

(13) 鋼トラスウェブPC橋の車両走行時の動的応答特性

金沢大学大学院自然科学研究科 ○犬島 秀治
 金沢大学大学院自然科学研究科 梶川 康男
 オリエンタル建設㈱技術部 正会員 角本 周

1. はじめに

複合橋梁は材料特性を生かした合理的な構造を追求するものであり、近年の公共事業に対するコスト縮減の要望から、わが国においても採用事例が増加している。PC橋から複合橋梁へのアプローチとしては、コンクリートウェブを鋼部材に置き換えた波形鋼板ウェブPC橋と鋼トラスウェブPC橋が提案され¹⁾、自重の軽減やプレストレス導入効率の向上といった利点を示している。これらの構造形式に対しては、その静的特性に関して多くの解析・実験が行われているが、衝撃係数の設定などの車両走行時の動的特性に関しては、波形鋼板ウェブPC橋に対して若干の解析・実験があるのみで²⁾、十分な検討は行われていない。さらに、鋼トラス橋で発生している疲労損傷や交通環境振動問題を考慮すると³⁾、鋼トラスウェブPC橋に対して車両走行時の動的特性を把握しておくことは、実橋への適用における問題点を抽出し合理的な設計を行う上でも重要であると考えられる。そこで、本研究では、3径間連続鋼トラスウェブ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動的特性を検討した⁴⁾。

2. 解析モデル

本研究で対象としたモデル橋梁は、図-1に示す中央径間100mの3径間連続ラーメン橋である。モデル橋梁の構造諸元および使用材料を、表-1に示す。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ェブにシェル要素を、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-3に、解析モデルの端支点部の詳細図を示す。

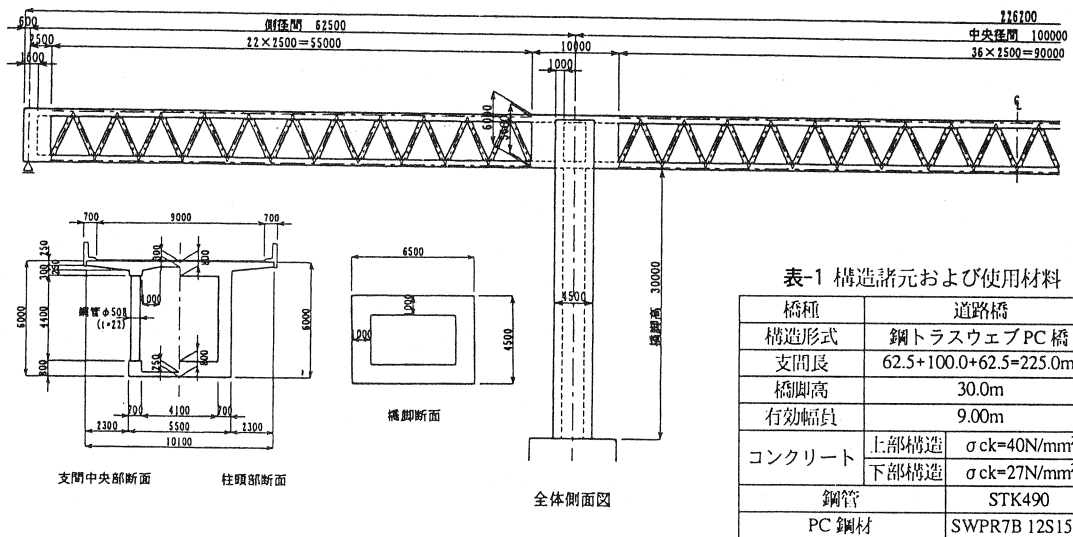


図-1 鋼トラスウェブPC橋のモデル橋梁

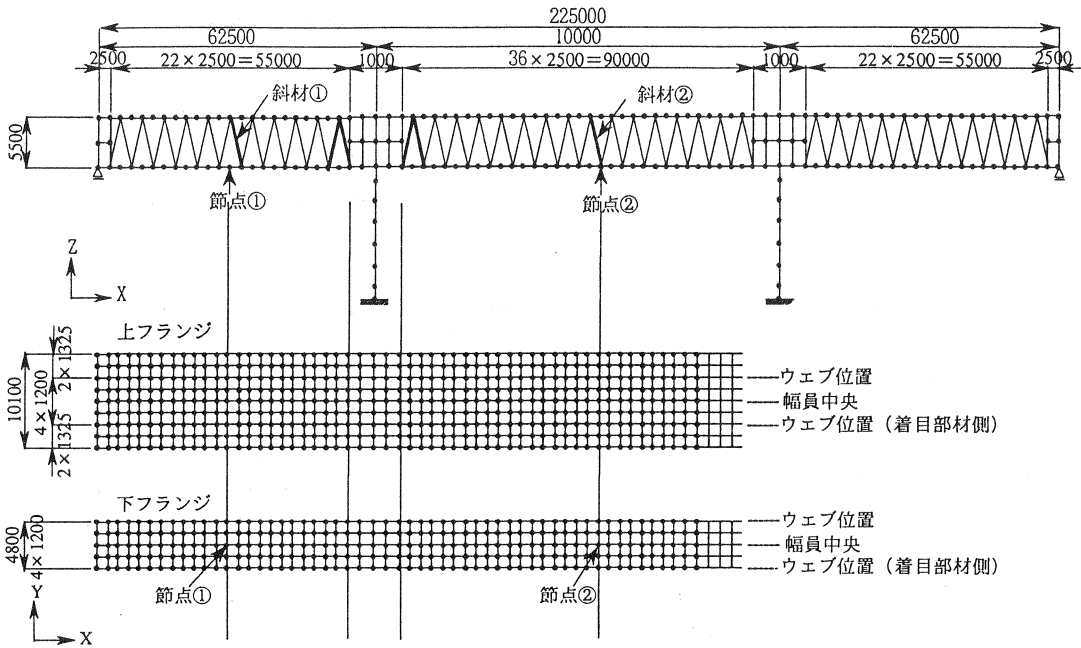


図-2 解析モデル

3. 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、動的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。ここで、モード減衰は、動的応答に与える減衰の影響を検討するために、表-2に示すように、構成部材の等価減衰定数を2ケース設定してひずみエネルギー比例減衰より算出した。

固有振動解析結果として、固有振動数を表-3に、振動モードの一例を図-4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に中央径間の対称モードがあり、続いて2.73Hzに側径間の逆対称モードと2.74Hzに側径間の対称モードが近接してある。これらたわみ振動の振動モードは、一般的なPC連続ラーメン橋の振動モードと比較しても特異なモード形状を示しておらず、同規模のPC連続ラーメン橋と同程度の卓越振動数となっている。

表-4に、各ケースに対するモード減衰を示す。上部構造構成部材の等価減衰定数が2倍になっても、たわみ振動モードのモード減衰は60%程度の増加となっている。

表-2 構成部材の等価減衰定数

| 構成部材 | 減衰定数(%) | |
|------------|---------|-------|
| | CaseA | CaseB |
| 上部構造コンクリート | 1.0 | 2.0 |
| 下部構造コンクリート | 5.0 | 5.0 |
| 鉛直トラス材 | 0.5 | 1.0 |

表-3 固有値解析結果

| 次数 | 振動モード | 振動数(Hz) |
|----|----------|---------|
| 1 | 面外対称1次 | 1.21 |
| 2 | 面内水平1次 | 1.23 |
| 3 | たわみ対称1次 | 1.61 |
| 4 | 面外逆対称1次 | 1.72 |
| 5 | 面外対称2次 | 2.21 |
| 6 | たわみ逆対称1次 | 2.73 |
| 7 | たわみ対称2次 | 2.74 |
| 8 | ねじれ対称1次 | 3.21 |
| 9 | 面外逆対称2次 | 3.58 |
| 10 | たわみ逆対称2次 | 3.76 |

表-4 振動モードの減衰定数

| 次数 | 減衰定数(%) | |
|----|---------|-------|
| | CaseA | CaseB |
| 1 | 4.04 | 4.27 |
| 2 | 3.36 | 3.74 |
| 3 | 1.21 | 1.94 |
| 4 | 3.84 | 4.11 |
| 5 | 2.02 | 2.74 |
| 6 | 1.15 | 1.86 |
| 7 | 0.93 | 1.68 |
| 8 | 0.73 | 1.38 |
| 9 | 1.42 | 2.30 |
| 10 | 0.94 | 1.63 |

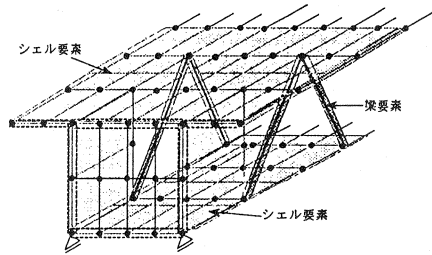


図-3 解析モデルの端支点部

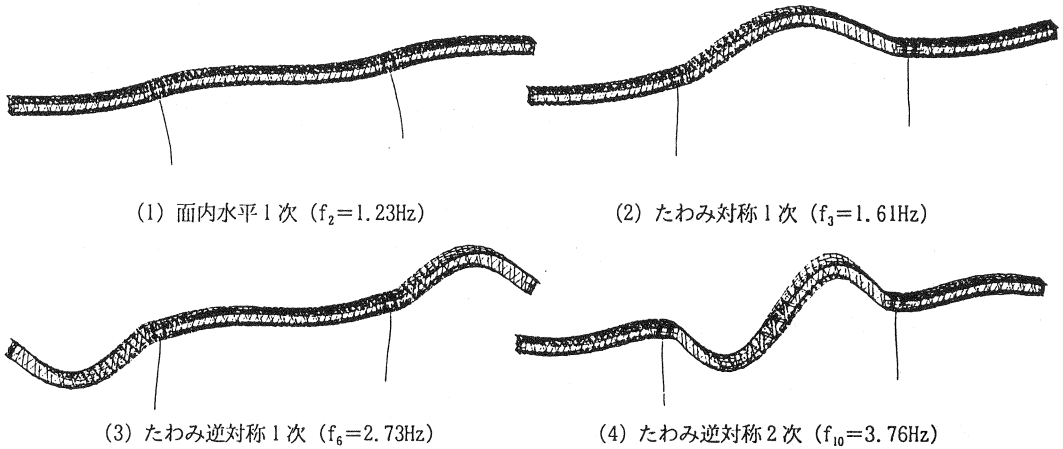


図-4 振動モード

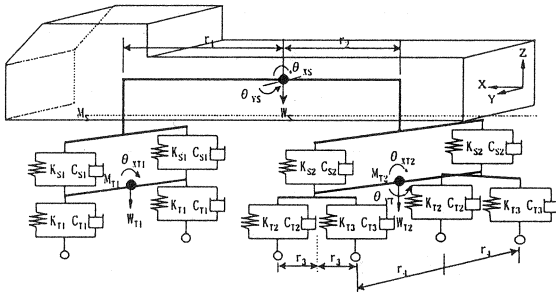


図-5 8自由度系車両モデル

表-5 車両モデルの各諸元

| | | |
|---------------------|---------|------|
| 総重量 | (kN) | 196 |
| ばね上ばね定数前軸 K_{s1} | (kN/m) | 639 |
| 後軸 K_{s2} | (kN/m) | 2556 |
| ばね上減衰係数前軸 C_{s1} | (kNs/m) | 2.45 |
| 後軸 C_{s2} | (kNs/m) | 9.80 |
| ばね下ばね定数前軸 K_{t1} | (kN/m) | 1775 |
| 後軸 K_{t2}, K_{t3} | (kN/m) | 3549 |
| ばね下減衰係数前軸 C_{t1} | (kNs/m) | 2.94 |
| 後軸 C_{t2}, C_{t3} | (kNs/m) | 5.88 |

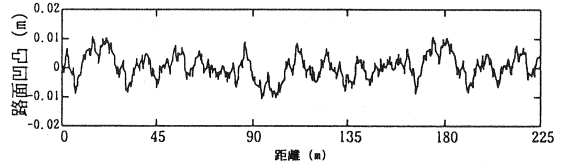


図-6 路面凹凸波形

4. 車両走行時の動的特性

車両走行時の動的特性の検討においては、総重量196kNの3軸大型車両を想定した図-5に示す8自由度系の車両モデルを使用した。表-5に、車両モデルの諸元を示す。本研究では、この大型車両が幅員中央を1台走行および2台連行走行する場合について、

図-2の解析モデルに示す各節点および部材に着目し、それぞれの速度・変位応答および断面力応答を算出した。なお、連行走行する場合は、車頭間隔を3次振動(1.61Hz)に対する共振車頭間隔とし⁴⁾、その車頭間隔が走行可能な約14m以上である走行速度領域で検討した。

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 β 法、時間間隔0.01秒、 $\beta=1/4$)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。また、本研究における路面凹凸は、ISO基準の「良」に相当するパワースペクトル密度に適合させた図-6に示す波形を、左右車輪位置で同一に用いた³⁾。

1台走行(減衰CaseA、速度60km/h)に対する解析結果の一例として、図-2の解析モデルに示した節点①および②における速度応答波形とそのスペクトルを図-7~図-10に、変位応答波形とその動的応答成分のスペクトルを図-11~図-14に示す。また、斜材①および②における軸力応答波形およびその動的成分のスペクトルを、図-15~図-18に示す。

側径間中央および中央径間中央の速度・変位応答は、静的成分は中央径間の方が大きいが動的成分は側径間の方が大きい傾向にある。側径間中央および中央径間中央の速度・変位応答のスペクトルに着目すると、

側径間中央では2.73Hzのたわみ逆対称1次モードが、中央径間中央では1.61Hzのたわみ対称1次モードが卓越する結果となっており、たわみ逆対称1次モードの方が車両のばね上系(3Hz程度)に近接していることが側径間中央の速度・変位応答を大きくしている要因と考えられる。なお、側径間中央および中央径間中央とも、最大速度応答は1.0cm/sec程度であり、歩行者が振動に対して不快感を感じる恕限度(少し歩きにくい:2.4cm/sec)以下となっている⁴⁾。

側径間中央および中央径間中央の斜材軸力は、静的成分の変動は同程度であるのに対して、動的成分は中央径間の方が2倍以上大きい変動を示している。斜材軸力応答のスペクトルに着目すると、速度・変位応答のスペクトルと異なり、側径間中央および中央径間中央ともに3.76Hzのたわみ逆対称2次モードが卓越している。よって、モード形状より影響がより大きいと考えられる中央径間の斜材の方が、動的成分の変動をより大きくしている要因と考えられる。

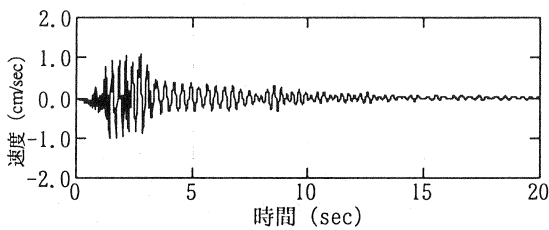


図-7 側径間中央,速度応答波形(節点①)

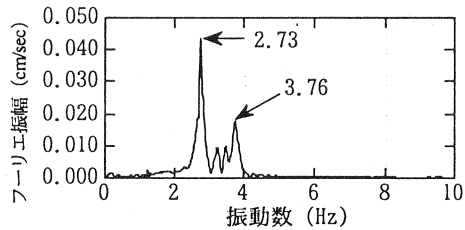


図-8 図-7のスペクトル

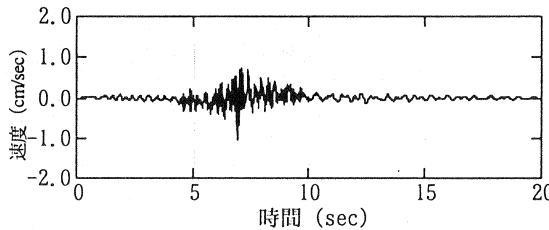


図-9 中央径間中央,速度応答波形(節点②)

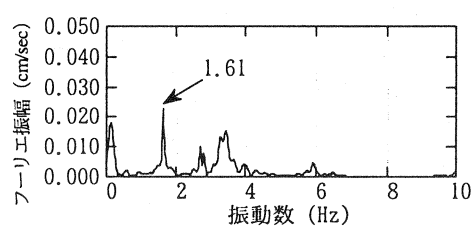


図-10 図-9のスペクトル

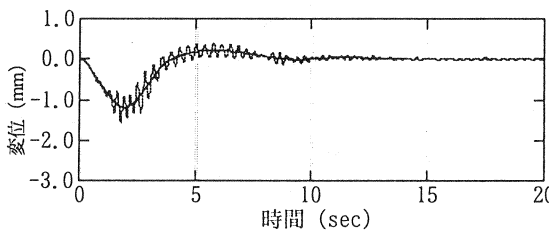


図-11 側径間中央,変位応答波形(節点①)

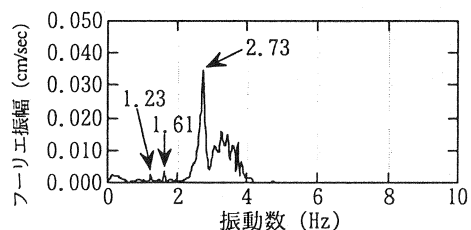


図-12 図-11のスペクトル

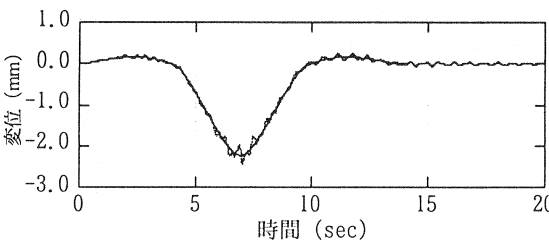


図-13 中央径間中央,変位応答波形(節点②)

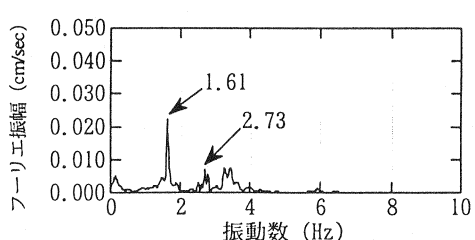


図-14 図-13のスペクトル

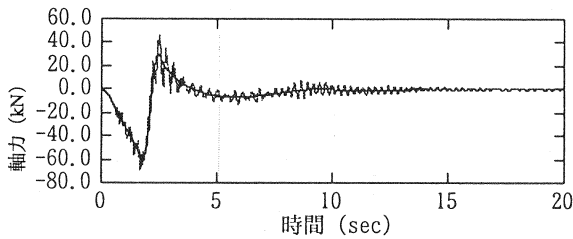


図-15 側径間中央, 軸力応答 (斜材部材①)

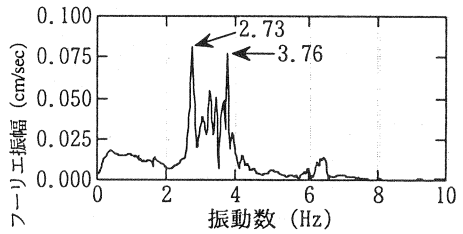


図-16 図-15のスペクトル

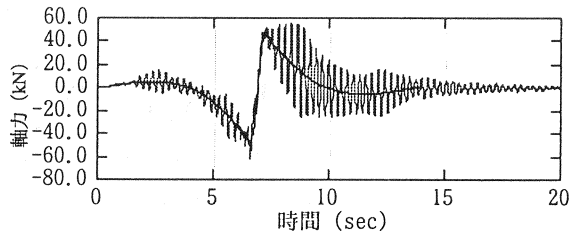


図-17 中央径間中央, 軸力応答波形 (斜材②)

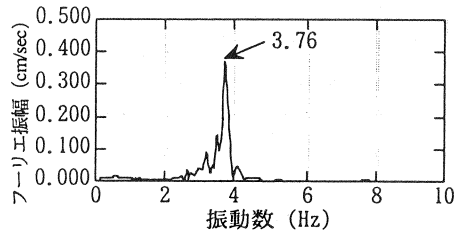


図-18 図-17のスペクトル

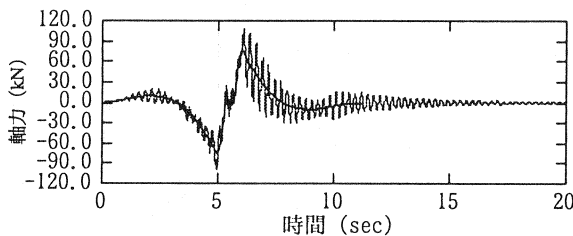


図-19 中央径間中央, 軸力応答波形 (斜材②, 2台連行)

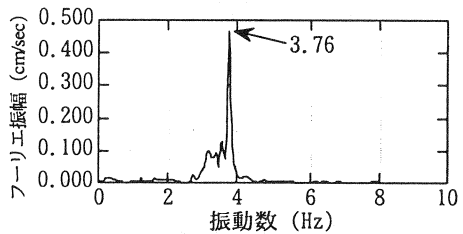


図-20 図-19のスペクトル

2台連行走行 (減衰 CaseA, 速度 80km/h) に対する解析結果の一例として, 斜材②における軸力応答波形およびその動的成分のスペクトルを図-19および図-20に示す. 走行速度は異なるが, 1台走行と比較すると静的成分は2倍程度大きくなっているが, 動的成分はフーリエ振幅からみても同程度となっている.

5. 動的増幅率

設計に用いられる衝撃係数は, 影響線荷荷における活荷重満載時に対して乗じられるため, 車両が1台走行または2台連行走行した場合の動的増幅率 (DIF) と等価ではない. しかしながら, DIF は車両走行による橋梁の動的応答

を評価する指標の1つであることから, 本研究では解析結果より DIF を算出し衝撃係数と比較することとした^{3), 4)}. なお, 鋼トラスウエブPC橋の設計衝撃係数は, 従来は表-6に示すPC桁橋の衝撃係数 i_1 が用いられているが¹⁾, ここでは, 鋼トラス橋の各部材に対する設計衝撃係数も比較として示している.

1台走行および2台走行時の解析結果の一例として, 節点①および②における変位応答のDIFを図-21および図-22に, 斜材①および②における軸力応答のDIFを図-23および図-24に走行速度をパラメータとして示す. 側径間中央と中央径間中央を比較すると, 車両走行時の動的応答の傾向と同様に, 変位応答は側径間の方が, 軸力応答は中央径間の方がDIFも大きな値を示しており, 設計衝撃係数 i_1 を大きく上回る結果

表-6 設計衝撃係数

| 種別 | 算出支間 | 側径間 (L=62.5m) | 中央径間 (L=100.0m) | |
|----------|-------|------------------|--------------------|-------|
| PC桁橋 | i_1 | 主桁支間 | 0.114 | 0.080 |
| 鋼トラス橋弦材 | i_2 | 主桁支間 | 0.178 | 0.133 |
| 鋼トラス橋斜材 | i_3 | 主桁支間の75% | 0.206 | 0.160 |
| 鋼トラス橋垂直材 | i_4 | 床桁(版)支間 | 0.365 | 0.365 |

となっている。また、走行速度が増加すると全体的には DIF が増加する傾向にはあるが、特に斜材②の軸力では、走行速度 70km/h において共振状態が生じている。各図中の CaseA および CaseB はそれぞれ表-4 に示すモード減衰に対する結果であるが、DIF には有意な差が生じていない。また、1 台走行と 2 台連行走行を比較すると、共振車頭間隔の走行でも 2 台連行走行の方が DIF は小さい値を示す傾向にある。

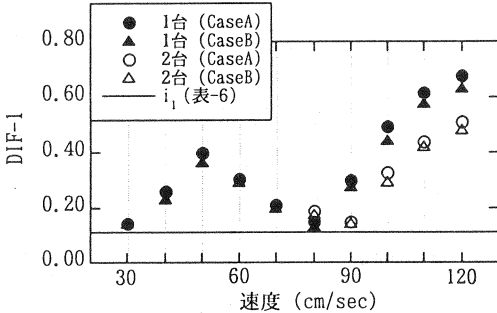


図-21 側径間中央,変位応答(節点①)

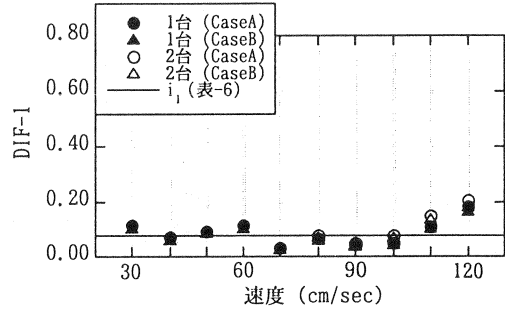


図-22 中央径間中央,変位応答(節点②)

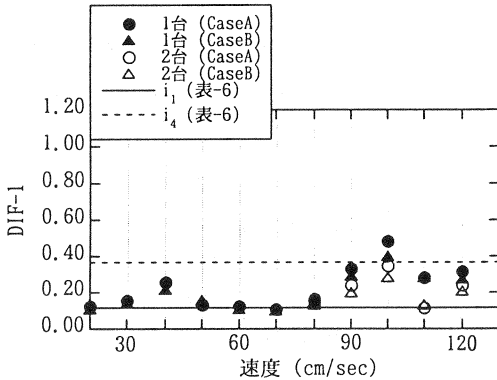


図-23 側径間中央,軸力応答(斜材①)

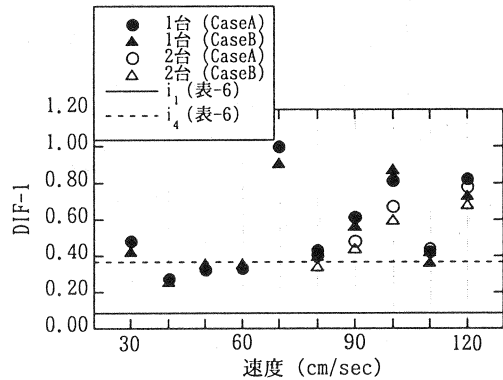


図-24 中央径間中央,軸力応答(斜材②)

6. まとめ

鋼トラスウェブPC橋の車両走行時の動的特性をシミュレーション解析した結果を以下にまとめる。

- (1) 鋼トラスウェブPC橋は、PC桁橋と比較しても特異なたわみ振動モードは生じてはいない。
- (2) 対象としたモデル橋梁の規模においては、車両走行時に振動使用性が問題となる可能性は少ない。
- (3) 着目点や部材によっては、設計衝撃係数と比較して大きな動的増幅が生じている。

今回の検討では走行パターンや着目点、着目部材も少なく、車両走行時の動的特性を十分検討しえていない。今後、設計活荷重列による走行パターンを含めて、より詳細に検討していく予定である。

参考文献

- 1) (財)高速道路調査会：PC橋の複合構造に関する調査研究(その2)報告書, 1998.3.
- 2) 立神久雄, 須合孝雄, 蝦名貴之, 梶川康男, 深田宰史, 福島幸治：波形鋼板トラスウェブを有する5径間連続PC箱桁橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.649-658, 1999.3.
- 3) 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.
- 4) 深田宰史, 梶川康男, 角本周：2径間連続PC斜張橋の車両走行時の振動特性と動的増幅率, 土木学会論文集, No.605 / I-45, pp.37-47, 1998.10.