

実橋の応力頻度測定による疲労寿命評価

工 務 部 工務第一課 澤 登 善 誠
保全施設部 保全技術課 乙 黒 幸 年
京都建設事務所桃山工事事務所 奥 西 史 伸

要 旨

実橋の疲労強度・疲労寿命は、一定振幅応力下における疲労試験結果に基づく疲労設計曲線により評価されるのが一般的であり、変動応力下における実橋の疲労強度や疲労寿命を詳細に調査された事例はほとんどない。今回、実橋下フランジに試験片を取り付け実働応力下における疲労試験を行い、この結果を疲労設計曲線や室内の疲労試験結果と比較することにより、既往の一般的な疲労設計手法の妥当性について検討した。試験は、主桁下フランジに実橋に生じるひずみが拡大されるように加工した試験片を取り付け、下フランジおよび試験片のひずみを応力頻度測定器で測定し、データを現場制御パソコンに取り込み電話回線により転送するデータ収集システムを活用した。

試験の結果、主桁下フランジの最大応力に対して試験片の最大応力は4倍程度大きく、実橋の変動応力下における疲労強度は、室内一定荷重試験下の疲労強度より1ランク程度低いことが確認された。
キーワード：疲労強度、疲労寿命、応力頻度測定、モニタリング

はじめに

実橋の疲労強度・疲労寿命は、一定振幅応力下における疲労試験結果に基づく疲労設計曲線を用いて、線形被害則により評価されるのが一般的である。過去に、実橋をシミュレートした変動応力波形に基づく室内疲労試験と一定応力下の疲労強度との関係を調査することはあったが、変動応力下にある実橋の疲労強度や疲労寿命を詳細に調査された事例はほとんど見当たらない。今回、実橋の主桁下フランジに疲労試験片（環状ノッチを有する砂時計型試験片）を取りつけて実働応力下における疲労試験を行い、この結果を疲労設計曲線や室内の疲労試験結果と比較することにより、既往の一般的な疲労設計手法の妥当性について検討した。

また、モニタリング手法のハード面の開発を目的として、測定データを電話回線により遠隔地で取得するデータ収集システムも実験的に使用した。

1. 試験対象橋梁

試験対象橋梁は交通量が多く大型車混入率も高い、3号神戸線のS356桁とした。支間30m、主桁間隔3.85mのRC床版鋼I桁（5本主桁）である。建設時は単純桁であったが、現在は連結化工事により4径間連結桁となっている。橋梁概要を図-1に示す。

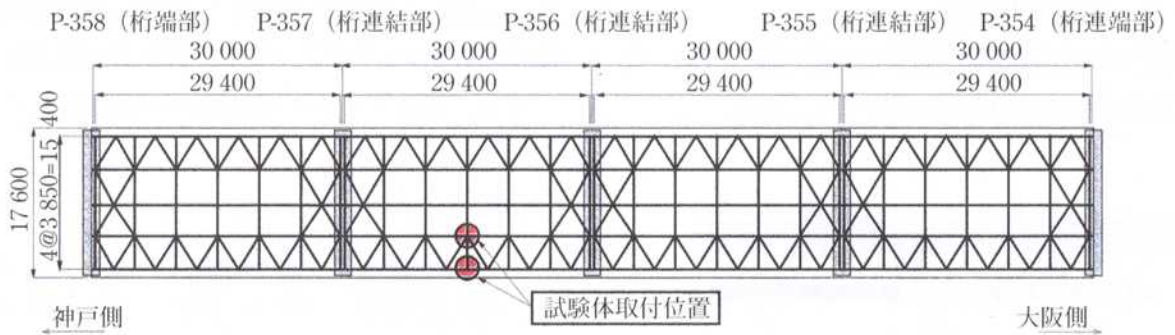


図-1 試験対象橋梁一般図

2. 試験方法

2-1 試験概要

疲労試験の概要を図-2に示す。試験は、実橋

での変動応力下における疲労試験と、同一の試験片を用いた一定荷重下での室内疲労試験とし、両者の結果を比較して疲労強度や疲労寿命を評価することとした。

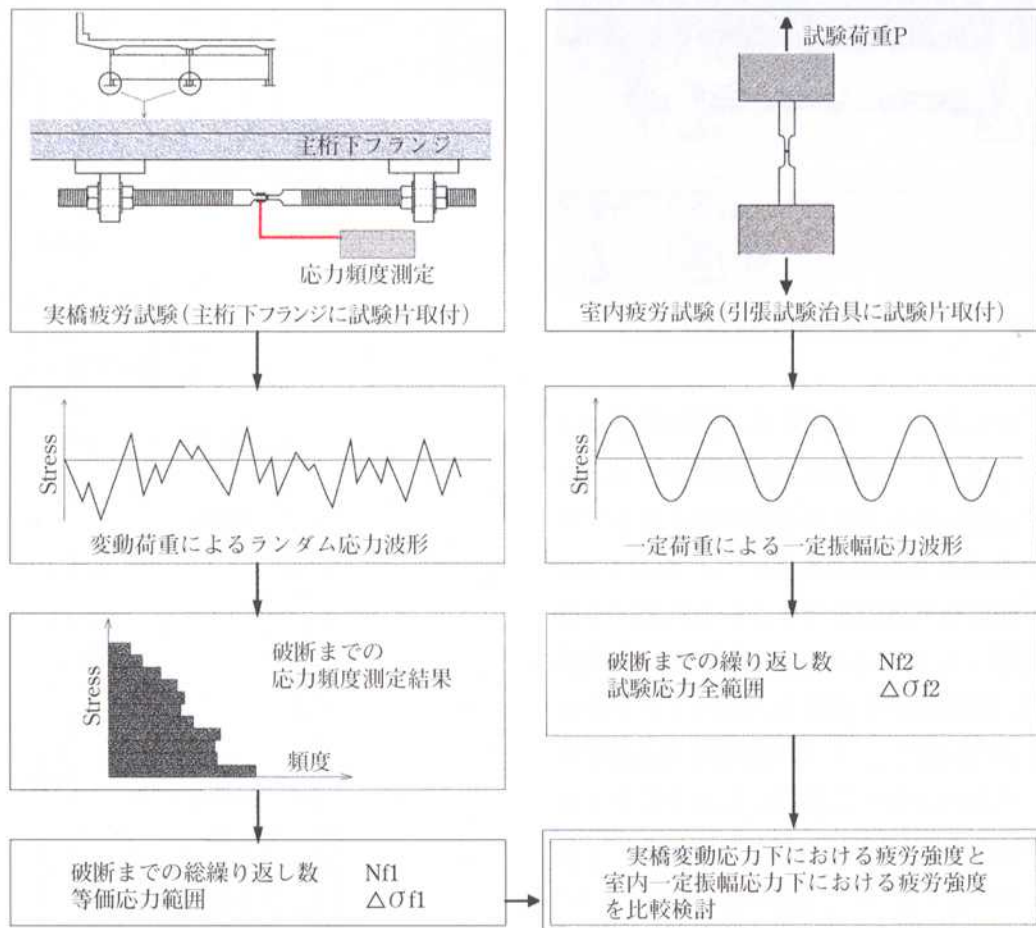


図-2 疲労試験の概要

2-2 実橋試験方法

実橋での疲労試験供試体の詳細を図-3に、実橋での疲労試験の状況を写真-1に示す。

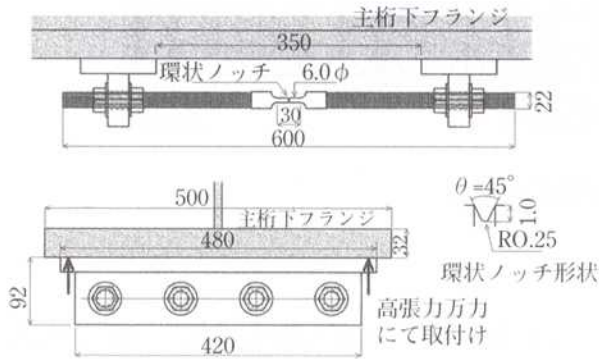


図-3 実橋疲労試験供試体



写真-1 実橋での疲労試験状況

図-3に示すように、試験片は試験対象となる平行部を細く短くし、試験体全長を長くすることにより、平行部に導入されるひずみが主桁下フランジのひずみよりも拡大されるように設計した。さらに、早期に疲労亀裂を発生させるために平行部中央に環状ノッチ（φ6.0mm）を設けた。試験片の設置は、固定治具を高張力万力により主桁下フランジ下面に設置し、2つの治具間に試験片を固定した。これにより、活荷重による主桁下フランジの発生応力と相似の応力が導入されることとなる。図-4に示すように、試験片は外桁（G5）および第一内桁（G4）の支間中央付近に12体ずつ、計24体設置した。

応力測定位置としては、試験片環状ノッチ近傍の上下2箇所および試験片取付部の主桁下フラン

ジ（試験片に発生する応力と実働応力の整合を確認するため）にひずみゲージを貼り付け計測した。また、測定データを取り込み・転送するデータ

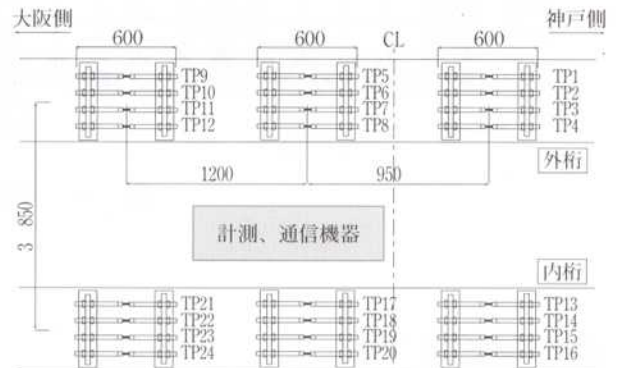
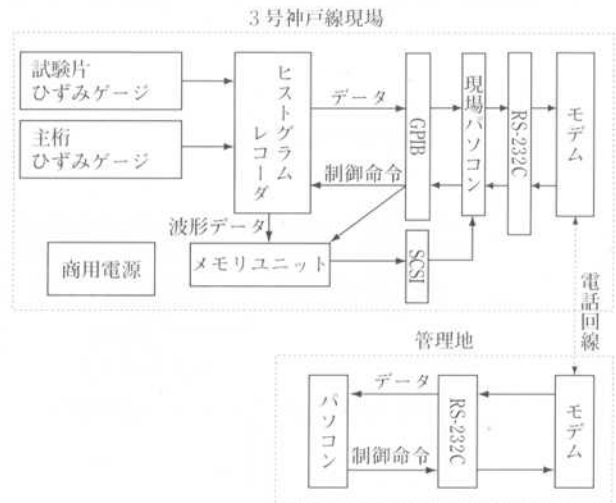
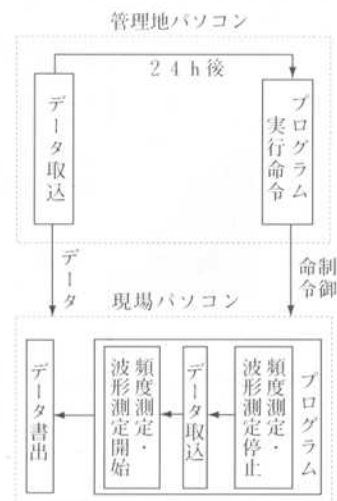


図-4 試験片の配置図



(1) 測定装置ブロック図



(2) 頻度データ取り込みフローチャート

図-5 測定・通信設備の概要

収集システムの概要を図-5に示す。試験片および主桁下フランジのひずみを応力頻度測定器に取り込み頻度測定し、測定データは測定箇所近傍に設置した現場制御パソコンに取り込み、電話回線により1日1回管理地に転送した。

2-3 室内試験方法

室内疲労試験供試体の詳細を図-6に、室内疲労試験状況を写真-2に示す。長さ900mm、幅80mm、板厚28mmの载荷治具の両側に試験片を取付け、50tサーボジャッキを用いて载荷治具に引張荷重を与えることにより試験片に引張応力を発生させることとした。

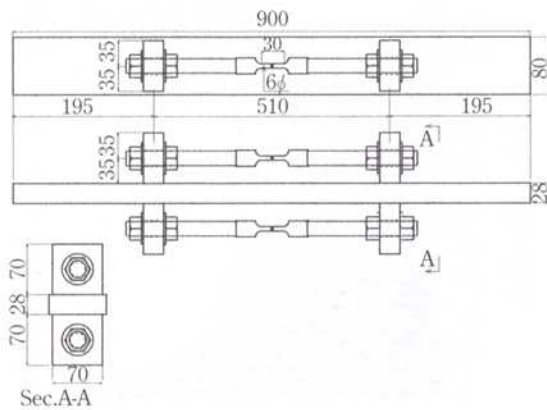


図-6 室内疲労試験供試体

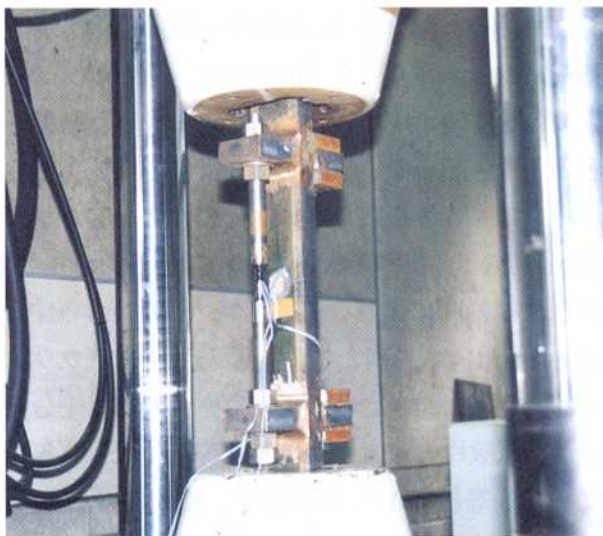


写真-2 室内疲労試験状況

3. 試験結果

3-1 試験片設置時の測定結果

実橋疲労試験体、室内疲労試験体の試験片設置時に試験体平行部に導入された初期応力の測定結果を図-7に示す。試験片の初期応力には、かなりのばらつきが見られたが、これは試験片設置時に曲げ変形が生じたものと考えられる。

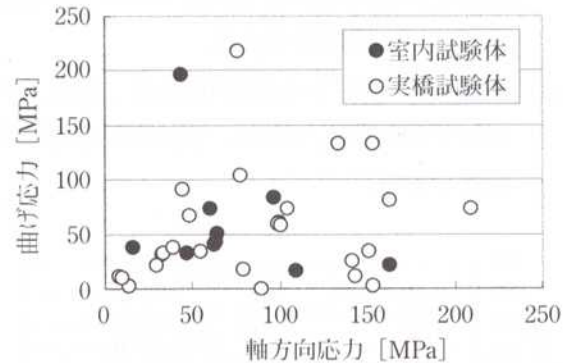


図-7 試験片設置時の初期応力測定結果

3-2 室内静的载荷試験結果

室内疲労試験を開始する前に行った静的载荷試験の結果の一部を図-8に示す。この試験により以下のことが解った。

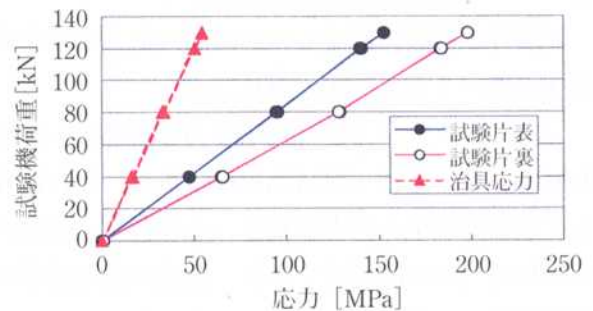


図-8 静的载荷試験の荷重-応力線図

- (1) 試験片平行部には治具応力の4倍程度の大きさの応力が発生している。
- (2) 治具応力および試験片応力とも荷重と線形関係にある。
- (3) 試験片設置時には曲げ変形の影響が見られたが、試験荷重に対する試験片の曲げ変形の影響は小さい。

3-3 実橋動的測定結果

実橋試験片の設置後に、全ての試験片について一般車走行時の動的測定を行った。その結果の一例を図-9に示す。他の試験片の測定結果についてもほぼ同様の結果となった。この測定により以下のことが解った。

- (1) 試験片には、主桁下フランジ応力の4倍程度の大きさの応力が導入されている。
- (2) 試験片の応力波形と主桁下フランジの応力波形はほぼ相似形である。
- (3) 試験片に発生する曲げ応力は、軸応力の10%~20%程度であり、室内試験結果と同程度である。

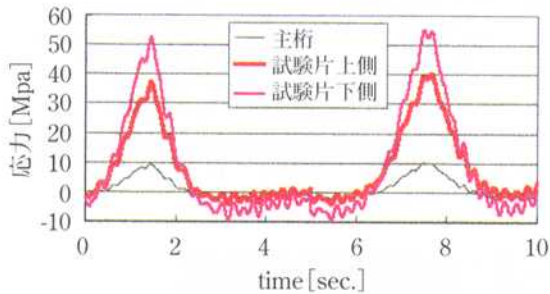


図-9 実橋試験片の動的測定結果

3-4 実橋応力頻度測定結果

試験片設置後に測定した24時間の応力頻度測定結果を表-1および図-10に示す。

主桁下フランジの最大応力振幅は外桁で46MPa、第一内桁で31MPa程度である。これに対して試験片の最大応力振幅は、その約3~4倍の131MPa、116MPa程度であり、前述の動的波形の増幅傾向と一致する。

24時間の応力頻度は、主桁下フランジに比べて試験片の方がはるかに多い。これは主桁下フランジの応力が拡大して試験片に導入されるため、主桁下フランジの小さな応力振幅まで影響を受けているためである。よって、主桁下フランジの打切限界以下、すなわち主桁下フランジの疲労寿命に影響を及ぼさない応力成分も試験片の疲労寿命に影響を及ぼすことになる。このような実橋の応力を拡大した試験片の試験結果を用いて疲労評価を

行う場合には、この点に留意する必要があると考えられる。

表-1 24時間応力頻度測定結果

	外桁		第一外桁		
	主桁Lflg.	試験片	主桁Lflg.	試験片	
総繰り返し数	89750	367543	72588	333956	
最大応力範囲 [MPa]	46.4	131.4	30.9	116.0	
JSSC-k4 (E)	損傷度 Di (/H)	3.9E-06	9.0E-04	5.8E-08	4.2E-04
	等価応力 [MPa]	33.9	48.9	30.9	41.8
	試算寿命 (年)	706	3.1	47364	6.5
JSSC-k5 (F)	損傷度 Di (/H)	1.3E-05	3.3E-03	1.9E-06	1.6E-03
	等価応力 [MPa]	28.3	44.2	24.0	37.4
	試算寿命 (年)	214.6	0.8	1407	1.7
JSSC-k6 (G)	損傷度 Di (/H)	7.4E-05	2.0E-02	1.6E-05	9.4E-03
	等価応力 [MPa]	18.6	39.5	17.5	33.8
	試算寿命 (年)	37	0.1	169	0.3

注) 主桁応力の試算はJSSC-E,F,G等級

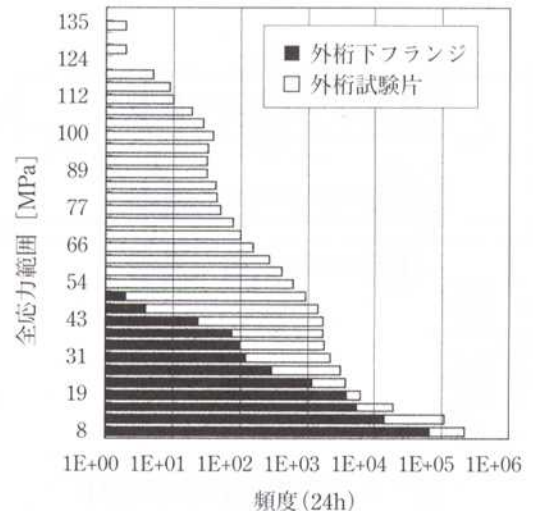


図-10 24時間応力頻度測定結果

主桁下フランジと試験片の応力頻度からJSSC-K4~K6¹⁾(主桁はJSSC-E~G)の疲労設計曲線を用いて疲労寿命を試算した結果を表-1に併記している。実橋で計測した応力頻度データはK5等級よりも低かったため、K4等級(転造高力ボルト)とK5等級(切削高力ボルト)から直線補間により、K6等級($\sigma_f=35\text{MPa}$, $\sigma_{ve}=9\text{MPa}$)を新たに仮定した。主桁下フランジは発生応力が小さいため試算疲労寿命は十分長い。試験片の疲労寿命はK4等級で3~6年程度、K5等級で1~2年程度、K6等級では0.1~0.3年程度となっている。

試験開始から終了までの1年間の主桁下フラン

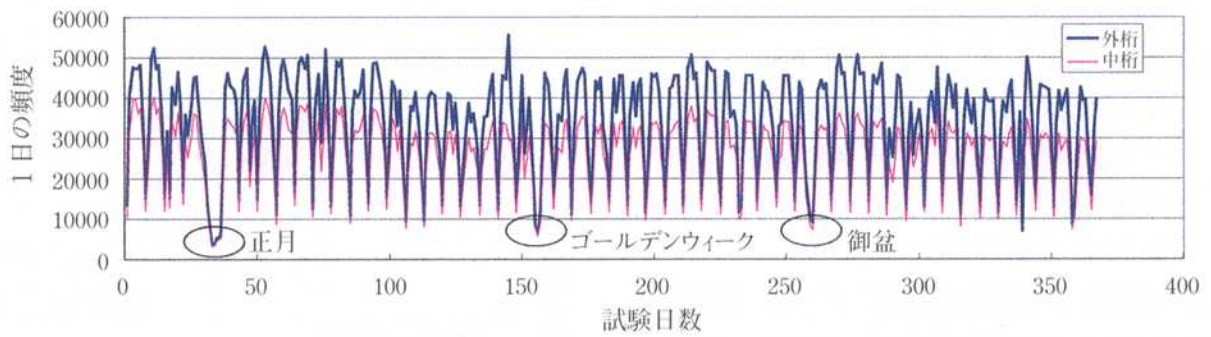


図-11 主桁下フランジの応力頻度測定結果

ジの応力頻度測定結果を図-11に示す。ここでの計測頻度は1日当たりの応力発生頻度をプロットしたものである。この図より応力頻度は一週間単位で変動していることが解る。また、測定開始後30日付近、160日付近、260日付近に応力頻度の比較的少ない期間が出現している。これらは正月、ゴールデンウィーク、盆休みの時期における交通量の減少による影響と考えられる。それ以外の期間では1年間を通して特に大きな変化は見られない。通常、実橋の疲労評価をする場合、1日もしくは1週間の応力頻度データから疲労寿命を推定するが、休日ならびに上記のような特別な時期を外せば平均的な評価が得られると考えられる。

3-5 試験片の疲労寿命試算

実働応力の大きな外桁に取り付けた試験片は全数破断し、第一内桁に取り付けた試験片は12本中3本が破断した。試験片の応力頻度測定結果（1日毎の損傷度： $\sum \sigma^5 \cdot N$ ）の経時変化の一例を図-12に示す。主桁下フランジの測定結果と同様に、試験片の測定結果もほぼ1週間単位で変動

しており、ある時点以降に試験片が破断し応力頻度が零となっている。

破断した試験片の応力頻度データから等価応力範囲（変動振幅応力と同じ繰返し数で等価な疲労被害を与える応力範囲）を算出し、S-N線図で表したものを図-13に示す。試験体の破断時期は、1日の応力頻度データがほぼ零となる点とし、等価応力範囲の算出にあたっては室内試験結果から得られたS-N線図（傾き1/5、応力打切限界80MPa）の他、JSSC-K4～K6等級の疲労設計曲線および修正マイナー則を用いた。図中には一定荷重下における室内疲労試験の結果を併記している。結果は以下のとおりである。

(1) 室内疲労試験結果の応力頻度データは、JSSC-K4～K5等級の疲労設計曲線近傍に分布している。また、一定応力振幅下での打切限界は80MPa程度である。

試験片は切削により環状ノッチを付けたものであるため、「軸方向力を受ける切削加工によるボルト（JSSC-K5等級）」と同等の疲労強度を有していると考え、今

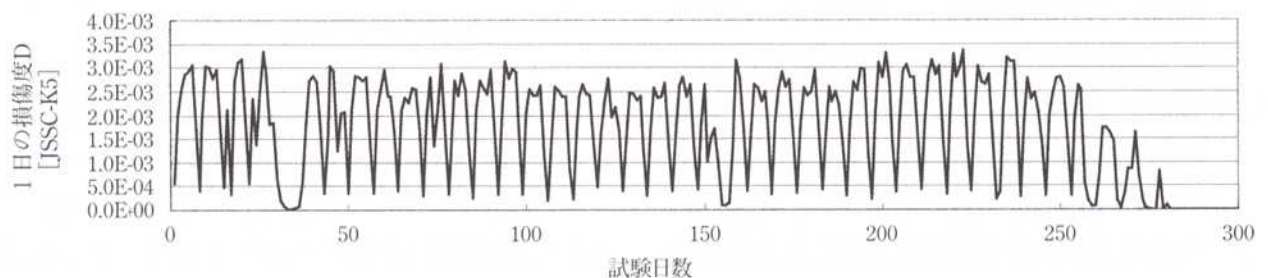


図-12 1日ごとの損傷度の経時変化

回の室内試験結果は妥当であるといえる。

(2) 実橋計測データについては、JSSC-K5～K6等級の疲労設計曲線近傍に応力頻度データが分布しており、実橋計測結果は室内試験結果と比較して疲労強度が1ランク程度下回った結果となった。

また破断した実橋の試験片について、破断するまでの1日ごとの応力頻度データから、JSSC-K5等級およびK6等級により疲労寿命を試算し、疲労寿命日数ごとに度数分布で表したものの一例を図-14に示す。

試験片により結果にばらつきはあるものの、JSSC-K5等級で試算した疲労寿命付近あるいはそれより早い時期に試験片は破断している。一方、1ランク下のK6等級で試算した場合には、試算した疲労寿命より破断時期は遅くなる。

これらの結果から、実橋の変動応力下における疲労強度は、一定応力下での室内試験による疲労強度（JSSC疲労等級）よりも1ランク程度下であると考えると疲労寿命の試算を行うことが安全側に評価することになると考えられる。

まとめ

実橋に試験片を取付け、変動応力下における疲労試験を実施するとともに、一年間にわたる応力頻度データを、電話回線を利用した収集システムにより収集することを検討した。

これまでの結果をまとめると、以下のように考えられる。

- (1) 1年間にわたり橋梁に作用する外力はほぼ一定であり、休日や特別な期間を避けた24時間の応力頻度測定データにより、実用的で有効な疲労評価を行うことができる。
- (2) 環状ノッチを有した試験片における、実橋の変動応力下での疲労試験および一定応力下での室内疲労試験の結果から、実橋の疲労強度は室内疲労試験より得られた疲労強度より1ランク程度下回る。
- (3) 主桁ドフランジに発生する応力波形を、試

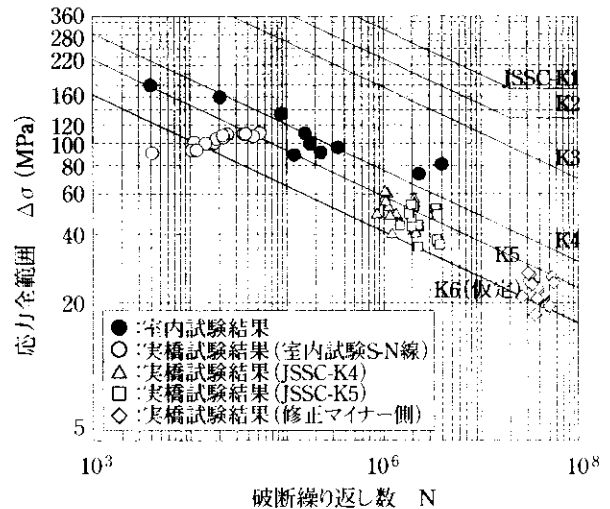
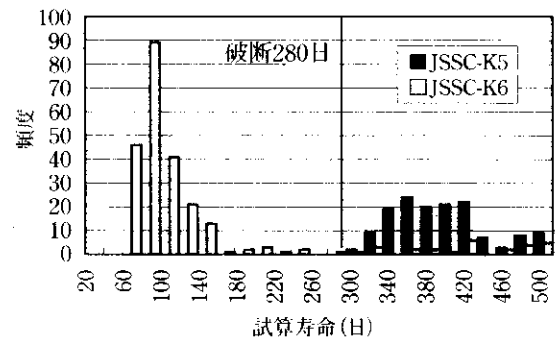
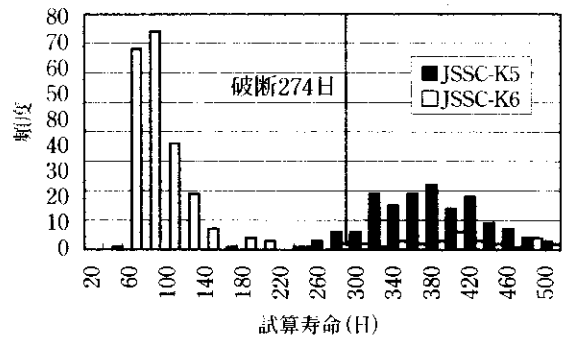


図-13 試験片の疲労試験結果



(1) 試験体1



(2) 試験体2

図-14 頻度データから試算した疲労寿命のヒストグラム

験片に発生する応力波形から比較的精度よく評価することが可能であり、今後の橋梁疲労モニタリング手法として有用である。

- (4) 電話回線を利用したデータ収集システムは有効に活用できる。

主桁一般部の疲労損傷が危惧される部位として

は、主桁ウェブの面外ガセット取付部、横桁下フランジの主桁ウェブ貫通部などが挙げられる。これらの部位の疲労強度（疲労寿命）評価を行うために、各部位の応力測定を行うのではなく、今回の計測のように主桁下フランジの応力測定結果から各部位の疲労強度を評価する手法を今後確立していく必要がある。そのためには、3号神戸線以外の路線においても応力頻度データを収集すると

ともに、疲労評価法の確立や算出された計測結果の評価基準についても検討していく必要があると考える。

参考文献

- 1) (社)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

Evaluating fatigue life of actual bridge structures from applied stress frequency.

Yoshinobu Sawanobori, Yukitoshi Otoguro, Fuminobu Okunishi

The fatigue strength and fatigue life of actual bridge structures is generally evaluated using fatigue design curves generated from the results of fatigue testing under constant amplitude stress. There have been very few reports of detailed investigation of the fatigue strength and fatigue life of bridge structures under fluctuating stress. Here we present results of a fatigue study of working stress that we carried out by attaching a test piece to a flange under a bridge. By comparing data from this investigation with the fatigue design curve and data from a laboratory fatigue experiment we considered the validity of assumptions about the fatigue that ordinarily occurs. The test piece we used was processed so as to amplify the strains that occur in the attached location, under the flange of the main beam of a bridge. We monitored the stress occurring in the test piece fixed in location using stress frequency measurement equipment and a data acquisition system that was controlled on-site by a personal computer, but which allowed us to receive the data via telephone lines.

Our findings show that the test piece underwent stress about four times greater than the greatest stress allowed for the under-flange of the main beam. We confirmed that fatigue strength under the fluctuating stress conditions of the actual bridge was about one rank less than the fatigue strength observed during the laboratory constant loading test.

Keywords: fatigue strength, fatigue life, stress frequency measurement, monitoring.