

(14) 外ケーブルの振動実験について

住友建設(株) 土木部 正会員 本田 英尚  
 首都高速道路公団 植野 晃  
 住友建設(株) 土木部 正会員 近藤 真一  
 住友建設(株) 技術研究所 正会員 藤田 学

1. はじめに

PC橋において、外ケーブルによりプレストレスを導入する方法は、補修・補強のみならず、1986年には本設ケーブルとして使用された事例も報告されており<sup>1)</sup>、今後PC橋のプレキャスト化の進展と連動する形で、この構造を有する橋が増加するものと考えられる。一方、外ケーブル構造に関する問題の一つに、ケーブルの振動がある。すなわち、ケーブルの固有振動数が通行車両の衝撃に起因する主桁の曲げ振動数と一致し、共振する可能性が想定され<sup>2)</sup>、この振動によりケーブル定着具などの近傍に曲げ応力が生じ、ケーブルの疲労につながると考えられることである。しかし、この点に関する設計資料としては、AASHTO<sup>3)</sup>の外ケーブルに関する規定に、特別な振動解析を行わない場合は、外ケーブルの固定間距離は25feet(7.6m)以下とすると記されているものの、そのほかの具体的なデータはほとんど見当たらない。そこで、外ケーブルの振動に関する基礎資料を得ることを目的として、首都高速道路渋谷高架橋で振動実験を行った。ここでは、この振動実験の結果および解析について概要を報告する。

2. 渋谷高架橋および外ケーブルの概要

外ケーブルの振動実験を実施した渋谷高架橋は、首都高速3号線のJR渋谷駅南口付近に位置する3径間連続PC有ヒンジラーメン橋で、昭和39年に竣工した。図-1に一般図を示す。中央ヒンジは、ローラー査および鉛直PC鋼棒が組合された構造で、せん断力のみを伝達するものであるが、竣工後25年を経て交通量の増加などに起因して損傷が生じたため、補修工事が行われた。補修方法は、中央ヒンジ部にBP杵を新設し、これにともなう荷重増に対処するために、外ケーブルを配置しプレストレスを導入するものであった。

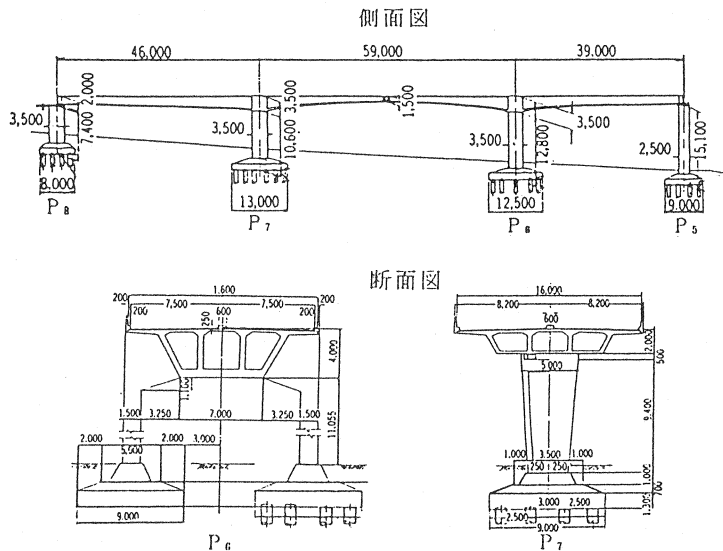


図-1 一般図

外ケーブルはSBEケーブルF70Tを用い、中央径間の主桁断面に16本直線状に配置されている。図-2に外ケーブル配置を示す。設計張力は1本当たり38tfである。

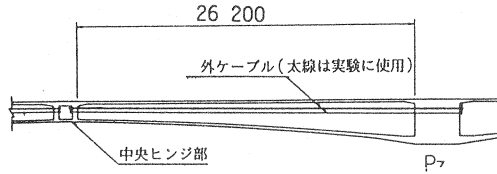


図-2 外ケーブル配置図

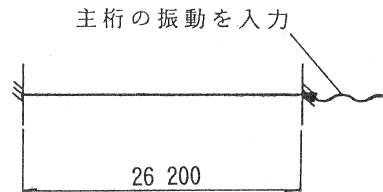
表-1 主桁と外ケーブルの固有振動数が一致するケーブル張力 (tf)

主桁	振動モード	1	2	3	4	5	6
	固有周期(SEC)		0.444	0.392	0.259	0.208	0.135
	振動数 (Hz)	2.358	2.551	3.861	4.808	7.407	9.259
ケーブル	1次	5.181	6.647	15.227	23.609	56.045	87.571
	2次	1.295	1.662	3.807	5.902	14.001	21.893
	3次	0.576	0.739	1.692	2.623	6.227	9.730

### 3. 予備解析

振動実験を実施するに際して、主桁と外ケーブルの固有振動数が一致した場合にケーブルが共振すると想定し、共振時のケーブル張力を求めるために、予備解析を行った。表-1に解析結果を示す。これより、主桁の1次固有振動数にケーブルの1次固有振動数が一致するのは、ケーブル張力が5.181tfの場合、同様に主桁の4次振動にケーブルの1次振動が一致するのは、23.609tfの場合であり、これらの時に共振が想定された。しかし実験において、ケーブル張力を正確に計算値に設定することが、ジャッキ・ポンプ操作の限界により困難と考えられたため、これに対する検討を行った。

方法は、図-3に示すようにケーブルをモデル化し、ケーブル張力 5tfを中心としたある範囲のなかで、入力波の振動数(ケーブル張力)を変化させて時刻歴応答解析を実施し、ケーブルの応答変位および加速度を求めるものである。解析におけるケーブルの対数減衰率は、筆者が実施した同種のケーブルにおける強制振動実験<sup>1)</sup>のデータから、1%とした。また、入力波はサイン波とし継続時間は7.5秒とした。解析結果を図-4に示す。これは、振動実験を行うケーブルの想定共振曲線であり、実験の際におけるケーブルの応答加速度の目安とした。



$$A = 3.939 \text{ cm}^2$$

$$W = 3.65 \text{ kg/m}$$

図-3 外ケーブルの解析モデル

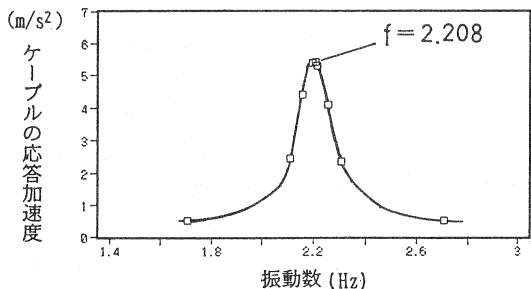


図-4 解析によるケーブル共振曲線

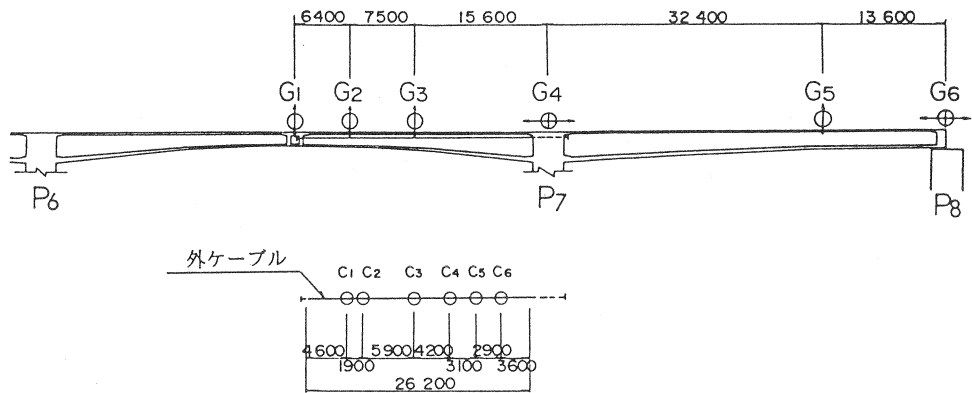


図-5 主桁および外ケーブルの測定位置

#### 4. 実験方法

振動実験は、中央径間 ( $P_6 \sim P_7$ ) の  $P_7$  側の外ケーブルで行った。

実験項目は、主としてケーブルの強制振動実験および主桁の振動によるケーブルの応答振動測定である。両者とも、ケーブルの振動モードを考慮して、ケーブルの中央部に1か所支持金具を設置したケースも実施した。

主桁には、側径間から中央径間のヒンジ部にわたり6箇所の測点を設けた。これらの測点にはサーボ型加速度計を配置した。 $P_7$ 柱頭部および $P_8$ 端支点上は水平振動、他の測点では鉛直振動を測定した。

外ケーブルの振動については、ひずみ型加速度計を取付け鉛直振動を測定した。主桁および外ケーブルの測定位置を図-5に示す。また、写真-1に測定状況を示す。

また、外ケーブルの振幅については、ケーブルの応答加速度から算出するとともに、振幅が最大となる $C_3$ 点においてレーザー変位計を用い、非接触で変位を測定した。ただし、この場合のケーブル変位は主桁下床版との相対変位である。

一方、中央ヒンジ部付近の中央分離帯に設けられたマンホールにビデオカメラを設置し、車両の通行状況をモニターするとともに記録した。

実験ケースは、表-2に示す22ケースとした。

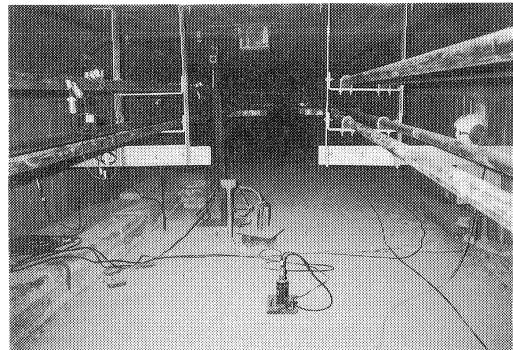


写真-1 測定状況

表-2 実験ケース

実験項目	ケース名	ケーブル張力 (tf)	ケーブル支持金具の有無
強制振動	VI 5TA	5	ナシ
"	VI 7TA	7	ナシ
"	VI10TA	10	ナシ
"	VI15TA	15	ナシ
"	VI22TA	22	ナシ
"	VI24TA	24	ナシ
"	VI15TB	15	アリ
"	VI22TB	22	アリ
"	VI24TB	24	アリ
"	VI26TB	26	アリ
"	VI30TB	30	アリ
応答振動	TR 5TA	5	ナシ
"	TR 7TA	7	ナシ
"	TR10TA	10	ナシ
"	TR15TA	15	ナシ
"	TR22TA	22	ナシ
"	TR24TA	24	ナシ
応答振動	TR15TB	15	アリ
"	TR22TB	22	アリ
"	TR24TB	24	アリ
"	TR26TB	26	アリ
"	TR30TB	30	アリ

5. 実験結果

(1)ケーブルの強制振動実験

人力により外ケーブルを振動させて得られたケーブルの卓越振動数から、各測定ケースのケーブル張力を求めた。測定結果を表-3に示すが、ケーブル張力はジャッキ後方に取付けたロードセルで読み取った導入緊張力とほぼ一致していた。

また、ケーブルの対数減衰率については、完全に主桁の振動をおさえることが困難であったため、求めることができなかった。

(2)主桁の応答振動特性

図-6に、主桁およびケーブルの振動波形を示す。中央ヒンジ部付近のビデオカメラによる交通状況のモニターで、大型車両が中央ヒンジ部を通過した時に、主桁が大きく揺れ始めることが確認できたが、通行車両の重量および通過速度がランダムであるため、主桁の応答波形も不規則なものとなっている。

車両通行時における主桁およびケーブルの加速度応答値について、パワースペクトルを作成し卓越振動数を求めた。図-7にパワースペクトルを示す。

表-4に卓越振動数の一覧を示す。主桁の振動特性については、明確な固有振動モードは得られなかったが、解析値との比較に示すようにおおむね1次モードと考えられる振動数が卓越していた。

(3)外ケーブルの応答振動特性

外ケーブルの卓越振動数は、表-4に示すようにケーブル張力を変化させて測定したがどのケースも、主桁の卓越振動数とは関係のない、ケーブル自身の1次モードが卓越していた。

表-5は、主桁および外ケーブルの卓越振動モードの次数を、振動開始時点から3秒間隔の時刻歴として示した表である。これによると、主桁の卓越振動は1次モードと他のモードがほぼ交互に入れ替わっているのに対し、ケーブル振動は0~21秒で主桁の卓越モードとは無関係に1次モードが卓越している。

したがって、外ケーブルの固有振動数が主桁の固有振動数と一致した場合に、ケーブルが共振する可能性についての一つの判断材料となる、外ケーブルに主桁から同一モードの振動が入力される継続時間については、6秒程度であると推定される。

なお、この時の外ケーブルの最大応答加速度は4.50m/sec<sup>2</sup>であった。

表-3 強制振動実験によるケーブル張力

測定ケース	固定間距離 (m)	振動数 (Hz)	張力 (tf)	導入緊張力 (tf)
TR 5TA	26.2	2.15	4.71	5
TR15TA	26.2	3.71	14.07	15
TR24TA	26.2	4.59	21.52	24
TR15TB	12.4	7.03	11.31	15
TR24TB	12.4	10.35	24.51	24

※ 振動数については、C 2 測点の振動数を用いた。

表-4 主桁および外ケーブルの卓越振動数

ケーブル固定支間長  $l = 26.2m$  (Hz)

ケーブル張力(tf)	測定値		解析値		
	ケーブル C <sub>3</sub>	主桁 G <sub>1</sub>		ケーブル	主桁
5	2.15	2.25	1次 2次	2.21 2.42	2.25 2.55
15	3.71	2.25	1次 2次	3.83 7.66	2.25 2.55
24	4.09	2.25	1次 2次	4.85 9.69	2.25 2.55

表-5 主桁および外ケーブルの卓越振動モード

時刻 (sec)	0~3	3~6	6~9	9~12	12~15	15~18	18~21	21~24	24~27	27~30	30~33	33~36	36~39	39~42	42~45
主桁の卓越振動次数	1	1	5	1	9	1	1	8	1	1	2	2	1	5	1
ケーブルの卓越振動次数	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5	1	1	3	1	2

※ 数字が2段の箇所は、卓越したモードが2種類の場合を示す。

6. 考 察

外ケーブルの振動を把握するうえで、主桁からケーブルに入力される振動の継続時間の推定が重要な要素であると考えられたため、図-3に示すモデルで実験と同一の条件を設定し、ケーブルの時刻歴応答解析を実施した。

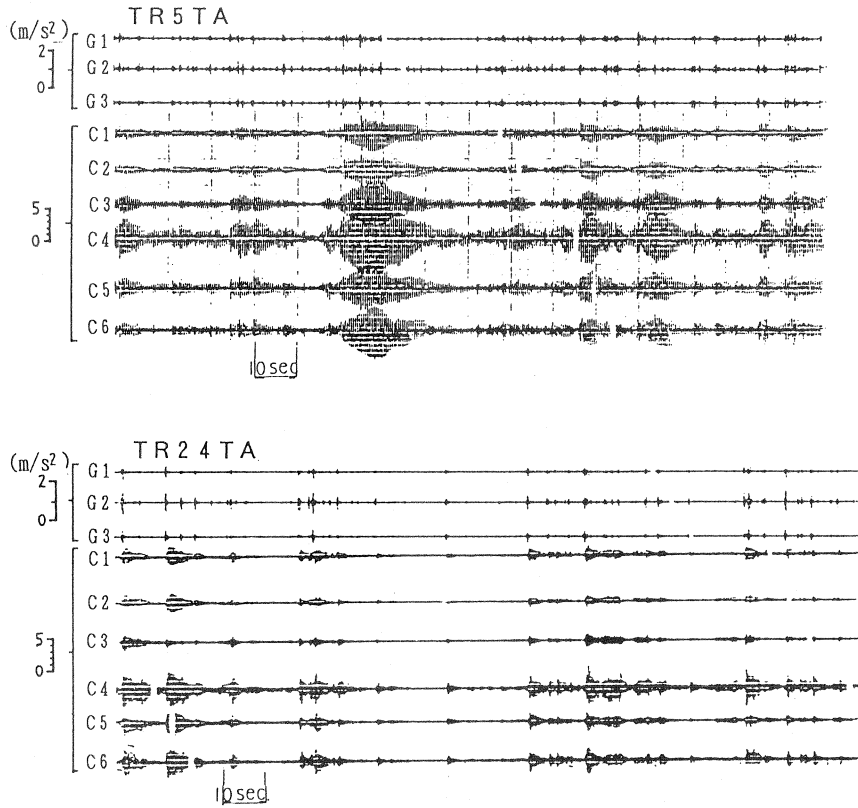


図-6 主桁およびケーブル波形

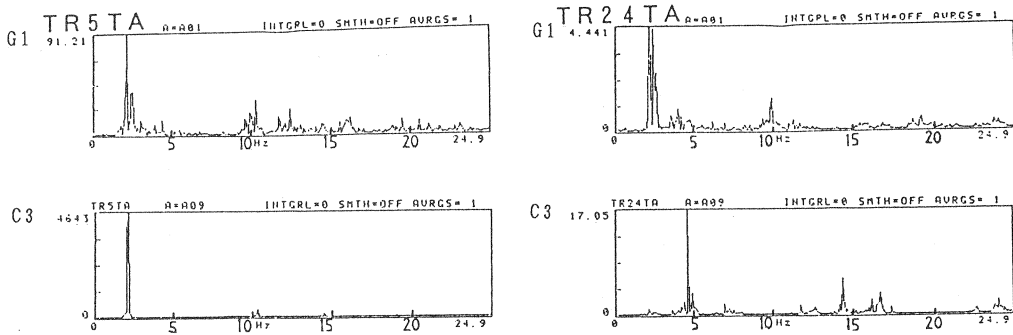


図-7 主桁およびケーブルのパワースペクトル

入力波の振動数は、実験における卓越振動数である2.25Hz、加速度は実験値の平均値である0.19m/sec<sup>2</sup>とした。

図-8に、入力波継続時間をパラメーターとして解析した外ケーブル応答加速度最大値の包絡線を示す。これによると、実験で得られたケーブルの加速度4.50m/sec<sup>2</sup>となる継続時間は6.6秒となっており、実験結果とおおむね一致した。

したがって、通行車両に起因する主桁の振動による外ケーブルの共振現象については、主桁の特定の振動数がケーブルの固有振動数と一致して生じたとしても、主桁の特定のモードの振動は、車両のランダムな通行の影響により数秒程度と推定されることから、外ケーブルの応答には比較的低いレベルの限界があると言える。

また、本橋の外ケーブルにおける導入張力は38tfであり、ケーブルの固有振動数は22.8Hzである。したがって、主桁の振動がかなり高いモードで卓越しない限り共振はしない。さらに、本橋では写真-2に示すようなケーブル支持金具でケーブルを最大7mで支持固定しており、外ケーブルの振動は目視ではほとんどわからない程度であった。

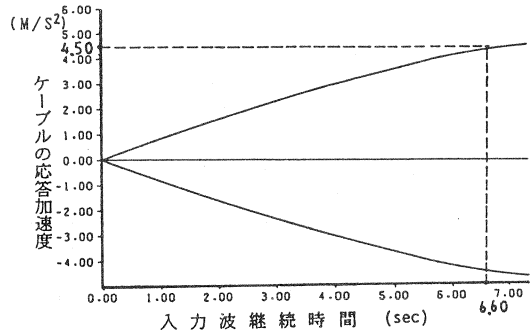


図-8 解析による外ケーブル応答加速度

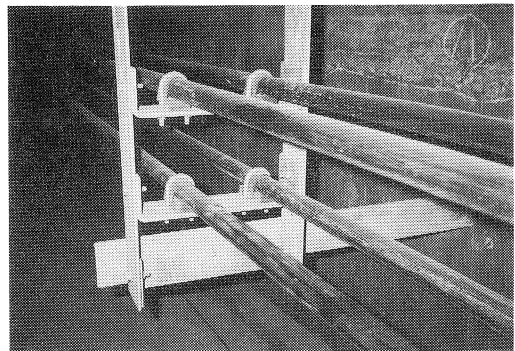


写真-2 外ケーブルの支持金具

## 7. おわりに

今回の振動実験は、主桁の振動と外ケーブルの振動の関係を把握することを主眼に行ったが、実験対象が支間の中央にヒンジを有する構造であり、主桁の振動がこのヒンジ部を車両が通過する際の衝撃に大きく影響を受けており、外ケーブルの振動に関してある限定したデータしか集めることができなかった。しかし、今回の実験を通して、主桁および外ケーブルの構造が設定されれば、主桁の振動特性から外ケーブルの振動特性をある程度推定できる基礎データが、不十分ではあるが得られたものと考えられる。今後は、さまざまな事例のデータを集めることにより、統計学的な見地での考察が必要になるとと思われる。

本実験のデータが、外ケーブル構造の合理的設計法確立のための一助となれば幸いである。

最後に、本報告の取りまとめに当たり終始ご指導を頂いた関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 平野・加藤・小高・木村：東北新幹線笹目川橋梁の設計・施工，プレストレストコンクリート，Vol.28，No.3，1986年5月
- 2) たとえば，森元：外ケーブル方式によるPC建造物の変遷，プレストレストコンクリート，Vol.32，No.5，1990年9月
- 3) American Association of State Highway and Transportation Officials：Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges，1989
- 4) 藤田・近藤：並列配置された斜張ケーブルの風による一振動事例，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，1990年10月