

文章编号:1673-2049(2013)02-0028-07

基于延性破坏准则的钢管混凝土圆柱 低周疲劳寿命研究

邢国华,冉 侯,寇文飞,付 国,刘伯权

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:将钢筋混凝土结构的等效延性破坏准则应用于钢管混凝土圆柱的低周疲劳寿命分析,提出了钢管混凝土圆柱的低周疲劳寿命计算方法,综合考虑了结构的首超破坏和累积损伤。建立了钢管混凝土圆柱的低周疲劳寿命拟合曲线,拟合公式的相关系数为 0.971;通过 23 根钢管混凝土圆柱的低周疲劳试验结果对提出的计算方法进行了验证。结果表明:建议计算模型能够较好地反映钢管混凝土圆柱在不同位移延性水平下的疲劳寿命。

关键词:钢管混凝土圆柱;延性;低周疲劳寿命;破坏准则;屈服曲率

中图分类号:TU392.3

文献标志码:A

Research on Low-cycle Fatigue Life of CFST Circular Columns Based on Ductility Failure Criterion

XING Guo-hua, RAN Yu, KOU Wen-fei, FU Guo, LIU Bo-quan

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Applying the equivalent ductility failure criterion of the reinforced concrete (RC) structure to the low-cycle fatigue life of concrete-filled steel tubular (CFST) circular columns, the computing method of the low-cycle fatigue life of CFST circular columns was presented. The first excursion failure and cumulative damage were comprehensively taken into account. The fitted curve of the low-cycle fatigue life of CFST circular columns was built, and the correlation coefficient of the fitted formula was 0.971. In addition, the suggested computing method was verified using low-cycle fatigue experiment data of 23 CFST circular columns. Results shows that the suggested computing model can better reflect the fatigue life of CFST circular columns under different displacement ductilities.

Key words: concrete-filled steel tubular circular column; ductility; low-cycle fatigue life; failure criterion; yield curvature

0 引 言

钢管混凝土作为一种新型的结构形式,充分发挥了钢材和混凝土 2 种材料的优点,并且不产生模

板费用,施工速度和方便性大大增加,在桥梁工程和高层建筑结构中得到了广泛应用^[1-14]。近年来,许多学者对钢管混凝土圆柱的滞回性能开展了广泛深入的研究,取得了丰硕研究成果,但目前对不同加载

收稿日期:2013-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51078037,51108032);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012ZD009);

长安大学基础研究支持计划专项基金项目(2012)

作者简介:邢国华(1983-),男,内蒙古呼和浩特人,副教授,工学博士,E-mail:ghxing@chd.edu.cn。

模式下钢管混凝土的低周疲劳损伤寿命开展的研究仍较少。

在分析结构和构件的疲劳破坏时,主要用结构和构件的整体变形与循环次数或滞回耗能与循环次数的关系来描述其疲劳寿命。钢管混凝土结构的低周疲劳破坏受位移延性影响显著,位移延性指数越大,结构的低周疲劳寿命越短,两者之间存在确定的关系,可采用金属疲劳理论进行描述^[15]。

Manson-Coffin 关系是工程中研究材料、构件或结构在反复荷载下疲劳寿命的方法之一。该方法主要是基于材料、构件或结构的变形和循环加载次数建立相应的关系式,从而确立材料、构件或结构在某一等幅高周循环或低周循环下的疲劳寿命。但是该方法中的塑性变形幅值是后验信息,工程设计及结构分析时较难直接获得,而位移延性则是工程人员所熟知的一项设计指标,可以直接获得。

刘伯权^[16]基于地震输入特性并考虑结构的低周疲劳破坏效应,通过 20 根大比例钢筋混凝土柱的低周疲劳试验和理论分析,提出了抗震结构的等效延性破坏准则。该准则考虑了结构首超破坏和累积损伤破坏 2 个方面因素,其表达式形式简单,概念明确,且采用了延性设计指标,易于实际工程应用。

为将钢管混凝土结构的疲劳验算与工程实际结合,本文中基于等效延性破坏准则建立了钢管混凝土圆柱的低周疲劳破坏曲线,对钢管混凝土圆柱的低周疲劳寿命进行了研究。

1 破坏准则

近年来,钢管混凝土结构在桥梁工程中得到了广泛应用,众多学者完成了大量的理论分析,但对钢管混凝土结构破坏准则的研究仍不充分。等效延性破坏准则考虑了变形和累积损伤,可较好地预测钢管混凝土结构的低周疲劳寿命。

1.1 结构破坏准则

结构的刚度准则和强度准则是结构弹性阶段直接有效的破坏判断准则。弹性范围内结构的强度和刚度能够较容易地通过计算得出或根据理论计算公式推导得出;结构一旦进入塑性阶段,其强度和刚度受混凝土材料的非线性特征影响显著,混凝土材料自身的离散性使得构件的屈服后性能特别是极限状态性能更加复杂,现有技术手段尚不能精确地分析工程结构的塑性性能。

Park 等^[17-18]于 1985 年提出了基于最大反应变形与累积耗能相组合的双参数地震损伤模型,该模

型一定程度上解释了地震动三要素对结构破坏的影响。由于 Park-Ang 准则采取了累积滞回耗能这一标量来表征结构的破坏,忽略了在同等耗能情况下,大位移幅值循环比小位移循环破坏严重这一事实,也无法反映出加载路径对结构破坏的影响。此外,由于组合参数 β 由数据拟合得出,拟合公式计算结果具有较大的离散性。

稳定失效破坏准则需要对结构的塑性铰或机械铰进行定义,无法直接得出结构破坏与塑性铰之间的相关关系。此外,构件层次的计算分析都需要借助大量方程求解,使得其应用范围受到极大的限制。

若考虑罕遇地震的偶然性以及结构响应的不确定性^[19],现有的刚度准则、强度准则以及双参数破坏准则均存在一定的局限性。

1.2 等效延性破坏准则

为了更好地评估结构的抗震性能,Newmark^[20]提出了延性的概念,延性定义为结构或构件在单一荷载作用下的极限变形与屈服变形之比,并把延性大小作为衡量结构抗震性能优劣的重要标志。

延性虽然可以反映结构屈服后的变形能力,但是延性的概念不能直接体现结构在地震作用下的振动特性以及在整个受力反应过程中所出现的刚度、强度退化特性。由于地震动作用时间相对较短,地震反应本质上是一个有限次数的振动过程,进一步可处理为超越屈服后弹塑性阶段的低周疲劳问题,结构的破坏可归结为循环加载次数为几次到几十次的累积损伤破坏。为此,笔者曾采用金属疲劳理论中的寿命曲线对钢筋混凝土结构的低周疲劳试验进行研究,取得了较好的分析结果。

文献[16]中完成了大量钢筋混凝土柱的低周疲劳破坏试验,采用的典型试件截面尺寸为 250 mm×200 mm,长度为 2 190 mm,纵筋单侧配筋率为 1.25%,配箍率为 0.5%,剪跨比为 5.12,主要设计参数见表 1。根据试验结果,回归得出以位移延性 u 为参数的钢筋混凝土柱低周疲劳寿命曲线为

$$Nu^{6.5} = 1.65 \times 10^4 \quad (1)$$

式(1)可写成

$$u_i N_i^\beta = C \quad (2)$$

式中: N 为构件的疲劳寿命; N_i 为构件在位移比 u_i 水平上作对称循环的疲劳寿命; C 为常数; β 为与构件类型有关的常数,由低周疲劳试验确定。

由式(2)可得等效位移延性为

$$u^* = \bar{N}^{-\beta} N_p^\beta u_p \quad (3)$$

式中: u^* 为考虑低周疲劳破坏特性的等效层间延性

表 1 钢筋混凝土柱低周疲劳试验参数
Tab. 1 Parameters of Low-cycle Fatigue
Experiment of RC Columns

试件 编号	$f_{cu}/$ MPa	$f_{sy}/$ MPa	$f_{yv}/$ MPa	n	加载位 移幅值	加载 次数
CF-1	33.3	411.5	328.8	0.23	$2\Delta_y$	268.0
CF-2	35.8	411.5	328.8	0.23	$3\Delta_y$	7.5
CF-4	39.0	411.5	328.8	0.23	$4\Delta_y$	2.0
CF-6	38.4	411.5	328.8	0.23	$2.5\Delta_y$	13.0
CF-7	36.6	411.5	328.8	0.23	$1.5\Delta_y$	1 048.0
CF-11	40.8	374.9	304.8	0.40	$2\Delta_y$	21.0
CF-20	44.9	374.9	304.8	0.23	$2.25\Delta_y$	135.0

注： f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度； f_{sy} 、 f_{yv} 分别为纵筋屈服强度和箍筋屈服强度； Δ_y 为钢管混凝土柱的屈服位移； n 为轴压比。系数，简称为等效延性； \bar{N} 为等效滞回循环次数； u_p 为极限位移延性，即单调荷载下结构的延性； N_p 为 u_p 相对应的循环次数。

由于 N_p 通常可取 1/4，则式(3)可改写为

$$u^* = (4\bar{N})^{-\beta} u_p = k u_p \tag{4}$$

式中： k 为等效系数， $k = (4\bar{N})^{-\beta}$ ，对钢筋混凝土结构， β 可取 0.152。

等效滞回循环次数 \bar{N} 考虑了结构破坏的累积效应，随着 \bar{N} 的增大，结构等效延性不断降低。当 $\bar{N}=1/4$ 时， $u^* = u_p$ ，可将结构的首超破坏和累积损伤破坏统一成一个表达式，且采用了延性概念，便于工程设计使用。

2 试验分析

钢管混凝土是在钢管中填充混凝土所形成的一种组合结构，具有承载力高、抗震性能好、施工方便、经济实用等特点，弥补了钢管和混凝土 2 种材料各自的缺点，能够充分发挥二者的优点。如果把钢管等效考虑为混凝土的一种高强高性能特殊保护层，则钢管混凝土可看作是普通钢筋混凝土材料的一种延伸和发展，其低周疲劳寿命仍可通过等效延性破坏准则计算得出。

2.1 破坏特点

研究表明^[21]，钢管混凝土构件在低周反复荷载作用下，可能发生 3 种形式的破坏：

(1)失稳破坏。当轴压比较大时，在反复荷载作用下，首先在受力最不利截面处发生压屈，钢管表面有向外凸鼓的现象，并沿环向发展，发展到一定程度时发生失稳破坏。合理设计的钢管混凝土结构应避免此类破坏。

(2)疲劳断裂破坏。当轴力较小或加载位移幅

值较小时，试件在反复荷载作用下，在最大压应力处微微发生一点凸鼓，凸鼓沿环向发展很慢，随着循环次数的增加，在最大应力处附近产生裂缝。此后随着循环加载次数的继续增加，裂缝逐渐开展，直至断裂。

(3)当加载位移和轴力位于上述二者之间时，试件在最大压应力处先发生凸鼓，并沿环向发展，发展到一定程度时，在凸鼓处出现裂缝，之后裂缝沿凸鼓面发展直至失稳。

具体来说，钢管混凝土柱在循环荷载作用下发生的破坏具有以下特征：①钢管混凝土压弯构件在外包钢管发生断裂之前的承载力随着循环次数的增加而缓慢退化，钢管发生断裂后，构件迅速丧失承载能力；②钢管破坏时，断裂部位钢管的变形远未达到单轴受拉时的极限变形，说明往复拉应力和压应力的循环作用不但会增加钢管的塑性变形，使钢管混凝土的承载力退化，还会使钢管产生疲劳损伤，降低钢管的极限变形能力。

因此，在低周反复荷载作用下，钢管混凝土柱破坏的主要原因是由于塑性铰区钢管疲劳损伤的累积而发生的疲劳破坏。此种在塑性铰区出现的不可恢复的塑性变形通常与循环加载次数和加载位移幅值大小直接相关。

2.2 等幅位移循环下柱的位移延性

文献[6]中完成了钢管混凝土模型柱的低周反复荷载试验，其中 13 个典型试件的材料参数和几何尺寸见表 2，模型柱编号的详细说明参见文献[6]。

图 1 中给出了不同侧移率下典型钢管混凝土圆柱的滞回曲线。模型柱滞回曲线的荷载和刚度退化随着不同位移延性的增大而加快，延性水平越高，往复变形对钢管混凝土造成的损伤越大，结构循环加载次数越少；随着侧移率的减小，钢管混凝土圆柱的滞回曲线环数明显增多，其低周疲劳寿命显著增加。文献[6]中虽未开展弹性阶段的钢管混凝土圆柱低周疲劳寿命试验研究，但可以预测加载位移延性指数较小时，模型柱的低周疲劳循环加载次数将显著增加。若模型柱的加载位移幅值低于 1 倍屈服位移，几十次循环加载次数下钢管混凝土圆柱较难发生破坏。

钢管混凝土圆柱的延性受钢管材性和混凝土强度影响较大。在中等和小加载位移幅值作用下，径厚比大的钢管混凝土圆柱承载力退化快于径厚比小的模型柱；大侧向加载位移幅值作用下，径厚比对钢管混凝土圆柱承载力退化的影响减弱。究其原因，

表 2 钢管混凝土圆柱低周疲劳试验参数

Tab. 2 Parameters of Low-cycle Fatigue Experiment of CFST Circular Columns

试件编号	直径/ mm	钢管壁 厚/mm	径厚比	柱高/ mm	f_c' /MPa	f_y /MPa	P /kN	加载 方式	侧移 率/%	剪跨比	n	屈服位 移/mm	位移 延性	加载 次数
L-CFST57-C2	330	5.78	57	1 500	37	293	1 300	等幅加载	2	4.545	0.349	20.926	1.434	170
L-CFST57-C4	330	5.78	57	1 500	37	293	1 300	等幅加载	4	4.545	0.349	20.926	2.867	28
L-CFST57-C6	330	5.78	57	1 500	37	293	1 300	等幅加载	6	4.545	0.349	20.926	4.301	12
L-CFST110-C2-1	330	3.00	110	1 500	34	56	1 300	等幅加载	2	4.545	0.399	19.319	1.553	86
L-CFST110-C2-2	330	3.00	110	1 500	34	356	1 300	等幅加载	2	4.545	0.399	19.319	1.553	88
L-CFST110-C4	330	3.00	110	1 500	34	356	1 300	等幅加载	4	4.545	0.399	19.319	3.106	24
L-CFST110-C6-1	330	3.00	110	1 500	34	356	1 300	等幅加载	6	4.545	0.399	19.319	4.659	13
L-CFST110-C6-2	330	3.00	110	1 500	34	356	1 300	等幅加载	6	4.545	0.399	19.319	4.659	14
L-CFST112-C2	336	3.00	112	1 500	39	270	1 300	等幅加载	2	4.464	0.349	21.433	1.400	84
L-CFST112-C4	336	3.00	112	1 500	39	270	1 300	等幅加载	4	4.464	0.349	21.433	2.799	32
S-CFST57-C2	325	5.75	57	1 500	37	272	1 300	等幅加载	2	4.615	0.364	20.669	1.451	92
S-CFST57-C4	325	5.75	57	1 500	37	272	1 300	等幅加载	4	4.615	0.364	20.669	2.903	18
S-CFST57-C6	325	5.75	57	1 500	37	272	1 300	等幅加载	6	4.615	0.364	20.669	4.354	10

注: f_y 为钢材屈服强度; f_c' 为混凝土圆柱体抗压强度; P 为轴压力。
在于大加载位移幅值作用下,钢管较快地进入塑性变形阶段,从而降低了对混凝土的有效约束,使得模型柱的刚度退化受钢管材性影响显著降低。

3 疲劳寿命分析

3.1 位移延性

图 2 为钢管混凝土圆柱的屈服曲率与位移示意,其中, Δ_u 为钢管混凝土柱的加载位移幅值, Δ_p 为钢管混凝土柱的塑性位移, l_p 为钢管混凝土柱的塑性较长长度, Φ_u 为钢管混凝土柱的极限曲率, H 为反弯点到柱端截面的距离,通常可取试验柱的柱高, Φ_y 为钢管混凝土圆柱的屈服弯矩对应的曲率。 Φ_y 主要与混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 和轴压比 n 有关,即

$$\left. \begin{aligned} \Phi_y &= 0.013\ 5(c+1)(1.51-n) \\ c &= f_{cu}/60 \\ n &= P/(A_s f_y + A_c f_c') \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: A_s , A_c 分别为钢管混凝土圆柱截面中钢管面积和混凝土面积。

钢管混凝土圆柱的屈服位移可按式^[22]计算

$$\Delta_y = \frac{1}{3} \Phi_y H^2 \quad (6)$$

因此,钢管混凝土圆柱的位移延性 u 为

$$u = \Delta_u / \Delta_y \quad (7)$$

3.2 低周疲劳寿命模型

使用 MATLAB 程序对钢管混凝土圆柱的低周疲劳寿命 N 进行拟合,首先将式(2)以对数形式表

示为

$$\lg(N) = a \lg(u) + b \quad (8)$$

式中: a , b 均为常数。

使用 MATLAB 中的 Polyfit 命令对式(8)进行一次多项式拟合^[23],为度量计算拟合曲线的品质,引入绝对系数 r^2 , r^2 的值越接近 1,曲线拟合效果越好。 r^2 的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} r^2 &= 1 - J/S \\ J &= \sum_{i=1}^m [f(x_i) - y_i]^2 \\ S &= \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $f(x_i)$ 为各试件低周疲劳寿命预测值; y_i , \bar{y} 分别为各试件低周疲劳寿命试验值和实测平均值。

根据表 2,采用 MATLAB 程序完成了钢管混凝土圆柱的低周疲劳寿命曲线拟合,结果如图 3 所示。

拟合公式为

$$Nu^{1.904\ 4} = 205.7 \quad (10)$$

拟合公式(10)的决定系数为 0.942 2,相关系数为 0.971,拟合效果良好。

4 模型验证

为了验证建议低周疲劳寿命计算模型的合理性,完成了 23 根钢管混凝土模型圆柱的低周疲劳寿命理论分析,计算结果及其与试验结果的对比情况如表 3 所示。

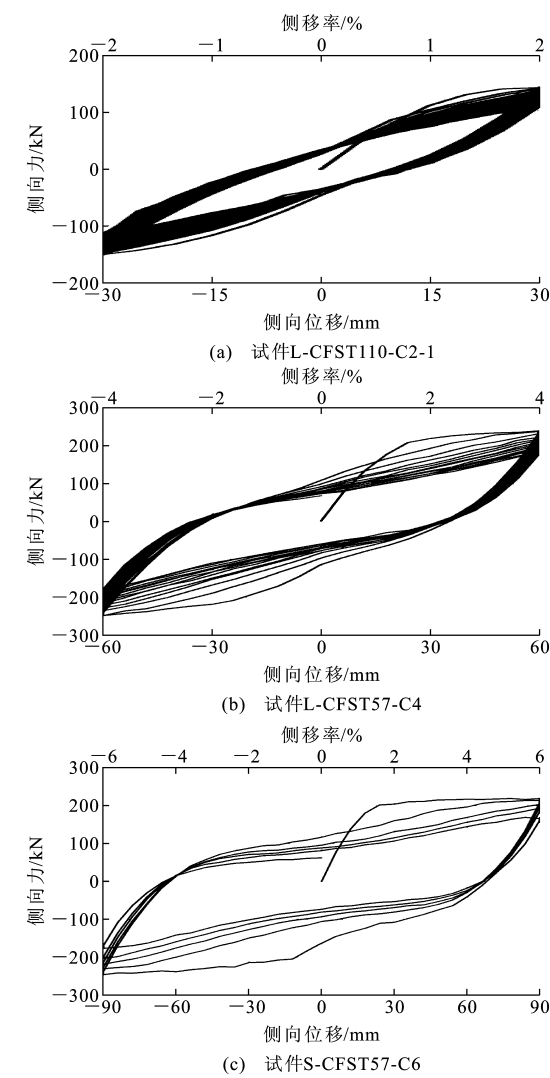


图 1 不同侧移率下典型钢管混凝土圆柱的滞回曲线
Fig. 1 Hysteretic Curves of Typical CFST Circular Columns Under Different Lateral Displacement Ratios

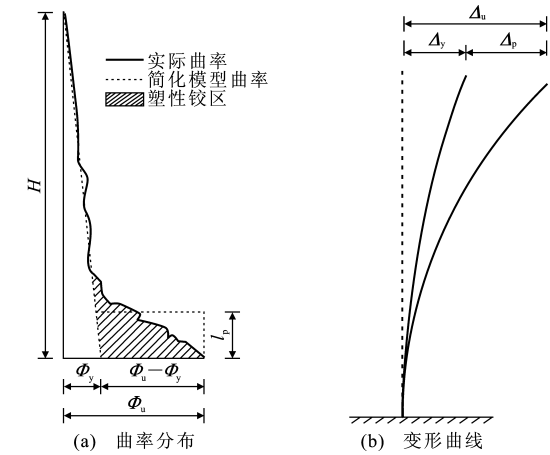


图 2 钢管混凝土圆柱的屈服曲率与位移示意
Fig. 2 Schematics of Yield Curvature and Displacement of CFST Circular Columns

从表3可以看出,建议模型的低周疲劳寿命计

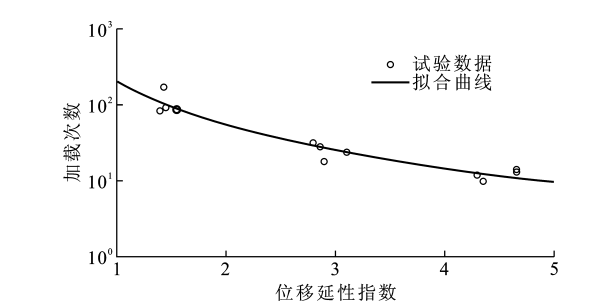


图 3 钢管混凝土圆柱低周疲劳寿命拟合曲线
Fig. 3 Fitted Curve of Low-cycle Fatigue Life of CFST Circular Columns

表 3 钢管混凝土圆柱低周疲劳寿命模型的试验验证
Tab. 3 Experiment Verifications of Low-cycle Fatigue Life Model of CFST Circular Columns

文献来源	试件编号	屈服位移/mm	加载位移幅值/mm	位移延性	加载次数	N_c	$N_t N_c^{-1}$
文献 [6]	L-CFST57-C2	20.93	30.0	1.43	170	104	1.64
	L-CFST57-C4	20.93	60.0	2.87	28	28	1.01
	L-CFST57-C6	20.93	90.0	4.30	12	13	0.94
	L-CFST110-C2-1	19.32	30.0	1.55	86	89	0.97
	L-CFST110-C2-2	19.32	30.0	1.55	88	89	0.99
	L-CFST110-C4	19.32	60.0	3.11	24	24	1.01
	L-CFST110-C6-1	19.32	90.0	4.66	13	11	1.18
	L-CFST110-C6-2	19.32	90.0	4.66	14	11	1.27
	L-CFST112-C2	21.43	30.0	1.40	84	108	0.77
	L-CFST112-C4	21.43	60.0	2.80	32	29	1.10
	S-CFST57-C2	20.67	30.0	1.45	92	101	0.91
	S-CFST57-C4	20.67	60.0	2.90	18	27	0.67
	S-CFST57-C6	20.67	90.0	4.35	10	12	0.80
文献 [21]	2t-2.0	10.90	20.0	2.75	99	30	1.34
	2t-2.5	10.90	25.0	2.91	61	27	1.56
	2t-3.0	10.90	30.0	2.43	42	38	1.61
文献 [24]	3t-3.0	10.30	30.0	1.94	40	58	1.70
	Z1-1-1	31.09	52.0	1.67	178	77	2.30
	Z1-1-2	31.09	74.0	2.38	47	39	1.19
	Z1-1-3	31.09	78.0	2.51	32	36	0.90
	Z1-1-4	31.09	88.0	2.83	18	28	0.63
	Z2-1-1	33.93	54.0	1.59	234	85	2.76
	Z2-1-2	27.02	48.8	1.81	98	67	1.47

注: N_c 为通过式(10)计算得到的疲劳寿命; N_t 为疲劳寿命试验值;若试验研究中已知屈服位移,则直接采用文献中数据,否则根据式(6)计算获得。

算结果与试验结果总体吻合良好,特别是对于位移延性大于2的钢管混凝土圆柱的低周疲劳寿命预测结果较为理想。

位移延性小于2的钢管混凝土圆柱的低周疲劳寿命计算结果与试验结果存在一定的差异。究其原因

因,在于同等滞回耗能情况下小位移幅值加载的结构疲劳损伤显著低于大位移幅值加载下产生的疲劳损伤。产生的疲劳损伤主要表现为:钢管在柱底部发生局部屈曲,形成塑性铰,在钢管的屈曲区域随着循环次数的增多出现裂纹,核心混凝土开裂并被逐渐压碎或成粉末状从钢管的裂缝处滑出,从而发生疲劳破坏。小位移幅值加载下钢管混凝土柱产生的损伤较小,试件发生疲劳破坏时的循环加载次数增多。若位移延性小于1,此时试件处于弹性阶段,钢管混凝土圆柱的疲劳破坏循环加载次数理论上可能为无穷大。因此,位移延性较小时,钢管混凝土圆柱疲劳试验的循环加载次数存在一定的离散性,理论计算值较难与试验值完全吻合。

5 结 语

(1)基于等效延性破坏准则完成了钢管混凝土圆柱的低周疲劳寿命计算,建议的拟合公式(10)考虑了结构首超破坏和累积损伤破坏2个方面因素,形式简单,概念明确。

(2)通过23根钢管混凝土圆柱的低周疲劳寿命理论计算结果与试验结果的对比分析,结果表明,建议模型能较好地预测钢管混凝土圆柱的低周疲劳寿命。

(3)钢管混凝土的低周疲劳寿命受加载位移幅值的影响较大,同等滞回耗能情况下大位移幅值加载下钢管混凝土柱的损伤程度比小位移幅值加载下的严重。因此,应开展变幅位移循环下钢管混凝土柱的低周疲劳寿命研究,以确保钢管混凝土结构的安全可靠。

参考文献:

References:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2004.
HAN Lin-hai. Concrete-filled Steel Tubular Structures: Theory and Practice [M]. Beijing: Science Press,2004.
- [2] 陈宝春,陈友杰,王来永,等. 钢管混凝土偏心受压应力-应变关系模型研究[J]. 中国公路学报,2004,17(1):24-28.
CHEN Bao-chun, CHEN You-jie, WANG Lai-yong, et al. Study of Stress-strain Relation of Concrete Filled Steel Tubular Eccentric Compression Column [J]. China Journal of Highway and Transport,2004,17(1):24-28.

- [3] 吕西林,陆伟东. 反复荷载作用下方钢管混凝土柱的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2000,21(2):2-11,27.
LU Xi-lin, LU Wei-dong. Seismic Behavior of Concrete-filled Rectangular Steel Tubular Columns Under Cyclic Loading [J]. Journal of Building Structures, 2000,21(2):2-11,27.
- [4] 杜喜凯. 往复荷载作用下钢管混凝土柱性能试验及理论分析[D]. 天津:天津大学,2001.
DU Xi-kai. Experimental Research and Theoretical Analysis of Seismic Behavior of Concrete-filled Steel Tube Beam-columns Under Cyclic Loading[D]. Tianjin: Tianjin University,2001.
- [5] 陈彦江,李 勇,闫维明,等. 大尺寸钢管混凝土柱承载力试验[J]. 中国公路学报,2011,24(4):33-38.
CHEN Yan-jiang, LI Yong, YAN Wei-ming, et al. Bearing Capacity Test of Large Size Concrete Filled Steel Tubular Column[J]. China Journal of Highway and Transport,2011,24(4):33-38.
- [6] 张国伟. 钢管混凝土柱在地震作用下的累积损伤性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2009.
ZHANG Guo-wei. Research on Cumulative Seismic Damage of CFT Columns[D]. Changsha: Hunan University,2009.
- [7] 丁发兴,余志武,蒋丽忠. 圆钢管混凝土轴压中长柱的承载力[J]. 中国公路学报,2007,20(4):65-70.
DING Fa-xing, YU Zhi-wu, JIANG Li-zhong. Bearing Capacity of Middle Long Concrete-filled Circular Steel Tubular Columns Under Axial Compression[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(4):65-70.
- [8] 余志武,丁发兴. 圆钢管混凝土偏压柱的力学性能[J]. 中国公路学报,2008,21(1):40-46.
YU Zhi-wu, DING Fa-xing. Mechanical Behavior of Concrete Filled Circular Steel Tubular Columns Under Eccentric Compression[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(1):40-46.
- [9] 陈彦江,李 勇,闫维明,等. 大尺寸钢管混凝土柱承载力试验[J]. 中国公路学报,2011,24(4):33-38.
CHEN Yan-jiang, LI Yong, YAN Wei-ming, et al. Bearing Capacity Test of Large Size Concrete Filled Steel Tubular Column[J]. China Journal of Highway and Transport,2011,24(4):33-38.
- [10] 赵均海,孟晓健,刘建军,等. 圆中空夹层钢管混凝土短柱的承载力[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(2):70-74.
ZHAO Jun-hai, MENG Xiao-jian, LIU Jian-jun, et al. Bearing Capacity of Concrete-filled Double-skin Steel-

- tube Stub Column[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2009, 29(2): 70-74.
- [11] 夏桂云, 曾庆元, 李传习, 等. 复式空心钢管混凝土柱抗压刚度[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(4): 41-45.
- XIA Gui-yun, ZENG Qing-yuan, LI Chuan-xi, et al. Compressive Stiffness of Composite Concrete-filled Steel Tube (CCFST)[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2003, 23(4): 41-45.
- [12] 张志权, 赵均海, 张玉芬, 等. 复合钢管混凝土柱轴压承载力的计算[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(1): 67-70.
- ZHANG Zhi-quan, ZHAO Jun-hai, ZHANG Yu-fen, et al. Axial Bearing Capacity of Composite Concrete-filled Steel Tubular Columns[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2010, 30(1): 67-70.
- [13] 黄 华, 刘 鸣. 混凝土构件疲劳设计规定及相关问题探讨[J]. 长安大学学报: 建筑与环境科学版, 2004, 21(3): 19-23, 28.
- HUANG Hua, LIU Ming. Discussion on Fatigue Design Roles of Concrete Structures and Interrelated Problems[J]. Journal of Chang'an University; Architecture and Environment Science Edition, 2004, 21(3): 19-23, 28.
- [14] 刘 鸣, 刘伯权. 钢筋混凝土柱低周疲劳力学性能分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(5): 65-70.
- LIU Ming, LIU Bo-quan. Low-cycle Fatigue Damage for Shear Behavior of Reinforced Concrete Columns[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2012, 32(5): 65-70.
- [15] ZHANG G W, XIAO Y, KUNNATH S. Low-cycle Fatigue Damage of Circular Concrete-filled-tube Columns[J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(2): 151-159.
- [16] 刘伯权. 抗震结构的破坏准则及可靠性分析[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995.
- LIU Bo-quan. Criteria for Seismic Structural Damage and Reliability Analysis[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 1995.
- [17] PARK Y J, ANG A H S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.
- [18] PARK Y J, ANG A H S, WEN Y K. Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 740-757.
- [19] HASELTON C B, LIEL A B, DEIERLEIN G G, et al. Seismic Safety of Reinforced Concrete Building. I: Assessment of Ductile Moment Frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(4): 481-491.
- [20] NEWMARK N M. An Engineering Approach to Blast Resistant Design[J]. American Society of Civil Engineers Transactions, 1956, 121: 45-65.
- [21] 窦立军, 钟善桐. 钢管混凝土低周疲劳的实验研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1991, 24(增): 81-87.
- DOU Li-jun, ZHONG Shan-tong. The Experimental Research of Low-cycle Fatigue for CFST[J]. Journal of Harbin Architectural and Civil Engineering Institute, 1991, 24(S): 81-87.
- [22] 江 枣, 钱稼茹. 钢管混凝土组合柱变形能力计算方法[J]. 世界地震工程, 2010, 26(2): 42-47.
- JIANG Zao, QIAN Jia-ru. Calculation Method for Deformation Capacity of Steel Tube-reinforced Concrete Composite Columns[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(2): 42-47.
- [23] PALM M J. MATLAB 7 基础教程——面向工程应用[M]. 黄开枝, 译. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- PALM M J. Introduction to MATLAB 7 for Engineers[M]. Translated by HUANG Kai-zhi. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [24] 邱法维, 杨卫东, 欧进萍. 钢管混凝土柱滞回耗能 and 累积损伤的实验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(3): 41-45.
- QIU Fa-wei, YANG Wei-dong, OU Jin-ping. Testing Research for the Dissipated Hysteric Energy and Accumulated Damage of CFST Column[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1996, 29(3): 41-45.