

免震ゴム支承の損傷検知手法に関する研究

生田 正人¹・四井 早紀²・川崎 佑磨³・伊津野 和行⁴

¹ 立命館大学大学院生 理工学研究科環境都市専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: rd0069hh@ed.ritsumeai.ac.jp (Corresponding Author)

² 正会員 立命館大学特任助教 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: s-yotsui@fc.ritsumeai.ac.jp

³ 正会員 立命館大学准教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: yuma-k@fc.ritsumeai.ac.jp

⁴ フェロー会員 立命館大学教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: izuno@se.ritsumeai.ac.jp

免震ゴム支承は被覆ゴムで覆われているため、内部が損傷していても外観では判断することが難しい。しかし、内部に損傷があれば地震時に設計どおりの免震機能を発揮することが期待できないため、非破壊で内部損傷を検知することができれば有用である。そこで、交通振動により支承内部に発生する弾性波を支承側面において計測する手法により、内部損傷を検知する手法について数値解析的に検討した。内部損傷によって対面する観測点の波形の対称性が崩れることと、内部損傷で反射した弾性波は既知の外部損傷からの反射波よりも早く到達することから、内部損傷を検知できることを示した。

Key Words: isolation rubber bearing, non-destructive test, wave propagation, RCIP method

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震以降、橋梁に免震ゴム支承が積極的に採用されるようになったが、近年その経年劣化が顕在化している¹⁾。ゴム支承の内部に損傷があると、地震時に免震機能が十分発揮できない恐れがある。しかし、ゴム支承は被覆ゴムに覆われており、外観から支承内部の損傷を判断することが困難である。

著者らは非破壊検査手法の一つである AE 法を用いた実験を行い、内部損傷からの波動を検出することができるとを示した^{2,3)}。交通振動により支承上面において起振された弾性波を、支承側面に設置したセンサーで観測することにより、内部損傷を検知する手法である。一方、ゴム支承内部における波動伝播を数値解析的に検証する試みは、鋼板がないゴム単体を対象とした解析にとどまっていた⁴⁾。また、設置されて年数が経過したゴム支承では、オゾン劣化によって表面に亀裂が生じることがあり⁵⁾、観測された波形が内部損傷によるものか、表面の亀裂によるものか区別することも必要である。

そこで本研究では、数値解析によって弾性波の伝播状況をシミュレーションし、鋼板や内部損傷があるとどのような影響があるか突き止めることを目的とした。

2. 解析手法

数値解析には、ゴム単体を対象とした解析⁴⁾と同様に、M型有理関数 CIP 法^{6,7)}を用いた。線形微小変形を仮定した三次元動弾性問題の支配方程式を、各方向に分離して移流方程式で表した。例として x 方向に関するものを式(1)~(9)に示す。

$$\partial_t h_1 + c_L \partial_x h_1 = 0 \quad (1)$$

$$\partial_t h_2 - c_L \partial_x h_2 = 0 \quad (2)$$

$$\partial_t h_3 + c_T \partial_x h_3 = 0 \quad (3)$$

$$\partial_t h_4 - c_T \partial_x h_4 = 0 \quad (4)$$

$$\partial_t h_5 + c_T \partial_x h_5 = 0 \quad (5)$$

$$\partial_t h_6 - c_T \partial_x h_6 = 0 \quad (6)$$

$$\partial_t h_7 = 0 \quad (7)$$

$$\partial_t h_8 = 0 \quad (8)$$

$$\partial_t h_9 = 0 \quad (9)$$

ここで、 $h_1 = V_x - \frac{\sigma_{xx}}{c_L \rho}$ 、 $h_2 = V_x + \frac{\sigma_{xx}}{c_L \rho}$ 、 $h_3 = V_y - \frac{\sigma_{xy}}{c_T \rho}$ 、 $h_4 = V_y + \frac{\sigma_{xy}}{c_T \rho}$ 、 $h_5 = V_z - \frac{\sigma_{zx}}{c_T \rho}$ 、 $h_6 = V_z + \frac{\sigma_{zx}}{c_T \rho}$ 、 $h_7 = \sigma_{yy} - \frac{\lambda}{\lambda+2\mu} \sigma_{xx}$ 、 $h_8 = \sigma_{zz} - \frac{\lambda}{\lambda+2\mu} \sigma_{xx}$ 、 $h_9 = \sigma_{yz}$ 、

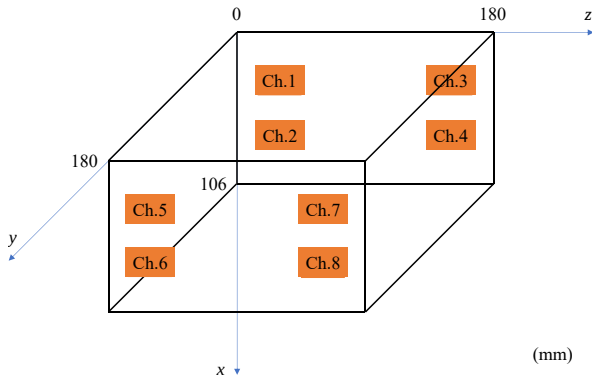


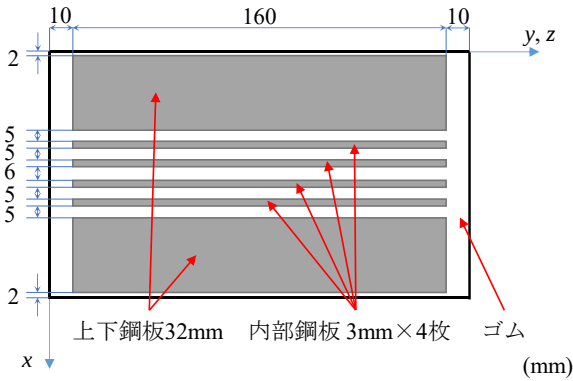
図-1 解析モデル

表-1 観測点座標

		座標 (mm)		
		x	y	z
観測点	Ch. 1	34	0	10
	Ch. 2	72	0	10
	Ch. 3	34	0	170
	Ch. 4	72	0	170
	Ch. 5	34	180	10
	Ch. 6	72	180	10
	Ch. 7	34	180	170
	Ch. 8	72	180	170

$c_L = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}$, $c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$, V_x , V_y , V_z はそれぞれ x , y , z 方向の変位速度, σ は応力, λ, μ はラメの定数, ρ は密度, ∂_t は時間 t に関する偏微分, ∂_x は x 方向の空間に関する偏微分である.

式(7)~(9)より, h_7 と h_8 と h_9 は時間変化しない. 式(1)~(6)はそれぞれ, 縦波速度 c_L と横波速度 c_T による移流方程式である. x 方向の次に y 方向, そして z 方向と順に



CIP法で解くこととした.

3. 解析モデル

解析モデルは実験供試体⁴⁾を参考にした $106 \times 180 \times 180$ mm の直方体である. 加振は, 初期条件として $x = 0$ の面全体に 1 N を与えた. 著者らの実験結果⁴⁾より, 縦波伝播速度 c_L は 1.6×10^3 m/s, 横波伝播速度 c_T は 3.0 m/s とした. 解析モデルを図-1 に, 観測点 (Ch. 1 から Ch. 8) の位置を表-1 に示す. 積層ゴム支承の内部には鋼板が存在し, 本研究ではこれについても考慮する. 解析に使用した鋼板の大きさは, 上下鋼板が $32 \times 160 \times 160$ mm, 内部鋼板が $3 \times 160 \times 160$ mm である. 鋼の縦波伝播速度 c_L は 5.9×10^3 m/s, 横波伝播速度 c_T は 3.2×10^3 m/s とした. 鋼板の配置図を図-2 に示す.

4. 内部損傷の検知

(1) 内部損傷がない場合

健全時の解析として, まず内部損傷がない場合の解析を行った. 対面している観測点 (例えば Ch.1 と Ch.5) で観測された変位速度の波形は正負対称になる (図-3). 次に, 波動の伝播状況の確認を行った. 図-4 は加振 $22\mu\text{s}$ 後における変位速度の絶対値で色分けしたもので, 青から赤に変化するほど変位速度が大きいことを示している. 図-4 より, 波動が左右対称に伝播していることがわかる. 本研究では, 健全時は弾性波が対称的に伝播して, 対面で観測した波形を足し合わせるとゼロになることを用いて, 内部損傷を検知することとした.

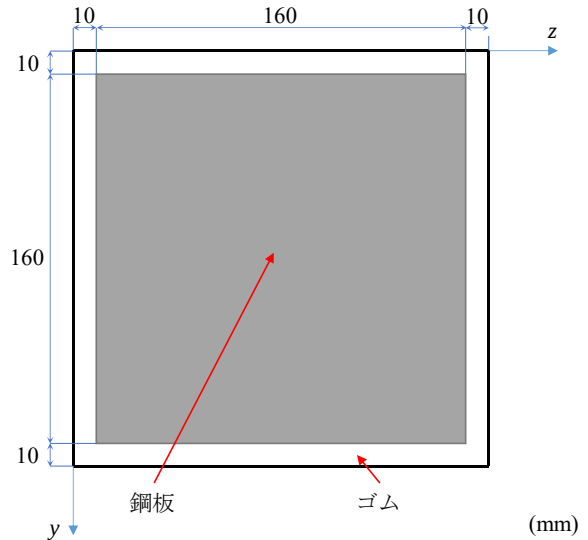


図-2 鋼板配置図

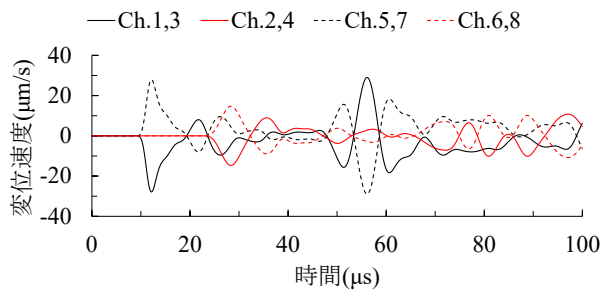


図-3 健全時の観測波形

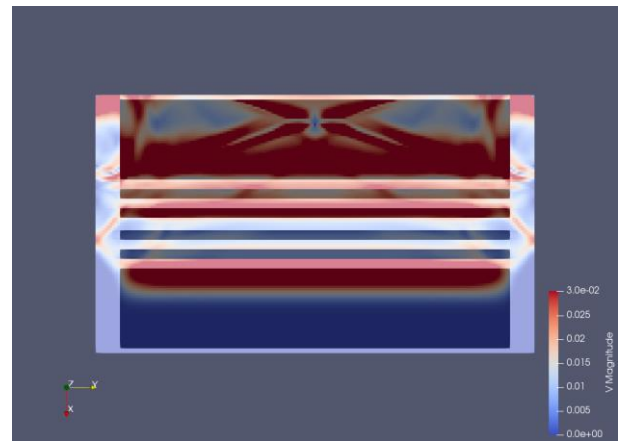


図-4 加振 22 μ s 後における波の伝播状況

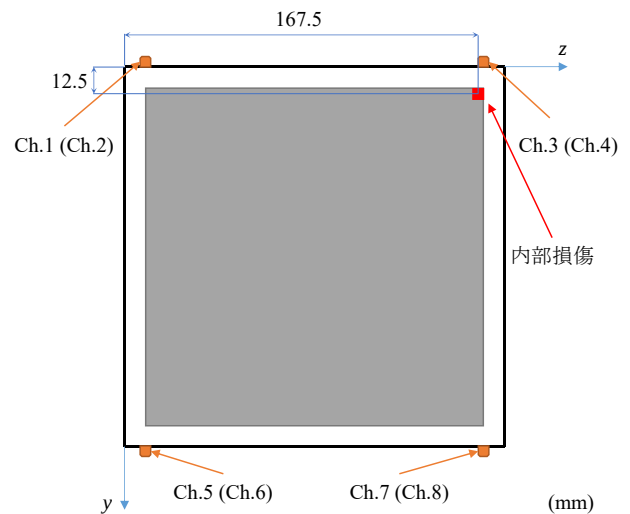
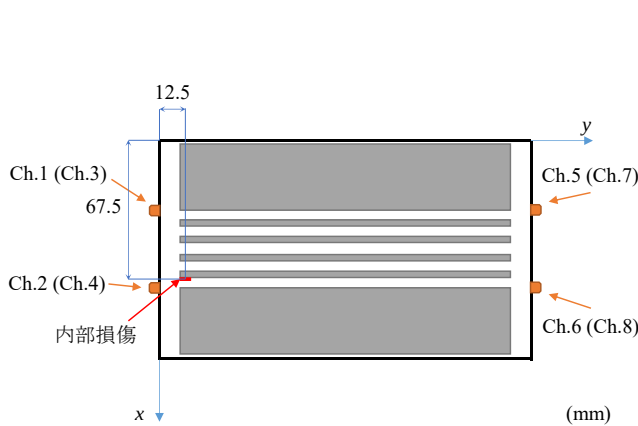


図-5 内部損傷の位置

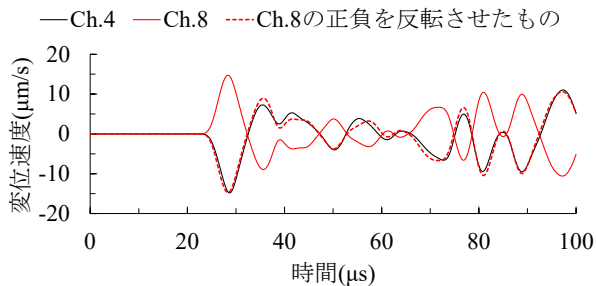


図-6 損傷がある時の観測波形 (Ch.4 と Ch.8)

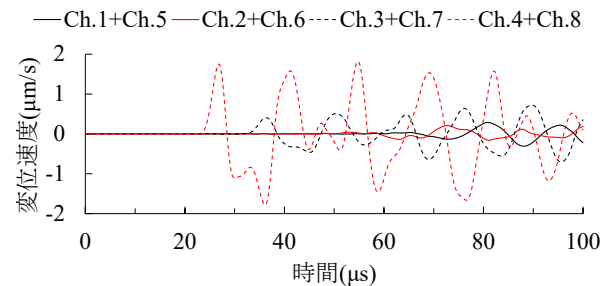


図-7 足し合わせた波形

(2) 内部損傷がある場合

次に、内部損傷がある場合について解析した。損傷は亀裂を想定し、矩形の空隙として模擬した。大きさは、 $1 \times 5 \times 5 \text{ mm}$ で損傷の位置は4枚目の内部鋼板の直下である $(x, y, z) = (67.5, 12.5, 167.5) \text{ mm}$ に設定した。内部損傷の位置を図-5に示す。

図-6 からわかるように、観測波形は対称にならなかった。これは、空隙の影響で弾性波の対称形が崩れたためである。そのため、対面している観測点で波形を足し合わせると、図-7 のようにゼロにならない。

また、図-7 で変位速度の差が生じる時刻は Ch.4+Ch.8 が一番早く、その後、Ch.3+Ch.7, Ch.2+Ch.6, Ch.1+Ch.5 の順となっている。この順は、内部損傷に近い観測点の組の順と同じである。内部損傷で反射した弾性波は、距離が近い順に観測点に到達するため、このような結果となった。また、変位速度の差の最大値も同じ順で大きくなっていることがわかる。これは、内部損傷と観測点に近いほど、内部損傷で反射した弾性波が、観測点で反射することを繰り返す、変位速度の差が大きくなるからだと考えられる。

次に、波動の伝播状況の確認を行った。図-8 は加振 22 μ s 後における変位速度を絶対値で色分けしたもので、青から赤に変化するほど変位速度が大きいことを示している。

図-8 より、対称的に伝播してきた波動が空隙箇所でも反射し、対称性が崩れていることがわかる。

これらより、空隙がある場合には、空隙箇所でも弾性波に乱れが生じ対称性が崩れるため、対面している観測点の観測波を足し合わせると変位速度の差が生じることがわかる。

ただし、観測点間を垂直二等分する平面に関して面対称の位置に1つもしくは複数の空隙がある場合は、弾性波に乱れは生じるが、対称性は崩れないために、本手法で検知することはできない。しかし、そのような状況は稀な事象だと考えられる。

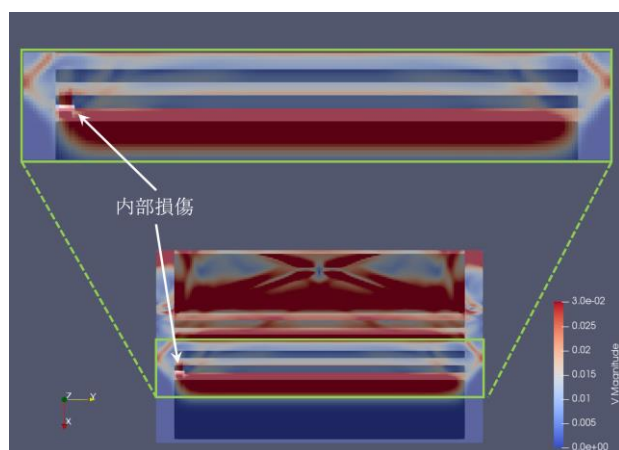


図-8 加振 22 μ s 後における波の伝播状況

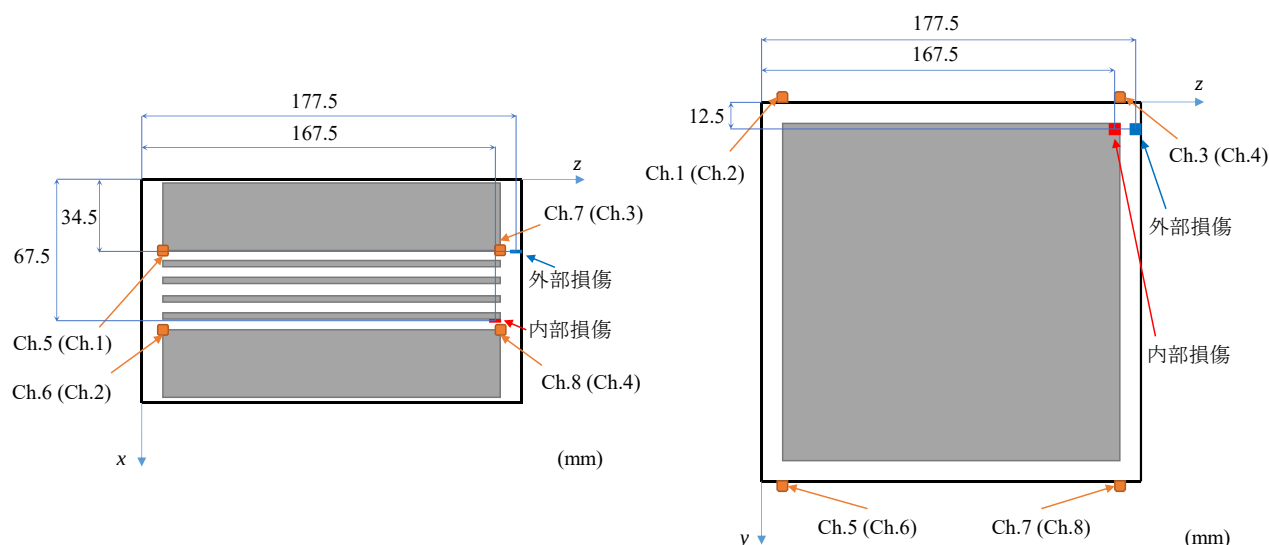


図-9 外部損傷と内部損傷の位置 (損傷パターン A)

以上より、対面の観測結果を足し合わせてゼロにならないければ、観測点間を垂直二等分する平面に関して面対称の位置以外の位置に内部損傷があるといえる。次に、外部損傷がある場合にも内部損傷の存在を検知できるかどうかについて検討する。

5. 外部損傷との区別

(1) 区別する方法の検討

1章で述べた通り、ゴム支承にはオゾン劣化等で表面に亀裂が生じている場合がある。その場合、4章の手法を適用して対面の観測波形を足し合わせてゼロにならなくても、それが内部損傷に起因するのか、表面の亀裂に起因するのか不明である。そのため、外部損傷と内部損傷を区別する方法を検討した。

外部損傷の大きさは、1 $\times$ 5 $\times$ 5mmで損傷の位置は(x, y, z)=(34.5, 12.5, 177.5)mmに設定した。内部損傷は4章と同じ箇所に設定した。外部損傷と内部損傷の位置を図-9に示す。これを損傷パターンAとする。

本研究では、以下の2つのケースで検証した。

ケース①：外部損傷のみある場合

ケース②：外部損傷と内部損傷が両方ある場合

図-10 と図-11 からわかるように、どちらのケースも対面位置における観測波形が対称にならず、足し合わせた波形がゼロにならない。そのため、時刻歴波形だけでは、外部損傷がある場合に、内部損傷を検知することができない。

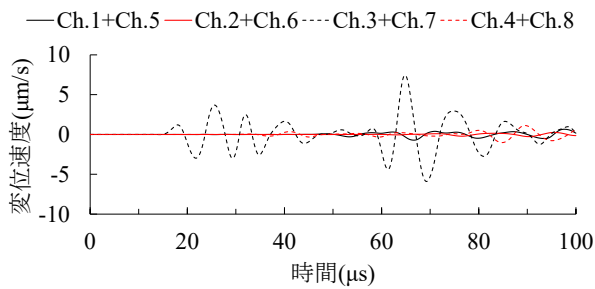


図-10 足し合わせた波形（ケース①）

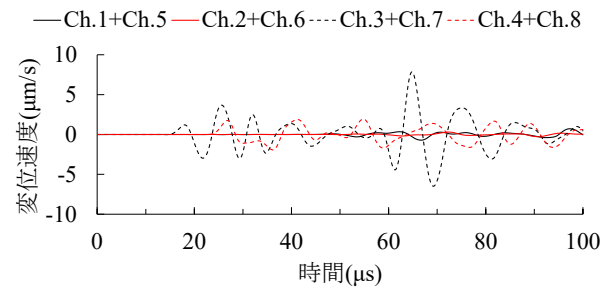


図-11 足し合わせた波形（ケース②）

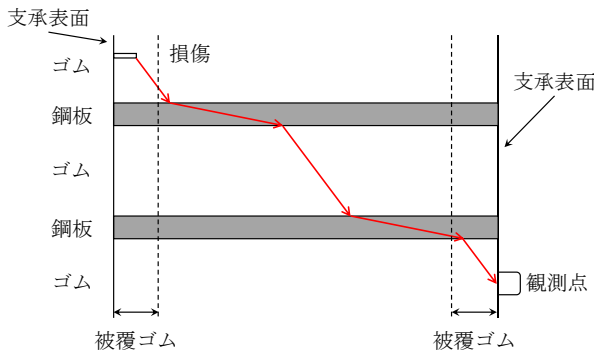


図-12 到達経路のイメージ

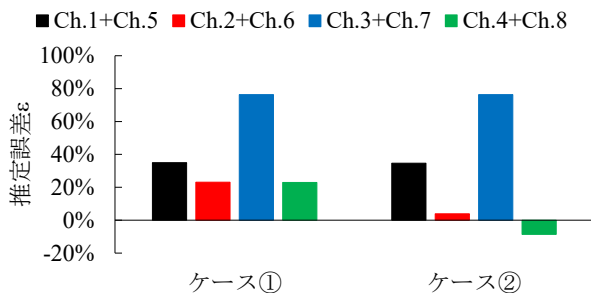


図-13 推定値との比較（損傷パターン A）

また、図-11より、内部損傷に近いCh.4+Ch.8より、外部損傷に近い Ch.3+Ch.7の方が、変位速度の差の最大値が大きいことがわかる。鋼板の縦波速度はゴムの3倍ほど速いため、損傷部に起因する弾性波が観測点に到達するのは、鋼板を透過してきた波が早く、後からゴム層だけを通して来た波が到達する。そのため、図-11の損傷部に起因する弾性波が観測点に最初に到達する20μs付近の波は鋼板を透過してきた波で、60μsに到達する波は外部損傷からゴム層だけを通して来た波が卓越しているものと考えられる。本研究で用いたゴムの音響インピーダンスは $1.8 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、鋼の音響インピーダンスは $4.7 \times 10^7 \text{ kg/m}^2\text{s}$ と1桁異なるため、ゴムから鋼へ透過する弾性波は8%で、92%は反射される。そのため、支承上面で発生した弾性波が内部損傷位置まで鋼板を透過して到達する割合は小さい。その内部損傷で

反射して対称性が乱されて出現する波の振幅より、外部損傷で反射してゴム層を経由してきた波に起因する波の振幅の方が大きいためだと考えられる。

そこで、外部損傷から反射してきた波の到達時点が推測可能であることを利用し、内部損傷の有無を判定することを考えた。外部損傷は外観から損傷位置が確認できる。そのため、上面を加振して発生した波動が、外部損傷箇所まで反射して、観測点まで到達するまでの時間の推定値を算出することができる。もし対面の観測値を足し合わせて求めた波の到達時間が、外部損傷箇所まで反射してきた波の到達時間より早ければ、それは内部損傷から反射してきた波に起因するものと考えられる。

しかし、外部損傷からの到達時間を計算するため、ここまで説明してきた手法を用いると計算時間が多く必要である。観測した波形から内部損傷を検知するためには、なるべく簡易な手法が必要だと考えられる。そこで本研究では、エクセルのソルバー機能を用いて簡易な計算を試みることにした。

側面の被覆ゴムを考慮した場合には、鋼板の側面を考慮した経路計算が必要となり簡単に計算することができない。そこで側面の被覆ゴム部まで鋼板が存在すると仮定して図-12のようにゴムと鋼板の積層構造を考えると、ホイヘンスの原理より波は最短時間で到達するため、エクセルのソルバー機能で経路と到達時間を求めることができる。実際には被覆ゴムがあるため、この手法で求めた到達時間（以下、推定到達時間とする）よりも必ず遅くなるはずである。

足し合わせた波形の到達時間は、損傷箇所に対称性が崩れた波動が観測点に初めて到達した時間なので、足し合わせた波形の到達時間と推定到達時間を比べ、足し合わせた波形の到達時間の方が早ければ、外部損傷以外に波動の対称性が崩れる要因があることになる。

図-13は、推定到達時間に対して、足し合わせた波形の到達時間がどのくらい遅れているのかを表したものである。縦軸の推定誤差 ε は、推定到達時間 T_e に対する足し合わせた波形の到達時間 T と推定到達時間 T_e の差

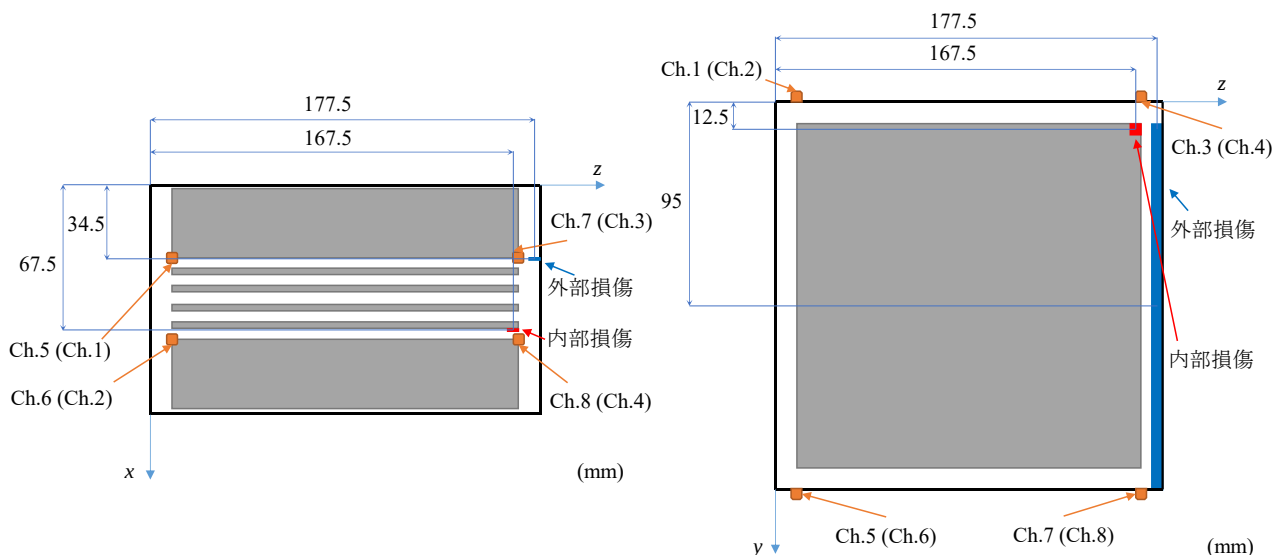


図-14 外部損傷と内部損傷の位置 (損傷パターンB)

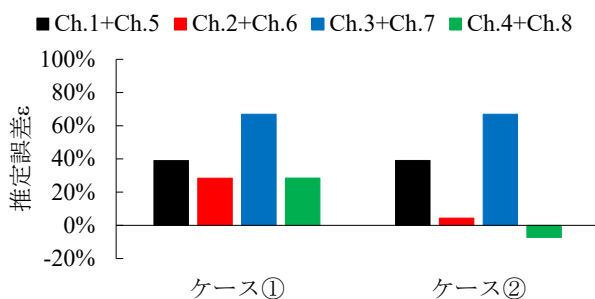


図-15 推定値との比較 (損傷パターンB)

の比率を表している。

$$\varepsilon = (T - T_e) / T_e \quad (10)$$

値がマイナスの場合、推定到達時間より足し合わせた波形の到達時間の方が早いことを示す。

ケース①の外部損傷のみの場合、すべての観測点の組み合わせで値がプラスになる。ケース②の外部損傷と内部損傷が両方ある場合では、すべての観測点の組み合わせの中で、Ch.4+Ch.8で値がマイナスになる。すなわち、外部損傷と内部損傷が両方ある場合は、一つでも値がマイナスになれば、外部損傷の他に内部損傷があると言える。

(2) 外部損傷が大きい場合の検討

次に、損傷パターンBとして外部損傷が大きい場合について検討した。外部損傷が内部損傷より大きい場合、観測波形には外部損傷の影響が大きく、内部損傷の存在を検知しにくいのではないかと考えたためである。外部損傷の大きさは、 $1 \times 170 \times 5 \text{ mm}$ で損傷の位置は $(x, y, z) = (34.5, 95, 177.5) \text{ mm}$ に設定した。つまり、側面の幅ほぼ全

体に亀裂が生じている状態である。内部損傷は4章と同じ箇所に設定した。外部損傷と内部損傷の位置を図-14に示す。

図-15は、推定到達時間に対して、足し合わせた波形の到達時間がどのくらい遅れているのかを表したものである。値がマイナスの場合、推定到達時間より足し合わせた波形の到達時間の方が早いことを示す。ケース①の外部損傷のみの場合、すべての観測点の組み合わせで値がプラスになる。ケース②の外部損傷と内部損傷が両方ある場合では、すべての観測点の組み合わせの中で、Ch.4+Ch.8で値がマイナスになる。したがって、外部損傷が大きい場合でも、外部損傷と内部損傷を区別することができた。

到達時間は、観測点に一番近い外部損傷の角で反射した波動が到達するまでの時間である。そのため、外部損傷の大きさではなく、観測点に一番近い角の位置が推定到達時間の計算に係る要因である。損傷パターンBは、損傷パターンAよりも外部損傷の角が観測点に近くなっているが、外部損傷は被覆ゴム層にできるため、損傷に到達するまでには、ゴム層を透過する。一方で、内部損傷は被覆ゴム層の内側にあるため、損傷に到達するまでには、鋼板部分を透過する割合が多い。また、内部損傷は損傷箇所では波動が反射した後も、鋼板を透過し、観測点に到達するので、推定到達時間より足し合わせた波形の到達時間が早くなる。よって、外部損傷が内部損傷より大きくても、本手法によって内部損傷を検知できたものと考えられる。

(3) 外部損傷が複数ある場合の検討

次に、損傷パターンCとして外部損傷が二箇所ある場合について検討した。

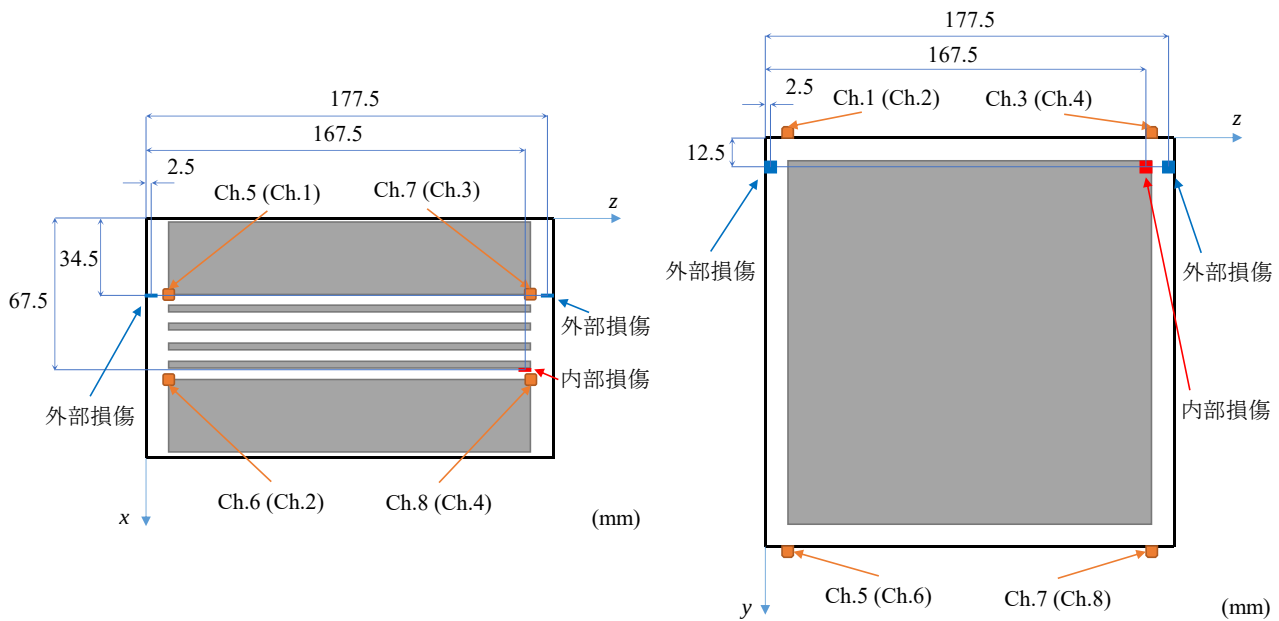


図-16 外部損傷と内部損傷の位置 (損傷パターンC)

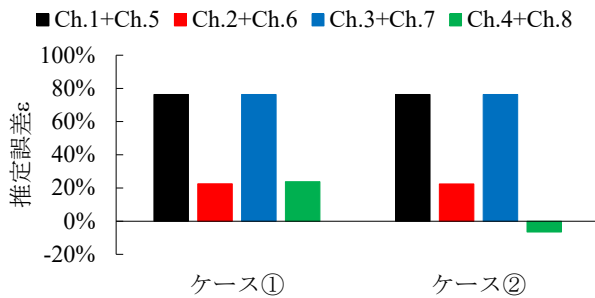


図-17 推定値との比較 (損傷パターンC)

外部損傷の大きさは、 $1 \times 5 \times 5 \text{ mm}$ で損傷の位置については一つ目を、 $(x, y, z) = (34.5, 12.5, 177.5) \text{ mm}$ に設定し、二つ目を、 $(x, y, z) = (34.5, 12.5, 2.5) \text{ mm}$ に設定した。内部損傷は4章と同じ箇所を設定した。外部損傷と内部損傷の位置を図-16に示す。

図-17は、推定到達時間に対して、足し合わせた波形の到達時間がどのくらい遅れているのかを表したものである。ケース①の外部損傷のみの場合、すべての観測点の組み合わせで値がプラスになる。ケース②の外部損傷と内部損傷が両方ある場合では、すべての観測点の組み合わせの中で、Ch.4+Ch.8で値がマイナスになる。したがって、外部損傷が二箇所ある場合でも、本手法によって内部損傷の存在を検知することができた。

本研究では、対面する2つの観測点を4組の、合計8個使用し、計測している。前節でも述べたように、観測点に一番近い角の位置が推定到達時間の計算に係る要因である。損傷パターンCは、損傷パターンAのモデルに外部損傷が一つ増えたケースである。二つ目の外部損傷は、Ch.1+Ch.5, Ch.3+Ch.7には近いため、推定到達時間

も早くなる。これは、図-13に比べて、図-17ではCh.1+Ch.5, Ch.3+Ch.7の推定誤差が大きくなっていることからわかる。一方、Ch.4+Ch.8のほとんど推定誤差は変わらず、マイナス側に出ている。これは、二つ目の外部損傷より、一つ目の外部損傷の方がCh.4+Ch.8には近く、二つ目の外部損傷が与えている影響は少ないからだと考えられる。外部損傷が複数箇所ある場合でも、4組の観測点のいずれかには、内部損傷の方が近い観測点の組があると考えられるため、外部損傷が複数存在しても内部損傷の存在を検知できると考えられる。

6. おわりに

本研究は、免震ゴム支承の内部にある損傷（内部損傷）を非破壊で検知することが目的である。支承上面で発生した弾性波を支承側面で観測する手法について検討するため、波動伝播シミュレーションを行った。得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) ゴム支承に外部損傷や内部損傷がある場合には、損傷箇所弾性波に乱れが生じて対称性が崩れる。外部損傷がない場合には、対面している観測点における観測波を足し合わせてもゼロにならないければ、内部損傷が存在しているものと判断できることを示した。
- 2) 外部損傷がある場合には、外部損傷は外観から位置を確定できることを利用した手法を提案した。外部損傷から反射してくる波の推定到達時間を簡易計算によって求め、対面している観測点における観測波

を足し合わせた波の到達時間が、それよりも早い観測点の組み合わせが一つでもある場合には、内部損傷が存在しているものと判断できることを示した。

- 3) 外部損傷が大きい場合や複数箇所ある場合でも、観測点に一番近い角の位置が推定到達時間の計算に係る要因であり、いずれかの観測点を組には内部損傷の方が近い組が存在すると考えられるため、外部損傷が存在しても内部損傷の存在を検知できるとを示した。

謝辞：本研究はJSPS 科研費 20K04672 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 林訓裕，足立幸郎，甲元克明，八ツ元仁，五十嵐晃，党紀，東出知大：経年劣化した鉛プラグ入り積層ゴム支承の残存性能に関する実験的検証，土木学会論文集 A1, Vol. 70, No. 4, pp. 1032-1042, 2014.
- 2) 川崎佑磨，寺村直人，伊津野和行，岡田慎哉：AE 法による積層ゴム支承の損傷評価に関する実験的研究，土木学会論文集 A1, Vol. 71, No. 2, pp. 244-254, 2015.
- 3) 川崎佑磨，田中陽裕，山田悠二，植田健介，伊津野和行：鋼板間のゴム内部で発生した剥離音の AE 法による検出精度に関する確認実験，土木学会論文集 A1, Vol. 76, No. 2, pp. 229-238, 2020.
- 4) 能勢侑希，伊津野和行，川崎佑磨：免震ゴム支承の内部損傷検知に関する数値解析的研究，日本地震工学会論文集，Vol. 19, No. 5, pp. 5_283-5_293, 2019.
- 5) 伊藤義人，矢澤晃夫，佐藤和也，顧浩声，忽那幸浩，山本吉久：橋梁支承用ゴムの環境劣化特性に関する基礎的研究，土木学会論文集，794 号，pp. 794_253-794_266, 2005.
- 6) 矢部孝，内海孝之，尾形陽一：CIP 法，森北出版，2003.
- 7) Nakamura, T. and Yabe, T.: Cubic interpolated propagation scheme for solving the hyper-dimensional Vlasov-Poisson equation in phase space, *Computer Physics Communications*, Vol. 120, pp. 122-154, 1999.

DETECTION OF INTERNAL DAMAGE IN A SEISMIC RUBBER BEARING

Masato IKUTA, Saki YOTSUI, Yuma KAWASAKI and Kazuyuki IZUNO

Recently, the deterioration of seismic rubber bearings has been reported after 20 years in service. As the isolation effects of deteriorated bearings during earthquakes are inadequate, early detection of deterioration is necessary to ensure the safety of isolated structures. However, if the interior of the bearing is damaged, the seismic isolation function cannot be expected during an earthquake.

This study analyzed the propagation of elastic waves to detect internal voids in rubber bearings using a nondestructive method. Using a numerical 3D model of a rubber bearing, an external force was applied to the top of a rectangular parallelepiped. The wave propagation was simulated using the CIP method. The results showed that the internal void can be detected from the combined waves at the observation points facing each other. Even in the presence of external damage, internal voids were able to be detected because the waves reflected from internal voids arrive earlier than the waves reflected from known external damage.