九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

下限界応力拡大係数範囲ΔK_<th>の簡便な同定方法に関する一検討

村上, 幸治
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻

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/2324/4794496

出版情報：Quarterly Journal of Welding Society. 35 (4), pp.149-153, 2017. Japan Welding Society
バージョン：
権利関係：(c) 2017 社団法人 溶接学会

KYUSHU UNIVERSITY

［溶接学会論文集　第35巻　第4号　p. 149-153（2017）］

下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の簡便な同定方法に関する一検討*

村上　幸治**，後藤　浩二***

Practical Determination Method of the Threshold Stress Intensity Factor Range ΔK_{th}*

by MURAKAMI Koji** and GOTOH Koji***

It is necessary to identify relationship between the fatigue crack propagation rate and the stress intensity factor range, if the fracture mechanics approach is applied to evaluate the fatigue crack growth evolution. In addition, identification of the stress intensity factor range of fatigue crack growth threshold (ΔK_{th}) is important to evaluate the structural integrity from the view of fatigue performance.

ASTM standard E647 "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates" is widely known as a de fact standard to determine the value of ΔK_{th}. However, a considerably long time is required to perform the determination of ΔK_{th} value. Therefore, it is expected to cut the experimental period for ΔK_{th} determination.

Efficient and time saving procedure for determining ΔK_{th} value comparing with ASTM-E647 is proposed in this study. Many fatigue crack propagation test data were applied to verify the validity of our proposed method. It is expected to be able to complete the experiment for determining ΔK_{th} value at a stage where the fatigue crack propagation rate is one order larger comparing with ASTM-E647.

Key Words: Fatigue crack propagation rate (da/dN), Stress intensity factor range (ΔK), Fatigue crack growth threshold (ΔK_{th}), ASTM standard E647, WES1111, K-decreasing test, Normalized K-gradient (C)

1. 緒　　言

船舶，橋梁，鉄骨建築などの厚鋼板を用いて建造される大型溶接構造物では，溶接継手部を起点とする疲労損傷が多数報告されている．通常の溶接構造物に対する疲労強度照査には，S-N 曲線と作用応力頻度分布を考慮した線形累積損傷則が適用されおり，破壊力学的手法を用いて疲労亀裂伝播性能に基づく評価は損傷事故原因の究明などの限られた範囲での適用に留まっている．しかしながら，線形累積損傷則では疲労亀裂寸法の成長履歴を推定できないため，疲労亀裂を起点とする脆性破壊の発生評価ができない．したがって，溶接構造物の健全性担保の観点に立てば，破壊力学的手法に基づき，疲労亀裂の成長履歴と任意段階に成長した疲労亀裂を起点とする脆性破壊発生を一貫して評価する設計手法の導入が期待される．

疲労亀裂伝播性能評価に破壊力学的手法を用いる場合でも，疲労亀裂開閉口挙動を定量的に考慮することの重要性[1)2)]が指摘されているものの，詳細な数値シミュレーションが必要となるため，初期設計段階での検討や短時間での損傷原因調査に際しては応力拡大係数範囲 ΔK をパラメータとし，これと亀裂伝播速度 da/dN の関係である Paris 則[3)]を適用することが実用的であろう．しかしながら，疲労亀裂伝播挙動では応力拡大係数範囲が下限界値 ΔK_{th} を下回ると疲労亀裂は新たに伝播することができず停留することが広く知られている．そこで，疲労亀裂伝播性能を評価する一環として ΔK_{th} を同定する必要がある．

一般に ΔK_{th} は材料定数と見なされており実験により同定される．疲労亀裂伝播試験方法のディファクトスタンダードとして広く用いられる ASTM-E647 規格[4)]に従って ΔK_{th} を同定する場合，長時間の継続的な疲労亀裂伝播試験が要求される．一方，ASTM-E647 の規定よりも ΔK_{th} 同定に要する時間を短縮する手法が検討され WES1111[5)]に採用されたが，検討に用いられた実験データに限りがあったことや大幅な実験期間の短縮には至っていないことを考慮すれば，より簡便かつ実験に要する時間短縮についての検討は継続すべきであろう．

本報告では，WES1111 における検討で用いた実験データに加えて複数の疲労亀裂伝播試験のデータを整理するとともに，亀裂開閉口挙動を考慮した疲労亀裂伝播シミュレーションも援用することで，より簡便に ΔK_{th} 値を同定する手法の検討結果を報告する．

2. ΔK_{th} の同定手法

2.1 ASTM-E647 による ΔK_{th} 同定手法

ASTM-E647 では以下の手順に従って下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} を同定するように規定されている．

1) 亀裂伝播速度 da/dN が 10^{-9}～10^{-10} m/cycle の領域にある，

*受付日　平成29年7月5日　受理日　平成29年9月22日
**　九州大学大学院工学府建設システム工学専攻　Member, Department of Civil and Structural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University
***正　員　九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門　Department of Marine Systems Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University

da/dN～ΔKデータを，K値減少法[4]を用いてほぼ等間隔に5点以上測定する．

2) データを直線回帰し，$da/dN = 10^{-10}$ m/cycleに対応するΔKをΔK_{th}とする．

3) $da/dN = 10^{-9}$～10^{-10} m/cycleの範囲で，ほぼ等間隔に5点のデータが取得できれば試験を打ち切ることができる．

この手法に従うと，5点以上の複数点でデータを測定する必要のある伝播速度のオーダが10^{-10} m/cycleの極低速伝播速度領域に該当するが，この伝播速度に到達するには，亀裂が事実上停留したと見なせる段階からさらに数十～数百万回の繰返し負荷を継続する必要があるため，実験に要する期間は非常に長期に渡ることになる．また，疲労亀裂伝播試験において亀裂が停留したと判断するための判断基準が明示されていないこともあり，亀裂が停留したと判断するには，以下のような取扱いを行う必要がある．

1. 始めに亀裂停留と判断した段階の亀裂伝播速度$(da/dN)_1$よりも，さらに1オーダ下の伝播速度$(da/dN)_2$で暫定的に試験を継続する．
2. 伝播速度を低下させた前後での亀裂成長挙動を比較して同様の停留状態であれば，亀裂伝播速度$(da/dN)_1$の時点ですでに停留していたと判断．

従って，疲労試験時間の短縮にはできる限り，実験を中止できる伝播速度が速いことが望ましい．

そこで，複数の疲労亀裂伝播試験結果[6)-11),13)]において，明らかに亀裂停留状態と判断できる段階のΔK値（ΔK_{th}と見なせる値）が記載されている値[6),10)]とASTM-E647の手法によるΔK_{th}値を比較した結果をFig.1に示す．同図において横軸はASTM-E647の手法によるΔK_{th}値，縦軸はそれぞれの疲労亀裂伝播試験結果において明らかに亀裂停留に至っていると見なせる段階のΔK値である．Fig.1より，ASTM-E647の手法に従って同定されるΔK_{th}値は安全側に評価されることが確認できる．

2.2　ΔK_{th}同定のためのK値減少法に対する要件緩和検討

前項で参照した疲労亀裂伝播試験結果[6)-11),13)]を整理し，ASTM-E647で規定された手法と同程度のΔK_{th}値を得ることができ，かつ実験継続条件を緩和できる手法について検討した．具体的には，最小二乗法等により，応力拡大係数範囲ΔKと疲労亀裂伝播速度da/dNの関係を式(1)で与えられる修正Paris則で近似することでΔK_{th}値を同定するが，この際に，どの程度の伝播速度範囲で得られたda/dNとΔKのデータを用いるべきかについて，下記a)～e)の場合について検討した．

$$da/dN = C\left\{(\Delta K)^m - (\Delta K_{th})^m\right\} \tag{1}$$

a) $da/dN = 10^{-9}$～10^{-10} m/cycleの範囲で，ほぼ等間隔に5点のデータ．

b) $da/dN = 10^{-9}$～10^{-10} m/cycleの範囲で，ほぼ等間隔に3点のデータ．

c) $da/dN = 10^{-9}$ m/cycle以下の全データ．

d) $da/dN = 10^{-9}$の前後領域にある3点ずつのデータ．

e) $da/dN = 10^{-9}$～10^{-8} m/cycleの範囲で，ほぼ等間隔に5点のデータ．

なお，d)のデータ範囲については，いくつかのda/dNの範囲について検討した．

Fig.2a)～e)に検討結果を示す．これらの図において横軸はASTM-E647の手法に従って推定したΔK_{th}値であり，縦軸はa)～e)で規定したデータを採用して式(1)の最小二乗近似により求めたΔK_{th}値である．

Fig.2に示した一連の結果より，da/dNが10^{-9} m/cycle程度までの実測データを求め，式(1)に最小二乗近似することで，ASTM-E647で示された方法と同程度のΔK_{th}値が得られることが確認できる．なお，妥当性検証に際しては統計的仮説検定であるt検定を行い，ASTM-E647の平均値との差に統計的な有意差がないことを確認した．さらに実験時間の短縮を考慮するならば，b)，d)，e)の手法を採用することで数千万回程度の繰返し数の削減効果が期待でき，結果として総試験時間の短縮が期待できる．

上述の結果も考慮し，試験後のデータ処理の簡略化や，試験後すぐにΔK_{th}値を示す必要性がある場合などの対応として，$da/dN = 1.0 \times 10^{-9}$ m/cycleの時点のΔK値をそのままΔK_{th}値として採用することの妥当性を調査した．Fig.3は，Fig.2から抜粋[6)-11)]した実験結果について，横軸はFig.2と同様にASTM-E647の定義に従って求めたΔK_{th}値とし，縦軸を$da/dN = 1.0 \times 10^{-9}$ m/cycleの時点のΔK_{th}値として整理した結果である．

Fig.3を参照すれば，$da/dN = 1.0 \times 10^{-9}$ m/cycle時点のΔK値としてΔK_{th}値を与えてもASTM-E647の従来の手法による

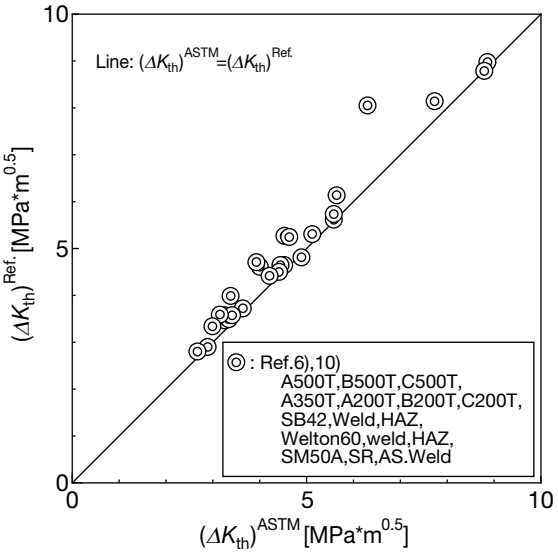
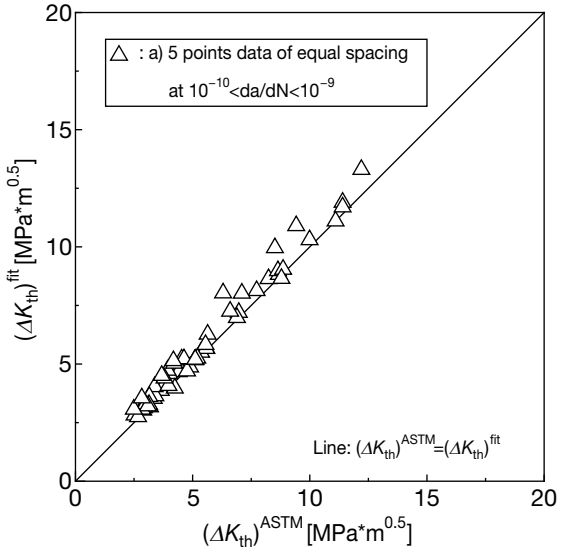
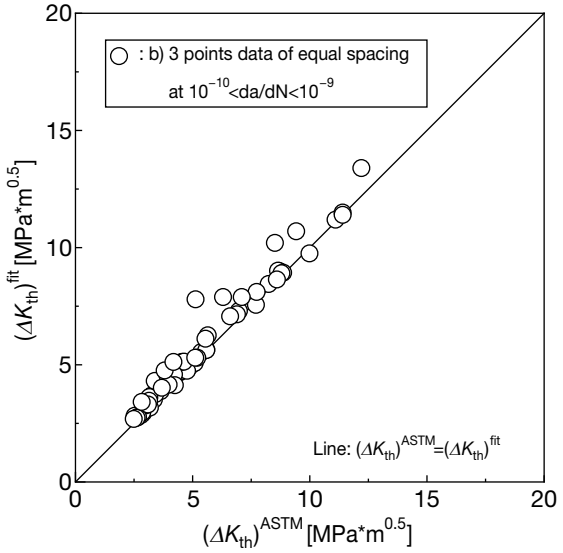


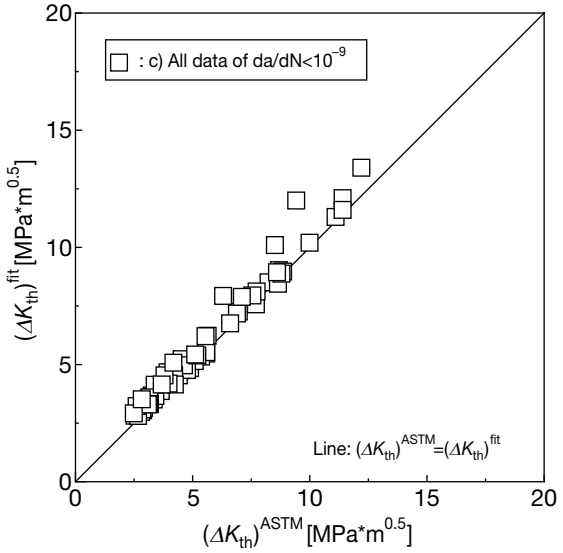
Fig.1　Comparison of ΔK_{th} identification by Refs.6) and10) with the one by ASTM-E647.



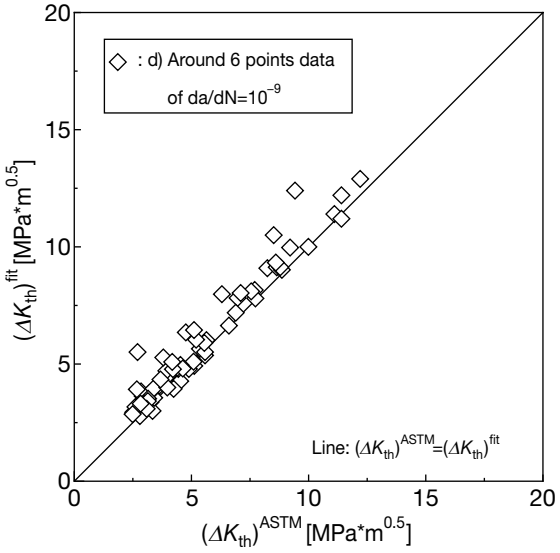
a) A result of made data under condition of a)



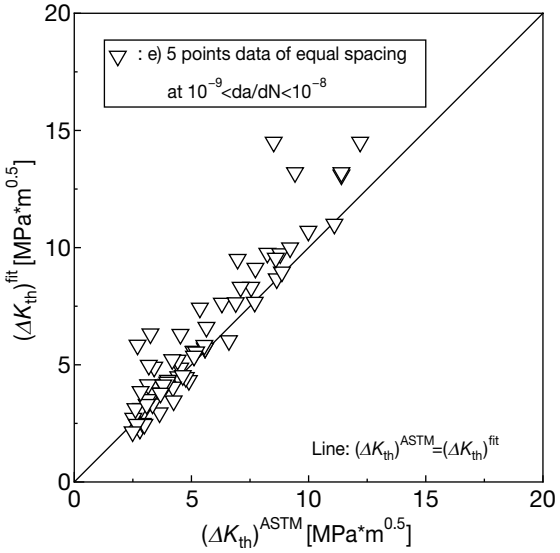
b) A result of made data under condition of b)



c) A result of made data under condition of c)



d) A result of made data under condition of d)



e) A result of made data under condition of e)

Fig. 2　Comparison of ΔK_{th} identification by proposed method with the one by ASTM-E647.

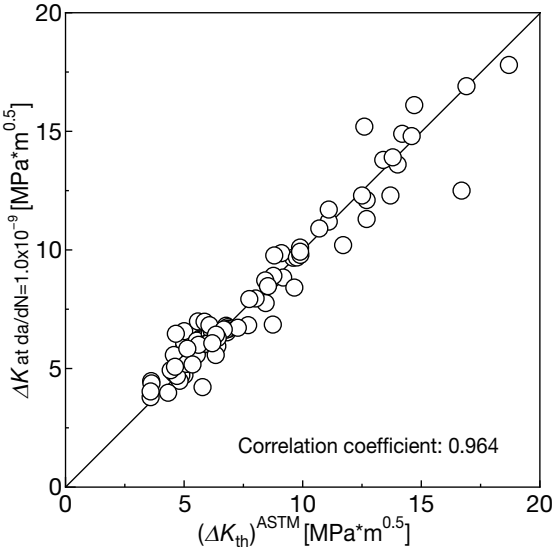


Fig. 3　Comparison between ΔK_{th} obtained by ASTM-E647 and ΔK at $da/dN = 1.0 \times 10^{-9}$ m/cycle.

値と同程度の結果が得られており，Fig. 2 と同様に t 検定により有意差の無いことを確認している．

以上の結果から，ASTM-E647 にて規定された実験方法を緩和しても，同規格の手法と有意差の無い ΔK_{th} 値を得ることが可能であると考えられる．

3.　K 値漸減試験における K 値減少率の設定

上述のように ΔK_{th} 値の同定のための実験要件の緩和可能性が判明したが，実験要件の緩和には K 値減少試験における K 値減少率 C_K の許容範囲に関する検討も必要である．C_K は次式で定義される．

$$C_K = (1/K)(dK/da) \tag{2}$$

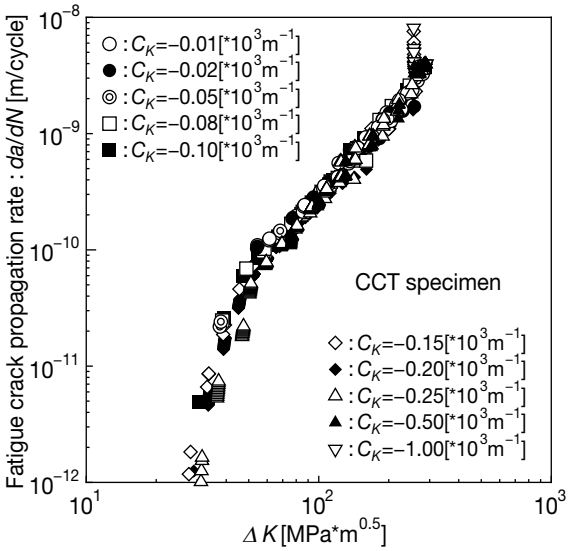
ASTM-E647 では，

- $C_K \geqq -0.08\,\mathrm{mm}^{-1}$ の条件を満たす範囲で荷重範囲を減少させること．
- 荷重（ΔK）を段階的に減少させる場合は，最大荷重 P_{max} の減少が，前段階の P_{max} の 10% を超えないようにすること．
- 荷重を連続的に減少させる場合は，荷重減少率を 2% 以下とすること．
- 荷重範囲変更後は，亀裂を 0.5 mm 以上伝播させることを推奨．

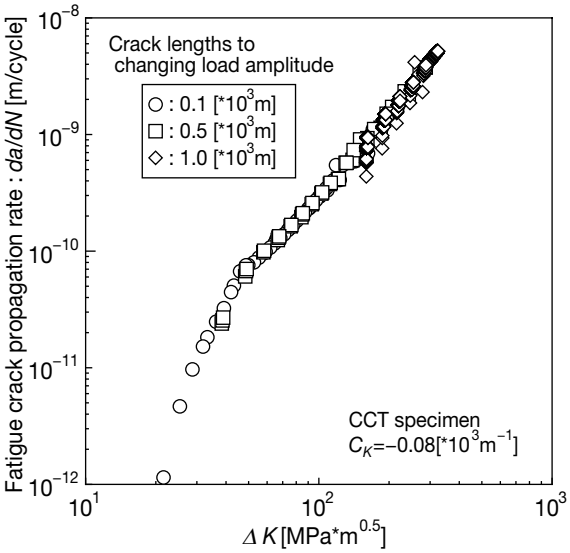
と規定されている．これらを全て充実に守って K 値減少試験を実施すると長時間を要するため，何らかの緩和対策が期待される．

そこで，疲労亀裂に特有の亀裂開閉口挙動を定量的に評価でき，亀裂成長挙動を精度良く推定できる，豊貞ら[12]により提案された疲労亀裂伝播シミュレーションを活用した検討を実施した．数値検討の内容は以下の通りである．

1) K 値減少率を −0.01 から −1.0 mm^{-1} の範囲で変化させ，K 値減少率が亀裂伝播に与える影響を検証する．なお，ある荷重範囲を次の荷重範囲に減少させるまでの間の疲労亀裂伝播量は 0.5 mm に固定する．
2) K 値減少率を ASTM-E647 で規定された最小許容値 −0.08 mm^{-1} に固定し，荷重範囲低減後の疲労亀裂伝播量を 0.1，0.5，1.0 mm と変化させ，亀裂伝播に与える影響を検証する．



a)　Case studies 1)



b)　Case studies 2)

Fig. 4　Relation between stress intensity factor range and fatigue crack growth rate under K decreasing test.

上記 1) の検討結果を Fig. 4a) に，2) の検討結果を Fig. 4b) に示す．Fig. 4 に示す結果より，今回の検討範囲では K 値減少率が ASTM-E647 の規定値を超えた場合でも，$\Delta K - da/dN$ 関

係に変化は見られなかった．

一方，亀裂成長曲線を確認したところ，K値減少率が規格の範囲外である$-1.0\,\mathrm{mm}^{-1}$の場合は十分な亀裂進展が得られる前に停留（長さ4mm以下）したため，実験条件には適さないと考えられる．ただし，K値減少率がASTM-E647の規格範囲外である-0.5～$-0.1\,\mathrm{mm}^{-1}$の場合は，規格範囲内のK値減少率と同様な亀裂成率が得られた．これらの結果を参照すると，K値減少率に関する規定は，$-0.25 \leqq C_K\,[\mathrm{mm}^{-1}] \leqq 0$程度に範囲を拡張しても妥当性は損なわれないと期待される．また，荷重を連続的に減少させる場合，1回の荷重減少量が2%以上でも問題はないことを確認した．しかしながら，これらは全て数値シミュレーションによる検討結果であるため，実際に種々の荷重条件の下でK値減少試験を実施した結果も勘案して最終的な結論を導くべきと考えられる．

4. ΔK_{th}同定手法及びK値漸減試験に関する提案

上述の検討結果より，ΔK_{th}同定手法及びK値漸減試験の実施方法に関してASTM-E647の規定を以下のように緩和することを提案する．

4.1 ΔK_{th}同定手法について

以下に記す3つの緩和方策を提案する．

1) 一定振幅荷重条件及び応力拡大係数漸減試験により，疲労亀裂伝播速度da/dNが10^{-9}～10^{-10} m/cycleの領域にある，応力拡大係数範囲ΔKとda/dNの関係をほぼ同間隔で3点以上取得し，最小二乗法等により，ΔKとda/dNの関係を式(1)で近似することで，疲労亀裂伝播則（修正Paris則）の係数C，m及びΔK_{th}を同定する．
2) 一定振幅荷重条件及び応力拡大係数漸減試験により，da/dNが1.0×10^{-9} m/cycle付近のデータ前後領域にあるΔKとda/dNの関係をほぼ同間隔で3点以上ずつ取得し，最小二乗法等によりΔKとda/dNの関係を式(1)で近似することで，疲労亀裂伝播則（修正Paris則）の係数C，m及びΔK_{th}を同定する．この際，使用するda/dNは，8.0×10^{-10} m/cycle～2.0×10^{-9} m/cycle付近のデータ範囲を推奨する．
3) $da/dN = 1.0 \times 10^{-9}$ m/cycleの時のΔK値としてΔK_{th}値を与えることも許容する．

4.2 K値漸減試験について

実験による検証が実施できていないことから，基本的にはASTM-E647と同様の実施条件とするが，実験時間短縮の観点から，Fig.4の結果を参照して，荷重範囲変更後に要求する疲労亀裂伝播長さを0.25mmとすることを提案する．

5. 結　　言

疲労亀裂伝播試験の簡易化の一環として，下限界応力拡大係数範囲ΔK_{th}の同定方法及びK値漸減試験の実施条件に関する検討を行い，現状のディファクトスタンダードであるASTM-E647規格に従った方法と有意差の無いΔK_{th}値を得ることができる実験条件の緩和手法を提案した．K値減少率の検討については数値シミュレーションの結果であるため，実験により検討結果の妥当性を検証することが今後の課題として挙げられる．

謝　　辞

本研究は，（社）日本溶接協会鉄鋼部会FGT委員会の活動結果をもとに実施したものであり，同委員会に参加された関係各位に御礼申し上げます．

また，検討データの整理に際して協力頂いた，九州大学大学院の橋本勝氏，太田雅人氏，白方裕葵氏に御礼申し上げます．

参 考 文 献

1) Paris, P.C. and Erdogan, F. : A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, Series D, Vol.85,1963, pp.528-534.
2) Elber, W. : The Signicance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP-486, 1971, pp.230-242.
3) 豊貞雅宏，岡本太郎，藤原裕彦：き裂開閉口を考慮した疲労き裂伝播モデル，日本造船学会論文集 第152号 1983，pp.381-389.
4) ASTME647-08: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, 2008.
5) 日本溶接協会：WES1111-2014疲労亀裂伝播試験方法，2014.
6) 橘内良雄：高強度鋼の疲労き裂伝播機構に及ぼす微視的組織の影響，材料，Vol.29，No.323，1980，pp.795-800.
7) 太田昭彦，佐々木悦男，小菅通雄：疲労き裂伝ぱ速度に及ぼす平均応力の影響，日本機械学会論文集，Vol.43，No.373，1977，pp.3179-3188.
8) 橘内良雄：炭素鋼の疲労き裂伝播機構に及ぼす微視的組織の影響，材料，Vol.29，No.325，1980，pp.1018-1023.
9) 加藤昭彦，栗原正好，川原正言：広範囲の応力条件下での疲労き裂伝播速度式の検討，日本造船学会論文集，Vol.153，1983，pp.336-343.
10) 橘内良雄：突合せ溶接材および母材の疲労き裂伝ぱ挙動，日本機械学会論文集A編，Vol.47，No.419，1981，pp.677-688.
11) 田中洋一，征矢勇夫：各種溶接構造用鋼の疲労亀裂伝播特性の検討，溶接学会論文集，Vol.7，No.2，1989，pp.90-97.
12) Toyosada, M., Gotoh, K. and Niwa, T.: “Fatigue crack propagation for a through thickness crack a crack propagation law considering cyclic plasticity near the crack tip”, International Journal of Fracture, Vol.26, No.9, 2004, pp.983-992.
13) 鉄鋼基礎共同研究会，鉄鋼の環境強度部会：鉄鋼材料の海水中腐食疲労・応力腐食割れデータ集，Vol.1，1986，pp.44-222