

鋼橋の疲労損傷に対する予防保全の検討

A STUDY OF INTENTIONAL MAINTENANCE FOR FATIGUE CRACKINGS ON HIGHWAY BRIDGES

飯野忠雄* 山田実** 岩崎雅紀***

By Tadao IINO, Minoru YAMADA and Masanori IWASAKI

ABSTRACT

In recent years, the fatigue damages of steel bridges have been reported frequently. Those fatigue crackings have been repaired and retrofitted in case of individual. But only this method is not enough for maintenance of fatigue cracking in steel bridges. Intentional maintenance shall be proceed. Then, inspection methods for fatigue crackings, measuring of stress histogram and actual through traffic on an actual bridge are carried out.

1. まえがき

首都高速道路は、1962年の供用開始以来供用延長を伸ばし、1989年3月現在200.9kmとなっており、1日平均利用交通量は100万台を越え、首都圏の重要な交通施設となっている。供用延長のうち、鋼構造部は、全延長の68.4% (137.5km) であり、残りがコンクリート構造部、トンネル、その他である。経過年数で見ると、総延長の54%が供用開始以来15年以上経過しており、大量交通及び重交通の走行を履歴している。ところで、従来鉄道橋において主に扱われていた疲労が道路橋においても重要な関心事となりつつある。

しかも、道路橋において疲労に対する検算の対象である鋼床版以外の構造形式において疲労損傷事例が数多く報告され始めている。¹⁾²⁾ これらの損傷事例は設計技術の向上に伴う軽量化、車両走行数の増加および走行車両重量の増加などの原因によって、通常の設計計算では考慮されない構造局部に発生している。

発見された疲労損傷に対しては、通常、個々の事例に応じて発生原因を究明し、種々の検討、実験がなされた後、補修・補強が実施されている。

しかし、維持管理面からはこれらの他に、疲労損傷事例をもとに各部の疲労健全性評価を行い、計画的に点検および補修・補強を行っていくことが必要であると考えられる。

このような考えから疲労損傷に対する計画的な予防保全を実施するため、疲労損傷事例の収集、点検手法、点検通路及び疲労健全性評価手法に関する調査、研究を進めてきた。

本研究は、この調査の一環として、首都高速道路において標準的構造を有する鋼 I 桁橋の点検、交通実

* 首都高速道路公団 湾岸線建設局 (〒105 港区海岸 1-2-18)

** (財)首都高速道路技術センター 技術部 (〒105 港区虎ノ門 1-1-21)

*** (株)横河橋梁製作所 研究所 (〒260 千葉市新港 88番地)

態調査および実働応力測定を行って各部の疲労健全性評価を試み、予防保全の実施のための基礎資料の作成を意図したものである。

2. 対象橋梁および検討概要

実橋試験の対象とした橋梁は、対象路線中では標準的構造形式を有する鋼合成 I 桁橋である。本橋の供用開始は1973年で、供用開始以降約16年を経ている。また、本路線の1987年度における1日平均通行台数は約55,000台／2車線で、毎年約3%弱の伸び率を示している。図-1に対象橋梁の一般図を示す。

調査項目は、表-1に示すとおりである。

(1) 対象橋梁の疲労損傷調査

鋼橋は、

- 1) 複雑な構造であるため、作業性がよくない。
- 2) 疲労損傷は、その大部分がすみ肉溶接部に発生しているが、その表面は溶接のままで、一般的には仕上げられていない。

といった特徴を有するので、実橋の点検において室内実験結果とどりの検出性能が得られるか明らかではない。

そこで、参考文献¹⁾をもとに実橋における疲労損傷の点検手法の確立を目的として図-2に示す手順で対象橋梁全体の詳細点検を実施した。

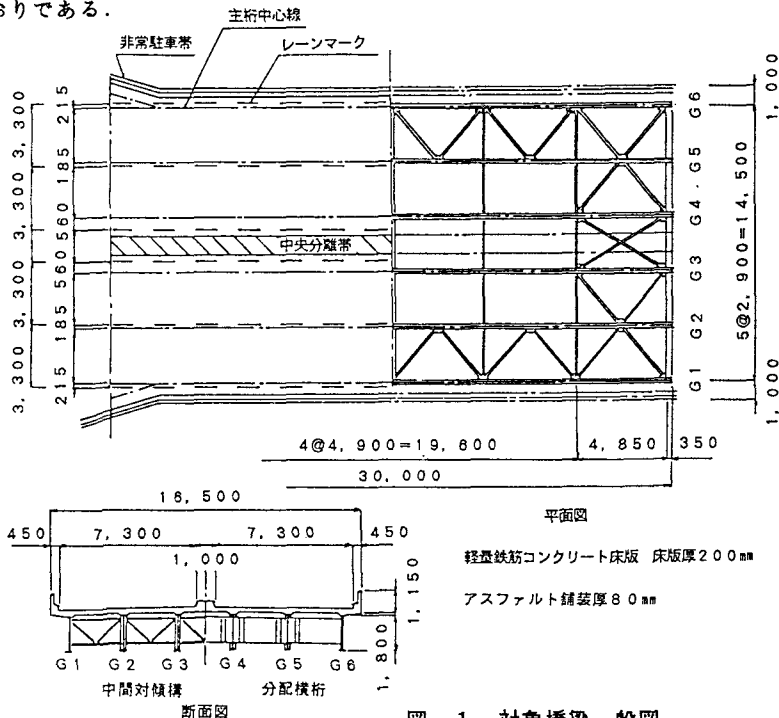


図-1. 対象橋梁一般図

表-1. 調査項目	
調査項目	目 的
疲労損傷調査	実橋における疲労損傷発生傾向の把握 疲労損傷の検出手法の確立
交通実態調査	対象路線における交通実態を調査する。 交通管制データを収集分析し、下記項目の解析に用いる。
実働応力測定	疲労損傷発生予想部位の疲労健全性を評価し、損傷発生時期、補修・補強必要時期を予測する。

(2) 交通管制データの収集及び大型車交通実態調査

既存の交通管制データを用いた交通量変動調査および可搬式自動車交通流測定装置²⁾(以下、TLAM)を用いた大型車交通量変動調査(平日、24時間)を行い、主に(3)の解析に利用した。

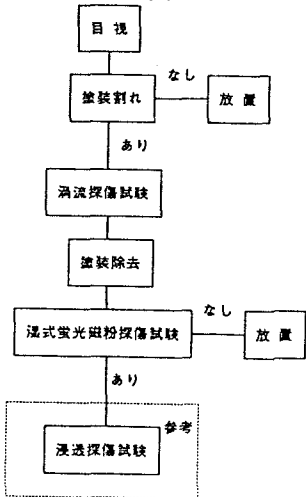


図-2. 非破壊試験実施順序

なお、測定は実働応力測定と同時にを行った。

(3) 疲労損傷事例に基づく各部の実働応力測定

各種文献^{1) 4)}をもとに疲労損傷の発生が予想される部位を選定し、それら64箇所について、2時間単位で1週間の実働応力測定を行って、各部の疲労健全性評価、損傷発生時期及び補修・補強必要時期の予測を行った。図-3に高い応力振幅が実測された部位を測定箇所例として示す。

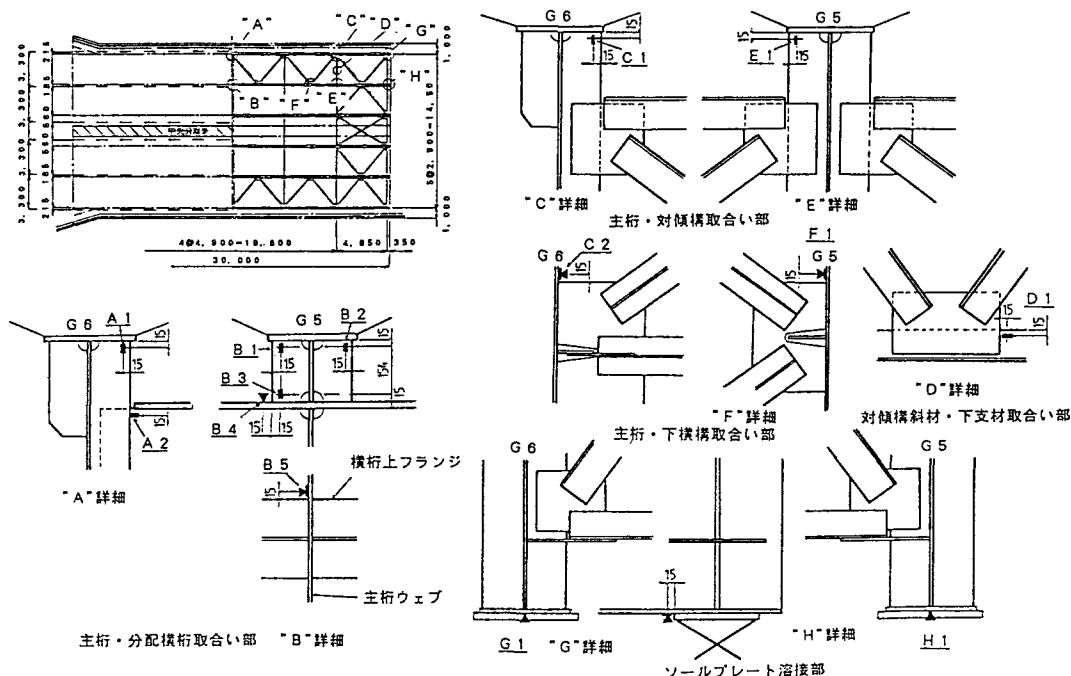


図-3. 実働応力測定部位例

3. 点検結果

表-2～表-4に、各非破壊試験条件を示す。

疲労損傷は、内桁・分配横桁取合い部のプレートリブ及びG6主桁・下横構取合い部のガセットまわし溶接部に発見された。試験結果を図-4に示す。亀裂は発生位置別に図-4の付図に示すA（補剛材側まわし溶接）、B（すみ肉止端一般部）、C（主材側まわし溶接）の3種類に分けた。ただし、A亀裂については、溶接止端部と溶接ビード上の両位置に発生していたので、これらをまとめて示してある。破壊試験はできなかったため、実亀裂長は不明である。そこで、以下では湿式蛍光磁粉探傷試験（以下、MT）による亀裂検出結果をもとに検討を加える。

目視（以下、VT）による塗装割れ検出数は1径間全体で43箇所であった。供用開始以来塗装塗替えが行われていなかったためであると考えられる。最小検出長は4mmで、室内試験結果と同等であった。

渦流探傷試験（以下、ECT）は、プローブ寸法の関係から適用不可能な部位（F）を除いて40箇所について行い、このうち、5箇所（12.5%）については亀裂を検出できなかった。表-5にA亀裂に対するECTの検出性能を示す。溶接止端部に発生した亀裂に対して、表面長8mm以上のみ検出しており、室内試験結果に比べて大きい。溶接ビード上の亀裂に対しては、箇所数が2箇所と少なく、検出限界は明らかではない。

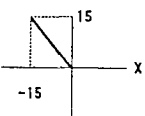
表-6には浸透探傷試験（以下、PT）のMTに対する亀裂検出性能を示す。溶接止端部のA亀裂につ

いては、室内試験結果と同長の8mmを検出しているが、ビード上の亀裂に対しては10mmの亀裂も検出して
いない。また、過小評価する傾向にあることもわ
かる。

なお、MTでは亀裂長2mm以上を検出しており、
室内試験結果と同等であった。

写真-1は、主桁・分配横桁取合い部のプレー
トリブと横桁上フランジとのすみ肉溶接部に発見
された亀裂のPTとMTの検出例である。亀裂が
同部位に多発しているにも係らずPTでの検出
性能は劣っている。

表-2. 渦流探傷試験条件

	名 称	形 式
使用機器	渦流探傷器	ED-800 マグナフラックス社
	プローブ	Wタイプ、自己比較方式
探傷感度	スリット試験片の 0.2W X 2H X 10Lを ブラウン管座標上 X=-15, Y=15に位相角 及び振幅をとる。	
非試験部での 位相角の設定	鍵全部信号がブラ ウン管座標X軸上 の正方向に振れる ようにする。	

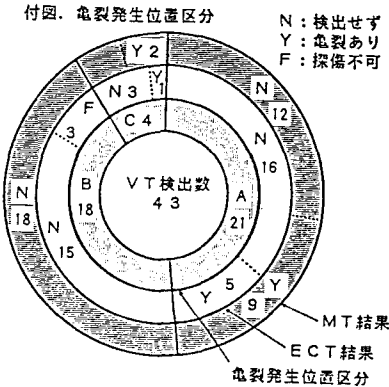
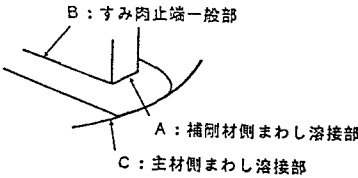


図-4. 点検結果のまとめ

表-3. 浸透探傷試験条件

	名 称	形 式
使用材料	浸透液	R-1A エアゾール (栄進化学)
	洗浄液	R-1M エアゾール (栄進化学)
	現像液	R-1S エアゾール (栄進化学)
探傷条件	前処理	塗装剥離後洗浄処理
	浸透	浸透液を亀裂部に散布 (30~40分)
	洗浄	洗浄液にて浸透液を除去
	現像	現像液を亀裂部に散布 (5~30分)
	観察	自然光、またはライト

表-4. 湿式蛍光磁粉探傷試験条件

	名 称	形 式
使用機器	磁化装置	TE-2 (小型軽量型)
	磁粉	SY-8000 XB (エアゾール蛍光磁粉, 2g/l)
	ブラックライト	SC-125
探傷条件	標準試験片	JIS A1 15/100
	磁化電流	交流
	磁化方法	極間法、連続
	通電時間	約10 (Sec)

表-5. 渦流探傷試験の検出性能

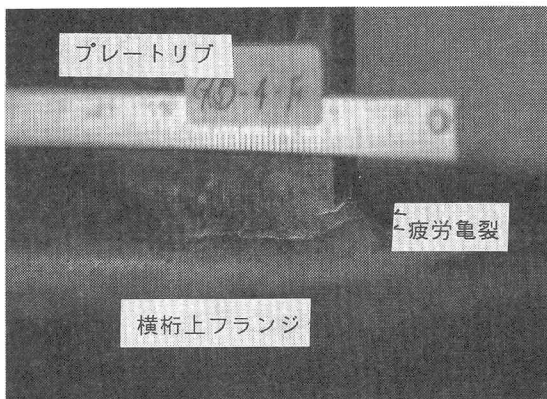
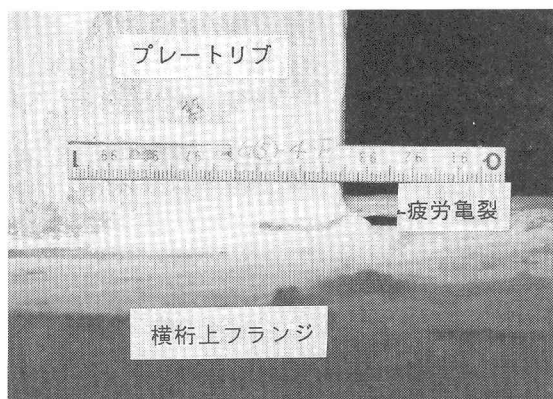
亀裂発生位置	溶接止端部						ビード上
MTによる検出 亀裂側面長 (mm)	4	5	8	10	13	3	10
ECT結果	×	×	○	○	○	○	×

- 1) 亀裂が側面に達する亀裂についての集計結果
2) ○: 検出, ×: 検出せず

表-6. 浸透探傷試験の検出性能

亀裂発生位置	A亀裂(溶接止端部)*						A亀裂(ビード上)*						C亀裂	
MTによる検出 亀裂側面長(mm)	2	3	4	8	12	13	3	3	7	10	20	25	4	6
PT結果(mm)	3	0	0	5	10	10	0	0	0	0	15	20	0	0
比 率 (%)	150	0	0	63	83	77	0	0	0	0	75	80	0	0

*: 亀裂長が板厚9mmを超え、側面に達する亀裂についての側面長の集計結果



(1) 漫透探傷試驗

(2) 湿式荧光磁粉探傷試驗

写真-1. 亀裂検出例（主桁・分配構桁取合い部）

4. 交通實態調查結果

対象橋梁が属する路線における過去の交通量調査結果を図-5に示す。1975年における交通量が少ないのは全線開通していなかったためであると推定される。これを除く4回の測定結果を1次回帰すると、

$$\text{断面交通量 (台/日} \cdot 2 \text{車線)} = 1,687 \times \text{西曆 (年)} - 3,297,880$$

となる。しかし、断面交通量としては飽和値が存在することが予想され、これを首都高速道路における一般的な交通管制データから65,000(台/日・2車線)と仮定する。なお、実働応力測定時にはほぼこれに近い数値が実測されており、対象路線の予想交通量の代表値としては高い値ではない。供用開始後の累計交通量は213,100,323(台/2車線)と仮定した。

図-6に実働応力測定時における断面交通量測定結果を示す。1週間の総交通量は391,091(台/2車線),平均交通量は4,656(台/2時間・2車線),最大交通量は6,755(台/2時間・2車線)である。

図-7はその頻度分布を示した図である。低交通量側は、平日の深夜および休日の夜間であり、4,000(台/2時間・2車線)を境に双峰分布を示している。

交通管制データでは大型車数が不明であるので、断面交通量の変動

T L A Mを使用して平日の24時間に渡って大型車交通量を調査した。結果を図-8に示す。大型車混入率

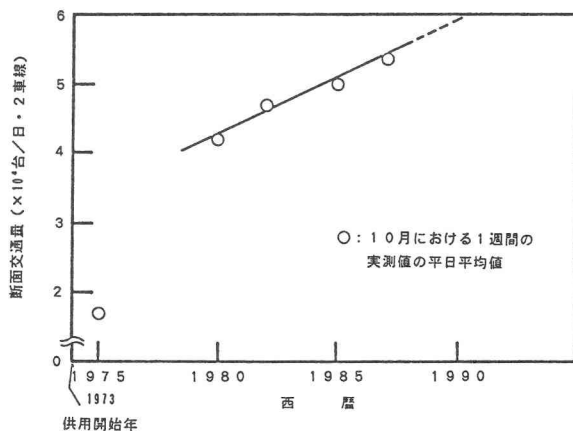


圖-5. 交通量経年変化

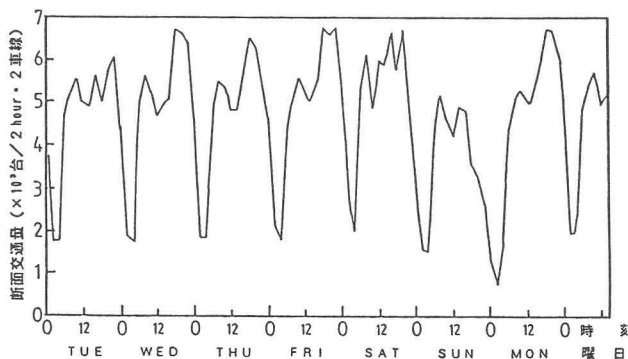
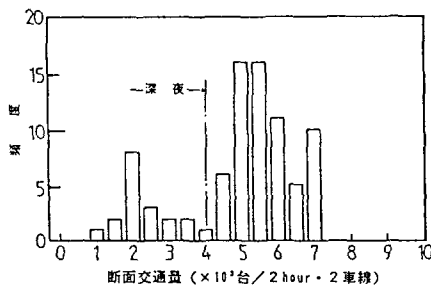
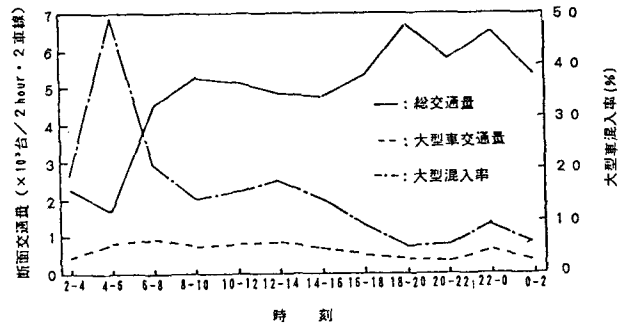


図-6. 実働応力測定時における
断面交通量の変動

は平均12.5%，深夜では約49％にも達している．



図－7．断面交通量の頻度分布



図－8．大型車交通量の経時変動

5. 実働応力測定結果

5. 1 余寿命解析

実働応力測定をもとにした疲労寿命評価方法には各種の方法があるが，ここでは図－9に示すとおりとした。⁴⁾

初めに，1週間の集計値をベータ分布にあてはめて等価応力振幅を求めた．詳細は次のとおりである．

ただし，疲労限がないものと考えて，測定全範囲を対象とした．

いま，応力変動範囲 S がベータ分布にしたがって部材に作用すれば，応力変動範囲 S の生起確率密度関数は，

$$F(S) = \{S^{q-1} \cdot (S_{max}-S)^{r-1}\} / B(q, r) \cdot S_{max}^{q+r-1} \quad \dots (1)$$

$$(0 \leq S \leq S_{max})$$

$$= 0$$

で表わされる．

ここに， $B(q, r)$ は q, r をパラメータとするベータ関数で，

$$B(q, r) = \int_0^1 t^{q-1} \cdot (1-t)^{r-1} dt \quad \dots (2)$$

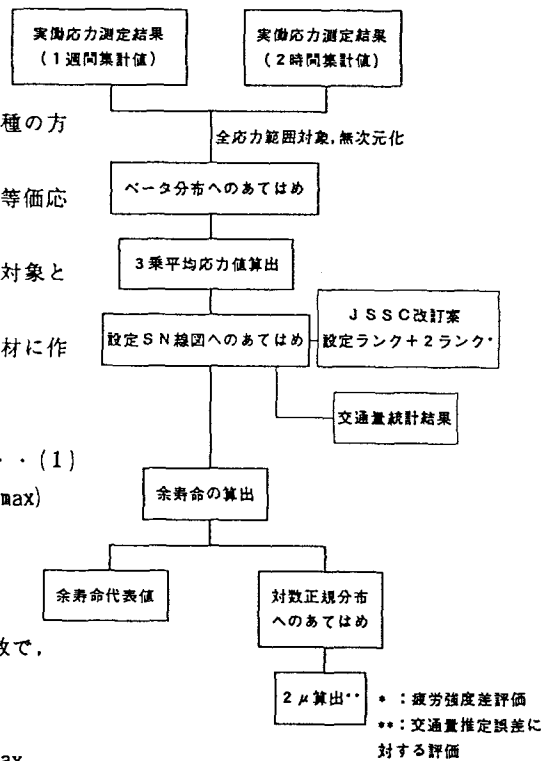
$$t = S/S_{max}$$

で表わされる．ベータ分布における3乗平均応力は，

$$S_{mc} = \sqrt{B(q+3, r) / B(q, r)} \cdot S_{max} \quad \dots (3)$$

にて計算され，これを等価応力振幅として解析を行なった．

第2に，測定期間における総交通量によって上記の等価応力振幅が測定繰返し数だけ発生したと考え，これを1稼働単位とした．そして，“4”で求めた供用開始後の累計交通量および今後の予想交通量により累計繰返し数を求めた．



図－9．解析フローチャート

第3に、この結果をS N線図にあてはめ、余寿命(測定時から亀裂発生までの年数)を求めた。

S N線図は、

$$\sigma^m \times N = \text{const}$$

σ : 等価応力振幅, N : 繰返し数

とし、疲労強度(ほぼ2.3%破断確率に相当)は日本鋼構造協会(J S S C)の疲労設計指針を参考に表-7のとおりとした。

表-7. 各部の設定疲労強度

ランク	疲労強度	継手区分例
A	190MPa	母材(機械仕上げ)
B	155MPa	突き合わせ溶接(溶接部仕上げ)
C	125MPa	ガス切断線, すみ肉溶接縦ビード
D	100MPa	突き合わせ溶接(溶接のまま)
E	80MPa	前面すみ肉溶接継手(まわし溶接を含む)
F	65MPa	ガセット溶接継手(まわし溶接部仕上げ)
G	50MPa	ガセット溶接継手(まわし溶接のまま)
H	40MPa	重ね継手(のど厚方向破断)

上記の解析手順に従って算出した余寿命が50年以下となった各部の実働応力解析結果を表-8に示す。

G 5主桁・分配横桁取合い部のプレートリブ(B 3)は-5年, G 6主桁・下横構ガセットまわし溶接部は-1年と, 点検結果と同様, 亀裂発生済みとの結果が得られた。

ソールプレート溶接部などでは, 疲労損傷が発見されていないにもかかわらず, 余寿命がマイナスとなっている部位があり, 重要点検箇所であるといえる。

さらに, 亀裂発生部について, 継手を単純モデルに置換して, 文献¹¹⁾を参考に亀裂進展解析を行い, 初期欠陥寸法および溶接線破断時期または板厚貫通時期を予測した。結果のみを表-9に示す。

分配横桁取合い部の疲労亀裂は深さ0.2mmの初期欠陥から発生しており, 約2年以内にプレートリブ溶接部を貫通すると予測され, 早急に補修・補強対策を講じる必要があると判断される。

ラテラルガセット溶接部の余寿命40年は, ウェブ板厚9mmを貫通するまでの寿命を表しており, 進展速度は遅い。現在の軽微なうちに補修を行う方が望ましいと考えられる。

表-8. 余寿命解析結果

測定部位	等価応力振幅 (MPa)	測定繰返し数 (1/10時間)	余寿命 (年)
A 2	19.3	23,871	1.5
B 2	35.9	62,500	-3
B 3	37.9	88,145	-5
B 4	25.7	24,140	1
B 5	22.7	30,268	3
C 1	23.6	22,129	4.9
C 2	25.9	31,337	-1
D 1	22.5	12,669	6
E 1	37.4	50,080	-3
F 1	29.5	46,673	-6
G 1	23.8	45,130	-2
H 1	25.0	56,341	-4

表-9. 亀裂進展解析結果

亀裂位置	初期欠陥寸法 (mm)	現在亀裂寸法 (mm)	余寿命 (年)
分補配強横リブ	0.2L (溶接長80mm)	5.0L (残存長75mm)	1.4
ラガテセラルト	0.2d x 5.0L (Web板厚9mm)	2.5d x 6.0L (残存厚6.5mm)	40

d:亀裂深さ, L:亀裂幅

5. 2 余寿命計算における変動要因

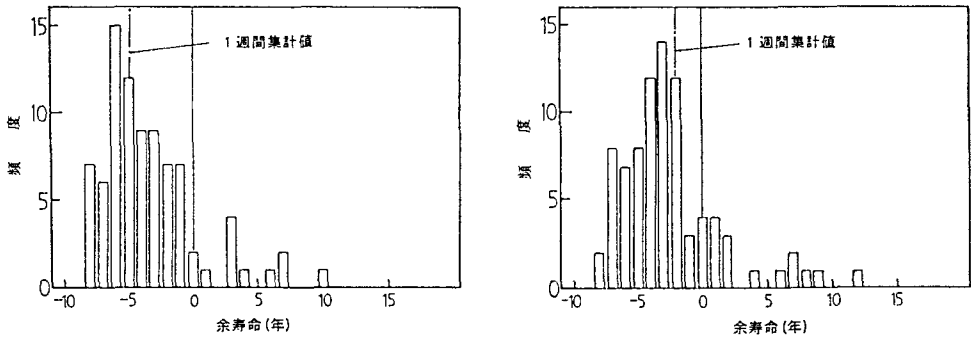
上記のとおり, 損傷が発生していないにもかかわらず, 余寿命がマイナスとなった部位がある。この原因として,

- (1)対象部の疲労強度のばらつき
- (2)重車両混入率, 走行位置等の交通実態変動

が考えられ, これらについては次の方法により考慮することとした。

(1)については、疲労試験データの平均値に相当する疲労強度(2ランク上)について先と同様に計算し、その影響について考慮した。

また、(2)については、2時間集計値を用いて設定疲労強度に対して余寿命を求め、これを対数正規分布にあてはめて、 2μ (95%信頼区間)を求めた。余寿命計算結果の頻度分布例を図-10に示す。



(1)補強リブ下端, B3

(2)ソールプレート溶接部, G1

図-10. 余寿命頻度分布例

上記計算結果を“5.1”の解析結果と合せて図-11に示す。

余寿命計算に及ぼす疲労強度のばらつきや交通実態の変動の影響は非常に大きく、例えば、ソールプレート溶接部のように余寿命がマイナスとなった部位では、16年～19年後には亀裂が発生する結果である。

したがって、今後の点検では、

図-11に示す箇所は要注意箇所として点検を進める必要があると考えられる。

6. まとめ

最近、鋼道路橋において増加しつつある疲労損傷に対して、計画的な維持管理を実施するために、疲労損傷の点検手法および各部の疲労健全性について実橋試験を行って検討を加えた。

ここで得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) 実橋における疲労損傷発生傾向を調査するため、詳細点検を行ったところ、疲労損傷は内桁・分配横桁取合い部および外桁・ラテラルガセット溶接部に検出された。

(2) 実橋に発生した疲労損傷に対して、室内試験結果ど

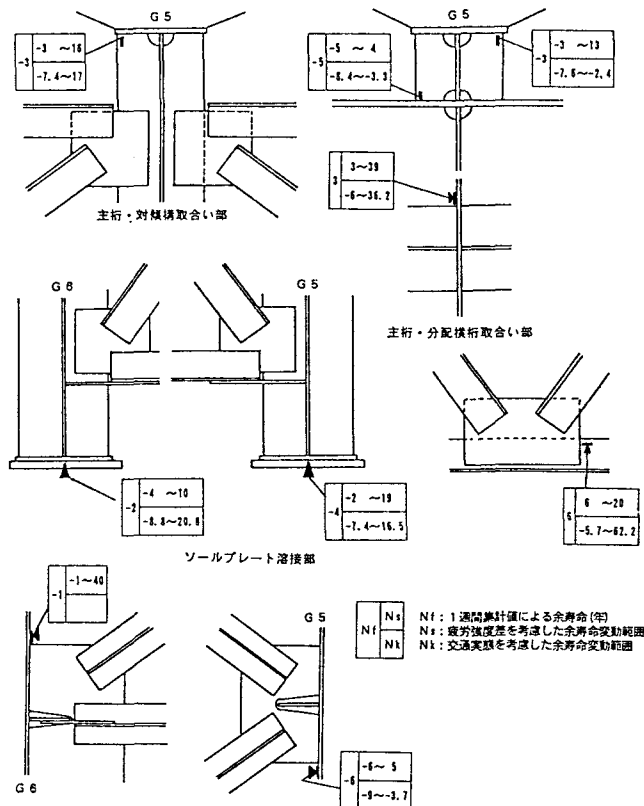


図-11. 余寿命に及ぼす疲労強度、交通実態の影響

おりの検出性能が得られるかを調査するため、実橋の詳細点検を行ったところ、渦流探傷試験を除いて室内試験と同等の検出性能が得られた。

- (3) 実働応力測定結果の解析に利用するため、既存の交通管制データおよび可搬式自動車交通流測定装置を用いた大型車交通量調査(平日24時間)を行った。実橋には、1週間で391,091台/2車線もの交通量があり、大型車混入率は平均12.5%、深夜では49%にも達していた。また、供用開始後約15年間の累計交通量は213,100,323台/2車線、今後の予測交通量は65,000台/日・2車線と推定された。
- (4) 1週間の実働応力測定の結果、内桁・分配横桁取合い部のプレートリブには、37.9MPaの変動応力(等価応力振幅)が88,145回も発生しており、余寿命は-5年となった。亀裂進展解析の結果、深さ0.2mm相当の初期欠陥があったものと推定され、約1.4年で溶接線が完全に破断する結果となった。早急に補強を行う必要があると判断される。
同様に、G6主桁・ラテラルガセット溶接部は、余寿命-1年で、深さ0.2mm x 表面長5mmの初期欠陥が存在していたと推定された。
- (5) 疲労損傷が発見されていないにもかかわらず、例えば、ソールプレート溶接部では-4年、G5主桁・対傾構取合い部垂直補剛材では-3年、G5主桁・ラテラルガセット溶接部では-6年と、余寿命がマイナスとなった。疲労強度のばらつきや交通実態変動の影響によるものと考えられ、これらを考慮しても、約20年以内には疲労損傷が発生すると予測された。
- (6) 横桁フランジまわし溶接部や対傾構斜材取付け部も、余寿命が10年以下と非常に低い。今後は、これらの箇所を要注意箇所として、重点的に点検を行う必要があると判断される。

上記検討結果をもとに、さらに構造形式、交通実態の異なる橋梁についての実橋試験を積み重ね、点検手法、疲労健全性評価手法の確立を図りたいと考えている。

謝辞

本研究を行うに当たり、(財)首都高速道路技術センター、(株)宮地鉄工所、三菱重工(株)、(株)東京鉄骨橋梁製作所および川崎製鉄(株)の関係各位には多大な御協力を頂いた。ここに付記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 西川和廣：道路橋における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，Vol.17，No.8，pp19-23，1983.8
- 2) 鋼構造委員会疲労変状調査小委員会：鋼橋の疲労変状調査，土木学会論文集，第368号/I-5，pp1-12，1986.4
- 3) 三木，深沢，加藤，大畦：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，第386号/I-8，1987.10
- 4) 深沢，大畦，加藤，三木：非破壊試験による表面疲労亀裂検出に及ぼす塗膜の影響，土木学会論文集，第398号/I-10，1988.10
- 5) 梶川，西沢，杉本：可搬式自動車荷重列自動測定システムの開発，土木学会論文集 第391号/VI-8 1988,3
- 6) A. H. S. Ang and W. H. Munse：PRACTICAL RELIABILITY BASIS FOR STRUCTURAL FATIGUE，ASCE National

Structual Engineering Convention, Meeting Preprint 2494, 1975

- 7) 山田, 牧野: 横リフ十字隅肉溶接止端部に発生する疲労亀裂の解析, 土木学会論文集, 第292号, pp1-12, 1979, 12
- 8) 山田, 牧野, 馬場, 菊池: 疲労亀裂の進展挙動に着目したガセット継手の疲労強度解析, 土木学会論文集, 第303号, pp31-41, 1980, 11

(1990年1月26日受付)