

DOI: 10.7511/jslx20210709002

# 基于修正 Park-Ang 模型的圆钢管构件地震损伤评估

刘翔, 朱南海\*, 陈禄军

(江西理工大学 土木与测绘工程学院, 赣州 341000)

**摘要:**为合理评估薄壁圆钢管构件的地震损伤程度,基于 Park-Ang 地震损伤模型,通过修正相关参数,建立了适用于圆钢管构件的地震损伤模型。利用圆钢管构件在低周反复荷载作用下的骨架曲线,给出了损伤模型中各待定参数的计算方法,在此基础上通过反演构件破坏点损伤因子为 1.0 时的模型组合系数,并利用曲线拟合法得到模型组合系数与构件轴压比、长细比和径厚比等参数间的关系式,从而建立构件的地震损伤评估模型。结果表明,修正的 Park-Ang 损伤模型可较好地评估圆钢管构件的损伤程度,构件达到极限破坏时的损伤因子值收敛于 1.0 且离散性较小,构件的破坏程度可划分为基本完好、轻微与中等破坏、严重破坏和失效破坏,对应的损伤因子界限值分别为 0.02、0.41 和 1.00。

**关键词:**圆钢管;地震损伤模型;损伤评估;模型组合系数;性能水准

**中图分类号:**TU311;O366.5

**文献标志码:**A

**文章编号:**1007-4708(2022)06-0737-09

## 1 引言

大跨度空间网格具有结构自重轻和整体性能好等优点而广泛应用于火车站和体育场馆等大型建筑中<sup>[1]</sup>,圆钢管是该类结构常用的杆件形式。各杆件通过节点相互连接形成结构整体,为保证结构在服役期间的安全性能,在设计初期需要考虑结构从构件层面到结构层面的失效劣化过程<sup>[2]</sup>。地震作用是造成结构倒塌破坏的重要因素之一,而且结构的破坏往往始于薄弱构件和节点,因此对结构进行有效的损伤性能评估对保证结构的安全性显得尤为重要<sup>[3]</sup>。强震作用下的损伤破坏指数可以直观描述结构或构件的损伤情况,可为结构的安全性评估和建立合理的结构损伤判别准则提供依据<sup>[4]</sup>。

基于损伤性能的抗震设计,在设计阶段可根据不同地震作用下的构件损伤程度来优化构件的几何尺寸等参数,使结构能够兼顾成本与预期的抗震性能目标,因此如何描述结构的损伤演化过程与损伤程度成为当前抗震设计研究领域的热点之一<sup>[5]</sup>。李永梅等<sup>[6]</sup>基于损伤理论和能量原理,提出以塑性耗能指标衡量结构整体或者局部的损伤状态。姚姝等<sup>[7]</sup>设计多个单层网壳结构模型,通过切断单根

杆件模拟实际杆件损伤,通过网壳结构损伤前后的加速度响应,建立损伤杆件位置识别指标向量,识别出实际结构的损伤位置。门进杰等<sup>[8]</sup>通过修正 Park-Ang 双参数地震损伤模型建立了适用于 RCS 混合框架结构的地震损伤模型。Brescia 等<sup>[9]</sup>通过研究多组钢构件和钢框架结构的变形能力,得出钢构件的单调加载变形能力与累积变形能力间的变化规律。杨游等<sup>[10]</sup>对框架结构进行动力增量分析,对比了六种不同损伤模型的差异性以及结构层数和设防烈度对结构性能的影响。漆启明等<sup>[11]</sup>基于多组钢筋混凝土空心墩的拟静力实验结果,对空心墩结构的损伤演化过程以及破坏机理进行分析,利用裂缝、钢筋应变和损伤分量等参数划分出构件的性能水准及其对应的破坏形态。Cao 等<sup>[12]</sup>基于大量高铁桥墩构件的拟静力试验,通过考虑构件纵筋配筋率与轴压比对损伤模型的影响,建立起适用于评估高速铁路桥墩结构损伤状态的双参数地震损伤模型。

本文针对常用的圆钢管构件,基于 Park-Ang 地震损伤模型,研究该类构件的地震损伤评估方法。通过对 Park-Ang 双参数地震损伤模型的累积滞回耗能项进行修正,得到适用于评估薄壁圆钢管构件的双参数地震损伤模型,而后基于圆钢管构件在低周反复荷载作用下的滞回曲线,研究损伤模型组合系数与构件参数间的变化关系,建立圆钢管构件的双参数损伤判别准则,提出圆钢管构件的损伤性能水准划分标准,给出圆钢管构件在不同破坏

**收稿日期:**2021-07-09;**修改稿收到日期:**2021-11-23。

**基金项目:**国家自然科学基金(51768024);江西省自然科学基金(20181BAB206039);江西理工大学青年英才支持计划(JXUSTQJYX2018009)资助项目。

**作者简介:**朱南海\*(1981-),男,博士,副教授  
(E-mail:zhunanhai@jxust.edu.cn)。

状态下的损伤指数变化范围。

## 2 修正的 Park-Ang 双参数损伤模型

Park 等<sup>[13]</sup>基于钢筋混凝土梁柱构件拟静力试验,提出了一种可以同时考虑构件最大变形量与累积滞回耗能的构件双参数损伤评估模型——Park-Ang 损伤模型,其表达式为构件最大位移和累积滞回耗能两参数的线性组合,即

$$D = \delta_m / \delta_u + \beta \left[ \int dE / (F_y \delta_u) \right] \quad (1)$$

式中  $D$  为损伤因子,  $\delta_m$  为构件的最大变形位移,  $\delta_u$  为单调加载下构件的极限变形位移,  $\int dE$  为累积滞回耗能,  $F_y$  为构件的屈服荷载,  $\beta$  为组合系数,

$$\beta = \left( -0.447 + 0.073 \frac{L}{d} + 0.24 n_0 + 0.314 \rho_t \right) 0.7^{\rho_w} \quad (2)$$

式中  $L/d$  为构件的剪跨比,  $n_0$  为构件轴压比,  $\rho_t$  为纵筋配筋率,  $\rho_w$  为体积配箍率。

由于 Park-Ang 损伤模型并不能反映出构件极限滞回耗能与累积幅值之间的关系,当构件单调加载至破坏时,计算出的损伤指标不收敛于 1,且构件在弹性阶段反复加载时,损伤指标不收敛于 0,因此需要对损伤因子的收敛性问题做进一步研究<sup>[14-16]</sup>。模型中两种参数采用的线性组合方式形式简单,便于描述,但是缺乏理论依据,若采取非线性组合方式则更为合理,但其中的组合参数不易确定<sup>[17]</sup>。

Chai 等<sup>[18]</sup>将损伤模型中累积耗能项的分子中减去单调加载下的耗能值,对损伤模型进行修正,可实现损伤指标收敛于 1.0,修正后构件损伤模型的表达式为

$$D = \delta_m / \delta_u + \beta \left[ \left( \int dE - E_{hm} \right) / (F_y \delta_u) \right] \quad (3)$$

式中  $E_{hm}$  为构件单调加载下的塑性耗能,其他参数同式(1)。

王东升等<sup>[19]</sup>考虑了构件的弹性工作阶段对于双参数损伤模型中位移项和能量项的影响,提出了改进的 Park-Ang 损伤模型,其表达式为

$$D = (1 - \beta) [(\delta_m - \delta_y) / (\delta_u - \delta_y)] + \beta \left\{ \sum \beta_i E_i / [F_y (\delta_u - \delta_y)] \right\} \quad (4)$$

式中  $E_i$  为第  $i$  个滞回圈的滞回耗能,  $\beta_i$  为能量项加权因子,其他参数同式(1)。

陈林之等<sup>[20]</sup>提出在能量参数项中减去构件的弹性阶段耗能,修正后的表达式为

$$D = (1 - \beta_0) (\delta_m / \delta_u) + \beta_0 \left\{ \int dE / [F_y (\delta_u - \delta_y)] \right\} \quad (5)$$

式中各项参数与式(1)所示的 Park-Ang 损伤模型相同。

周知等<sup>[21]</sup>基于原始的损伤模型,在大量型钢构件滞回试验的基础上,提出适用于箱型截面和工字型截面钢构件的修正损伤模型,其表达式为

$$D = (1 - \beta_s) [(\delta_m - \delta_y) / (\delta_u - \delta_y)] + \beta_s \left\{ \int dE / [F_y (\delta_u - \delta_y)] \right\} \quad (6)$$

式中  $\beta_s$  为与构件轴压比、长细比和翼缘高厚比等相关的组合系数公式。

## 3 圆钢管构件的修正 Park-Ang 损伤模型

### 3.1 圆钢管构件的损伤模型

为了使 Park-Ang 损伤模型能够适用于圆钢管构件的损伤评估,需对该损伤模型做进一步改进。考虑到圆钢管构件在弹性阶段内不会发生塑性损伤情况,因此圆钢管构件在循环加载过程中不考虑弹性阶段的耗能,将式(6)所示损伤模型中的累积耗能减去加载初期阶段产生的弹性耗能,得到修正后的损伤模型为

$$D = (1 - \beta_c) [(\delta_m - \delta_y) / (\delta_u - \delta_y)] + \beta_c \left\{ \left( \int dE - E_e \right) / [F_y (\delta_u - \delta_y)] \right\} \quad (7)$$

式中  $D$  为修正后的构件损伤指数,  $\beta_c$  为考虑圆钢管构件参数的组合系数,  $\delta_m$  为构件的最大变形位移,  $\int dE$  为累积滞回耗能(按照滞回环的面积累加计算),  $E_e$  为构件在加载初期的弹性耗能( $E_e = F_y \cdot \delta_y$ ),  $F_y$  为构件屈服荷载、 $\delta_u$  为极限位移、 $\delta_y$  为屈服位移,这几个参数可利用 Park 法<sup>[22]</sup>按照构件在反复荷载作用下所得的骨架曲线作图计算,计算方法如图 1 和图 2 所示。

图 1 中  $F_c$  为构件首次屈服时的荷载值,取构件的屈服荷载与 0.75 倍极限荷载的较小值,点 B

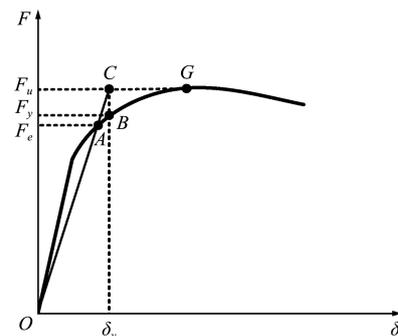


图 1 屈服位移的确定方法

Fig. 1 Determining method of yield displacement

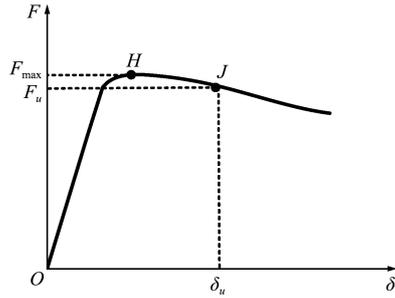


图2 极限位移的确定方法

Fig. 2 Determination method of limit displacement

为构件的屈服位移  $\delta_y$  与屈服荷载  $F_y$  组成的坐标点。单调加载下的极限位移确定方式如图 2 所示,其中  $F_{max}$  为构件单调加载下的最大荷载,点 J 对应横坐标为极限位移  $\delta_u$ ,其值取 0.85 倍的极限荷载对应的位移值。

### 3.2 组合系数的确定

为建立适用于圆钢管构件的损伤模型,需考虑钢管构件不同参数(径厚比、轴压比和长细比)的影响以获得式(7)的组合系数  $\beta_c$ 。组合系数  $\beta_c$  可根据构件在达到破坏极限坏状态时其损伤指数达到 1.0 进行反推求得,当  $D=1.0$  时,由式(7)可得

$$\beta_c = [F_y(\delta_u - \delta_y)] / \left( \int dE - F_y \delta_m \right) \quad (8)$$

组合系数可直观反映圆钢管构件在反复荷载作用下的累积耗能能力。式(8)中  $\delta_y$  和  $\delta_u$  可根据多组圆钢管构件在低周反复荷载作用下的滞回曲线和

骨架曲线(各级循环加载的峰值点连接成的包络线)按照图 1 和图 2 所示方法进行计算,进而得到每根钢构件对应的组合系数  $\beta_c$ ,进而采用回归分析方法可得组合系数与构件参数间的变化规律。

为得到圆钢管构件的恢复力特性曲线,施加的荷载形式为轴力和循环弯矩,循环弯矩施加规则按照 ECCS 的加载制度以构件的屈服位移进行控制,在构件处于弹性状态下施加等幅荷载并循环一周,然后逐级提高位移幅值并循环三次,钢管屈服位移可按照式(9)计算得到<sup>[23]</sup>。

$$\delta_y = \frac{(1-n)f_y L^2}{3E_y} \quad (9)$$

式中  $f_y$  为钢材的屈服强度设计值,  $E$  为钢材的弹性模量,  $y$  为圆钢管构件外边缘至截面几何中心的长度,  $n$  为构件轴压比,  $L$  为构件计算长度。

根据网壳结构技术规程(JGJ61-2003)<sup>[24]</sup> 规定,杆件的容许长细比为 150 且横截面尺寸不宜小于  $\Phi 45 \times 3$ ,钢结构设计标准(GB50017)<sup>[25]</sup> 规定圆钢管受压构件的外径与壁厚之比不应超过 100,钢管壁厚不应超过 25 mm,选取横截面直径(外径)为 219 mm,壁厚分别为 6, 8, 10 和 12,即径厚比( $d/t$ )分别为 36.5, 27.4, 21.9 和 18.3 的圆钢管构件作为分析对象,取构件的轴压比( $n=N/Af_y$ )分别为 0.2, 0.4 和 0.6。各圆钢管构件的参数及由式(8)计算获得的组合系数值列入表 1。

表 1 圆钢管构件主要参数及组合系数值

Tab. 1 Main parameters and combination coefficient values of round steel pipes

编号	杆长 /mm	轴压比 $n$	长细比 $\lambda$	径厚比 $d/t$	$\beta_c$ 计算值	$\beta_c$ 拟合值	编号	杆长 /mm	轴压比 $n$	长细比 $\lambda$	径厚比 $d/t$	$\beta_c$ 计算值	$\beta_c$ 拟合值
1	1130	0.2	10	36.5	0.23	0.14	25	1110	0.2	10	21.9	0.08	0.10
2	2260	0.2	21	36.5	0.18	0.13	26	2219	0.2	21	21.9	0.11	0.09
3	3390	0.2	31	36.5	0.10	0.12	27	3329	0.2	31	21.9	0.06	0.08
4	4520	0.2	41	36.5	0.07	0.10	28	4439	0.2	41	21.9	0.08	0.06
5	1130	0.4	10	36.5	0.13	0.14	29	1110	0.4	10	21.9	0.08	0.09
6	2260	0.4	21	36.5	0.13	0.12	30	2219	0.4	21	21.9	0.10	0.08
7	3390	0.4	31	36.5	0.09	0.11	31	3329	0.4	31	21.9	0.05	0.07
8	4520	0.4	41	36.5	0.06	0.10	32	4439	0.4	41	21.9	0.07	0.06
9	1130	0.6	10	36.5	0.12	0.13	33	1110	0.6	10	21.9	0.07	0.09
10	2260	0.6	21	36.5	0.11	0.12	34	2219	0.6	21	21.9	0.10	0.07
11	3390	0.6	31	36.5	0.09	0.10	35	3329	0.6	31	21.9	0.05	0.06
12	4520	0.6	41	36.5	0.06	0.09	36	4439	0.6	41	21.9	0.06	0.05
13	1120	0.2	10	27.4	0.11	0.12	37	1100	0.2	10	18.3	0.08	0.09
14	2240	0.2	21	27.4	0.11	0.10	38	2199	0.2	21	18.3	0.07	0.08
15	3359	0.2	31	27.4	0.09	0.09	39	3299	0.2	31	18.3	0.05	0.07
16	4479	0.2	41	27.4	0.10	0.08	40	4399	0.2	41	18.3	0.08	0.05
17	1120	0.4	10	27.4	0.11	0.11	41	1100	0.4	10	18.3	0.08	0.08
18	2240	0.4	21	27.4	0.10	0.10	42	2199	0.4	21	18.3	0.07	0.07
19	3359	0.4	31	27.4	0.08	0.08	43	3299	0.4	31	18.3	0.04	0.06
20	4479	0.4	41	27.4	0.07	0.07	44	4399	0.4	41	18.3	0.07	0.05
21	1120	0.6	10	27.4	0.10	0.10	45	1100	0.6	10	18.3	0.06	0.08
22	2240	0.6	21	27.4	0.09	0.09	46	2199	0.6	21	18.3	0.06	0.06
23	3359	0.6	31	27.4	0.08	0.08	47	3299	0.6	31	18.3	0.04	0.05
24	4479	0.6	41	27.4	0.06	0.06	48	4399	0.6	41	18.3	0.05	0.04

图3所示为钢管构件分别在加载初期阶段、中期阶段和后期阶段的应力分布以及变形情况,随着位移荷载的不断增大,端部约束区域逐渐从弹性状态进入弹塑性状态,并在底部出现轻微的鼓曲现象,构件在加载后期阶段出现严重的起鼓现象导致刚度下降,承载能力降低。图4为构件在循环荷载作用下得到的滞回曲线。

由表1可知,通过反推法得出的组合系数其计算值与圆钢管构件径厚比、长细比和轴压比变化密切相关。组合系数的大小反映了圆钢管构件的延性性能以及在反复荷载下的耗能能力,构件滞回耗能能力越强,组合系数值越小,构件滞回耗能能力越弱,组合系数值越大。图5和图6为圆钢管构件的组合系数值在不同截面参数下的变化曲线。

图5为圆钢管的径厚比分别取36.5, 27.4, 21.9和18.3时,在不同轴压比和不同杆件长度下组合系数 $\beta_c$ 的变化情况。如图5(a)所示,当圆钢管的径厚比为36.5时,随轴压比的增大,在不同构件长度下,组合系数 $\beta_c$ 均呈下降趋势,同时可以看

出构件长度也是影响组合系数 $\beta_c$ 的因素之一,长构件的组合系数 $\beta_c$ 低于短构件,说明构件的耗能能力随其轴压比和长度的增大而增大。这是因为对于压弯构件而言,轴压力的存在有利于构件抗弯能力的提高,构件耗能能力随之增强。同理,由图5(b)可以看出,当圆钢管构件的径厚比为27.4,组合系数 $\beta_c$ 与轴压比和构件长度之间具有相同的变化规律。进一步当圆钢管构件的径厚比取为21.9和18.3时,其组合系数 $\beta_c$ 与轴压比和构件长度之间具有相似的变化趋势。

图6为圆钢管构件的轴压比为0.4时,构件的组合系数 $\beta_c$ 随径厚比和长度的变化曲线。如图6(a)所示,随径厚比的增大,构件的组合系数 $\beta_c$ 也逐渐增大,同时从图6(b)可以看出,随构件长度的增大,构件的组合系数呈减小趋势。表明低径厚比构件其耗能能力高于高径厚比构件,且长构件高于短构件。因此为保证圆钢管构件的耗能能力,对于较短的钢管构件可采用小径厚比,对于长度较长的构件可采用大径厚比。

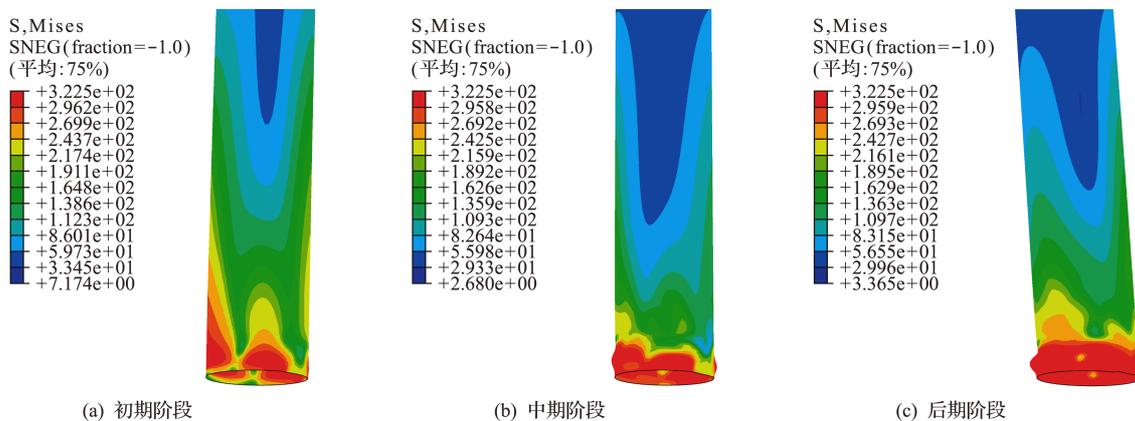


图3 三个加载阶段的应力  
Fig. 3 Stress diagrams of the three loading phases

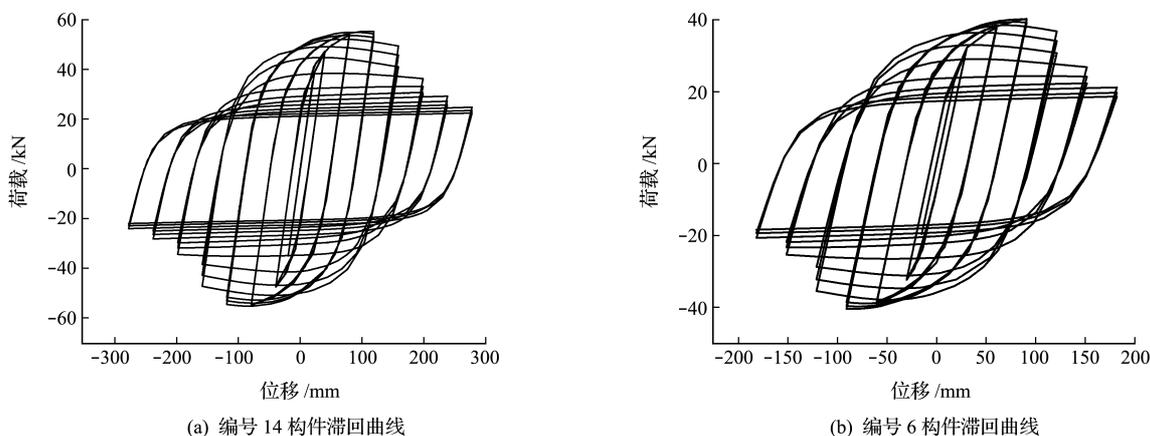


图4 循环荷载作用下的构件滞回曲线  
Fig. 4 Hysteresis curve under cyclic load

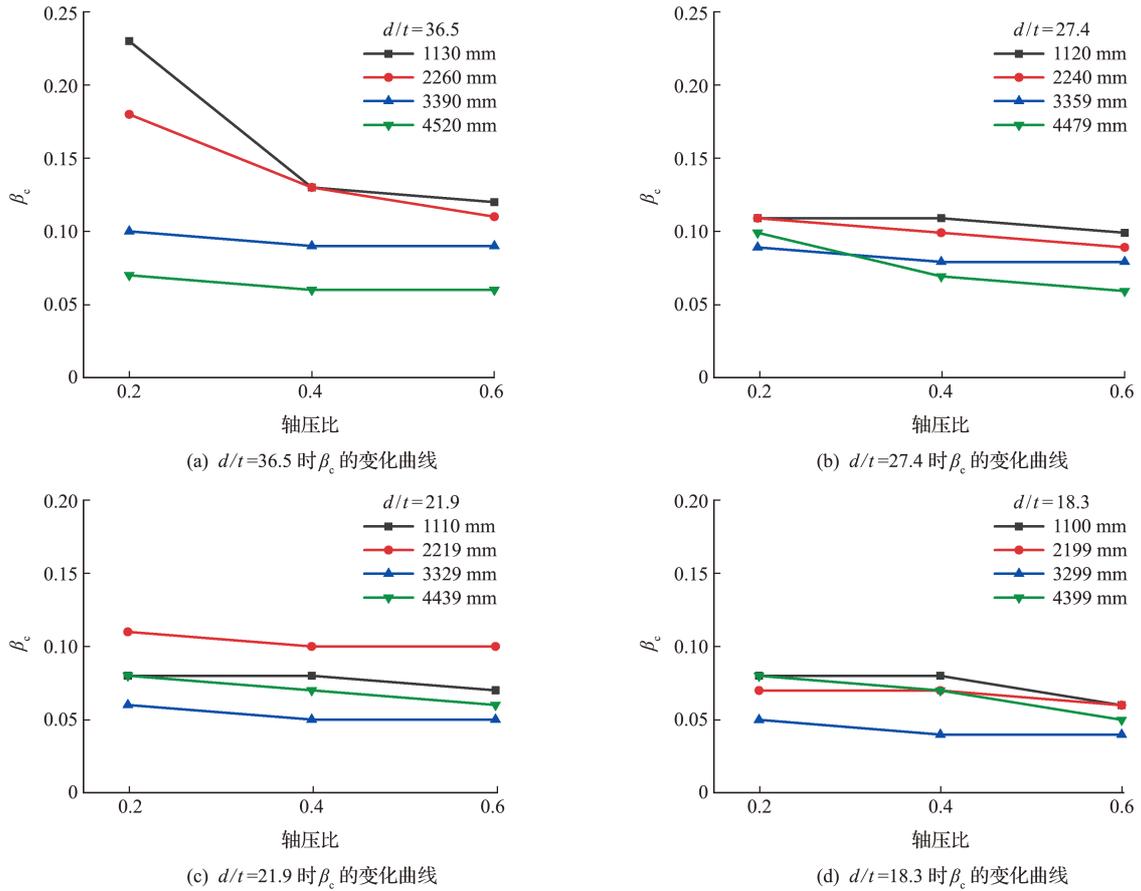


图5 不同轴压比下的组合系数变化情况

Fig. 5 Changes in combination coefficients under different axial compression ratios

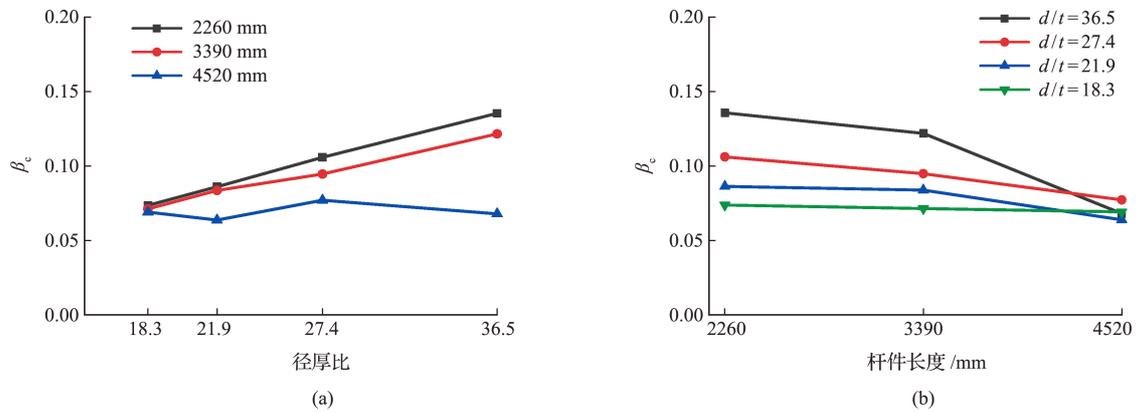


图6 不同径厚比与杆件长度下的组合系数变化情况

Fig. 6 Variation of combination coefficient under different diameter-thickness ratio and rod length

表1给出了具有不同参数的构件对应的组合系数,在此基础上采用线性回归方法建立组合系数 $\beta_c$ 的计算值与构件参数间的关系,得到组合系数 $\beta_c$ 与构件参数的关系式为

$$\beta_c = -0.0355n_0 - 0.00126\lambda + 0.00288(d/t) + 0.05854 \quad (10)$$

式中  $n_0$  为轴压比,  $\lambda$  为长细比,  $d/t$  为径厚比。为验证该式拟合结果的准确性,将组合系数的计算值与拟合值进行比较,结果如图7所示。

图7(a)为组合系数值的计算值与拟合值的分布情况,可以看出,两值分布于 $45^\circ$ 线附近,具有明显的相关性;图7(b)为计算值与拟合值之间的绝对差值分布情况,可以看出计算值与拟合值相差较小,通过计算 Pearson 相关性系数得到二者的相关性系数为0.713,表明计算值与拟合值具有较强的相关性。结果表明,式(10)可以用于预测圆钢管构件在计算其双参数损伤因子时的组合系数 $\beta_c$ 。

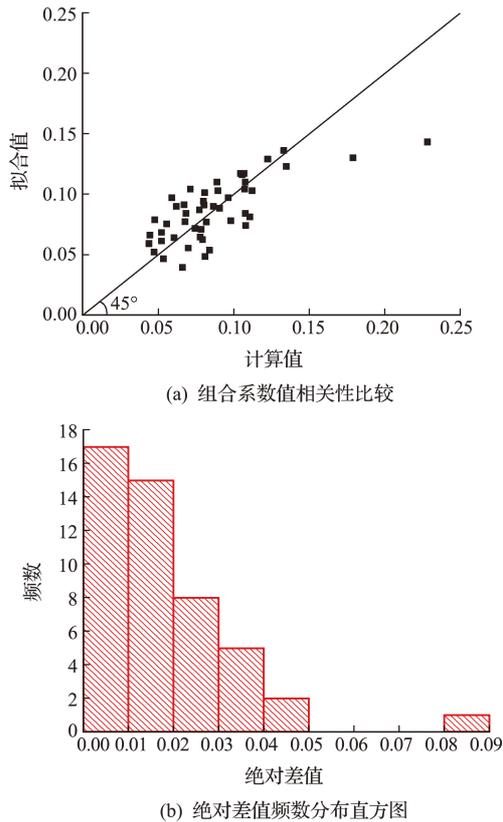


图7 拟合值与计算值相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between fitted value and calculated value

由式(7,10)可计算得到各圆钢管构件达到其极限破坏时的损伤因子值,损伤因子计算值与理论值的比较如图8所示,可以看出损伤因子的计算值与实际值吻合较好,其平均值为1.008,标准差为0.148,方差为0.0219,而利用原始的损伤模型(1)计算出的损伤指数平均值为1.035。由此可见式(7)所示的修正双参数损伤模型可较为准确地反映圆钢管构件破坏时的损伤状态,也验证了所建立的圆钢管构件地震损伤评估模型的正确性。

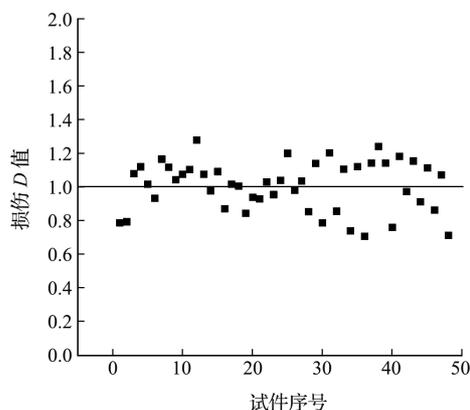


图8 构件破坏时损伤因子D计算结果

Fig. 8 Calculated result of damage factor  $D$  at the time of destruction

#### 4 圆钢管构件性能水准的划分

损伤性能水准定义了建筑物或者结构构件的最低性能指标,作为评定建筑结构和构件破坏状态的标准,其分析对象包括了由整体结构、结构构件、非结构构件以及对建筑功能有影响的场地设施等。根据构件的使用安全性能与损坏程度,建筑钢结构的性能水准可划分为充分运行、运行、基本运行、生命安全和接近倒塌五种情况<sup>[26]</sup>。分别对应的损伤程度为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏。

参考钢筋混凝土构件的性能水准划分准则,圆钢管构件的性能水准可根据其恢复力特性曲线进行划分,划分关键点界限点包括屈服点、峰值点和极限破坏点等。由式(7)表示的修正 Park-Ang 损伤模型可得到圆钢管构件在屈服点、峰值点和极限破坏点对应的损伤因子值分别为0.02,0.41和1.00,以此作为钢管构件性能水准的划分界限值,参考文献<sup>[27]</sup>中对应的分类标准给出圆钢管构件破坏程度与损伤因子值的界定范围,列入表2,该结果可作为评估圆钢管构件在不同阶段的损伤情况。

表2 破坏程度与损伤因子值范围

Tab. 2 Damage degree and damage factor value range

破坏程度	基本完好	轻微与中等破坏	严重破坏	完全破坏
损伤因子	$[0, 0.02)$	$[0.02, 0.41)$	$[0.41, 1)$	$[1, +\infty)$

各圆钢管构件在屈服点、峰值点和极限破坏点这三个性能水准点处对应的损伤因子值的分布如图9~图11所示。图9表示依据各钢管构件的骨架曲线在构件达到屈服点时由修正后的损伤评估模型得到的损伤因子值,其平均值为0.02,标准差为0.006;图10表示圆钢管构件的骨架曲线其峰值点对应的损伤因子值,平均值为0.41,标准差为0.046;图11表示骨架曲线极限破坏点对应的损伤因子值,其平均值为1.008,标准差为0.148。由此可见构件在屈服点、峰值点和极限破坏点处的损伤因子值标准差均较小,且离散性较小,说明采用该评判准则可较合理地评估钢管构件的损伤破坏程度。

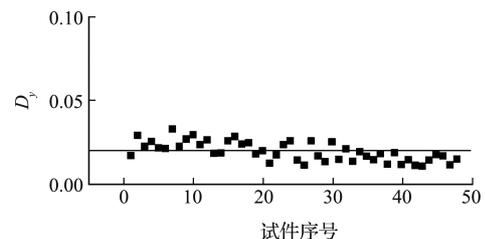


图9 构件屈服点处损伤值分布情况

Fig. 9 Distribution of damage value at yield point of component

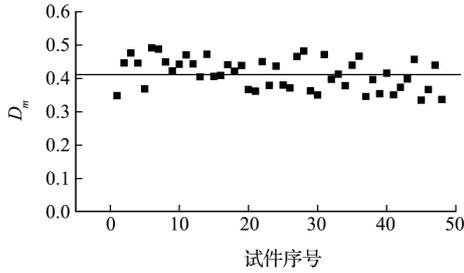


图 10 构件峰值点处损伤值分布情况

Fig. 10 Distribution of damage value at peak point of component

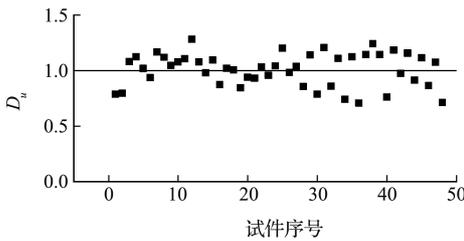


图 11 构件极值点处损伤值分布情况

Fig. 11 Distribution of damage values at extreme points of components

## 5 结 论

本文基于 Park-Ang 地震损伤模型,通过修正相关参数建立了适用于圆钢管构件的地震损伤模型。研究了损伤模型组合系数与构件参数间的变化关系,建立了圆钢管构件的双参数损伤判别准则,提出了圆钢管构件在不同破坏状态下的损伤性能水准划分标准。主要结论如下。

(1)利用修正后的 Park-Ang 双参数地震损伤模型计算得到的圆钢管构件达到其极限破坏状态时的损伤因子接近于 1.0,且离散性较小,可准确评估薄壁圆钢管构件的地震损伤状态。

(2)建立了模型组合系数与构件轴压比、径厚比和长细比等参数的关系,可以准确预测构件在不同特征参数下的组合系数值的大小。

(3)根据构件破坏过程,将屈服点、峰值点和极限破坏点作为构件性能水准控制点,其性能水准可划分为基本完好、轻微与中等破坏、严重破坏和完全破坏等四种状态,性能水准对应的损伤因子分别为 0.02,0.41 和 1.00。

## 参考文献(References):

[1] 于志伟,郑世杰,甄翠贤,等. 单层柱面铝合金网壳结构强震失效机理及地震易损性[J]. 建筑结构学报, 2020, **41**(S1): 17-24. (YU Zhi-wei, ZHENG Shi-jie, ZHEN Cui-xian, et al. Failure mechanism and seismic vulnerability of single-layer aluminum alloy cylindrical

reticulated shells[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, **41**(S1): 17-24. (in Chinese))

- [2] 徐 军,袁子豪. 单层球面网壳结构随机地震响应与可靠度分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, **46**(11): 69-78. (XU Jun, YUAN Zi-hao. Stochastic seismic response and reliability analysis of single-layer spherical reticulated shells[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2019, **46**(11): 69-78. (in Chinese))
- [3] 杨 伟,欧进萍. 基于能量原理的 Park & Ang 损伤模型简化计算方法[J]. 地震工程与工程振动, 2009, **29**(2): 159-165. (YANG Wei, OU Jin-ping. A simplified method for computing Park & Ang damage model based on energy concept[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, **29**(2): 159-165. (in Chinese))
- [4] 付 国,刘伯权,邢国华. 基于有效耗能的改进 Park-Ang 双参数损伤模型及其计算研究[J]. 工程力学, 2013, **30**(7): 84-90. (FU Guo, LIU Bo-quan, XING Guo-hua. The research and calculation on modified Park-Ang double parameter seismic damage model based on energy dissipation[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, **30**(7): 84-90. (in Chinese))
- [5] Powell G H, Allahabadi R. Seismic damage prediction by deterministic methods: Concepts and procedures [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1988, **16**(5): 719-734.
- [6] 李永梅,冯玉沛,王 成. 基于能量原理的单层网壳结构动力损伤分析[J]. 建筑结构学报, 2018, **39**(S2): 366-373. (LI Yong-mei, FENG Yu-pei, WANG Cheng. Analysis of dynamic damage on single layer latticed domes based on energy principle[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, **39**(S2): 366-373. (in Chinese))
- [7] 姚 姝,张辉东,周晓洁,等. 空间单层网壳结构损伤杆件位置识别试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, **51**(6): 116-121. (YAO Shu, ZHANG Hui-dong, ZHOU Xiao-jie, et al. Test on member damage location identification of single-layer reticulated shell[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, **51**(6): 116-121. (in Chinese))
- [8] 门进杰,张 谦,徐 超,等. 基于改进 Park-Ang 双参数模型的 RCS 混合框架结构地震损伤评估[J]. 工程力学, 2020, **37**(9): 133-143. (MEN Jin-jie, ZHANG Qian, XU Chao, et al. Seismic damage assessment of composite frame with reinforced concrete columns and steel beams based on improved Park-Ang double pa-

- parameter model[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, **37**(9):133-143. (in Chinese))
- [9] Iannone F, Rizzano G, Piluso V, et al. *Preliminary Results of an Experimental Program on the Cyclic Response and Rotation Capacity of Steel Members* [M]. CRC Press, 2009.
- [10] 杨 游, 杨永强, 赵一男, 等. 基于不同损伤模型的RC框架结构抗震能力对比分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, **40**(5): 118-126. (YANG You, YANG Yong-qiang, ZHAO Yi-nan, et al. Seismic performance comparison and analysis of RC frame based on different damage models[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, **40**(5): 118-126. (in Chinese))
- [11] 漆启明, 邵长江, 胡晨旭, 等. 空心墩地震损伤评估及性能水准量化研究[J]. *土木工程学报*, 2020, **53**(11): 116-128. (QI Qi-ming, SHAO Chang-jiang, HU Chen-xu, et al. Study on seismic damage assessment and performance level quantification of hollow pier[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, **53**(11): 116-128. (in Chinese))
- [12] Cao S S, Jiang L Z, Wei B. Numerical and experimental investigations on the Park-Ang damage index for high-speed railway bridge piers with flexure failures [J]. *Engineering Structures*, 2019, **201**: 109851.
- [13] Park Y J, Ang A H S, Huang C K. Mechanistic seismic damage modes for reinforced concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1987, **3**(4): 25-33.
- [14] 徐龙河, 颜欣桐. 基于变形与耗能的钢筋混凝土柱双参数损伤模型参数修正[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2017, **50**(12): 1314-1320. (XU Long-he, YAN Xin-tong. Parameters modification of deformation and energy based double parameters damage model for RC column[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2017, **50**(12): 1314-1320. (in Chinese))
- [15] Kunnath S K, Reinhorn A M, Park Y J. Analytical modeling of inelastic seismic response of R/C structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, **116**(4): 996-1017.
- [16] Kumar S, Usami T. Damage evaluation in steel box columns by cyclic loading tests[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1996, **122**(6): 626-634.
- [17] 徐 强, 马 艳, 王社良. 基于构件损伤的防屈曲支撑钢框架易损性分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, **47**(4): 61-68. (XU Qiang, MA Yan, WANG She-liang. Vulnerability analysis of buckling-restrained brace frame based on the component damage[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, **47**(4): 61-68. (in Chinese))
- [18] Chai Y H, Romstad K M, Bird S M. Energy-based linear damage model for high-intensity seismic loading [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, **121**(5): 857-864.
- [19] 王东升, 冯启民, 王国新. 考虑低周疲劳寿命的改进Park-Ang地震损伤模型[J]. *土木工程学报*, 2004, **37**(11): 41-49. (WANG Dong-sheng, FENG Qi-min, WANG Guo-xin. A modified Park-Ang seismic damage model considering low-cycle fatigue life [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, **37**(11): 41-49. (in Chinese))
- [20] 陈林之, 蒋欢军, 吕西林. 修正的钢筋混凝土结构Park-Ang损伤模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, **38**(8): 1103-1107. (CHEN Lin-zhi, JIANG Huan-jun, LÜ Xi-lin. Modified Park-Ang damage model for reinforced concrete structures[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, **38**(8): 1103-1107. (in Chinese))
- [21] 周 知, 钱 江, 黄 维. 基于修正的Park-Ang损伤模型在钢构件中的应用[J]. *建筑结构学报*, 2016, **37**(S1): 448-454. (ZHOU Zhi, QIAN Jiang, HUANG Wei. Application of modified Park-Ang damage model to steel members [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, **37**(S1): 448-454. (in Chinese))
- [22] Park R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing [J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 1989, **22**(3): 155-166.
- [23] 王开飞, 邵方方, 邢信慧, 等. 圆钢管压弯构件常轴力滞回性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2010, **31**(S1): 35-38. (WANG Kai-fei, SHAO Fang-fang, XING Ji-hui, et al. Research on hysteretic behavior of steel circular-tube members under constant compression and cyclic bending [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, **31**(S1): 35-38. (in Chinese))
- [24] 网壳结构技术规程(JGJ 61-2003)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (Technical Specification for Latticed Shells (JGJ 61-2003)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese))
- [25] 钢结构设计标准(GB 50017-2017)[S]. 北京: 中国工业出版社, 2004. (Code for Design of Steel Structures (GB 50017-2017)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese))
- [26] 王烨华. 粘弹性阻尼高层钢结构基于性能的抗震设计

- 方法研究[D]. 广州大学, 2006. (WANG Ye-hua, Research on Performance-Based Seismic Design Method of High-Rise Steel Structure with Viscoelastic Dampers[D]. Guangzhou University, 2006. (in Chinese))
- [27] 王晓伟, 张耀庭, 肖云峰. 基于修正 Park-Ang 模型的 PC 框架结构损伤模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2018, **38**(3): 73-80. (WANG Xiao-wei, ZHANG Yao-ting, XIAO Yun-feng. Study on seismic damage of prestressed concrete frame structures based on modified Park-Ang model[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2018, **38**(3): 73-80. (in Chinese))

## Research on seismic damage assessment of circular steel tube members based on modified Park-Ang model

LIU Xiang, ZHU Nan-hai\*, CHEN Lu-jun

(School of Civil and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** In order to reasonably evaluate the degree of seismic damage of thin-walled circular steel pipe members, a seismic damage model applicable to circular steel pipe members was established based on the Park-Ang seismic damage model by modifying the relevant parameters. Using the skeleton curve of the circular steel pipe component under the action of low-cycle repeated loads, the calculation method of each undetermined parameter in the damage model is given. On this basis, the model combination coefficient when the damage factor of the component failure point is 1.0 is determined through an inverse analysis and used. The curve fitting method provides the relationship between the model combination coefficient and the axial compression ratio, slenderness ratio and diameter-thickness ratio of the components, so as to establish the seismic damage assessment model of the components. The results show that the modified Park-Ang damage model can better evaluate the damage degree of round steel pipe members. When a member starts to fail, the damage factor converges to 1.0 and the dispersion is small. The damage degree of the member can be divided into basically intact, minor damage, moderate and severe damage, and complete damage, the corresponding damage factor threshold values are 0.02, 0.41, and 1.00, respectively.

**Key words:** round steel pipe; earthquake damage model; damage assessment; model combination coefficient; performance level

引用本文/Cite this paper:

刘翔, 朱南海, 陈禄军. 基于修正 Park-Ang 模型的圆钢管构件地震损伤评估[J]. 计算力学学报, 2022, **39**(6): 737-745.

LIU Xiang, ZHU Nan-hai, CHEN Lu-jun. Research on seismic damage assessment of circular steel tube members based on modified Park-Ang model[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, **39**(6): 737-745.