

那仁满都拉, 格根塔娜, 于欣冉, 等. 基于常时微动观测的城市建筑物共振效应评价及地震安全韧性提升研究[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 68–74. [Narenmandula, Gegentana, YU xinran, et al. Evaluation of Urban Buildings Resonance Effects and its Seismic Resilience Improvement Based on Microtremor Observation[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 68–74. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.011.]

基于常时微动观测的城市建筑物共振效应评价及地震安全韧性提升研究^{*}

那仁满都拉¹, 格根塔娜¹, 于欣冉¹, 宝音图², 郭恩亮¹, 韩晓明³, 杨永胜⁴

(1. 内蒙古师范大学 地理科学学院 内蒙古自治区蒙古高原灾害与生态安全重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022;
2. 内蒙古大学, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特 010000;
4. 内蒙古城市规划市政设计研究院有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘 要: 为了掌握呼和浩特市建筑结构及场地的共振效应, 以代表性钢筋混凝土结构和整体城区场地为研究对象, 通过实地调查和常时微动观测收集数据, ①分析不同建设年代、楼层和形状的 431 栋建筑物的结构自振周期及其振动特性, 并通过 214 个场地的固有周期, 推测整体城区场地固有周期及其分布规律。②对未来地震中观测建筑物的潜在共振风险进行等级划分, 发现高、中、低风险等级的建筑物分别占 21%、15%、64%。③在研究结果的基础上, 提出地震安全韧性提升方法, 从而为呼和浩特市地震安全与防震减灾工作提供科学依据。

关键词: 共振效应; 地震安全韧性; 钢筋混凝土结构; 常时微动观测; 呼和浩特市

中图分类号: TU375; TU352.11; X43; X915.5; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)03-0068-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.011

除地震构造环境外, 城市所处的场地条件也是震害的重要影响因素之一。场地地基土的种类与厚度不同, 对上部结构造成的破坏程度也存在很大差异^[1]。当结构自振周期与场地固有周期近似或相等时, 地震中可能会引发共振效应, 加剧建筑物的受损程度。例如, 1996 年包头 6.4 级地震发生后, 距离震中较远的东河区的房屋受损情况, 要比震中附近的青山区和昆区的同类房屋更严重^[3]; 2008 年汶川 8.0 级地震发生时, 距离汶川 750 km 之外的西安地区震感强烈, 部分建筑物因共振效应受损^[4-5]; 1967 年委内瑞拉 6.5 级地震中, 加拉加斯市建在深覆盖层(230~300 m)上的高层建筑(14~24 层)有 80% 都严重损毁, 而该地区的一般多层建筑和建在浅覆盖层上的高层建筑却几乎完好无损^[6-7]; 1985 年墨西哥 7.8 级地震发生后, 距离震中 400 km 之外、位于松软沉积层之上的墨西哥城的损失, 远大于西部距离震中更近的沿海四个州的损失^[8-9]; 2011 年东日本 9 级大地震中, 大阪政府 55 层办公楼因自振周期与场地固有周期接近而破坏严重, 从北部山区到南部沿海地区, 高层建筑破坏情况逐渐加重^[10]。因

此, 为了保障人民群众的生命财产安全, 最大程度降低地震灾害影响, 在进行建筑平面布局和抗震设计时应尽量避免建筑结构的自振周期接近或等于场地固有周期^[11-12]。

在场地与地震的关系方面, 现有研究多围绕常时微动观测、土与结构相互作用和场地土特性等方面展开。结果表明场地土越软, 地震动蕴含能量越大, 建筑物的震害越明显^[13-15]。同时, 众多学者也从多方面对不同建筑进行了抗震性能研究。2004 年蔡元奇等^[11]从地震作用的特征出发, 研究了不同结构自振周期与场地固有周期的比值对建筑物抗震能力的影响; 2005 年刘俊杰等^[12]通过观测实际建筑, 分析了场地固有周期与结构自振周期产生共振效应的关联性; 2008 年陈敏思^[16]得出温州市高层建筑的自振周期, 并对场地进行归类和特征分析, 发现强地震动会引起高层建筑物发生共振效应; 叶建庆等^[17]根据 2008 年汶川地震的地震记录, 证实了震害与地震卓越周期之间存在相关性关系。那仁满都拉等^[18-20]采用常时

^{*} 收稿日期: 2023-01-18 修回日期: 2023-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41967056); 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0047); 内蒙古自治区科技成果转化专项项目(2019GG015)

第一作者简介: 那仁满都拉(1974-), 男, 蒙古族, 内蒙古通辽人, 博士, 教授, 主要从事城市综合防灾减灾研究。

E-mail: nm2050@163.com

通信作者: 宝音图(1980-), 男, 蒙古族, 内蒙古通辽人, 博士, 副教授, 主要从事地震灾害评估与减灾对策研究。

E-mail: baoyintu@imu.edu.cn

微动观测方法, 分析了不同结构、不同地区的建筑物和场地的振动特性。

呼和浩特市位于华北地震区西北部河套断裂带的凹陷地段。市区附近的大青山山前断裂全长约 200 km, 在晚更新世时期到全新世时期曾多次发生古地震。呼和浩特市附近也曾多次发生地震, 例如 1929 年毕克齐 6 级地震、1976 年和林格尔 6.3 级地震、1996 年包头西 6.4 级地震, 因此其具备发生 7 级以上大地震的构造背景。且呼和浩特段断裂和毕格齐段断裂均已超过其特征地震复发间隔周期, 呼和浩特市已经成为未来发生地震的高风险地区^[21]。为此, 本文以呼和浩特市市区所占建筑物比例最高的钢筋混凝土结构与其所在场地为研究对象, 采用常时微动观测与实地调查方法, 首先分析代表性建筑的结构自振周期及其振动特性和城区场地固有周期及其分布规律。其次根据观测数据和建筑设计规范等资料, 对所观测建筑划分未来地震中可能产生共振效应的风险等级。最后, 从观测建筑物与场地振动特性和避免共振效应的角度提出地震安全韧性提升方法, 从而为呼和浩特市地震安全与防震减灾工作提供科学依据。

1 常时微动观测及数据处理

1.1 观测概况及观测方法

为了掌握钢筋混凝土结构的整体特征, 选择均匀分布在呼和浩特市区的 431 栋不同建设年代、不同楼层和不同形状的钢筋混凝土结构(图 1)进行研究。建筑结构的观测时间选在风力较小且无雨的白天。观测场地以覆盖整个建成区为原则, 场地的布局呈“田”字形, 以 500 m 为间距, 沿东西方向依次命名为 EW1、EW2、EW3、EW4 线, 沿南北方向依次命名为 NS1、NS2、NS3、NS4 线, 共计 214 个场地观测点, 总线长约 100 km。场地的观测时间选在无雨、微风、晴朗的 22:00 - 07:00。

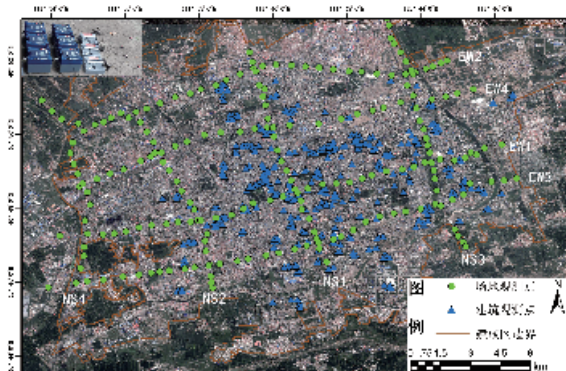


图 1 结构和场地观测点及观测设备

使用的仪器包括电子数据记录器、校正时间的 GPS 天线和日本应用地质公司生产的常时微动仪(McSEIS-MT NEO)(图 1 左上角所示)。该仪器内装有一块可调平的钢板, 上面固定着 3 个传感器, 可以观测南北和东西两个水平方向(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 200 Hz。每栋建筑使用 3 台常时微动仪, 分别放在建筑 1 层(1F)、顶层(R)(或屋顶)

和距离建筑 3 ~ 30 m 远的自由地面上(G)。仪器的布置如图 2 所示。应注意仪器的 NS 和 EW 方向要分别与建筑物的短轴和长轴方向一致, 1 层和顶层的仪器需要靠近承重墙或柱子等主体结构放置, 并保持在一个铅直线上。在选择自由地面时, 应避免将仪器布置在地下空间, 如地窖、管道、车库等。此外, 3 台仪器通过连接的 GPS 天线确保从同一时间点开始测量, 观测时间为 30 ~ 60 min/栋。

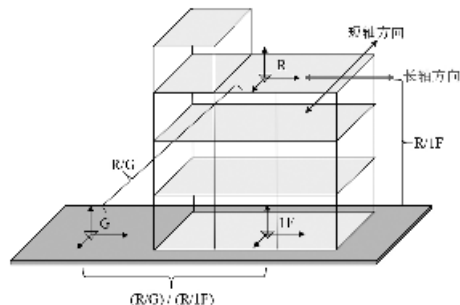


图 2 常时微动仪设置示例

1.2 测量数据处理方法

建筑观测数据处理时, 首先采用搭接 50% 的方法切出时间带为 81.92 s 的数据。其次对各时间带的数据进行快速傅立叶分析得出 NS、EW 和 UD 方向的傅立叶频谱。最后, 分别计算长轴(NS)和短轴(EW)方向的结构顶层和 1 层的傅立叶频谱比, 即顶层/1 层频谱比^[18]。从频谱比中读取最大值对应的周期, 作为该结构的自振周期, 共获取了 431 栋建筑短轴和长轴方向的结构自振周期。因部分建筑物周边的场地振动受地下停车场等地下结构物的影响, 最终获取了 340 栋建筑物周边的自由地面(G)的观测数据, 按照上述方法读取 340 栋建筑短轴和长轴方向的顶层/地面频谱比的自振周期。

场地观测数据处理时, 首先采用搭接 50% 的方法切出时间带为 81.92 s 的数据, 对各时间带的数据进行快速傅立叶分析, 获得 2 个水平和 1 个垂直成分的傅立叶频谱。然后剔除含干扰数据的时间带, 对其余时间带进行快速傅立叶变换, 对傅立叶频谱施加幅度约为 0.1 Hz 的平滑化处理。最后, 使水平分量谱(H)和垂直分量谱(V)相除得到 H/V 谱比, 从 H/V 频谱中读取最大值对应的周期, 作为该观测点的场地固有周期^[19]。

2 钢筋混凝土结构的振动特性分析

2.1 不同楼层、高度的结构振动特性

图 3 和图 4 分别显示了不同层数和不同高度的结构自振周期及其变化趋势线。由图 3 和图 4 可知, 结构高度越高或层数越多, 其短轴和长轴方向的固有周期越大。结构的自振周期由质量和刚度决定, 随着建筑高度、楼层数的增加, 结构质量(或刚度)也会发生变化, 因此结构自振周期与建筑高度和层数之间存在显著的相关性关系。观测结构自振周期 T 与建筑层数 N 之间的线性关系:

$$T_s = 0.053N + 0.009; \quad (1)$$

$$T_l = 0.043N + 0.071. \quad (2)$$

自振周期 T 与建筑高度 H 之间的线性关系:

$$T_s = 0.016H - 0.021; \quad (3)$$

$$T_l = 0.013H + 0.043. \quad (4)$$

式中: T_l 为结构长轴方向的自振周期, T_s 为结构短轴方向的自振周期。图 3 和图 4 还分别展示了《建筑结构荷载规范: GB50009—2012》^[21] 中给出的高层建筑钢筋混凝土结构的自振周期经验公式 ($T = 0.05 N$) 和吴明军^[23] 估算的高层钢筋混凝土框架结构基本自振周期公式 ($T = 0.014 N$) 的趋势线, 获得结果在结构层数与高度方面均与其呈现出良好的一致性。

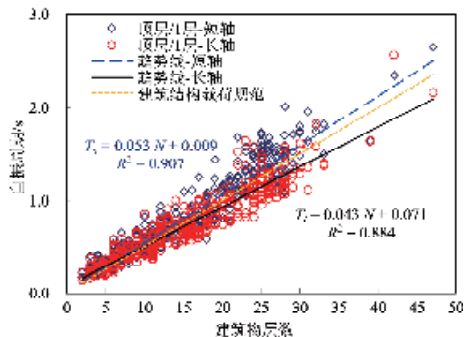


图 3 不同层数的结构自振周期

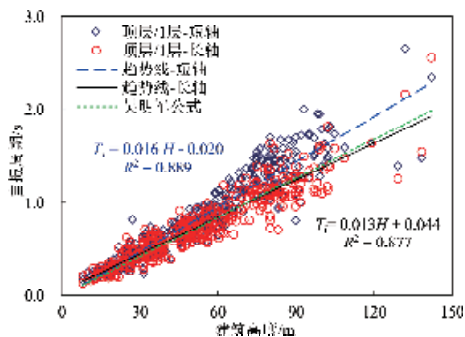


图 4 不同建筑高度的结构自振周期

2.2 不同建筑形状的结构振动特性

随着社会经济发展和人们对建筑物的审美需求日益提升, 建筑形状也逐渐复杂化。这不仅会增加建筑造价, 还会影响结构的抗震安全性能。规则建筑指长方形和正方形建筑, 不规则建筑指 L 形或 U 形等形状复杂的建筑。以 5 层和 6 层的钢筋混凝土结构为例, 计算不同形状的结构自振周期及其平均值, 如图 5 所示。可知不论在建筑的哪个方向, 均为不规则建筑的平均自振周期大于规则建筑的平均自振周期。该结果表明建筑形状复杂化会影响建筑结构的振动特征。

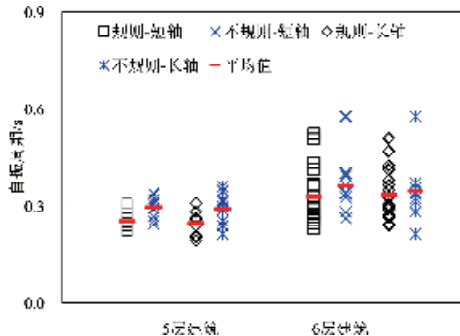


图 5 不同形状的结构自振周期比较

2.3 建筑短轴方向和长轴方向的结构自振周期比较

图 6 为建筑短轴和长轴方向的自振周期比较结果。可知观测的大多数结构在短轴方向的自振周期比长轴方向的自振周期略大或接近一致。由此可推测, 建筑不同方向柱、梁、承重墙等主体结构和非主体结构不同, 建筑短轴方向和长轴方向的振动特征也不同。

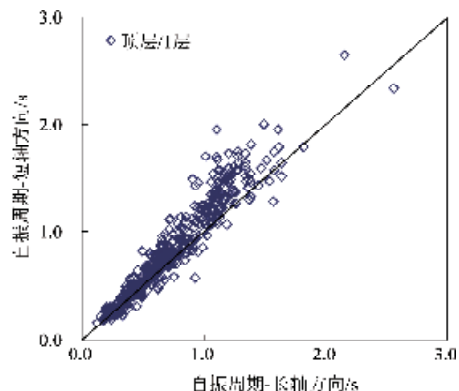


图 6 建筑短轴和长轴方向的结构自振周期比较

2.4 结构与场地相互作用的分析

结构与场地之间相互作用的大小常借助结构顶层/1 层频谱比的自振周期与结构顶层/地面频谱比的自振周期之比表示。若两者相互作用值为 1, 则结构与场地的相互作用为零; 作用值越趋近 1, 结构与场地的相互作用越小; 作用值越偏离 1, 结构与场地的相互作用越大^[18]。观测到的 340 栋建筑结构与其所处场地的相互作用关系及整体趋势线如图 7 所示, 大部分结构与场地之间的相互作用值在 0.9~1.0 之间, 并且越高的建筑与场地相互作用越小。由此可推测, 除了个别建筑的结构与场地之间的相互作用偏大外, 大部分建筑的结构与场地之间的相互作用并不明显, 这可能与研究区场地类型和代表性建筑的结构高度有关。

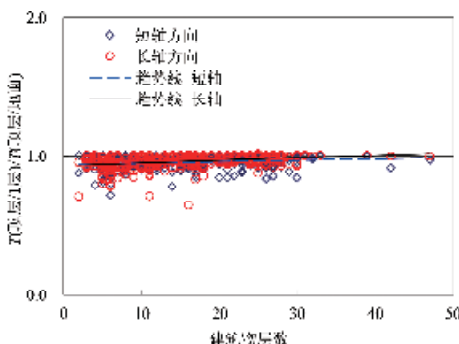


图 7 结构与场地的相互作用

2.5 不同建设年代的结构振动特性

随着建筑物使用年份的增加, 结构的振动特征也会发生变化, 因此开展抗震安全监测是十分必要的, 但现实中很难开展长期观测。本文选取的大多数建筑物在 3~33 层之间, 根据结构自振周期与楼层的相关性关系, 可将不同楼层建筑物的结构自振周期转变为 15 层建筑的结构自振周期进行比较。转换后不同建设年代的 15 层建筑的结构自振周期变化趋势如图 8 所示。由图 8 可知, 建成

年代越久的建筑, 其结构的自振周期越大。引起这一变化趋势的原因, 除了与结构抗震设计规范的变化、经济条件等因素有关外, 还与混凝土材料的性能随着时间推移逐渐劣化致使刚度降低有关^[24]。

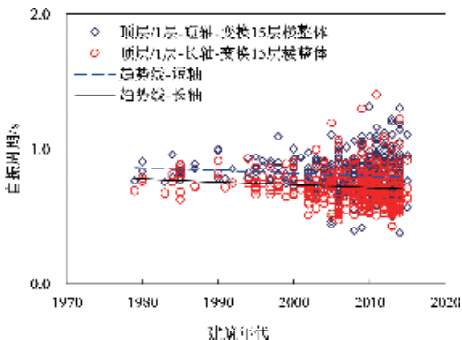


图8 不同建设年代的结构自振周期比较

3 城区场地的振动特征分析

按前述数据分析方法计算出城区场地 214 个固有周期值如图 9 所示, 场地的固有周期在 0.21 ~ 1.25 s 之间, 从北到南、从东到西呈逐渐变长的趋势。该变化趋势与观测区地形地貌变化相吻合, 即城市北部以大青山山前坡积物为主、海拔相对较高的地区, 场地固有周期偏小, 到城市南部以平原沉积物和河流冲积物为主、地势低平的地区, 场地固有周期逐渐变大, 而到城市西南部地区, 场地固有周期则达到最高值。

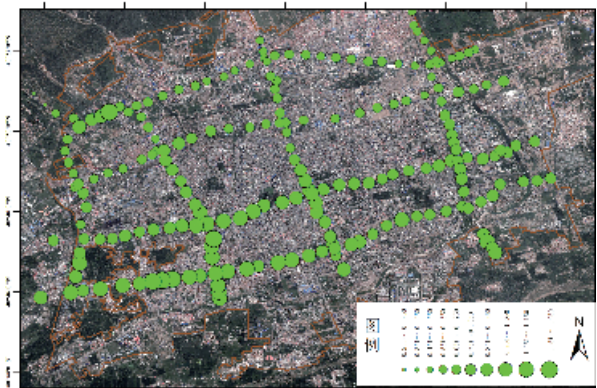


图9 城区场地固有周期分布图

为了掌握城区整体场地振动特征, 利用 ArcGIS 软件对观测点的固有周期值进行插值处理, 得到固有周期等值线图(图 10), 从而推断出未知场地的固有周期。由场地固有周期的计算公式 $T_s = 4H/V_s$ (H 为覆盖层厚度, V_s 为土层平均剪切波速)可知, 当土层平均剪切波速一定时, 场地覆盖层越厚, 场地固有周期越大。呼和浩特市地处华北断块西北部中河套断陷东段的呼包断陷盆地东北部, 在地质历史变化中沉积了较厚的第四纪沉积物, 并由东北向西南方向逐渐加厚。研究区第四纪中更新世的等深线图^[25]如图 11 所示, 与图 10 对比可以发现, 场地固有周期分布与沉积物厚度分布具有较好的一致性, 这表明场地固有周期较

好地反映了场地土层厚度及其振动特性。

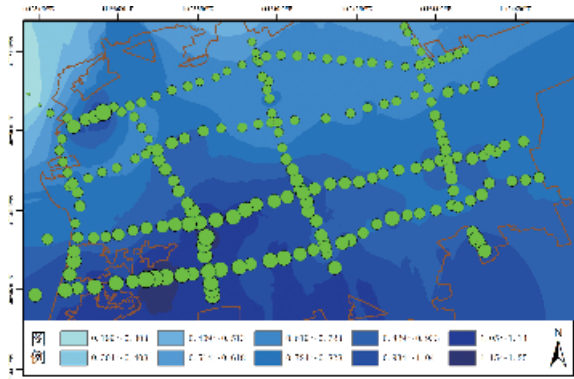


图10 场地固有周期等值线图

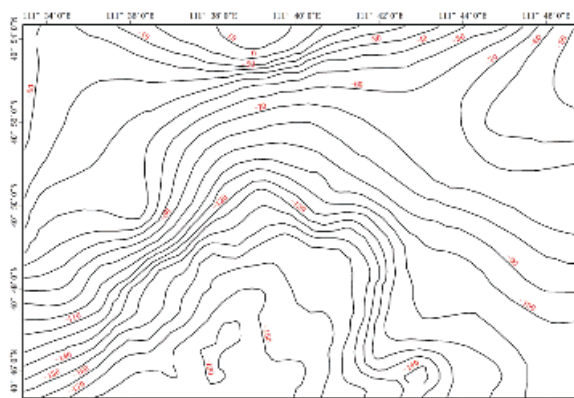


图11 第四纪中更新世(Q₂)等深线图

4 建筑物共振效应评价及地震安全韧性提升建议

4.1 共振范围确定及共振效应风险评价

目前我国建筑与场地共振范围标准多参考国外成果^[26]。蔡元奇认为建筑的自振周期和场地固有周期并非越远越好^[11]。GOSAR 将建筑自振周期远离场地固有周期 $\pm 15\%$ 以内定为共振风险较高, $\pm 15\% \sim 25\%$ 以内为中风险, 超出 $\pm 25\%$ 为低风险^[28]。魏立金指出建筑自振周期最好远离场地固有周期 10% 以上, 并强调建筑破损时会出现固有周期加长现象(图 12 上部分)^[28]。综合考虑以上成果, 可将共振点两侧依次选取 10% 的区间定为高、中风险共振范围。但考虑到建筑破损时自振周期的加长会使得部分中风险共振建筑在震时转变为高风险共振建筑, 因此在共振点左侧多选取 5% 的高风险共振区间, 最终共振范围如表 1 和图 12 下部分所示。共振范围计算公式 $D = T_b/T_g$, T_b 为结构自振周期, T_g 为场地固有周期, D 为共振范围。

表1 共振风险等级划分

共振范围	风险等级	建筑比率/%
$0.85 < D \leq 1.1$	高	21
$0.75 < D \leq 0.85, 1.1 < D \leq 1.2$	中	15
$D \leq 0.75, D > 1.2$	低	64

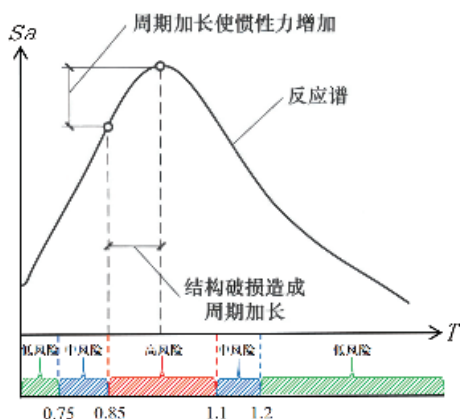


图 12 结构自振周期与场地固有周期的关系及共振范围

由表 1 可知, 实测 340 栋建筑物中, 共振风险等级为高、中和低的建筑物所占比例分别为 21%、15% 和 64%, 对象建筑物的共振风险等级分布如图 13 所示。抗震设计时, 应使建筑物自振周期避开场地固有周期, 以免发生共振效应, 但是实测结果表明, 建筑物的结构自振周期与对应场地固有周期相等或接近的比率较高, 这可能与研究区域建筑物施工技术水平落后和老旧建筑物较多有关。此外, 该场地位于呼包断陷盆地的东北部, 沉积物厚度达到 200 m, 因此场地固有周期较长, 更易接近既有建筑物的自振周期。

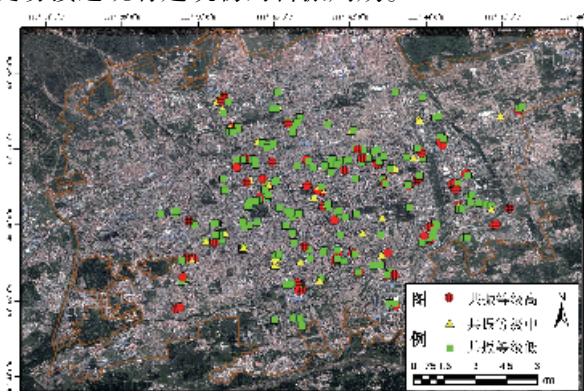


图 13 共振风险等级划分图

4.2 地震安全韧性提升建议

为了降低建筑结构在地震中的破坏概率、减轻结构破坏程度, 本文主要围绕基础工作调研与方法应用、既有建筑维护预防和未来建筑规划设计等方面提出地震安全韧性提升建议。

(1) 进一步透明化城市场地振动特征。由图 10 可知, 城市场地振动特征分布不均匀, 这代表未来地震中城区不同地点或不同街道的地面震动会存在差异。并且对于像研究区这样的断陷盆地或海岸等沉积物较厚的地区, 未来地震中除了会产生共振效应外, 场地本身还具有放大地震动效应的风险^[11]。因此, 今后在城市地震安全评价工作中应全面考虑城市场地沉积物厚度、介质类型及其振动特性。

(2) 应用常时微动观测方法可有效提升城市群抗震韧性评估精度。由观测建筑物振动特性的分析结果可知, 不同建筑年代、高度和形状的建筑物的振动特性不同, 并且对于相同层数(高度)的建筑群, 仍有大量建筑物的自振周期不符合《建筑结构荷载规范: GB50009—2012》中的设计自

振周期。正是因为实际中城市建筑物的多样性和复杂性, 建筑群抗震评估的准确性很难得到提升。而常时微动观测方法能掌握不同既有建筑物的振动特性, 能为建筑物的实际抗震能力推测提供实测数据支撑, 从而提升城市抗震评估精度。

(3) 检测鉴定既有高风险共振建筑物的抗震安全性。观测的建筑群中, 21% 的建筑物属于高风险共振等级, 对于城市整体建筑群, 高风险建筑总数偏多。建议政府及相关研究部门加强该类建筑物抗震安全性评估及维护管理的工作力度, 尽快核实共振效应是否存在加重地震中灾情的风险。

(4) 在今后城市建设规划中优化建筑布局策略。为避免未来建筑设计规划中发生共振效应, 提出以建筑高度为调控的建筑布局规划策略。在城区场地固有周期(图 10)基础上, 应用前述长轴和短轴方向上的建筑高度与自振周期线性关系函数, 计算未来地震中城区场地可能发生共振效应($D=1$)的建筑物高度(图 14)。由图 14 可知, 市区最北部应避免建设 36~44 m 的建筑, 北二环路两侧应避免建设 40~55 m 的建筑, 中部区域应避免建设 49~60 m 的建筑, 南部区域应避免建设 57~70 m 的高层建筑, 特别是部分西南区域, 不宜修建 70 m 以上的高层或超高层钢筋混凝土结构的建筑。

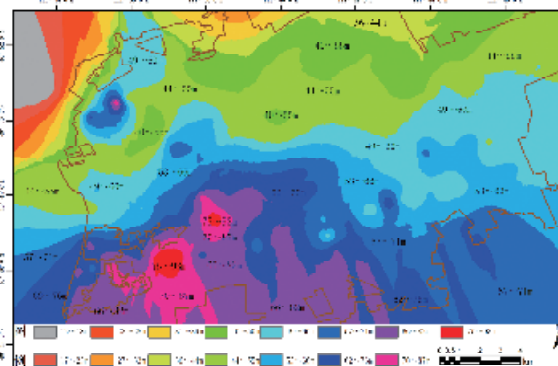


图 14 易共振建筑物高度分布图

5 总结

本文以筛选出的呼和浩特市不同楼层数、高度、形状和建设年代的 431 栋代表性钢筋混凝土结构和整个建成区的场地为研究对象, 通过实地调查与常时微动观测, 对结构的振动特性进行了分析和归纳。同时, 在研究结果的基础上, 提出了地震安全韧性提升方法。

(1) 钢筋混凝土结构的振动特性有: ①高度越高的结构, 其自振周期越大; ②层数相同的结构, 建成年代越早, 自振周期越大; ③不同形状的结构, 其振动特性不同; ④大多数建筑短轴方向的自振周期比长轴方向的自振周期略大或基本相同; ⑤除个别结构与场地的相互作用较大之外, 大部分结构与场地相互作用较小或可忽略不计。

(2) 城区场地的固有周期在 0.21~1.25 s 之间, 由北向南、由东向西有逐渐变长的趋势。该趋势与地形地貌和沉积物厚度分布规律一致, 即在大青山山前坡积物较厚、海拔较高的城市北部地区偏小, 在地势平坦的城市南部逐渐变大, 从中心城区至城市西南部地区, 场地的固有周期逐渐达到最高值。

(3)划分了 340 栋建筑在未来地震中可能产生共振效应的高、中、低风险等级,各风险等级的建筑所占比例分别为 21%、15% 和 64%。虽然抗震设计时,应使建筑物自振周期避开场地固有周期,但是实测结果表明,建筑物的结构自振周期与对应场地固有周期相等或接近的比率较高。

(4)从观测建筑物与场地振动特性和避免共振效应的角度出发,提出了地震安全韧性提升方法,从而为城市建筑群地震安全与防震减灾工作提供参考依据。

目前的技术水平和手段方法尚不能完全掌握城市建筑物自振周期的长期变化等问题,无法充分考虑到场地对建筑布局可能造成的共振影响。今后将继续对建筑群的抗震能力、场地增幅特征和震源影响等重要因素进行研究,为城市防震减灾做出力所能及的贡献。

参考文献:

- [1] 蒋维强,欧阳立胜. 场地卓越周期与设计特征周期的关系研究[J]. 工程抗震, 2004(2): 46-49.
- [2] 王国新,黄坤朋. 表层土结构对地表地震动的影响研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(5): 33-40.
- [3] 方崇. 基于城市建设地基土细观结构与场地自振特性变异的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
- [4] 门进杰,史庆轩,陈曦虎. 汶川地震对远震区高层建筑造成的震害及设计建议[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2008, 40(5): 648-653.
- [5] 陈平,吴博. 汶川地震中西安高层建筑震害调查及分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(2): 60-62.
- [6] 孙小鹏,冯柏林. 深软土地场上高层住宅的地震安全性问题[J]. 地震学刊, 1999(3): 1-5.
- [7] 李凡. 天津软土地场地震动特性对高层建筑的影响[J]. 天津城建大学学报, 2004, 10(1): 21-24.
- [8] MENDOZA M J, AUVINET G. The Mexico earthquake of september 19, 1985—behavior of building foundations in Mexico city[J]. Earthquake Spectra, 2012, 4(4): 835-853.
- [9] 刘莉,陆栋梁,王飞,等. 墨西哥地震对六安市抗震设防的启示[J]. 中国应急救援, 2015(4): 51-52.
- [10] 张令心,王婷,董本勇. 远场地震动对高层建筑地震反应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2014(S1): 445-554.
- [11] 蔡元奇,韩芳,朱以文. 场地卓越周期与结构基本周期关系研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(4): 70-74.
- [12] 刘俊杰,王家全. 场地卓越周期的讨论与场地建筑的共振现象[J]. 广西科技大学学报, 2005, 16(3): 47-50.
- [13] 张继文. 远场地震动作用下土-结构相互作用对深厚土层上高层建筑的影响[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011.
- [14] 张孝奎,陈丽梅,张盈,等. 远震对软土地高层建筑的抗震影响研究[C]//转型与重构: 2011 中国城市规划年会论文集. 南京: 东南大学出版社、东南大学电子音像出版社, 2011: 445-554.
- [15] 陈国兴,刘薛宁,朱姣,等. 深厚松软场地卓越周期与地面峰值加速度的空间变异特征: 以苏州为例[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 976-1004.
- [16] 陈敏思,史文海,阮长锋. 温州市高层建筑动力特性的脉动测试研究[J]. 中国水运: 下半月, 2008(4): 89-91.
- [17] 叶建庆,苏金蓉,陈慧. 汶川 8.0 级地震卓越周期分析[J]. 地震研究, 2008, 31(S1): 498-504.
- [18] 那仁满都拉,布仁,川瀨博,等. 基于常时微动观测的钢筋混凝土建筑振动特性及其地域差异[J]. 振动与冲击, 2016, 35(4): 27-32.
- [19] 布仁,那仁满都拉,包玉海,等. 基于常时微动观测的呼和浩特市地基地土振动特性及分类研究[J]. 内蒙古师范大学学报, 2014, 43(1): 86-91.
- [20] 那仁满都拉,满特格尔,布仁,等. 基于常时微动观测的砖混结构建筑振动特性及其推断抗震能力的简易方法研究[C]//中国灾害防御协会风险分析专业委员会. 风险分析和危机反应中的信息技术论文集. 巴黎: 亚特兰蒂斯出版社, 2014: 708-714.
- [21] 阿那尔. 基于简易法的呼和浩特市地震灾害损失预测[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2013: 1-45.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 中国建筑工业出版社, 北京, 2012: 1-246.
- [23] 吴明军. 高层钢筋混凝土框架结构自振周期估算的研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(10): 57-60.
- [24] 格格塔娜,那仁满都拉,王鸿鸽,等. 不同年代钢筋混凝土建筑的振动特性研究[C]//中国灾害防御协会风险分析专业委员会. 第七届年会论文集. 巴黎: 亚特兰蒂斯出版社, 2016: 830-835.
- [25] 中国地震局地球物理研究所. 呼和浩特市活断层探测与地震危险性评价: 目标区近断层强震动评价[M]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2007.
- [26] 任旋. 基于微振动监测的地基与建筑动力特性及共振效应[D]. 福州: 福州大学, 2016.
- [27] GOSAR A. Site effects and soil - structure resonance study in the Kobarid basin (NW Slovenia) using microtremors[J]. Natural hazards and earth system sciences, 2010, 10(4): 761-722.
- [28] 魏利金. 建筑结构设计规范疑难热点问题及对策[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 68.
- [29] 李文倩,陶正如,姚远,等. 基于 H/V 谱比法的新疆地区不同类别场地地震效应特征研究[J]. 内陆地震, 2022, 36(3): 193-203.
- [30] 李龙,王海云,姜伟平等. 中国仪器地震烈度增量与场地放大系数的关系研究[J]. 世界地震工程, 2022, 38(3): 171-183.
- [31] 陈兰生,冀昆,温瑞智等. 考虑场地放大效应的全国地震危险分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(6): 177-185.

Evaluation of Urban Buildings Resonance Effects and its Seismic Resilience Improvement Based on Microtremor Observation

Narenmandula¹, Gegentana¹, YU Xinran¹, BAO Yintu², GUO Enliang¹,
HAN Xiaoming³, YANG Yongsheng⁴

(1. Inner Mongolia Key Laboratory of Disaster and Ecological Security on the Mongolian Plateau, College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Inner Mongolia University, Hohhot 010020, China; 3. Seismological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010000, China; 4. Inner Mongolia Urban Planning & Municipal Engineering Design Research Institute, Hohhot 010022, China)

Abstract: To grasp the resonance effect of buildings and sites in Hohhot city, field investigation and micromotion observation analyses are carried out on representative reinforced concrete buildings and at many urban sites as the research objects. First, the intrinsic periods and dynamic characteristics of 431 buildings with different con-

struction ages, floors, and shapes and their vibration characteristics are analyzed, and the predominant periods of the 214 sites in the entire urban area and their distribution characteristics are examined. Second, the risk levels of the observed buildings for possible resonance effects in future earthquakes are classified, the results revealed that the risk levels of high and medium buildings account for about 21% and 15% respectively. Finally, based on the results, proposing a seismic safety and resilience enhancement method to provide a scientific basis for seismic safety and earthquake mitigation work in Hohhot city.

Keywords: resonance effect; seismic resilience; reinforced concrete structure; microtremor observation; Hohhot city

.....
(上接第 47 页)

Risk Early Warning of Subway Fire Disaster Under the Concept of Resilience Based on 2 – Dimensional Cloud Model

LIU Jingyan¹, CHEN Jia¹, TIAN Jing¹, ZHAO Liqin²

(1. *Key Laboratory of Building Collapse Mechanism and Disaster Prevention, Institute of Disaster Prevention, China Earthquake Administration, Sanhe 065201, China*; 2. *Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China*)

Abstract: Under the guidance of the concept of disaster resilience, the resilience of the subway fire protection system is analyzed, and the early warning analysis of subway fire risk is carried out. Firstly, the subway fire disaster system composed of the pregnancy environment, disaster – bearing body and disaster causing factors is analyzed, and the subway fire disaster accident is investigated. According to the resilience management 4M1E – 4Rs, the subway fire risk early warning analysis framework is constructed. According to the relevant standards of subway fire prevention and referring to the relevant references of subway fire and fire protection, a subway fire early warning evaluation index system is established. Comprehensively considering the risk possibility and risk consequences in the risk matrix, a two – dimensional cloud model is established for analysis. Taking the risk probability and risk consequence as the dimensions of the two – dimensional cloud model, the entropy weight method and the CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation) method are used to determine the index combination weight. Finally, the cloud generator MATLAB is used to program and calculate the cloud digital characteristics of probability risk cloud and consequence risk cloud, and generate cloud droplets and risk warning cloud maps, and compare them with standard cloud maps. The visual cloud map is combined with the proximity to comprehensively determine the risk warning level. This method is used to analyze the fire risk early warning of a subway station, which provides ideas and methods for the fire risk early warning of the subway.

Keywords: subway fire; disaster risk; disaster resilience; risk early warning; 2 – dimensional cloud model