

# Design and Fabrication of RC Beam Column Substructure Specimens Considering Axial Restraint Effect

Siwei Liu\*, Wei Zhang, Shijian Yang, Licheng Jiang

Chongqing University of Science and Technology, Chongqing  
Email: \*510031087@qq.com

Received: Feb. 21<sup>st</sup>, 2019; accepted: Mar. 7<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 14<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Under the action of earthquake, the RC beam-column frame structure causes the shearing mechanism of the column hinge mechanism and the joint due to the passive axial force generated by the surrounding members. According to the ductility design criteria of “strong column weak beam”, “strong shear weak bend” and “strong joint weak member”, this paper selects one from three layers and four spans and considers the axial restraint effect on the RC beam substructure, carrying out the design and production, studying the structural bearing capacity for the later quasi-static loading test as the basis of the experimental research.

## Keywords

Strong Column Weak Beam, Strong Shear Weak Bend, Strong Joint Weak Member, Axial Restraint, Design and Production

---

# 考虑轴向约束效应下的 RC梁柱子结构试件 设计与制作

刘思危\*, 张伟, 杨仕建, 蒋利成

重庆科技学院, 重庆  
Email: \*510031087@qq.com

收稿日期: 2019年2月21日; 录用日期: 2019年3月7日; 发布日期: 2019年3月14日

\*通讯作者。

## 摘要

RC梁柱框架结构在地震荷载作用下由于受周边构件约束在梁中产生被动轴力导致柱铰机制与节点的剪切破坏。本文根据“强柱弱梁”、“强剪弱弯”、“强节点弱构件”的承载力-延性设计准则,从一榀三层四跨中选型,考虑轴向约束效应对RC梁柱子结构进行设计与制作,为后期进行拟静力加载试验研究结构承载力提供试验研究基础。

## 关键词

强柱弱梁, 强剪弱弯, 强节点弱构件, 轴向约束, 设计与制作

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

建筑结构在强震模式作用下的设计理念遵循“强柱弱梁”、“强剪弱弯”、“强节点弱构件”以实现抗震设防目标。然而,根据历年来国内外的震害调查:大量RC结构出现了“柱出铰”以及节点的破坏[1]。主要原因可能是现浇楼板对梁抗弯承载力的贡献、填充墙不合理位置设置、节点区的箍筋不足以及混凝土强度不足[1][2][3][4]。值得注意的是以上研究都忽略了RC框架梁受弯损伤后发生伸长的现象[5],然而在真实存在的周边构件(柱、现浇板)会对梁伸长形成轴向约束效果从而在梁中产生被动轴力,此轴力可能会改变结构的预期地震反应。

Ashtiani *et al.* [6]证实RC梁柱子结构在拟静力往复加载时,当位移角达到3.5%时,梁伸长达到30 mm,并且在梁中产生不可低估的轴力。Kokusho和Maeda [7][8]试验表明,在梁中会因约束产生被动轴力使得梁抗弯承载力提高幅度达到1.5~2.4倍。值得注意的是,周边构件的约束所产生的约束轴力与施加预应轴力在机理上有所差别,被动轴力主要原因是梁塑性铰区开裂梁伸长受约束产生的力,并且在真实结构中梁中实际被动轴力难以测得。因此本文采用直径50 mm钢棒等效约束装置代替真实存在的周边构件对梁进行轴向约束,由于梁在受弯损伤开裂发生轴向伸长时才能产生被动约束轴力,因此在设计时保证梁要发生损伤破坏的情况下尽量避免柱出铰与节点提前剪切破坏。因此加强柱截面尺寸、柱纵筋及节点箍筋,符合“强柱弱梁”、“强剪弱弯”、“强节点弱构件”的延性设计理念下对试件进行加工制作。

## 2. 试件设计

### 2.1. 试件选型

试件结构原型为梁截面尺寸:500×800 mm;柱截面尺寸760×760 mm;梁长8 m;柱高为3.2 m。此次试验设计了2个1/2比例的试件,因此按照0.5的比例缩尺后,梁截面250 mm×400 mm,柱截面350 mm×300 mm(考虑节点抗剪强度避免发生节点剪切破坏的破坏模式增大了柱截面),柱底铰支座中心与作动器中心距离为1600 mm,柱高为1670 mm。梁端底铰支座中心距为4000 mm,梁长4260 mm。此结构模型还原于原模型的1/2弯矩为0处、柱1/2反弯点为0处:层高均为1.6 m,每跨跨度均为4.0 m,对应原型结构层高3.2 m,跨度8 m,是符合实际结构中的一榀框架尺寸。

试件尺寸与配筋图如图 1，试件以轴向约束为变量。RC 梁受弯损伤轴向伸长现象主要表现在梁受弯发生混凝土开裂和纵筋屈服后，因而试件设计是以梁端先屈服为原则进行的，尽可能保证柱不破坏并且节点不先剪切破坏。具体试验概况模型如表 1。

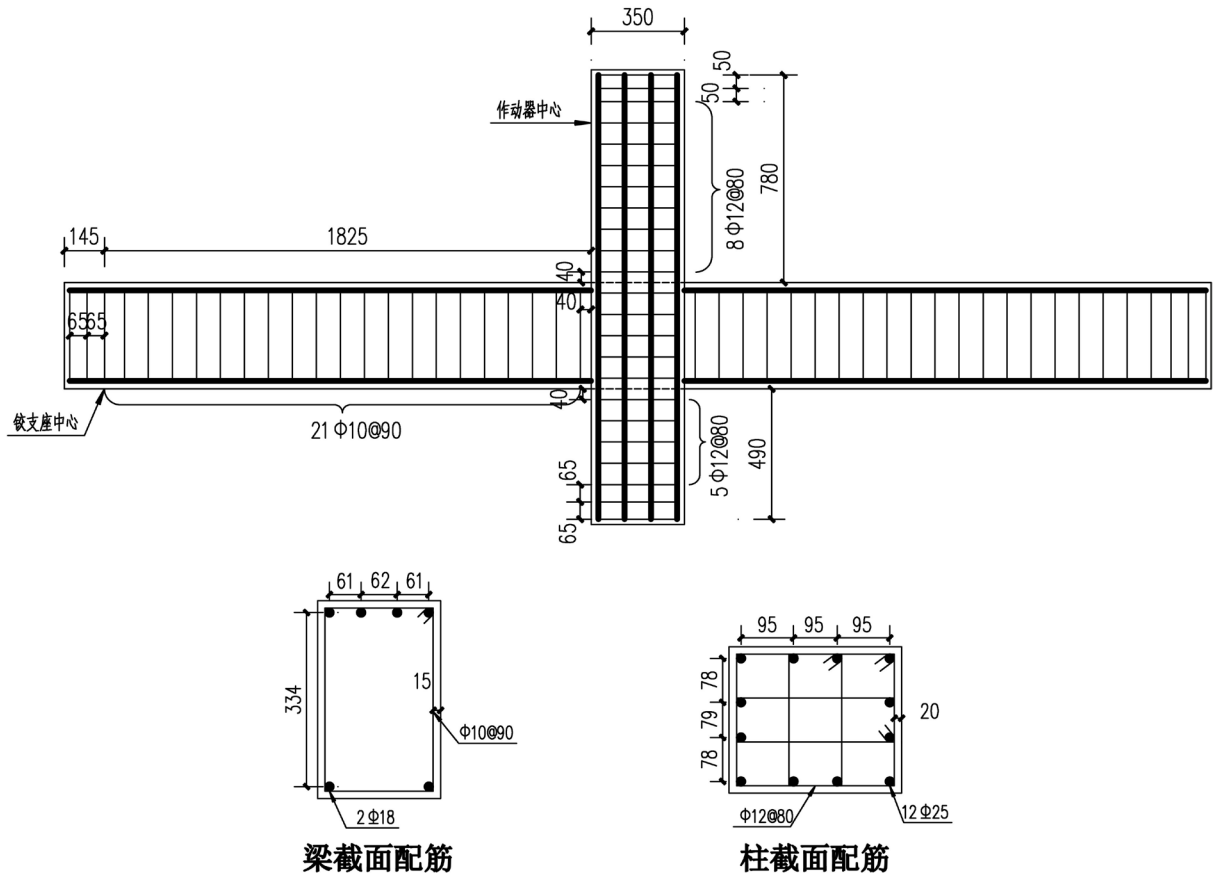


Figure 1. Specimen dimensions and reinforcement detail  
图 1. 试件尺寸与截面配筋图(mm)

Table 1. Experimental parameters of specimens  
表 1. 试验模型概况

构件编号	梁纵筋配筋率/%		柱总配筋率(单侧)/%	梁箍筋	柱箍筋(节点区)	约束钢棒直径/mm	混凝土强度
	上部	下部					
试件 1	0.88		6.23	10@90	12@80	-	C35
试件 2	0.88	0.44	(2.08)		(12@75)	50	C35

## 2.2. 等效约束刚度装置

试件选型于一榀三层四跨模型，由于实际情况中很难测得周边框架结构对 RC 梁柱子结构的约束轴力，因此采用 OpenSees 有限元软件，以强柱弱梁破坏模式为前提，考虑梁柱刚度折减系数 0.5，使子结构产生单位侧移时即需要的力就是所需约束刚度。综合考虑选取直径为 50 mm 的钢棒等效代替周边构件约束。轴向约束装置如图 2。

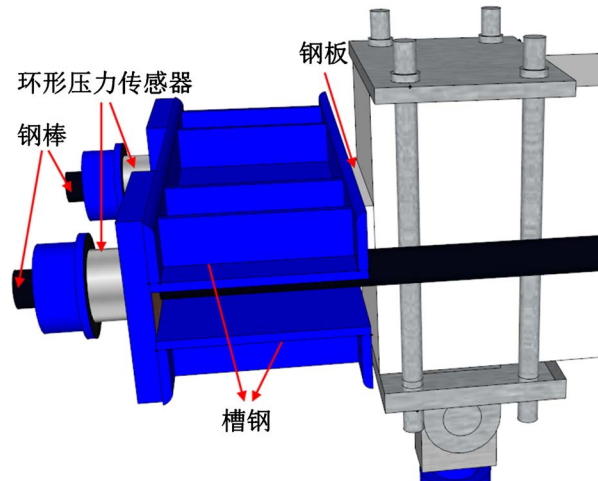


Figure 2. Axial restraint system  
图 2. 轴向约束系统图

### 3. 试件制作

试件制作具体流程为：钢筋的下料加工→钢筋打磨、应变片粘贴→钢筋绑扎、支模→混凝土浇筑、混凝土试件及试压块养护。纵筋下料时需要结合梁、柱尺寸以及保护层厚度来决定钢筋的下料长度。而箍筋弯钩角度为  $135^\circ$ 、长度为箍筋直径的 10 倍，因此箍筋下料长度则要根据混凝土保护层厚度、直段长度、弯钩增加长度以及量度差值(箍筋调整值)决定。

#### 3.1. 钢筋应变片粘贴

由于试验采用热轧带肋钢筋，因此需要使用砂轮在量测带肋位置处打磨一个长  $\times$  宽  $\times$  深 =  $20 \times 5 \times 2$  mm 的凹形平槽，并用磨砂纸将其再次磨平后用无水乙醇清洗。将自带导线端的应变片用 502 胶水粘在量测平槽后，采用 703 硅橡胶对应变片进行封闭，待 6~8 小时 703 硅胶具有良好的凝固性后，将高压防水自粘带再一次包裹封闭，完成对应变片的抗震与防水的二次保障。最后为了减小整体应变片系统在混凝土内的剪切摩擦，最后用锡箔纸将其完全包裹。

#### 3.2. 钢筋绑扎、支模

钢筋的绑扎、支模顺序为：柱钢筋笼进行绑扎 → 对试件底部支模 → 将柱钢筋笼放入底模上并按照图纸要求对梁的纵筋、箍筋进行绑扎 → 设置吊钩 → 关模。值得注意的是：1) 梁纵(箍)筋的摆放遵循尽量使应变片线端朝同一个方向，以便连接应变测试仪。2) 由于试件采用卧式浇筑，试验前需将试件吊立放置于加载系统上，因此在绑扎梁的钢筋笼时，将两个吊钩绑扎在梁对称位置。使吊立时形成三角形，保证试件在转移过程中不受损伤。3) 模板的切割制作应严格按照图纸尺寸，关模前将应变片导线捆绑避免造成损伤。

#### 3.3. 混凝土配合比设计

试验采用自拌式混凝土，因此对其进行了混凝土配合比设计如下[9]：

1) 试配强度  $f_{cu,o}$ ；

$$f_{cu,o} = f_{cu,k} + 1.645 \cdot \sigma = 44.87 \text{ Mpa} \quad (1)$$

式(1)其中  $f_{cu,k} = 35 \text{ Mpa}$ ， $\sigma = 6$ 。

2) 确定水灰比  $W/B$ ;

为了使混凝土试件在预期时间内强度达标, 因此水泥采用普通 42.5R, 水泥常规富余系数  $\gamma_c = 1.13$ , 故水泥实际强度与水灰比如式(2), 式(3)

$$f_{ce} = \gamma_c \cdot f_{ceg} = 1.13 \times 42.5 = 48.02 \text{ Mpa} \quad (2)$$

$$W/B = \alpha_a \cdot f_{ce} / (f_{cu} + \alpha_a \cdot \alpha_b \cdot f_{ce}) = 0.34 \quad (3)$$

式(3)中混凝土回归系数  $\alpha_a = 0.46$ ,  $\alpha_b = 0.07$ 。

3) 单位用水量  $m_{wa}$ ;

根据规范混凝土粗骨料采用两级配制作, 粗骨料中最大碎石粒径 20 mm, 其中 35%为直径 5~10 mm 粒径粗骨料, 65%为直径 10~20 mm的粒径粗骨料, 设计坍落度(160~180 mm)。以 90 mm为基础水量, 单位用水量 200 kg, 每增加 20 mm, 用水量增加 5 kg。此外, 减水剂能使水泥中的颗粒得以扩散并且使其中的游离水得以释放从而保证和易性的情况下减少混凝土的用水量、水泥用量节约成本。若在冬季较冷地区可适当添加防冻剂。由于本试验拟配C35 混凝土, 采用减水率为 30%的高效减水剂, 减水剂掺量为胶凝材料的 2%用量。单位水用量如式(4)

$$m_{wa} = m_{wo} (1 - \beta) = 152.25 \text{ kg} \quad (4)$$

式(4)中  $m_{wa}$  为掺减水剂的混凝土每立方米混凝土的用水量;  $m_{wo}$  为未掺减水剂的混凝土每立方米混凝土的用水量;  $\beta$  为减水剂的减水率。

4) 单位水泥用量  $m_{co}$  如式(5);

$$m_{co} = \frac{m_{wa}}{W/B} = 447 \text{ kg} \quad (5)$$

## 5) 为了保证混凝土和易性, 根据规范砂率取值 39%;

6) 减水剂根据厂家推荐用量取胶凝材料的 2%用量, 因此单位减水剂用量为  $m_v$  为 8.8 kg;

由于试验采用 1/2 比例的缩尺模型试验, 因此试件中的粗骨料粒径也相应进行了 1/2 缩尺。因此本次试验变为单级配, 骨料直径全部为 5~10 mm的粗骨料。由于整体骨料粒径减少, 若按照两级配的用量, 混凝土强度无法达到预期强度。经查阅相关规范砂率降低 0.03, 水胶比控制在 0.31~0.33。因此单位水泥用量  $m_{wo}$  变更为 490 kg, 单位减水剂用量 8 kg。

7) 细骨料石、粗骨料用量分别如式(6)、式(7)、式(8)取混凝土密度 2460 kg/m<sup>3</sup>;

$$\begin{aligned} m_{go} + m_{so} &= 2460 - m_{co} - m_{wa} - m_v \\ &= 1852 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} m_{so} &= (m_{go} + m_{so}) \cdot (0.39 - 0.03) \\ &= 666 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad (7)$$

$$m_{go} = 1186 \text{ kg/m}^3 \quad (8)$$

式(7)  $m_{so}$  中为细骨料用量;  $m_{go}$  为粗骨料用量。表 2 为 C35 细石混凝土单位材料用量。

**Table 2.** Material for unit volume concrete material  
**表 2.** 单位体积混凝土材料用料

材料	水(kg)	水泥(kg)	粗骨料(kg)	细骨料(kg)	减水剂(kg)
每 m <sup>3</sup> 用量	153	490	1186	666	8

### 3.4. 混凝土浇筑

试件的混凝土浇筑与振捣，圆柱体试压块的浇筑应与试件保持同时进行。在整个试件浇筑完毕后，应使用小型震动棒对混凝土进行振捣，期间应尽量避免在贴有应变片的位置进行过度振捣，防止应变片因震动而损坏。振捣完整后将混凝土逐一浇水、多次镏刀收面，并用塑料薄膜将试件及圆柱体试压块进行包裹覆盖后浇水进行养护。

### 3.5. 试件养护

同等条件的自然养护模式即为浇水、覆盖薄膜。1) 为了混凝土表面在养护期间保持湿润的状态，应在其表面浇水，减少温度产生的裂缝，也可降低混凝土收缩而产生的裂缝；2) 为了防止养护水的急剧蒸发，还应使用塑料薄膜将其覆盖。当拆除模板后，试件混凝土自身水逐渐通过水化作用散出，因此需要对其进行至少两个星期养护。于是对试件与试压块在捆扎好的应变片线用塑料口袋进行保护的前提下，进行了为期三周的浇水，覆盖薄膜，再在薄膜上浇水的养护模式，如图 6 之后撤除薄膜以及停止浇水。一周后，试件拆除底模，不再覆盖。

### 3.6. 材料性能

试验试件纵筋采用 HRB400，箍筋采用 HPB300，混凝土采用 C35。钢筋拉伸试验在  $10^5$  kg 万能材料试验机上进行，按照钢筋直径进行分组，每组三根留样，根据钢筋直径选取合适夹具，最终取三根钢筋屈服强度的平均值作为该直径钢筋  $f_y$  值。为了消除相同直径中不同钢筋之间差异带来的影响，以及考虑到钢筋超强现象，对试验所有的钢筋进行留样。如表 3 为本批试验构件的钢筋、混凝土力学性能。

Table 3. Properties of concrete

表 3. 材料力学性能

构件编号	钢筋屈服强度(MPa)				混凝土圆柱体抗压强度(MPa)
	D10	D12	D16	D25	
试件 1	595	545	493	473	24.9
试件 2	595	545	493	473	21.7

### 3.7. 测量内容及测量方法

#### 3.7.1. 测量内容

- 1) 柱顶水平力、梁两端被动轴力及左右梁端竖向拉压荷载值；
- 2) 柱顶的水平位移、梁端位移、以及节点区位移、塑性铰区位移；
- 3) 梁柱端与节点交界处梁纵筋的应变、靠近节点的梁两端箍筋应变以及节点核心区受力方向的箍筋应变；
- 4) 记录试件梁、柱、节点区裂缝的出现、发展以及分布情况。

#### 3.7.2. 测量方法

试件力、位移传感器以及应变片布置如图 3。

1) 作动器对柱顶施加的柱顶水平力由布置在 500 kN 作动器中的拉压传感器(4-12)测量；轴向约束效应产生的被动轴力由设置在梁端部的 2 个内径为 50 mm 的 500 kN 环形压力传感器(4-09, 4-10)。

2) 柱顶设置位移计 4-03 测量柱顶端水平位移；由于梁受弯开裂造成的梁整体伸长量则由梁两端位移计 4-06, 4-07 量测，并且梁的伸长主要发生在梁的塑性铰区，因此在塑性铰区设置 4-15, 4-16 以测量左、

右梁的伸长量；节点核心区轴向变形由 4-01、4-02、4-04、4-05 量测，而剪切变形由 4-13，4-14 量测。此外钢棒的应变片 5-1，5-2 是梁产生被动轴力的备份数据。

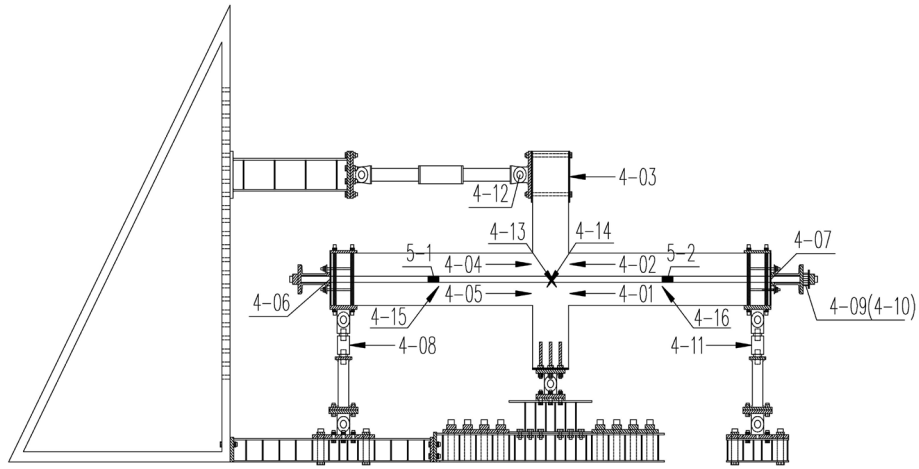
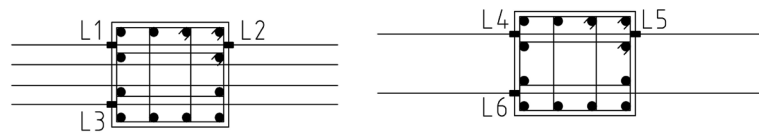


Figure 3. Sensor layout  
图 3. 传感器布置

3) 梁纵筋应变片布置如图 4，为了更好的了解梁屈服时的位移角与荷载，由梁端与节点交界处的梁纵筋应变 L1~L6 量测；如图 5 柱端是否屈服由 Z1~Z6 量测；LG1~LG8 布置在靠近节点区的梁端箍筋；ZG1~ZG4 布置在节点核心区正、背面。



(a) 梁上部纵筋应变片

(b) 梁下部纵筋应变片

Figure 4. Longitudinal reinforcement strain gauge layout  
图 4. 梁纵筋应变片

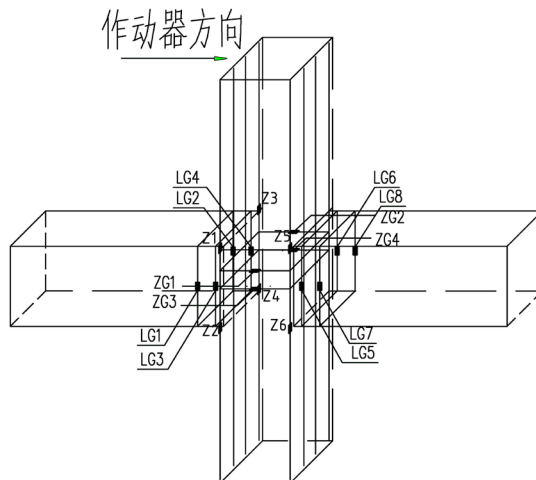


Figure 5. Beam stirrup, column longitudinal reinforcement, stirrups strain gauge layout  
图 5. 梁箍筋、柱纵筋、箍筋应变片布置图



### 3.8. 加载装置及加载制度

为了模拟试件的边界条件，试验加载装置见图 6。试验采用柱端主动加载方式，通过与三角反力架和柱端相连的水平作动器在柱顶施加往复水平力。梁两端铰支座下连接可调节的竖向链杆以约束梁端竖向位移。柱上下端均为铰支座，柱底端下的地梁通过地锚完全锚固在地面。梁两端分别设置 2 个侧向稳定支撑以防止试件在水平加载过程中向平面外移动。轴向约束装置分居试件梁两端模拟实际存在的(柱、现浇板)对 RC 梁柱子结构的约束效应。

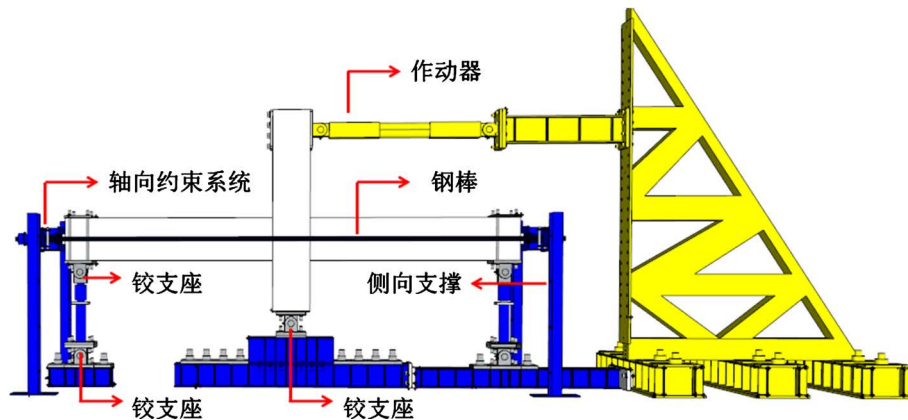


Figure 6. Test apparatus  
图 6. 试验加载图

试验关注的梁柱子结构屈服后的状态，为了方便全程采用位移加载。按柱顶水平位移逐级递增的方式控制加载位移幅值。柱顶位移幅值依次为 6 mm、8 mm、12 mm、16 mm、24 mm、32 mm、48 mm、64 mm，每一级位移幅值往复循环三次，加载制度如图 7 所示。

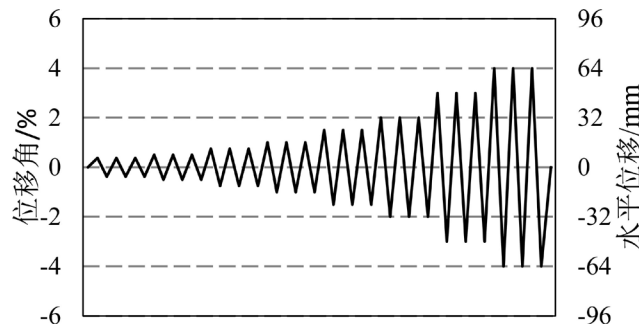


Figure 7. Lateral loading history  
图 7. 加载制度图

## 4. 结论

- 1) 从一榀框架选取 RC 梁柱子结构进行试验研究时，其设计应在遵循“强柱弱梁”、“强剪弱弯”、“强节点弱构件”的延性设计准则下，还需考虑周边构件对 RC 梁柱子结构轴向约束。
- 2) 由于实际结构中难以测量周边构件(柱、现浇板)对梁约束产生的被动轴力，因此本文从“杆件”层次出发，利用钢棒代替周边约束构件进行试件的制作，后期还将进行板对梁的约束以及有限元模拟整个框架体系对梁约束所带来的性能影响。
- 3) 设计时，柱纵筋配筋率、柱配箍率、柱截面、节点配箍率都应进行相应加强，使梁必须先于柱、



节点屈服,这样才能在梁中产生被动轴力。而双筋截面梁在考虑非抗震与抗震条件下选择上部纵筋配筋率大于下部。

4) 试验中应变片损坏是由于其粘贴方法,因此本文提出运用 703 硅橡胶以及高压自粘防水带作为双层防护来代替传统的 AB 胶与纱布。

5) 混凝土养护应根据季节条件、场地环境,在同等自然养护条件下进行调整。夏季由于天气炎热场地干燥养护时间应多于冬季。

6) 对缩尺试验构件进行制作时,混凝土粗骨料粒径也需同比例缩尺。配合比应按规范要求下,根据实际情况降低砂率与水胶比。

## 参考文献

- [1] 叶列平, 曲哲, 马千里, 林旭川, 陆新征, 潘鹏. 从汶川地震框架结构震害谈“强柱弱梁”屈服机制的实现[J]. 建筑结构, 2008, 38(11): 52-59.
- [2] 黄兆纬, 黄信, 胡雪瀛, 齐麟, 蔡浩良, 刘涛, 朱旭东. 现浇楼板配筋对梁负弯矩受力性能的影响[J]. 土木工程学报, 2013(S2): 93-99.
- [3] 王威, 薛建阳, 章红梅, 等. 框架结构在汶川 5.12 大地震中的震害分析及抗震启示[J]. 世界地震工程, 2009, 25(4): 131-135.
- [4] 田志鹏, 张新培, 赵统. 汶川地震中多层钢筋混凝土框架结构房屋震害分析[J]. 建筑结构, 2009(11): 67-71.
- [5] Zerbe, H.E. and Durrani, A.J. (1989) Seismic Response of Connections in Two-Bay RC Frame Subassemblies. *Journal of Structural Engineering*, **115**, 2829-2844. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1989\)115:11\(2829\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:11(2829))
- [6] Ashtiani, M.S., Dhakal, R.P. and Scott, A.N. (2014) Seismic Performance of High-Strength Self-Compacting Concrete in Reinforced Concrete Beam-Column Joints. *Journal of Structural Engineering*, **140**, Article ID: 4014002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000973](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000973)
- [7] Kokusho, S., Hayashi, S., Wada, A., et al. (1988) Behaviors of Reinforced Concrete Beam Subjected to the Axial Restriction of Deformation. *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, **105**, 359-368.
- [8] Maeda, M., Kabeyasawa, T. and Sanada, Y. (1999) Test and Analysis of Reinforced Concrete Beams under Axial Restraint. *U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, **58**, 1258-1269.
- [9] JGJ55-2011. 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)