



灌浆缺陷对套筒连接性能与PC梁柱节点 抗震性能影响的试验研究

汇报人：徐锋 副教授

研究生：王 凯、许沅沅、储居礼、王 阳

2022. 12. 29

南京工业大学 土木工程学院

一 研究背景和目的

二 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

三 灌浆缺陷对PC梁柱节点性能的影响

四 主要结论与展望

1. 研究背景和目的

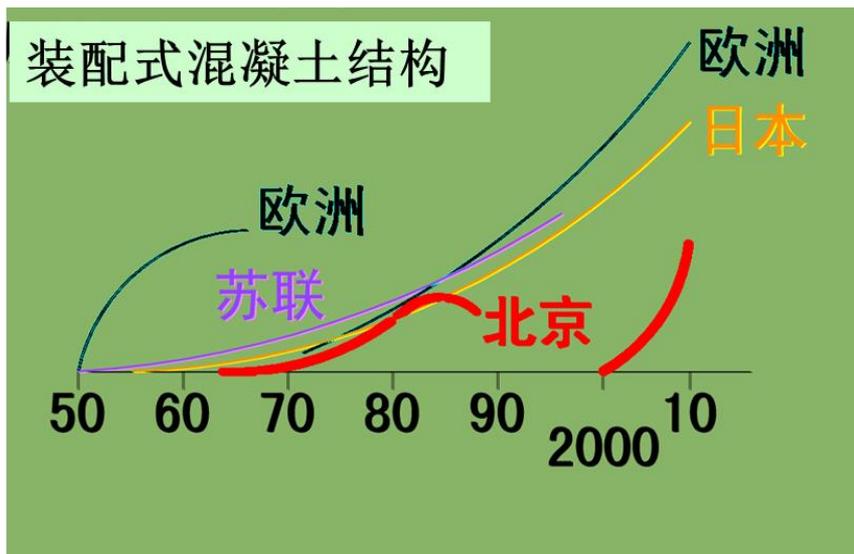
1.1 研究背景—装配式建筑发展

□ 西方国家

- 装配式混凝土结构建筑经过几十年甚至上百年的时间，已经相对成熟、完善。
- 日本、美国、澳大利亚、欧洲等国家和地区按照各自的经济、社会、工业化程度等特点，选择不同的道路和方式。

□ 中国

- 20世纪50年代：开创（前苏联技术）
- 20世纪60~80年代：发展
- 20世纪90年代：低潮
- 21世纪10年代：恢复、发展、创新



1999年08月 《关于推进住宅产业化提高住宅质量的若干意见》

2006年06月 《国家住宅产业化基地试行办法》

2013年01月 《绿色建筑行动方案》

2014年05月 《2014-2015年节能减排低碳发展行动方案》

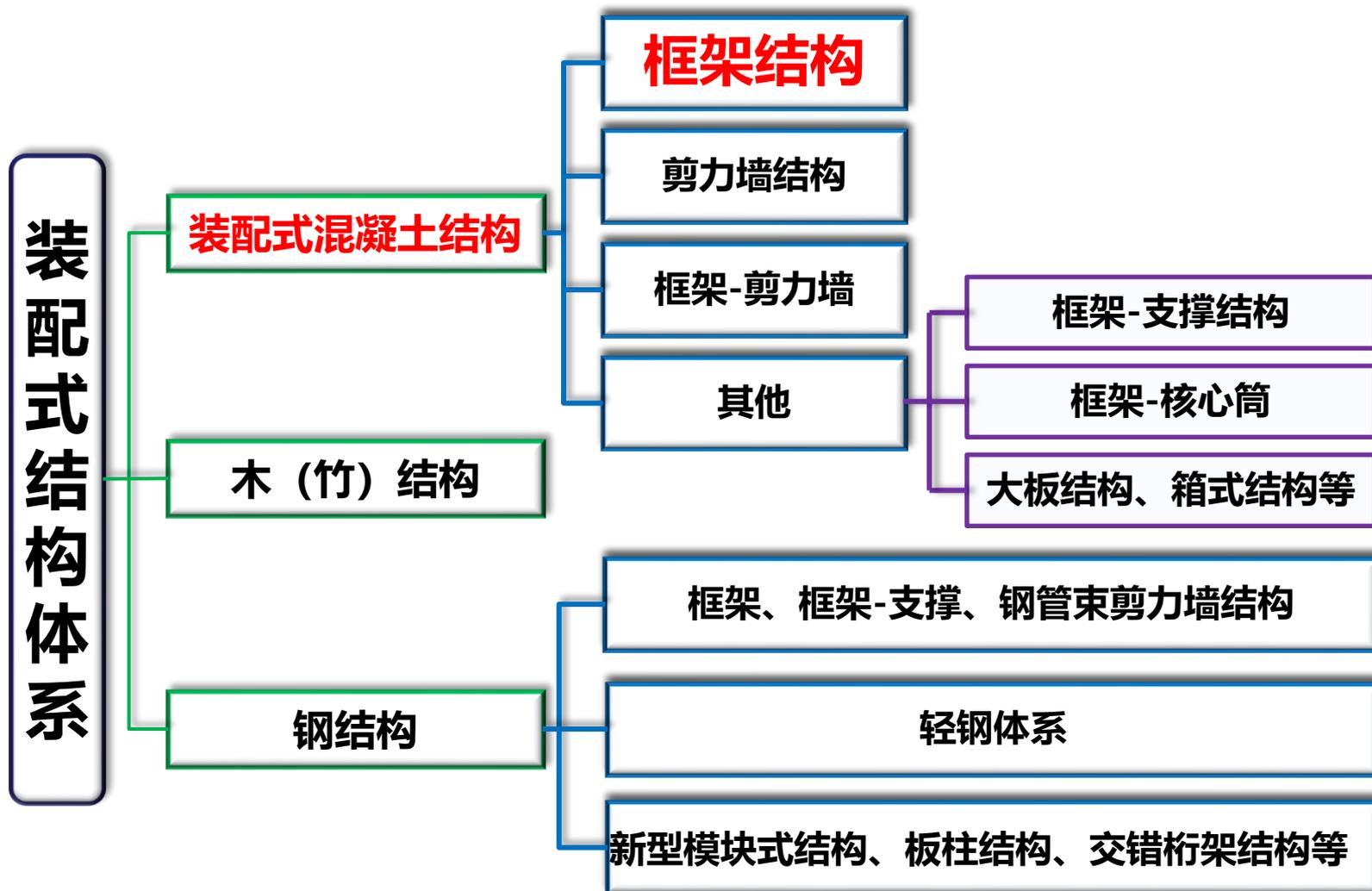
2014年07月 《关于推进建筑业发展和改革的若干意见》

2014年09月 《工程质量治理两年行动方案》

2015年11月 《建筑产业化发展纲要》 **2025年装配式建筑占新建建筑比例50%以上!**

1. 研究背景和目的

1.1 研究背景—装配式结构形式和连接方式



1. 研究背景和目的

1.1 研究背景—装配式结构形式和连接方式

装配式 混凝土 结构

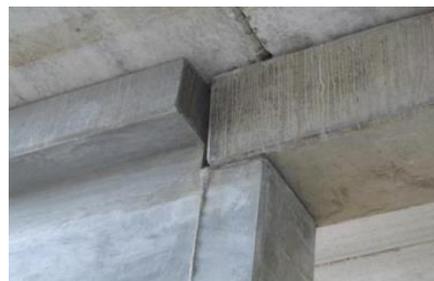
湿连接（装配整体式）

（通过**连接件**将相邻构件的受力纵筋相连，在连接处浇混凝土。为**等同现浇**形式。）



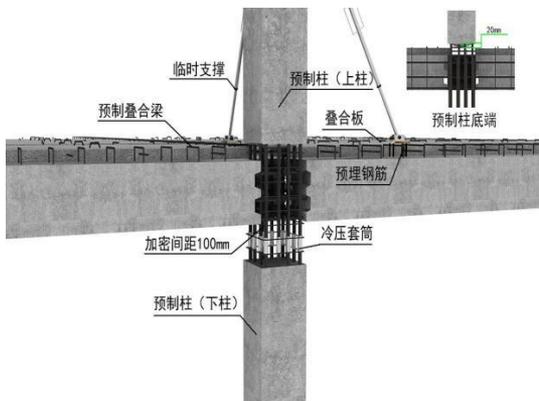
干连接（全装配式）

（连接区通过焊接、螺栓、预应力或者栓钉连接，不需要现浇混凝土。为**非等同现浇**形式。）

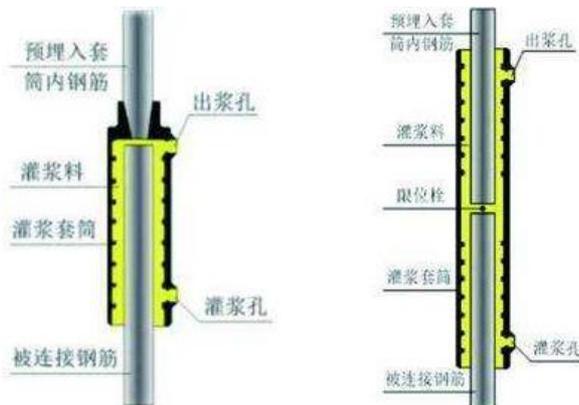


1. 研究背景和目的

1.1 研究背景—装配整体式框架结构



装配式框架和节点示意图

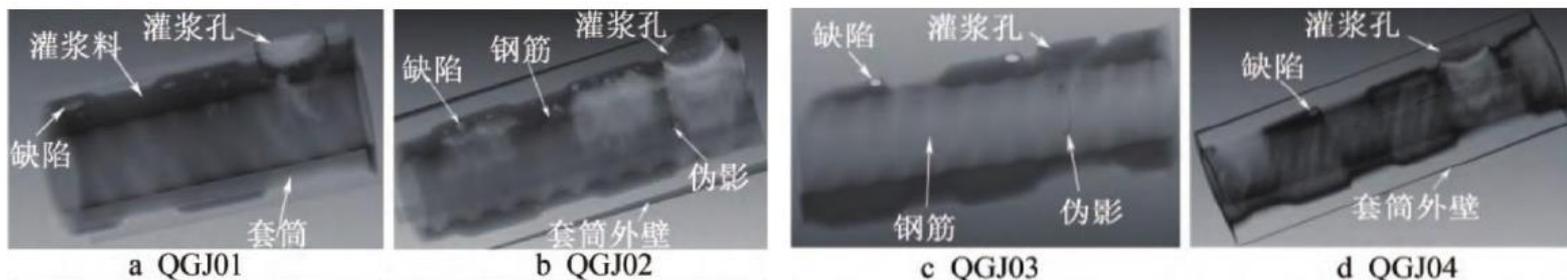


半/全套筒连接

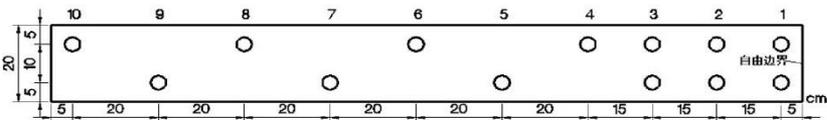
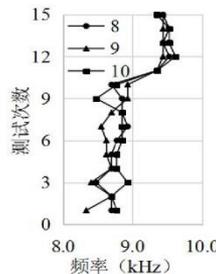
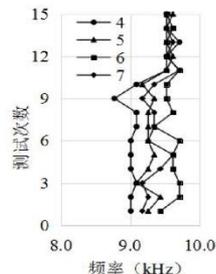
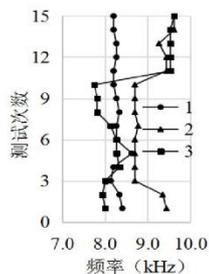
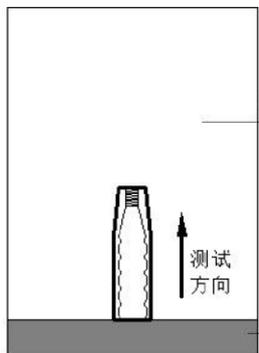
1. 研究背景和目的

1.2 存在的问题

现象：大量工程实践测试，套筒灌浆过程中存在各种形式的“缺陷”。



CT扫描灌浆套筒成像结果



超声波法对灌浆套筒密实度测试结果

1. 研究背景和目的

1.2 存在的问题

现象：大量工程实践测试，套筒灌浆过程中存在各种形式的“缺陷”。

问题：实际工程中，套筒“灌浆缺陷”是否普遍存在？

套筒“灌浆缺陷”形式和程度如何？

套筒“灌浆缺陷”对PC结构性能影响多大？

(套筒连接性能→结构节点性能→整体结构性能)

1. 研究背景和目的

1.3 研究内容和目的

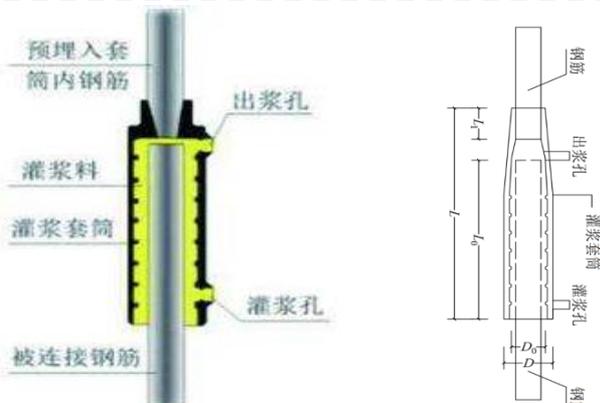
目标（总）：针对PC混凝土框架结构工程中存在的套筒灌浆缺陷等薄弱连接问题，先从钢筋材料连接、构件节点和框架结构三个层次分别研究钢筋薄弱连接效应演化机制，再构建考虑钢筋连接薄弱效应的PC框架结构性能多尺度演化分析方法，最终创建考虑钢筋薄弱连接效应演化的PC框架结构失效模式分析和抗震性能评估理论。

研究内容：

- 基于薄弱连接效应重构接头模型的粘结-滑移本构关系演化机制研究
- 考虑钢筋薄弱连接效应影响的PC节点抗震滞回性能演化机制研究
- 考虑钢筋薄弱连接PC框架的多尺度力学演化模型和抗震性能评估理论。

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

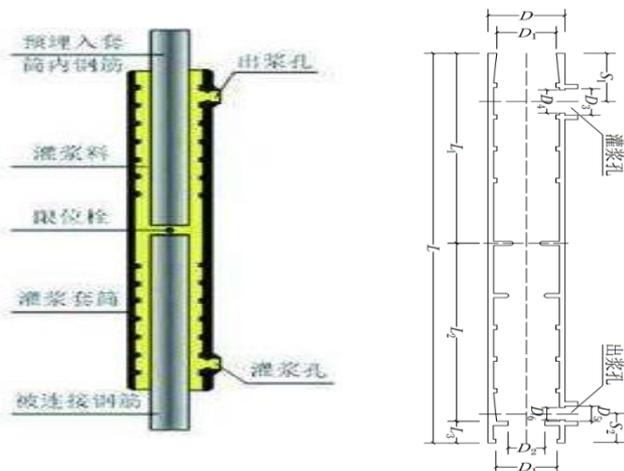
2.1 试验设计—套筒



半灌浆套筒示意图

单位: mm

套筒型号	总长度 L	螺纹段长度 L1	灌浆段长度 L0	外径 D	内径 D0
GTB4-20	190	30	143	44	36



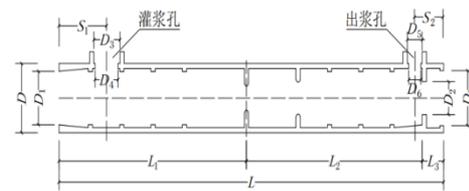
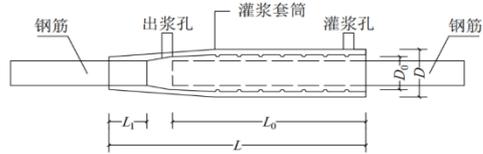
全灌浆套筒示意图

单位: mm

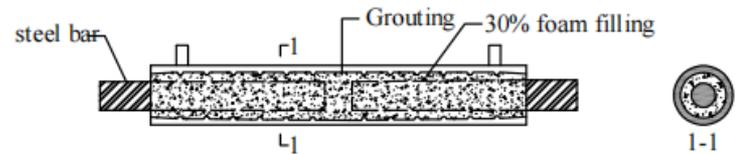
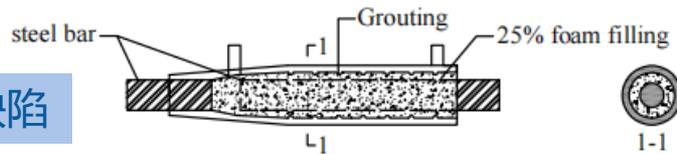
套筒型号	总长度 L	螺纹段长度 L1	灌浆段长度 L0	外径 D	内径 D2
GTZQ4-18	350	170	160	50	38
GTZQ4-20	370	180	170	52	40
GTZQ4-25	460	225	215	58	46

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

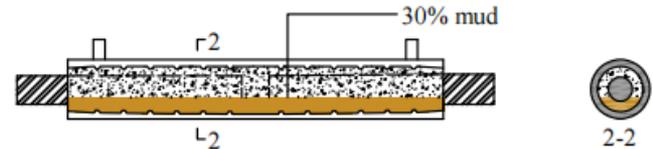
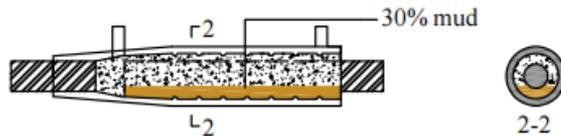
2.1 试验设计—灌浆缺陷（类型）



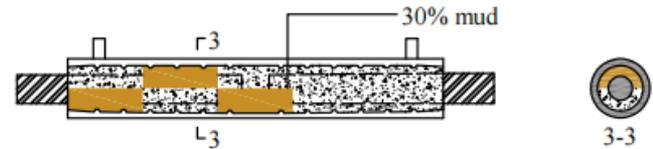
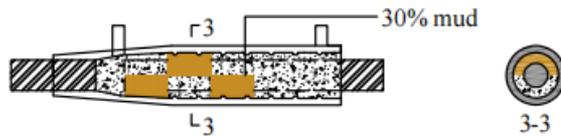
均匀缺陷



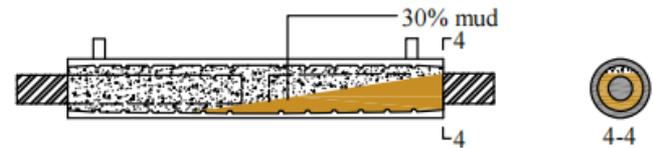
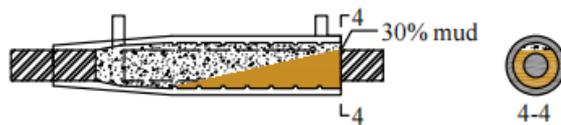
轴向缺陷



环向缺陷



倾斜缺陷

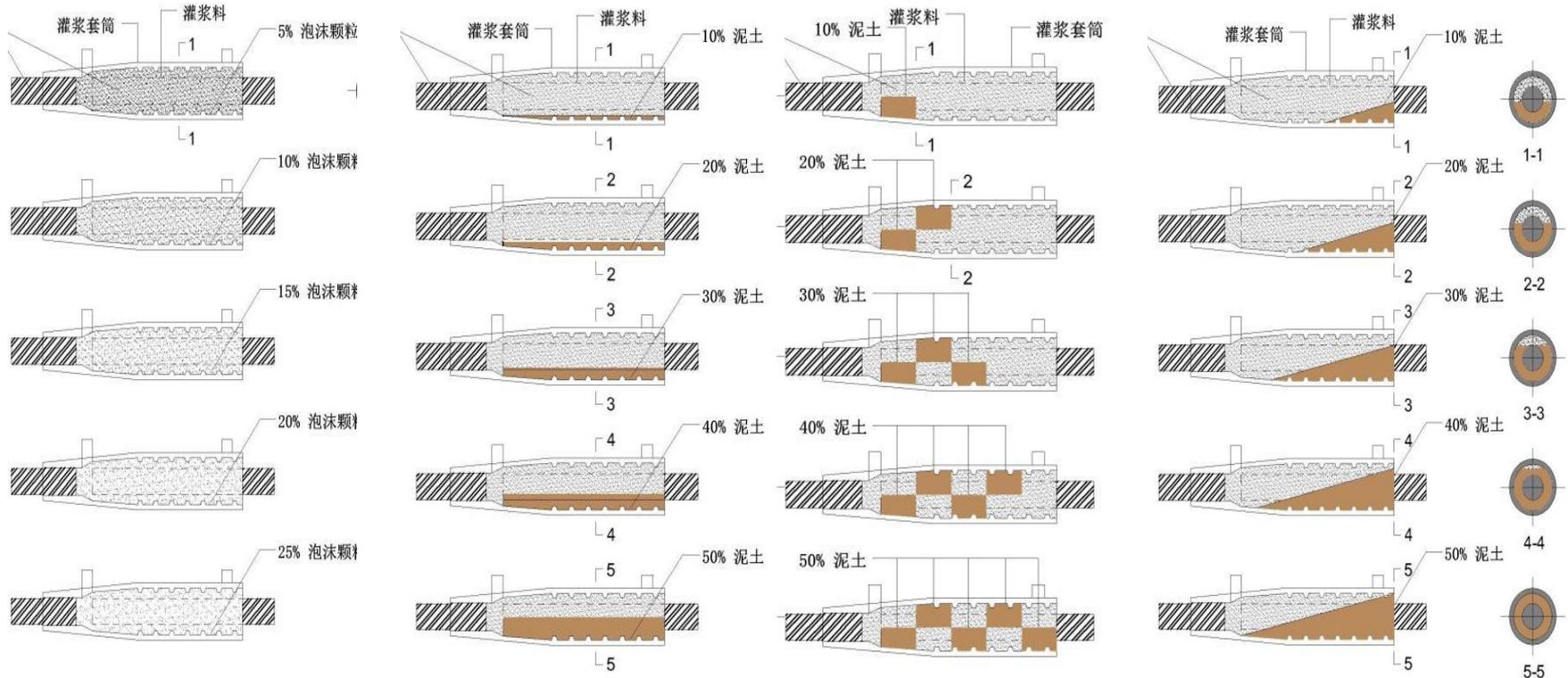


半灌浆套筒连接缺陷示意图

全灌浆套筒连接缺陷示意图

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

2.1 试验设计—灌浆缺陷（量值）



以半灌浆套筒连接缺陷为例（全套筒方法相同）

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

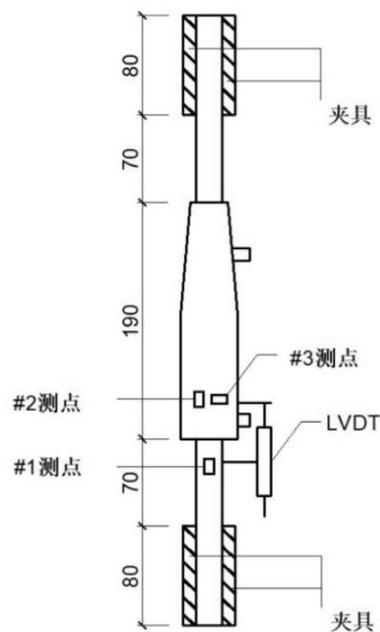
2.2 试验制作和测试



灌浆套筒试件制备



单向拉伸试验加载装置



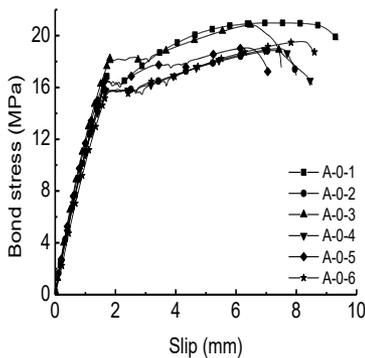
位移计架设布置

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

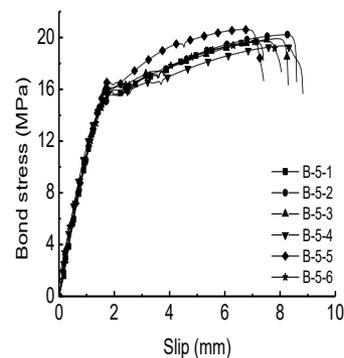
2.3 试验结果与分析—半套筒+单调



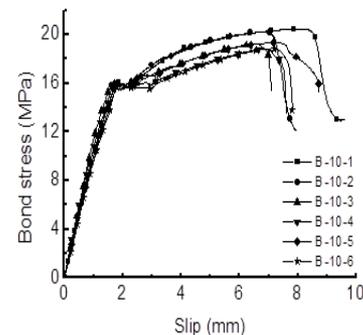
钢筋拉断破坏



(a) 无缺陷



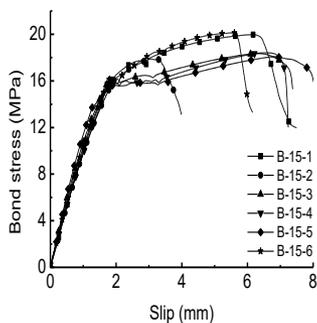
(b) 均匀缺陷 (5%)



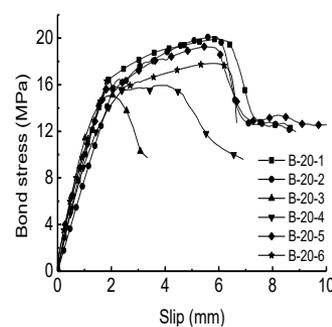
(c) 均匀缺陷 (10%)



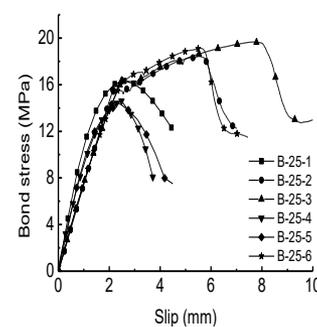
粘结截面破坏



(d) 均匀缺陷 (15%)



(e) 均匀缺陷 (20%)

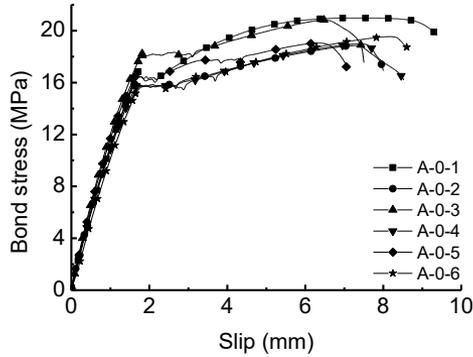


(f) 均匀缺陷 (25%)

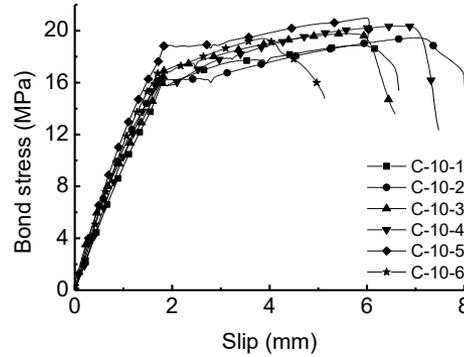
均匀缺陷下粘结-滑移曲线

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

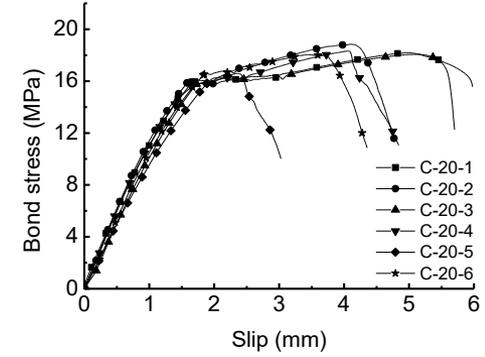
2.3 试验结果与分析—半套筒+单调



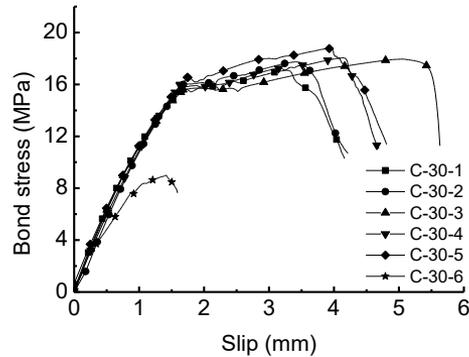
(a) 无缺陷



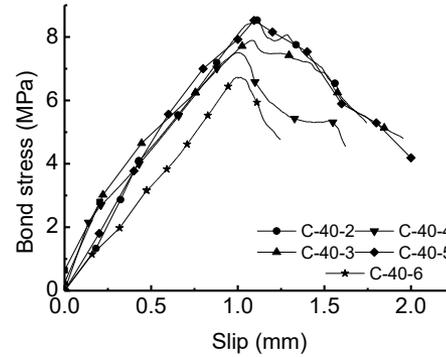
(b) 轴向缺陷 (10%)



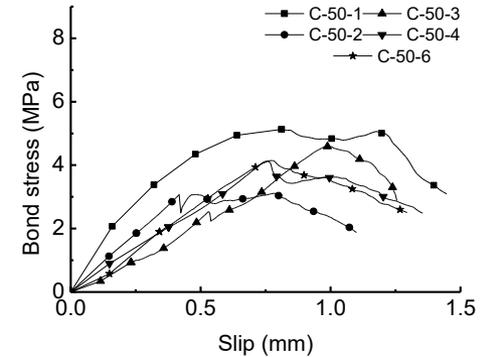
(c) 轴向缺陷 (20%)



(d) 轴向缺陷 (30%)



(e) 轴向缺陷 (40%)

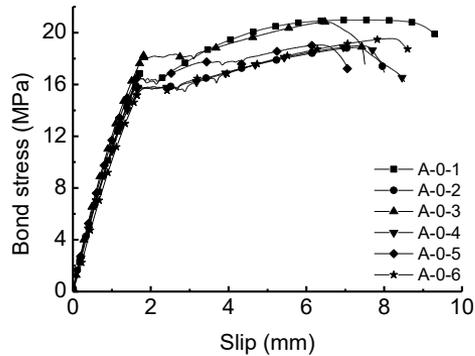


(f) 轴向缺陷 (50%)

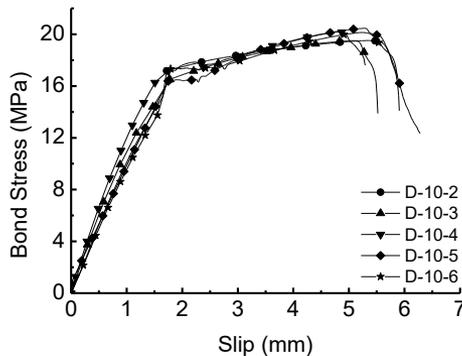
轴向缺陷下粘结-滑移曲线

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

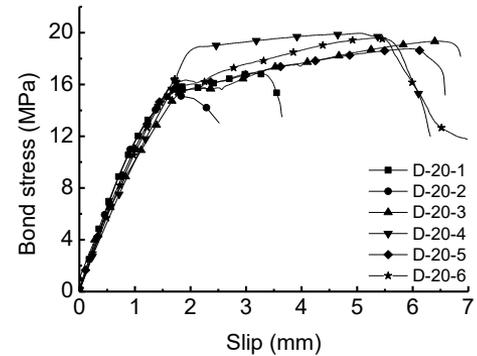
2.3 试验结果与分析—半套筒+单调



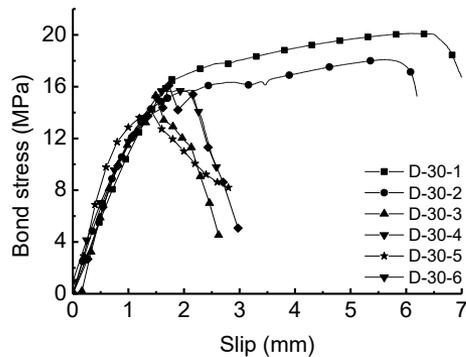
(a) 无缺陷



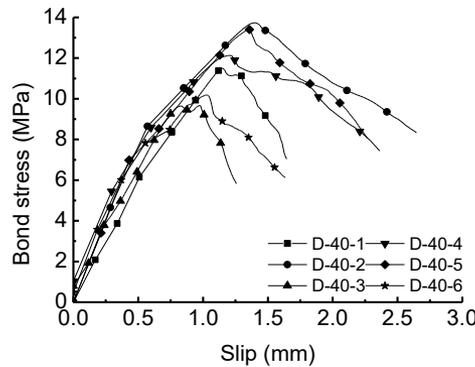
(b) 环向缺陷 (10%)



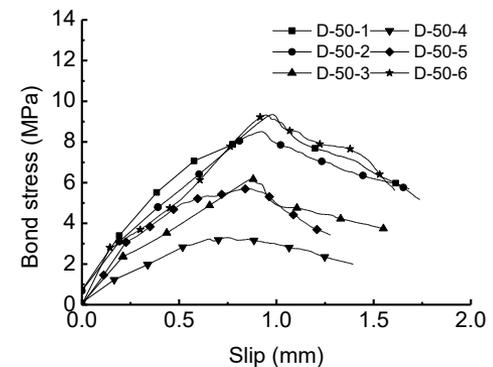
(c) 环向缺陷 (20%)



(d) 环向缺陷 (30%)



(e) 环向缺陷 (40%)

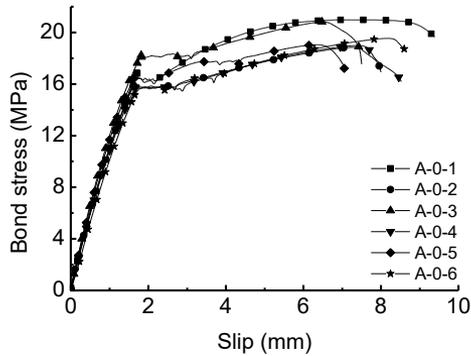


(f) 环向缺陷 (50%)

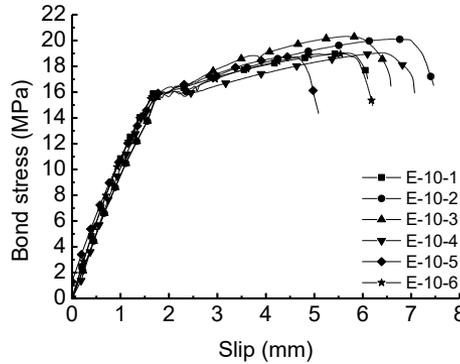
环向缺陷下粘结-滑移曲线

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

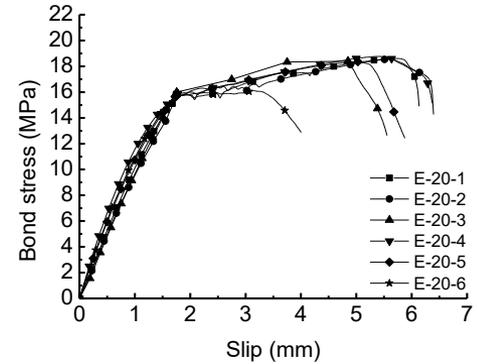
2.3 试验结果与分析—半套筒+单调



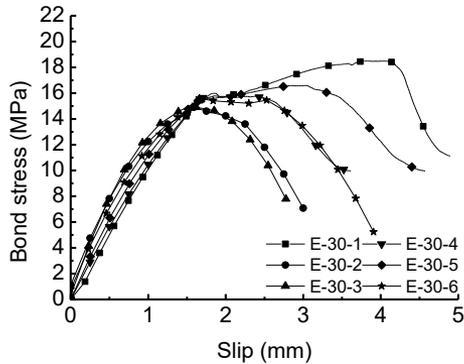
(a) 无缺陷



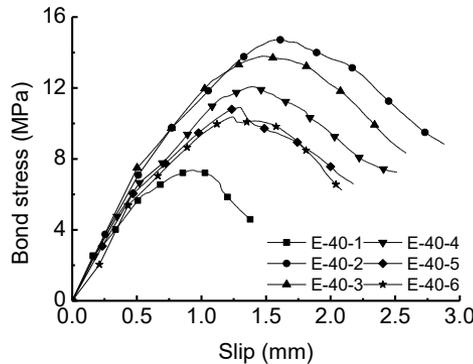
(b) 斜向缺陷 (10%)



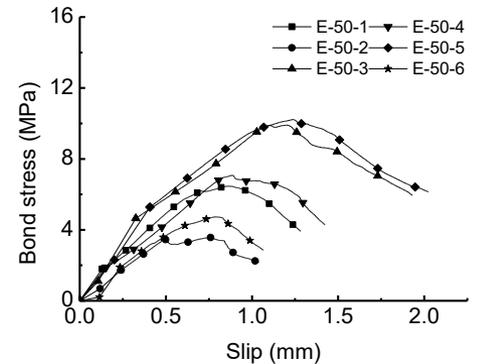
(c) 斜向缺陷 (20%)



(d) 斜向缺陷 (30%)



(e) 斜向缺陷 (40%)

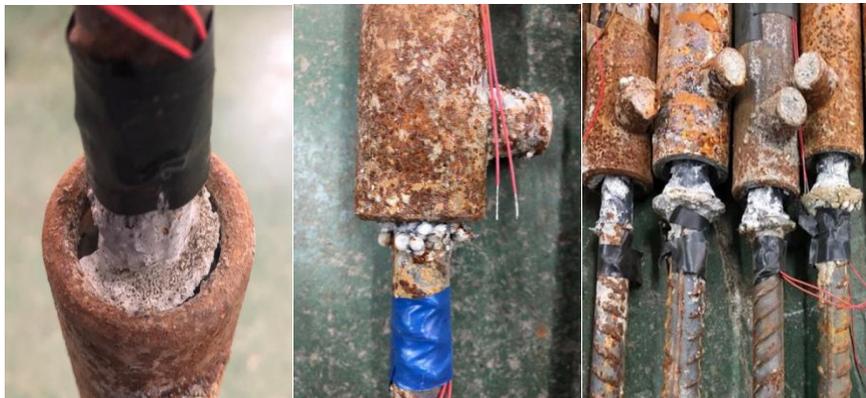


(f) 斜向缺陷 (50%)

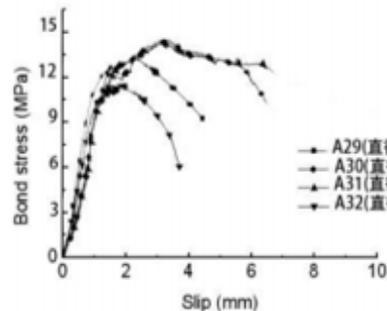
斜向缺陷下粘结-滑移曲线

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

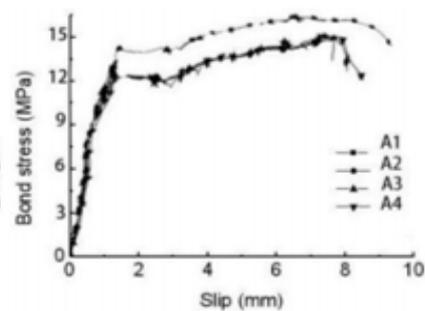
2.3 试验结果与分析—全套筒+单调



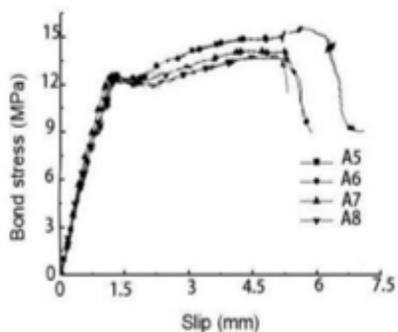
全灌浆套筒破坏形态



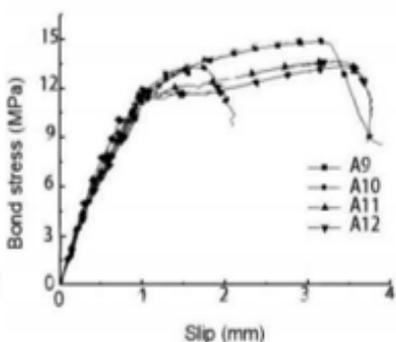
(a) 均匀缺陷 (0%)



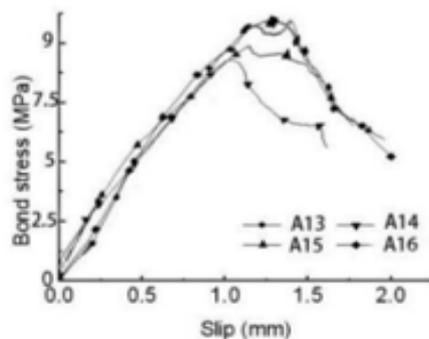
(b) 均匀缺陷 (10%)



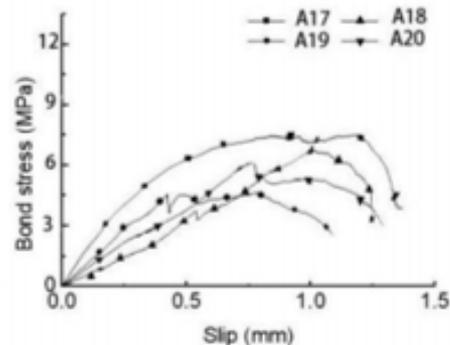
(c) 均匀缺陷 (20%)



(d) 均匀缺陷 (30%)



(e) 均匀缺陷 (40%)

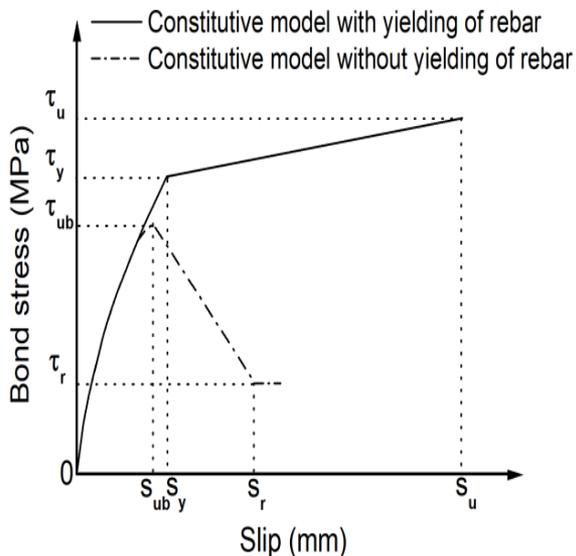


(f) 均匀缺陷 (50%)

全套筒 (钢筋直径20mm) 均匀缺陷下试件粘结滑移曲线(其它曲线从略)

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

2.3 试验结果与分析—粘结模型



钢筋屈服破坏 (非粘结破坏) 函数表达式:

$$\tau(S) = \tau_y \left(\frac{S}{S_y} \right)^\alpha \quad 0 \leq S \leq S_y$$

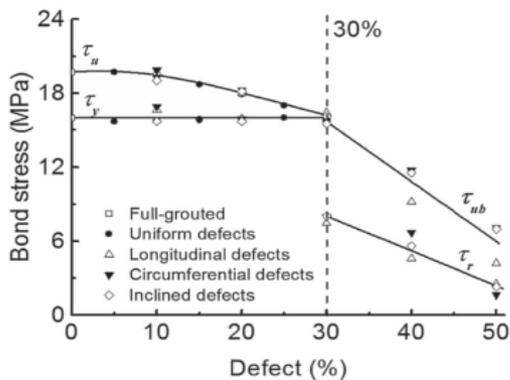
$$\tau(S) = \left(\frac{S - S_y}{S_u - S_y} \right) (\tau_u - \tau_y) + \tau_y \quad S_y \leq S \leq S_u$$

钢筋不屈服破坏 (粘结破坏) 函数表达式:

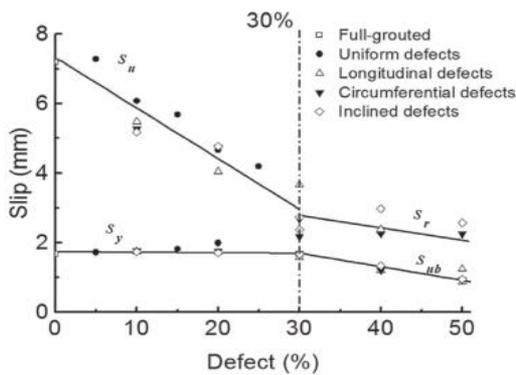
$$\tau(S) = \tau_{ub} \left(\frac{S}{S_{ub}} \right)^\alpha \quad 0 \leq S \leq S_y$$

$$\tau(S) = \left(\frac{S - S_r}{S_{ub} - S_r} \right) (\tau_{ub} - \tau_r) + \tau_r \quad S_y \leq S \leq S_u$$

$$\tau(S) = \tau_r \quad S > S_r$$



粘结强度和缺陷比例的关系



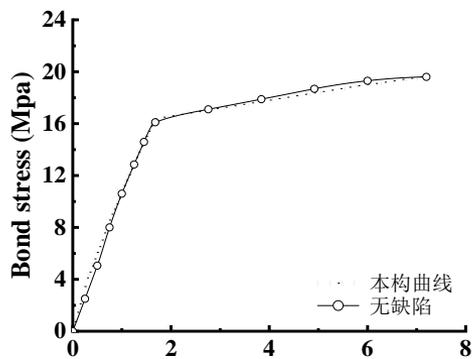
滑移量和缺陷比例的关系

结论:

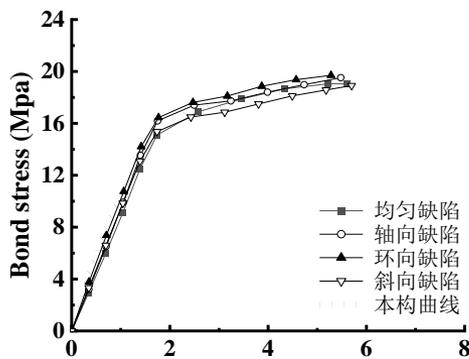
1. 30%的灌浆不足体积比是对应于钢筋屈服和未屈服破坏模式 (及钢筋拉断和粘结破坏) 的**临界值**。
2. 不同灌浆缺陷的形式影响不大, 灌浆缺陷率的影响明显。
3. 全套筒和半套筒试验数据接近, 可以统一处理。

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

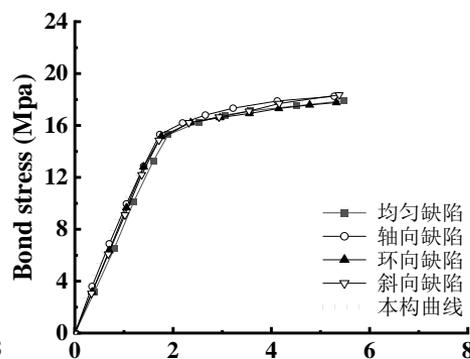
2.3 试验结果与分析—粘结模型



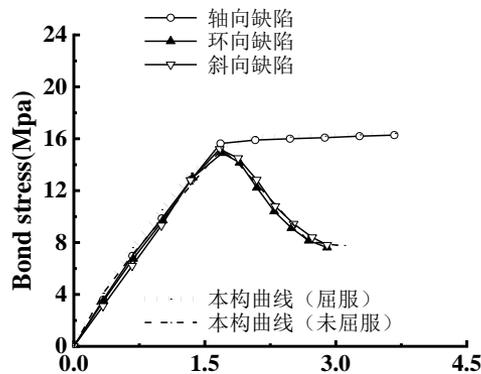
(a) 缺陷比例 (0%)



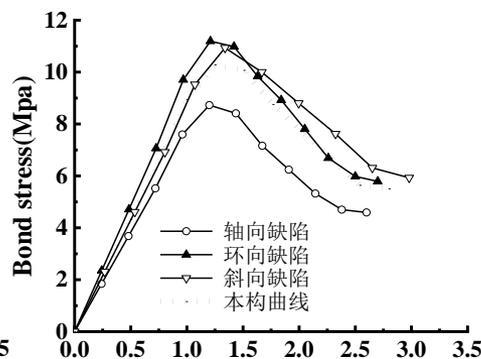
(b) 缺陷比例 (10%)



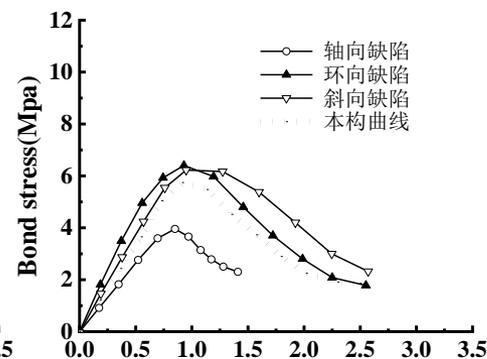
(c) 缺陷比例 (20%)



(d) 缺陷比例 (30%)



(e) 缺陷比例 (40%)

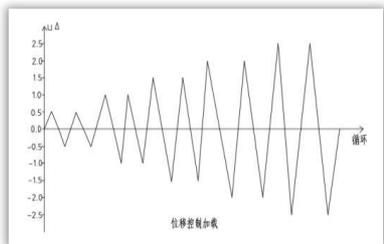


(f) 缺陷比例 (50%)

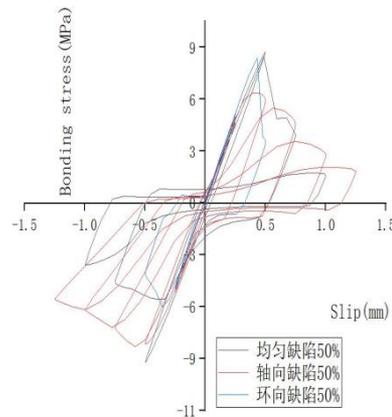
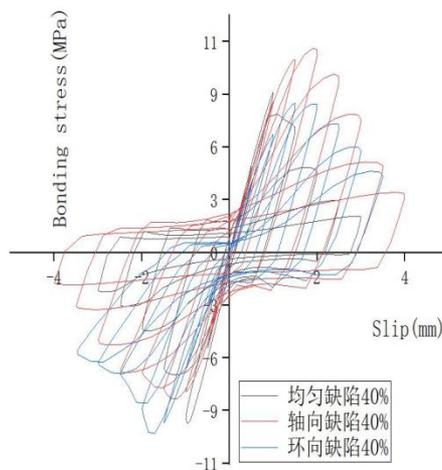
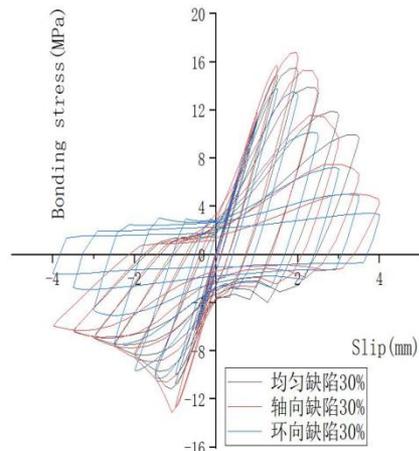
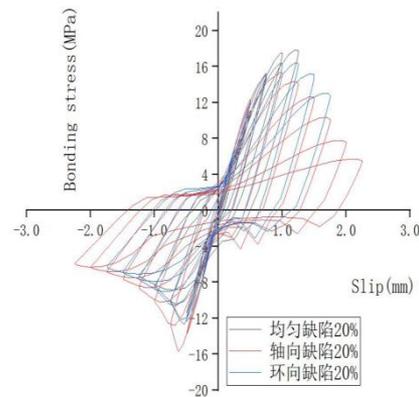
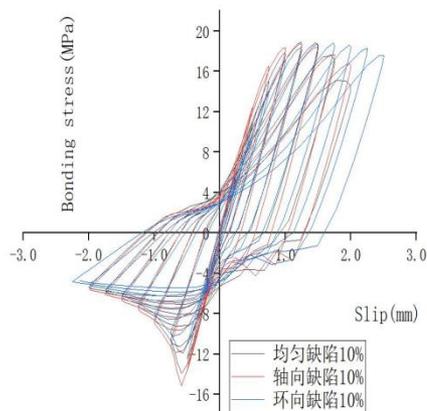
本构模型与试验曲线对比 (半套筒为例)

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

2.4 反复荷载下的粘结关系和模型



MTS疲劳机试验设备示意图

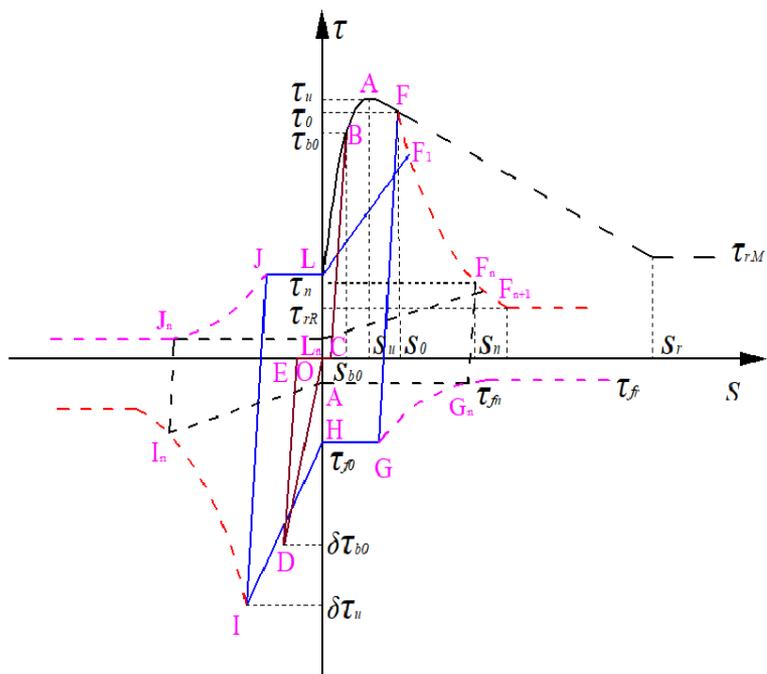


综合环比以上三种缺陷形式，可以发现在全灌浆钢筋套筒试件中，砂浆骨料分布越均匀，套筒的承载力越大，其粘结性能越好，曲线软化阶段离散性越小。

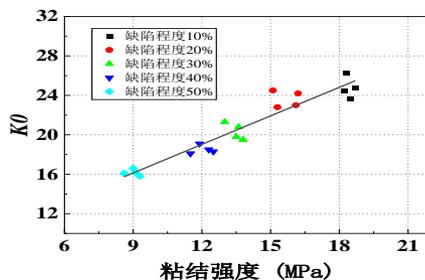
三种缺陷形式粘结-滑移曲线对比

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

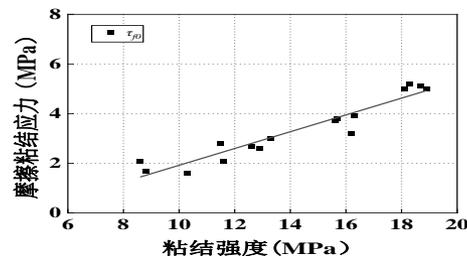
2.4 反复荷载下的粘结关系和模型



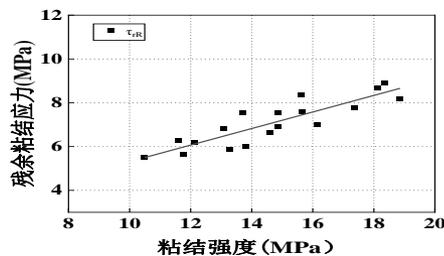
往复荷载作用下带灌浆缺陷套筒钢筋的粘结-滑移模型



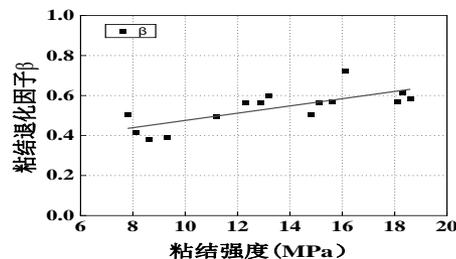
卸载刚度K0与粘结强度



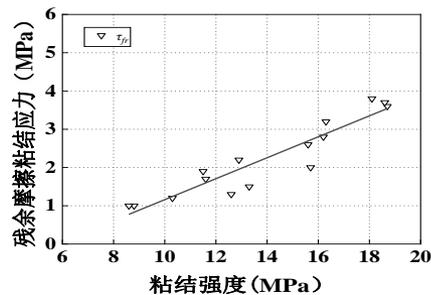
摩擦粘结应力与粘结强度



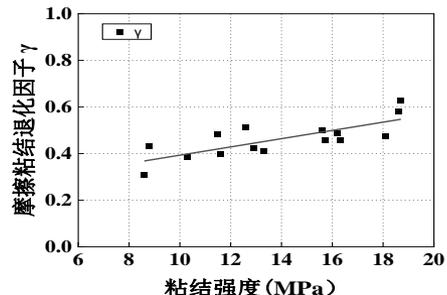
残余粘结应力与粘结强度



粘结退化因子β与粘结强度



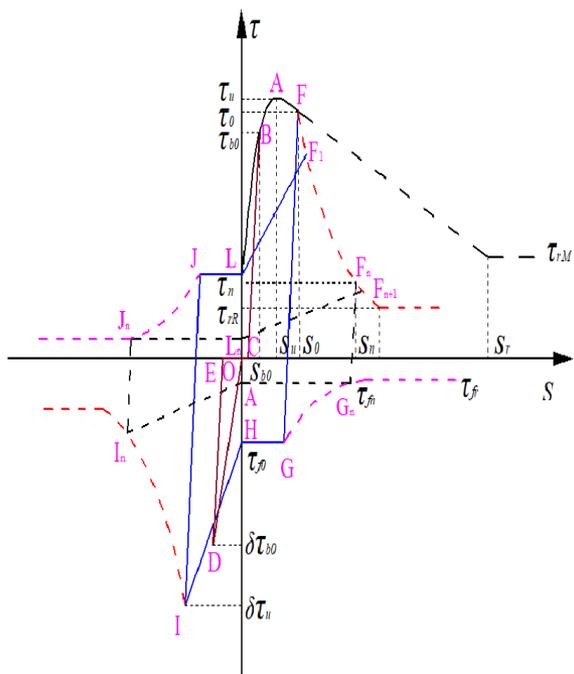
残余摩擦粘结应力与粘结强度



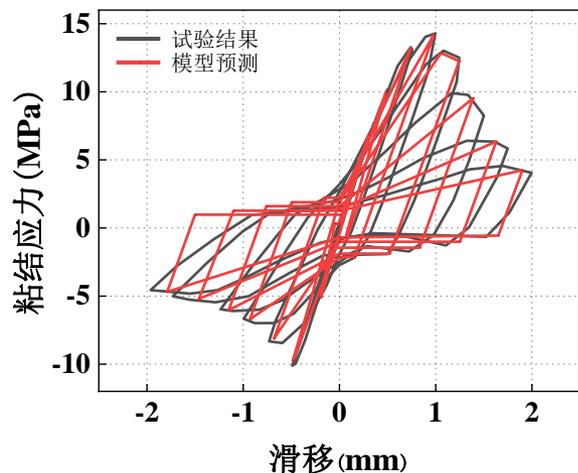
摩擦粘结退化因子γ与粘结强度

2. 灌浆缺陷对套筒连接性能的影响

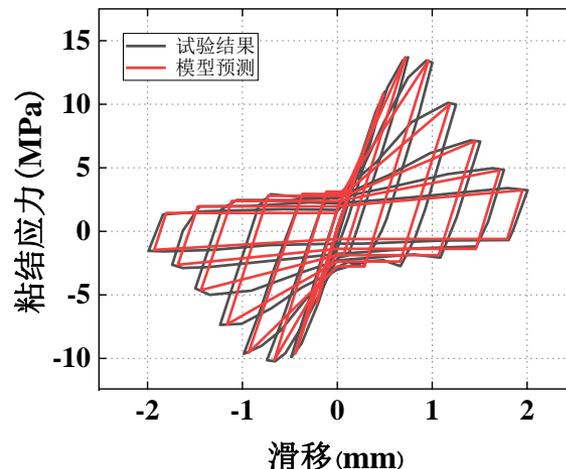
2.4 反复荷载下的粘结关系和模型



往复荷载作用下带灌浆缺陷套筒钢筋的粘结-滑移模型



试件Q-MT-ZX-18-30



试件Q-MT-HX-18-30

①提出的往复荷载作用下的粘结-滑移模型能较好的体现出粘结应力随卸载位移增加的退化规律以及摩擦粘结应力的**退化规律**。

②预测的卸载段曲线与实际测得的卸载曲线存在一定的误差，因实际卸载过程中，试件的卸载刚度是在**不断变化**的，从对比曲线中能够体现出卸载的基本状态。

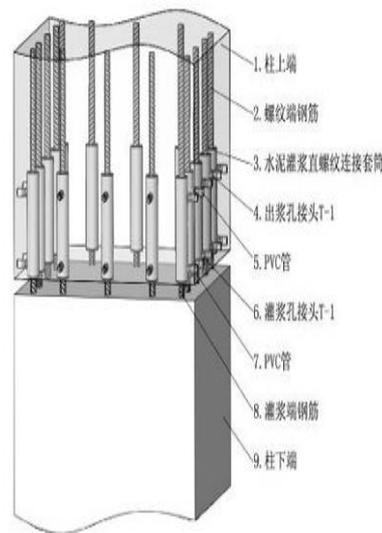
3. 灌浆缺陷对PC梁柱节点性能的影响



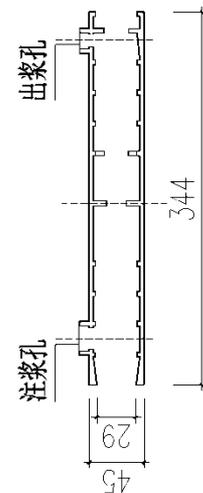
3.1 试验设计

目标：通过PC节点低周性能试验，考察套筒连接缺陷对节点受力性能的影响。

概况：进行了4个PC梁-柱节点模型低周试验，预制上柱/下柱采用套筒灌浆连接，灌浆缺陷率分别0%~45%（所有套筒同缺陷率）。



柱端套筒连接



全套筒示意图

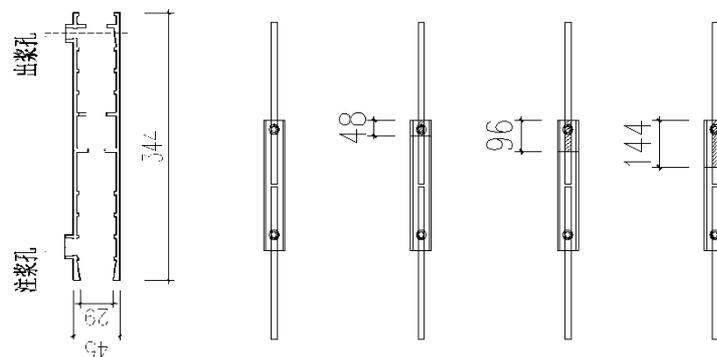
3. 灌浆缺陷对PC梁柱节点性能的影响



3.1 试验设计

目标：通过PC节点低周性能试验，考察套筒连接缺陷对节点受力性能的影响。

概况：进行了4个PC梁-柱节点模型低周试验，预制上柱/下柱采用套筒灌浆连接，灌浆缺陷率分别0%~45%（所有套筒同缺陷率）。



节点模型灌浆密实度

试件编号	缺陷率	缺陷长度 (mm)
JD-1	缺陷率 0%	0
JD-2	缺陷率 15%	48
JD-3	缺陷率 30%	96
JD-4	缺陷率 45%	144

3. 灌浆缺陷对PC梁柱节点性能的影响



3.2 试验过程—制作



预制梁



预制柱



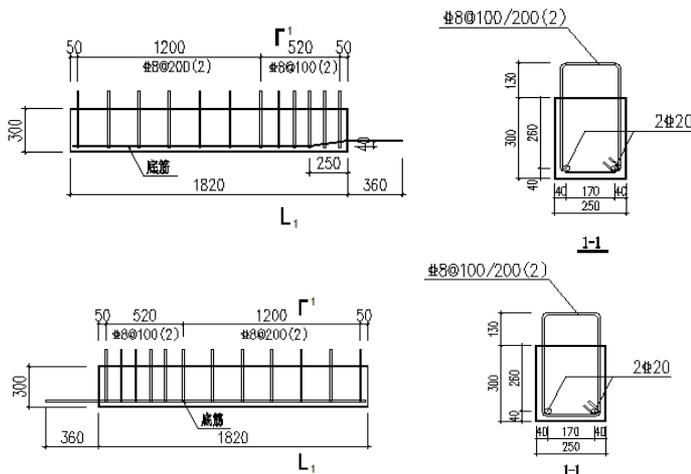
构件吊装



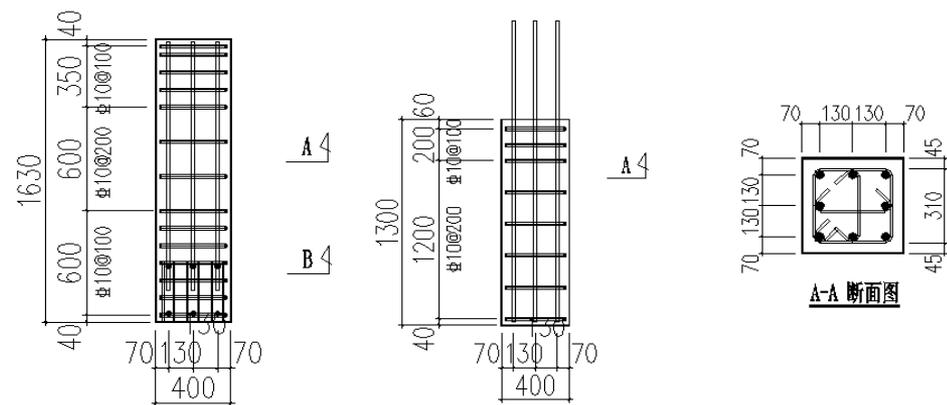
节点现浇



PC节点



左/右梁配筋详图

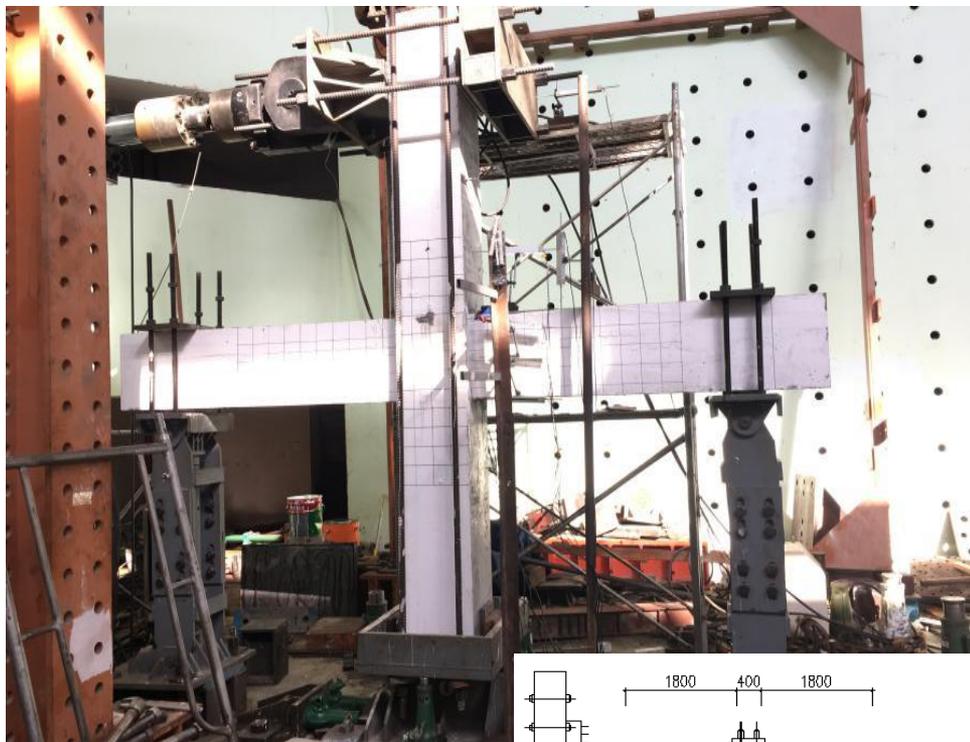


上/下柱配筋详图

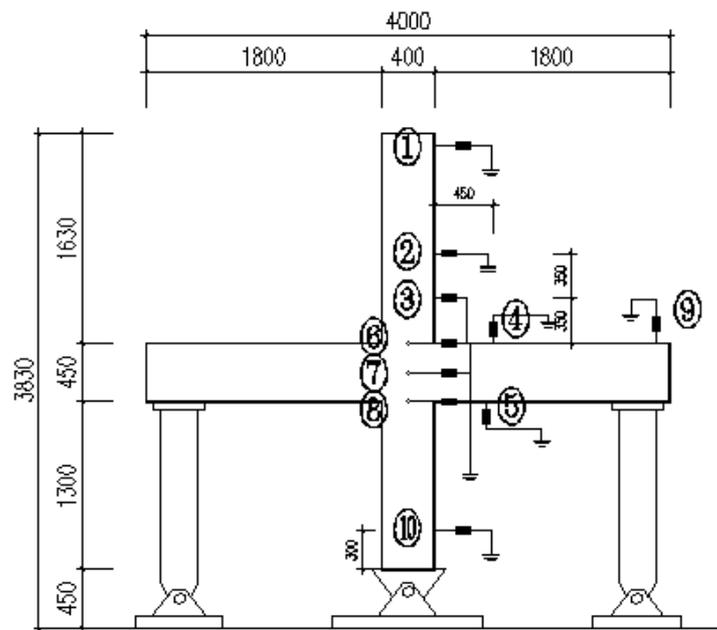
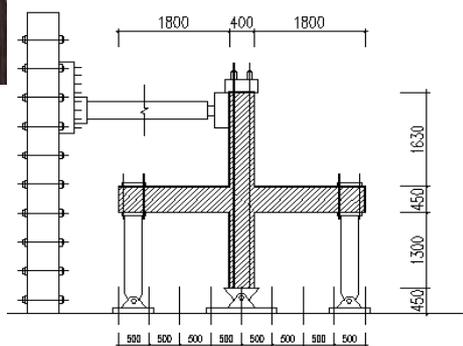
3. 灌浆缺陷对PC梁柱节点性能的影响



3.2 试验过程—测试



节点加载装置

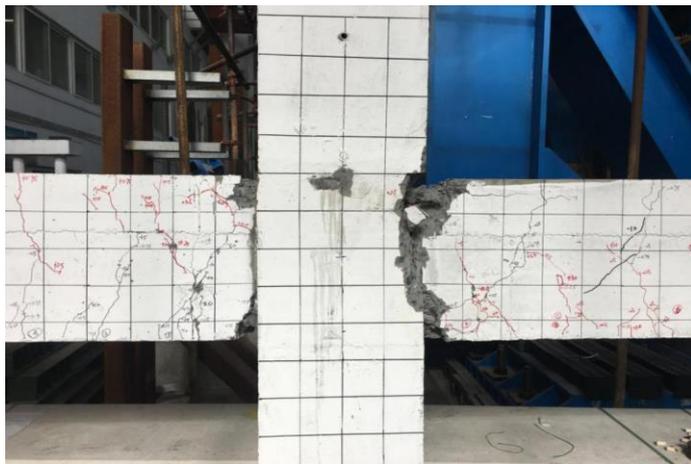


位移计布置图

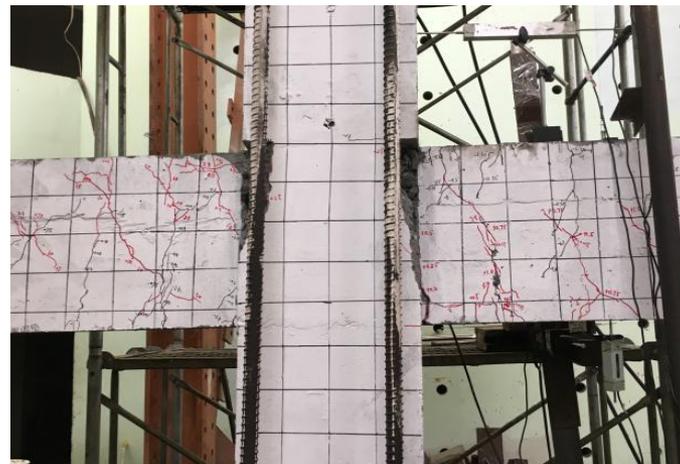
3. 灌浆缺陷对PC梁柱节点性能的影响



3.3 试验结果与分析—试验现象



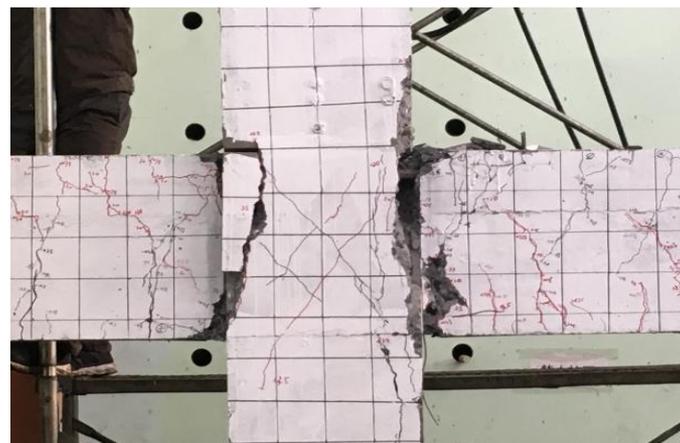
JD-1破坏形态



JD-2破坏形态



JD-3破坏形态

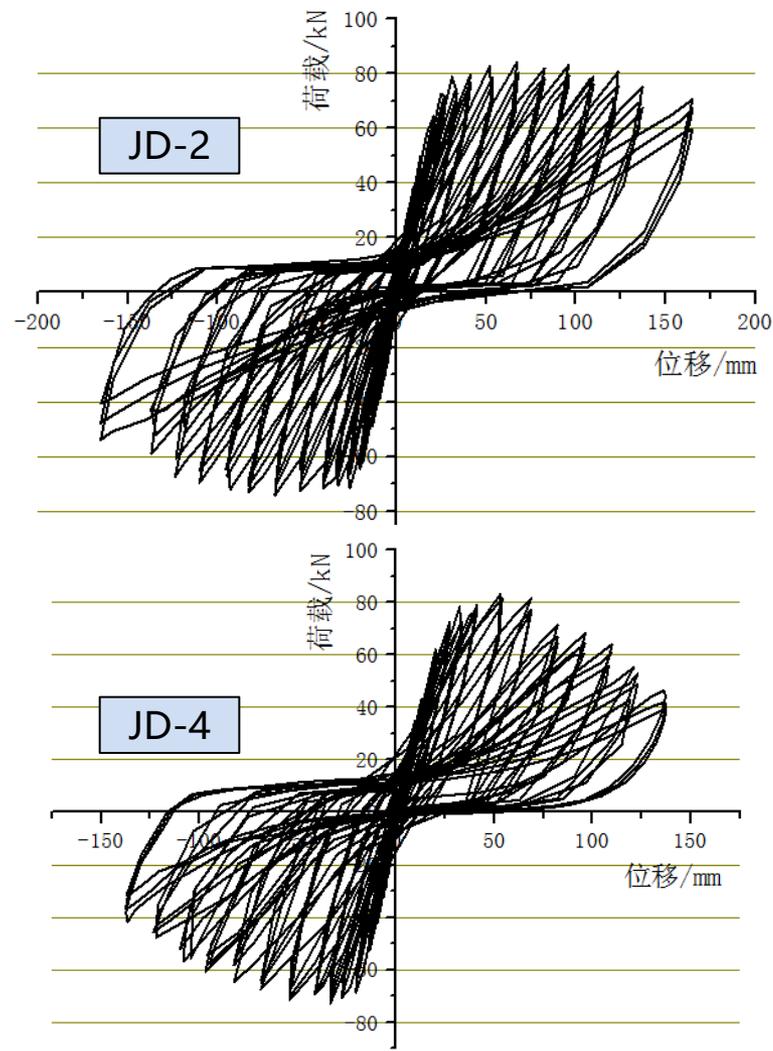
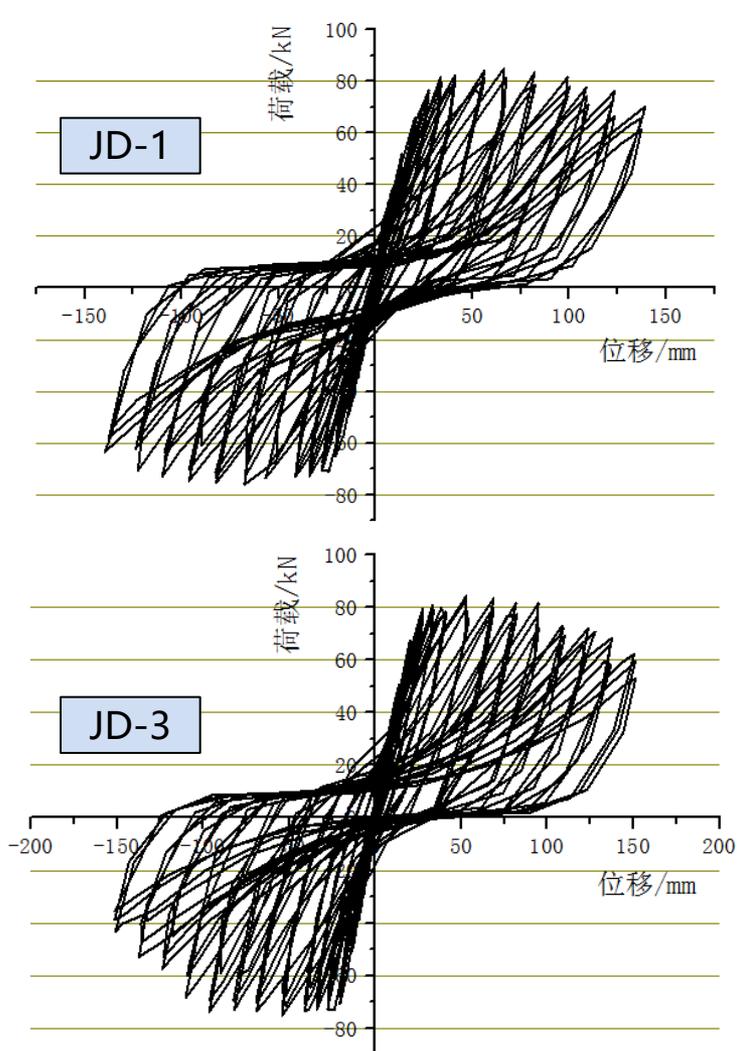


JD-4破坏形态

3. 灌浆缺陷对PC梁柱节点性能的影响



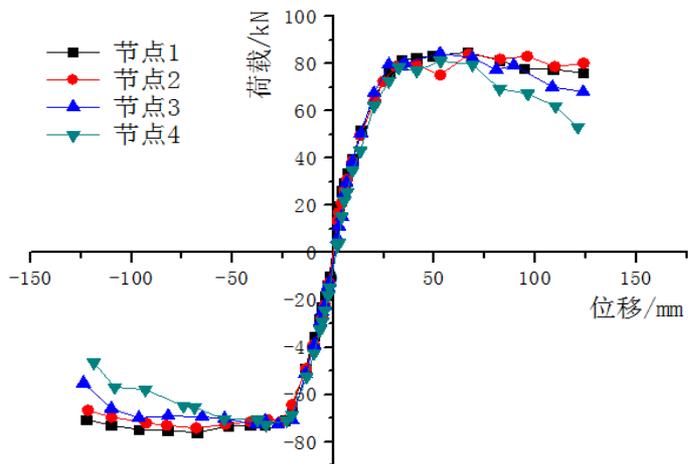
3.3 试验结果与分析—滞回曲线



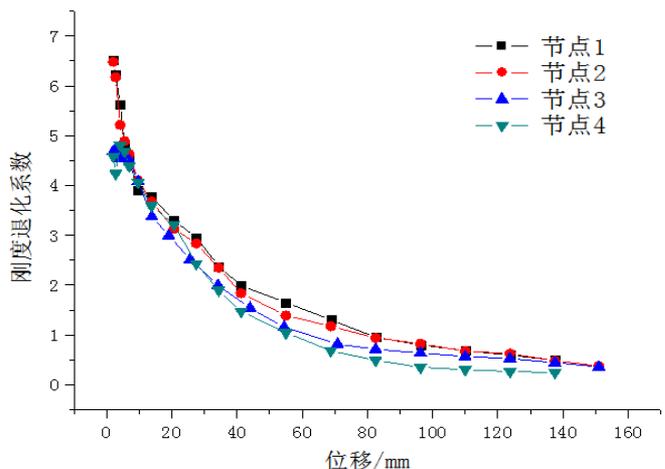
3. 灌浆缺陷对PC梁柱节点性能的影响



3.3 试验结果与分析—骨架曲线



骨架曲线



刚度退化曲线

骨架曲线特征点

	节点1		节点2		节点3		节点4	
	正	负	正	负	正	负	正	负
开裂荷载	29.7	24.8	26.6	25.3	25	24.9	23	24.1
开裂位移	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
屈服荷载	82.3	72.9	79.4	71.5	78.4	69.2	76.9	69.3
屈服位移	41.2	41.2	41.1	41.2	41.1	40.9	41.3	41.1
峰值荷载	86.9	78	86.1	77.1	83.4	75.1	82.6	72.4
峰值位移	66.3	67.6	67	68	68.8	53.9	68.9	54
破坏荷载	70.3	63.4	71.5	58.9	68.3	59.4	68.2	59.9
破坏位移	139.5	139.8	137.3	136.8	137.5	123.6	96.4	93.1

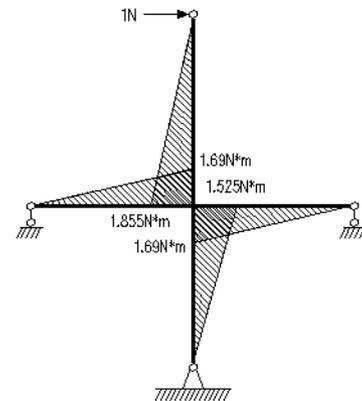
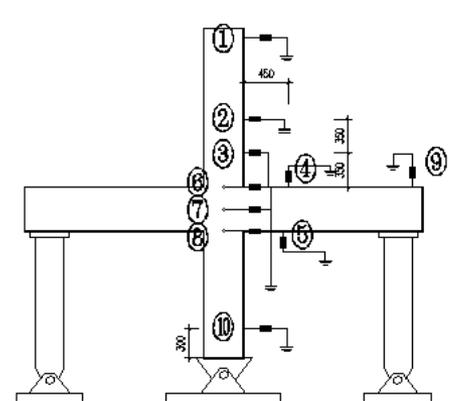
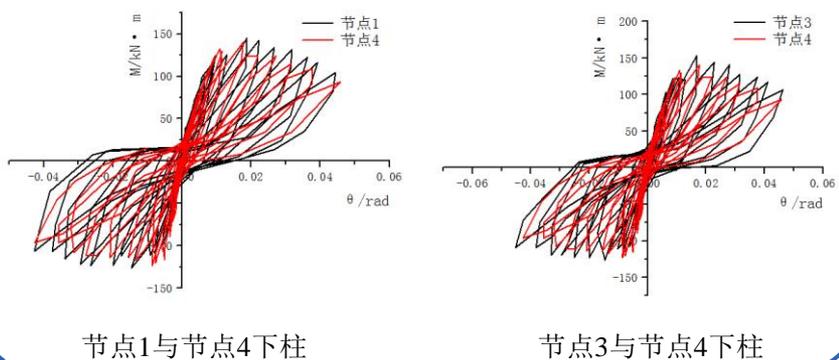
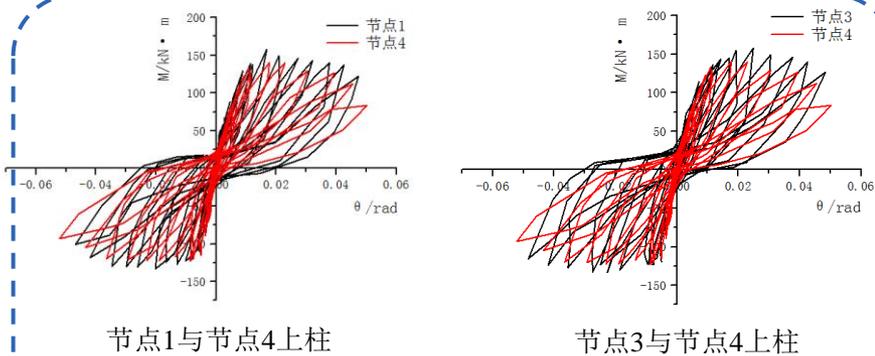
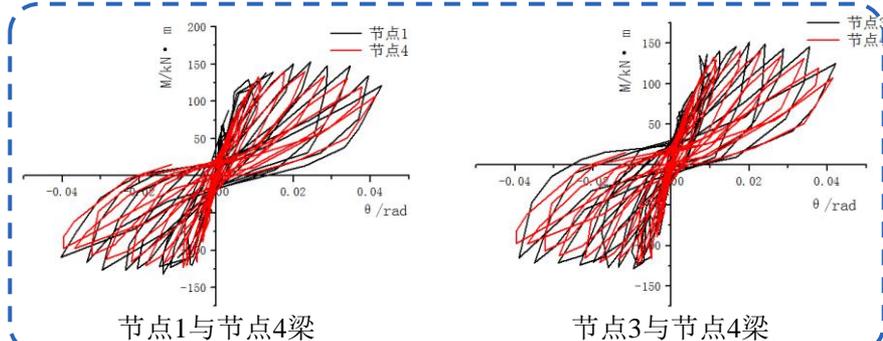
延性参数

	节点1		节点2		节点3		节点4	
	正	负	正	负	正	负	正	负
延性系数	3.39	3.39	3.34	3.32	3.35	3.02	2.33	2.27

3. 灌浆缺陷对PC梁柱节点性能的影响



3.3 试验结果与分析—承载力与转角变形



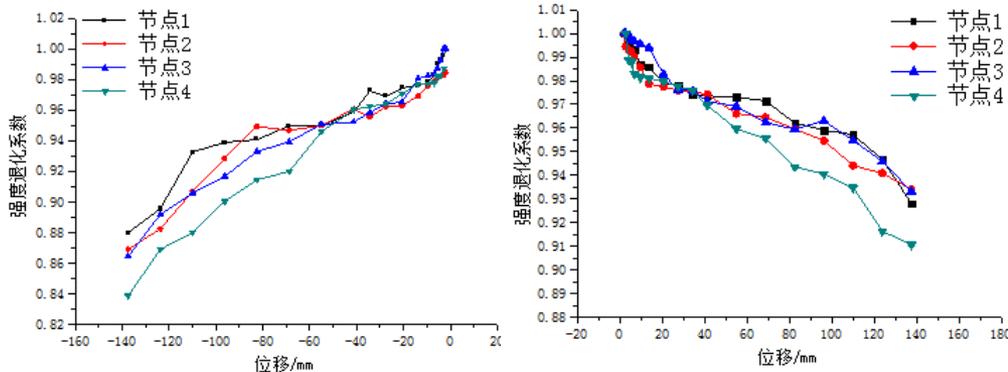
峰值塑性转角以及破坏塑性转角

节点编号	位置	峰值转角		破坏转角	
		正向	反向	正向	反向
节点1	上柱	0.0249	0.0212	0.0374	0.0387
	下柱	0.0220	0.0236	0.0369	0.0365
节点3	上柱	0.0206	0.0192	0.0387	0.0382
	下柱	0.0210	0.0270	0.0378	0.0371
节点4	上柱	0.0218	0.0186	0.0459	0.0397
	下柱	0.0203	0.0172	0.0326	0.0324

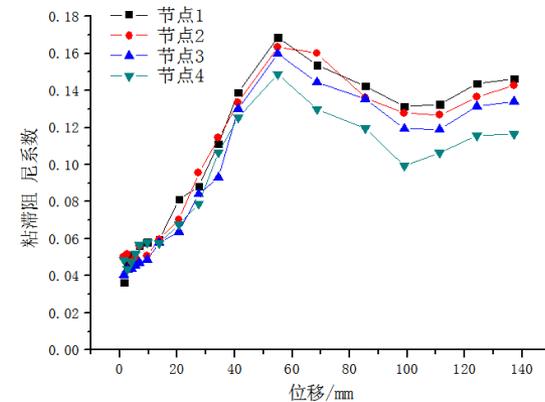
3. 灌浆缺陷对PC梁柱节点性能的影响



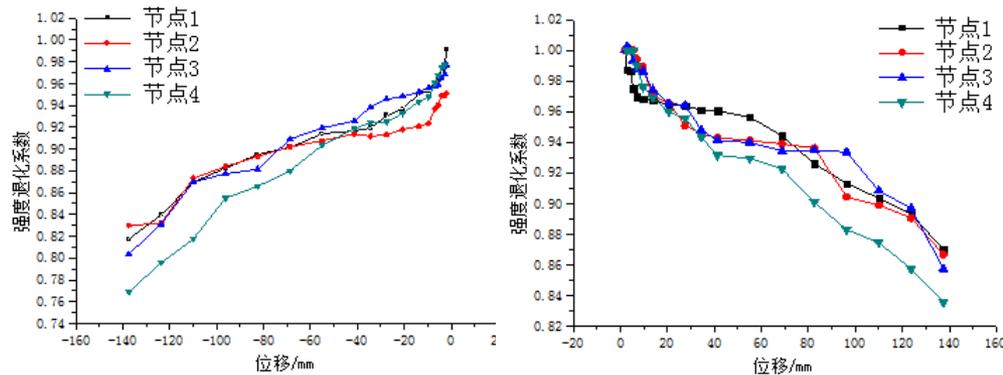
3.3 试验结果与分析—耗能能力



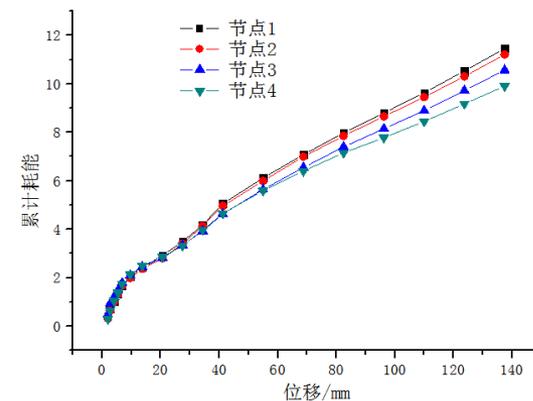
J=2时强度退化曲线



粘滞阻尼系数曲线



J=3时强度退化曲线

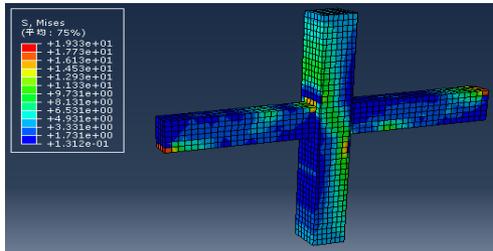


累计耗能曲线

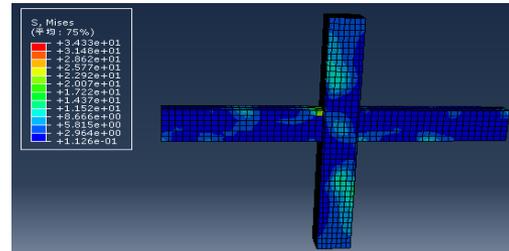
3. 灌浆缺陷对PC梁柱节点性能的影响



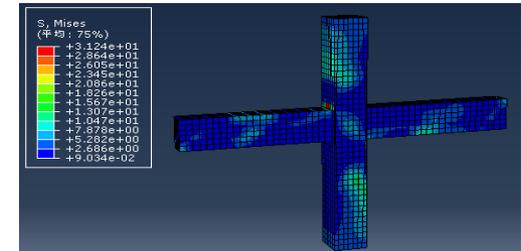
3.4 数值分析



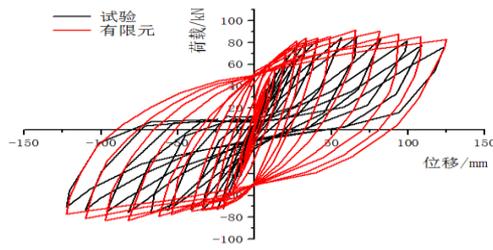
JD-1混凝土应力云



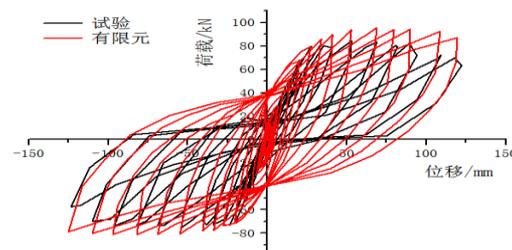
JD-3混凝土应力云



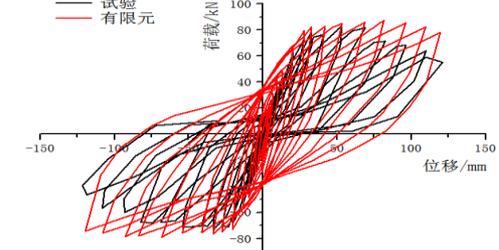
JD-4混凝土应力云



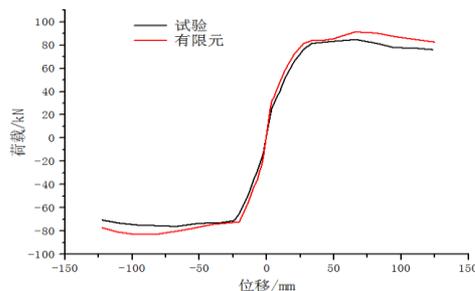
JD-1滞回曲线



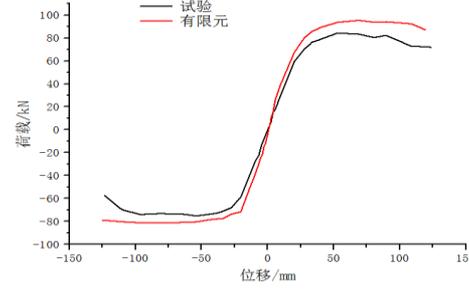
JD-3滞回曲线



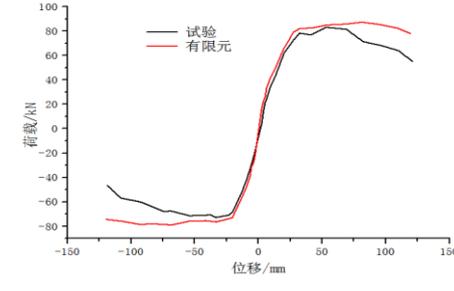
JD-4滞回曲线



JD-1骨架曲线



JD-3骨架曲线



JD-4骨架曲线



请各位同事批评指正！