

MFD小委員会

複合荷重下における疲労および延性破壊 評価の重要知識整備に関する調査研究

この資料を引用するにあたっては、下記を明記してください。

(一社)日本溶接協会原子力研究委員会の50周年以降10年間のまとめ資料公開資料(2019年):**MFD小委員会「複合荷重下における疲労および延性破壊評価の重要知識整備に関する調査研究」**

1. 小委員会の活動期間と構成員

■MFD小委員会

【研究題目】複合荷重下における疲労および延性破壊評価の重要知識整備に関する調査研究

【研究期間】2015年5月～2017年3月

【研究体制】(所属・役職は研究期間当時)

- 主 査 : 岡田 裕 (東京理科大理工学部教授)
- 副 主 査 : 高橋由紀夫 (電力中央研究所 研究参事)
- WGリーダー : 秋庭義明 (横浜国立大学大学院工学研究院教授)
- : 和田義孝 (近畿大学理工学部機械工学科准教授)
- 幹 事 : 4機関、4名
- 委 員 : 電力各社、大学、電力関連機関、メーカを含む22機関、約30名
- 顧 問 : 矢川元基 (公益社団法人 原子力安全研究協会 会長)
- 菊池正紀 (東京理科大理工学部 嘱託教授)

背景と目的

複合荷重下の疲労や延性破壊に関する検討を実施してきた(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会傘下の小委員会の成果に対し、試験や解析の成果を広く参照/活用できる形とするために、以下を目的として研究成果の調査を実施し、それらの知見やデータを収集、整理し、重要な知見としてデータベース化を図る。



- ① 繰返し複合荷重下での疲労および破壊評価に関する**既往研究調査**
- ② 繰返し複合荷重下での疲労および破壊評価に関する**溶接協会小委員会の成果のまとめ**
 - **実験WG**
 - **解析WG**
- ③ 繰返し複合荷重下での**疲労および延性破壊に関するデータベースの構築**
- ④ 繰返し複合荷重下での**構造実耐力評価に関する数値解析手法の基盤構築**

3.1 既往研究調査

- 日本溶接協会 原子力研究委員会では、繰返し複合荷重下での試験や、疲労亀裂あるいは延性亀裂進展シミュレーション技術の高度化に向けて、既往研究の調査が行なわれてきた。
- MDF小委員会では複合荷重下での機器の破壊挙動および破壊強度を精度よく予測するのに必要な解析評価技術に対して新たに取り組むべき課題があることが指摘され、その課題解決に向けて、関連する既往研究のさらなる調査が必要と判断された。
- そこで、繰返し複合荷重下での疲労および破壊評価に関する既往研究の中から次ページに示す8編の論文を調査対象に抽出し、知見を纏めた。

3.1 既往研究調査

表 成果を纏めた既往研究一覧

No	タイトル	著者
1	Monotonic vis-à-vis cyclic fracture behaviour of AISI 304LN stainless steel	H. Roy, et al.
2	A study on the decrease of fracture resistance curve under reversed cyclic loading	Chang-Sung Seok, et al.
3	Effect of cyclic loading on elastic-plastic fracture resistance of PHT system piping material of PHWR	P.K. Singh, et al.
4	INVESTIGATION ON EVALUATION METHOD BASED ON J INTEGRAL FOR RETARDATION OF CRACK GROWTH DUE TO EXCESSIVE LOADING BEYOND SMALL SCALE YIELDING CONDITION	Y, YAMAGUCHI, et al.
5	弾塑性破壊力学パラメータに基づく繰返し過大荷重による配管材のき裂進展評価法の提案	山口他
6	過大な圧縮荷重がき裂進展挙動に及ぼす影響	山口他
7	地震荷重下における配管のき裂進展評価手法の提案*	山口他
8	The Effects of Cyclic and Dynamic Loading on the Fracture Resistance of Nuclear Piping Steels*	NUREG/CR-6440

■ 既往研究調査から得られた主な知見

- AISI 304Lの破壊靱性は応力比Rの減少に伴い低下し、 $R=-1$ でJ-R曲線の下限值に一致
- 繰返し荷重下でのJ-Rカーブ減少は、両振り荷重下での亀裂先端の引張残留応力の発現や、J積分値評価時の亀裂開閉口挙動の考慮が必要
- $R<0$ の条件ではCyclic J-Rカーブの低下が顕著に生じ、 $R=-1$ で最小値となる傾向
- STS410における小規模降伏を超える一定荷重振幅での疲労亀裂進展量は、疲労亀裂と延性亀裂の和で表現可能
- ΔJ を使った修正Wheelerモデルは、繰返し過大荷重による亀裂進展挙動の高精度予測に有効。
- 繰返し荷重負荷中に過大な引張/圧縮荷重を受けることで、亀裂進展速度が変化。
- CT試験片の繰返し荷重試験から、繰返し負荷による最大荷重の低下は圧縮負荷による亀裂先端の鋭化とボイドの鋭化によるものと推定
- 繰返しJ-R曲線の実験結果をFEMにより検証する場合、移動と等方の2つの硬化則が必要
- 解析の材料特性に移動硬化則を用いると最大荷重は実験結果と概ね一致するが、最小荷重の絶対値は実験値に比べ低い。等方硬化則の場合、解析による引張/圧縮荷重の絶対値は実験結果より大きい。最初の数サイクルは実験結果とよく一致。
- CT試験片による繰返し負荷試験で変位増分量を変化させた場合、ステンレス鋼は試験時の最大荷重は $R=-1$ のとき、最大で約20%低下。一方、炭素鋼は、高い応力比($R=-0.3$)で最大荷重点の変位量が低下

3.2 小委員会の成果のまとめ

- 複合荷重下での疲労や延性亀裂の進展、破壊挙動把握は、新設のみならず、高経年化した原子力設備の評価にも有益であることから、日本溶接協会 原子力研究委員会では下記の小委員活動を推進
- 小委員会活動を通じて、多くの実験データの蓄積と複雑な亀裂進展挙動を予測する数値解析手法を高度化
- 下記小委員会で得たそれらの実験的、数値解析的成果を、参照/活用できるように、実験WG と解析WGの観点からPPT形式で系統的に整理

複合荷重下での疲労、亀裂進展、破壊挙動に関連する小委員会活動

- (1)「繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究」
(MF小委員会)
- (2)「繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究
その2」(MF-II小委員会)
- (3)「繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究
その3」(MF-III小委員会)
- (4)「軽水炉機器・構造物の繰り返し複合荷重下における破壊評価に関する研究」
(MDF小委員会)

3.2 小委員会の成果のまとめ

■ 各小委員会の主な成果(実験WG)

- MF小委員会

当時の設計建設基準や維持規格で未考慮の複合荷重効果に着目。炭素鋼とステンレス鋼を用いて軸荷重やねじり荷重を組み合わせた疲労試験を実施し、試験結果に基づき、複合荷重下での破断寿命と亀裂進展挙動の評価法を提案した。

- MF-II小委員会

データ拡充のため、切欠き材を含めた複合荷重試験を行い、MF小委員会提案の寿命評価法および亀裂進展評価法の有用性を確認。一方、応力集中部を有するステンレス鋼の疲労では、予想に反し切欠き強化現象が確認された。

- MF-III小委員会

MF-II小委員会で確認された切り欠き強化現象の検討のため、切欠き付きステンレス鋼の疲労試験を実施。切欠き底に発生する亀裂発生とその後の進展に分離して切欠き効果を検証し、切欠き材の複合荷重下での疲労損傷メカニズムを解明した。

- MDF小委員会

巨大地震を想定した過大な複合荷重に対する部材の健全性評価を実施。亀裂を有する試験片を用いて軸荷重とねじり荷重を組み合わせた静的および疲労試験を行い、日本機械学会「維持規格」を準用して破壊評価を行うことで、当該規格の保守性および妥当性を確認した。

■ 各小委員会の主な成果(解析WG)

- MF小委員会

亀裂進展ラウンドロビン解析を実施し、混合モード荷重下にある三次元亀裂問題を対象としたエネルギー解放率と応力拡大係数の評価を行った。さらに、混合モード負荷を受ける円筒に存在する貫通亀裂の応力拡大係数評価と、汎用数値解析ソフトを用いたJ積分評価による検証及び塑性変形の影響調査を行った。

- MF-Ⅱ小委員会

実験WGで実施した3種類の試験片を対象とした弾性及び弾塑性解析を複数の機関で実施。結果の比較から解析精度の検証を行ったが、実験結果を力学的に解釈するには至らなかった。一方、参加各機関で最新の解析手法を適用した亀裂進展解析を試み、大規模な三次元亀裂進展解析が可能であるとの見通しを得た。

- MF-Ⅲ小委員会

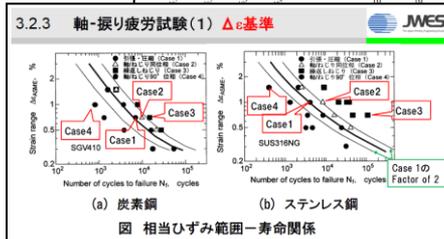
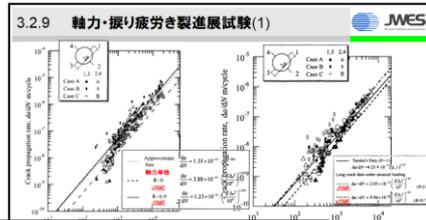
三次元曲面亀裂に対して様々な疲労亀裂進展シミュレーションを実施した結果、疲労亀裂進展クライテリオンの再検討の必要性が指摘された。また、解析計算に要する時間の短縮のための様々な計算技術の改良の必要性が判明した。

- MDF小委員会

地震を想定した過大な複合荷重に対する部材の評価に関して、破壊解析による繰返し複合荷重下での破壊シミュレーションを高度化し、実寸法を考慮した部材の破壊シミュレーションを実施して、当該技術の高度化を図った。

3.2 小委員会の成果のまとめ

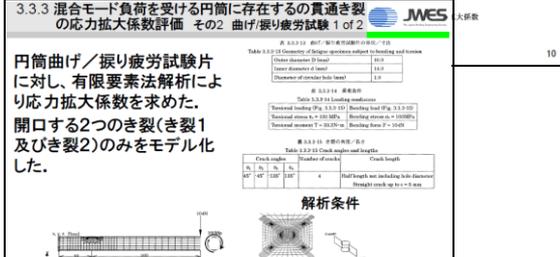
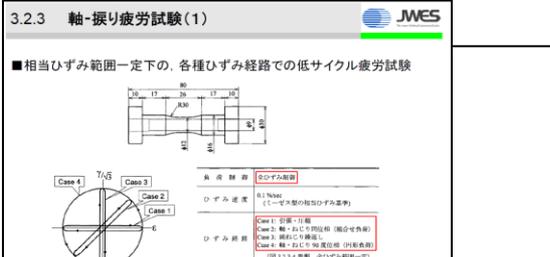
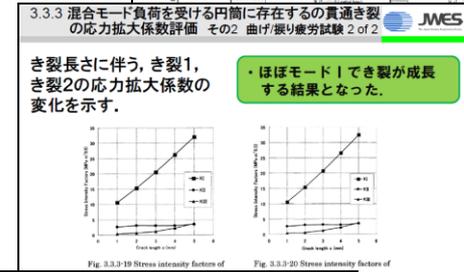
■ 成果のまとめの例 (MF小委員会)



3.3.4 き裂付き薄肉円筒試験片の弾塑性解析 2 of 2 JWES

周方向き裂を有し引張荷重を受ける薄肉円筒試験片及び45°のき裂を有し振り荷重を受ける薄肉円筒試験片に対して評価を実施。

- 解析方法は極限荷重の補正と小規模履歴効果に対する補正項を加えることで十分な精度が得られた。
- J-R法は引張荷重ではき裂面に垂直な方向の変位を用い、振り荷重ではせん断方向の変位を用いることでよい精度を得ることができた。



原子力研究委員会 MFD小委員会
多軸疲労および破壊ナレッジプラットフォーム

MF小委員会

繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究(実験WG)

この資料を引用するにあたっては、下記を明記してください。
(一社)日本焊接協会原子力研究委員会MFD小委員会ナレッジプラットフォーム
公開資料(2017年):MF小委員会「繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究(平成15年度報告書)」

原子力研究委員会 MFD小委員会
多軸疲労および破壊ナレッジプラットフォーム

MF小委員会

繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究(解析WG)

この資料を引用するにあたっては、下記を明記してください。
(一社)日本焊接協会原子力研究委員会MFD小委員会ナレッジプラットフォーム
公開資料(2017年):MF小委員会「繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究(平成15年度報告書)」

実験WG

解析WG

■複合荷重下での機器の健全性評価の際に広く参照/活用できるようにすることを目的に、MF～MF-Ⅲ、MDF小委員会で採取された重要と判断される試験データを集積し、これらのデータベース化を図った。

■系統的に利用し易いようにデータベースはExcel形式で作成し、以下に示す情報を収録

- 試験機関情報（試験機関名称など）
- 材料情報（材料メーカ、鋼種、化学成分、熱処理条件、機械的特性など）
- 試験片情報（形状、内/外径、応力集中係数など）
- 試験条件（制御方法、負荷形態、繰返し速度、負荷波形、試験環境など）
- 試験結果（応力、ひずみ、応力比、荷重、変位、破断繰返し数、繰返し数、亀裂長さ、亀裂進展速度、応力拡大係数など）

3.3 疲労および延性破壊に関するデータベースの構築

■ データベースの例

Sheet No	MDF-Hi-SS-2										
Author	Nakane Y. Lab Hitachi										
Ref	MDF Committee										
Material	SUS316TP Maker Sumitomo Metal Shape/Dim Pipe, OD=609.6mm, t=38.9mm										
Chemical	C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu		
Comp.(%)	0.016	0.51	1.36	0.025	0.001	11.3	17.51	15	0	0	
	Al	Ti	Fe	N	Sm	As	Sn				
	0.0031	0	0	0.1	0	0	0				
Mechanical	Yield Strength	Tensile Strength		Elongation	R. A	Hardness					
Properties	287(MPa)	573(MPa)		63(%)	0(%)	0(HV)					
Heat Treatment	1065°C x 30min. WQ										
Position	0	Specimen Shape	Round Bar JIS 14A号	Dimmension (mm)	Outer Dia	6	GL				
					Inner Dia	0					
					Notch bottom Dia	0	Nominal S.C.F.				
					Radius	0					
					if Notched Notch Radius	0					
					if Hole has Hole Dia	0					
Control1	Axial load	Loading mode	Monotonic	Data/Equation	Test data						
Control2	0	Loading mode									
Environ	Air										

No	Temp (°C)	Control1 ε or γ (-)	Control2 σ or τ (MPa)	Remarks
1	20	-9.5E-07	0.463329	
2	20	-8.1E-05	0.459129	
3	20	1.11E-06	1.276603	
4	20			
5	20			
6	20			
7	20			
8	20			
9	20			
10	20			
11	20			
12	20			
13	20			
14	20			
15	20			
16	20			
17	20			
18	20			
19	20			
20	20			
21	20			
22	20			
23	20			
24	20			
25	20			
26	20			
27	20			
28	20			
29	20			
30	20			
31	20	0.002815	258.8355	

引張試験での応力-ひずみ関係

Sheet No	MF3-F-SS-32										
Author	Y.Akino Lab 横国大										
Ref	MF3 Committee										
Material	SUS316L Maker 株式会社YAKIN 川崎 Shape/Dim φ 10.7, φ 16, 段付き丸棒										
Chemical	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	
Comp.(%)	0.009	0.73	1.26	0.022	0.001	12.13	17.59	2.09	0	0	
	Al	Ti	Fe	N	Sm	As	Sn				
	0	0	0	0	0	0	0				
Mechanical	Yield Strength	Tensile Strength		Elongation	R. A	Hardness					
Properties	250(MPa)	564(MPa)		64(%)	0(%)	0(HV)					
Heat Treatment	0										
Position	0	Specimen Shape	Round Bar	Dimmension (mm)	Outer Dia	10.7	GL				
					Inner Dia	0					
					Notch bottom Dia	0	Nominal S.C.F.				
					Radius	0					
					if Notched Notch Radius	0					
					if Hole has Hole Dia	0					
Control1	Torque	Wave1	Triangles	Phase	0	S.C.F		Defn Nr	0		
Control2	0	Wave2		Phase	0		1.117				
Environ	Air	Conduct	0	(μ. S/cm)	DO(ppm)	0		Notes	0		

No	Temp (°C)	Control1 ε a(%)	Control1 σ a(MPa)	R	Control2 Freq(Hz)	Control2 v a(%)	Control2 τ a(MPa)	R	NF (cycles)	Run out	Remarks
1	20	0	0	0	0.6	0	200	-1	1.01E+05	0	0
2	0	0	0	0	1	0	180	-1	4.18E+05	0	0
3	0	0	0	0	0.8	0	180	-1	3.33E+05	0	0
4	0	0	0	0	2	0	180	-1	1.55E+06	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0										
12	0										
13	0										
14	0										
15	0										
16	0										
17	0										
18	0										
19	0										
20	0										
21	0										
22	0										
23	0										
24	0										
25	0										
26	0										
27	0										
28	0										
29	0										
30	0										
31	0										
32	0										
33	0										
34	0										
35	0										
36	0										
37	0										
38	0										
39	0										
40	0										
41	0										
42	0										
43	0										
44	0										
45	0										

疲労試験データ

3.3 疲労および延性破壊に関するデータベースの構築

■ データベースの例

Sheet No	MDF-cyclD-SS-pi-1	
Author	Akiniwa Lab Yokohama National Univ.	
Ref	MDF Committee	
Material	SUS316	Maker Kobe Special Tube Co.Ltd. Shape/Dim. 20A_sch160
Chemical	C Si Mn P S Ni Cr Mo V Cu	0.04 0.42 1.7 0.029 0.002 11.27 16.62 2.12 0 0
Comp.(%)	Al Ti Fe N Sm As Sn	0 0 0 0 0 0
Mechanical Properties	Yield Strength 281(MPa) Tensile Strength 575(MPa) Elongation 67(%) R. A 0(%) Hardness 0(HV)	
Heat Treatment	Position 0 Specimen Shape Pipe Dimension Outer Dia 19.21 Inner Dia 16.28 Notch bottom Dia 0 Comment if Pre-crack has Angle 2θ (deg) 88.2 0 if Hole has Hole Dia (mm) 0	
Control1	Torque 0 Loading mode Cyclic Data/Equation Test data	
Control2	Environ Air 0 Loading mode Temp(°C) 20	

No	Cycle	Control1		Control2		Crack length				Remarks
		δ or θ (mm or deg)	P or T (kN or Nm)	δ or θ (mm or deg)	P or T (kN or Nm)	a ₁ (mm)	a ₂ (mm)	a ₃ (mm)	a ₄ (mm)	
1	1	0	-0.23544							
2	1	0.018	2.7468							
3	1	0.054	6.94548							
4	1	0.09	10.71252							
5	1	0.108	15.3036							
6	1	0.144	19.54152							
7	1	0.18	23.89716							
8	1	0.207	27.8604							
9	1	0.261	32.29452							
10	1	0.297	37.70964							
11	1	0.342	43.79184							
12	1	0.396	50.30568							
13	1	0.45	56.81952							
14	1	0.513	63.5688							
15	1	0.603	71.2206							
16	1	0.702	79.0686							
17	1	0.854	88.32924							
18	1	1.1737	98.13924							
19	1	3.969	107.20368							
20	1	7.056	112.18716							
21	1	7.155	102.4164							
22	1	7.074	91.4292							
23	1	6.984	78.95088							
24	1	6.867	66.15964							
25	1	6.75	51.91452							
26	1	6.651	39.12208							
27	1	6.525	25.7022							
28	1	6.39	10.71252							
29	1	6.282	0.3924							
30	1	6.246	-0.90252							
31	1	6.129	-11.85048							

破壊試験の荷重-ひずみ関係

Sheet No	MF3-HI-SS400	
Author	Nakane Lab Hitachi	
Ref	MF3	
Material	SS400	Maker Nippon Steel Co. Shape/Dim. φ 110
Chemical	C Si Mn P S Ni Cr Mo V Cu	0.19 0.18 0.45 0.01 0.024
Comp.(%)	Al Ti Fe N Sm As Sn	0.0029 0 0 0 0 0
Mechanical Properties	Yield Strength 265(MPa) Tensile Strength 440(MPa) Elongation 27(%) R. A 70.8(%) Hardness 0(HV)	
Heat Treatment	Position 0 Specimen Shape φ 60 Dimension Outer Dia 60 Inner Dia 0 Notch bottom Dia 0 Nominal S.C.F. 0 Comment TP has a φ 3mm diameter with 3mm depth hole if Hour glass Radius 0 if Notched Notch Radius 0 if Hole has Hole Dia 3	
Control1	Torque 0 Wave1 0 S.C.F 0 Defn NF 0	
Control2	Torque 0 Wave2 Sinusoidal Phase 0 DO(ppm) 0	
Environ	Air 0 Crdct 0 (μ S/cm)	

Temp (°C)	Control1				Control2				Nf (cycles)	Run out	Remarks
	Freq(Hz)	ε a(%)	σ a(MPa)	R	Freq(Hz)	v a(%)	T a(MPa)	R			
20	0	0	0	0	1	0	140	-0.9	0	0	

No	N (cycle)	Freq1 (Hz)	c1 (mm)	c2 (mm)	c3 (mm)	c4 (mm)	2a1 (mm)	2a2 (mm)	da1/dN (mm/c)	K1 (MPa√m)	Keff1 (MPa√m)	da2/dN (mm/c)	K2 (MPa√m)
2	220000		10						7.49E-08	26.61043			
3	230000		15						1.69E-07	31.87461			
4	240000		20						3.33E-07	36.38499			
5	250000												
6	260000												
7	270000												
8	280000												
9	290000												
10	300000												
11	310000												
12	320000												
13	330000												
14	340000												
15	350000												

疲労亀裂進展速度データ

疲労および疲労亀裂進展のデータ整備件数

委員会名	疲労データ	疲労亀裂進展データ
MF	22 (SS:12、CS:10)	25 (SS:10、CS:15)
MF-Ⅱ	66 (SS:33、CS:33)	5 (SS:3、CS:2)
MF-Ⅲ	48 (SS:38、CS:10)	2 (SS:1、CS:1)
合計	136 (SS:83、CS:53)	30 (SS:14、CS:18)

CS : Carbon Steel, SS : Stainless Steel

応力-ひずみ関係および荷重-変位関係のデータ整備件数

委員会名	丸棒の σ - ϵ 線図		円筒(配管)又はCTのP- δ 線図	
	単調	繰返し	単調	繰返し*
MF	—	2 (SS:1、CS:1)	—	—
MF-II	—	—	—	—
MF-III	1 (SS:1)	4 (SS:4)	—	—
MDF	4 (SS:2、CS:2)	2 (SS:1、CS:1)	—	—
	—	—	20(CT) (SS:9、CS:11)	19(CT) (SS:7、CS:12)
	—	—	39(円筒) (SS:20、CS:19)	49(円筒) (SS:14、CS:35)
合計	5 (SS:3、CS:2)	8 (SS:6、CS:2)	59 (SS:29、CS:30)	68 (SS:21、CS:37)

*返し数が20回以下をデータ整備の対象に選定

CS : Carbon Steel, SS : Stainless Steel

合計306件のデータを整備

3.3 WEBでの一般公開化

「繰返し複合荷重下での疲労および破壊評価に関する溶接協会小委員会の成果のまとめ」と「繰返し複合荷重下での疲労および延性破壊に関するデータベース」は、一般に公開、提供し幅広く活用されることが望ましいことから、「**多軸応力下の疲労および延性破壊データベース**」として日本溶接協会 原子力研究委員会HPからWEB公開※した

原子力研究委員会

MFD小委員会

Subcommittee for Important Knowledge of Multi-axial Fatigue and Ductile Fracture



- はじめに
- 多軸応力下の疲労研究小委員会の成果
- 多軸応力下の疲労強度データベース
- 多軸応力下の疲労き裂進展速度データベース
- 多軸応力下の延性破壊データベース

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2017 All Right Reserved.

1

多軸応力下の疲労および延性破壊データベースとは



「JWES 多軸応力下の疲労および延性破壊データベース」は、日本溶接協会 原子力研究委員会 MFD小委員会 (2015年5月～2017年3月)の調査研究の活動成果を取り纏めたものです。

MFD小委員会では、以下の項目のデータベースを構築しました。

- ①多軸応力下の疲労研究小委員会の成果
- ②多軸応力下の疲労強度データベース
- ③多軸応力下の疲労き裂進展速度データベース
- ④多軸応力下の延性破壊データベース

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2017 All Right Reserved.

2

WEB公開画面

- 過大荷重下での機器の実耐力を評価する数値解析手法の基盤固めを目的として、
 - (1) 大変形弾塑性域での亀裂進展と ΔJ の評価式の検討
 - (2) 大変形弾塑性域での亀裂進展と破壊クライテリアの検討を実施
- 共通解析項目として、炭素鋼(SGV410 鋼)1TCT試験片の実験に対するトレース解析を行った。
- 解析項目は、
 - 静的負荷試験(Monotonic Loading; ML 試験)
 - 疲労亀裂進展(Fatigue Crack Growth; FCG 試験)のトレース解析

3.4 数値解析手法の基盤構築

各研究機関における解析の取組みと解析手法

No.	研究機関	破壊挙動トレース解析		解析手法
		静的負荷試験 (ML試験)	疲労亀裂進展 (FCG試験)	
1	A	○	○	ABAQUS(6面体要素、構成式の検討、J積分)
2	B	○	○	MSC.Marc(6面体要素、並列計算、構成式の詳細検討)
3	C	○	○	ANSYS(四面体要素、詳細モデル化)
4	D	○	○	Gursonの降伏関数による弾塑性破壊力学シミュレーション(損傷力学モデルに基づく構成則)
5	E	○	—	ANSYS(XFEM解析、2次元)

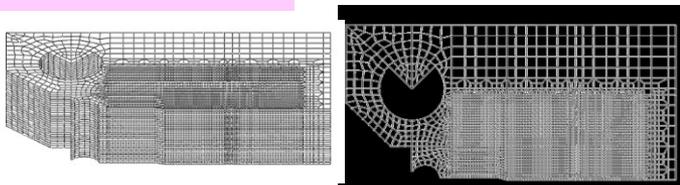
No. 1~3,5: 汎用コードを利用し独自の機能追加(J積分、メッシュ生成など)

No. 4: 独自構成方程式の使用(Gursonモデルなど)

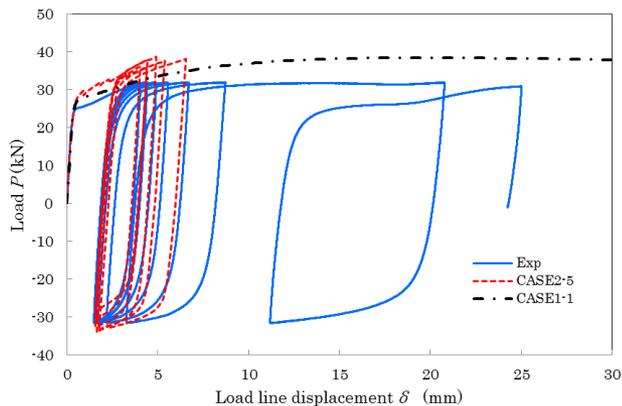
3.4 数値解析手法の基盤構築

FCG解析例(機関A)

有限要素メッシュ



荷重-荷重線変位

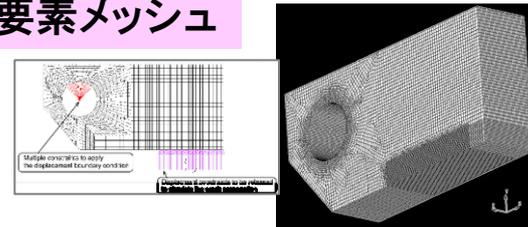


得られた知見

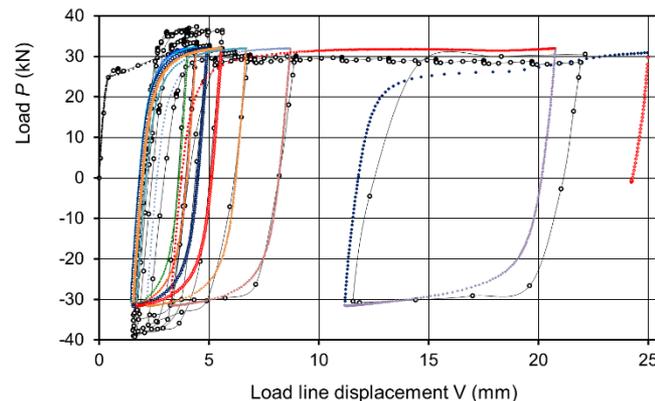
- 複合硬化則の適用が必要
- P- δ 線図の圧縮側面積も考慮した ΔJ と試験での亀裂進展量は、JSME維持規格大気中フェライト鋼の疲労亀裂進展線図に包絡

FCG解析例(機関B)

有限要素メッシュ



荷重-荷重線変位

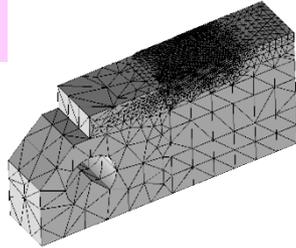


得られた知見

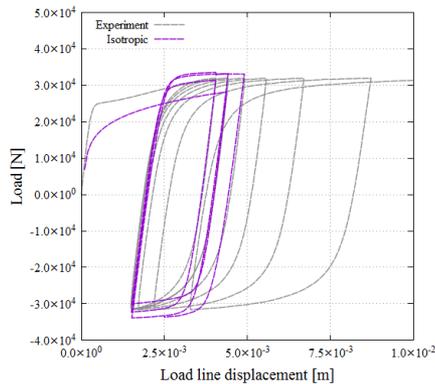
- 解析結果は初期亀裂長さに敏感で等方/移動動硬化の割合は0.75:0.25が適切
- 破壊力学パラメータとその計算手法に関する検討は概ね完了

FCG解析例(機関C)

有限要素メッシュ



荷重-荷重線変位

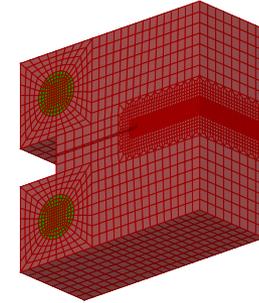


得られた知見

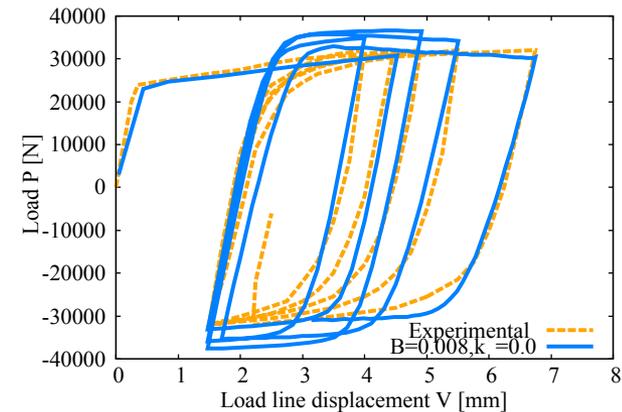
- 高精度解析には等方+移動硬化が適切で、荷重-荷重線変位は概ね実験結果を再現
- 四面体モデリングによる解析の可能性を示唆

FCG解析例(機関D)

有限要素メッシュ



荷重-荷重線変位



得られた知見

- 荷重-荷重線変位は実験と定量的に合わないが、亀裂進展挙動は定性的に再現
- 移動硬化の考慮が不要で、Gursonモデルを用いた解析手法の可能性を示唆

■数値解析手法の基盤構築活動で得た知見のまとめ

- 初期亀裂長さによる荷重変化の感度は大
- 複合硬化則が有効
 - ・特に等方硬化の寄与が大
 - ・材料パラメータ決定が多くの場合試行錯誤
- 損傷力学モデルを含め、複数の汎用FEMにおいて得た結果は概ね同様
- 四面体/六面体によるモデル化でも解析手法やモデル化の工夫により解析可能
- CT試験片の疲労亀裂進展の解析が可能となり破壊パラメータの調査が可能

まとめ

本小委員会では、複合荷重下の疲労や延性破壊に関する検討を実施してきた溶接協会 小委員会の成果に対し、試験や解析の成果を広く参照/活用できる形とするために研究成果調査を実施し、以下の活動を通じてそれらのデータや知見を収集/整理し、重要な知見としてデータベース化してWEBで一般公開した。

- ① 既往研究調査
- ② 繰返し複合荷重下での疲労および破壊評価に関する溶接協会小委員会の成果のまとめ
- ③ 繰返し複合荷重下での疲労および延性破壊に関するデータベースの構築
- ④ 繰返し複合荷重下での構造実耐力評価に関する数値解析手法の基盤構築

今後の展望

実構造物に対する大変形弾塑性域での数値解析手法の適用性検証