

疲労損傷部材の余寿命評価を目的とした対話型疲労亀裂進展解析プログラム

法政大学 ○梶原 仁、森 猛

1. はじめに 近年、荷重を繰返し受ける鋼構造物に疲労損傷事例が数多く報告されている。これらの損傷は、溶接による形状変化部などの応力集中が著しい箇所に疲労亀裂が生じたというものである。疲労亀裂が生じた場合には、亀裂の発生原因や進展性、亀裂が進展して部材が破断した場合の影響度などを考慮して、補修方法や補修時期が検討される。補修時期を合理的に判断する上で、疲労亀裂が進展して部材が破断するまで、あるいは補修不可能な亀裂長さとなるまでの寿命、すなわち余寿命を明らかにすることは不可欠である。余寿命の評価には破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展解析が有効とされている。しかし、この方法は煩雑なため、鋼構造物の維持管理に携わる一般の技術者が手軽に利用するには至っていないのが現状と考えられる。そこで、著者らは一般の技術者が疲労損傷部材の余寿命を正確かつ容易に予測できる対話型の疲労亀裂進展解析プログラムをパソコンをベースとして開発した。ここでは、プログラムの概要と使用例について報告する。

2. 疲労亀裂進展解析プログラム 本プログラムのフローチャートを図1に示す。以下これに従って、プログラムの内容を説明する。本プログラムは、入力プログラムと疲労亀裂進展解析プログラムに分けられる。入力プログラムでは、解析に必要とされる数値の入力を行う。入力に際しては選択した継手、検出された亀裂の形状などにより解析に必要とされる最少限の数値を入力するようにしている。

①解析対象は図2に示すような鋼構造物で代表的な8種類の継手の中から選ぶことができる。縦方向溶接継手については、継手内部のブローホールから生じる疲労亀裂の進展解析も可能である。②選択した継手の寸法の入力を行う。ここでは、継手の板厚、板幅、溶接の大きさなどの寸法を、画面表示にしたがって入力する。③応力拡大係数を計算するためには、亀裂形状、表面亀裂、有限板幅・板厚、応力集中に対する補正係数 F_e 、 F_s 、 F_t 、 F_g が必要となる。 F_e 、 F_s 、 F_t については、これまでの研究成果に基づき計算することとしている。 F_g については、その値を直接入力するかあるいは応力分布を入力する。継手によっては、 F_g の簡便式が与えられているものもあるのでそれを利用できるようにしている。④非破壊検査等により検出された亀裂の位置、形状、寸法を入力する。亀裂

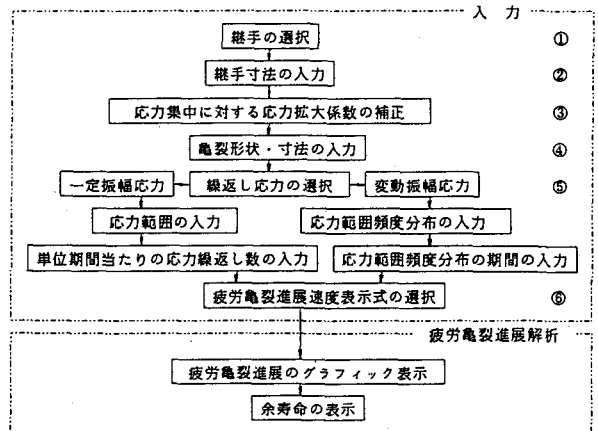


図1 プログラムのフローチャート

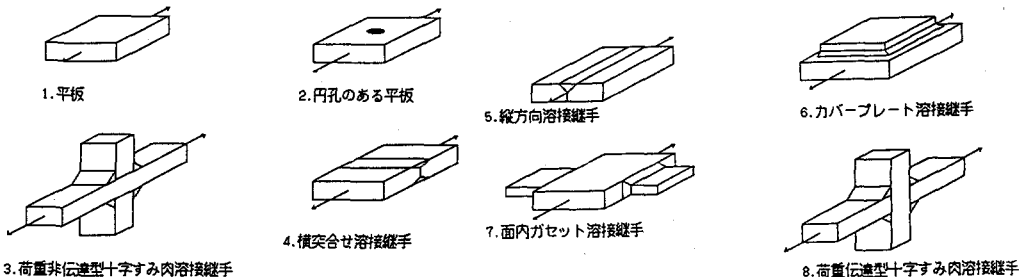


図2 対象とする継手

形状は、グラフィック画面上に表示されるいくつかの中から選択する。複数の亀裂を入力することも可能であり、最大5つまでの亀裂の進展を同時に解析できる。その際、亀裂の位置がグラフィック画面に表示され、入力値を確認することができる。

⑤一定振幅応力だけではなく変動振幅応力下での疲労亀裂進展も対象としている。一定振幅応力を選択した場合には、応力範囲の値と単位となる期間（1日、1月、その他）当りの応力繰返し回数を入力する。変動振幅応力を選択した場合には、応力範囲頻度分布データを、個々の応力範囲の大きさとその頻度を入力することにより与える。入力が終わると、応力範囲頻度分布がグラフ化され、視覚的に確認できるようにしている。そして、作成した応力範囲頻度分布に対応する期間を入力する。

⑥疲労亀裂進展速度 da/dN は応力拡大係数範囲 ΔK の関数として表わすこととし、以下の3つの関係を利用することができる。 $[da/dN = C (\Delta K)^m]$ $[da/dN = C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)]$ $[da/dN = C (\Delta K)^m (\Delta K > \Delta K_{th})、da/dN = 0 (\Delta K \leq \Delta K_{th})]$ ここで、 C 、 m は材料定数であり、 ΔK_{th} は下限界応力拡大係数範囲である。これらの3つの材料定数を入力することにより、疲労亀裂進展速度表示式を定義する。なお、最新の疲労に関する研究成果に基づいた日本鋼構造協会『鋼構造物の疲労設計指針・同解説』に示される値はメニュー形式で利用できるようにしている。

以上で入力終了し疲労亀裂進展解析が行われ、疲労亀裂の進展過程がグラフィック画面に表示される。これにより、視覚的に疲労亀裂の成長の様子を確かめられるようにしている。最後に余寿命が表示される。

3. プログラムの使用例（I断面鋼道路橋下フランジの余寿命予測） ここでは、I断面桁の垂直スチフナと下フランジのすみ肉溶接の下フランジ側に疲労亀裂が検出されたという仮定（図3参照）のもとに、下フランジの余寿命を本プログラムを用いて解析した例をグラフィック画面を利用して示す。なお繰返し応力としては建設省で行われた合成I桁橋の主桁下フランジでの24時間応力測定結果を利用する。

プログラムを実行すると、解析に必要な諸データの入力画面が以下の順序で表示されるので、画面の指示にしたがい必要な数値を入力する。

<画面1：解析対象とする継手の選択画面>スチフナとフランジの溶接部は、荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手とみなすことができるので、③を入力する。<画面2：継手寸法と応力集中に対する応力拡大係数の補正方法に関する入力画面>画面の指示にしたがい、必要な寸法を入力する。また、補正係数については簡便式を利用することとし、①を入力する。<画面3：検出された亀裂の形状の選択画面>条件より②を入力する。<画面4：亀裂の数および亀裂の寸法の入力画面>条件より亀裂の数を②と入力し、さらに1番目の亀裂の位置および表面での長さを入力する。その際、亀裂の位置が画面上に矢印で表示される。<画面5：2番目の亀裂の寸法の入力画面>画面の指示に従い必要な数値を入力する。<画面6：繰返し応力の選択画面>変動振幅応力を対象とするので、②を入力する。<画面7：応力範囲の入力条件>建設省で測定された応力範囲頻度分布に従い、応力範囲の区分数を24と入力する。個々の応力範囲の値は等間隔である

るので⑤と入力して、刻み幅と最大応力範囲を入力する。

<画面8：応力範囲頻度分布の入力画面>画面の指示にしたがい、各応力範囲の頻度を入力する。<画面9：応力範囲頻度分布の表示>入力した応力範囲頻度分布が棒グラフとして表示される。<画面10：応力範囲頻度分布に対応する期間の入力画面>24時間すなわち1日分のデータなので③を選択し、さらに①と入力する。<画面11：疲労亀裂進展表示式の選択画面>ここでは③を選択する。<画面12：疲労亀裂進展速度表示式における材料定数の入力画面>鋼構造協会疲労設計指針の最安全設計曲線である①

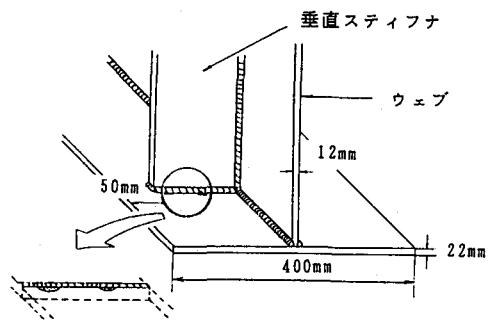
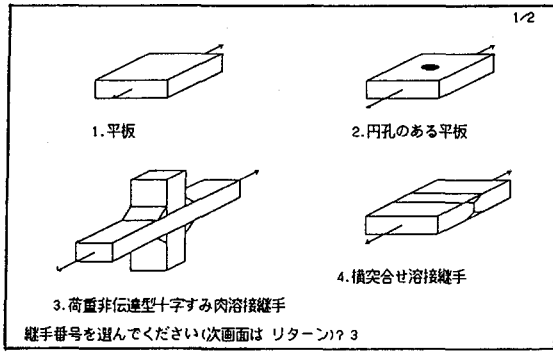
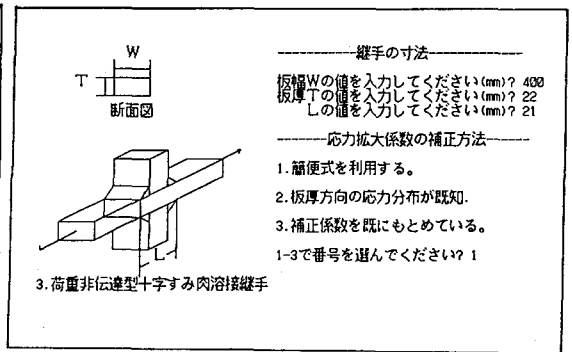


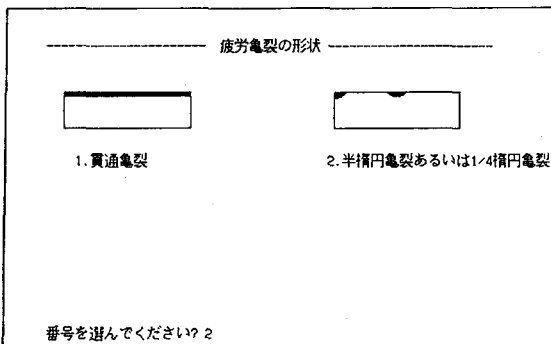
図3 解析対象とした疲労損傷



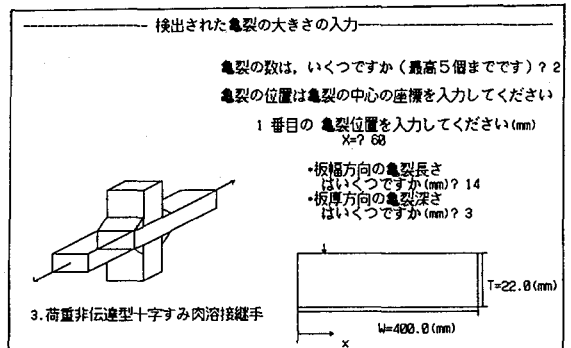
画面 1



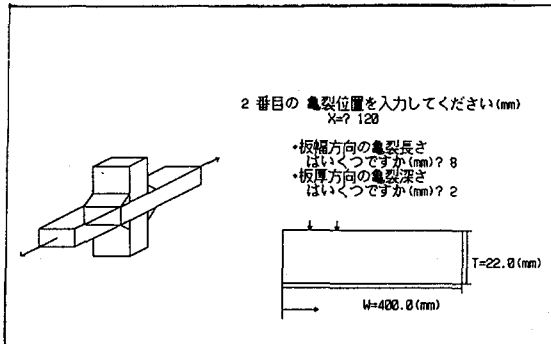
画面 2



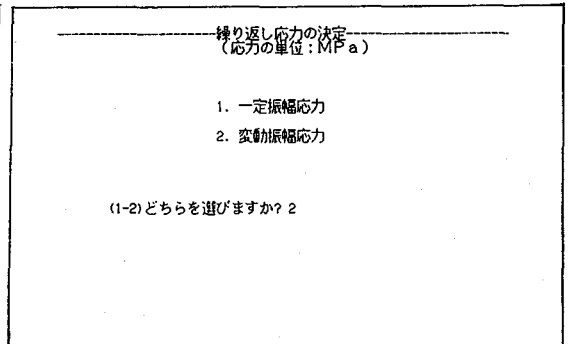
画面 3



画面 4



画面 5



画面 6

を選択する。以上で入力終了し、進展解析が実行される。その際、応力繰返し回数とそれに伴う疲労亀裂の成長が、画面 1 3 に示すようにグラフィック画面上に表示される。亀裂が成長し、限界値に達すると、画面 1 4 に示すように余寿命が表示され、計算を終了する。

4. おわりに 一般の技術者が疲労損傷部材の余寿命を正確かつ容易に評価するためのツールを提供することを目的として著者らが開発した疲労亀裂進展解析プログラムを紹介した。このプログラムはまだ開発段階であり、実務に適用するに当たってはさらに改良が必要と考えている。

-----応力範囲の入力(応力の単位(MPa))-----

応力範囲は、いくつに区分されていますか? 24

応力範囲の刻み幅は一定ですか(Y/N)? Y

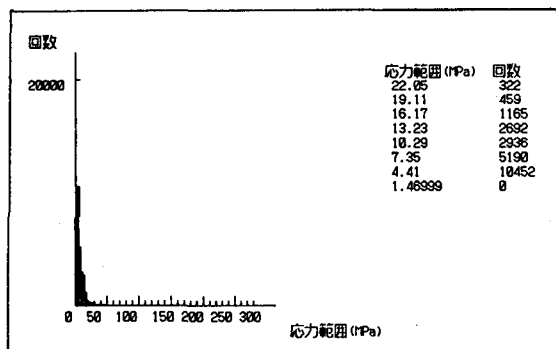
応力範囲の刻み幅はいくつですか? 2.94

一番大きい応力範囲(中央値)はいくつですか? 69.09

画面 7

応力範囲 (MPa)	回数	応力範囲 (MPa)	回数	応力範囲 (MPa)	回数
69.09	? 2	22.05	? 322		
66.15	? 4	19.11	? 459		
63.21	? 3	16.17	? 1165		
60.27	? 3	13.23	? 2692		
57.33	? 3	10.29	? 2936		
54.39	? 13	7.35	? 5190		
51.45	? 11	4.41	? 10452		
48.51	? 42	1.48999	? 0		
45.57	? 52				
42.63	? 57				
39.69	? 53				
36.75	? 55				
33.81	? 56				
30.87	? 91				
27.93	? 130				
24.99	? 203				

画面 8



画面 9

-----応力範囲頻度分布のの期間の入力-----

1.年 2.月

3.日 4.時

先ほど入力した応力範囲頻度分布に対応する期間を入力してください。まず期間の単位を番号で入力してください? 3

何日ですか? 1

画面 1 0

-----疲労亀裂進展速度表示式の選択-----

1. $da/dN = Cx(\Delta K)^m$

2. $da/dN = Cx(\Delta K - \Delta K_{th})^m$ (変動振幅応力では使用しない)

3. $da/dN = Cx(\Delta K)^m$ ($\Delta K > \Delta K_{th}$)

$da/dN = 0$ ($\Delta K \leq \Delta K_{th}$)

但し da/dN : mm/cycle ΔK : $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ です。

番号を入力してください? 3

画面 1 1

-----定数の決定-----

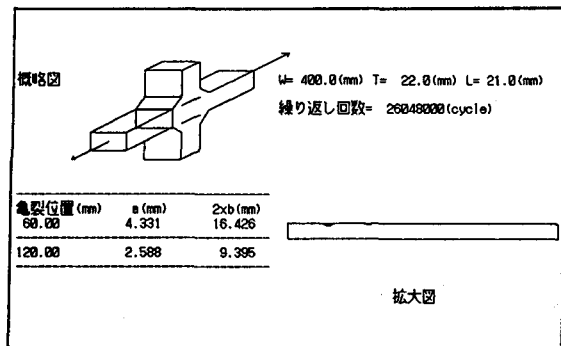
1. $C=2.7 \times 10^{(-11)}$ $m=2.75$ $\Delta K_{th}=2.0$ (JSSC 最安全設計曲線)

2. $C=1.5 \times 10^{(-11)}$ $m=2.75$ $\Delta K_{th}=2.9$ (JSSC 平均設計曲線)

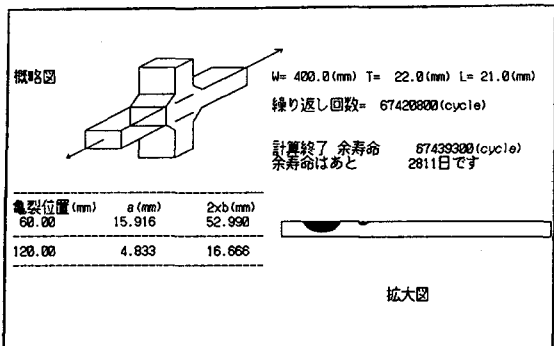
3. 新たに C, m の値を入力する。

番号を選んでください? 1

画面 1 2



画面 1 3



画面 1 4