

(8) 鋼トラスウエブPC橋の各種限界状態に対する動的増幅率の検討

オリエンタル建設(株) 大阪支店 ○犬島秀治  
 金沢大学大学院 自然科学研究科 梶川康男  
 金沢大学工学部 深田宰史  
 オリエンタル建設(株) 技術部 正会員 角本 周

1. はじめに

複合橋梁は、異種材料の特性を生かした組合せにより合理的で経済的な構造を追求するものであり、国内でも公共工事に対するコスト削減の要望から、近年急速に提案され採用され始めている<sup>1)</sup>。PC橋から複合橋梁へのアプローチの1つに、コンクリートウエブを軽量の鋼トラス材に置き換えた鋼トラスウエブPC橋があり、構造特性や最適な構造諸元、経済的な適用支間、施工方法等が検討されている<sup>2)</sup>。さらに、鋼トラスウエブPC橋の荷重伝達機構および経済性、施工性において特に重要となるトラス材の格点構造に関して、各種の接合方法が提案され、耐荷力や疲労耐久性を確認する実験が実施されている<sup>3)</sup>。しかしながら、これらの検討や実験における荷重設定の一因子である衝撃係数に関しては、PC橋としての値を用いているのが実状であり、橋梁の主目的である「交通を通過させること」に伴う動的特性に関しては十分な研究は行われていない<sup>4)</sup>。

本研究は、3径間連続鋼トラスウエブPC橋をモデル橋梁として、車両走行のシミュレーション解析により構成部材の動的応答を算出し、設計で想定する各種限界状態に対する動的増幅率について検討したものである。

2. 解析モデル<sup>4)</sup>

(1) モデル橋梁および解析モデルの設定

研究の対象としたモデル橋梁は、鋼トラスウエブPC橋の適用支間より中央径間 100m の3径間連続ラーメン橋とし、構造特性および施工性等を考慮して桁高やトラス材配置等の諸元を設定している<sup>1)</sup>。図-1に、モデル橋梁の一般図および使用材料を示す。解析モデルは、図-2に示すように、上下フランジおよび端支点部と柱頭部のコンクリートウエブにシェル要素を、斜材および橋脚にはり要素を用いた3次元骨組構造とした。ここで、柱頭部の下フランジと橋脚は剛結合し、橋脚下端での境界条件は固定としている。

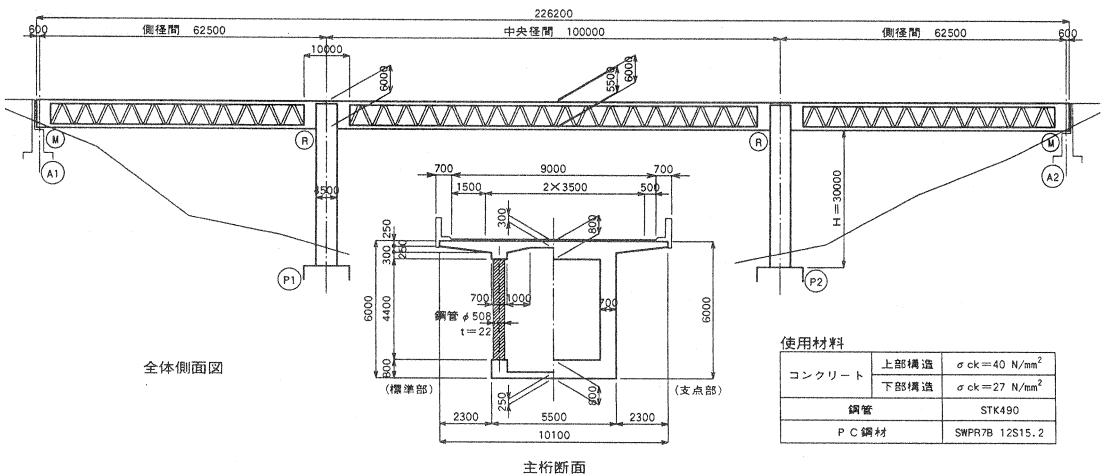
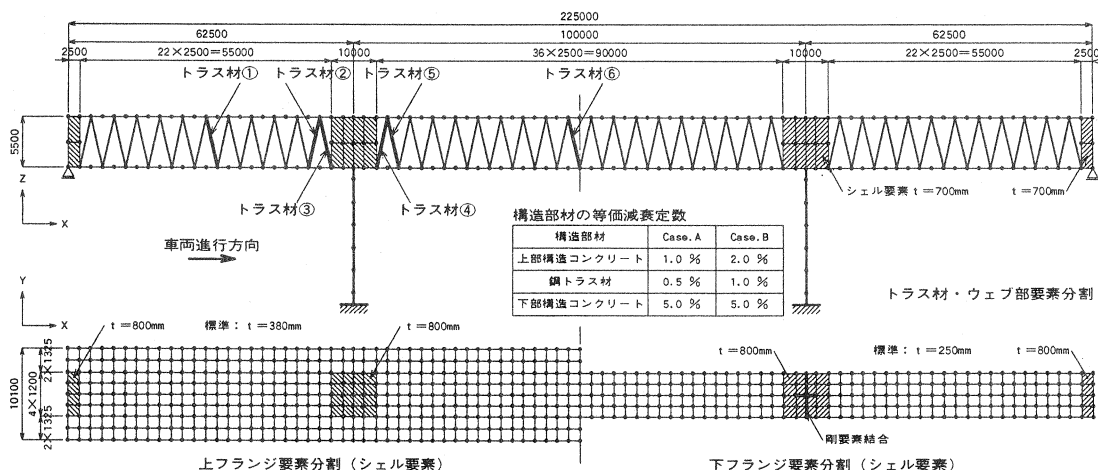


図-1 検討に用いた鋼トラスウエブPC橋のモデル橋梁

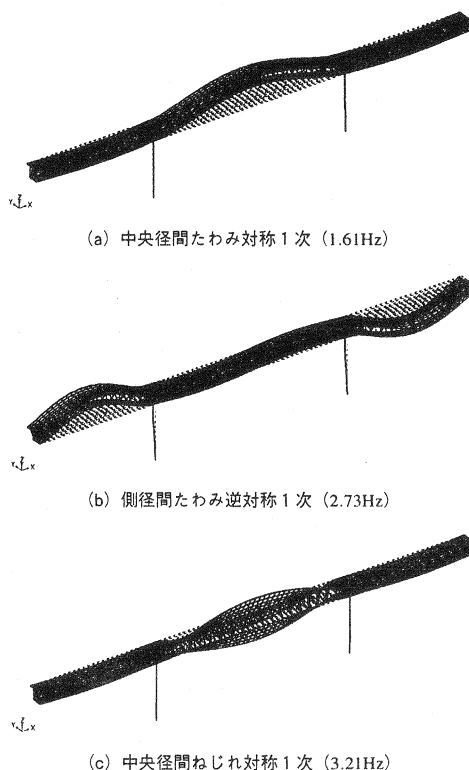


図一 2 解析モデルおよび着目トラス材

(2) 固有振動特性

モデル橋梁の固有振動特性を把握するとともに、シミュレーション解析におけるモード減衰の設定のために、固有振動解析を行った。なお、動的応答に与える減衰の影響を検討するために、上部構造構成部材の等価減衰定数を2ケース設定し(図一2参照)、ひずみエネルギー比例減衰よりモード減衰を算出した。

固有振動解析結果として、振動モードの一例を図一3に示す。車両走行時の動的応答に寄与するたわみ振動モードは、1.61Hzに中央径間のたわみ対称モードがあり、続いて2.73Hzと2.74Hzに側径間のたわみ逆対称モードと対称モードが近接してある。また、3.21Hzには中央径間のねじれ対称モードがある。



図一 3 固有振動モード

3. 車両走行のシミュレーション解析

車両走行のシミュレーションにおいては、動的応答に影響を与える走行状態や車両モデル、走行速度、路面凹凸等のパラメータを以下のように設定した。

(1) 走行状態は、総重量245kN車の単独走行および道路橋示方書で規定するL荷重(A活荷重)を想定した連行走行とした<sup>5)</sup>。さらに、図一4に示すように、連行走行は中央径間長に応じたLc荷重列と側径間長に応じたLs荷重列を設定した。ここで、荷重列の車両間距離は、走行速度によらず7mとしている<sup>6)</sup>。

(2) 車両モデルは、全載時重量245kNおよび196kNの3軸大型車両を想定し、ねじれ振動等の立体的な挙動に対応させるために、図一5に示す8自由度系の車両モデルを使用した。なお、連行走行における147kN車は、196kN車に対して半載状態をモデル化している。

(3) 走行位置は、図一6に示すように、単独走行では片側ウェブ直上(偏心走行)または幅員中央(中央走

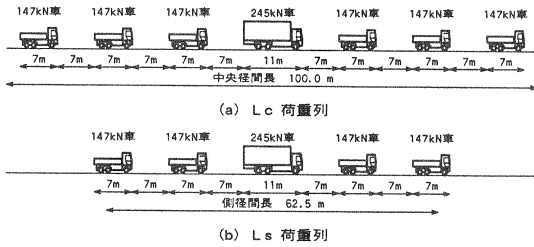


図-4 連行走行状態

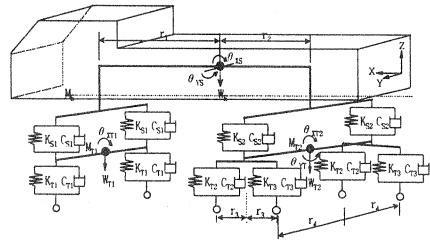


図-5 8自由度系車両モデル

行)とし、連行走行ではL荷重の主載荷状態を考慮して両ウェブ直上を並進走行とした。

(4)走行速度は、40~80km/hの範囲で10km/h毎に設定した。

(5)路面凹凸は、図-7に示すISO基準の「良」または「普通」に相当するパワースペクトル密度に適合させた波形を各1波形設定し<sup>7)</sup>、左右車輪位置で同一位相として用いた。

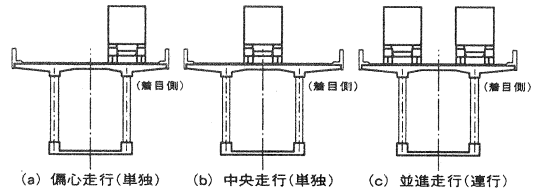


図-6 車両走行位置

動的解析は、車両と橋梁の相互作用を考慮できる直接積分法(Newmark  $\beta$ 法、時間間隔0.01秒、 $\beta=0.25$ )により行った。ここで、減衰マトリックスは、3次および6次振動を基準振動モードとし、Rayleigh減衰により設定した。なお、本研究では、図-2の解析モデルに示すトラス材に注目して断面力応答を算出した。

シミュレーション解析結果の一例として、単独偏心走行時およびLc荷重列走行時におけるトラス材③の軸力応答波形を、図-8および図-9に示す。なお、速度は60km/h、路面「良」、構造減衰はCase.Aとしている。

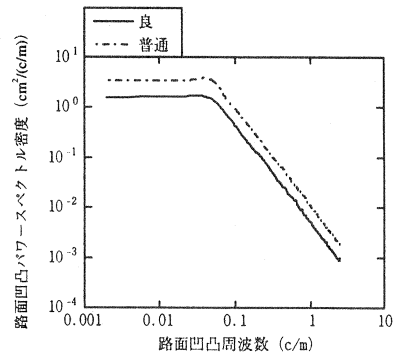


図-7 路面凹凸パワースペクトル密度

#### 4. 動的増幅率の評価方法

使用限界状態や終局限界状態に対しては、想定する最大応答に対する照査が重要であることから、活荷重も影響線が同一符号となる範囲に載荷する。よって、活荷重に乗じる衝撃係数も、単独走行時ではなくL荷重を想定した連行走行時における最大応答より評価しなければならない。一方、疲労限界状態に対しては、供用期間中にまれにしか発生しないような最大応答よりも定期的な変動応答による累積損傷が重要となることから、大型車両の単独走行時の変動応答と計画大型車交通量を基に照査することが提案されている<sup>8)</sup>。

このように、動的増幅率は、対象とする限界状態に応じて評価すべきものと考えられる。そこで、本研究では、①使用限界状態および終局限界状態は連行走行時の動的応答より、②疲労限界状態は単独走行時の動的応答より、それぞれ以下の方法で動的増幅率を評価することとした。

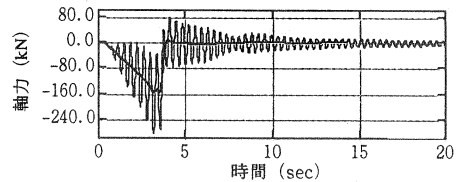


図-8 トラス材軸力応答(単独走行)

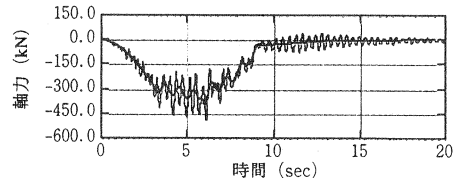


図-9 トラス材軸力応答(連行走行)

使用限界状態および終局限界状態に対しては、式(1)で評価する<sup>7)</sup>。なお、DIF①については、単独走行時の動的応答についても評価を行う。

$$DIF① = 1 + y_{1,dy,max} / y_{st,max} \quad (1)$$

ここで、 $y_{st,max}$  は静的応答成分の最大値、 $y_{1,dy,max}$  は  $y_{st,max}$  を含む1サイクル中の動的応答成分の最大値である。

疲労限界状態に対しては、式(2)で評価する。

$$DIF② = y_{dy,max-min} / y_{st,max-min} \quad (2)$$

ここで、 $y_{st,max-min}$  および  $y_{dy,max-min}$  は静的応答および動的応答の最大-最小値の差である (図-10 参照)。

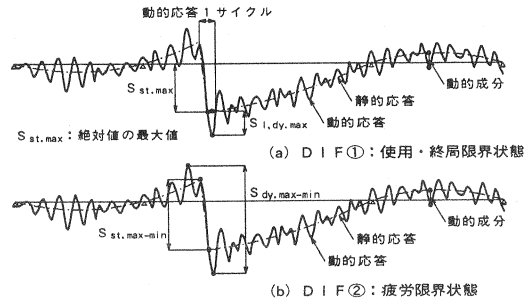


図-10 動的増幅率の評価

## 5. 各種限界状態に対する動的増幅率

### (1) トラス材位置と動的増幅率

図-11 に、単独偏心走行時のトラス材の軸力応答および面内曲げモーメント応答に対する DIF①および DIF②を示す。なお、走行速度は 60km/h、路面「良」、構造減衰 Case.A としている。トラス材の動的増幅率は中央径間に比べて側径間両端部が大きい傾向にあるが、これは、245kN 車のばね上系振動数 (約 2.7Hz) と径間たわみ振動モードの振動数が一致していることが要因と考えられる。また、DIF①と DIF②は全体的には同程度の値となっているが、側径間両端部では軸力応答に対する DIF②が他に比べて大きい傾向にある。

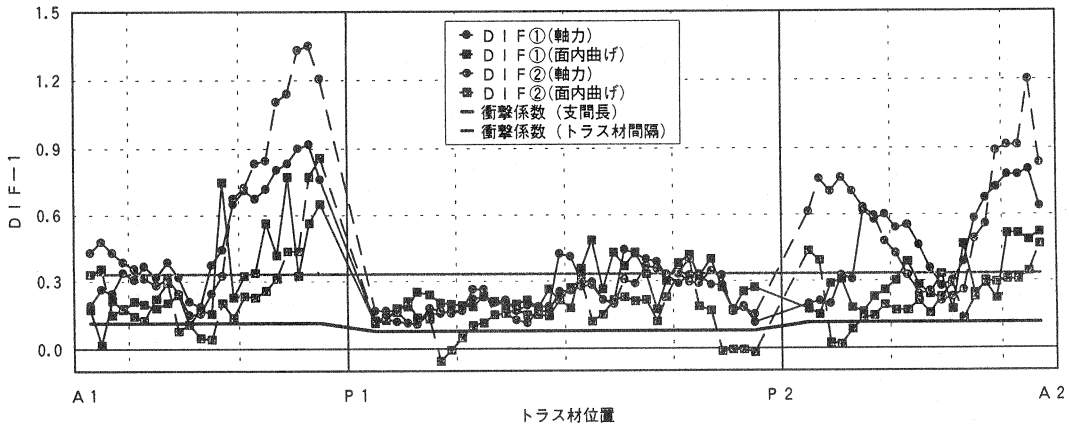


図-11 単独偏心走行時の各トラス材の動的増幅率

### (2) 動的増幅率に与えるパラメータの影響

図-12 は、構造減衰が動的増幅率に与える影響を示したものである。なお、これ以降の図は、図-2 に示したトラス材①~⑥を抽出して各走行速度 (40~80km/h) における DIF をプロットしており、比較したパラメータ以外の走行条件は同一としている。Rayleigh 減衰の基準振動モードの減衰定数は Case.A では約 1.2%、Case.B では約 1.9% となるが、DIF①および DIF②の値はともに 10% 程度の減少となっている。

図-13 は、路面凹凸の状態が動的増幅率に与える影響を示したものである。路面状態が「良」から「普通」になることで、相関性は弱いものの DIF①の値は平均 35% 程度増加しているのに対して、DIF②の値は平均 15% 程度の増加となっている。このことから、路面凹凸の状態の影響は、単独走行よりも連行走行において顕著であるものと判断される。

図-14は、連行走行における荷重列長の影響を示したものである。DIF①の値はLc荷重列の場合とLs荷重列の場合で平均値では有意な差はなく、部材位置による傾向も現れていない。これは、トラス部材の影響線が曲げモーメントタイプではなくせん断力タイプに類似していることも一因であると考えられ、連行走行における245kN車と146kN車の配置順序を変更するなど、より詳細な検討を要するものと考えられる。

図-15は、単独走行における走行位置の影響を示したものである。DIF①は、偏心走行に比べて中央走行は50%程度大きい値を示しており、動的増幅率に顕著な差が生じる結果となった。

図-16は、同一トラス部材における断面力別の動的増幅率を比較したものである。トラス部材の面内曲げモーメントに対する動的増幅率は、軸力に対する動的増幅率と比較して連行走行のDIF①および単独走行のDIF②では、特に側径間部材においてその差が大きく、平均でも40%程度小さい結果となっている。

図-17は、走行状態および評価方法の相違による動的増幅率の比較を行ったものである。このうち、(a)は単独走行と連行走行の動的増幅率を、同じ評価方法(DIF①)で比較したものである。一般

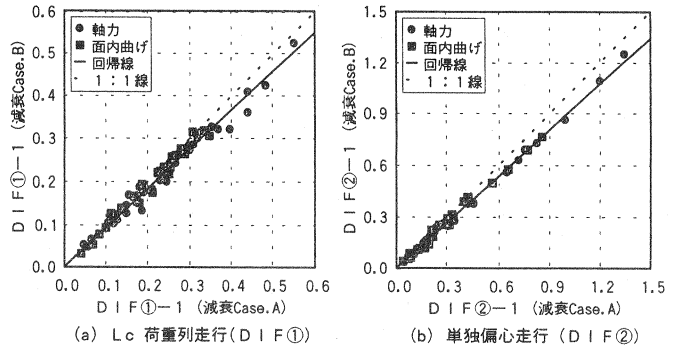


図-12 構造減衰が動的増幅率に与える影響

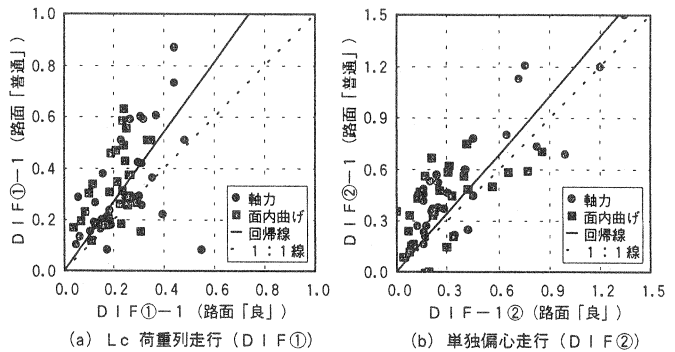


図-13 路面凹凸状態が動的増幅率に与える影響

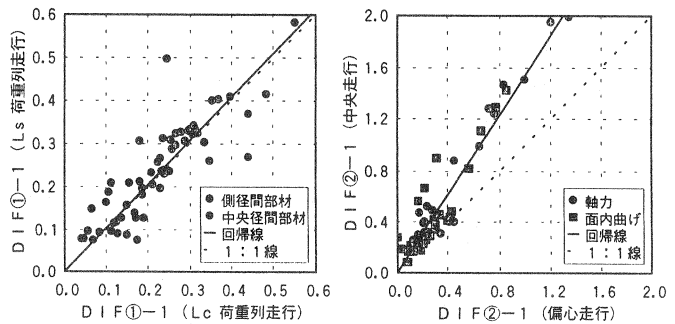
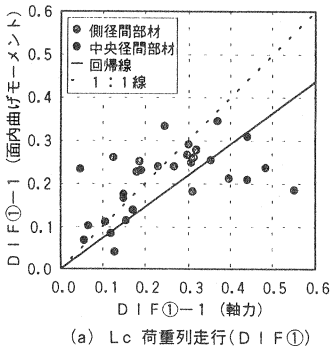
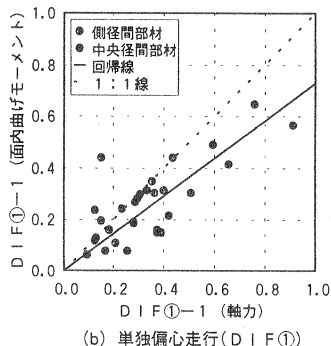


図-14 連行荷重列長の影響

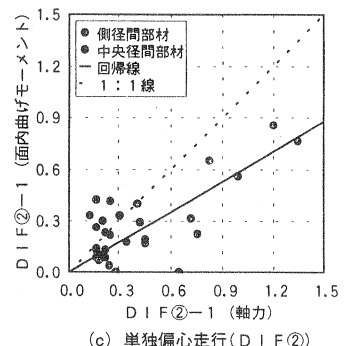
図-15 単独走行位置の影響



(a) Lc 荷重列走行(DIF①)

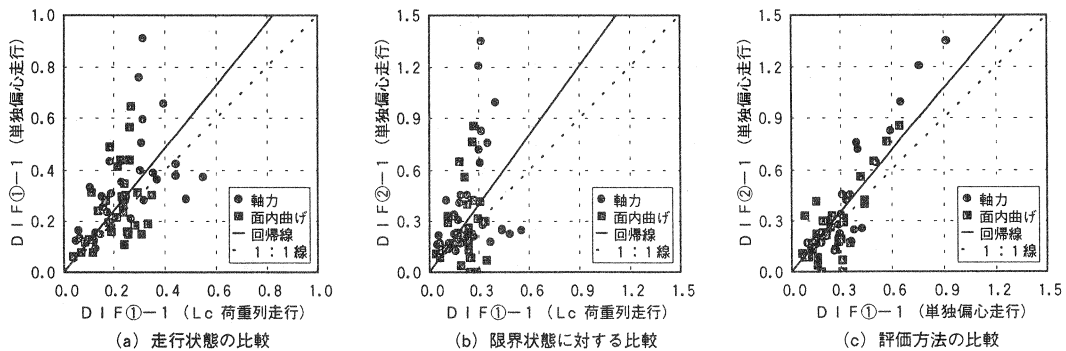


(b) 単独偏心走行(DIF①)



(c) 単独偏心走行(DIF②)

図-16 同一トラス部材の軸力応答および曲げモーメント応答に対する動的増幅率



図一17 走行状態および評価方法の相違による動的増幅率の比較

に、単独走行の場合は連行走行の場合に比べて動的増幅率は大きくなるが、今回の検討では、相関性は弱いものの平均で 20%程度大きな値を示している。(b)は、本研究における評価方法に基づく使用限界状態および終局限界状態に対する動的増幅率（連行走行の DIF①）と、疲労限界状態に対する動的増幅率（単独走行の DIF②）を比較したものである。(a)と同様に相関性の弱い結果となっているが、疲労限界状態に対する動的増幅率は平均で 35%程度大きな値を示しており、部材によっては 2~3 倍大きな値を示している場合もある。(c)は異なる評価式で単独走行時の動的増幅率を算出した結果を比較したものである。最大変動応答に対する動的増幅率は、最大応答に対する動的増幅率に比べて 20%程度大きな値を示している。

## 6. まとめ

本研究で得られた主な知見をまとめると、以下のとおりである。

- (1) トラス部材の動的増幅率は、同一径間内においても部材位置により顕著な差が生じている。
- (2) 動的増幅率に与える減衰定数の影響は小さく、路面凹凸の影響は単独走行よりも連行走行の方が大きい。
- (3) トラス部材の面内曲げモーメントに対する動的増幅率は、軸力に対する動的増幅率に比較して 30%程度小さい値を示している。
- (4) JSSC「鋼構造物の疲労設計指針」<sup>8)</sup>では、“衝撃係数についての正確な情報がない場合は、他の限界状態の照査に用いた衝撃係数を用いる。”としているが、疲労限界状態に対する動的増幅率は他の限界状態に対する動的増幅率より大きい値を設定する必要があるものと考えられる。

本研究では、疲労限界状態に対する動的増幅率を静的な最大変動応答に対する動的な最大変動応答の比で評価した。しかしながら、図一8のような応答を示す場合は、最大変動応答以外の動的応答も疲労を評価する場合の累積損傷に寄与することから、今後はその影響を含めて検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 黒岩正・後藤昭彦：巴川橋，猿田川橋の設計－鋼トラスウェブPC橋－，プレストレストコンクリート，Vol.41, No.2, pp.41-47, 1999.3.
- 2) (財)高速道路調査会：PC橋の複合構造に関する調査研究報告書（総括編），1999.9.
- 3) 江口信三・二井谷教治・関口信雄・野呂直以：鋼トラスウェブ格点部の静的および疲労試験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22, No.3, pp.1015-1020, 2000.6.
- 4) 犬島秀治・梶川康男・角本周：鋼トラスウェブPC橋の車両走行時の動的応答特性，第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.63-68, 1998.10.
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，1996.12.
- 6) 横山功一・井上純三：自動車走行モードと道路橋の衝撃係数，土木学会論文集，No.442/I-14, pp.391-394, 1990.10.
- 7) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，1993.10.
- 8) (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，1993.4.