

圧縮荷重作用時に生じる初期欠陥面閉口挙動を考慮した疲労亀裂伝播解析

高木, 芳史
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 : 博士後期課程

後藤, 浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

<https://hdl.handle.net/2324/4794492>

出版情報 : Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 26, pp.131-143, 2017-12. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

バージョン :

権利関係 :



圧縮荷重作用時に生じる初期欠陥面閉口挙動を 考慮した疲労亀裂伝播解析

学生会員 高 木 芳 史* 正会員 後 藤 浩 二**

Numerical Simulation of Fatigue Crack Propagation Considering Closure of Initial Defect Surfaces under Compressive Loading

by Yoshifumi Takaki, *Student Member* Koji Gotoh, *Member*

Summary

Numerical simulation method for the fatigue crack propagation in the case that the initial defect surface closes by the compressive loading is proposed. Previous fatigue crack opening / closing model based on the strip yield model proposed by Toyosada et al. is improved to consider the closure effect on the initial defect surfaces. This improved numerical simulation procedure for the fatigue crack propagation was verified by comparing with measured fatigue crack propagation histories under various superimposed stress histories.

In addition, numerical case studies were performed to investigate the influence of appearance degree of superimposed stress for the fatigue crack propagation history by applying our improved numerical simulation procedure. These simulation results are suggested that safe side evaluation for the fatigue crack propagation could be obtained by replacing the superimposed stress into the stress with enveloping the superimposed stress.

1. 緒 言

疲労亀裂に特有の亀裂開閉口挙動を定量的に考慮して疲労亀裂伝播履歴を推定する手法として、亀裂結合力モデルに基づく数値モデルがNewman¹⁾により提案された。その後Toyosadaら²⁾により、繰返し载荷中の除荷弾性挙動を考慮できるようにモデルが改良された。また Toyosadaらは、亀裂先端近傍の繰返し塑性挙動に基づくRPG (Re-tensile Plastic zone Generating) 荷重²⁾の概念と、亀裂先端近傍で疲労亀裂進展の駆動源となる塑性仕事が生じる荷重範囲に対応する有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} をパラメータとした疲労亀裂伝播則を提案し、前述の疲労亀裂開閉口モデルに基づく数値シミュレーションに実装することで、種々の応力比を有する一定荷重振幅履歴、二段ブロック荷重やスパイク荷重、嵐モデル荷重³⁾といった変動荷重履歴条件下でも疲労亀裂伝播履歴を良好に推定できることを示している²⁾。近年、船舶や海洋構造物の分野では、設計外力として考慮している波浪変動外力にwhippingやspringingにより発生する弾性振動が重畳

した、複数周波数成分を有する载荷履歴条件下（以下、重畳応力履歴条件と称する）での疲労損傷に注目が高まっており、多くの研究成果^{4)~12)}が報告されている。

著者の一人らは重畳応力履歴条件下における疲労亀裂伝播挙動の推定を目標として、上述の疲労亀裂開閉口モデルと ΔK_{RPG} をパラメータとした疲労亀裂伝播則に基づくToyosadaらの数値解析手法を活用した研究を進めている。重畳応力履歴問題では、Raniflow法¹³⁾のサイクルカウントのように、全応力履歴から疲労亀裂の成長に寄与する応力履歴（以降、有効応力履歴と称する）を抽出し、この応力履歴条件下で疲労亀裂伝播解析を行えばよいと考えられる。この考え方に立脚し、著者の一人ら¹⁴⁾¹⁵⁾は重畳応力履歴から有効応力履歴を抽出するアルゴリズムを提案し、これを疲労亀裂伝播シミュレーションに実装することで、複数の重畳応力履歴条件下において比較的良好に疲労亀裂成長履歴を推定できることを示している。

しかしながら前述の検討¹⁴⁾¹⁵⁾では、平均応力が低い応力履歴条件において、疲労亀裂成長履歴の推定精度が劣ることも確認された。この原因として、採用している亀裂開閉口モデルでは、初期欠陥部は有限の開口量を有する切欠きのな取扱いがなされており、過大な圧縮応力が外力として作用する場合でも初期欠陥部が閉口しない、すなわち初期欠陥部が圧縮の外力を全く受け持てないとしていることが影響を及ぼしている可能性が挙げられる。一方、whippingやspringingが重畳した荷重履歴では、特にその初期段階において過大な圧縮

* 九州大学 大学院工学府 建設システム工学専攻
博士後期課程

** 九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

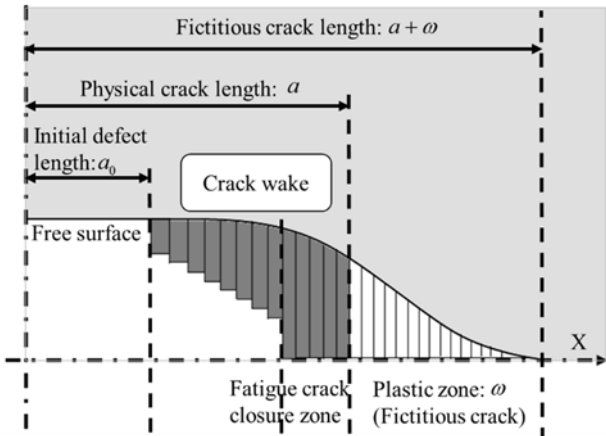
の外力が作用する可能性があるため、実機の疲労亀裂成長評価においては考慮すべき現象である。また、平均応力が低い重畳応力履歴の場合は、最大の圧縮外力が負の値をとり絶対値が大きい場合もあり得る。したがって、より広範囲の荷重履歴に対して疲労亀裂伝播挙動の推定精度を向上させるためには、初期欠陥部も圧縮の外力を受け持てるようにモデルを改良することが必要であると考えられる。

本研究では、初期欠陥面が接触する場合にも対応できるように亀裂開閉口モデルを拡張し、平均応力の低い荷重条件、平均応力が変動する条件、whipping荷重履歴を模擬した荷重条件等において疲労亀裂伝播解析を実施し、実測結果との比較を実施した。また、全荷重履歴中の一部期間においてのみ重畳応力履歴が間欠的に作用する場合の疲労亀裂伝播挙動に関して数値シミュレーションによる検討も実施した。

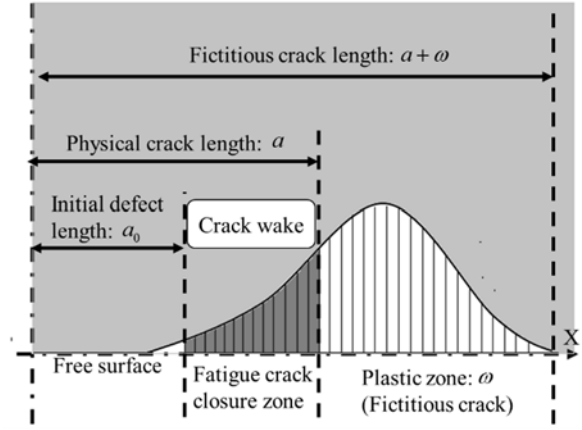
2. 初期欠陥面の閉口現象を考慮できる 疲労亀裂開閉口モデル

1.で述べた亀裂結合モデルに基づく疲労亀裂開閉口モデルでは、亀裂先端に形成される塑性域に相当する仮想亀裂部及び疲労亀裂進展に伴い亀裂面に取り込まれた残留引張変形層を、一次元の棒要素で表現することで亀裂開閉口現象を考慮している (Fig. 1 参照)。Fig. 1 に示す有限のゲージ長さを有する棒要素は初期欠陥部を除く実亀裂内面領域と塑性域 (仮想亀裂面) に配置した。なお、実亀裂と塑性域の境界付近と仮想亀裂先端付近にはより幅が細い棒要素を配置している。

本研究では、従来のモデルにおいてゲージ長さ 0 の棒要素を初期欠陥部 (下図中の Initial defect 部) にも配置することで、初期欠陥面が閉口する部分でも圧縮の外力を受け持てるように改良した。また、従来モデルにおいて棒要素に生じる応力を与える式を (1) 式に、改良モデルにおける応力の式を (2) に示す。



(a) Maximum loading condition.



(b) Minimum loading condition.

Fig. 1 Improved strip yield model, which can consider initial defect closure.

$$(\sigma_B)_j = \left[P_{\min} \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} - \left\{ \sum_{i=1}^{j-1} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) + \sum_{i=j+1}^{NBAR} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} - L_j \right] / \left\{ \frac{L_j}{E'} + F_B(x_j, x_j, c) \right\} \quad (1)$$

$$(\sigma_B)_j = \left[P_{\min} \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} - \left\{ \sum_{i=1}^{j-1} (\sigma_B)_i F_{AB}(x_j, x_i, c) + \sum_{i=j+1}^{NFA+NBAR} (\sigma_B)_i F_{AB}(x_j, x_i, c) \right\} - L_j \right] / \left\{ \frac{L_j}{E'} + F_{AB}(x_j, x_j, c) \right\} \quad (2)$$

$$j=1 \sim NFA \text{ (初期欠陥面のとき)} \quad L_j=0 \quad (3)$$

実亀裂面内 (初期欠陥面も含む)

$$(\sigma_B)_j > 0 \text{ のとき } (\sigma_B)_j = 0 \quad (4)$$

$$(\sigma_B)_j < -\lambda\sigma_Y \text{ のとき } (\sigma_B)_j = -\lambda\sigma_Y \quad (5)$$

仮想亀裂面内

$$(\sigma_B)_j > -\lambda\sigma_Y \text{ のとき } (\sigma_B)_j = \lambda\sigma_Y \quad (6)$$

$$(\sigma_B)_j < -\lambda\sigma_Y \text{ のとき } (\sigma_B)_j = -\lambda\sigma_Y \quad (7)$$

ここで、

$(\sigma_B)_i$ 最小荷重時に棒要素 (要素番号 i) に作用する応力、

$(\sigma_{SA})_i$ 初期欠陥面 (位置 x_i) における単位外荷重による応力

$(\sigma_{SB})_i$ 実亀裂面 (進展部分) と仮想亀裂面 (位置 x_i) における単位外荷重による応力

$F_A(x_j, x_i, c)$ 初期欠陥面 (位置 x_i) に単位荷重が作用した時の、位置 x_j の開口変位、

$F_B(x_j, x_i, c)$ 実亀裂面 (進展部分) と仮想亀裂面 (位置 x_i) に単位荷重が作用した時の、位置 x_j の開口変位、

$F_{AB}(x_j, x_i, c)$ 初期欠陥面、実亀裂面及び仮想亀裂面全体を考えた場合に、位置 x_i に単位荷重が作

NFA : 用した時の全亀裂面 (位置 x_j) の亀裂開口変位,
 $NBAR$: 初期欠陥面に配置した棒要素本数,
 λ : 実亀裂面 (亀裂進展部分) と仮想亀裂面の棒要素本数,
 L_j : 塑性拘束係数,
 L_j : 位置 x_j における棒要素長さ (ゲージ長),
 である.

改良モデルの妥当性検証のため, 1 サイクル中 (平均荷重 → 最大荷重 → 最小荷重, の順序で载荷) の最小荷重段階における亀裂線上応力分布と亀裂開口変位について, 改良モデルに基づく数値解析結果を弾塑性 FE 解析の結果と比較した. 弾塑性 FE 解析には汎用非線形 FE 解析コード MSC Marc 2015¹⁶⁾を用いた. 解析条件を Table 1 に示す.

Table 1 Analysis conditions.

Specimen type:	CCT specimen
Specimen width (W) [mm]:	50.0
Half crack length (a) [mm]:	12.5, 25.0, 37.5
Number of nodes and elements in FE analysis:	216644, 215444
Yield stress (σ_Y) [MPa]:	300
Plastic constraint factor (λ):	1.12
Young's modulus (E) [MPa]:	206000
Applied net stress range ($\Delta\sigma_{net}$):	$\sigma_Y (=300 \text{ MPa})$
Stress ratio (R):	-1.0

Fig. 2 は亀裂線上の応力分布の比較結果である. Fig. 3 に示した弾塑性 FE 解析結果は, 亀裂線上付近の FEM モデルの要素中心の値の二点間を亀裂位置まで外挿した値である.

初期欠陥面で圧縮の外力を受け持てない従来モデルによる結果 (□印) と FE 解析結果 (●印) を比較すると, 従来モデルでは初期欠陥面で圧縮外力を受け持てないため亀裂前方でより多くの圧縮外力を受け持つ必要が生じ, 結果としてより大きな塑性域が形成されている.

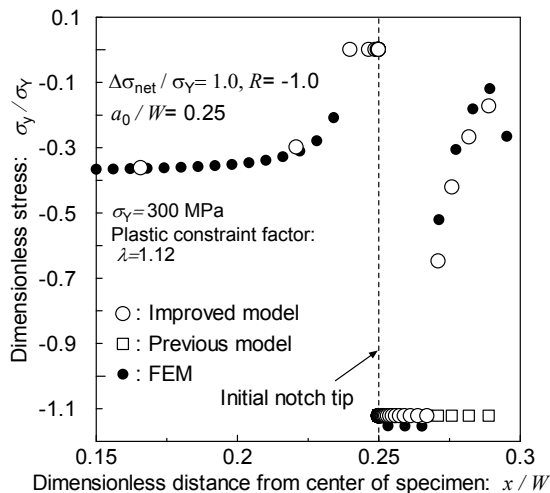


Fig. 2 Dimensionless stress distribution along a crack line.

一方, 改良モデルによる結果 (○印) と FE 解析結果 (●印) を比較すると, 初期欠陥面でも圧縮外力を受け持つことができるため, 塑性域寸法や亀裂前方の除荷弾性領域の応力も両者で良好に一致している.

Fig. 3 は亀裂開口変位の比較である. 同図中に▲印で示している物理量は, 著者の一人らにより検証された当該位置における亀裂線垂直方向塑性ひずみ成分の積分量であり, 亀裂結合力モデルで与えられる仮想亀裂部の開口量に相当するものである¹⁷⁾.

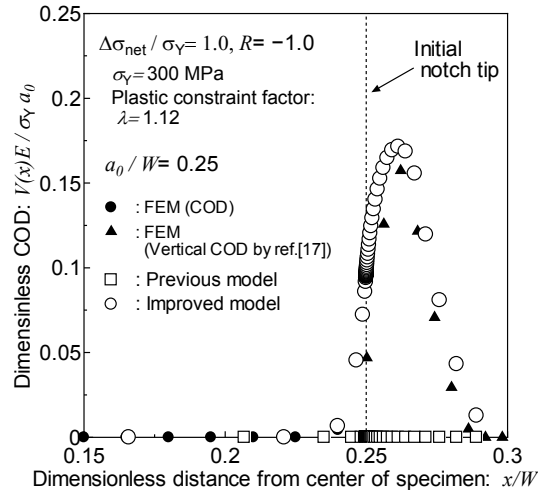


Fig. 3 Comparison of the notch opening displacements at the minimum stress using an improved SYM and FEM.

Fig. 3 の結果より, 実亀裂面で圧縮外力を受け持てるように改良したモデルでは, 従来モデルで表現できていなかった仮想亀裂部の開口変位に関する計算精度も向上していることが確認できる. 以上の結果, 初期欠陥面が閉口する場合に圧縮外力を初期欠陥面でも受け持てるように改良したモデルを用いることで, 亀裂線上応力分布の推定精度が向上したことが確認できた.

3. 初期欠陥面の亀裂閉口挙動を考慮した疲労亀裂伝播解析

3.1 負の応力比を有する一定応力振幅条件下の場合

2.で述べた, 初期欠陥面でも圧縮外力を受け持てるように改良した疲労亀裂開閉口モデルを疲労亀裂開閉口シミュレーションコードに実装させ, 負の値を含む複数の応力比を有する一定荷重振幅条件下における疲労亀裂伝播解析を実施した. ここでも 2.で設定した CCT 試験片を想定し, 初期欠陥半長 (a_0) のみ $a_0/W=0.25$ と設定し, その他の条件は Table 1 に従った. Fig. 4 は解析により得られたサイクル数 (N) と疲労亀裂伝播長 (a) の関係である. 改良モデルに基づく数値シミュレーションにより得られた N と a の関係は, 応力比が負の条件下に従来モデルを用いた数値シミュレーション結果の $N=2.0 \times 10^4$ 回付近で生じた不自然な挙動を示すこ

となく、滑らかな成長挙動を示している。また、応力比 (R) が 0 の場合は初期欠陥面が圧縮外力を受け持たないため、従来モデルと改良モデルの計算結果は完全に一致している。

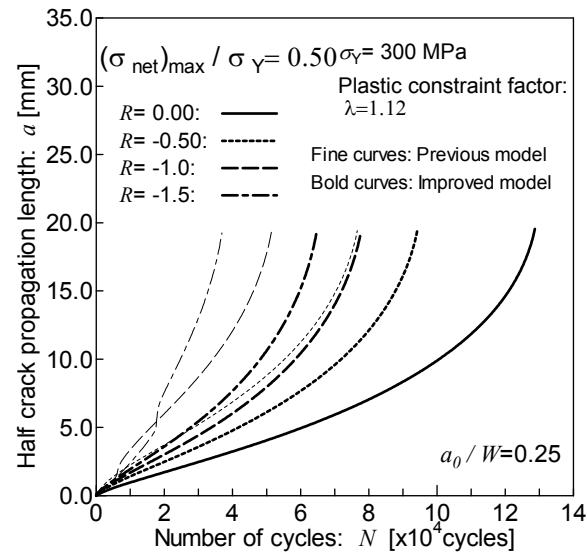
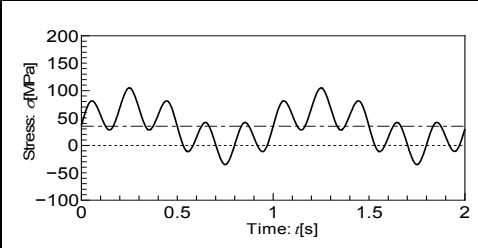


Fig. 4 Crack growth curves under constant amplitude loading with different stress ratios.

3.2 圧縮の重畳応力が作用する場合

載荷履歴中の一部で圧縮外力が作用する重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播挙動に関して、本研究で提案する疲労亀裂伝播シミュレーションを用いて検討した。検討に用いた重畳応力履歴を含むすべての解析条件は、著者の一人ら¹⁵⁾が過去に実施した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験と同様である。重畳応力履歴を Table 2 及び Table 3 に示す。試験の詳細は文献¹⁵⁾を参照していただきたい。解析対象とした試験片形状は Fig. 5 に示す。なお、文献¹⁵⁾に示された疲労亀裂伝播試験でも、Fig. 5 と同形状の試験片が採用されている。

Table 2 Applied loading conditions¹⁵⁾.

Test ID	Amplitude [MPa]		Mean [MPa]
	High	Low	
Sa4t_L	±35	±35	35
			

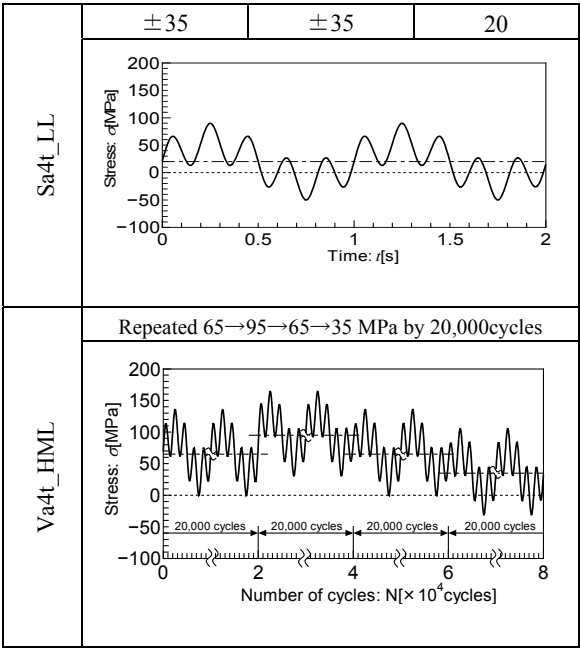


Table 3 Applied loading conditions 2¹⁵⁾.

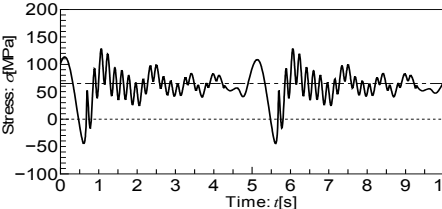
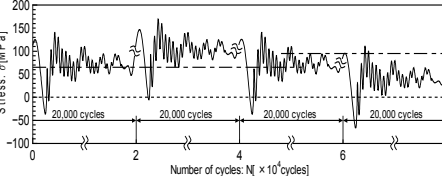
Test ID	Max. amplitude [MPa]		Mean [MPa]
	Upper (+)	Lower (-)	
	70	110.9	65
Ra4tD_M			
	Repeated 65→95→65→35 MPa by 20,000cycles		
Ra4tD_HML			

Table 4 Material constants of fatigue crack.

C	1.932×10^{-10}
m	2.091

本研究では ΔK_{RPG} をパラメータとした疲労亀裂伝播則 ($da/dN=C(\Delta K_{RPG})^m$, K 値の単位は $\text{MPa m}^{1/2}$, 疲労亀裂伝播速度の単位は m/cycle)を採用しており、材料定数 C , m を Table 4 に示す¹⁵⁾.

Fig. 6 に本研究で提案する解析手法、初期欠陥面の閉口現象を無視した従来手法及び実測された疲労亀裂伝播量 (Δa) とサイクル数 (N_L) の関係を示す。ここでサイクル数は低周

波応力成分のサイクル数を意味する。

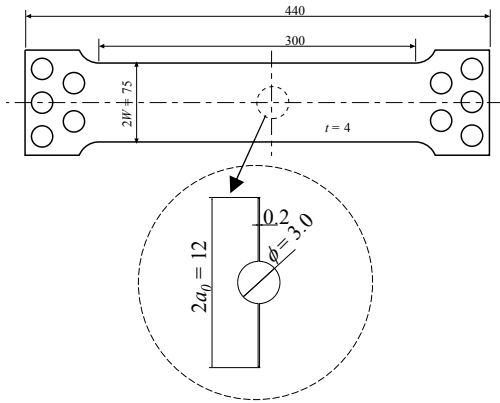
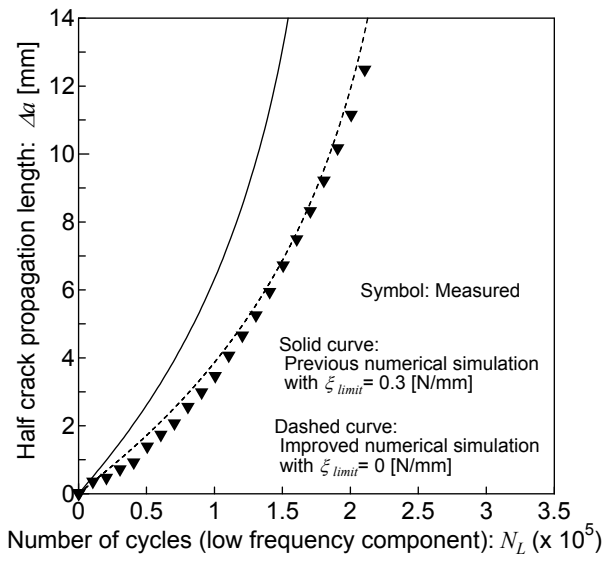
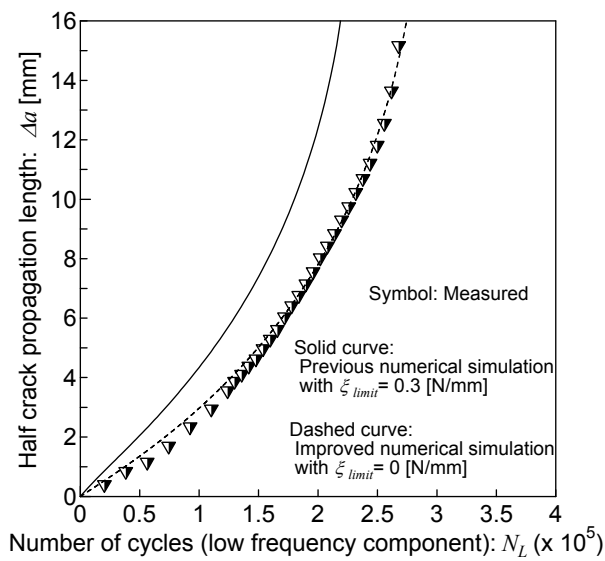


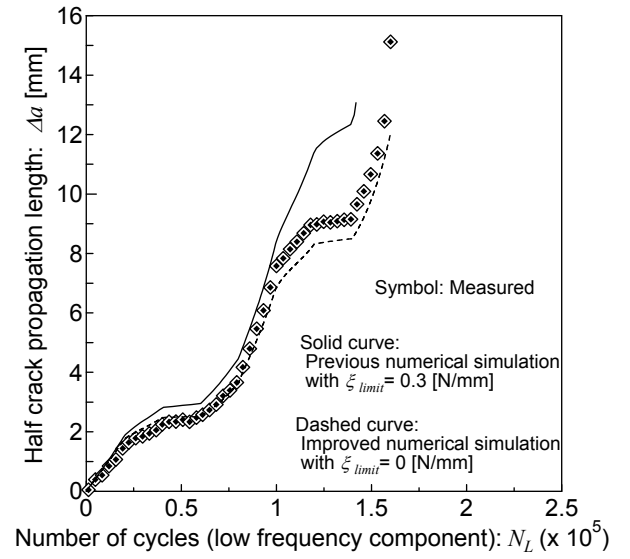
Fig. 5 Specimen configuration used.



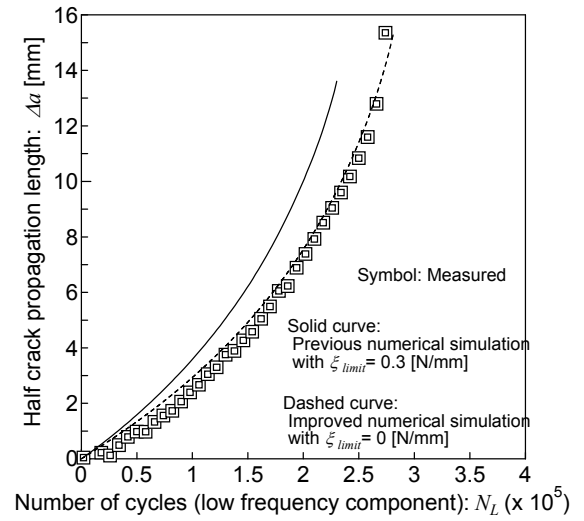
(a) Sa4t_L



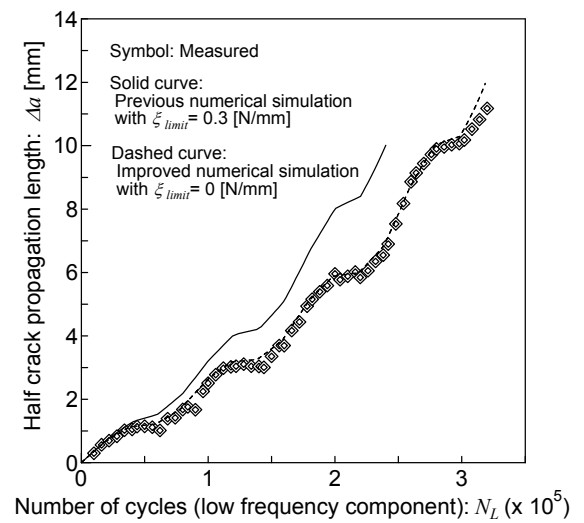
(b) Sa4t_LL



(c) Va4t_HML



(d) Ra4tD_M



(e) Ra4tD_HML

Fig. 6 Comparison of measured crack growth curves with estimated ones under variable loading sequences.

初期欠陥面の閉口現象を考慮するとき、著者の一人らが提案した、重畳応力条件下において疲労亀裂伝播に有効な応力履歴抽出アルゴリズム¹⁴⁾の中で導入された有効応力履歴抽出パラメータ（亀裂先端近傍の両振塑性仕事量に相当）の下限界値 ζ_{limit} を、従来の設定値である $\zeta_{limit}=0.3$ [N/mm]から、物理現象として本来あるべき値である $\zeta_{limit}=0$ [N/mm]に変更すると、実験値と推定値は良好な一致を示した。この結果は、既報の有効応力履歴抽出手法が適切な物理的意味を有する手法であることを示唆するとともに、初期欠陥面の閉口現象を考慮する必要性も示唆している。

4. 間欠重畳応力条件下における疲労亀裂伝播挙動

4.1 各応力期間を変更した間欠重畳応力条件下の場合

船舶や海洋構造物で whipping や springing が生じる場合、これは時間の経過とともに減衰するため、複数周波数成分を有する重畳応力状態は全載荷履歴中の一部区間においてのみ生じ、残りの期間は波浪変動外力のみが作用している。このように、全載荷履歴中の一部において重畳応力が生じる場合（以降、これを間欠重畳応力状態と称する）、重畳応力状態が生じている期間の程度により、疲労寿命が異なることが指摘されている^{10)~12)}。

そこで、本研究で提案した数値シミュレーション手法を用いて、疲労亀裂伝播挙動に及ぼす間欠重畳の程度の影響に関する数値検討を実施した。Fig. 7, Fig. 9, Fig. 11, Fig. 13 に示す試験対番号の S3-3 は波形識別名である。文献¹¹⁾によると、一次波（低周波） n_s 回分の重畳波系とそれに続く n_c 回の定振幅波形の組み合わせを荷重セットと称している。また、 n_s+n_c を荷重セット総サイクル数 n_{total} と称する。波形識別名に続く 2 桁の数字は $n_s/n_{total} \times 100$ を表し、これに続く 1 桁の数字は試験体番号を意味する。

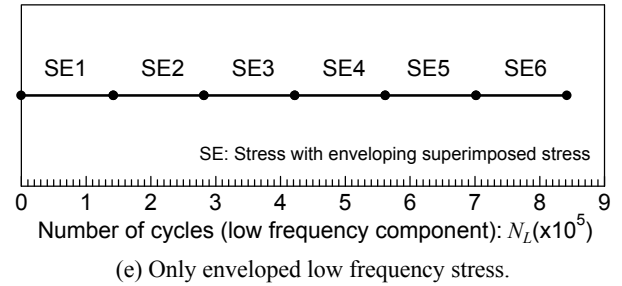
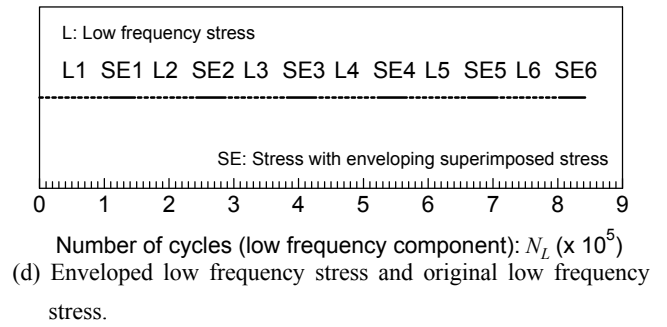
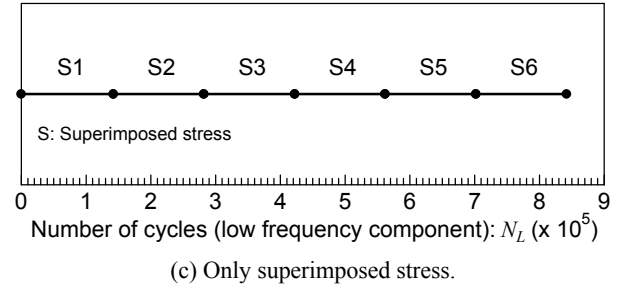
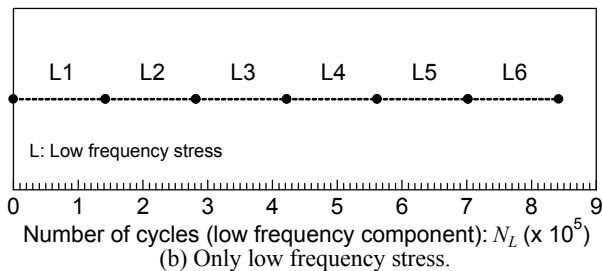
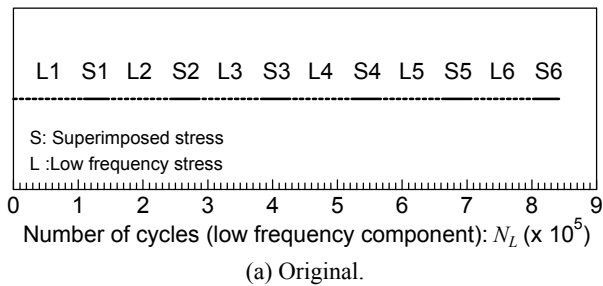


Fig. 7 Applied loading conditions (Test ID: S3-3_25_2_1).

初期欠陥半長 $a_0=1.5$ [mm] の板厚貫通亀裂を有する無限平板に複数の間欠重畳応力履歴が作用した場合の疲労亀裂伝播解析を実施した。設定した荷重履歴を Fig. 7 (a) ~ (e) に示し、その概要を以下に記す。

- 間欠重畳応力履歴を付与した疲労試験¹⁰⁾¹¹⁾で適用された荷重履歴である。以下の (b) ~ (e) は (a) を基準として重畳応力作用期間等を適宜変更させたものである。なお、応力履歴シリーズ (a) ~ (e) の ID は文献¹⁰⁾で履歴 (a) に相当するものの表記と一致させている。
- 荷重履歴 (a) において、低周波応力の作用期間 (L_i) を重畳応力の作用期間 (S_i) まで延長し、低周波応力成分のみが作用すると設定した。
- 荷重履歴 (a) において、重畳応力の作用期間 (S_i) を低周波応力の作用期間 (L_i) まで延長し、重畳応力成分のみが作用すると設定した。
- 荷重履歴 (a) 中の重畳応力作用区間において、これを包絡する波形（以降、包絡波と称す）を作成し、区間ごとに最大荷重の包絡線の最大値と最小荷重の包絡線の最小値を抽出し、これらを低周波成分と同じ周波数の一定応力振幅履歴として作用させたもの。本論文で「包絡波」と称する場合は、この場合と同様の意味である。

(e) 荷重履歴 (d) で作成した包絡波が全期間で作用するとしたもの。

Fig. 7中の低周波応力成分作用期間 L_i 及び重畳応力作用期間 S_i に付与した応力波形を、それぞれ Fig. 8 に示す。参照した疲労試験¹⁰⁾¹¹⁾では、4種類の負荷パターンが与えられたため、他3種類の条件に対しても Fig. 7と同様に、元の荷重履歴を (a) として (b) ~ (e) に相当する荷重履歴を生成し、疲労亀裂伝播解析を実施した。生成した荷重履歴について、Fig. 9~Fig. 14 に示す。

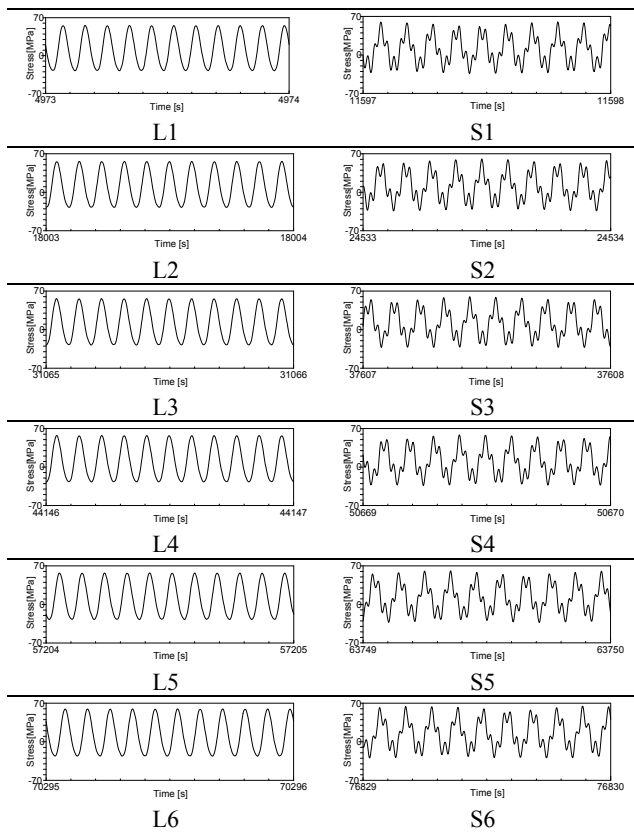
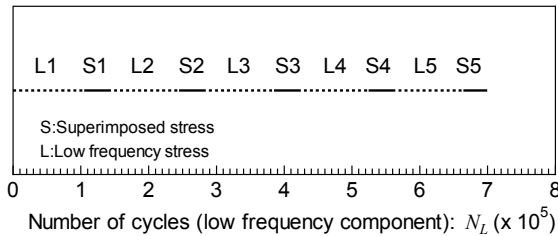
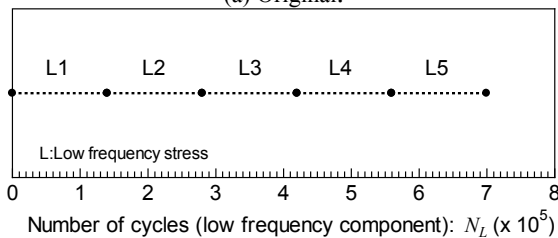


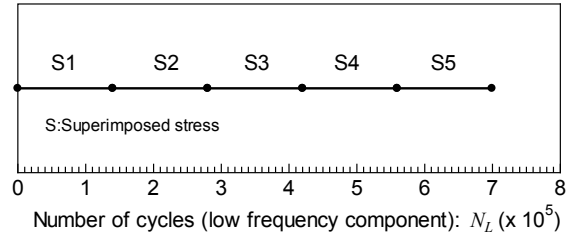
Fig. 8 Applied stress patterns in Fig. 7.



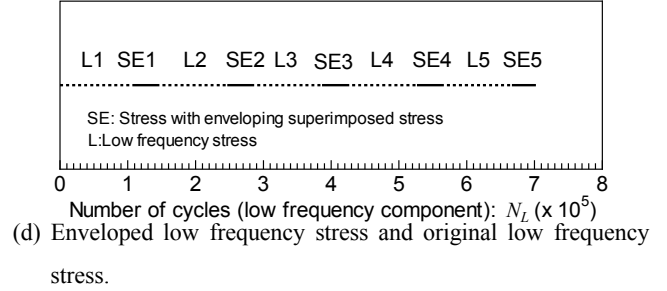
(a) Original.



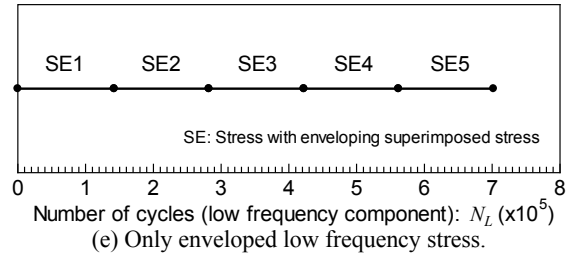
(b) Only low frequency stress.



(c) Only superimposed stress.



stress.



(e) Only enveloped low frequency stress.

Fig. 9 Applied loading conditions (Test ID: S3-3_25_2_2).

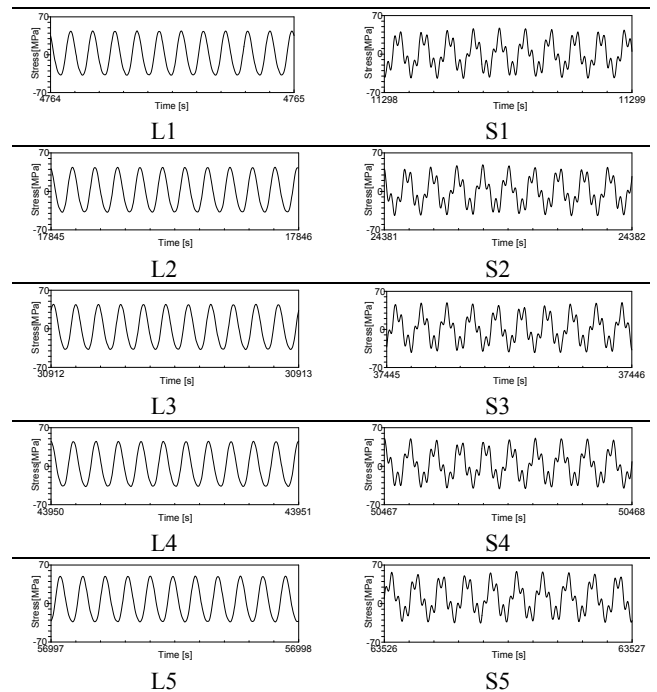


Fig. 10 Applied stress patterns in Fig. 9.

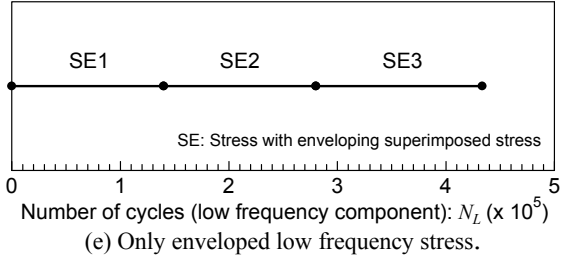
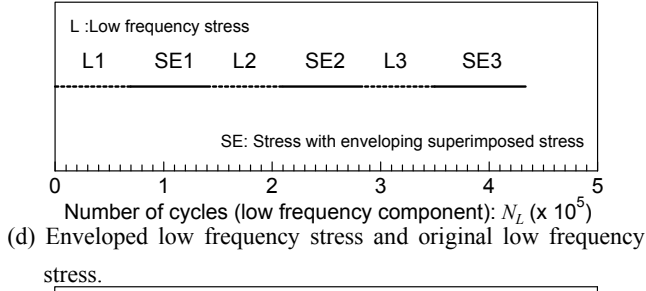
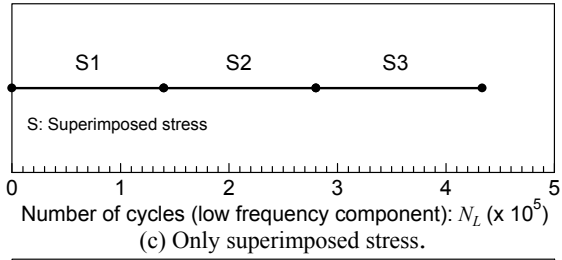
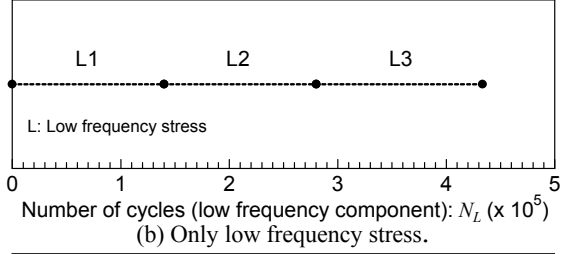
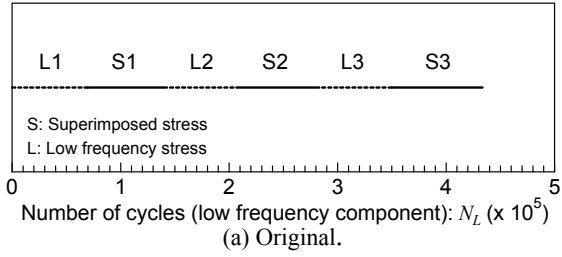


Fig. 11 Applied loading conditions (Test ID: S3-3_50_2_1).

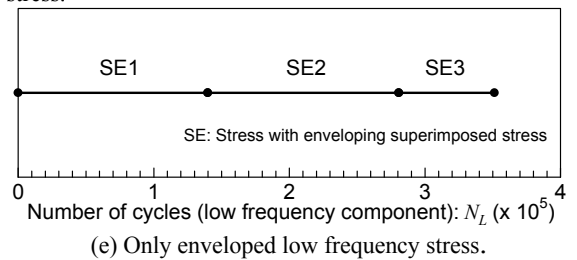
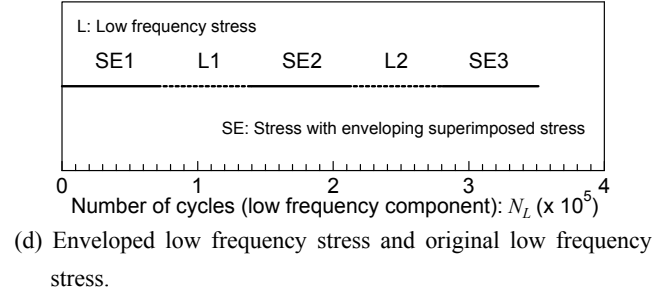
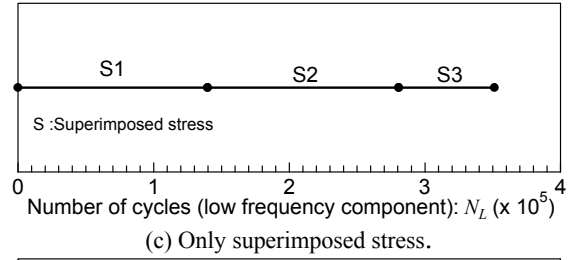
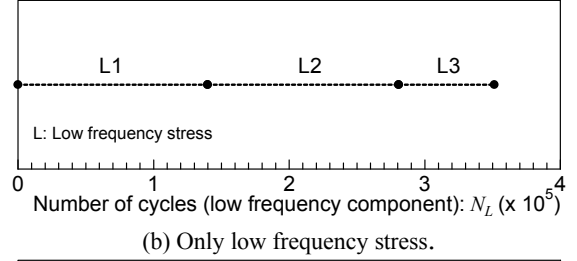
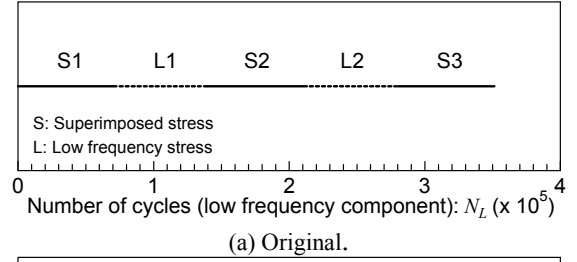


Fig. 13 Applied loading conditions (Test ID: S3-3_50_2_2).

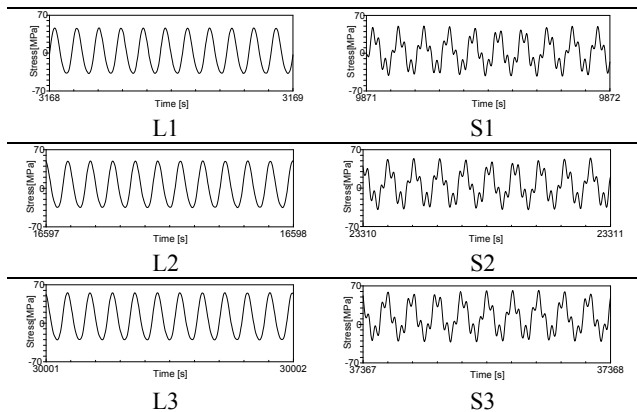


Fig. 12 Applied stress patterns in Fig. 11.

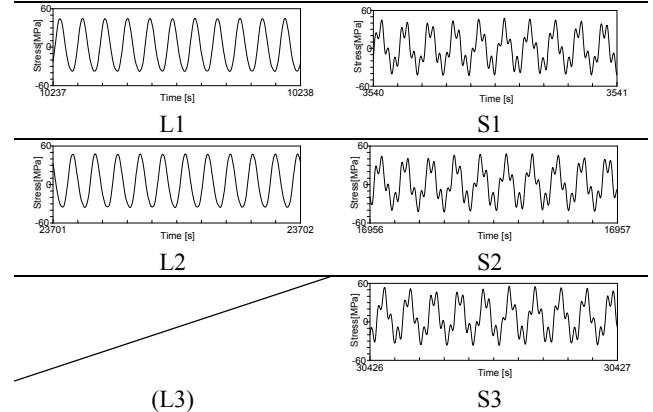


Fig. 14 Applied stress patterns in Fig. 13.

得られた疲労亀裂伝播履歴を低周波数成分のサイクル数で整理した結果を Fig. 15 に示す。いずれの解析結果も、低周波応力成分のみが作用する場合（応力履歴（b））がオリジナルの応力履歴（a）に対して、ほぼ同程度の亀裂伝播となる結果が得られた。この理由として、参照した疲労試験¹⁰⁾¹¹⁾で（a）の波形を等価応力範囲に換算して整理すると、一定応力振幅条件下での疲労試験結果と同一の $S-N_b$ 曲線（ N_b : 亀裂伝播寿命）として整理できることに対応しているためと考えられる。また、重畳波応力をこれの包絡波に置き換えた荷重履歴（d）及び（e）に対する解析結果は、オリジナル荷重履歴に対する結果よりも疲労亀裂伝播が速いという安全側の結果を与えた。

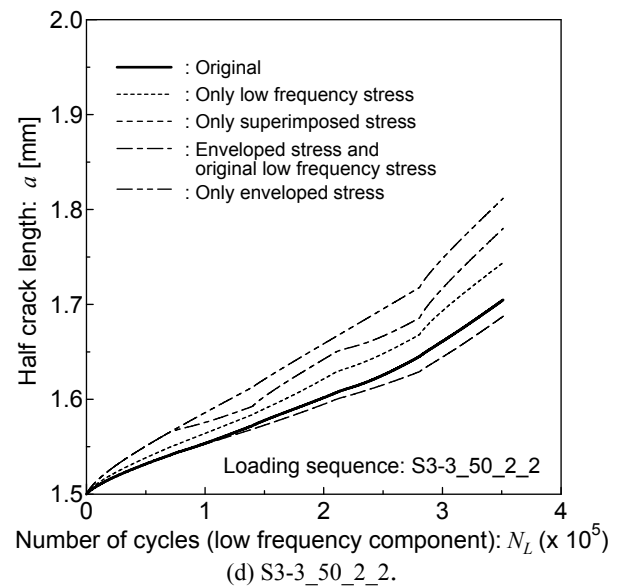
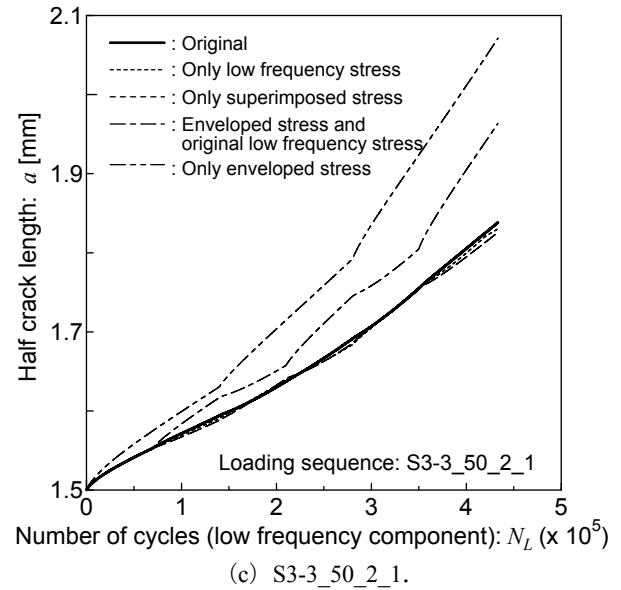
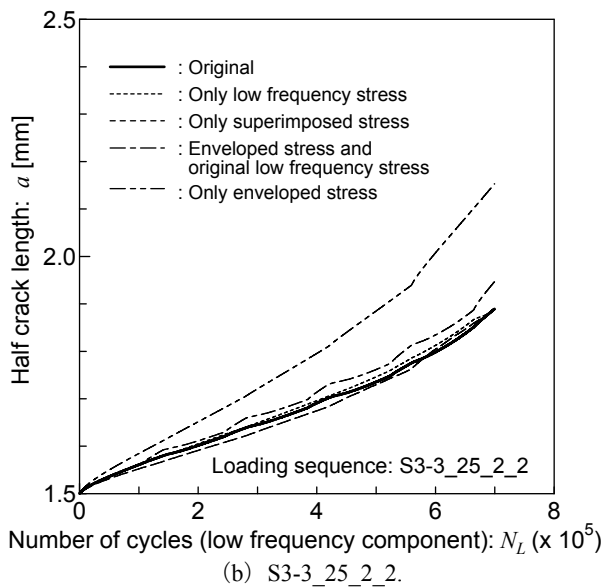
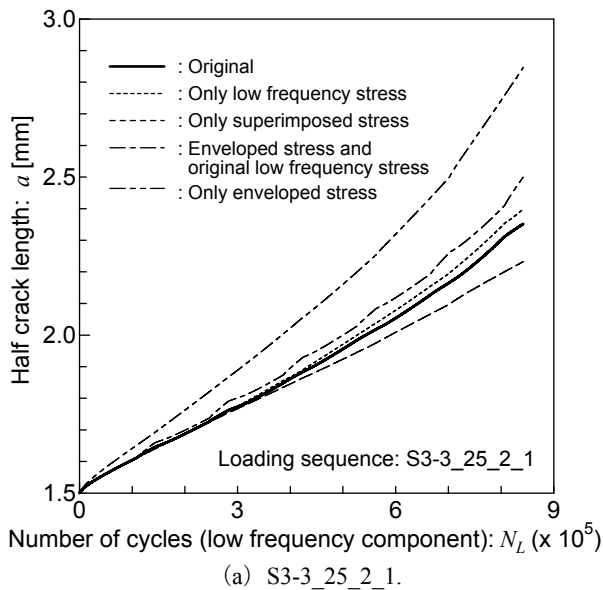


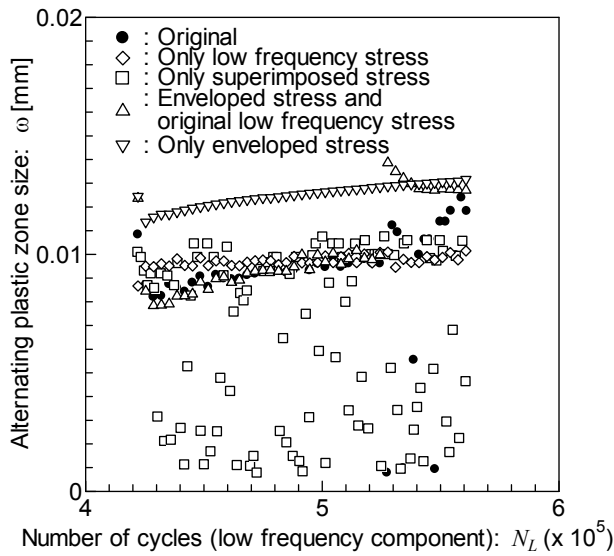
Fig. 15 Comparison of fatigue crack growth curves in the case of various stress period.

これらの結果から、今回のような間欠重畳応力履歴条件下での疲労亀裂伝播挙動評価では、重畳応力成分は無視して低周波応力成分だけを考慮すればよいことが示唆される。しかしながら、本研究で設定した応力履歴は、船舶の航行中に疲労損傷が懸念される高応力集中場に生じる応力履歴と比較すれば比較的応力変動が小さいこともあり、本知見を実船の疲労損傷評価に適用するには、更なる数値解析検討に加え、溶接継手や構造体モデルを用いた疲労試験による検証が必要であろう。

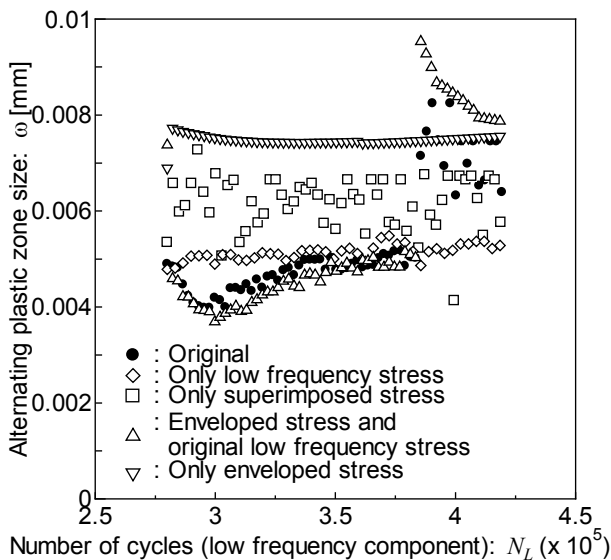
次に、Fig. 15 に示した疲労亀裂伝播履歴の差が生じた理由について考察した。本研究で適用した疲労亀裂伝播に関する数値シミュレーションでは、亀裂先端近傍に形成される両振り塑性域内で生じる繰返し塑性仕事が亀裂伝播の駆動力源となるという考えに立脚しており、特に重畳応力履歴が

作用する場合の疲労亀裂進展に有効な応力履歴の抽出にも、亀裂先端近傍の両振り塑性仕事を指標としている。そこで、両振り塑性仕事と一義的な関係を有する両振り塑性域寸法と低周波成分外力の作用サイクル数 N_L の関係を調査した。

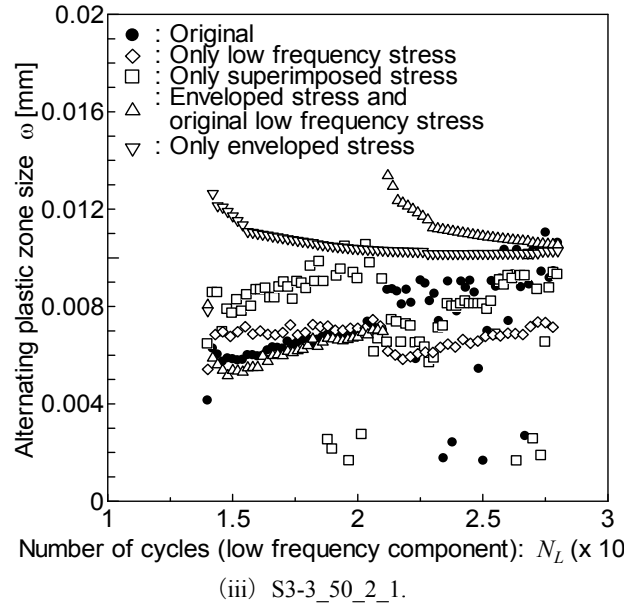
結果を Fig. 16 に示すが、重畳波応力が作用する荷重履歴(c) (□印) の応力条件では他の解析条件と比較して 両振り塑性域寸法の変動が大きい。最大塑性域寸法はオリジナル履歴 (a) における結果 (●印) 及び低周波成分のみで構成される応力履歴 (b) における結果 (◇印) と同程度である。一方、重畳応力の代わりに包絡波を負荷した履歴(d) (△印) 及び重畳応力の包絡波のみを負荷した履歴 (e) (▽印) のときは、オリジナルの応力履歴の場合と比較して、両振り塑性域寸法が継続的に大きな値を示した。このため、重畳応力の代わりに包絡波を負荷した履歴と重畳応力の包絡波のみを負荷した履歴の場合に、疲労亀裂伝播が速くなったと考えられる。



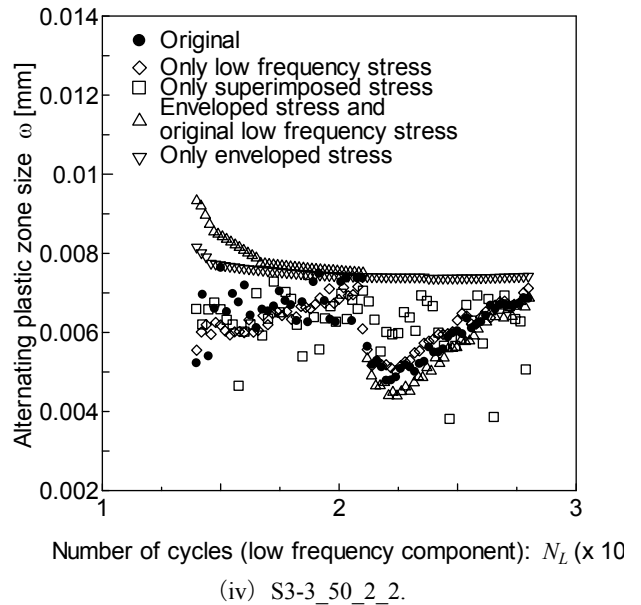
(i) S3-3_25_2_1.



(ii) S3-3_25_2_2.



(iii) S3-3_50_2_1.



(iv) S3-3_50_2_2.

Fig. 16 Relationship between the alternating plastic zone size and the applied stress cycles of low frequency component.

4.2 低周波応力期間を変更した間欠重畳応力条件下の場合

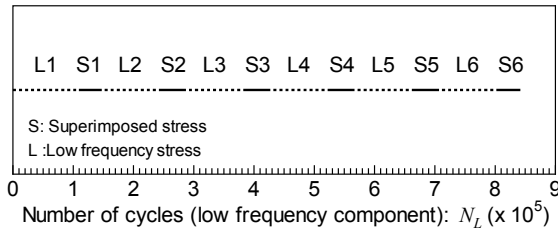
Fig. 7 (a) 及び Fig. 11 (a) に示したオリジナル応力履歴において、低周波応力期間を増加させた種々の間欠重畳応力条件を創成し、これらの条件で疲労亀裂伝播解析を実施した。創成した間欠応力履歴を Fig. 17 と Fig. 18 に示す。なお、想定した試験片種類や初期欠陥長さ等の解析条件は 4.1 と同じである。

Fig. 17 (b) は Fig. 17 (a) のオリジナルの低周波応力期間 L2 を重畳応力期間 S2 まで延長しており、これを低周波応力期間増分 Lv1 と定義した。Fig. 17 (c) 中に示す低周波応力期間増分 Lv2 は、Fig. 17 (b) の増分に加えて Fig. 17 (a) の低周波応力期間 L3 を重畳応力期間 S3 まで延長させた。Fig. 17 (d) の低周波応力期間増分 Lv3 は、Fig. 17 (c) の増分に加えて

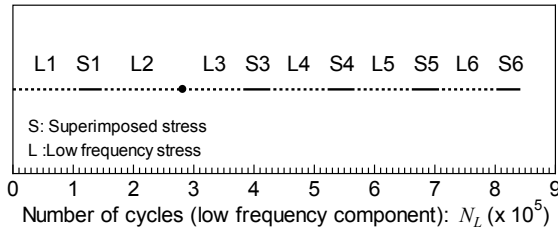
Fig. 17 (a) の低周波応力期間 L4 を S4 の期間まで延長させ、Fig. 17 (e)では各低周波応力期間 L を各重畳応力期間 S まで延長させた。

Fig. 18 (b) では、Fig. 18 (a) 中の低周波応力期間 L2 を重畳応力期間 S2 まで延長させており、これを低周波応力期間増分 Lv1 と定義した。同様に Fig. 18(c) では Fig. 18 (b)の増分に加えて Fig. 18 (a)の低周波応力期間 L3 を重畳応力期間 S3 まで延長させ、低周波応力期間増分 Lv2 とした。Fig. 18 (d) では、各低周波応力期間 L を各重畳応力期間 S まで延長させた。

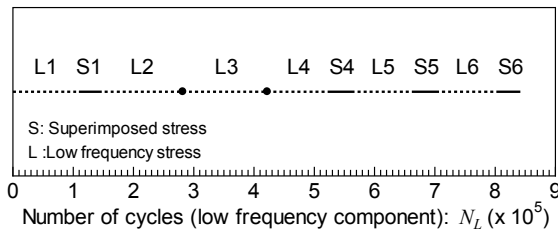
Fig. 18 (b) では、Fig. 18 (a) 中の低周波応力期間 L2 を重畳応力期間 S2 まで延長させており、これを低周波応力期間増分 Lv1 と定義した。同様に Fig. 18(c) では Fig. 18 (b)の増分に加えて Fig. 18 (a)の低周波応力期間 L3 を重畳応力期間 S3 まで延長させ、低周波応力期間増分 Lv2 とした。Fig. 18 (d) では、各低周波応力期間 L を各重畳応力期間 S まで延長させた。



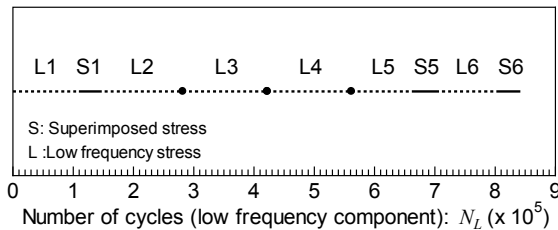
(a) Original.



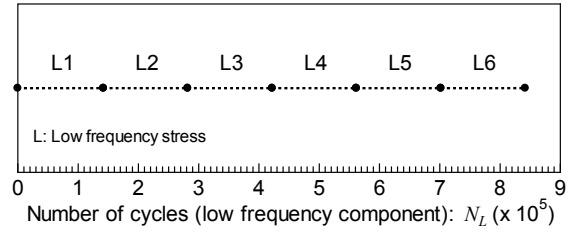
(b) Lv1 increment of low frequency stress period.



(c) Lv2 increment of low frequency stress period.

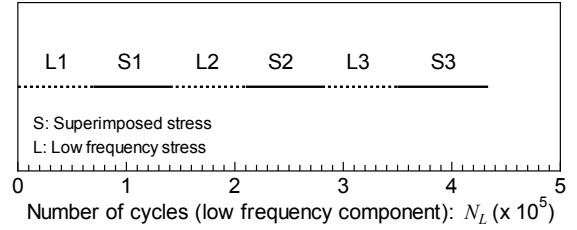


(d) Lv3 increment of low frequency stress period.

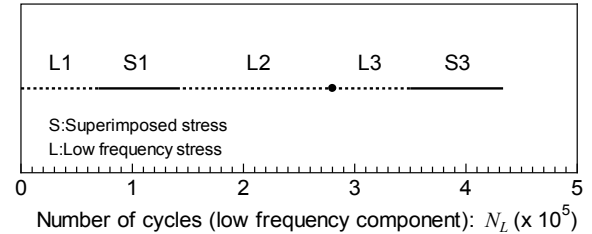


(e) Only low frequency stress.

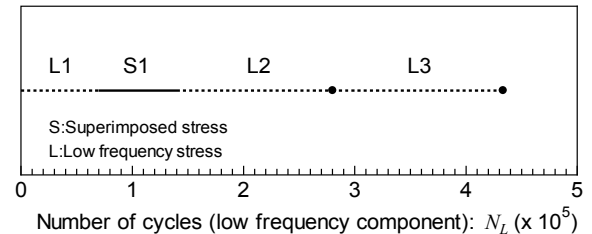
Fig. 17 Applied loading conditions (ID: S3-3_25_2_1).



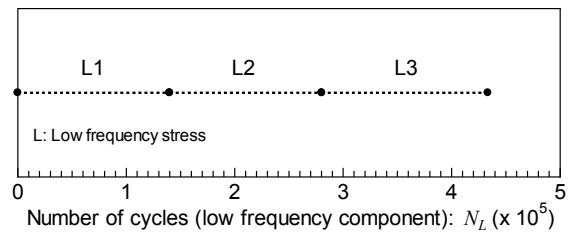
(a) Original.



(b) Lv1 increment of low frequency stress period.



(c) Lv2 increment of low frequency stress period.

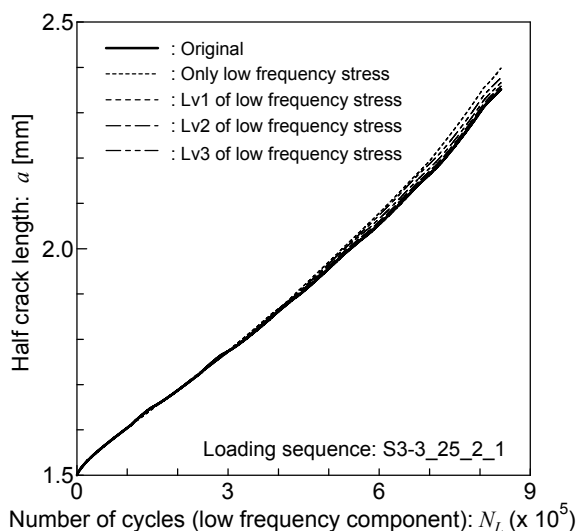


(d) Only low frequency stress period.

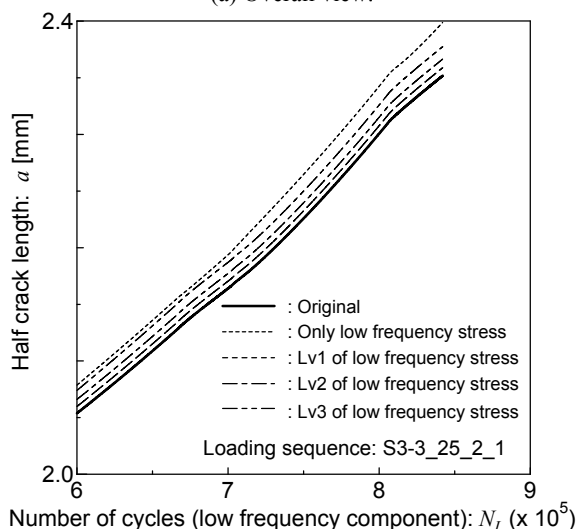
Fig. 18 Applied loading conditions (ID: S3-3_50_2_1).

Fig. 17 に示した間欠重畳応力条件下における解析結果を Fig. 19 に示す。ここでも低周波数成分のサイクル数に対する伝播履歴を示している。想定初期欠陥寸法が短かつ総サイクル数もさほど長期間でない解析であるため、伝播挙動に大きな相違は見られないものの亀裂伝播曲線を詳細に眺め

ると、低周波応力期間の増加に伴い、疲労亀裂伝播が速くなることが分かる。



(a) Overall view.

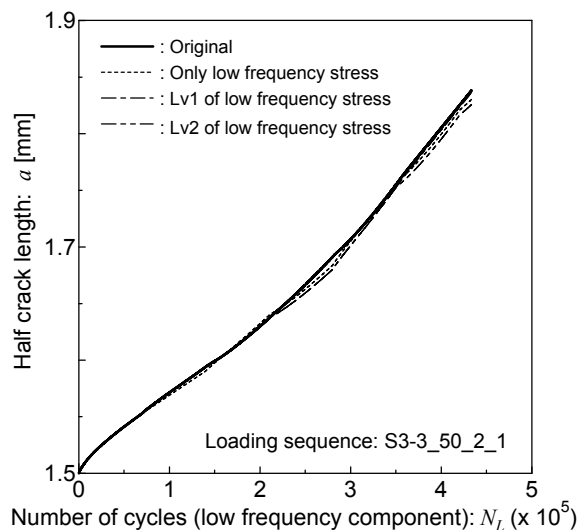


(b) Enlarged view.

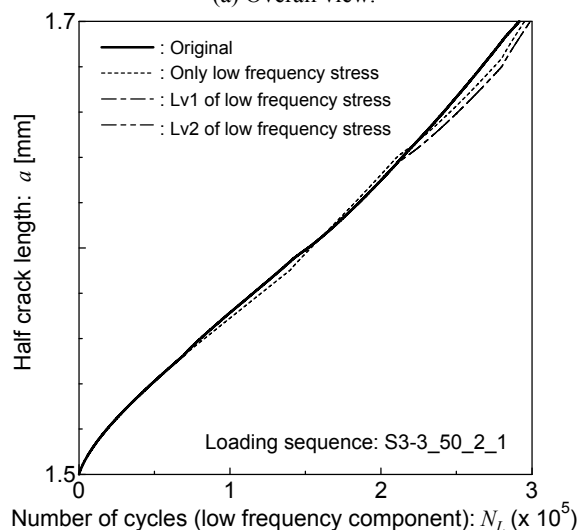
Fig. 19 Comparison of fatigue crack growth curves in the case of increasing low frequency stress period.

(ID: S3-3_25_2_1)

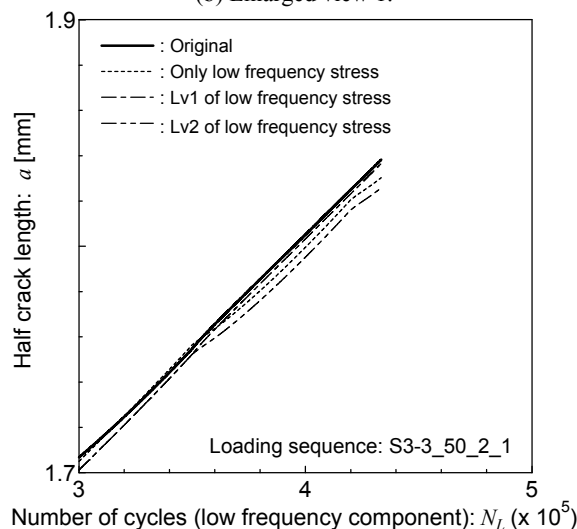
次に、Fig. 18 に示した間欠重畳応力条件下における解析結果を Fig. 20 に示す。こちらについても伝播挙動に大きな相違は見られないものの亀裂伝播曲線を詳細に眺めると、低周波成分応力のサイクル数が $1.0 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^5$ 回 付近 (Fig. 18 (a) において重畳応力期間 S1 に相当) で、オリジナル応力履歴 (a) の方が低周波応力成分のみ (d) の場合よりも疲労亀裂伝播速度が速くなっている。また低周波応力のサイクル数が $3.5 \times 10^5 \sim 4.4 \times 10^5$ 回 付近において、伝播速度の大小関係と間欠重畳の程度が不規則に変化しており、Fig. 18 のように低周波応力期間を増加させる度に疲労亀裂伝播速度が速くなるという挙動は示していない。すなわち、応力履歴次第では、必ずしも 低周波応力期間を増加させる度に疲労亀裂伝播速度が速くなるとは限らないと考えられる。



(a) Overall view.



(b) Enlarged view 1.



(c) Enlarged view 2.

Fig. 20 Comparison of fatigue crack growth curves in the case of increasing low frequency stress period.

(ID: S3-3_50_2_1)

5. 結 言

過大荷重作用時に生じることが懸念される初期欠陥面の閉口現象を表現可能できるように亀裂開閉口モデルを改良した。次に提案モデルを既報の疲労亀裂開閉口および伝播に関する数値シミュレーションに実装し、負の値を含む複数の応力比を有する一定振幅載荷条件下および局所的に圧縮が作用する重畳応力条件下における疲労亀裂伝播履歴を実測結果と比較し、改良モデルの有用性を確認した。

引き続き、改良モデルに基づく数値シミュレーションを活用し、間欠重畳応力を受ける場合の疲労亀裂伝播挙動について検討し、疲労亀裂伝播寿命に関しては重畳応力履歴部分をこれの包絡波履歴に置き換えれば、安全側の評価ができる可能性を確認した。また、低周波応力期間を変更した間欠重畳応力条件下では、低周波応力期間を増加させる度に必ずしも疲労亀裂伝播速度が速くなるとは言えないことを確認した。ただし、これらの結論は数値シミュレーション結果のみに基づくものであるため、間欠重畳応力条件およびこれに対応する低周波成分のみが付加される条件下で疲労亀裂伝播試験を実施し、数値シミュレーション結果の妥当性を検証する必要があると考えられる。また、本研究では評価対象外とした、疲労亀裂発生挙動に及ぼす重畳応力履歴の影響についての研究を進める必要があると考えられる。

謝 辞

本研究はJSPS科研費基盤研究(A)(課題番号:JP26249136)の助成を受けて実施したものである。本研究の内容に関し、(公社)日本船舶海洋工学会船体疲労強度設計法の精密化のための研究委員会(P-47)および(一社)溶接学会溶接構造研究委員会の委員各位より有益なご意見を賜りました。ここに記して御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Newman Jr., J.C.: A crack-closure model for predicting fatigue crack growth under aircraft spectrum loading, NASA Technical Memorandum 81941, 1981.
- 2) Toyosada, M. et. Al: Fatigue crack propagation for a through thickness crack: a crack propagation law considering cyclic plasticity near the crack tip, Int. J. Fatigue, Vol.26, No.9,2004, pp.983-992.
- 3) 富田康光, 河辺寛, 福岡哲二, 田所誠次朗: 波浪荷重の統計的性質と疲労強度評価のための波浪荷重シミュレーション法(その1), 日本造船学会論文集, Vol.170, 1991, pp.631-644.
- 4) Storhaug, G., Choi, B.K., Moan, T. and Hermunstad, O.A.: Consequence of Whipping and Springing on Fatigue for a 8600 TEU Container Vessel in Different Trades Based on Model Tests, Proceedings of PRADS 2010, Vol.2, 2010, pp.1180-1189.
- 5) Storhaug, G., Malenica, S., Choi, B.K., Zhu, S. and Hermunstad, O.A.: Consequence of Whipping and Springing on Fatigue and Extreme Loading for a 13000 TEU Container Vessel Based on Model Tests, Proceedings of PRADS 2010, Vol.2, 2010, pp.1200-1209.
- 6) Fricke W., Paetzold, H.: Experimental investigations of the Effect of Whipping Stresses on the Fatigue Life of Ships, Proceedings of IMDC 2012, Vol.3, 2012, pp.3-10.
- 7) Fricke W., Paetzold, H.: Experimental investigations on fatigue damage of ship structures caused by whipping stresses, Proceedings of PRADS 2013, pp.465-470.
- 8) Wang, X., Gu, X. and Hu, J.: Investigation of Springing Influence of Fatigue Damage of Ship Structures, Proceedings of PRADS 2013, pp.471-478.
- 9) Fukasawa, T. and Mukai, K.: On the Effects of Hull-girder Vibration Upon Fatigue Strength of a Post-Panamax Container Ship Disaggregated by Short-term Sea State, Proceedings of PRADS 2013, pp.479-485.
- 10) Osawa, N., Nakamura, T., Yamamoto, N. and Sawamura, J.: Experimental study on high frequency effect on fatigue strength of welded joints by using plate-bending-vibration type fatigue testing machine, Proceedings of OMAE 2014, OMAE2014-23856.
- 11) 大沢直樹, 中村哲也, 山本規雄, 沢村淳司: 曲げ振動疲労試験機を用いた高周波重畳波浪荷重を受ける溶接継手の疲労強度に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.22, 2015, pp.175-186.
- 12) 大沢直樹, 中村哲也, 寺井幸司, 山本規雄, 岩田麟太郎: 間欠高周波重畳波浪荷重を受ける溶接継手の疲労強度に関する実験的研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol.23, 2016, pp.127-130, 2016A-OS4-6.
- 13) 遠藤達雄, 松石正典, 光永公一, 小林角市, 高橋清文: Rain Flow Method の提案とその応用, 九州工業大学研究報告, No.28, 1974, pp.33-62.
- 14) 後藤浩二, 松田一貴: 複数周波数成分を有する重畳応力条件下における疲労き裂伝播挙動解析, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.17, 2013, pp.75-81.
- 15) Matsuda, K. and Gotoh, K.: Numerical simulation of fatigue crack propagation under superimposed stress histories containing different frequency components with several mean stress conditions, Marine Structures, Vol.41, 2015 pp.77-95.
- 16) <http://www.mscsoftware.com/ja/product/marc> (accessed on January 16, 2017.)
- 17) Toyosada, M. and Gotoh, K.: Physical Meaning of the Fictitious crack Opening Displacement in Dugdale Model, Proceedings of ICF 11, 2005, ICF11 4620.