

## 報告 既設 PC 桁の構造劣化診断に関する検討

恒国 光義<sup>\*1</sup>・加藤 佳孝<sup>\*2</sup>・魚本 健人<sup>\*3</sup>

**要旨**：目視点検において、主桁の支間中央付近に橋軸直角方向のひび割れが確認されたプレストレストコンクリート道路橋を対象として、自動車荷重に対する挙動の計測を行い、構造性能に関する劣化診断を行った。主桁のひずみ、ひび割れ開口振幅の計測から残留プレストレストの推定を行うことで安全性能に関する診断を行い、また、たわみと振動の計測から剛性の低下を評価することで使用性能に関する診断を行った。

**キーワード**：PC 橋, 構造性能, 劣化診断, プレストレスト, 剛性

### 1. はじめに

橋長 15m以上のコンクリート道路橋について見ると<sup>1)</sup>、2025 年頃には、道路橋の耐用年数として一般に言われている 50 年を超えるコンクリート橋が、現在の数の 50%を占めることになると考えられる。近年の車両の大型化・重量化などの要因により、今後、老朽化する橋が増加してゆくことになる。したがって、既存のコンクリート道路橋をいかに適切に管理し、長期にわたって有効に活用していくかが重要な課題となっている<sup>1)</sup>。

現在のコンクリート道路橋の維持管理では、定期点検と中心として行われており、補修等の必要性を判定する場合に詳細点検が実施される。定期的な点検方法として一般的に行われているのは、点検員によるコンクリート表面の変状を外観する目視検査である<sup>2)</sup>。しかしながら、今後は、予定供用期間内での要求性能を許容範囲に保持できるよう維持管理することが基本になる<sup>3)</sup>ものと考えられ、要求性能を定量的に評価できる点検方法や診断方法を確立する必要がある。

本報告では、架設から 39 年経過したプレストレストコンクリート道路橋を対象として、ひずみや振動といった計測から、使用性や安全性と

いった構造性能の定量的な診断を行ったものである。対象橋では、定期点検で主桁の支間中央付近に橋軸直角方向のひび割れが確認されており、性能の低下が懸念された。そこで、自動車荷重に対する上述の計測を行い、構造性能に関する劣化診断を行った。

### 2. 対象橋

#### 2.1 対象橋の概要

対象とした道路橋は支間長 20m のポストテンション単純 T 桁橋であり、架設から 39 年が経過している。その外観を写真-1 に示し、上部構造と主桁の諸元を、それぞれ図-1 と図-2 に示す。対象橋は 50 径間からなり、片側 2 車線の合計 4 車線となっている。24 時間の交通量は 22,000 台で、そのうち大型車が 6.5%を占めている<sup>3)</sup>。



写真-1 対象橋の外観

\*1 東電設計 (株) 技術開発本部 構造・耐震技術部 工修 (正会員)

\*2 東京大学 生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター 講師 博 (工) (正会員)

\*3 東京大学 生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター 教授 工博 (正会員)

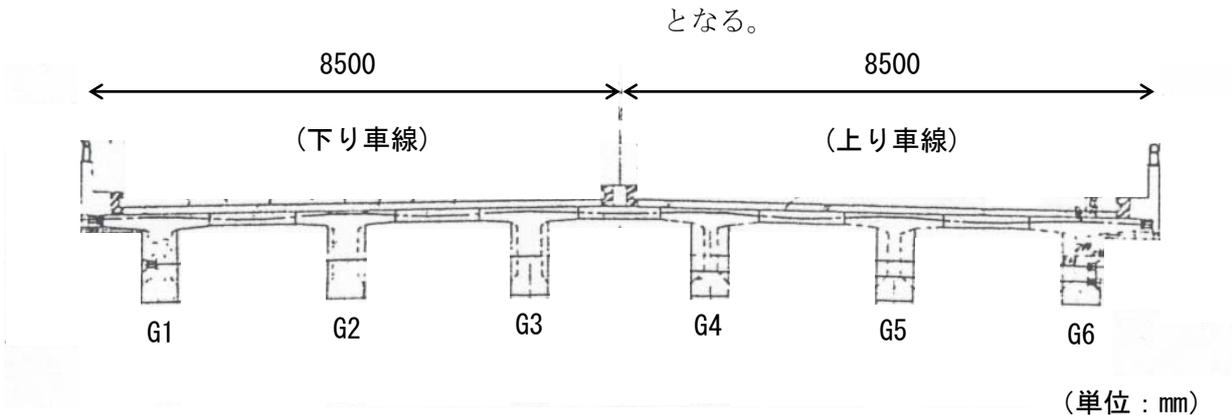


図-1 上部構造の形状

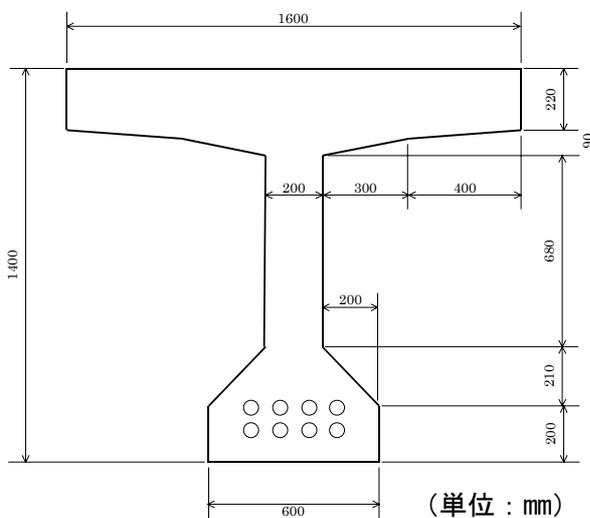


図-2 主桁（支間中央）の諸元

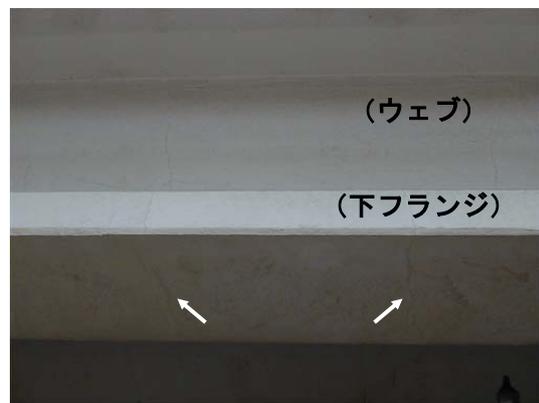


写真-2 主桁の支間中央付近のひび割れ

G1～G6の6本の主桁（図-1参照）のうち、G1あるいはG6の主桁の支間中央付近において、写真-2に示すような橋軸直角方向のひび割れが生じている径間が存在し、そのひび割れの高さはウェブの中央付近にまで達していた。

## 2.2 プレストレス力の計算

対象橋では、竣工図以外の設計図書は現存していなかったことから、表-1、2に示す条件で、設計当時の基準<sup>4)</sup>に基づいてプレストレス力の計算を行った。その結果、支間中央での設計荷重作用時のPC鋼材の有効引張応力度は $785\text{N/mm}^2$ となり、PC鋼材の有効引張力は $2860\text{kN}$ となった。このとき、死荷重作用時の主桁下縁のコンクリート圧縮応力度は、 $5.1\text{N/mm}^2$

表-1 PC鋼材（12-φ7）の特性

項目	数値
引張強度	$1550\text{ N/mm}^2$
降伏応力度	$1350\text{ N/mm}^2$
弾性係数	$200\text{ kN/mm}^2$
プレストレス中緊張応力度	$1220\text{ N/mm}^2$
角度1radあたりの摩擦係数	0.34
ケーブル1mあたりの摩擦係数	0.0045
リラクゼーションによる減少率	5%

表-2 コンクリートの特性

項目	数値	
圧縮強度	プレストレス導入時	$35\text{ N/mm}^2$
	供用時	$40\text{ N/mm}^2$
弾性係数	プレストレス導入時	$32.5\text{ kN/mm}^2$
	供用時	$35.0\text{ kN/mm}^2$
クリープ係数	2	
乾燥収縮度	$20 \times 10^{-5}$	

### 2.3 実態自動車荷重を用いた照査

対象橋では、主桁の支間中央付近に橋軸直角方向のひび割れが定期点検で確認されており、その要因を探るため、上記 2.2 で計算されたプレストレス力に対し、実態自動車荷重<sup>5)</sup>による主桁下縁の応力度の照査を行った。

図-3 に示すように、架設当時のプレストレス力であっても、総重量 429kN のダンプ<sup>5)</sup>、あるいは 727kN のトレーラ<sup>5)</sup>が走行した場合、支間中央付近の主桁の下縁では、圧縮強度から推定した曲げ引張強度<sup>6)</sup>4.7N/mm<sup>2</sup>を超える引張応力度が生じ、主桁の支間中央付近には曲げひび割れが発生する結果となった。

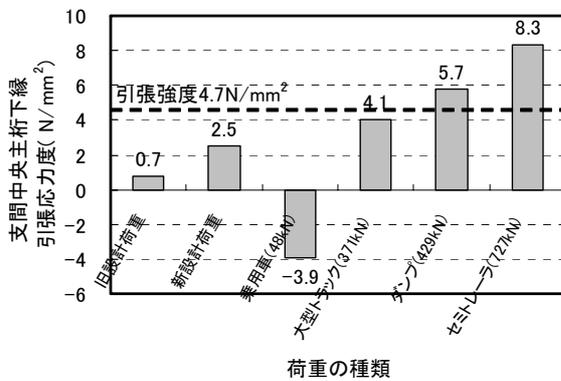


図-3 実態自動車荷重に対する主桁下縁の圧縮応力度

## 3. 計測

### 3.1 計測内容

対象橋ではプレストレス力が設計値通りであっても、総重量の大きい大型車が走行した場合には、主桁の支間中央付近には曲げひび割れが発生する可能性がある。あるいは、施工不良や PC 鋼材の損傷などの何らかの要因によってプレストレス力が低下し、自動車荷重に対して曲げひび割れが生じる、すなわち安全性能が低下していることも考えられる。また、曲げひび割れの影響によって主桁の剛性が低下し、使用性が低下していることも考えられる。

このことから、ひび割れが目視で確認されている A 径間の G1 桁、B 径間の G1、G6 桁、および比較のためひび割れが確認されていない C 径

間の G1 桁を対象として、主桁のひずみ、ひび割れ開口振幅、たわみ・振動を表-3 に示す組合せで行った。なお、径間 B の G1 桁と径間 C の G1 のたわみと振動の計測では、380kN の試験車 (ラフタークレーン) を走行させた。試験車の走行は、上り・下り方向の走行車線を、それぞれ 6 回走行させた。

表-3 計測対象主桁と計測項目

		計測対象			
		A-G1	B-G1	B-G6	C-G1
計測項目	ひずみ	○	—	—	—
	ひび割れ 開口振幅	○	—	—	—
	たわみ・振動	—	○, ●	○	○, ●

※●は試験車走行時の計測

### 3.2 計測方法

#### (1) ひずみ

A 径間の G1 桁では、写真-3 に示すように、主桁の支間中央に対してほぼ対象の位置に 2 本の軸直角方向のひび割れが確認されている。ひずみの計測は、長さ 90mm のひずみゲージを図-4 に示すように箇所を設置して行った。同図において、支間中央の主桁の下縁、下縁から 410mm、750mm に設置したゲージは、支間中央断面のひずみ分布を計測するためのものである。また、主桁下縁において支間中央を対象として 550mm に設置したゲージは橋軸方向のひずみ分布、およびひび割れ近傍のひずみを計測する目的のものである。計測は動的に行い、サンプリング周波数は 100Hz とした。

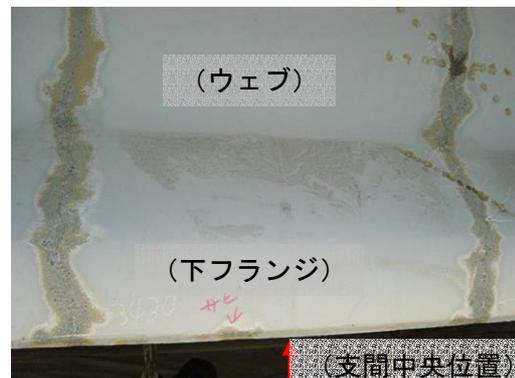


写真-3 A 径間 G1 桁のひび割れ (ひび割れ近傍の表面被覆材のはつり後)

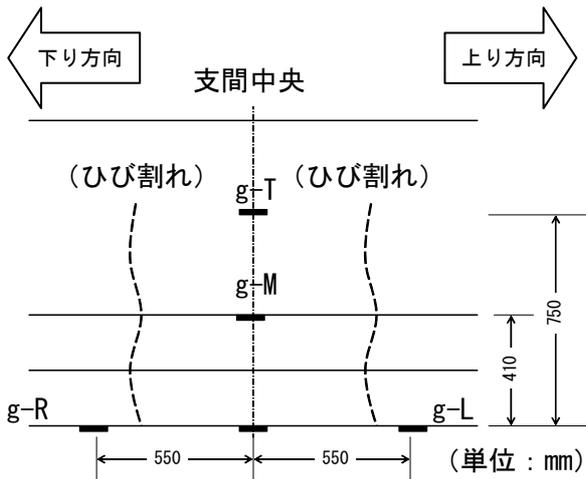


図-4 ひずみゲージの設置箇所 (A 径間 G1 桁)

(2) ひび割れ開口振幅

A 径間の G1 桁でのひび割れ開口振幅の計測は、評点距離 50mm の  $\pi$  ゲージをひび割れ箇所 (前傾図-4 参照) の主桁下縁に設置して行った。ひずみの計測と同様に、サンプリング周波数 100Hz の動的計測とした。

(3) たわみ・振動

ひび割れが目視で確認されている B 径間 G1, G6 桁, ひび割れが確認されていない C 径間の G1 桁を対象として、写真-4 に示すように、レーザ速度計を用いて各主桁の支間中央のたわみと振動の計測を行った。サンプリング周波数は 100Hz とした。レーザ速度計の計測データは速度時刻歴であるため、それを時間に関して積分することでたわみの時刻歴に変換した。また、速度時刻歴のフーリエ・スペクトルから振動特性の評価を行った。



(a) センサヘッド



(b) 設置状況

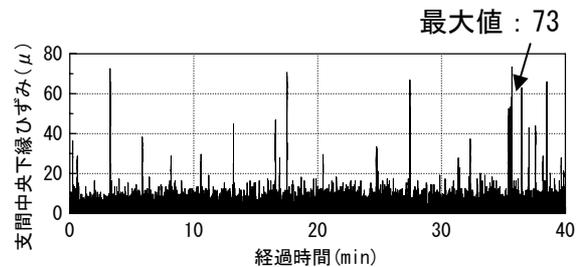
写真-4 レーザ速度計を用いた計測

3.3 計測結果

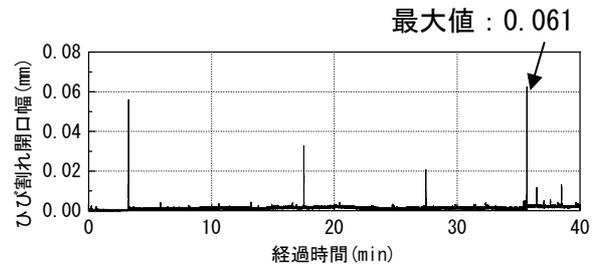
(1) ひずみとひび割れ開口幅

A 径間の支間中央主桁下縁のひずみ g-C と上り側ひび割れの開口幅の時刻歴を図-5 に示す。ひずみの最大値は  $73 \times 10^{-6}$  であり、そのときのひび割れ開口幅 0.061mm であった。

また、主桁下面に設置した 3 つのひずみの関係を図-6 に示す。支間中央のひずみと支間中央を対象として 550mm 位置のひずみはほぼ同じ値となり、計測区間 1100mm では、ほぼ一様なひずみが生じていること、およびひび割れ近傍のひずみに対するひび割れの開口の影響はない結果となった。ひび割れ開口幅についても、2 本のひび割れの開口幅はほぼ同程度であった。



(a) 主桁下縁ひずみ (支間中央)



(b) ひび割れ開口幅

図-5 ひずみとひび割れ開口幅の時刻歴

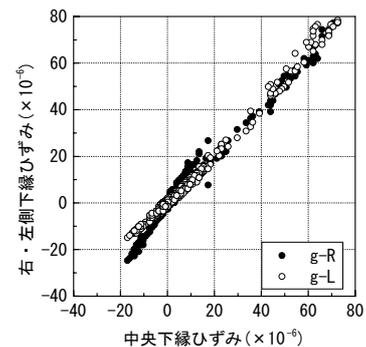


図-6 主桁下縁のひずみの比較

## (2) たわみと振動

たわみと振動の計測を行った径間 B と C の結果のうち、径間 C の G1 桁の速度時刻歴とそのフーリエ・スペクトルを、それぞれ図-7 および図-8 に示す。

フーリエ・スペクトルにおいて周波数 0~2Hz の成分が卓越しているが、これは路面凹凸による自動車の振動であると考えられることから<sup>7)</sup>、橋の固有振動数は 7.23Hz となる。また、速度時刻歴を時間に関して積分して得られるたわみの最大値は、2.01mm であった。径間 B の G1 桁についても同様の結果が得られている。

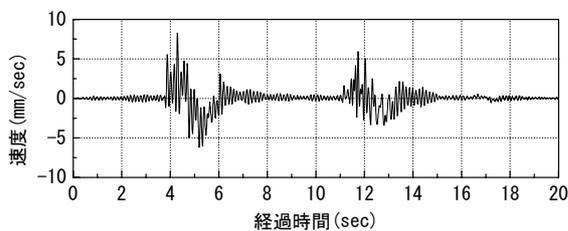


図-7 速度時刻歴 (C 径間 G1 桁)

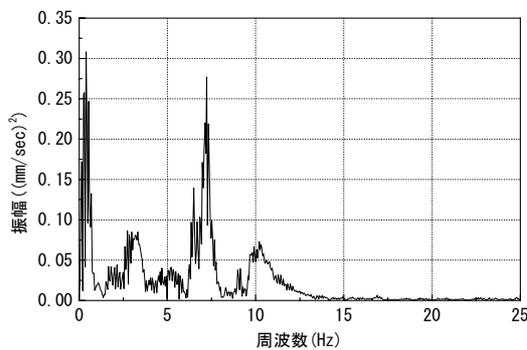


図-8 フーリエスペクトル (C 径間 G1 桁)

g-C の値をひび割れが開口し始めるときの支間中央主桁下縁のひずみと評価した。次に、このときの g-C の計測値と、支間中央に高さ方向に設置したひずみゲージ g-M, g-T (前掲図-4 参照) の計測値から評価したひずみ分布から、図-10 に示すように算出した中立軸まわりの算出したモーメント  $M_L$  をひび割れが開口し始めるときのモーメントとし、主桁と横桁の自重、地覆・高欄、舗装による曲げモーメント  $M_D (=180\text{kN}\cdot\text{m})$  を用いて、次式により PC 鋼材のプレストレス力 P の推定を行った。

$$P = \frac{M_D + M_L}{\frac{1}{A} + \frac{e}{I} y} \quad (1)$$

上式において、I, A : 全断面有効の断面二次モーメント ( $=0.208\text{m}^4$ ) と断面積 ( $=0.905\text{m}^2$ )、y : 主桁下縁からの中立軸高さ (m)、e : PC 鋼材の偏心量 ( $=y - 0.16\text{m}$ ) である。

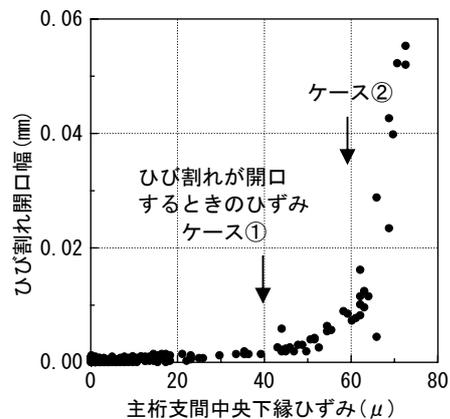


図-9 ひずみとひび割れ開口幅の関係

## 4. 構造劣化診断

### 4.1 安全性能に関する診断

#### (1) 診断方法

対象橋の主桁において点検で確認されている橋軸直角方向のひび割れは、総重量の大きい大型車、あるいはプレストレス力の低下による曲げひび割れであることが考えられる。そこで、主桁のひずみとひび割れ開口幅の計測データを用いて、残留しているプレストレス力の推定を行った。

まず、図-9 から、両者の関係が変化する点の

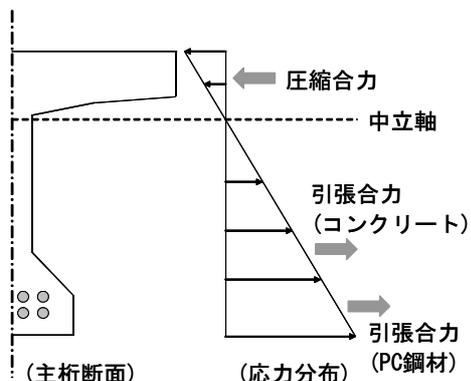


図-10 ひずみ分布の計測に基づく作用モーメントの算出

## (2) 診断結果

ひび割れが開口し始めるときの主桁下縁のひずみを図-9 から  $40 \times 10^{-6}$  (同図中ケース①) とすると、そのときの中立軸高さは  $y=1.12\text{m}$  となる。また、 $60 \times 10^{-6}$  (ケース②) とすると  $1.14\text{m}$  となる。その結果、ひび割れが開口し始めるときの曲げモーメントはそれぞれ、 $M_L=270\text{kN}\cdot\text{m}$  (ケース①)、 $410\text{kN}\cdot\text{m}$  (ケース②) となる。

式(1)より、PC 鋼材の引張力はケース①で  $P=2080\text{kN}$  となり、プレストレス力の設計値 (前述 2.2 参照) の  $2860\text{kN}$  の 73% となり、プレストレス力が低下している結果となった。また、ケース②で  $P=2260\text{kN}$  となり、プレストレスの低下は 79% であった。しかし、プレストレス力の推定に用いたひずみ、ひび割れ開口幅の計測精度、あるいはひび割れが開口し始めるときの主桁下縁のひずみの評価についてはさらに検討する必要があるものと考えられる。

## 4.2 使用性能に関する診断

### (1) 診断方法

使用性能に関する診断は、試験車 (総重量  $380\text{kN}$  のラフタークレーン) 走行時の支間中央のたわみと固有振動数の比較により行った。

### (2) 診断結果

6回の試験車走行のたわみの最大値、および固有振動数のそれぞれの平均値の比較を表-4 に示す。たわみと振動の計測結果は、横桁によって一体化された上部構造全体の応答となっている可能性もあるが、たわみの最大値、固有振動数とともに、目視で確認された表面のひび割れの状況に対応しており、ひび割れによって主桁の剛性が低下していることが考えられる。

表-4 たわみの最大値と固有振動数の比較

	最大たわみ (mm)	固有振動数 (Hz)	備考
C-G1	1.88(1.00)	7.26(1.00)	ひび割れなし
B-G1	1.92(1.02)	7.10(0.98)	ひび割れ1本
B-G6	—	6.27(0.86)	ひび割れ5本

※B-G6 の固有振動数は通常の交通状態での計測結果を示す (その他は試験車走行時の結果)。

## 5. まとめ

架設から 39 年経過した PC 道路橋において、主桁の支間中央付近に橋軸直角方向のひび割れが生じている主桁を対象として構造性能を診断するための計測を行った。その結果、以下の結果を得た。

- (1) 主桁のひずみとひび割れ開口幅の計測から、残存しているプレストレス力を推定した結果、設計値の 73%~79% となり、安全性能が低下している可能性があったが、ひずみとひび割れ開口幅の計測精度などの検討が必要と考えられる。
- (2) 主桁のたわみと振動の計測結果から、表面のひび割れ本数に応じて剛性が低下する傾向なり、今後、ひび割れ本数の増大に伴って使用性能が低下することも考えられた。

謝辞：本報告は、(財)道路保全技術センターと東京大学生産技術研究所との共同研究の成果であり、関係各位のご協力とご理解に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 橋梁マネジメント研究会編：道路橋マネジメントの手引き、(財)海洋架橋・橋梁調査会、2005。
- 2) 魚本健人：コンクリート診断学入門 構造物の劣化対策、朝倉書店、2004
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]、p.7、土木学会、2002
- 4) 土木学会：プレストレストコンクリート設計施工指針、土木学会、1961
- 5) 首都高速道路 (株)：首都高速道路起終点調査、1988
- 6) 岡村 甫、前田昭一：鉄筋コンクリート工学、p.13、市ヶ谷出版社、1989。
- 7) 土木学会：土木技術者のための振動便覧、土木学会、1987。