

伸縮装置異常検知エキスパートシステム

阪神高速技術(株) 技術部 技術開発課 塚本 成昭
阪神高速技術(株) 技術部 杉井 謙一
阪神高速技術(株) 技術部 山上 哲示

.....

要旨

伸縮装置内部の損傷の発見は、主として日常点検時に点検車輛に搭乗した熟練点検員が、伸縮装置通過時の異常音や異常振動などを感知して感覚的に一次判断し、叩き点検等で二次判断することにより行われている。本論文は、伸縮装置通過時の異常音を解析し、熟練点検員に代わる一次判断エキスパートシステムを構築することを目的とする。

本論文では、まず、すでに損傷が発見されている伸縮装置に対して、熟練点検員、車内マイク、車外マイクを搭乗・搭載したパトロール車を走行させ、熟練点検員に異常判断をさせつつ、音響データ採取した。次いで、損傷伸縮装置での音圧相当電圧のオーバーオールと健全伸縮装置でのそれとの比較評価を行った。結果、オーバーオールから異常を判断することは難しいことが判明した。続いて、伸縮装置通過時点を中心とした1秒間のデータに対し、周波数解析を行った。結果、500～800Hzの周波数帯域において損傷伸縮装置に特徴的なスペクトルが存在することがわかった。さらに、周波数解析を子細に行うことによって、210～230Hzおよび450～650Hzの二つの周波数帯域でのパワースペクトルオーバーオールを利用することで、精度向上を図れることがわかった。

キーワード:道路橋, 伸縮装置, 損傷, 騒音計, 周波数分析

はじめに

道路橋の伸縮装置は、輪荷重の影響を直接的に受けて損傷が生じやすく、定期的補修が必要となるため、維持管理上の重要部材となっている。伸縮装置の損傷は、車輛の走行性に影響をおよぼすだけでなく、破損した部材や抜け落ちたボルトが飛散する危険性がある。

伸縮装置の損傷点検は、主として車輛走行による日常点検で熟練技術者の体感により検知されている。つまり、点検車輛が伸縮装置を通過する際に熟練技術者が異常音や異常振動を感覚的に検知したとき、点検車輛を停止して目視や叩き点検により詳細確認している。しかし、熟練技術者の多くが退職期を迎えること、後継者が不足して

いることから、将来的な管理レベルの低下が危惧されている。

筆者らは、点検車輛上で収録される伸縮装置通過音に着目し、周波数解析およびカオス時系列解析をもちいて、伸縮装置の異常検出を試みてきた^{1),2),3)}。これら一連の研究では、健全伸縮装置での通過音と損傷伸縮装置での通過音との差異を、周波数帯域で評価する方法と、カオス時系列解析に基づく予測誤差により評価する方法とを検討してきた。これまでの研究成果として、周波数帯域で評価する方法がより簡便で、効率よく評価できることがわかった。

本論文では、まず、損傷の存在が確認されている伸縮装置を対象に、実験走行をおこない、同乗した熟練点検員の正解率を調査する。この実験走

行時には、点検車両上に車内マイクと車外マイクとを設置し、音響データを同時に採取する。次いで、収録音のオーバーオール音圧による異常検出が可能か否かを検討する。続いて、周波数解析による異常検出方法について検討する。周波数解析による方法としては、一つの周波数帯域を用いる方法と複数の周波数帯域を用いる方法とを検討する。

1. 実験走行と熟練点検員の異常判断精度

車両上の熟練点検員が体感により伸縮装置の異常を判断できるか否かを試す目的で、日常点検時に損傷ありと診断された伸縮装置を対象に、実験走行した。実験走行は2011年度に実施し、対象とした伸縮装置数は37基であった。また、車両に搭乗し、異常を判断する熟練点検員は特定の1名とした。

対象伸縮装置の種類および数量を表-1に示す。実験走行はそれぞれの損傷伸縮装置に対しておのおの複数回実施し、有効データが得られた対象伸縮装置通過延べ回数は207回であった。

車両上の熟練点検員の判断結果は、表-2のとおりである。ここでは熟練点検員の判断基準として、走行前に次の4段階を設定した。すなわち、◎判断容易、○判断可能、△判断困難、×判断不可である。

熟練点検員がどの程度の判断精度を有するかを検証してみる。ひとつの方法として、◎判断容易と○判断可能の総数を有効データ数で除すと、 $159/207$ (77%) である。

もうひとつの方法として、◎判断容易3点、○判断可2点、△判断困難1点、×判断不可0点として加重平均を求めた。加重平均の最高点は3点、最低点は0点である。判断の閾値として中央値をわずかに超える1.60点に設定すると、該当する伸縮装置数は $24/37$ (65%) である。

以上のことから、熟練点検員の異常判断精度は

表-1 損傷伸縮装置

損傷伸縮装置	記号	対象基数
トランスフレックスジョイント(ニッタ製)	TF	30
ラバースジョイント(中外道路製)	RT	3
簡易鋼製SPジョイント(ニッタ製)	SP	1
鋼製フィンガージョイント	FJ	3
	合計	37

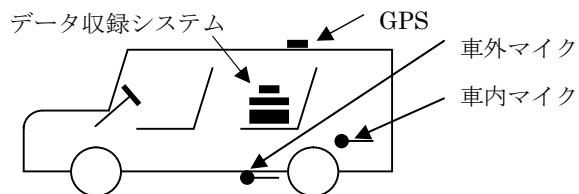


図-1 計測車両マイク設置位置

表-3 測定対象区間と損傷伸縮装置種類

損傷伸縮装置名	測定回数	伸縮装置種類	損傷形態
A	4	TF	ボルトの緩み
B	2	SP	本体内部の破断
C	2	FJ	ボルトおよびナットの緩み

おおむね6~7割程度であると考えてよさそうである。

2. 伸縮装置通過音の測定

2-1 測定方法

第1節の実験走行時に、点検車両上に車内マイクと車外マイクとを設置して、音響データを採取した。車内マイク、車外マイクの設置位置を図-1に示す。通過音の収録は、RION NL-06騒音計マイクとRION製テープレコーダを用いておこない、サンプリング周波数は51,200Hz、1区間1回の収録時間は20秒間とした。

2-2 オーバーオール音圧

伸縮装置の種類によるオーバーオール音圧の差異をみるために、日常点検で損傷ありと判断された伸縮装置A~Cを含む各区間を表-3のように設定した。便宜上、区間名と伸縮装置名とはA~Cで一一致させている。

車内収録音のオーバーオール音圧に相当する電圧ゲインを図-2~図-4に示す。図中、「←→」

表-2 熟練点検員判断結果

凡例：◎判断容易(3点)、○判断可能(2点)、△判断困難(1点)、×判断不可(0点)、—不注意通過(無視)													
損傷伸縮装置番号	伸縮装置種類	伸縮装置通過回数および熟練点検員判断結果								有効データ数	◎○数	加重平均点	1.60以上に該当
		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目				
2011-1	TF	◎	◎	◎	◎	◎				5	5	3.00	1
2011-2	TF	○	○	○	○	○				5	5	2.00	1
2011-3	TF	○	○	○	○	○	—			5	5	2.00	1
2011-4	RT	◎	◎	◎	◎	◎				5	5	3.00	1
2011-5	TF	○	○	○	○	○				5	5	2.00	1
2011-6	TF	◎	◎	◎	◎	◎	—			5	5	3.00	1
2011-7	FJ	○	○	○	○	○				5	5	2.00	1
2011-8	TF	○	◎	○	×	×				5	3	1.40	
2011-9	TF	○	○	○	×	◎	×			6	4	1.50	
2011-10	TF	◎	◎	◎	◎	◎				5	5	3.00	1
2011-11	TF	○	○	○	○	○				5	5	2.00	1
2011-12	SP	◎	◎	◎	◎	◎				5	5	3.00	1
2011-13	TF	○	○	○	○	○				5	5	2.00	1
2011-14	TF	○	◎	◎	◎	◎				5	5	2.80	1
2011-15	TF	○	×	×	○	×	×			6	2	0.67	
2011-16	TF	○	○	○	○	×	○	◎		7	6	2.57	1
2011-17	TF	○	×	○	◎	×				5	3	1.40	
2011-18	TF	×	×	×	×	×				5	0	0.00	
2011-19	TF	○	○	○	○	○	○			6	6	2.00	1
2011-20	TF	○	×	×	○	○	×			6	3	1.00	
2011-21	TF	×	○	○	×	×	○	◎		7	4	1.29	
2011-22	TF	×	○	○	○	○	○	○		6	5	1.67	1
2011-23	FJ	×	×	×	×	×	×			6	0	0.00	
2011-24	FJ	○	○	○	○	○	—			5	5	2.00	1
2011-25	TF	○	○	—	×	○	×	×		6	3	1.00	
2011-26	TF	◎	◎	—	○	○	○	○		6	6	2.33	1
2011-27	TF	○	×	×	◎	◎	◎			6	4	1.83	1
2011-28	TF	×	○	○	○	○	○			6	5	1.67	1
2011-29	TF	○	◎	◎	◎	◎	◎			6	6	2.83	1
2011-30	RT	○	○	×	×	○	○	○		7	5	1.43	
2011-31	TF	○	—	—	○	—	○	×	○	5	4	1.60	1
2011-32	TF	○	×	×	×	○	○	×		7	3	0.86	
2011-33	TF	×	○	◎	×	○	○			6	4	1.50	
2011-34	TF	○	○	○	○	×	○			6	5	1.67	1
2011-35	TF	○	○	○	○	○				5	5	2.00	1
2011-36	TF	○	○	×	×	×				5	2	0.80	
2011-37	RT	○	○	○	○	○	○			6	6	2.00	1
									合計	207	159		24
									該当率		77%		65%

で示す箇所が伸縮装置位置であり、それに A~C の記号を付記したものが損傷伸縮装置である。図より、健全伸縮装置でも大きな音圧が発生していることが確認できる。また、伸縮装置の種類によって特に音圧が異なることはなかった。ただし、区間 B では、健全伸縮装置に音圧が大きいものがあり、区間 C では、損傷伸縮装置での音圧が比較的大きくなっている。このように、車内音のオーバーオール音圧のみでは損傷と音圧との直接的関連性を論じることは難しい。

次に、車外音の電圧ゲインを図-5~図-7 に示す。車内音と比較して、路面からの音、風切り音などのノイズの影響が強いが、損傷伸縮装置を通過す

るときに音圧が大きくなっていることがわかる。また、区間 B においては、損傷の有無にかかわらず、全ての伸縮装置で音圧が大きい。このように、車外音でもオーバーオール音圧のみでは伸縮装置の損傷の有無を論じることは難しい。

3. 周波数解析

実験走行で得られた音圧相当の電圧波形の周波数特性を明らかにするために、伸縮装置通過時点を中心とした1秒間データに対して周波数解析をおこなった。ここでは、対象区間に含まれる全ての伸縮装置通過時のデータを取り出したのち、

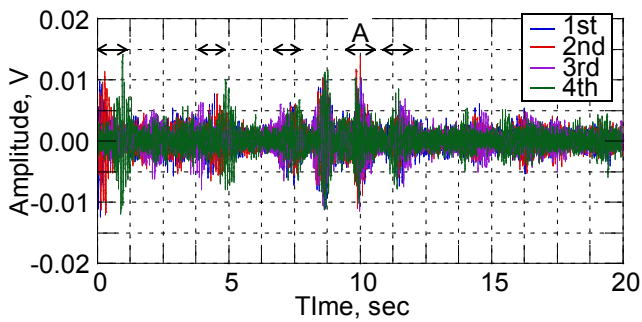


図-2 区間 A の車内音の電圧ゲイン

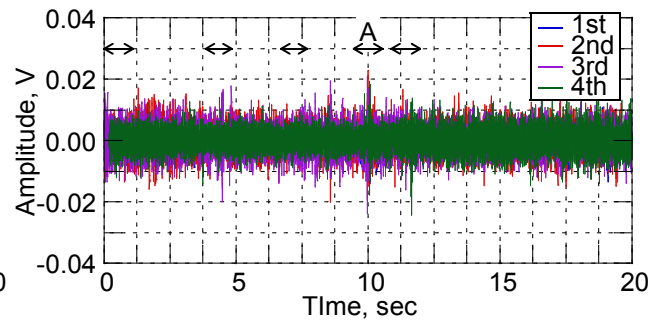


図-5 区間 A の車外音の電圧ゲイン

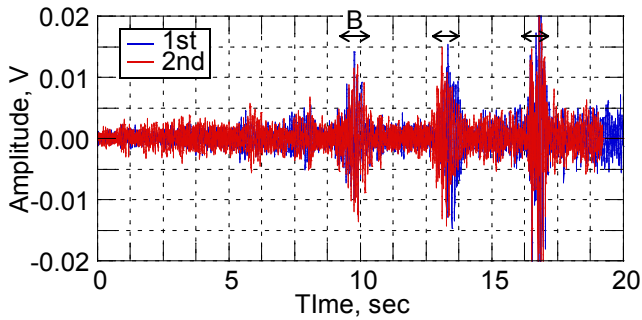


図-3 区間 B の車内音の電圧ゲイン

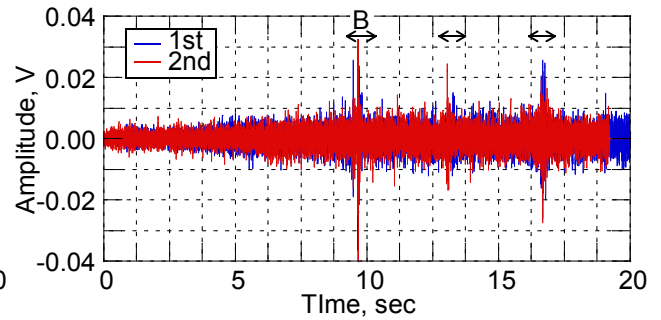


図-6 区間 B の車外音の電圧ゲイン

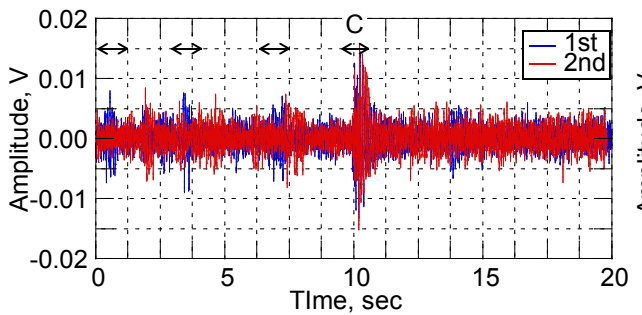


図-4 区間 C の車内音の電圧ゲイン

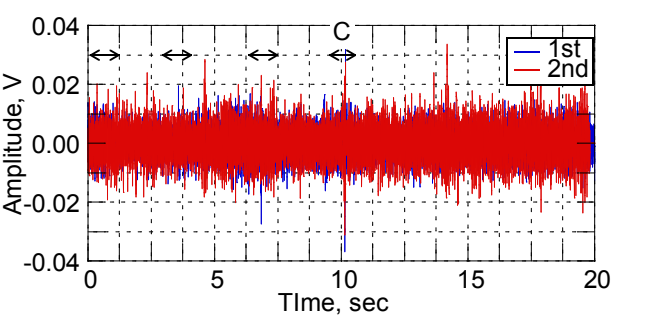


図-7 区間 C の車外音の電圧ゲイン

ハニングウィンドウを掛けて FFT 処理をおこない、パワースペクトルを求めた。

図-8 は、区間 A における車内音のパワースペクトルである。この区間には、損傷伸縮装置 A と健全伸縮装置 6 基とが含まれている。図より、周波数帯域 500~800Hz において、損傷伸縮装置 A 通過時のパワースペクトル（赤線）が、健全伸縮装置通過時のパワースペクトルに比して大きくなっていることがわかる。

図-9 は、区間 A における車外音のパワースペクトルである。やはり周波数帯域 500~800Hz において、損傷伸縮装置 A 通過時のパワースペクトル（赤線）が、健全伸縮装置通過時のパワースペクトルに比して大きくなっている。

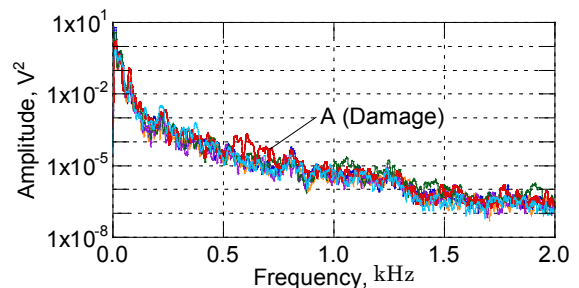


図-8 区間 A 通過時の車内音パワースペクトル

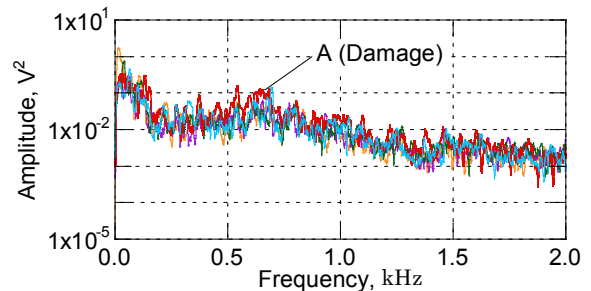


図-9 区間 A 通過時の車外音パワースペクトル

4. パーシャルオーバーオール (POA)

第2節で、全周波数成分を対象としたオーバーオールでは伸縮装置の損傷の有無を論じることが難しいことを述べた。また、第3節で、周波数帯域 500~800Hz において、損傷伸縮装置通過時のパワースペクトルが健全伸縮装置通過時に比べて大きい傾向があることを述べた。

本節では、限定された周波数帯域のパーシャルオーバーオールに着目した分析をおこなう。ここでは、車内での会話等のノイズが混入しにくい車外音を対象とする。

4-1 一帯域パーシャルオーバーオール²⁾

第3節で指摘した周波数帯域 500~800Hz における振幅強度を求め、伸縮装置の損傷の有無を判定できる閾値が存在するか否かを検討する。

実験走行で収録した 20 秒間単位の車外音の時系列データに対して、10msec.ごとに 40msec.幅のデータを切り出し、ハニングウィンドウを掛ける。次に、そのデータに対して FFT 処理をおこなない振幅スペクトルを求める。最後に、得られた振幅スペクトルのうち 500~800Hz 帯域の振幅を合算し、その時間における振幅強度とした。

図-10 は、区間 A における車外音に関する 20 秒間の振幅強度の推移である。この区間では 4 回の試験走行をおこなったので、4 回分のデータを併記している。同区間には「←→」で示す 5 基の伸縮装置が存在するが、図中 A と付記した伸縮装置が日常点検時に損傷ありと診断された伸縮装置である。図より、走行回によらず損傷伸縮装置での振幅強度が強くなっていることが確認できるものの、走行回によって健全伸縮装置通過時にも同程度の強度が得られる場合があることがわかる。

図-11~図-12 はそれぞれ、区間 B, C における車外音振幅強度の推移である。図より、いずれの区間においても損傷伸縮装置で振幅強度が強くなっていることが確認できるものの、区間 A と同様、走行回によって振幅強度にばらつきがあり、

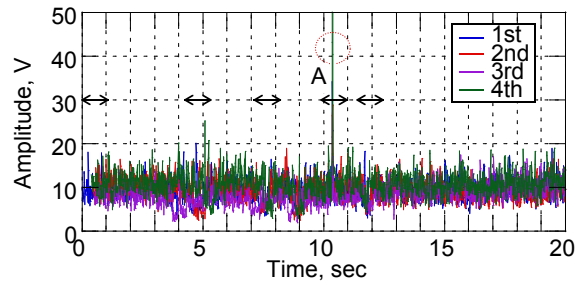


図-10 区間 A における車外音振幅強度の推移

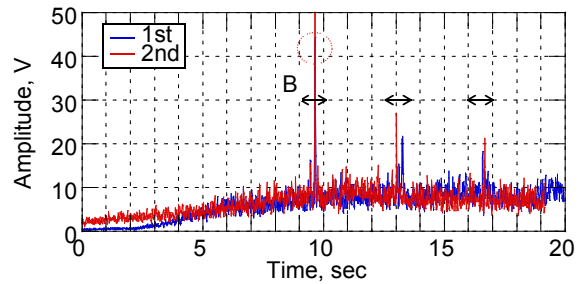


図-11 区間 B における車外音振幅強度の推移

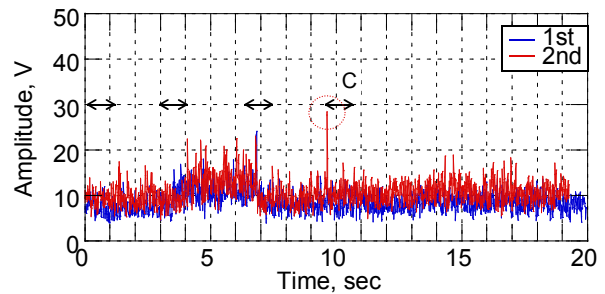


図-12 区間 C における車外音振幅強度の推移

損傷伸縮装置と健全伸縮装置とを区別することは難しい。

以上より、損傷を完全に識別できる閾値はなく、誤判定を許容する必要があることがわかる。

4-2 複数帯域パーシャルオーバーオール³⁾

これまでの検討の結果、損傷伸縮装置と健全伸縮装置とでは周波数帯域 500~800Hz のパワーに差異があり、損傷を判断するためのひとつの指標として使える可能性があることがわかった。

本項では、損傷頻度と実用性とを考慮して、ゴム・鋼製一体ジョイント型トランスフレックスジョイント (TF) を対象とし、損傷伸縮装置と健全伸縮装置との間で特に大きな差異が生じると考えられる周波数帯域をより狭く設定したうえで

複数個抽出し、それらの振幅強度の組み合わせ累積することを考える。周波数帯域としては、図-9を参考にしながら、表-4に示す三つの周波数帯域とそれらの組み合わせを想定した。

ゴム・鋼製一体ジョイント型トランスフレックスジョイント (TF) の代表的損傷形態を呈する伸縮装置 6 基を選定し、それらの前後に存在する健全伸縮装置 10 基を含む計 16 基に対して、新たに走行して音響データを採取した。表-5に対象伸縮装置の詳細を示す。それぞれの伸縮装置に対して複数回の走行をおこなっており、採取したデータ数は損傷伸縮装置 39 データ、健全伸縮装置 49 データである。

損傷伸縮装置において、その前後の路面走行時の振幅強度に比較して、特定周波数帯域でより大きな振幅強度が生じることを利用して、損傷の存否を判断した。音圧ピークの大きさを評価する指標としては、伸縮装置通過時点を中央点とする 1 秒間のパーシャルオーバーオール標準偏差 σ でその時間内の最大値 \max を除して正規化をほどこした \max/σ を用いた。 \max/σ が大きいほど損傷の可能性が大きいと判断するわけである。

図-13に伸縮装置番号(表-5に対応)と \max/σ (周波数帯域 210~230Hz+450~650Hz) との関係を示す。周波数帯域に 210~230Hz と 450~650Hz とを選定した理由については後述する。図中、赤丸は損傷伸縮装置における走行各回の収録音の \max/σ を表しており、青丸は健全伸縮装置における走行各回の収録音の \max/σ である。

全体的な傾向として、損傷伸縮装置を示す赤丸はグラフ上方に多くプロットされ、健全伸縮装置を示す青丸はグラフ下方に多くプロットされている。このことから、損傷の存否を判断するひとつの指標として、 \max/σ は有効であることがわかる。

一方で、同一伸縮装置であるにもかかわらず、走行回によって \max/σ に大きなばらつきが生じることがある。これは、点検車両が鉄道のように常に同じ軌道上を走行できるわけではないために生じる現象である。このことは、閾値の設定い

表-4 周波数帯域とその組み合わせ

Case	周波数帯域と組み合わせ
A	210~230Hz
B	450~650Hz
C	1130~1150Hz
D	A + B
E	A + C
F	B + C
G	A + B + C

表-5 対象伸縮装置 (TF) の詳細

伸縮装置番号	損傷形態	測定回数
1	ナット緩み	11
2	健全	9
3	健全	3
4	本体損傷、ナット緩み	5
5	本体損傷、摩耗	6
6	本体損傷、摩耗	6
7	本体損傷、ナット緩み	6
8	健全	6
9	健全	6
10	健全	3
11	健全	2
12	健全	5
13	健全	5
14	ナット締結部ゴム剥離	5
15	健全	5
16	健全	5

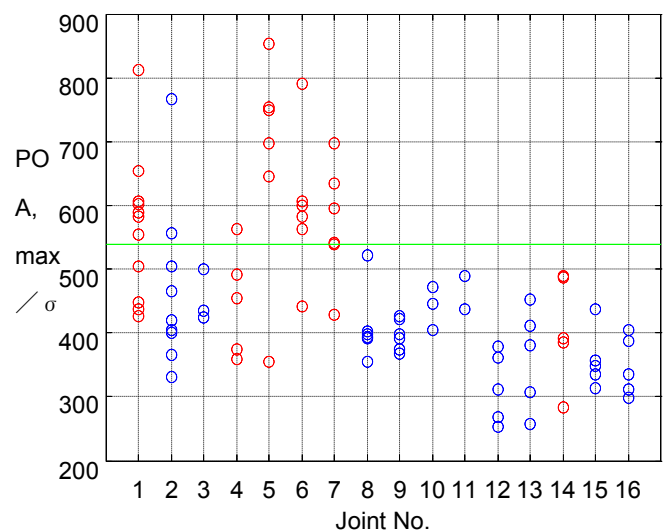


図-13 伸縮装置番号と \max/σ

かんによっては、損傷伸縮装置を健全であると判断したり、健全伸縮装置を損傷ありと判断したりする可能性があることを示している。たとえば、No.2伸縮装置では、健全なものを損傷ありと誤検出する可能性があり、No.14伸縮装置では、損傷ありを健全と判断する可能性がある。図中の緑線

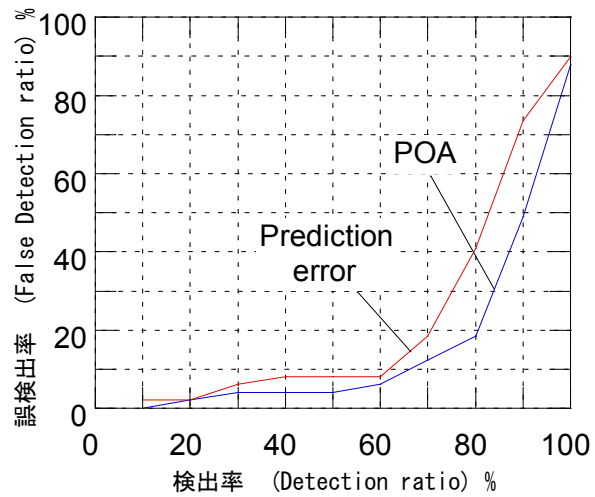
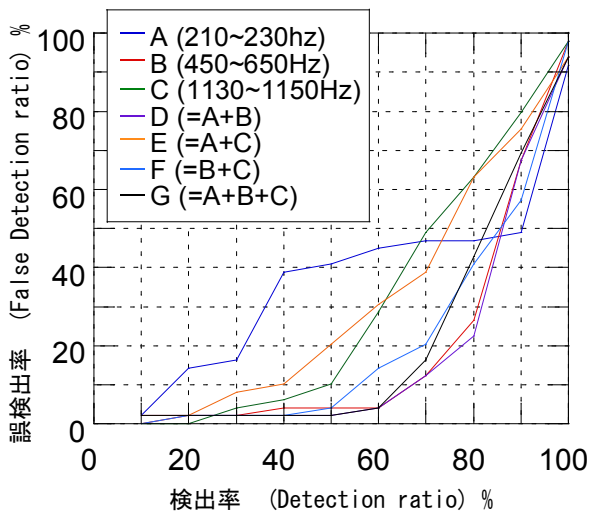


図-14 複数帯域 POA の組み合わせの影響 図-15 予測誤差による方法と POA による方法との比較

は、検出率（損傷を損傷と判断する割合）を熟練点検員の判断精度とほぼ同等の 60%と設定したときの閾値を示したものである。このとき、健全な No.2 伸縮装置にプロットされた 2 点が損傷ありと判断され、誤検出率（健全を損傷と判断する割合）は $2/49=5\%$ となる。

次に、周波数帯域として 210~230Hz と 450~650Hz との組み合わせを選定した理由について説明する。

図-14 は、表-4 に示した三つの周波数帯域とそれらの組み合わせに対して図-13 と同様のグラフを作成したのち、いろいろな閾値を設定して、検出率と誤検出率の関係を調べたものである。右下方に向かって最も大きな凸形状となるのが、D（210~230Hz+450~650Hz）の線である。B（450~650Hz）の線に比してわずかではあるが、この周波数帯域の組み合わせ D が最も効率的であることがわかる。

なお、本論文冒頭で述べたように、筆者らは本論文で扱ったパーシャルオーバーオールによる方法の他に、予測誤差による方法（Prediction Error Method）³⁾についても検討しているが、図-15 に示すように、パーシャルオーバーオールによる方法の方がより効果的であるという結果を得ている。

あとがき

本論文では、損傷のあることが確認されている伸縮装置を対象に走行実験をおこない、搭乗の熟練点検員の異常発見率を調査した。また、点検車両に搭載したマイクで車内音と車外音とを採取し、これらを用いて熟練点検員と同程度の異常発見率を実現できるかを検討した。その結果、得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 点検車両に搭乗した熟練点検員の伸縮装置異常発見率は、6~7割程度である。
- 2) オーバーオール音圧により伸縮装置の異常を判断することは難しい。
- 3) パーシャルオーバーオール音圧により伸縮装置の異常を判断しようとするとき、ひとつの周波数帯域のみ設定する場合には 500~800Hz 帯域を利用すればよく、複数周波数帯域を設定する場合には 210~230Hz 帯域と 450~650Hz 帯域とを総合評価すればよい。ただし、いずれの方法によってもある程度の誤検出（健全伸縮装置を損傷伸縮装置と判断する場合）を許容する必要がある。
- 4) 210~230Hz 帯域と 450~650Hz 帯域とを総合評価する場合、検出率を熟練点検員と同程度の判断精度 60%を目標とすれば、誤検出率を 5%程度におさえることができる。

謝辞：本研究は，京都大学大学院工学研究科，(株)日本工業試験所，国際振音計装(株)，(株)ケイアールティとの共同研究の成果の一部をとりまとめたものです。関係していただいた方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 塚本成昭，山上哲示：走行時の異常音による伸縮継手損傷検出の試み，阪神高速道路第42回技術研究発

表会論文集，pp.299-306，2010

- 2) 服部洋，大島義信，塚本成昭：車輛通過音を活用した道路橋伸縮装置の異常検知に関する基礎的研究，土木学会論文集A2，Vol.67，No.2，pp. I_865-I_873，2011
- 3) 大島義信，福田翔平，Heng Salpisoth，服部洋，塚本成昭：車両通過音を用いた道路橋伸縮装置の異常検知における高精度化に関する検討，土木学会論文集A2，Vol.68，No.2，pp. I_751-I_759，2012

AN ACOUSTIC EXPERT SYSTEM FOR DETECTING DAMAGE OF EXPANSION JOINTS

Shigeaki TSUKAMOTO, Kenichi SUGII and Tetsuji YAMAGAMI

Damage of bridge expansion joints has been detected primarily by skilled inspectors boarding on an inspection vehicle who determine possible damage from the noise and vibration generated during passage over each joint and perform hammer sounding where necessary. However, the number of younger personnel to replace them is decreasing due to the aging society. The purpose of this study was to analyze the noise generated during passage over expansion joints and develop a system to take over the sensory inspection.

In this study, an inspection vehicle equipped with microphones and boarded by a skilled inspector was made to run, passing over existing expansion joints with and without known damage. While the vehicle was traveling, sound data was collected and the inspector inside performed the sensory inspection. A comparison between the overall values of sound pressure at the damaged joints and those at the sound joints revealed that this approach was ineffective in detecting damaged ones. The authors carried out frequency analyses on the data of one-second period, with the time point of passage over each expansion joint adjusted to the middle of the period. The frequency analyses showed that the damaged joints exhibited characteristic spectra in the band from 500 to 800 Hz, and that accuracy might be increased by using partial overall values in two bands, from 210 to 230 Hz and from 450 to 650 Hz.

塚本 成昭



阪神高速技術株式会社
技術部 技術開発課
Shigeaki Tsukamoto

杉井 謙一



阪神高速技術株式会社
技術部
Kenichi Sugii

山上 哲示



阪神高速技術株式会社
技術部
Tetsuji Yamagami