

研究人防结构与抗震结构设计

文 / 张午原 山东省人民防空建筑设计院有限责任公司

摘要: 南郊马鞍山路片区人防综合工程是一项集紧急掩蔽、物资储备、地下停车等功能于一体的重要城市防御设施。在设计过程中,如何在满足人防工程防护等级要求的同时,兼顾抗震设防需求,实现人防结构与抗震结构的有机结合,是一个需解决的关键问题。本文以该项目为例,提出了人防结构与抗震结构设计相结合的系统解决方案。通过在统一的结构体系中采取针对性措施,从而达到提升人防工程综合防护能力,以期类似人防工程项目设计提供理论依据和实践指导。

关键词: 人防结构; 抗震结构; 防护等级; 抗震性能化设计; 韧性防护

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.01.106

引言

随着我国城市化进程的不断推进,城市人口急剧增长,对城市公共安全提出了更高要求。人民防空工程作为城市防灾减灾体系的重要组成部分,在战时可为人员提供掩蔽场所,平时可作为停车库等公共设施,发挥资源的最大效益。传统的人防工程设计侧重战时防护性能,对平时使用功能考虑不足,难以满足现代城市发展需求。与此同时,我国许多城市位于地震高发区,建筑工程同时面临着地震灾害的严峻考验。

一、项目背景概述与设计依据

(一) 项目背景

南郊马鞍山路片区人防综合工程位于济南市市中区,地处济南市中心城区的核心地带。该区域人口密集,建筑林立,战略地位突出。项目将兼顾城市景观塑造,最大限度减少对地面环境影响。同时,工程将融入海绵城市理念(如图1),通过下凹式绿地、透水铺装等措施,增强区域雨水吸收、蓄存和缓释能力,助力城市生态文明建设,实现人防工程与海绵城市建设的有机结合。

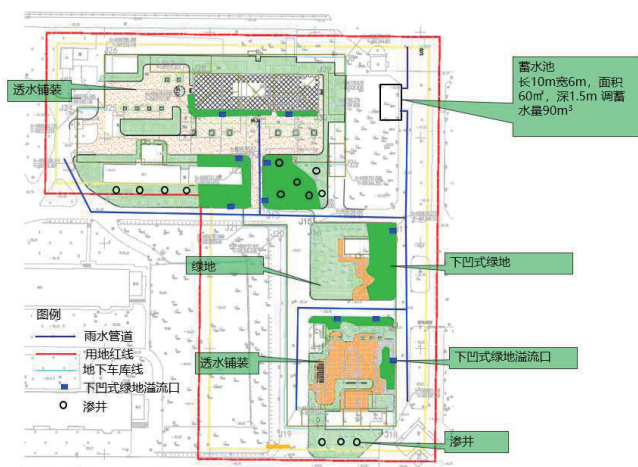


图1: 海绵城市项目设计图

(二) 人防结构与抗震结构设计依据

项目设计严格执行了《人民防空工程设计规范》《人民防空工程防护设计规范》《人民防空工程设计防火规范》等国家现行标准,并结合山东省地方标准,全

面落实人防工程的抗爆、防护、防化、防火等设计要求,从源头确保人防工程防护能力和使用安全。项目设计还必须符合《中华人民共和国人民防空法》《山东省实施〈中华人民共和国人民防空法〉办法》等法律法规,并执行《中华人民共和国城乡规划法》《城市规划编制办法》等规划建设管理法规,确保项目选址、规划、设计、施工等各阶段的工作都能严格依法依规进行。

二、人防结构设计

(一) 总体布局与功能分区

1. 多层次防护体系

南郊马鞍山路片区人防综合工程采用地下三层布局,形成纵深防护、多层次防护的空间格局^[1]。地下一层主要为紧急车辆掩蔽部,划分为两个防护单元,战时可容纳200辆特种车辆(如图2)。地下二层为紧急人员掩蔽部,设置一个防护单元,可容纳掩蔽人数1800人。地下三层兼有一等人员掩蔽和紧急人员掩蔽功能,划分为两个防护单元,掩蔽人数分别为900人和2800人。

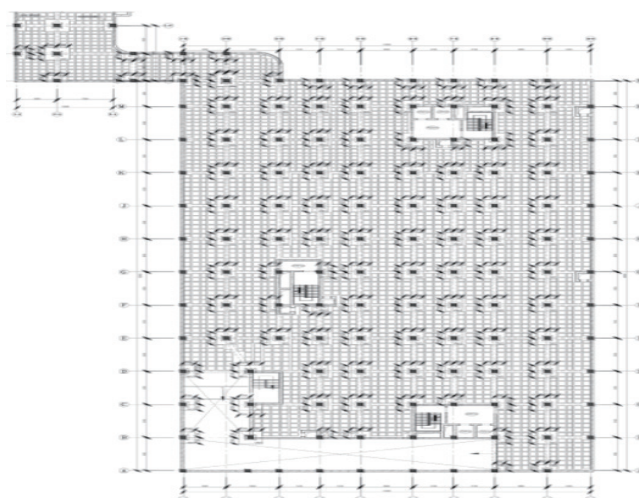


图2: 地下一层结构平面图

2. 灵活连通设计

在总体布局中,地下各层防护单元之间设有连通口,采用“十”字型布置,纵向贯通地下三层,横向连接各防护单元,构建灵活顺畅的内部交通网络^[2]。战时

可实现人员快速疏散和物资调配，平时可方便车辆和人员出入。各防护单元内部还划分为若干个抗爆单元，采用沙袋等可拆卸材料设置隔墙，进一步细化防护空间，提高抗毁伤能力。

(二) 主体结构设计

人防工程主体结构外墙采用C40P8等级防水混凝土，抗渗等级不低于P8，内墙采用C35混凝土，强度等级不低于C35。顶板覆土1.5~2.0m，采用C40P8防水混凝土，厚度400mm，双向配筋，钢筋保护层厚度不小于40mm^[3]。顶板防水构造自上而下分别为：种植土层、排水隔离层、刚性防水层（聚氨酯防水涂料）、细石混凝土找平层、顶板结构层。在外墙外侧涂刷水泥基渗透结晶型防水涂料，再铺设高分子自粘胶膜防水卷材，最后用C15细石混凝土做保护层，形成外防水屏障。排水管道穿墙处采用柔性防水套管，管道与套管间缝隙用膨胀止水环密封。防水与排水要从源头控制渗漏，采用复合防水构造，还要具备一定的冗余能力，在极端情况下仍能保持畅通。

(三) 防护设施与设备

1. 防护门与防护密闭门

根据人防工程的等级要求，本项目采用甲级钢质的防护门，门扇采用加强型钢板内衬钢管框架，门框采用型钢，内填混凝土。防护密闭门选用乙级钢质密闭门，开启方式为双扇平开式。防护门与密闭门表面均做防腐处理，设置门锁和密封装置，确保在战时能快速启闭，可靠密闭。门体结构要坚固耐用，能承受一定的冲击荷载（如图3），同时具备良好的密封性能。

项次	类别	部位	人防等效静荷载标准值(KN/m ²)	
			核6级6类	核5级5类
1	主体	顶板	70、55	100
		底板	55	100
		外墙	50	100
2	临空墙	楼梯、竖井	130	270
		室内出入口(考虑上部建筑)	110	210
		汽车坡道处	160	370
3	门框墙	楼梯、竖井	200	400
		室内出入口(考虑上部建筑)	200	400
		汽车坡道处	240	550
4	隔墙	与普通地下室相邻普通地下室一侧	110	230
		人防区之间	50	100
5	扩散室余压墙	无人员掩蔽	39	
		有人员掩蔽	65	
		柴油发电机排烟口	130	
6	楼梯	正面	60	120
		反面	30	30

注：1. ()内数值用于当顶板考虑上部建筑影响时；
2. 室外楼梯出入口大于等于二层时，作用在门框墙、临空墙上的等效荷载宜乘以折减系数0.9。

图 3: 人防等效静荷载标准值

2. 通风与排烟系统

各防护单元系统由防化通风机、过滤吸收器、活性炭吸附器、空气净化装置、通风管道、电动密闭阀等组成。其中一等人员掩蔽所的防化等级达到丙级，设置专用的核生化报警和监测设备。通风系统平时采用全新风

方式运行，战时可转换为隔绝式或净化通风方式。新风入口与排风口分别设置在迎风面和背风面，通过三道电动密闭阀实现可靠密闭。管道穿墙处做防护密闭处理，采用套管+金属软管的形式。整个系统还应具备完备的监测预警、控制调节和应急处置能力，最大限度降低危害，确保掩蔽人员的生命安全。

三、抗震结构设计

(一) 抗震设防标准与等级

南郊马鞍山路片区人防综合工程位于济南市，根据《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010，济南市抗震设防烈度为7度，设计基本地震加速度值为0.10g，设计地震分组为第三组。在确定抗震设防标准的基础上，结合工程的重要性和使用功能，本工程抗震设防类别定为标准设防类，对应的结构抗震等级为三级^[4]。在抗震设计过程中，严格遵循规范要求，采用动力弹塑性时程分析方法，考虑地震作用下结构的弹塑性变形，准确评估结构在罕遇地震下的抗倒塌能力，确保工程在强震作用下的安全性与稳定性。

(二) 结构体系

本工程采用钢筋混凝土框架—核心筒结构作为主体结构形式，框架结构具有良好的延性和耗能能力，能够有效抵抗水平地震作用；核心筒结构则可提供较大的侧向刚度，增强结构整体性，有利于抵抗垂直地震作用^[5]。通过合理布置框架梁柱和核心筒墙体，协调结构平面布置，优化构件截面尺寸（如图4），形成传力明确、刚度分布均匀的抗侧力体系。选用高强度、高性能的混凝土材料，提高框架柱和核心筒墙体的抗压强度和抗剪强度，满足人防抗力要求。

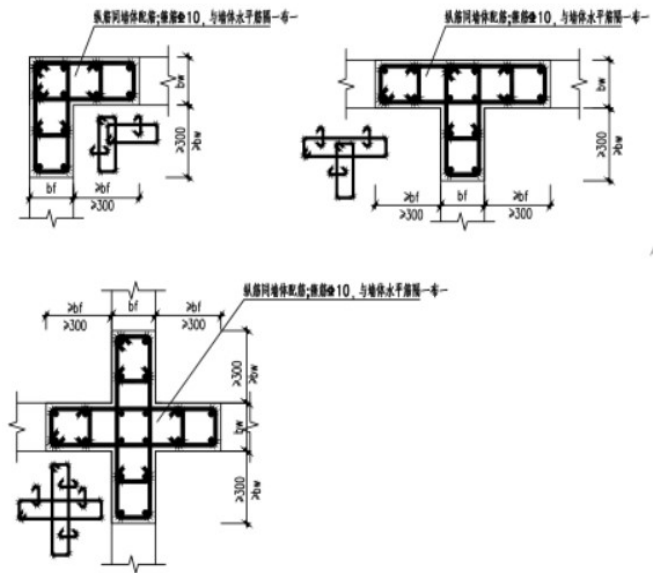


图 4: 钢筋混凝土墙转角边缘构件

(三) 设置抗震缝与防震缝

根据场地条件和使用要求，结合人防平战转换需求，本工程采用人字形缝隙将地下结构分为三个独立单元，缝隙宽度不小于100mm，内填柔性材料^[6]。在主体结构与出入口结构之间设置抗震缝，宽度不小于50mm。抗

震缝贯通基础、顶板和外墙，并与水平防震缝相连。在抗震缝两侧设置独立柱，并在柱间设置抗震支架，保证相邻单元体变形协调一致。在抗震缝处的管线穿越部位设置柔性连接，减小震时管线破坏。

四、研究人防结构与抗震结构设计结合关键点

(一) 统一协调人防防护等级与抗震设防要求

人防结构设计主要依据人防防护等级要求，从战时防护功能出发，考虑抗爆、抗冲击、防化、防辐射等因素，对结构布局、构件尺寸、材料强度等进行专门设计。而抗震结构设计则基于当地抗震设防烈度，从建筑整体受力角度，通过合理的结构体系、构造措施等来提高结构的延性、耗能能力，确保建筑在强震下不倒塌（如图1）。设计中，首先根据人防工程等级，按照最高的核6级和常6级进行防护设计，满足人防抗力要求；同时按照当地抗震设防烈度7度进行抗震设计，二者设防水平相当，避免矛盾。其次，在结构体系选型时，采用钢筋混凝土剪力墙结构，剪力墙不仅具有较强的抗爆、防护能力，也能提供较大的侧向刚度，抵抗水平地震力，二者功能互补。第三，在材料选用时，采用高强混凝土和高强钢筋，并适当提高配筋率，在保证抗力的同时提高构件的延性。第四，在构造措施上，加强薄弱部位如洞口、变截面处的配筋，合理设置结构缝，避免应力集中，提高整体性。

(二) 加强薄弱部位构造措施

人防工程中薄弱部位，是抗震设计重点和难点。这些部位往往存在应力集中、刚度突变等问题，在地震作用下极易发生破坏，导致结构整体抗震能力降低。同时，这些部位还承担着防护密闭、气密等重要功能，破坏后会严重影响人防工程防护效能^[7]。设计中应采取如下构造措施来加强薄弱部位：一是防护密闭部位如防护门洞口，采用增大洞口边缘构件截面尺寸、配置双层钢筋网等措施，提高洞口周边区域的承载力和延性。二是在结构后浇带、沉降缝等处，设置暗柱、暗梁等构造钢筋，并采用高性能混凝土浇筑，增强结构整体性和协同工作能力。三是在防护密闭门与门框墙、门洞口处设置钢筋混凝土圈梁，增大刚度，提高抗震性能。四是在防护密闭构件与主体结构连接处，采用柔性连接等减震措施，避免因刚度差异导致的应力集中。五是对防护通风口等薄弱部位，增大壁厚，配置钢筋网片，提高抗冲击能力。六是加强薄弱部位的施工质量控制，严格控制混凝土强度、钢筋保护层厚度等，确保实体质量满足设计要求。

(三) 开展抗震性能化设计

传统人防工程设计主要依据经验公式和弹性理论方法，对结构在常规武器攻击下的防护能力进行验算，较少考虑罕遇地震作用下结构的损伤特征和破坏机理。这种基于抗力的设计思路，难以全面评价人防工程在强震下的真实表现，不利于结构抗震韧性的提升。在抗震设计中可引入性能化的思路和方法：第一，采用增量动力分析法，考虑结构的非线性特性，计算不同地震动参数下的结构响应，得到结构的抗震能力曲线，评估其在设防地震、罕遇地震等不同水准下的破坏状态。第二，利

用数值模拟技术，对结构开展精细化建模，模拟构件的开裂、屈服、极限变形能力，分析薄弱部位的应力应变分布，预测结构的破坏模式和倒塌机制。第三，在满足人防抗力要求的基础上，结合性能化分析结果，对薄弱部位如防护密闭部位、结构缝、洞口等进行抗震加强，提高其延性和耗能能力，并合理布置抗震构造，如临空墙加强配筋（如图5），框架梁端采取延性构造措施等。第四，开展静动力试验，在结构的关键部位布置传感器，获取实测地震响应数据，校核数值模拟结果，为结构的健康诊断和性能评估提供依据。

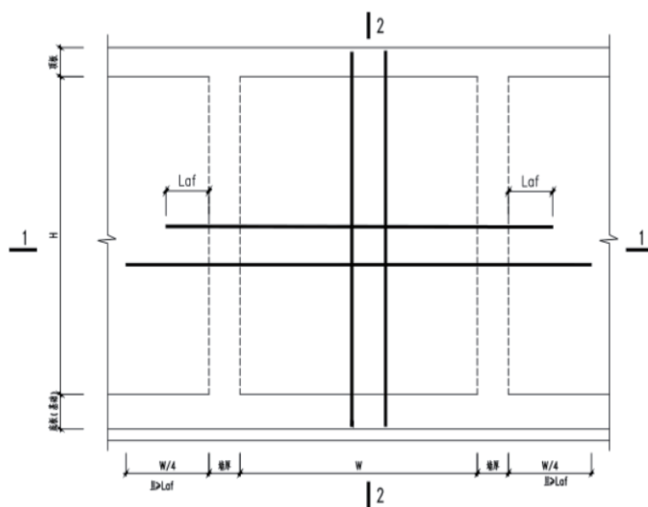


图 5: 临空墙配筋立面示意图

结束语

本文以南郊马鞍山路片区人防综合工程为例，系统阐述了人防结构与抗震设计的关键内容，深入分析了二者结合的重点难点，提出了统筹兼顾、一体化设计的思路 and 措施。未来，人防结构与抗震结构设计还需要进一步的深度融合，在今后的工作中，需进一步加强基础理论研究，完善设计理念和 method，并在更多的实践中加以应用和验证，为人防事业的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 栾学立, 王胜男, 张震. 人防工程施工常见问题及结构检测要点分析[J]. 工程建设与设计, 2024(09): 218-220.
- [2] 徐梦俊. 浅谈人防工程结构设计荷载问题[J]. 房地产世界, 2023(17): 43-45.
- [3] 吴卫. 地下室人防结构的主要构件设计[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(11): 91-93.
- [4] 杨震. 某单跨钢结构连廊抗震设计与分析[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(05): 154-156.
- [5] 王昊. 建筑结构抗震设计的技术要点探析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(15): 55-57.
- [6] 袁兴洪. 装配式建筑设计及抗震设计标准研究[J]. 大众标准化, 2024(09): 29-31.
- [7] 吴泓. 房屋抗震设计的发展趋势分析[J]. 居舍, 2024(14): 83-86.