

RPG荷重の自動計測手法に関する検討

村上, 幸治
九州大学工学部技術部

森下, 瑞生
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/2324/4794745>

出版情報 : 溶接構造シンポジウム講演論文集, 2019-12. Japan Welding Society
バージョン :
権利関係 :



RPG 荷重の自動計測手法に関する検討

九州大学工学部技術部

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

○村上 幸治

森下 瑞生

後藤 浩二

A Study of the Automatic measurement technique of RPG load

by Koji MURAKAMI, Mizuki MORISHITA, Koji GOTOH

1. 緒言

疲労亀裂伝播則は、Paris¹⁾により応力拡大係数範囲 ΔK と疲労亀裂伝播速度 da/dN (a : 亀裂長さ, N : サイクル数) の関係式 $da/dN=C(\Delta K)^m$ (C, m : 材料定数) が提案されて以降、同様の形式で、Elber²⁾による疲労亀裂に特有の亀裂開閉口挙動を考慮した有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} をパラメータとする伝播則、更には亀裂開閉口挙動の影響も考慮しつつ疲労亀裂先端近傍における繰返し塑性挙動も考慮したRPG荷重(Re-tensile Plastic zone Generated load)基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} をパラメータとする伝播則³⁾が提案され、特に変動荷重履歴下における疲労亀裂成長履歴の推定に関してはRPG荷重(Re-tensile Plastic zone's Generated load)基準の伝播則の優位性が示されている⁴⁾。

同伝播則を適用するためには、疲労亀裂伝播試験を実施してRPG荷重を計測し、この結果に基づいて伝播則の材料定数(Paris則の C, m に相当)を同定することが必要不可欠である。RPG荷重の同定方法には、疲労亀裂伝播試験で測定した荷重-ひずみのデータに基づく荷重-塑性ひずみヒステリシス曲線(本論文では、以下単に「ヒステリシス曲線」と称す)について、元曲線とこれを反転させたものを重ね合わせ、両者にずれが生じ始める点とする、反転法⁵⁾と、荷重-ひずみ履歴の二階微分値に基づく、微分法⁶⁾がある。反転法では、RPG荷重に加えて、疲労亀裂開閉口荷重(いわゆるOpen荷重, Close荷重)も同時に同定可能であるが、微分法ではRPG荷重のみ同定可能である。また、これらのデータ処理に際して、特に反転法では、一定負荷サイクル毎に得られたヒステリシス曲線を手動で重ね合わせ処理する必要があるため、その作業に多大な労力を有するという欠点がある。

本研究では、疲労亀裂開閉口挙動に基づく複数の破壊力学パラメータに基づく疲労亀裂伝播則を同時に評価することも勘案し、反転法によるRPG荷重同定を自動化する方法を検討した。

2. RPG 荷重の計測方法

2.1 データ取得環境

Fig.1に例示するように、試験片の疲労亀裂伝播経路上に貼付した接触式抵抗線ひずみゲージとロードセルから、Fig.2に示す高精度コンプライアンス計測システム⁷⁾により得られたヒステリシス曲線に基づき、反転法の自動化を検討した。

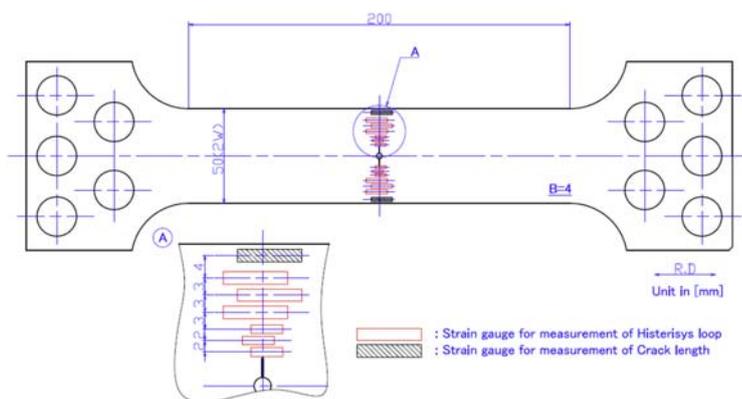


Fig.1 Test specimen (CCT type).

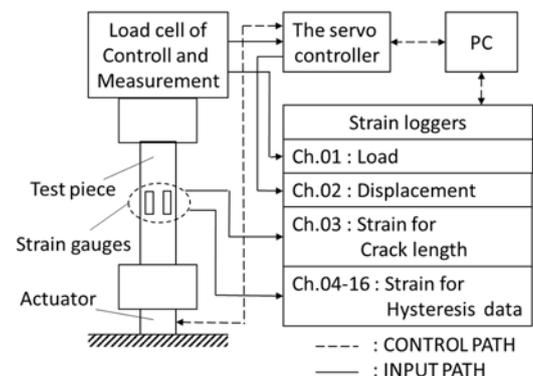


Fig.2 Measurement of compliance system.

繰返し一定荷重振幅試験により取得したヒステリシスを除荷弾性コンプライアンス法⁸⁾で処理することで、ヒステリシス曲線を得る。その後、これを反転させたヒステリシス曲線を元曲線と同時に描画して重ね合わせることで、RPG 荷重等が同定される。Fig.3 に、反転法により RPG 荷重及び Open 荷重を同定する手法を模式的に示した。

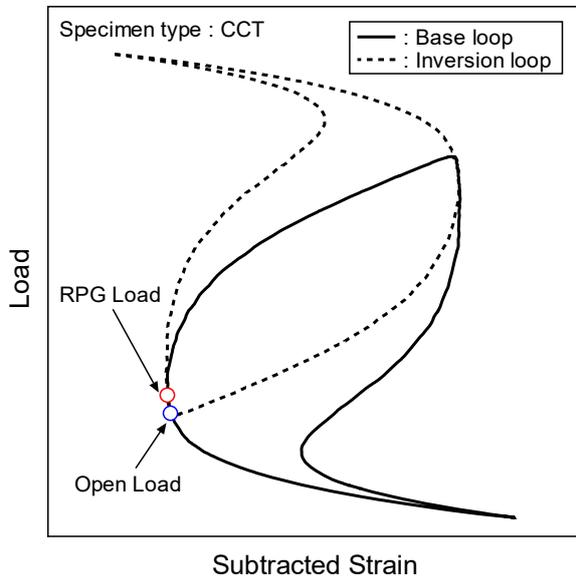


Fig.3 Identification of RPG Load.

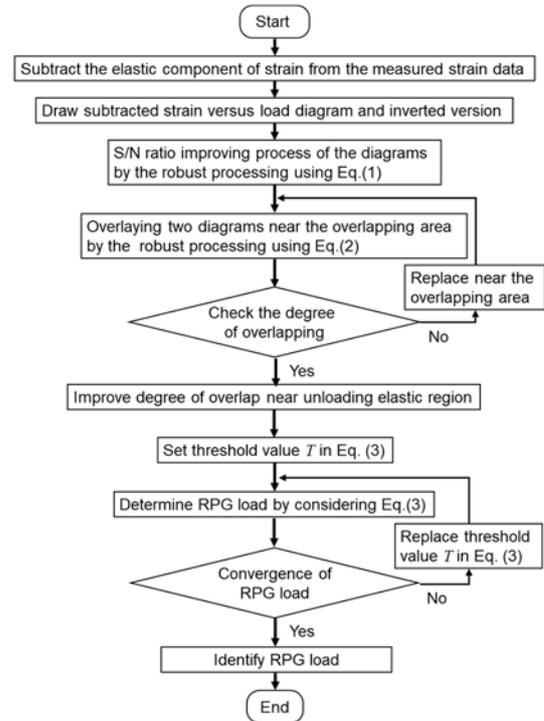


Fig.4 The flow chart of Automatic measurement.

2. 2 重ね合せのアルゴリズム

Fig.4 に RPG 荷重計測の自動処理フローを示す。自動計測処理システムは、将来、データ処理の経験を機械学習できるアルゴリズムを活用することで、複数の材料や試験片形状に依存しない定量的なデータ処理を実現することを念頭に、Python ディストリビューションの Anaconda⁹⁾を使用して構築した。

反転法を手動で行うと、正転、反転ヒステリシス曲線の重ね具合が作業により異なり、計測結果にバラツキが生じることがある。これはヒステリシス曲線に含まれる誤差（ノイズ）や、評価素材ごとに疲労亀裂開閉口挙動に固有の特徴があるためにヒステリシス曲線の形状が異なることなどの問題があることに加え、データ処理の熟練具合にも影響を受ける。そこで、自動計測の開発にあたっては、データ処理の熟練度に直結するチューニングパラメータの使用を最小限に抑えつつ、使用するアルゴリズムは Anaconda で提供されている関数の使用で実現することに注力した。Anaconda で提供されている関数を用いることで、2 曲線の重ね合わせ作業が自動化され、かつ 2 曲線の一致度を数値として得ることができる。

反転法による RPG 荷重や亀裂開口荷重の決定には、正転、反転ヒステリシス曲線における除荷弾性コンプライアンス変化が一致する領域を探す作業が必要である。しかし、試験により取得したヒステリシス曲線には多くの誤差（ノイズ）が入っているため、後述する正転と反転のヒステリシス曲線の重ね合わせに支障をきたす場合があるため、ロバスト推定による S/N 比の改善を試みた。そこで、式 (1) に示す誤差に重みを付ける Biweight 推定法で処理したデータに最小二乗法を用いて、ヒステリシス曲線を構成するデータの連続した 6 点を一つのデータ群として取り扱い、そこから 1 点ずつ順次ずらしたデータ群に対して Fig.5 に例示する処理を行った。具体的な処理手続きは以下の通りである。Fig.5 a) に例示するように、データ群を最小二乗法で近似し、式 (1) 中の d_i を決定する。一つのデータ群の中で最も大きな d_i を d_{max} とし、全データ群の d_{max} の平均値を式 (1) 中の W_a としている。式 (1) により算出した重みを考慮し、各データ群の近似直線の傾きと切片が収束するまで繰返し計算し、収束後、Fig.5 b) に示すようにデータ群中の 3 番目の並びのデータを近似直線上に垂直距離移動させる。これら同様な処理を全データ群で実施したが、処理後のヒステリシス曲線とオリジナルとはノイズ以外での違いはほぼ見られなかった。

$$w_a(d_i) = \begin{cases} 0 & (d_i < -W_a, W_a < d_i) \\ \{1 - (d_i/W_a)^2\}^2 & (-W_a \leq d_i \leq W_a) \end{cases} \quad (1)$$

$w_a(d_i)$: 重み関数,
 d_i : 誤差,
 i : データ番号 ($i=1\sim 6$),
 W_a : 誤差の許容範囲.

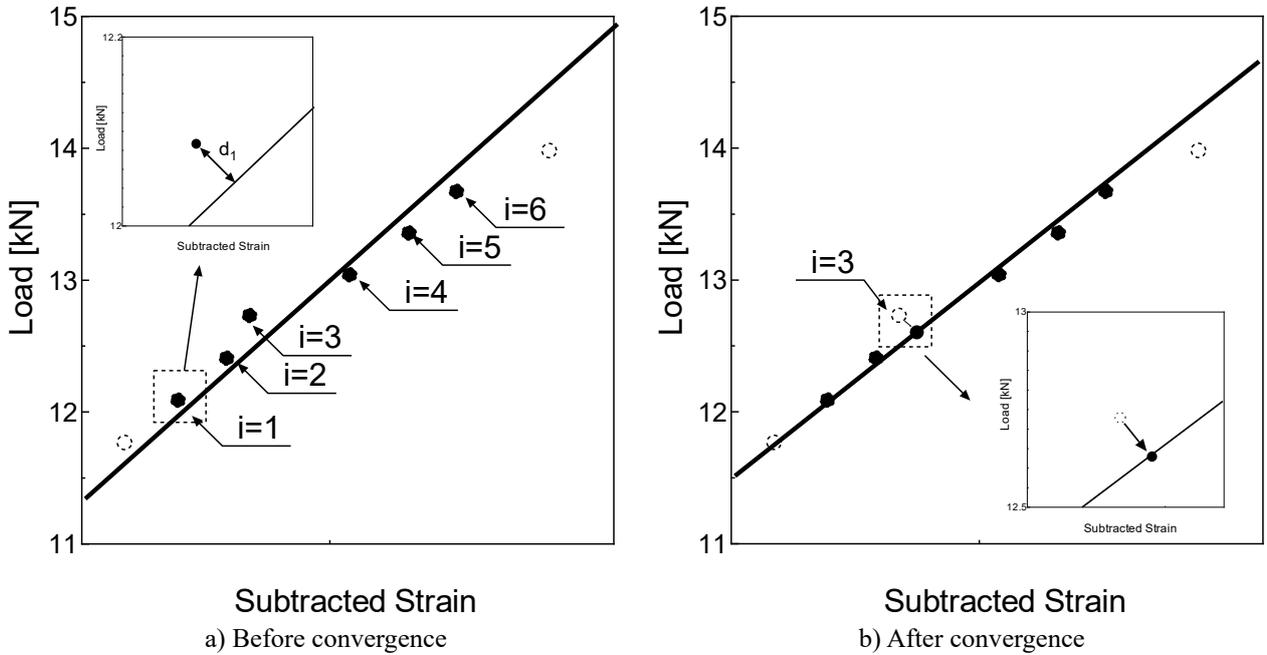


Fig.5 Smoothing of hysteresis curve by the weighted least square approximation.

正転及び反転ヒステリシス曲線の除荷弾性コンプライアンス変化が一致する領域の探索には、数値計算ライブラリ Scipy¹⁰⁾の `optimize.least_squares` 関数を用いた。Fig.6 a)に探索状況の一例を示すが、正転ヒステリシス曲線の負荷側と反転ヒステリシス曲線の除荷弾性荷重付近のデータを、式 (2) に示す Biweight 推定法で重みを付けたデータとし、前述の関数にて非線形最小二乗最適化を行う。もしここで最適な一致状態とならない場合は、曲線それぞれを式 (2) の W_b 以下となるデータ範囲に減らしながら、正転ヒステリシス曲線に対する反転側の相対移動量が収束するまでフィッティング処理を繰り返す。

その後、Fig.6 a)に示すように一致探索完了後の2曲線の最小ひずみ値を揃えたときに生じる交点の上限値と下限値の間のデータのみで再度、前述のロバスト推定にて2曲線を重ね合わせることで、Fig.6 b)に示すように、精度良く一致領域を特定することが可能となる。

以上の手法により、Fig.3に示すような従来、手作業で行ってきた正転及び反転ヒステリシス曲線の重ね合わせが自動で行えるようになった。

$$w_b(d_{l,m}) = \begin{cases} 0 & (d_{l,m} < -W_b, W_b < d_{l,m}) \\ \{1 - (d_{l,m}/W_b)^2\}^2 & (-W_b \leq d_{l,m} \leq W_b) \end{cases} \quad (2)$$

$w_b(d_{l,m})$: 重み関数,
 $d_{l,m}$: 誤差,
 l : 正転ヒステリシスのデータ番号,
 m : 反転ヒステリシスのデータ番号,
 W_b : 誤差の許容範囲. 全 $d_{l,m}$ の平均値.

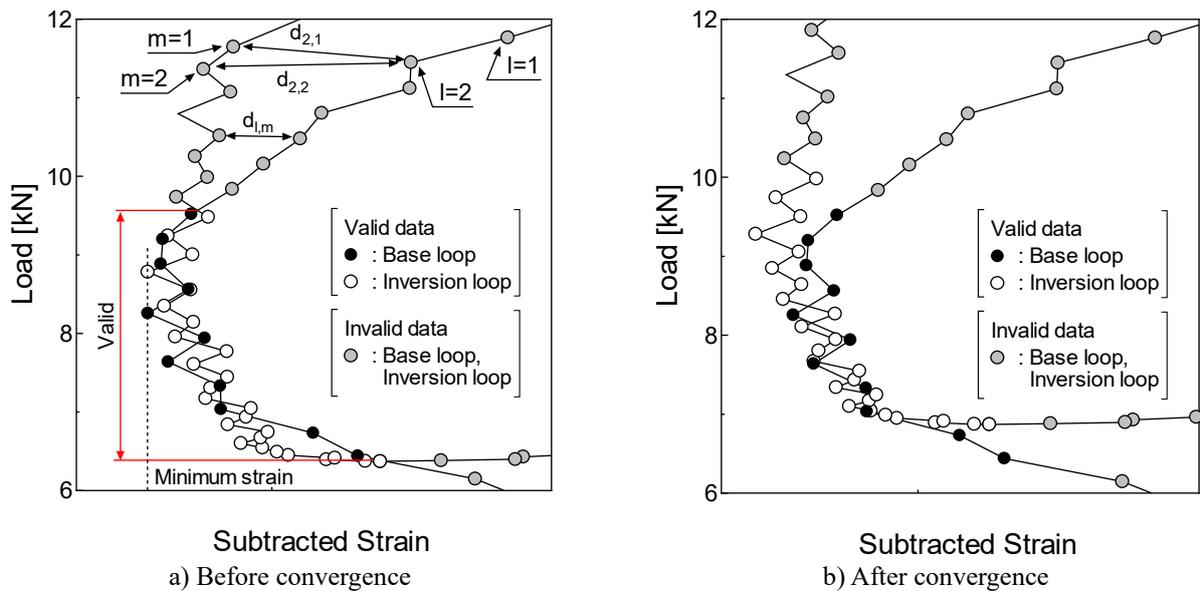


Fig.6 Schematic illustration of the base and inversion hysteresis loops matching procedure.

2. 3 RPG 荷重の決定方法

反転法において、正転及び反転ヒステリシス曲線が離れる点として定義される RPG 荷重について、式 (3) に示す判定条件より両曲線の離反点を判定する。

$$T \geq (D_{B(i)} - D_I)^2 / H_W^2 \quad (3)$$

- T : 閾値,
- $D_{B(i)}$: i 番目の正転ヒステリシスの除荷弾性コンプライアンス値,
- D_I : $D_{B(i)}$ と同じ荷重レベルでの反転ヒステリシスの除荷弾性コンプライアンス値,
- H_W : ヒステリシス曲線の幅.

Fig.7 は RPG 荷重決定に及ぼす閾値 T の影響を確認した一例である。 T には重ね合せ曲線群ごとに上限値と下限値を設定している。 著者らによる反転法による RPG 荷重手動計測の経験では、データに含まれるノイズ影響についてヒステリシス曲線全体を視認しつつ考慮して重なり判定を行っていたが、本研究で提案する自動処理でも手動計測の結果と近い値を取得できるようにするため、設定範囲内の値のうち、一段低いデータの $D_{B(i)} - D_I$ が負となる場合は、 $D_{B(i-1)}$ に対応する荷重値を RPG 荷重値として採用することで手動計測に近い判定結果を得られるようにした。

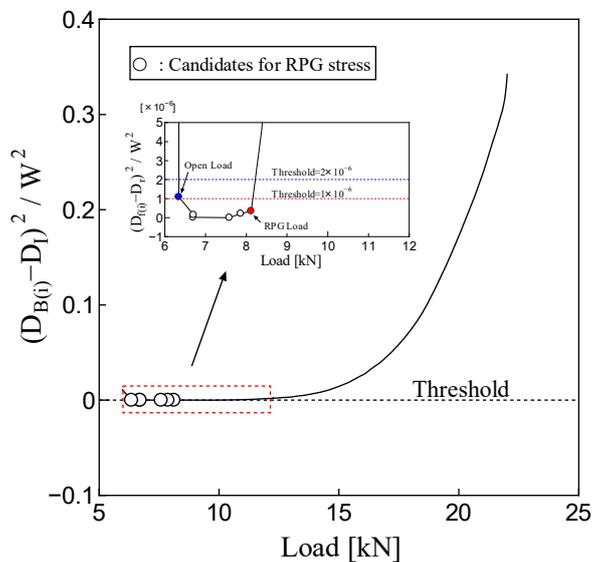


Fig.7 Determination of RPG Load by the threshold values.

このように適切な T を設けることで、ロバスト推定にて除去できなかったノイズによる影響をできる限り排除した RPG 荷重の同定が可能となった。なお、同手法は豊貞らにより提案されている、反転法による亀裂開口荷重 (Open 荷重) の自動計測にも転用可能である。

3. 手動計測との比較

3. 1 RPG 荷重と亀裂長さの関係

自動計測により求めた RPG 荷重と疲労亀裂開口荷重に対し、過去の手動計測結果¹¹⁾との比較一例を Fig.8 a)-c)に示す。RPG 荷重を同定するための判定条件である式 (3) の閾値はヒステリシス曲線の重なり具合により変動するが、 $1.0 \times 10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-6}$ 程度である。

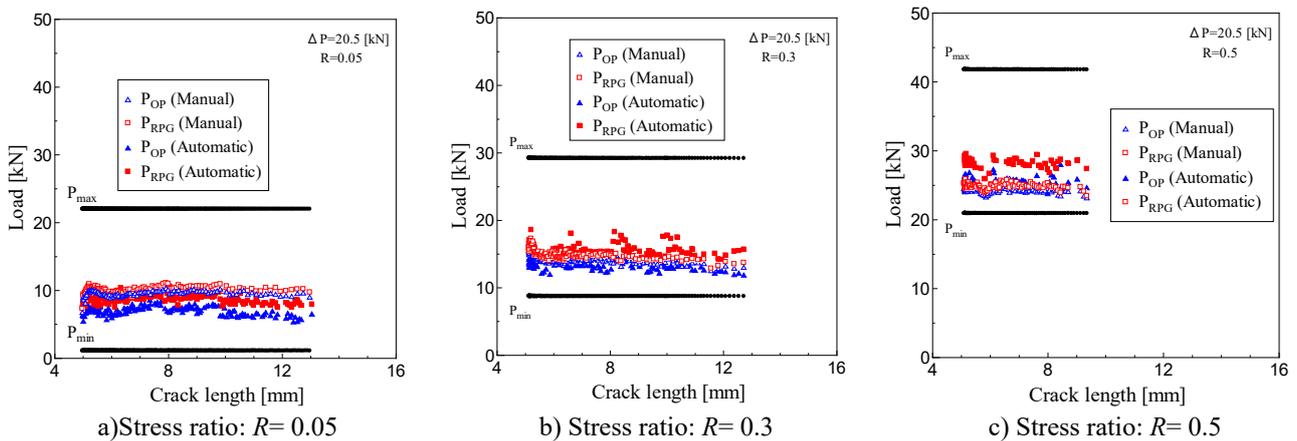


Fig.8 Comparison of RPG Load by Automatic and manual measurements technique.

比較した応力比から判断する限りにおいて、RPG 荷重、疲労亀裂開口荷重ともに数 kN の差異が見られるが、この結果を以って自動計測により得られる結果が手動方法よりも不正確であるとは言えない。

3. 2 疲労亀裂進展特性

自動計測により求めた RPG 荷重より、式 (4) で示す ΔK_{RPG} 基準による疲労亀裂伝播則の材料定数 C , m を求めた結果を Fig.9 に示す。

$$da/dN = C(\Delta K_{RPG})^m \quad (4)$$

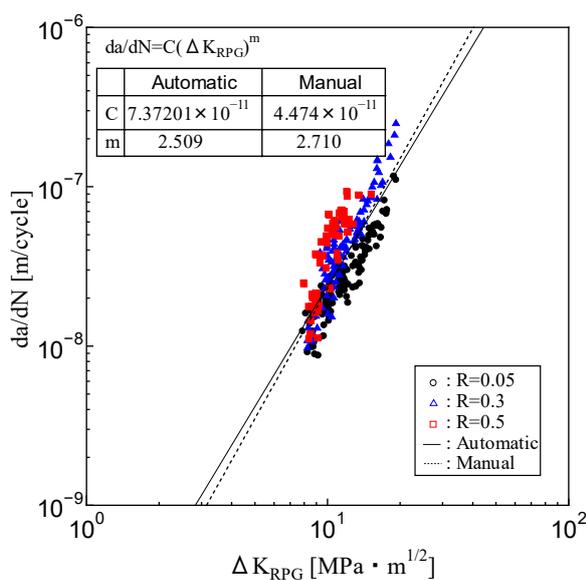


Fig. 9 Comparison of $da/dN-\Delta K_{RPG}$ by the Automatic measurement.

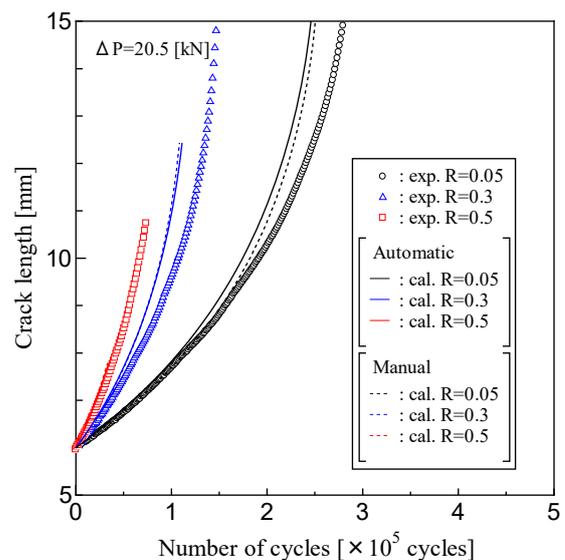


Fig. 10 Comparison between estimated fatigue crack propagation histories with measured value.

Fig.9 より，自動計測による RPG 荷重に基づき決定した材料定数 C ， m は，過去に手動計測した RPG 荷重に基づき決定した結果に近い値を示していると判断できる．また，自動計測による材料定数と過去に実施した手動計測による材料定数を用いて，疲労亀裂伝播成長シミュレーション¹²⁾を行い，亀裂成長曲線を求めた結果を Fig.10 に示すが，当然の結果ではあるが，疲労亀裂成長履歴の推定結果もほぼ同程度のものが得られた．以上の結果より，自動計測により得られた RPG 荷重はこれまでの手動処理による測定結果と同等のものが得られたと判断できる．

4. 結言

RPG 荷重基準による疲労亀裂成長履歴の推定は，特に変動荷重履歴下における優位性を有しているため，これらを大型溶接構造物に使用される鋼材の疲労亀裂伝播成長推定の定量的評価に適応することを目的として，RPG 荷重の自動計測手法を検討し，これまでの手動計測による結果と同等の測定が可能であることを確認した．

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 Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP-486, (1971), pp.230-242.
- 3) Toyosada, M., Okamoto, T. and Fujiwara, H.: Fatigue Crack Propagation Model with considering for Crack Opening / Closing Phenomena, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.152, (1983), pp.381-389. (in Japanese)
- 4) For example, Matsuda, K. and Gotoh, K.: Numerical simulation of fatigue crack propagation under superposed stress histories containing different frequency components with several mean stress condition, Marine structures Vol.41, (2015), pp.77-95
- 5) M. Toyosada and T. Niwa: The significance of RPG load for fatigue crack propagation and the development of a compliance measuring system, International Journal of Fracture, Vol.67, (1994), Issue 3, pp.217-230.
- 6) Machida, S., Yoshinari, H. and Makino, H.: Detailed Observation of Change in Strain near Fatigue Crack Tip, Journal of the Society of Materials Science Japan, Vol.46, (1997), Issue 496, pp.138-142. (in Japanese)
- 7) Murakami, K. and Gotoh, K.: A Study of Measurement accuracy of RPG Load of the Fatigue crack propagation test, 溶接構造シンポジウム 2017 講演論文集, (2017), 253-256. (in Japanese)
- 8) Kikukawa, M. Jono, M., Tanaka, K. and Takatani, M.: Measurement of Fatigue Crack Propagation and Crack Closure at Low Stress Intensity Level by Unloading Elastic Compliance Method, Journal of the Society of Materials Science Japan, Vol.25, (1976), Issue 276, pp.899-903. (in Japanese)
- 9) <https://www.anaconda.com/distribution/> (accessed on 27, September, 2019)
- 10) <https://www.scipy.org/> (accessed on 27, September, 2019)
- 11) Uchimura, H., Takuno, M., Murakami, K. and Gotoh, K.: Fatigue strength of austenitic stainless steels applied to chemical tankers, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.16, (2012), pp.89-97. (in Japanese)
- 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 Fatigue, Vol.26, Issue 9, (2004), pp.983-992.