鋼構造物の疲労によるき裂伝播解析に関する研究

川崎重工業（株）　真田　健司
岡山大学大学院　学生員　○森脇　清明
岡山大学工学部　正会員　谷口　健男

1．まえがき　近年、海洋構造物・橋梁など供用中に多くの繰り返し荷重を受ける構造物において、疲労によると思われるき裂の発生が報告されるようになってきた。そのため、疲労き裂に対する設計・製作上の考慮・対策といったものの見直しが行われ始めている。本研究は、既に筆者らの報告に基礎を置いたものであって、あらたに、一定振幅荷重及び変動重複荷重下の疲労寿命推定法を提案し、その妥当性の検討を行う。なお、ここで示した方法は、線形破壊力学の応用であり、従って小規模降伏状態を仮定する。

2．疲労き裂伝播解析ｼｽﾃﾑ　本解析ｼｽﾃﾑの目的は、初期き裂長a_0からあるき裂長aまで成長するのに必要な荷重繰り返し回数（時間）、あるいは、使用期間tが与えられたときのき裂の進展量を求めることである。本解析ｼｽﾃﾑを適用するときのｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑを図1に示す。その中で、応力拡大係数の算定法とき裂進展方向の予測法については、理論的検討、および数値実験より、次の手法を用いる。

① 有限要素法を基礎とする実用的な応力拡大係数の算定法として変位法を用いる。ただし、変位法を用いて解析を行う場合の有限要素ﾓﾃﾞﾙ設定は注意する必要がある。

② き裂進展方向の予測法としては、き裂先端の周方向直応力最大の方向を用いる。

次に、一定振幅荷重下の疲労寿命推定法について考える。疲労き裂伝播速度式として、疲労き裂伝播速度（da/dN）と応力拡大係数範囲$\Delta K(=K_{max}-K_{min})$の関数であるﾊﾟﾘｽ則が成立する。また、$\Delta K_{th}$（下限界応力拡大係数範囲）を考慮する場合ﾊﾟﾘｽ則が成り立つ領域が、き裂の安定成長領域であることを考慮し、ﾊﾟﾘｽ則を変形した式(1)を使用する。ただし、材料定数であるCとmは厳密に設定する必要がある。

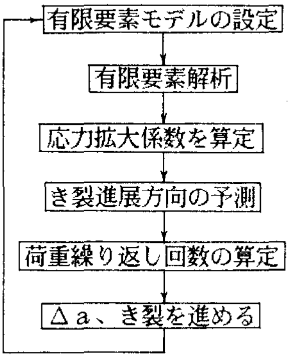

図1　き裂伝播解析の手順

$$\frac{da}{dN}=\begin{cases} C(\Delta K)^m & \Delta K>\Delta K_{th} \\ 0 & \Delta K\leqq\Delta K_{th} \end{cases} \qquad (1)$$

寸法a_iのき裂が寸法a_fにまで進展するのに要する疲労寿命N_pは式(1)を変数分離して積分することにより式(2)のように求まる。さらに、荷重繰り返し数N_iからN_fまでのき裂進展量a_pは式(3)で求まる。

$$N_p=\int_{a_i}^{a_f}\frac{1}{C(\Delta K)^m}\,da \qquad (2)$$

$$a_p=\int_{N_i}^{N_f}C(\Delta K)^m\,dN \qquad (3)$$

式(1)は、き裂長aのとき成り立っている。もし、き裂がある増分Δaだけ進展した場合ΔKもΔaに従って変化する。有限要素法を基礎とする場合、このき裂長と応力拡大係数の関係をﾓﾃﾞﾙ化する必要がある。ここでは、ﾓﾃﾞﾙの全幅に対してき裂長が短い場合、この関係はほぼ線形であることに注目し以下のようにﾓﾃﾞﾙ化を行う。き裂長がa_nからa_{n+1}まで進展する区間は、平均き裂長$(a_n+a_{n+1})/2$をこの区間のき裂長aとし、その長さに対する平均応力拡大係数値$(K_n+K_{n+1})/2$をこの区間のK値とする。この仮定により、連続

的な挙動をFEMに適した段階的解析に置換することが可能となる。これを式(2)に適用し、繰り返しき裂をΔaずつ進展させる度にき裂解析を行う。そして、進展するのに必要な荷重繰り返し数を算定することにより、一定振幅荷重下の疲労寿命推定が行える。

さて、変動重複荷重下において、式(1)を利用し、疲労き裂伝播解析を行う際の問題点は、ΔKの評価法にあり、具体的には、活荷重のﾓﾃﾞﾙ化をいかに行うかということである。ここでは、活荷重を数ﾌﾞﾛｯｸに分割して取り扱うBLOCK法とm乗平均を用いるRMM方が、実用上利用しやすいという結果を得た。これを、簡単に説明する。いま、$\Delta\sigma_i$：1ﾌﾞﾛｯｸ内の第iｽﾃｯﾌﾟ応力範囲、n_i：第iｽﾃｯﾌﾟの繰り返し数、$\Delta K_{\sigma=1}$：考慮しているき裂長に対応する領域に単位荷重を載荷することにより得られる応力拡大係数幅、とすれば、BLOCK法のΔKは次式のように算定される。

$$\Delta K = \Delta\sigma_i \times \Delta K_{\sigma=1} \qquad (4)$$

式(4)により各ﾌﾞﾛｯｸごとに求めたΔKを、ΔK_{th}を考慮して、式(3)に代入しn_iに対応するき裂進展量を算定する。一方、RMM法とは、1ﾌﾞﾛｯｸ内の等価なΔKを算定する方法である。次式により等価なΔKは算定される。

$$\Delta K_{eq(m)} = \left(\frac{\Sigma n_i (\Delta\sigma_i \cdot \Delta K_{\sigma=1})^m}{\Sigma n_i} \right)^{\frac{1}{m}} \qquad (5)$$

式(5)により、求まった$\Delta K_{eq(m)}$を式(2)に代入し、Δaに対する荷重繰り返し数を算定する。なお、m=2とした場合、2乗平均を用いるRMS法となる。ここで、活荷重をﾌﾞﾛｯｸ荷重として扱う場合に何ｽﾃｯﾌﾟに分割するかは結果に大きな影響を及ぼし、最低でも10ｽﾃｯﾌﾟ以上が必要であることが数値実験より得られた。

3．適用例

1例として、中央き裂入り帯板試験片を対象として、変動重複荷重下での疲労き裂伝播挙動を本手法を用いて考察する。なお、疲労試験結果は文献1)に示され、そこでは、荷重条件として、表1に示すようなﾌﾞﾛｯｸ荷重を想定している。また、荷重は 10,15,20kg/mm²の3応力ﾚﾍﾞﾙとし、出現順序はﾗﾝﾀﾞﾑであり、それぞれの応力の出現頻度は、ほぼ100:10:1とした。さらに、1ﾌﾞﾛｯｸ内でのﾗﾝﾀﾞﾑｻｲｸﾙの長さは、666ｻｲｸﾙとしている。

表1　ブロック荷重

111 cycles		1110 cycles		11100 cycles	
σ(kg/mm²)	N(回数)	σ(kg/mm²)	N(回数)	σ(kg/mm²)	N(回数)
10.0	100	10.0	1,000	10.0	10,000
15.0	10	15.0	100	15.0	1,000
20.0	1	20.0	10	20.0	100

さて、本解析では解析ﾓﾃﾞﾙを図2に示すような1/4ﾓﾃﾞﾙで与え、荷重は総繰り返し数が、111のﾌﾞﾛｯｸ荷重とした。材料定数 $C=6.40\times10^{-13}, m=4.0$ として解析した結果を図3に示す。本解析結果は、ﾗﾝﾀﾞﾑ荷重と総繰り返し数111回のﾌﾞﾛｯｸ荷重下で求められるき裂進展曲線よりも外側にきている。これは、Cとmの設定に厳密性を欠いたためと考えらえる。

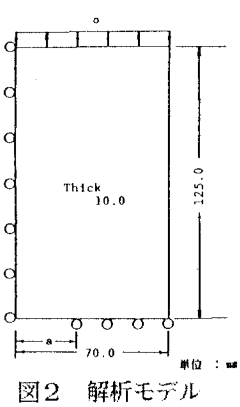

図2　解析モデル

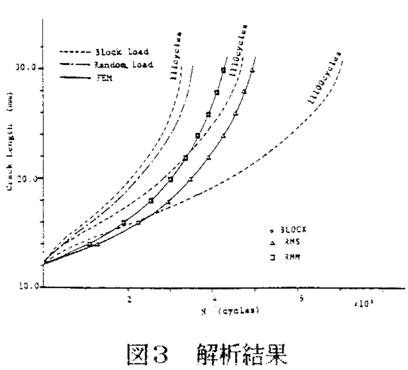

図3　解析結果

4．結論

本解析の疲労き裂伝播解析ｼｽﾃﾑは、単純な鋼構造物に適用可能であることが分かった。しかし、材料定数Cとmの設定には注意を要すると言える。

〈参考文献〉1)　岩崎紀夫、加藤照彦、川原正言：ﾗﾝﾀﾞﾑ荷重下での疲労き裂伝播(第4報)：日本造船学会春季講演会において講演、pp268-278、1981、5