

含偏心異徑管接頭(Eccentric Reducer)之疲勞壽命評估

翁炯立, 張漢洲, 劉家銓
臺灣電力公司 核能安全處

摘要

本分析針對含有偏心異徑管接頭(eccentric reducer)之管路系統, 分析其焊道上的疲勞裂縫成長, 計算其疲勞壽命。分析過程, 採用ABAQUS有限元素分析軟體針對偏心異徑管接頭上之假想裂紋進行破壞力學分析, 求取不同裂縫深度下之應力強度因子(stress intensity factors)之變化值, 並進一步計算其疲勞壽命, 以提供核電廠進行較符合實際運轉狀況的管路設計之參考。

關鍵字: 熱應力強度因子、有限元素分析、偏心異徑管接頭

ABSTRACT

The eccentric reducers were sometimes used in the piping system for some reasons. This study focuses on the evaluations of the fatigue crack growth of the weld of eccentric reducer, and estimates its fatigue life. The stress intensity factors of various crack depth in the weld of eccentric reducer were calculated by ABAQUS and the fatigue crack growth was predicted by the Paris Law thereafter. This study provides a valuable reference of aging management strategies in piping systems for the nuclear power industry.

Keywords: Thermal stress, Finite Element Analysis

一、前言

核能電廠安全有關之管路系統, 設計時須依設計規範 ASME Section III NB-3600 進行結構完整性及疲勞分析。由於 NB-3600 規範為公式套用法之設計方法(design by formula), 為遂行規範之通用性, 其計算分析的假設基礎未免有其過度簡化及保守性。因此, 計算結果有時會有設計過頭(over-design)或無法符合法規要求之現象。本分析針對含有偏心異徑管接頭(eccentric reducer)之管路系統, 以分析的設計方式(design by analysis), 分析其焊道上的疲勞裂縫成長, 計算其疲勞壽命。分析過程, 採用 ABAQUS 有限元素分析軟體針對偏心異徑管接頭上之假想裂紋進行破壞力學分析, 求取不同裂縫深度下之應力強度因子(stress intensity factors)之變化值, 並進一步計算其疲勞壽命, 以提供核電廠進行較符合實際運轉狀況的管路設計之參考。

二、評估方法概述

運轉中核能機組之組件發現有熱疲勞

或機械疲勞顧慮時, 一般可依照 ASME Section XI IWB-3740 "OPERATING PLANT FATIGUE ASSESSMENTS" 及其附錄 L 進行繼續運轉之可接受性評估。另外, 當運轉中機組之組件之累積疲勞使用因子超過當初設計規範所設定之疲勞使用限值時, 上述規範亦可用來進行繼續運轉之可接受性疲勞評估。評估方法簡述如下。

1. 假設初始裂縫
2. 計算下一次檢測時之最終裂縫尺寸
3. 計算管件之容許裂縫尺寸
4. 研判繼續運轉之可行性

因為本項分析引用上列之瑕疵容許評估法, 合理假設偏心異徑管接頭存在一初始裂縫, 運轉期間承受各種暫態引發之交變應力下, 計算裂縫成長量, 並累積至該組件之法規容許裂縫深度時, 即假設達到破損狀態, 以此評估其疲勞壽命。本分析採用之案例為某一核電廠之反應爐水淨化取水管線(Reactor Water Clean Up System, RWCU), 該系統管件為 304 不銹鋼材質。

三、假設初始裂縫

管件內表面瑕疵評估時，可假設為半橢圓型表面裂縫，依規範要求，假設之裂縫深長比(aspect ratio)為 1：6，裂縫深度之假設可依實際情況進行假設。

依據 ASME 法規要求，2"管件在電廠運轉期間之檢測計畫中並未檢測瑕疵深度，因此，分析時沒有該焊道之裂縫深度檢測資料，但該管路系統於投入正式運轉前均依 ASME Section XI IWB-3514 節之要求進行運轉前檢測 (Pre-Service Inspection, PSI)，依據此項規範，對於不銹鋼管壁厚度 <0.312"，當裂縫深長比 aspect ratio = 0.16(即 1:6)時，運轉前檢測之容許最大裂縫深度 = 9.9% t，t 為管壁厚度，換言之，壁厚為 0.218"之 2"RWCU 管件焊道在運轉開始之初始裂縫深度可合理假設為 0.218"×9.9% = 0.0216"。

四、計算管件容許裂縫尺寸

4.1 評估方法

不銹鋼管材之斷裂韌度極高，依 ASME Section XI IWB-3600 節之建議，含裂縫不銹鋼管件之破損行為應採用極限負載分析法 (Limit Load Analysis) 進行分析【1】，分析過程簡述如下：

考慮一管件，平均半徑為 R，壁厚為 t，其內壁有一深度為 a，長度為 2rθ 之周向裂紋，當承受內壓力 P 及彎力矩 (bending moment) M 後，達到全截面塑性變形之極限負載狀態時，在截面的應力分佈如圖一所示。

在軸向應力及彎曲應力之作用下，管件之裂縫截面達到全截面塑性變形狀態下，其相對應之極限彎曲應力 (failure bending stress) 如下：

$$P'_b = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left(2 \sin \beta - \frac{a}{t} \sin \theta \right) \text{-----(1)}$$

上式中，

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\pi - \frac{a}{t} \theta - \frac{\pi \cdot P_m}{\sigma_f} \right) \text{-----(2)}$$

當考量安全係數後，(1)式可寫為：

$$P'_b = SF(P_m + P_b) - P_m \text{-----(3)}$$

(1)~(3)式中，

β：中性軸之角度

a：裂縫深度

t：管壁厚度

θ：裂縫一半角度

P_m ：一次薄膜應力(primary membrane stress)

P_b ：一次彎曲應力(primary bending stress)

P'_b ：管件破壞前所能承受之彎曲應力

σ_f ：管材之塑流應力(flow stress)，= 3 S_m

S_m 為材料之容許應力強度(stress intensity)，依定義， S_m 為 Tresca Yield Criterion 所定義之等效應力(equivalent stress)，換言之，為最大主應力值與最小主應力值之差值。依 ASME Section II，304 不銹鋼在 550°F 之容許應力強度 $S_m = 16,900$ psi，因此，(1)式中之塑流應力 $\sigma_f = 3 S_m = 50,700$ psi。

SF：安全係數，在運轉暫態狀況下(upset condition，或稱為 plant condition Level B)，SF=2.77；在較嚴重的事務狀況下(faulted condition，或稱為 plant condition Level D)，則 SF=1.39。

另外，依據法規 ASME Section XI IWB-3640 節之要求，除了採用上述之安全係數進行含裂縫不銹鋼管件之結構完整性評估外，為確保核能安全營運，另額外要求核能一級管件(含焊道)之裂縫深度與管壁厚度比(a/t)不得超過 0.75。本分析所採用之焊道容許裂縫深度即依此要求進行評估。

4.2 RWCU 管件承受之一次應力

管件破損之力源為一次應力(primary stress)，運轉中最大一次應力中包括平均薄膜應力(membrane stress)及彎曲應力(bending stress)，前者為管內壓力所造成，後者為彎矩(bending moment)所造成，此兩項應力分別為管路設計規範 NB-3600 節第(9)式中之 $B_1(PD_0/2t)$ 及 $B_2(D_0/t)M_i$ ，其中 B_1 及 B_2 分別為針對壓力負載及彎曲負載之應力指數(stress index)，表示幾何、材質等不連續之應力集中效應。如前所述，依 ASME 規範之要求，評估不銹鋼管件容許裂縫尺寸需要考慮之運轉條件有 upset condition (condition Level B) 及 faulted condition (condition Level D)。在 upset condition 下，安全係數應達到 2.77，而 faulted condition 下，安全係數則需維持在 1.39 以上。本項評估中，上列兩項應力值均節錄自另一份應力分析報告書【2】，其中

Level B 之一次應力，即 NB-3600 中之 Eq.(9B)，Level D 之一次應力，即 NB-3600 中之 Eq.(9D)。表一所示為 RWCU 系統偏心異徑管接頭(節點#3480)之 condition Level B 及 condition Level D 之一次應力彙總表。

4.3 容許裂縫深度

由表一所示之一次應力，代入式(1)~(3)，即可得知上述偏心異徑管接頭(節點#3480)之 condition Level B 及 condition Level D 運轉條件下之容許裂縫深度，如表二所示。

五、計算疲勞壽命

5.1 運轉中疲勞裂縫成長評估

運轉中，裂縫承受交變應力過程造成疲勞裂縫成長。管件之疲勞裂縫成長一般可採用 Paris law 進行評估，ASME Section XI Appendix C 所建議之 paris law 如下：

$$\frac{da}{dN} = C_0 (\Delta K_I)^n \text{-----}(4)$$

式中，a：裂縫深度

N：應力循環數

da/dN：每一應力循環數之裂縫成長量

ΔK_I ：應力強度因子變動值(Stress Intensity Factor Range)

n：材料之疲勞特性常數，Appendix C 對不銹鋼之建議值為 3.3

$$C_0 = CS \text{-----}(5)$$

(5)式中，

$$C = 10^{(-10.009+8.12 \times 10^{-4} T - 1.13 \times 10^{-6} T^2 + 1.12 \times 10^{-6} T^3)} \text{-----}(6)$$

$$S = 1.0 \quad R \leq 0 \text{-----}(7a)$$

$$= 1.0 + 1.8R \quad 0 < R \leq 0.79 \text{-----}(7b)$$

$$= -43.35 + 57.97R \quad 0.79 < R \leq 1.0 \text{-----}(7c)$$

T：溫度

R：應力比(stress ratio) = $\sigma_{min} / \sigma_{max} = K_{min} / K_{max}$

由(4)式可求得累積的疲勞裂縫成長量為：

$$\int_{a_0}^{a_f} da = a_f - a_0 = \int_{N_1}^{N_2} C_0 (\Delta K_I)^n dN = \sum C_0 (\Delta K_I)^n \Delta N \text{-----}(8)$$

可寫成：

$$a_f = a_0 + \sum C_0 (\Delta K_I)^n \Delta N \text{-----}(9)$$

(9)式中， a_0 ：初始裂縫深度

a_f ：最終裂縫深度

5.2 偏心異徑管接頭焊道裂縫之應力強

度因子

由(9)式可知，裂縫之成長與裂縫尖端之應力強度因子變動值息息相關。裂縫尖端應力強度因子為主導裂縫開裂行為的重要參數。

對於承受穩態應力(σ)之裂縫，其應力強度因子可表示如下：

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \text{-----}(10)$$

對於承受交變應力($\Delta\sigma$)之裂縫，其應力強度因子變動值則表示如下：

$$\Delta K_I = \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \text{-----}(11)$$

(10)&(11)式中， β ：幾何形狀修正係數，一般均隨結構幾何形狀及裂縫尺寸(a)而變。

如(10)及(11)式所示，應力強度因子及其中之幾何形狀修正係數 β 均隨裂縫深度而變化。計算疲勞裂縫成長過程，必須先求得幾何形狀修正係數 β ，進而求得應力強度因子。

圖二為一外徑 4.50"，壁厚 0.337"之直管以偏心異徑管接頭(eccentric reducer)連接另一外徑 2.375"，壁厚 0.218"之直管，並在 2" 側之焊道內壁存在一深度為 0.0654"(a/t=0.3)之半橢圓型表面裂縫，由於對稱關係，因此有限元素分析模式只需模擬管件之 1/2。為提高分析結果之準確度，裂縫前緣以較細之網格進行模擬。當在裂縫端之直管上施加 10000 psi 之拉張應力時時，求得裂縫最深處之應力強度因子為 4.223 ksi \sqrt{in} 。

由(10)式，幾何形狀修正係數 β 為

$$\beta = \frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi a}} = \frac{4.223}{10.00 \sqrt{\pi} \times 0.0654} = 0.932$$

針對其它不同裂縫深度，重複上述計算結果，分別可求得相對應的幾何形狀修正係數 β 如下：

a/t	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75
β	0.932	1.274	1.588	1.977	2.320	2.530

利用曲線設定(curve fitting)，上列 β 與 a/t 之關係式可用 3 階多項式來近似，如圖三所示，並表示如下：

$$\beta = -0.0429 + 3.2983 \left(\frac{a}{t}\right) - 0.3475 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0.6878 \left(\frac{a}{t}\right)^3 \text{-----}(12)$$

利用(12)式及交變應力值，即可求得(11)式之應力強度因子變動值，進而利用(6)式求

得 4"x2" 偏心異徑管接頭焊道內壁裂縫承受每一應力循環之裂縫成長量。

5.3 RWCU 管件承受之交變應力

RWCU 管路運轉過程中可能遭遇之暫態，包括運轉基準地震(OBE)，共有 16 個，詳如圖四所示。每一個暫態可能含蓋若干 load sets，每一 load set 有其應力狀態。依據 RWCU 管路設計規範，整個暫態過程中總共分成 31 個 load sets，詳如表三「RWCU Load Sets 彙總表」。

材料產生疲勞之力量源為交變應力，其中包括一次應力(primary stress)及二次應力(secondary stress)，因此，在各種暫態中，load set 間之應力變化量(一次應力+二次應力)為疲勞分析所需考慮之對象。依機組運轉記錄，RWCU 遭遇過之暫態類別及次數均已知，各暫態期間之應力變化值為暫態中兩應力狀態之差值，定義為 load set pair 之應力變化量。表四為計算實際疲勞壽命所採用之 RWCU load set pairs 彙總表及機組統計至第 23 燃料週期時，所發生過之暫態類別及次數。本分析將評估 RWCU 管件之疲勞壽命第 24 燃料週期以後之疲勞壽命，由於第 24 燃料週期以後之暫態次數仍未知，因此，對第 24 燃料週期以後預估暫態及次數，假設與第 23 燃料週期相同，但第 23 燃料週期未發生過的暫態，則保守假設均可能發生一次。

上述各暫態下每一個 load set 之應力狀態，已另由 PIPESTRESS 管路設計軟體完成計算。表五所示為本案所評估之節點 3480 位置，由上述應力計算結果所節錄出在各個 load sets 下所承受之尖峰應力強度值。

5.4 疲勞壽命預估

依據前兩節求得裂縫處之幾何形狀修正係數及所承受之交變應力後，應用(9)及(11)式，即可進行疲勞裂縫成長計算。為便於運算，本分析將(9)及(11)式之疲勞裂縫成長計算，以 Fortran 編寫成一簡單之運算程式進行計算。由分析結果顯示，上列節點 #3480 自運轉初始之假想裂縫深度 $a/t=9.9\%$ 成長至破損(依法規要求裂紋成長至 $a/t=75\%$)之疲勞壽命為 91.5 年。

六、結論

本分析採用 Paris law 進行偏心異徑管

接頭裂紋疲勞壽命評估，裂紋在各種不同深度下之應力強度因子採用 ABAQUS 進行破壞力學分析。管接頭以法規所規範，當裂紋成長至裂紋深度與管壁度比(a/t)達到 75% 時，即研判達到破損狀態。管接頭承受之交變應力節錄自另一份由 Pipestress 所進行之分析報告。分析結果，此一 RWCU 偏心異徑管接頭焊道之疲勞壽命為 91.5 年。

七、參考資料

- [1] ASME Section XI Appendix C "Evaluation of Flaws in Piping", 2007 年版。
- [2] "爐水淨化管線應力再分析報告"，台灣電力股份有限公司，2009 年 10 月。

八、表格

表一、RWCU 系統偏心異徑管接頭之 condition Level B 及 condition Level D 之一次應力彙總表

節點位置	管壁厚度 (in)	Level B		Level D	
		Pm (ksi)	Pb (ksi)	Pm (ksi)	Pb (ksi)
3480	0.218	5.474	3.465	5.474	6.318

表二、節點#3480 處之容許裂縫深度彙總表

節點位置	管壁厚度 (in)	Level B 容許裂縫深度 (in)	Level D 容許裂縫深度 (in)	最大容許裂縫深度 (in)
3480	0.218	0.1635	0.1635	0.1635

表三、RWCU 管路承受之 Load Sets 彙總表

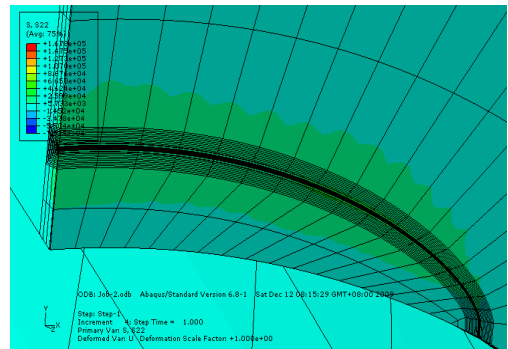
Load Set No	Events	Description
1	Base case	BASE CASE 70 °F, 0 PSIG HYDROSTATIC TEST
2	Design Hydro. Test	70 °F TO 212 °F HYDROSTATIC TEST
3		212 °F 1250 PSIG HYDROSTATIC TEST
4		PRESSURE TEST 212 °F TO 100 °F
5		STATUS @ 100 °F 0 PSIG
6		Start up
7	Hot standby	STATUS @ 546 °F 1005 PSIG
8	Turbine Roll Increase to Rated Power	546°F DOWN TO 538 °F
9		STATUS @ 538 °F 1005 PSIG
10		538°F DOWN TO 522 °F
11	Daily Reduction, Weekly Reduction Rod Pattern Change Rated Power Normal Operation	STATUS @ 522 °F 1005 PSIG
12	Turbine Trip with 100% Steam Bypass	TURBINE TRIP 522 °F TO 490 °F
13		STATUS @ 490 °F 1005 PSIG
14		TURBINE TRIP 490 °F TO 522 °F
15	Partial Feedwater Heater Bypass	PARATIAL FW BYPASS 522 TO 512°F
16		STATUS @ 512 °F 1005 PSIG
17		PARATIAL FW BYPASS 512 TO 522°F
18	Scram	STATUS @ 522 °F 1125 PSIG
19		STATUS @ 522 °F 930 PSIG
20		TURB TRIP FW ON 522 TO 400 °F
21		STATUS @ 400 °F 240 PSIG
22		TURB TRIP FW ON 400 TO 546 °F
23	Reduction to 0% Power	REDUCTION TO 0% 522 °F TO 546 °F
24	Shut Down Vessel Flooding	SHUTDOWN 546 °F TO 375 °F
25		STATUS @ 375 °F 170 PSIG
26		SHUTDOWN 375 °F TO 330 °F
27		STATUS @ 330 °F 88 PSIG
28		SHUTDOWN 330 °F TO 100 °F
29	Unbolt	UNBOLT 100 °F TO 70 °F
30	OBE	NORMAL @ 522 °F +OBE
31		NORMAL @ 522 °F -OBE

表四、RWCU 管路 load set pairs 彙總表及發生過之暫態類別及次數

Load Set No	Event	Description	EOC-23 為止 發生次數		Load Set Pair	Peak Stress Intensity Range for Load Set Pairs (ksi) (以節點 3480 為例)
			1 號機	2 號機		
1	Base case	BASE CASE 70 °F, 0 PSIG HYDROSTATIC TEST	N/A	N/A	N/A	N/A
2	Design Hydro. Test	70 °F TO 212 °F HYDROSTATIC TEST	35	30	1	0.0
3		212 °F 1250 PSIG HYDROSTATIC TEST			1	139.07
4		PRESSURE TEST 212 °F TO 100 °F			1	25.81
5		STATUS @ 100 °F 0 PSIG			1	25.79
6	Start up	START UP 100°F TO 546 °F	80.82	79.5	1	25.81
7	Hot stanby	STATUS @ 546 °F 1005 PSIG			1	391.06
8	Turbine Roll Increase to Rated Power	546°F DOWN TO 538 °F	179	162	7	392.83
9		STATUS @ 538 °F 1005 PSIG			7	383.76
10		538°F DOWN TO 522 °F			7	387.28
11	Daily Reduction、Weekly Reduction、Rod Pattern Change、Rated Power Normal Operation	STATUS @ 522 °F 1005 PSIG	720+ 276.5+ 235.5	687+ 267.5+ 38	7	370.74
12	Turbine Trip with 100% Steam Bypass	TURBINE TRIP 522 °F TO 490 °F	0	0	13	371.08
13		STATUS @ 490 °F 1005 PSIG			13	344.68
14		TURBINE TRIP 490 °F TO 522 °F			13	370.87
15	Partial Feedwater Heater Bypass	PARATIAL FW BYPASS 522 TO 512°F	0	0	13	370.83
16		STATUS @ 512 °F 1005 PSIG			13	363.26
17		PARATIAL FW BYPASS 512 TO 522°F			13	370.78
18	Scram	STATUS @ 522 °F 1125 PSIG	30+ 84	22+ 58	21	372.63
19		STATUS @ 522 °F 930 PSIG			21	369.56
20		TURB TRIP FW ON 522 TO 400 °F			21	369.83
21		STATUS @ 400 °F 240 PSIG			21	256.06
22		TURB TRIP FW ON 400 TO 546 °F			21	391.07
23	Reduction to 0% Power	REDUCTION TO 0% 522 °F TO 546 °F	149	136	7	376.04
24	Shut Down Vessel Flooding	SHUTDOWN 546 °F TO 375 °F	80.82	79.5	1	391.09
25		STATUS @ 375 °F 170 PSIG			27	221.04
26		SHUTDOWN 375 °F TO 330 °F			1	221.11
27		STATUS @ 330 °F 88 PSIG			1	208.59
28		SHUTDOWN 330 °F TO 100 °F			1	208.62
29	Unbolt	UNBOLT 100 °F TO 70 °F	22	22	1	30.54
30	OBE	NORMAL @ 522 °F +OBE	0	0	1	362.56
31		NORMAL @ 522 °F +OBE			1	379.72

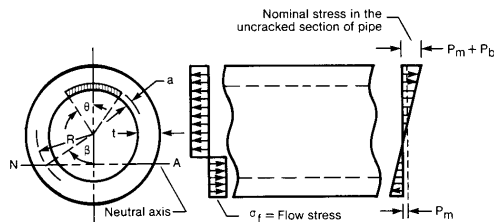
表五、RWCU 管路節點#3480 位置在各種 load sets 下所承受之尖峰應力 (ksi)

Load Set No	尖峰應力值 (ksi)	Load Set No	尖峰應力值 (ksi)
1	0.	17	370.78
2	0.0	18	372.63
3	139.07	19	369.56
4	25.81	20	369.83
5	25.79	21	256.06
6	25.81	22	391.07
7	391.06	23	376.04
8	392.83	24	391.09
9	383.76	25	221.04
10	387.28	26	221.11
11	370.74	27	208.59
12	371.08	28	208.62
13	344.68	29	30.54
14	370.87	30	362.56
15	370.83	31	379.72
16	363.26		

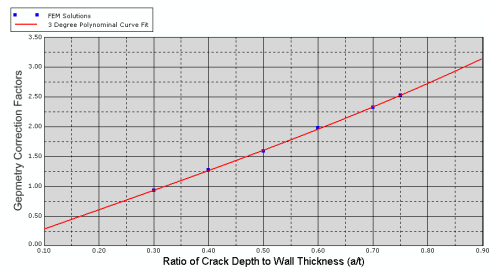


圖二、偏心 Reducer 內壁存在一 $a/t=0.30$ 半橢圓型表面裂縫之有限元素分析模式

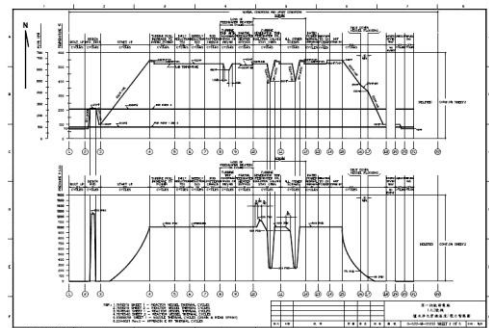
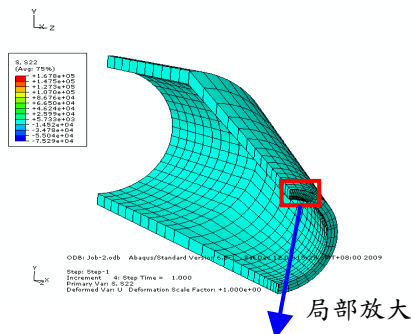
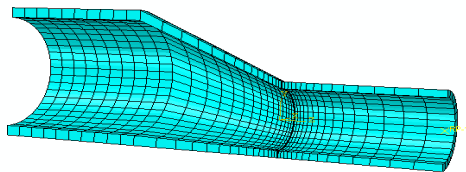
九、圖片



圖一、含周向裂紋管件在破壞前，發生全截面塑性變形狀態之應力分佈



圖三、偏心 Reducer 內壁半橢圓型表面裂縫之幾何形狀修正係數(與 a/t 之曲線近似)



圖四、RWCU 管路運轉過程中可能遭遇之暫態