

高架橋上の門型標識柱基部の交通振動による疲労耐久性評価

Fatigue evaluation of a sign structure under traffic-induced vibration

小塩達也*, 山田健太郎**, 片桐英喜***, 前野裕文****

Tatsuya OJIO, Kentaro YAMADA, Hideki KATAGHIRI and Hirofumi MAENO

*工修, 名古屋大学助手, 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

** Ph.D. 名古屋大学教授, 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

*** 名古屋高速道路公社, 保全部(〒462-0844 名古屋市北区清水四丁目 17-30)

**** 工博, 名古屋高速道路公社, 保全部(〒462-0844 名古屋市北区清水四丁目 17-30)

Fatigue cracks were found in bases of a variable message sign structure on a viaduct. Cracks were initiated at the fillet weld of rib plates attached at the bottom end of four main poles. Strain measurement was carried out for 88 hours at the fillet weld of rib plates where no crack was found. Hourly traffic volume and truck traffic volume were investigated by toll records in a tollgate nearby. Hourly fatigue damage, which was calculated by Rain-flow Counting Method and Miner's rule, indicated that the fatigue damage was relative to truck traffic volume. Fatigue life was calculated by the cumulative truck traffic volume. The calculated fatigue life was compared with the actual fatigue life.

Key Words: sign structure, vibration, fatigue, traffic-induced vibration

キーワード: 橋梁付属物, 標識柱, 疲労, 振動, 交通振動

1. はじめに

橋梁上に設置される標識柱, 照明柱などの橋梁付属物に振動が生じ, 振動による繰り返し荷重により溶接部に疲労き裂が生じる事例が報告されている¹⁾. 橋梁付属物に振動が生じる原因としては, 風などによる空気力学的な加振力や, 自動車の走行によって加振された橋梁の振動などが考えられる. しかしながら, 橋梁付属物の設計時には, 上記の振動現象については配慮されないことが多い.

筆者らは名古屋高速道路公社の標識柱, 照明柱において, 供用下での振動測定, 応力頻度測定を行い, 様々な種類の橋梁付属物基部について疲労寿命の相対比較を行なった^{2,3)}. その結果, 橋梁付属物の固有振動数が3Hz付近にあるとき, 橋梁上を大型車が走行する際に振動を生じやすいことが明らかになった. また, 情報板を有する門型標識柱, F型標識柱の疲労寿命が短いと判定された. さらに, 応力の総繰り返し数と交通量の関係にある程度の相関があることが判明している. これらの分析で用いた交通量とは普通乗用車を含む交通量であったが, 橋梁振動が生じる大きな要因は, 大型車両の走行によるものであることを考慮すると, 大型車交通量と疲労損傷度の関係に着目する必要がある.

本研究では, 2004年度に疲労き裂が発見された情報板門

型柱を対象に, 疲労き裂発生部位のひずみ測定を行い, 振動特性, 応力範囲頻度分布を求めた. また, トラフィックカウンタおよび料金所の料金収集記録から求めた時間あたりの大型車交通量と標識柱基部の疲労損傷度の関係を求めた. さらに, 供用開始後から現在までの大型車両の累積交通量を考慮した疲労き裂の発生年度を推定し, 実際の疲労き裂の発生年度と比較した.

2. 分析対象と測定方法

2.1 疲労き裂が発生した情報板門型柱

名古屋高速道路公社では, 2000年度の測定結果¹⁾から, 情報板門型柱の疲労寿命が他のものよりも比較的短いという分析結果に基づき, 既設の門型標識柱(標識板および情報板門型柱)の重点点検を行なった. その結果, 2基の情報板門型柱の基部リブプレート上端部の回しすみ肉溶接部に疲労き裂が発見された. このうちの1基は文献³⁾で計測したものである. 本研究ではもう一つの情報板門型柱を分析対象とした.

本研究で測定対象とした橋梁付属物は, 名古屋高速道路公社高速3号大高線(以下, 大高線とする.), 距離標8.94Kpにある情報板門型柱である. この情報板は上下線1体構造

の鋼単純鉄桁橋上に設置されている。情報板門型柱の写真および一般図を写真1、図1に示す。この情報板門型柱は、内照式の変情報板を有し、パイプトラスで門型柱を構成している。基部は左右2本ずつ4本の柱が壁高欄上にアンカーボルトで固定され、基部は3角形のリブプレートで補強されている。図2に疲労き裂発生位置の概略図を、写真2～4にき裂1、き裂2の写真を示す。疲労き裂はリブプレート上端部のまわしすみ肉溶接止端を基点とし、4箇所発生しており、き裂長さは40mmほどである、井舎ら⁴⁾の解析によれば、門型形式の標識柱の場合には、振動数に与える基部の疲労き裂の影響は小さく、き裂が発生しても振動特性には変化が現れないとされている。従って、この情報板門型柱は、疲労き裂発生前と同様に振動が生じていることが予想される。そこで、前述した情報板門型柱の柱基部の補強

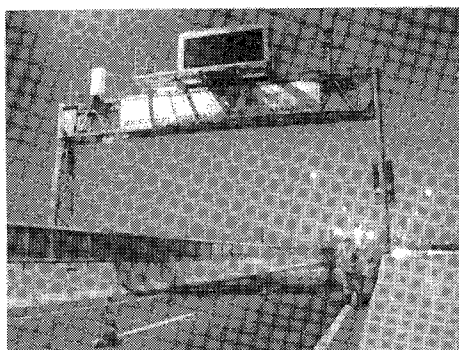


写真1 高速3号大高線8.94kpの情報板門型柱(南東から)

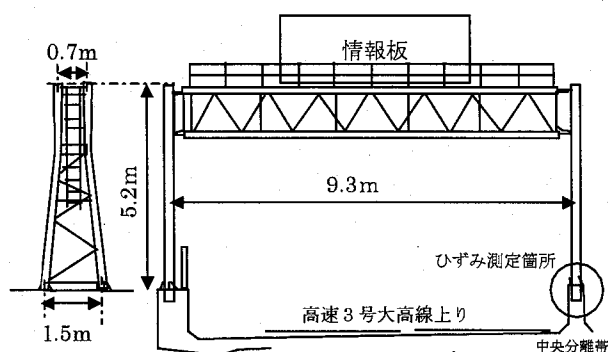


図1 情報板門型柱(8.94Kp)の一般図

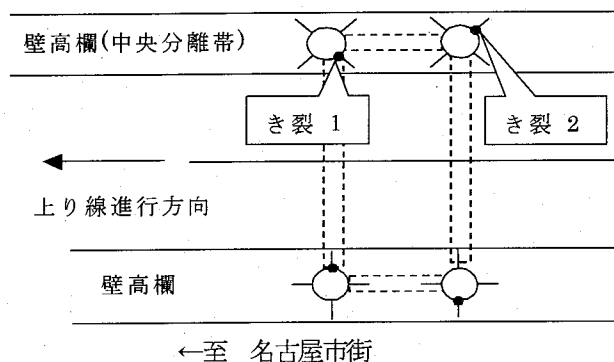


図2 疲労き裂の発生位置

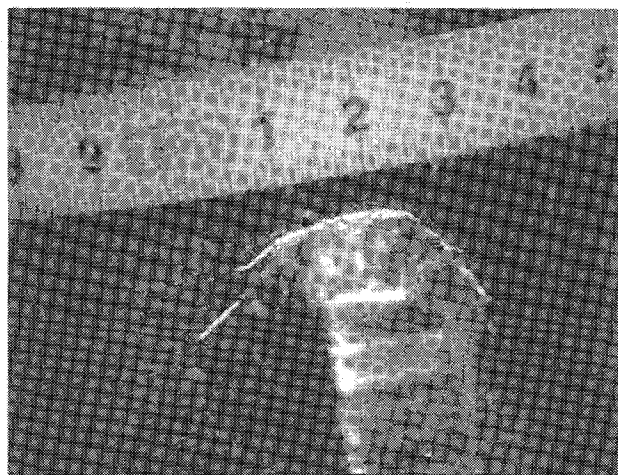


写真2 磁粉探傷試験時の写真(き裂2)

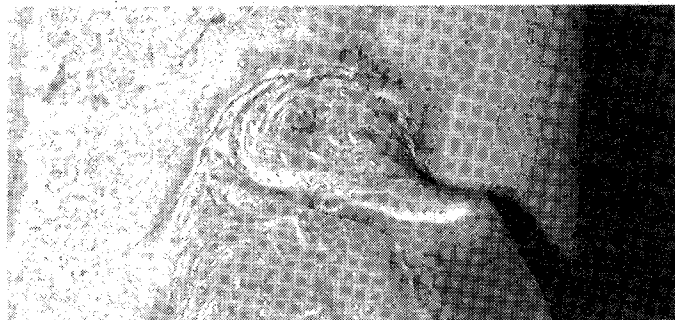


写真3 き裂1

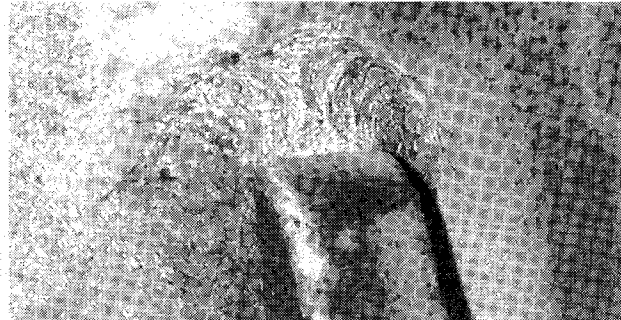


写真4 き裂2

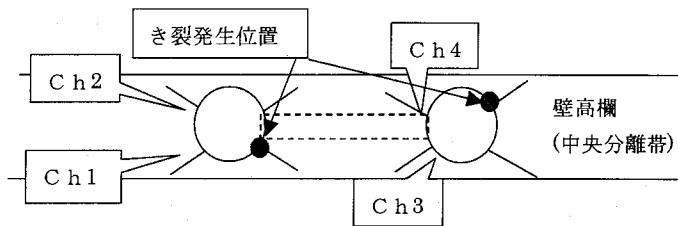


図3 ひずみゲージ貼付箇所

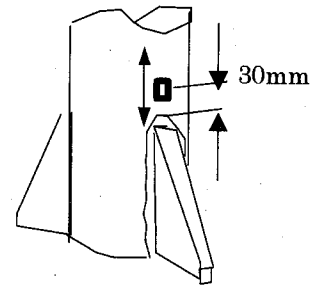


図4 基部リブプレート上端部のひずみゲージ貼付位置

2.5 交通量の調査

交通量と振動の関係を明らかにするため、対象位置の上流にある星崎料金所(上り線)の各料金ブース(10箇所)の料金收受データ、情報板門型柱付近の上下線のトラフィックカウンターによる交通量のデータを計測期間についてそれぞれ入手した。星崎料金所は、測定する情報板門型柱の上り側に位置し、情報板門型柱を通過した上り線の車両すべてが必ず通過する料金所である。この料金收受データから、料金区分にしたがって、大型車、普通車の交通台数を算出し、全交通量に対する時間ごとの大型車混入率を求めた。星崎料金所の交通量は上り線のみのデータであるため、上下線に設置したトラフィックカウンターで計測された交通量に対し、星崎料金所のデータから計算した大型車混入率を乗じることで、上断面の大型車交通量とした。また、年度別の過去の交通台数に関するデータも入手し、供用開始から現在までの累積交通量を推定した。

3. 測定結果

3.1 大高線の交通量

測定期間に星崎料金所を通過した普通車と大型車の時間別交通量を図5に示す。朝夕のラッシュ時、8:00、16:00付近にピークがあるが、20:00頃から急激に台数が減り、深夜1~2時付近にはほとんど車両走行が見られない。一方、大型車の交通量は8:00ごろにピークがあるが、午後には減少し、普通車に見られた16:00頃のピークは見当たらない。図6にトラフィックカウンターによる交通量および平均走行速度を示す。8:00および16:00の台数のピーク時は渋滞により平均速度が低下しているが、それ以外の時間帯では、平均速度は概ね安定している。なお、20日13時~21日3時に台風23号の接近に伴う速度規制等が行われているが、交通台数に著しい変化は認められなかった。

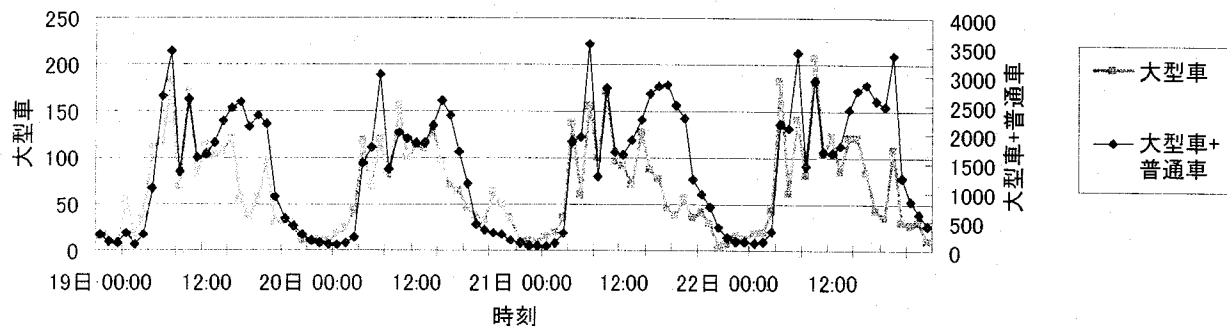


図5 測定期間の星崎料金所の時間別交通量

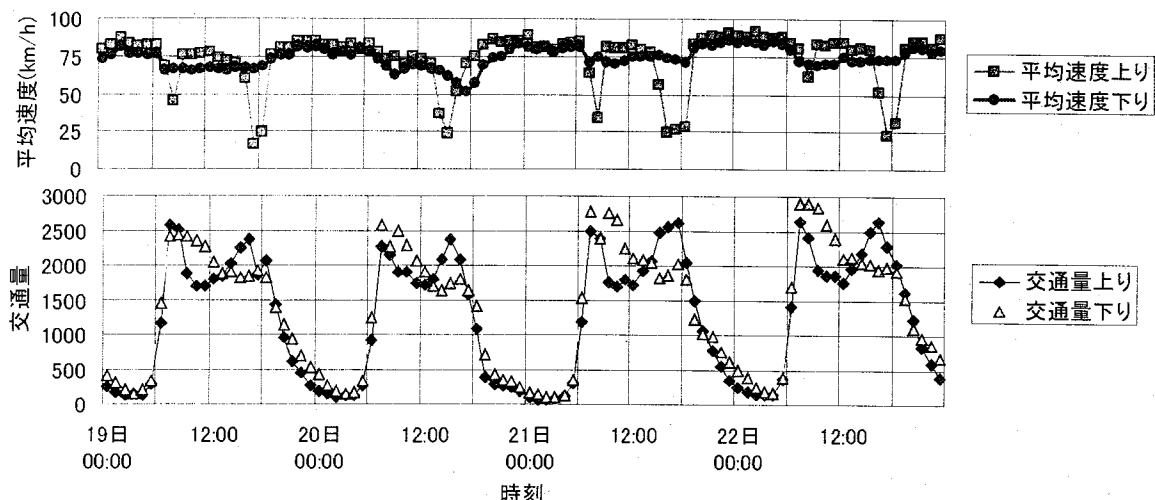


図6 トラフィックカウンターによる大高線の交通量と平均速度の推移

3.2 応力範囲頻度分析

計測した連続ひずみ波形から、レインフロー法を使用し、応力範囲頻度分布を作成した。最大のひずみ値を示したCh3の応力範囲頻度分布を図7に示す。スライス幅は 5μ ひずみとした。最大ひずみ変動範囲はCh3で 540μ 、Ch2,1で 500μ であった。

3.3 振動特性の分析

連続測定開始前に行なった振動測定では、壁高欄から高さ2mの位置の柱部に加速度計を設置し、橋軸直角方向の水平加速度とCh1~Ch3のひずみを同時に測定した。測定データは1台の大型車両が通過する際の応答波形を約1分間とし、1kHzのサンプリング周波数で測定した。図8にCh3のひずみと加速度波形を示す(最大応答値付近の10秒間)。ひずみと水平加速度は位相が一致しており、柱上部が橋軸直角方向に変形する面内せん断型モード²⁾により基部に繰り返しひずみが生じていることがわかる。

・固有振動数および減衰定数

振動測定で得られた波形から、Random Decrement 法⁵⁾(以下 RD 法)を用いて、減衰自由振動波形を算出した。Ch1のRD法による減衰自由振動波形を図9に、そのパワースペクトル(ピークを1として正規化)を図10に示す。

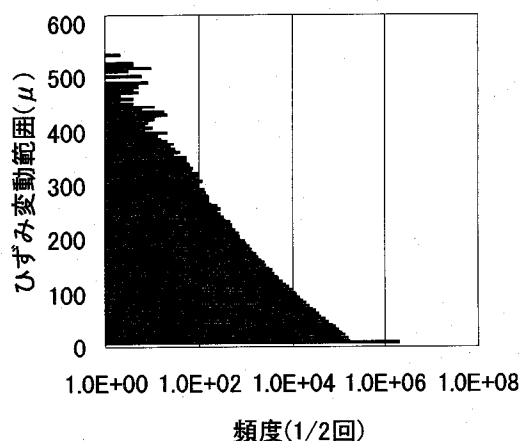


図7 Ch3 応力範囲頻度分布
(測定全期間、88時間)

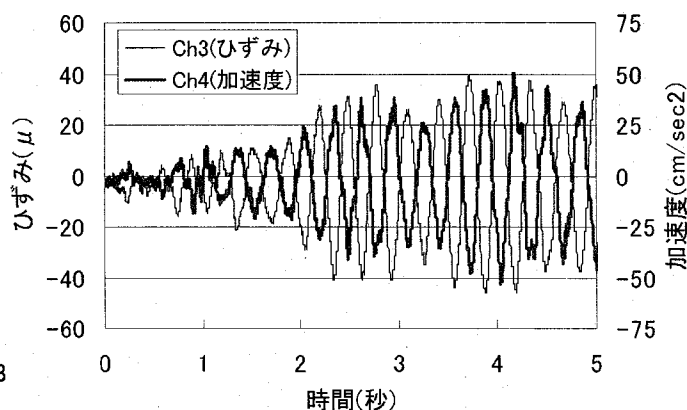


図8 Ch3のひずみ波形と基部から2m位置の
橋軸直角方向水平加速度(2軸トラック通過時)

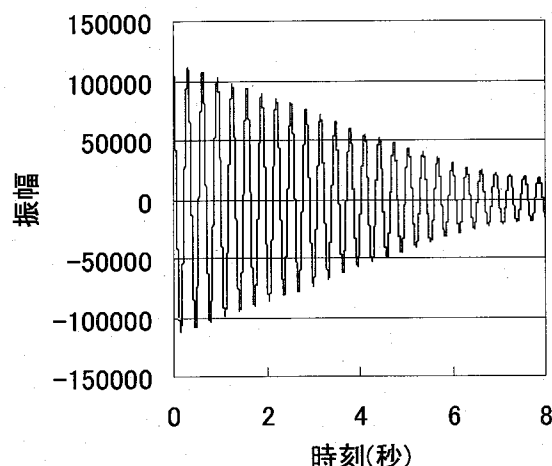


図9 RD法により算出したCh1の自由振動波形

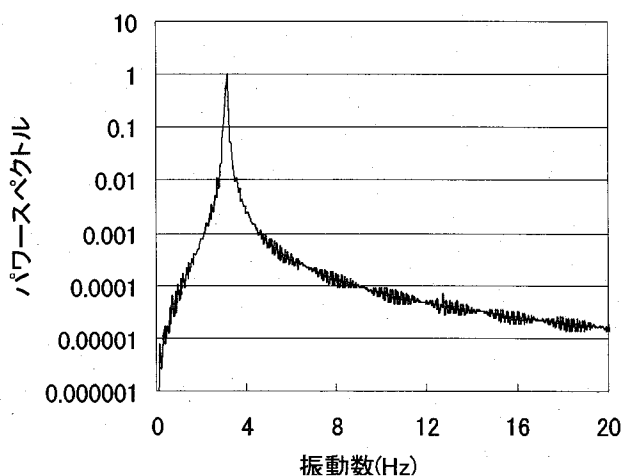


図10 Ch1の自由振動波形から計算したパワースペクトル

固有振動数は3.17Hz、自由振動波形から直接的に求めた減衰定数は0.008であった。この振動数は文献2)で交通振動による励振が生じやすいとされている振動数域(2~4Hz)にあると考えられる。

・振幅・周期スペクトル

もっとも大きなひずみを記録したCh3について、レインフロー法による振幅・周期スペクトル²⁾を計算した。振幅・周期スペクトルは、レインフロー法により波形の変動範囲を計数する際に、その変動範囲の終始点の時間間隔を周期として同時に計数し、変動範囲と周期の2次元頻度分布を作成する計数法である。振幅・周期スペクトルに特定の振動数域が卓越する場合、その振動数域での振動が測定点の疲労損傷度に与える影響が大きいことを示している。図11にCh3の波形から計算した88時間分の振幅・周期スペクトルを示す。最大値は 500μ 付近で、固有振動数である3.1Hz付近に生じている。また、この付近以外の振動成分は1Hz付近が卓越しているが、これは、「うなり成分」がレインフロー法により計数されたものである。

以上から、この情報板門型柱は3.17Hzの振動モードにより基部に繰り返し荷重が作用しており、疲労き裂発生の主要因となっていると考えられる。

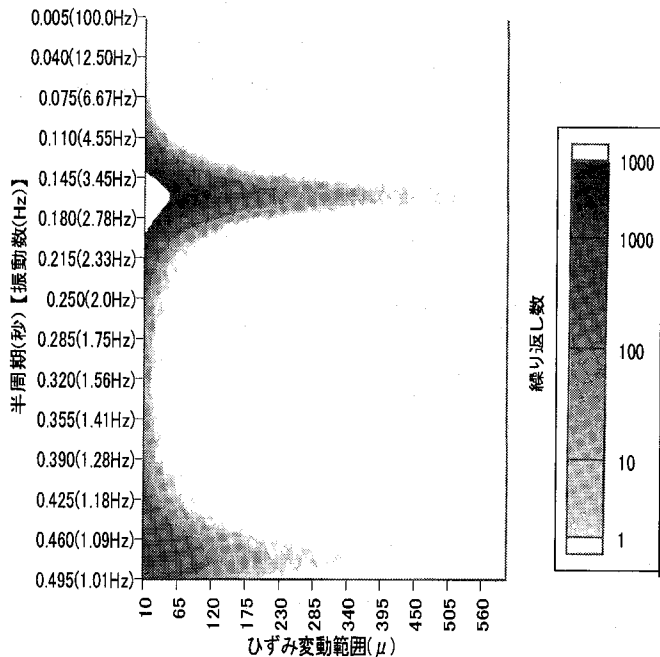


図 11 Ch3 のひずみの振幅・周期スペクトル
(周期は半サイクルの周期、振動数は 1 サイクルの振動数)

3.4 時間あたり交通量と疲労損傷度

道路橋の部材の発生応力の繰り返し数は、影響線の長さに応じて、通過する車両の台数や軸数が関与し、応力の大きさは総重量や軸数が関係している⁹⁾。したがって、部材の疲労寿命を正確に予測するためには、供用開始からの大型車の台数、軸数や、荷重の頻度分布などを考慮する必要があるといわれている⁹⁾。供用下で測定した応力範囲頻度分布を用いて疲労寿命を予測する場合には、計測した期間に対応する大型車の台数を把握し、単位台数あたりの疲労損傷度を求め、供用開始からの累積台数を用いて疲労損傷度を求めることが好ましいとされている⁹⁾。

一方、本研究で対象としている橋梁上の付属構造物に生じる応力の繰り返しは、大型車の通過にともなう橋梁の振動によるものであり、筆者らの過去の測定事例^{2),3)}において交通量と振動による繰り返し数との間にある程度の相関があることが示されているものの、大型車交通量と疲労損傷度との因果関係については明らかにされていない。本研究では、単位時間あたりの疲労損傷度と大型車の通行台数の関係に着目した。図 12 に時間毎の応力範囲頻度分布から求めた総繰り返し数と大型車交通量の関係を示す。橋梁部材に生じる応力の繰り返し数は大型車交通量と相関があり、大型車交通量の台数に応じた振動の繰り返しが生じていることを示している。

山田ら⁷⁾が行なった鋼管柱基部の疲労試験や、山田ら⁸⁾が行なった実大の疲労試験により、図 4 に示した形式の標識柱基部リブプレート上端の疲労強度が求められている。山田ら⁸⁾の試験結果によれば、すみ肉溶接止端の上方 30mm の位置での応力を基準として、「日本鋼構造協会鋼構造物の疲労設計指針」⁶⁾ (以下 JSSC 疲労設計指針) の F 等級～G 等級となることが明らかになっている。そこで、

本研究では、この疲労試験での応力の評価位置と同じ位置でひずみを測定し、F 等級および G 等級の疲労強度を仮定し、計測した応力範囲頻度分布からマイナー則を用いて疲労損傷度を求めた。

時間ごとの疲労損傷度と交通量、大型車交通量の推移を G 等級(打ち切り限界考慮)で計算した結果について図 13、図 14 に示す。時間毎の疲労損傷度は、普通車を含む交通量よりも大型車交通量の台数の変化に応じて増減している。図 13 によれば、朝夕(7:00～8:00、16:00～17:00)の交通量のピーク時では、交通量に対して疲労損傷度が小さくなる傾向がある。図 6 によれば、この時間帯では、上り車線の平均速度が渋滞により低下している。一方、図 5、図 13 によれば、大型車交通量についてはこの時間帯に交通量のピークはみられず、むしろ大型車交通量がやや少なくなる傾向がある。従って、朝夕の時間帯における時間あたり損傷度の低下の原因としては、走行速度、大型車両交通量の低下が考えられる。

図 15、図 16 にそれぞれ交通量と疲労損傷度、大型車交通量と疲労損傷度の関係を示す。情報板門型柱が設置された上り線の平均速度を用いてクラス分けを行なった。時間交通量と疲労損傷度の関係ではばらつきが大きいのにに対し、時間大型車交通量と疲労損傷度ではばらつきが小さくなり、大型車交通量に応じて疲労損傷度が大きくなっている。また、平均走行速度に対してもある程度の依存性があると考えられ、特に、渋滞が予想される平均速度時速 50km/h 以下の場合には、他の速度域での結果に比べ疲労損傷度が小さくなっている。

例外的な値として、10 月 21 日 11:00 のデータのみ、大型車交通量に対する疲労損傷度が大きくなっている。この原因として台風後の風の影響が予想されたため、名古屋地方気象台が発表している風速の観測値を入手した。名古屋における時間別の平均風速の変化を図 17 に示す。台風接近に伴い、20 日の 12:00 から翌 21 日にかけて風速が平常時よりも大きくなっている。10 月 21 日 11:00 に生じた疲労損傷度のピーク値と風速のピーク値の発生時間帯は一致しており、このときの時間大型車交通量は 212 台と測定期間内では中規模の時間交通量であった。一方、風速の

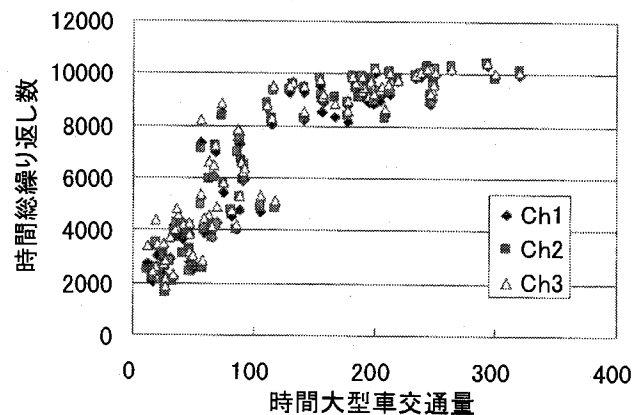


図 12 総繰り返し数と時間大型車交通量

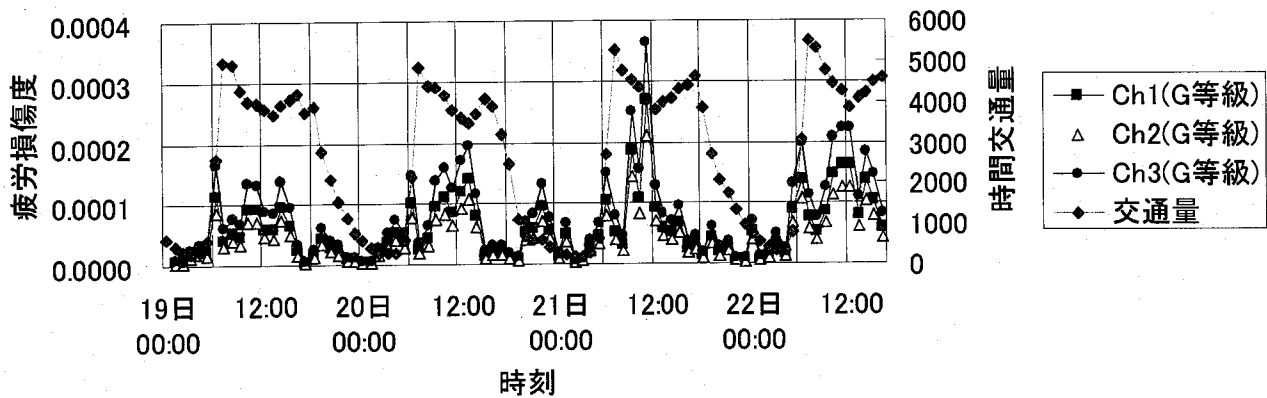


図 13 交通量と疲労損傷度の推移 (全車種, G 等級)

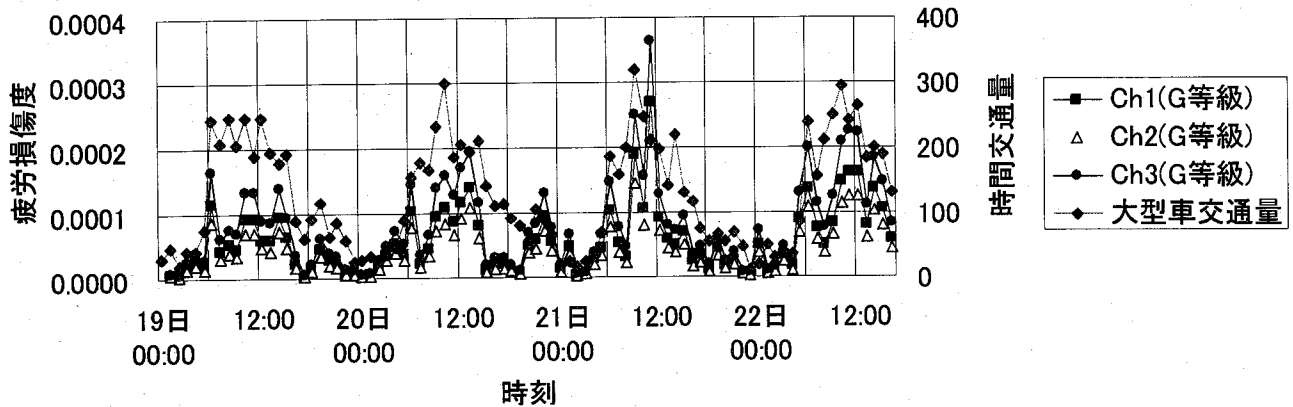


図 14 交通量と疲労損傷度の推移 (大型車, G 等級)

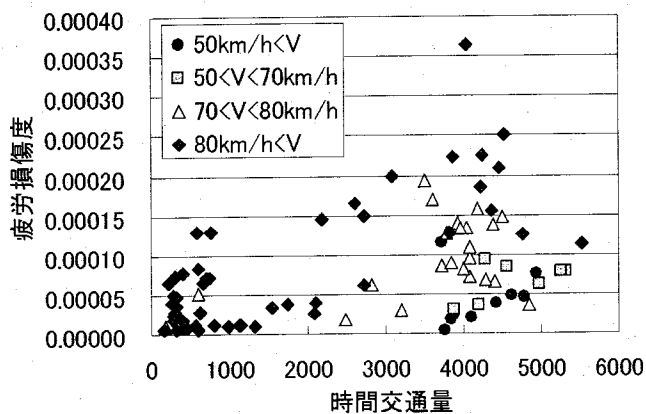


図 15 時間交通量と疲労損傷度, 平均速度 (Ch3:G 等級)

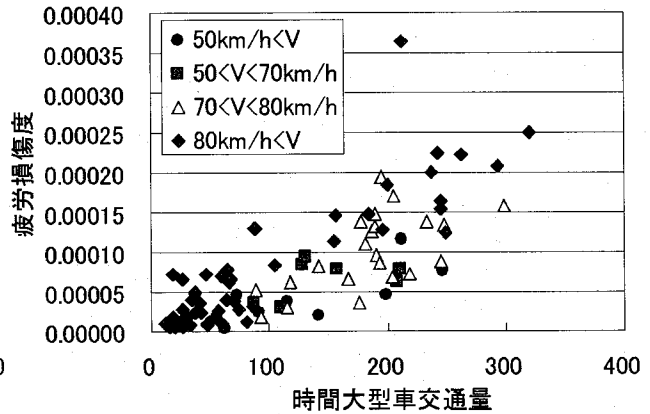


図 16 時間大型車交通量と疲労損傷度, 平均速度 (Ch3:G 等級)

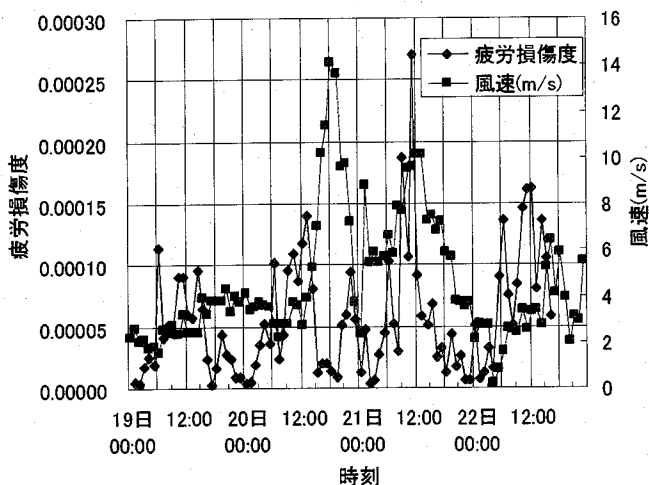


図 17 台風通過時の風速の変化と疲労損傷度

最大値である 10 月 20 日 18:00 付近では、疲労損傷度は最大値の 10 分の 1 以下と比較的小さく、時間大型車交通量は 93 台と半分程度であった。図 7 に示した応力範囲頻度分布の最大値についても、21 日 11:00 で記録されており、風速が大きい場合には、大型車交通量と風速が、相互作用的に情報板門型柱の振動に影響を与えていることが予想される。しかしながら、図 16 からわかるように、このような現象は測定期間 88 時間を通じて 21 日 11:00 の時間帯にのみ観測されており、疲労損傷度全体に与える影響は小さいと考えられる。本研究では風についての詳細な観測を行っていないため、結果を示すに留めるが、風の影響により情報板門型柱が大きな振動を生じた疲労き裂が発生している例があることを考慮すれば、橋梁付属物の設置条件によっては大型車両だけでなく風の影響、またはこれ

らの相互の作用については今後検討すべきであると考えられる。

3.4 交通量を考慮した疲労寿命の推定

ここでは、累積大型車両台数を用いて情報板門型柱の疲労寿命を推定する。3.3 節の結果から、強風時および渋滞時を除いた一般的な走行状態では、大型車交通量に応じて情報板門型柱基部の疲労損傷度が増加することが明らかになった。朝夕の渋滞時など、走行速度への依存性なども確認されたが、ここでは、長期的な累積疲労損傷度を求めるにあたり、情報板門型柱基部の疲労損傷度は大型車交通量と比例関係にあると仮定する。

図 16 の大型車交通量と疲労損傷度の関係から、疲労損傷度が大型車交通量に比例すると仮定し、88 時間の計測期間中の疲労損傷度の合計と同時帯の大型車交通量から、大型車 1 台あたりの疲労損傷度を求めた。この値から、疲労損傷度が 1 となるのに要する累積大型車交通量を求めた。表 1 に各測定点における疲労き裂発生時の累積大型車交通量を示す。計算に用いた疲労強度曲線は、JSSC 疲労設計指針の G 等級、F 等級とし、打ち切り限界を考慮したものと、考慮しないもののそれぞれについて計算した。3 つの測定点間では 1.5～2 倍程度の累積大型車交通量の違いがあり、G 等級で 100～300 万台、F 等級で 300～800 万台という結果となった。

次に供用開始から現在に至るまでの累積大型車交通量を計算するため、以下のデータを入手した。

- ①昭和 54 年～平成 7 年交通量：全区間での料金徴収実績（営業実績）を集計したデータ。
- ②平成 7 年～平成 16 年交通量：星崎料金所の営業実績データ（上り線）

これらのデータは必ずしも情報板門型柱が設置された大高線の断面交通量を代表するものでないの、以下のようにして、供用開始からの大高線の大型車交通量を求めた。

- 1) ①、②のデータから、大型車混入率の推移を求めた。
- 2) 昭和 54 年度～昭和 60 年度まで

測定対象のある大高線は昭和 54 年に開通し、当初は大高線のみ営業であった。しかし、昭和 61 年度に別の路線が開通していることから、昭和 60 年度までについては①のデータを大高線の交通量とした。

- 3) 平成 7 年～平成 16 年度

上り線にある星崎料金所の大型車交通量を 2 倍し、上下線での大型車交通量とした。

- 4) 昭和 61 年度から平成 6 年度

この期間については、大高線単独の営業実績データがない。そこで昭和 61 年度から平成 6 年度までは年度ごとの交通量の伸びが同じであるとして、昭和 60 年と平成 7 年の全車種の交通量を用いて線形補間を行い、この区間の交通量を求めた。さらに、補間した交通量に 1) で計算したその年の大型車混入率を乗じ、大型車両の交通量を算定した。

こうして算出した昭和 54 年～平成 16 年の大高線の普通車と大型車の年間別交通量の推移を図 18 に示す。なお、この図の 2004 年度のデータは 11 月末までのものである。年度別の大型車交通量から供用開始からの累積大型車交通量を計算し、表 1 に示した台数を超える年度を疲労き裂が発生する年度とした。なお、2004 年以降の交通量は 2003 年度の交通量と同じとして求めた。表 2 に累積大型車交通量から求めた疲労き裂の予測発生年度を示す。設計上安全側となる G 等級で 1990 年度～1992 年度、F 等級で 1994 年度～1996 年度となり、実際のき裂発見年度である 2004 年度よりはやや短い寿命となった。

既設の橋梁部材で行なわれている、実働応力測定に基づく疲労耐久性の検討⁹⁾では、一般的に現状の応力頻度が繰り返し続けると仮定した場合の疲労寿命が求められることが多い。そこで、比較のため、累積交通台数を考慮せずに、現状の応力の繰り返しが供用開始から続いたとした場合の疲労寿命計算結果を表 3 に示す。いずれの点も数年でき裂が発生する可能性があるという計算結果となった。

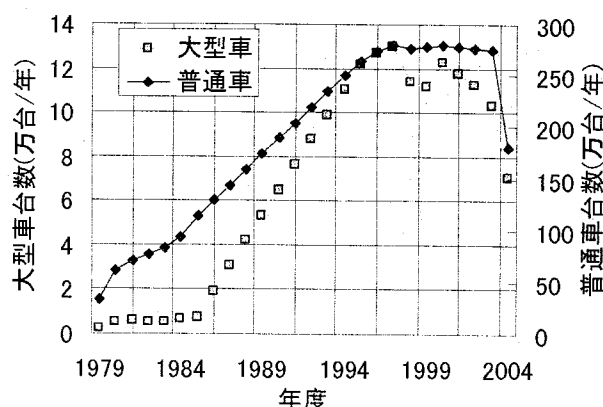


図 18 大高線の年度別交通量

表 1 測定点における 疲労き裂発生時の累積大型車交通量

強度等級	G等級 (打ち切り限界なし)	F等級 (打ち切り限界なし)	G等級 (打ち切り限界15MPa)	F等級 (打ち切り限界21MPa)
Ch1	1,851,971	4,068,781	2,272,589	5,995,949
Ch2	2,320,898	5,099,014	2,984,254	8,112,122
Ch3	1,356,507	2,980,245	1,589,421	4,057,276

表 2 疲労き裂の予測発生年度 (括弧内は寿命)

強度等級 チャンネル	G等級 (打ち切り限界なし)	F等級 (打ち切り限界なし)	G等級 (打ち切り限界15MPa)	F等級 (打ち切り限界21MPa)
Ch1	1990 (12年)	1994 (16年)	1991 (13年)	1996 (18年)
Ch2	1991 (13年)	1995 (17年)	1992 (14年)	1997 (19年)
Ch3	1989 (11年)	1992 (14年)	1990 (12年)	1994 (16年)

表3 累積大型車交通台数を考慮しない疲労寿命(年)

強度等級 チャンネル	G等級 (打ち切り限界 なし)	F等級 (打ち切り限界 なし)	G等級 (打ち切り限界 15MPa)	F等級 (打ち切り限界 21MPa)
Ch1	1.6	3.6	2.0	5.4
Ch2	2.1	4.6	2.7	7.3
Ch3	1.2	2.7	1.4	3.6

以上から、本研究で測定対象とした情報板門型柱は、大型車両の少ない供用開始直後には大きな振動は生じていなかったものが、大型車両の利用台数の増加とともに、振動が顕著になり、大型車両の累積台数に比例して疲労損傷度が累積し、基部の疲労き裂の発生に至ったものと考えられる。

まとめ

本研究では、都市内高架橋に設置された情報板門型柱でひずみ測定を行い、情報板門型柱の振動特性や、大型車交通量と門型柱基部の疲労損傷度の関係について調査し、き裂発生年度の予測を行なった。以下に本研究で得られた内容を述べる。

- ・き裂が発見された情報板門型柱には「面内せん断型」の振動モードが卓越し、固有振動数は3.17Hz、減衰定数は0.008であった。
- ・基部には面内せん断型の振動モード(3.17Hz)による曲げひずみが卓越し、最大のひずみ変動範囲は500 μ であった。
- ・基部ひずみにおける時間あたりの総繰返し数と大型車交通量には相関がみられた。
- ・時間あたりの大型車交通量と振動による基部の疲労損傷度には相関が見られ、渋滞時もしくは台風などの強風時を除く一般的な走行状態では概ね大型車両台数と疲労損傷度、繰返し数に比例関係が見られた。
- ・渋滞による走行速度の低下時には台数あたりの疲労損傷度が低下する現象が見られた。
- ・最大ひずみ値は、台風通過後に観測された時間平均風速のピーク値に発生しているが、台風通過時生じた時間平均風速が最大となる時間帯では、大型車交通量が少なく、大きな振動は観測されなかった。
- ・供用開始(1979)からの累積大型車交通量を考慮した疲労寿命の推定結果によれば、G等級で1990年度～1992年度、F等級で1994年度～1996年度、寿命にして11～19年となり、実際のき裂発見年度である2004年度よりはやや短い寿命となった。
- ・測定期間のひずみの繰返しが続いたとした場合の疲労寿命は、1.2～7年程度となった。

以上から、橋梁付属物は大型車両から直接荷重を受けないものの、橋梁を通し間接的に加振され、大型車両の走行

台数に応じた繰返し荷重が発生するという現象が確認された。また、応答の大きさは車両の台数だけでなく、走行速度にも相関性があることが予想され、恒常的に渋滞している路線と、渋滞がないような路線では疲労損傷が発生する可能性が異なる可能性があることが明らかになった。

従って、橋梁付属物を設計する際には、大型車両の走行による加振を考慮すべきであり、特に固有振動数を橋梁上での卓越振動数や大型車両の加振振動数から離すなどの措置を講じることが好ましいと考えられる。また、既設の橋梁付属物を維持管理する際には、大型車両の走行による加振を考慮し、大型車交通量が多い時間帯で振動状況の点検を行なうことが有効であると考えられる。

謝辞

本研究は名古屋大学への文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(B) 課題番号16360228, 研究代表者 代表者 山田健太郎)の補助を受けて行なった。

本研究をすすめるにあたり、センサー設置作業等については(有)愛測エンジニアリング樽谷省三氏にご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼橋の疲労，1997，丸善出版
- 2) 小塩達也，李相勳，山田健太郎，森成顕，森下宣明：交通荷重による標識柱の振動と疲労耐久性：構造工学論文集，Vol.47A，pp.1009-1017，2001.3
- 3) 小塩達也，山田健太郎，森田俊樹，李相勳：交通振動下にある高架橋付属構造物の振動測定と疲労耐久性の評価，土木学会論文集 No.766/I-68,219-232,2004.7
- 4) 井舎英生，谷憲一，北田俊行：道路橋の標識柱の損傷と振動特性に関する実験的研究，第58回土木学会年次学術講演会講演概要集第1部，pp.1545-1546，2003.9
- 5) 田村幸雄，佐々木淳，塚越治夫：RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価，日本建築学会構造系論文報告集，No.454，pp.29-38，1993.12
- 6) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針，技報堂出版，1993
- 7) 山田健太郎，近藤明雅，小林且典，宮本伸治，荒木準一：鋼管柱基部の疲労強度，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1045-1054，1992.3
- 8) 山田聡，酒井吉永，山田健太郎，撤去した標識柱基部の疲労強度とその補修方法に関する一考察，構造工学論文集，Vol.49A，pp.725-734，2003.3
- 9) Amir Gilani, Andrew Whittaker, Fatigue-life evaluation of steel post structures. I: Background Analysis, *Journal of structural engineering*, ASCE, 2000-3

(2005年9月10日受付)