

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.06.009

混合桥墩抗震性能试验研究

田甜, 邱文亮, 张哲

(大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要:以3个剪跨比为3.0桥墩试件(包含1个混合桥墩试件和2个对比试件)的拟静力试验为基础,研究混合桥墩与钢筋混凝土桥墩、钢管混凝土组合桥墩抗震性能的差异,并以此作为混合桥墩方案是否可行的评判依据。结果表明:3个桥墩试件均发生弯曲延性破坏,但混合桥墩试件的裂缝数量多、沿墩身分布范围广;混合桥墩试件的抗震性能要明显优越于钢筋混凝土桥墩试件,其位移延性和自复位能力甚至比钢管混凝土组合桥墩试件更为出色;混合桥墩兼顾了经济性和耐震性,在地震设防区是一个极具竞争力的桥墩方案。

关键词:混合桥墩;组合桥墩;普通桥墩;核心钢管;抗震性能

中图分类号:U443.22 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2017)06-0528-07

Experimental study on the seismic behavior of hybrid bridge column

TIAN Tian, QIU Wenliang, ZHANG Zhe

(School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The main objective of this paper is to examine the feasibility of the hybrid bridge column. To address this problem, quasi-static tests are conducted to explore the differences of seismic behaviors between hybrid bridge column and reinforced concrete (RC) bridge column and STRC bridge column, each column with shear span ratio of 3.0. The test results show that flexural-ductile failures are observed for all three columns, and much more cracks with wider distribution area are found to be created in the hybrid bridge column. This demonstrates that the hybrid bridge column yields a much better seismic behavior over the RC bridge column. In addition, the ductility and self-centering capability of hybrid bridge column are superior to those of the STRC bridge column. In general, the hybrid bridge column has the advantage of both economical efficiency and favorable seismic behavior, thus can be considered as a highly competitive bridge column scheme in seismic active regions.

Key words: hybrid bridge column; composite bridge column; conventional bridge column; core steel tube; seismic behavior

钢管混凝土组合(STRC)柱是一种在钢筋混凝土(RC)柱内设置核心钢管的钢-混凝土组合构件,因其具有优越的力学特性^[1-6]以及良好的施工性^[7]而受到设计者的青睐。研究表明^[8-11],将STRC组合柱应用在桥梁工程领域作为梁式桥的桥墩,不但可避免传统钢筋混凝土桥墩在地震作用下的剪切破坏和竖向压溃,以改善结构的耗能和变形能力,还可减小大震作用下墩顶的位移响应,降低上部结构碰撞震害发生的概率。因此,STRC组合桥墩在中、高烈度地震设防区具有良好的应用前景。然而,对于跨山沟、峡谷的大跨高墩梁桥以及跨江、海大型桥梁工程的引桥桥墩,在墩身内通长埋置核心钢管势必会大幅度增加工程抗震设防投入。为达到经济指标与抗震性能相统一的目的,可将STRC组合桥墩的核心钢管在墩身中部截断,即只在距墩底

收稿日期: 2016-11-19
基金项目: 国家自然科学基金(51178080)
作者简介: 田甜(1985—),男,湖北随州人,博士研究生,主要从事桥梁抗震研究。E-mail: tian3316625@163.com
通信作者: 邱文亮,教授。E-mail: qwl@dlut.edu.cn

一定高度范围的墩身内预埋核心钢管,由此形成一种如图 1 所示的下部为 STRC 组合墩、上部为 RC 墩的竖向不规则结构,可称为 STRC-RC 混合桥墩。

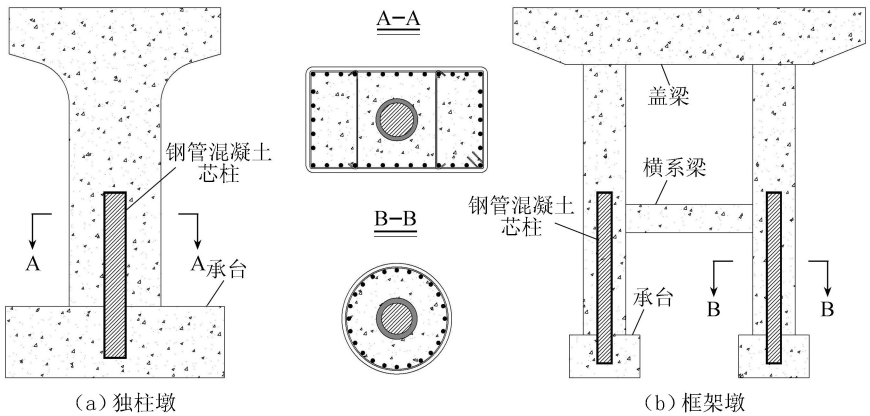


图 1 混合桥墩示意图

Fig. 1 Schematic of hybrid bridge columns

STRC-RC 混合桥墩与竖向混合结构过渡层中的 SRC-RC 转换柱^[12]具有相似的构成方式。薛建阳等^[13]和伍凯等^[14]以截面配钢率、轴压比、型钢延伸长度以及细部构造措施为设计参数,对转换柱的抗震性能进行研究,发现型钢的局部存在(延伸至层间一定高度后截断)使转换柱的工作机理不同于常规框架柱,且其失效模式以剪切破坏最为常见;虽然各参数的作用及其耦合导致转换柱的抗震性能存在较大的变异性,但经过合理设计的转换柱仍可满足工程实践对于延性和耗能的需求。然而,混合桥墩采用圆形钢管来约束截面核心混凝土,有别于转换柱中的工字型钢,且桥梁墩柱较建筑框架柱更具有地震易损性的特点,因此,混合桥墩的抗震表现究竟如何,尚待研究。本文完成了 3 个桥墩试件的拟静力加载试验,分别将混合桥墩的各项抗震性能指标与组合桥墩和钢筋混凝土桥墩进行对比,目的有二:其一,研究将组合桥墩的核心钢管在墩身中部截断(形成混合桥墩)后,是否会使桥墩的抗震性能发生明显劣化;其二,研究在钢筋混凝土桥墩中下部预埋核心钢管(形成混合桥墩)后,是否会使桥墩的抗震性能得到显著改善。试验结果可为混合桥墩的进一步研究和方案实施提供依据。

1 试验概况

试验设计了 3 个相同剪跨比的圆形截面桥墩试件,其中,CHC 为混合桥墩试件,CRC 为钢筋混凝土桥墩试件,CSC 为组合桥墩试件。各试件的尺寸与配筋均保持一致,设计参数见表 1。

表 1 试件参数及试验结果

Table 1 Summary of specimen parameters and test results

试件编号	$\rho_l/\%$	$\rho_v/\%$	$\rho_s/\%$	l/mm	P_y/kN	P_u/kN	Δ_y/mm	Δ_u/mm	$\theta_u/\%$
CRC	1.28	0.84			73.73	85.42	6.25	47.68	5.30
CHC	1.28	0.84	1.74	450	100.09	119.23	9.68	59.91	6.66
CSC	1.28	0.84	1.74	900	109.37	128.90	9.99	50.24	5.58

注: ρ_l 为纵筋率, ρ_v 为体积配箍率, ρ_s 为截面含钢率, l 为钢管在墩身内的埋置长度, P_y 和 Δ_y 分别为采用 Park 法^[15]得到的名义屈服荷载和名义屈服位移, P_u 为峰值荷载, Δ_u 为极限位移(取水平力下降至峰值荷载的 85% 时对应的位移), θ_u 为极限位移角(为极限位移 Δ_u 与墩高 h 的比值)。

试验轴压比的计算与钢筋混凝土墩柱的计算方法相同:

$$n = \frac{N}{N_0}$$

(1)

其中

$$N_0 = f_{ck} A_c$$

式中: n ——轴压比; N ——墩顶竖向力; N_0 ——墩身名义抗压强度; f_{ck} ——混凝土抗压强度标准值; A_c ——墩身截面积。

试验过程中,施加于墩顶的竖向力均为 284 kN,相应的试验轴压比为 0.15,接近或稍大于工程实践中桥墩的实际轴压比。

试件的构造如图2所示,墩身截面直径为300 mm,水平力 P 作用点距离墩底(即墩柱有效高度)900 mm,剪跨比 $\lambda=3.0$;墩身纵筋采用8 Φ 12的HRB400级带肋钢筋,沿截面周围均匀布置,纵筋率 $\rho_1=1.28\%$;螺旋箍筋采用 Φ 8的HPB300级光圆钢筋,箍筋间距为70 mm,体积配箍率 $\rho_v=0.84\%$;核心钢管采用规格为 Φ 102 mm $\times$ 4 mm的Q345级低碳合金无缝钢管,截面含钢率 $\rho_s=1.74\%$ 。钢管在底座内的锚固长度为450 mm,在墩身内的埋置长度 l 分别为450 mm和900 mm;墩身与底座混凝土连续浇筑而成,混凝土标准立方体试块抗压强度均值为45.0 MPa;从钢管中截取500 mm $\times$ 15 mm的抗拉强度测定标准件,测得其屈服强度为368 MPa,极限强度为562 MPa; Φ 12纵筋的屈服强度和极限强度分别为422 MPa和605 MPa; Φ 8箍筋的屈服强度和极限强度分别为450 MPa和550 MPa。

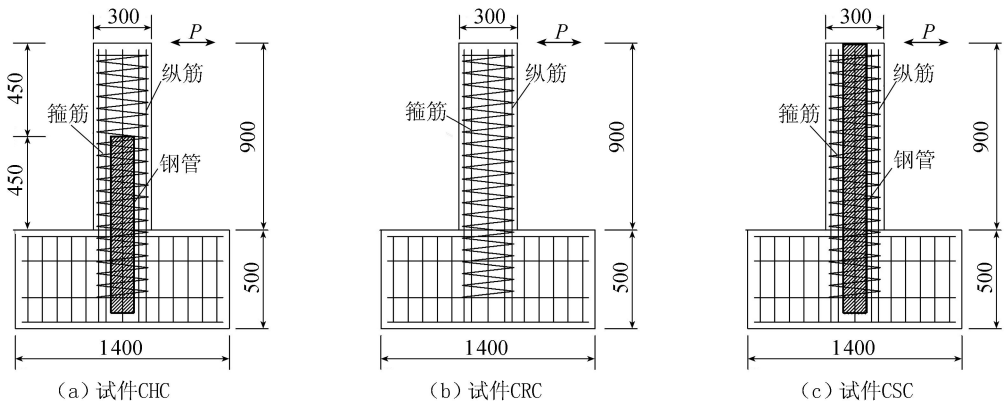


图2 试件尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig.2 Dimensions and reinforcement layout of specimens(units: mm)

试验在大连理工大学桥梁隧道研发基地结构大厅进行,加载装置见图3,采用悬臂式加载。墩顶轴向力由加载能力为 $\pm 3\,000\text{ kN}$ 的竖向千斤顶施加,水平作用由最大行程为 $\pm 300\text{ mm}$ 的电液伺服作动器施加。水平加载采用位移控制,反复施加的位移幅值逐级增加,每级位移循环3次,当试件的水平承载力下降至最大荷载的80%以下,或不适于继续加载时结束试验。试验过程中需要测量的数据有荷载、变形、应变以及裂缝信息。加载点处的水平力和位移由作动器的控制系统自动采集,墩底区域的纵筋、箍筋和钢管应变利用无线静态应变测试系统采集,墩身裂缝的宽度、长度和倾角采用裂缝探测仪、钢尺和量角器量测。

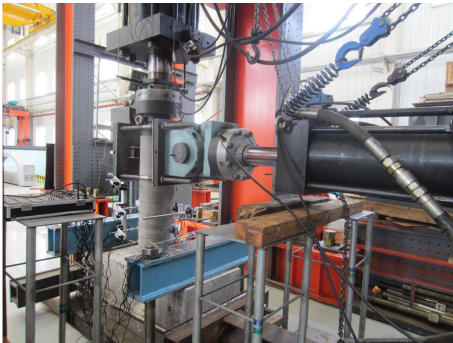


图3 试验加载装置

Fig.3 Photo of test set-up

2 试验现象

3个桥墩试件的损伤发展过程基本相同,可描述如下:水平位移 $\Delta=4\text{ mm}$ 时,墩柱下半段先出现水平微裂缝;继续加载,裂缝数量增多、间距变小,原有水平裂缝宽度增加,并朝墩身侧面延伸形成斜裂缝。 $\Delta=8\text{ mm}$ 和 12 mm 时,纵筋和核心钢管相继受拉屈服;此后,裂缝数量不再增多,开始形成宽度较大的弯曲临界裂缝。 $\Delta=24\text{ mm}$ 时,墩底混凝土在压、拉作用下起皮、掉渣,混凝土保护层开始从墩身剥离。随着循环次数的增多和位移幅值的继续增大,剥落区沿着墩身向上发展。 $\Delta=48\text{ mm}$ 时,墩底区域钢筋骨架外露,约束混凝土亦受到破坏;当水平位移接近各试件的极限变形时,纵筋严重屈曲后疲劳断裂,试件的水平承载力显著下降而宣告破坏。各试件最终破坏形态如图4所示,3个试件均发生了以墩底塑性铰为宏观特征的弯曲延性破坏;另外,钢筋

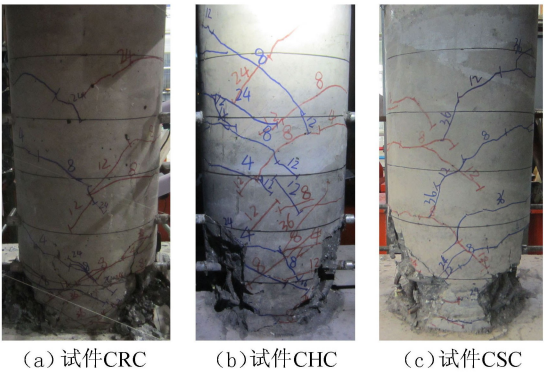


图4 试件破坏形态和裂缝分布

Fig.4 Failure modes and crack distributions of different specimens

混凝土桥墩试件和组合桥墩试件的裂缝数量较少,而混合桥墩试件的裂缝数量较多且分布范围广,尤其在钢管端部区域发育较为充分,但该区域裂缝在卸载后能完全闭合。

与转换柱类似^[16],混合桥墩的构成方式决定了其裂缝的形成、发展以及最终的破坏模式:加载过程中,外围混凝土通过挤压钢管混凝土芯柱迫使其抵抗外荷载,并完成二者的内力分配。这种挤压效应的反作用力使钢管端部的外围混凝土处于双向拉压的不利应力状态,会降低局部混凝土的力学性能并促成裂缝的生成。因此,混合桥墩在钢管截断位置裂缝分布较为密集。然而,由于试验中混合桥墩的核心钢管埋置长度较长(为墩身直径的1.5倍),钢管混凝土芯柱的侧向刚度和所分担的水平力较小,其反作用力所导致的混凝土应力畸变程度较轻。与弯曲应力较大的墩底混凝土相比,虽然钢管端部混凝土裂缝发育较为充分,但较轻的应力畸变所引起的局部混凝土受力性能劣化并不明显,因而损伤仍集中于墩底区域发展,并形成延性和耗能良好的塑性铰机制。

3 试验结果

3.1 滞回曲线与骨架曲线

各试件的荷载-位移滞回曲线和骨架曲线分别如图5和图6所示,由于正、反方向骨架曲线不完全对称,故图6的纵坐标取正、反向加载的平均值。主要试验结果列于表1。

a. 从图5可见,钢筋混凝土桥墩试件的滞回曲线瘦小,有明显的捏缩、滑移现象,表现出较差的滞回性能;组合桥墩试件的滞回曲线则比较饱满,即使在接近极限位移时,仍具有较好的稳定性。纵筋疲劳断裂后,不会出现钢筋混凝土试件加载曲线切线刚度接近于零的情况;混合桥墩试件滞回曲线的形状非常接近于组合桥墩试件,但前者滞回环的饱满程度和稳定性要更好。

b. 从图6可见,墩身开裂前,各试件的骨架曲线几乎重合,表明3个桥墩试件的初始弹性刚度基本相同;墩身开裂后,钢筋混凝土桥墩试件的刚度最小,组合桥墩和混合桥墩试件的刚度则相对较大;峰值荷载过后,钢筋混凝土试件和组合桥墩试件骨架曲线下降段的斜率相差不大,混合桥墩试件骨架曲线的下降段相对较为平缓。

c. 由表1可知,3个试件的峰值荷载分别为85.42 kN、119.23 kN和128.90 kN。混合桥墩试件的承载能力较钢筋混凝土试件提高了39.6%,而与组合桥墩试件仅相差7.5%。这表明在钢筋混凝土桥墩中下部埋置核心钢管(钢管已经屈服)可大幅提高桥墩的水平承载力,而将组合桥墩的核心钢管在墩身中部截断所导致的水平承载力降低在可接受范围之内。

d. 由表1可知,3个试件的极限位移分别为47.68 mm、59.91 mm和50.24 mm。混合桥墩试件的变形能力最强,其极限位移较钢筋混凝土试件和组合桥墩试件分别增加了12.23 mm和9.67 mm,相应的提高幅值分别为25.6%和19.2%。可见,混合桥墩具有良好的变形能力,其位移延性甚至具有超过组合桥墩的潜力。这是由于混合桥墩试件在墩底形成塑性铰的同时,于钢管端部也生成了一定范围的弯曲裂缝,在不增加墩身损伤的情况下提高了墩身的变形能力。

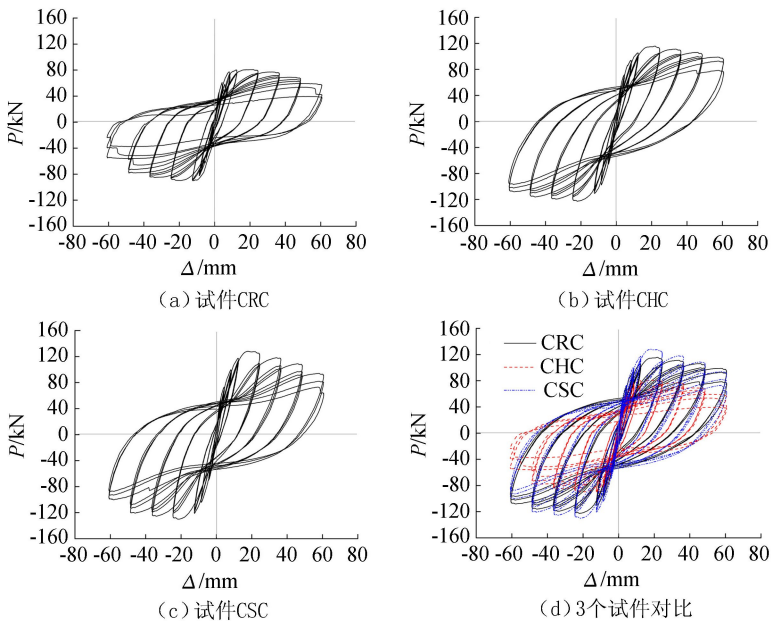


图5 荷载-位移滞回曲线
Fig. 5 Load-displacement hysteretic curves

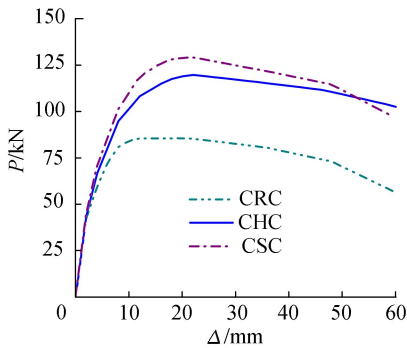


图6 荷载-位移骨架曲线
Fig. 6 Load-displacement skeleton curves

3.2 刚度退化与强度衰减

反复荷载作用下混凝土开裂、钢材屈服、黏结退化以及混凝土剥落会引起试件的刚度退化,刚度退化反映了墩身的损伤累积。桥墩的刚度可用滞回环的割线刚度 K_N 来表示,各试件的刚度退化曲线如图7所示。

由图7可知:(a)随着水平位移的增大,各试件的刚度退化均呈现出先快后慢的变化规律。(b)加载初期,混合桥墩试件的刚度退化要略快于组合桥墩试件,这与混合桥墩试件的墩身裂缝发育更为充分有关;峰值荷载过后,裂缝基本出齐,二者的刚度退化速率基本相当。(c)整个加载过程中,混合桥墩试件和组合桥墩试件的刚度退化表现均要优于钢筋混凝土桥墩试件,这是由于核心钢管的加强作用延缓了墩身的损伤发展。(d)加载末期,各试件的残余刚度趋近于一个稳定值,混合桥墩试件和组合桥墩试件的残余刚度约为钢筋混凝土试件的1.7倍。可见,在墩身内埋置核心钢管可提高桥墩的残余刚度,进而可改善桥墩的抗倒塌能力,增强对余震的抵御作用。

墩身的恢复力随荷载循环次数的增多而逐渐降低的现象称为强度衰减,强度衰减体现了构件抵抗反复荷载的能力。强度衰减的快慢可采用强度衰减系数 η ($\eta = P_i/P_1, i=2,3$) 来定量描述,即某一位移幅值下后两次循环的峰值荷载 (P_2 、 P_3) 与首次循环的峰值荷载 P_1 之比,图8给出了各试件强度衰减系数的变化曲线以及不同位移下第3次循环的强度衰减系数对比柱状图。

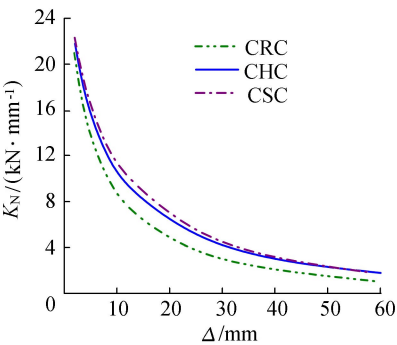


图7 刚度退化曲线
Fig.7 Stiffness degradation curves

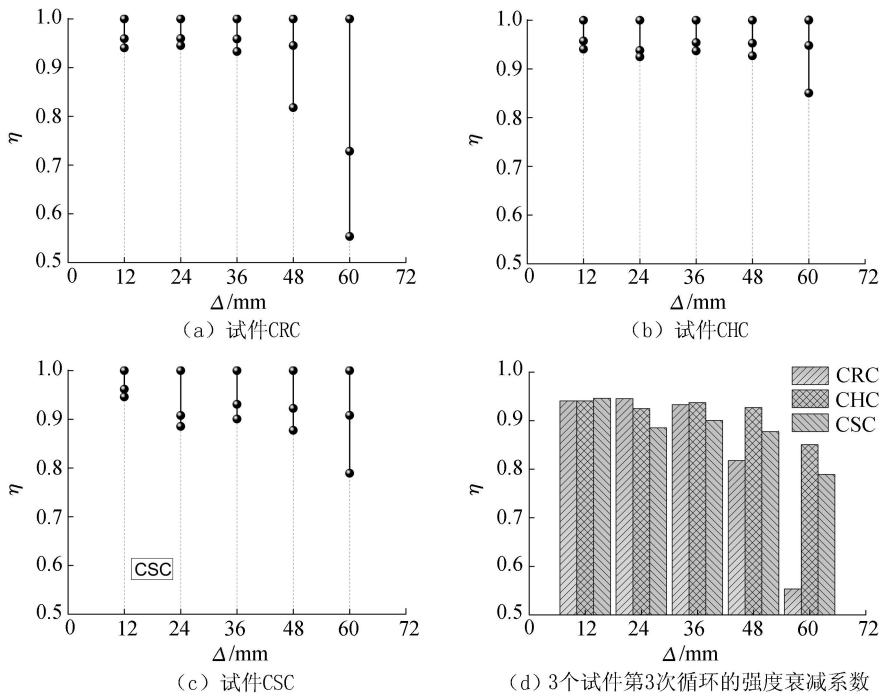


图8 强度衰减曲线
Fig.8 Strength attenuation curves

由图8可知:(a)水平位移 $\Delta \leq 12$ mm 时,各试件的强度衰减均较为缓慢;随着循环次数的增多和位移幅值的增大,强度衰减逐渐加剧。(b)钢筋混凝土试件在 $\Delta \leq 36$ mm 时的强度衰减非常稳定,各位移幅值下的强度衰减值均不超过7%; $\Delta = 48$ mm 时,强度衰减突然加快,强度衰减值达18%; $\Delta = 60$ mm 时,强度严重衰减,降幅达到45%。可见,钢筋混凝土桥墩抵抗大幅值位移循环的能力较差。(c)混合桥墩试件表现为逐步稳定的强度衰减,在 $\Delta = 48$ mm 时的强度衰减率小于8%, $\Delta = 60$ mm 时的强度衰减值亦不超过15%。(d)组合桥墩试件的强度稳定性要稍差于混合桥墩试件, $\Delta = 48$ mm 和 $\Delta = 60$ mm 时的强度衰减值分别为12%和21%。相关研究表明^[13],核心钢管与外围混凝土界面黏结裂缝的产生与发展是造成该类组合构件强度衰减的一个重要因素,且核心钢管埋置长度越长,黏结裂缝的分布范围越广发展越充分,滞回曲线的强度衰减和

捏缩现象越严重。

综上可知,在钢筋混凝土桥墩中下部埋置核心钢管,可延缓桥墩的强度衰减和刚度退化,使残余强度和残余刚度得到提高;将组合桥墩的核心钢管在墩身中部截断,对桥墩的刚度退化影响较小,对强度衰减反而有所改善。

3.3 累积耗能与残余位移

耗能特性和复位能力是评价桥墩抗震性能的另外两个重要指标。耗能能力强的桥墩尽管自身已经严重破损,但由于能够及时耗散掉地震动输入能量,可避免结构的整体倒塌;自复位能力强的桥墩,地震作用下的残余变形小,有利于震后桥梁结构的继续运营,并减小桥墩的修复费用。耗能特性和复位能力可用累积耗能和残余位移来表征,图 9 和图 10 分别给出了各试件的累积滞回耗能 E_{hyst} 和残余位移 Δ_r 随墩顶水平位移 Δ 的变化曲线。

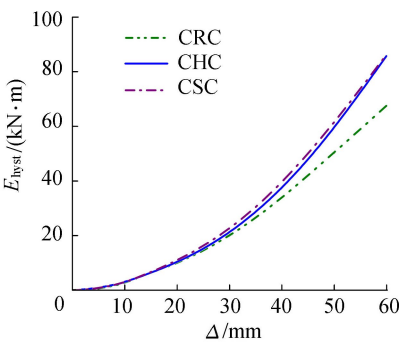


图 9 累积耗能曲线

Fig. 9 Accumulated energy dissipation curves

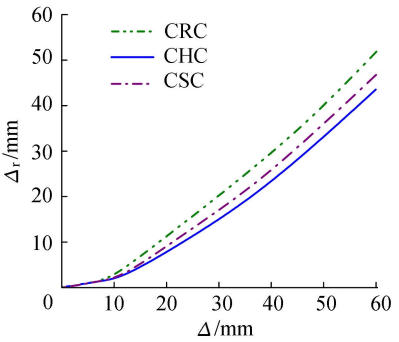


图 10 残余位移曲线

Fig. 10 Residual displacement curves

由图 9 和图 10 可见:(a) 水平位移小于 24 mm(12 mm) 时,各试件的滞回耗能(残余位移)均处于较低水平且无明显差异;随着水平位移的增大,累积耗能(残余位移)曲线稳定增长,各试件之间的差异趋于明显。(b) 混合桥墩试件在加载中期的累积耗能略低于组合桥墩试件,但破坏前二者的耗能曲线逐渐重合,最终的累积耗能同为 86 kN·m,相对于钢筋混凝土试件的 68 kN·m,增幅为后者的 26.4%。(c) 加载中后期,混合桥墩试件的残余位移要明显小于 2 个对比试件。特别地,当墩顶水平位移分别为 17.5 mm 和 20.0 mm 时,钢筋混凝土试件和组合桥墩试件的残余位移达到 9 mm,相应的残余位移角为 1%,相当于日本道路协会规定震后桥墩是否推倒重建的极限值^[17]。此时,混合桥墩试件的残余位移角较 2 个对比试件分别要小 33.3% 和 15.5%。

综上,在钢筋混凝土桥墩中下部埋置核心钢管,可显著改善桥墩的耗能特性和复位能力;将组合桥墩的核心钢管在墩身中部截断,可减小墩顶的残余位移,并且不会影响最终的累积耗能。

4 结 论

- a. 混合桥墩试件在反复荷载作用下损伤发展平稳、可控,最终破坏形态与钢筋混凝土桥墩试件和钢管混凝土组合桥墩试件均表现为墩底塑性铰区的弯曲延性破坏;相同墩顶位移下,混合桥墩试件的裂缝分布范围较广,并且在钢管端部区域发育较为充分。
- b. 混合桥墩试件的滞回曲线呈饱满的弓形,强度衰减缓慢,卸载后残余变形小,其抗震性能较钢筋混凝土桥墩试件有显著改善;与钢管混凝土组合桥墩试件相比,混合桥墩试件的极限位移增加了 19.2%,承载能力降低了 7.5%,而刚度退化和累积耗能变化甚微。
- c. 混合桥墩试件的极限位移角为 6.66%,满足工程实践中认为抗震构件具有良好变形能力时极限位移角不小于 4.0% 的要求。因此,混合桥墩方案具有应用于地震设防区的可行性。为促进混合桥墩在工程中的应用,亟待开展对混合桥墩的理论分析和数值模拟以及进一步的试验研究。

参考文献:

[1] HAN Linhai, WANG Zhibin, XU Wu, et al. Behavior of concrete-encased CFST members under axial tension[J]. Journal of

Structural Engineering, 2016, 142(2): 04015149.

- [2] 蔡健, 谢晓锋, 杨春, 等. 核心高强钢管混凝土柱轴压性能的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2002, 30(6): 81-85. (CAI Jian, XIE Xiaofeng, YANG Chun, et al. An experimental research on the composite column with core of high-strength concrete filled steel tube under axial compression loading[J]. Journal of South China University of Technology, 2002, 30(6): 81-85. (in Chinese))
- [3] 李惠, 王震宇, 吴波. 钢管高强混凝土叠合柱抗震性能与受力机理的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(3): 27-33. (LI Hui, WANG Zhenyu, WU Bo. Experimental research on mechanism and seismic performance of laminated column with steel tube filled with high-strength concrete[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(3): 27-33. (in Chinese))
- [4] 赵国藩, 张德娟, 黄承逵. 钢管混凝土增强高强混凝土柱的抗震性能研究[J]. 大连理工大学学报, 1996, 36(6): 759-766. (ZHAO Guofan, ZHANG Dejuan, HUANG Chengkui. Study of earthquake resistant behaviour of high strength concrete column reinforced with concrete filled steel tube[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1996, 36(6): 759-766. (in Chinese))
- [5] 尧国皇, 李永进, 廖飞宇. 钢管混凝土叠合柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(5): 114-121. (YAO Guohuang, LI Yongjin, LIAO Feiyu. Behavior of concrete-filled steel tube reinforced concrete columns subjected to axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(5): 114-121. (in Chinese))
- [6] 郭全全, 李芊, 章沛瑶, 等. 钢管混凝土叠合柱偏心受压承载力的计算方法[J]. 土木工程学报, 2014, 47(5): 56-63. (GUO Quanquan, LI Qian, ZHANG Peiyao, et al. Calculation for bearing capacity of steel tube reinforced concrete columns under eccentric compression[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(5): 56-63. (in Chinese))
- [7] 林立岩, 李庆钢. 钢管混凝土叠合柱的设计概念与技术经济性分析[J]. 建筑结构, 2008, 38(3): 17-21. (LIN Liyan, LI Qinggang. Design concept and analysis of technical economy for steel tube-reinforced concrete column[J]. Building Structure, 2008, 38(3): 17-21. (in Chinese))
- [8] QIU Wenliang, JIANG Meng, PAN Shengshan, et al. Seismic responses of composite bridge piers with CFT columns embedded inside[J]. Steel and Composite Structures, 2013, 15(3): 343-355.
- [9] QIU Wenliang, KAO Chinshe, KOU Changhuan, et al. Experimental study of seismic performances of RC bridge columns with CFST column embedded inside[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 23(2): 212-219.
- [10] WANG Zhibin, HAN Linhai, LI Wei, et al. Seismic performance of concrete-encased CFST piers: experimental study[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(4): 04015072.
- [11] 冯进, 包张君, 方有珍, 等. 卷边 PEC 柱(弱轴)-钢梁组合框架层间抗震机理试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 309-316. (FENG Jin, BAO Zhangjun, FANG Youzhen, et al. Experimental study on seismic mechanism of inter-story substructure of PEC column(weak axis)-steel beam composite frame[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(4): 309-316. (in Chinese))
- [12] 杨勇, 郭子雄, 聂建国, 等. SRC-RC 竖向混合结构过渡层抗震设计方法探讨[J]. 世界地震工程, 2005, 21(4): 60-65. (YANG Yong, GUO Zixiong, NIE Jianguo, et al. Study on seismic design of transmission story of SRC-RC vertical hybrid structures[J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(4): 60-65. (in Chinese))
- [13] 薛建阳, 伍凯, 赵鸿铁, 等. SRC-RC 转换柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(11): 102-110. (XUE Jianyang, WU Kai, ZHAO Hongtie, et al. Experimental study on seismic behavior of SRC-RC transfer columns[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(11): 102-110. (in Chinese))
- [14] 伍凯, 薛建阳, 赵鸿铁. SRC-RC 竖向混合结构转换柱承载力与延性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(3): 63-70. (WU Kai, XUE Jianyang, ZHAO Hongtie. Analysis on bearing capacity and ductility performance of transfer columns in SRC-RC hybrid structures[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2012, 44(3): 63-70. (in Chinese))
- [15] PARK R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing[J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1989, 22(3): 155-166.
- [16] 伍凯, 薛建阳, 赵鸿铁. SRC-RC 转换柱中钢与混凝土的共同工作[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 75-83. (WU Kai, XUE Jianyang, ZHAO Hongtie. Cooperation of shape steel and concrete in SRC-RC transfer column[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2015, 43(7): 75-83. (in Chinese))
- [17] Japanese Road Association. Design specifications of highway bridges, Part V: Seismic design[S]. Tokyo: Japanese Road Association, 1996.