

論文

弾性波を用いた非破壊試験による鋼板補強 RC 床版の劣化評価指標の提案

茅野茂*, 山本貴士**, 服部篤史***, 塩谷智基****, 河野広隆*****

*阪神高速道路株式会社フェロー (〒530-0005 大阪市北区中之島 3 丁目 2)

**博士 (工学), 京都大学大学院工学研究科教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

***博士 (工学), 京都大学大学院工学研究科特定教授 (同上)

****Ph.D., 京都大学大学院工学研究科特定教授 (同上)

*****博士 (工学), 京都大学名誉教授 (同上)

RC 床版の劣化過程におけるたわみは FEM 解析では説明できない。これは劣化によるひび割れの進展による RC 床版の不連続化によるものと推定。そこで、非破壊検査手法による弾性波伝播経路を基にした AE トモグラフィ解析を劣化進展の評価に導入。RC 床版の輪荷重走行試験による劣化進展に伴うたわみと弾性波の伝播速度の低下を比較し、損傷力学におけるスカラー損傷パラメータを用いた劣化評価指標を導入し、AE トモグラフィ解析による弾性波速度のみから床版劣化進展を評価できる指標を提案する。

キーワード：輪荷重走行試験, AE トモグラフィ, 劣化評価指標, 弾性波速度

1. 背景と目的

近年、道路インフラの老朽化による劣化や交通荷重による繰返荷重による疲労劣化が社会問題となり、全国的に大規模な更新・修繕事業が推進されている。その中でも更新や修繕の判断が困難なものがある。阪神高速道路の初期 (1970 年代) に建設された RC 床版は、建設後、大型交通の増などにより RC 床版の底面に鋼板 (厚さ 4.5mm) を接着することで補強された。このような鋼板補強床版は、底面の損傷の様子が外観から確認できないだけでなく、適切な検査を行うための非破壊試験方法も確立されるに至っていない。

一方、京都大学と阪神高速道路(株)との共同研究によって鋼板補強 RC 床版 (以下、「床版」) の内部損傷状況を評価するために、高速道路での通行規制を行わずに、交通による発生する AE を鋼板接着補強のために設置されたアンカーボルトにセンサを設置することにより AE トモグラフィ解析^{1) 2)}により得られた速度分布から内部損傷を評価できることが示された³⁾。

本研究では、実橋から切り出した鋼板補強 RC 床版を用いて輪荷重走行試験を実施する際に、たわみの計測と同時に弾性波速度を計測した。また一方で同床版をモデル化した FEM 解析を実施した。得られた結果から、実際に試験で計測されたたわみと FEM 解析での計算値との差が繰返し荷重による劣化進展によるものとして、劣化進展を評価する手法を構築するとともに、AE トモグラフィ解析から得られた弾性波速度分布のみを用いて対象

とする床版の劣化進展を推定する手法について提案する。

2. 輪荷重走行試験と FEM 解析によるたわみの比較

2.1 輪荷重走行試験

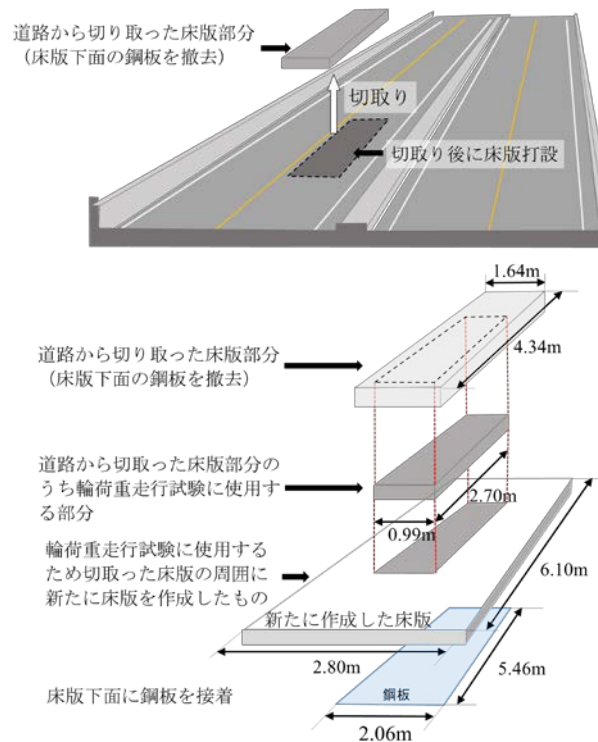


図-1 試験用の床版の切り取り

実橋の劣化した床版で輪荷重走行試験を実施するため、図-1のように、まず実橋から床版の一部(4,340×1,640 mm)を切り取り、一度成形(2,700×990 mm)した後、荷重試験用の寸法(6,100×2,800 mm)にするために切り取った床版の周囲に新たに同じ配合・配筋で鉄筋コンクリートを設置した。床版の底面に接着されていた鋼板は一旦切り取る前に取り外し、床版を上記のように成形後、再度床版の下部に新しい鋼板(厚さ4.5mm)を接着し試験を行った。鋼板の再接着時のアンカーボルトの位置は、以前に取り付けられている位置を避け設置した。なお、供試体を設置するにあたり、周囲4辺の支持条件を、橋軸方向(長辺)を単純支持、橋軸直角方向(短辺)は床版の連続性を再現するため弾性支持とした。

たわみ計設置位置およびAEトモグラフィ解析のための加速度センサの設置位置は図-2とし、加速度センサの設置は鋼板設置時に取り付けられたアンカーボルトの露出側の先端とし、最大90 cmの間隔で取り付けられた。

輪荷重走行試験では図-3に示すように157 kNから19.6 kNずつ段階的に荷重を増加させ、各荷重で4万回走行させた。試験の結果、255 kNの荷重に変更した直後の試験開始から200,517回で床版全体が破壊するに至った。

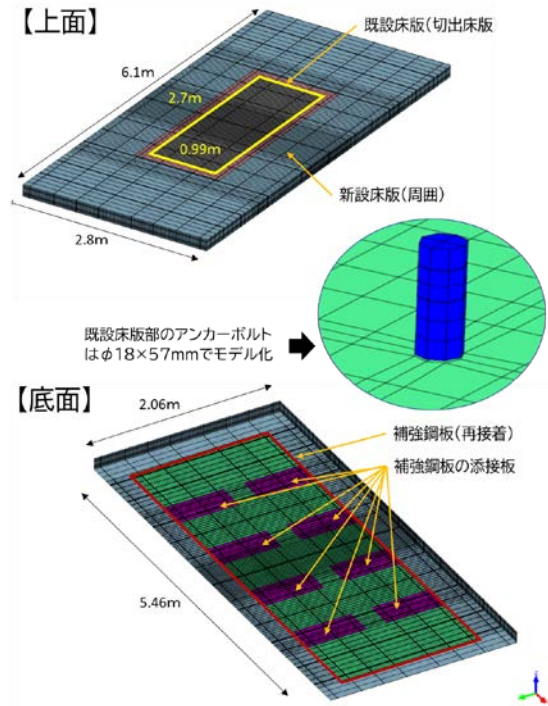


図-4 FEM 解析モデル

2.2 FEM 解析の実施と輪荷重走行試験結果の比較

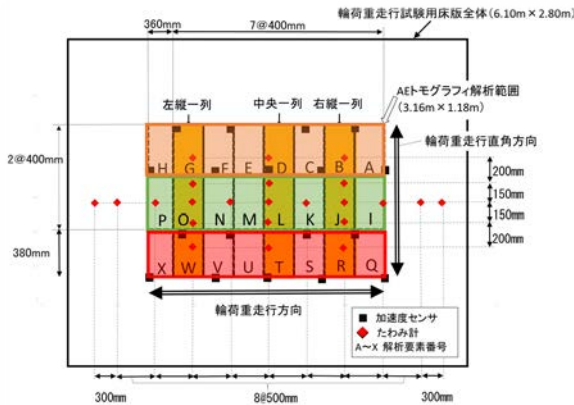


図-2 加速度センサとたわみ計測位置

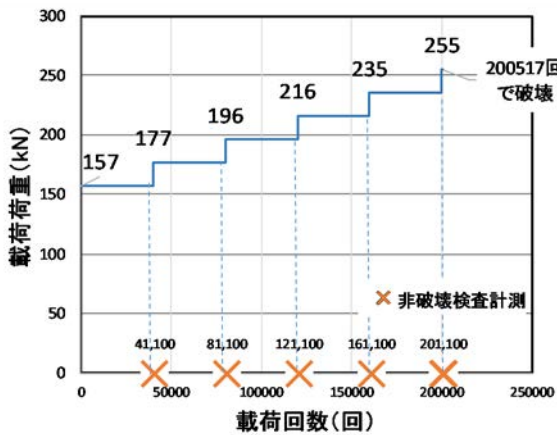
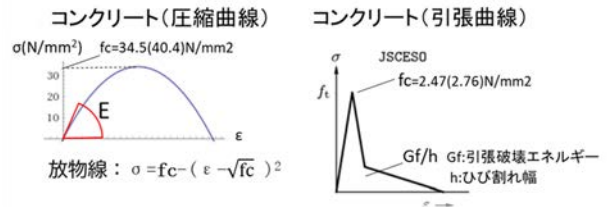


図-3 輪荷重走行試験の荷重ステップ

【コンクリート】

モデル	弾塑性ひび割れモデル	
	既設(切取部)	新設(周囲)
ヤング係数	29350 N/mm ²	30480 N/mm ²
圧縮強度	34.5 N/mm ²	40.8 N/mm ²
ポアソン比	0.2	0.2
圧縮曲線	放物線	放物線
圧縮破壊エネルギー	52.06 N/mm	56.21 N/mm
引張軟化曲線	JSCE引張軟化	JSCE引張軟化
Mode-I 引張破壊エネルギー	0.0884 N/mm ²	0.0934 N/mm ²
引張強度	2.47 N/mm ²	2.76 N/mm ²
せん断伝達モデル	一定	一定
せん断伝達係数	0.05	0.05



【鉄筋、アンカーボルト、鋼板】

モデル	バイリア弾塑性モデル
ヤング係数	20000 N/mm ²
ポアソン比	0.3
蘇生モデル	Von Mises塑性モデル
軟化曲線	全ひずみ-降伏応力
硬化仮定	ひずみ硬化
硬化タイプ	等方硬化
降伏応力	345 N/mm ²

図-5 FEM 解析の材料特性値

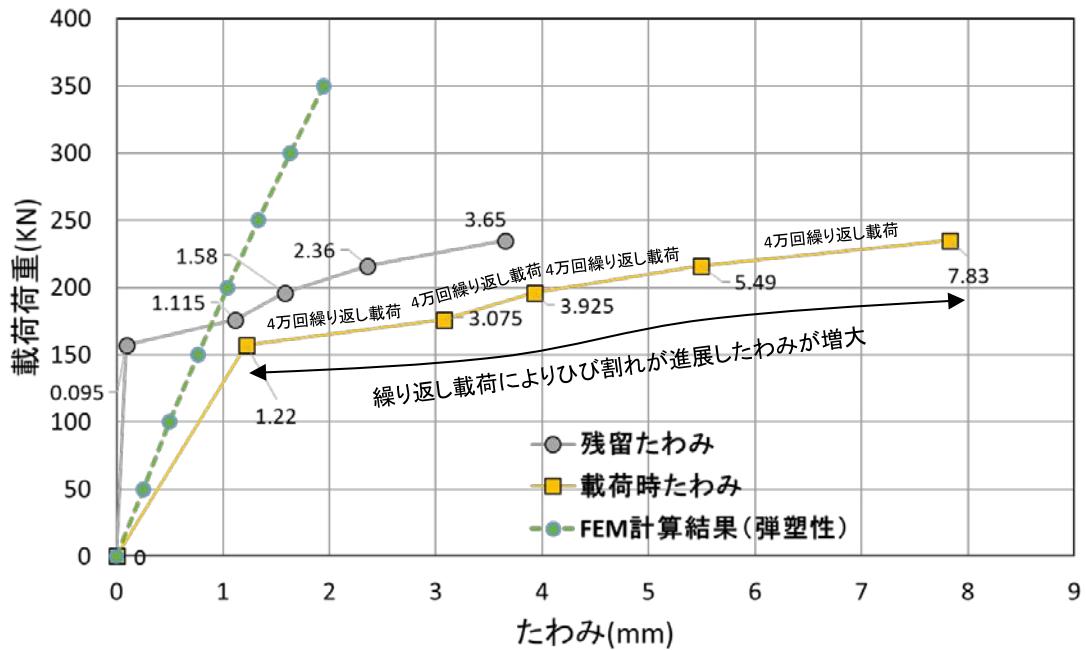


図-6 輪荷重載荷試験と FEM 解析によるたわみとの関係

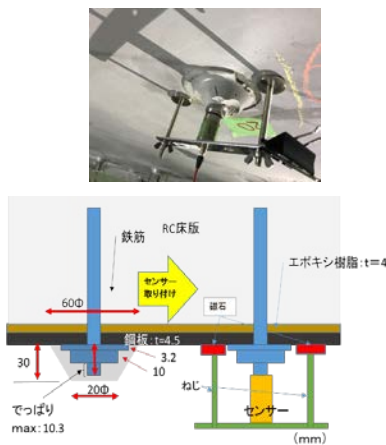


図-7 加速度センサの取付け

今回対象とした試験床版を模した FEM 解析モデルを作成し、計算で得たたわみと輪荷重走行試験で得られたたわみと比較した。FEM 解析モデルには、輪荷重走行試験で作製した試験床版と同様に、鉄筋および鋼板（添接版を含む）および、鋼板接着のためのエポキシ樹脂（厚さ 4.0mm）を配置し解析を行った。（図-4, 5 参照）

図-6 に FEM 解析結果と輪荷重走行試験で得られたたわみとの比較を示した。これを見ると、177 kN から載荷荷重が大きくなるに従い FEM 解析結果と輪荷重走行試験の差が大きくなるのがわかる。この差は繰返し載荷によるひび割れの進展、拡大により床版コンクリートの連続性が失われたことによるものと推察される。

また、各荷重除荷時の残留たわみも載荷重の増に伴い大きな値を示していることも床版全体の破壊に向けひび割れが拡大しているためと考えられる。

3. AE トモグラフィ解析

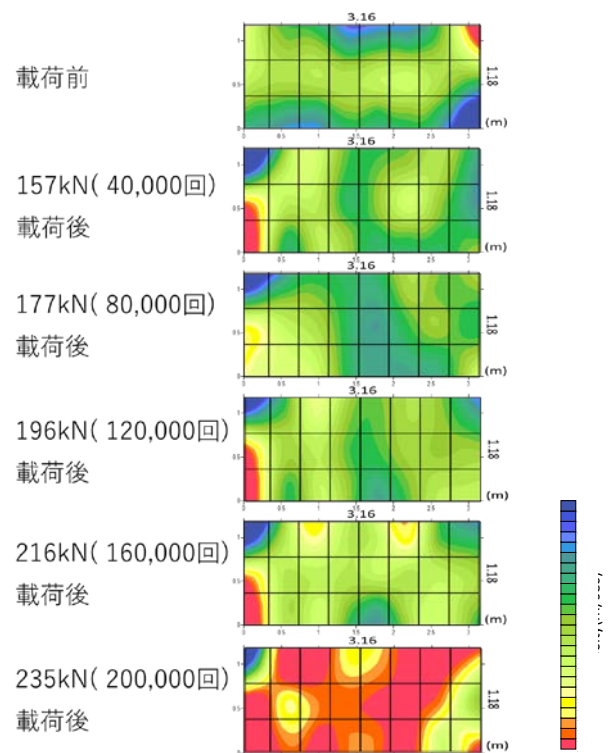


図-8 AE トモグラフィ解析による速度分布図

3.1 計測手法

AE トモグラフィ解析を実施する際に使用したセンサは、床版底面に鋼板接着時に設置されたアンカーボルトの露出側の先端に設置した。その様子を図-7 に示す。センサの検出面とアンカーボルトの先端との接触媒質にはグリースを用い、マグネットを有した治具により安定

した圧着力を得た。センサは、周波数応答が 3 Hz～12 kHz の圧電型加速度センサ (TEAC 製, 707IS) を用い、検出波形は、ワイドバンドレコーダ (TEAC 製, WX-7000) により、200 kHz のサンプリングレートで連続的に記録を行った。得られた波形の振幅に対し、AE 波を抽出し、AIC (赤池情報量規準) ⁴⁾により各 AE 波の到達時間をセンサ毎に求め、AE ヒットの到達時間を抽出した。その後、到達時間差が 1 ms (イベント継続時間) 以内にヒットしたものを AE イベントとしてグループ化することで、最終的に AE 源から励起された AE 波を受信したセンサとその到達時間の組み合わせとしてデータを得た。

3.2 解析結果

トモグラフィ解析により得られた弾性波速度分布を図-8に示す。解析した範囲は、図-2のA～Xの解析要素の範囲 (1180mm×3160mm) である。この結果より、載荷荷重が 196 kN までは弾性波速度の大きな低下は認められないが、載荷荷重が 235 kN に移行した段階で弾性波速度の低下が認められた。なお、次の載荷荷重である 255 kN でたわみが急激に増加し、床版底面の鋼板が完全に浮き落下する直前で試験を終了した。

4. AE トモグラフィ解析による弾性波速度と輪荷重走行試験によるたわみの関係

輪荷重走行試験の各荷重段階での弾性波速度と床版の破壊の進展とともに増大するたわみとの関係を検証する。

輪荷重走行試験では、各載荷荷重による図-8の0kNを除く157kN, 177kN, 196kN, 216kN, 235kNの5段階の静的載荷後のたわみと弾性波速度を比較した。一方、図-2に示すようにAEトモグラフィ解析のメッシュを24か所に分け、輪荷重走行方向の3列についてそれぞれの



図-9 弾性波速度と載荷荷重の関係

解析メッシュの弾性波速度と解析メッシュ内にあるたわみゲージで計測したたわみの関係を図-9に示した。

次に、AE トモグラフィ解析メッシュごとに載荷終了後の弾性波速度とたわみの関係を図-10に示す。これにより、繰り返し載荷回数と荷重の増大による劣化が進むにつれて、一定に弾性波速度が低下していくことが判る。

5. 劣化係数による劣化進展評価

前章で示したように、輪荷重走行試験による床版の劣化に伴って弾性波速度が低下することに注目すると、弾性波速度の変化から対象とする床版の劣化進展の程度や耐力を推定することが可能と考えた。

床版を連続体としてとらえた場合、疲労による劣化が進み、例えばひび割れなどの不連続な個所が増加すれば連続体を扱う FEM 解析では計算できない変位が生じるため、実際の床版のたわみが FEM 解析で計算した値よりも大きくなるのではないかと考えられる。

一方、非破壊試験で取り扱う弾性波速度は床版内部のひび割れが拡大進展した場合、その直線伝播経路が遮断され迂回をするものと考え結果として弾性波速度が遅くなると考えられている。そのイメージを図-11に示す。

ここで、損傷力学におけるスカラー損傷パラメータ Ω を導入すると、弾性係数 E の関係式は、次式ようになる。

$$\Omega = 1 - \frac{E}{E^*} \quad (5a)$$

ここに、E: 損傷を受けた材料の有効弾性係数、 E^* : 健全な材料に相当する弾性係数とする。図-12に示すように、輪荷重走行試験における床版の載荷荷重をたわみで除した

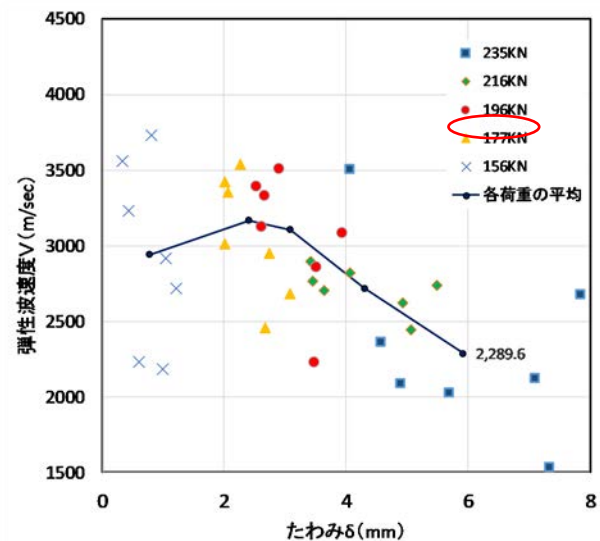
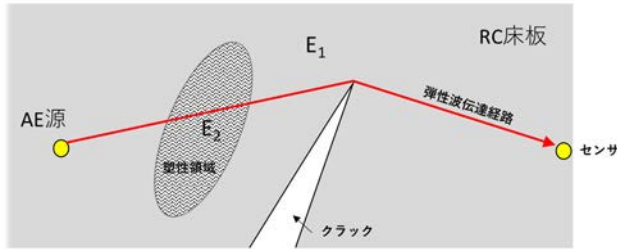


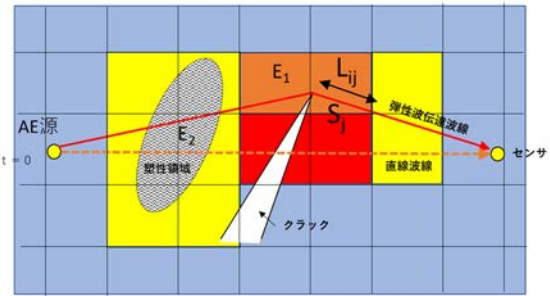
図-10 床版のたわみと弾性波速度

【連続体での弾性波の伝播】



$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

【AETモグラフィ解析での弾性波の伝播】



スローネス : $s = \frac{1}{V}$ (v:速度) $\rightarrow t_i = \sum_{j=1}^N S_j L_{ij}$

図-11 弾性波伝播の考え方

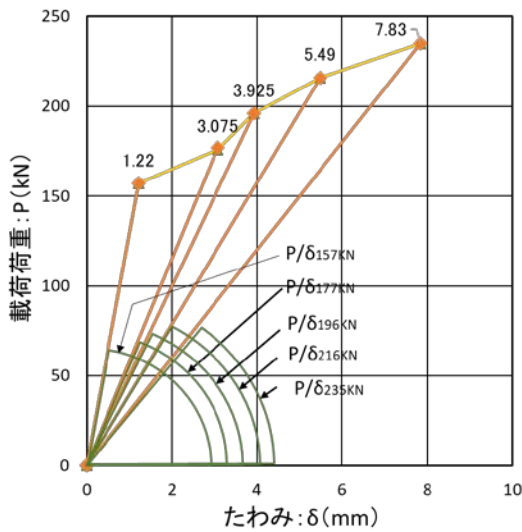


図-12 各載荷荷重の P/δ

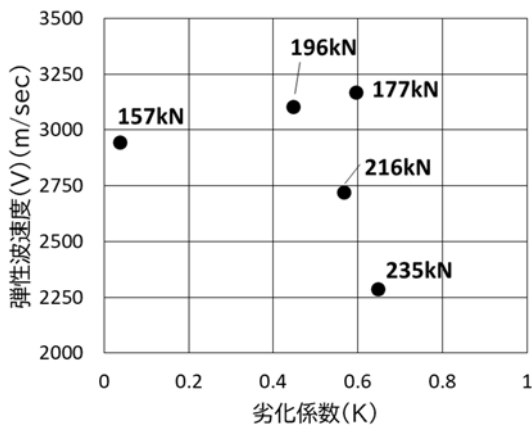


図-13 試験床版の劣化係数と弾性波速度の関係

もの (P/δ) を床版の剛性の変化とし、見かけ上、弾性係数の低下で変化が現れると考え、床版全体の損傷進行による剛性の変化を次式の劣化係数 K と定義する。

$$K = 1 - \frac{P/\delta}{(P/\delta)^*} \quad (5b)$$

ここに、P/δ を損傷進行した床版材料の剛性、(P/δ)* を損傷のない (健全な) 床版材料に相当する剛性とする。

図-13 に、輪荷重走行試験における弾性波速度と荷重載荷による劣化係数 K の関係を示す。劣化係数 K は 2 ステップ目の 177kN 載荷時から 0.4 を超え、最終破壊直前の 235kN では 0.6 を超えている。

6. AE トモグラフィ解析から求まる弾性波速度による劣化進展評価

ここでは、床版の変形を表すたわみと内部を伝搬する弾性波速度の関係について明らかにするとともに、弾性波速度による床版の劣化評価について考察する。

一般に矩形の床版の中央部に矩形の範囲に荷重を加えると、中央でのたわみ δ は以下の式 (6a) により求まる⁹⁾。

$$\delta = \frac{\alpha}{E} \left(\alpha = \frac{q_0 a^3}{1} \frac{12(1-\nu^2)}{h^3} (b > a) \right) \quad (6a)$$

ここに、q₀ は床版中央の分布荷重、a、b は床版の短辺と長辺、h は床版の厚さ、ν はポアソン比、E はヤング係数である。

また、連続体の内部で伝わる弾性波の速度は以下のよう¹⁰⁾に求まる。

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \beta \sqrt{E} \quad (6b)$$

ここに、

$$\beta = \sqrt{\frac{1-\nu}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (6c)$$

以上の2式を式(5b)に適用すると、

$$K = 1 - \frac{\alpha_0}{\alpha} \frac{\beta_0^2}{\beta^2} \frac{V^2}{V_0^2} \quad (6d)$$

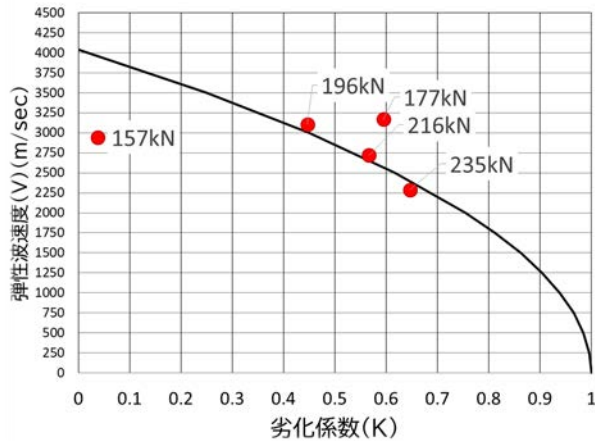


図-14 劣化係数と弾性波速度の関係

さらに、弾性波速度 V を劣化係数で表すと、次式になる。

$$V = V_0 \sqrt{1-K} \cdot \frac{\alpha}{\alpha_0} \frac{\beta^2}{\beta_0^2} \quad (6e)$$

ここに、劣化により密度およびポアソン比が劣化係数により変化しないと考えると、次式になる。

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} \frac{\beta^2}{\beta_0^2} = \frac{\rho_0(1-\nu)^2(1-2\nu_0)}{\rho(1-\nu_0)^2(1-2\nu)} = 1 \quad (6f)$$

すなわち、式(6d)、(6e)はそれぞれ以下となる。

$$K = 1 - \frac{V^2}{V_0^2} \quad (6g)$$

$$V = V_0 \sqrt{1-K} \quad (6h)$$

以上より、弾性波速度は劣化係数で定まり、劣化係数は弾性波速度により定まることになる。弾性波速度と劣化係数の関係は図-14の曲線のようになり、前述の輪荷重走行試験における弾性波速度と荷重载荷による劣化係数 K の関係が近似していることがわかる。(弾性波初期値 V_0 には同時期に施工された隣接部の健全な床版から得られた弾性波速度 4,050m/sec を使用した)

このように、式(6f)、(6g)により非破壊検査手法による AE トモグラフィ解析で求められる弾性波速度のみから底面に鋼板接着された床版の劣化状況の評価することが可能となり、弾性波速度と劣化係数の関係が定まれば、裏面のクラック状態が補強鋼板などにより補強等がなされたために外観から劣化評価できない床版の健全性が評価可能となる。

7. 結論

本研究では、輪荷重走行試験においてたわみ計測に加

えて、アンカーボルトの露出側の先端に AE センサを設置し、AE トモグラフィ解析を行うことで、底面に鋼板接着補強が施され、外部から底面のひび割れ状況が把握できない床版でも、内部劣化の進展を評価できることを示した。

また、損傷力学における損傷パラメータから床版の劣化進展に関する劣化係数 K を導入し、AE トモグラフィ解析により得られた弾性波速度分布だけで床版の劣化進展を評価できる手法を提案した。

この方法によれば、交通規制や通行止めによる微破壊などを実施することなく床版底面からの非破壊検査法により劣化状況を定量的に評価することができ、鋼板接着補強床版の更新・修繕を判断する手段として有効に活用できるものと考えている。

謝辞

本論文の執筆にあたり、京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻の橋本勝文特定准教授、奥出信博特任助教に多大なるご協力を賜りました。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 塩谷智基, 麻植久史, 西田孝弘, 宮田弘和: AE 法および AE トモグラフィにより推定された実橋梁 RC 床版の損傷検証, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp. 2085-2090, 2016.
- 2) Yoshikazu Kobayashi, Tomoki Shiotani: Computerized AE Tomography, Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 239-MCM, Springer, pp.47-68, 2016.
- 3) 茅野茂, 塩谷智基, 西田孝弘, 橋本勝文, 宮川豊章: 鋼板接着補強された RC 床版の AE トモグラフィによる損傷評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 17 巻, pp.291-296, 2017.10
- 4) Hirotugu Akaike: Markovian representation of stochastic processes and its application to the analysis of autoregressive moving average processes, Annals of the Institute of Statistical Mathematics Vol.26, No.1, pp. 363-387, 1974.3
- 5) 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論—構造物の診断と破壊現象解析—森北出版, pp. 44- 49, 2005.
- 6) S.P チモシェンコ (長谷川節訳): 板とシェル理論 <上>, プレイン図書, 1981.8.

(2020年7月17日受付)