

瀬戸大橋トラス弦材角溶接部の非破壊検査に対する
確率および破壊力学手法を用いた評価Evaluation of NDI Results in the Seto Ohashi Bridge
through Probability and Fracture Mechanics Concept.

三木千寿* 田中靖資** 奥川淳志***

by Chitoshi Miki, Yasushi Tanaka and Okukawa Atsushi

The requirements of fatigue design and quality control of the Seto Ohashi Bridge was "no fatigue crack will appear on the surface of main members during one century use. The corner joints of truss chords were inspected using newly developed automatic ultrasonic testing systems. All defects of which size were over the permissible limits had to be repaired and inspected again. All of NDI results have been recorded with regard to the size and the location. The results of NDI were evaluated through probability and fracture mechanics concepts and conformed the good performance of quality control.

1. はじめに

本州四国連絡橋瀬戸大橋の溶接部材は、所要の疲労強度を確保するといった観点から、その要求品質が決められている。とくに箱断面トラス弦材の部分溶け込みあるいはすみ肉溶接による角継手は、そのルート部にブローホールが残りやすく、またブローホールの存在により部材の疲労強度は著しく低下することが認められている¹⁾²⁾(図-1)。そこで瀬戸大橋の補剛トラスの道路・鉄道併用部材は、100年間の使用によってもブローホールから発生した疲労きれつが部材表面に達しないことを目標として、要求品質が決められている³⁾。さらにその溶接部は自動超音波法により非破壊検査が実施されその結果が保存されている⁵⁾。本論文はトラス弦材溶接部の非破壊検査結果に対して確率・統計手法および破壊力学手法を適用して疲労寿命解析を行い、当初設定した“100年間で表面にきれつが出現しない”という目標の実現度の評価を試みたものである。

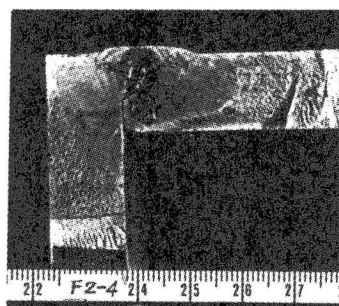


図-1. 角溶接ルート部のブローホールとそれから発生・進展した疲労亀裂

* 東京工業大学教授(目黒区大岡山2-12-1)

** 東京工業大学修士課程(現在建設省土木研究所)

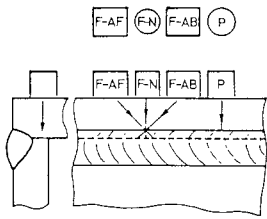
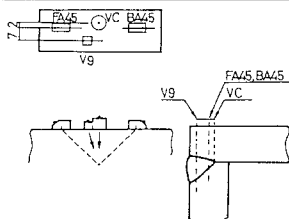
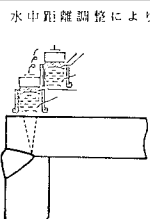
*** 本州四国連絡橋公団設計二課課長(港区虎の門5-1-5 45森ビル)

2. 角継手部ブローホールの非破壊検査結果

ここで対象とする欠陥は、箱断面トラス部材のかど溶接部（部分融け込みグループ溶接部、内面すみ肉溶接部、外面すみ肉溶接部）に生じたブローホールである。本四連絡橋の部材は疲労に対する厳しきから特A部材、A部材、B部材の3種類に分類されており、それぞれに対する欠陥の許容限界寸法は特A部材に対しては、欠陥の幅を代表するW寸法が1.5mm、欠陥の高さを代表するH寸法が4.0mmであり、AおよびB部材に対してはW寸法が3.0mm、H寸法が6.0mmである⁴⁾。

角溶接部は表-1に示す5種類の自動超音波探傷システムにより検査されている。いずれのシステムとも自動記録の機能を有しており、そのうち4システムでは通常使用されるAスコープ表示の他、投影図に近い像の得られるBスコープおよびCスコープ表示を用い、欠陥の形状まで判定できるようになっている。またこれらのシステムの採用に当たっては、標準の人工欠陥試験片および自然欠陥試験体の試験結果に基づいて性能の評価基準を満たしていることが確認されている。

表-1. 弦材角溶接部の非破壊検査に用いられた自動超音波探傷システム

システム 項目		D I A - C A T - U T システム	P C - 2 U システム	C H P - 5 システム
探 触 子	個 数	4 個	4 個	2 個
	接触方法 (媒質)	ギャップ法 (ソニコート)	ギャップ法 (グリセリン)	局部水浸法 (水)
	配 置 種 類	 P (SZ20NSF): 溶込み深さ測定 F-N (SZ15SSF): ルート部 F-AF, F-AB (SZ20A4SSF): 欠陥検査	 VC (SIS2153350N): 溶込み量 (SG32153200N): 溶込み変化量 FA45, BA45 (SG52153290A45): ルート部欠陥検出 V9 (CG5217): 一般部 (SK12.5N): 欠陥検出	 水中距離調整により、焦点深さ可変 2 個並列走行 たれ込み 底面キズ検査 ルートブロー 一般部検査 5MHz, 1.5φ 8φファースト(水中): 有効板厚30~42mm 10φファースト(水中): 有効板厚42~55mm

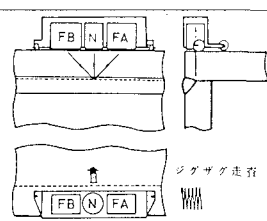
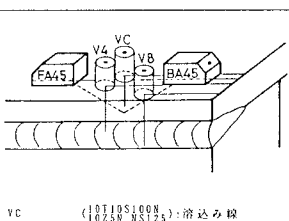
システム 項目		N - N - I システム	A U T システム
探 触 子	個 数	3 個	
	接触方法 (媒質)	ギャップ法 (ソニコートBSL)	ギャップ法 (グリセリン)
	配 置 種 類	 ジグザグ走行 K (SZ20NSF31~68) (SZ20NSF33~84): 溶込み量 FA (SZ20A4SSF23~58) (SZ20A4SSF19~89): 欠陥検出 FB (SZ20A4SSF23~84) (SZ20A4SSF20~100): 欠陥検出	 VC (10110S100N (1025N NS123): 溶込み線 SZ25S100A454 FA45, BA45 (SZ20S150A45): ルート部欠陥 SZ10S50 V4 (SZ10S300N): 監視機能欠陥検出 V8 (SZ10N): 一般部欠陥

図-2は、自動超音波探傷システムの性能評価に使用された自然欠陥試験体のグループ溶接されたかど継手と、すみ肉溶接されたかど継手のブローホールを、あるシステムで探傷した時のエコー高さと、探傷後露呈して測定した実寸法（W寸法）の関係である。ブローホールの寸法は図中の回帰直線を基準として推定されるので、これらと図中の回帰直線から求まる推定寸法の差が測定誤差となる。推定寸法と実寸法を比較すると図-3のような関係が得られる。このようにして求めた各々の超音波探傷システムの誤差の平均値および標準偏差を表-2に示す。いずれのシステムともすみ肉溶接部の測定誤差がグループ溶接のそれよりも大きくなる傾向がある。図-4に、ある検査システムにより測定されたブローホールのW寸法、H寸法の例を示す。ブローホールの寸法は0.1mm単位で測定されている。また、0.5mmより小さいブローホールからのエコーは装置のノイズや部材表面の反射エコーと判別が困難なため足切りをしたので測定していない。この分布が対数正規分布に従うと仮定すると図中の実線で示す頻度分布が得られる。

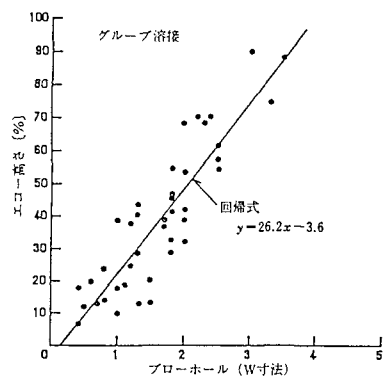


図-2. エコ-高さとブローホールの関係

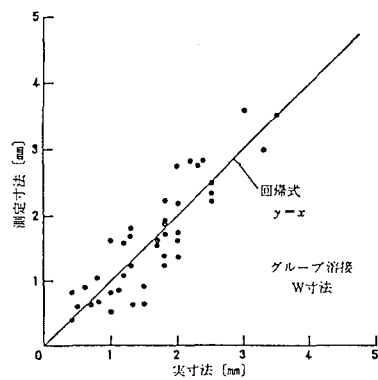


図-3. 推定寸法と実寸法

表-2. 各システムの測定誤差の平均値および標準偏差

項 目			シ ス テ ム				
			A	C	K	I	J
部分溶け込み グループ溶接	W寸法	誤差の平均値	- 0.01	- 0.08	- 0.32	- 0.36	- 0.15
		誤差の標準偏差	0.40	0.40	0.34	0.33	0.13
	H寸法	誤差の平均値	- 0.10	0.01	- 0.08	0.57	0.15
		誤差の標準偏差	0.87	- 0.76	0.58	0.43	0.56
すみ肉溶接	W寸法	誤差の平均値	- 0.07	0.79	- 0.17	- 0.33	- 0.11
		誤差の標準偏差	0.96	1.42	1.21	0.76	1.62
	H寸法	誤差の平均値	不 明	0.40	- 0.09	0.26	- 0.04
		誤差の標準偏差	不 明	1.34	0.71	0.81	0.60

(注) システム ACKIJ の順序は表-1のシステムの順序と対応していない。(単位: mm)

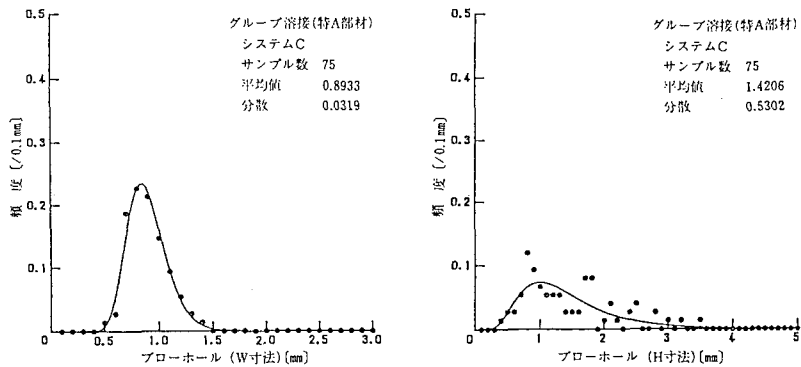


図-4. あるシステムによるブローホール寸法の測定結果

3. ブローホール寸法の確率分布の補正

(i) 裾切りの影響

非破壊検査で許容寸法を越えていると判断されたブローホールは補修することが義務づけられている。したがって、トラス弦材中に実在するブローホールの寸法の分布は非破壊検査結果に対する受入れ許容限界寸法で裾切りされた影響をうけている。図-4に示した分布に対して裾切りの影響の補正⁶⁾を行った後の分布を図-5に示す。

(ii) 測定誤差の補正

超音波探傷試験では、ブローホールの寸法が小さい場合見落とし可能性があり、また測定された寸法には誤差が含まれる。したがって、真のブローホールの分布を求めるには、検出されたブローホール寸法の分布に対して、測定誤差と見落としの補正を行う必要がある。

ここでは測定誤差が検査システムによらず正規分布に従うと仮定する。裾切りを行った確率密度分布を $f_b(b)$ 、誤差の確率密度分布を $f_x(X)$ とすると、誤差の補正をした後の確率密度分布 $f_{be}(b)$ は、

$$f_{be}(b) = \int_{0.5}^{\infty} f_b(b-x) f_x(X) dx \quad (1)$$

で与えられる⁶⁾。2で述べたように、ここで使用しているいずれの超音波探傷システムでも超音波探傷システムの違いに関係なくW寸法、H寸法ともに0.5mm以下は検出していない。そのため、この値以下の分布は切り捨てた。こうして得られた分布を図-5中に示す。

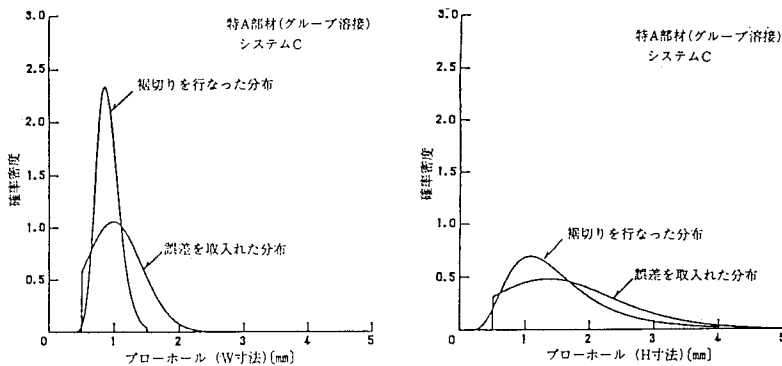


図-5. 裾切りの影響および誤差の補正後のブローホール寸法の分布

(iii) 見落としの補正

ここで用いた非破壊検査システムでは、W寸法が1.0mm以上、またはH寸法が2.0mm以上のブローホールは確実に検出することができ、W寸法が0.5mm以下、かつH寸法が0.5mm以下のブローホールはほとんど検出できない。したがってブローホールの寸法と非検出率の関係を、すべてのシステムに対して図-6に示すように仮定する。測定誤差の補正をした分布に、図-6に示す関係をゆう度関数としてベイズの定理を適用し⁶⁾、次式によって見落としの補正をおこなった。

$$f(x) = f(x) L(x) / \int_0^{\infty} f_{ie}(x) L(x) dx \quad (2)$$

x : w あるいは h L : ゆう度関数

得られた分布を図-7に示す。(2)式の分母の定積分は定数となり、見落としの補正を行った後の分布(事後分布)に確率密度関数の性質を持たせるための正規化係数である。この係数は超音波探傷試験で発見

されたブローホールの数に対する発見できなかったブローホールを含めたすべてのブローホールの数
の比を意味しており、発見されたブローホールの数から今後の非破壊検査で新たに発見されるであろうブロー
ホールを予測することができる。なお、非破壊検査で欠陥を検出しながら実際には欠陥は存在しない、
いわゆるからぶりに対しては、補正を行っていない。これは安全側の仮定である。

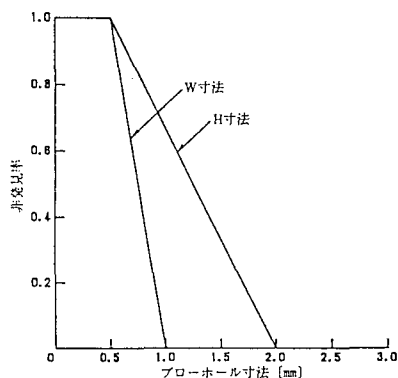


図-6. ブローホール寸法と見落率

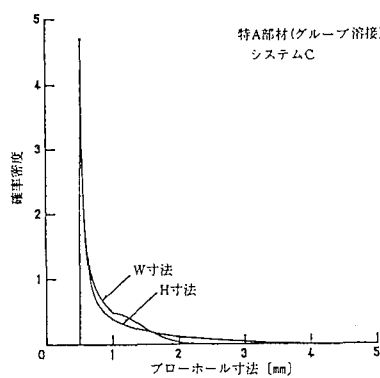


図-7. 見落しの補正をした分布

(iv) 円形亀裂への置き換え

ブローホールを含む部材の疲労強度評価を破壊力学に基づいた亀裂進展解析により行うには、ブローホール
を亀裂に置き換える必要がある。幅W・高さHのブローホールは次式により直径2aの円形亀裂に置き換
えられることが、疲労亀裂進展解析および実験結果との比較から確かめられている⁷⁾。

$$2a = 0.94 \times W^{0.29} \times H^{0.48} \quad (3)$$

(3)式を適用することにより求められた円形亀裂の直径2aの分布を図-8に示す。その際、検査システ
ムごとのサンプル数の差の影響は重みをつけることにより考慮した。

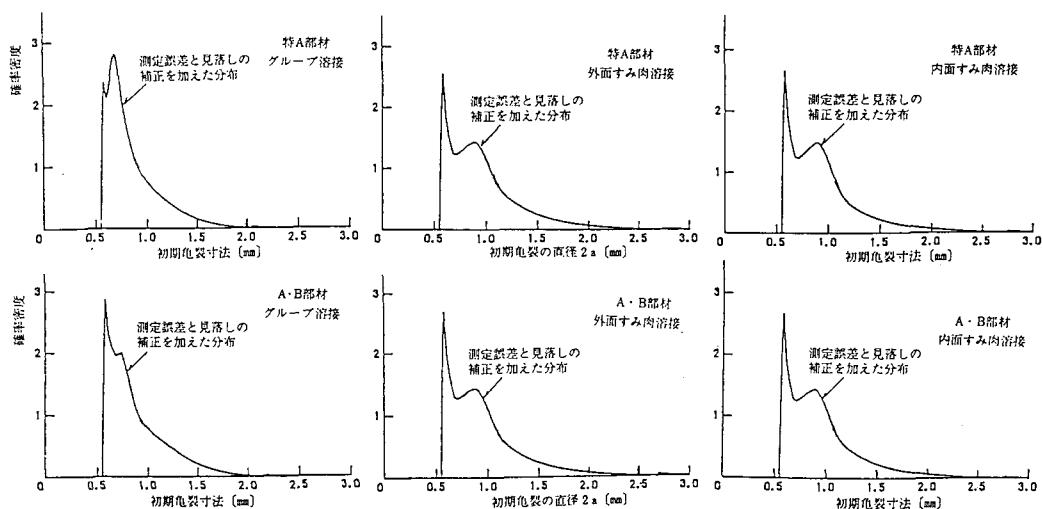


図-8. 初期亀裂寸法(円形亀裂の直径2a)の分布

4. 疲労きれつ進展解析

(1) 解析モデル

部分グループ溶接あるいはすみ肉溶接のルート部のブローホールから発生した疲労亀裂は図-9に示すようにはじめに溶接ルート部を中心とした円形の内部亀裂として進展し、内部亀裂が溶接金属の表面に達すると急速に半円形あるいは3/4円形の表面亀裂となり、やがて表面亀裂が貫通亀裂になると考える⁹⁾。このような亀裂に対する応力拡大係数は、重ね合わせ法⁹⁾により計算した。

(2) 疲労きれつ進展則

疲労きれつ進展速度と応力拡大係数範囲 (ΔK) 間には次式を仮定する。

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (5)$$

C, m : 材料係数

ΔK_{th} : 疲労亀裂進展下限界

ここでは ΔK_{th} 以上の ΔK_I について線形被害則が成立つとして、変動荷重下での疲労亀裂進展量を評価した¹⁰⁾。

我国で行われた鋼素材および鋼溶接継手に関する疲労亀裂進展試験の結果を数多く収集し、 $m=3$ とした時の C の変動特性を調べた結果¹¹⁾、 C の分布は図-10に示す対数正規分布が得られた。疲労亀裂進展解析では m は 3、 C はこの確率分布を用いた。

ΔK_{th} は残留応力や応力比に著しい影響を受けるが、引張残留応力の高い溶接継手内や、応力比の高い所を対象とした実験結果は少ない。そこでここでは ΔK_{th} は $2.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($6.45 \text{ kgf}/\text{mm}^{3/2}$) と一定値を仮定した。

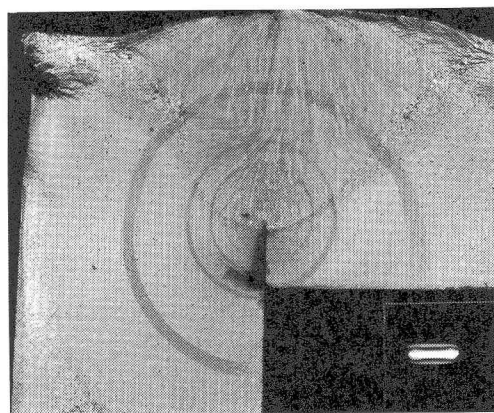


図-9. ブローホールからの亀裂進展形状

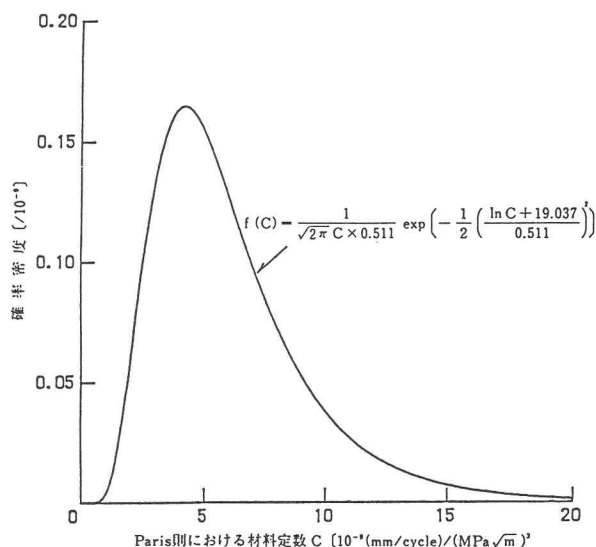


図-10. C の確率密度関数

5. トラス弦材に生じる変動応力

(1) 影響線

吊橋の補剛トラスの各部材は同一の荷重によってもその断面力の変動特性は異なっており、したがって疲労に対しての厳しさも異なる。下津井瀬戸大橋、南・北備讃瀬戸大橋の補剛桁は連続トラスであり、設計時には連続梁としてモデル化されている。ここでは概略の疲労の照査に基づいて、図-11に示す下津井大橋の中央径間上弦材（3019部材）および側径間の上弦材（3006）の影響線を疲労寿命解析の代表として用いる。これらの部材は疲労に対して厳しく、またほぼ同じ影響線を有する部材が多い。したがってこれらの影響線を用いた結果で瀬戸大橋の全部材の疲労安全性を検討できると考えた。

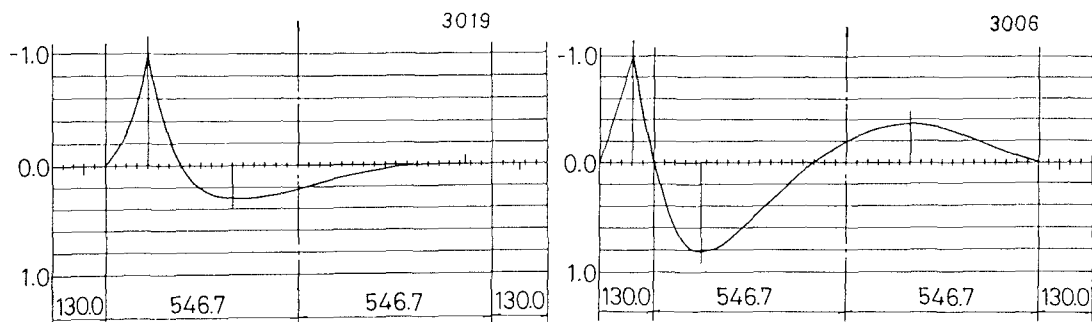


図-11. 影響線の形状

(2) 活荷重の仮定

瀬戸大橋は1988年4月、道路4車線、在来型鉄道複線で開業したが、ここでは設計時に想定した鉄道部が新幹線と在来線の複々線とした場合および開業時の使用状態を用いて検討する。

(i) 列車荷重のシミュレーション

新幹線は1日26往復、列車はN-16型12両とし、各軸重は乗車効率に基づいてモンテカルロシミュレーションで決定した。在来線は開業時に予定されている列車の種類およびダイヤを考慮し、列車の種類および1日の本数を15両編成の寝台特急が1往復、5両編成の特急が10往復、9両編成の快速が19往復、および24両編成の貨物が4往復とした。これらの内、昼間に特急が8往復、快速が14往復、貨物が3往復、夜間に寝台特急が1往復、特急が2往復、快速が5往復、貨物が1往復すると仮定した。列車長、車軸位置、空車時の軸重および編成の詳細は現在の列車を参考に決めた。

(ii) 自動車荷重シミュレーション

自動車荷重は瀬戸大橋の予想交通量に基づいて時間交通量を365台/車線とし、大型車の車種混入率を2軸大型26%、3軸大型および4軸トレーラーをそれぞれ7%と設定し、モンテカルロシミュレーションで荷重列を求めた^{1,2)}。各車両の重量分布は東名高速道路の実測値に基づいて設定している。

(3) 列車のすれちがい位置

活荷重において列車の占める割合は非常に大きく、したがって橋上での列車のすれちがいは重要である。

橋上で列車がすれちがう場合、影響線の形状およびすれちがう位置により、発生する部材力は単線載荷した時に発生する部材力より大きくなる場合および小さくなる場合がある。伊藤の研究⁴⁾を参考にして、在来線の場合、橋上での列車のすれちがいは、貨物と貨物で1日に1度生じるとし、列車の先頭がすれ違う位置は、主塔近傍（橋端から350m）および橋の中央（橋端から600m）2ケースを考えた。従来線と新幹線の両

方を考える場合、列車どうしの同時乗荷は昼間に新幹線+新幹線が2回、夜間に新幹線+貨物が1回とし、すれ違う位置は新幹線+新幹線が橋の中央で1回、新幹線+新幹線および新幹線+貨物が主塔近傍でそれぞれ1回とした。

(4) 軸力範囲の頻度分布

以上に示した条件で5日分の荷重列を作成し、影響線を用いて軸力の変動を計算し、それに対してレインフロー法を適用することにより軸力範囲の頻度分布を求めた。また、その結果を平均化することにより、1日当たりの頻度分布とした。

在来線のみの場合と在来線に新幹線を加えた場合の軸力範囲の頻度分布の一例を比較してそれぞれ図-12(a)、(b)に示す。新幹線が通る場合には、疲労に大きく影響する軸力範囲の大きい部分の頻度が高くなっている。同時乗荷により軸力範囲が増大する場合および貨物あるいは新幹線と大型車が連行して通過する際に発生する軸力範囲は本州四国連絡橋の疲労照査列車荷重²⁾(2.7t/m等分布荷重、長さ400m)の乗荷により発生する軸力範囲を越える場合がある。

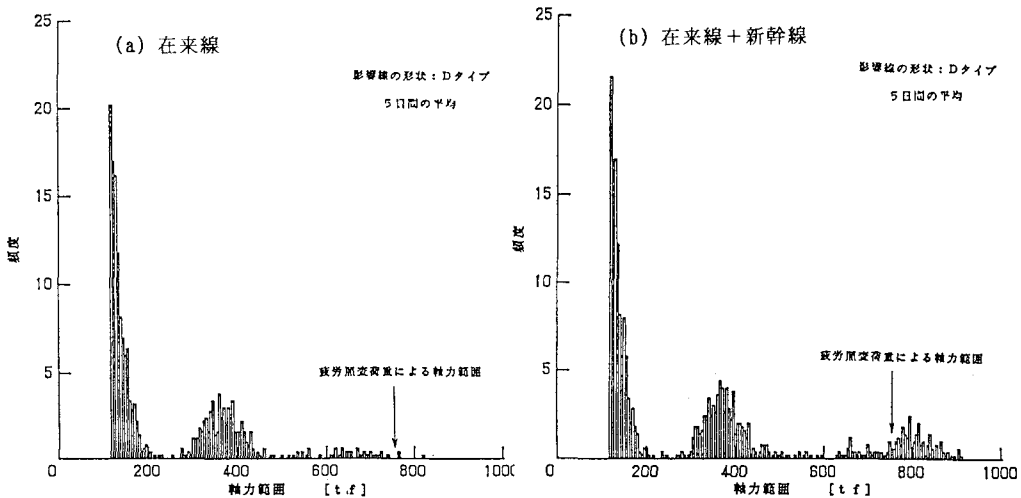


図-12. 軸力範囲の分布 (3019部材)

6. 疲労き裂寸法の分布の経年変化

(1) 疲労亀裂寸法の分布

疲労亀裂長さの分布を用いてaが決められた時、活荷重のシミュレーションにより得られた単位期間当たりの応力範囲の頻度分布から応力拡大係数範囲の頻度分布が求まる。 ΔK_{th} 以下の成分は疲労亀裂進展に寄与しないため、 ΔK_{th} 以上の成分についてのみ等価応力拡大係数範囲(ΔK_{eq})を求める。亀裂長がaの時の単位期間における亀裂進展長は、

$$da = C (\Delta K_{eq})^m dN \quad (8)$$

となる。ここで、 ΔK_{eq} は亀裂長の関数となることは当然であるが、 ΔK_{th} 以上となる ΔK の成分の数dNも ΔK_{th} が与えられた時、亀裂長によって決定される値であるから亀裂長の関数となる。したがって亀裂が進展するに従って進展に寄与する応力範囲の成分も多くなる。

以上の変数に対し確率密度関数を導入すると、単位期間における亀裂寸法の分布の変化は次式によって表わされる。

$$f_{a_{j+1}}(a_{j+1}) = f_c(x) f_{a_j}(a_j) \left| \partial x / \partial a_{j+1} \right| da_j \quad (9)$$

$$x = (a_{j+1} - a_j) / [(\Delta K_{eq})^2 d N] \quad (10)$$

$f_{a_{j+1}}(a_{j+1})$: (j+1) 年における亀裂寸法の確率密度関数
 $f_{a_j}(a_j)$: j 年における亀裂寸法の確率密度関数

計算はすべて数値積分であるが、計算精度と計算時間のかねあいから積分間隔daは0.01mm、単位期間を1年としている。単位期間の間に、Paris則における材料定数Cの平均値を用いて計算した亀裂進展長が0.01mmに満たない亀裂に対しては、計算に多大の時間を必要とするが、計算の結果得られる確率密度関数の形状等にほとんど影響しないことから計算を省略した。

設計時に想定した新幹線も載るような使用条件下で3019部材の影響線を有する中央径間径間部の特A部材に分類されている上・下弦材のグループ溶接から発生する疲労亀裂を対象として計算した亀裂寸法の分布の経年変化を図-13に示す。50年間の使用では、亀裂寸法の変化はわずかなため、ここでは50年、100年および150年後についての結果を示している。部分溶け込み溶接、すみ肉溶接とも、そのルートは部材表面から8mmより深い位置にあり、したがって設計条件であった10年間の使用で疲労きれつが表面に表われないようにすることを十分満足しているといえよう。なお、新幹線が載らない場合は150年間の使用においても亀裂寸法の増加は極めてわずかである。

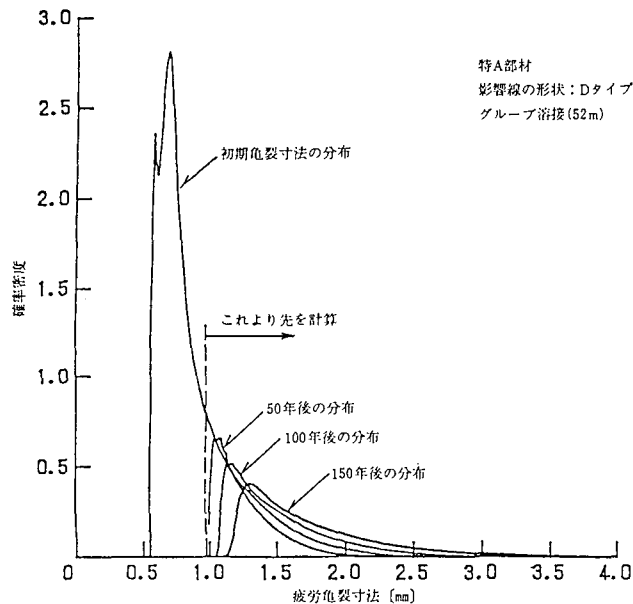


図-13. 疲労亀裂寸法の確率密度分布の経年変化

7. おわりに

本研究で得られた主な結果をまとめると次の通りである。

- (1) 非破壊検査結果に対して誤差、見落しを補正し、疲労亀裂進展におけるばらつきも考慮した破壊力学解析から、瀬戸大橋トラス弦材角溶接に対する許容欠陥寸法の設定値およびそれに対応した非破壊検査により、当初の設計条件下で100年間疲労亀裂が部材表面に達しないという目標は達成されていることが確認された。
- (2) 非破壊検査の結果は、いずれのシステムによっても測定された寸法の分散より誤差の分散が大きいため、欠陥寸法の確率分布に対して誤差の分布が支配的となっている。また、角継手を構成する部分溶け込み溶接、外面すみ肉溶接および内面すみ肉溶接において、内面すみ肉溶接が最も欠陥の発生率が高く、また非破壊検査の精度が低い。したがって疲労の観点からは内面すみ肉溶接は存在しない方がいい。

本研究は瀬戸大橋の補剛桁のうち、トラス弦材のブローホールから発生する疲労き裂のみに着目していったものである。疲労損傷が生じる可能性は他の部材、部位にも十分にあり、瀬戸大橋の疲労安全性の確保には、今後メンテナンス検査での検査位置、検査間隔を含めた幅広い検討が必要と考えている。

本研究を実施するにあたり、(財) 海洋架橋調査会、併用橋の非破壊検査方法の検討委員会¹³⁾の田島二郎委員長はじめ委員各位から有益な助言、データの提供をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Miki, C., Nishino, F., Hiyabayashi, Y. and Ohga, H. : Fatigue Strength of Longitudinal Welded Joints Containing Blowholes, 土木学会論文集, No.325, pp.153-165, 1982.9
- 2) Tajima, J., Takena, K., Miki, C. and Itoh, F. : Fatigue Strengths of Truss Made of High Strength Steels, 土木学会論文集, No.341, 1984.1
- 3) 久保村圭介、下川浩資、竹名興英：鉄道併用長大橋建設のための新技術の開発、土木学会誌、第38巻、1983.6
- 4) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会、疲労分科会、報告書、別冊2、本州四国連絡橋の疲労設計、昭和49年3月
- 5) (財) 海洋架橋調査会・本州四国連絡橋製作検討委員会：本州四国連絡橋の補剛トラス製作に関する検討報告書、別冊1・調質高張力鋼かど継手のA.U.T.システムのまとめ、昭和62年3月
- 6) 伊藤学、亀田弘行：土木・建築のための確率・統計の基礎、丸善株式会社
- 7) Miki, C., Mori, T., Sakamoto, K. and Sasaki, T. : Fatigue Crack Growth Analysis from a Blowhole in a Longitudinal Welded Joint, 土木学会論文集, No.386, 73-81, 1987.10
- 8) Takena, K., Hirano, S., Itoh, F. and Miki, C. : Fatigue Strengths of Box-Section Truss with Corner Joints, 土木学会論文集, No.380/I-7, 1987.4.
- 9) Albrecht, P. and Yamada, K. : Rapid Calculation of Stress Intensity Fractors, Proceedings of ASCE, Vol.103-st12, pp.377-389, 1977
- 10) Miki, C., Murakoshi, J. and Sakano, M. : Fatigue Crack Growth in Highway Bridges, 土木学会論文集, No.386, pp.155-164, 1987.10.
- 11) Okumura, T., Nishimura, T., Miki, C. and Hasegawa, K. : Fatigue Crack Growth Rates in Structural Steels, 土木学会論文集, No.322, pp.175-178, 1982
- 12) 三木千寿、後藤祐司、村越潤、館石和雄：シミュレーションによる道路橋の疲労設計活荷重の研究、構造工学論文集, Vol.32A, 1986年3月、pp.597-608
- 13) 海洋架橋調査会、併用橋の非破壊検査方法の検討委員会、報告書、1、2、3、昭和61年、62年、63年

(1990年10月12日受付)