

3. 活動成果

1) クラック発生箇所と発生原因（文献調査）

プレートガーダーに発生する疲労クラックについて文献調査した結果を以下に示す。

(1) 発生箇所

荷重分配横桁あるいは対傾構と主桁との取合部のうち、上フランジ側の溶接部や補剛材等の母材部に多く発生している。ある調査結果では下フランジ側に比べて上フランジ側では格点数にして約30倍の頻度でクラックが発生しているとの報告がある。

横桁については、主桁との取合構造により④のタイプは外主桁との取合補剛材部に多発しており、⑤のタイプでは内外主桁を問わず両方の台形状リブプレート部に発生している。

対傾構については、主桁間の荷重分配作用を考慮する場合としない場合の両方に発生しており支間中央に近い方に多い傾向にある。

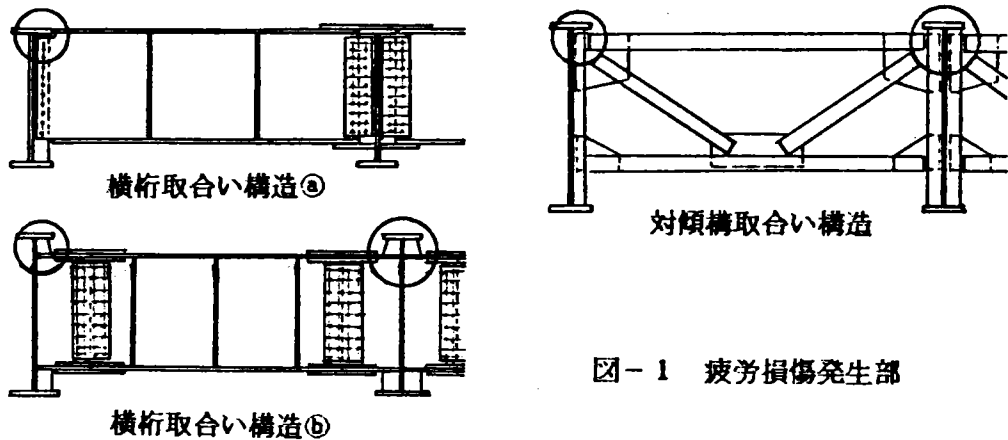


図-1 疲労損傷発生部

(2) 発生原因

主として以下に示す3つにより、疲労クラックが発生すると推定されている。

- ① 輪荷重により床版にたわみが生じ、このたわみによる角変形は横桁や対傾構と床版との間の狭い領域に集中する。そのため上フランジと補剛材等を引きはがす方向に繰返し2次応力が発生する。
- ② 活荷重の作用により主桁間にタワミ差が生じようとする時、横桁や対傾構により隣接する桁に荷重が分配される。この荷重分配により設計時に考慮されていない主桁ウェブ面外方向に繰返し2次応力が発生する。
- ③ 構造上、対傾構部材と補剛材はガセットプレートを通じて結合されていて偏心があるため、部材に大きな面外曲げ応力が作用している。

(3) クラックが発生した橋梁に共通する特徴

- ① 交通量、特に大型車混入率が高い。
- ② 供用後15年以上経過している。
- ③ 主桁間隔が3m以上と大きい。
- ④ 床版厚が20cm以下と比較的小さい。
- ⑤ 横桁と主桁の上フランジ同士が接合されていない。

2) 検査部位と検査率

1) 項の調査結果により、クラックについて検査部位と検査率を再検討し、中間部について表-2のように決定した。前年度成果報告との主な相違点は次の通りである。

- ① 検査対象部位をクラックの発生しやすい構造部位毎にグルーピングし、効率的な検査と評価が出来るように配慮した。
- ② 抜取検査を前提とするため、検査単位（溶接部については単位溶接長と範囲）を設定した。
- ③ 検査率は原則として25、50、100%のように倍数設定した。
- ④ 中主桁、外主桁の区分による検査率の増減は考慮しないこととした。

3) 定期検査インターバル

諸外国の維持管理のために行われる定期的検査の現状を下表に示す。

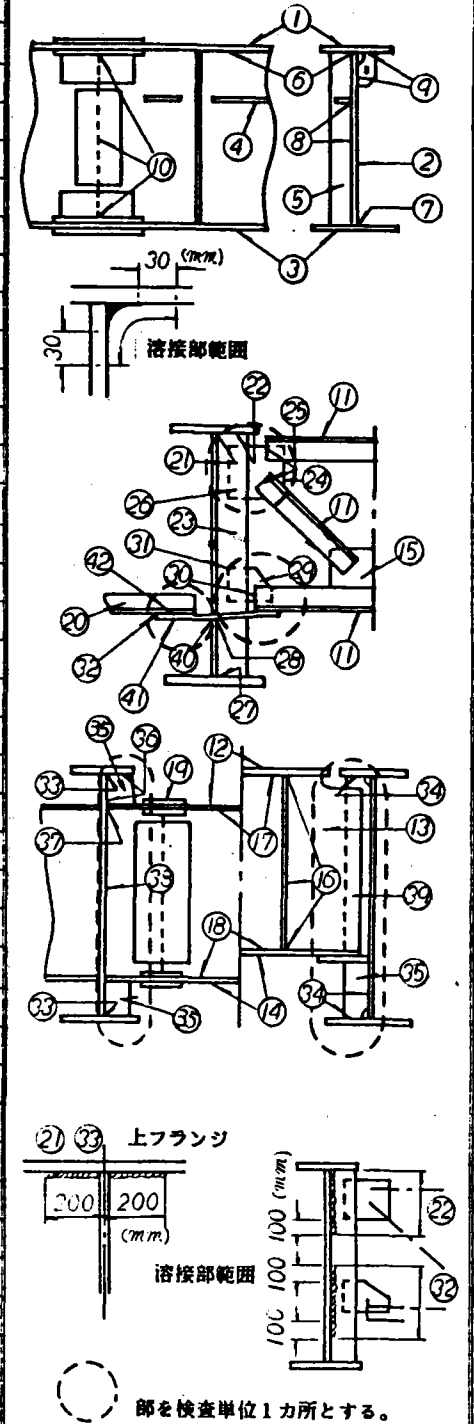
表-1

国名	規格規定	検査頻度
アメリカ	AASHTO 橋梁維持点検マニュアル 1978	・定期検査 2年毎に1回
西ドイツ	DIN1076 道路及び附属構造物の監視 1983 と検査	・簡易検査 3年毎に1回 ・本検査 6年毎に1回
イギリス	構造物の点検に関する技術覚書 運輸省 道路管理局	・一般検査 2年以内 ・主要検査 6年以内
フランス	構造物の点検・維持に関する技術指針 道 路 交 通 局	・定期点検 年次点検 年1回 詳細点検 原則として5 年毎
ベルギー	道路橋の管理に関する規定 建設省 橋梁局	・定期点検 一般点検 2年毎

表-2 中間部検査対象部位および検査率

検査対象部位	検査率	中間部検査率 (%)																検査 単位	備考	
		クラック				座屈				破断				腐食						
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV			
A 主桁一般部	① 上フランジ							50	100			50	100			25	50	100	延長	検査単位は以下とする。 1) 延長...対象桁における全長に対する割合。 2) 本数...全数に対する割合。 3) カ所数...全カ所数に対する割合 4) 加ッ数...全加ッに対する割合。 対象位置図
	② ウェブ							50	100			50	100			25	50	100	本数	
	③ 下フランジ							50	100			50	100			25	50	100	本数	
	④ 水平スチフナー															25	50	100	本数	
	⑤ 鉛直スチフナー(取合なし)							50	100							25	50	100	本数	
	⑥ 上フランジとウェブ溶接部															25	50	100	延長	
	⑦ 下フランジとウェブ溶接部															25	50	100	本数	
	⑧ ウェブとスチフナー溶接部															25	50	100	本数	
	⑨ リブとフランジ、ウェブの溶接部															25	50	100	本数	
	⑩ 主桁添接部															25	50	100	カ所数	
B 対傾構横構一般部	⑪ 上下弦材及び斜材						50	50	100			50	100			25	50	100	加ッ数	
	⑫ 上フランジ							50	100			50	100			25	50	100	本数	
	⑬ ウェブ							50	100			50	100			25	50	100	本数	
	⑭ 下フランジ							50	100			50	100			25	50	100	本数	
	⑮ ガセット及び斜材、下弦材との溶接部															25	50	100	本数	
	⑯ スチフナー及びフランジ、ウェブとの溶接部															25	50	100	本数	
	⑰ 上フランジとウェブの溶接端部		25	50	100											25	50	100	本数	
	⑱ 下フランジとウェブの溶接端部		25	50	100											25	50	100	本数	
	⑲ 横桁添接部															25	50	100	本数	
	⑳ 横構						50	50	100			50	100			25	50	100	カ所数	
C 主桁取合対上傾部	㉑ 主桁上フランジとウェブ溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
	㉒ 取合スチフナーと上フランジ、ウェブ溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
	㉓ 取合鉛直スチフナー(上下部)		25	50	100											25	50	100	本数	
	㉔ 対傾構ガセット		25	50	100							50	100			25	50	100	本数	
	㉕ 対傾構ガセットと上弦材、斜材溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
	㉖ 取合鉛直スチフナーとの添接部		25	50	100							50	100			25	50	100	本数	
D 同上下部	㉗ 下フランジとウェブ溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
	㉘ 横構ガセットとウェブ溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
	㉙ 対傾構ガセット		25	50	100							50	100			25	50	100	本数	
	㉚ 対傾構ガセットと下弦材溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
	㉛ 取合鉛直スチフナーとの添接部		25	50	100							50	100			25	50	100	本数	
	㉜ 取合スチフナーとウェブ溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
E 主桁横桁取合部	㉝ 主桁上下フランジとウェブ溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
	㉞ 取合スチフナーと上下フランジ、ウェブ溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
	㉟ 取合鉛直スチフナー、リブ		25	50	100											25	50	100	本数	
	㊱ 横桁仕口リブと上フランジ、ウェブ溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
	㊲ 横桁仕口フランジとウェブ溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
	㊳ 横桁仕口ウェブと主桁ウェブ溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
F 横取構部	㊴ 取合鉛直スチフナーとの添接部		25	50	100											25	50	100	本数	
	㊵ 横構ガセットとウェブ溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	
	㊶ 横構ガセット							50	100			50	100			25	50	100	本数	
	㊷ 横構ガセットと横構添接部															25	50	100	本数	
	㊸ 横構と水平スチフナー突合せ溶接部		25	50	100											25	50	100	本数	

(注) 検査水準: I...経年数6年以下の橋梁、II...同6年~12年以下 III...同12年~24年以下、IV...同24年起。



国内では5～7年毎に実施する規定もあり、諸外国の現状と照らし合わせても6年毎の実施で特に不都合は無いと考えた。

[参考文献]

- ・西川和広：プレートガーダー橋の疲労損傷例、道路、1985-7
- ・土木学会：既存橋梁の耐荷力と耐久性、1985-7
- ・土木学会：鋼橋の疲労変状調査、論文集第368号、1986-4

4) 非破壊検査適用について

(1) 適用区分

損傷事象のうちクラックの検査について非破壊検査を適用する。非破壊検査方法は現場条件及びある程度確立されている事を前提に①超音波探傷法、②磁粉探傷法、③染色浸透探傷法、④渦流探傷法の4手法を採用した。各々の特徴は(3)項に示すが①は表面を含み主として内部の探傷に使用し、②～④は表面欠陥の探傷に使用する。尚、②と③は②の磁粉探傷法を優先的に適用し、これが適用困難な狭隙部等に限って代用として、染色浸透探傷法を使用することとした。

(2) 検査手順

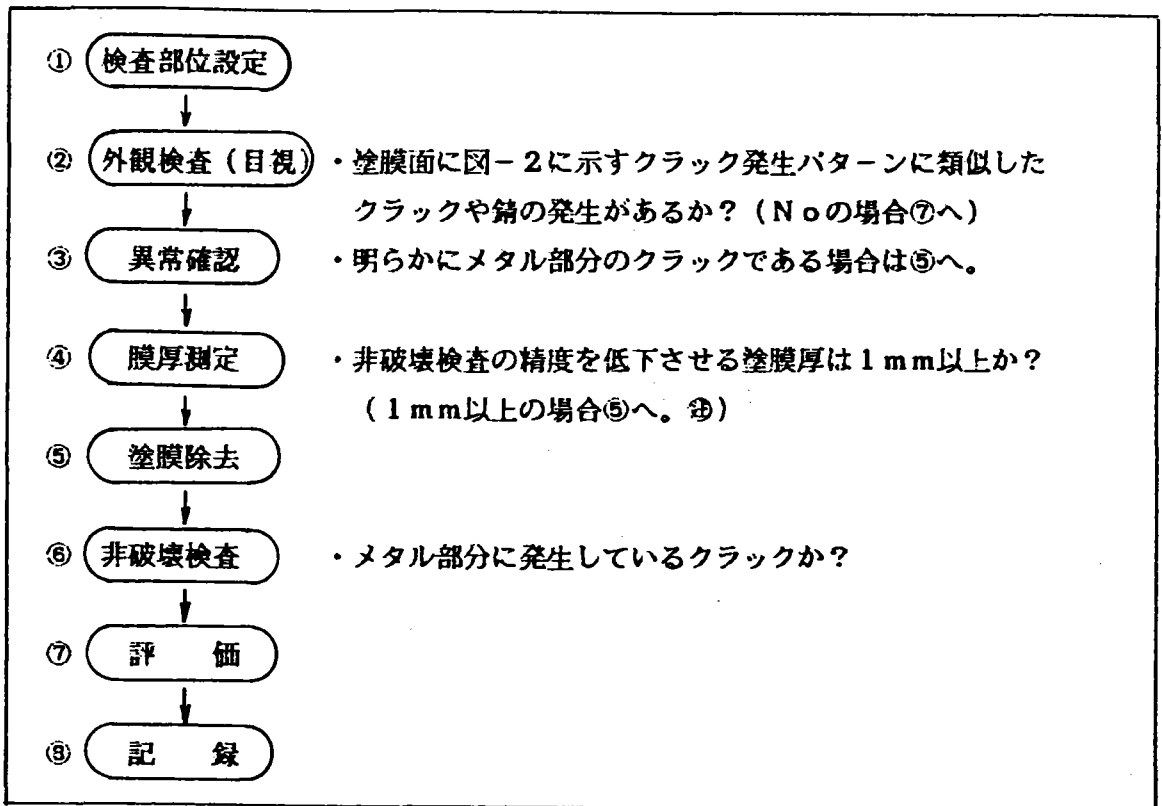
検査手順は前年度報告の通りであり、目視による外観検査を主体として行う。この検査の効率と信頼性を高めるために、表-2に示すような検査対象部位と範囲を損傷事例をもとに定めた。損傷事象のうちクラックについては目視で認められた場合に限ってさらに非破壊検査手法を適用し、その大きさ、状況等を詳細に調査することとした。

検査を行うに当ってはまず検出すべき欠陥の最小長が明確になっている必要がある。橋梁全体の耐荷力や耐久性に直ちに影響を及ぼす欠陥の大きさは発生部位や材質、荷重条件等によって異なり、影響の度合を定量的に評価する方法が確立されていない現状ではこの最小欠陥長を定量化するのは困難である。

一方、目視により検出可能なクラックの長さは、溶接部以外で明るい場合に6mm以上との報告もあるが、現場条件の中では当然これよりも大きくなるし、しかも塗膜上より検出する必要がある。経験的に20～30mm以上あれば異常は認められると思われるし、長さの上限については例えば取合垂直補剛材と上フランジの溶接部のように、比較的短い溶接線が全線に渡って疲労クラックの進展により破断するに至る前に発見できると思われる。

従ってここでは目視で認識された全ての異常(クラックらしいもの)を検出すべき欠陥として次の非破壊検査の対象とすることとした。非破壊検査ではクラックであるか否かの確認と程度の調査を行うこととする。

次にクラックについての検査手順を示す。



⑥非破壊検査の精度に影響する塗膜厚の程度については、非破壊検査や塗膜の種類によって異なるが、染色浸透探傷を除いて1mm程度までは可能との報告もあるが、当グループでは昭和62年度に実験を行って確認することを予定している。

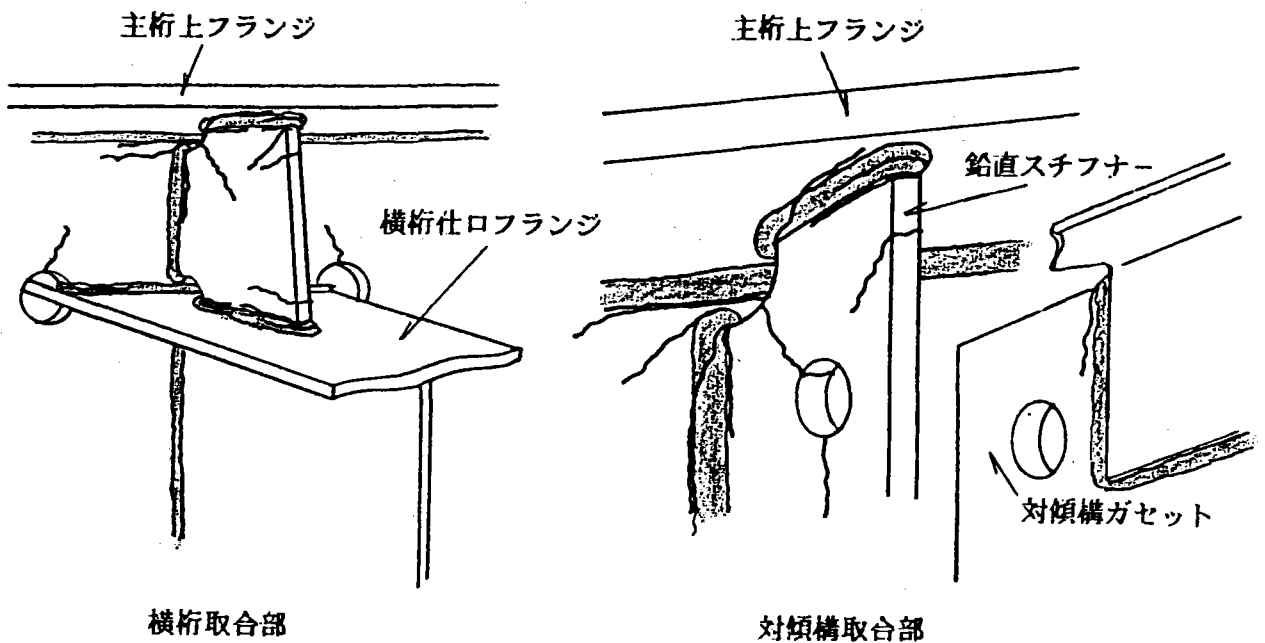


図-2 クラック発生パターン(例)

(3) 非破壊検査の特徴

維持管理検査に用いる4種類の非破壊検査法のうち、渦流探傷法を除く3手法について、現場使用を考慮して調査した結果を比較表として表-3に示す。渦流探傷法は塗膜等の表面状態に対して比較的鈍感であり、表面欠陥の探傷には有効と考えられるが、現在の装置や判定方法では直ちに現場に適用するのは困難と考え、比較表から除外した。ただし、同種の渦電流を応用して、表面欠陥の有無のみを検査できる軽量小型な機器が開発されているのでこれの適用性検討を次年度に予定している。

表-3に掲げた3手法は、現在最も多用されている方法であり、現場環境への適用は容易である。ここで使用する超音波探傷法は一般にパルス反射式超音波探傷法と呼ばれるものであり、利用する超音波特性により板面に垂直に縦波を入射させる垂直探傷法と斜めに横波を入射させる斜角探傷法、及び表面波により表面欠陥を検出する表面波探傷法等がある。垂直探傷法は板面に平行なラミネーション状の欠陥検出には有効であるが板面と直角方向にある欠陥検出は困難である。特にクラックの様に表面や内部に進展している欠陥、さらにその方向(角度)が任意である様な欠陥を検出するには斜角探傷法が有効である。表面波探傷法は表面状態に敏感であるため、既設橋梁への適用は困難と考え除外することとした。従ってここでは斜角探傷法を中心に検討した。次にこの斜角探傷法によるクラックの寸法や範囲を測定する方法としては、クラック端部からのピークエコーを検出して測定する端部エコー法や、入射した横波が欠陥表面部で表面波に変換することを利用したモード変換回転表面波法、あるいは表面欠陥と板面の角部を利用したコーナーエコー法等がある。この他dBドロップ法等を合せ10程度の方法が開発されているがいずれも欠陥の位置、角度や大きさによって適用方法およびその検出精度が異なる。特にクラックの先端位置を精度良くつかむという点において高度の技術が必要である。

磁粉探傷法は欠陥部に生じる漏洩磁束に、散布した磁粉が付着することを利用して視覚的に検出するもので、表面および表面直下にある欠陥検出に適用することができる。磁化方法や磁粉の種類によって、いくつかの方法があるがここでは湿式蛍光磁粉を用いた極間法を考えている。

浸透探傷法は欠陥内部に浸透した浸透液が、現像剤中に毛細管現象によりにじみでることを利用した方法で、磁粉探傷法と同様、視覚的に欠陥検出ができるが表面に開口した欠陥しか検出できない。ここでは最も一般的に行われている溶剤除去性染色浸透探傷法を採用することとした。

これら3つの探傷法は、一般特性としてイニシャルコストを除けばコスト的にも安価であり、有資格者が実施するぶんにおいては、操作性にも特に問題はないと考えられる。しかしいずれも、検査の自動化に伴い改善されつつはあるがまだ記録性に問題がある。適用性や欠陥検出性については表-3に示すように欠陥種類による基本的な相違があるものの、適用部位に応じて単独又は併用して適用することにより維持管理に必要な情報を効率的に得ることができると思われる。

表-3 各種非破壊検査法の比較

比較特性		超音波探傷	磁粉探傷	染色浸透探傷	備考
一般	① 機器重量 (軽量)	○	○	◎	
	② 操作性 (容易)	○	○	◎	
	③ 操作姿勢制限	○	○	○	
	④ 資格・技量	△	△	○	
	⑤ 能率性	○	△	○	
	⑥ 迅速性	◎	○	△	
	⑦ 記録性	△	△	△	
	⑧ 再現性	△	○	○	
	⑨ 安全性	◎	○	△	
	⑩ 価格	◎	◎	◎	
適用性	⑪ 材質制限	◎	○	◎	
	⑫ 板厚制限	○	◎	◎	
	⑬ 表面塗膜	△	△	×	
	⑭ 表面発錆	○	△	△	
	⑮ 表面油脂	◎	△	△	
	⑯ 表面水分	◎	◎	△	
	⑰ 表面凹凸	△	○	○	
	⑱ 表面温度	○	○	○	
	⑲ 振動	○	◎	◎	
⑳ 応力変動	◎	◎	◎		
欠陥検出性	㉑ 表面 (層) 欠陥	○	◎	◎	
	㉒ 内部欠陥	◎	×	×	
	㉓ ビード止端欠陥	○	◎	◎	
	㉔ クラック検出 (長さ)	△	◎	○	・微小クラック
	㉕ クラック検出 (幅)	△	◎	○	・同上の開口幅

◎：非常に良い ○：良い △：条件付で良い ×：良くない

5) 対傾構取合垂直補剛材部の疲労クラックについて

取合補剛材と主桁上フランジの溶接部近傍には、1)項で示した原因による繰返し応力により疲労クラックが多発している。これは単に活荷重による応力レベルのみでなく、製作時に生じる残留応力や微小な切欠の存在、そして応力レベルを左右する要因としての橋の支間長、主桁間隔、床版厚等の構造条件や輪荷重の位置さらに交通量、特に大型車混入率や交通流等の条件が複雑に影響した結果と考えられる。これらの要因を総合的に考慮して疲労寿命を評価した報告もあるが、ここでは維持管理検査を行う上で把握しておく必要があると思われる、疲労クラックの進展状況を簡単に考察した。

(1) 基本条件

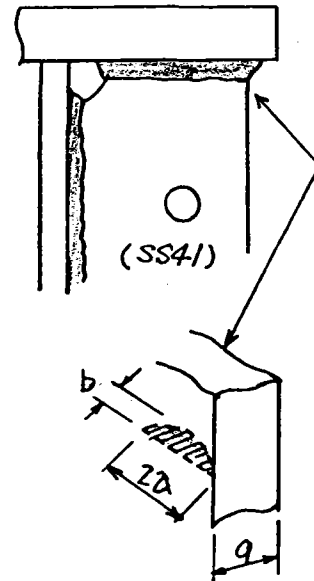
右図のように補剛材の端部廻り溶接部にカット状の切欠が存在し、上下方向に両振りの繰返し応力が作用するものとする。

切欠は深さ $b = 0.3\text{mm}$ 、長さ $2a = 0.6\text{mm}$ の半楕円状とする。

作用応力は主として床版タワミによるものや、主桁のタワミ差に伴う部材力によるもの、及び部材の偏心による面外曲げ等による引張圧縮応力と考えらる。しかし、ここではこれらを個々に与えるのをやめる為に、報告されている実測値を採用することとした。

実測値は応力変動幅 $\Delta\sigma$ $1.4 \sim 2.4\text{Kgf/mm}^2$ 程度であり最大値の 2.4Kgf/mm^2 とする。また、これの $60 \sim 80\%$ は圧縮応力につき 70% として、応力値は $-16.8 \sim -7.2\text{Kgf/mm}^2$ とする。

従って応力比 (R) は -0.43 となる。



(2) 疲労クラック発生の評価

破壊力学的にクラックは次の条件を満足する場合に発生すると言える。

$$\Delta K I \geq \Delta K_{th} \dots \textcircled{1} \quad \Delta K I \quad ; \quad \text{応力拡大係数 } K I \text{ の変動幅 (Kgf/mm}^{\frac{3}{2}}\text{)}$$

$$\Delta K_{th} \quad ; \quad \Delta K I \text{ の下限値}$$

ΔK_{th} は右図より、 $R = -0.43$ の場合 $2.0\text{Kgf/mm}^{\frac{3}{2}}$ とする。

$\Delta K I$ は WES2805 『溶接継手のぜい性破壊に対する欠陥の評価方法』より求める。

$b/a \approx 1$ の場合

$$\Delta K I = \Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot a}$$

$$= 2.4 \cdot 0.3 = 2.3.3\text{Kgf/mm}^{\frac{3}{2}}$$

逆に $2.0\text{Kgf/mm}^{\frac{3}{2}}$ の時、 $\Delta\sigma$ は 20.6Kgf/mm^2 である。

従って①式を満足するのでクラックは発生するといえる。尚、この場合クラックは長さ及び深さ方向に進展する。

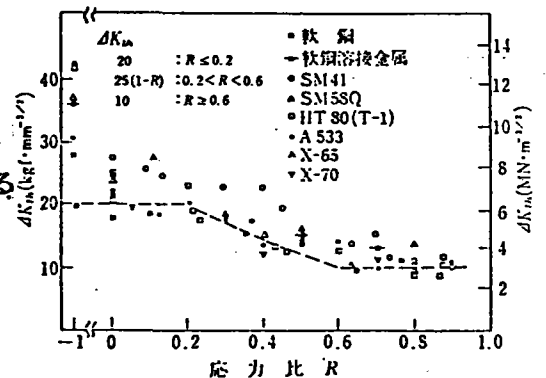


図 軟鋼及び低合金鋼の $\Delta K_{I,a}$ に及ぼす R の影響

(3) 疲労クラックの進展

発生したクラックの進展は一般に次のパリスの進展則と呼ばれる式により評価できる

$$da/dN = C(\Delta K I)^m \dots \textcircled{2} \quad da/dN; \text{クラック伝播速度}$$

a ; クラックの寸法

c, m ; 材料定数

軟鋼の場合 $m \approx 4$, $c = 5 \times 10 \times 55 \approx 5.5 \times 10$, $\Delta K I = 23.3 \text{ Kg}/\text{mm}^{3/2}$ とすると、②式より 初期欠陥長さ a_0 が長さ a_n に進展するまでの応力繰返し数 N は

$$N = \frac{1}{C(\Delta K I)^m} (a_n - a_0) = 6.2 \times 10 \times (a_n - a_0) \dots \textcircled{3} \text{で与えられる}$$

補剛材と主桁上フランジの溶接部長さ 65mm (補剛材幅 100mm, スカラップ 35R) とすると、 $a_0 = 2 \times a = 0.6\text{mm}$, $a_n = 65\text{mm}$

$$\therefore N = 3.97 \times 10^7 \text{ (回)} \dots \textcircled{4}$$

溶接部長さ 65mm が完全に破断するのに、実例から判断して 20 年経過したとすると長さ 20mm のクラックが発見されるまでの経年数 (Y) は $a_n = 20$ とおいて、③より $Y = 6$ (年) 程度であり、検査水準 II の検査時期である 6 年経過後にはクラックの長さは 20mm 程度になっており、注意すれば目視で十分発見できると考えられる。

次に、このようなクラックの進展をみるような橋梁の使用条件を考えてみる。

応力変動範囲最大 $24 \text{ Kg}/\text{mm}^{3/2}$ が計測された橋梁は、愛知県の国道 23 号線に昭和 41 年に架けられた 2 径間連続非合成 I 桁で、5 主桁、上下線分離の計 6 車線のものである。昭和 60 年度、日交通量は 97,326 台/日でこのうち大型車は約 40% の 38,755 台/日であった。大型車は一車線当たり 6,460 台/日となる。④の N が 20 年間の回数とすると 1 日では $3.97 \times 10 \div (20 \times 365) = 5,440$ 回/日となり 6,460 台/日・車線の値の 84%、数値の上では帰与していることになる。

応力変動範囲の $24 \text{ Kg}/\text{mm}^{3/2}$ や大型車は一車線当たり 6,460 台/日が常時作用するとは考えられないが、このような構造条件及び交通条件の橋梁を平均的にひとつのパラメータと仮定して実測例を整理し、それらのデータより他の橋梁の状況をおおまかに推定しても良いと考える。

例えば上述の実例で大型車混入率を 60% とすると、9,730 台/日・車線となり N に換算すると $N = 9,730 \times 0.84 = 8,170$ 回/日となる。全線破断まで $N = 3.97 \times 10^7$ (回) であるから、この場合 13.3 年に短縮されることとなる。

[参考文献]

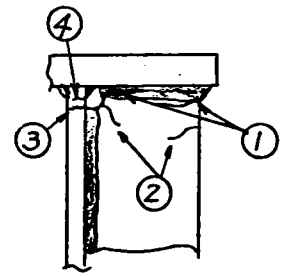
- ・建設省土木研究所：既設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究、資料 2420 号 1986-11
- ・土木学会：実交通荷重による鋼鉄桁橋の応力変形挙動、構造工学論文集 33 巻 1987-3
- ・田島他：鋼橋の寿命予測と維持管理に関する研究、課題番号 59350028 1986-3

6) 維持管理検査における抜取検査率について

表-2に示すように検査水準IVを除いて25%及び50%の検査率を設定した。そして検査の結果、一箇所でも欠陥が発見されれば全数検査を行うこととした。このような抜取検査が検査の信頼性や橋梁の健全性にどのような意味を持つかについて簡単に考察してみる。

(1) 検査対象箇所のモデル化(例)

- ・対象部位；中間対傾構取合い補剛材の上フランジ溶接部近傍
- ・対象事象；右図に示すようなクラック
- ・箇所数；3主桁で合計24格点とし、1格点当り4事象とする。
従ってロットの大きさNは、 $24 \times 4 = 96$ となる。
- ・サンプル数(n)；検査率25%・・・ $n = 24$
検査率50%・・・ $n = 48$
検査率75%・・・ $n = 72$ (参考)



(2) 抜取検査の確率論的意味

抜取検査は、検査の結果得られる品質限界をあらかじめ決めておいて、抜取方式が設計されるものであるが、既設橋梁の検査の場合、許容される欠陥不良率は必ずしも明確ではない。従って、本検査要領では目標許容不良率を定めずに検査率を設定しているのので、この検査率で行った場合、結果としてどのような不良率になるかも検討してみる。尚、不良率とはロットの大きさNに対して存在又は残存する欠陥数の割合を示す。

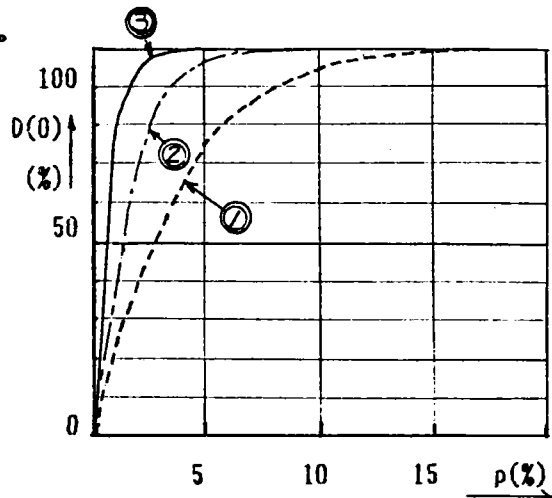
一般に不良率pである大きさNのロットから、任意にn個のサンプルを抜取ったとき、そのサンプル中にr個の不良が現われる確率をp(r)とすると、超幾何分布の場合次式で示される。

$$p(r) = \frac{\binom{N-pN}{n-r} \binom{pN}{r}}{\binom{N}{n}} \dots \textcircled{1}$$

r=0の場合、p(0)の値は直ちにロット合格率を意味する。r>0の場合は全数検査となるがこの確率は $D(0) = 1 - p(0) \dots \textcircled{2}$ となる。

以下に、不良率pを0~20%と変化させた場合のD(0)のグラフと、p=5%及び10%の場合のD(0)の値を表に示す。

検査率 (%)	D(0) (%)	
	p=5%	p=10%
① 25	76	95
② 50	97	100
③ 75	100	100



前表で $p = 5\%$ の場合、検査率 25% でも 76% の確率で全数検査を行うこととなる。このことは次のような仮定を設けた場合、検査の信頼性や、結果として得られる橋梁の健全性の度合は 76% であると言える。

即ち、

- ・長さ 20mm 以上のクラックを欠陥とし、これの外観検査による検出率は 100% とする。

- ・ 20mm 未満のクラックが残存していても橋梁の健全性には影響ないものとする

- ・ 検出された欠陥は完全に補修されるものとする。

これらの仮定の逆を危険率とすれば、危険率が 0 の場合（実際は有り得ないが） 100% 検査が行われた場合の信頼度や健全度は 100% であると言っても良いと考えられる。

次に抜取検査の結果の不良率を考える。対象橋梁は一橋であるから前頁のグラフより、検査率 25% で $p \geq 15\%$ の場合、 100% 近い確率で全数検査されるので上記仮定により不良率は 0% になる。 $p < 15\%$ の場合では最大 15% の不良率即ち、 $96 \times 0.15 \approx 15$ 個の欠陥が残ることがあり得ることとなる。検査率 50% の場合では $p < 8\%$ の場合で最大約 8 個が僅かではあるが残る事となる。

検査率 25% は検査水準 II の場合であり、経年数 6 年超 12 年以下の橋梁が対象である。 70% 以上の信頼度や健全度が得られれば大きな問題はないものと考えられるが、ロットの大きさやサンプル数及び上記危険率によって変化するので、これらについては今後の課題としてさらに検討していくこととする。