DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201609035

钢管混凝土梁柱新型连接节点抗震性能试验

朱海清, 张谢东, 李 营, 张 行

(武汉理工大学 交通学院, 武汉 430063)

摘 要: 为进一步研究钢管混凝土桥墩在地震作用下的变形与破坏机理,促进钢管混凝土墩柱在桥梁中的应用,提出一种新型的钢管混凝土梁柱节点,并对新型节点试件与传统一体化浇筑的节点试件进行了轴压和水平低周反复荷载共同作用下的试验. 考察了节点不同浇筑方式、钢管柱不同埋深、选用不同屈服强度钢管对该类节点的抗震性能的影响,对节点破坏形式、滞回曲线、变形能力、累积耗能等抗震指标进行对比分析. 结果表明:新型节点试件相对传统节点,钢管与混凝土粘结良好,无明显滑移或脱开破坏;试件的延性和耗能都相对于传统节点试件稍有提高. 对于设计为耗能元件的构件,柱选用屈服强度低的钢管比屈服强度高的钢管耗能效果更好,并且能够更好的保证连接梁的完整性.

关键词: 钢管混凝土柱;节点;屈服强度;低周反复荷载

中图分类号: U443.2;TU398.9 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2017)09-0070-09

Seismic behavior of a new CFST column-to-beam connection

ZHU Haiqing, ZHANG Xiedong, LI Ying, ZHANG Hang

(School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to achieve a further understanding of the nonlinear behaviors and damage mechanism of concrete-filled steel tubular (CFST) piers, a new type of CFST column-to-cap beam connection was proposed. The proposed connections and corresponding traditional monolithic connections were tested under combined axial loading and lateral quasi-static loading. The connections with different casting methods, different CFST column embed length, different CFST tube yield strength were constructed. Their damage modes, hysteretic curves, ductile capacity and accumulation energy dissipating were studied compared with each other. Research results indicate that the CFST column-to-cap beam connections with replaceable components perform a good bonding capacity. The ductility and earthquake energy dissipating capacity of the proposed connection is better than that of the traditional monolithic connection. Furthermore, for those connections designed as endergonic members, steel tubes with low yield stress perform a better energy dissipating than that of steel tubes with high yield stress, which will decrease the cap beam's damage by a large extent.

Keywords: concrete filled steel tube; connection; yield stress; quasi-static loading test

随着人们对震后结构能够迅速恢复使用功能的要求,抗震设计逐渐从"大震不倒、中震可修、小震不坏"的理念向"可恢复功能结构"转换[1-2]. 通常指在结构某部位设置延性耗能构件,震后能快速修复或者更换这些构件,以达到快速恢复结构功能的目的. 其中运用比较成熟的有日本、美国以及我国台湾地区的框架结构中普遍使用的型钢防屈曲支撑以及剪力墙[3-5],表现出非常良好的耗能特性. 随着抗震设计的需要,不同构件在结构体系中担任着不同的使命,例如承重构件、消能构件、固定构件等,分工明确,更好的服务着整个体系.

桥梁在地震中的破坏通常从桥墩破坏开始,引起整个结构连续性倒塌,图1中为常见的4种地震引起的桥墩破坏状态,其中图1(a)、1(d)来源于文献[6],图1(b)、1(c)来源于百度图片. 依次为:1)桥墩中部横向约束钢筋(箍筋)配置不足引起的剪切破坏;2)梁柱节点配筋不足,竖直柱纵向配筋不足,盖梁锚固钢筋长度不足,呈现明确的剪切-弯曲破坏;3)墩柱明显错开,呈压剪破坏,主要因为配筋不足引起的斜截面承载力不足;4)墩柱底部保护层混凝土剥落,核心混凝土被压碎,呈明显地压弯破坏. 早期的钢筋混凝土桥墩的震损非常普遍和严重. 一方面,文献[7]通过试验证明了钢管混凝土桥墩的抗震性能优于普通钢筋混凝土桥墩;另一方面,图1中桥墩破坏而主梁状态良好的案例,只要修复或更换桥墩构件,桥梁的功能即可迅速恢复. 钢管混凝土柱作为桥墩既可以提高桥梁的抗震性能,又可以提高桥梁的建造速度,近年来正在越来越广泛的

收稿日期: 2016-09-10
基金项目: 国家自然科学基金(51408450)
作者简介: 朱海清(1988—),女,博士研究生;
张谢东(1964—),男,教授,博士生导师
通信作者: 李 营,liying@whut.edu.cn

应用. 钢管混凝土柱与盖梁的节点形式倾向于 T 型节点，而不同于多层建筑的中节点或边节点. 且近年来，为了满足抗震和快速施工的要求，多层建筑中的钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点[8-9]的节点形式逐渐创新. 然而，目前对钢管混凝土柱作为桥墩与盖梁的连接研究还比较缺乏.



(a)Foothill Boulevard 桥 (1994 年 Northridge 地震)　(b)阪神高速高架桥 (1995 年阪神地震)　(c)台湾集集镇某桥 (1999 年集集地震)　(d)百花大桥 (2008 年汶川地震)

图 1　常见桥墩地震破坏形式

Fig.1　General earthquake damage status of piers

1　试验概况

1.1　材料特性

钢管混凝土结构设计规范[10]规定：钢管混凝土构件中钢管可采用 Q235、Q345、Q390、Q420 和 Q345GJ 等钢材，且当有可靠依据时选用其他牌号的钢材. 本文将钢材按照使用目的分为明显的 4 种等级：低屈服点钢、碳素结构钢、低合金高强度钢和超高强度钢，4 种钢材的典型代表以及各自的力学特性列于表 1 中. 表中 E 为杨氏模量，G 为剪切模量，t 为钢材厚度，e 为伸长率，f_y 为钢材屈服强度，f_u 为钢材极限强度，f_v 为钢材抗剪强度.

表 1　钢材特性

Tab.1　Steel properties

类型	E/GPa	G/GPa	t/mm	f_y/GPa	f_u/GPa	f_v/GPa	e/%
LYP100	206	79	6~50	80~120	200~300	140~210	≥50
Q275	206	79	≤16	≥275	410~540	280~380	≥22
Q345	206	79	≤16	≥345	470~630	330~440	≥21~22
Q500	206	79	≤16	≥500	610~770	430~540	≥17

低屈服点钢材的屈服强度主要分 3 个等级：100、160、225 MPa，各国规范略有不同，但是低屈服点钢材统一表现出延伸率大于 40%的特性. 而普通碳钢、合金钢的延伸率则小于 30%. 碳素结构钢[11]的屈服强度在 195~275 MPa 之间，文献[12]取消了 Q295 的强度级别，因此可将屈服强度在 295 MPa 左右的钢材视为普通合金钢. 目前用于运输天然气、石油等的管材选用 Q290 钢，美国对应为 API 5L-X42 钢[13]，这种钢材具有很强的抗震和抗疲劳特性，能够承受地震和路面车辆等活荷载的影响. 低合金高强度钢的代表为 Q345 钢，目前桥梁用钢以 Q345 为主，具有良好的综合力学性能和可焊接性能，具有良好的抗拉强度和延伸率，是目前我国用途非常广泛的结构钢. 超高强度管材指屈服强度大于 345 MPa 的钢材，目前在输变电工程中较常使用的为 Q420 钢材，至于更高屈服强度的 Q690 钢在工程结构中的使用主要处于研发阶段[14-15].

混凝土材料具有良好的抗压特性，钢管具有良好的抗拉特性，在钢管混凝土组合结构里更是因为约束效应更能提高强两者的性能. 本文介绍的是一种新型钢管混凝土柱-盖梁节点，引入了一种新型粘结材料 grout[16]，它具有良好的粘结性能和优于普通混凝土的延伸性能，具有足够的抗压性能且不会干缩，是一种专门用于填充不同构件接触间隙的纤维加强水泥砂浆. 该种材料物质主要成分有：二氧化硅质量分数 50%~75%；水泥质量分数 25%~50%；硫酸钙质量分数≤2.5%；氧化铝质量分数≤1%；其他聚合物质量分数≤1%. 根据填充空间的可操作难度，每包固体 grout 产品加入 3.1 L 的水可拌和为流动性一般的混合物，加入 3.8 L 水可拌和为流动性较好的混合物(每包 grout 产品重 50 lb，约为 22.67 kg). 该种纤维加强砂浆具有较高的早期强度，实验室测量的 Φ150 mm×300 mm 圆柱体 1 d 抗压强度设计值流动性一般和流动性较好的分别为 41.3、31.0 MPa，7 d 后分别为 56.5、48.2 MPa，28 d 后分别为 68.9、62.0 MPa.

1.2　试件设计

1.2.1　设计原则

试件设计的原则和公式在文献[17]中有详细介绍，这里仅给出最基本的设计步骤和需满足的要求，可根据具体案例和不同规范，稍作调整. 1)材料强度.钢管混凝土构件的材料选择满足最基本的要求，中国规范[10]要求混凝土强度等级 C30~C80，钢材 Q235 以上；美国规范[18]要求混凝土强度 4 ksi (约 28 MPa)以上，钢材 50 ksi(约 350 MPa)以上. 粘结 grout 的纤维体积分数约 0.2%，且达到约 70 MPa的抗压强度. 2)抗弯强度.需满足 $P-M$ 曲线，及轴压力-截面弯矩曲线. 3)钢管厚度限制.通常指钢管径厚比(外径与厚度的比值)，该指标通常

评价钢管的局部屈曲，中国规范为 $(20\times\frac{235}{f_y})$ ~ $(135\times\frac{235}{f_y})$，美国规范为不大于 $0.22\frac{E_s}{F_y}$. 4）轴向压力限制.钢管压弯现象跟柱的长度、刚度相关，即 $P_{cr}=0.658^{\frac{P_0}{P_e}}P_0$（短柱），$P_{cr}=0.877P_e$（长柱），其中 $P_0=0.95f'_cA_c+F_yA_s$，P_{cr} 为允许轴压力，P_e 为根据欧拉方程得到的临界屈曲压力，P_0 为组合柱的轴向极限抗压承载力，f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度，A_c 为混凝土面积，f_y 为钢材屈服强度，A_s 为钢管面积. 5）柱脚埋深. 通常指钢管混凝土柱埋入盖梁/基础混凝土的深度，中国规范要求房屋厂房等建筑不小于 1.5 D，文献[17]建议不小于 0.9D. 6）盖梁/基础设计. 盖梁或基础需满足抗弯、抗剪强度和冲切破坏强度，抗剪环等连接件细部需满足焊接强度和受剪承载力.

1.2.2 施工步骤

钢管混凝土柱的延性破坏主要取决于钢管的钢材强度，本文试件为桥墩与盖梁节点，仍需要承重，对于低屈服点钢在该种节点中的应用，本文暂不讨论，因此主要设计了 4 组共 7 个大规模试件. 试件几何尺寸和埋入形式如图 2、3 所示，试件清单如表 2 所示. 试件设计为倒置的“T”型，思路来源于文献[19]，主要考虑了实际工程中盖梁-墩或者墩-基础既会承受压力，地震作用下也会承受侧向力. 试件设计并不是包括盖梁-墩-基础的“工”型，主要考虑了结构的对称原理，对节点进行了简化. 图 2 为模型大样，图 3(a)为采用了纤维加强砂浆的新型节点，图 3(b)为传统节点. Low、Mid、High 代表钢材屈服强度的高、中、低；Corr 代表对比试件，是 Corresponding 的简写；L_e 为钢管混凝土柱埋入盖梁混凝土深度；f'_{col} 为钢管内混凝土圆柱体抗压强度；f'_{cap} 为盖梁混凝土圆柱体抗压强度；f'_{grout} 为纤维加强砂浆圆柱体抗压强度.

所有试件除了埋深和连接形式有所区别，其他几何尺寸相同. 试件施工时，一体化节点浇筑同普通钢管混凝土结构施工；新型节点施工顺序为：铺设盖梁模板—绑扎钢筋—放入一个直径为711.2 mm的开口钢管—在预留位置放置柱钢管—浇筑纤维加强砂浆—灌注柱内混凝土. 为了尽量使得钢管混凝土柱作为主要地震耗能构件，适当提高盖梁的混凝土强度和配筋率.

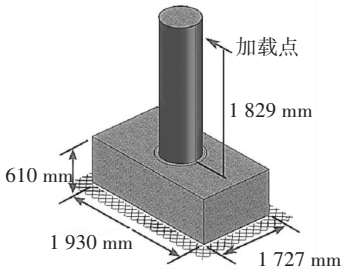


图2 试件大样图

Fig.2 Specimen sketch

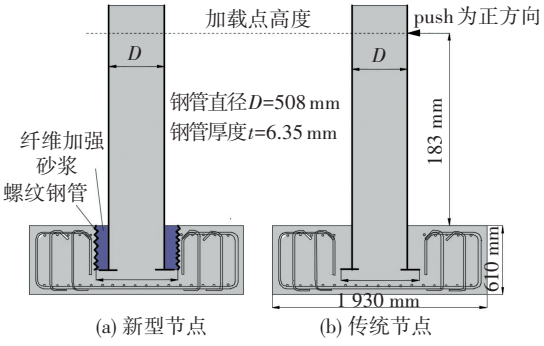


图3 试件埋入形式示意图

Fig.3 Specimen details

表 2 试件属性及参数

Tab.2 Specimen properties and parameters

编号	钢管材质	f_y / (N·mm^{-2})	f_u / (N·mm^{-2})	L_e/ D	f'_{col} / (N·mm^{-2})	f'_{cap} / (N·mm^{-2})	f'_{grout} / (N·mm^{-2})	节点形式	来源
Low-01	普通碳素钢	290	414	0.8	60	76	—	传统节点	文献[17,20]
Low-02	普通碳素钢	290	414	0.8	64	79	72	新型节点	文献[17,20]
Mid-01	普通合金钢	345	483	0.8	53	64	—	传统节点	文献[17,20]
Mid-02	普通合金钢	345	483	0.8	59	74	49	新型节点	文献[17,20]
High-01	高强合金钢	526	603	0.6	76	76	—	传统节点	文献[21]
High-02	高强合金钢	526	603	0.6	71	71	63	新型节点	文献[21]
Corr-01	普通合金钢	345	483	0.6	52	70	66	新型节点	文献[17,19]

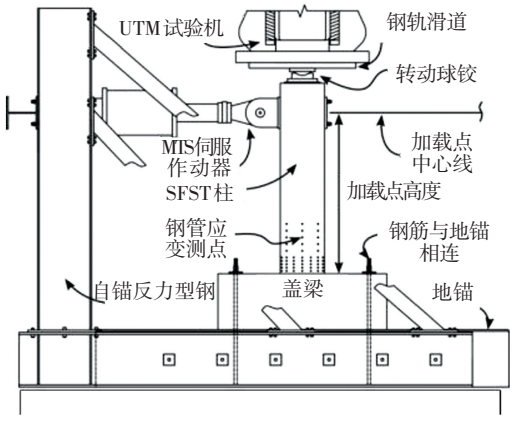
1.2.3 对比设计因素

试验目的为获取一体化浇筑和新型节点试件的抗震性能及其差异，主要考虑了以下因素：1）对于每组试件，设置连接形式为单一影响因素. 2）选取

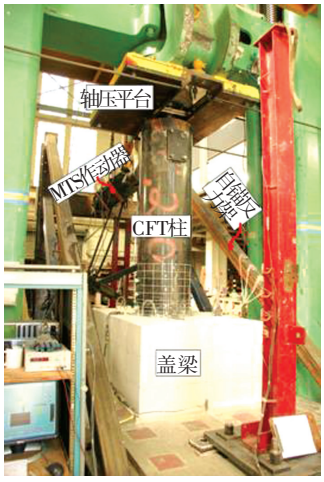
钢材 Q290、Q345 的钢管混凝土柱，设计足够的埋深 0.8D，略小于文献[17]的建议埋深 0.9D，因为埋深 0.9D 时，埋深足够，盖梁最终状态良好，几乎无裂缝. 而设计埋深为 0.8D 时，可根据盖梁出现裂纹的数量判断钢管屈服强度不同的节点对盖梁完整度的影响. 3）选取高强钢 Q520 的钢管混凝土柱，与参考试件 Corr-01，设计埋深较浅. 观察同等加载条件下高强钢管节点和普通强度钢管节点的不同破坏状态.

1.3　加载装置

试件测试装置如图 4(a)所示，根据式(3)可得到组合截面的抗压承载力，本次实验中设计轴压力为 0.1P_0，如果按照超高强钢管混凝土柱的轴压要求，加载轴向力在 1 000 kN 左右，因此本文选择了具有超大轴压能力(量程为 10 000 kN) 的 UTM 液压伺服作动器. 加载点的横向力通过前期的有限元软件仿真估算得到，加载点反力峰值不超 800 kN，选用了量程为 1 000 kN、行程为 300 mm 的 MTS 作动器. 并在轴压板上装有水平加载方向的滑道，保证钢管柱在水平反复加载作用下始终受到轴压力的作用. 图 4(b)为试验照片，可观察到加载板、滑道、反力架等装置. 整个试件其实是真实节点的倒置，盖梁上顶面此时作为锚固面与地面接触，盖梁 4 个角端预留有钢筋通道，通过钢筋与地锚相连. 本文研究对象钢管混凝土柱-盖梁节点，与钢管混凝土柱-基础节点一定程度上相似. 试验选用 Steel-ATC-24 Protocol 方法，荷载增量是节点首次屈服时加载点的位移 Δ_y. 该值可通过 pushover 试验，或者仿真计算得到 pushover 荷载试验下节点的力-位移曲线，曲线上出现的第 1 个波动点既是节点屈服点. 若节点屈服点不明显，可取 0.7~0.75 倍反力峰值对应的位移值作为节点屈服位移. 整个加载历程可分为 3 个阶段：屈服前阶段，至少包括 6 次弹性循环；强化阶段，逐级荷载按照 Δ_y、$2\Delta_y$、$3\Delta_y$、……加载，每级荷载循环 3 次；退化阶段，某级荷载下，反力开始下降，则从该级荷载开始，每级荷载循环两次，直至反力突然大幅度下降，试验结束. 图 5 为加载历程.



(a)设计图



(b)实物图

图 4　加载装置

Fig.4　Test setup

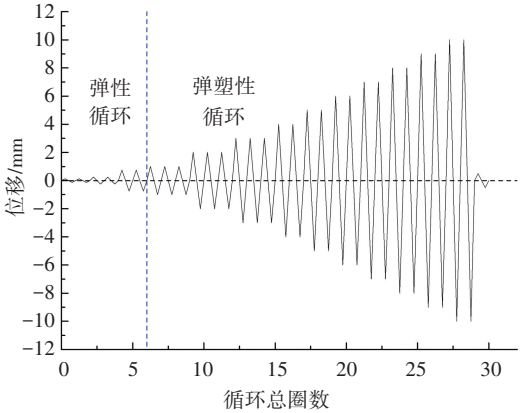


图 5　加载历程

Fig.5　Loading history

2　试验结果

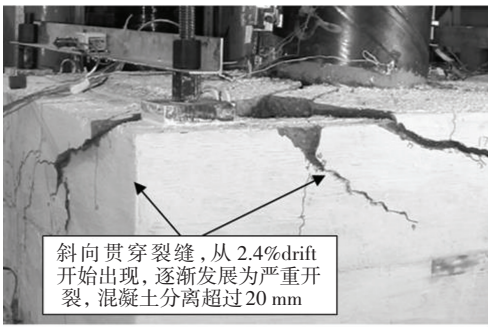
2.1　试验结束的控制因素

钢管混凝土柱-盖梁节点地震荷载作用下的破坏方式主要有 3 种：柱破坏、盖梁破坏和粘结问题. 判断试验是否结束的依据为加载点反力突降到峰值的 20%以下. 本文试验试件的最终破坏状态存在明显的柱破坏控制和盖梁破坏控制，如图 6 所示，没有出现因为粘结失效导致试验结束的案例. 图 6(a)为试件 Low-01 的最终状态，钢管鼓曲明显，钢管撕裂严重，管内混凝土暴露，盖梁整体状态良好，红色记号笔勾画出了裂纹的主要走向. 试件 Low-02、Mid-01、Mid-02 和Corr-01最终破坏状态与 Low-01 类似，均属于柱破坏控制试验. 图 6(b)为试件 High-

01 的最终状态,钢管无明显鼓曲,柱非埋入段整个试验过程中的应变测量未达到其钢管材料的屈服应变. 盖梁混凝土板块性裂开,最大分离距离超过 20 mm,盖梁整体性能完全丧失. 试件 High-02 最终状态与 High-01 类似,均属于盖梁破坏控制试验.



(a) Low-01



(b) High-01

图 6 典型钢管混凝土柱-盖梁节点破坏状态

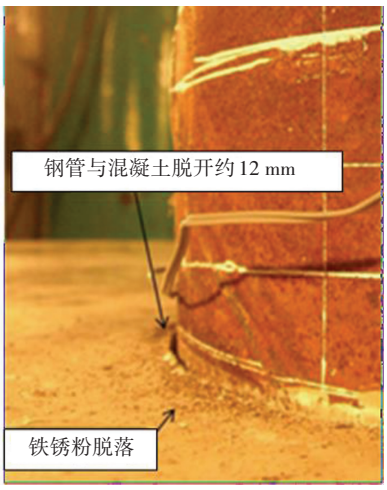
Fig.6 Typical damage models of CFST-cap beam connections

2.2 浇筑方式引起的连接问题

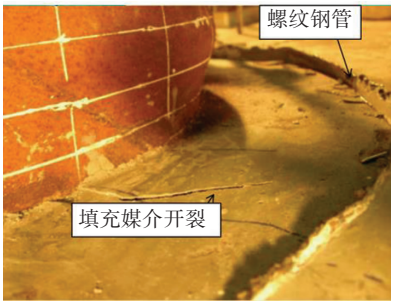
组合结构中钢材与混凝土的粘结滑移问题一直未真正解决,普通混凝土因为其物理特性,很难与钢管始终保持良好的粘结. 而纤维加强砂浆中纤维的加入改善了水泥砂浆的延性,大幅度减小了水泥混合物的干缩特性,使得砂浆与钢管,砂浆与基础混凝土粘结良好. 图 7 中反映了不同浇筑方式试验中在柱端位移 2%左右时,节点核心区域的粘结状态. 新型节点的粘结状态明显优于普通节点.

2.3 钢管强度的影响

High-02 整个实验过程中,未检测到盖梁以上部分钢管出现拉伸屈服,试验结束后去掉混凝土,挖出钢管如图 8(a)后所示,钢有底部有明显永久变形,但钢管整体完整性良好. 同样埋深的试件 Corr-01则表现出柱破坏控制的特性,盖梁上虽出现不可忽视的裂缝(黑色记号笔走向),但试验结束时,钢管明显撕裂,暴露出柱内混凝土, 如图 8(b)所示.



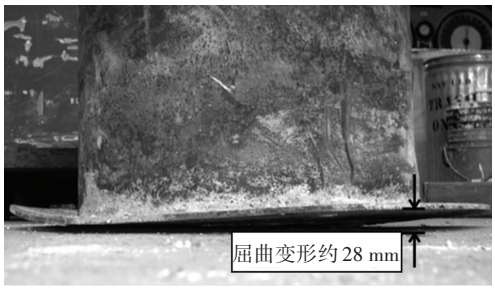
(a) 脱开



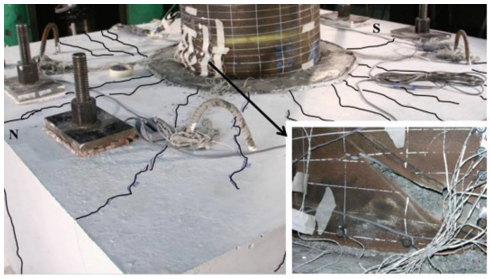
(b) 粘结完好

图 7 浇筑方式不同引起的粘结问题

Fig.7 Bonding issues caused by different cast methods



(a) High-02



(b) Corr-01

图 8 不同屈服强度钢管试验后状态

Fig.8 Final status of steel tubes with different yield stress

2.4 试验过程中的状态量

试验中根据测量仪器的数据反映了试件的状体变化,主要表观量为盖梁开裂情况、钢管鼓曲情况和钢管撕裂情况,表 3 列举了试件实验过程中的表观

量. 表中 C1 表示正方向盖梁轻微开裂（C 是指 Cracking），C1 表示反方向盖梁轻微开裂；轻度开裂指少数裂纹. CC1 表示正方向盖梁中度开裂，CC2 表示反方向盖梁中度开裂（中度开裂指可数的且裂缝最大宽度不超过 2 mm 的开裂状态）. CCC1 表示正方向盖梁严重开裂，CCC2 表示反方向盖梁严重开裂（严重开裂指混凝土有板块错开，暴露内部钢筋的开裂状态）. B1 表示正方向可见的钢管局部屈曲（B 是指 Buckling），B2－反方向可见的钢管局部屈曲. T1 表示正方向可见的钢管撕裂（T 是指 Tearing），T2 表示反方向可见的钢管撕裂. S 表示试验终止（S 是指 Stop）.

表 3　试验的破坏过程

Tab.3　Damage procedure of the test

n	$n\Delta_y$	Low-01	Low-02	Mid-01	Mid-02	High-01	High-02	Corr-01
1－2	0.0125							
3－4	0.25				C1 C2			
5－6	0.75			C1 C2			C1 C2	C1 C2
7－9	1	C1 C2				C1 C2	CC1 CC2	
10－12	2		C1 C2	CC1	CC1 CC2 B1 B2			
13－15	3			CC2 B1 B2		CC1 CC2	CCC1 CCC2	
16－18	4	B1 B2	B1 B2					B1 B2
19－20	5							
21－22	6			T1 T2	T1 T2	CCC1 CCC2		T1 T2
23－24	7							
25－26	8	T1 T2	T1 T2			S	S	S
27－28	9			S	S			
30－31	10	S						
32	11		S					

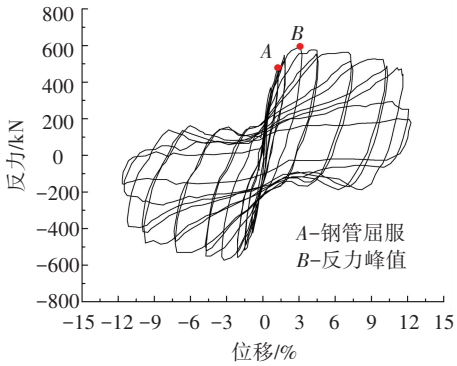
试件 High－01 和 High－02 盖梁开始出现裂纹时，所观测到的钢管应变并未达到钢材的屈服应变；其他试件中钢管应变仪所测的应变超过屈服应变后才出现盖梁裂纹. 试件 High－01 和 High－02 的钢管在整个实验过程中虽达到了屈服应变，但是外形无明显的鼓包屈曲；其他试件均在中等大小的控制位移循环时出现明显的钢管鼓曲，且变形逐渐随着控制位移增大而增大，钢管变形最大处开始出现裂纹，钢管逐渐被撕裂. 随着试验循环圈数的增加，High－01 和 High－02 钢管仍无裂缝，但盖梁破坏严重，失去完整性和承载力；其余试件钢管在与盖梁连接处部位明显撕裂，暴露内部混凝土，但盖梁整体状态良好. 试验结束的判断标准为，加载点反力观测数据突降到峰值的 20%以下.

3　结果分析

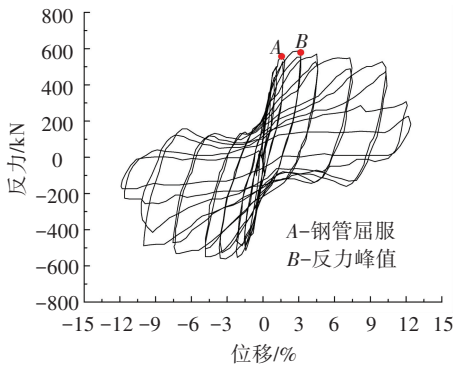
3.1　滞回曲线

图 9 为各个试件荷载－位移曲线，横坐标为加载点的水平位移与柱的有效高度的比值 Drift，范围为－15% ~ 15%. 纵坐标为加载点反力，取值为 －800~800 kN. 从图 9 可以看出，钢管混凝土柱－盖梁节点的滞回曲线明显的呈两种趋势，饱满型和捏

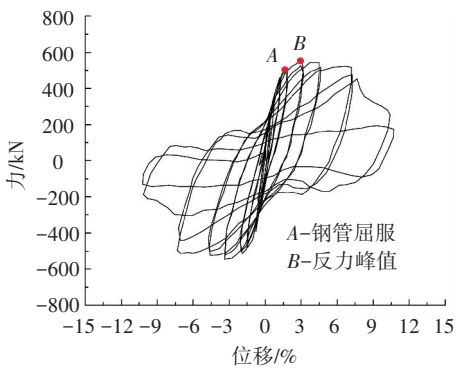
拢型. 试件 Low－01、Low－02、Mid－01、Mid－02、Corr-01为饱满型,High-01 和 High-02 为捏拢型.



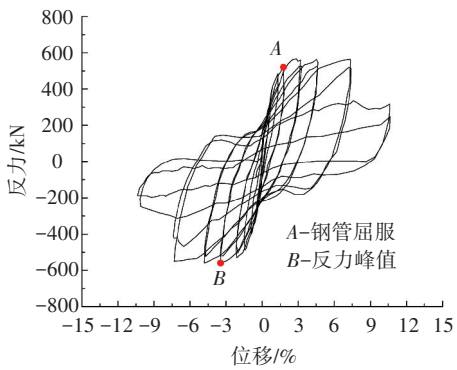
(a) Low-01



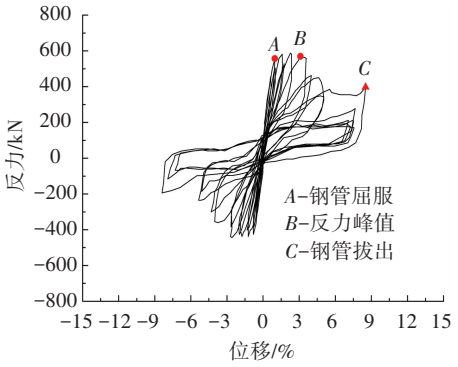
(b) Low-02



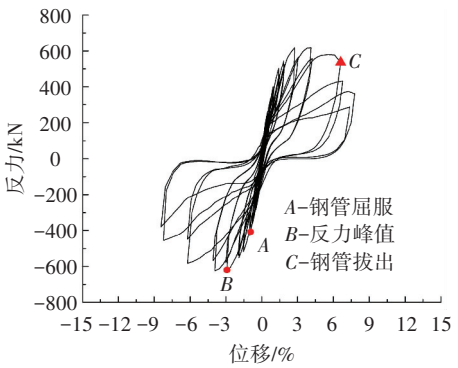
(c) Mid-01



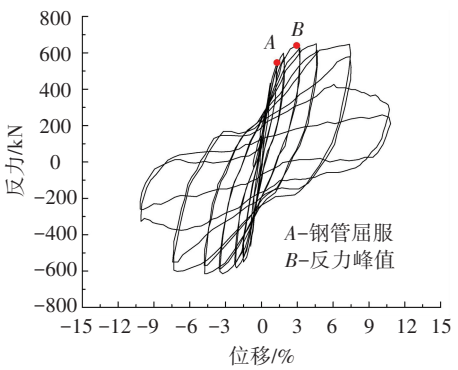
(d) Mid-02



(e) High-01



(f) High-02



(g) Corr-01

图 9　滞回曲线

Fig.9　Hysteretic curves

捏拢型滞回曲线具有较长的滑移平台,通常这表明节点出现了粘结问题或者锚固破坏,这与试验过程中观测到的试验现象非常吻合. 试验中,试件 High-01 的盖梁混凝土与钢管脱开,伴有盖梁混凝土严重开裂;试件 High-02 的粘结砂浆被挤压开裂,伴有盖梁混凝土严重开裂. 图中标出了观测到钢管应变仪达到屈服应变的所在循环、反力峰值所在的循环、以及钢管柱被拔出所在的循环(即盖梁混凝土开裂达到 20 mm).

饱满型滞回曲线仅中间部分捏拢,这是由于钢管在循环荷载和轴压共同作用下出现剪切破坏引起的. 这与试验中观测到的钢管与盖梁交接部位屈曲并开裂相吻合. 试件所能达到的最大位移值,Low－01、Low-02大于 Mid-01、Mid-02,表明了钢管屈服强度

低的节点延性稍好；试验结束时试件经历的循环总圈数，Mid-01、Mid-02 大于 Corr-01，表明柱埋深较大的节点延性较好.

3.2　抗震性能指标

结构的延性设计，既是在保证结构不发生倒塌的情况下，部分构件在地震荷载作用下产生反复的弹塑性变形消耗地震能量. 从各试件的荷载-位移曲线中标记试件的屈服位移 Δ_y，极限位移 Δ_u，位移延性系数为两者的比值，列于表 4 中，表中 F_m 表示反力荷载的峰值，Δ_m 表示峰值出现时的位移，μ 表示延性系数 $\mu=\Delta_u/\Delta_y$，η 表示稳定能力 $\eta=\Delta_y/H$，ω 表示变形能力 $\omega=\Delta_u/H$，K 为累积耗能. 耗能最基本的指标是结构或者构件的荷载-位移曲线所包围的面积，即滞回环包围的面积累积之和，该值越大表明耗能效果越好，反之则表示耗能能力较差. 表 4 列出了各试件的抗震性能参数. 其中累积耗能按滞回曲线包围的面积计算，本文通过 MATLAB 软件对荷载位移曲线进行面积积分得到累积耗能 K.

表 4　各试件抗震性能指标

Tab.4　Seismic properties of all specimens

试件	试件形式	Δ_y/mm	F_m/kN	Δ_m/mm	Δ_u/mm	μ	η/%	ω/%	K/(kN·m)
Low-01	传统	16.5	587.2	58.5	212.1	12.9	0.9	11.6	925.6
Low-02	新型	16.5	580.5	58.5	224.9	13.6	0.9	12.3	960.4
Mid-01	传统	14.6	544.7	49.4	192.0	13.1	0.8	10.5	667.2
Mid-02	新型	14.6	560.9	49.4	195.7	13.4	0.8	10.7	699.0
High-01	传统	12.8	580.5	43.9	146.3	11.4	0.7	8.0	316.6
High-02	新型	14.6	617.4	51.2	142.6	9.8	0.8	7.8	410.6
Corr-01	新型	14.6	643.6	58.5	184.7	12.7	0.8	10.1	763.5

钢管的屈服强度直接影响了节点试件的累积耗能. 钢管屈服强度 290 MPa 的试件 Low-01、Low-02 累积耗能大于 900 kN·m；钢管屈服强度 345 MPa 的试件 Mid-01、Mid-02、Corr-01 的累积耗能在 700 kN·m 左右；而钢管屈服强度 526 MPa 的试件 High-01、High-02 的累积耗能在 400 kN·m 左右. 表明了相对低的屈服强度的钢管在抗震耗能方面表现的更好.

每组试件的传统浇筑和分步浇筑的对比结果：分步浇筑试件的各项抗震指标都与传统浇筑试件的相当. 并且，对于累积耗能指标，分步浇筑试件略优于普通传统浇筑试件. 由于分步浇筑试件选用了纤维加强砂浆 Grout 的缘故，从侧面反映了 Grout 的延性优于未添加任何纤维的普通混凝土.

试件 Mid-02 与 Corr-01 的主要区别是埋深与纤维加强砂浆的强度. 埋深决定了盖梁先破坏还是钢管先破坏，纤维加强砂浆的强度决定了加载点反力峰值的大小. 两个试件的抗震指标数值上相当，具有相近的延性系数、稳定能量、变形能力，累积耗能也比较接近. 但是节点的最终破坏状态，钢管均发生了延性撕裂破坏；Mid-02 节点的盖梁轻微开裂，Corr-01 节点的盖梁严重开裂. 因此，整个节点的破坏状态而言，埋深大的节点更利于抗震.

4　修复策略

本文提出的新型钢管混凝土柱-盖梁节点，亦是震损后可快速修复的构件. 抗震设计期望是钢管出现延性撕裂破坏，钢管柱不被拔出，盖梁状态良好. 针对只是钢管出现撕裂破坏的震后节点试件，可采用图 10 中的策略进行修复. 首先，判断震后节点的破坏状态，如表 3 中试验时记录的破坏状态量，当钢管出现屈服、鼓曲、撕裂时，管内混凝土未大量暴露时，都可以进行快速修复. 然后，凿掉图 2 所示螺纹钢管内部的纤维加强砂浆，采用激光切割机等对未破坏区域影响小的切割机器去掉破坏区域的钢管. 下一步，选用屈服强度高于原钢管的钢管材料，进行外包加固处理. 最后，重新灌注纤维加强砂浆.

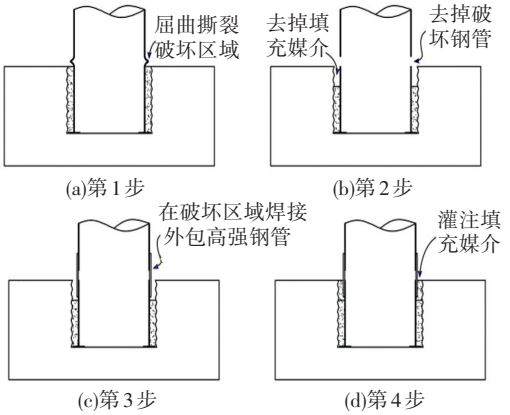


图 10　钢管修复策略

Fig.10　Repair strategy of the steel tube

5　结论与讨论

1）水平低周反复荷载作用下，钢管柱埋深不足时，盖梁破坏程度为试验控制因素；埋深足够时，钢管撕裂程度为试验控制因素. 节点的抗侧向力能力与钢管的屈服强度和柱埋入结构的强度正相关，钢

管屈服强度越大,抗侧向力峰值越大;柱埋入结构强度越大,抗侧向力峰值越大.

2)新型节点因采用纤维加强砂浆作为粘结填充媒介,相比传统节点解决了钢管与混凝土的粘结问题,且在累积耗能方面有所提高. 既表现出了良好的节点建造便捷性,又表现出了不逊色于传统节点的抗震性能.

3)钢管柱埋深不足时,适当降低钢管的屈服强度,能使钢管柱成为主要耗能构件,不仅更好地保障盖梁的整体性能,而且能提高整个节点的累积耗能.

致谢 感谢美国华盛顿大学钢管混凝土结构实验室 Dawn Lehman 教授与 Max Stephens 博士提供的历史试验数据,感谢 Charles Roeder 教授对本文写作思路的指导.

参考文献

[1] 吕西林,陈聪.带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014(1): 27-36.
LU Xilin, CHEN Cong. Research progress in structural systems with replaceable members [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014(1): 27-36. DOI:10.13197/j.eeev.2014.01.27.luxl.004.

[2] 吕西林,陈云,毛苑君.结构抗震设计的新概念——可恢复功能结构[J].同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 941-948.
LU Xilin, CHEN Yun, MAO Yuanjun. New concept of structural seismic design: earthquake resilient structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(7): 941-948. DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2011.07.001.

[3] CHEN S, CHANG C. Experimental study of low yield point steel gusset plate connections [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 57: 62-69.DOI: https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.03.014.

[4] 刘其舟,蒋欢军. 新型可更换墙脚部件剪力墙设计方法及分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 37-44.
LIU Qizhou, JIANG Huanjun. Design method of new type of reinforced concrete shear wall with replaceable corner components and its analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(1): 37-44. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.01.006.

[5] 王佼姣,石永久,严红,等. 低屈服点全钢防屈曲支撑抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(10): 9-16.
WANG Jiaojiao, SHI Yongjiu, YAN Hong, et al. Experimental study on the seismic behavior of all-steel buckling-restrained brace with low yield point [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(10): 9-16.DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2013.10.014.

[6] 王宇航. 曲线梁桥钢管混凝土桥墩的扭转效应研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
WANG Yuhang. Study on torsion effect in concrete filled steel tube piers of curved girder bridges [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.

[7] STEPHENS M, LEHMAN D, ROEDER C. Design of CFST column-to-foundation/cap beam connections for moderate and high seismic regions [J]. Engineering Structures, 2016, 122: 323-337.

[8] 李宁波,万怡秀,吴昭华,等. RC 梁-核心区钢管壁开洞组合柱节点试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013,45(12): 63-69.
LI Ningbo, WAN Yixiu, WU Zhaohua, et al. Experimental study on connections of RC beam-composite column with openings on steel tube [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(12): 63-69.

[9] 徐姝亚,李正良,刘红军,等. 装配式套筒连接 CFST 柱-RC 梁节点抗震性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(6): 124-131.
XU Shuya, LI Zhengliang, LIU Hongjun, et al. Seismic behavior of precast sleeve-connected CFST column to RC beam connection [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(6): 124-131.

[10] 钢管混凝土结构技术规程:CECS 28—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
Technical specification for concrete-filled steel tubular structures: CECS 28—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.

[11] 碳素结构钢:GB T-700—2006[S]. 北京: 中国钢铁工业协会, 2006.
Carbon structural steels: GB T-700-2006[S]. Beijing: China Iron and Steel Association, 2008.

[12] 低合金高强度结构钢:GB-T-1591—2008[S]. 北京: 中国钢铁工业协会, 2008.
High strength low alloy structural steels: GB-T-1591-2008[S]. Beijing: China Iron and Steel Association, 2008.

[13] MOHSIN R, MAJID Z A, YUSOF M Z. Multiple failures of API 5L X42 natural gas pipe: experimental and computational analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 34: 10-23. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.07.007.

[14] 陈魏. Q460 高强钢管节点疲劳累积损伤分析及疲劳性能[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
CHEN Wei. Fatigue behavior and damage analysis of CHS joints with Q460[D].Chongqing: Chongqing University, 2015.

[15] 谌磊,彭奕亮,杨俊芬,等. Q690 高强钢管轴压承载力试验研究[J].武汉大学学报(工学版), 2013, 46(增刊1): 90-96.
CHEN Lei, PENG Yiliang, YANG Junfen, et al. Experimental study of axial bearing capacity of Q690 high-strength steel tubes [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(Sup1): 90-96.

[16] Dayton Superior. Sure-grip high performance grout (cement-based grout) technical data sheet [DB/OL].(2016-04-01)[2016-07-15]. Https://www. Daytonsupe rior.com.

[17] LEHMAN D, ROEDER C. Rapid construction of bridge piers with improved seismic performance: finial report to the California department of transportation (caltrans) under contract 59A0641 [R]. Sacramento: California department of transportation, 2012.

[18] AISC. Steel construction manual [S]. 14th ed. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2011.

[19] MCKITTRICK L, HICKS J, STEPHENS J, et al. Performance of steel pipe-to-concrete bent connections subject to seismic or high transverse loading PHASE Ⅰ: preliminary investigation: prepared for State of Montana Department of Transportation Research, Development, and Technology Transfer Program in cooperation with the United of States Department of Transportation Federal Highway Administration[R]. Helena: Montana Department of Transportation, 1998.

[20] LEE J. Experimental investigation of embedded connections for concrete-filled steel tube columns subjected to combined axial-flexural loading [D]. Seattle: University of Washington, 2011.

[21] KINGSLEY A. Experimental and analytical investigation of embedded column base connections for concrete filled high strength steel tubes [D]. Seattle: University of Washington, 2005.

(**编辑** 魏希柱)