

多径間連続曲線箱桁橋の振動特性に関する一考察

A STUDY ON VIBRATION CHARACTERISTICS OF MULTI-SPAN CURVED BOX GIRDER BRIDGE

徳永法夫* 早川 清** 西村 昂**

Norio TOKUNAGA, Kiyoshi HAYAKAWA and Takashi NISHIMURA

* 阪神高速道路公団保全施設部調査役 (〒541 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

** 工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科 (〒525 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

*** 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

Since traffic vibration of elevated roads is complicated, because the interaction of many factors, it is not clarified yet. Under this circumstance, we had an opportunity to conduct a survey to examine the dynamic characteristics of a loop bridge with 7-span continuous box girder, both qualitatively and quantitatively. We examined the influence of the vibration of the bridge on surrounding ground and near-by houses as well as super- and sub-structure of the elevated roads, based on the survey results.

As these results, we inferred natural frequency as dynamic characteristics, displacement locus of bridge piers, impact factors to surrounding ground and houses and vibration sources. Moreover, we constructed an analytical model based on the observed results, and then we studied vibration-suppression measures by the response analysis simulation as a case study.

This paper presents useful results on the vibration characteristics on loop bridge as well as whole vibration properties of a human body in the surrounding environment based on the results of its survey and analysis.

keyword: :traffic vibration, loop bridge, multi-span continuous girder, curved girder, dynamic characteristic, vibration-suppression, natural period analysis, response analysis

1. まえがき

道路橋交通振動の発生要因は、伸縮継手部段差によるもの、上部工の固有振動、車両のばね振動、橋脚のロッキングおよびスウェイ振動など複雑であり、しかもこれらの要因が絡みあうため、十分に解明されるに至っていない。このような状況の中で、構造的に珍しい7径間連続箱桁橋で平面線形が円を描く高架道路橋出路という希な構造物の動的挙動特性を定量的に明確にし、加えて近傍地盤面および隣接家屋への影響をも考慮して、振動源、振動状況、振動伝播経路などを把握するための振動調査を実施し、分析・検討した。

本調査で対象とした橋梁のようにループ状の桁における振動特性の調査は過去にも事例が少なく¹⁾、その挙動特性を明確にすることは貴重な技術資料になると考える。

さらに、実橋を的確に表現するモデルを作るため、実測結果と比較しながら固有値解析および時刻歴応答解析を行い、解析モデルの作成および修正を行った。その解析モデルを用いた鉛直成分の振動加速度レベルに関する検討は既に報告されている²⁾。そこで本論文では、水平方向成分に関する体感補正^{4), 5)}を考慮した振動レベルに着目し、いくつかの制振対策を想定してそれらの効果を考察した。

2. 調査概要

2. 1 調査目的

本調査は、7径間連続ループ箱桁という希少な構造としての振動特性を確認し、出路橋の上下部構造の挙動特性だけでなく近隣地盤・家屋への振動の発生源および伝播経路を解明することを目的として実施した。

調査対象橋梁の構造一般図(図-1)と構造諸元(表-1)を以下に示した。

2. 2 試験内容

(1) 試験車走行試験

既知荷重による応答量を得るために、総重量を196kN (20tf)に調整したダンプトラックを試験車として、高架橋本線および出路橋を走行させ計測を行った。出路部の走行では、通常の走行パターンに加え、加振力を増大させるため本線から出路へ分岐するジョイント部に、厚さ10mmのゴム板を敷き人工的に段差を設けた。

(2) 一般車供用時測定

試験車の他に、供用中の一般車の中から大型車に着目し、本線および出路を単独で走行しているパターンについても計測を行った。

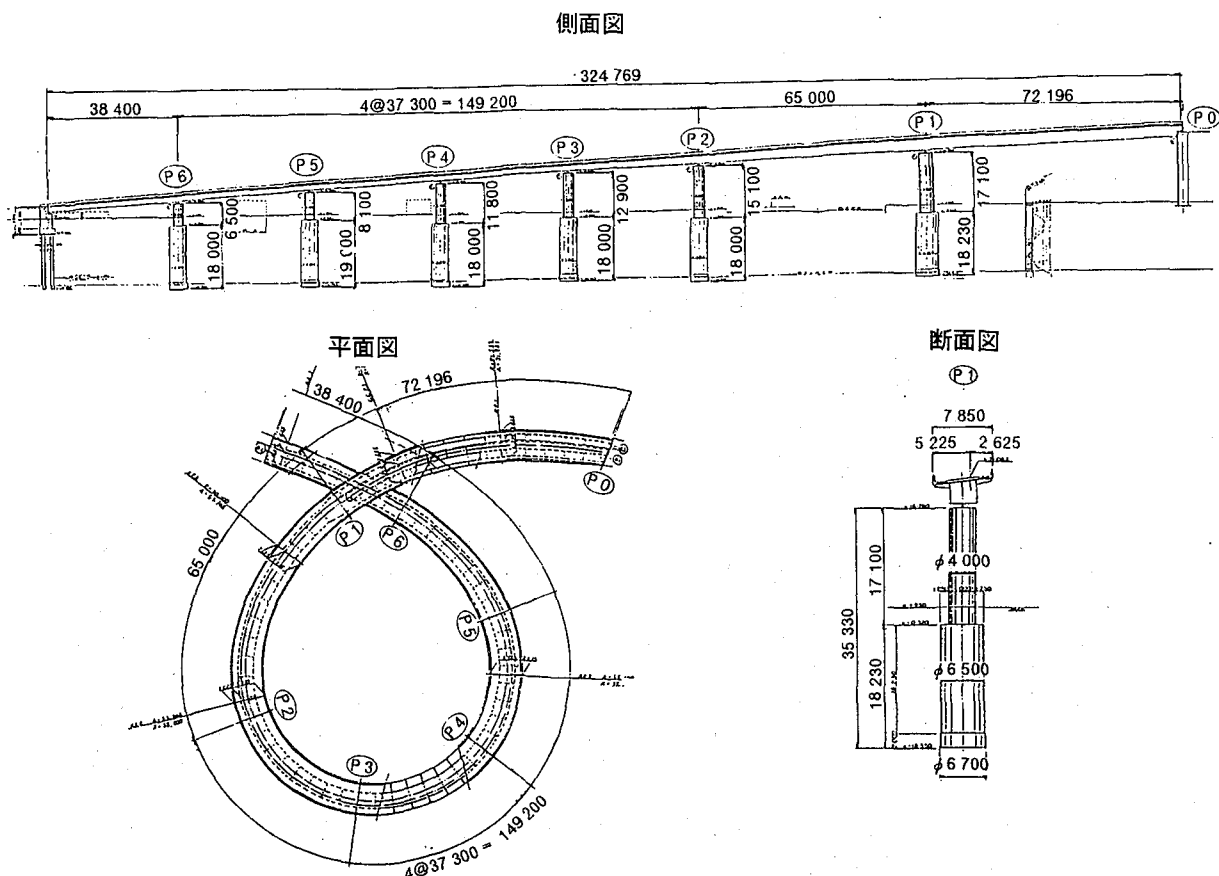


図-1 構造一般図

表-1 構造諸元

橋 長	325.771 m
桁 長	325.571 m
支 間	38.4m + 4 × 37.3m + 65.0m + 72.196m
橋 格	TL-20, 1等橋
設計速度	35km/h ~ 40km/h
上部工形式	7径間連続非合成箱桁
下部工形式	経体：RC円形柱、逆T式橋台 基礎：オープンケーソン、場所打ち杭
舗 装	アスファルト舗装 75mm
床 版	コンクリート床版 210mm
設計震度	上部工 Kh=0.30, 下部工 Kh=0.22, 基礎 Kh=0.0
通用示方書	道路橋示方書

2. 3 交通振動特性の測定項目

(1) 出路橋の振動性状に着目した測定項目および測点配置

出路橋の振動性状（振動特性）を，一般通行車両および既知重量の試験車により確認した．測定項目を以下に挙げ，測点の配置（図-2）を以下に示した．

a. 振動加速度

出路桁各径間中央（3成分×7点），出路各橋脚天端（3成分×1点，2成分×6点），本線桁径間中央（1成分×4点）

b. 支承変位

P0（本線出路分岐部）およびP7（出路桁終端），橋脚の支承変位（1成分×4点）

(2) 振動発生源および伝播状況に着目した測定項目および測点配置

出路橋に関わる振動の発生源および伝播経路は，周辺の状況を考慮すると，下記の2つが主な振動発生源及び伝播経路と思われた．

- ①高架橋本線または出路橋の振動が出路およびその橋脚を伝播して出路直下近傍の地盤を振動させる経路
- ②並行する平面国道の振動が地盤を伝播し出路直下近傍の地盤を振動させる経路

そこで，高架道路橋本線および並行する国道の一般車走行および試験車走行に伴う出路周辺および近接家屋の卓越

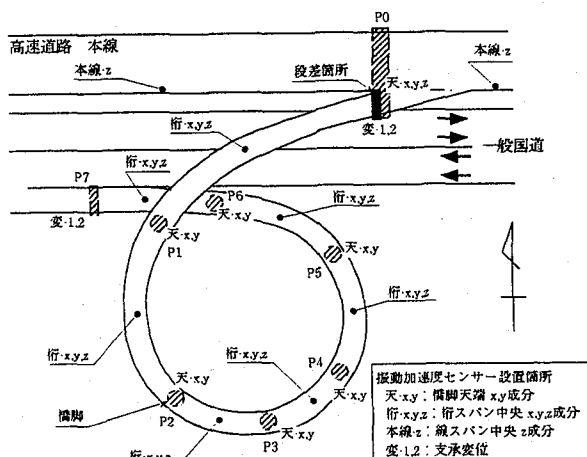


図-2 出路橋の振動特性に着目した測点配置図

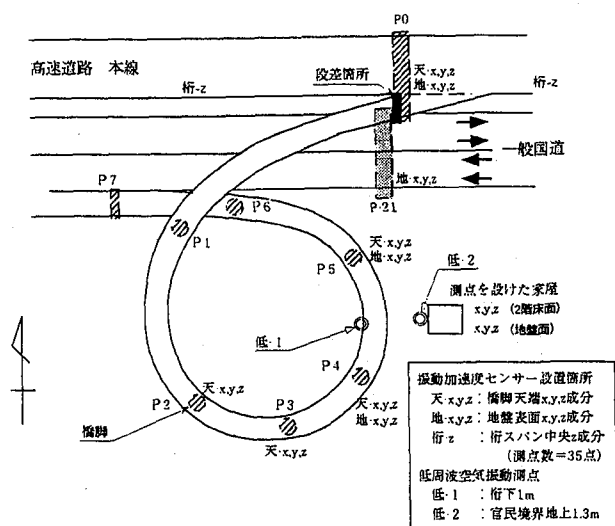


図-3 発生源・伝播経路に着目した測点配置図

振動数を分析し、振動発生源および伝播経路を推定した。測定項目および測点の配置を図-3に示した。

a. 振動加速度

P0橋脚の天端および直下地盤面測点(3成分×2点, 本線と出路の分岐点), 国道43号の高架部分の橋脚直下地盤面(3成分×1点), 出路各橋脚天端およびその直下地盤面(3成分×6点), 出路近傍の地盤面および家屋内2階床面(3成分×2点)

b. 振動レベル

P5橋脚直下地盤面(3成分×1点), 出路近傍の地盤面(家屋1階に相当)(3成分×1点), 家屋内2階床面(3成分×1点)

(注: 振動レベルとは、振動感覚補正を行った振動の加速度実効値をdBで表したものの⁵⁾)

2. 4 車両走行状況

高速本線および並行する国道の一般車の走行状況と試験車の走行状況を監視員およびビデオカメラにより監視記録し、構造物および地盤の時刻歴振動データと整合させた。

3. 交通振動測定結果

3. 1 出路橋の桁の挙動について

出路橋自身の自由振動における挙動を把握するため、本線を一般大型車が通過した場合の振動変位軌跡を図-4に示した。この図より、橋脚上の測点であるP0を除き、桁の測点においては鉛直方向成分が比較的优势となってい

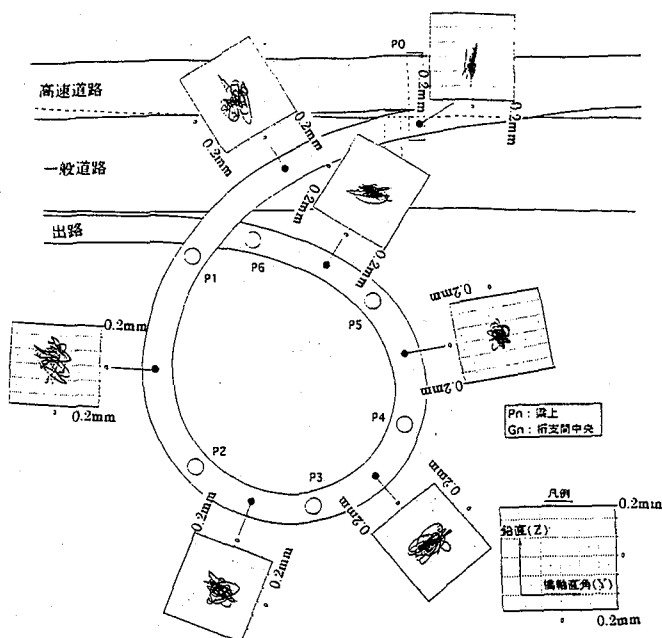


図-4 自由振動時の変位軌跡(鉛直断面内)

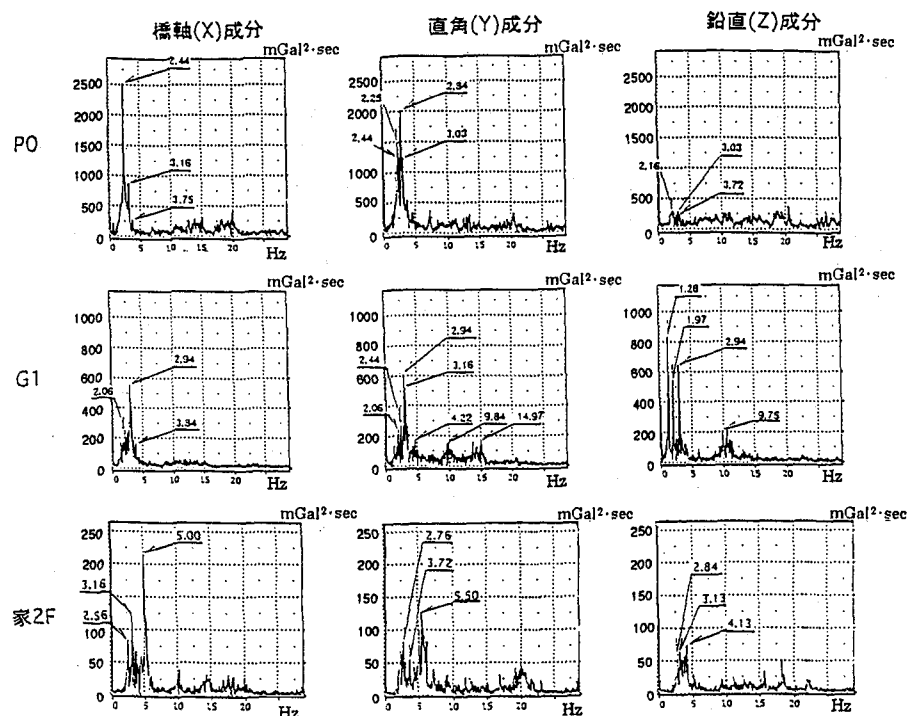


図-5 周波数分析結果

る。測点が桁支間の中央であることを考慮すると当然であるが、橋軸直角方向成分も鉛直変位に匹敵するほどの値を示している。よって、振動の要因としては桁のたわみ振動ばかりではなく、橋軸直角方向の成分も比較的大きく寄与していると思われる、出路の桁全体が各々の橋脚の頂部を揺する現象が生じていると考えられる。

3. 2 多径間連続曲線桁橋の固有振動数

振動加速度波形データについて、周波数分析結果として図-5にP0測点(本線との接続点), G1測点, 家屋2

表-2 卓越振動数

	横軸(X)成分			縦軸(Y)成分			鉛直(Z)成分		
観2F	2.56	3.16	5.00	2.56	2.76	3.72	2.84	3.16	4.13
観1F	2.75	3.16	3.72	2.56	3.16	4.31	2.84	3.34	5.31
P21	2.75	3.72	5.31	2.75	3.03	5.31	2.75	3.34	5.31
P0地	2.25	3.72		2.84	3.03	3.72	1.84	2.84	3.72 4.19
P0	2.56	3.16	3.75	2.25	2.44	2.84 3.03	2.16	3.03	
G0	2.56	2.94	3.16 3.44	1.28	2.56	3.03 4.22	1.28 1.97	2.94	
P1	2.94	3.16 3.44		2.56	3.16	4.22 4.63			
G1	1.28 2.06	2.94	3.44 3.84	2.44	2.94	3.16 4.22	1.28 1.97	2.94	
P2	1.75 2.25	2.84 3.16	3.84	2.06	2.44	3.16 3.84			
G2	2.06	2.56	2.94 3.16	1.69 2.06	3.16	5.22	1.28 1.97	2.94	3.94
P3	1.84	2.56	3.16 4.53	2.44	3.84				
G3	2.06	2.44 2.72	3.16	2.44	3.16	3.94	2.44	2.94	3.94
P4地	2.44	3.03	4.63	2.06	3.16	3.94	2.06	3.16	
P4	2.44	2.94	3.94	2.56	2.84	3.16			
G4	2.44	3.16	3.94	2.06	2.94	3.16 3.84	2.44	2.94	3.53 3.94
P5地	2.44 2.75	3.16	5.00	2.44	3.16 3.72		2.25 2.45 2.75	3.72	
P5	2.56 2.84	3.16	4.00	2.44	2.94	3.94			
G5	2.44	3.16		2.44	3.16	3.94 5.22	2.06 2.45	2.94	4.22
P6	2.56	2.94		2.44	3.16	3.84			
G6	2.94	3.44	3.94	2.44	3.16	3.94	2.44	2.94	3.44

 : 3次モード
 : 4次モード
 : 5次モード
 : 6次モード
 : 7次モード
 : 8次モード

階測点のスペクトル図を示した。分析対象データは、試験車および一般車を含む全ケースから、単独走行で他の車両の影響のないケースを選んだ。また、全測点の周波数分析結果より、ピークの大きな振動数について概ね上位3個程度の卓越したピークを選び、表-2にまとめた。表-2において、各次振動モード毎にグルーピングし、各々の方向成分での出現状況を示した。

出路橋に共通する振動数成分と、それらの振動モードを求めるため、各径間中央の測点で得られた加速度データについて、任意の2測点間のクロススペクトル分析を順次行い、各測点の振幅（フーリエ振幅）および測点間の位相を求めた。それらの値から実測結果に基づく振動モードとして8個の固有振動数および振動モードが求まった³⁾（表-3）。これらのうち特徴的なモードとして、2.94Hz（5次）と、3.16Hz（6次）について図-6に示した。

2.94Hz（5次）は、鉛直成分がG3径間（P3-P4橋脚間）以外の桁がすべて同位相であることから、周辺地盤の鉛直振動への影響が大きいと思われる。また、水平成分も比較的大きいがこれは対面している位置（P1~P2とP4~P5、あるいはP2~P3とP5~P6など）の位相が逆であることから、ある程度打ち消す作用があると思われる。よって、外部（周辺地盤）への影響は比較的小さいものと考えられる。一方、3.16Hz（6次）ではG1径間（P1-P2橋脚間）とG4径間（P4-P5橋脚間）を結ぶ方向、すなわちモード図上では左右方向の挙動が同位相であることから、周辺地盤の水平振動に大きく寄与していると考えられる。

3. 3 近接家屋に対する交通振動の影響

近接家屋への影響を検討するため、本線との接続箇所であるP0測点、家屋1階および2階の測点における加速度

表-3 実測結果による固有振動数

実測1次モード	1.28Hz
実測2次モード	1.97Hz
実測3次モード	2.44Hz
実測4次モード	2.56Hz
実測5次モード	2.94Hz
実測6次モード	3.16Hz
実測7次モード	3.84Hz
実測8次モード	3.94Hz

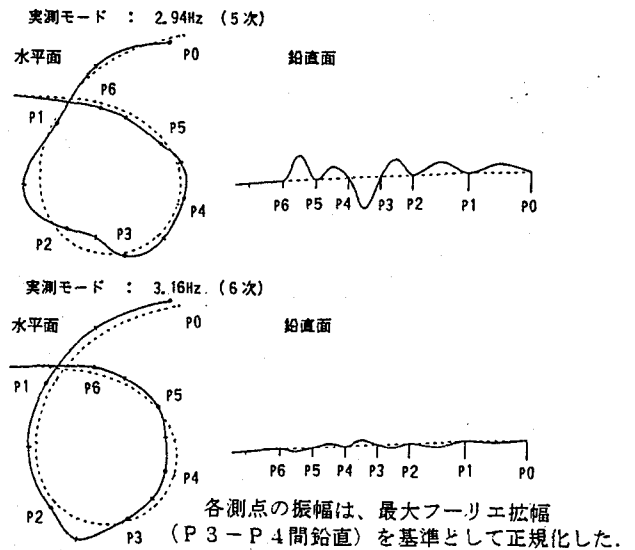


図-6 実測モード

波形を図-7に示した。P0測点において衝撃的な波形が見られる時刻に一般大型車が本線を走行し、家屋1階測点で衝撃的な波形が見られる時刻に試験車が一般国道を通過していた。

この図-7より、家1階測点では一般国道通過時の衝撃が現われており、特に鉛直(z)成分が大きく伝わっていることが解る。しかし、家2階測点では、橋軸(x)および橋軸直角(y)の水平面内成分が大きく増幅されている。このことはx,y成分の振幅が大きくなっている部分の時刻を考慮すると、本線を通行した3台の一般車両の影響であると考えられる。したがって、測定対象家屋の場合、2階においては本線および出路の振動の方が影響が大きいと考えられる。

そこで、家屋2階における人体に感じる振動の性状(振動数成分)として、加速度データに体感補正^{4),5)}を施した後、周波数分析を行った結果を図-8に示した。同図より体感上影響が大きい振動数成分は、2.84Hz、3.16Hz、5.0Hz、5.5Hzであることが解る。

これらの振動数の成分について、下記の発生要因が推察される。

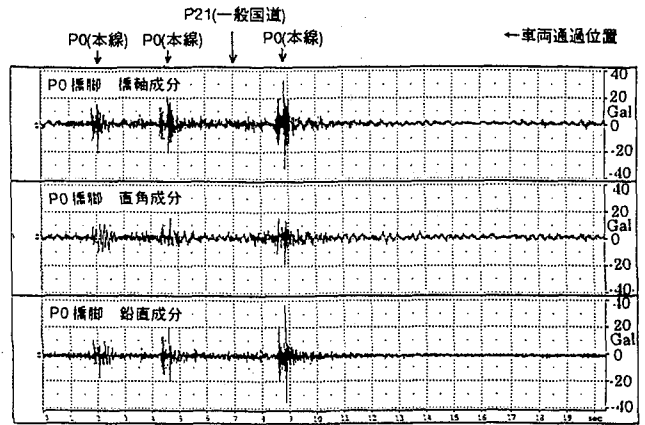
- ・2.84Hz - 主にP0およびその地盤面で見られること、出路橋での卓越振動数および実測モードが見られないことなどからP0橋脚の横(本線直角)方向の倒れモードが主な原因であると思われた。
- ・3.16Hz - 出路のほとんど全ての測点で水平成分が方向を問わず生じており、鉛直成分がほとんど見られない。このことから、対象家屋の水平振動のうち3.16Hzの成分は出路橋の振動特性に起因していると言える。
- ・5.00、5.50Hz - 家屋測点以外の測点では大きなピークが見られなかった。この5Hz付近の振動数は、家屋の固有振動数であり特に1階から2階に伝わる過程において増幅されたものと推測される。

4. 固有振動数解析結果

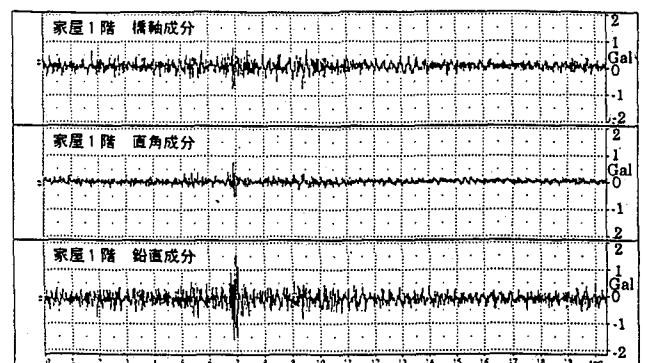
実測で得た卓越振動数及びその挙動を確認し、それぞれの卓越振動成分においてもっとも影響力が大きい箇所を推定した。併せて、制振を行うとした場合の制振手法と、その効果を検討する上で不可欠な解析モデルの作成を目的として固有値解析を行った。

4. 1 解析モデル

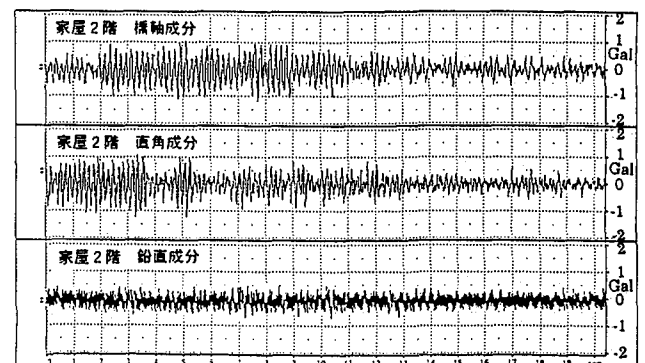
固有値解析を行なうためにモデル化した範囲は、出路の桁(上部工)およびフーチングを含む橋脚(下部工)とし、竣工図書⁶⁾を参考にして座標や断面定数を算出した。各部材は梁要素で表現し、立体骨組構造として解析を



本線—出路分岐部P0橋脚天端測点



隣接家屋1階測点



隣接家屋2階測点

図-7 加速度波形

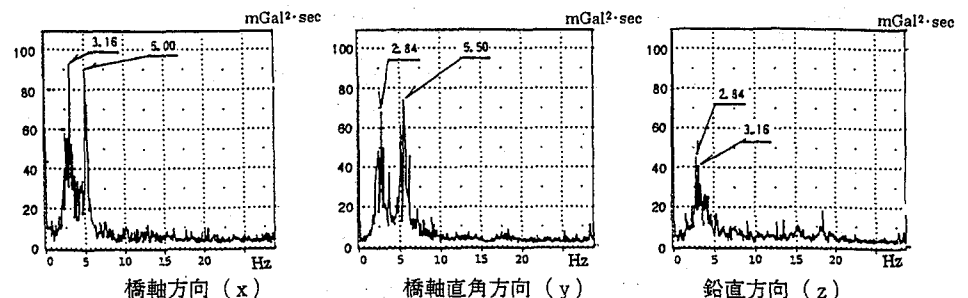


図-8 体感補正後スペクトル(家屋2階)

行った。また、材料定数は鋼材がヤング係数206GPa ($2.1 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)、単位体積重量7.85t/m³、ポアソン比 $\nu=0.3$ とし、コンクリートはヤング係数26GPa ($2.65 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)、単位体積重量2.30t/m³、ポアソン比 $\nu=0.15$ とした。計算は、サブスペース法に基づいた固有値計算プログラム (FORTRAN77 言語) を用いた。

4. 2 解析結果

各測点間の位相および振幅を考慮して解析モードと実測モードを比較した結果を表-4に示す。また実測モードで水平および鉛直成分への影響が大きいと考えられる実測5次 (2.94Hz) モードおよび実測6次 (3.16Hz) モードに対応する解析モードを、図-9に示した。

表-4より、各モードの固有振動数は良く一致している、また、図-9では実測結果と同様に5次モード (実測: 2.94Hz) では鉛直振動が優勢であり、6次モード (実測3.16Hz) では水平振動が優勢である。これらのことより、解析モデルは概ね妥当であると考えられる。

5. 時刻歴応答解析結果

5. 1 解析条件および解析モデル

固有値解析の結果より、数値モデルを設定した。そこで、ケーススタディとしていくつかの制振対策を想定し時刻歴応答解析を行った。載荷荷重は単独車両 (196kN) とし、出路に車両を走行させた場合の応答を計算することで各対策手法の効果を比較検討した。解析に用いた車両モデルは、前輪1軸、後輪2軸の5自由度モデル³⁾で、出路橋を15m/secの車速で走行させた。出路橋の路面凹凸は、ISO (国際標準化機構) の路面状態評価基準カテゴリー⁷⁾のAverage (普通) を用いた。

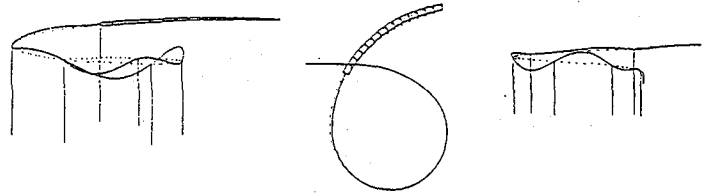
また、制振対策として、下記の4種類のモデルを仮定した (図-10)。

- ・現況モデル: 比較の基準となるもので、現況の特性を再現したモデル。
- ・支承拘束モデル: 本橋は、連続する7径間の両端が可動支承となっており、その片方を拘束したモデル。P7 (降りきったところのアバット支点) を比較的

表-4 実測結果と解析結果の比較

実測結果		解析結果	
実測1次モード	1.28Hz	解析1次モード	1.285Hz
実測2次モード	1.97Hz	解析2次モード	1.849Hz
実測3次モード	2.44Hz	解析3次モード	2.465Hz
実測4次モード	2.56Hz	解析4次モード	2.618Hz
実測5次モード	2.94Hz	解析5次モード	3.087Hz
実測6次モード	3.16Hz	解析6次モード	3.138Hz
実測7次モード	3.84Hz	解析7次モード	3.657Hz
実測8次モード	3.94Hz	解析8次モード	3.994Hz

5th frq = 3.087 (Hz)



6th frq = 3.138 (Hz)

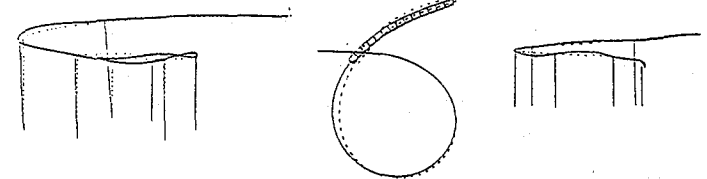
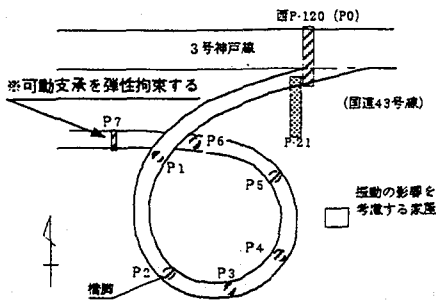


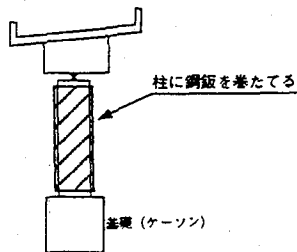
図-9 解析モード

高い剛性 (橋軸方向 $E=9.8\text{GPa}$ ($1.0 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$)) により移動量を拘束した。

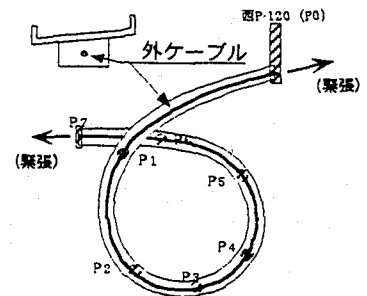
- ・鋼鉄巻たてモデル: P1からP6までの全ての橋脚柱に、耐震補強基準に準じた鋼鉄巻立て補強を施したモデル。 (鋼鉄厚 $t=6\text{mm}$ 、既設橋脚柱とは一体化するものと仮定)
- ・外ケーブルモデル: ボックス桁の中にPC鋼線を通し外ケーブルとして緊張させたモデル。緊張力の桁曲線率中心方向成分の分力により、出路橋全体を絞り込むように拘束する作用と、緊張力の分力としての軸力の増加による桁の剛性向上を狙ったモデル



支承拘束モデル



鋼鉄巻きたてモデル



外ケーブルモデル

図-10 解析モデルの概要

ル。(P C鋼材：直径30mm, $E=186\text{GPa}$ ($1.9 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$), 張力 $P=19.6\text{kN}$ (2.0tf))

5. 2 応答解析結果

上記4種類のモデルについて応答計算を行った。その結果のうち、比較的制振効果が認められた水平成分について以下に述べる。応答解析結果として、G1測点の水平成分に関する加速度波形および環境振動評価で用いられる体感補正^{4), 5)}を施した水平成分振動レベル波形を図-11に示した。この図の5秒から9秒の間付近が、測点のある着目径間(G1径間)を車両が通過している。

図-11より、外ケーブルモデルの加速度波形において特にP0~P1間で高い振動数成分が顕著に見られていることから、水平方向の剛性が向上していることが伺える。

次に、各モデルの固有振動数の変化を表-5にまとめた。この表より対策を施したモデルは、全て各次の固有振動数が高くなっている。特に、外ケーブルモデルでは、5~34%も高くなっており、感覚補正を考慮した体感的な振動量の低減、および家屋の固有振動数からはずれる事による共振振動の低減が期待できるものと思われた。

また、今回のケーススタディで出路橋の固有振動数および振動モードのうち、制振対策の対象家屋に関して影響が大きいのは、現況モデルの6次モード3.138Hz(実測では3.16Hz)であった。この6次モードの振動数が各モデルとも高くなっていることから、地中の伝播における減衰や体感特性^{4), 5)}を考慮すると、各対策手法のいずれも程度は異なるが、出路橋に施す制振対策としては効果が現れているといえた。

以上、制振対策のケーススタディを検討した結果、水平成分については外ケーブルモデルが桁断面剛性の向上にやや寄与し、入力レベルの小さい範囲(車両が通過した後の自由振動など)での振動レベルが低減することがわかった。

なお、鉛直成分に関しては、外ケーブルモデルでは水平方向同様、車両による入力エネルギーの小さくなる部分で振動レベルが小さくなったが、支承拘束と鋼鉄巻たてモデルについては、現況モデルとほとんど同じ加速度波形および振動レベル波形であり、この2つの対策は鉛直成分に対して効果がないことが解っている^{2), 8)}。

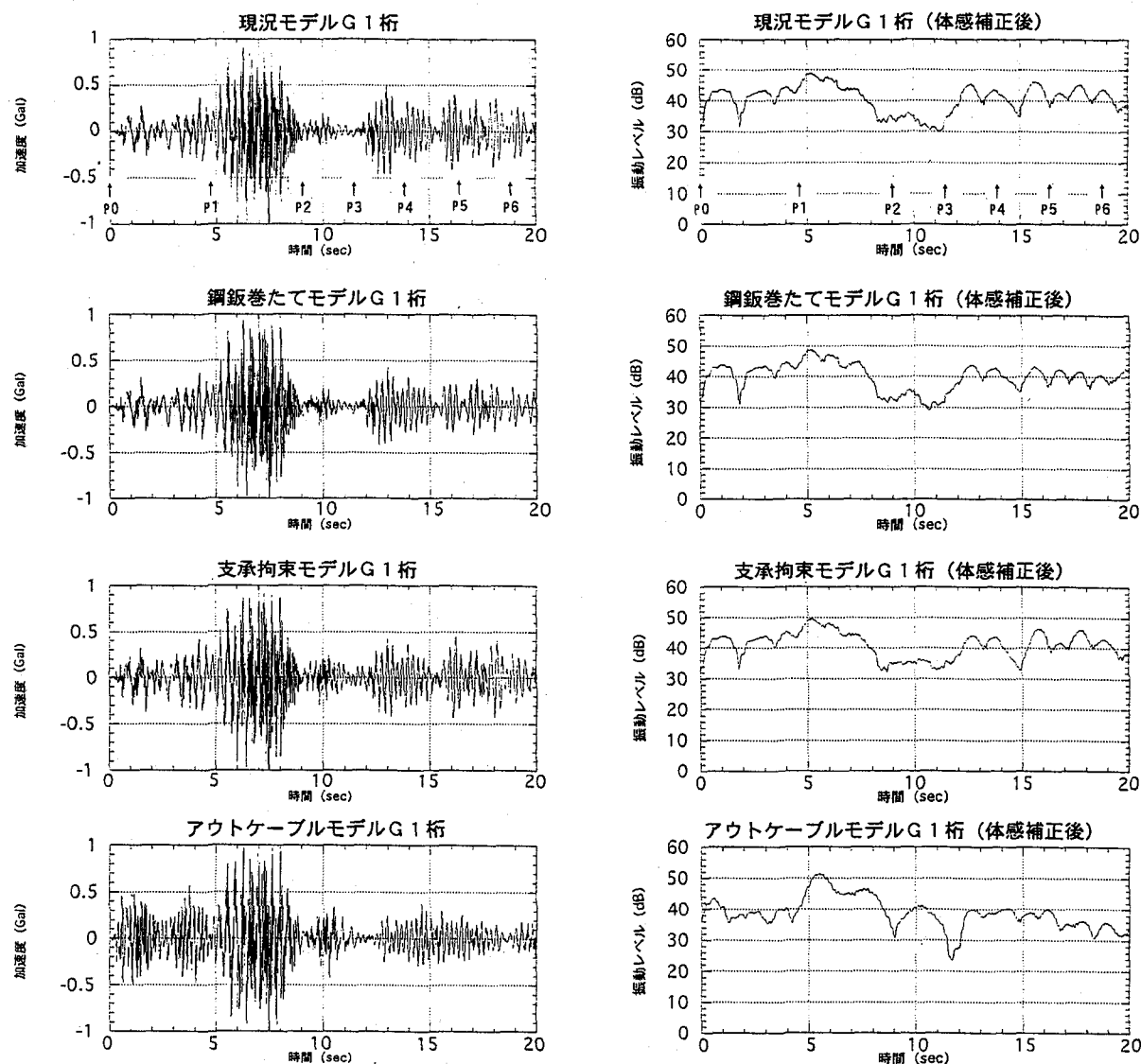


図-11 解析による加速度波形および振動加速度レベル波形(水平成分)

6. まとめ

高架道路の交通振動が問題となっている昨今の状況の中で、構造的に珍しい7径間連続箱桁で平面線形が閉じる1重ループ橋の高速道路出路橋において振動調査を実施し、分析・検討した。

本論文では、高架橋出路上下部工の動的挙動特性の把握のみならず、近傍地盤面および隣接家屋への影響も検討した。その結果を以下にまとめた。

6. 1 振動特性について

・本線走行時の桁の自由振動でたわみ量に匹敵する橋軸直角(y)方向の変位が生じている事から出路橋は橋脚の倒れ変形を伴って桁全体が水平に振動していると考えられた。

・実測卓越振動モードのうち特徴的なものは、周辺地盤の鉛直振動に大きく寄与して

いると考えられた2.94Hz(5次)、および周辺地盤に対する水平方向の加振力に大きく寄与していると考えられた3.16Hz(6次)が挙げられる。

・測定対象家屋の振動は、一般国道よりも本線の影響が大きい。

・家屋2階で観測されている増幅されやすい振動数成分のうち、体感ゆれに対して影響度合の大きいものは2.84Hz、3.16Hz、5.00Hz・5.50Hzであることが解った。これらの振動数成分の発生源として、以下の事が考えられた。

[2.84Hz]・・・出路橋本体では生じていないことから、P0橋脚自身の固有振動か本線上下線の桁の固有振動等が考えられた。

[3.16Hz]・・・水平方向成分が卓越した振動モードであり、家屋で増幅されるため、出路橋の固有振動成分の中でもっとも家屋に対する影響が大きいと考えられた。

[5.00Hz・5.50Hz]・・・ほとんどの測点で観測されていない振動数成分であるため、家屋固有の共振振動数であると推測された。

6. 2 制振対策について

実測および固有値解析の結果から、家屋2階で感じる振動の低減処置を想定したケーススタディとして、以下の3種の対策モデルについて応答計算を行った。

- P7(A1: 出口側端部)の支承を弾性拘束したモデル
- 橋脚柱に鋼板を巻たて、剛性を向上させたモデル
- 桁内に外ケーブルを配置し軸力を加えたモデル

この結果、水平成分振動レベルに関しては今回の各モデルで想定した条件では、入力レベルが小さな範囲で低減効果を示し、出路橋に起因する振動成分の制振対策としての可能性を示唆できたと考える。

7. あとがき

本調査およびケーススタディは、調査結果から振動発生要因を解明し、モデルによる数値解析から制振対策につい

表-5 固有振動数比較一覧

卓越成分	1次 (鉛直)	2次 (鉛直)	3次 (鉛直)	4次 (水平)	5次 (鉛直)	6次 (水平)	7次 (水平)	8次 (水平)	9次 (鉛直)	10次 (水平)
現況モデル	1.285 (-)	1.849 (-)	2.465 (-)	2.618 (-)	3.087 (-)	3.138 (-)	3.657 (-)	3.994 (-)	4.055 (-)	4.100 (-)
支承拘束モデル	1.285 (0%)	1.850 (0%)	2.618 (6%)	2.970 (13%)	3.134 (2%)	3.625 (16%)	3.669 (0%)	4.053 (1%)	4.496 (11%)	4.691 (14%)
鋼板巻立モデル	1.285 (0%)	1.849 (0%)	2.465 (0%)	2.629 (0%)	3.091 (0%)	3.208 (2%)	3.750 (3%)	4.047 (1%)	4.124 (2%)	4.217 (3%)
7カケ-フルモデル	1.344 (5%)	2.367 (28%)	2.769 (12%)	3.478 (33%)	3.663 (19%)	4.209 (34%)	4.361 (19%)	4.650 (16%)	4.816 (19%)	5.338 (30%)

(%)は、現況モデルに対する増加率を示す。

て検討した。その結果、環境基準⁴⁾ですでに定められている鉛直振動に加え、水平振動に関しての知見を得た。

また、今後の課題として、免震支承を採用した場合の振動特性の変化、より効果的な構造的制振対策の検討などが挙げられる。さらに、本調査は震災前に実施したものであるため、被災後のデータを収集し被災前後の振動特性を比較検討することが、地盤をも含めた道路構造物の振動挙動特性を解明するための一助となるものと考ええる。

最後に、今回の調査データが複雑な高架道路の交通振動の解明に役立つことを願うとともに、御協力いただいた関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 渡辺高行，島田静雄，加藤雅史，滝沢文雄，藤沢伸光，津村直宣：七滝高架橋の常時微動測定，第14回日本道路会議一般論文集，1981.10
- 早川清，白尾兼二，馬場茂，川上順子，西星匡博：7径間連続曲線箱桁橋振動特性調査，橋梁交通振動に関するコロキウム論文集，1995.11
- 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析，技報堂，1993.10
- 環境庁大気保全局特殊公害課：振動規制技術マニュアル，ぎょうせい，1977
- 公害防止の技術と法規編集委員会編：公害防止の技術と法規，通商産業省立地公害課，1992
- 兵庫県道高速大阪西宮線 武庫川出路鋼桁工事 最終設計図，平成5年，阪神高速道路公団
- ISO：Proposals for generalized road inputs to vehicles，ISO/TC 108/WG9 Document No.5, pp.1~9, August, 1973
- 平成6年度 湾岸線6期環境調査業務(その3)報告書，平成7年3月，阪神高速道路公団

(1996年9月6日受付)