Characteristics of Vibration of Reinforced Concrete Buildings of Different Ages

Gegentana¹, Narenmandula¹, Hongge Wang¹, Jianzhong Bao², Fengxiang Li²,
KAWASE Hiroshi³, MATUSHIMA Youyichi³

¹College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Natural Disaster
Prevention Research Institute, Hohhot, 010022, China,

²Inner Mongolia Urban Planning & Municipal Engineering Design Research Institute,
Hohhot, 010070, China,

³Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, 611001, Japan

不同年代钢筋混凝土建筑物的振动特性研究

格根塔娜¹, 那仁满都拉¹, 王鸿鸽¹, 包健众², 李凤祥², 川濑博³, 松岛信一³

¹内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古师范大学自然灾害防治研究所,
呼和浩特, 010022, 中国,

²内蒙古城市规划市政设计研究院, 呼和浩特, 010070, 中国,

³京都大学防灾研究所, 611001, 日本京都,

Abstract

In order to determine the vibration characteristics of reinforced concrete buildings of different ages, shapes similar to Hohhot, the same height reinforced concrete building built in different years as the research object, the use of micro-observation methods often mastered the natural cycle of the building. The natural cycle of the building's correlation analysis found that the natural period of the construction of the building's longer have gradually longer trend. Preliminary analysis concluded that the main reason may be the building itself naturally weathered old building leading to the stiffness (or seismic endurance) decreased, while the impact strength of the building material changes brought is not obvious.

Key words: Vibration; Different years; Always jog observation; RC

摘要

为了掌握不同年代钢筋混凝土建筑物的振动特性,以呼和浩特市不同年代建造的形状类似、同等高度的钢筋混凝土建筑物作为研究对象,采用常时微动观测方法获得了建筑物的固有周期。对固有周期与建筑年代相关关系分析,掌握建造年代越久建筑物的固有周期有逐渐变长的趋势。初步分析推断,该趋势的主要原因可能是建筑物本身的自然风化老旧导致建筑刚度(或抗震耐力)逐渐降低,而建筑材料的强度变化所带来的影响不为明显。

关键字: 振动特性; 不同年代; 常时微动观测; 钢筋混凝土

1. 引言

中国是一个地震活动较频繁的国家,我国大陆不但处于环太平洋地震带和欧亚地震带之间,还有印度板块和太平洋板块从南面和东南面的挤压,这种特殊的构造环境使我国成为了一个地震活动频繁的国家。据统计,中国仅占全球陆地面积的 1/15,但是大陆地震却占

全球的 1/3，全国 60% 的国土、50% 的城市、67% 的大城市位于烈度 7 度及以上烈度区之内^[1,2]。我国毕竟还是发展中国家，建筑物的抗震能力、地震灾害预测技术及防御技术与发达国家相比还存在一定的差距。中国中西部欠发达地区是印度板块运动的最大受力区，也是板内地震最活跃，最大受害区，至此，我国中西部欠发达地区将面对的自然灾害挑战会十分严峻，发生破坏性地震的可能性很高，这将对我国可持续发展造成一定负面影响^[1-4]。

改革开放以来，随着社会和经济的快速发展和城市用地的紧张，钢筋混泥土建筑物的兴建愈发猛烈。可是唐山、汶川和玉树等地震灾害告诉我们，建筑物抗震能力低是造成重大人员伤亡和经济损失的主要原因^[5]。一般钢筋混凝土结构的经济寿命为 60 年，住宅的自然寿命一般要大于经济寿命，随着年代的变迁，建筑抗震能力逐渐减少，会导致出现各种安全隐患，加上未来可能发生的地震灾害等不可避免的情况，因此，掌握现有建筑物的抗震能力或抗震能力变化特征是非常重要的任务。目前推测建筑抗震能力一般使用建筑设计材料为基准，但是在建筑使用过程中抗震耐力会出现变化。为了掌握建筑物的现有抗震能力，使用常时微动观测方法的研究在逐渐增多^[6-8]。常时微动观测技术主要应用在地基土划分、地震烈度增量计算、建筑物抗震性能评价、工程场地地震安全评价、滑坡的地质调查等方面，为工程地质以及震害预测等提供基础性资料^[8-10]。吴志坚等人通过对汶川地震的震害调查验证了常时微动观测结果与震后实际情况有一致性^[11]。在 2011 年 ONO 等 e-defense 三维振动台试验结果显示常时微动观测方法能很好地反映足尺钢框架结构的损伤程度和刚度^[12]。可是，目前建筑抗震能力随着建筑年代的变化而变化的研究极少，影响着城市建设和城市管理中防灾减灾政策的导入和实践等。如果掌握建筑物抗震能力随着年代变化而变化的特征，再结合建筑设计材料来推测建筑物当前和未来的抗震能力，可以为城市防灾规划和城市地震安全评估等工作提供科学性依据。

本文为了间接推测建筑抗震能力随着建造年代变化而变化的特征，采用常时微动观测方法，以中西部欠发达地区呼和浩特市为研

究对象，分析形状类似、高度同等、建造年代不同的钢筋混凝土建筑物的固有周期，掌握了不同年代建筑物的固有周期随着年代变化而变化特性，并初步提出建筑物固有周期的建筑年代变化原因要素。

2. 观测建筑概况及其观测数据分析方法

2.1 观测建筑概况及测量步骤

那仁满都拉等在钢筋混凝土建筑物振动特性研究中证实了建筑物的固有周期与建筑物的高度、形状、年代、用途有着密切关系^[9]。因此本文为了避免建筑物的高度及形状对建筑物固有周期产生影响，选择了呼和浩特市区内形状、建造年代不同的 6 层、8 层、11 层和 12 层等几组钢筋混凝土建筑物。表 1 显示对象建筑物的概况。

表 1 观测建筑物的基本信息及固有周期

序 号	建筑 编号	楼 层	建筑 年代	建筑 面积 (m ²)	建筑 形状	建筑 用途	顶层/1层	
							短轴EW	长轴NS
1	HSND01	6	2011	938	长方	住宅	0.30	0.27
2	HSND02	6	2009	516	长方	住宅	0.26	0.27
3	HSND03	6	1997	936	长方	商业	0.29	0.38
4	HSND04	6	2014	598	长方	住宅	0.26	0.24
5	HSND05	6	2014	760	长方	住宅	0.26	0.30
6	HSND06	6	2006	1062	长方	教育	0.41	0.41
7	HSND07	6	2012	891	长方	住宅	0.27	0.26
8	HSND08	6	2011	2546	长方	教育	0.33	0.33
9	HSND09	6	2011	4508	长方	教育	0.37	0.35
10	HSND10	6	2010	3828	长方	教育	0.51	0.42
11	HSND11	6	2000	5842	长方	商业	0.52	0.51
12	HSND12	6	2005	704	长方	教育	0.36	0.36
13	HSND13	6	2009	616	长方	住宅	0.31	0.30
14	HSND14	6	2012	1736	长方	住宅	0.27	0.24
15	HSND15	6	2013	455	长方	住宅	0.25	0.27
16	HSND16	6	2007	1200	长方	写字	0.23	0.33
17	HSND17	8	1995	630	长方	行政	0.49	0.36
18	HSND18	8	1992	861	长方	商业	0.47	0.44
19	HSND19	8	1985	1200	长方	商业	0.45	0.49
20	HSND20	8	2013	576	长方	住宅	0.31	0.46
21	HSND21	8	2007	690	长方	医疗	0.53	0.49
22	HSND22	8	2008	660	长方	住宅	0.34	0.38
23	HSND23	8	1990	648	长方	商业	0.41	0.51
24	HSND24	8	2003	980	长方	商业	0.40	0.42
25	HSND25	8	2008	810	长方	住宅	0.43	0.43
26	HSND26	8	1987	672	长方	教育	0.48	0.41
27	HSND27	8	1999	280	长方	教育	0.44	0.48
28	HSND28	8	2001	1800	长方	行政	0.56	0.40
29	HSND29	11	2013	308	长方	住宅	0.54	0.56
30	HSND30	11	2011	854	长方	住宅	0.54	0.59

31	HSND31	11	2005	289	正方	住宅	0.56	0.62
32	HSND32	11	2011	1040	长方	住宅	0.55	0.45
33	HSND33	11	2004	944	长方	住宅	0.52	0.52
34	HSND34	11	2009	588	长方	住宅	0.47	0.40
35	HSND35	11	2009	770	长方	住宅	0.53	0.51
36	HSND36	11	2011	767	长方	住宅	0.49	0.41
37	HSND37	11	1985	300	长方	商业	0.68	0.71
38	HSND38	11	1986	527	长方	写字	0.67	0.64
39	HSND39	11	2014	957	长方	住宅	0.46	0.36
40	HSND40	11	2008	1320	长方	商业	0.68	0.70
41	HSND41	11	1998	2200	长方	教育	0.65	0.52
42	HSND42	11	2010	559	长方	住宅	0.48	0.46
43	HSND43	11	2010	936	长方	住宅	0.60	0.61
44	HSND44	11	2013	406	长方	住宅	0.42	0.43
45	HSND45	11	2011	336	长方	住宅	0.47	0.41
46	HSND46	11	2010	1053	长方	住宅	0.50	0.37
47	HSND47	11	2002	468	长方	住宅	0.58	0.42
48	HSND48	11	2009	495	长方	住宅	0.45	0.36
49	HSND49	11	2004	1050	长方	住宅	0.58	0.51
50	HSND50	12	2006	972	长方	住宅	0.55	0.46
51	HSND51	12	2005	325	长方	住宅	0.54	0.56
52	HSND52	12	2004	891	长方	写字	0.63	0.60
53	HSND53	12	2013	806	长方	住宅	0.48	0.62
54	HSND54	12	2010	336	长方	住宅	0.55	0.61
55	HSND55	12	2007	1652	长方	住宅	0.61	0.56
56	HSND56	12	1999	1480	长方	写字	0.58	0.76
57	HSND57	12	2002	1584	长方	写字	0.58	0.58
58	HSND58	12	2002	1562	长方	写字	0.72	0.61
59	HSND59	12	2009	1364	长方	写字	0.68	0.67
60	HSND60	12	2004	891	长方	写字	0.63	0.60
61	HSND61	12	2000	814	长方	行政	0.56	0.54
62	HSND62	12	2001	1957	长方	商业	0.78	0.61

本次研究采用了日本应用地质公司制造的常时微动仪,该仪器的3个传感器定制在仪器内部一个可以调平的钢板上面,可以测到两个水平方向(NS和EW方向)和一个垂直方向(UD方向)的加速度成分,采样频率为200Hz。观测在白天进行,3台常时微动仪分别放置在建筑物的1层(1F)、顶层(R)和外面的自由地面(G),图1显示常时微动仪观测时的位置图。仪器放置的NS和EW方向需和建筑物的长轴和短轴方向相对应,一层和顶层的仪器要尽量相互垂直,并靠近建筑物的承重墙或柱子等主要结构。选定外面的自由地面的位置时要注意避免地窖、管道以及地下车库等空地,需放置在离建筑物3米以外的自然地面上。此外,需要用GPS控制时间的准确性,3个仪器必须从同一个时间点开始测量,保证数据的同步性。每栋建筑物观测用时15min×2,中间间隔1

到2分钟。需要注意的是在观测过程当中围绕仪器一米之内要避免有人为活动,因为常时微动是一种没有震源的振幅很小的微弱振动,为了数据的精准要保持安静无动态的观测环境。

图1 常时微动仪的位置图

为了更好的掌握建筑物振动特征,采用常时微动仪观测的同时采集了建筑物的面积、建造年代、结构、层数、形状、用途、平面和立面图等基本信息,并对观测建筑物拍照留存。建筑物所在经纬度使用便捷GPS来定位。

2.2 观测数据的处理与分析

首先,把观测得到的30分钟的数据采用搭接50%的观测数据叠加方法,切出时间带为81.92秒的数据。然后从22个时间带中选出没有受干扰的数据进行快速傅立叶变换计算得出它的傅立叶频谱,会出现NS、EW和UD方向的傅立叶频谱。再计算不同方向的建筑物顶层和1层傅立叶频谱比。从NS方向和EW方向傅立叶频谱比中读取第一个高峰值,作为建筑物的长轴(NS)和短轴(EW)的第一自振周期,即建筑物固有周期。

3. 不同年代钢筋混凝土结构建筑物振动特性

按上述常时微动观测数据分析法,分别计算出建筑物的顶层和1层的第一次固有周期,表1列出建筑物的固有周期值。

图2至图5显示6层、8层、11层和12层建筑物固有周期的建筑年代变化趋势。图中横轴代表建筑物建造的年代,竖轴代表建筑物

的固有周期；菱形的图例代表建筑物短轴的固有周期，代表公式为图中公式 y ，圆形图例代表建筑物长轴的固有周期，代表公式为图中公式 w ；直线代表建筑物短轴的固有周期走势，虚线代表建筑物长轴的固有周期走势。从图中可以看出，同层建筑物随着年代的推移，不论短轴还是长轴，建筑建造的年代越久，它的固有周期有变长的趋势。从公式 $T=2\pi(M/K)$ 得知，在质量 (M) 同等的情况下，建筑物的刚度 (K) 和固有周期 (T) 呈反比例关系^[8]。因此，推测建造年代越久建筑物的刚度或抗震耐力就越低，固有周期则越长。另外，因为对象建筑物的数量过少，没能以建筑用途进行分类研究，不同用途的钢筋混凝土建筑物的振动特性或许可能存在差异，在这方面尚需更进一步的分析和研究。

图2 6层建筑物固有周期的建筑年代变化

图3 8层建筑物固有周期的建筑年代变化

图4 11层建筑物固有周期的建筑年代变化

图5 12层建筑物固有周期的建筑年代变化

4. 建筑物固有周期的建筑年代变化原因分析

影响建筑物固有周期变长的原因有很多方面，主要以建筑物当地的自然条件引起的风化老旧、建筑混凝土材料特性变化、建筑结构变化、建筑施工情况和建筑后期保护维修等原因为主。本文中选用的建筑物为结构相同和形状类似的钢筋混凝土框架结构，并且建筑物都分布在呼和浩特市，建筑施工技术和后期管理水平也基本相同，所以可以认为对象建筑物固有周期变化的主要影响原因为建筑物本身的风化老旧和钢筋混凝土材料的进化发展两个要素。

4.1 建筑材料变化对固有周期的影响

为了分析建筑材料对建筑固有周期的影响，对比《混凝土结构设计规范》GB50010-2002和《混凝土结构设计规范》GB50010-2010 发

现, 2010 年以后钢筋混凝土强度等级得到很大提升。新规范明确规定钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C20, 采用高强度级别的钢筋时, 混凝土强度等级还应增加, 钢筋也向高强、高性能方向发展, 淘汰低强度的钢筋, 形成 300、400、500Mpa 强度梯次^[13-14]。因此, 以《混凝土结构设计规范》GB50010-2010 颁布时间为标准, 考虑到建筑施工时间以 2011 年为界限比较建筑物的固有周期, 间接推测混凝土和钢筋的强度提升对建筑振动特性的影响。因为观测数据的限制, 进一步分析了 6 层和 11 层建筑两组数据, 图 6 和图 7 显示 2011 年前后建的建筑物固有周期及其平均趋势线的比较结果。从图中可以看出, 2011 年之后的建筑物的固有周期趋势线整体偏低与 2011 年之前的建筑物的固有周期趋势线。该趋势可能反映着混凝土强度等级和钢筋强度提升所引起的建筑固有周期变化情况。但无论 2011 年前建的或者后建的建筑物的固有周期随着建筑建造年代的变化而变长, 因此, 可以初步推断为钢筋混凝土的强度提升对建筑固有周期随着建造年代变化而变长的趋势有影响, 但不是主要影响因素。

图 6 6 层建筑物固有周期的建筑年代变化

图 7 11 层建筑物固有周期的建筑年代变化

4.2 建筑物本身的风化老旧对固有周期的影响

通过对钢筋混凝土材料风化特征分析发现, 钢筋混凝土结构建筑本身由于时间长了会出现一些缺陷^[15-16]。随着建筑物的使用, 首先, 由于建筑物表面混凝土受到大气、水汽或各种腐蚀性介质的作用产生一系列化学反应, 使混凝土结构开裂、膨胀、溶解受到破坏, 进而使混凝土强度急剧降低。其次, 由于混凝土保护层的破坏深度达到钢筋表面时, 钢筋也受到大气、水汽和各种腐蚀性介质的接触, 导致钢筋强度也逐步降低, 而且钢筋表面的锈蚀产物使钢筋体积变大, 对混凝土保护层产生应力, 从而导致混凝土产生进一步破坏。在如此风化老旧的循环作用下, 导致整体钢筋混凝土建筑的刚度和抗震耐力降低, 使建筑固有周期变长。

以上结论, 初步推断建筑物的自然风化老旧对建筑物的刚度和抗震耐力的影响较大, 因此, 从观测数据中得到建造年代越久的钢筋混凝土建筑物的固有周期有逐渐变长的趋势。

5. 总结

本文以呼和浩特市不同年代建造的形状相似、同等高度的钢筋混凝土建筑物作为研究对象, 采用常时微动观测方法, 掌握了建筑物随着年代变化的固有周期的变化特征。通过分析 6 层、8 层、11 层和 12 层等四组建筑物的固有周期发现, 得知建造年代越久建筑物的固有周期有变长的趋势。初步分析推断, 导致上述结论的主要原因为建筑物本身的自然风

化老旧导致建筑刚度或抗震耐力逐渐降低,而钢筋混凝土材料的强度变化所带来的影响不为明显。该建造年代越久建筑物的固有周期有变长的趋势,可结合建筑设计材料来推测建筑物当前抗震能力和未来的抗震能力变化,为城市地震安全评估工作等提供科学依据。今后,增加建筑设计与施工材料、建筑物数量和用途等详细设置条件,对钢筋混凝土建筑物的振动特性进行更进一步详细研究,掌握建筑物刚度或抗震能力的建筑年代变化而变化趋势。

Acknowledgements

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (41461101), and The Project Sponsored by the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry, and The introduction of high-level scientific research personnel project start-up funds, Inner Mongolia Normal University(YJRC12005).

致谢

本研究得到国家自然科学基金项目(41461101),教育部留学回国人员科研启动基金资助项目,内蒙古师范大学高层次人才科研启动经费项目(YJRC12005)的资助。

参考文献

- [1]聂高众,高建国,马宗晋.中国未来10~15年地震灾害的风险评估.自然灾害学报,2002,11(1):68-73.
- [2]科技部国家计委国家经贸委灾害综合研究组,灾害,社会,减灾,发展.北京:气象出版社.2000.
- [3]聂高众,高建国.21世纪中国的自然灾害发展趋势——以地震和旱涝为例.第四纪研究,2001,21(3):249-261.
- [4] J.P. Yan, S.S Li, J. Bai, X.Y. Liu. The spatial symmetry axis of earthquake hazard in China. Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2013, 3(1):59-64.
- [5]赵小凡.浅谈钢筋混凝土结构的发展.建筑与工程,2011,(27):701.
- [6]YAGI Shigehua, TOBITA Jun, FUKUWA Nobuo.Effect of soil-Structure Interaction on Transfer Function Estimation of Low-Rise R.C. Buildings using Microtremor. Journal of Structural Engineering, AIJ, 2000, 46B, 435-444.
- [7]HO Narenmandula, KAWASE Hiroshi. Evaluation of Earthquake Response and Dynamic Characteristics of RC and Wooden Buildings in FUKUKA city Obtained from Aftershocks of the West off FUKUKA Earthquake and Microtremor Data. Journal of Structural and Construction Engineering. AIJ, 2006, 605, 63-70.
- [8]那仁满都拉.基于常时微动观测的钢筋混凝土建筑物振动特性及其地域差异.振动与冲击,2016,35(4):22-27.
- [9]陈宏林.工程地震勘察方法.地震出版社.1998.
- [10]布仁.基于常时微动观测的呼和浩特市地基土振动特性及分类研究.内蒙古师范大学学报自然版,2004,43(1):86-91.
- [11]吴志坚,车爱兰,王兰民,等.常时微动测试在汶川地震甘肃灾区建筑结构震害调查中的应用.西北地震学报,2009,31(1):87-90.
- [12]Masaru ONO,KenjiKANAZAWA.Seismic Damage Detection of A High-Rise Steel Building on the Full-Scale Shaking Table Test. Journal of Structural and Construction Engineering. AIJ, 2011, 662, 775-783.
- [13]《混凝土结构设计规范》GB50010-2002.
- [14]《混凝土结构设计规范》GB50010-2010.
- [15]赵国藩.钢筋混凝土结构发展现状及展望.中国土木工程学会第八届年会论文集.1998.
- [16]陈合成,葛培华,刘军.钢筋混凝土的腐蚀与防护.石油化工腐蚀与防护,2003,20(6):10-13.