

鋼橋維持管理技術者の トレーニングマニュアル

Ⅲ： 疲労の評価編

疲労の評価編 目次

1. 橋梁の疲労-----	1
1.1 はじめに-----	1
1.2 疲労評価における冗長性と進展性-----	3
2. S-N線図 ($\Delta\sigma$ -N関係) による評価-----	8
2.1 はじめに-----	8
2.2 S-N線による評価-----	9
2.3 疲労設計曲線-----	10
2.4 各継手における許容応力範囲の比較-----	17
3. 変動振幅応力を受ける鋼部材の疲労寿命評価-----	21
3.1 はじめに-----	21
3.2 応力頻度解析 (レインフロー法) -----	21
3.3 線形累積被害則による疲労寿命評価-----	22
3.4 計算例-----	26
4. 疲労亀裂進展解析-----	32
4.1 はじめに-----	32
4.2 疲労亀裂進展解析の概要-----	32
4.3 疲労亀裂進展解析に必要な情報-----	33
4.4 一定振幅応力下の疲労亀裂進展の解析方法と計算例-----	46
4.5 変動振幅応力下の疲労亀裂進展解析-----	60
5. 亀裂の性格評価のための整理表-----	67
5.1 はじめに-----	67
5.2 整理表の作成上の留意点-----	67
5.3 各項目の説明-----	67
5.4 損傷事例の適用例-----	80

[付属資料] 整理表の適用例

第1章 橋梁の疲労

1.1 はじめに

橋梁の疲労問題では、亀裂が発生し、進展し、場合によっては、破壊に至ることを対象としている。破壊には、落橋という人命にもかかわる種類のもので、二次部材の完全切断のような、その段階では人命には直接関係しない種類のものがある。

鋼橋は、コンクリート系の橋よりかなり均一な組織を扱う。すなわち、コンクリート系の橋では、モルタル、骨材、鉄筋、プレストレス筋、シーブ、鉄骨など様々な材料で構成されている。これに対して、鋼橋では、床版など部分的にコンクリートを使用する場合もあるが、ほとんどが鋼で構成されている。ここでは、鋼橋の鋼部材に限定して疲労について述べる。

上述した疲労亀裂は、繰返し载荷を受ける部材の溶接部、切り欠き部などといった応力集中部で発生する。溶接部は、溶接欠陥、溶接ビード、ルートなどが原因で応力集中を有し、さらに残留応力の影響を受けて亀裂の発生点となることが多い。また、切り欠き部ではそのままでは、必ず応力集中が生じる。これに対して、補強材、フィレットなどで応力集中の緩和が行なわれている。補強材については、溶接で取付ける場合、かえって疲労強度を下げてしまうことがあるので注意を要する。これに対する対策方法として、質の良い溶接、止端のティグ処理・ピーニングなどで疲労強度を向上させるほか、非破壊検査で欠陥の確認をすることなどが検討されてきている。

橋梁における疲労を考える場合、道路橋の疲労と、鉄道橋の疲労は、その特性が異なる。最も大きい違いは荷重である。この影響もあり、結果として、活荷重比の違い、応力変動のパターンの違いが生じる。

参考のために、鉄道橋上をP-16荷重を走行させた場合の桁中央下フランジに生じる応力変動の波形と道路橋上をRLT荷重を走行させた場合の応力変動波形を支間長が5m、25m、100m、200mについて図-1.1と図-1.2に示す。鉄道橋では、支間長が短い場合には車両の車軸ごとに応力変動が生じている。この車軸ごとの応力変動の大きさは支間長が長くなるにつれて小さくなり、支間200mではまったく見られなくなる。また、支間が長くなるにつれて、疲労荷重による応力の割合が小さくなっている。この最後の点については、道路橋でも同じことが言える。

疲労で直接問題となるのは、変動荷重の大きさと繰返し数ではなく、亀裂が発生、進展する部分の変動応力の大きさと繰返し数である。

また、道路橋と鉄道橋では、設計の規定^{1)・2)}が異なり、とくに鉄道橋では疲労規定が初期のころから採用されていた。道路橋では、鋼床版など一部に疲労を考慮した設計

が行なわれてきた。そのため、ディテールが異なる部分もあり、損傷事例は必ずしも同じではない。

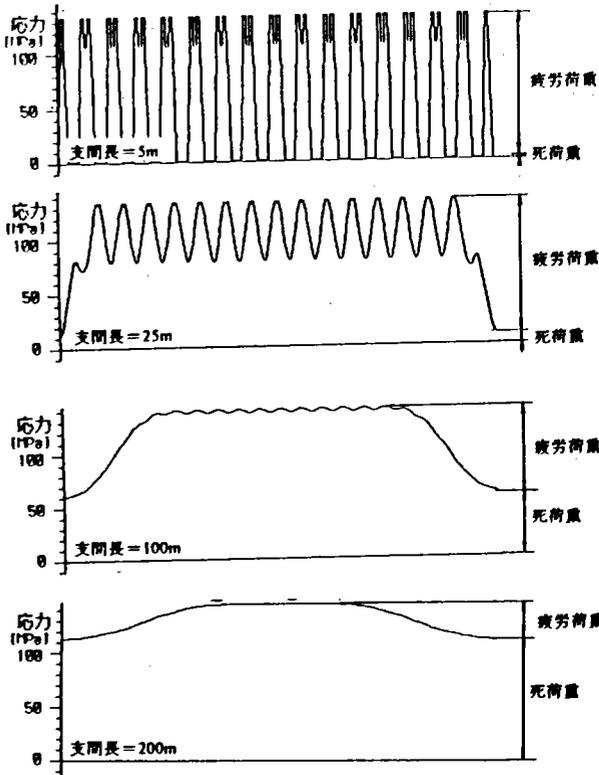


図-1.1 鉄道橋の応力変動波形

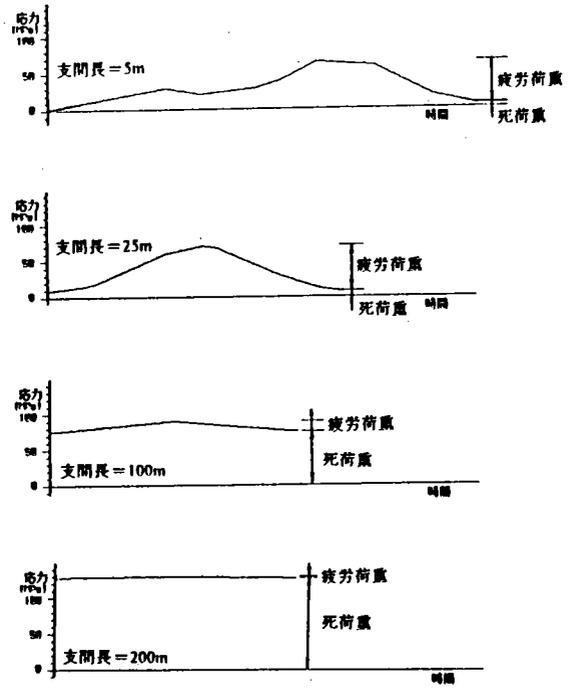


図-1.2 道路橋の応力変動波形

1.2 疲労評価における冗長性と進展性

前述したように、疲労では、亀裂が発生し、進展し、場合によっては、破壊に至ることを対象としている。破壊には、落橋という人命にもかかわる種類のもの、二次部材の完全切断のような、その段階では人命には直接関係しない種類のものがあり、前者が大きな問題を起こす。亀裂のこの性格を判断する場合に、亀裂の冗長性と進展性の理解が重要になる。

これらの言葉はよく使われている割には、明確な定義はなされずに使われている場合が多いようである。そこで、冗長性と進展性についてまとめてみる。

1.2.1 冗長性

冗長性とは、リダンダンシー(redundancy)と英語で言うことも多い。ここでは、米国連邦道路局のトレーニングマニュアル³⁾の冗長性に関する記述を紹介する。

冗長性とは、ある構成要素あるいは部材が破壊しても、その部材がそれまでに受持っていた荷重が他の部材に再配分され、構造物全体の崩壊は生じないことを意味する。すなわち、再配分により付加される荷重に一時的に耐えるだけの余裕が他の部材にある場合に、構造全体の崩壊を防げる。

冗長性のない構造では、荷重が再配分された時点で、荷重が付加された部材が破壊し、この結果、構造物の部分あるいは全体が破壊する。

橋梁には、3タイプの冗長性がある。

- ・荷重経路冗長性（単径間内で複数の荷重経路をもつ場合の冗長性：ex. 多主桁）
- ・構造的冗長性（複数径間に跨がった荷重経路をもつ場合の冗長性：ex. 連続桁）
- ・内的冗長性
(複数の荷重経路をもつ機械的な連結部材を持つ場合の冗長性：ex. 高力ボルト接合)

橋の冗長性の程度を認識あるいは特定することは、破壊の危険性を定義する上で重要である。

1.2.1.1 荷重経路冗長性

荷重経路冗長性がある橋梁は、3つ以上の（主桁のような）主要荷重伝達部材をもつか、3つ以上の荷重経路をもつ。1つの部材が破壊したとしても、荷重は他の部材に再配分され、橋は崩壊しないであろう。荷重経路冗長性のある橋梁の代表例として多主桁

橋がある。(図 1.1参照)



図 1.1 多主桁橋の損傷事例

1.2.1.2 構造的冗長性

複数径間に跨がって荷重経路をもつ橋梁の設計は、構造的な冗長性があるという。2主桁橋でも連続桁であれば、構造的な冗長性がある場合もある。1つの部材が破壊しても、その支間の荷重はこれに隣接する支間に再配分され、橋の破壊は起こらないこともある。

構造要素の破壊を想定した計算によって、構造的な冗長性があるか否かを確認することができる。トラス橋には構造的な冗長性があるものもある。しかし、これは必ず解析によって決めなければならない。

1.2.1.3 内的冗長性

橋の1部材が複数の荷重経路を持つように機械的に連結された幾つかの部材要素から構成されるとき、内的な冗長性があるという。1部材要素の破壊によって、部材全体の破壊に至ることはないであろう。内的な冗長性のある部材として、リベットで組立られたプレートガーダーが挙げられる。(図 1.2と1.3参照)

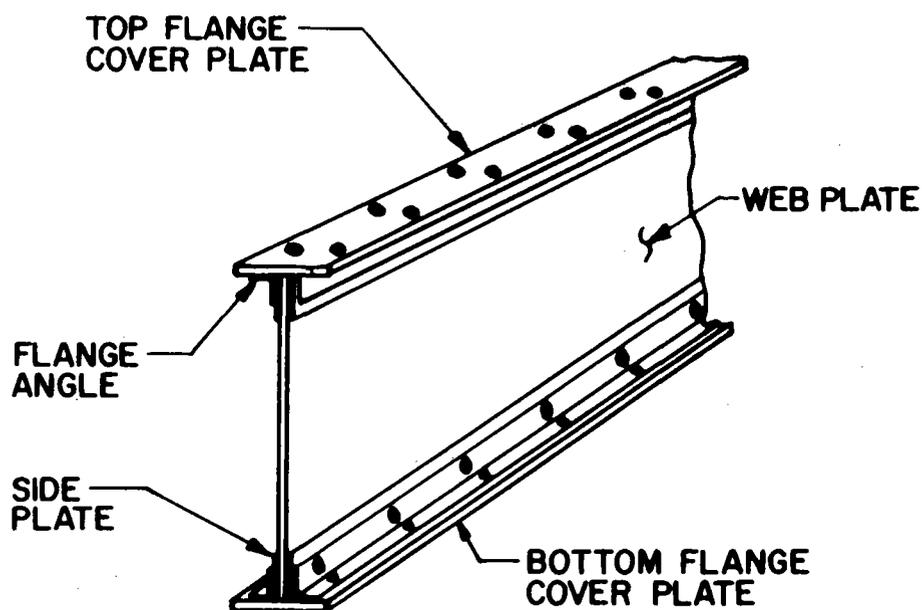


図 1.2 リベット桁

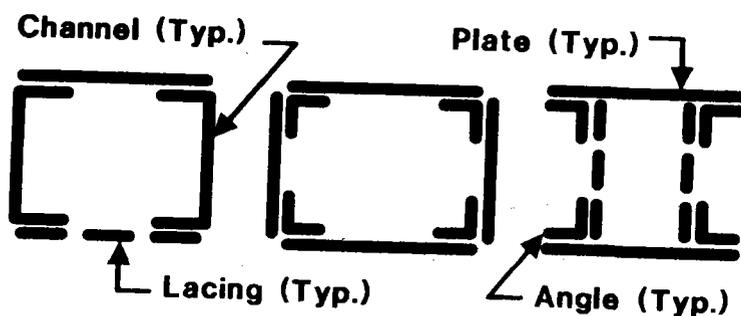


図 1.3 リベットによる箱断面部材

部材の内的な冗長性は、溶接による補修によって、低下あるいは消失してしまうこともある。溶接は亀裂が部材要素間を進展する道を与えてしまう。

内的な冗長性は、部材の冗長性とも言える。

1.2.1.4 冗長性がない構造

冗長性がない橋梁は、荷重に抵抗する主部材が2部材以下あるいは荷重経路が2つ以下しかない。冗長性がない橋には、必ずといっていいほど、崩壊を決定する部材、すなわち、その部材が破壊すると全体崩壊を招く部材がある。(図1.4参照)

構造的冗長性および内的冗長性は考慮すべきではなく、2主桁橋はすべて冗長性がないものとして考えるのが妥当である。

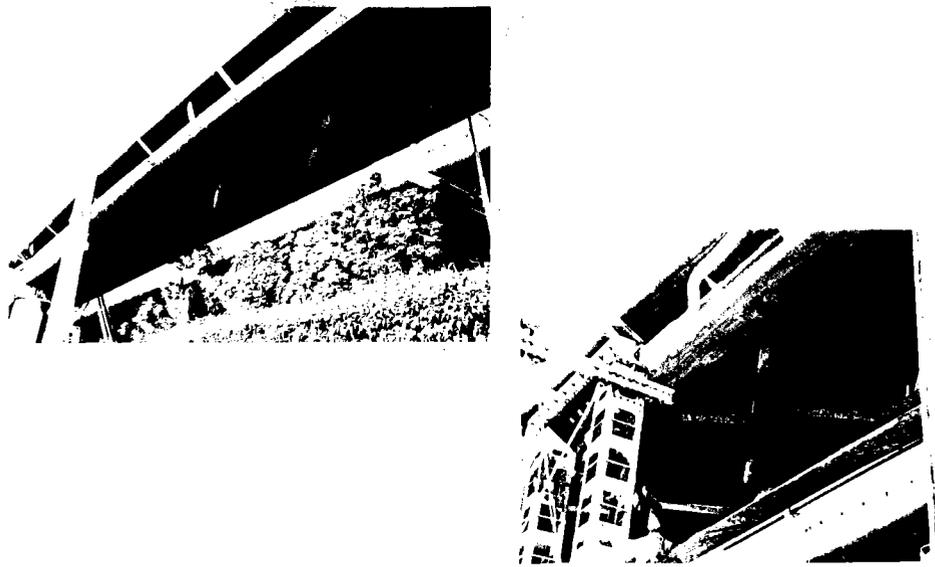


図 1.4 2主桁橋の損傷事例

1.2.2 進展性

進展性という言葉は耳にすることはあるものの、まだ定義されて使用されている言葉ではないようである。ただ、鉄道橋の維持管理では、表 1.1のように亀裂の評価をする場合に進行性によってランク付けを行なっている⁴⁾。

上述の冗長性の定義と鉄道での定義とは若干異なるかもしれないが、『冗長性』と『進展性』を以下のように定義する。

冗長性：1部材あるいは1部材要素が破壊した場合に構造物全体として破壊にいたるか破壊にいたらないかという特性を表す言葉

進展性：1部材の中で、今ある亀裂が今後、進展するか否かを表す言葉

進展性を考える場合によい事例として、圧縮の繰返し応力を受ける部材に溶接部がある場合に、その溶接部から生じた亀裂についての評価がある。すなわち、残留引張応力部では亀裂が発生し進展することがあるが、この亀裂が進展するに従い残留引張応力は開放され、亀裂の進展は遅くなることが多く、停留する場合もある。しかしながら、溶接構造では、意外なところで連続性があり、亀裂が予期せぬ方向に進展することがある。したがって、溶接部のある部材に圧縮の繰返しを受ける場合に発生した亀裂は、比較的進展性は小さいと考えられるが進展性がないとは言い切れない。したがって、圧縮部の

亀裂は必ずしも停留するとは限らないので注意を要する。

『冗長性』と『進展性』は定義をすることで、矛盾あるはあらたな問題が生じて、それを解決する中で、より適切な言葉の定義がなされていくことと考える。今後、さらなる議論の中で、この言葉を適切な形で使用することで、さらに、亀裂の評価に対する理解を深めることが望まれる。

表 1.1 鉄道橋の維持管理における進行性による評価表

評価ランク	状 況
a	変状を発見してから4～5年以内（全般検査で1回見落としを考慮）に機能の限界もしくはその部材（品）の破断等に達する可能性のあるもの。
b	変状を発見してから10年（塗装期間）以内に機能の限界もしくはその部材（継手）の破断等に達する可能性のあるもの。
c	変状が認められるものの進行は遅く、計算上設計想定寿命程度は満足できると思われるもの。
s	変状が発生しても通常はほとんど進展しないか、進展しても破断に至らないもの。

参考文献

- 1) 土木学会鋼鉄道橋設計標準に関する研究委員会：国鉄建造物設計標準解説 鋼鉄道橋 鋼とコンクリートとの合成鉄道橋，土木学会，1983.5.31
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，丸善，1994.2.20
- 3) Federal Highway Administration: Bridge Inspector's Training Manual/90, 1991.7
- 4) 鋼構造物補修・補強・改造の手引き：P.311，1992.7.29，鉄道総合技術研究所

第2章 S-N線図 ($\Delta\sigma$ - N 関係) による評価

2.1 はじめに

疲労試験を行うと、一般に応力範囲が小さくなるにしたがって疲労寿命が長くなる関係が見られる。試験結果を、縦軸に応力範囲 ($\Delta\sigma$)、横軸に疲労寿命 (N) をとってプロットした場合、 $\Delta\sigma$ と N の関係は、**図 2.1** に示すような両対数紙上で負の傾きをもつ直線で近似される。

$$\log N = \log C - m \log(\Delta\sigma) \quad (2.1)$$

ここで、 C および m は定数である。このような式で表される $\Delta\sigma$ と N の関係を S-N 曲線と呼ぶ。

応力範囲を小さくして実験を行うと、荷重繰返し数をいくら多くしても疲労破壊が生じないようになる。無限回荷重を載荷しても疲労破壊が起こらない応力範囲の上限値を疲労限と呼ぶ。

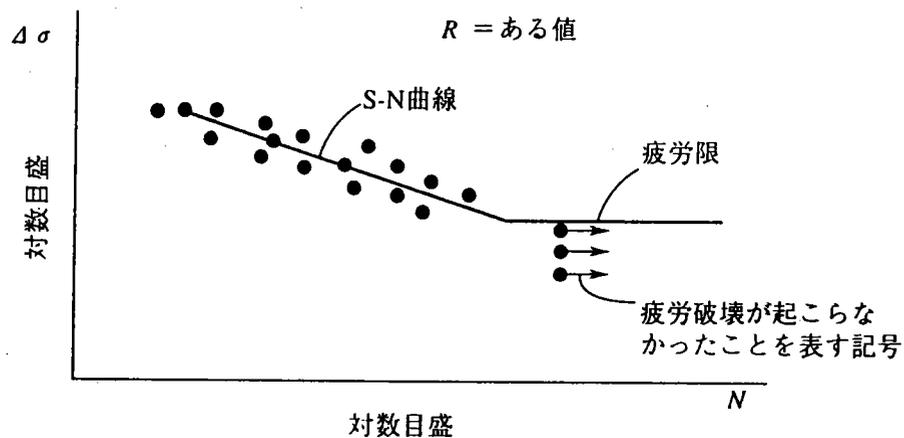


図 2.1 S-N 曲線 (出展: 大倉一郎『鋼橋の疲労』¹⁾)

2.2 S-N線による評価

図 2.2 に示すような下フランジの垂直スティフナ溶接部を例として、S-N線による疲労寿命評価を行う。

日本鋼構造協会(JSSC)指針²⁾によると、この継手は荷重非伝達型のリブ十字継手（隅肉溶接、非仕上げ）はE等級に分類される。 2×10^6 回の応力繰返しに対応する疲労強度は80Mpaであり、一定振幅応力に対する疲労限は62Mpaである。一定振幅応力に対する疲労設計曲線は以下の式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma^m \cdot N &= C_0 \quad (\Delta\sigma > \Delta\sigma_{ce}, \Delta\sigma_{ve}) \\ N &= \infty \quad (\Delta\sigma \leq \Delta\sigma_{ce}, \Delta\sigma_{ve}) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

$$C_0 = 2 \times 10^6 \cdot \Delta\sigma_f^m \quad (3.3)$$

ここで、 N ：疲労寿命、 $\Delta\sigma$ ：応力範囲、 $\Delta\sigma_f$ ： 2×10^6 回基本許容応力範囲、 $\Delta\sigma_{ce}$ ：一定振幅応力に対する疲労限、 $\Delta\sigma_{ve}$ ：変動応力に対する応力打ち切り限界、 m ：疲労設計曲線の傾きを示す指数であり、直応力を受ける継手の場合は $m=3$ 。

強度等級Eのリブ十字継手の場合、 $\Delta\sigma_f = 80\text{Mpa}$ より、

$$C_0 = 2 \times 10^6 \cdot 80^3 = 1.024 \times 10^{12} \quad (3.4)$$

ゆえに、応力範囲 $\Delta\sigma=100, 75, 50\text{Mpa}$ の各々に対する疲労寿命 N 、および、一日当りの応力繰返しを 1.2×10^4 回/日とした場合の継手の疲労破壊までの日数 t は、

$\Delta\sigma$	N	t
100 MPa	1.024×10^6	85 日
75 MPa	2.427×10^6	202 日
50 MPa	∞	∞

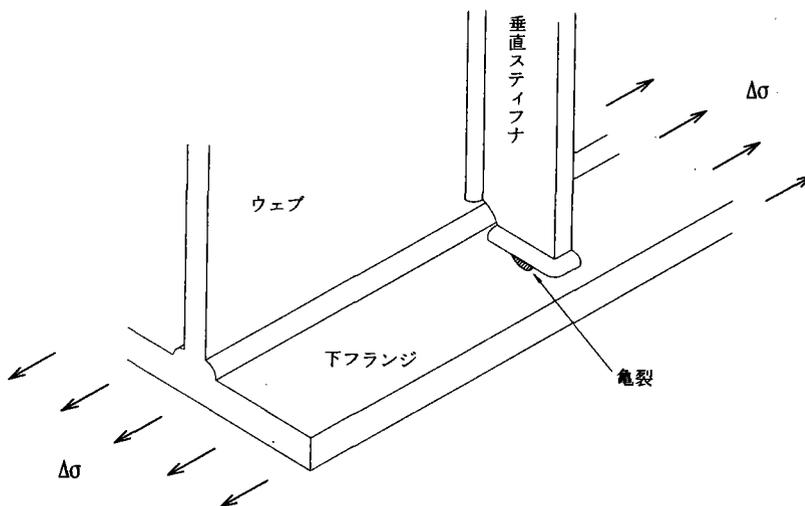


図 2.2 下フランジの垂直スティフナ溶接部

2.3 疲労設計曲線

(1) 日本鋼構造協会(JSSC)

日本鋼構造協会では、継手の強度等級に応じて疲労設計 $\Delta\sigma-N$ 曲線を設定しており、それは以下のような式で表される（直応力に対して）。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma^m \cdot N &= C_0 & (\Delta\sigma > \Delta\sigma_{ce}, \Delta\sigma_{ve}) \\ N &= \infty & (\Delta\sigma \leq \Delta\sigma_{ce}, \Delta\sigma_{ve}) \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

$$C_0 = 2 \times 10^6 \cdot \Delta\sigma_f^m \quad (3.6)$$

ここで、 N ：疲労寿命、 $\Delta\sigma$ ：応力範囲、 $\Delta\sigma_f$ ： 2×10^6 回基本許容応力範囲、 $\Delta\sigma_{ce}$ ：一定振幅応力に対する疲労限、 $\Delta\sigma_{ve}$ ：変動応力に対する応力打ち切り限界、 m ：疲労設計曲線の傾きを示す指数であり、直応力を受ける継手の場合は $m=3$ 。

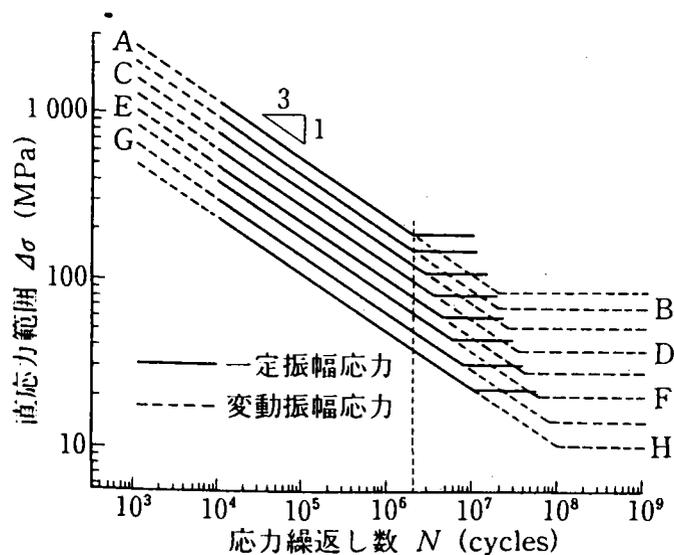


図 2.3 JSSC 疲労設計曲線（直応力を受ける継手）

継手等級分類を表 2.1 に示す。この分類には、継手内の溶接形状による局所的な応力集中、継手に含まれる欠陥（表中に示される範囲内の欠陥）、応力の方向、金属組織や残留応力、溶接部の仕上げの影響などが考慮されている。

各継手等級に対する疲労設計 $S-N$ 曲線は 2×10^6 回の繰返し数に対する応力範囲で指定される。

一定振幅に対する疲労限は A 等級および B 等級の継手に対しては、 $S-N$ 曲線の応力繰返し数 2×10^6 回に対する応力範囲で設定されており、C 等級以下の継手ではそれよりも多い応力繰返し数で設定される。したがって、強度等級の低い継手では疲労限となる応力範囲は相対的により低い値となる。

変動振幅応力に対しては、疲労限以下の応力範囲も疲労亀裂の進展に關与することから、S-N曲線を傾き $m=3$ のまま疲労限の下に延長した、変動応力に対するS-N曲線を設定している。また、疲労限より下に変動応力に対する打切り限界を設定しており、これ以下の微小な応力範囲成分は疲労損傷に寄与しないと仮定している。

・平均応力（応力比）の影響

溶接継手に対しては、溶接部近傍に鋼材の降伏点に達するような高い残留応力が生じるため、外力により生じる応力の状態に関わらず、実際に溶接部に生じている変動応力は、降伏点を最大応力としたくり返し応力状態に近いものとなっている。そのため、疲労寿命に対する応力比の影響は小さい。

非溶接継手については、応力比の影響が顕著に生じるが、日本鋼構造協会の疲労設計指針では疲労照査の簡略化のため、溶接継手と同様に扱うこととしている（ケーブルについては応力比の影響を考慮する）。

・応力集中の影響

溶接継手部の疲労寿命は疲労亀裂の発生する位置での応力及び疲労亀裂が進展する断面での応力分布に依存する。これらに対して、疲労設計指針では公称応力の大きさおよび継手の形式が支配的であると考え、応力集中の影響は継手の強度等級の違いとして取り込み、設計自体は公称応力に対する応力範囲について行うようにしている。

・静的強度の影響

疲労強度の高い継手については、鋼材の静的強度レベルが高いほど疲労強度も高くなるが、疲労強度等級の低い継手においては、疲労強度に対する静的強度レベルの影響は認められなくなり、静的強度レベルの高い鋼の方が低くなることもある。日本鋼構造協会の疲労設計指針では、疲労強度等級の高い継手に対しても、疲労照査の簡略化のために静的強度レベルの影響は考慮しない。

表 2.1 継手の強度等級分類

(a) 非溶接継手

継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$)	備考
1. 帯板	(1) 表面および端面、機械仕上げ(あらさ 50 s 以下)	A (190)	
	(2) 黒皮付き、ガス切断縁(あらさ 100 s 以下)	B (155)	
	(3) 黒皮付き、ガス切断縁(著しい条痕は除去)	C (125)	
2. 形鋼	(1) 黒皮付き	B (155)	
	(2) 黒皮付き、ガス切断縁(あらさ 100 s 以下)	B (155)	
	(3) 黒皮付き、ガス切断縁(著しい条痕は除去)	C (125)	
3. シームレス管		B (155)	
4. 円孔を有する母材 (純断面応力, 実断面応力)		C (125)	
5. フィレット付きの切抜きガセットを有する母材	(1) $1/5 \leq r/d$ 切断面のあらさ 50 s 以下	B (155)	
	(2) $1/10 \leq r/d < 1/5$ 切断面のあらさ 50 s 以下	C (125)	
	(3) $1/5 \leq r/d$ 切断面のあらさ 100 s 以下	C (125)	
	(4) $1/10 \leq r/d < 1/5$ 切断面のあらさ 100 s 以下	D (100)	
6. 高力ボルト摩擦接合継手の母材 (総断面応力)	(1) $1 \leq n_b \leq 4$	B (155)	
	(2) $5 \leq n_b \leq 15$	C (125)	
	(3) $16 \leq n_b$	D (100)	
7. 高力ボルト支圧接合継手の母材 ($n_b \leq 4$, 純断面応力)		B (155)	
8. 検算対象方向の応力を伝えない高力ボルト締め孔を有する母材 (純断面応力)		B (155)	

n_b : 応力方向のボルト本数
 ※(4, 6, 7, 8) 孔を押し抜きせん断で加工した場合には強度等級を1ランク上げる。

(b) 横突合せ溶接継手

継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$)	備考
1. 余盛削除した継手		B (155)	
2. 止端仕上げした継手		C (125)	
3. 非仕上げ継手	(1) 両面溶接	D (100)	
	(2) 良好な形状の裏波を有する片面溶接	D (100)	
	(3) 裏当て金付き片面溶接	F (65)	
	(4) 裏面の形状を確かめることのできない片面溶接	F (65)	

※ 完全溶込み溶接で、溶接部が健全であることを前提とする。
 ※ 継手部にテーパが付く場合には、その勾配を 1/5 以下とする。
 ※ 深さ 0.5 mm 以上のアンダーカットは除去する。
 ※ (1., 2.) 仕上げはアンダーカットが残らないように行う。仕上げの方向は応力の方向と平行とする。

表 2.1 継手の強度等級分類 (つづき)

(c) 縦方向溶接継手

継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$)	備 考
1. 完全溶込み溶接継手 (溶接部が健全であることを前提とする)	(1) 余盛削除	B (155)	<p>※ (1.(2), 2., 3.) 棒継ぎにより生じたビード表面の著しい凸凹は除去する。 ※ (2., 3.)内在する欠陥(ブローホールなどの丸味を帯びたもの)の幅が1.5 mm, 高さが4 mmを超えないことが確かめられた場合には, 強度等級をCとすることができる。</p>
	(2) 非仕上げ	C (125)	
2. 部分溶込み溶接継手		D (100)	
3. すみ肉溶接継手		D (100)	
4. 裏当て金付き溶接継手		E (80)	
5. 断続する溶接継手		E (80)	
6. スクラップを含む溶接継手		G (50)	
7. 切抜きガセットの フィレット部に接する 溶接	(1) $1/5 \leq r/d$	D (100)	
	(2) $1/10 \leq r/d < 1/5$	E (80)	

(d) 十字溶接継手

継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$)	備 考
荷重非伝達型	1. 滑らかな止端を有するすみ肉溶接継手	D (100)	<p>※ (2., 6.(2), 7. (2)) 仕上げはアンダーカットが残らないように行う。グラインダーで仕上げる場合には仕上げの方向を応力の方向と平行にする。 ※ (1., 6. (1), 7. (1)) アンダーカットは除去する。 ※ (3., 4., 5., 6. (3)(4), 7. (3)(4), 9. (1)) 深さ0.5 mm以上のアンダーカットは除去する。 ※ (8., 9. (2)) のど断面積は (のど厚) × (溶接長) より求める。</p>
	2. 止端仕上げたすみ肉溶接継手	D (100)	
	3. 非仕上げのすみ肉溶接継手	E (80)	
	4. 溶接の始終点を含むすみ肉溶接継手	E (80)	
	5. 中空断面部材をすみ肉溶接した継手	(1) $d_0 \leq 100$ mm F (65) (2) $d_0 > 100$ mm G (50)	
荷重伝達型	6. 完全溶込み溶接	(1) 滑らかな止端を有する継手	D (100)
		(2) 止端仕上げた継手	D (100)
		(3) 非仕上げの継手	E (80)
		(4) 中空断面部材(片面溶接)	F (65)
伝達型	7. 止端破壊	(1) 滑らかな止端を有する継手	E (80)
		(2) 止端仕上げた継手	E (80)
		(3) 非仕上げの継手	F (65)
		(4) 溶接の始終点を含む継手	F (65)
伝達型	8. ルート破壊 (のど断面)	II (40)	<p>のど厚は $s/\sqrt{2}$ より求める。開先をとり、部分溶込みすみ肉溶接とした場合ののど厚は (s+開先深さ)/$\sqrt{2}$ とする。 ※ (8., 9. (2)) 溶接の脚長(あるいはサイズ) s が板厚の0.4未満の継手については適用範囲外とする。</p>
	9. 中空断面部材 (片面溶接)	(1) 止端破壊 II (40) (2) ルート破壊 (のど断面) II (40)	

表 2.1 継手の強度等級分類 (つづき)

(e) ガセット溶接継手 (付加板を溶接した継手を含む)

継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$)	備考
面外ガセット	1. ガセットをすみ肉あるいは開先溶接した継手 ($l \leq 100$ mm)	(1) 止端仕上げ	E (80)
		(2) 非仕上げ	F (65)
	2. フィレットを有するガセットを開先溶接した継手 (フィレット部仕上げ)	E (80)	
	3. ガセットをすみ肉溶接した継手 ($l > 100$ mm)	G (50)	
4. ガセットを開先溶接した継手 ($l > 100$ mm)	(1) 止端仕上げ	F (65)	
	(2) 非仕上げ	G (50)	
面内ガセット	5. フィレットを有するガセットを開先溶接した継手 (フィレット部仕上げ)	(1) $1/3 \leq r/d$	D (100)
		(2) $1/5 \leq r/d < 1/3$	E (80)
		(3) $1/10 \leq r/d < 1/5$	F (65)
6. ガセットを開先溶接した継手	(1) 止端仕上げ	G (50)	
	(2) 非仕上げ	H (40)	
7. 重ねガセット継手の母材		H (40)	<p>※ (1.(1), 2., 4.(1), 5., 6.(1)) 仕上げはアンダーカットが残らないように行う。グラインダーで仕上げる場合には仕上げの方向を応力の方向と平行とする。</p> <p>※ (1.(2), 3., 4.(2), 6.(2), 7.) 深さ 0.5 mm 以上のアンダーカットは除去する。</p>

(f) その他の溶接継手

継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$)	備考
1. カバプレートをすみ肉溶接で取り付けした継手 ($l \leq 300$ mm)	(1) 止端仕上げ	E (80)	
	(2) 非仕上げ	F (65)	
2. カバプレートをすみ肉溶接で取り付けした継手 ($l > 300$ mm)	(1) 溶接部仕上げ	D (100)	
	(2) 非仕上げ	G (50)	
3. スタッドを溶接した継手	(1) 上板断面	E (80)	
	(2) スタッド断面	S (80)	
4. 重ね継手	(1) 上板断面	H (40)	<p>※ (1.(1), 2.(1)) 仕上げはアンダーカットが残らないように行う。グラインダーで仕上げる場合には仕上げの方向を応力の方向と平行とする。</p> <p>※ (1.(2), 2.(2)) 深さ 0.5 mm 以上のアンダーカットは除去する。</p> <p>※ (2.(1)) 脚長 s_h, s_b は $s_h \geq 0.8 t_c, s_b \geq 2 s_h$ とする。</p>
	(2) 添接板断面	H (40)	
	(3) 前面すみ肉溶接のと断面	H (40)	
	(4) 側面すみ肉溶接のと断面	S (80)	

(g) ケーブルおよび高力ボルト

継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$)	備考
1. ケーブル本体	(1) 平行線	K 1 (270)	
	(2) ロープ	K 2 (200)	
2. ケーブル定着部	(1) 平行線新定着法	K 1 (270)	
	(2) 平行線亜鉛鍍込み	K 2 (200)	
	(3) ロープ亜鉛鍍込み	K 3 (150)	
3. 高力ボルト	(1) 転造	K 4 (65)	<p>※ (2.(1)) 新定着法とはケーブル本体と同程度の疲労強度を有する定着部構造とする工法である。</p>
	(2) 切削	K 5 (50)	

(2)米国道路橋示方書 (AASHTO)

S-N曲線は傾き $m=3$ で与えられており、継手等級はA~E'まで7種類に分類されている。一定振幅応力に対しては疲労限は $\Delta\sigma_{caf}$ が設定されているが、疲労限とS-N線との交点となる応力繰返し数は継手等級ごとに異なっており、強度の小さい継手ほど疲労限となる荷重繰返し数は多くなる。すなわち、疲労限は相対的により小さい値となる。

変動応力に対する疲労設計曲線は、S-N曲線を疲労限以下まで同じ傾き $m=3$ で延長し、これによって $\Delta\sigma_{caf}$ 以下の応力繰返しの影響を評価する (修正マイナー則)。したがって、変動振幅応力ではすべての応力繰返しが疲労損傷に寄与すると仮定している。

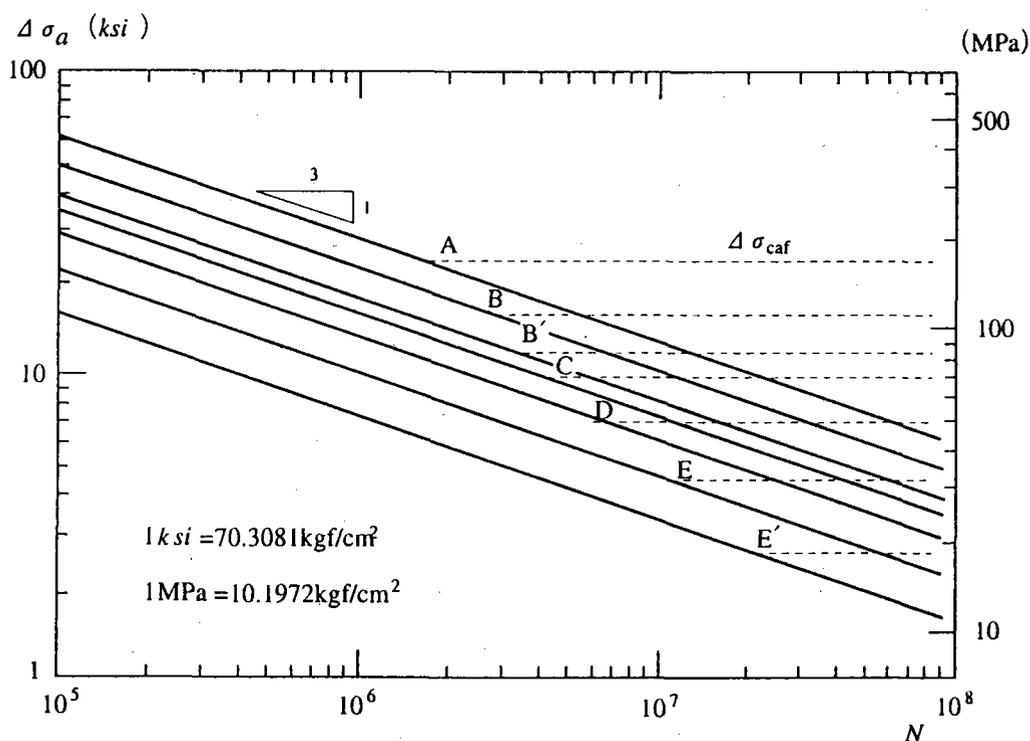


図 2.4 AASHTO で規定される設計 S-N 曲線 (出展: 大倉一郎『鋼橋の疲労』)

(3) 欧州統一基準 (EUROCODE3)

S-N曲線は傾き $m=3$ で与えられており、継手等級は 14 種類に分類されている。一定振幅応力に対する疲労限 $\Delta\sigma_{caf}$ は、強度等級によらず S-N 曲線の応力繰返し数 $N=5 \times 10^6$ に対する応力範囲で設定される。

変動応力に対する疲労設計曲線は、S-N 曲線を疲労限以下に対して傾きを $m=5$ に減じて延長し、これによって $\Delta\sigma_{caf}$ 以下の応力繰返しの影響を評価する。また、微小応力範囲成分に対する打ち切り限界 $\Delta\sigma_{vaf}$ が設定されており、疲労限以下の S-N 曲線の荷重繰返し数 $N=10^8$ に対する応力範囲で規定される。

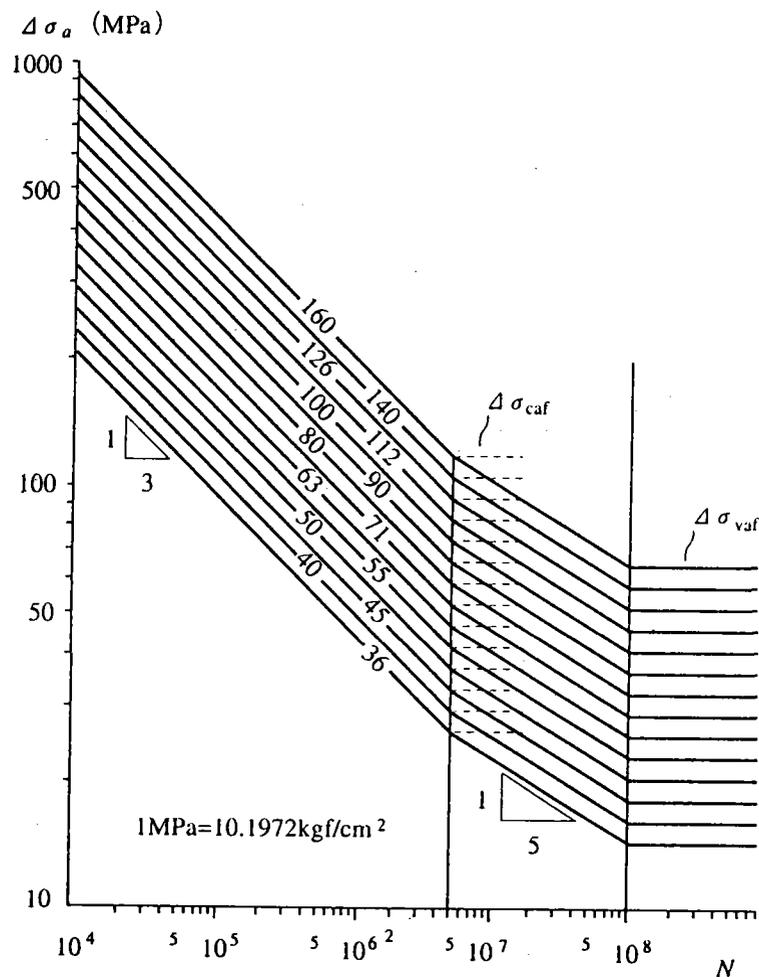


図 2.5 EUROCODE3 で規定される設計 S-N 曲線 (出展: 大倉一郎『鋼橋の疲労』)

2.4 各継手における許容応力範囲の比較

JSSC 指針の各継手分類における 2×10^6 回基本許容応力範囲と、同じ継手に対する他の基準における 2×10^6 回基本許容応力範囲を表 2.2 に比較して示す²⁾。

表 2.2(a) 2×10^6 回基本許容応力範囲の他の基準類との比較 (非溶接継手)

継 手	JSSC	AASHTO	EUROCODE3
	<i>m</i> =3	<i>m</i> =3	<i>m</i> =3
1.(1)	190	165	160
(2)	(50s 以下) 155	(ASA smoothness1000 以下)	160
(3)	(100s 以下) 125		140,125
2.(1)	155	165	160
(2)	(黒皮付き) 155	(ASA smoothness1000 以下)	160
(3)	(100s 以下) 125		140,125
3.	155	—	160
4.	125	—	—
5.(1)	155	—	—
(2)	125	—	—
(3)	125	—	—
(4)	100	—	—
6.(1)	155		
(2)	125	123	140
(3)	100		
7.	155	123	140
	(純断面)	(純断面)	(純断面)
8.	155	—	140
	(純断面)		(純断面)

表 2.2(b) 2×10^6 回基本許容応力範囲の他の基準類との比較 (横突合せ溶接継手)

継 手	JSSC	AASHTO	EUROCODE3
	<i>m</i> =3	<i>m</i> =3	<i>m</i> =3
1.	155	123	112
2.	125	—	—
3.(1)	100	89	90,80
(2)	100	89	(36)
(3)	65	—	71
(4)	65	—	36

表 2.2(c) 2×10^6 回基本許容応力範囲の他の基準類との比較 (縦方向溶接継手)

継 手	JSSC	AASHTO	EUROCODE3
	$m=3$	$m=3$	$m=3$
1.(1)	155	123	—
(2)	125		125(自動溶接) 112(自動溶接) 100(手 溶 接)
2.	125,100	123	100
3.	125,100	123	125(自動溶接) 112(自動溶接) 100(手 溶 接)
4.	80	—	112(自動溶接)
5.	80	—	80
6.	50	—	71
7.(1)	100	—	—
(2)	80	—	—

表 2.2(d) 2×10^6 回基本許容応力範囲の他の基準類との比較 (十字溶接継手)

継 手	JSSC	AASHTO	EUROCODE3
	$m=3$	$m=3$	$m=3$
1.	100	—	—
2.	100	—	—
3.	80	89	80($t \leq 12\text{mm}$) 71($t > 12\text{mm}$)
4.	80	89	80($t \leq 12\text{mm}$) 71($t > 12\text{mm}$)
5.(1)	65	—	71
(2)	50	—	—
6.(1)	100	—	71
(2)	100	—	
(3)	80	—	
(4)	65	—	
7.(1)	80	—	71
(2)	80	—	
(3)	65	—	
(4)	65	—	
8.	40	—	36
9.(1)	40	—	—
(2)	40	—	40,36

表 2.2(e) 2×10^6 回基本許容応力範囲の他の基準類との比較 (ガセット継手)

継 手	JSSC	AASHTO	EUROCODE3
	$m=3$	$m=3$	$m=3$
1.(1)	80	—	—
(2)	65	69 ($L \leq 100\text{mm}$)	71
2.	80	123($r > 600\text{mm}$) 89($r > 150\text{mm}$) 69($r > 50\text{mm}$) 55($r \leq 50\text{mm}$)	—
3.	50	55	55
4.(1)	65	—	—
(2)	50	55	50
5.(1)	100	123($r > 600\text{mm}$)	90($1/3 < r/d$)
(2)	80	89($r > 150\text{mm}$)	71($1/6 < r/d < 1/3$)
(3)	65	69($r > 50\text{mm}$) 55($r \leq 50\text{mm}$)	45($r/d < 1/6$)
6.(1)	50	55	—
(2)	40	55	—
7.	40	—	—

表 2.2(f) 2×10^6 回基本許容応力範囲の他の基準類との比較 (その他の溶接継手)

継 手	JSSC	AASHTO	EUROCODE3
	$m=3$	$m=3$	$m=3$
1.(1)	80	—	—
(2)	65	55($t \leq 20\text{mm}$) 40($t > 20\text{mm}$)	50($t \leq 20\text{mm}$) 36($t > 20\text{mm}$)
2.(1)	100	—	—
(2)	50	55($t \leq 20\text{mm}$) 40($t > 20\text{mm}$)	50($t \leq 20\text{mm}$) 36($t > 20\text{mm}$)
3.(1)	80	89	80
(2)	80 (せん断)	—	80 (せん断)
4.(1)	40	40	63
(2)	40	40	45
(3)	40	—	—
(4)	80 (せん断)	62 (せん断)	80 (せん断)

表 2.2(g) 2×10^6 回基本許容応力範囲の他の基準類との比較 (ケーブル・ボルト)

継 手	JSSC	AASHTO	EUROCODE3
	$m=3$	—	$m=3$
1.(1)	270	—	—
(2)	200	—	—
2.(1)	270	—	—
(2)	200	—	—
(3)	150	—	—
3.(1)	65	—	36
(2)	50	—	36

参考文献

- 1)大倉一郎：鋼橋の疲労、東洋書店、1994.
- 2)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、1993.

第3章 変動振幅応力を受ける鋼部材の疲労寿命評価

3.1 はじめに

鋼橋の疲労照査に不可欠な部材や継手部の疲労強度は一定振幅応力試験により求められることが多い。しかし、橋梁に作用する荷重（主として車両）は一定ではなく、様々な大きさで異なる位置に作用する。したがって、荷重により部材に生じる応力も一定であることは稀であり、通常は複雑な波形となる。このような変動振幅応力を受ける継手部の疲労強度あるいは疲労寿命の評価は以下の手順で行なわれることが多い。

- ① 変動振幅応力に対してレインフロー法などの応力範囲頻度分布解析方法（応力計数法）を適用し、応力範囲の頻度分布を求める。
- ② ①で求めた応力範囲頻度分布および一定振幅応力試験より求めた応力範囲と疲労寿命の関係に基づき、Palmgren-Minerの方法などの線形累積被害則を利用して疲労強度あるいは疲労寿命を求める。

ここでは、代表的な応力範囲頻度分布解析方法であるレインフロー法および線形被害則について簡単に説明する。また、これらの理解を深めることを目的とし、いくつかの計算例を示す。

3.2 応力範囲頻度解析（レインフロー法）

図3.1に示すように、変動振幅応力波形の時間軸を鉛直方向、応力軸を水平方向にとる。応力の極値のところに水源を置き、水を流したとする。このときの流線のレンジで応力を計数する方法がレインフロー法である。具体的には、引続きあらわれる4つの極値 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ が、 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \sigma_4$ あるいは $\sigma_1 \leq \sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_4$ の条件を満たす場合にレンジ $|\sigma_2 - \sigma_3|$ の波を計数し、 σ_2, σ_3 を変動振幅応力波形より削除する。このような計数を続けると、図3.2に示すように漸増・漸減する変動振幅応力が残ることがあるが、その場合には最大の極大値と最小の極小値の差、2番目の極大値と極小値の差、……、を応力範囲として計数すればよい¹⁾。

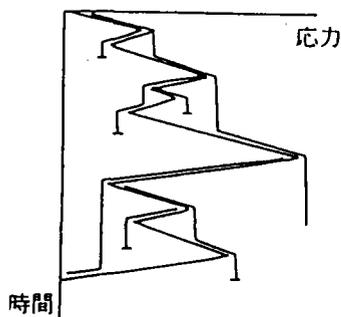


図3.1 レインフロー法(1)

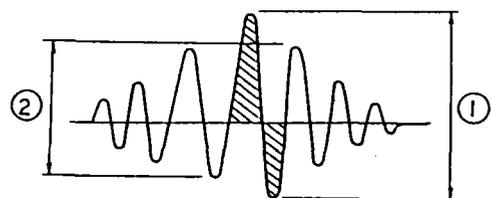


図3.2 レインフロー法(2)

3.3 線形累積被害則による疲労寿命評価

3.3.1 線形累積被害則

前節で求めた応力範囲頻度分布の内、ある応力範囲レベルを $\Delta\sigma_i$ 、その頻度を n_i とおき、 $\Delta\sigma_i$ が一定振幅で繰返されたときの疲労寿命を N_i とする。ただし、 $\Delta\sigma_i$ が一定振幅応力下での疲労限以下であれば、 $N_i=\infty$ である。 $\Delta\sigma_i$ が n_i 回繰返されたときの疲労損傷度 W_i を (n_i/N_i) とし、損傷度の合計 W が

$$\begin{aligned} W &= \sum W_i \\ &= \sum (n_i/N_i) \\ &= 1 \end{aligned} \quad (3.1)$$

となったときに疲労破壊が生じるとする。これが、Palmgren-Minerの方法あるいは単にMinerの方法と呼ばれる変動振幅応力下での疲労寿命予測法である。

疲労損傷度が大きくなれば、 $\Delta\sigma_i$ が一定振幅応力下での疲労限以下であっても疲労損傷の進行に寄与する。これは、疲労損傷が進行するにしたがって疲労亀裂は大きくなり、それに伴って小さい応力範囲によっても疲労亀裂が進展するようになることによる。したがって、Minerの方法では危険側の評価を与えることになる。このような疲労限以下の $\Delta\sigma_i$ の影響を考慮する方法に修正Minerの方法やHaibachの方法がある。

修正Minerの方法では、疲労限以下の $\Delta\sigma_i$ に対する疲労寿命 N_i を ∞ とするのではなく、**図3.3**に示すように疲労限以上の $\Delta\sigma$ - N 線を疲労限以下でもそのままの傾きで延ばし、 N_i を求め、(3.1)式より疲労寿命を求める方法である。しかし、この方法では一般に安全側すぎる結果が得られるとされている。Haibachの方法では、**図3.3**に示すように疲労限以下で $\Delta\sigma$ - N 線の傾きを緩やかとし、 $\Delta\sigma_i$ に対する疲労寿命 N_i を求める。

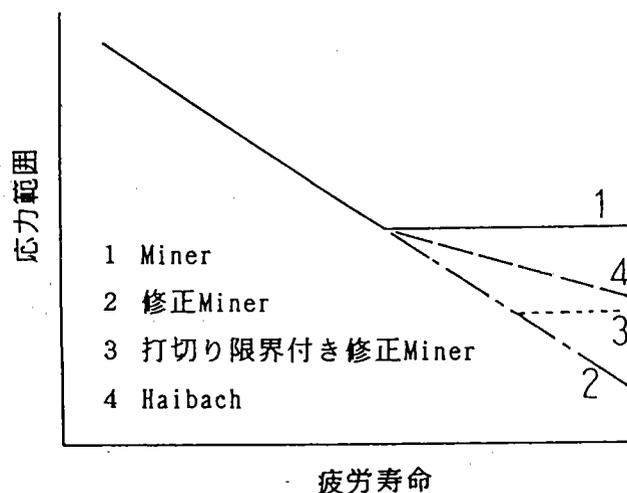


図3.3 線形被害則において基準となる応力範囲—疲労寿命関係

最近改定された日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」²⁾ (以後JSSC指針と呼ぶ) では、疲労損傷に寄与しない応力範囲の限界値を一定振幅応力下での疲労限よりも低くすることにより疲労寿命を評価することとしている (図3.3参照)。JSSC指針では、この応力範囲レベルを "変動振幅応力下の応力範囲の打ち切り限界" と呼んでいる。変動振幅応力下の応力範囲の打ち切り限界の求め方は以下の通りである。すなわち、次章で示す破壊力学の手法を用いた変動振幅応力下での疲労亀裂進展解析を行ない疲労寿命を求め、推定した疲労寿命と応力範囲頻度分布の合計頻度 (総繰返し数) を同じとし、その頻度分布の中の大きい応力範囲から順次疲労損傷度を計算し、その累積値が1となったときの応力範囲を変動振幅応力下での打ち切り限界としている (図3.4参照)。疲労損傷度を求める際に基準とする $\Delta\sigma$ - N 線は、一定振幅応力下で疲労亀裂進展解析を行なうことにより求めている。一定振幅応力下の応力範囲の打ち切り限界 (疲労限) に対する変動振幅応力下で応力範囲の打ち切り限界の比は、およそ0.46である。

以上のように、いずれの方法も(3.1)式に基づいて変動振幅応力を受ける継手部の疲労強度評価を行なうものであり、各方法の相違は N_i の求めた方、すなわち基準とする $\Delta\sigma$ - N 関係だけである。なお、変動振幅応力の応力範囲成分のすべてが疲労限以下であれば、どの評価方法においても疲労破壊は生じない (疲労寿命は ∞) とされている。

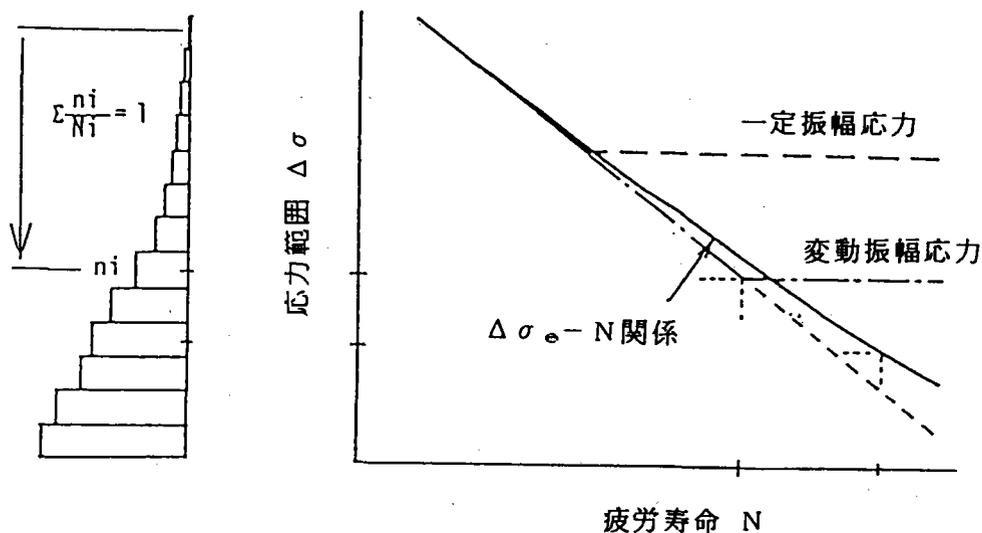


図3.4 打ち切り限界の設定方法

3.3.2 等価応力範囲

応力範囲と疲労寿命の関係（ $\Delta\sigma$ - N 線）は、

$$\Delta\sigma^m \cdot N = C \quad (3.2)$$

C, m : 継手定数

で表わされる。これを(3.1)式に代入すれば、疲労損傷度 W は、

$$W = \sum (\Delta\sigma_i^m \cdot n_i) / C \quad (3.3)$$

となる。ある大きさの応力範囲 $\Delta\sigma_e$ が $\sum n_i$ 回作用したときの疲労損傷度は、

$$W = \Delta\sigma_e^m \cdot \sum n_i / C \quad (3.4)$$

で与えられる。(3.3)式および(3.4)式で与えられる損傷度が等しい場合に $\Delta\sigma_e$ を等価応力範囲と呼ぶ。

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[m]{\sum (\Delta\sigma_i^m \cdot n_i) / \sum n_i} \quad (3.5)$$

以上の式の展開から明らかなように、(3.5)式より $\Delta\sigma_e$ を求め、それを(3.2)式の $\Delta\sigma$ - N 関係に代入することにより、対象とする変動振幅応力下での疲労寿命を求めることができる。修正Minerの方法では、すべての大きさの応力範囲レベルに対して、(3.2)式が成立つとしているので、(3.5)式をそのまま用いればよい。Minerの方法では、疲労限以下の応力範囲は疲労損傷に寄与しないとしているので、それらの応力範囲は無視し、疲労限以上の応力範囲のみを対象として(3.5)式より等価応力範囲を求めることになる。また、その際の応力繰返し数も疲労限以上の応力範囲の数だけを対象とする。

Haibachの方法では、疲労限 $\Delta\sigma_{ce}$ 以上で(3.2)式、疲労限以下では(3.6)式で $\Delta\sigma$ - N 線を表わす。

$$\Delta\sigma^k \cdot N = \kappa \quad (3.6)$$

$$k = 2m - 1 \quad \kappa = C \cdot \Delta\sigma_{ce}^{k-m} = C \cdot \Delta\sigma_{ce}^{m-1}$$

したがって、等価応力範囲は、

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta\sigma_i^m \cdot n_i + C/K (\sum \Delta\sigma_j^k \cdot n_j)}{\sum n_i + \sum n_j}} \quad \Delta\sigma_e \geq \Delta\sigma_{ce} \quad (\Delta\sigma_{ce} : \text{疲労限}) \quad (3.7)$$

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[k]{\frac{K/C (\sum \Delta\sigma_i^m \cdot n_i) + \sum \Delta\sigma_j^k \cdot n_j}{\sum n_i + \sum n_j}} \quad \Delta\sigma_e < \Delta\sigma_{ce} \quad (\Delta\sigma_{ce} : \text{疲労限})$$

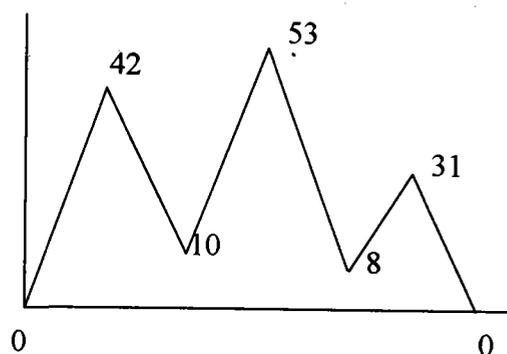
で与えられる。

しかし、疲労限や打ち切り限界以下の応力範囲成分を削除することや、(3.7)式のように疲労限度を

境として応力範囲成分の取扱いを変えることは繁雑であるため、すべての応力範囲成分を有効とした(3.5)式から求められる値を等価応力範囲とよび、変動振幅応力の代表値として用いられるのが一般的である。しかし、(3.5)式から求められる等価応力範囲を修正Minerの方法以外に用いる場合には、疲労寿命評価方法だけではなく応力範囲頻度分布によっても等価応力範囲－疲労寿命関係が異なることに注意願いたい。

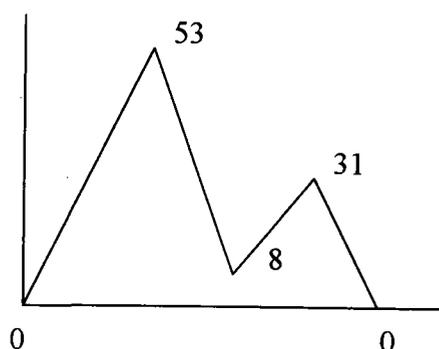
3.4 計算例

<例a レインフロー法>



① $\sigma_1=0, \sigma_2=42, \sigma_3=10, \sigma_4=53$

$\sigma_1 \leq \sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_4$ の条件を満たすので、 $|\sigma_2 - \sigma_3| = 32 \text{Mpa}$ を計数し、 σ_2, σ_3 を削除。

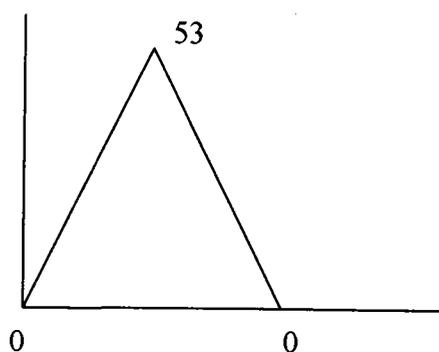


② $\sigma_1=0, \sigma_2=53, \sigma_3=8, \sigma_4=31$

条件を満たさないなので、 $\sigma_1 = \sigma_2, \sigma_2 = \sigma_3 \dots$

$\sigma_1=53, \sigma_2=8, \sigma_3=31, \sigma_4=0$

$\sigma_1 \leq \sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_4$ の条件を満たすので、 $|\sigma_2 - \sigma_3| = 23 \text{MPa}$ を計数し、 σ_2, σ_3 を削除。



53Mpaを係数。

よって、応力範囲53, 32, 23Mpaが一つずつである。

<例b JSSC指針に基づく疲労損傷度の計算>

図3.5に天白川右岸取付高架橋における応力測定結果を示す³⁾。計測箇所は図3.6に示すように、分配横桁を取付ける垂直スティフナーの、分配横桁上フランジ位置である。計測時間は24時間、計測時間内の応力繰返しは30886回であった。応力範囲頻度分布はレインフロー法により作成した。これをもとに垂直スティフナーの疲労損傷度の計算を行う。垂直スティフナーと上フランジとの溶接継手は、荷重伝達型の十字溶接継手であり、滑らかな止端を有する隅肉溶接継手の止端破壊を仮定する。継手等級はJSSC指針によるとE等級に分類される。

疲労損傷度は次の式で算出される。

$$W = \sum (\Delta\sigma_i^m \cdot n_i) / C \quad (b.1)$$

ここで、変動応力に対する応力打ち切り限界は29Mpaであるから、これ以下の応力繰返しは無視する。疲労設計曲線より、各定数は以下のように与えられる。

$$m=3, C=2 \times 10^6 \times 80^3 = 1.024 \times 10^{12}$$

従って、各応力範囲 $\Delta\sigma_i$ に対する疲労損傷度 W_i は、

$$\begin{aligned} W_1 &= (134.75^3 \times 2) / 1.024 \times 10^{12} = 4.78 \times 10^{-6} \\ W_2 &= (129.85^3 \times 0) / 1.024 \times 10^{12} = 0 \\ W_3 &= (124.95^3 \times 0) / 1.024 \times 10^{12} = 0 \\ W_4 &= (120.05^3 \times 1) / 1.024 \times 10^{12} = 1.69 \times 10^{-6} \\ W_5 &= (115.15^3 \times 7) / 1.024 \times 10^{12} = 1.04 \times 10^{-5} \\ &\vdots \\ W_{12} &= (31.85^3 \times 828) / 1.024 \times 10^{12} = 2.61 \times 10^{-5} \end{aligned} \quad (b.2)$$

24時間の応力繰返しによる疲労損傷度は

$$\begin{aligned} W &= \sum W_i = 4.78 \times 10^{-6} + 1.69 \times 10^{-6} + 1.04 \times 10^{-5} + \dots + 2.61 \times 10^{-5} \\ &= 0.000395 \end{aligned} \quad (b.3)$$

従って、疲労損傷度が1となる日数は

$$1/W = 1/0.000395 = 2533 \quad \text{日} \quad (b.4)$$

天白川右岸取付高架橋、測点：ST1

応力範囲		頻度
(kgf/cm ²)	(MPa)	
1350 ~ 1400	132.3 ~ 137.2	2
1300 ~ 1350	127.4 ~ 132.3	0
1250 ~ 1300	122.5 ~ 127.4	0
1200 ~ 1250	117.6 ~ 122.5	1
1150 ~ 1200	112.7 ~ 117.6	7
1100 ~ 1150	107.8 ~ 112.7	6
1050 ~ 1100	102.9 ~ 107.8	12
1000 ~ 1050	98.0 ~ 102.9	8
950 ~ 1000	93.1 ~ 98.0	20
900 ~ 950	88.2 ~ 93.1	19
850 ~ 900	83.3 ~ 88.2	21
800 ~ 850	78.4 ~ 83.3	28
750 ~ 800	73.5 ~ 78.4	40
700 ~ 750	68.6 ~ 73.5	66
650 ~ 700	63.7 ~ 68.6	88
600 ~ 650	58.8 ~ 63.7	138
550 ~ 600	53.9 ~ 58.8	167
500 ~ 550	49.0 ~ 53.9	254
450 ~ 500	44.1 ~ 49.0	382
400 ~ 450	39.2 ~ 44.1	500
350 ~ 400	34.3 ~ 39.2	663
300 ~ 350	29.4 ~ 34.3	828
250 ~ 300	24.5 ~ 29.4	1261
200 ~ 250	19.6 ~ 24.5	1698
150 ~ 200	14.7 ~ 19.6	2752
100 ~ 150	9.8 ~ 14.7	5993
50 ~ 100	4.9 ~ 9.8	15932

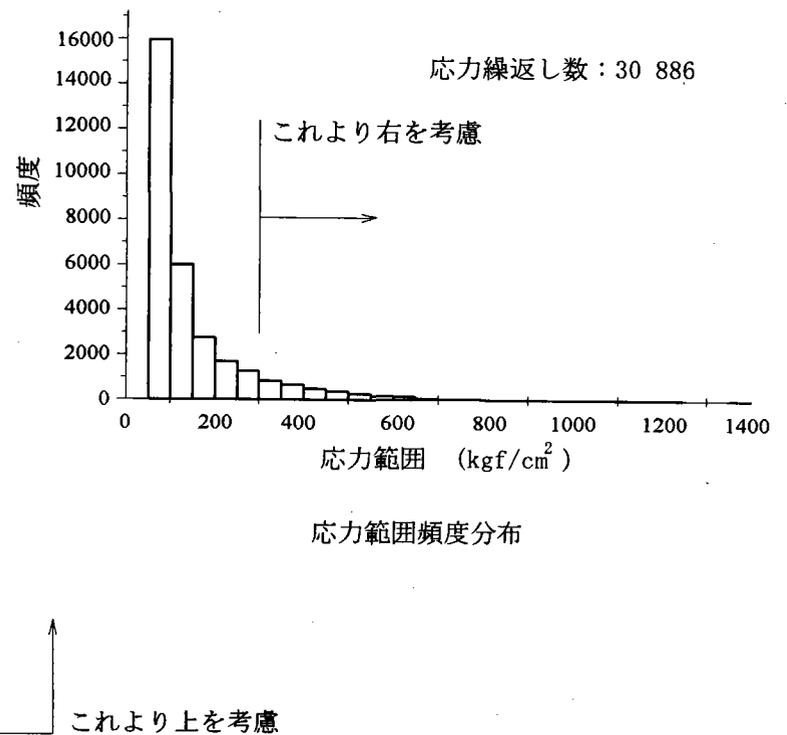
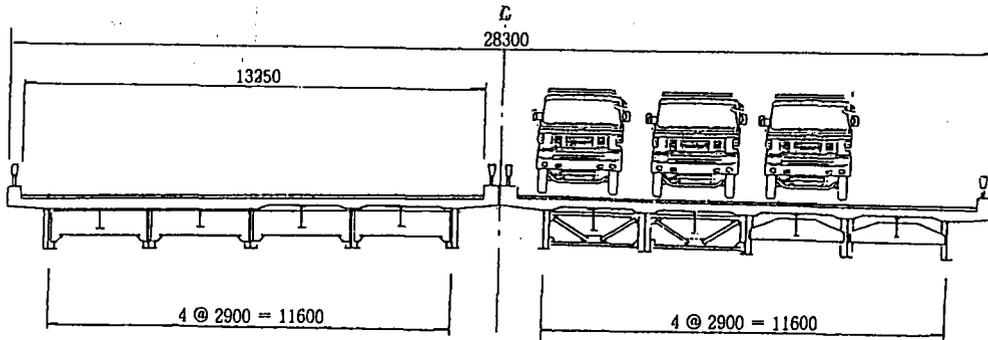
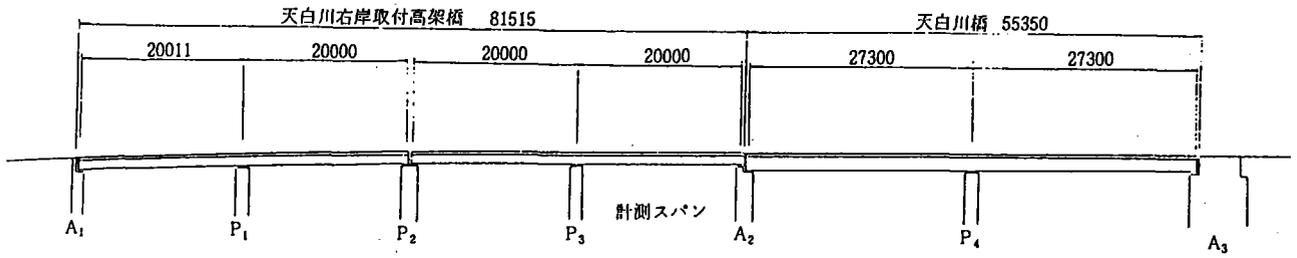
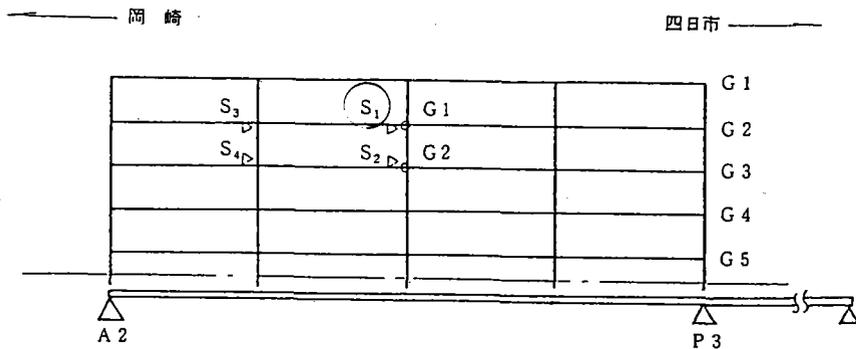


図3.5 応力範囲頻度分布



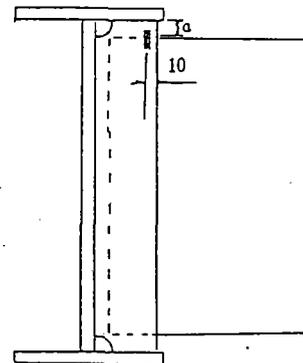
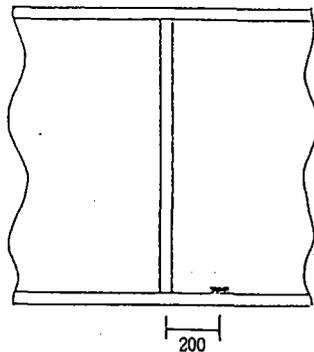
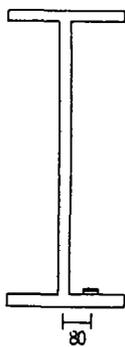
天白川右岸取付高架橋の一般図および標準断面図



ゲージNo	a (mm)
S ₁	25
S ₂	15
S ₃	15
S ₄	25

○ : 主桁ひずみゲージ

▷ : スティフナーひずみゲージ



応力頻度の測定箇所 (天白川橋右岸取付橋)

図3.6対象橋梁およびひずみゲージ張付け位置

<例 c 等価応力範囲を用いた疲労照査：修正Miner>

例 b と同じ応力範囲頻度分布を用いる。修正マイナー則に従って全ての応力繰返しを考慮して等価応力範囲を算出すると、以下の通りである。

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[m]{\sum(\Delta\sigma_i^m \cdot n_i) / \sum n_i} \quad (c.1)$$

ここで、 $\sum n_i = 30886$ 、

$$\sum(\Delta\sigma_i^m \cdot n_i) = 4.78 \times 10^8 \quad (c.2)$$

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[3]{4.78 \times 10^8 / 30886} = 24.93 \text{ MPa} \quad (c.3)$$

等価応力範囲に対応した荷重繰返し数は、S-N曲線より、

$$N = \frac{C}{\Delta\sigma^m} = \frac{1.024 \times 10^{12}}{24.93^3} = 66108907 \text{ cycles} \quad (c.4)$$

24時間分の応力繰返し数は30886回であるから、疲労寿命は

$$66108907 / 30886 = 2140 \text{ 日} \quad (c.5)$$

例 b に示す J S S C 指針に比較して、安全側の評価となっている。

<例 d 等価応力範囲と疲労寿命の関係：打切り限界を考慮>

例 b と同じ応力範囲頻度分布を用いる。J S S C 指針に従って、変動振幅応力に対する応力打切り限界以下の応力繰返しを無視し、等価応力範囲を算出すると以下の通りである。

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[m]{\sum(\Delta\sigma_i^m \cdot n_i) / \sum n_i} \quad (d.1)$$

ここで、応力打切り限界以上の応力繰返し回数は $\sum n_i = 3250$ 、

$$\sum(\Delta\sigma_i^m \cdot n_i) = 4.04 \times 10^8 \quad (d.2)$$

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[3]{4.04 \times 10^8 / 3250} = 49.92 \text{ MPa} \quad (d.3)$$

等価応力範囲に対応した荷重繰返し数は、S-N曲線より、

$$N = \frac{C}{\Delta\sigma^m} = \frac{1.024 \times 10^{12}}{49.92^3} = 8231498 \text{ cycles} \quad (d.4)$$

変動振幅の、応力打切り限界を超える応力繰返し数は24時間当たり3250回であるから、疲労寿命は

$$8231498 / 3250 = 2533 \text{ 日} \quad (d.5)$$

例 b における疲労寿命予測と一致する。

参考文献

- 1) 伊藤文人：実働荷重による疲労寿命設計（岡本舜三編：鋼構造の研究、第5章）、技報堂出版、1977.
- 2) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、1993.
- 3) 建設省土木研究所：既設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究、土木研究所資料、第2420号、1986.

第4章 疲労亀裂進展解析

4.1 はじめに

破壊力学を用いた疲労亀裂進展解析は、Parisにより疲労亀裂進展速度が応力拡大係数範囲の関数となる¹⁾ことが示されて以来、亀裂状の欠陥を有する部材の疲労寿命や既に疲労亀裂の生じた部材の余寿命評価などに利用されてきた。また、溶接構造物においては、継手内に残存するブローホールなどの溶接欠陥や前面すみ肉溶接継手止端などの表面形状変化部から疲労亀裂が発生することが多く、その場合の疲労寿命の大半は亀裂の進展過程で占められる^{2),3)}ことから、これらの継手の疲労強度や寿命の予測にも利用されている。そして、この手法により、実験だけでは定量的な評価が難しかった疲労強度に対する板厚の影響・欠陥（ブローホール）の影響・溶接形状の影響などが明らかにされている。

以上のように、疲労亀裂進展解析を行なうことにより構造物の疲労に対する安全性を検討する上で有用な情報が得られる。しかし、このような解析が行なわれるようになってからまだ10～20年程度であるためか、研究ではよく利用されるこの解析も、実務ではあまり利用されていないようである。ここでは、鋼橋の維持管理に携わる一般の技術者が疲労亀裂進展解析を行なう際の手引きとなるよう、その解析方法と具体的な計算例を示す。

4.2 疲労亀裂進展解析の概要

図4.1は二段多重試験（ビーチマーク試験）から調べた前面すみ肉溶接継手の止端から発生した疲労亀裂の進展性状³⁾を示している。溶接止端に沿って発生した複数の半楕円形の表面亀裂は互いに合体を繰り返しながら進展している。疲労亀裂進展解析は、このような疲労亀裂進展の様子をシミュレートし、疲労寿命を求めようとするものである。したがって、この解析においては、疲労亀裂のモデル化、初期亀裂寸法、疲労亀裂進展速度、亀裂進展に伴う亀裂形状の変化、限界亀裂寸法などの情報が必要となる。また、具体的な進展のシミュレーション法（進展解析の方法）も必要となる。

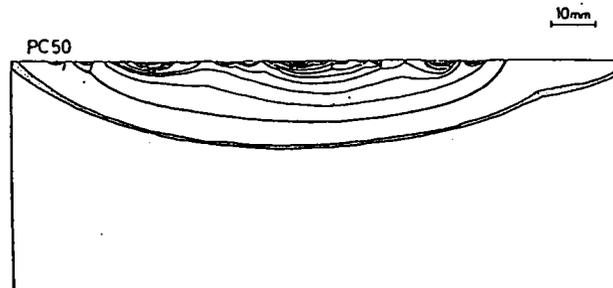


図4.1 疲労亀裂の進展性状（全面すみ肉溶接継手）

疲労亀裂の進展に要する寿命は、疲労亀裂進展速度 da/dN が応力拡大係数範囲 ΔK の関数となることを利用し、亀裂の進展をシミュレートし、それを初期亀裂 a_i から限界亀裂 a_c まで行うことにより求められる。

$$da/dN = f(\Delta K) \quad (4.1)$$

(4.1)式が積分可能であれば、疲労亀裂進展寿命 N_p は、(4.2)式より計算される。

$$N_p = \int_{a_i}^{a_c} \{1 / f(\Delta K)\} da \quad (4.2)$$

しかし、(4.1)式が積分可能であることは稀であり、一般には数値積分や応力繰返し数ごとの亀裂進展量を逐次計算することなどが必要となる。

4.3 疲労亀裂進展解析に必要な情報

(1) 疲労亀裂のモデル化

図4.2は鋼橋で用いられている代表的な継手を示している。

1. 横突合せ継手
2. 縦方向溶接継手
3. 前面すみ肉溶接継手
4. ガセット継手

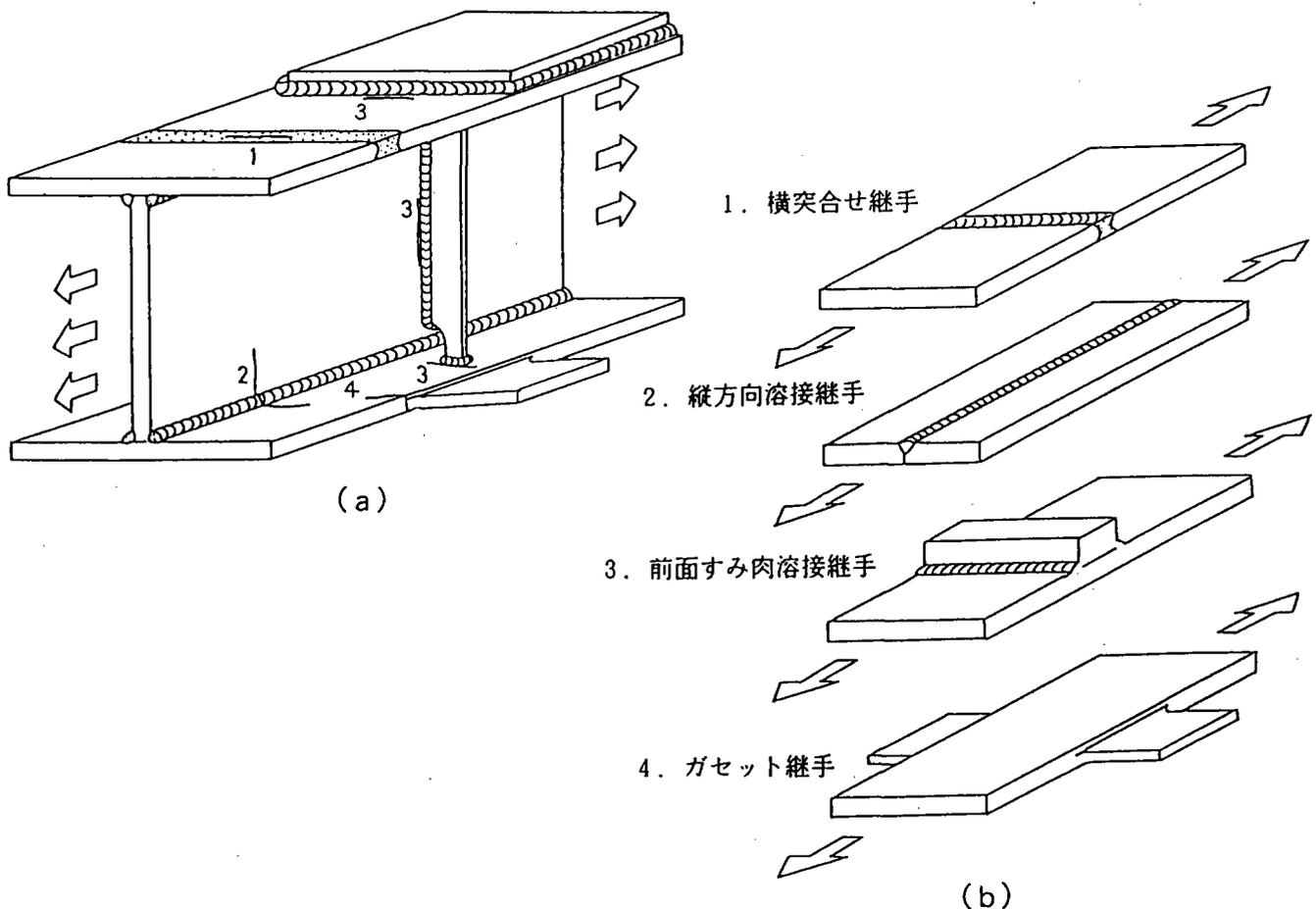


図4.2 鋼橋に用いられる代表的な継手

これらの継手で想定される亀裂は、その形状・位置により、図4.3のように分けることができる。

- (1) 楕円形の内部亀裂……縦方向溶接継手
- (2) 半楕円形の表面亀裂……横突合せ継手、前面すみ肉溶接継手
- (3) 1/4楕円形の表面亀裂……ガセット継手
- (4) 内部貫通亀裂……縦方向溶接継手、横突合せ継手、前面すみ肉溶接継手
- (5) 片側貫通亀裂……ガセット継手

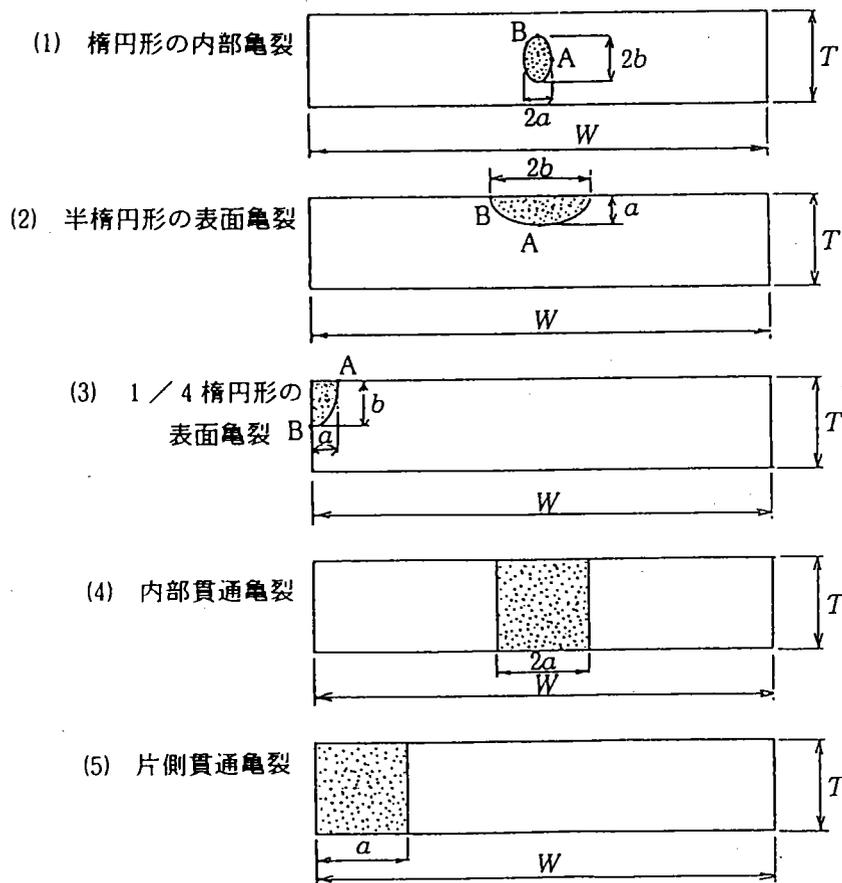


図4.3 疲労亀裂のモデル化

(2) 初期亀裂寸法

供用中の構造物で疲労亀裂が検出された場合には、それを初期亀裂とすればよい。磁粉探傷法などの非破壊検査方法では、継手表面での亀裂寸法が測定され、その深さを知ることはできない。このような場合には、文献⁴⁾などを参考に表面の寸法からその深さを推定することが考えられる。また、検出された亀裂よりも十分に小さい半円形の亀裂を仮定し、疲労亀裂進展解析を検出された亀裂の表面長さまで行なうことにより亀裂の深さを推定することも考えられる。

検査周期を検討する場合には、用いた検査法の精度などを勘案し、初期亀裂寸法を決めることが考えられる。例えば、溶接止端など継手表面から生じる疲労亀裂の検出に対して最も信頼性が高いとされている蛍光磁粉探傷法では、その検出・測定精度が5mm程度とされている⁵⁾ので、初期亀裂の表面の長さを5mm、その深さを安全をみてその半分2.5mmとする、などが考えられる。

検査等により亀裂状の欠陥が検出された場合には、いくつかの基準⁶⁻⁸⁾において規定されている脆性破壊を対象とした欠陥の亀裂への置き換えに従えば安全側の評価が可能となる。すなわち、**図4.4**に示すように、止端割れのような表面欠陥についてはそれを応力方向と直角に投影した面を長さ $2b$ 、深さ a の矩形で囲み、各軸を $2b$ 、 $2a$ とする半楕円形の亀裂に、また溶け込み不良のような内部欠陥についてはその投影面を長さ $2b$ 、深さ $2a$ の矩形で囲み、各軸を $2b$ 、 $2a$ とする楕円形の亀裂に置き換えることが考えられる。

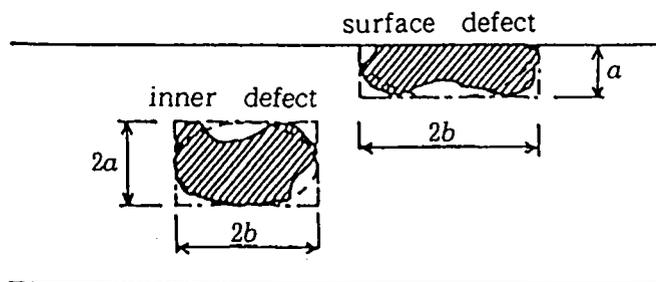


図4.4 溶接欠陥の亀裂への置き換え

(3) 応力拡大係数

亀裂は切欠きに比べて非常に鋭いため、亀裂先端には高い応力集中が生じる。例えば、**図4.5**に示すように

無限板内に長さ $2a$ の貫通亀裂が存在し、それが遠方で一様な応力 σ_n を受ける場合、亀裂沿う断面の亀裂先端近傍の応力分布は(4.3)式で与えられることが知られている。

$$\sigma = K/\sqrt{\pi r} \quad (r: \text{亀裂先端からの距離}) \quad (4.3)$$

K は定数であり、応力拡大係数 (stress intensity factor) と呼ばれている。(4.3)式および英語の名称からもわかるように応力拡大係数 K は亀裂先端の応力場の大きさを示す係数である。そのため、応力拡大係数は脆性破壊や疲労破壊などの亀裂先端近傍の応力場に支配されると考えられる破壊現象を評価するためのパラメータとして広く用いられている。

図4.5の場合の応力拡大係数 K は次式で与えられる。

$$K = \sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (4.4)$$

溶接欠陥や前面すみ肉溶接継手の止端に生じる疲労亀裂は、**図4.6**に示すように三次元的であり、またその近傍は複雑な応力状態となっている。そのため、このような疲労亀裂の応力拡大係数を厳密に求めることは困難であり、また有限要素法などの数値解析から応力拡大係数を求めることも非常に煩雑となる。

Albrecht⁹⁾らは、溶接継手部に生じた疲労亀裂の応力拡大係数 K を近似的に次式で表している。

$$K = F_e \cdot F_s \cdot F_t \cdot F_g \cdot \sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (4.5)$$

F_e は亀裂形状、 F_s は表面亀裂、 F_t は有限板厚あるいは板幅、 F_g は応力勾配（応力集中）に対する補正係数である。(4.5)式は、亀裂の状態および亀裂の存在する継手の種々の条件に対する補正係数を組み合わせて K 値を算出する式であり、補正係数相互の干渉効果は考慮していない。しかし、工学的には十分な精度を有しているものと考えられている。以下に代表的な各補正係数の表現式を示す。

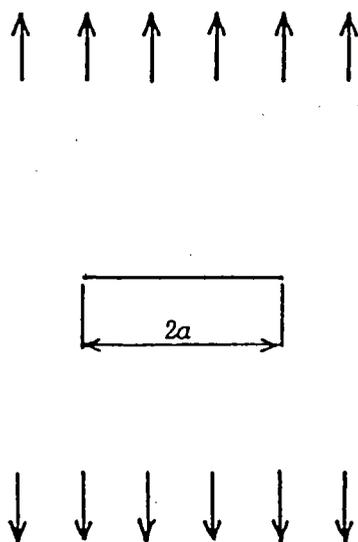


図4.5 無限板中の貫通亀裂

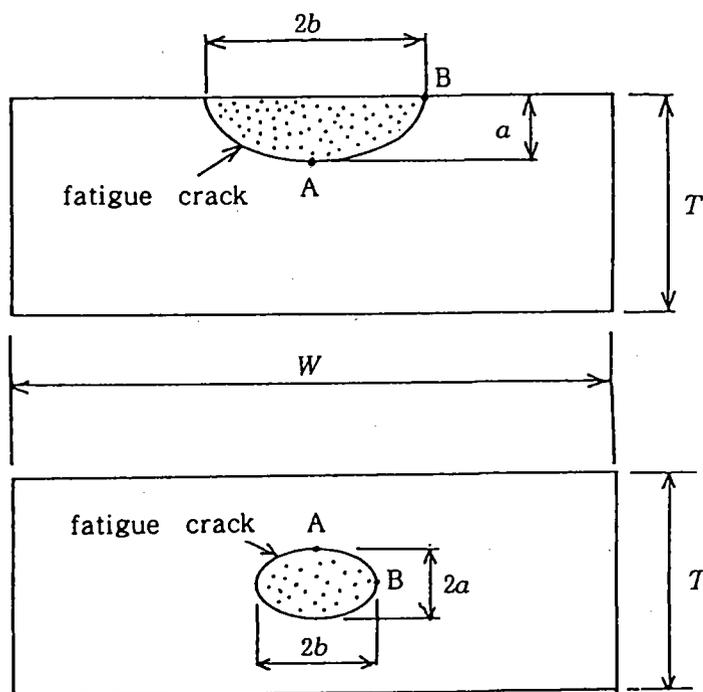


図4.6 溶接継手部に生じる疲労亀裂の形状

<亀裂形状に対する補正係数 F_e >

Irwin¹⁰⁾は無限体中に存在する短軸 $2a$ 、長軸 $2b$ の楕円形の亀裂に対する応力拡大係数を次式で与えている (図4.7参照)。

$$K = (1/E(k)) \cdot (1 - k^2 \cdot \cos\phi) \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4.6)$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \xi} d\xi \quad (\text{第2種完全楕円積分})$$

$$k^2 = 1 - a^2/b^2 \quad \phi : \text{離心角}$$

(4.6)式より、短軸方向の亀裂前縁 (A点) での補正係数 F_{eA} 、長軸方向の亀裂前縁 (B点) での補正係数 F_{eB} は (4.7) 式を用いて求められる。

$$F_{eA} = 1/E(k) \quad F_{eB} = F_{eA} \sqrt{a/b} \quad (4.7)$$

$E(k)$ の近似解がRaweにより求められており¹¹⁾、次式で与えられている。

$$E(k) = \sqrt{1 + 1.464(a/b)^{1.65}} \quad (4.8)$$

図4.8に F_{eA} 、 F_{eB} と亀裂の形状比 a/b の関係を示す。図中の実線は(4.7)式から、破線は(4.8)式を(4.7)式に代入することにより求めた関係である。破線で示す関係と実線で示す関係は良く一致している。したがって、(4.9)式から精度の高い補正係数を計算することができる。

$$F_{eA} = 1/\sqrt{1 + 1.464(a/b)^{1.65}}$$

$$F_{eB} = F_{eA} \sqrt{a/b} \quad (4.9)$$

貫通亀裂については

$$F_{eA} = 1 \quad (4.10)$$

となる。

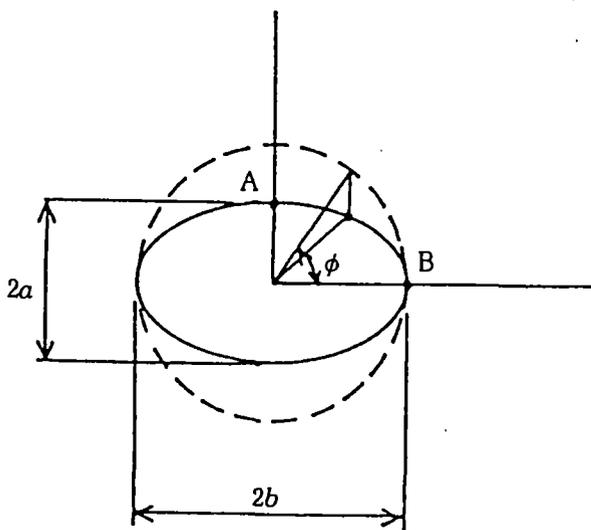


図4.7 楕円形の亀裂

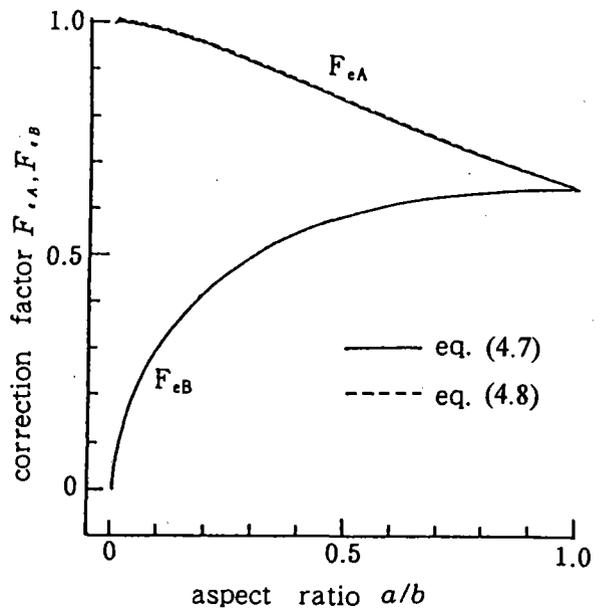


図4.8 亀裂形状に対する応力拡大係数の補正係数

<表面亀裂に対する補正係数 F_s >

半無限板中の自由端に長さ $2a$ の貫通亀裂がある場合の応力拡大係数は、次式で与えられる¹²⁾。

$$K = 1.12 \cdot \sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (4.11)$$

したがって、この場合は

$$F_s = 1.12 \quad (4.12)$$

となる。Paris¹²⁾は(4.13)式、Kobayashiらは(4.14)式¹¹⁾、Maddox¹⁴⁾は(4.15)式で半楕円形の亀裂の最深点 (図4.6のA点) での補正係数 F_{sA} を与えている。

$$F_{sA} = 1 + 0.12(1 - a/b) \quad (4.13)$$

$$F_{sA} = 1 + 0.12(1 - a/b)^2 \quad (4.14)$$

$$F_{sA} = 1 + 0.12(1 - 0.75a/b) \quad (4.15)$$

半楕円形の表面亀裂の F_s については、西谷ら¹⁵⁾が体積法により求めた解がある。図4.9に(4.13)、(4.14)、(4.15)式および西谷らによる F_{sA} と a/b の関係を示す。いずれの式においても、 F_{sA} と a/b の関係はほぼ一致しており、それらの値は西谷らのによる解よりも若干高めとなっている。半楕円形亀裂の幅方向の前縁 (図4.6のB点) での補正係数は、

$$F_{sB} = 1 \quad (4.16)$$

とされることが多い。なお、部材内部の楕円形亀裂に対する補正係数は

$$F_{sA} = F_{sB} = 1 \quad (4.17)$$

である。

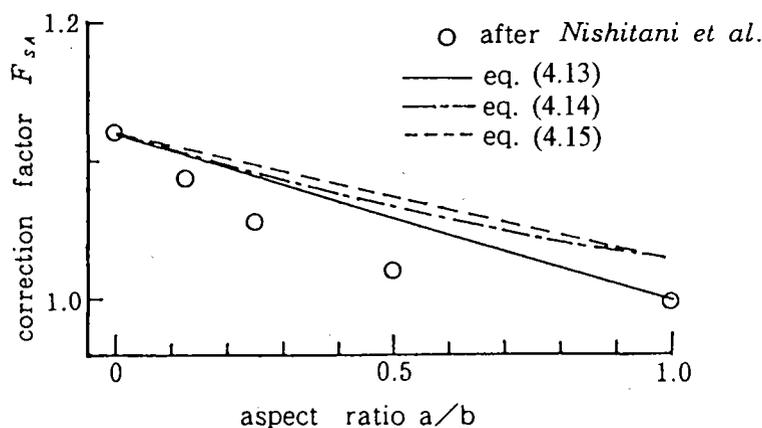


図4.9 表面疲労亀裂に対する応力拡大係数の補正係数

<有限板厚・板幅に対する補正係数 F_t >

幅 W の板の中央に長さ $2a$ の貫通亀裂がある場合の補正係数は(4.18)式で与えられる¹²⁾。

$$F_t = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4) \sqrt{\sec(\pi\lambda/2)} \quad (\lambda = 2a/W) \quad (4.18)$$

この式を図4.6に示す半楕円形の表面亀裂及び楕円形の内部亀裂に適用すれば、次式が得られる。

$$F_{tA} = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4) \sqrt{\sec(\pi\lambda/2)}$$

$$\lambda = a/T \quad (\text{表面亀裂})、\lambda = 2a/T \quad (\text{内部亀裂}) \quad (4.19)$$

$$F_{tB} = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4) \sqrt{\sec(\pi\lambda/2)}$$

$$\lambda = a/W$$

<応力集中に対する補正係数 F_g >

任意の応力場に長さ $2a$ の亀裂がある場合の応力拡大係数は、図4.10に示すように亀裂のあるときの解とないときの解の重合わせから、亀裂がないときに亀裂の部分に相当する位置に生ずる応力を亀裂面に作用させたときの応力拡大係数と等しい。図4.11に示すように、無限板中の亀裂面に任意の応力 $\sigma(x)$ が作用する場合の応力拡大係数は、(4.20)式で与えられる¹²⁾。

$$K = 1/\sqrt{\pi a} \int \sigma(x) \sqrt{(a+x)/(a-x)} dx \quad (4.20)$$

分布力 $\sigma(x)$ が、図4.12に示すように、上下、左右対称な場合の応力拡大係数は、

$$K = 2/\sqrt{\pi a} \int \sigma(x) \sqrt{(a+x)/(a-x)} dx \quad (4.21)$$

となる。さらに、亀裂面に作用する分布力を、図4.12に示すように適当な間隔で分割し一様な応力の集まりとみなせば、(4.21)式は(4.22)式に置き換えられる。

$$K = \sqrt{\pi a} (2/\pi) \sum \sigma_i (\arcsin(c_i + 1/a) - \arcsin(c_i/a)) \quad (4.22)$$

ここで、代表応力を σ_n とすれば、

$$K = \sigma_n \sqrt{\pi a} \left[(2/\pi) \sum (\sigma_i/\sigma_n) (\sin^{-1}(c_i + 1/a) - \sin^{-1}(c_i/a)) \right] \quad (4.23)$$

となる。したがって、 F_g は(4.23)式の括弧内の式で与えられる。

$$F_{gA} = (2/\pi) \sum (\sigma_i/\sigma_n) (\sin^{-1}(c_i + 1/a) - \sin^{-1}(c_i/a)) \quad (4.24)$$

なお、図4.6に示す亀裂の幅方向前縁(B点)での補正係数 F_{gB} は、溶接止端に沿っての応力はほぼ一様と考えられることから、

$$F_{gB} = K_t \quad (K_t : \text{応力集中係数}) \quad (4.25)$$

となる。

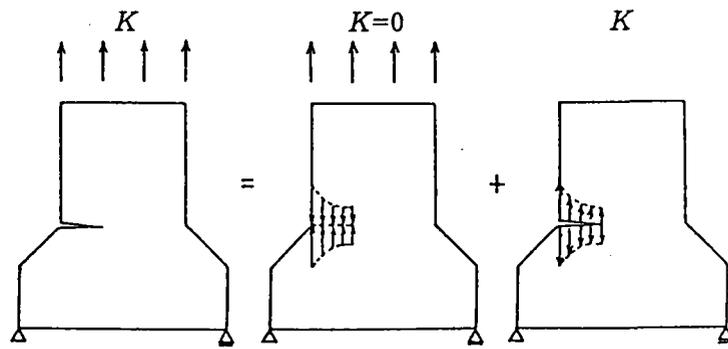


図4.10 重ね合わせの原理

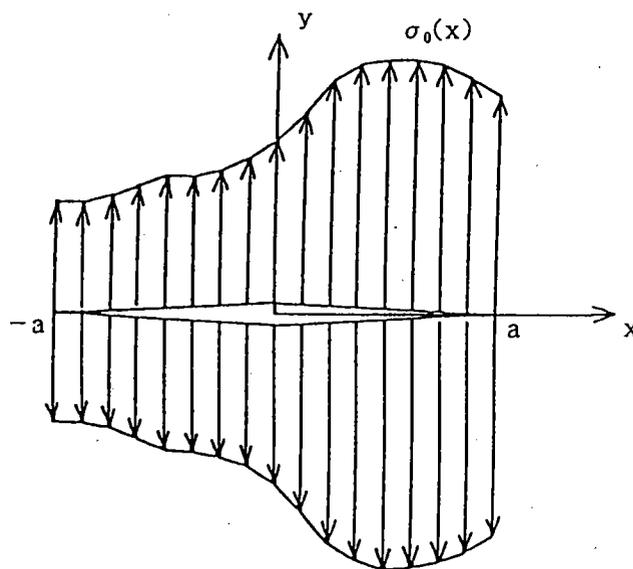


図4.11 亀裂面に作用する上下対称な応力

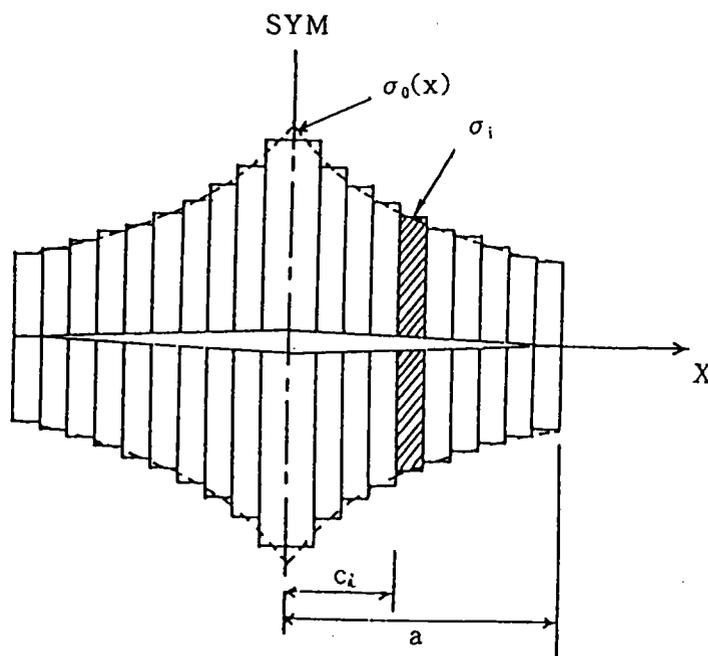


図4.12 亀裂面に作用する上下左右対称な応力

<応力拡大係数の近似式>

いくつかの溶接継手については応力拡大係数の近似式が提案されており、それを用いれば、応力拡大係数の算出は簡便となる。以下に2つの例を示す。

- ・荷重伝達型十字すみ肉溶接継手のルート部から発生する疲労亀裂¹⁶⁾ (図4.13)

$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \sec(\pi a/2W) [A_1 + A_2(a/W)] / (1 + 2H/T_p) \quad (4.26)$$

$$A_1 = 0.528 + 3.287(H/T_p) - 4.361(H/T_p)^2 + 3.696(H/T_p)^3 \\ - 1.874(H/T_p)^4 + 0.415(H/T_p)^5$$

$$A_2 = 0.218 + 2.717(H/T_p) - 10.171(H/T_p)^2 + 13.122(H/T_p)^3 \\ - 7.755(H/T_p)^4 + 1.787(H/T_p)^5$$

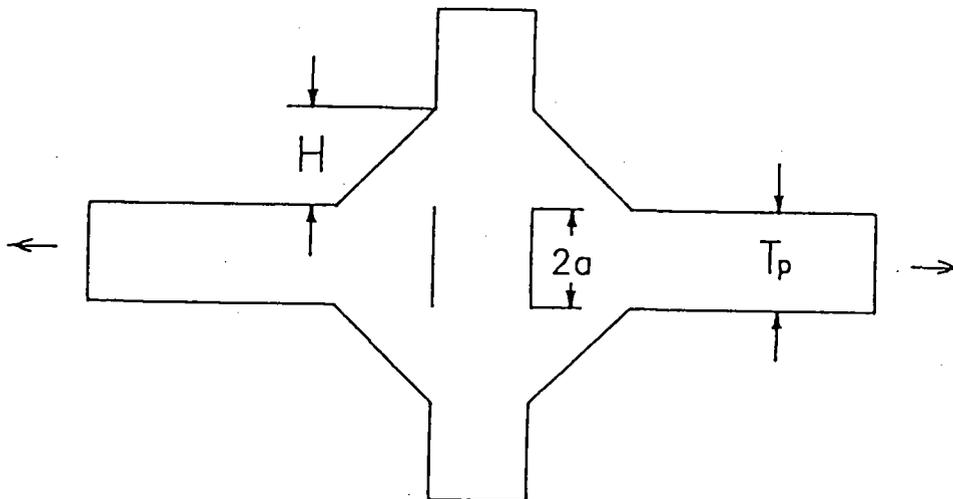


図4.13 F_g の解析モデル (ルート破壊)

- ・荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手の溶接止端から発生する疲労亀裂^{14),17)} (図4.14)

$L/T \leq 2$:

$$F_{gA} = 0.51(L/T)^{0.27} \cdot (a/T)^{-0.31} \quad a/T \leq 0.05 \quad (L/T)^{0.55}$$

$$F_{gA} = 0.83(a/T)^{0.15(L/T)^{0.46}} \quad a/T > 0.05 \quad (L/T)^{0.55}$$

$L/T > 2$:

$$F_{gA} = 0.615(a/T)^{-0.31} \quad a/T \leq 0.073$$

$$F_{gA} = 0.83(a/T)^{-0.2} \quad a/T > 0.073$$

(4.27)

なお、材料学会より「Stress Intensity Factors Handbook」¹⁸⁾が発刊されており、そこには、様々な形状の亀裂、継手および応力状態での応力拡大係数の算出法が示されており、実際の解析に当たってはそれらを参考にするとうい。

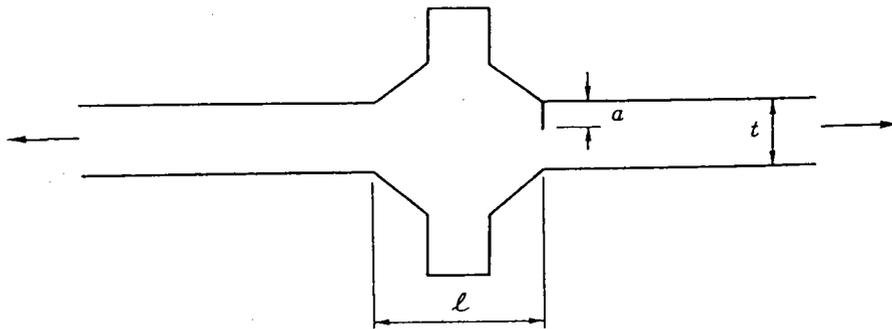


図4.14 Fg の解析モデル (止端破壊)

(4) 疲労亀裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係

Parisら¹⁾により示されて以来、疲労亀裂進展速度は応力拡大係数範囲の関数として表されることが多い。

$$da/dN = C(\Delta K)^n \quad (C, n: \text{材料定数}) \quad (4.28)$$

図4.15にASME Sec.XI⁶⁾、BSI PD6493⁷⁾、WES 2805⁸⁾で採用されている疲労亀裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を示す。実線①で示す関係は炉水環境中を対象としたものであり、他は大気中を対象としている。図4.15中に示す一点鎖線⑤および⑥は、それぞれBarsom¹⁹⁾により求められたマルテンサイト鋼およびフェライト・パーライト鋼での da/dN - ΔK 関係の上限である。また、破線⑦および⑧は、三木ら²⁰⁾により示されたわが国での400,500MPa級および600,800MPa級鋼材での平均的な da/dN - ΔK 関係を示したものである。

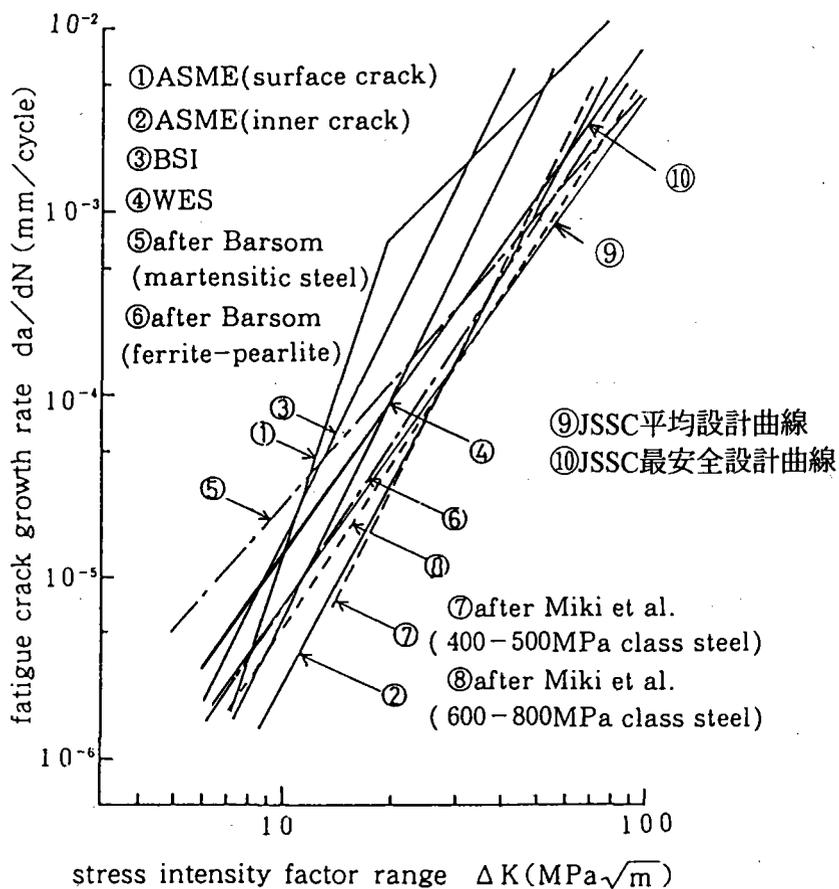


図4.15 欠陥評価基準で用いられている da/dN - ΔK 関係

ΔK がある限界値以下になると、亀裂は進展しなくなり、 $da/dN = 0$ となる。この限界値は下限応力拡大係数範囲 (ΔK_{th}) と呼ばれており、 ΔK_{th} をも含めた亀裂進展則としては、以下の式が提案されている²¹⁾。

$$da/dN = C(\Delta K^n - \Delta K_{th}^n) \quad (4.29)$$

ΔK_{th} は、応力比 $R (= \sigma_{min}/\sigma_{max})$ に著しく影響されることが確かめられている。BSIでは

$$\Delta K_{th} = 6.01 - 4.56R \quad (4.30)$$

で ΔK_{th} が与えられている。しかし、溶接継手に対しては、溶接部に降伏点に達するような引張残留応力が存在するため、その場合は ΔK_{th} を次式で与えている。

$$\Delta K_{th} = 1.5 / \left\{ 1 - \left(4.56 / \sigma_y \sqrt{\pi a} \right) \right\} \quad (\sigma_y : \text{降伏応力}) \quad (4.31)$$

また、600MPa級鋼溶接継手を用いて高い引張残留応力場で ΔK_{th} に対する応力比の影響を調べた研究では、 ΔK_{th} は応力比 (-1~0.91) によらずほぼ $2 \sim 2.5 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度であるという結果が得られている²²⁾。他の鋼材を用いた溶接継手においても同様な結果が得られている^{23),24)}。

日本鋼構造協会「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」では、数多くの疲労亀裂進展試験結果に基づき、疲労亀裂の閉口が生じない状態、すなわち高い引張残留応力場での疲労亀裂進展速度を次式で表している²⁵⁾。

$$\text{平均設計曲線} \quad da/dN = 1.5 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.75} - 2.9^{2.75}) \quad (4.32)$$

$$\text{最安全設計曲線} \quad da/dN = 2.7 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.75} - 2.0^{2.75}) \quad (4.33)$$

$$da/dN : \text{m/cycle}, \Delta K : \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

平均設計曲線は平均的な疲労寿命を求める際、また最安全設計曲線は同指針に示されている各継手の疲労強度と同程度の安全性をもって疲労寿命を求める際に用いるものである。現在のところ、(4.32),(4.33)式が最も信頼性が高いと考えられている。

疲労亀裂進展解析に用いる da/dN - ΔK 関係は、ここで挙げた式を参考に定めればよい。また、必要であれば、実験から新たに da/dN - ΔK 関係を設定することも考えられる。

(5) 亀裂進展形状

図4.6に示すように、部材内に半楕円形の表面亀裂あるいは楕円形の内部亀裂が存在する場合、ASMEでは相似形を保持しながら進展するとしている。また、BSIでは曲げ応力と軸応力の比により亀裂形状変化を区別し、この比が0.25を越える場合には、貫通亀裂として取り扱い。0.25以上では亀裂形状が半円形あるいは円形となるまで $2b$ が一定で深さ方向のみ進展するとしその後は半円形あるいは円形のまま進展するとしている。亀裂は進展に伴いその形状が変化し、また応力拡大係数の値は亀裂形状により異なるため、ASME、BSIでの亀裂形状変化の仮定では寿命予測の精度が低いと思われる。WESでは実験結果に基づいた亀裂形状変化式を用いることにしているが、この式は平滑

平板の実験結果から定めたものであり、前面すみ肉溶接継手のように応力集中のある場を進展する亀裂に対しては適用しがたい。

Maddox¹⁷⁾は、リブ十字すみ肉溶接止端部から発生する半楕円形の亀裂の形状比 a/b の変化を実験結果に基づいて仮定し、疲労寿命の予測を行なっている。他の疲労寿命に関する研究においても、Maddoxと同様の仮定あるいは亀裂の形状比は亀裂深さによらず一定という仮定がなされている。

以上のように、ASME、BSI、WESおよびこれまでの研究の多くにおいては、深さ方向のみ亀裂進展を対象とし、幅方向の進展は亀裂形状変化を仮定することにより考慮している。

これらに対し、**図4.6**に示す深さ方向の亀裂前縁（A点）および幅方向の亀裂前縁（B点）での応力拡大係数範囲 ΔK_A 、 ΔK_B を算出し、これを疲労亀裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係に代入し、それぞれの方向の亀裂増分を求めることにより亀裂形状変化を考慮した解析が可能となる。多くの場合、2方向の進展を考えることで、疲労亀裂の形状変化を含めた解析が可能であるが、場合によっては、3方向（半楕円形の亀裂）あるいは4方向（楕円形の亀裂）の進展解析が必要となることもある。

(6) 亀裂合体条件と合体後の亀裂

溶接継手の疲労寿命を推定するためには、1つの亀裂を対象とすればよいと既述したが、実際には複数の亀裂が生じることも少なくない。

飯田ら²⁶⁾は、複数の人工表面欠陥からの亀裂進展形状を解析する際に以下のように疲労亀裂の合体および合体後の亀裂を定義している。すなわち、**図4.16**に示すように隣接する二つの亀裂 (a_1, b_1) 、 (a_2, b_2) の前縁が接触した時点で合体したとみなす。合体後の亀裂深さ a_3 は a_1 、 a_2 のどちらか大きいほうと等しく、亀裂の幅 b_3 は b_1 と b_2 との和とする。また、亀裂の相互干渉効果はないものとする。実際には、亀裂の相互干渉効果が生じ、また合体時の亀裂は複雑な形状となるものの、そのような亀裂の応力拡大係数を求めることは現在のところ困難である。また、合体時の複雑な形状の亀裂はその進展に伴い急速に半楕円形に近づく。したがって、現在のところは先の仮定は妥当と思われる。

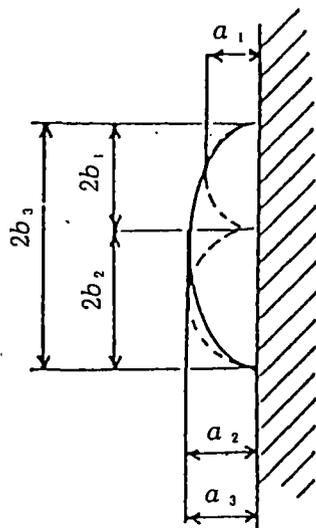


図4.16 亀裂合体の定義

(7) 限界亀裂寸法

限界亀裂寸法 a_c は、繰返し荷重により疲労亀裂が進展し、他の破壊モードに移行する亀裂寸法と定義される。破壊モードとしては、脆性破壊、延性破壊、部材全断面降伏などが考えられる。また、疲労亀裂が進展して、板を貫通した後の疲労寿命はそれまでの寿命と比べて非常に短いことが多いため、板厚貫通時の亀裂寸法を限界亀裂寸法とすることも多い。

脆性破壊を対象とする場合には、最大応力 σ_{max} が作用した際の応力拡大係数が破壊じん性値 K_{IC} と一致するときの亀裂寸法として限界亀裂寸法求められる。最大応力 σ_{max} は、死荷重、活荷重（車両荷重、衝撃荷重）といった主荷重が作用するときの応力を用いるのが通常である。しかし、溶接継手においては、疲労亀裂が発生し進展する位置が高い引張残留応力場となるため、最大応力を降伏応力とみなすのが妥当とも考えられる。

4.4 一定振幅応力下の疲労亀裂進展の解析方法と計算例

(1) 積分法

<例 a> 図4.17に示すように、無限板内に長さ $2a_i$ の亀裂が存在している。この板に遠方で亀裂と直角に $\Delta\sigma_n$ の大きさの繰返し応力が作用している。この亀裂が $2a_c$ まで進展するのに要する応力繰返し数（疲労亀裂進展寿命） N_p を求めたい。ただし、疲労亀裂進展速度 da/dN は (a.1) 式で与えられるものとする。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (a.1)$$

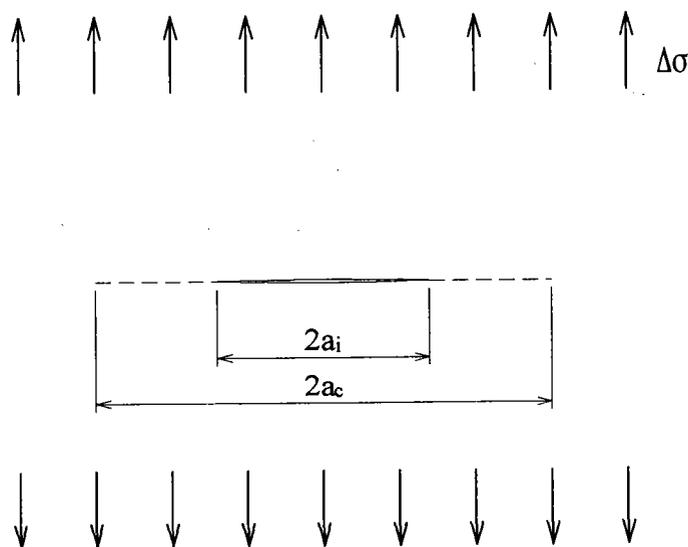


図4.17 計算対象（無限板の貫通亀裂）

[解]

(a.1) 式を変形すると、(a.2) 式が得られる。

$$N_p = \int dN = \int da / C(\Delta K)^m \quad (\text{a.2})$$

また、 ΔK は、

$$\Delta K = \Delta\sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (\text{a.3})$$

で与えられるので、これを (a.2) 式に代入すれば、(a.4) 式が得られる。

$$N_p = \int (1/C \cdot \Delta\sigma_n^m \cdot \pi^{m/2} \cdot a^{m/2}) da \quad (\text{a.4})$$

(a.4) 式を解くことにより疲労亀裂進展寿命 N_p を求めることができる。

$$N_p = \left\{ a_c^{-m/2+1} - a_i^{-m/2+1} \right\} / \left\{ (-m/2+1)C \cdot \Delta\sigma_n^m \cdot \pi^{m/2} \right\} \quad (\text{a.5})$$

例えば、 $a_i=10\text{mm}$ 、 $a_c=100\text{mm}$ 、 $\Delta\sigma_n=100\text{MPa}$ 、 $C=2.7 \times 10^{-11}$ 、 $m=2.75$ とし、単位系を以下のよ
うに統一すれば、 N_p が求められる。

$$a_i=0.01\text{m}, a_c=0.1\text{m}, \Delta\sigma_n=100\text{MPa}, C=2.7 \times 10^{-11}, m=2.75 \quad (\text{a.6})$$

$$(da/dN : \text{m/cycle}, \Delta K : \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$\begin{aligned} N_p &= (0.1^{-0.375} - 0.01^{-0.375}) / (-0.375 \cdot 2.7 \times 10^{-11} \cdot 100^{2.75} \cdot \pi^{1.375}) \\ &= 2.10 \times 10^6 \text{ cycles} \end{aligned} \quad (\text{a.7})$$

となる。単位系を統一することに注意されたい。

(2) 数値積分法

<例b> 図4.18に示すように、正方形断面 (400mm x 400mm) の棒の内部に半径20mmの円形亀裂
が存在している。この棒に 12.8MN の繰返し荷重が作用している。この円形亀裂が半径
100mm となるまでの荷重繰返し数 N_p を求めたい。ただし、疲労亀裂進展速度表示式とし
て (b.1)式を用いることとする。

$$da/dN = 1.5 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.75} - 2.9^{2.75}) \quad (\text{b.1})$$

$$da/dN : \text{m/cycle}, \Delta K : \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

[解]

4.3(3)項より、応力拡大係数範囲 ΔK は、(b.2)式で与えられる。

$$\Delta K = F_e \cdot F_t \cdot \Delta\sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (\text{b.2})$$

$$(4.9) \text{式より } F_e = 1 / \sqrt{1 + 1.464(20/20)^{1.65}} = 0.6371 \text{ (厳密には } 2/\pi)$$

$$(4.18) \text{式より}$$

$$F_t = \left(1 - 0.025(2a/400)^2 + 0.06(2a/400)^4\right) \sqrt{\sec(\pi a/400)}$$

(b.1)および(b.2)式より、 N_p を求める式は、

$$N_p = \int f(a) da \tag{b.3}$$

$$f(a) = \frac{1}{1.5 \times 10^{11} \left\{ \left(F_e \cdot F_t \cdot \Delta \sigma_n \sqrt{\pi a} \right)^{2.75} - 2.9^{2.75} \right\}}$$

となる。これを Simpson法で計算する。以下に亀裂のきざみ幅を変えて計算した例を示す。

刻み幅 (mm)	分割数	疲労亀裂進展寿命 (cycles)
40	2	1.4736×10^6
20	4	1.3494×10^6
10	8	1.3260×10^6
5	16	1.3231×10^6
2.5	32	1.3228×10^6
1	80	1.3228×10^6
0.5	160	1.3228×10^6
0.25	320	1.3228×10^6

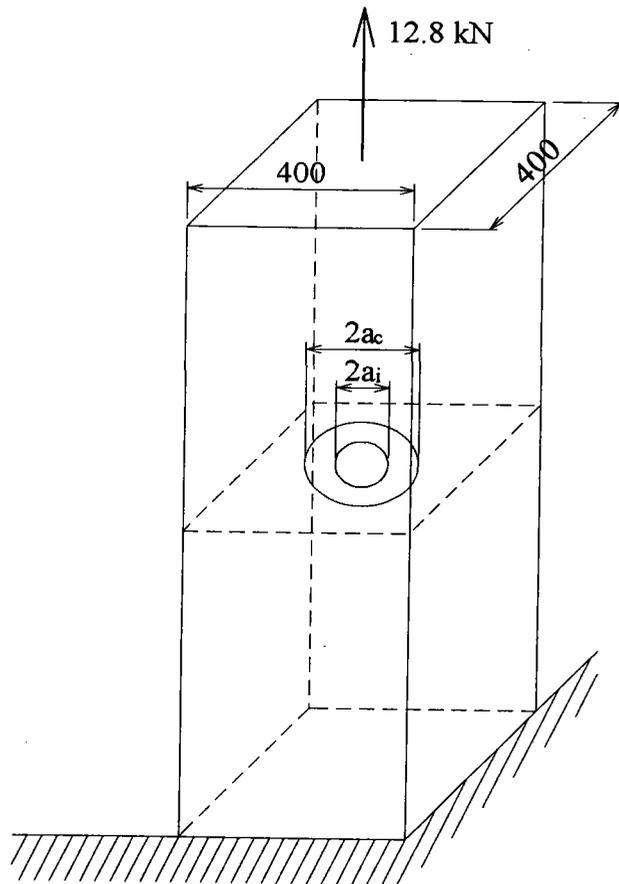


図4.18 計算対象 (無限体内の円形亀裂)

(3) Δn 法

亀裂の進展を2方向以上で考える場合には、単純な積分や数値積分法で疲労寿命を計算することはできない。この場合に、 Δn 法あるいは Δa 法が必要となる。 Δn 法では以下のように疲労寿命の計算を行なう。なお、以下の例は2方向の進展を考えた解析である。

半楕円形あるいは楕円形の亀裂の短軸側の前縁（図4.6、A点）および長軸側の前縁（図4.6、B点）での応力拡大係数範囲 ΔK_A 、 ΔK_B を算出し、これらを疲労亀裂進展速度表示式に代入することにより、応力1サイクルごとの両方向の亀裂進展量が算出される。この計算を初期の亀裂寸法から限界の亀裂寸法まで繰返すことにより疲労寿命を求めることができる。しかし、1サイクルごとの計算から寿命を求めるには寿命と等しい回数の繰返し演算が必要となるため、ここでは Δn 回の応力繰返しによる亀裂増分を計算することにより、疲労寿命を求める。このとき、 Δn が計算結果に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。なお、 Δn 法の精度を高めるために、1ステップでの亀裂増分を以下の手順で求めることが考えられる。

- (1) 亀裂 (a, b) に対する応力拡大係数範囲 ΔK_{A1} 、 ΔK_{B1} を求める。
- (2) Δn 回の応力繰返しによって生じる亀裂増分 $\Delta a'$ 、 $\Delta b'$ を算出する。

$$\Delta a' = C(\Delta K_{A1})^m, \quad \Delta b' = C(\Delta K_{B1})^m$$

- (3) 亀裂 $(a+\Delta a', b+\Delta b')$ に対する応力拡大係数範囲 ΔK_{A2} 、 ΔK_{B2} を求める。
- (4) 亀裂が (a, b) から $(a+\Delta a', b+\Delta b')$ まで進展する時の平均的な応力拡大係数範囲 ΔK_A 、 ΔK_B を算出する。

$$\Delta K_A = \left\{ \frac{(\Delta K_{A1}^m + \Delta K_{A2}^m)}{2} \right\}^{1/m}$$

$$\Delta K_B = \left\{ \frac{(\Delta K_{B1}^m + \Delta K_{B2}^m)}{2} \right\}^{1/m}$$

- (5) このステップでの亀裂増分 Δa 、 Δb を求める。

$$\Delta a = C(\Delta K_A)^m, \quad \Delta b = C(\Delta K_B)^m$$

無限体中に直径 $2a_1$ の円形亀裂が存在する場合、その亀裂が直径 $2a_2$ の円形亀裂まで成長するのに要する繰返し数 N_i は、後述のように応力拡大係数の式が積分可能であるため、積分法で求めることができる。ここでは、亀裂増分を計算する1ステップでの応力繰返し数 Δn をかえて Δn 法で寿命 N_{est} を計算し、積分法で求めた寿命 N_i と比較する。なお、以上の計算手順で求めた寿命 N_{est} と積分を行なうことにより求めた寿命 N_i の比を、亀裂増分を計算したステップ数をパラメータとして図4.19に示す。解析条件は図中に示す通りである。 N_i に対する N_{est} の誤差は極めて小さく、ステップ数を50

とした場合で約0.1%、100ステップとすれば0.02%程度にすぎない。したがって、1ステップでの亀裂増分を計算するための応力繰り返し数 Δn は、全ステップが100以上となるようにすれば十分である。

Δn 法による疲労亀裂進展寿命の解析手順を図4.20に示す。図の説明は以下の通りである。

① 計算に必要なデータの入力

W, T : 部材断面の幅および高さ

$\Delta\sigma$: 応力範囲

C, m : $da/dN-\Delta K$ 関係における材料定数

Δk_{th} : 下限界応力拡大係数

NUM : 初期亀裂の数

$a(J,1)$: NUM 個の初期亀裂のうち、 J 番目の初期亀裂の深さ

$b(J,1)$: J 番目の初期亀裂の幅

$x(J,1)$: J 番目の初期亀裂の位置

a_c : 亀裂深さの限界値

Δn : 1ステップでの応力繰り返し回数

② 計算終了の判定

亀裂の深さが限界値を越えた場合、計算を終了する。

③ 亀裂合体の判定

合体とみなされた場合には、④に従い新たな亀裂の深さ、幅、位置を設定する。

④ 合体後の亀裂の寸法、位置の計算

⑤ 亀裂増分の計算

前記に手順にしたがい、亀裂増分を計算する。

⑥ 次のステップでの亀裂の深さ、幅を求め②に戻る。

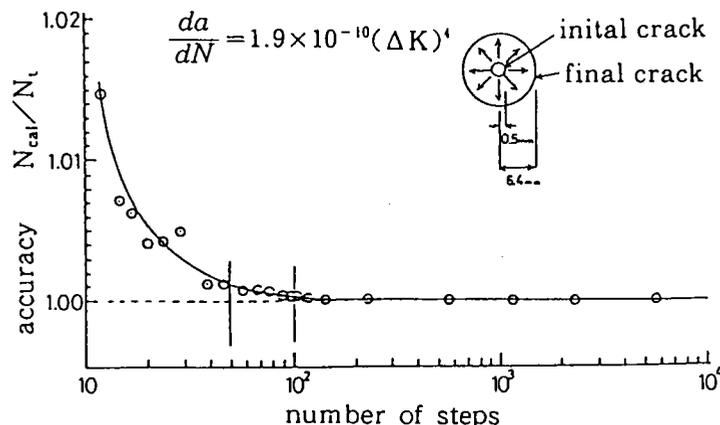


図4.19 疲労亀裂進展寿命の計算精度

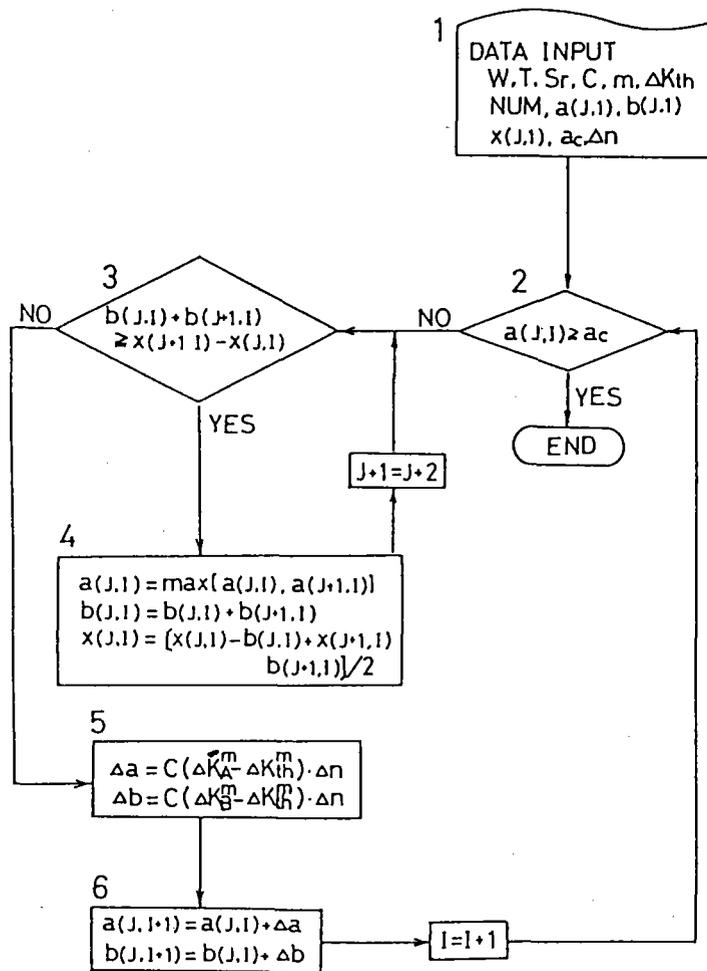


図4.20 疲労亀裂進展の解析手順 (Δn 法)

<例c> 図4.21に示す荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手の止端に深さ $a=1.5\text{mm}$, 表面での長さ $2b=5\text{mm}$ の半楕円形の亀裂が検出された。この亀裂が進展して板を貫通するまでの疲労亀裂進展寿命 N_p をもとめたい。ただし、この継手には 50MPa の繰返し応力が 1日当たり 1.2×10^4 回作用しているものとする。また、疲労亀裂進展速度表示式は

$$da/dN = 1.5 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.75} - 2.9^{2.75}) \quad (\text{c.1})$$

da/dN : m/cycle, ΔK : $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

で与えられる。

また、溶接止端を含む断面の応力分布と F_g は図4.22に示すように既に求められている。

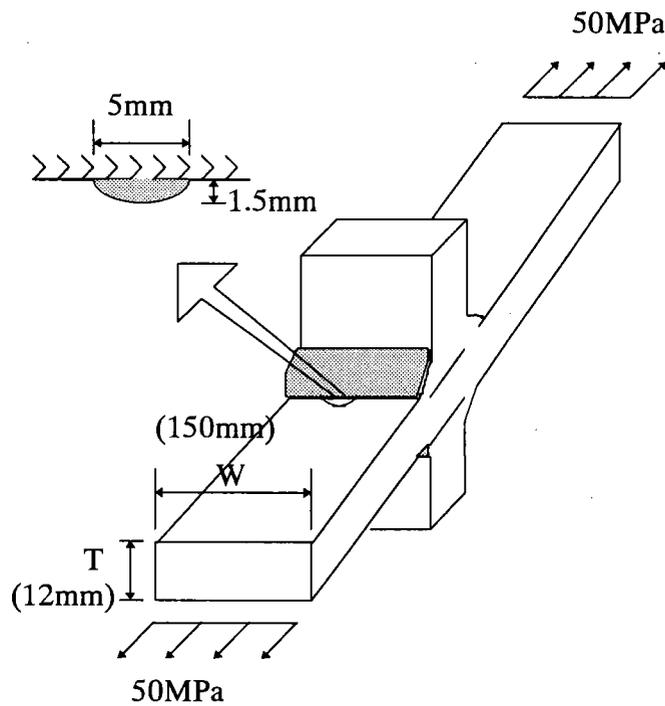


図4.21 計算対象 (荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手)

[解]

この亀裂に対する応力拡大係数範囲は次式で与えることができる。

$$\Delta K_A = F_{eA} \cdot F_{sA} \cdot F_{tA} \cdot F_{gA} \cdot \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{c.2})$$

$$\Delta K_B = F_{eB} \cdot F_{sB} \cdot F_{tB} \cdot F_{gB} \cdot \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{c.3})$$

$\Delta n = 10000$ cycleとして、

計算ステップ1:

亀裂寸法 $(a, b) = (1.5\text{mm}, 2.5\text{mm})$

表面からの深さ(mm)	応力 (公称応力で無次元化)
0.0 ~ 0.025	3.325185
0.025 ~ 0.05	2.835388
0.05 ~ 0.075	2.599960
0.075 ~ 0.10	2.387047
0.10 ~ 0.125	2.218048
0.125 ~ 0.15	2.090195
0.15 ~ 0.175	1.985760
0.175 ~ 0.20	1.864719
0.20 ~ 0.25	1.736777
0.25 ~ 0.30	1.639118
0.30 ~ 0.40	1.530896
0.40 ~ 0.50	1.420694
0.50 ~ 0.60	1.339827
0.60 ~ 0.70	1.279176
0.70 ~ 0.80	1.237263
0.80 ~ 0.90	1.210257
0.90 ~ 1.0	1.152883
1.0 ~ 1.5	1.105028
1.5 ~ 2.0	1.009247
2.0 ~ 3.0	0.942403
3.0 ~ 4.0	0.889093
4.0 ~ 5.0	0.864798
5.0 ~ 6.0	0.854553

亀裂深さ(mm)	Fg
0.025	3.32519
0.05	2.93222
0.075	2.75111
0.10	2.59865
0.125	2.47273
0.15	2.37001
0.175	2.28299
0.20	2.17127
0.25	2.04988
0.30	1.95484
0.40	1.84016
0.50	1.72221
0.60	1.63369
0.70	1.56417
0.80	1.50947
0.90	1.46647
1.0	1.42058
1.5	1.32971
2.0	1.21586
3.0	1.1176
4.0	1.03945
5.0	0.99410
6.0	0.96550

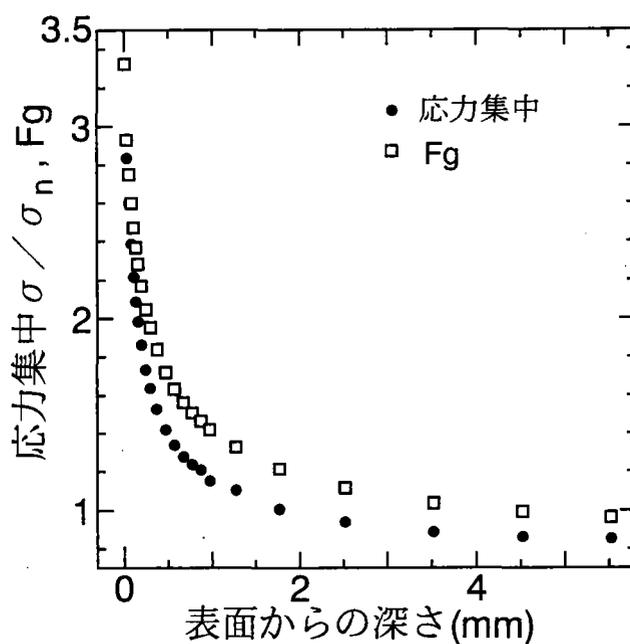


図4.22 応力分布とFg

(4.9)式より

$$F_{eA} = 1/\sqrt{1+1.464(1.5/2.5)^{1.65}} = 0.7832 \quad (c.4)$$

$$F_{eB} = 0.7832 \cdot \sqrt{1.5/2.5} = 0.6067 \quad (c.5)$$

(4.13)式より

$$F_{sA} = 1+0.12(1-1.5/2.5) = 1.048 \quad (c.6)$$

また、(4.16)式より $F_{sB} = 1$

(4.19)式より

$$F_{tA} = \left(1 - 0.025(1.5/12)^2 + 0.06(1.5/12)^4\right) \sqrt{\sec(\pi \cdot 1.5/12)} = 1.009 \quad (c.7)$$

$$F_{tB} = \left(1 - 0.025(2.5/150)^2 + 0.06(2.5/150)^4\right) \sqrt{\sec(\pi \cdot 2.5/150)} = 1.000 \quad (c.8)$$

図4.22より、 $a=1.5\text{mm}$ であるから、 $F_{gA}=1.32971$ 。また、 $F_{gB}=K_1=3.32519$

以上より、

$$\Delta K_A = 0.7832 \times 1.048 \times 1.009 \times 1.32971 \times 50 \times \sqrt{\pi \times 0.0015} = 3.781 \quad (c.9)$$

$$\Delta K_B = 0.6067 \times 1.000 \times 1.000 \times 3.32519 \times 50 \times \sqrt{\pi \times 0.0025} = 8.939 \quad (c.10)$$

$\Delta n=10000$ 回の応力繰返しによって生じる亀裂増分 Δa 、 Δb は、

$$\Delta a = 1.5 \times 10^{-11} (3.781^{2.75} - 2.9^{2.75}) \times 10000 = 3.011 \times 10^{-6} \text{ [m]} = 0.003011 \text{ [mm]} \quad (c.11)$$

$$\Delta b = 1.5 \times 10^{-11} (8.939^{2.75} - 2.9^{2.75}) \times 10000 = 5.916 \times 10^{-5} \text{ [m]} = 0.05916 \text{ [mm]} \quad (c.12)$$

したがって、亀裂寸法 $(a, b) = (1.503011\text{mm}, 2.55916\text{mm})$ として次のステップに進む。

以上の計算を繰り返すと、第241ステップ目の計算終了時点、応力繰返し数2410000回で、亀裂の幅 b が板幅の1/2以上となり、幅方向に板を貫通する。そこで、貫通亀裂として以降の計算を続けるものとする。このとき、亀裂深さは $a=6.104\text{mm}$ である。

計算ステップ242：

亀裂寸法 $a=6.104\text{mm}$

貫通亀裂であるから、(4.10)式より

$$F_{eA} = 1.0 \quad (c.13)$$

(4.12)式より

$$F_{sA} = 1.12 \quad (c.14)$$

(4.19)式より

$$F_{tA} = \left(1 - 0.025(6.104/12)^2 + 0.06(6.104/12)^4\right) \sqrt{\sec(\pi \cdot 6.104/12)} = 1.195 \quad (c.15)$$

図4.22より、 $a=6.104\text{mm}$ であるから、 $F_{gA}=0.96550$ 。

以上より、

$$\Delta K_A = 1.0 \times 1.12 \times 1.195 \times 0.9655 \times 50 \times \sqrt{\pi \times 0.006104} = 8.944 \quad (\text{c.16})$$

$\Delta n=10000$ 回の応力繰返しによって生じる亀裂増分 Δa は、

$$\Delta a = 1.5 \times 10^{-11} (8.944^{2.75} - 2.9^{2.75}) \times 10000 = 5.925 \times 10^{-4} [\text{m}] = 0.05925 [\text{mm}] \quad (\text{c.17})$$

したがって、亀裂寸法 $a=6.104+0.05925=6.163[\text{mm}]$ として次のステップに進む。

以上の計算を繰り返すと、第274ステップ目の計算終了時、応力繰返し数2740000回で亀裂深さが板厚以上となり、板を貫通する。

従って、疲労亀裂進展寿命は

$$N_p = 2740000 \text{ 回} \quad (\text{c.18})$$

また、一日当りの応力繰返し数 1.2×10^4 より、

$$2740000 / 1.2 \times 10^4 = 228.3 \text{ 日} \quad (\text{c.19})$$

(4) Δa 法

Δn 法では、 Δn 回の応力繰返しにより亀裂がどの程度進展するかを計算し、亀裂進展寿命を求めた。 Δa 法では、 Δa だけ進展するのに必要な応力繰返し数を繰返し求めることにより、疲労亀裂進展寿命を算出する。1つの疲労亀裂を対象とした場合の計算手順は以下の通りである（図4.23参照）。

① 計算に必要なデータの入力

W, T : 部材断面の幅および高さ

$\Delta\sigma$: 応力範囲

C, m : da/dN - ΔK 関係における材料定数

ΔK_{th} : 下限界応力拡大係数

$a(1)$: 初期亀裂の深さ

$b(1)$: 初期亀裂の幅

a_c : 亀裂深さの限界値

Δa : 1ステップでの亀裂進展量

② 計算終了の判定

亀裂の深さが限界値を越えた場合、計算を終了する。

③ Δa 進展するのに要する応力繰返し数 n_i を計算（含む ΔK_A の計算）する。

$$n_i = \Delta a / C (\Delta K_A^m - \Delta K_{th}^m)$$

④ 幅方向の亀裂進展量を求める（含む ΔK_B の計算）。

$$\Delta b = C (\Delta K_B^m - \Delta K_{th}^m) \cdot n_i$$

⑤ 次のステップでの亀裂の深さ、幅を求め②に戻る。

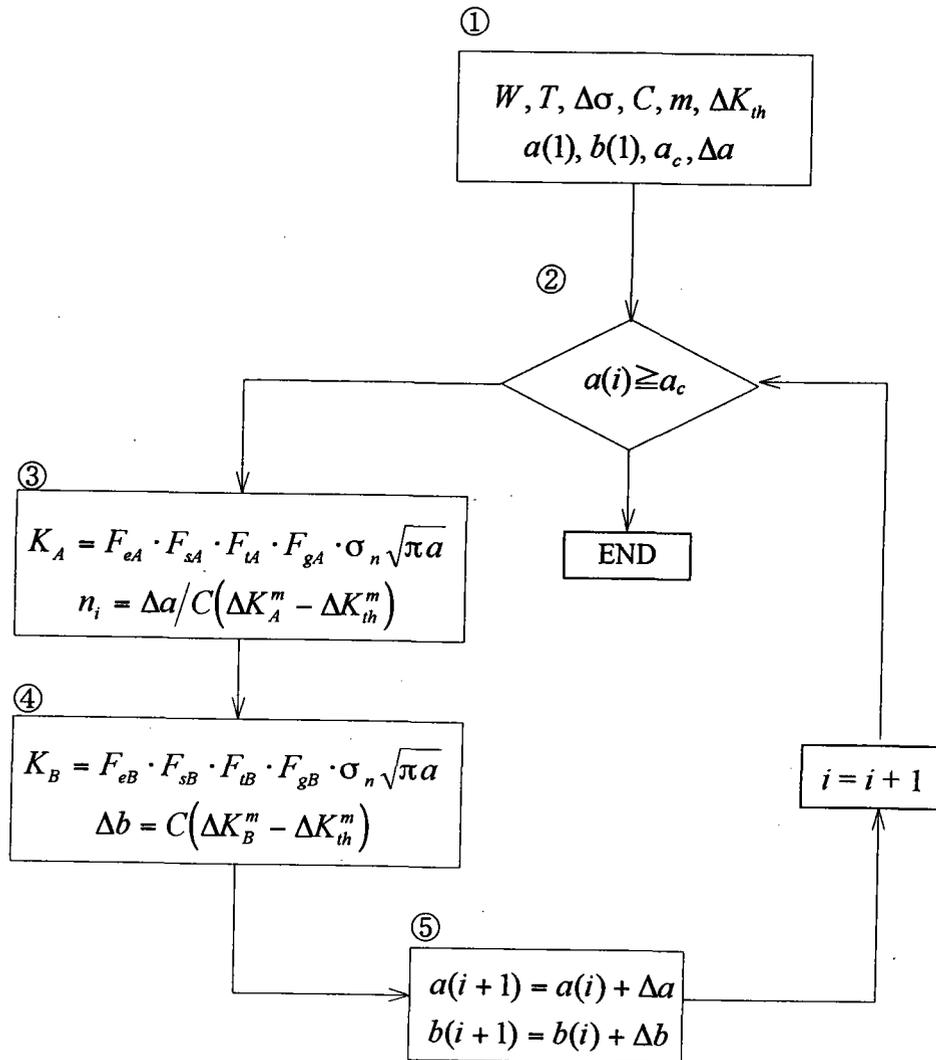


図4.23 疲労亀裂進展の解析手順 (Δa法)

<例d> 図4.21に示す荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手の止端に深さ $a=1.5\text{mm}$ 、表面での長さ $2b=5\text{mm}$ の半楕円形の亀裂が検出された。この亀裂が進展して板を貫通するまでの疲労亀裂進展寿命 N_p をもとめたい。ただし、この継手には 50MPa の繰返し応力が 1日当たり 1.2×10^4 回作用しているものとする。また、疲労亀裂進展速度表示式は

$$da/dN = 1.5 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.75} - 2.9^{2.75}) \quad (\text{d.1})$$

$$da/dN : \text{m/cycle}, \Delta K : \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

で与えられる。

また、溶接止端を含む断面の応力分布と F_g は図4.22に示すように既に求められている。

亀裂の形状比は $a/b=1.5/2.5=3/5$ で一定のままとする。

[解]

この亀裂に対する深さ方向の応力拡大係数範囲は次式で与えることができる。

$$\Delta K_A = F_{eA} \cdot F_{sA} \cdot F_{lA} \cdot F_{gA} \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{d.2})$$

$\Delta a = 12/100 = 0.12 \text{ mm}$ として、

計算ステップ1：

亀裂寸法 $(a, b) = (1.5\text{mm}, 2.5\text{mm})$

(4.9)式より

$$F_{eA} = 1 / \sqrt{1 + 1.464(3/5)^{1.65}} = 0.7832 \quad (\text{d.3})$$

(4.13)式より

$$F_{sA} = 1 + 0.12(1 - 3/5) = 1.048 \quad (\text{d.4})$$

(4.19)式より

$$F_{lA} = \left(1 - 0.025(1.5/12)^2 + 0.06(1.5/12)^4\right) \sqrt{\sec(\pi \cdot 1.5/12)} = 1.009 \quad (\text{d.5})$$

図4.22より、 $a = 1.5\text{mm}$ であるから、 $F_{gA} = 1.32971$ 。

以上より、

$$\Delta K_A = 0.7832 \times 1.048 \times 1.009 \times 1.32971 \times 50 \times \sqrt{\pi \times 0.0015} = 3.781 \quad (\text{d.6})$$

$\Delta a = 0.12\text{mm}$ 進展するのに要する応力繰返し数は、

$$\begin{aligned} n_1 &= 0.00012 / 1.5 \times 10^{-11} (3.781^{2.75} - 2.9^{2.75}) \\ &= 398531 \end{aligned} \quad (\text{d.7})$$

計算ステップ2：

亀裂寸法 $(a, b) = (1.62\text{mm}, 2.7\text{mm})$

$$(4.9) \text{式より} \quad F_{eA} = 0.7832 \quad (\text{d.8})$$

$$(4.13) \text{式より} \quad F_{sA} = 1.048 \quad (\text{d.9})$$

(4.18)式より

$$F_{lA} = \left(1 - 0.025(1.62/12)^2 + 0.06(1.62/12)^4\right) \sqrt{\sec(\pi \cdot 1.62/12)} = 1.011 \quad (\text{d.10})$$

図4.22より、 $a = 1.62\text{mm}$ であるから、 $F_{gA} = 1.302$ 。

以上より、

$$\Delta K_A = 0.7832 \times 1.048 \times 1.011 \times 1.302 \times 50 \times \sqrt{\pi \times 0.00162} = 3.855 \quad (\text{d.11})$$

$\Delta a = 0.12\text{mm}$ 進展するのに要する応力繰返し数は、

$$\begin{aligned} n_2 &= 0.00012 / 1.5 \times 10^{-11} (3.855^{2.75} - 2.9^{2.75}) \\ &= 360425 \end{aligned} \tag{d.12}$$

以上の計算を繰り返し、 $\Delta\alpha$ の総和が板厚を貫通するまでの各ステップにおける荷重繰返し数の合計は、以下の通りであった。

$$N_p = \sum n_i = 6650478 \text{ 回}$$

また、一日当りの応力繰返し数 1.2×10^4 より、

$$6650478 / 1.2 \times 10^4 = 554.2 \text{ 日}$$

4.5 変動振幅応力下の疲労亀裂進展解析

変動振幅応力下の疲労亀裂進展解析の方法は、一定振幅応力下と基本的には同じである。ただし、疲労亀裂進展速度を如何に表現するかが問題となる。

変動振幅応力下での疲労亀裂進展速度に対して、線形重ね合せが適用できるとすれば、疲労亀裂進展量は、(4.28)式より

$$\Delta a = \sum C(\Delta K_i)^n \quad (4.34)$$

ΔK_i : それぞれの応力範囲に対する応力拡大係数範囲

したがって、変動振幅応力下での進展速度の平均は、

$$(da/dN)_{av} = \sum C(\Delta K_i)^n / \sum i \quad (4.35)$$

となる。応力拡大係数範囲 ΔK は、

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (4.36)$$

F : 応力拡大係数の補正係数

で与えられる。それぞれの応力範囲による亀裂進展量が微小であるとすれば、

$$\begin{aligned} (da/dN)_{av} &= C \left[\sum (\Delta \sigma_i^n / \sum i) \left\{ \sqrt{\pi a} \cdot F \right\}^n \right] \\ &= C \left\{ \Delta \sigma_e \sqrt{\pi a} \cdot F \right\}^n \end{aligned} \quad (4.37)$$

$\Delta \sigma_e$: 等価応力範囲

となる。さらに、

$$\Delta K_{eq} = \Delta \sigma_e \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (4.38)$$

とおけば、

$$(da/dN)_{av} = C(\Delta K_{eq})^n \quad (4.39)$$

となる。 ΔK_{eq} は等価応力拡大係数範囲と呼ばれており、これにより変動振幅応力下の疲労亀裂進展速度を精度よく予測できることは多くの研究で実験的に確かめられている²⁷⁾⁻³⁰⁾。

以上は、すべての応力拡大係数範囲レベルが ΔK_{th} 以上の場合についてである。また、すべての ΔK 成分が ΔK_{th} 以下であれば疲労亀裂は進展しないと言われている。 ΔK の分布の範囲内に ΔK_{th} レベルがある場合の疲労亀裂進展速度については、線形被害則を適用し、 ΔK_{th} 近傍の領域の進展速度を考慮した(4.29)式に基づいて予測することが考えらる。

レイリー分布に従う応力範囲頻度分布、および指数分布に近い応力範囲頻度分布を有する変動振幅応力下の疲労亀裂進展試験では、(4.29)式に基づいた線形被害則からの予測は若干危険側となるという結果が示されている^{29),30)}。これを補正するために、(4.29)式の ΔK_{th} を一定振幅応力下で得られたそれよりも若干小さくおいて、変動振幅応力下で疲労亀裂進展速度を求める方法²⁹⁾、および

ΔK_{th} はそのまま、

$$\begin{aligned} da/dN &= C(\Delta K)^m & (\Delta K > \Delta K_{th}) \\ da/dN &= 0 & (\Delta K \leq \Delta K_{th}) \end{aligned} \quad (4.40)$$

線形被害則に基づき疲労亀裂進展速度を予測する方法³⁰⁾が提案されている。前者では、変動振幅応力下での ΔK_{th} は低下する、すなわち一定振幅応力下での ΔK_{th} 以下の ΔK レベルでも疲労亀裂は進展する、後者では ΔK_{th} 近傍の ΔK において疲労亀裂進展が加速されると仮定していることになる。これらの内、どちらが変動振幅応力下での亀裂進展の加速の原因であるかは現在のところ明らかとはなっていないが、いずれの方法によっても工学的には十分な精度で変動振幅応力下での疲労亀裂進展速度を予測できる。(4.40)式は、(4.29)式よりも変動振幅応力下での疲労亀裂進展速度の計算が簡便となる。また、(4.28)式を用いれば、疲労亀裂進展速度の計算はさらに簡便となるが、その結果は過度に安全となることもある。

(4.40)式を基に Δn 法で変動振幅応力下の疲労亀裂進展寿命を計算するアルゴリズムを図4.24に示す。

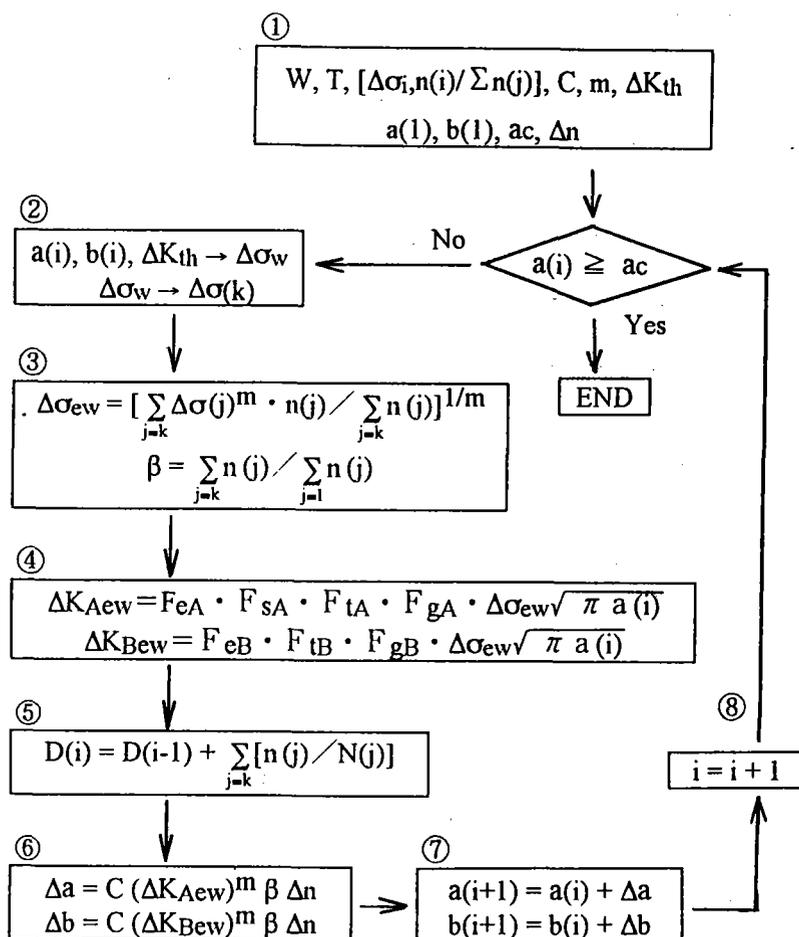


図4.24 変動振幅応力に対する疲労亀裂進展解析手順 (Δn法)

＜例e＞ 変動振幅応力の作用下おける、下フランジと垂直補剛材との荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手の疲労寿命を算出する。変動振幅応力の応力範囲頻度分布は図4.25に、解析対象となる構造物は図4.26に示す通りである。初期き裂は、深さ $a=2\text{mm}$ 、表面での長さ $2b=6\text{mm}$ の半楕円形の亀裂である。亀裂の形状比は $a/b=1/3$ で一定とする。この亀裂が進展して板を貫通するまでの疲労亀裂進展寿命 N_p をもとめたい。疲労亀裂進展速度表示式は

$$\begin{aligned} da/dN &= 1.5 \times 10^{-11} \times (\Delta K)^{2.75} & (\Delta K > 2.9) \\ da/dN &= 0 & (\Delta K \leq 2.9) \end{aligned} \quad (\text{e.1})$$

で与えられる。

下フランジの板厚は12mm、溶接止端部の応力拡大係数は図4.22の通りである。

【解】

各計算ステップごとに、 $\Delta K > 2.9$ となる応力範囲 $\Delta\sigma_w$ を算出し、これ以上の応力範囲の成分から等価応力範囲 $\Delta\sigma_{ew}$ を求め、さらに等価応力範囲 ΔK_{Aew} を算出して、疲労亀裂の進展量を算出する。

$\Delta n=100000$ とする。応力範囲と応力拡大係数範囲の関係は以下の式で与えられる。

$$\Delta K_A = F_{eA} \cdot F_{sA} \cdot F_{tA} \cdot F_{gA} \cdot \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{e.2})$$

計算ステップ1：

亀裂寸法(a,b)=(2mm, 6mm)

(4.9)式より

$$F_{eA} = 1 / \sqrt{1 + 1.464(1/3)^{1.65}} = 0.8984 \quad (\text{e.3})$$

(4.13)式より

$$F_{sA} = 1 + 0.12(1 - 1/3) = 1.08 \quad (\text{e.4})$$

(4.19)式より

$$F_{tA} = \left(1 - 0.025(2/12)^2 + 0.06(2/12)^4\right) \sqrt{\sec(\pi \cdot 2/12)} = 1.017 \quad (\text{e.5})$$

図4.22より、 $a=2\text{mm}$ であるから、 $F_{gA}=1.21586$ 。

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_w &= \frac{\Delta K_{th}}{F_{eA} \cdot F_{sA} \cdot F_{tA} \cdot F_{gA} \cdot \sqrt{\pi a}} \\ &= \frac{2.9}{0.8984 \times 1.08 \times 1.017 \times 1.21586 \times \sqrt{\pi \times 0.002}} = 30.49 \text{ [MPa]} \end{aligned} \quad (\text{e.6})$$

30.49Mpa以上の応力範囲に対する等価応力範囲は、

$$\Delta\sigma_{ew} = \left(\frac{\sum_{j=k} \Delta\sigma(j)^m \cdot n(j)}{\sum_{j=k} n(j)} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{1.4587 \times 10^8}{3250} \right)^{\frac{1}{2.75}} = 49.17 [\text{MPa}] \quad (\text{e.7})$$

また、全応力繰返しに対する、 $\Delta\sigma_w$ を超える応力繰返し回数の比 β は、

$$\beta = \sum_{j=k} n(j) / \sum_{j=1} n(j) = 3250 / 30886 = 0.1052 \quad (\text{e.8})$$

等価応力拡大係数範囲 ΔK_{Aew} は、

$$\Delta K_{ew} = 0.8984 \times 1.08 \times 1.017 \times 1.21586 \times 49.17 \times \sqrt{\pi \times 0.002} = 4.675 \quad (\text{e.9})$$

疲労亀裂進展量は、

$$\Delta a = C(\Delta K_{Aew})^m \beta \Delta n = 1.5 \times 10^{-11} \times 4.675^{2.75} \times 0.1052 \times 100000 = 0.01097 [\text{mm}] \quad (\text{e.10})$$

亀裂寸法(a,b)=(2.0197mm,6.0591mm)として次のステップに進む。

以上の計算を繰り返すと、第231ステップの計算終了時に亀裂深さ a が板厚以上となり、板を貫通する。従って、疲労亀裂進展寿命は

$$N_p = 23100000 \text{ 回} \quad (\text{e.11})$$

また、変動振幅応力の24時間の繰返し数は30886回であるから、継手の疲労寿命は、

$$23100000 / 30886 = 747.9 \text{ 日} \quad (\text{e.12})$$

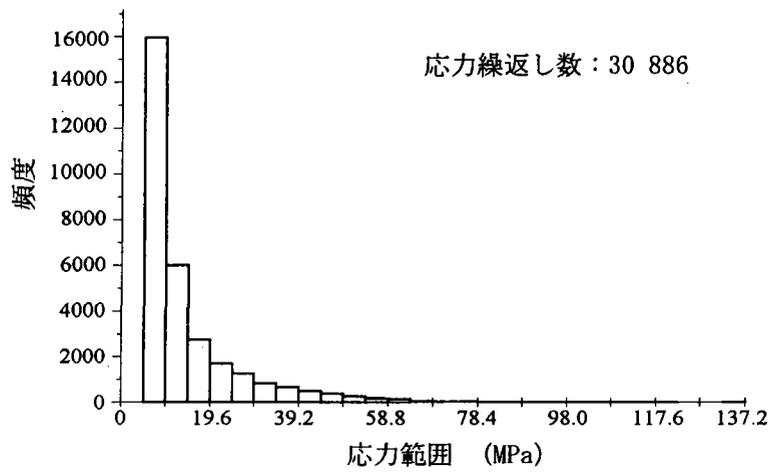


図4.25 応力範囲頻度分布

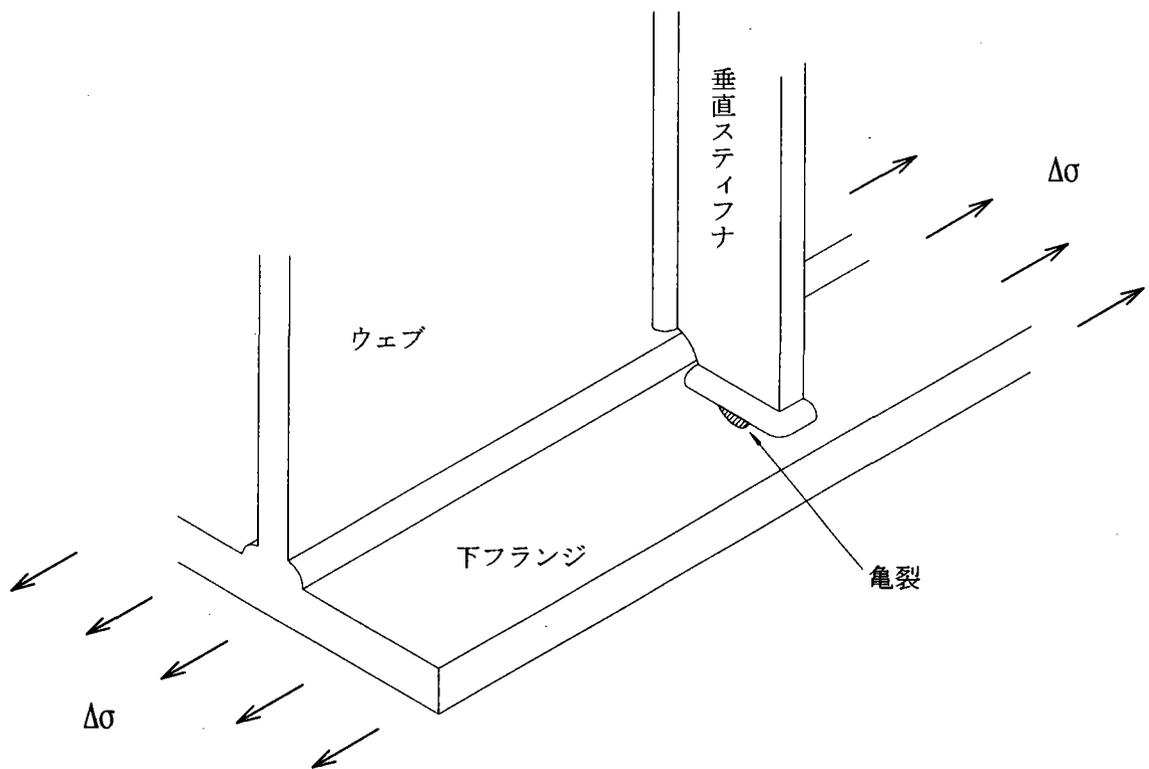


図4.26 解析対象 (垂直スチーフナ溶接部)

参考文献

- 1) Paris, P. and Erdogan, F. : A Critical Analysis of Crack Propagation Law, Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Vol.85, pp.528-534, 1963.
- 2) Miki, C., Mori, T., Sasaki, T. and Sakamoto, K. : An Analysis of Fatigue Crack Growth from Blowholes in Logitudinal Welded Joints, 土木学会論文集, No.386, pp.73-81, 1987.
- 3) 三木千寿, 森猛, 阪本謙二, 柏木洋之 : 前面溶接継手の疲労強度に対する継手寸法の影響, 構造工学論文集, Vol. 33A, pp. 393-402, 1987.
- 4) 三木千寿, 深沢誠, 加藤昌彦, 大睦久雄 : 表面疲労亀裂検出に対する各種非破壊試験の適用性, 土木学会論文集, No.386, pp.329-337, 1987.
- 5) 森猛, 三木千寿 : すみ肉溶接部に生じる表面疲労亀裂の形状, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 829-838, 1995.
- 6) ASME : Boiler and Pressur Vesesel Code, Section XI, Rule for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Computers, 1983.
- 7) BSI : Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Level for Defects in Fusion Welded Joints, PD 6493, 1980.
- 8) JWES : Method of Assessment for Defects in Fusion-Welded Joint with Respect to Brittle Fracture, WES 2850, 1980.
- 9) Albrecht, P. and Yamada, K. : Rapid Calculation of Stress Intensity Factors, Proceedings of ASCE, Vol.103, No.ST 2, pp.377-389, 1977.
- 10) Irwin, G.R : Crack-Extension Force for a Part-Through Crack in a Plate, Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME, Vol.29, No.4, pp.651-654, 1962.
- 11) Newman, J.C.Jr. : A Review and Assesment of the Stress-Intensity Factors for Surface Cracks, ASTM STP 381, pp.30-83, 1965.
- 12) 岡村弘之 : 線形破壊力学入門, 培風館, 1977.
- 13) Paris, P.C and Sih, G.C. : Stress Analysis of Cracks, ASTM STP 381, pp.30-83, 1865.
- 14) Maddox, S.J. : An Anaiysis of Fatigue Crack in Fillet Welded Joints, International Journal of Fracture, Vol.11, No.2, pp.221-243, 1975.
- 15) 西谷弘信, 村上啓宜 : だ円板状き裂の応力拡大係数 (引張り) , 機械学会論文集, Vol.39, No.317, pp.7-14, 1973.
- 16) Frank, K.H. and Fisher, J.W. : Fatigue Strength of Fillet Welded Cruciform Joints, Proceeding of ASCE, ST9, pp.1727-1740, 1979.
- 17) Maddox, S.J. : Assessing the Significance of Flaws in Welds Subject to Fatigue, Welding Journal, Vol.53, No.9, Welding Research Supplement, pp.401s-409s, 1974.
- 18) Committee on Fracture Mechanics, The Society of Material Science, Japan : Stress Intensity Factors

Handbook, Vol.1, 2, 3, Pergamon Press, 1987.

- 19) Rolfe, S.T. and Barsom, J.M. : Fatigue Control in Structures, Applications of Fracture Mechanics, Prentice-Hall, Inc., 1977.
- 20) 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.
- 21) Klesnil, M. and Luckas, P. : Influence of Strength and Stress History on Growth and Stabilisation of Fatigue Cracks, Engineering Fracture Mechanics, Vol.9, No.1, pp.77-92, 1972.
- 22) Miki, C., Mori, T., and Tajima, J. : Effect of Stress Ratio and Tensile Residual Stress on Near Threshold Fatigue Crack Growth, 土木学会論文集, No.368, pp.187-194, 1986.
- 23) Ohta, A., Sasaki, E., Nihei, M., Kosuge, M., Kanao, M., and Inagaki, M. : Fatigue Crack Propagation Rates and Threshold Intensity Factors for Welded Joints of HT80 Steel at Several Stress Ratios, International Journal of Fatigue, Vol.4, pp.233-237, 1982.
- 24) 榑原淳, 堀川浩甫, 森猛 : 低速度域における疲労き裂伝播挙動に及ぼす溶接残留応力の影響, 溶接学会論文集, Vol.4, No.1, pp.193-199, 1986.
- 25) 日本鋼構造協会 : 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993.
- 26) 飯田国広, 安藤清, 平田隆明 : 複数表面欠陥からの疲労亀裂伝播寿命評価, 日本造船学会論文集, No.148, pp.284-293, 1981.
- 27) Barsom, J.M. : Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading in ASTM A514-B Steel, ASTM STP536, pp.147-167, 1973.
- 28) Yamada, K. : Fatigue Crack Growth Rate of Structural Steel under Constant and Variable Amplitude Block Loading, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.2, No.2, pp.271s-279s, 1985.
- 29) 榑原淳, 堀川浩甫 : 溶接残留応力場における繰返し変動荷重下の疲労亀裂伝播挙動 (低 ΔK 領域において) , 溶接学会論文集, Vol.4, No.4, pp.715-725, 1986
- 30) Miki, C., Murakoshi, J. and Sakano, M. : Fatigue Crack Growth in Highway Bridges, Proceedings of JSCE, No.386, pp.155-164, 1987.
- 31) 建設省土木研究所 : 既設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究, 土木研究所資料 第2420号, 1986.

第5章 亀裂の性格評価のための整理表

5.1 はじめに

『疲労損傷の評価』のワーキンググループ（以下WGと略す）では、疲労亀裂を発見した時に、その亀裂の性格、すなわち、すぐ補修しなければならない亀裂か、それとも、すぐには補修しなくともよい亀裂かを判断できるようになりたいという要望があり、これを解決すべく、本活動が始った。

そこで、亀裂の性格を判断できる力を付けるため、まず、疲労設計指針（JSSC）¹⁾の学習会を行なうとともに、亀裂の性格評価のための整理表の作成と、事例研究を行なうことにした。本章では、この整理表と事例研究の成果について報告する。

5.2 整理表の作成上の留意点

以下の点に留意して、整理表を作成した。

- ① 発見した亀裂が進展するか否について判断できるようになる。
- ② 補修時期の決定、補修方法の計画に際して有用な資料となる。
- ③ 亀裂を最初に発見した人が、その亀裂の評価を行なう力を養うことができる。
- ④ 経過観察用のものではない。
- ⑤ なるべく少ないデータシート枚数で評価の視点を養成する。

以上に注意して作成した整理表を用いて、J. W. Fischerの『鋼橋の疲労と破壊』²⁾のスタディケースを整理表に記入してまとめることを通して、再度、整理表を見直した。

5.4には、スタディケースについて、本表に記入したものを収録してある。

5.3 各項目の説明

<損傷を起こした橋梁の特定>

まず、損傷の概要を記録する前に、損傷の発生した橋を特定するため、以下の3項目について記入する。

- ①橋梁名、
- ②路線名、
- ③架設場所

この3項目を記入することにしたのは、同名橋梁があったり、橋梁名だけでは特定できない橋が多いため、架設場所も記入することにした。架設場所は、都道府県、市町村程度が記入されていれば十分と考えられる。路線名については、管理状態や交通荷重を

検討する時の基礎資料となりうると考え、ここで記入することにした。また、橋梁を特定するには、その橋梁が構成する路線名と、橋梁が跨ぐ路線名（道路、川、鉄道などの他低地などを含む）がわかると非常に便利である。

< 損傷概要 >

損傷概要を記録するため、以下の3項目について記入する。

① 損傷位置図、 ② 損傷の特徴、 ③ 損傷詳細図

①の損傷位置図は、橋梁全体での位置を図上で示す。これにより、亀裂の位置を把握することができるとともに、橋梁全体の形状を把握することができる。そのため、亀裂の点検調査および亀裂の発生原因の調査の基礎資料ともなる。したがって、この目的を達成できる全体形状がわかる図に亀裂発生箇所を図示する必要がある。

②の損傷の特徴は、亀裂の特徴が分かるように文字で表現する。

一方、③の損傷詳細図は、どのような構造に、どのような亀裂が発生し、どのくらいの大きさになっているのか分かるように、図あるいは写真を用いて表現する。

1) 検査概要

検査概要を記録するため、以下の3項目について記入する。

① 検査年月日、 ② 検査担当者、 ③ 検査方法

亀裂は、時間の経過とともに進行することが考えられるので、検査年月日を記入する必要がある。この検査日により、今回の検査結果と次回検査での検査結果を比較することにより、亀裂の性格および置かれた環境を把握あるいは確認することができる。同時に、10)で述べるように補修時期の設定にも役に立つ。

②の検査担当者の記入によって、記録が不明確な場合は担当者に問い合わせることが可能になる。また、担当者の属性を知ることによって、検査結果の質をある程度予測して、結果からの判断をすることが可能になる。すなわち、熟練者が記入した場合と検査経験の浅い人が行なう場合では、その検査結果の質は自ずと異なる。

ここで、検査方法の記入については、記録の簡略化と適切な記録をするための支援策として、よく使用される検査方法を記入しておき、採用した方法を囲む形式にした。目視は肉眼およびルーペによる観察、PTは浸透探傷試験、RTは放射線透過試験、ETは渦流探傷試験、UTは超音波探傷試験、磁粉は磁粉探傷試験（MT）、グラインダー

は表面をグラインダーで適度に研削することによる内部の観察を意味する。本WGでのケーススタディは本表で行なったが、今後の技術開発を考えると検査方法の中にその他を入れる必要があるものと考えられる。

2) 亀裂の長さ

亀裂の長さは実測した場合にその長さを記入する。

これは、亀裂を評価する上で重要で、亀裂の進展解析に用いるK値を求める場合、この亀裂長さが必要となる。例えば、長さaの貫通亀裂のある無限板が遠方で一様な応力 σ_n を受ける場合の応力拡大係数Kは、次式によって求めることができる(4.3(3)参照)。

$$K = \sigma_n \sqrt{\pi a}$$

また、応力拡大係数範囲について文献1)にも解説されている。

この亀裂長さの計測にあたって、目視では表面亀裂しか計測できないが、非破壊検査法では内部亀裂も計測が可能になる。この他、表面亀裂についても、目視より精度よく計測ができる可能性がある。このとき、計測機器を含む測定法、測定精度などを記録しておく、亀裂の評価で役に立つ。

また、内部亀裂および表面亀裂の亀裂進展解析では、亀裂形状が問題となる。この亀裂形状を楕円形の亀裂に近似させるため、楕円の短軸半径aと長軸半径bが必要になる。近似させる楕円として、内部亀裂は楕円形、表面亀裂は半楕円形と1/4楕円形があるので、誤解を避けるため、この違いを図で明記して示すことを奨める。このaおよびbの取り方については、4章の図4.3が参照できる。

整理表作成時の留意点⑤の視点から、亀裂が複数ある場合にはこの表には記入せずに、図および表を用いて別添する形をとった。

3) 亀裂の発生点

亀裂が異常な欠陥から発生したのか、それとも、その構造あるいは形状のため不可避免的に形成される応力集中部から亀裂が発生したのか区別する必要がある。なお、欠陥については、溶接で避けられない微小な欠陥すなわち規定で許されている欠陥は後者に含まれるものとし、異常な欠陥という表現で区別した。

構造自体の疲労強度で亀裂が発生した場合、すなわち、異常な欠陥が無い場合、応急的な局所的な処置だけでは済まないことが多い。また、設計当時の設計基準を守って設計した構造であれば、亀裂が発生した特定の構造物ばかりでなく、その時代の一般構造

物にこの問題は波及する。

一方、異常な欠陥から発生した場合には、亀裂が発生した特定の構造物の問題として扱える。したがって、まず、これを区別するため欠陥との関係の有無を記入する。

つぎに、この欠陥の種類と大きさを記入する。欠陥には様々なものがあるので、ここでは欠陥名と実測した場合にだけ大きさを記入し、さらに、亀裂の発生領域・発生位置などで分類する。

欠陥、応力集中、残留応力、材質などの視点から、まず、発生領域を母材と溶接部に分類し、つぎに、応力集中の視点から母材を一般部と切り欠き部に分類する。

ここで、溶接部については、溶接時に溶接欠陥を生じる場合が多い。また、溶接形状も個々の溶接毎に異なり力の方向も異なるので、応力集中部が様々な場所に発生し大きさもばらつき、この結果、疲労強度もばらつく。溶接部に生じる亀裂は亀裂発生位置により以下の3つに分類できる傾向がある。

- ① 止端部
- ② ルート部
- ③ 溶接内部

止端部とルート部について図 5.1 に図示する。問題となる止端部は載荷荷重によって異なる。疲労亀裂が発生する確率の高い止端部については、応力集中を緩和するため、グラインダー処理やティグ処理で止端処理を行なうことがある。

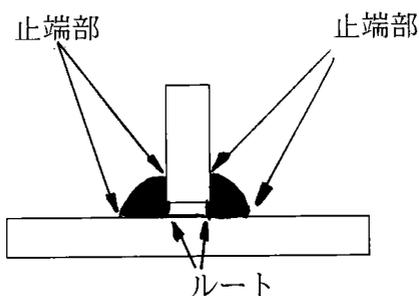


図 5.1 止端とルート

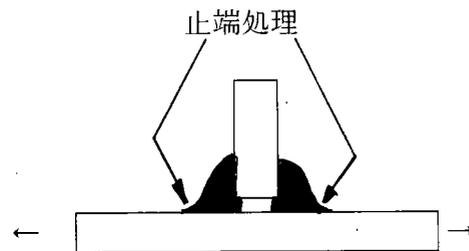


図 5.2 亀裂が発生する可能性の高い止端の処理

溶接施工が悪いと、溶接部では図 5.3 に示す亀裂が発生することがある。一般には、施工時の検査で除去されるが、施工時の検査ですべての欠陥が検出できるとは限らないので注意を要する。

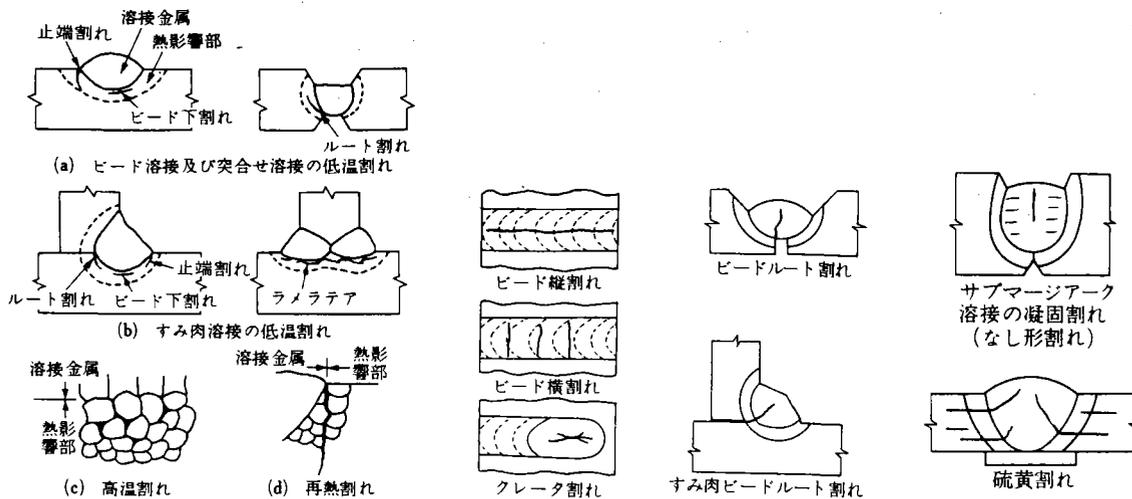


図 5.3 溶接割れの事例³⁾

切り欠き部については、切り欠きの種類を記入すると同時に、応力集中率を記入するようにした。円、楕円などの応力集中率は、FEMで求めることもできるが、簡略式および図表⁴⁾を用いて求めることもできる。

4) 欠陥の発生原因

亀裂の発生位置になる可能性のある、すなわち、疲労強度を決定する可能性のある欠陥は、製造・製作・架設・供用の各段階で発生する可能性がある。これを大きく分類すると次の3つに分類される。

- ① 材料の欠陥
- ② 施工中に生じた欠陥
- ③ 供用中に生じた欠陥

施工中に生じた欠陥については、発生原因ならびに欠陥の性質によって、さらに以下のように分類することができる。

- ① 溶接によってできる欠陥
- ② 工作によってできる欠陥
- ③ 鋼材の工場での受取りから現場架設までの受取りまでの移動中の傷
- ④ 架設中の傷

ここで、③と④の欠陥の性格は、発生原因および欠陥の性質が類似している。また、①の溶接に伴う欠陥については、溶着金属部の材質は母材と異なり、母材の熱影響部は材質変化を起こしている。さらに、残留応力も発生している。この点で②の工作に伴う欠陥とは性格が異なる。なお、工作の中でもガス切断は、溶接時に問題となった材質変化および残留応力の問題が若干あるので注意を要する（表5.1 参照）。

表5.1 溶接によってできる欠陥と工作によってできる欠陥の周辺環境の違い

	溶接時にできる欠陥	工作時にできる欠陥	
		ガス切断	機械加工
残留応力	有り	有り（比較的少ない）	無し
材質変化	有り	有り（比較的少ない）	無し

まず、溶接欠陥として、図 5.4に示す欠陥が挙げられる。

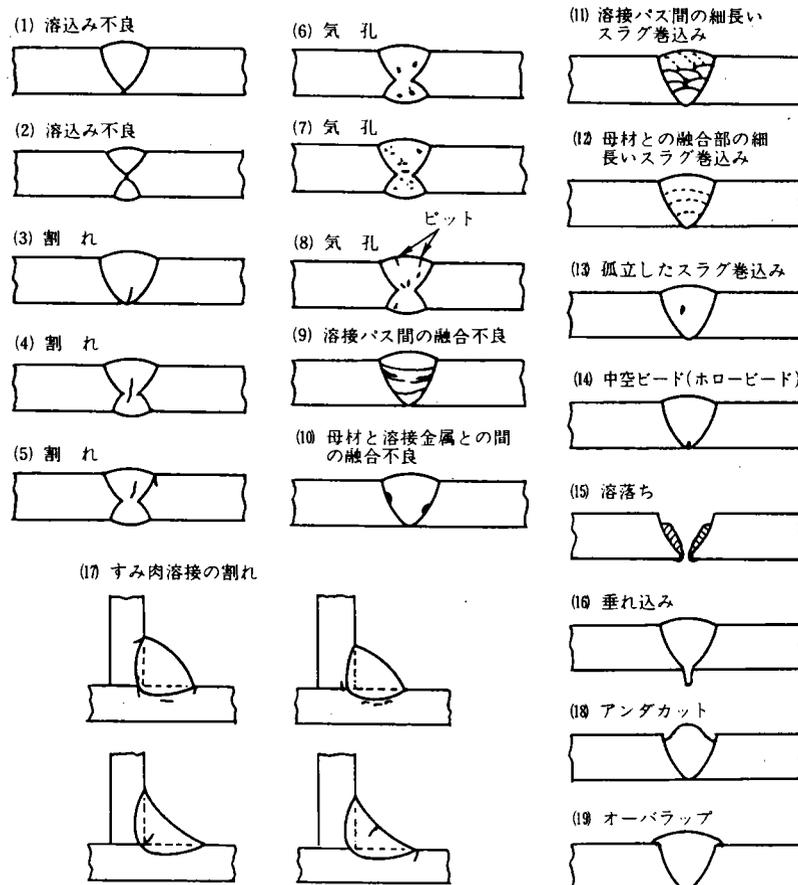


図 5.4 溶接欠陥³⁾

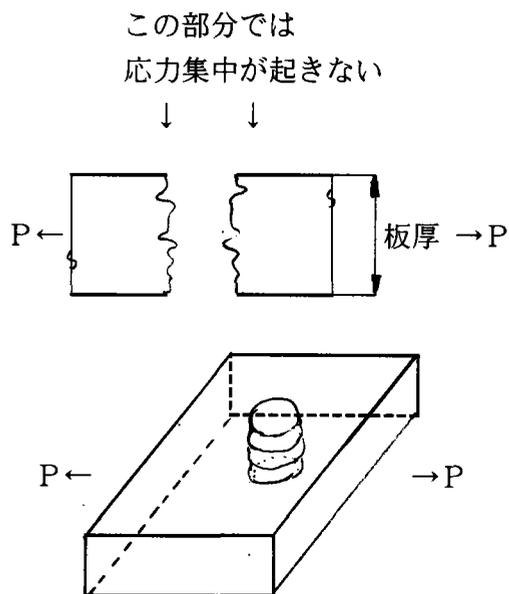


図 5.5 ドリル孔明けと応力集中

押し抜きせん断（パンチング）
による板厚方向の傷で面内の荷重
に対して応力集中が起こる

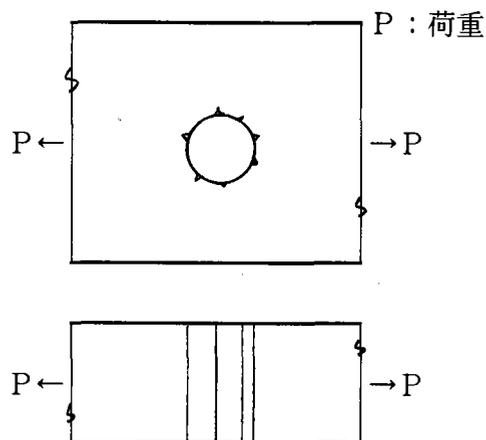


図 5.6 パンチングによる孔明けと応力集中

一方、工作にはドリル孔明、グラインダー、ガス切断など様々な作業が含まれる。ガス切断では、上述のように若干ではあるが残留応力が付加され材質変化を起こす。ドリル孔明では、孔明される板に面内応力が変動する場合、円の応力集中（3程度）はあるものの、加工面での微小な凹凸による応力集中は力が板厚方向に載荷されない限り問題にならない（図 5.5参照）。これに対して押し抜きせん断（パンチング）による孔明では、図5.6のような板厚方向に加工面に形成される傷のような微小な凹凸によって応力集中が起こり、場合によっては問題になる。そのため、現在16mm以下の鋼板にしかパンチングによる孔明けは許されていない⁵⁾。

グラインダー・ドリルなどは、使用する方向を誤るとかえって傷を作ることになるので注意を要する。また、各作業を失敗をして傷を作ることもある。傷を作ってしまった場合には、その深さが大きいほど底半径が小さいほど疲労強度に悪い影響を与える。溶接により傷を埋めて補修すること（肉盛り）もあるが、溶接欠陥が生じたり、材質変化や残留応力の付加を招くので、注意をして行なう必要があり、極力避ける方向で対処することが望ましい。

5) 材質

材質については、塑性を起こしていないと考えられる部分からの切出し試験体を用いて確認するのが最も確実と考えられる。しかしながら、道路橋示方書にしたがって用いられた国内の鋼材で鋼種が分かっているならば、初期の評価では切出し試験体による確認は

必要としない。これに対して、道路橋示方書にない材料については、溶接ができない部材もあるので、注意を促すことを考えて特徴を書くことにした。

切出試験体による試験は、特に錬鉄などの古い材料でじん性が低い場合に必要となる。なお、材質が不明の鋼材の判別については、グラインダーの歯に試験片を当てて火花を出した時の火花の状態で区別することもできる⁶⁾。

次に、寒い地域での検討では、後述する遷移温度による検討が重要になる。これにより疲労亀裂からぜい性破壊を起こした場合の原因調査やぜい性破壊の可能性の検討を行なうことができる。

切出し試験体を用いて材質を確認する場合、まず亀裂との関係を把握するため切出した位置図を作成する必要がある。すなわち、亀裂発生点・既に亀裂が進展した部分・亀裂の進展が予想される部分と、切出し試験体との関係を把握する必要がある。特に溶接部では材質が急変するので、溶接部のどこの部分から採取したかが重要になる。

次に、一般に行なわれる試験の種類は、引張試験およびシャルピーVノッチ試験である。引張試験では、ふつう降伏応力度・引張強度・伸びを求める。シャルピーVノッチ試験では温度を変えて試験を行ない、温度とシャルピー試験値をグラフにして急変部の温度を調べて遷移温度を求める（事例6-1の図2および7-1の図7.8参照）。また材料特性を知るため化学的成分の分析を行なうこともできる。

この他、ぜい性破壊を検討するため、じん性値を求めるために曲げ試験片を用いた破壊じん性試験が行なわれたり、荷重-変位データからJ積分を行なったりすることもある。

6) 設計示方書

設計された示方書によって設計の考え方が異なるので明記する必要がある。特に、設計荷重が異なるので注意を要する。また、年代によっては使用が許可されている材料も異なるので注意が必要である。

また、鉄道橋については疲労に対する照査規定があるが、道路橋の規定である道路橋示方書には、1996年10月現在、全般にわたった疲労規定はなく、鋼床版のところに疲労に関する規定がある程度である。

7) 荷重

亀裂の進展を検討する場合、亀裂先端部周辺の応力変動の大きさが問題となる。これを決めるのは荷重変動の大きさと荷重を含む構造である。このうち、実際の荷重の変動

は、設計荷重で設定しているものとは異なり、ことに、道路橋では実荷重は変動し、設計荷重との差異が大きい。

しかしながら、交通量および荷重の計測がかなり行なわれ、その特性が把握されつつある。これらの研究で、交通量の中でも大型車の交通量の疲労損傷に与える影響が支配的であることが報告されている。そこで、荷重の項目では、設計荷重とともに実測の交通量および大型車の混入率を記入する形をとった。評価のため実測する場合もあるが、これまでに実測されてきた結果を引用して用いることができる。この場合、資料の出典と計測年月日を明記することで、より適切な評価が行なえる。大型車の混入率に対して、車種構成を記入すれば、さらに詳しい情報を与えることができる。車種構成が分かれば軸距なども分かり、より実際にあった解析ができる。この他、軸重を計測することもある。

8) 発生応力の検討

発生応力は構造モデルと荷重モデルから計算によって求めることもあるが、計算の過程で様々な仮定や近似が行なわれるので、計測することが望ましい。計測する場合、検討に必要な応力について理解し、特異点の応力を計測しないように、歪ゲージを貼付する位置と方向に注意を要する。

計算あるいは計測によって求めた発生応力を記載し、後述のぜい性破壊ならびに疲労亀裂進展解析に用いることができるようにした。

ここで最大発生応力はぜい性破壊検討用で、発生応力範囲は疲労亀裂進展解析用である。どの場合も適切な評価を行なうには計測位置が重要なため、別図を用いて報告することを想定してデータシートを作成したので、位置的か時間的に1点の応力を記入する分しかスペースを確保していない。また、発生応力を計測する場合、数箇所で行なわれることが考えられるので、別表の有無の項目を設けた。なお、発生応力範囲については荷重との関係を知る必要がある。車両載荷試験を行ない、載荷荷重と応力範囲の関係から他の交通量調査を用いてシミュレートする場合と、応力変動を一定の期間計測して応力頻度解析を行ない応力範囲とその繰返し回数を求め、これを用いて亀裂の進展を予測する場合がある。

さらに、推定した亀裂進展方向に沿った応力ないし応力範囲の分布図が役に立つと考えてこの項目を設けた。ただし、この分布は亀裂が発生していない場合のものを計測するものと考えられるので、亀裂が進展した場合にはここで計測された応力とは異なるので注意を要する。

また、応力ないし応力範囲に強い二軸性がある場合には、一軸性の応力下での考えがそのまま通用しない場合があるので、注意を促すため2軸性の有無についての項を設けた。

9)発生変位

発生変位と発生応力は、各要因によって発生する亀裂の性格が異なると考えられ、この違いを意識しようと言うことでこの項目を設定した。しかしながら、本WGではまとめきらなかったが表には載せておくことにした。ここでは、計測値と計算値を比較検討できるように併記する形を、また、計測方法ならびに計算方法でその精度が左右されることが考えられるので明記する形をとった。

10)竣工年月日，供用開始年月日，供用年数

竣工年月で構造についての情報が得られ、供用開始年月日と1)の検査概要ですでに分かっている検査年月日をもとに、検査日まで受けた荷重とその載荷回数を予想することができる。これは補修時期の検討に役立つ。

11)亀裂の性格

亀裂の性格を把握する場合、冗長性の概念が重要になる。1.2に冗長性と進展性について、まとめてあるのでこれを熟知されたい。

12)限界亀裂

限界亀裂については、4.3(7)に他の破壊モードに移行する亀裂寸法と定義して、このモードの種類として、ぜい性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通を上げている。これについては、文献1)にも述べられている。この他、補修の時期の視点からも限界亀裂を考えることができる。

13)損傷のモデル化

亀裂進展解析を行なう場合、亀裂などを図で説明し、実際の板厚 T_f や亀裂長さ a をどのようにとって計算をしたのか明記し誤解を防止する。

K値の計算も採用する継手形式によっては複雑になり、モデル化の違いで結果も異なるので、どのようなモデルで応力を求めたかを述べておく必要がある。

また、応力ないし応力範囲に強い二軸性がある場合には、一軸性の応力下での考えがそのまま通用しない場合があるので、注意を促すため2軸性の有無についての項を設けた。

9)発生変位

発生変位と発生応力は、各要因によって発生する亀裂の性格が異なると考えられ、この違いを意識しようと言うことでこの項目を設定した。しかしながら、本WGではまとめきらなかったが表には載せておくことにした。ここでは、計測値と計算値を比較検討できるように併記する形を、また、計測方法ならびに計算方法でその精度が左右されることが考えられるので明記する形をとった。

10)竣工年月日，供用開始年月日，供用年数

竣工年月で構造についての情報が得られ、供用開始年月日と1)の検査概要ですでに分かっている検査年月日をもとに、検査日まで受けた荷重とその載荷回数を予想することができる。これは補修時期の検討に役立つ。

11)亀裂の性格

亀裂の性格を把握する場合、冗長性の概念が重要になる。1.2に冗長性と進展性について、まとめてあるのでこれを熟知されたい。

12)限界亀裂

限界亀裂については、4.3(7)に他の破壊モードに移行する亀裂寸法と定義して、このモードの種類として、ぜい性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通を上げている。これについては、文献1)にも述べられている。この他、補修の時期の視点からも限界亀裂を考えることができる。

13)損傷のモデル化

亀裂進展解析を行なう場合、亀裂などを図で説明し、実際の板厚 T_f や亀裂長さ a をどのようにとって計算をしたのか明記し誤解を防止する。

K値の計算も採用する継手形式によっては複雑になり、モデル化の違いで結果も異なるので、どのようなモデルで応力を求めたかを述べておく必要がある。

14)K値の計測の有無

K値を直接計測することを当初考えたが、簡便な計測法も見つからず、今回の調査では報告事例も見当らなかった。しかしながら、K値の簡便な計測方法が見つかれば、直

接評価ができるのでより現実にあった評価ができるという点で有効である。そのため、この項目を残した。

15)進展解析

設計荷重などから推定した荷重ならびに計測した荷重から計算によって、あるいは、応力を実測して、亀裂近傍の応力変動範囲を求め、想定したあるいは計測した亀裂の長さから、 ΔK 値をもとめ、変動回数（繰返し回数）との関係で亀裂進展解析を行ない、発生している亀裂についての解析による確認、および、これからの亀裂進展についての予想を行なうことができる。

この進展解析については、3章と4章に詳しく述べられているので参照することができる。

16)環境

寒い地域では、疲労亀裂がある程度進行すると、ぜい性破壊を起こして崩壊することがある。そのため、最低使用温度を調査し、この温度下でぜい性破壊を起こす破壊じん性値を求めて、じん性破壊の検討を行なう。

一般には、このじん性破壊の問題は、遷移温度以上の環境で鋼材を適用することによって対処している。すなわち、遷移温度が使用する地域での最低気温より小さい鋼材を選定することでこの問題に対処している。

錆が発生した部材に亀裂が発生することがある。錆による損傷度は環境によって大きく左右される。塗装の維持管理費を軽減すべく、最近では耐鋼性鋼を用いることがあるが、例えば北海道では、表5.7に示すように海岸からの距離や地域などで使用条件を区別している⁷⁾。錆の問題は地域的な問題の他に、非排水部・土砂のたい積部・鳥などの糞のたい積部などでは、特に錆びが進行している場合があるので注意を要する。亀裂の問題に直接は係わらないが、錆びの度合いによっては鋼材の肉厚が減少することも有り得るので確認しておく必要がある。

表 5.7 耐候性鋼の裸使用の使用条件の地域による区分⁷⁾

地域区分	飛来塩分量の測定を省略してよい地域
日本海沿岸部 (稚内市から松前町までの日本海に面した地域) 太平洋沿岸部 (松前町から襟裳町までの太平洋に面した地域)	海岸線から20 kmを越える地域
その他の沿岸部 (上記を除く全域)	海岸線から2 kmを越える地域

17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析

亀裂の破面を採取し、フラクトグラフィーすなわち破面の拡大写真を観察することによって、亀裂の進展過程を観察することができる。すなわち、フラクトグラフィーで疲労亀裂の進展によって形成されるストライエーションを観察することができれば、本亀裂は疲労亀裂であることが裏付けされる。この他、ストライエーション1本が繰返し回数1回に相当するので、ストライエーションの本数で、亀裂の進展に寄与した荷重の載荷回数を推定することができ、この点からも亀裂進展が解析できる。

18) 処置

処置については、詳細検査、経過観察、応急処置、補修、補修ならびに応急処置後経過観察について、有無、時期、簡単な内容を記入できる形にした。

19) 類似事例の報告

類似の事例がどの程度あるか確認できるように事例数を記入する形をとった。これは、他の事例での処置およびその後の実績が、実際に補修をする者にとって参考になると考えてこのような項目をとった。また、他にも同じような事例が多数起こっていれば、対策を別途立てる必要があるとともに、補修の規定がすでに作成されている場合があるので注意を喚起するために設けた。

損傷数が多ければ、これはその構造全体の問題で、さらに、損傷が引続き発生する可能性がある。したがって、亀裂発生部の対処だけでなく、今後、同じ様な亀裂が他の類似構造部で発生することを予想して、対策を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂，1993. 4. 25
- 2) ジョンW. フィッシャー著：鋼橋の疲労と破壊，建設図書，1987. 9. 15
- 3) 溶接学会編：溶接技術の基礎，産報出版，1986. 12. 20
- 4) 西田正孝著：応力集中，森北出版，1986. 12. 5
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，丸善，1994. 2. 20
- 6) 鋼構造物補修・補強・改造の手引き：P. 280～282，1992. 7. 29，鉄道総合技術研究所
- 7) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針，1975. 12

5.4 損傷事例の適用例

5.1に述べたように、本WGでは事例研究を行なった。すなわち、J.W.Fischerの『鋼橋の疲労と破壊』のスタディケース22例のうち、以下に示す13例について、前述の整理表を用いて整理した。原典における表題を（）に示す。この表題の番号を整理表の右肩に示す。但し、章と節の間の『.』は『-』に変わっている。なお、以下に示す目次の右側の数字は、付属資料『整理表の適用例』でのページを意味する。

1. Point Pleasant 橋-----	1
(2.1 Ohio 川を跨ぐ Point Pleasant(Silver) 橋の破壊解析)	
2. Route157 橋-----	5
(2.2 St. Clair 通りを跨ぐ Illinois Route 157)	
3. Yellow Mill Pond 橋-----	10
(3.1 Connecticut 州 Bridgeport の Yellow Mill Pond 橋における疲労破壊解析)	
4. Lafayette Street 橋-----	15
(4.1 Lafayette Street 橋の疲労破壊解析)	
5. Dan Ryan 高速鉄道高架橋-----	21
(6.1 Dan Ryan 高速鉄道の鋼箱断面橋脚の疲労破壊解析)	
6. I-57、郡道 No. 28橋 -----	27
(7.1 Illinois 州 Farina の I-57に架かる郡道 No. 28橋の疲労破壊解析)	
7. Gulf Outlet 橋 -----	32
(8.1 Gulf Outlet 橋の疲労破壊抵抗)	
8. Ft. Duquesne 橋-----	36
(9.1 Ft. Duquesne 橋のラーメン橋脚の疲労破壊解析)	
9. Lehigh River 橋と Canal 橋 -----	42
(10.1 Lehigh River 橋および Canal 橋の連結板の亀裂)	
10. Allegheny River 橋 -----	47
(10.2 Allegheny River 橋における連結板の亀裂)	

1 1. Cuyahoga County 橋-----	52
(11.1 Clevelant I-90 Conrail 跨線橋に生じた亀裂の疲労解析)	
1 2. Belle Fourche River 橋 -----	56
(13.1 Belle Fourche River 橋の疲労亀裂)	
1 3. Walt Whitman 橋-----	61
(15.1 Walt Whitman 橋における縦桁腹板の疲労亀裂)	

参考文献

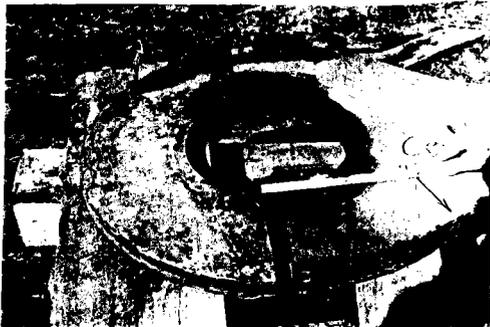
- 1) ジョンW. フィッシャー著, 阿部英彦・三木千壽訳監修: 鋼橋の疲労と破壊スタディーケース, 建設図書, 1987. 9. 15

[付属資料]

整理表の適用例

目 次

1. Point Pleasant 橋 -----	1
(2.1 Ohio 川を跨ぐ Point Pleasant(Silver) 橋の破壊解析)	
2. Route157 橋 -----	5
(2.2 St. Clair 通りを跨ぐ Illinois Route 157)	
3. Yellow Mill Pond 橋 -----	10
(3.1 Connecticut 州 Bridgeport の Yellow Mill Pond 橋における疲労破壊解析)	
4. Lafayette Street 橋 -----	15
(4.1 Lafayette Street 橋の疲労破壊解析)	
5. Dan Ryan 高速鉄道高架橋 -----	21
(6.1 Dan Ryan 高速鉄道の鋼箱断面橋脚の疲労破壊解析)	
6. I-57、郡道 No.28橋 -----	27
(7.1 Illinois 州 Farina の I-57に架かる郡道 No.28橋の疲労破壊解析)	
7. Gulf Outlet 橋 -----	32
(8.1 Gulf Outlet 橋の疲労破壊抵抗)	
8. Ft. Duquesne 橋 -----	36
(9.1 Ft. Duquesne 橋のラーメン橋脚の疲労破壊解析)	
9. Lehigh River 橋と Canal 橋 -----	42
(10.1 Lehigh River 橋および Canal 橋の連結板の亀裂)	
10. Allegheny River 橋 -----	47
(10.2 Allegheny River 橋における連結板の亀裂)	
11. Cuyahoga County 橋 -----	52
(11.1 Cleveland I-90 Conrail 跨線橋に生じた亀裂の疲労解析)	
12. Belle Fourche River 橋 -----	56
(13.1 Belle Fourche River 橋の疲労亀裂)	
13. Walt Whitman 橋 -----	61
(15.1 Walt Whitman 橋における縦桁腹板の疲労亀裂)	

橋梁名: Point Pleasant橋 路線名: U・S 3 5	架設場所: 米国WestVirginia州
損傷位置図 (全体での位置、全体形状を知ることができるような図) 別添 (有): 1枚、無し)	
損傷の特徴: 応力腐食によるピットを起点とした疲労亀裂が引き金となり、C13ジョイント北側の4本のアイバーのピン孔が脆性破壊で切断	損傷詳細図 (溶接部から亀裂が発生した場合、溶接部の詳細を含む)
1) 検査日 (1967年12月15日計測) 検査担当者 () 検査方法 (目視、PT、RT、ET、UT、磁粉グラインダー) -- 落橋	
2) 亀裂の長さ: 切断 複数の亀裂の場合: 図-2・8参照	図-2.8 C13N アイバーの破壊 (連邦道路局提供)
3) 亀裂の発生点 ☆欠陥との関係の有無 (有・無) 欠陥の種類と大きさ (応力腐食によるピット 3mm) ☆発生領域 母材 (一般部、切り欠き部)、溶接部 ☆溶接部の場合 止端部、ルート部、内部 ☆切り欠き部の場合 種類: アイバー 応力集中率: 3.0	
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か (材料、製作、架設、供用) ☆材料の欠陥 <名称: > ☆施工中に生じた欠陥 <名称: > ・溶接に伴う欠陥 () ・工作に伴う欠陥 (ドリル孔明、ガス切断、グラインダー、その他 < > ・鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷 (深さ、底半径等) ・架設中の傷 ☆供用中に生じた欠陥 (主に傷、腐食) <名称: 腐食ピット >	図-2.13 矢印で示すのがアイバー C13N のピン孔における初期の亀裂 (亀裂の大きさについては図-2.9参照) (連邦道路局提供)
5) 材質 (材料) ☆切出し試験体による材質確認 (有・無) ★切出した位置 図 (有・無) ★試験の種類 ①引張試験 (有・無) $\sigma_y = 545 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_B = \text{MPa}$ ②シャルピ-Vノッチ試験 (有・無) 方法: 結果の図 (有 2-11 図・無) ③破壊靱性試験 (有・無) 試験片: アイバー幹部 試験で求めた特性値: $K_{Ic} = 28.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ $K_{Ic} = 45 \sim 55$ (厳密な意味でのK I C試験、荷重-変位データ(J積分)) $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ④化学分析 (有・無) 文献 2. 3	

☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。	
①発生点	(鋼種：)
②既に亀裂が進展した領域	(鋼種：)
③亀裂進展の可能性のある領域	(鋼種：)
(錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)	
6) 設計示方書	
7) 荷重	
☆設計荷重	
☆実測あるいは推定	
交通量：	6640 台/日
資料の出典	オハイオ州道路局 計測年月日 1964年 月 日
大型車交通量 (混入率)	1600 台/日 (%)
資料の出典	計測年月日 年 月 日
(車種構成)	乗用車5040台/日 トラック1600台/日
8) 発生応力の検討	
☆最大発生応力 (脆性破壊検討用) : 別表 (有・無)	
計測値：	MPa
計測方法 荷重：	、測定位置 別添図 (有()・無)
計算値：	MPa
算出方法 荷重：	、測定位置 別添図 (有()・無)
☆発生応力範囲 (疲労損傷検討用) : 別表 (有・無)	
計測値：	283 MPa
計測方法 荷重：死+活	、測定位置アイバー幹部 別添図 (有()・無)
計算値：	MPa
算出方法 荷重：	、測定位置 別添図 (有()・無)
☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図 (有・無)	
☆応力ないし応力範囲の強い二軸性 (有・無) 有の場合別添資料 (有・無)	
9) 発生変位	計測値： 計測方法
	計算値： 計算方法
10) 竣工年月日	年 月 日 供用開始年月日 1928年 5月19日
供用年数	39年
11) 亀裂の性格	
①進展性： (進展経路の予測を含む)	
②冗長性：	
12) 限界亀裂： 長さ、材料、応力レベルの組合せで表示？、JRの便覧参照、脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、座屈)	

13) 損傷のモデル化 図(有()・無)など(a、亀裂の形を図で説明) K値の計算 $K = F_e * F_s * F_w * F_g * \sigma \sqrt{\Pi a}$ 採用する継手形状 注) 死荷重による推定値 $K = 44 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$			
14) K値の計測 (有・無)			
15) 進展解析 (有・無)			
16) 環境 最低使用温度 不明 雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SO _x 、NO _x) しぶき、海岸からの距離(耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (有・無) アイバーの熱処理により表面から深さ2.5~10mmに堅い層ができた。これが材料の靱性を低下させ、硬度の最も高い分に2つの腐食ピットがあった。腐食ピットと亀裂の表面はかなりの腐食と腐食生成物が見られた。 腐食ピットは崩壊時の低靱性と相まってアイバーのピン孔下周縁において脆性破壊段階の原因となった。			
18) 処置		時 期	内 容 (検査方法なども含む)
詳細調査	有・無		検査方法
経過観察	有・無		観察方法
応急処置	有・無		
補修	有・無		
経過観察	有・無		
19) 類似事例の報告 (場所、特徴など) 事例数 : 5 1900年~1913年の間に米国で製造された5つの日本の 鉄道橋のアイバーの頭 損傷数 :			

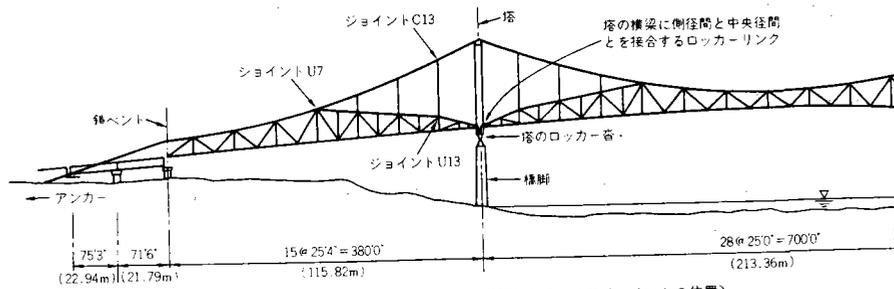


図-2.2 Point Pleasant橋の側面図 (C13, U7およびU13のジョイントの位置)

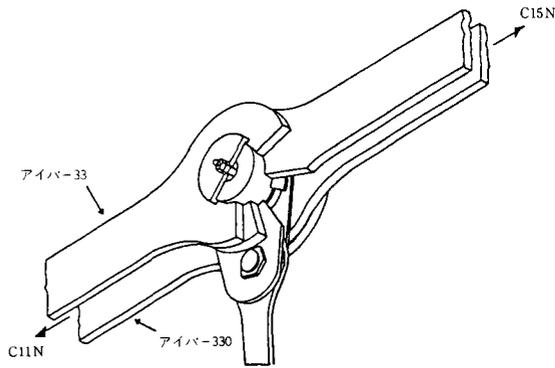


図-2.3 C13のジョイント (ここではアイバーの鋼はハンガーとそのストラッププレートによってトラスに結合されている)

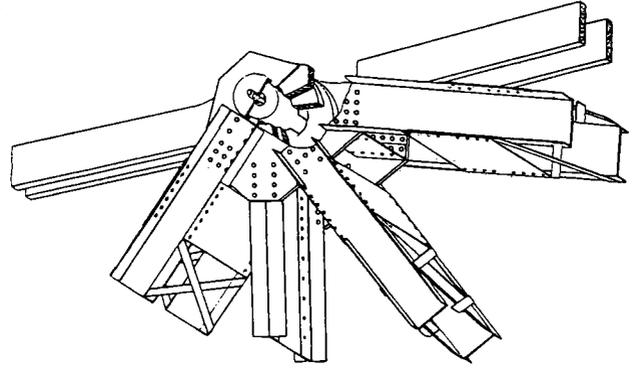


図-2.4 U7のジョイントの詳細 (ここでアイバーはトラスに結合されている)

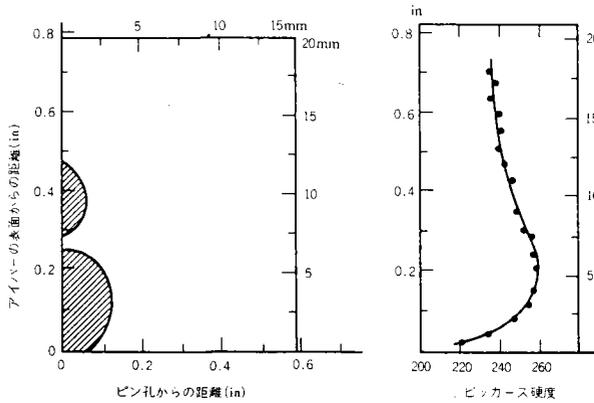


図-2.9 初期のアイバー亀裂の位置と材料の局部硬度

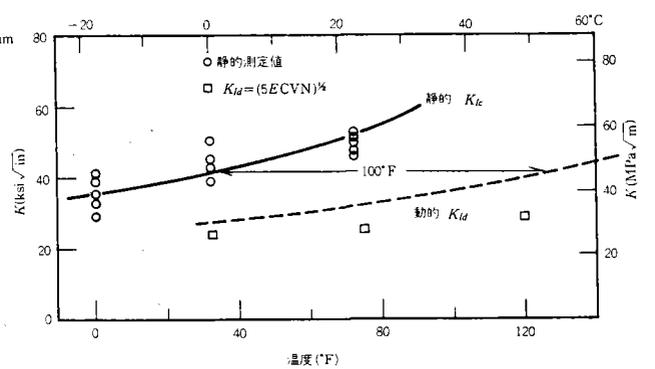


図-2.10 アイバー鋼の破壊靱性

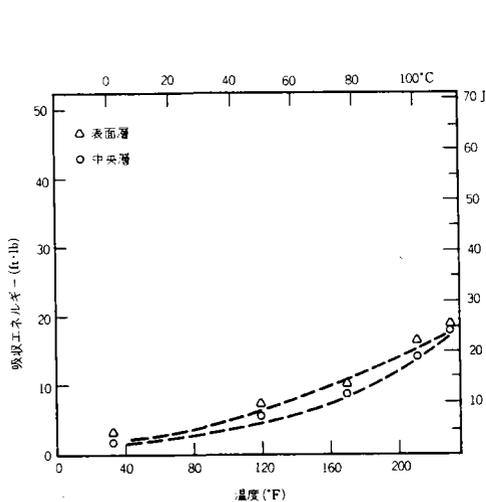


図-2.11 アイバーから得られた平均のシャルピーVノッチ試験値

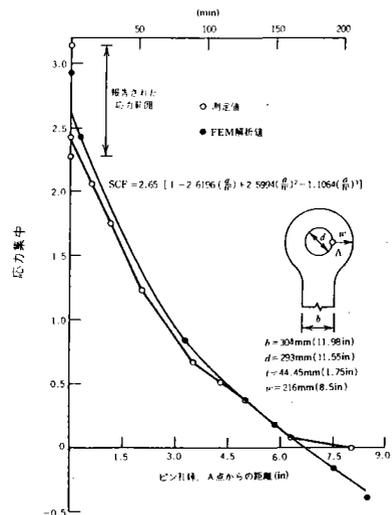
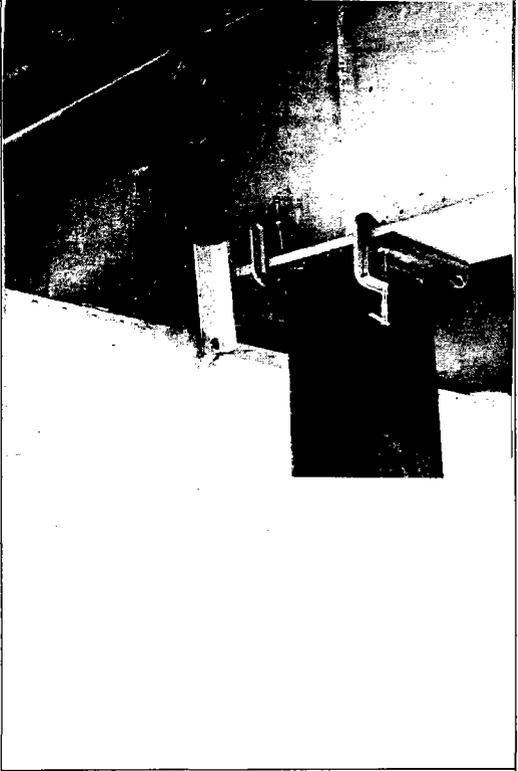


図-2.14 FEM解析と測定値との比較

橋梁名: Route 157 橋 路線名:	架設場所: 米国 Illinois 州 St. Clair 郡
損傷位置図 (全体での位置、全体形状を知ることができるような図) 別添 (有) : 枚、無し)	
損傷の特徴: 1端はロッカー支承で支持され、他端がピンプレートのリンクで支持された桁の桁端を支持するピンリンクのうちG8~G10分が疲労破壊し、桁が12mm~14mm沈下した。	損傷詳細図 (溶接部から亀裂が発生した場合、溶接部の詳細を含む)
1) 検査日 (1978年10月23日計測) 検査担当者 (管区従業員) 検査方法 (目視、PT, RT, ET, UT, 磁粉 グライNDER)	
2) 亀裂の長さ: 19 * 178 mm 複数の亀裂の場合: 図-2. 17 参照	
3) 亀裂の発生点 ☆欠陥との関係の有無 (有・無) 欠陥の種類と大きさ () ☆発生領域 母材 (一般部、切り欠き部)、溶接部 ☆溶接部の場合 止端部、ルート部、内部 ☆切り欠き部の場合 種類: 応力集中率:	
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か (材料、製作、架設、供用) ☆材料の欠陥 <名称: > ☆施工中に生じた欠陥 <名称: > ・溶接に伴う欠陥 () ・工作に伴う欠陥 (ドリル孔明、ガス切断、グライNDER、その他 < > ・鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷 (深さ、底半径等) ・架設中の傷 ☆供用中に生じた欠陥 <名称: 腐食生成物によるピンプレートのウェブへの固着 >	
5) 材質 (材料) ☆切出し試験体による材質確認 (有・無) ★切出した位置 _____ 図 (有・無) ★試験の種類 ①引張試験 (有・無) $\sigma_y =$ _____ MPa、 $\sigma_B =$ _____ MPa ②シャルピ-Vノッチ試験 (有・無) 方法: _____ 結果の図 (有 _____ 図・無) ③破壊靱性試験 (有・無) 試験片: _____ 試験で求めた特性値: (厳密な意味でのK I C試験、荷重-変位データ (J 積分)) ④化学分析 (有・無)	

☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。			
①発生点	(鋼種：)
②既に亀裂が進展した領域	(鋼種：)
③亀裂進展の可能性のある領域	(鋼種：)
(錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)			
6) 設計示方書			
7) 荷重			
☆設計荷重	H 2 0 - 4 4		
☆実測あるいは推定			
交通量：	1 8 6 0 台/日		
資料の出典		計測年月日	年 月 日
大型車交通量 (混入率)	3 0 0 台/日 (1 6 %)		
資料の出典		計測年月日	1 9 8 0 年 月 日
(車種構成)			
8) 発生応力の検討 参考・・・付近のS. 309橋			
☆最大発生応力 (脆性破壊検討用) : 別表 (有・無)			
計測値：	MPa		
計測方法 荷重：		測定位置	別添図 (有()・無)
計算値：	MPa		
算出方法 荷重：		測定位置	別添図 (有()・無)
☆発生応力範囲 (疲労損傷検討用) : 別表 (有・無)			
計測値：	MPa		
計測方法 荷重：		測定位置	別添図 (有()・無)
計算値：	MPa		
算出方法 荷重：		測定位置	別添図 (有()・無)
☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図 (有)・無) 図 2. 1 9			
☆応力ないし応力範囲の強い二軸性 (有・無) 有の場合別添資料 (有・無)			
9) 発生変位 計測値： 計測方法			
計算値： 計算方法			
10) 竣工年月日 年 月 日 供用開始年月日 年 月 日			
供用年数 年			
11) 亀裂の性格			
①進展性：			
(進展経路の予測を含む)			
②冗長性：低い			
12) 限界亀裂：長さ、材料、応力レベルの組合せで表示？、J R の便覧参照、脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、座屈)			

13) 損傷のモデル化 <input checked="" type="checkbox"/> (有) (図-2. 19)・無) Tpなど (a、亀裂の形を図で説明) K値の計算 採用する継手形状			
14) K値の計測 (有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無)			
15) 進展解析 (有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無)			
16) 環境 最低使用温度 ピンプレートの凍結・・・氷点下 雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SOx、NOx) しぶき、海岸からの距離 (耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無)			
18) 処置		時期	内容 (検査方法なども含む)
詳細調査	<input checked="" type="checkbox"/> 有・無		検査方法 目視
経過観察	有・無		観察方法
応急処置	有・無		
補修	<input checked="" type="checkbox"/> 有・無		G8~G10桁を支保工で受け14本のリフトンを取り替え
経過観察	有・無		
19) 類似事例の報告 (場所、特徴など) 事例数： 損傷数：			

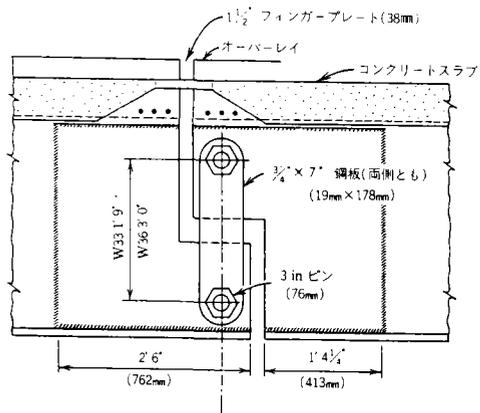


図-2.15 吊りスパン2と6の典型的なハンガー部

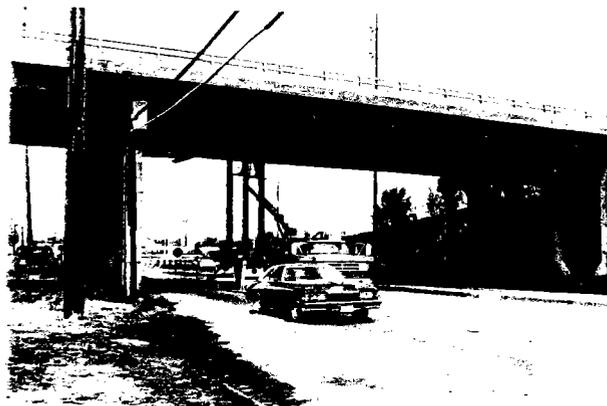


図-2.16 St. Clair 通りを越える吊りスパン2を示す景観 (Illinois 州交通局提供)

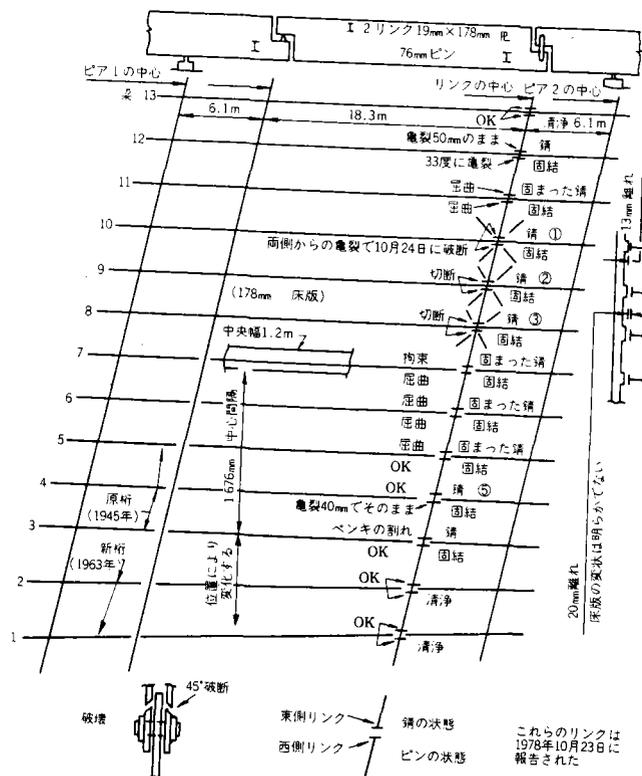


図-2.17 電裂の入ったハンガーの位置を示す吊りスパンの略図

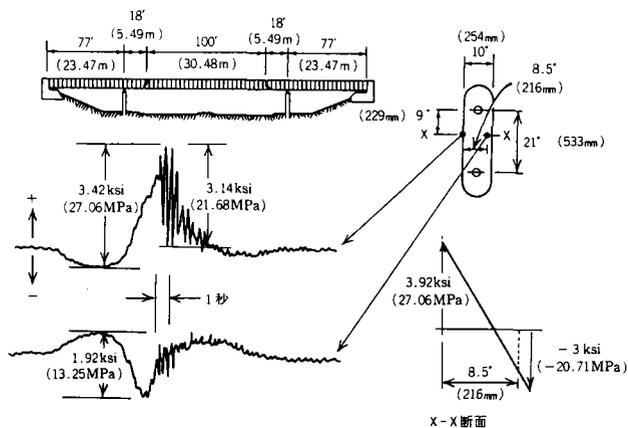
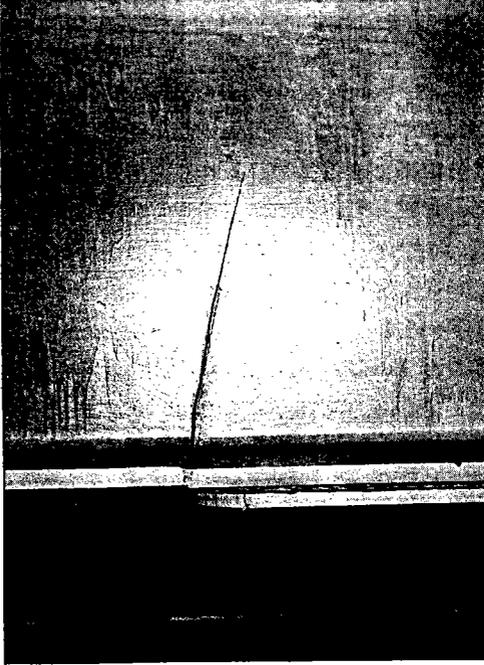
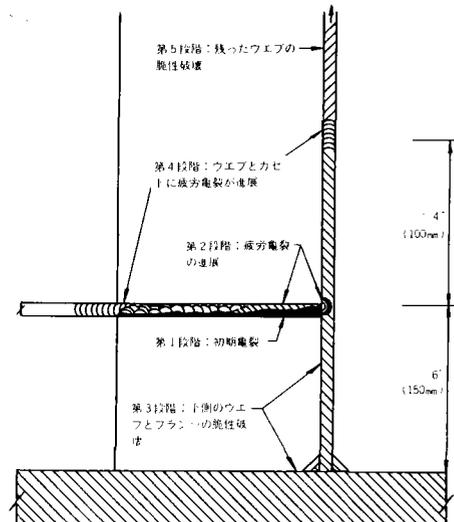


図-2.19 U. S.309橋のピンプレートのひずみ-時間応答

橋梁名：Yellow Mill Pond橋 路線名：I-95 (Connecticutターンパイク)	架設場所：米国 Connecticut州 Brigeport
損傷位置図 (全体での位置、全体形状を知ることができるような図) 別添 (有)： 枚 図-1、無し)	
損傷の特徴： 下フランジカバープレート、隅肉溶接止端より発生1ヶ所はウェブ内に400mmほど進展	損傷詳細図 (溶接部から亀裂が発生した場合、溶接部の詳細を含む)
1) 検査日 (1970年11月 2日計測) 検査担当者 () 検査方法 (目視、PT, RT, ET, UT, 磁粉 グラインダー)	
2) 亀裂の長さ： 400mm 複数の亀裂の場合：図- 参照	
3) 亀裂の発生点 ☆欠陥との関係の有無 (有・無) 欠陥の種類と大きさ () ☆発生領域 母材 (一般部、切り欠き部)、溶接部 ☆溶接部の場合 止端部、ルート部、内部 ☆切り欠き部の場合 種類： 応力集中率：	
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か (材料、製作、架設、供用) ☆材料の欠陥 <名称： > ☆施工中に生じた欠陥<名称： > ・溶接に伴う欠陥 () ・工作に伴う欠陥 (ドリル孔明、ガス切断、グラインダー、その他< > ・鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷 (深さ、底半径等) ・架設中の傷 ☆供用中に生じた欠陥 (主に傷、腐食) <名称： >	
5) 材質 (材料) ☆切出し試験体による材質確認 (有・無) ★切出した位置 図 (有・無) ★試験の種類 ①引張試験 (有・無) $\sigma_y = 398.5 \text{ MPa}$, $\sigma_B = 656 \text{ MPa}$ ②シャルピ-Vノッチ試験 (有・無) 方法： 結果の図 (有 図- 無) ③破壊靱性試験 (有・無) 試験片： 試験で求めた特性値： ④化学分析 (有・無) A242鋼に対してマンガン過多 (1.45%に対して 1.69%)	

☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。	
①発生点	(鋼種： A 2 4 2)
②既に亀裂が進展した領域	(鋼種： A 2 4 2)
③亀裂進展の可能性のある領域	(鋼種： A 2 4 2)
(錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)	
6) 設計示方書	
A A S H T O	
7) 荷重	
☆設計荷重	
☆実測あるいは推定	
交通量：	5 6 8 0 0 台/日
資料の出典	文献 3. 4 計測年月日 年 月 日
大型車交通量 (混入率)	7 7 0 0 台/日 (1 3. 5 %)
資料の出典	文献 3. 4 計測年月日 年 月 日
(車種構成)	
8) 発生応力の検討	
☆最大発生応力 (脆性破壊検討用) : 別表 (有・無)	
計測値：	MPa
計測方法 荷重：	、測定位置 別添図 (有()・無)
計算値：	MPa
算出方法 荷重：	、測定位置 別添図 (有()・無)
☆発生応力範囲 (疲労損傷検討用) : 別表 (有・無)	
計測値：	1 3. 1 MPa (マイナー則等価応力範囲)
計測方法 荷重：	、測定位置 別添図 (有()・無)
計算値：	MPa
算出方法 荷重：	、測定位置 別添図 (有()・無)
☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図 (有・無)	
☆応力ないし応力範囲の強い二軸性 (有・無) 有の場合別添資料 (有・無)	
9) 発生変位	計測値： 計測方法
	計算値： 計算方法
10) 竣工年月日	1 9 5 7 年 月 日 供用開始年月日 1 9 5 8 年 1 月 日
供用年数	1 2 年 1 0 ヵ月
11) 亀裂の性格	
①進展性：有り	
(進展経路の予測を含む)	
②冗長性：低い	
12) 限界亀裂：長さ、材料、応力レベルの組合せで表示？、J R の便覧参照、脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、座屈)	

13) 損傷のモデル化 図(有()・無) Tpなど(a、亀裂の形を図で説明) K値の計算 フランジ内の半楕円形表面亀裂としてモデル化 採用する継手形状			
14) K値の計測 (有・無)			
15) 進展解析 (有・無) 亀裂深さ1インチまでの応力繰返し数: $N = 36 * 10^6$ cycles			
16) 環境 最低使用温度 -23℃ 雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SO _x 、NO _x) しぶき、海岸からの距離(耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (有・無) 疲労亀裂は溶接止端部から発生し、フランジを貫通、ウェブ内に51mmまで進展。 1970年9月頃の過積載車により脆性破壊したと考えられる。 フランジから抜き出したコアの観察より、ストライエーション間隔: $4 \sim 3 * 10^{-8}$ mm/cycles			
18) 処置		時期	内容(検査方法なども含む)
詳細調査	有・無	1979.11	検査方法 目視 超音波探傷
経過観察	有・無		観察方法
応急処置	有・無	1970.12	脆性破壊の桁撤去、損傷桁をボルト添接
補修	有・無		ピーニング再溶融、亀裂の止端長さ38mm以上
経過観察	有・無		はボルト添接、腹板に孔
19) 類似事例の報告 (場所、特徴など) 事例数: 損傷数:			

橋梁名：Lafayette Street橋 路線名：不明	架設場所：米国Minnesota州 St. Paul
損傷位置図（全体での位置、全体形状を知ることができるような図） 別添（有）：2枚 図4. 3 図4. 1、無し	
損傷の特徴：横構のガセットプレートと垂直スチフナーの接合部に生じた溶接欠陥（融合不良）から疲労亀裂が発生し、この溶接がウェブとスチフナーの溶接と交差していたため、亀裂は主桁ウェブ及び下フランジまで侵入した。	損傷詳細図 （溶接部から亀裂が発生した場合、溶接部の詳細を含む） 
1) 検査日（1975年 5月 7日計測） 検査担当者（不明） 検査方法（目視、PT、RT、ET、UT、磁粉 グライNDER）	
2) 亀裂の長さ：3315mm 複数の亀裂の場合：図- 参照	
3) 亀裂の発生点 ☆欠陥との関係の有無（有・無） 欠陥の種類と大きさ（融合不良） ☆発生領域 母材（一般部、切り欠き部）、溶接部 ☆溶接部の場合 止端部、ルート部、内部 ☆切り欠き部の場合 種類： 応力集中率：	
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か（材料、製作、架設、供用） ☆材料の欠陥 <名称： > ☆施工中に生じた欠陥<名称：融合不良 > ・溶接に伴う欠陥（溶け込み不足） ・工作に伴う欠陥（ドリル孔明、ガス切断、グラインダー、その他 > ・鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷（深さ、底半径等） ・架設中の傷 ☆供用中に生じた欠陥（主に傷、腐食）<名称： >	
5) 材質（材料） ☆切出し試験体による材質確認（有・無） ★切出した位置 図4. 4 （有・無） ★試験の種類 ガセット $\sigma_y = 260 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_B = 462 \text{ MPa}$ ①引張試験（有・無） ウェブ $\sigma_y = 370 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_B = 564 \text{ MPa}$ ②シャルピ-Vノッチ試験（有・無）方法： 結果の図（有 図4. 8・無） ③破壊靱性試験（有・無）試験片： 試験で求めた特性値： （厳密な意味でのK I C試験、荷重-変位データ（J積分）） ④化学分析（有・無）A441鋼およびA36鋼の規格値内	

<p>☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。</p> <p>①発生点 (鋼種：A 3 6 (ガセット)、A 4 4 1(フランジ、ウェブ))</p> <p>②既に亀裂が進展した領域 (鋼種： ")</p> <p>③亀裂進展の可能性のある領域 (鋼種： ")</p> <p>(錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)</p>	
<p>6) 設計示方書</p> <p style="text-align: center;">A A S H T O ?</p>	
<p>7) 荷重</p> <p>☆設計荷重 HS 2 0 ?</p> <p>☆実測あるいは推定</p> <p>交通量： 推定 1 5 0 0 台/日</p> <p>資料の出典 _____ 計測年月日 _____ 年 月 日</p> <p>大型車交通量 (混入率) _____ 台/日 (_____ %)</p> <p>資料の出典 _____ 計測年月日 _____ 年 月 日</p> <p>(車種構成) _____</p>	
<p>8) 発生応力の検討</p> <p>☆最大発生応力 (脆性破壊検討用) : 別表 (有・無)</p> <p>計測値： _____ MPa</p> <p>計測方法 荷重： _____、測定位置 _____ 別添図 (有()・無)</p> <p>計算値： _____ MPa</p> <p>算出方法 荷重： _____、測定位置 _____ 別添図 (有()・無)</p> <p>☆発生応力範囲 (疲労損傷検討用) : 別表 (有・無)</p> <p>計測値： _____ MPa</p> <p>計測方法 荷重： _____、測定位置 _____ 別添図 (有()・無)</p> <p>計算値： _____ MPa</p> <p>算出方法 荷重： _____、測定位置 _____ 別添図 (有()・無)</p> <p>☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図 (有・無)</p> <p>☆応力ないし応力範囲の強い二軸性 (有・無) 有の場合別添資料 (有・無)</p>	
<p>9) 発生変位 計測値： _____ 計測方法 _____</p> <p>計算値： _____ 計算方法 _____</p>	
<p>10) 竣工年月日 _____ 年 月 日 供用開始年月日 1 9 6 8 年 1 1 月 1 3 日</p> <p>供用年数 _____ 7 年</p>	
<p>11) 亀裂の性格</p> <p>①進展性： _____</p> <p>(進展経路の予測を含む)</p> <p>②冗長性： _____</p>	
<p>12) 限界亀裂： 長さ、材料、応力レベルの組合せで表示?、J R の便覧参照、脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、座屈)</p>	

13) 損傷のモデル化 <input checked="" type="checkbox"/> (図4. 10)・無) Tpなど (a、亀裂の形を図で説明) K値の計算 第2段階においてK値を与えている。 採用する継手形状			
14) K値の計測 (有・ <input checked="" type="checkbox"/>)			
15) 進展解析 (<input checked="" type="checkbox"/> ・無) 図4. 10の第2段階を対象に進展解析を行っている。			
16) 環境 最低使用温度 -30℃ (1975年2月9日、St. Paul) 雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SOx、NOx) しぶき、海岸からの距離 (耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (<input checked="" type="checkbox"/> ・無) 図4. 5～図4. 7、および図4. 10			
18) 処置		時 期	内 容 (検査方法なども含む)
詳細調査	<input checked="" type="checkbox"/> ・無		検査方法
経過観察	有・無		観察方法
応急処置	有・無		
補修	<input checked="" type="checkbox"/> ・無		図4. 13 図4. 14
経過観察	有・無		
19) 類似事例の報告 (場所、特徴など) 事例数: 5 損傷数:			

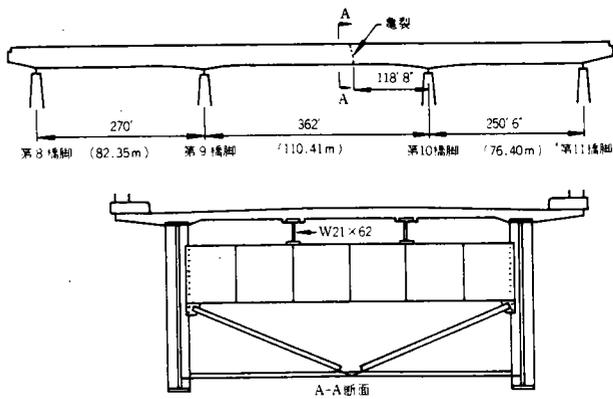


図-4.3 側面および横断面の概要

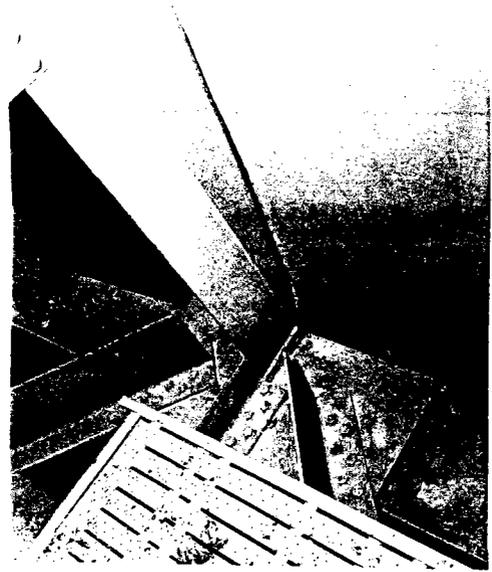


図-4.1 Lafayette Street 橋の亀裂の発生した箇所

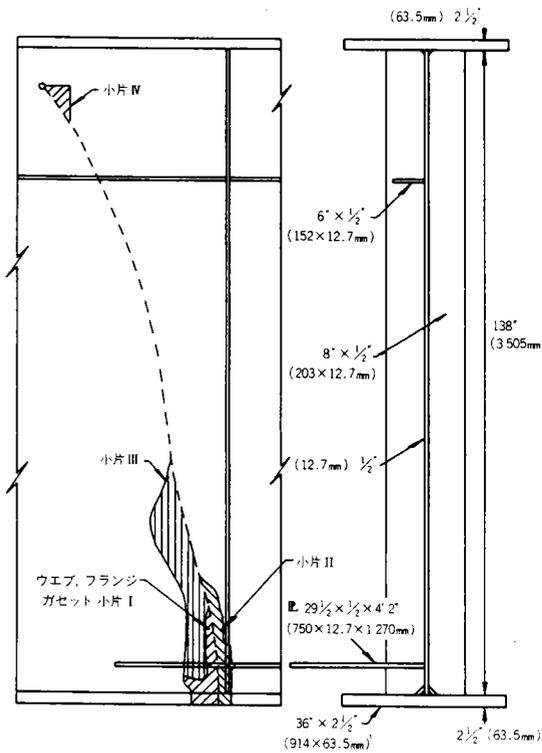


図-4.4 亀裂と試験のために切り出した小片の概要

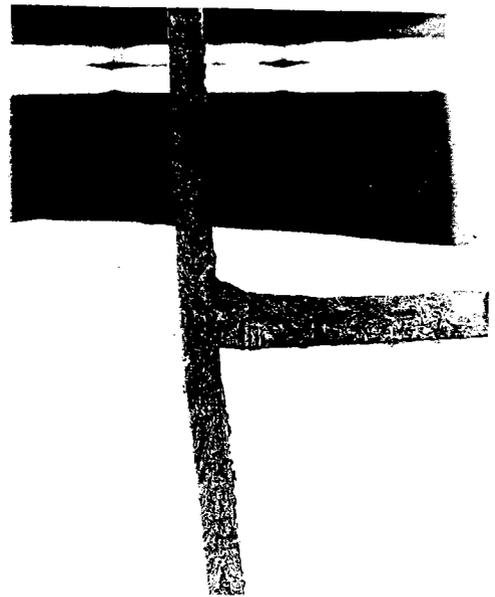


図-4.5 溶込み不足が見られるガセットとウェブの破面 (小片II)

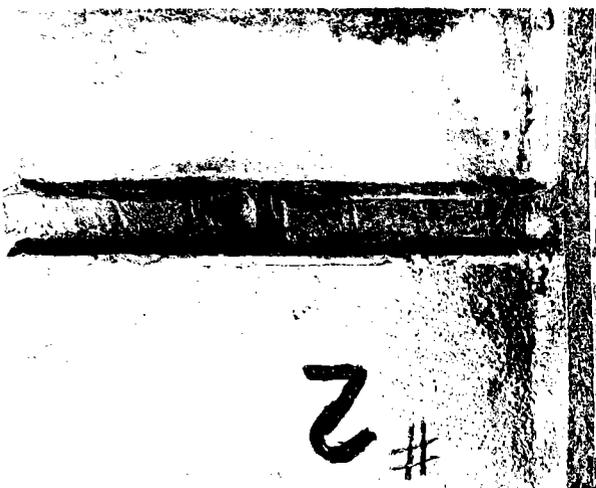


図-4.6 補剛材と溶接部およびウェブの近接したガセットの破面 (小片II)



図-4.7 ウェブとフランジの境界の破面

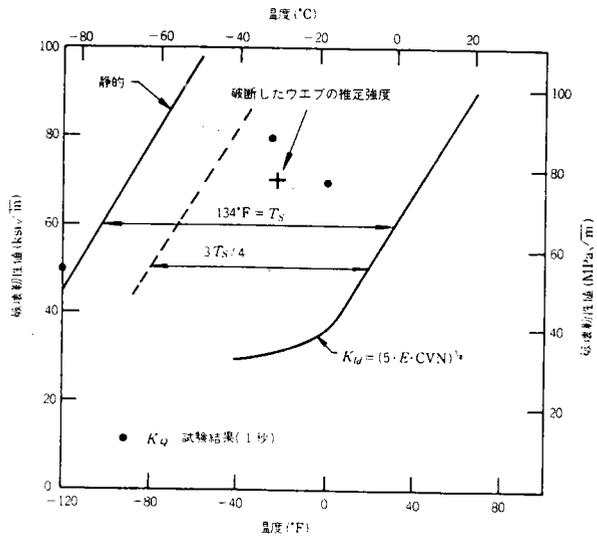
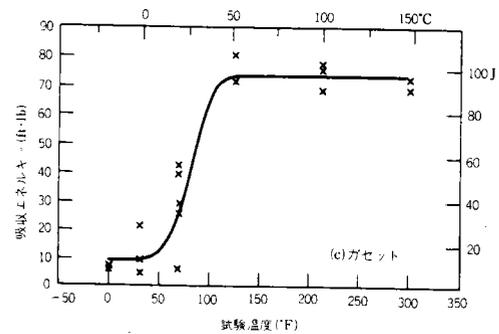
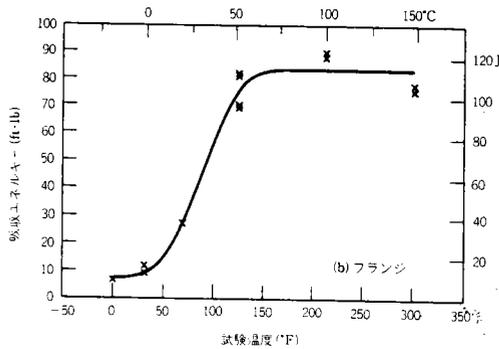
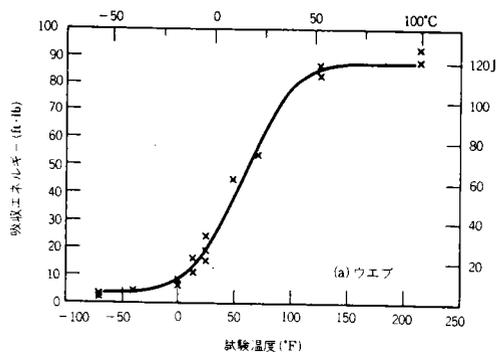


図-4.9 破壊靱性試験とシャルピーVノッチ試験の関係

図-4.8 シャルピーVノッチ試験結果



図-4.11 亀裂面における亀裂成長のストライケーション 25,300倍

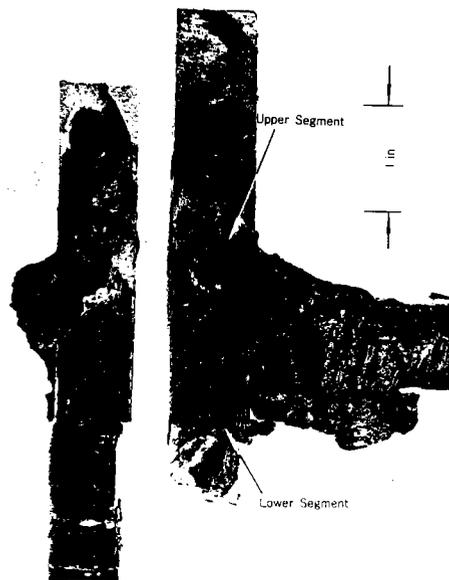


図-4.12 破断面染液部 左側の同一位置から右側を抜いた部分で露出した破面

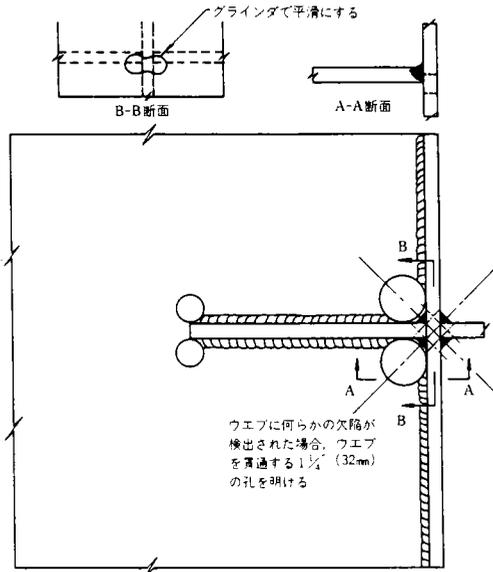
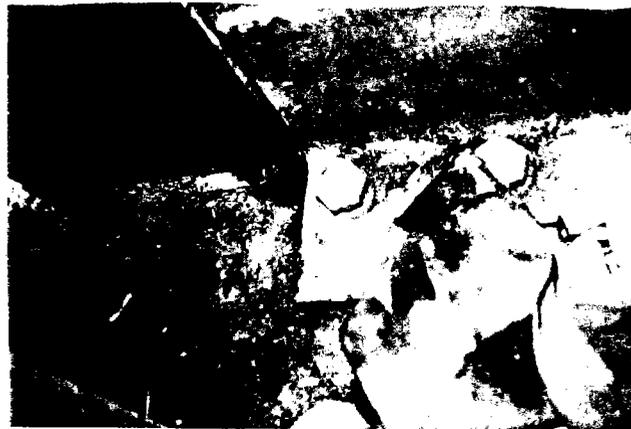


図-4.13 補修の手順

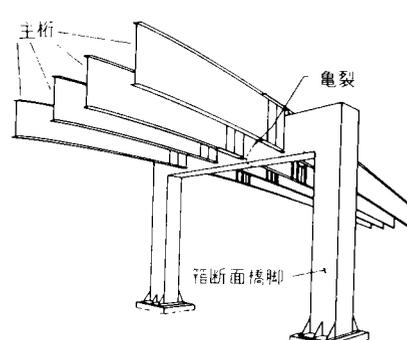
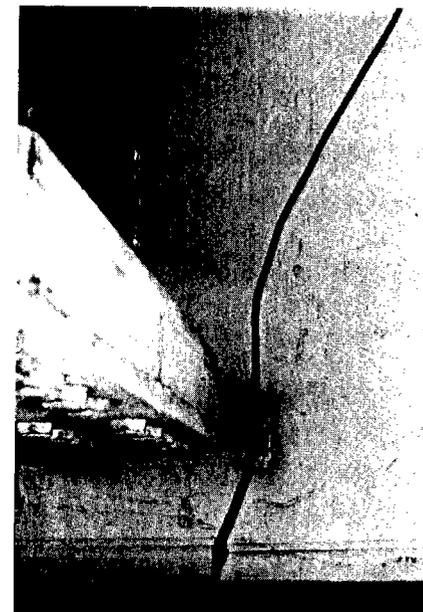


(a)ガセットプレートに開けた孔



(b)亀裂を取り除くために府ウエブに開けた孔

図-4.14 ガセットプレートと府ウエブの補修孔

橋梁名：Dan Ryan高速鉄道高架橋 路線名：Lake-Dan Ryan高速線	架設場所：米国シカゴ
損傷位置図（全体での位置、全体形状を知ることができるような図） 別添（ <input checked="" type="checkbox"/> 有り）：1枚 図-1、無し	
損傷の特徴： 構造ディテールおよび溶接の不具合によって生じたもの。ラーメン橋脚の主桁との取り合い部	損傷詳細図 （溶接部から亀裂が発生した場合、溶接部の詳細を含む） 
1) 検査日（1978年 1月 4日計測） 検査担当者（ ） 検査方法（ <input checked="" type="checkbox"/> 目視、PT, RT, ET, UT, 磁粉 グラインダー）	(a) 亀裂の位置（橋脚26）
2) 亀裂の長さ：ものすごく長い<破壊寸前> 複数の亀裂の場合：図- 参照	
3) 亀裂の発生点 ☆欠陥との関係の有無（ <input checked="" type="checkbox"/> 有・無） 欠陥の種類と大きさ（融合不良、スラグ巻き込み、ブローホール） ☆発生領域 母材（一般部、切り欠き部）、 <input checked="" type="checkbox"/> 溶接部 ☆溶接部の場合 <input checked="" type="checkbox"/> 止端部、ルート部、 <input checked="" type="checkbox"/> 内部 ☆切り欠き部の場合 種類： 応力集中率：	☆供用中に生じた欠陥（主に傷、腐食）<名称： >
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か（材料、 <input checked="" type="checkbox"/> 製作、架設、供用） ☆材料の欠陥 <名称： > ☆施工中に生じた欠陥<名称： > ・ <input checked="" type="checkbox"/> 溶接に伴う欠陥（ブローホール） ・工作に伴う欠陥（ドリル孔明、ガス切断、グラインダー、その他< >） ・鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷（深さ、底半径等） ・架設中の傷	5) 材質（材料） ☆切出し試験体による材質確認（ <input checked="" type="checkbox"/> 有・無） 但し母材 ★切出した位置 図（有・無） ★試験の種類 ①引張試験（ <input checked="" type="checkbox"/> 有・無） $\sigma_y = 235 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_B = 680 \text{ MPa}$ ②シャルピ-Vノッチ試験（ <input checked="" type="checkbox"/> 有・無）方法： 結果の図（ <input checked="" type="checkbox"/> 有 図-2・無） ③破壊靱性試験（ <input checked="" type="checkbox"/> 有・無） 試験片：ASTM-E399 試験で求めた特性値： 図-3 （厳密な意味でのKIC試験、荷重-変位データ（J積分）） ④化学分析（ <input checked="" type="checkbox"/> 有・無） A36鋼の規格値を満足

☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。	
①発生点	(鋼種： A 3 6)
②既に亀裂が進展した領域	(鋼種： A 3 6)
③亀裂進展の可能性のある領域	(鋼種： A 3 6)
(錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)	
6) 設計示方書 AREA (アメリカ鉄道技術協会)、CTA (Chicago運輸局) の設計指針 AWS (アメリカ溶接協会)	
7) 荷重 ☆設計荷重 ☆実測あるいは推定 交通量： 9年間で 1.4×10^6 資料の出典 _____ 計測年月日 _____ 年 月 日 大型車交通量 (混入率) _____ 台/日 (_____ %) 資料の出典 _____ 計測年月日 _____ 年 月 日 (車種構成) _____	
8) 発生応力の検討 ☆最大発生応力 (脆性破壊検討用) : 別表 (有・無) 計測値： _____ MPa 計測方法 荷重： _____、測定位置 _____ 別添図 (有()・無) 計算値： _____ MPa 算出方法 荷重： _____、測定位置 _____ 別添図 (有()・無) ☆発生応力範囲 (疲労損傷検討用) : 別表 (有・無) 計測値： _____ MPa 計測方法 荷重： _____、測定位置 _____ 別添図 (有()・無) 計算値： 15~21 MPa (1列車通過) FEM解析と経験による 算出方法 荷重：設計荷重、測定位置 主桁上フランジ 別添図 (有()・無) ☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図 (有・無) ☆応力ないし応力範囲の強い二軸性 (有・無) 有の場合別添資料 (有・無)	
9) 発生変位	計測値： _____ 計測方法 _____ 計算値： _____ 計算方法 _____
10) 竣工年月日	1969年 9月 日 供用開始年月日 1969年 9月 日 供用年数 9年
11) 亀裂の性格 ①進展性：有り (進展経路の予測を含む) ②冗長性：低い	
12) 限界亀裂： 長さ、材料、応力レベルの組合せで表示?、JRの便覧参照、脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、座屈)	

13) 損傷のモデル化			
図 (有()・無) Tpなど (a、亀裂の形を図で説明)		K値の計算 止端およびルートからの亀裂を対象とした簡便式	
採用する継手形状		荷重伝達型十字スミ肉溶接継手にモデル化	
14) K値の計測 (有・無)			
15) 進展解析 (有・無)			
$\Delta\sigma_e = 15 \text{ Mpa}$ とすると 止端 0.75 --> 3.2 mm $1.65 * 10^6$ ルート 17.78 --> 21.08 mm $1.30 * 10^6$			
16) 環境			
最低使用温度 -22℃ (実測) 雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SOx、NOx) しぶき、海岸からの距離 (耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (有・無)			
融合不良部、スラグ巻き込み等の内部欠陥より発生した疲労亀裂、溶接止端から発生した疲労亀裂、およびそれらを起点とした脆性破壊面が観察されている。 図-4			
18) 処置			
		時期	内容 (検査方法なども含む)
詳細調査	有・無		検査方法
経過観察	有・無		観察方法
応急処置	有・無		仮支点
補修	有・無		疲労亀裂が生じていない同種の部分にストップ
経過観察	有・無		ホール 図-5
19) 類似事例の報告 (場所、特徴など)			
事例数: 1 (Girard Point橋脚)			
損傷数:			

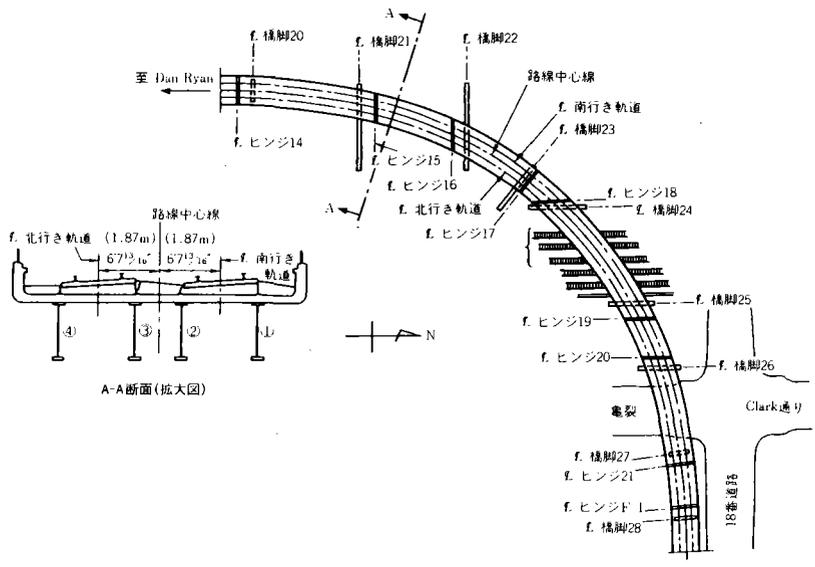


図-6.2 平面図および亀裂が生じた橋脚24, 25, 26の位置

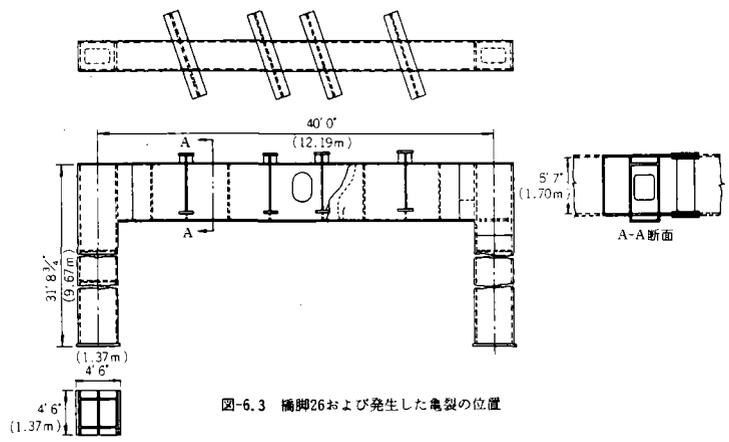
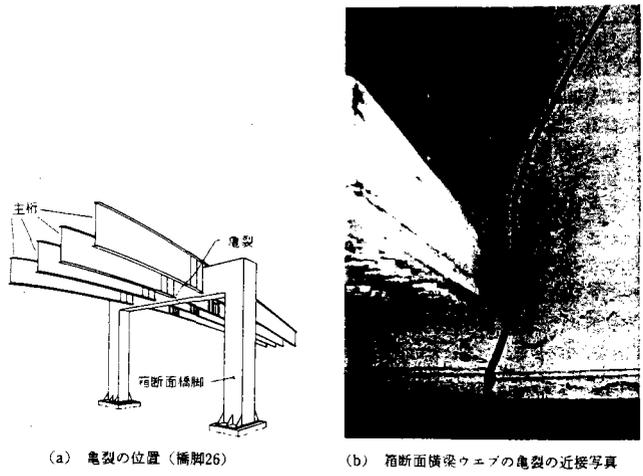


図-6.3 橋脚26および発生した亀裂の位置



(a) 亀裂の位置 (橋脚26) (b) 箱断面橋梁ウェブの亀裂の近接写真

図-6.4 橋脚26の箱断面橋梁の亀裂

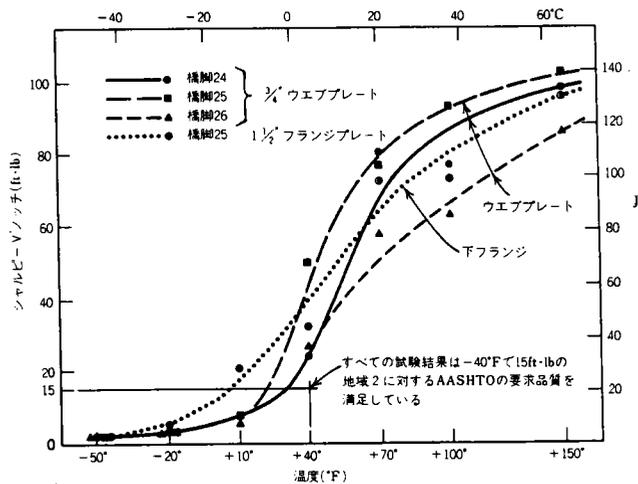


図-6.7 シャルピー-Vノッチ (CVN) 衝撃試験の結果の比較

図 - 2

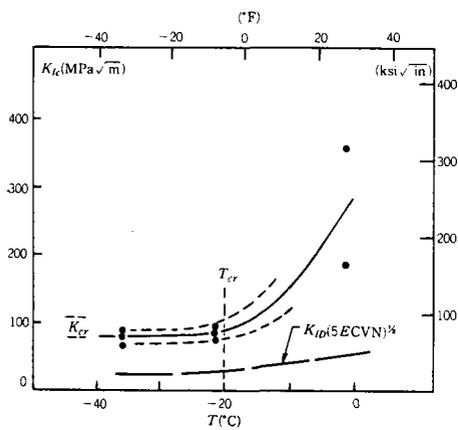
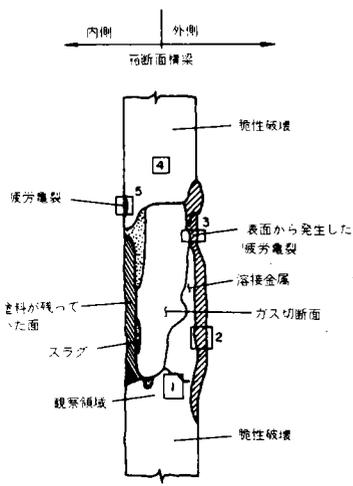


図-6.8 K_{IC} と試験温度の関係

図 - 3



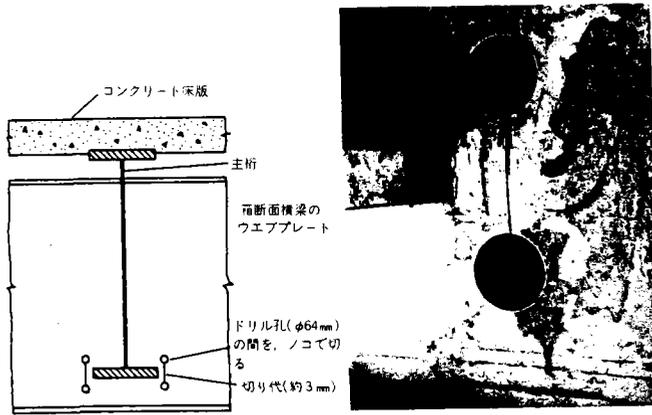
(a) 疲労亀裂の成長過程



(b) 箱断面横梁ウェブの破面

図-6.5 橋脚26の破面の模式図

図 - 4

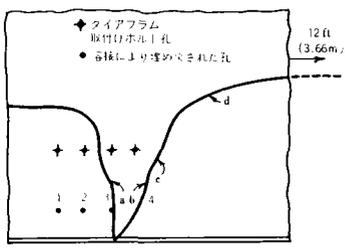
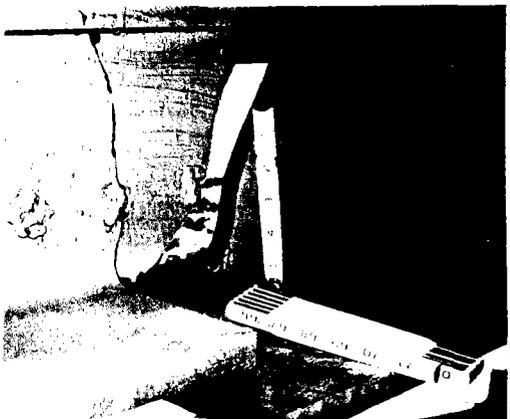


(a) 補強方法の模式図

(b) 補強された箱断面横梁ウェブの写真

図-6.12 橋脚26の典型的な補強方法 橋脚21, 22, 24, 25も同様

図 - 5

橋梁名：I-57、郡道NO. 28橋 路線名：郡道NO. 28橋	架設場所：Illinois州 Farinaの北、Fayette郡
損傷位置図（全体での位置、全体形状を知ることができるような図） 別添（有り）：2枚 図7. 1、図7. 2、無し	
損傷の特徴： 孔を溶接によって埋め戻した場合に生じる溶接欠陥を起点とした亀裂 （疲労による小さな亀裂 → 脆性破壊）	損傷詳細図 （溶接部から亀裂が発生した場合、溶接部の詳細を含む）
1) 検査日（1977年 3月18日計測） 検査担当者（建設技術者） 検査方法（目視・車で通りかかり発見）	
2) 亀裂の長さ：片側305mm、片側4570mm 複数の亀裂の場合：図-7. 4参照	写真撮影方向
3) 亀裂の発生点 ☆欠陥との関係の有無（有・無） 欠陥の種類と大きさ（融合不良、スラグ巻き込み） ☆発生領域 母材（一般部、切り欠き部）、 溶接部 ☆溶接部の場合 止端部、ルート部、 内部 ☆切り欠き部の場合 種類： 応力集中率：	
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か（材料、 製作 、架設、供用） ☆材料の欠陥 <名称： > ☆施工中に生じた欠陥 <名称：融合不良 > ・ 溶接に伴う欠陥 （孔の埋め戻し欠陥） ・工作に伴う欠陥（ドリル孔明、ガス切断、グラインダー、その他 < > ・鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷（深さ、底半径等） ・架設中の傷 ☆供用中に生じた欠陥（主に傷、腐食） <名称： >	図-7.3(a) 破壊の様式図 図-7.3(b) 孔埋め溶接部3および4に生じた亀裂 (Illinois州道路局の報告による)
5) 材質（材料） ☆切出し試験体による材質確認（有・無） ★切出した位置 7. 7 図（有・無） ★試験の種類 ①引張試験（有・無） $\sigma_y = 300 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_B = 491.6 \text{ MPa}$ ②シャルピ-Vノッチ試験（有・無）方法：ASTMA370 結果の図（有7. 8 図・無） ③破壊靱性試験（有・無）試験片：曲げ試験片 試験で求めた特性値：静的破壊靱性値KQ（最大荷重） ④化学分析（有・無）A36鋼の規格値の範囲内	図7. 9

☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。	
①発生点	(鋼種：A 3 6 - 6 7 W 3 6 * 1 5 0)
②既に亀裂が進展した領域	(鋼種：A 3 6 - 6 7 W 3 6 * 1 5 0)
③亀裂進展の可能性のある領域	(鋼種：A 3 6 - 6 7 W 3 6 * 1 5 0)
(錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)	
6) 設計示方書	A A S H O 道路橋示方書 (1 9 5 8 . 1 . 2) A A S H O 道路橋示方書追補 (1 9 6 6 . 1 . 3) I l l i n o i s 州道路局示方書 (1 9 6 8 .)
7) 荷重	
☆設計荷重	H S 2 0 ?
☆実測あるいは推定	
交通量：	推定 4 0 0 台/日
資料の出典	I l l i n o i s 州道路局 (資料 7 . 2) 計測年月日 年 月 日
大型車交通量 (混入率)	台/日 (%)
資料の出典	計測年月日 年 月 日
(車種構成) 自動車および農業用軽車両 (資料 7 . 1)	
8) 発生応力の検討	表 7 . 1
☆最大発生応力 (脆性破壊検討用)	: 別表 (有・無)
計測値：	M P a
計測方法 荷重：	、測定位置 別添図 (有()・無)
計算値：	M P a
算出方法 荷重：	、測定位置 別添図 (有()・無)
☆発生応力範囲 (疲労損傷検討用)	: 別表 (有・無)
計測値：	M P a
計測方法 荷重：	、測定位置 別添図 (有()・無)
計算値：	M P a
算出方法 荷重：	、測定位置 別添図 (有()・無)
☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図 (有・無)	
☆応力ないし応力範囲の強い二軸性 (有・無) 有の場合別添資料 (有・無)	
9) 発生変位	計測値： 計測方法 計算値： 計算方法
10) 竣工年月日	1 9 6 8 年 月 日 供用開始年月日 年 月 日
供用年数	9 年 (損傷発見時)
11) 亀裂の性格	
①進展性：	(進展経路の予測を含む)
②冗長性：	
12) 限界亀裂：	長さ、材料、応力レベルの組合せで表示?、J R の便覧参照、脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、座屈)

13) 損傷のモデル化 図(有()・無)など(a、亀裂の形を図で説明) K値の計算 $KQ = 53.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} (-29^\circ\text{C})$ $KQ = 55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} (-40^\circ\text{C})$ 採用する継手形状			
14) K値の計測 (有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無)			
15) 進展解析 (有・無)			
16) 環境 最低使用温度 -29°C (1976~1977冬) 雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SO _x 、NO _x) しぶき、海岸からの距離(耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (<input checked="" type="checkbox"/> 有・無) 図7.5、図7.6			
18) 処置		時期	内容(検査方法なども含む)
詳細調査	有・無		検査方法
経過観察	有・無		観察方法
応急処置	有・無		
補修	<input checked="" type="checkbox"/> 有・無		図7.7
経過観察	有・無		
19) 類似事例の報告 (場所、特徴など) 事例数: 2橋 Iowa州(孔埋め)、Ontario州(プラグ溶接) 損傷数: 複数亀裂			

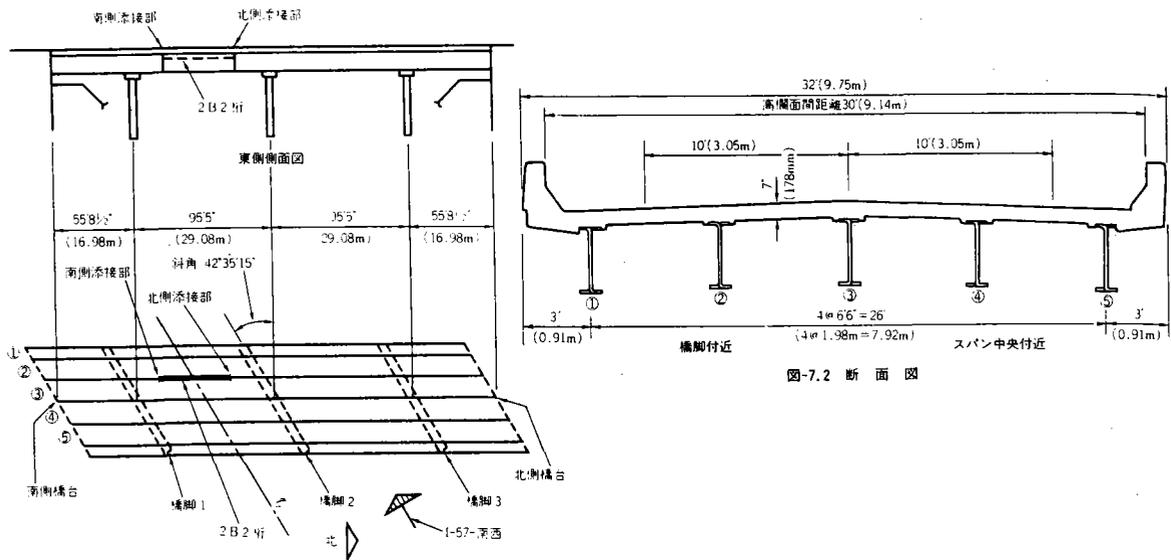


図-7.1 側面図および亀裂を生じた桁の位置

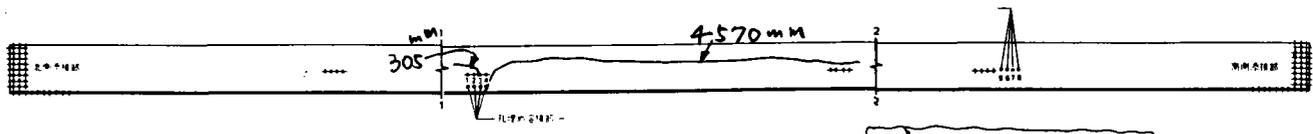


図-7.4 継ぎ位置および亀裂の発生と進展

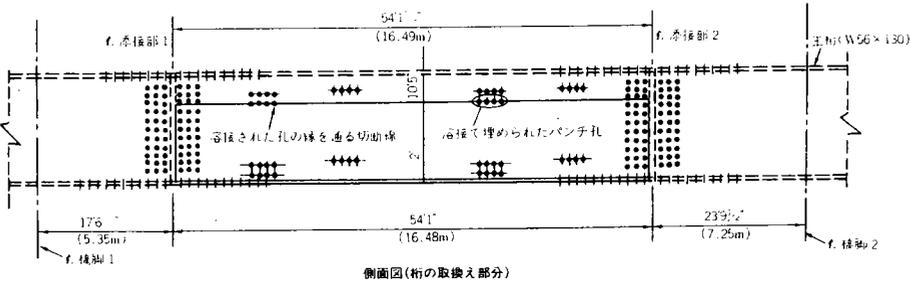
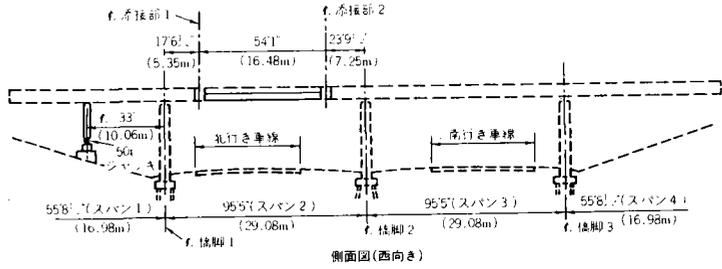
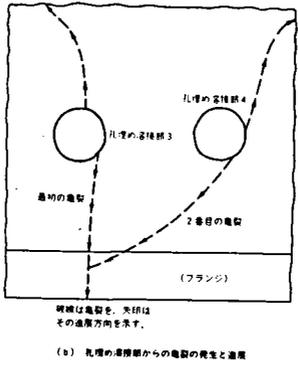


図-7.7 補修の詳細 (2B2桁の取換え)

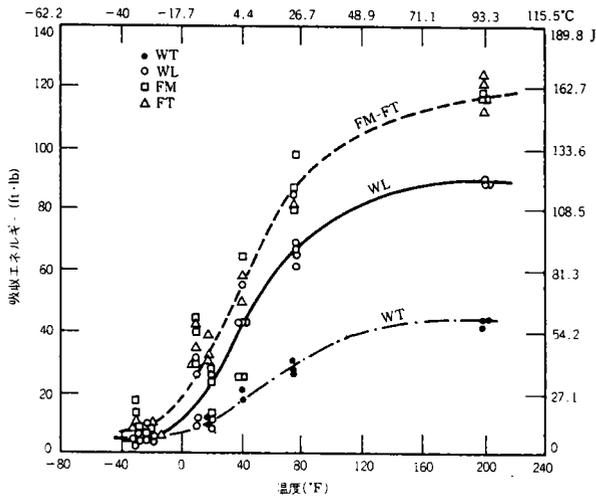


図-7.8 シャルピーVノッチ衝撃試験および遷移温度

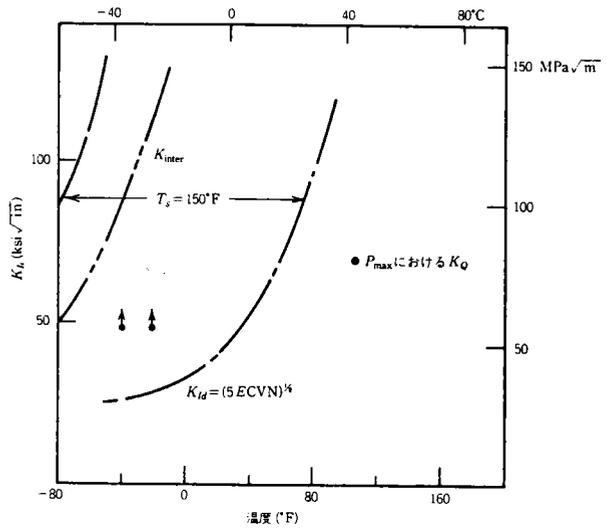


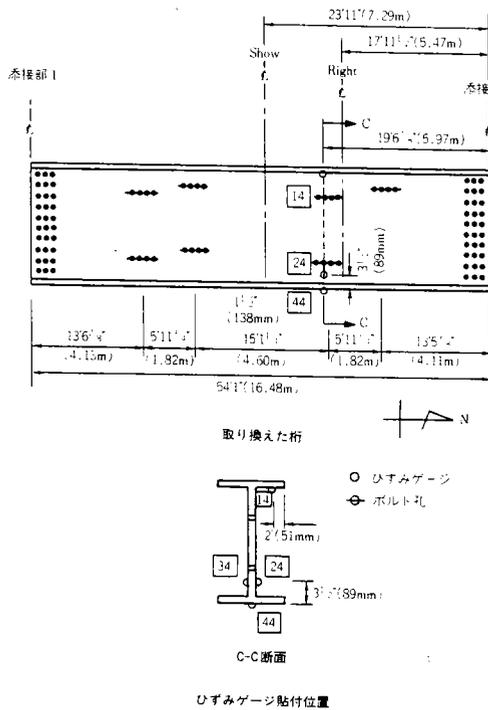
図-7.9 桁腹板の破壊靱性

表-7.2 プラグ溶接部を持つ試験片の引張試験結果

試験片	総断面積 in ² (mm ²)	試験温度 °F (°C)	最大荷重 kips (kN)	総断面積を基準 とした引張強さ ksi (MPa)
10a	1.842 (1188)	-20 (-29)	100.97 (449.1)	54.82 (378.0)
10b	1.822 (1175)	-20 (-29)	105.13 (467.6)	57.70 (397.8)
10c	1.815 (1171)	-20 (-29)	114.9 (511.1)	63.31 (436.5)
10d	1.807 (1166)	-40 (-40)	99.6 (443.0)	55.12 (380.0)

表-7.1 荷重車走行時の2B2桁における測定応力

走行条件	ゲージ位置	引張応力 ksi (MPa)	圧縮応力 ksi (MPa)	応力範囲 ksi (MPa)
1. 徐行 南行き車線 桁2の上を中心	44	2.56 (17.65)	0.34 (2.34)	2.90 (19.99)
	34	2.21 (15.24)	0.28 (1.93)	2.49 (17.77)
2. 徐行 南行き車線 桁2の上にもう半輪	44	2.28 (15.72)	0.34 (2.34)	2.62 (18.06)
	34	1.98 (13.65)	0.28 (1.93)	2.26 (15.58)
3. 30mph 南行き車線 桁2の上を中心	44	2.84 (19.58)	0.62 (4.28)	3.46 (23.86)
	34	2.47 (17.03)	0.56 (3.86)	3.03 (20.89)



ひずみゲージ貼付位置

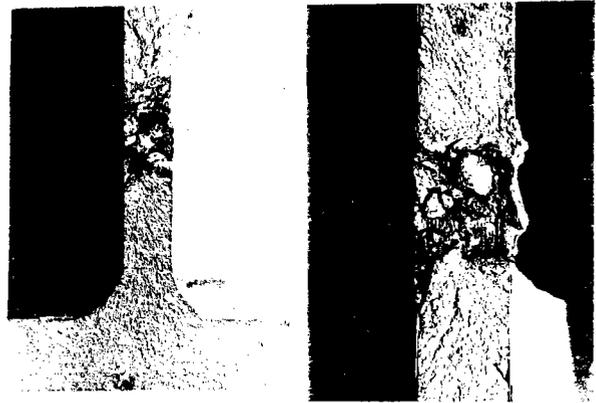


図-7.5 孔埋め溶接部付近の破断面 Illinois 大学の好意による。

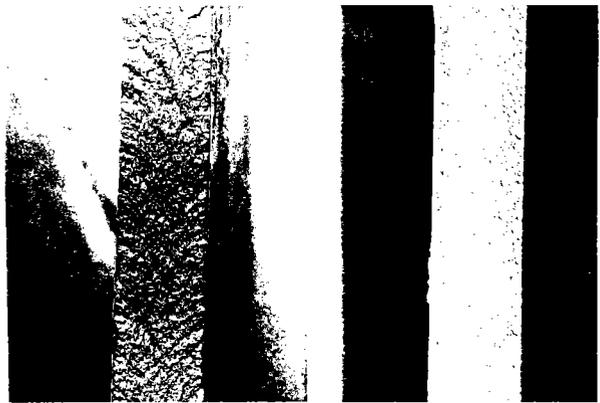


図-7.6 桁腹板の破断面 Illinois 大学の好意による。

橋梁名：Gulf Outlet橋 架設場所：Louisiana州 路線名：New Orleans近く Mississippi川河口	
損傷位置図（全体での位置、全体形状を知ることができるような図） 別添（有）：1枚、無し	
損傷の特徴： 溶接箱断面のタイガーダーの角溶接に直角方向亀裂が発生。サブマージ溶接部を手溶接により大きくした部分に発生。	損傷詳細図 （溶接部から亀裂が発生した場合、溶接部の詳細を含む）
1) 検査日（ 年 月 日計測） 検査担当者（ ） 検査方法（目視、PT, RT, ET, UT, 磁粉グラインダー）	
2) 亀裂の長さ： mm 複数の亀裂の場合：図- 参照	
3) 亀裂の発生点 ☆欠陥との関係の有無（有・無） 欠陥の種類と大きさ （割れ 6. 3mm*7. 8mm） ☆発生領域 母材（一般部、切り欠き部）、溶接部 ☆溶接部の場合 止端部、ルート部、内部 ☆切り欠き部の場合 種類： 応力集中率：	
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か（材料、製作、架設、供用） ☆材料の欠陥 <名称： > ☆施工中に生じた欠陥<名称：溶接割れ > ・溶接に伴う欠陥（溶接割れ） ・工作に伴う欠陥（ドリル孔明、ガス切断、グラインダー、その他< > ・鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷（深さ、底半径等） ・架設中の傷 ☆供用中に生じた欠陥（主に傷、腐食）<名称： >	
5) 材質（材料） ☆切出し試験体による材質確認（有・無）A514 H等級 ★切出した位置 L15~L16 フランジ ウェブ 図（有）（図8. 5）・無） ★試験の種類 ①引張試験（有・無） $\sigma_y = 746 \sim 848$ MPa、 $\sigma_B = 847 \sim 917$ MPa ②シャルピ°-Vノッチ試験（有・無）方法： 結果の図（有）（図8. 7）・無） ③破壊靱性試験（有・無）試験片： 試験で求めた特性値：動的破壊靱性 $K_{id} = 60$ MPa \sqrt{m} （厳密な意味でのKIC試験、荷重-変位データ（J積分）） ④化学分析（有・無）	

☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。	
①発生点	(鋼種： A 5 1 4 鋼)
②既に亀裂が進展した領域	(鋼種： A 5 1 4 鋼)
③亀裂進展の可能性のある領域	(鋼種： A 5 1 4 鋼)
(錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)	
6) 設計示方書	
7) 荷重	
☆設計荷重	
☆実測あるいは推定	
交通量： 推定 $5 * 10^6$ 台のトラック (1965~1979)	
資料の出典	計測年月日 年 月 日
大型車交通量 (混入率)	台/日 (%)
資料の出典	計測年月日 年 月 日
(車種構成)	
8) 発生応力の検討	
☆最大発生応力 (脆性破壊検討用) : 別表 (有・無)	
計測値:	MPa
計測方法 荷重:	、測定位置 別添図 (有()・無)
計算値:	2 5 2 MPa
算出方法 荷重:	死荷重 、測定位置 タイガーダ別添図 (有()・無)
☆発生応力範囲 (疲労損傷検討用) : 別表 (有・無)	
計測値:	MPa
計測方法 荷重:	、測定位置 別添図 (有()・無)
計算値:	4 8 MPa
算出方法 荷重:	活荷重 、測定位置 別添図 (有()・無)
☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図 (有・無)	
☆応力ないし応力範囲の強い二軸性 (有・無) 有の場合別添資料 (有・無)	
9) 発生変位 計測値: 計測方法	
計算値: 計算方法	
10) 竣工年月日 1 9 6 5 年 月 日 供用開始年月日 1 9 6 5 年 1 0 月 日	
供用年数 1 3 年	
11) 亀裂の性格	
①進展性: 有り	
(進展経路の予測を含む)	
②冗長性:	
12) 限界亀裂: 長さ、材料、応力レベルの組合せで表示?、J R の便覧参照、脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、座屈)	

13) 損傷のモデル化			
<input checked="" type="checkbox"/> (有) (図-8. 11)・無) Tpなど (a、亀裂の形を図で説明) K値の計算 楕円形状亀裂としてモデル化 $K = F_e * F_w \sigma \sqrt{\pi a}$ 採用する継手形状			
14) K値の計測 (有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無)			
15) 進展解析 (<input checked="" type="checkbox"/> 有・無)			
亀裂先端0. 13mm進展するために $N = 4.8 * 10^6$ 回繰り返し (亀裂は大きく進展しない)			
16) 環境			
最低使用温度 -7℃ 雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SOx、NOx) しぶき、海岸からの距離 (耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (<input checked="" type="checkbox"/> 有・無)			
コアからフランジおよびウェブ両方の熱影響部にまで亀裂発生。 亀裂面全体に広範囲にわたり腐食生成物が見られた。 破面上にストライエーション状模様が存在し、疲労亀裂進展の可能性が見られる。 亀裂は溶接時あるいは、その直後に生じたものと考えられる。			
18) 処置			
		時 期	内 容 (検査方法なども含む)
詳細調査	<input checked="" type="checkbox"/> 有・無		検査方法 染色浸透検査
経過観察	有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無		観察方法
応急処置	有・無		
補修	<input checked="" type="checkbox"/> 有・無		グラインダー研磨、孔明け、コア抜きにより亀裂を
経過観察	有・無		除去
19) 類似事例の報告 (場所、特徴など)			
事例数: 4 (イタリアのEntella River橋、米国の3橋)			
損傷数:			

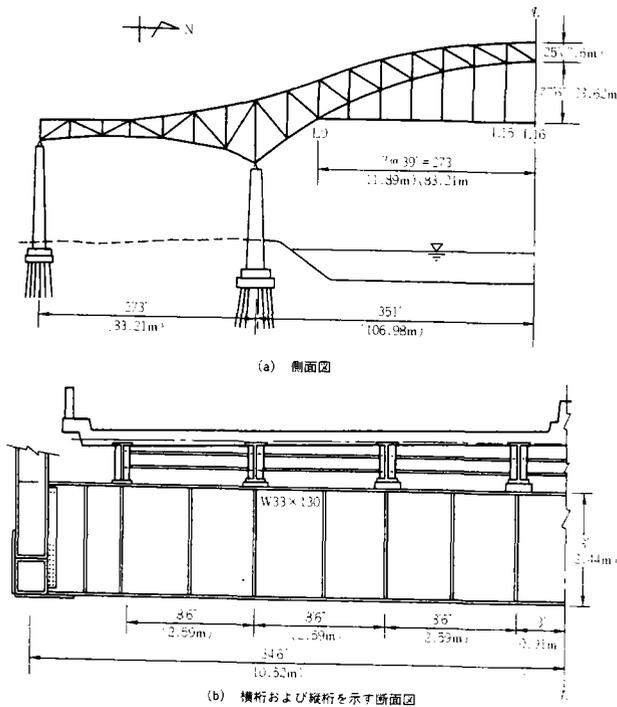
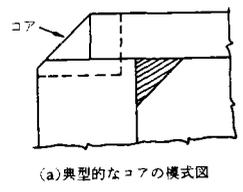
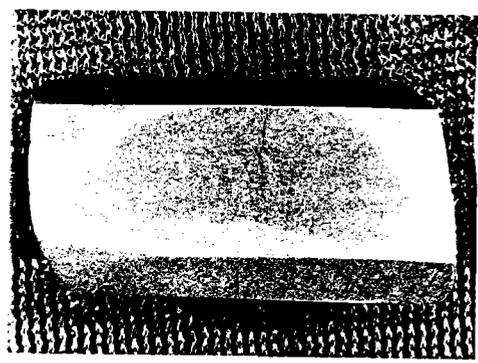


図-8.1 Gulf Outlet 橋の側面図および断面図



(a) 典型的なコアの模式図



(b) 研磨後に亀裂が現れた溶接部のエッチング面
図-8.5 箱断面の角溶接部から切り出したコアの詳細

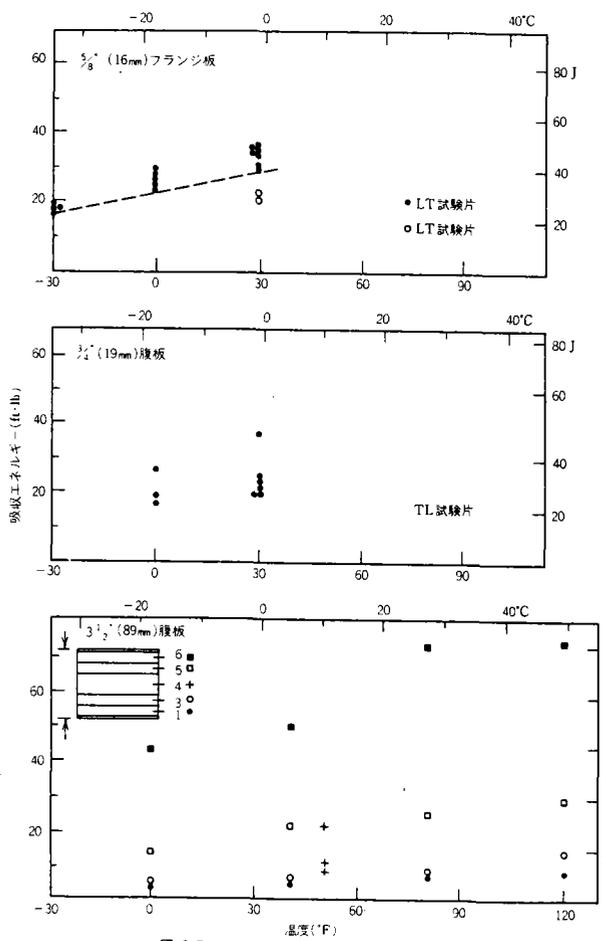


図-8.7 シャルピー-Vノッチ試験結果のまとめ

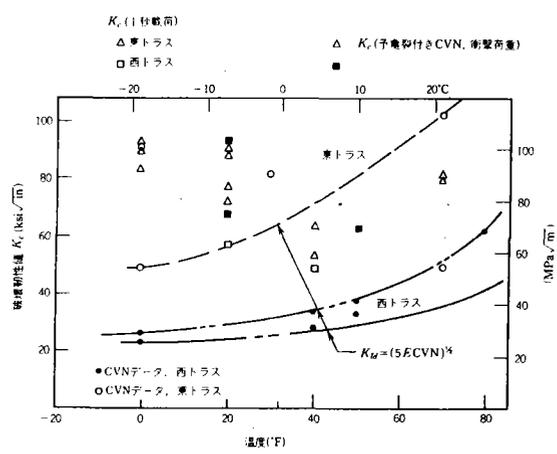


図-8.8 CVN試験から求めた動靱性値とコンパクトテンション (CT) および子亀裂付き CVN 試験片の低温ゆげ試験結果との比較

$$K = F_c F_w \sigma \sqrt{\pi a}$$

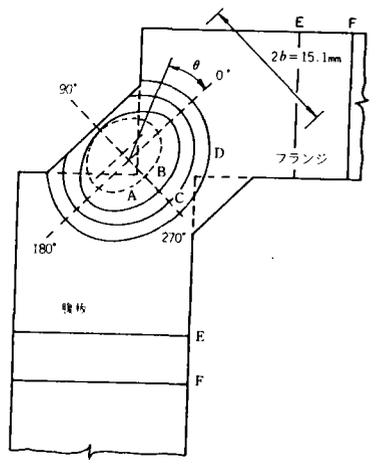


図-8.11 角溶接部の理想化された外接亀裂

亀裂の性格評価のための整理表

9-1:1/4

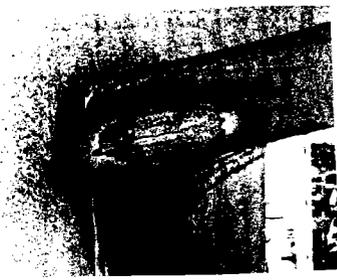
橋梁名：Ft. Duquesne橋 路線名： 架設場所：米国. Pennsylvania州	
損傷位置図（全体での位置、全体形状を知ることができるような図） 別添（有り）： 枚 、無し）図-9. 1,2,5,6,9,10	
損傷の特徴： 箱型ラーメン橋脚の横梁と柱の接合部上部コーナーの柱あるいは梁フランジにラメラティア状の亀裂。 3ヶ所に溶接止端の亀裂。	損傷詳細図 （溶接部から亀裂が発生した場合、溶接部の詳細を含む） （亀裂の発生および進展経路が分かる図）
1) 検査日 （1978年 9月20日計測） 検査担当者（ ） 検査方法（目視、PT,RT,ET,UT,磁粉 グライNDER）	
2) 亀裂の長さ： mm 複数の亀裂の場合：図-9. 5, 9. 6参照	
3) 亀裂の発生源 ☆欠陥との関係の有無（有・無） 欠陥の種類と大きさ（ ） （大きさは測定値のみ記入） ☆発生領域 母材（一般部、切り欠き部）、溶接部 ☆溶接部の場合（溶接部近傍） 止端部、ルート部、内部 ☆切り欠き部の場合 種類： 応力集中率：	
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か（材料、製作、架設、供用） ☆材料の欠陥 <名称： > ☆施工中に生じた欠陥<名称： > ・溶接に伴う欠陥（ ） ・工作に伴う欠陥（ドリル孔明、ガス切断、グライNDER、その他< >） ・鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷（深さ、底半径等） ・架設中の傷 ☆供用中に生じた欠陥（主に傷、腐食）<名称： >	
5) 材質（材料） ☆切出し試験体による材質確認（有・無） ★切出した位置 図（有・無） ★試験の種類 ①引張試験（有・無） $\sigma_y =$ MPa、 $\sigma_B =$ MPa ②シャルピ-Vノッチ試験（有・無）方法： 結果の図（有 図・無） ③破壊靱性試験（有・無） 試験片： 試験で求めた特性値： （厳密な意味でのK I C試験、荷重-変位データ（J積分）） ④化学分析（有・無）	

図-9.5 橋脚SB3の横梁-柱接合における横梁上フランジの亀裂

図-9.6 橋脚SB3の横梁圧縮フランジ亀裂

☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。	
①発生点	(鋼種： AS17)
②既に亀裂が進展した領域	(鋼種： ")
③亀裂進展の可能性のある領域	(鋼種： ")
(錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)	
6) 設計示方書 AASHTO	
7) 荷重	
☆設計荷重	
☆実測あるいは推定	
交通量：	台/日
資料の出典	計測年月日 年 月 日
大型車交通量(混入率)	425 台/日 (%)
資料の出典	計測年月日 1975年 月 日
(車種構成)	
8) 発生応力の検討	
☆最大発生応力(脆性破壊検討用) : 別表(有・無)	
計測値：	MPa
計測方法 荷重：	測定位置 別添図(有()・無)
計算値：	MPa
算出方法 荷重：	測定位置 別添図(有()・無)
☆発生応力範囲(疲労損傷検討用) : 別表(有・無)	
計測値：	28 MPa (最大, Srminer: 14 MPa)
計測方法 荷重：	測定位置 別添図(有()・無)
計算値：	MPa
算出方法 荷重：	測定位置 別添図(有()・無)
☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図(有・無)	
☆応力ないし応力範囲の強い二軸性(有・無) 有の場合別添資料(有・無)	
9) 発生変位	計測値： 計測方法 pending
	計算値： 計算方法
10) 竣工年月日	1968年 月 日 供用開始年月日 1968年 月 日
供用年数	10年
11) 亀裂の性格	
①進展性：止端部の亀裂がラメティアと一体になった場合、進展性あり。 (進展経路の子測を含む)	
②冗長性：あり(不静定次数が高いため)	
12) 限界亀裂：長さ、材料、応力レベルの組合せで表示?、JRの便覧参照、脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、座屈)	

13) 損傷のモデル化 <input checked="" type="checkbox"/> (有) <input type="checkbox"/> (無) Tfなど (a、亀裂の形を図で説明) K値の計算 コーナーの深い亀裂を側面亀裂と考える。 採用する継手形状			
14) K値の計測 (有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無)			
15) 進展解析 (<input checked="" type="checkbox"/> 有・無)			
16) 環境 最低使用温度 雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SO _x 、NO _x) しぶき、海岸からの距離 (耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無)			
18) 処置		時 期	内 容 (検査方法なども含む)
詳細調査	有・無		検査方法
経過観察	有・無		観察方法
応急処置	<input checked="" type="checkbox"/> 有・無		ウェブのコーナー部にスロットホール。
補修	<input checked="" type="checkbox"/> 有・無	1981	ウェブ、上フランジにボルト添接。
経過観察	有・無		
19) 類似事例の報告 (場所、特徴など) 事例数： 損傷数：			

亀裂が複数ある場合の亀裂の長さの情報

亀裂箇所、位置 ※	亀裂の長さ、破断についての情報
梁・柱接合部フランジ	製作時に発生、圧縮フランジのものは進展しない。
同グループ溶接部	止端部に亀裂、熱影響部に進展。

※箇所数で報告されている場合と、図示した番号により報告されている場合があるので、報告形態に応じて整理する。図示した番号による場合（図- 参照）

亀裂進展域の材料

材 料	使 用 場 所	亀裂との関係 ※
A517	比較的長いスパンの橋脚。	ラメラティアはA517のみ

※亀裂発生位置、亀裂進展域、亀裂進展が予測され領域
 （発生） （進展） （進展予測）

亀裂部の応力範囲

亀裂番号 ※	対象部	計測値 (MPa)	計算値 (MPa)	計測方法	計算方法 (荷重含む)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

※図- 参照



(a)塗装を除去する前の亀裂



(b)塗装を除去した後の亀裂

図-9.5 橋脚SB3の横梁一柱接合部における横梁上フランジの亀裂



(a)塗装を除去する前の亀裂



(b)浸透探傷検査された後の亀裂

図-9.5 橋脚SB3の横梁圧縮フランジの亀裂

亀裂の性格評価のための整理表

10-1:1/3

橋梁名: Lehigh River橋とCanal橋 路線名: U・S・22号線	架設場所: Pennsylvania州 Bethlehem市付近の河川上
損傷位置図(全体での位置、全体形状を知ることができるような図) 別添(有り): 1枚、無し) 図-10.1,2,3,4,5,6,9,10	
損傷の特徴: 主桁を挟んで横桁とブラケットを接合する連結板数個所に疲労亀裂。	損傷詳細図 (溶接部から亀裂が発生した場合、溶接部の詳細を含む) (亀裂の発生および進展経路が分かる図)
1) 検査日 (1972年 月 日計測) 点検時 検査担当者(州交通局の検査官) 検査方法 (目視、PT, RT, ET, UT, 磁粉グラインダー) -- 落橋 解析結果では併用開始6~7年目位から	組立時に連結板とブラケットを固定するために行なわれる仮付け溶接部を起点として連結板の端部から発生していた。
2) 亀裂の長さ: mm 複数の亀裂の場合: 図-10.4 参照 54の連結板のうち20枚、幾つかは全巾貫通	
3) 亀裂の発生点 ☆欠陥との関係の有無 (有・無) 欠陥の種類と大きさ (仮付溶接) (大きさは測定値のみ記入) ☆発生領域 母材(一般部、切り欠き部)、溶接部 ☆溶接部の場合 止端部、ルート部、内部 ☆切り欠き部の場合 種類: 応力集中度:	
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か(材料、製作、架設、供用) ☆材料の欠陥 <名称: > ☆施工中に生じた欠陥<名称: > ・溶接に伴う欠陥 () ・工作に伴う欠陥 (ドリル孔明、ガス切断、グラインダー、その他< >) ・鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷(深さ、底半径等) ・架設中の傷 ☆供用中に生じた欠陥(主に傷、腐食) <名称: >	図-10.4 仮付け溶接部から発生した連結板の亀裂
5) 材質(材料) ☆切出し試験体による材質確認(有・無) ★切出した位置 図(有・無) ★試験の種類 ①引張試験(有・無) $\sigma_y =$ MPa、 $\sigma_B =$ MPa ②シャルピ-Vノッチ試験(有・無) 方法: 結果の図(有 図・無) ③破壊靱性試験(有・無) 試験片: 試験で求めた特性値: (厳密な意味でのK I C試験、荷重-変位データ(J積分)) ④化学分析(有・無)	

☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。		
①発生点	(鋼種： ASTM A7))
②既に亀裂が進展した領域	(鋼種： //))
③亀裂進展の可能性のある領域	(鋼種： //))
(錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)		
6) 設計示方書 AASHTO (米国州道路交通局)		
7) 荷重 ☆設計荷重 HS20 ☆実測あるいは推定 交通量： 約3,700台/日 (1953~1974の調査) 資料の出典 図-10.10 計測年月日1972~76年 月 日 大型車交通量 (混入率) 台/日 (%) 資料の出典 計測年月日 年 月 日 (車種構成)		
8) 発生応力の検討 ☆最大発生応力 (脆性破壊検討用) : 別表 (有・無) 計測値： MPa 183 (亀裂の解析から) 計測方法 荷重： 、測定位置 別添図 (有()・無) 計算値： MPa 算出方法 荷重： 、測定位置 別添図 (有()・無) ☆発生応力範囲 (疲労損傷検討用) : 別表 (有・無) 計測値： MPa 41~83 (亀裂の解析から) 計測方法 荷重： 、測定位置 別添図 (有()・無) 計算値： MPa 算出方法 荷重： 、測定位置 別添図 (有()・無) ☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図 (有・無) ☆応力ないし応力範囲の強い二軸性 (有・無) 有の場合別添資料 (有・無)		
9) 発生変位	計測値： 計測方法 pending 計算値： 計算方法	
10) 竣工年月日	1953年 月 日	供用開始年月日 1953年11月 日 供用年数 19.5年
11) 亀裂の性格 ①進展性：低い、主桁上フランジの位置で面外変位により (連結板に面内曲げ応力 (進展経路の予測を含む) が発生し) 仮付け溶接の端部から疲労亀裂がゆっく ②冗長性： あり りと進展した。		
12) 限界亀裂： 長さ、材料、応力レベルの組合せで表示?、JRの便覧参照、脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、座屈)		

13) 損傷のモデル化			
図 (有		・無) Tf など (a、亀裂の形を図で説明)	
K 値の計算		片側貫通亀裂を有する帯板にモデル化。	
採用する継手形状		板曲げを対象。	
14) K 値の計測 (有・無)			
15) 進展解析 (有・無)			
13) 参照			
16) 環境			
最低使用温度			
雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SO _x 、NO _x)			
しぶき、海岸からの距離 (耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (有・無)			
18) 処置			
		時 期	内 容 (検査方法なども含む)
詳細調査	有・無		検査方法 実際の交通条件や計測した応力履歴
経過観察	有・無		観察方法
応急処置	有・無		
補修	有・無		
経過観察	有・無		
19) 類似事例の報告 (場所、特徴など)			
事例数： 文献 10・1～3			
損傷数： 同州 Harrisbvr g 近郊の South 橋			

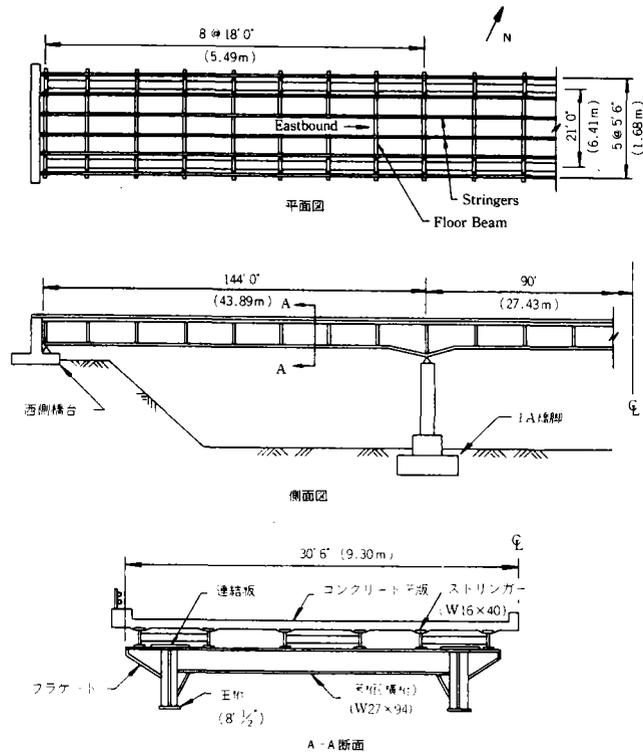


図-10.1 Lehigh Canal 橋の平面図、側面図および断面図



図-10.2 Lehigh Canal 橋 側面からの外観

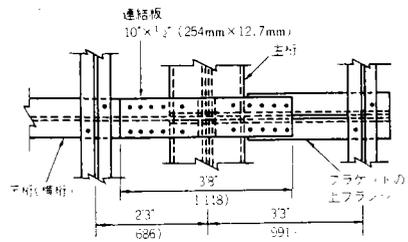


図-10.3 床組ブラケットと主桁を接合する連結板の詳細



図-10.4 仮付け溶接部から発生した連結板の亀裂

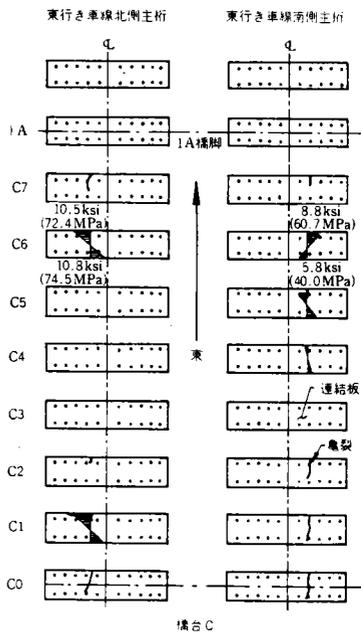


図-10.5 東行き車線側西端支間における連結板に生じた亀裂の位置と計測された応力の模式図

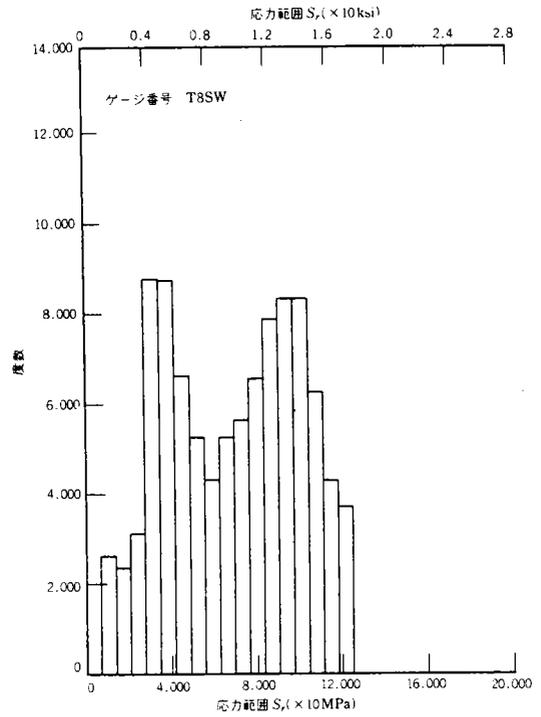


図-10.9 ゲージ T8SW における応力範囲ヒストグラム

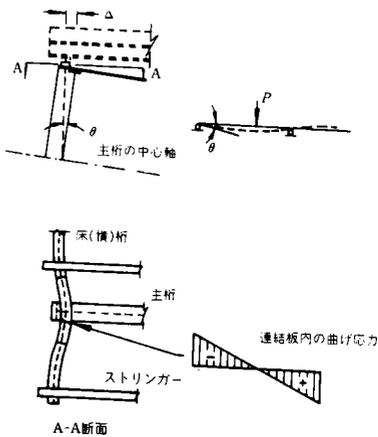


図-10.6 主桁の上フランジの橋軸方向への移動とそれにより生じる連結板の水平方向面内曲げ

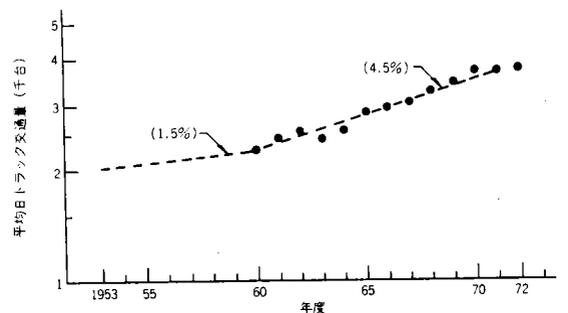
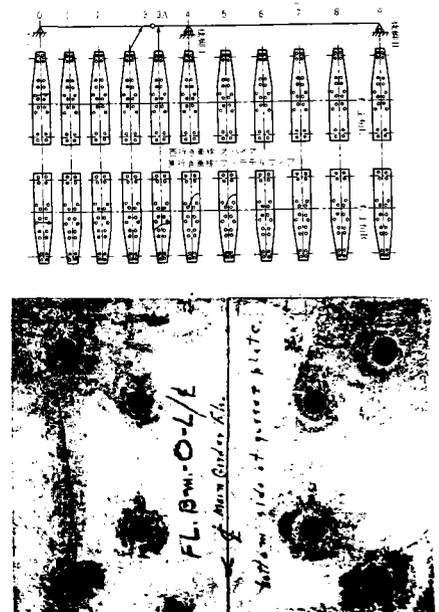


図-10.10 Lehigh Canal 橋および River 橋における ADTT (平均日トラック交通量)

亀裂の性格評価のための整理表

10-2:1/3

橋梁名: Allegheny River橋 路線名: Pennsylvaniaターンパイク		架設場所: Allegheny川を渡る地点	
損傷位置図 (全体での位置、全体形状を知ることができるような図) 別添 (有り): 枚、無し) 図-10, 10, 13~17, 20, 21			
損傷の特徴: 主桁を挟んで横桁とブラケットを接合する連結板 数個所に疲労亀裂。		損傷詳細図 (溶接部から亀裂が発生した場合 、溶接部の詳細を含む) (亀裂の発生および進展経路が分 かる図) 外側の第一番目あるいは内側第一 番目の縦桁と連結板を止めている 幾つかのリベットも破損し、連結 板も幾つか破損している。 図-10. 16~17	
1) 検査日 (1971年 月 日計測) 点検時 検査担当者 (Pennsy道路公社) 検査方法 (目視、PT, RT, ET, UT, 磁粉 グライNDER)			
2) 亀裂の長さ: 127mm (3A) 支点近傍 複数の亀裂の場合: 図-10. 16, 10. 17参照			
3) 亀裂の発生点 ☆欠陥との関係の有無 (有・無) 欠陥の種類と大きさ (127mm) (大きさは測定値のみ記入) ☆発生領域 母材 (一般部、切り欠き部)、溶接部 ☆溶接部の場合 止端部、ルート部、内部 ☆切り欠き部の場合 種類: 孔 応力集中率:			
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か (材料、製作、架設、供用) ☆材料の欠陥 <名称: > ☆施工中に生じた欠陥 <名称: > ・溶接に伴う欠陥 () ・工作に伴う欠陥 (ドリル孔明、ガス切断、グライNDER、その他 < >) ・鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷 (深さ、底半径等) ・架設中の傷 ☆供用中に生じた欠陥 (主に傷、腐食) <名称: >			
5) 材質 (材料) ☆切出し試験体による材質確認 (有・無) ★切出した位置 図 (有・無) ★試験の種類 ①引張試験 (有・無) $\sigma_y =$ MPa、 $6B =$ MPa ②シャルピ-Vノッチ試験 (有・無) 方法: 結果の図 (有 図・無) ③破壊靱性試験 (有・無) 試験片: 試験で求めた特性値: (厳密な意味でのK I C試験、荷重-変位データ (J積分)) ④化学分析 (有・無)			

☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。	
①発生点	(鋼種： A7鋼)
②既に亀裂が進展した領域	(鋼種： ")
③亀裂進展の可能性のある領域	(鋼種： ")
(錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)	
6) 設計示方書 AASHO	
7) 荷重	
☆設計荷重	HS20
☆実測あるいは推定	
交通量：	台/日
資料の出典	計測年月日 年 月 日
大型車交通量(混入率)	台/日 (%)
資料の出典	計測年月日 年 月 日
(車種構成) 89KNを超える大型車	
8) 発生応力の検討	
☆最大発生応力(脆性破壊検討用) : 別表(有・無)	
計測値：	MPa
計測方法 荷重：	、測定位置 別添図(有()・無)
計算値：	MPa
算出方法 荷重：	、測定位置 別添図(有()・無)
☆発生応力範囲(疲労損傷検討用) : 別表(有 [○] ・無)	
計測値：	MPa 83~124
計測方法 荷重：	、測定位置 別添図(有()・無)
計算値：	MPa
算出方法 荷重：	、測定位置 別添図(有()・無)
☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図(有 [○] ・無)	
☆応力ないし応力範囲の強い二軸性(有・無) 有の場合別添資料(有・無)	
9) 発生変位	計測値： 計測方法 pending 計算値： 計算方法
10) 竣工年月日	1952年 月 日 供用開始年月日 年 月 日
供用年数	19年
11) 亀裂の性格	
①進展性： (進展経路の子測を含む)	
②冗長性：	
12) 限界亀裂： 長さ、材料、応力レベルの組合せで表示?、JRの便覧参照、脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、座屈)	

13) 損傷のモデル化 図(有()・無) Tfなど(a、亀裂の形を図で説明) K値の計算 採用する継手形状			
14) K値の計測 (有・無)			
15) 進展解析 (有・無)			
16) 環境 最低使用温度 雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SO _x 、NO _x) しぶき、海岸からの距離(耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (有・無)			
18) 処置		時 期	内 容 (検査方法なども含む)
詳細調査	有・無		検査方法
経過観察	有・無		観察方法
応急処置	有・無		
補修	有・無		
経過観察	有・無		
19) 類似事例の報告 (場所、特徴など) 事例数： 損傷数：			



図-10.13 Allegheny River 橋の端部支間と第2支間

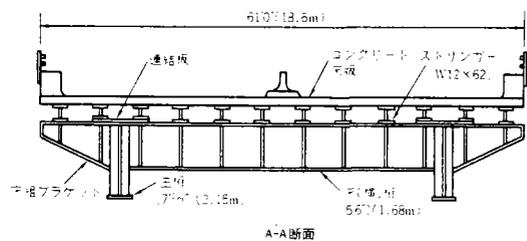
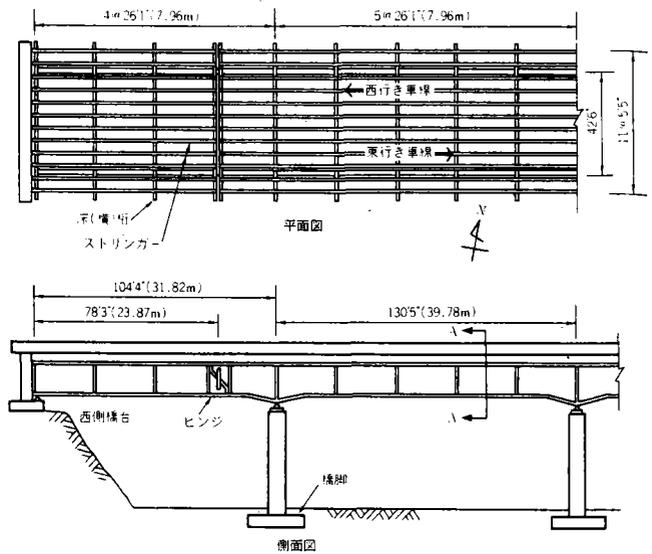


図-10.14 Allegheny River 橋端支間および第2支間の平面、側面および断面図

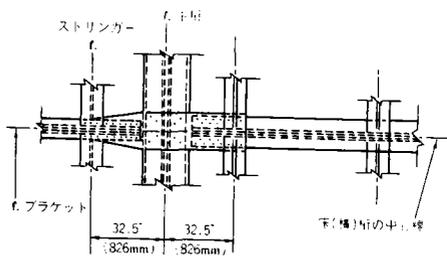


図-10.15 連結板の詳細

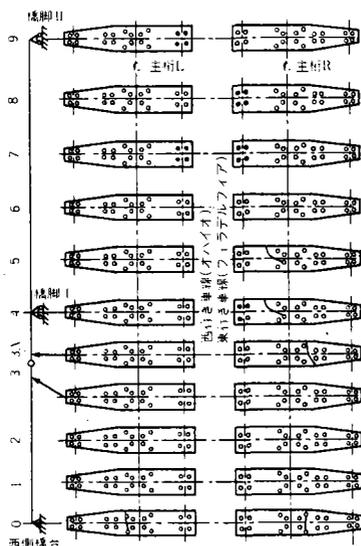


図-10.16 試験を行った支間の亀裂を生じた連結板と弛んだリベット (●印が弛んだリベット)

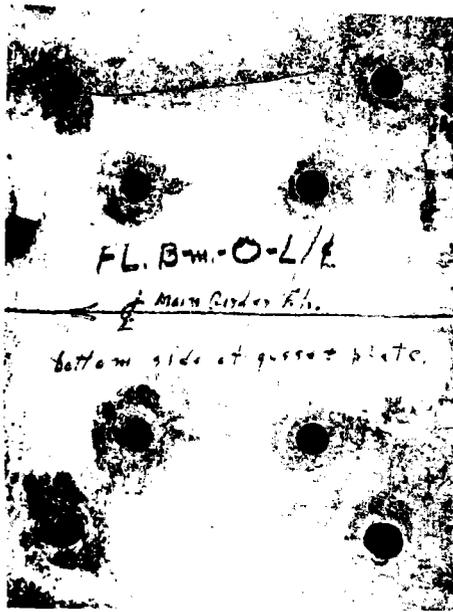


図-10.17 Allegheny River 橋の典型的な亀裂を生じた連結板

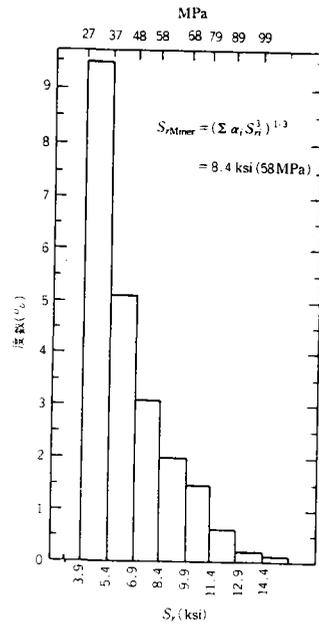


図-10.18 橋脚 1 近くの連結板の応力
頻度分布 (ヒストグラム)

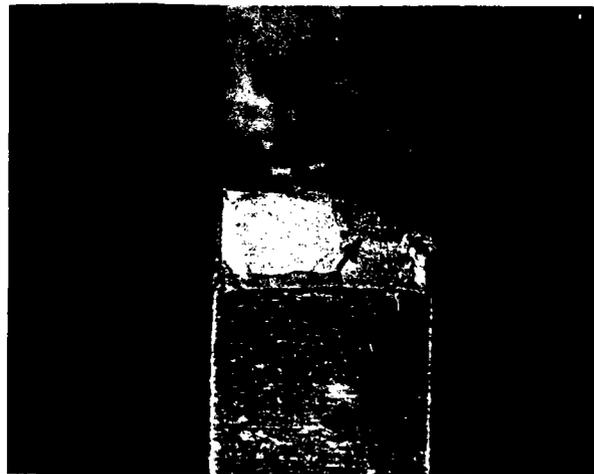


図-10.20 リベット孔縁の小さな疲労亀裂

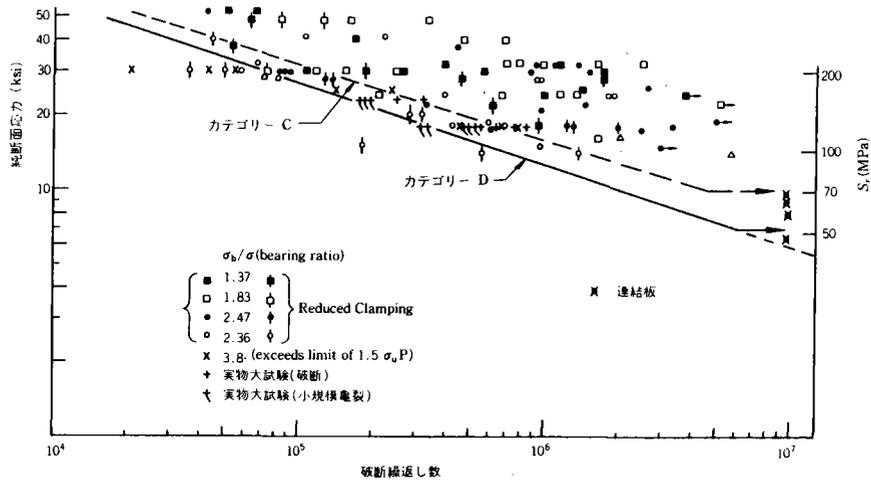


図-10.21 連結板での実測応力と疲労試験結果

橋梁名：Cuyahoga County橋 路線名：I-90	架設場所：Ohio州Cleveland
損傷位置図（全体での位置、全体形状を知ることができるような図） 別添（有り）： 枚、無し） 図-2,3,9,10,11,12	
損傷の特徴： 垂直補剛材端と下フランジ間のウェブギャップに面外曲げによる亀裂。亀裂はウェブ側、補剛材側止端の2種類。	損傷詳細図 （溶接部から亀裂が発生した場合、溶接部の詳細を含む） （亀裂の発生および進展経路が分かる図）
1) 検査日 （1973年 5月1~3日計測） 検査担当者（州交通局担当官） 検査方法（目視、PT, RT, ET, UT, <u>磁粉</u> グライNDER）	
2) 亀裂の長さ： 約5mm 複数の亀裂の場合：図-11.2参照	
3) 亀裂の発生点 ☆欠陥との関係の有無（有・無） 欠陥の種類と大きさ（輸送中の振動による亀裂） （大きさは測定値のみ記入） ☆発生領域 母材（一般部、切り欠き部）、 <u>溶接部</u> ☆溶接部の場合 <u>止端部</u> 、ルート部、内部 ☆切り欠き部の場合 種類： 応力集中率：	<p>図-11.3 補剛材端部に発生した亀裂</p>
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か（材料、製作、 <u>架設</u> 、供用） ☆材料の欠陥 <名称： > ☆施工中に生じた欠陥<名称： > ・溶接に伴う欠陥（ ） ・工作に伴う欠陥（ドリル孔明、ガス切断、グライNDER、その他< >） □鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷（深さ、底半径等） ・架設中の傷（輸送中の桁の横ゆれによるウェブ面外曲げにより亀裂が生じた） ☆供用中に生じた欠陥（主に傷、腐食）<名称： >	図-11.3 補剛材端部に発生した亀裂
5) 材質（材料） ☆切出し試験体による材質確認（有・無） ★切出した位置 図（有・無） ★試験の種類 ①引張試験（有・無） $\sigma_y =$ MPa、 $\sigma_B =$ MPa ②シャルピ-Vノッチ試験（有・無）方法： 結果の図（有 図・無） ③破壊靱性試験（有・無） 試験片： 試験で求めた特性値： （厳密な意味でのK I C試験、荷重-変位データ（J積分）） ④化学分析（有・無）	

☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。 ①発生点 (鋼種： ウエブの場合はA36) ②既に亀裂が進展した領域 (鋼種： ") ③亀裂進展の可能性のある領域 (鋼種： ") (錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)	
6) 設計示方書 AASHTO Ohio州交通局の補足規定	
7) 荷重 ☆設計荷重 <input checked="" type="checkbox"/> 実測あるいは推定 輸送中の面外曲げ振動によるくり返し数 50,000回と推定 交通量： _____ 台/日 資料の出典 _____ 計測年月日 _____ 年 月 日 大型車交通量 (混入率)： _____ 台/日 (_____ %) 資料の出典 _____ 計測年月日 _____ 年 月 日 (車種構成) _____	
8) 発生応力の検討 ☆最大発生応力 (脆性破壊検討用) : 別表 (有・無) 計測値： _____ MPa 計測方法 荷重： _____ 、測定位置 _____ 別添図 (有()・無) 計算値： _____ MPa 算出方法 荷重： _____ 、測定位置 _____ 別添図 (有()・無) ☆発生応力範囲 (疲労損傷検討用) : 別表 (有・無) 計測値： _____ MPa 計測方法 荷重： _____ 、測定位置 _____ 別添図 (有()・無) 計算値： 371 MPa~460 MPa (ストライエーション間隔から逆算) 算出方法 荷重： _____ 、測定位置 _____ 別添図 (有()・無) ☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図 (有・無) ☆応力ないし応力範囲の強い二軸性 (有・無) 有の場合別添資料 (有・無)	
9) 発生変位 計測値： _____ 計測方法 _____ pending 計算値： _____ 計算方法 _____	
10) 竣工年月日 1973年 月 日 供用開始年月日 _____ 年 月 日 供用年数 0年	
11) 亀裂の性格 ①進展性：少い (亀裂は供用中の曲げ応力と平行) (進展経路の予測を含む) ②冗長性：低い	
12) 限界亀裂：長さ、材料、応力レベルの組合せで表示?、JRの便覧参照、脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、座屈)	

13) 損傷のモデル化 <input checked="" type="checkbox"/> (有) (<input type="checkbox"/>) T _f など (a、亀裂の形を図で説明) K値の計算 採用する継手形状			
14) K値の計測 (<input checked="" type="checkbox"/> ・無) ストライエーション間隔から $\Delta K_r = 30 \sim 43 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$			
15) 進展解析 (<input checked="" type="checkbox"/> ・無) 初期欠陥 $a_i = 0.75 \text{ mm}$ から最大亀裂深さ5mmまで、 $N = 29,300 \sim 50,000$ 回			
16) 環境 最低使用温度 雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SO _x 、NO _x) しぶき、海岸からの距離 (耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (<input checked="" type="checkbox"/> ・無) 亀裂はウェブ両端に存在し、ウェブギャップ部が面外にねじられた時の主引張応力に直角の方向に曲りながら進展している。 フラクトグラフィーによると、ストライエーション間隔： $5 \sim 10 \mu\text{in}$ ($1.3 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ mm}$)。 <div style="text-align: right;">図-11.9</div>			
17) 処置		時 期	内 容 (検査方法なども含む)
詳細調査	有・無		検査方法
経過観察	有・無		観察方法
応急処置	有・無		<div style="text-align: right;">図-11.11</div>
補修	<input checked="" type="checkbox"/> ・無		溶接部内亀裂：研削、ウェブ内亀裂：ストップホール+ホルト
経過観察	有・無		
18) 類似事例の報告 (場所、特徴など) 事例数： 損傷数：			

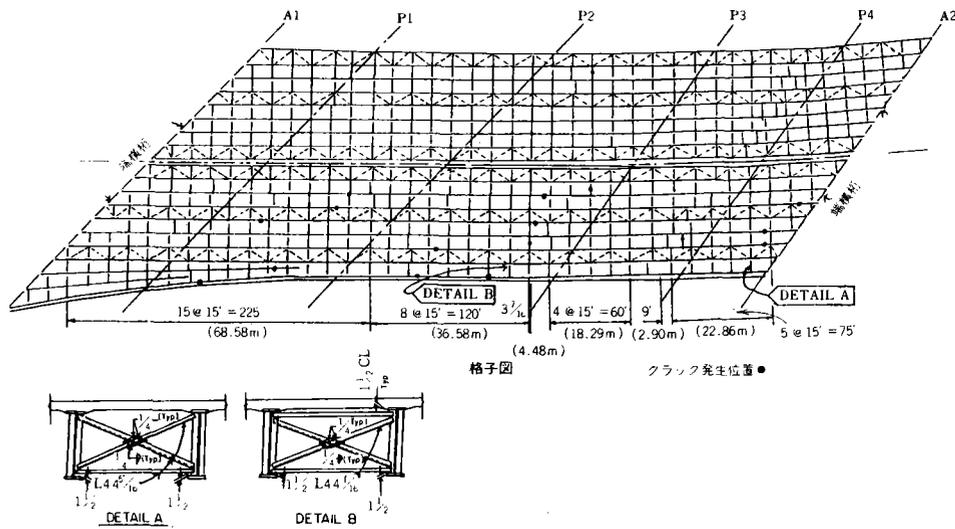


図-11.2 Cuyahoga County 橋の格子構造と対横構

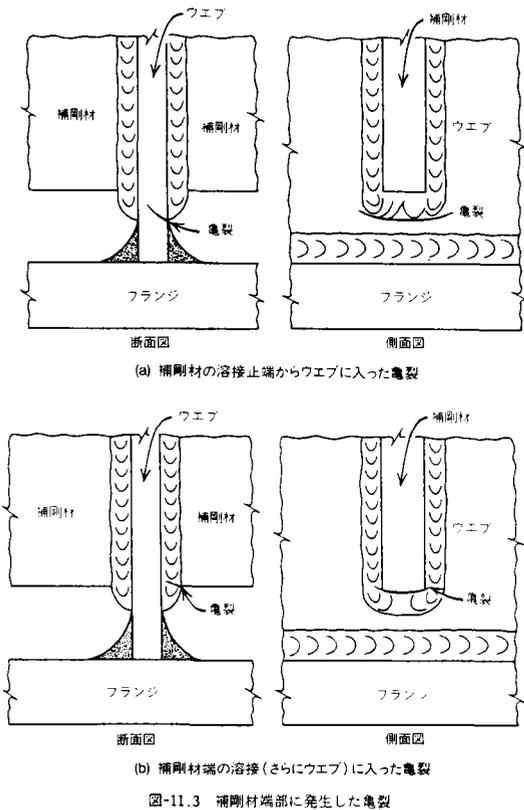


図-11.3 補剛材端部に発生した亀裂

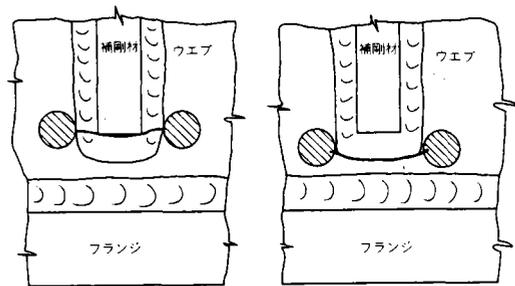


図-11.11 補剛材下端の2タイプの亀裂の補修方法



図-11.9 切断面をニッチングしたもののウェブと溶接部に亀裂が見える

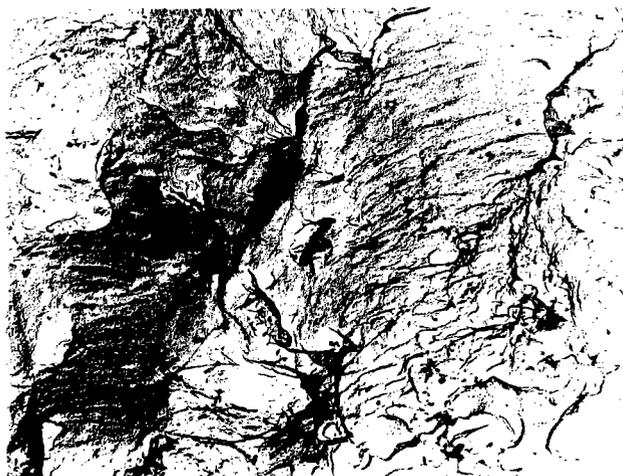
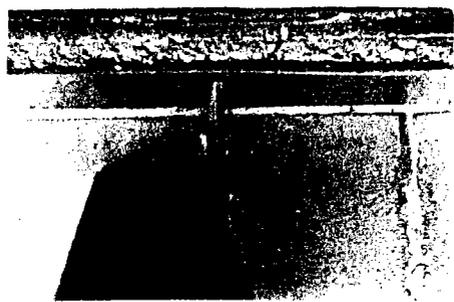


図-11.10 ウェブに入った疲労亀裂のストライケーション 7,500psi

亀裂の性格評価のための整理表

13-1:1/4

橋梁名：Belle Fourche River橋 路線名：U・S・212号線		架設場所：South Dakota州 Belle Fourche	
損傷位置図（全体での位置、全体形状を知ることができるような図） 別添（有り）：1枚、無し）図-13.6			
損傷の特徴： 正曲げモーメント領域圧縮フランジ近くのウェブギャップ。中間対傾構取付垂直補剛材の上端に複数の亀裂。		損傷詳細図 （溶接部から亀裂が発生した場合、溶接部の詳細を含む） （亀裂の発生および進展経路が分かる図）	
1) 検査日（1976年10月 日計測） 検査担当者（ ） 検査方法（目視、PT, RT, ET, UT, 磁粉グラインダー）			
2) 亀裂の長さ： mm 複数の亀裂の場合：図-13.9参照			
3) 亀裂の発生点 ☆欠陥との関係の有無（有・無） 欠陥の種類と大きさ（ ） （大きさは測定値のみ記入） ☆発生領域 母材（一般部、切り欠き部）、溶接部 ☆溶接部の場合 止端部、ルート部、内部 ☆切り欠き部の場合 種類： 応力集中率：			
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か（材料、製作、架設、供用） ☆材料の欠陥 <名称： > ☆施工中に生じた欠陥<名称： > ・溶接に伴う欠陥（ ） ・工作に伴う欠陥（ドリル孔明、ガス切断、グラインダー、その他< >） ・鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷（深さ、底半径等） ・架設中の傷 ☆供用中に生じた欠陥（主に傷、腐食）<名称： >		図-13.9 フランジと腹板の取付け溶接に沿った亀裂とダイアフラム連結板の端部に発生した疲労亀裂 （South Dakota州交通局提供）	
5) 材質（材料） ☆切出し試験体による材質確認（有・無） ★切出した位置（有・無） ★試験の種類 ①引張試験（有・無） $\sigma_y =$ MPa、 $\sigma_B =$ MPa ②シャルピ-Vノッチ試験（有・無）方法： 結果の図（有 図・無） ③破壊靱性試験（有・無）試験片： 試験で求めた特性値： （厳密な意味でのK I C試験、荷重-変位データ（J積分）） ④化学分析（有・無）			

☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。	
①発生点	(鋼種： A317)
②既に亀裂が進展した領域	(鋼種：)
③亀裂進展の可能性のある領域	(鋼種：)
(錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)	
6) 設計示方書	
1953年 H20-44トラック荷重に対する South Dakota州の基準	
7) 荷重	
☆設計荷重	
☆実測あるいは推定	
交通量：	280 台/日
資料の出典	計測年月日 年 月 日
大型車交通量 (混入率)	台/日 (%)
資料の出典	計測年月日 年 月 日
(車種構成)	
8) 発生応力の検討	
☆最大発生応力 (脆性破壊検討用) : 別表 (有・無)	
計測値：	MPa
計測方法 荷重：	測定位置 別添図 (有()・無)
計算値：	MPa
算出方法 荷重：	測定位置 別添図 (有()・無)
☆発生応力範囲 (疲労損傷検討用) : 別表 (有・無)	
計測値：	MPa
計測方法 荷重：	測定位置 別添図 (有()・無)
計算値：	MPa
算出方法 荷重：	測定位置 別添図 (有()・無)
☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図 (有・無)	
☆応力ないし応力範囲の強い二軸性 (有・無) 有の場合別添資料 (有・無)	
9) 発生変位	計測値： 計測方法 pending
	計算値： 計算方法
10) 竣工年月日	年 月 日 供用開始年月日 1958年 月 日
供用年数	18年
11) 亀裂の性格	
①進展性： なし	
(進展経路の予測を含む)	
②冗長性： あり	
12) 限界亀裂： 長さ、材料、応力レベルの組合せで表示?、JRの便覧参照、脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、座屈)	

13) 損傷のモデル化 <input checked="" type="checkbox"/> (有) <input type="checkbox"/> (無) Tfなど (a、亀裂の形を図で説明) K値の計算 採用する継手形状			
14) K値の計測 (有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無)			
15) 進展解析 (有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無)			
16) 環境 最低使用温度 雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SO _x 、NO _x) しぶき、海岸からの距離 (耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (有・ <input checked="" type="checkbox"/> 無)			
17) 処置		時 期	内 容 (検査方法なども含む)
詳細調査	有・無		検査方法
経過観察	有・無		観察方法
応急処置	有・無		(図-13.10)
補修	<input checked="" type="checkbox"/> 有・無		ストップホール(φ19)、補剛材を上フランジに隅肉溶接
経過観察	有・無		
18) 類似事例の報告 (場所、特徴など) 事例数： 損傷数：			

亀裂が複数ある場合の亀裂の長さの情報

亀裂箇所、位置 ※	亀裂の長さ、破断についての情報
上フランジとの溶接位置	ウエブとフランジとの溶接に平行に、ウエブ側止端に沿って発生
補剛材上端の溶接止端	ウエブ側止端に発生、45° 方向に10数cm進展後上向きに曲る
〃 のスカーリップ端	スカーリップ端部から鉛直方向に発生しウエブから溶接部を切離す

※箇所数で報告されている場合と、図示した番号により報告されている場合があるので、報告形態に応じて整理する。図示した番号による場合（図-13.10参照）

亀裂進展域の材料

材 料	使 用 場 所	亀裂との関係 ※

※亀裂発生位置、亀裂進展域、亀裂進展が予測される領域
 （発生） （進展） （進展予測）

亀裂部の応力範囲

亀裂番号 ※	対象部	計測値 (MPa)	計算値 (MPa)	計測方法	計算方法 (荷重含む)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

※図- 参照

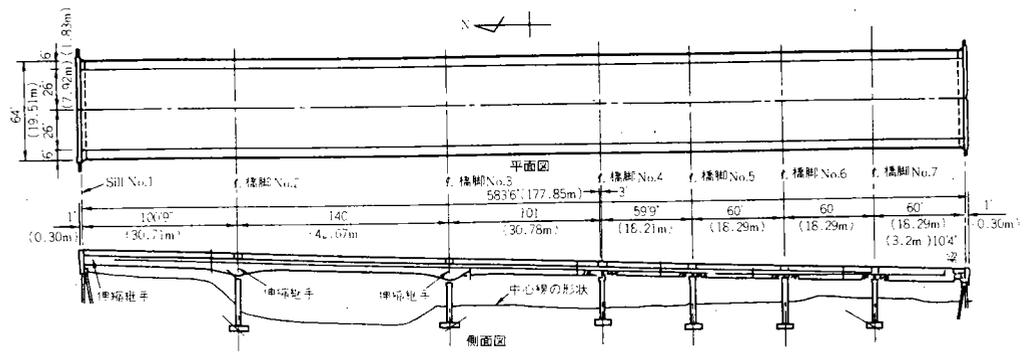


図-13.6 Belle Fourche 橋の平面図と側面図

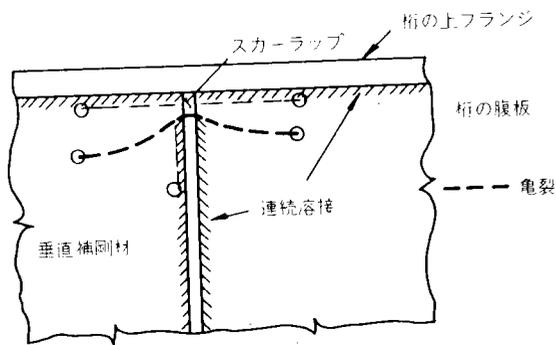


図-13.10 腹板の亀裂と補修孔の位置を示す模式図

亀裂の性格評価のための整理表

15-1:1/3

橋梁名: Walt Whitman橋 路線名:	架設場所: 米国 Philadelphia Gloucester 境
損傷位置図 (全体での位置、全体形状を知ることができるような図) 別添 (有り): 枚、無し) 図-15. 1~4, 10	
損傷の特徴: 吊橋縦桁ウェブ及びブラケット山形鋼に亀裂。吊床版ねじれ応答によるウェブ面外曲げによる。	損傷詳細図 (溶接部から亀裂が発生した場合、溶接部の詳細を含む) (亀裂の発生および進展経路が分かる図)
1) 検査日 (1968年10月 日計測) 検査担当者 () 検査方法 (目視、PT, RT, ET, UT, 磁粉 グライNDER)	
2) 亀裂の長さ: mm 複数の亀裂の場合: 図-15. 3参照	
3) 亀裂の発生点 ☆欠陥との関係の有無 (有・無) 欠陥の種類と大きさ () (大きさは測定値のみ記入) ☆発生領域 母材 (一般部、切り欠き部)、溶接部 ☆溶接部の場合 止端部、ルート部、内部 ☆切り欠き部の場合 種類: リベット孔 応力集中率:	図15-3 道路伸縮継手位置で ブラケットの上の縦桁腹板に生じた亀裂 (Delaware River Port Authorityの好意による)
4) 欠陥の発生原因 どの段階での欠陥か (材料、製作、架設、供用) ☆材料の欠陥 <名称: > ☆施工中に生じた欠陥 <名称: > ・溶接に伴う欠陥 () ・工作に伴う欠陥 (ドリル孔、ガス切断、グライNDER、その他 < >) ・鋼材の工場での受取から現場架設受取までの移動中の傷 (深さ、底半径等) ・架設中の傷 ☆供用中に生じた欠陥 (主に傷、腐食) <名称: >	
5) 材質 (材料) ☆切出し試験体による材質確認 (有・無) ★切出した位置 図 (有・無) ★試験の種類 ①引張試験 (有・無) $\sigma_y =$ MPa, $\sigma_B =$ MPa ②シャルピ-Vノッチ試験 (有・無) 方法: 結果の図 (有 図・無) ③破壊靱性試験 (有・無) 試験片: 試験で求めた特性値: (厳密な意味でのK I C試験、荷重-変位データ (J積分)) ④化学分析 (有・無)	

☆材質の種類：道示にない材料についてはその特徴を記入する。 ①発生点 (鋼種：) ②既に亀裂が進展した領域 (鋼種：) ③亀裂進展の可能性のある領域 (鋼種：) (錬鉄、鋳鉄等の注意事項は別途説明)	
6) 設計示方書 AASHO	
7) 荷重 ☆設計荷重 ☆実測あるいは推定 交通量： _____ 台/日 資料の出典 _____ 計測年月日 _____ 年 月 日 大型車交通量 (混入率) _____ 台/日 (_____ %) 過去360万台 (3軸以上) 資料の出典 _____ 計測年月日 _____ 年 月 日 (車種構成) _____	
8) 発生応力の検討 ☆最大発生応力 (脆性破壊検討用) : 別表 (有・無) 計測値： _____ MPa 計測方法 荷重： _____、測定位置 _____ 別添図 (有()・無) 計算値： _____ MPa 算出方法 荷重： _____、測定位置 _____ 別添図 (有()・無) ☆発生応力範囲 (疲労損傷検討用) : 別表 (有・無) 計測値： 186 MPa (最大値) 計測方法 荷重： _____、測定位置 _____ ゲージA 別添図 (有()・無) 計算値： _____ MPa 算出方法 荷重： _____、測定位置 _____ 別添図 (有()・無) ☆応力ないし応力範囲の推定亀裂進展方向に沿った分布図 (有・無) ☆応力ないし応力範囲の強い二軸性 (有・無) 有の場合別添資料 (有・無)	
9) 発生変位 計測値： _____ 計測方法 _____ pending 計算値： _____ 計算方法 _____	
10) 竣工年月日 1957年 月 日 供用開始年月日 _____ 年 月 日 供用年数 _____ 年	
11) 亀裂の性格 ①進展性：ウェブギャップ部の面外変形を解放するまで進展、その後はなし。 (進展経路の予測を含む) ②冗長性：あり、構造物の耐荷力に大きく影響しない。	
12) 限界亀裂： 長さ、材料、応力レベルの組合せで表示？、JRの便覧参照、 脆性破壊、延性破壊、部材断面の降伏、亀裂の板厚貫通、補修、(隣接部材、 座屈)	

13) 損傷のモデル化 <input checked="" type="checkbox"/> (有) <input type="checkbox"/> (無) Tfなど (a、亀裂の形を図で説明) K値の計算 採用する継手形状			
14) K値の計測 (有・無)			
15) 進展解析 (有・無) Srminerを求め大型車交通量でプロットして、形鋼のS-N線と比較			
16) 環境 最低使用温度 雰囲気 (潮風、湿度、風速、排気ガス、SOx、NOx) しぶき、海岸からの距離 (耐候性鋼)、海岸地帯、工業地帯			
17) 目視およびフラクトグラフィーによる破面解析 (有・無)			
17) 処置		時 期	内 容 (検査方法なども含む)
詳細調査	有・無		検査方法
経過観察	有・無		観察方法
応急処置	有・無		
補修	有・無		ブラケット改良 (支技板を切断)
経過観察	有・無		1年ごとに検査
18) 類似事例の報告 (場所、特徴など) 事例数： 損傷数：			

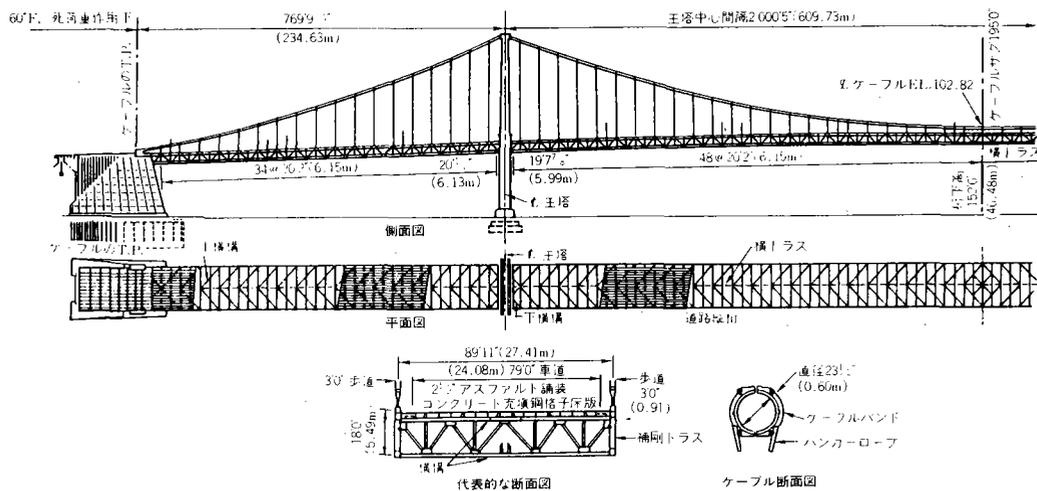


図-15.1 Walt Whitman 橋の平面図および側面図

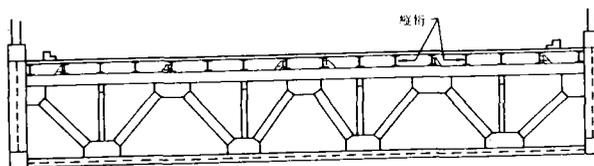


図-15.2 縦桁および横トラスを示す代表的な断面図



図-15.3 道路伸縮継手位置でフラケットの上の縦桁複成に生じた亀裂 Delaware River Port Authority の好意による

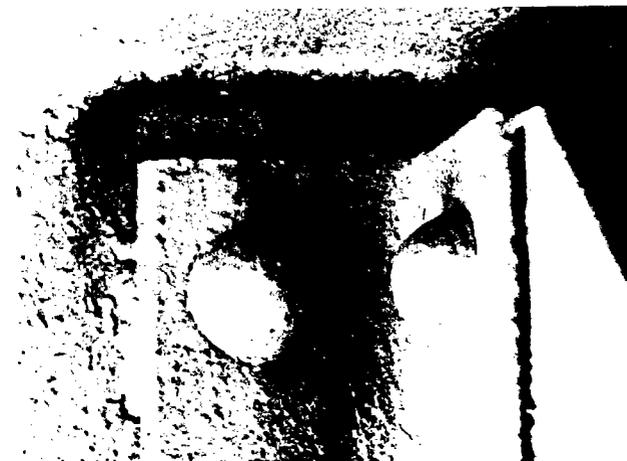


図-15.4 縦桁複成およびフラケットの山形溝に生じた亀裂の接近写真 Delaware River Port Authority の好意による

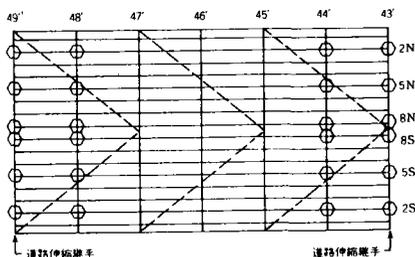


図-15.10 道路伸縮継手間で縦桁—横トラス間の横方向支持ブラケットを切断了した箇所 (○印)