

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.06.002

双层钢箱—混凝土组合墩耗能与等效黏滞阻尼分析

夏 坚¹, 宗周红², 夏樟华¹, 黎雅乐²

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 双层钢箱—混凝土组合墩柱(DSCB墩柱)是一种具有良好的抵御“多灾害”能力的新型桥梁墩柱截面形式, 鉴于耗能能力是结构或构件抵抗地震的一个重要性能, 而黏滞阻尼又是表征构件耗能特性的关键参数, 为了解该新型墩柱在双向地震作用下的耗能和阻尼特点, 通过对11根DSCB墩柱的水平单、双向拟静力试验, 研究该新型桥梁墩柱的耗能能力及等效黏滞阻尼系数。试验结果表明: DSCB墩柱具有远超同截面尺寸钢筋混凝土箱型墩的耗能能力; DSCB墩柱的双向累积滞回耗能和位移延性存在相关关系, 给出的正则化耗能与位移延性的关系式可为估算墩柱的耗能能力使用; 由于双向耦合作用, 弱轴的滞回环出现拓宽, 因此双向地震作用下弱轴的等效黏滞阻尼大于单向地震作用下弱轴的等效黏滞阻尼。

关键词: 双层钢箱混凝土组合墩; 双向水平地震; 双向拟静力试验; 滞回耗能; 等效黏滞阻尼

中图分类号: TU442.55

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2015)06—0008—08

Analysis of Energy Dissipation and Equivalent Viscous Damping of Double Steel Box – Concrete Composite Piers

XIA Jian¹, ZONG Zhouhong², XIA Zhanghua¹, LI Yale²

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Double-skin steel-concrete composite box piers(DSCB) for bridges is a new approach of resisting multi-disasters. Energy dissipation is a fundamental property of structures or structural members when subjected to seismic conditions, while viscous damping is the key coefficient when analyzing the energy dissipation capacity of a structure or a structural member. In order to study the energy dissipation and damping properties of these new piers under bidirectional seismic load, 11 DSCB piers were tested under cyclic loading with uniaxial and biaxial quasi-static testing method. The test result indicates that the energy dissipation capacity of DSCB piers is much higher than that of RC piers with rectangular hollow cross-sections; the biaxial cumulative hysteretic energy dissipation has a relationship with the displacement ductility, and the relationship can be used for the estimation of energy dissipation; because of the biaxial coupling effects of the bi-directional seismic loading, the equivalent viscous damping of minor axis is larger than that of uniaxial earthquake loading.

Keywords: double-skin steel-concrete composite box pier; bidirectional seismic load; biaxial quasi-static testing; cumulative hysteretic energy dissipation; equivalent viscous damping

结构构件耗能能力是评价其抗震性能的一项重要依据, 耗能指标越高, 说明结构在地震过程中消耗

的地震能量越多, 对结构的抗震安全性越有利。用于设计和评估的非线性静力方法经常使用和能量相

收稿日期: 2015-06-13

修稿日期: 2015-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178101, 51378112)与教育部博士点基金项目(20110092110011)资助。

作者简介: 夏 坚(1970—), 男, 福建福清人, 博士研究生, 教授级高工, 主要从事结构抗震防灾研究。E-mail: xjian@fjky.com

通讯作者: 宗周红(1966—), 男, 江苏如皋人, 博士, 教授, 主要从事桥梁动力灾变及其控制研究。E-mail: zongzh@seu.edu.cn

关的参数来评价或描述结构的非线性地震响应^[1-4]。而黏滞阻尼是描述构件耗能特征的关键参数,基于位移的设计方法中阻尼取值极为关键。基于位移的设计方法所采用的等代结构经常采用最大位移处的割线刚度和等效黏滞阻尼来代表弹性和滞回阻尼的复合影响^[5]。在单向滞回作用下耗能和等效黏滞阻尼已有研究表明和位移延性存在相关关系^[6],邱法维等^[7]、郭蓉等^[8]、文永庆等^[9]、阎宇等^[10]在研究地震损伤模型时对钢管混凝土组合结构或构件的耗能进行了计算分析,但上述研究大部分采用的是单向水平拟静力试验的耗能,而现有研究认为双向水平地震作用下,由于两个方向的耦合作用,会导致构件的强度和刚度退化加剧,构件在双向水平地震作用下的耗能和阻尼较单向水平地震作用会出现不同。且已有的研究所针对的钢管混凝土截面形式大部分为圆形或方形,尚未开展本文所研究的双层钢箱—混凝土组合墩柱(Double-Skin Steel-Concrete Composite Box Pier, DSCB)的耗能及阻尼特点研究,为此,有必要进行 DSCB 墩柱在水平双向低周往复荷载下的耗能和等效黏滞阻尼研究。

DSCB 墩柱是由内、外两层同心的钢箱与内部充填的混凝土组成,截面形式见图 1。已有研究表明,这种新型墩柱截面形式不但具有普通钢管混凝土构件承载力高、塑性和韧性好、抗震及耐火性能优越等特点,而且还具有以下优点:(1) 截面开展,抗弯刚度大;(2) 自重轻,抗震性能好;(3) 防火性能优于实心钢管混凝土,是一种理想的可满足“多灾害防御”理念的桥梁墩柱截面型式^[11-12]。本文基于 11 根双层钢箱混凝土组合墩的水平单、双向拟静力试验,研究该新型桥梁墩柱在双向水平滞回荷载作用下的耗能与阻尼特点,以期为今后基于能量的抗震设计提供借鉴。

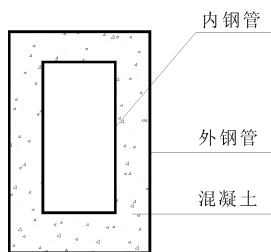


图 1 双层钢箱混凝土组合墩

1 双层钢箱混凝土组合墩柱双向拟静力试验

对震害的调查研究及实验研究结果表明,水平

双向地震比单向地震对钢筋混凝土结构的破坏作用大很多,这是因为一个方向的损伤直接影响到另一个方向的抗震能力,两个方向的相互耦合作用严重削弱结构的抗震能力。另外,由于结构的平面不规则性,结构的地震反应是呈多维的,这种多维非对称性引起的扭转振动会加剧结构的变形并进一步导致结构的失稳和倒塌。因此,研究结构或构件双向受力状态下的性能是非常重要的。从另一个方面看,多维抗震研究也是结构设计理论和规范发展的需要,因为结构多维抗震研究这个问题十分复杂,目前还没有很好地建立起恢复力模型并进行非线性动力分析,所以试验作为最直接的手段显得尤为重要^[13]。拟静力试验方法是目前研究结构或构件性能中应用最广泛的实验方法,可以最大限度地利用试件提供各种基本信息。例如承载力、刚度、变形能力、耗能能力和损伤特征等。但目前拟静力试验大部分还集中在一维试验上,对构件多维抗震性能的试验依然较少。为研究 DSCB 墩柱在双向水平地震作用下的耗能性能及等效黏滞阻尼,进行了 2 根墩柱的单向拟静力试验和 9 根墩柱的双向拟静力试验^[11];参照目前实际桥梁工程普遍采用的材料强度情况,试件内填混凝土强度 C50,钢板为 Q235 钢材;试件主要考虑轴压比、钢管壁宽厚比、截面长宽比和长细比参数;试件参数见表 1,试件加载图见图 2。

拟静力试验的加载方法有力控制、位移控制及力—位移混合控制 3 种方法^[14],本文采用位移控制加载。加载路径对墩柱在双向加载下的滞回表现及耗能均有影响,本文采用对角线加载路径来研究墩柱的双向抗震性能。对角线加载拟静力试验采用 X 和 Y 双向同步加载, X 方向与 Y 方向的位移幅值比为 1:1,每级加载循环 2 圈。整个加载过程为:初始阶段,第一级加载 3 mm,以后在钢板屈服位移之前每级以 3 mm 的幅值递增;钢板屈服以后阶段,以 6 mm 为幅值递增加载,直至试验结束。具体加载规则及其分解如图 3 所示。

2 双层钢箱—混凝土组合墩柱双向滞回曲线特点

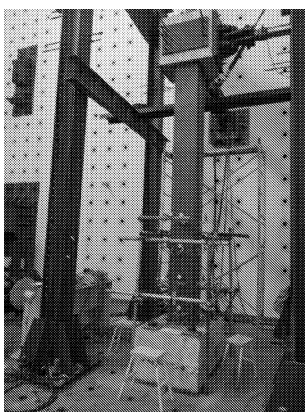
DSCB 墩柱在双向水平往复荷载作用下沿两个主轴的墩顶水平力和位移的滞回曲线和骨架线可参见文献^[11]。DSCB 墩柱强轴滞回曲线在混凝土开裂之前,构件基本处于弹性工作状态,构件加载和卸载曲线基本重合,构件刚度退化不明显;随着滞回位移水平的提高,钢管开始屈服,填充的混凝土出现开

裂,构件进入弹塑性阶段,滞回环呈现弓形;弱轴方向在较低滞回位移水平下,试件刚开始依然呈线性,加载及卸载曲线基本重合,但较强轴方向,弱轴更快地在更低的位移水平下开始进入塑性状态,构件刚度开始退化。随着位移的增大,滞回环呈现一定的

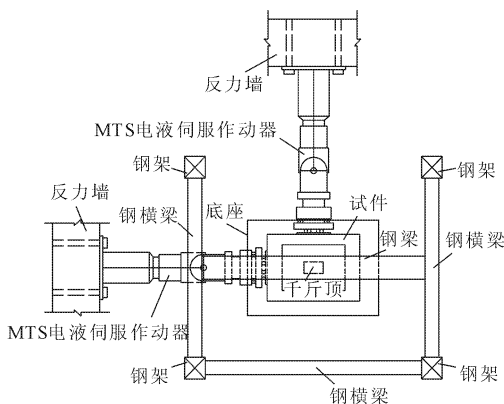
倒“S”形。弱轴滞回曲线比较明显的特征是,试件从峰值位移开始卸载时,不管正、反向,均出现明显的力值陡降现象,即位移基本不变而恢复力逐渐减小。由于该现象的出现,弱轴滞回环被拓宽,弱轴滞回环普遍较为丰满,耗能显著增大。

表 1 试件尺寸详表

试件编号	加载高度 /m	外管长×宽 /mm	内管长×宽 /mm	钢管壁厚 /mm	轴压比	加载规则
U4a-A1-10-4	4.45	440×320	260×180	4.0	0.10	强轴单向加载
U4b-A1-10-4	4.45	440×320	260×180	4.0	0.10	弱轴单向加载
B4-A1-10-4	4.45	440×320	260×180	4.0	0.10	对角线加载
B4-A1-10-5	4.45	440×320	260×180	5.0	0.10	对角线加载
B4-A1-10-6	4.45	440×320	260×180	6.0	0.10	对角线加载
B4-A1-08-4	4.45	440×320	260×180	4.0	0.08	对角线加载
B4-A1-15-4	4.45	440×320	260×180	4.0	0.15	对角线加载
B3-A1-10-4	3.45	440×320	260×180	4.0	0.10	对角线加载
B5-A1-10-4	5.45	440×320	260×180	4.0	0.10	对角线加载
B4-A2-10-4	4.45	320×320	180×180	4.0	0.10	对角线加载
B4-A3-10-4	4.45	640×320	460×180	4.0	0.10	对角线加载

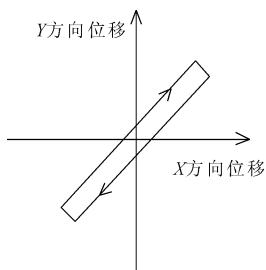


(a) 实际加载装置

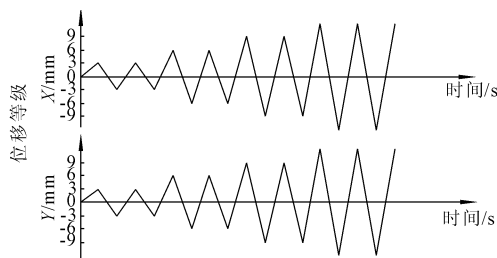


(b) 加载布置俯视图

图 2 试件加载装置示意图



(a) 对角线加载



(b) X、Y方向位移加载时程分解

图 3 对角线加载规则及其分解图

3 耗能分析

3.1 累积耗能

试件滞回耗能为滞回曲线所包围的面积,利用

累积耗散能量评价试验构件的耗能能力,考虑每个加载循环过程中 X 方向、Y 方向滞回耗能分别由式(1)和式(2)进行计算,构件的总耗能能力为前两者之和,由式(3)计算^[6]。

$$E_x = \int P_x dx \quad (1)$$

$$E_y = \int P_y dy \quad (2)$$

$$E_{tot} = \int P_x dx + \int P_y dy \quad (3)$$

每个试验构件累积耗散能量的计算结果见图 4。由图 4 可以看出:(1) 双向加载作用下构件的累积耗能明显大于相应位移水平下单向加载作用下的累积耗能,同时双向加载作用下的累积耗能略大于单向试验作用(X 向和 Y 向)累积耗散能量之和;(2)

随着宽厚比的增加,构件累积耗能降低;长细比(=加载高度/截面强轴长度,分别为 7.84、10.11、12.39)对构件累积耗能影响是成反比,长细比越大,构件在同一水平位移作用下累积耗能越小;长宽比(=截面长度/截面宽度,分别为 1.00、1.38、2.00)对构件累积耗能的影响是正比的,构件的长宽比越大构件的累积耗能也就越大;轴压比(分别为 0.08、0.10、0.15)对构件的累积耗能影响呈现反比的趋势,构件的轴压比越小,构件在同一位移加载情况下的累积耗能越大。

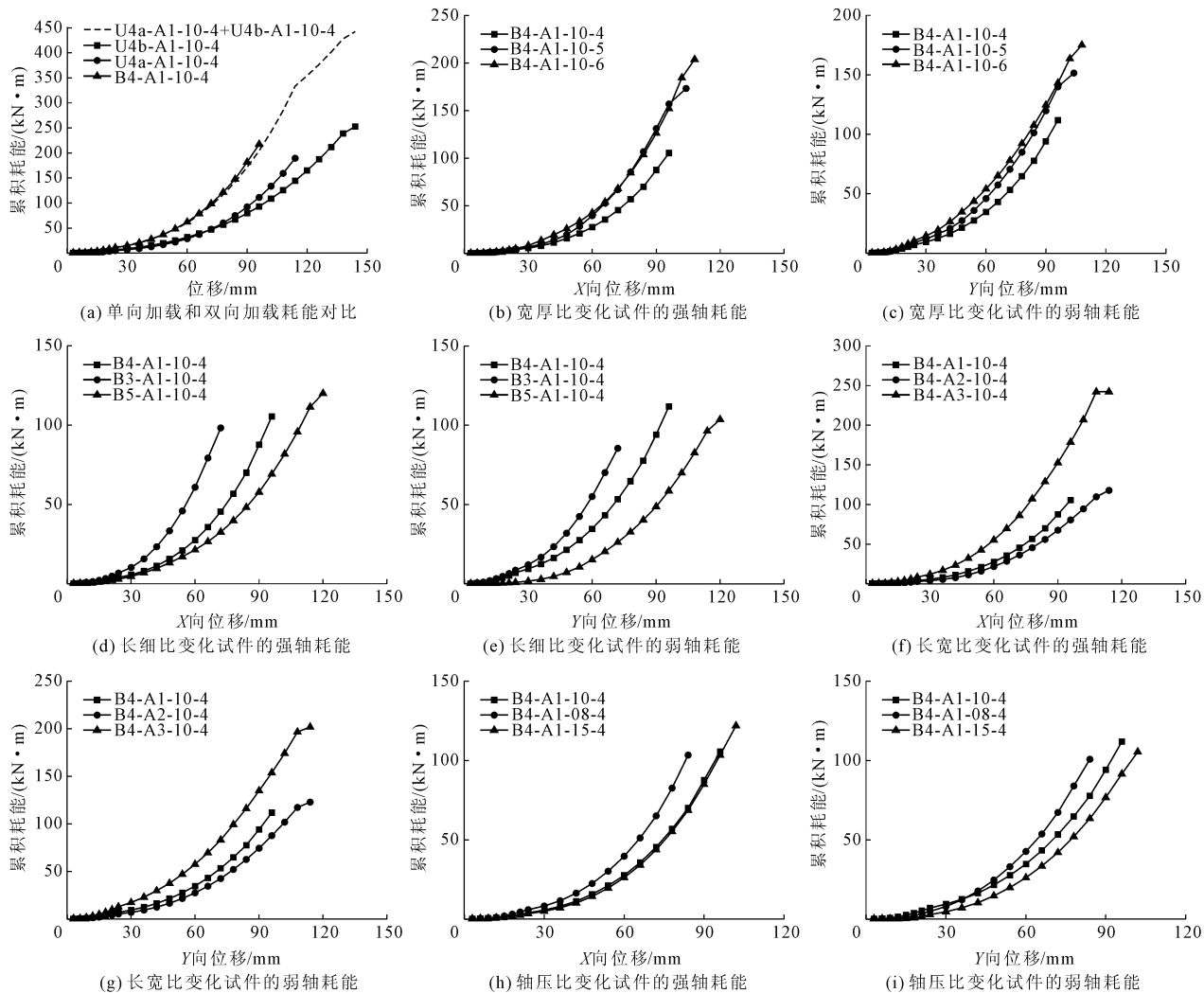


图 4 试件累积耗能

本文基准试件 B4-A1-10-4 达到破坏时的累积滞回耗能为 225 kN·m,而与该试件截面相仿的钢筋混凝土薄壁墩破坏时的累积滞回耗能仅为 4.0 kN·m^[15],虽然钢箱混凝土组合墩的含钢率(10%)是对应钢筋混凝土箱型墩含钢率(2%)的 5 倍,但耗能能力却达到了约 55 倍。由此可见,钢箱混凝土组合墩具有良好的耗能能力。

3.2 单圈滞回环耗能

为了进一步研究每一圈加载对试验构件的影响,本文分别计算了试验中 11 个构件的单圈滞回耗能以及圈数对应的累积耗能,其结果见图 5。分析各个构件的计算结果,可以得到以下相应的结论:

(1) 无论是单向加载试验还是双向加载试验,在每个相同的位移水平时,第一个滞回环耗散的能

量总是大于第二圈滞回环耗散的能量。造成这种耗散能量的降低的主要原因是由于在第一圈加载过程中试验对构件产生损伤造成了构件刚度和强度的下降。

(2) 从试验结果图形可以看出,这种墩柱截面

型式在单向加载试验中和双向加载中,直到常规破坏(荷载下降到峰值荷载的 85% 时)每圈循环耗散的能量都没有呈现出显著的下降。表现出稳定的耗能能力。

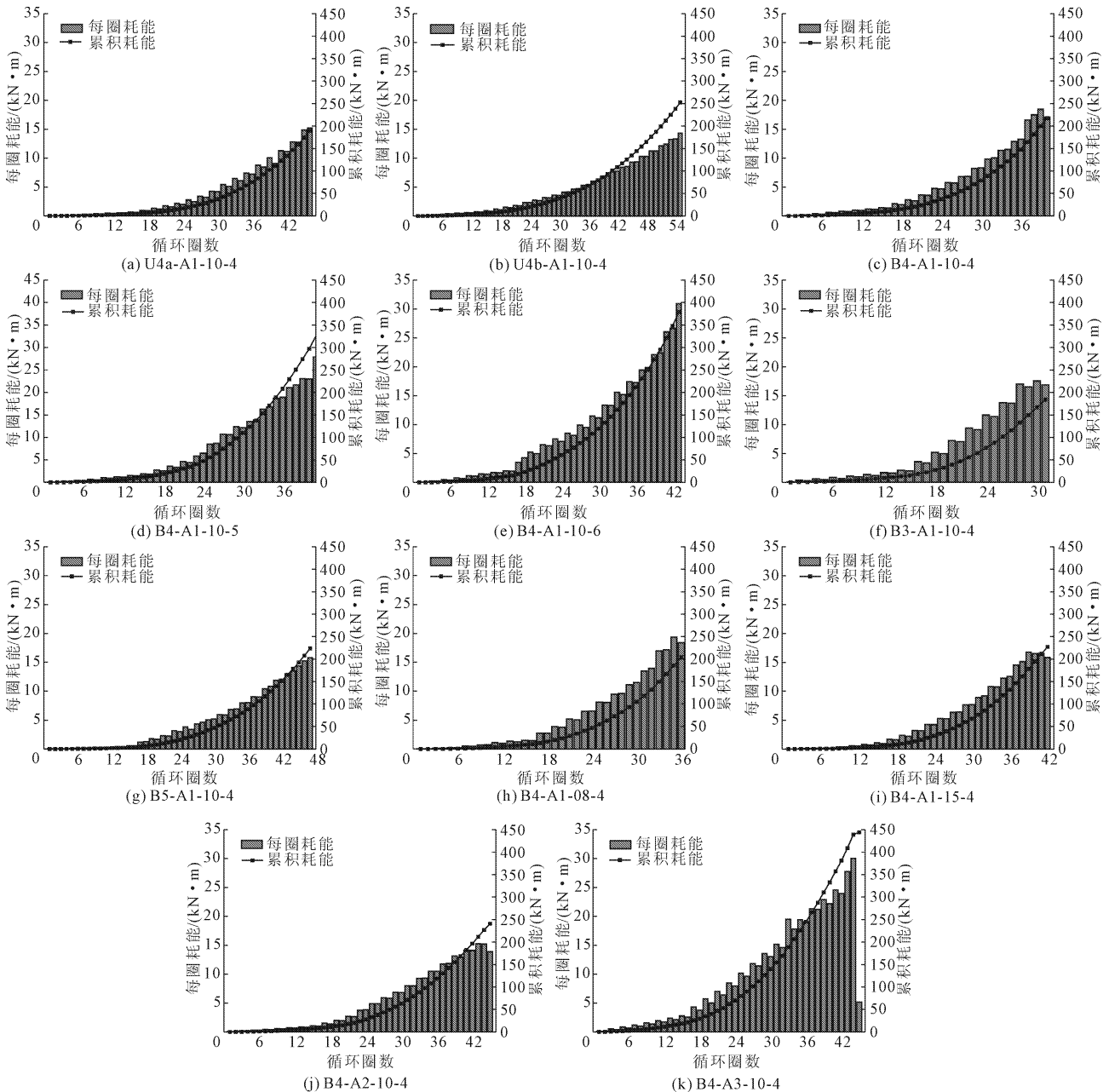


图 5 各构件单圈耗能与累积耗能

3.3 构件破坏总耗能

构件在破坏(荷载下降到峰值荷载的 85% 时)时的总耗能能够更加明确的体现试验构件耗能能力,因此本文计算并对比了相应构件在破坏前的总耗能,结果见图 6,从结果观察可以看出以下几点结论:

(1) 双向加载方式作用下试验得到的总耗能小于单向加载作用时弱轴的总耗能,这是由于双向耦合作用下,试件的极限位移较单向荷载作用下小;同为单向加载试验时,加载弱轴时的总耗能比加载强轴时的总耗能大 33%。

(2) 随着壁厚的增加,构件的耗能能力不断增

大, B4-A1-10-6 构件的总耗能能力比 B4-A1-10-4 构件大 74%。

(3) 双向加载试验过程中, 随着试件长细比的增大, 构件的总耗能能力呈现增大的趋势。

(4) 随着轴压比增大, 试件的总耗能能力呈现增大的趋势, 但这应该由于这三个试件的轴压水平较低情况下得到的结果, 后续尚应增大轴压比进一步对该结果进行验证。

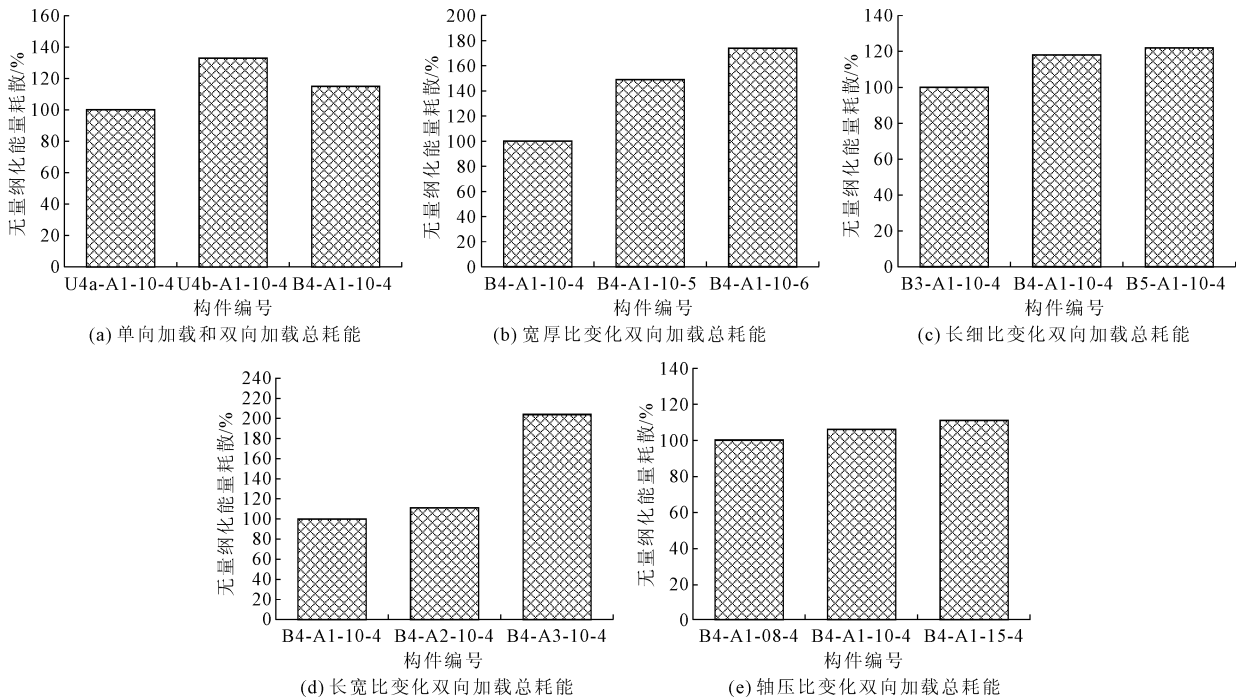


图 6 各构件破坏总耗能

3.4 正则化耗能与位移延性的关系

由于位移延性系数和能量耗散与构件的各种变量参数密切相关, 因此钢箱混凝土组合截面的位移延性系数与耗能能力之间的关系是很复杂的。为了排除其他参数的干扰, 本文做了正则化规定: 对于每个试验构件, 计算从屈服点到常规破坏点的能量耗散与总能量耗散的比值作为正则化的耗能即 E_{cum}/E_y ($E_y = P_y \Delta_y / 2$)。图 7 为构件位移延性系数与正则化耗能之间的关系图, 拟合公式为式(4)。

$$\frac{E_{cum}}{E_y} = 1.15\mu^{2.6} \quad (4)$$

由于式(4)的拟合是基于对角线双向加载的试验数据得到的, 因此该式还需后续其他试验数据的验证。但是, 该式提供了一个粗略估计在不同延性需求下构件的耗能能力的途径。

4 等效黏滞阻尼比

4.1 双向拟静力试验两个主轴方向的等效阻尼

等效阻尼取决于结构位移延性需求和单元中塑性铰的位置^[16]。它可被认为是如式(5)中所示的弹性阻尼和滞回阻尼的叠加, 这里的“+”并不是数学意义上的求和。

$$\xi_{eq} = \xi_{el} + \xi_{hyst} \quad (5)$$

本文中弹性等效阻尼比 (ξ_{el}) 取用广泛接受的临界阻尼比 5%, 而滞回阻尼 (ξ_{hyst}) 主要取决于构件屈服后的滞回特性。对于一个对称闭合的滞回曲线, 滞回阻尼比一般采用的是式(6), 其中公式中 E_D 代表给定滞回环的能量耗散, 即闭合滞回环的面积 A_{loop} ; E_{S0} 代表的是与滞回环中最大的力和位移相关的弹性应变能。

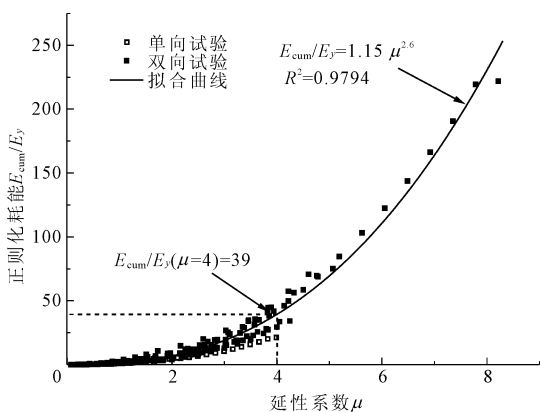


图 7 正则化耗能与位移延性的关系

$$\xi_{\text{hyst}} = \frac{E_D}{4\pi E_{S0}} = \frac{A_{\text{loop}}}{2\pi F_{\text{max}} D_{\text{max}}} \quad (6)$$

然而,在地震荷载或者以位移控制条件下进行的拟静力试验中,一般滞回曲线都会出现不对称和不闭合的情况,这就意味着直接使用式(6)是不太适合的。因此等效滞回阻尼一般采用每个半周期的滞回进行计算,如图 8 所示^[6]:

(1) 首先半个周期的滞回环是确定的,由一对零力点分隔;

(2) 每半个滞回周期内,弹性应变能 E_{S0} 可以利用半个周期内的最大力和最大位移计算得到;

(3) 对于半个的滞回周期的耗散能量 E_D 可以利用积分的方法求解半个滞回曲线的面积 $A_{\text{half-loop}}$;

(4) 最后半个滞回周期求解等效阻尼比的公式如下:

$$\xi_{\text{hyst}} = \frac{1}{\pi} \frac{A_{\text{half-loop}}}{F_{\text{max}} D_{\text{max}}} \quad (7)$$

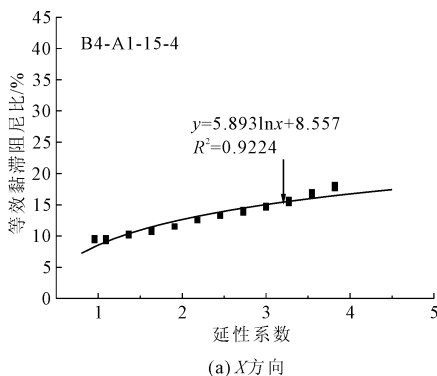


图 9 B4-A1-15-4 构件等效阻尼比与位移延性系数关系

表 2 列出了试验中 11 根构件在两个方向 (X 和 Y) 等效黏滞阻尼比与位移延性系数的最佳对数拟合曲线函数及相关系数 R^2 。

(1) 对比单向加载和双向加载试验,可以看出两者在强轴的等效黏滞阻尼比结果较为接近,而在弱轴方向,双向加载的结果远大于单向加载的结果,这主要是由于双向耦合作用,弱轴的滞回环出现明显的拓宽,耗能增加明显;

(2) 双向加载作用下,分析构件参数对构件等效黏滞阻尼比拟合曲线的影响时,发现构件参数对等效黏滞阻尼的影响规律不太明显,但可以发现在构件参数对构件两个方向的 (X 向和 Y 向) 的影响是不同的。部分构件计算所得等效黏滞阻尼相关系数较小,这是由于影响构件耗能的因素较多,仅采用位移延性系数进行粗略估算会出现相对较大的离散。

基于上文等效滞回阻尼的计算方法,分别计算了试验中 11 个构件在强轴 (X 轴) 和弱轴 (Y 轴) 方向的等效阻尼,接着采用对数曲线拟合试验构件位移延性系数与等效黏滞阻尼比的函数方程。鉴于篇幅的限制,本文仅列出 B4-A1-15-4 构件位移延性系数与等效黏滞阻尼比拟合图形,见图 9。

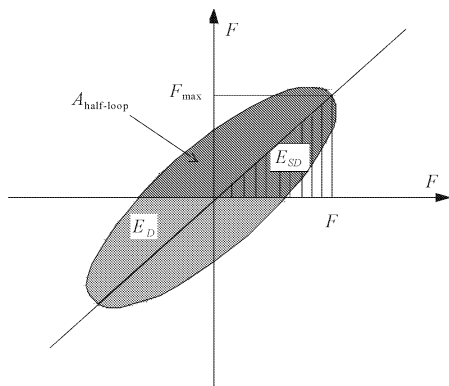
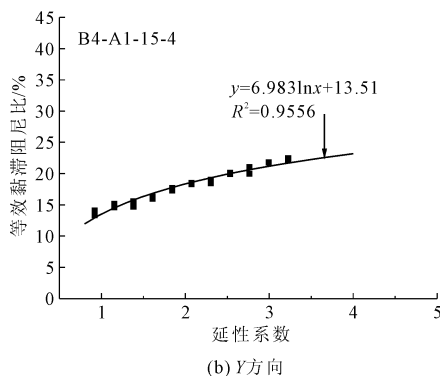


图 8 半个滞回周期计算滞回阻尼比



4.2 整体等效双向阻尼

在双向水平滞回荷载作用下的构件的阻尼可以参照 Rodrigues 等^[6]提出的用于承受双向水平滞回荷载作用的钢筋混凝土构件的阻尼计算公式:

$$\xi_{\text{eq}} = \frac{\xi_x \cdot E_x + \xi_y \cdot E_y}{E_x + E_y} \quad (8)$$

式中: ξ_{eq} 是双向滞回下的等效黏滞阻尼比; ξ_x 、 ξ_y 分别是各主轴方向的等效黏滞阻尼比; E_x 、 E_y 分别为各主轴方向的滞回耗能。

5 结论

本文通过对 11 根双层钢箱混凝土组合墩在单向和双向水平滞回荷载下的拟静力试验,研究了该新型截面形式的桥梁墩柱在双向地震作用下的耗能能力和等效黏滞阻尼系数,可以得到以下结论:

表 2 各试件等效黏滞阻尼比拟合曲线

构件编号	截面方向	拟合曲线	R^2
U4a-A1-10-4	X	$\xi_{eq} = 10.49 \ln u + 8.763$	0.8965
U4b-A1-10-4	Y	$\xi_{eq} = 4.587 \ln u + 12.600$	0.8135
B4-A1-10-4	X	$\xi_{eq} = 10.69 \ln u + 7.031$	0.6579
	Y	$\xi_{eq} = 16.32 \ln u + 11.740$	0.4899
B4-A1-08-4	X	$\xi_{eq} = 10.06 \ln u + 8.074$	0.6387
	Y	$\xi_{eq} = 14.78 \ln u + 14.870$	0.8564
B4-A1-15-4	X	$\xi_{eq} = 5.893 \ln u + 8.557$	0.9224
	Y	$\xi_{eq} = 6.983 \ln u + 13.510$	0.9556
B3-A1-10-4	X	$\xi_{eq} = 11.57 \ln u + 8.318$	0.8436
	Y	$\xi_{eq} = 8.165 \ln u + 4.911$	0.8658
B5-A1-10-4	X	$\xi_{eq} = 3.888 \ln u + 12.210$	0.6000
	Y	$\xi_{eq} = 12.84 \ln u + 14.540$	0.9274
B4-A1-10-5	X	$\xi_{eq} = 12.85 \ln u + 9.119$	0.8219
	Y	$\xi_{eq} = 7.627 \ln u + 18.750$	0.4946
B4-A1-10-6	X	$\xi_{eq} = 6.253 \ln u + 11.220$	0.4728
	Y	$\xi_{eq} = 3.742 \ln u + 20.250$	0.2641
B4-A2-10-4	X	$\xi_{eq} = 11.93 \ln u + 10.960$	0.9625
	Y	$\xi_{eq} = 11.14 \ln u + 12.590$	0.5572
B4-A3-10-4	X	$\xi_{eq} = 4.116 \ln u + 9.946$	0.9264
	Y	$\xi_{eq} = 2.32 \ln u + 17.200$	0.2474

(1) 双向钢箱混凝土组合墩具有远超钢筋混凝土箱型墩的耗能能力。

(2) 双层钢箱混凝土组合墩直至达到破坏荷载(承载力降低至峰值荷载的 85%),每圈的滞回耗能未出现显著下降,表现出在各个位移水平下稳定的耗能能力。

(3) 墩柱在双向地震作用下的累积滞回耗能和位移延性存在一定的相关关系,可利用文中回归得到累积滞回耗能公式进行粗略的耗能估算。

(4) 由于双向水平地震耦合作用,弱轴方向的滞回环出现拓宽,因此双向地震弱轴的等效黏滞阻尼大于单向地震作用下的弱轴阻尼。

参考文献:

[1] Eom T S, Park H G. Evaluation of energy dissipation of slender reinforced concrete members and its applications[J]. Engineering Structures, 2010,32(9):2884-2893.

[2] Park Y J, Ang A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985,111(4):722-739.

[3] 邱法维,杨卫东,欧进萍.钢管混凝土柱滞回耗能和累积损伤的实验研究[J].哈尔滨建筑大学学报,1996,29(3):41-45.

[4] 吴 轶,黄照棉,LEE,等.基于刚度退化和滞回耗能的圆钢管混凝土柱损伤模型[J].地震工程与工程振动,2014,34(5):172-179.

[5] Blandon C A, Priestley M J N. Equivalent viscous damping equations for direct displacement based design[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005,9(1):257-278.

[6] Rodrigues H, Varum H, Arede A, et al. A comparative analysis of energy dissipation and equivalent viscous damping of RC columns subjected to uniaxial and biaxial loading[J]. Engineering Structures, 2012,35(1):149-164.

[7] 邱法维,杨卫东,欧进萍.钢管混凝土柱滞回耗能和累积损伤的实验研究[J].哈尔滨建筑大学学报,1996,29(3):41-45.

[8] 郭 蓉,王铁成,赵少伟,等.方钢管混凝土柱的地震损伤模型[J].河北农业大学学报,2007,30(3):109-112.

[9] 文永庆.钢管—钢管混凝土柱双参数破坏准则的研究[D].长沙:湖南大学,2009.

[10] 阎 宇.低周反复水平荷载作用下方钢管混凝土柱损伤模型的研究[D].青岛:青岛理工大学,2010.

[11] Xia Jian, Zong Zhouhong, Xu Chaoran, et al. Study on seismic performance of double-skin steel-concrete composite box piers—Part I: Bidirectional quasi-static test[Z]. Submit to Journal of Southeast University(Accepted for publication).

[12] Xia Jian, Zong Zhouhong, Xu Chaoran, et al. Study on seismic performance of double-skin steel-concrete composite box piers—Part II: Nonlinear finite element analysis[Z]. Submit to Journal of Southeast University(Accepted for publication).

[13] 邱法维,李文峰,潘 鹏,等.钢筋混凝土柱的双向拟静力实验研究[J].建筑结构学报,2001,22(5):26-31.

[14] 邱法维,钱稼茹,陈志鹏.结构抗震试验方法[M].北京:科学出版社,2000.

[15] 夏樟华.钢筋混凝土箱型墩抗震性能研究[D].福州:福州大学,2014.

[16] Priestley M J N. Displacement-based seismic assessment of reinforced concrete buildings[J]. Journal of Earthquake Engineering, 1997,1(1):157-192.