrete shear walls^[3]

用剪力墙的国家之一,在 1985 年智利地震中,剪力墙结构的存在避免了人员伤亡且其本身破坏较轻。鉴于剪力墙结构良好的抗震性能,智利随后数年逐渐增加结构高度,但剪力墙厚度仍与中低高层结构墙体厚度相同(典型厚度为 200~250mm^[41])。

随着结构高度的增加,重力荷载增大,而剪力墙厚度不变,致使剪力墙轴压比过大,在地震作用下其延性降低,是造成 2010 年智利地震数幢高层、数千片剪力墙的受压破坏(图 3)、甚至发生整体倒塌(图 4)的主要原因之一。



图 4 钢筋混凝土剪力墙结构的倒塌^[3]

Fig. 4 Collapse of a reinforced concrete structure^[3]

2.1.2 剪力墙钢筋的破坏

图 5 给出了在智利地震中钢筋混凝土剪力墙钢筋的破坏照片,其地震破坏现象为纵向钢筋的外露、外鼓、屈曲和拉断。

发生震害的大部分高层结构都依据 1996 年颁布的智利建筑结构设计规范^[5]设计,该规范基本内容与美国同时期的 ACI 318^[6]设计规范类似,但考虑到剪力墙结构在 1985 年地震中的良好表现,智利规范允许“在剪力墙设计时,不必满足 ACI 318—95 规范 21.6.6.1~21.6.6.4 的规定”,且允许删除剪力墙边缘约束构件。这一设计规定导致数百片钢筋混凝土剪力墙因未设置边缘约束构件而发生破坏(图 5a)。

据文献^[3]介绍,智利没有独立的施工监理和检测,监理和检测也是承包商的工作内容之一。承包商在施工时,将结构设计图纸中的箍筋 135°弯钩,施工时做成了 90°弯钩,造成箍筋的约束作用大幅减小和纵向钢筋的外鼓拉断破坏(图 5b)。

2.2 复杂高层结构震害及分析

历次地震震害表明,结构不规则将直接或间接导致结构在强震作用下的破坏甚至倒塌^[7]。然而,由于我国近年来对高层建筑造型的需求,复杂超限高层结构层出不穷,且未经历过大地震考验。本节介绍两个复杂高层结构在智利地震中的震害情况,以供我国工程结构设计人员和研究人员借鉴。

2.2.1 立面收进高层结构的破坏

高层建筑常常由于建筑立面需要、建筑功能改变等原因设置立面收进,从结构角度分析,立面收进



(a) 未设置边缘约束构件



(b) 箍筋为 90°弯钩

图 5 钢筋混凝土剪力墙钢筋的破坏^[4]

Fig. 5 Damages of steel bars in shear walls^[4]

楼层的刚度和质量较其下部楼层发生突变,在强震作用下,宜造成应力集中而出现破坏。

卢文胜等^[8]对某结构高度 244.8m 立面收进超高层结构进行了 1:35 模型结构模拟地震振动台试验,试验研究表明,结构立面收进部位的大部分框架柱均出现纵横交错的贯通裂缝,且裂缝宽度较大,局部混凝土被压溃脱落(图 6、7)^[8]。

智利地震中某立面收进办公楼结构如图 8 所示,该结构共 21 层,其立面收进层位于 11 层。地震造成其立面收进层的整层破坏及高位连体楼层的破坏(图 8)。

可以看出,立面收进层复杂高层结构在强震作用下的破坏模式与同类型结构体系模拟地震振动台试验破坏模式相似。主要两方面:一方面,在复杂结构设计中,仍需加强对立面收进楼层及其上下数楼层的刚度和延性设计;另一方面,采用模拟地震振动台试验考察复杂结构强震作用下的破坏模式,仍不失为一种有效的研究手段。

2.2.2 连体结构连廊的破坏

高层连体建筑由于其宏伟的气势、现代化的气息而被广泛采用。原因是一方面由于建筑功能上的要求,它可以方便两塔楼之间的联系,同时连体具有良好的采光效果和广阔的视野而形成大跨度高空观



图6 某立面收进高层结构振动台试验模型
Fig.6 Elevation of a shaking table test model with setbacks



图7 振动台试验中立面收进层柱的破坏
Fig.7 Experimental damages of a column in story with setbacks

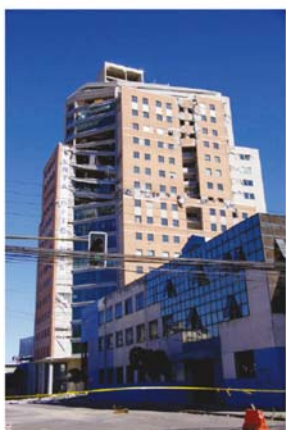


图8 立面收进高层结构的破坏^[2]
Fig.8 Damage pattern of a tall building with setbacks^[2]

光连廊;另一方面,由于连体的设置,可以使建筑外观上更具特色,具有强烈的视觉冲击效应。但从结构方面,连体两侧塔楼在强震作用下的相互运动对连体结构的设计是极大的挑战。

侯家健等^[9]研究了双塔连体建筑的竖向抗震实用设计方法,提出了考虑塔楼和桁架协同的地震作用实用算式;陈朝辉等^[10]结合实际工程,研究了型钢

混凝土空腹桁架连体结构的应用,得出空腹桁架结构抗震性能良好的结论;周颖等^[7]进行了1:15不等高塔楼连体结构的模拟地震振动台试验研究,研究表明连体桁架钢梁在强震作用下会发生屈曲,钢桁架节点出现断裂;黄志华等^[11]对1:25等高塔楼连体结构进行了模拟地震振动台试验研究,强震作用下连体位置主要表现为:桁架与两塔楼的连接节点没有可见破坏,但连体桁架腹杆多处屈曲,连体下部塔楼钢筋混凝土型钢柱转化为钢筋混凝土柱处的梁端发生了较为严重的剪切破坏。

智利地震发生时,某高层连体结构正处于施工阶段,如图9所示。该结构地上22层,地下9层,两侧塔楼由连廊联系在一起。在连廊结构设计中,分别采用了后张预应力技术、隔震技术(图10a)和预留间隙的做法(图10b),以尽可能消除两塔楼相互振动对连体结构的不利影响。然而,智利地震后发现,即使是连体部位进行了特殊的结构处理,两塔楼的相互靠近运动效果仍未能很好的消除,造成连梁与塔楼连接部位形成通长裂缝带(图11)。



图9 连体高层结构立面照片^[4]
Fig.9 Elevation of a multi-tower connected building^[4]

可以看出,虽然国内外工程人员已进行了连体结构抗震性能的研究和设计,但智利地震震害表明,在连体结构设计中应着重研究塔楼相互振动对连体结构的影响、连体结构的竖向振动、塔楼与连体结构连接附近部位节点的有效性等问题,避免连体结构的失效破坏和整体倒塌。

2.3 消能减震高层结构的震害情况

本节介绍一幢带消能减震钢支撑超高层建筑和一幢设有金属球颗粒阻尼器高层建筑在智利地震中的表现。这也是近年来鲜有的经历大地震考验的消能减震高层及超高层结构工程实例。

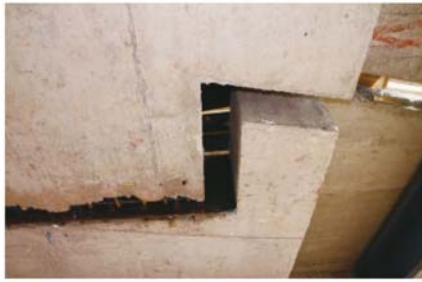
2.3.1 带消能减震钢支撑超高层建筑的震害情况

Titanium Tower(图12)位于智利首都Santiago,其结构地上52层、地下7层,地上结构高度181m。在其相距仅几个街区、高300m、70层的Gran Costanera Tower建造完成前,即将完工的Titanium Tower是目前南美最高的高层建筑。

Titanium Tower为钢筋混凝土框架-核心筒结构



(a) 连体部位的隔震



(b) 连体部位预留间隙

图 10 连体部位的设计^[4]

Fig. 10 Engineering practices of connecting bridge^[4]



图 11 连体部位的破坏^[4]

Fig. 11 Damage pattern of connecting bridge^[4]

体系,楼面为预制板加整浇层(图 13)。在抗侧力设计中,结构横向(短向)设置了被动消能减震装置,安装在管状支撑交叉位置(图 14)。

在此次智利地震中,Titanium Tower 未见任何可见的结构性裂缝及破坏,仅在结构短轴方向 40 层处出现玻璃幕墙脱落的非结构破坏(图 15)。因此表明,Titanium Tower 结构体系设计合理,消能减震支撑的设置可以很好的消耗地震动能量,保护结构主体不发生破坏。

2.3.2 金属球颗粒阻尼器高层建筑的震害情况

颗粒阻尼器是在容器或结构空间中装入一定的颗粒(如金属球、钨颗粒),通过强震作用下颗粒间的内部耗能来实现耗散地震动能量的目的。颗粒阻尼



图 12 南美最高 Titanium Tower 立面照片^[3]

Fig. 12 Elevation of the tallest building in South America-Titanium Tower^[3]



图 13 Titanium Tower 结构体系^[4]

Fig. 13 Structural system of Titanium Tower^[4]

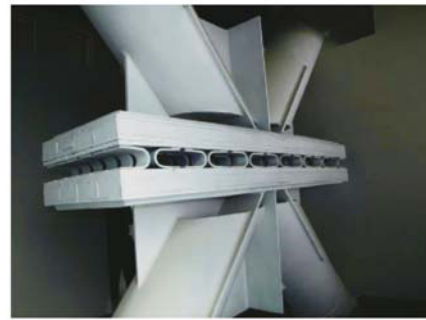


图 14 Titanium Tower 被动消能减震装置^[2]

Fig. 14 Passive energy dissipating system of Titanium Tower^[2]

器的研究始于单颗粒碰撞阻尼,历史上首个单颗粒碰撞阻尼实例出现在 1937 年^[12],用于控制涡轮机叶片的振动。随后国内外研究人员进行了颗粒阻尼器试验和分析的一系列研究,我国学者也逐步开始了颗粒阻尼器的研究工作^[13]。

此次智利地震中,有一幢金属球颗粒阻尼器高层建筑经历了地震考验。Parque Araucano(图 16)位于智利首都 Santiago,该结构地上 22 层、地下 6 层。抗侧力体系为框架-核心筒结构,并在 21 层设有 2 个金

属球颗粒阻尼器箱(图 17),以减小强震作用下的动力反应。智利地震后,考察 Parque Araucano 结构,地上和地下结构均未见任何可见的结构性裂缝。表明结构体系设计合理,金属颗粒阻尼器可以在强震作用下很好的发挥耗能作用,保护结构主体不发生破坏。



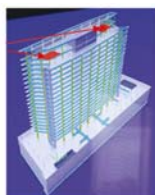
图 15 Titanium Tower 玻璃幕墙的破坏^[2]

Fig. 15 Damages of claddings in Titanium Tower^[2]

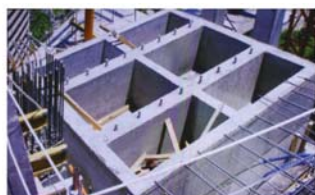


图 16 Parque Araucano 建筑震后立面照片^[4]

Fig. 16 Post-quake view of Parque Araucano building^[4]



(a) 金属颗粒阻尼器箱
安装位置(如箭头)



(b) 金属颗粒阻尼器箱全景图



(c) 金属颗粒阻尼器箱安装图



(d) 金属球颗粒直径示意

图 17 Parque Araucano 颗粒阻尼器照片^[4]

Fig. 17 Metal balls dampers of Parque Araucano building^[4]

3 对我国高层建筑设计启示

本文分别介绍了智利地震中钢筋混凝土剪力墙高层建筑、立面收进复杂高层建筑、连体复杂高层建筑、带消能减震支撑超高层建筑、带金属球颗粒阻尼器高层建筑的震害情况,并进行其震害原因分析。以上分析对我国钢筋混凝土高层及超高层结构设计的启示如下:

(1) 对钢筋混凝土高层规范外延拓展需谨慎

鉴于 1985 年智利地震中剪力墙结构的良好表现,用中低层剪力墙的厚度(200 ~ 250mm)建造高层建筑,造成 2010 年智利地震中数百片剪力墙在轴压比过大、延性过小的情况下发生受压破坏,并给修复工作带来极大的困难。

(2) 构造措施对钢筋混凝土高层影响至关重要

智利震害中的剪力墙结构设计遵循 1996 年智利结构设计规范,其基本方法与美国 ACI 318-95 规范相似,但却允许删除剪力墙边缘约束构件和不必严格满足 ACI 规定。智利规范对构造措施的放松造成数百片剪力墙出现钢筋外鼓、拉断等难以修复的破坏。另外,承包商将剪力墙箍筋 135° 弯钩做成 90° 弯钩也导致了竖向钢筋的严重破坏。剪力墙边缘约束构件构造措施是实现剪力墙抗震性能的基本保证之一,我国必须在未来的钢筋混凝土高层建筑建造中,从设计和施工两方面来确保这一点。

(3) 对复杂及超限高层的抗震性能研究仍需加强

尽管国内外工程人员已经进行了立面收进复杂高层和连体复杂高层结构的抗震性能研究和工程实践尝试,但智利震害表明,这两种结构体系的设计仍存在诸多问题。如:对于立面收进复杂高层结构,收进层及其上下数层的刚度和延性协调仍需精细化的设计分析;对于连体复杂高层结构,塔楼相互振动对连体结构的影响、连体结构的竖向振动、塔楼与连体结构连接附近部位节点的有效性等问题仍未能很好解决。在一定时间内,采用模拟地震振动台试验考察复杂结构强震作用下的破坏模式,仍不失为一种有效的研究手段。

(4) 加强在我国高层及超高层结构中采用消能减震技术

在智利首都 Santiago,地震引发很多钢筋混凝土剪力墙结构发生破坏,然而 Santiago 市内设有消能减震支撑的南美最高的超高层建筑和设有金属球颗粒阻尼器的高层建筑均未发生结构性破坏。我国在未来 10 年内将是全世界高层建造最多的国家之一,加强消能减震高层及超高层的建造,对我国现代高层抗震技术的提升和防灾减灾社会的营建具有不可估

量的作用。

致谢:本文在撰写过程中得到了美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center)、洛杉矶高层结构设计委员会(Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council)的大力支持,特此感谢!

参 考 文 献

- [1] Latin America Herald Tribune. Chile Says Death Toll from February. Quake Stands at 486. 2010[EB/OL]. [2010-12-18]. <http://laht.com/article.asp?CategoryId=14094&ArticleId=354915>.
- [2] Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council. Performance of tall buildings during the 2/27/2010 Chile Magnitude 8.8 earthquake: a preliminary briefing [R]. Los Angeles: Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council, 2010.
- [3] Lew M, Naeim F, Carpenter L D, et al. The significance of the 27 February 2010 Offshore Maule, Chile earthquake[J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2010, 19(8): 826-837.
- [4] Naeim F, Lew M, Carpenter L D, et al. Performance of tall buildings in Santiago, Chile during the 27 February 2010 Offshore Maule, Chile Earthquake. [J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2011, 20(11): 1-16.
- [5] NCh433. Of96 Official Chilean code[S]. Santiago, Chile, 1996.
- [6] ACI 318-95 Building code requirements for structural concrete[S]. 1995.
- [7] Zhou Ying, Lu Xilin, Lu Wensheng, et al. Shake table testing of a multi-tower connected hybrid structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 8(1): 47-59.
- [8] 卢文胜, 苏宁粉, 丁鲲, 等. 立面收进超限高层建筑结构振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(3): 39-44. (Lu Wensheng, Su Ningfen, Ding Kun, et al. Shaking table test on super high-rise building with setback in elevation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(3): 39-44. (in Chinese))
- [9] 侯家健, 容柏生, 韩小雷, 等. 双塔连体建筑的竖向抗震实用设计方法[J]. 建筑结构, 2007, 37(9): 6-9. (Hou Jiajian, Rong Baisheng, Han Xiaolei, et al. Practical design method for large span corridor structure in twin-tower tall building[J]. Building Structure, 2007, 37(9): 6-9. (in Chinese))
- [10] 陈朝辉, 傅学怡, 杨想兵, 等. 型钢混凝土空腹桁架连体结构研究应用; 深圳大学科技楼连体结构解析[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 64-71. (CHEN Chaohui, FU Xueyi, YANG Xiangbing, et al. Study on steel reinforced concrete vierendeel portal structure: portal structure design of Shenzhen University Science and Technology Building[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2): 64-71. (in Chinese))
- [11] 黄志华, 吕西林, 周颖, 等. 双塔连体结构的模拟地震振动台模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 31-38. (HUANG Zhihua, LU Xilin, ZHOU Ying, et al. Shaking table model test of a multi-tower connected structure[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 31-38. (in Chinese))
- [12] Paget A. Vibration in steam turbine buckets and damping by impact[J]. Engineering, 1937, 143: 305-307.
- [13] Lu Zheng, Lu Xilin, Masri Semi F. Studies of the performance of particle dampers under dynamic loads [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(26): 5415-5433.