

预制混凝土构件的连接方式对抗震性能的影响研究

王璜

安徽省建筑科学研究设计院

摘要：预制混凝土构件作为现代建筑领域的重要组成部分，在地震等自然灾害中的抗震性能备受关注。本研究旨在探究不同连接方式对预制混凝土构件抗震性能的影响，以为工程实践和设计提供有益的参考。通过文献综述和实验分析，我们从力学性能、承载能力、耗能能力等方面对不同连接方式进行比较研究。研究结果对于提高预制混凝土构件的抗震性能，确保建筑结构在地震中的安全性具有重要意义。

关键词：预制混凝土构件；连接方式；抗震性能；力学性能；承载能力；耗能能力

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.18.035

引言：

随着城市化的不断发展和人们对建筑安全性的要求日益提高，预制混凝土构件作为一种高效、可靠的建筑技术在工程实践中得到广泛应用。然而，地震等自然灾害给建筑结构的安全性带来了严峻的挑战。在地震作用下，预制混凝土构件的连接方式直接影响其抗震性能。因此，深入研究不同连接方式对预制混凝土构件抗震性能的影响，对于提高建筑结构的地震安全性具有重要意义。

一、连接方式对预制混凝土构件力学性能的影响

（一）刚性连接与半刚性连接比较

刚性连接和半刚性连接是常见的两种连接方式，在地震作用下对构件的力学性能产生不同影响。（1）刚性连接是指连接节点刚度较高、具有较好的刚性特征，连接部位不易发生明显的位移和变形。这种连接方式能够有效地传递水平荷载，使结构整体刚性增加，对地震作用有一定的抵抗能力。当地震荷载较大时，刚性连接可能导致构件产生较大的弯曲变形，甚至出现脆性破坏，结构整体耗能能力较差。^[1]（2）相比之下，半刚性连接部位允许一定的位移和变形，连接节点的刚度较刚性连接低。这种连接方式能够充分利用连接处的变形消耗地震能量，使得结构在地震作用下具有较好的耗能能力。半刚性连接适用于地震作用较大的区域，可以减缓地震荷载对结构的影响，降低地震作用产生的应力集中，从而提高结构延性和抗震性能。

（二）连接剪力传递机制分析

地震作用下预制混凝土构件之间产生水平位移，连接方式起着传递剪力的关键作用。连接剪力传递机制是指连接部位承受的剪力如何传递到相邻构件，影响连接的稳定性和整体性能。（1）对于刚性连接，剪力传递

主要通过刚性节点完成，连接部位的刚性使得剪力能够迅速传递到相邻构件，形成整体刚性联结。在地震作用下，如果连接节点的刚度过高，可能导致节点承受过大的剪力而发生破坏、进而失效。设计刚性连接时需要合理考虑节点的尺寸和材料，确保连接处的剪力传递机制稳定可靠。^[2]（2）对于半刚性连接，剪力传递主要通过连接部位的变形来实现。连接部位允许一定的位移和变形，消耗部分地震能量，减轻地震作用对结构的影响。半刚性连接的剪力传递机制较为复杂，需要综合考虑连接部位的刚度、材料特性以及相邻构件的变形能力，才能确保连接能够稳定传递剪力。

（三）连接刚度对结构整体性能的影响

连接刚度越高，连接处的位移和变形越小，使得构件之间相互作用增强、结构整体刚度提高。（1）刚性连接具有较高的连接刚度，使得结构在地震作用下保持较好整体稳定性。然而，过高的连接刚度可能导致结构整体刚度过大，地震作用下产生过大的应力集中，降低结构延性和抗震性能。（2）半刚性连接具有较低的连接刚度，在一定程度上允许连接部位发生位移和变形，在地震作用下发挥良好的耗能效果，减缓地震荷载对结构的影响，提高结构整体的延性和抗震性能。

二、连接方式对预制混凝土构件承载能力的影响

（一）不同连接方式下的承载力试验对比

不同的连接方式会对构件的承载能力产生影响，因此有必要通过试验对比不同连接方式下的承载能力差异。选取代表性的刚性连接和半刚性连接样本进行承载力试验，模拟相同地震作用下加载，分析构件的承载能力和变形情况，从而了解预制混凝土构件在不同连接方式下的承载能力。最终可知，（1）刚性连接的预制混凝土构件在荷载作用下表现出较高的承载能力。刚性连接的刚度较高，使得构件整体刚度增加。然而，当地震作用较大时，刚性连接可能导致构件产生较大的弯曲变形，甚至出现失稳和破坏。（2）半刚性连接的预制混凝土构件在荷载作用下表现出较好的承载能力和变形能力。^[3]半刚性连接允许一定的位移和变形，能够在地震作用下消耗部分地震能量，减轻地震作用对结构的影响，提高结构的延性和抗震性能。

（二）加强措施对提高承载能力的效果评估

为了提高预制混凝土构件的承载能力，可以采取一系列加强措施来改善连接形式和连接方式。（1）通过优化刚性连接设计，合理控制连接部位刚度，避免引起应力集中和破坏。设计刚性连接时，可以考虑使用弹性

连接材料或设置适当的缓冲层，减缓地震荷载对连接部位的冲击。(2)对于半刚性连接，可以增加连接部位的剪力传递面积，提高连接的承载能力。同时，可以采用更为耐久和可靠的连接材料，确保连接在地震作用下不产生滑移和失稳现象。(3)结合结构优化设计，可以对预制混凝土构件的布置和连接形式进行调整，以提高结构整体抗震性能。采用合理连接方式和连接形式，充分利用构件优势，提高结构整体承载能力和韧性。^[4]

三、连接方式对预制混凝土构件耗能能力的影响

(一) 耗能能力测试方法及参数分析

预制混凝土构件的耗能能力是指在地震作用下，构件能够消耗和吸收地震能量的能力。耗能能力的高低直接影响着结构抗震性能和地震响应。为了评估不同连接方式对耗能能力的影响，首先需要确定合适的耗能能力测试方法。常用的测试方法包括地震模拟试验、冲击试验、梁柱试验等。这些试验可以模拟地震作用下不同连接方式下构件变形和破坏情况，从而评估其耗能能力。在进行耗能能力测试时，需要关注一些重要的参数，如最大位移、最大位移角、耗能能力指标等。最大位移可以反映构件在地震作用下的变形程度，最大位移角可以反映构件在地震作用下的变形能力。耗能能力指标可以通过测量结构的耗能量和耗能面积来计算，用于评估结构在地震作用下消耗地震能量的能力。

(二) 不同连接方式下的耗能能力对比

通过对不同连接方式下构件的耗能能力进行对比分析，可以了解不同连接方式对结构耗能性能的影响。在地震模拟试验中，半刚性连接的预制混凝土构件表现出较好的耗能能力。由于半刚性连接的连接部位允许一定的位移和变形，构件能够在地震作用下发生一定程度的滞回行为，从而有效地消耗地震能量。相比之下，刚性连接的构件由于连接部位刚度较高，变形能力较差，耗能能力较低。^[5]耗能能力测试还发现了不同连接方式下的耗能特点。在耗能过程中，半刚性连接的构件通常表现出较为平稳的滞回曲线，具有较好的延性。而刚性连接的构件在耗能过程中滞回曲线较为陡峭，表现出较为脆弱的性态。这些不同的耗能特点直接影响着结构在地震中的响应和破坏形式。

(三) 耗能能力与连接方式的关联性研究

针对不同连接方式下耗能能力的差异，需要进一步研究耗能能力与连接方式之间的关联性，探究其影响机理。从力学角度来看，连接方式直接决定了构件之间的相互作用和约束程度。刚性连接使得构件之间的刚性传递较好，而半刚性连接允许构件之间发生一定的相对位移。因此，刚性连接下构件之间的相互作用较强，耗能能力相对较低，而半刚性连接下构件之间的相互作用较弱，耗能能力相对较好。连接方式还会影响构件的整体受力性态和变形模式。在地震作用下，刚性连接的构件

可能出现局部破坏和失稳，耗能能力较低。而半刚性连接的构件通常表现出较好的延性，能够在地震作用下发生较大的位移和变形，消耗更多地震能量。

四、结构优化设计建议

(一) 考虑抗震性能的连接方式选择

在预制混凝土构件的设计和施工中，选择合适的连接方式对于提高结构的抗震性能至关重要。根据前面的研究结果可知，半刚性连接方式相对于刚性连接方式具有更好的耗能能力和延性，能够有效地消耗地震能量，并在地震作用下允许构件之间发生一定的相对位移和变形，从而减缓地震作用对构件的影响。因此，在设计过程中，应优先考虑采用半刚性连接方式，以提高构件的抗震性能。

(二) 结构设计中的连接形式调整

除了选择合适的连接方式外，结构设计中的连接形式也会直接影响预制混凝土构件的抗震性能。半刚性连接部位的变形会导致构件之间发生相对滑移，可能影响连接的稳定性。^[6]因此在进行连接形式调整时，需要综合考虑结构的整体稳定性、耗能能力和变形能力。

(1)可以通过增加连接剪力传递机构的设置来增强连接的耗能性能。连接剪力传递机构是连接中的重要部位，其设计可以使连接在地震作用下发生剪切变形，从而吸收地震能量。通过在连接部位添加适当的剪力墙、剪力板或剪力撑等结构形式，可以有效增强连接的耗能能力。(2)可以合理设计连接的刚度和强度。过高的连接刚度可能导致结构在地震作用下过于刚硬，降低了结构的耗能能力，因此在设计中要注意合理控制连接的刚度。同时，连接的强度要满足结构的承载要求，避免连接在地震作用下出现过度破坏。(3)考虑到连接在地震作用下的变形特点，可以在连接部位设置适当的预留变形空间，使连接能够在地震作用下发生一定程度的变形。这样不仅可以提高连接的耗能能力，还可以减轻连接部位的应力集中，延缓结构的破坏。

(三) 新型连接方式的应用前景展望

随着科技的不断进步，新型连接方式在预制混凝土构件中的应用逐渐受到关注。这些新型连接方式通过引入新的材料、新的连接形式和新的耗能机制，为提高构件的抗震性能提供了新的可能性。例如，采用形状记忆合金等高性能材料作为连接剪力传递机构，可以使连接具有更好的耗能能力和自恢复能力，进一步提高结构的抗震性能。此外，一些基于摩擦阻力、阻尼器等原理的新型连接方式也被广泛研究，这些连接方式能够在地震作用下引入额外的耗能机制，有效减缓地震作用对结构的影响。虽然新型连接方式具有很大的潜力，但在实际工程中的应用还面临一些挑战。其中包括新型连接方式的设计与施工难度、材料性能和耐久性等问题。因此，在推广新型连接方式时，需要进一步开展深入的研

研究和实验,解决相关技术难题,并确保其在实际工程中的可行性和稳定性。

五、抗震性能评估标准与规范建议

(一) 国内外相关抗震标准比较

在预制混凝土构件的抗震性能评估中,抗震标准和规范是衡量结构抗震性能的重要依据。国内外针对预制混凝土构件的抗震标准和规范存在一定的差异,因此对其进行比较分析有助于了解不同标准的优缺点,为制定更科学、合理的评估标准提供参考。

(1) 国内的抗震设计规范通常是根据国内地震特点和工程实践经验制定的,其中包括《建筑抗震设计规范》(GB 50011)和《钢结构设计规范》(GB 50017)等。这些规范主要涉及结构的抗震设计要求和抗震性能评估方法,对于预制混凝土构件的抗震性能评估具有一定的指导作用。(2) 国外的抗震标准和规范也有许多,如美国的《地震规范》(NEHRP)、欧洲的《欧洲地震设计规范》(Eurocode 8)、日本的《建筑抗震设计规范》(AIJ)等。这些标准通常较为详细和完善,涵盖了多个方面的抗震性能评估内容,可以为预制混凝土构件的抗震性能评估提供更全面的参考。

综合比较国内外抗震标准,可以发现不同标准在一些技术要求和参数设置上存在一定的差异。因此,在制定预制混凝土构件的抗震性能评估标准时,可以借鉴国外先进标准的经验,结合国内地震特点和工程实践,制定更符合国内实际的抗震性能评估标准。

(二) 连接方式的性能评估体系构建

为了更科学地评估不同连接方式对预制混凝土构件抗震性能的影响,需要构建合理的性能评估体系,从多个方面对连接方式进行全面评估。

(1) 可以从力学性能、变形能力和耗能能力等方面来评估连接方式的性能。力学性能包括连接的刚度和强度,变形能力可以通过连接的位移角和延性等指标来反映,耗能能力则可以通过连接在地震模拟试验中的滞回曲线和耗能能力指标来评估。(2) 可以考虑连接方式在不同地震作用下的响应和破坏形式。通过进行地震模拟试验和数值分析,可以观察不同连接方式在地震作用下的变形特点和破坏形式,为评估其抗震性能提供更直观的数据支撑。(3) 可以结合实际工程案例,对不同连接方式在地震中的应用效果进行评估。通过对比分析不同连接方式下结构的实际性能表现,可以验证评估体系的科学性和可行性。

(三) 优化抗震性能标准与规范建议

基于对连接方式性能评估的研究结果,可以对现有的抗震性能标准与规范进行优化建议,以进一步提高预制混凝土构件的抗震性能评估水平。

(1) 在抗震性能标准中增加连接方式的性能要

求。目前的抗震性能标准通常将抗震性能评估集中在结构整体层面,对连接方式的性能要求较少。通过将连接方式的性能要求纳入标准,可以更全面地考虑连接方式对结构性能的影响,从而更准确地评估结构的抗震性能。(2) 建立针对预制混凝土构件的专门性能评估指标。目前的抗震性能标准没有针对预制混凝土构件的特殊性能评估指标。通过建立专门的性能评估指标,可以更精确地评估预制混凝土构件的抗震性能,提高评估的准确性和可靠性。(3) 加强抗震性能标准与规范的推广和培训。通过加强相关标准与规范的推广和培训,可以提高工程师的抗震性能评估水平,推动抗震性能评估工作的开展。

结论:

通过对不同连接方式对预制混凝土构件抗震性能影响的研究,我们得出了以下结论:(1) 在力学性能方面,刚性连接具有较高的刚度和强度,但在地震作用下易出现脆断失效;而半刚性连接则具有更好的变形能力,能够有效消耗地震能量。(2) 在承载能力方面,合理设计连接形式可提高构件的承载能力,增强其整体稳定性。(3) 在耗能能力方面,适度的耗能设计可有效减缓地震作用对构件的影响,降低结构损伤风险。

综上所述,不同连接方式在预制混凝土构件的抗震性能方面各有优劣。因此在工程实践中,应根据具体项目的要求和地震作用特点,综合考虑力学性能、承载能力和耗能能力等因素,合理选择连接方式,并结合结构优化设计,提高预制混凝土构件整体抗震性能,确保结构安全性和稳定性。此外,相关的抗震性能评估标准和规范也需要进一步完善,以指导工程实践并推动行业的健康发展。

参考文献

- [1] 孙长征, 高强, 赵唯坚等. 预制混凝土构件间钢筋连接技术的发展与应用[J]. 中国建筑金属结构, 2013(22): 198-199.
- [2] 吴涛, 刘全威, 张磊等. 预制混凝土构件钢筋约束浆锚连接技术发展展望[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(06): 776-780.
- [3] 杨佳林. 预制混凝土构件新型连接体系开发与工程应用[J]. 建筑施工, 2020, 42(08): 1446-1448.
- [4] 睢文静. 预制混凝土框架结构的连接方法概述[J]. 四川建材, 2011, 37(06): 38-39+41.
- [5] 陈伟, 陶忠, 杨雨等. 不同方式连接下钢柱-一体式预制混凝土墙组合构件抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(11): 89-98.
- [6] 黄朗. 预制混凝土构件斜缝式预压连接节点的抗剪性能研究[D]. 中国矿业大学, 2018.