

高速走行下での鋼鉄道箱桁の動的挙動と 補剛材下端部の応力

Dynamic Behavior and Stress Features at the End of Vertical Stiffener
of Steel Railway Box Girder under High Speed Train

杉本一朗*, 三木千壽**, 市川篤司***, 伊藤裕一****

* 工修 東京工業大学 大学院 社会人博士課程 (鉄道総研) (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

** 工博 東京工業大学教授 工学部 土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 主幹技師 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

**** 工修 東海旅客鉄道株式会社 施設部工事課 (〒100 東京都千代田区丸の内1-6-5)

In response to an increasing demand on the railway for more convenience and comfort, the railway speedup is progressing. Influence of this speedup on steel bridges is not fully known. Field measurements have been carried out to determine how the steel bridge is affected by high speed train. To begin with, the influence on the whole beam was estimated. Next, attention was focused on the area at the end of vertical stiffeners which are suspected to be most influenced by high speed. The results of measurements indicate that there will be no problems with the factors involved in stress designing, but with an increase in the vibrations attendant on speedup, the train load comes to strongly influence the stress at the end of vertical stiffeners.

Key Words : railway steel bridge high speed train, vertical stiffener, out-of-plane vibration, fatigue

1. はじめに

最近、鉄道の利便性、快適性に対する社会的ニーズが高まっている。特に、利便性に関しては自動車等の他交通機関に対する競争力の向上の必要性和相俟って、多くの鉄道事業者がスピードアップに取り組んでいる。スピードアップにあたっては、騒音等の環境問題および構造物に与える影響が考慮され、各種環境対策の他軸重の小さな新型高速走行車両の開発・投入などの対策が講じられている。しかし、そのような高速走行の線区が増えるにつれ、構造物への影響を総合的に検討することが重要になっている。

鉄道橋の設計¹⁾において、速度の影響は衝撃および遠心荷重の設計荷重に考慮されている。また、たわみ制限も適用速度が考慮されている。したがって、高速化にあたっては、試験走行等により各部材に発生する応力度およびたわみを測定し、許容値内に収まることを確認するのが一般的である。通常は列車重量が設計荷重に比べて小さいため許容値を超えることはない。しかし、鋼橋のような薄肉の構造物の場合、高速走行下では面外方向の部材振動が問題になることが多い^{2,3)}。このような振動は、ボルト・リベットの弛みや疲労被害の増加につながることも考えられる。したがって、今後鋼橋を維持管理していく上で高速化がどのような影響を及ぼすかを把握する

ことは非常に重要^{4,5)}であり、必要によっては設計に反映させる必要がある。

このようなことから、本論文は、高速走行下での鋼橋の挙動を把握することを目的に、鋼箱桁を対象に高速走行下での実橋測定を通して検討を行ったものである。最初に、測定および解析により高速走行が桁に与える影響を列車速度との観点から検討し、次に速度とともに振動が増大する腹板について、これまでき裂の発生事例が多く高速走行の影響を受けやすいと考えられる補剛材下端部に着目して、桁の挙動との関連について検討を行った。

2. 垂直補剛材下端部に見られる損傷

これまで、溶接構造の鉄道鋼箱桁には様々な変状が報告されている^{6,7,8)}が、図-1に示すような垂直補剛材下端部から発生する疲労き裂^{9,10)}は列車本数の多い高速線区で多く報告されている。実橋では写真-1に示すように水平方向に発生している。これは下フランジの水平方向の揺れに起因する疲労き裂と考えられている³⁾。

この損傷は、列車の走行安全にただちに影響を及ぼすものではないが、放置するとき裂の方向が変わって思わぬ現象につながる可能性もあるため、発見次第適宜補修・補強を行うとともに、日頃から要注意箇所として点検を行っている。

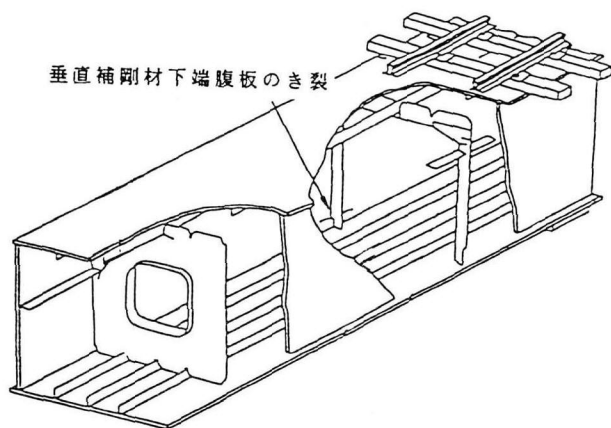


図-1 垂直補剛材下端部に発生する疲労き裂

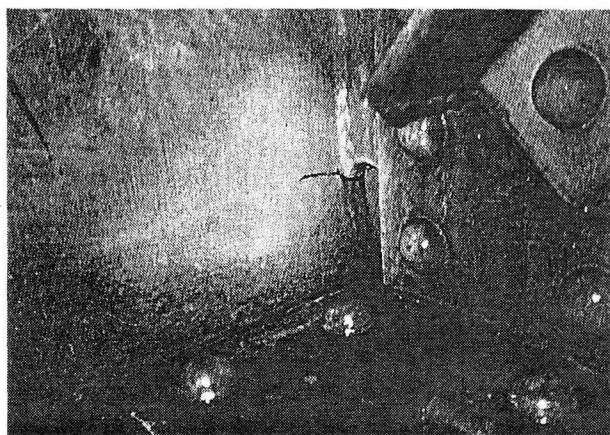


写真-1 実橋における補剛材下端部の疲労き裂

3. 列車速度と鉄道鋼箱桁の応力、たわみおよび振動加速度

3. 1 測定概要

実際に垂直補剛材下端部から疲労き裂の変状が報告されている4径間連続の箱型上路プレートガーダー(4@40m, 軌道構造: 橋まくらぎ式)を対象に実橋測定を行った。測定対象橋梁における変状の発生割合は総数に対して約5%程度である。

最初に、高速走行下の橋梁各部材の挙動を把握することを主な目的に測定(基本測定)を行った。測定項目およびその位置を図-2に示す。測定項目は、設計で照査を行う上下フランジの応力度(S01, S02)および主桁のたわみ(D02V)の他、腹板の振動加速度(A05)および補剛材下端部(対傾構有り)の鉛直方向の応力度(S03)も測定した。なお、腹板補剛材下端部の応力度は、実橋におけるき裂の発生状況から鉛直方向の応力度を測定した。この時、溶接ビードによる応力集中の影響を受けないように補剛材下端から20mm離れた腹板の表裏にひずみゲージを張り付けた。また、測定列車は、図-3に示す同じ軸距で異なる軸重を持つ2タイプである。このうち、Bタイプの列車(以下、B列車)はAタイプの列車(以下、A列車)に比べて軸重が小さな高速列車である。A列車の測定は全て実列車で行っており、そのため同じタイプの列車でも乗車効率の差の分だけ軸重が異なっている。また、測定速度範囲も比較的狭い範囲にある。一方、B列車も実列車での測定を基本としたが、一部に軸重が同じ試験用車両のデータも利用した。

3. 2 測定結果

(1) 応力度

図-4は、主桁下フランジ(支間中央)の測定結果(最

大応力範囲)を列車速度毎に整理したものである。B列車を見ると、250km/h程度までの速度では発生する応力度にそれほど変化はないが、それを超えると少し大きくなっている。また、A列車とB列車による発生応力度は、軸重の比にほぼ対応している。実応力比(実測応力度/計算応力度)は約60%で、発生している応力度はそれほど大きくない。なお、A列車においても200km/h付近で増加しているように見られるが、これは乗車率の差による軸重のばらつきによるものと考えられる。

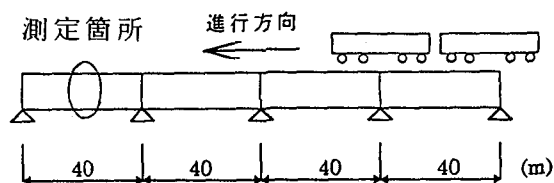
図-5に腹板補剛材下端部の鉛直方向の最大応力範囲と走行速度との関係を示す。その値は小さいが、やはり速度が250km/hを超える頃から急に大きくなる傾向にある。図-6にはB列車の170.2km/hと258.3km/hの時の垂直補剛材下端部の鉛直方向応力の波形(表裏)と、それらの差より求めた曲げ応力の波形、および水平方向応力の応力波形を示す。図より面外方向に曲げ応力が発生していることがわかる。これらの測定値は小さいが、このような小さな応力でも変状は発生している。なお、水平方向の応力波形は、車軸の移動による応力の変動に対応した波形を示しており、鉛直方向応力に見られる高次の振動成分はほとんど見られない。

(2) たわみ

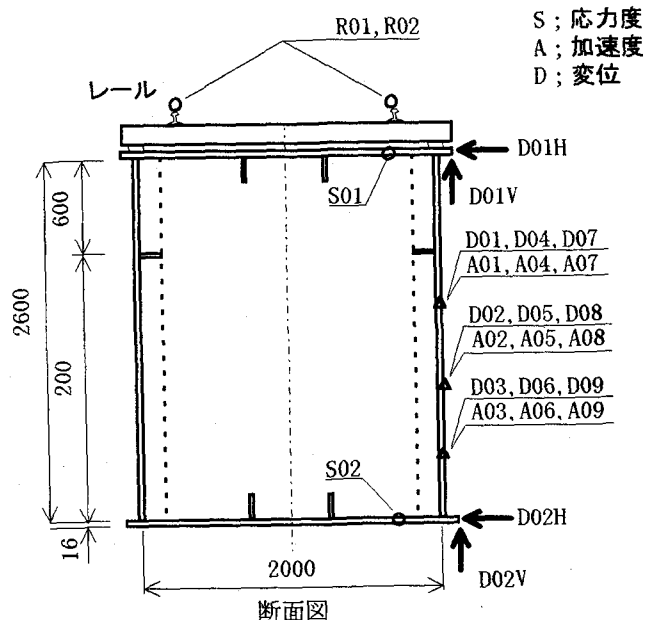
図-7は主桁支間中央のたわみの測定結果を速度ごとに整理したものであるが、応力度の測定結果とほぼ同様の傾向にある。また、その大きさは、鉄道の設計基準¹⁾に定められるたわみ限度値($L/2000$ L : 支間)に比べても半分程度と小さく、速度が250km/hを超えると増加するがその程度はわずかである。

(3) 衝撃係数

図-8は、B列車において、応力度の測定値を低速走行における測定値で除すことによって算出した衝撃係数を示したものである。図には、設計基準に示す衝撃係数を実線で、桁一車両バネマスモデルの相互作用を考慮した動的応答解析^{11), 12)}により得られた衝撃係数を破線で示す。これから、計算値と実測値は比較的よく一致しており、



単位: mm



	応力度	変位	加速度
基本測定	S01, S02 S03, S04	D01V, D02V	
補剛材下端部に着目した測定	S03I, S03O S04I, S04O	D01, D02, D03 D04, D05, D06 D07, D08, D09 D01H, D02H D01V, D02V	A01, A02, A03 A04, A05, A06 A07, A08, A09

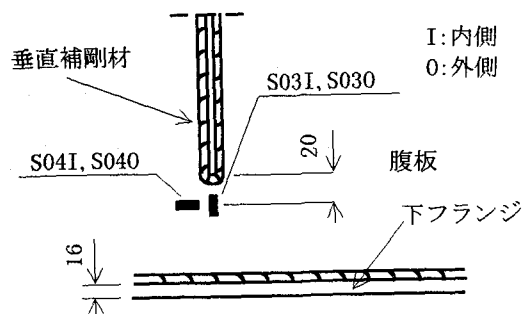
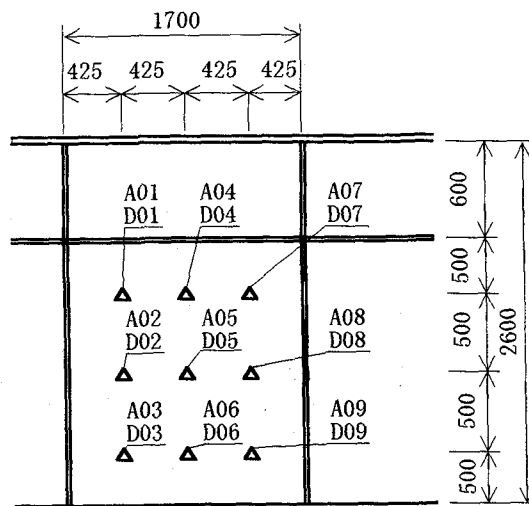
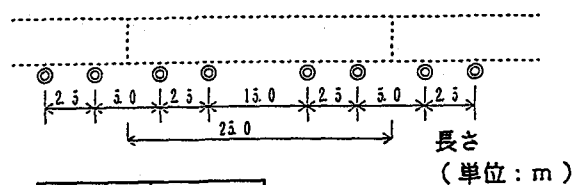


図-2 測定位置図



	軸重 kN
A列車	156.8
B列車	117.6

乗車率0%の値を示す。

図-3 測定列車

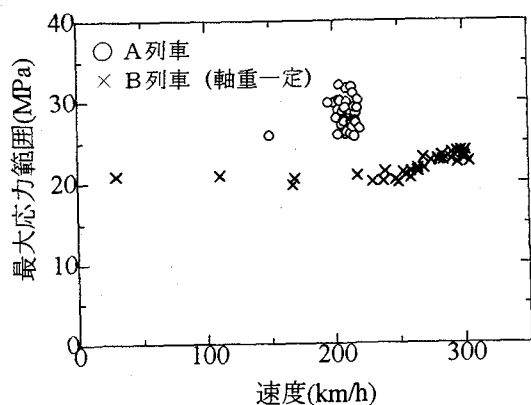


図-4 主桁下フランジの最大応力範囲

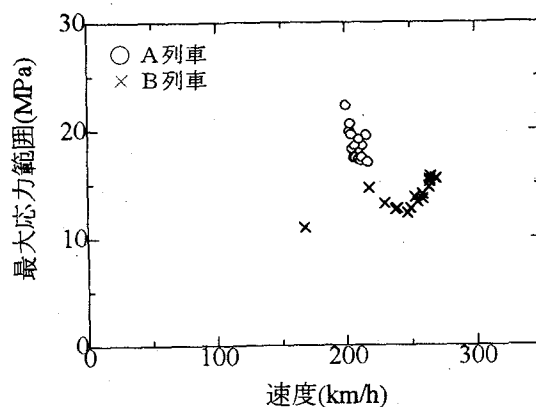


図-5 補剛材下端部(鉛直応力)の最大応力範囲

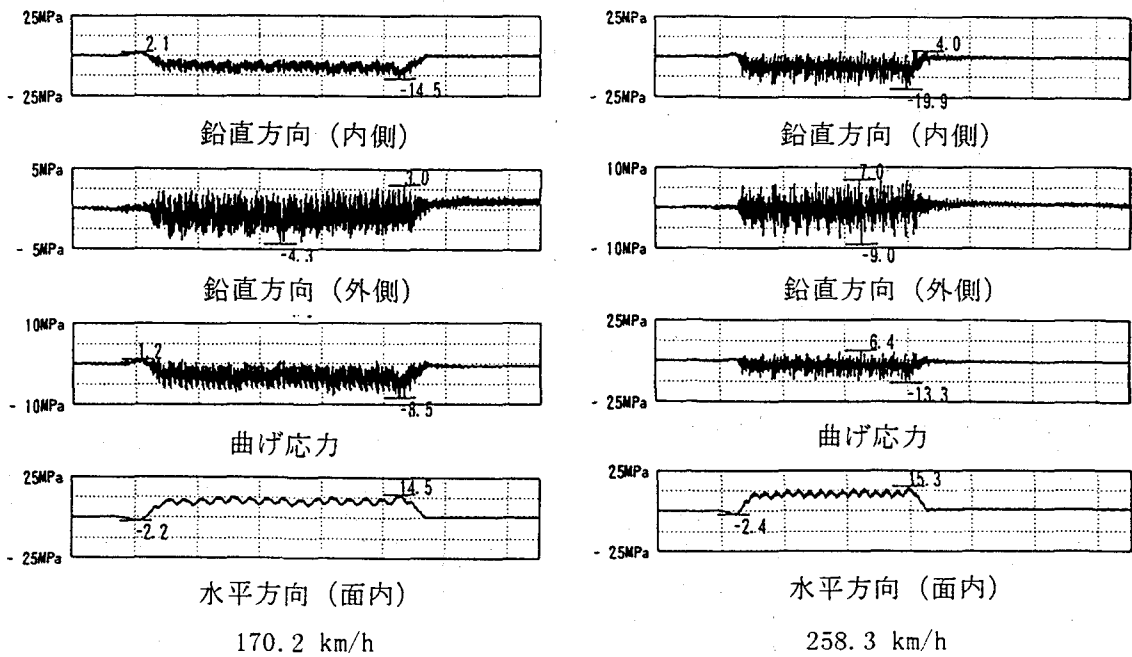


図-6 補剛材下端部の応力波形 (B列車)

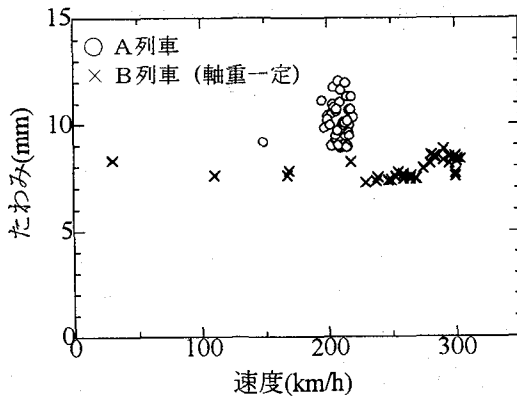


図-7 主桁支間中央のたわみ

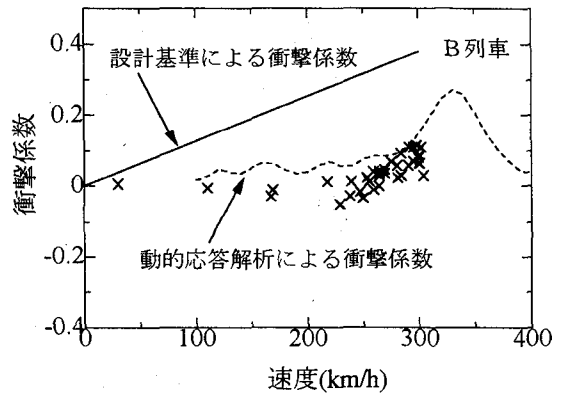


図-8 衝撃係数

250km/h 程度の速度から大きくなる傾向にあること、計算値からこの桁では衝撃係数は330km/h 付近にピークがあると予想されることがわかる。ただし、それらは設計基準に定める衝撃係数に比べて小さい。

(4) 振動加速度

図-9 は主桁下フランジの応力測定位置での上下方向振動加速度を、図-10 は主桁腹板の面外方向の振動加速度を列車速度ごとに整理したものである。これらの図から、腹板の面外方向振動加速度が大きいこと、振動加速度は速度の影響を受け、重量の軽い小さなB列車でも速度が250km/h を超えると急激に増加し、速度230km/h で運転されているA列車より大きな振動加速度を生じることがわかる。特に、腹板の面外方向の振動加速度は、上記フランジの振動加速度に比べても速度の影響をさらに強く受けている。

(5) 疲労損傷度

上述したように、フランジの応力は列車速度によりそれほど増加する傾向は認められないが、腹板の補剛材下端部の応力度は増加する。そこで、主桁下フランジ (縦ビード) および腹板の補剛材下端部 (鉛直方向) について、応力度の測定波形からレインフロー法により1列車あたりの疲労損傷度 (それぞれ、鉄道橋の設計基準に定めるC等級およびG等級¹³⁾ を基準にする) を計算した。その結果を図-11 および図-12 に示す。図から、設計で考慮する下フランジの疲労損傷度 (以下、1列車あたりの疲労損傷度のことを言う) が非常に小さいのに対し、設計で考慮しない腹板の鉛直方向応力に対する疲労損傷度が比較的大きいこと、両者とも疲労損傷度は速度の増加とともに大きくなるが特に補剛材下端部でその影響が大きいことがわかる。

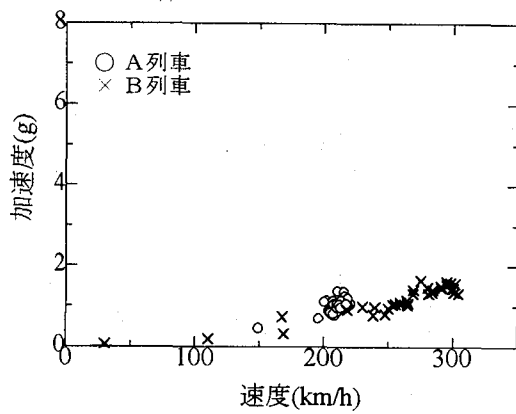


図-9 主桁下フランジの上下方向振動加速度

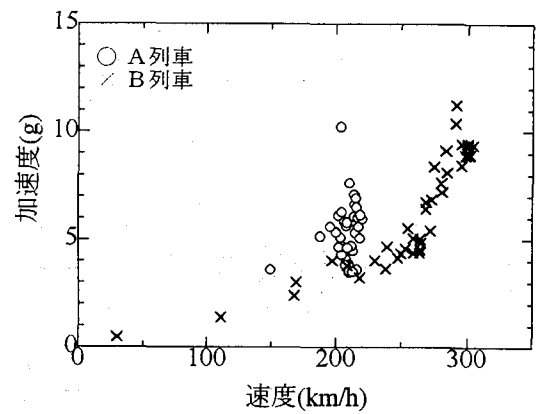


図-10 腹板面外方向の加速度

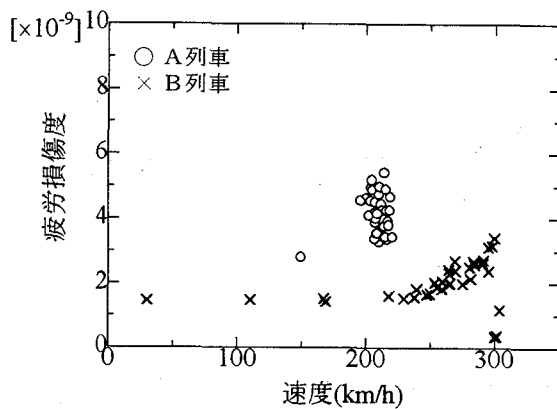


図-11 下フランジの疲労損傷度

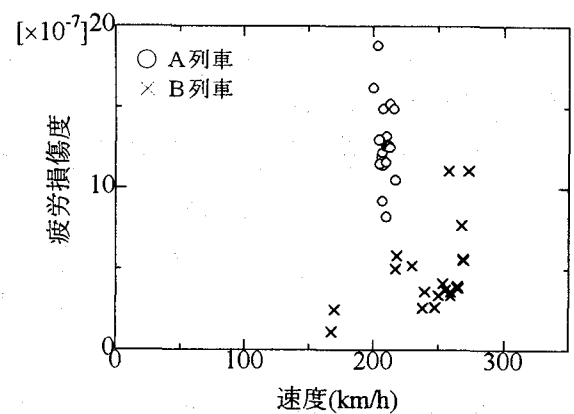


図-12 補剛材下端部（鉛直応力）の疲労損傷度

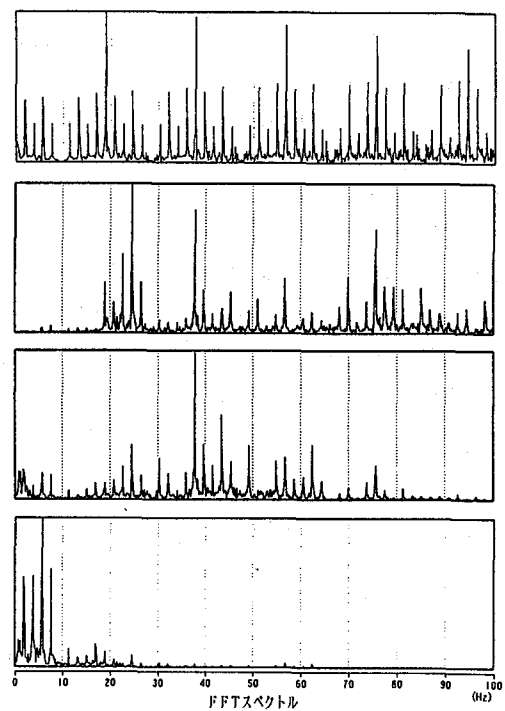
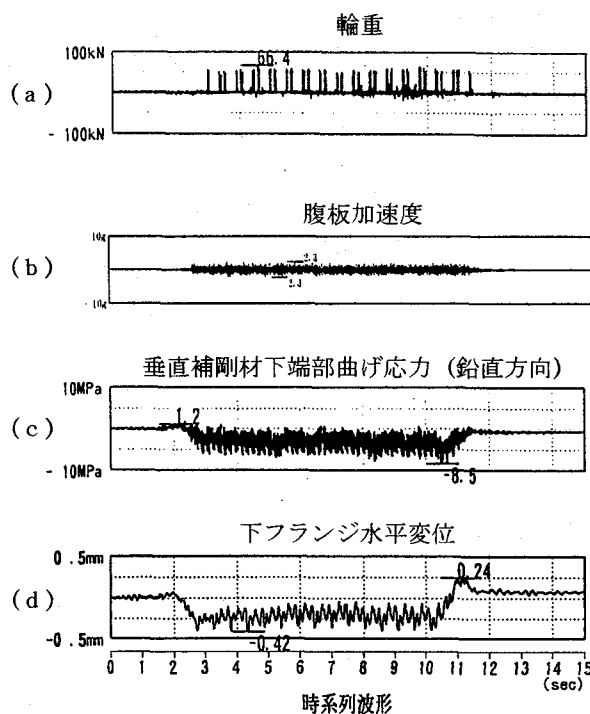


図-13 測定波形とフーリエスペクトル
(B列車 時速 170.2km/h)

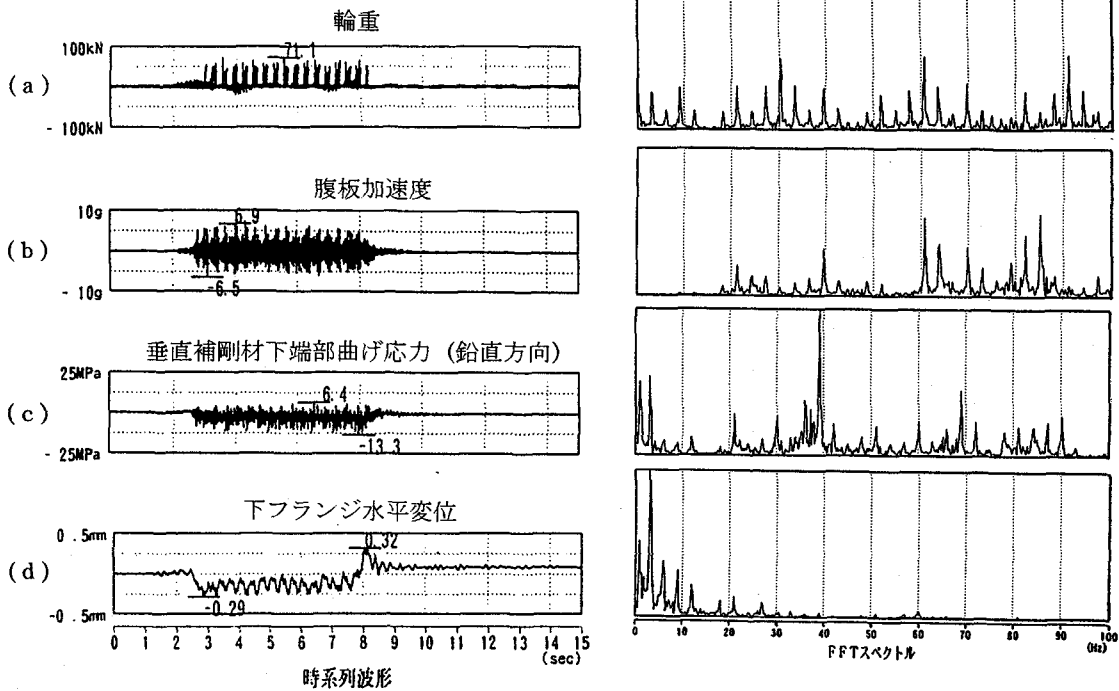


図-14 測定波形とフーリエスペクトル
(B列車 時速 273.3km/h)

4. 腹板の補剛材下端部に着目した測定

4. 1 測定概要

3章に速度とともに腹板の補剛材下端部の応力範囲が大きくなる傾向があることを述べたが、ここでは、その要因を探り、桁の挙動と垂直補剛材下端部の応力度との相関関係およびき裂発生メカニズムを探ることを主な目的に、3章に述べたと同じ橋梁において、支間中央部の腹板の振動加速度および変位、垂直補剛材下端部を中心とする応力度等を測定した。図-2にこれらの測定項目および位置を示す。腹板の加速度計は、腹板を縦に4等分、横方向に4等分するように3×3の9カ所(A01～A09)および補剛材上の1カ所(A10)の計10箇所に設置した。また、腹板の変形状況を把握するため、加速度計と同じ位置(9箇所)の変位を、補剛材に固定しアングル材に変位計を取り付けることにより測定した(D01～D09)。補剛材下端部の応力度については、腹板(表裏)の水平方向および鉛直方向に、溶接ビードによる応力集中の影響を除外するため補剛材下端部溶接部から20mm離れた位置にひずみゲージを貼り付けた(S03,S04)。また、補剛材下端部の面外方向応力が発生する要因の一つとして下フランジの左右の動きを想定し、不動点として桁脇に設けたビティ足場を利用してその変位を測定した(D01H,D02H)。さらに、桁の鉛直方向の変位(たわみ)も測定した(D01V,D02V)。その他、列車速度および軸重

測定用にレールにひずみゲージを貼り付けている(R01,R02)。

4. 2 測定結果および考察

(1) 輪重

図-13(a)および図-14(a)に、それぞれ列車速度170.2km/hおよび273.3km/hのときにレールに発生する応力波形およびスペクトルを示す。レールに貼り付けたひずみゲージは、車軸がゲージの直上に来たときに鋭いピークを示す。両者のスペクトルを見ると、卓越周波数は速度により異なったものとなっている。これを他の速度域のデータを含め20Hz以下の卓越周波数と速度の関係で調べたものが図-15である。図から、これらの卓越周波数は速度により比例していることがわかる。このうち周波数の最も小さな振動(図中、卓越周波数1)は、速度/車両長に対応する。この輪重のスペクトルは、桁の影響を受けない列車の速度と車軸間隔のみから決まるスペクトルとみなすことができる¹⁴⁾。

(2) 腹板の面外方向の振動

図-13(b)および図-14(b)から、腹板中央部の面外方向の振動加速度は、速度とともに大幅に増加し(図-5参照)、比較的高い周波数の振動が卓越するようになることがわかる。振動は、列車速度に関わらず20Hz以上の周波数が卓越しており、その卓越周波数は(1)で述べた列車の速度と軸距から決まるスペクトルの卓越周波数と一致している。

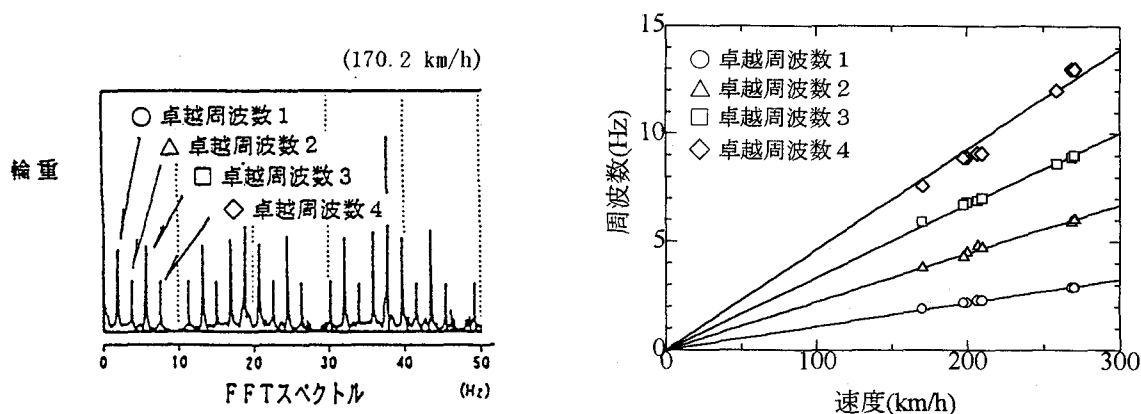


図-15 実測波形における 20Hz 以下の卓越周波数

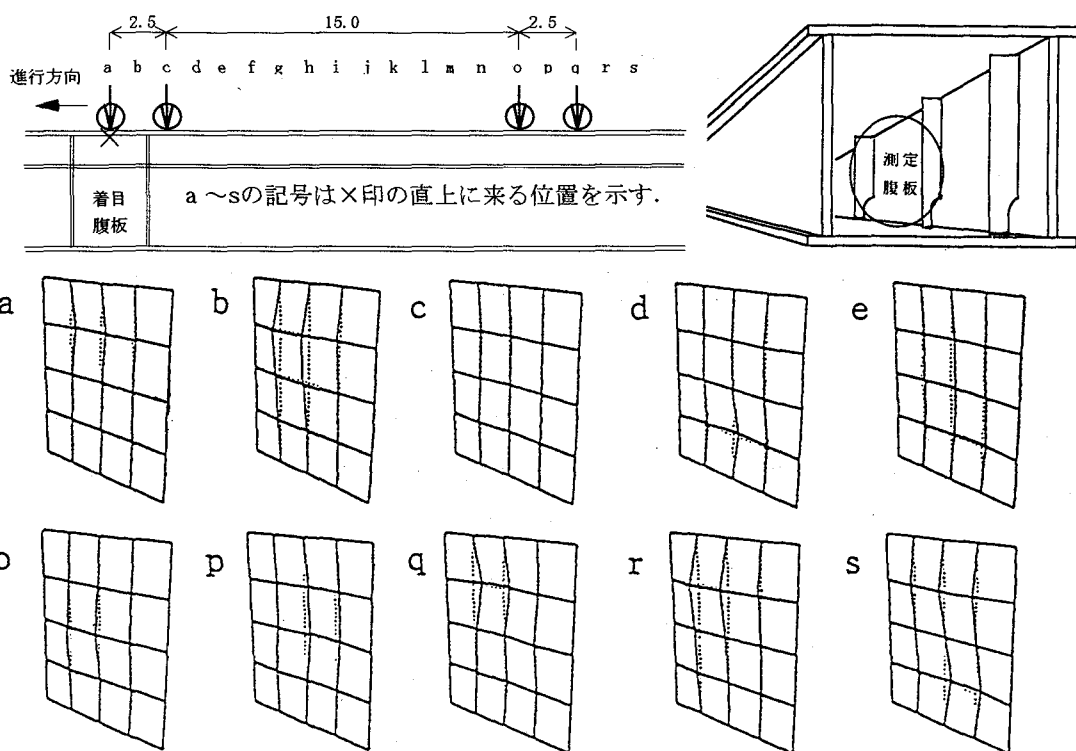


図-16 列車通過時の腹板の変形状況

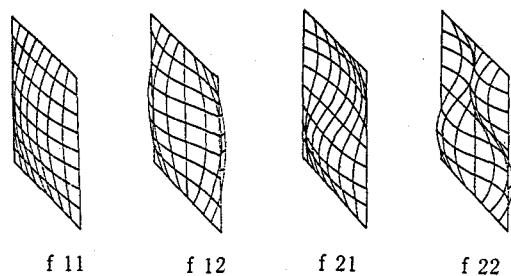


図-17 腹板の変形モード

また、図-16 はB列車が 272.5km/h で走行するときの腹板が面外方向に変形していく状況を示したものである。図中 a ～ s の記号は、列車が移動し各記号の位置が着目する腹板中央部に来る位置を示している。腹板の振動は車輪が腹板上を通過するとき、図-17 に示すように固有振動数 f_{11} のモードに近い変形状況になっており、また

f_{21} および f_{22} のモードと同じような変形も認められる。

以上のように、腹板の振動も車軸の移動が起振源になり、車軸の位置によってあるモードで変形する強制振動と考えられる。

(3) 桁全体の横方向への振動

図-18 に上下フランジの水平方向への変位波形、それらの変位差の波形、および上下フランジの水平・鉛直方向の変位から求めた桁断面の変形図を示す。これらの図から、桁は上フランジが大きく横方向に変形し、同時に下フランジも上フランジ程大きくはないが同様に横方向に変形して振動していることがわかる。すなわち、桁は、列車（車軸）の進行とともに横方向に、かつ図に示すように断面がねじれるような変形振動が生じている。列車速度が比較的低速の場合には、この変形振動はそれほど

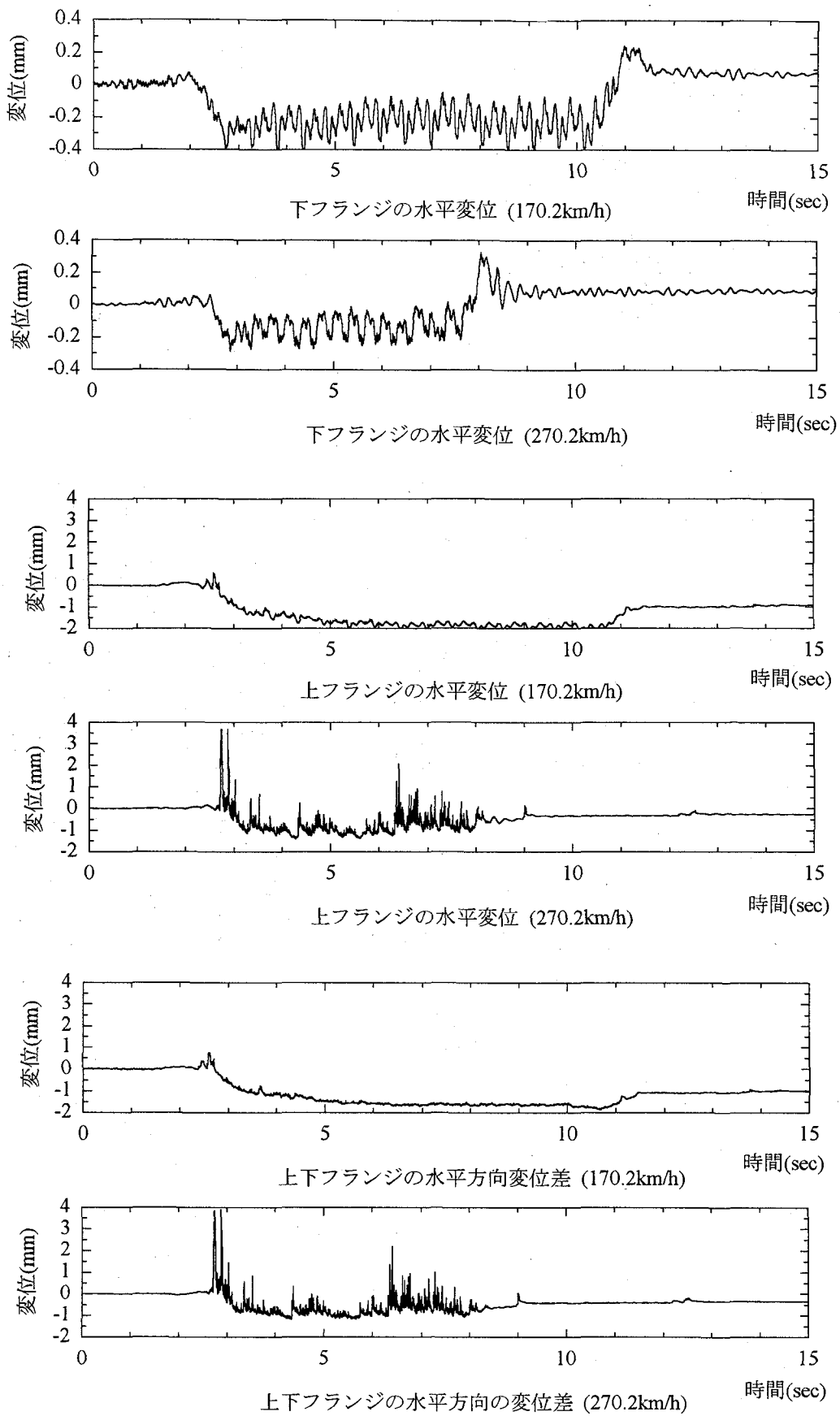
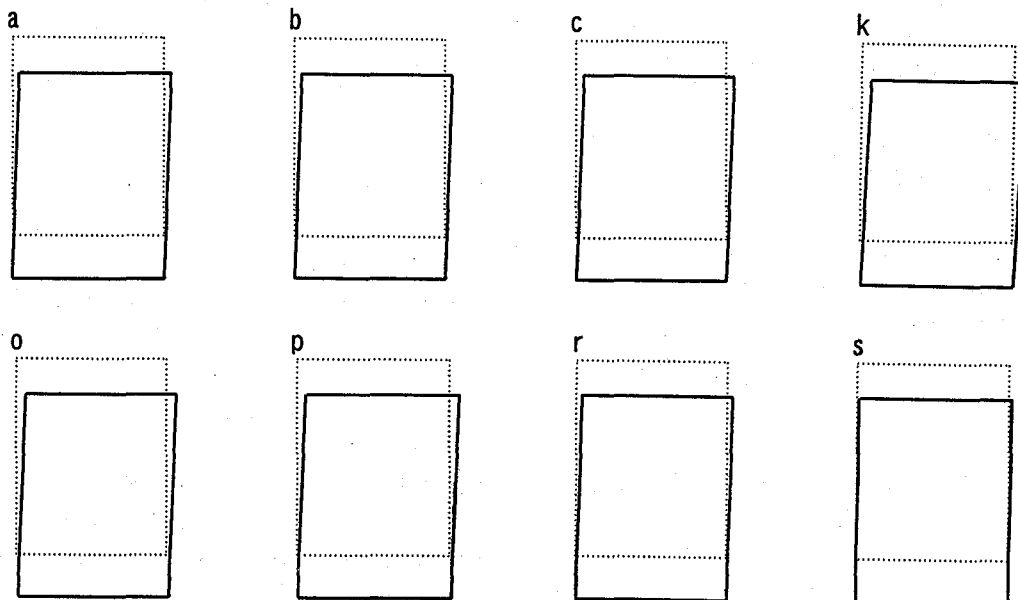


図-18 上下フランジの水平変位波形



大きくないが、列車速度が高速になると、上フランジの変位量の変動幅が大きくなるため桁の変形も大きくなり、またより高い周波数の振動が増加するようになると考えられる。図-19 には 1 車両が移動する際の断面の変形状態を示す。列車が移動するにつれて断面の変形状態が異なることが読み取れる。なお、図には示していないが、これらの振動の卓越周波数も (1) で述べた列車の速度と軸距から決まるスペクトルの卓越周波数と一致する。

図-13(c)および図-14(c)に補剛材下端部の面外方向の応力波形およびスペクトルを示す。面外方向の応力は、面内方向の応力に比べると（図-6参照）幅広い周波数領域で変動しており、比較的周波数の高い振動が多い。また、速度とともに振動倍率は増加し、より高周波の振動成分が増加している。

これまでの検討では、桁の変位、腹板の面外振動、補剛材下端部の面外・面内方向応力度等どれもが列車の荷重列の影響（軸距および速度）を強く受けていること、部材によってそのスペクトルの卓越周波数の特定の成分が卓越している。したがって、列車の通過によって桁は以下のような挙動をしていると考えられる。

形は下フランジの変形に比べて大きく、桁は断面方向にねじれるように変形する振動を発生する。フランジの振動には比較的周波数の高い振動成分が含まれているため、桁の変形振動もそれに相当する比較的周波数でも振動する。同時に腹板も車軸の位置によってある変形モードで変形し振動する。この振動も、比較的高い周波数で振動する。この腹板の振動の要因としては、上記の桁の変形振動が考えられる。また、補剛材下端部の面外方向の応力の変動は、以上のような桁の変形に起因して発生するものと考えられる。なお、低速域では、これらの振動はそれほど大きくないが、速度の増加とともに桁の変形振動が増加するなど、これらの現象がより顕著に現れる。

高速化に伴い、鋼橋には部材振動の増加等の新たな問題も発生しており、維持管理を行っていく上でその影響を把握しておくことは重要である。このようなことから、新幹線の鋼箱桁の実橋測定を行い、その影響について検討した。得られた結論は、以下の通りである。

— 1011 —

- (2) フランジおよび腹板の振動加速度は速度とともに増加する。270km/hを超えると特に主桁腹板の面外振動が増加する傾向が顕著である。
- (3) 測定波形から疲労損傷度を計算すると、補剛材下端部の鉛直方向応力の疲労損傷度は、270km/hを超える領域で急激に大きくなる。
- (4) 上下フランジの変位、腹板の面外方向振動加速度および補剛材下端部の面外・面内方向応力度のどれもが列車の荷重列の影響を強く受けており、部材によって特定の周波数の振動が卓越する。
- (5) 主桁は、断面方向にねじれるような変形振動を発生する。また、速度の増加とともにこの変形振動は増加する。
- (6) 桁は、車両（軸）の移動が起振源となって横方向にねじれ振動を発生し、それによって腹板も面外方向に振動する。補剛材下端部の面外方向の曲げは、このような桁の変形により発生しているものと考えられる。

謝辞

本研究に際して地質計測(株)酒井紀士夫氏にご協力を頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），丸善，1992.10.
- 2) Isoura.K：Maintenance Program of Shinkansen Structure, IABSE,1989.
- 3) K.Sakamoto, C.Miki, A.Ichikawa, M.Abe:Vibration Fatigue of Steel Bridges of the Bullet Train System, IABSE,1990.
- 4) 竹森重英、平野尚、高橋安彦、稲熊弘：超高速列車による構造物の応答解析、鉄道連合シンポジウム、1996.7.
- 5) 関雅樹、大上卓司、徳丸哲義、青柳幸徳：鉄道振動の発生と伝播に関する一考察：鉄道連合シンポジウム、1996.7.
- 6) 坂上晃、内藤繁、阿部允：鉄道橋におけるソールプレート取付け溶接部の疲労亀裂に関する発生原因の検討、第48回土木学会年次講演会、1993.9.
- 7) 市川篤司：鋼鉄道橋の補修・補強の概要、橋梁と基礎、1994.8.
- 8) 境幸輝、赤松貞義、津山弘幸、羽子岡爾郎：新幹線の鋼桁支承部交換に伴う応力等測定結果報告、第49回土木学会年次学術講演会、1994.9.
- 9) 赤松貞義、洞浩富、阿部允：箱断面上路プレートガーダーのき裂変状に関する一考察、第50土木学会年次学術講演会、1995.9.
- 10) 阪本謙二：TIG処理による疲労亀裂の補修、橋梁と基礎、1994.8.
- 11) 松浦：高速鉄道における橋桁の動的応答に関する研究、鉄道総合技術研究報告、No.1074、1978.3.
- 12) 市川篤司：橋梁の主桁たわみ制限の適用に関する諸問題、鉄道総研報告、1994.8.
- 13) 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.
- 14) 神田仁、長戸博、宮本秀郎：土路盤における地盤振動と解析、鉄道連合シンポジウム、1996.7.

(1997年1月23日受付)