

# 采用混合施工方法的 R.C. 框架结构施工过程的受力分析

郑宏宇<sup>1</sup> 柳云帅<sup>2</sup>

1. 广西大学土木建筑工程学院工程防灾与结构安全教育部重点实验室 广西 南宁 530004

2. 广西交通投资集团有限公司 广西 南宁 530028

**【摘要】**：钢筋混凝土（R.C.）框架结构的填充墙与框架梁、柱的连接为半刚性连接或弱连接，存在建筑外墙与柱、梁混凝土结合部位开裂、渗水以及填充墙无法充分参与抗震等问题。借鉴约束砌体抗震墙的施工方法，提出采用约束砌体抗震墙先砌墙后浇混凝土的施工顺序建造全楼的混合施工法（HCM），形成的约束砌体框架解决上述问题。本文先基于已有约束砌体抗震试验验证了有限元数值模型的准确性，再建立了混合施工法、传统施工法和倒序施工法的同参数模型，对比分析了三种方法的单层柱-梁-墙单元体系抗震性能的差异，验证了混合施工法的可行性和优势。研究表明：R.C. 框架结构采用 HCM 可获得更高的承载力和变形能力，延性更好，抗震性能得以提高，可减小框架梁、柱的内力和配筋量。

**【关键词】**：框架结构；约束砌体；混合施工方法；抗震性能；内力

DOI:10.12417/3041-0630.26.09.002

## Force Analysis of Construction Process Applying Hybrid Construction Method in R.C. Frame Structure

Zheng Hong-yu<sup>1</sup>, Liu Yun-shuai<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004;

2. Guangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanning 530028, China

**Abstract:** In reinforced concrete (R.C.) frame structures, infill walls are semi-rigidly or weakly connected to frame beams and columns, which gives rise to a series of defects including cracking and water seepage at the bonding interfaces between external walls and concrete beams/columns, as well as insufficient seismic participation of infill walls. By drawing on the construction method of confined masonry shear walls, a hybrid construction method (HCM) for the entire building is proposed, involving constructing confined masonry shear walls first and then casting concrete, which may solve the aforementioned issues. First, the accuracy of the finite element numerical model is verified by the existing seismic test data of confined masonry wall. Then, three numerical models with identical design parameters are established corresponding to the HCM, conventional frame structure construction method and conventional masonry structure construction method. Comparative analysis is performed on the seismic performance of single-storey column-beam-wall subassemblies under the three construction methods to validate the feasibility and superiority of the proposed HCM. The analysis results show that the load-bearing capacity, deformation capacity and ductility of R.C. frame structures are enhanced when applying HCM, thus improving the overall seismic performance; meanwhile, the internal forces and required reinforcement amount of frame beams and columns can be reduced.

**Keywords:** Frame structure; Confined masonry; Hybrid construction method; Seismic performance; inner force

钢筋混凝土框架结构是多、高层建筑的主要结构形式，具有经济性好、适用性强的优点，其传统的施工方法是：先浇筑主体混凝土框架，再从顶层向底层逐层砌筑填充墙，填充墙与框架柱、梁之间依靠间隔布置的细长拉接钢筋以及墙内构造柱或芯柱连接。但填充墙与混凝土梁、柱构件之间不易结合紧密，

外墙容易出现薄弱性缝隙而产生的渗水、裂缝等问题。参考我国《建筑抗震设计规范》<sup>[1]</sup>第 3.9.6 条关于砌体抗震墙的规定，其施工顺序是相反的，即先砌墙后以墙为模板布置钢筋和浇筑混凝土，从底层向上层进行。由此，本文提出一种钢筋混凝土（R.C.）框架结构的反向施工方法，即先砌筑墙体，再浇筑框

作者简介：郑宏宇（1976-），男，汉族，广东澄海人，工学博士，副教授，主要从事钢筋混凝土建筑结构设计与施工方法等方面的研究工作。

课题：国家自然科学基金项目，FRP 条带复合约束-FRP 纵筋的北部湾海砂海水混凝土柱受压与抗震性能研究（51968004）

架柱、梁和板，本文称为“混合施工方法”。这种墙体并非框架结构填充墙，施工时须按照约束墙体的要求设置柱子马牙槎和墙体内部的拉接钢筋筋片，与墙体上侧的框架梁共同对砌体墙进行约束，并承担结构本身竖向荷载和外部荷载的作用，形成的约束砌体-框架体系具有更好的整体性。此类施工方法目前鲜有研究报道。本文基于约束砌体抗震墙结构框架梁、柱与墙体刚性连接的抗震性能问题，运用施工力学和施工阶段“生死单元”方法<sup>[2]</sup>，分析RC框架结构采用混合施工法的可行性，以及结构构件的内力和变形特性，并在此基础上提出框架结构采用混合施工法的构件配筋优化设计，为实际工程的施工操作可行性以及施工方案设计提供理论依据和参考。

### 1 有限元数值模型准确性验证

已有文献<sup>[3]</sup>采用低周往复加载试验，测试了单层单跨约束砌体结构的抗震性能。本文基于ABAQUS平台，参照文献<sup>[3]</sup>中的BCW-1试件参数建立约束砌体数值模型KYW，对试验过程进行数值模拟。通过将有限元计算结果与试验实测数据进行对比分析，验证本文所建数值模型的可靠性和准确性。

提取循环加载时各循环峰值点得到骨架曲线，试验试件BCW-1与KYW模拟骨架曲线对比如图1所示。

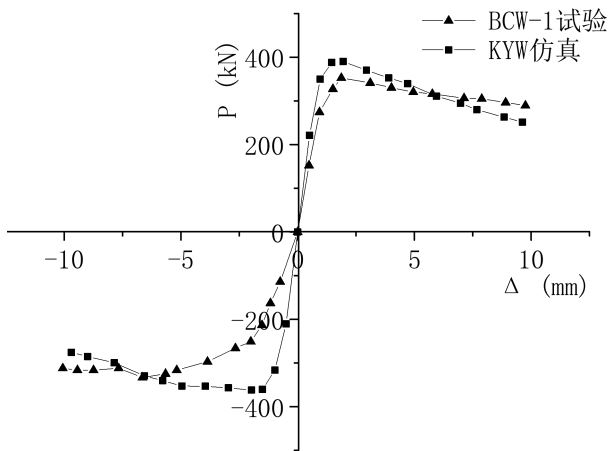


图1 BCW-1 试验与 KYW 模拟骨架曲线

通过对比 BCW-1 试验与 KYW 数值模拟的骨架曲线可以发现，二者整体变化趋势基本吻合，数值模拟所得承载力结果与试验实测值整体误差约为 10%。数值模型与试验试件的最终破坏形态一致，均表现为墙体交叉裂缝破坏。在往复荷载作用下，模拟试件的损伤主要集中在墙体对角线位置以及框架柱的顶端与底端，梁和柱中部损伤程度最轻，损伤分布规律与试验现象基本一致。综合对比分析结果表明，本文所建立的有限元模型可较好地反映约束砌体构件的真实受力及破坏特征，能够为后续分析提供较准确的模型。

### 2 不同施工方法下框架-墙单元抗震性能对比

为验证 HCM 对 R.C.框架的适用性，建立三种框架模型，分别采用不同施工方法：①模型 KHW (HCM, R.C.框架约束砌体)；②模型 KCW (现行的传统施工方法, R.C.框架+填充墙)；③模型 KDW (砌体结构施工方法, R.C.框架+承重砌体)。三个模型参考文献<sup>[3]</sup>试件尺寸设计，与单层单跨模型 KYW 的数据基本一致。约束砌体框架试件 KHW 的框架柱与墙体采用马牙槎咬合连接，再从柱脚向上 300mm 开始每隔 300mm 设置一道沿砖墙水平通长设置拉结钢筋网片。拉结钢筋网片由 2 根直径 8mm 的钢筋搭配直径 4mm 的横向短筋点焊制成。试件 KCW 则借助 ABAQUS 软件中的弹簧单元模拟墙体拉结结构，通过赋予弹簧单元差异化刚度参数，还原构件间的连接受力状态，同时在填充墙与框架梁、柱的交接位置预留 30mm 的缝隙<sup>[4]</sup>。试件 KDW 不设置缝，拉结筋的设置与传统施工法相同。

有限元分析得到三个试件达到极限荷载时的损伤云图如图 2~4 所示，骨架曲线如图 5，特征点处的荷载值及对应的位移值对比见表 1。

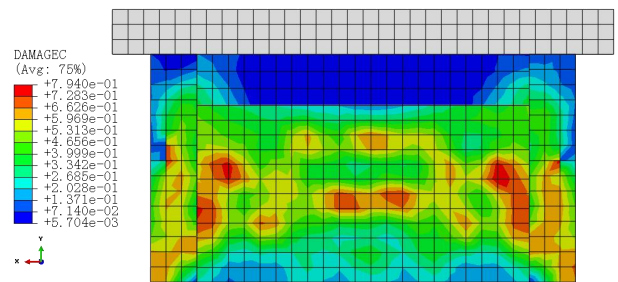


图2 KHW 试验模拟损伤云图

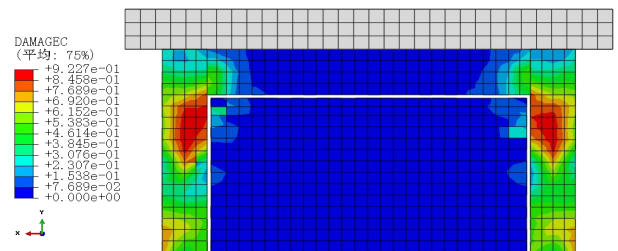


图3 KCW 试验模拟损伤云图

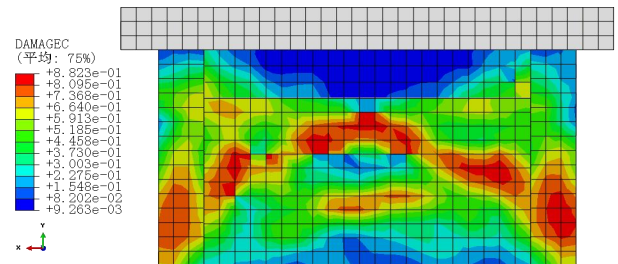


图4 KDW 试验模拟损伤云图

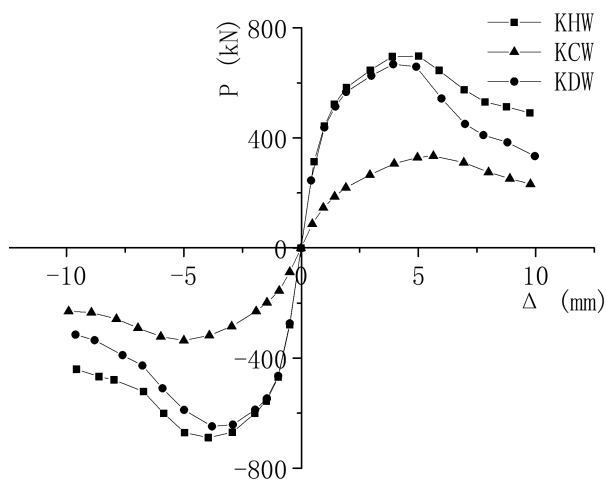


图5 三个模型的骨架曲线对比

表1 特征点荷载值及对应的位移值对比

试件编号	Fp/kN		Fu/kN		Δp/mm		Δu/mm	
	正向	反向	正向	反向	正向	反向	正向	反向
KHW	697. 2	689. 1	645. 4	601. 0	5.0 2	3.9 5	5.8 8	5.8 5
KCW	334. 4	335. 7	284. 2	285. 3	5.6 4	5.0 0	7.7 3	7.0 9
KDW	667. 7	648. 1	567. 5	550. 8	3.9 3	3.7 9	5.7 7	5.4 2

注：F表示水平荷载，Δ表示水平位移，下标p表示峰值，下标u表示极限。

对各试件损伤云图对比分析可知，约束砌体墙体凭借内部拉结钢筋网片的增强效应，整体损伤程度显著降低，仅出现少

量局部压碎破坏。同时，约束砌体墙体可协同框架主体共同参与受力，有效分担荷载，使得框架梁、柱的损伤程度明显低于填充墙与框架采用刚性、柔性连接的结构体系。对三组模型的骨架曲线对比分析可以发现，约束砌体框架试件KHW通过墙体与框架梁柱的协同受力机制，有效提升了结构的初始刚度。进入承载力下降段后，试件KDW因缺失钢筋网片的配筋加固作用与马牙槎的咬合约束效果，其骨架曲线下降速率显著快于KHW试件，这表明砌体施工法建造的结构在抵达极限承载力后，会发生快速的刚度退化与结构破坏。承载力数据结果显示，低周往复荷载作用下，采用混合施工法的约束砌体框架结构，其水平承载能力较传统框架施工法提升108.5%，相较于砌体施工法的水平承载力也提升了约5%。综合试验损伤特征与力学性能数据表明，混合施工法建造的约束砌体框架结构具备良好的工程适用性，拥有更为优异的抗震性能，可显著提升结构抵御外部荷载的能力。

### 3 结语

数值仿真分析结果表明，将混合施工工艺应用于框架结构，相较于传统框架和砌体结构施工方法，能够有效改善结构的受力状态与变形特性，有效提升框架的抗震性能和承受外荷载的能力。

混合施工法可使底部框架梁与其上砌体墙体形成协同受力体系，其工作机理与砌体结构的墙梁受力机制相近。在上部竖向荷载作用下，框架梁与下部墙体紧密贴合协同工作，梁体上表面产生拉应力；同时，上层墙体向下传递的竖向荷载会使梁跨中截面下表面受拉。两种受力效应相互叠加抵消，降低框架梁的跨中弯矩，从而减小梁体内力。对于框架柱，墙体可协同承担竖向与水平荷载，有效分担框架柱的受力，显著降低柱子轴力、剪力和弯矩。框架梁、柱的受力水平减小后，其配筋可在规范允许范围内适当优化减少，能够有效降低工程用材成本，具备良好的经济效益。本研究所得结论可为混合施工方法在实际工程中的应用提供可行性论证。

### 参考文献：

[1] 中华人民共和国国家标准.建筑抗震设计规范 GB 50011-2010(2016年版)[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
 [2] 郑江,葛鸿鹏,王先铁,贺震,罗勇.局部位形约束生死单元法及其在施工力学分析中的应用[J].建筑结构学报,2012,33(08):101-108.  
 [3] 郑妮娜.装配式构造柱约束砌体结构抗震性能研究[D].重庆:重庆大学,2010.  
 [4] 刘利花.带竖缝砌体填充墙框架结构的非线性有限元分析[J].苏州科技学院学报,2010,3:49-53.