局所振動試験法を活用した機械学習モデルによるRC部材の浮き検知に関する実験的検討

Ruben VARGAS [1]・池野　勝哉[2]・内藤　英樹[3]・木本　智幸[4]

[1] 正会員　五洋建設株式会社　技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: ruben.vargas@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)
[2] 正会員　五洋建設株式会社　技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
[3] 正会員　東北大学　大学院工学研究科（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06）
[4] 大分工業高等専門学校　電気電子工学科（〒870-0152 大分県大分市大字牧 1666 番地）

かぶりコンクリートの浮きは，RC 構造物の安全性および耐久性に深刻な影響を与えるため，早期発見と適切な補修が不可欠である．本研究では，著者らが開発に取り組んでいる局所振動試験法を活用し，オートエンコーダを用いた機械学習モデルによる RC 部材の浮き検知の適用性を実験的に検討した．浮きを模擬した RC 試験体による実験の結果，浮きと反対側の面からの検査にもかかわらず，機械学習モデルにより浮きの位置を概ね捉えられることができ，本手法が浮き検知に有効な手法の一つであることが示された．

Key Words : *RC structures, concrete delamination, localized vibration, machine learning*

1.　はじめに

港湾のRC構造物は過酷な塩害環境に暴露されており，建設後数十年を経た後，著しく劣化が進行する場合が多い[注1)]．桟橋上部工の主な劣化要因の一つは，塩害による鉄筋腐食であり，腐食生成物によって周囲のコンクリートに大きな引張応力が発生し，ひび割れやかぶりコンクリートの浮きが発生する．とりわけ，かぶりコンクリートの浮きは，RC構造物の安全性および耐久性に深刻な影響を与え，進行すると広範囲に及ぶため[1)]，早期発見と適切な補修が不可欠である．

近年では高性能センサがコンクリート構造物に埋め込まれ，ヘルスモニタリングが行われる事例[2)]が増えているが，大多数の既存インフラにはセンサが設置されておらず，コンクリート構造物の浮き点検は，検査員による目視や打音検査によって行われている．しかし，これらの方法は検査員の熟練度に依存するため客観性に欠けること[3)]や，ここ最近の担い手不足による熟練検査員の確保が困難といった問題点が指摘できる．さらには，桟橋下面や橋梁下面における検査員の安全性についても課題となる場合がある．そのため，広範なRC構造物の健全性を客観的かつ安全に調査できる技術が望ましい．

著者らは，動電式の小型加振器を用いたRC部材の非破壊試験法（以下，局所振動試験法）の開発に取り組んでいる[4),5)]．**図-1**に局所振動試験法の概念図を示す．この手法は，小型加振器で幅広い周波数帯を含むホワイトノイズを与え，得られた応答加速度をフーリエ解析して，周波数応答関数に変換する．RC部材内部に損傷がある場合には，ひび割れ・空洞周りの波の回折や反射によって，周波数応答関数は健全状態から変化する．著者らはこの変化に着目し，ピーク周波数である共振周波数の低下から異常検知する手法[4),5)]（以下，従来法）や，周波数応答関数の全体変化を捉える機械学習モデルによる手法[6)]を提案している．既往研究では，これらの手法を用いて試験体載荷による曲げとせん断ひび割れへの適用性を確認しているが，浮きに対する検討は未だ行われていない．

桟橋上部工におけるかぶりコンクリートの浮きは，主として部材の下面に発生する場合が多いため，局所振動試験法によってこれらの上面から検知することができれば，検査員の安全性向上や効率的かつ客観的な調査を実現できるものと考えられる．そこで，本研究では局所振

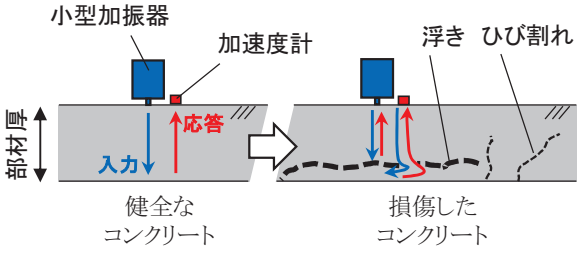


図-1　局所振動試験法の概念図

動試験法を用いたかぶりコンクリートの浮き検知に関する基礎的実験を実施し，従来法および機械学習モデルによる異常検知手法の適用性を検討した．

2. 局所振動試験法を用いた異常検知手法

(1) 共振周波数の変化に着目した従来法

従来法[4), 5)]では縦振動の共振周波数の低下に着目して，部材の健全性を評価している．部材厚さ方向の重複反射波が励起されたとき，健全状態における1次の共振周波数は，近似的に両端自由の棒部材の縦振動の式(1a)および式(1b)で算定される．

$$f_0 = \frac{c}{2L} \tag{1a}$$

$$c = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \tag{1b}$$

ここで，f_0は共振周波数，cは見掛けの音速，Lは振動長さ，E_dは動弾性係数，ρは密度である．局所振動試験法で一般的に用いられる周波数範囲（500～20,000 Hz程度）では，鉄筋や骨材寸法の影響は比較的小さいため，鉄筋の影響を無視して，コンクリートの物性値（E_dとρ）のみを与えてもよい．

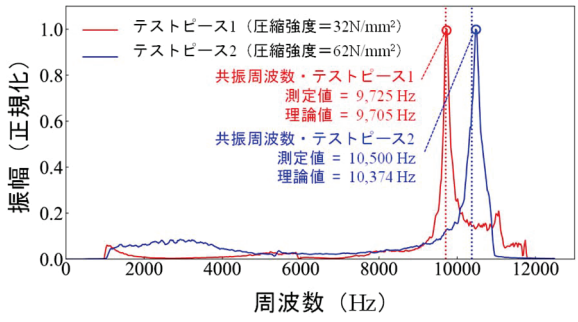


図-2 コンクリート試験片における局所振動試験

一例として，直径100 mm×高さ200 mmのテストピース（圧縮強度32 N/mm², 62 N/mm²）に対して局所振動試験を実施し，得られた周波数応答関数を図-2に示す．図中の共振周波数は，式(1a)および式(1b)から算出される理論値と良好に対応しており，共振周波数の低下に着目した従来法の適用性が確認できる．しかし，実構造物では部材側面からの反射の影響や，様々な部材形状と拘束条件等により周波数応答関数に複数のピークが存在するため，実務的に共振周波数といった単一の指標に基づく健全性の評価は難しい場合が多い．

(2) 機械学習モデルによる手法

著者の一人である内藤ら[6)]は，共振周波数の低下ではなく，周波数応答関数の全体変化に着目し，健全状態のデータから特徴量を抽出することでRC部材の健全性を評価する手法として，オートエンコーダを用いた機械学習モデルを提案している．オートエンコーダは，中間層のノード数を減らして次元削減（エンコード）を行い，逆処理によって元の次元データを再構成（デコード）するように学習する，教師なし学習型のニューラルネットワークである．オートエンコーダが，健全状態の周波数応答関数のみを学習するため，学習済みオートエンコーダは健全データのみ再構成ができるが，損傷データは再構成できない．この性質を利用して，対象RC部材の測定データを学習済みオートエンコーダに入力し，入力層と出力層の再構成誤差より異常度を求め評価する．

本研究で使用したオートエンコーダの構成を図-3に示す．3 層のエンコード層によって入力データの次元を1/2ずつ段階的に削減し，その後，3 層のデコード層によって元の次元に再構成する．入力層と出力層は同じノード数(512)を持ち，これは局所振動試験から得られる周波数応答関数のデータ点数に対応している．入力データは，局所振動試験法により取得した周波数応答関数を一次元データとして扱い，周波数分解能を25 Hzとし，試験体の理論共振周波数を十分に包含する0～12,800 Hz（512パラメター）の範囲を対象にした．学習データは，周波数応

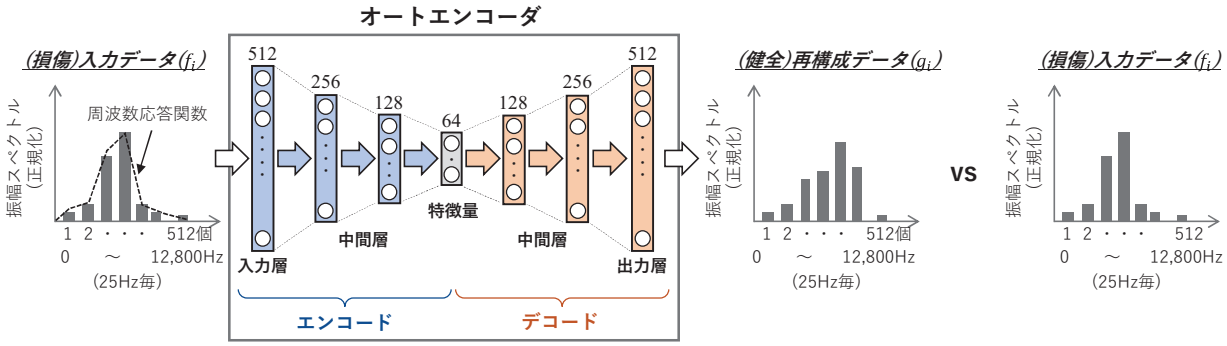


図-3 オートエンコーダの構成

答関数の振幅を最大値で正規化することで，コンクリート表面の接触状態の差異，測定者の技量差，および小型加振器や加速度計の個体差に起因する測定のバラつきを抑制した．学習データは，周波数応答関数f_i $(1 \leq i \leq 512)$をf_{i-s} $(1 \leq i \leq 512, -2 \leq s \leq 2)$へコピーして周波数軸方向にずらすことで，データ数を5 倍にかさ増しした．学習にはAdam最適化アルゴリズムを使用し，学習係数は0.001，ミニバッチサイズは16，最大エポック数は500に設定した．また，周波数応答関数は急峻な多峰性を有しているため，オートエンコーダに入力される周波数応答関数と再構成された周波数応答関数のピーク周波数がわずかにずれるだけでも，再構成誤差として評価されてしまう懸念があった．そこで，移動平均を用いて周波数応答関数のピークを滑らかにし，ノイズ処理として周波数応答関数のピーク値から5 %を差し引いた値が負値となる成分をゼロとして処理した．入力する周波数応答関数f_i $(1 \leq i \leq 512)$, および出力される再構成周波数応答関数をg_i $(1 \leq i \leq 512)$より，式(2)に示す異常度eを定義した[6]．

$$e = \frac{\sum_{i=1}^{512} |f_i - g_i|}{\sum_{i=1}^{512} |g_i|} \tag{2}$$

3. 浮きを模擬したRC試験体による検討

RC部材の浮き検知の適用性を確認するため，浮きを模擬したRC試験体（計9 体）を製作し，浮きを設けた面と反対側に加振器を設置し，局所振動測定を行った．得られた周波数応答関数から従来法および機械学習モデルの2種類の異常検知手法を用いて，RC試験体の浮き検知を試みた．

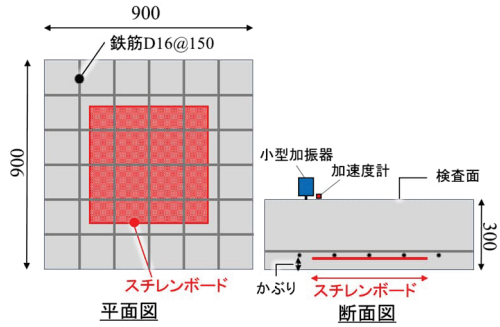


図-4　試験体の概要（単位：mm）

表-1　かぶりやスチレンボードの配置

試験体	スチレンボード寸法（mm）	かぶり c_v（mm）
1	-	100
2	200 x 200 x 3	25
3	200 x 200 x 10	25
4	200 x 200 x 3	100
5	200 x 200 x 10	100
6	500 x 500 x 3	25
7	500 x 500 x 10	25
8	500 x 500 x 3	100
9	500 x 500 x 10	100

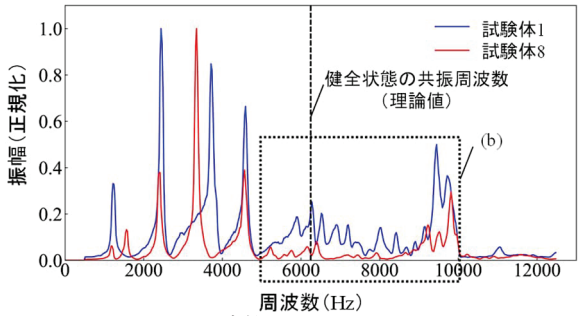
(1)　試験体の概要

浮きを模擬したRC試験体の概要図を図-4，試験因子を表-1に示す．試験体は900 mm×900 mm×300 mmであり，メッシュ鉄筋としてD16を150 mmピッチで配置した．

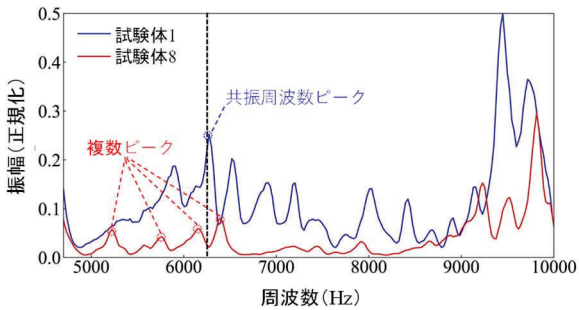
実桟橋の調査では，コンクリートのかぶり厚さは50～100mmの範囲で分布しているとの報告がある[7]が，昭和59年に通達された「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」等の関連規定の導入・改定以前に建設された港湾構造物では，この範囲を下回る事例も存在すると指摘されている[8]．そこで，コンクリートのかぶりを極端に小さい25 mmと一般的な100 mmの2種類に設定した．なお，鉄筋の材質は全てSD345であり，コンクリートの目標圧縮強度は24 N/mm^{2}である．鉄筋下に，200 mm×200 mmおよび500 mm×500 mmのスチレンボード（厚さ3 mmおよび10 mm）を予め埋め込み，コンクリートを打ち込むことで浮きを模擬した．

(2)　共振周波数の変化に着目した手法（従来法）

図-5(a)および(b)に，試験体1および試験体8の中央で測定した周波数応答関数を示す．試験体1では，部材の境界からの反射の影響により複数のピークが存在し，周波数応答関数から共振周波数を一意的に求めることができな



(a)　周波数帯　0 – 12,800 Hz



(b) 拡大した周波数帯　5,000 – 10,000 Hz

図-5　試験体中央の周波数応答関数（試験体 1，試験体 8）

かった．しかしながら健全な試験体であるため，共振周波数に相当するピークは，式(1a)および式(1b)を用いて算出した理論値近傍に特定できる．また，浮きを模擬した試験体8も，周波数応答関数に複数のピークが見られる．これは試験体1と同様に，部材境界からの反射の影響に加え，部材内部の浮きの影響も受けているためと考えられる．実務において局所振動試験を適用することを想定すると，部材内部の浮きの有無やその範囲については事前情報として得ることができず，異常を含んだ状態の理論値を取得することは事実上不可能である．半無限を仮定できる道路床版のように，部材厚さに対して境界条件の影響を受けにくい部材であれば，従来法による異常検知が可能である[9]．しかし，桟橋上部工は梁－床版といった複合部材で構成されており，境界条件の影響を受けやすく，従来法によって共振周波数を客観的に特定することは難しいと考えられる．そこで本研究では，境界条件の影響を受けやすい平面サイズの試験体を用いて，従来法に加えて，後述する機械学習モデルによる浮き検知の適用性を検討した．

(3) 機械学習モデルによる手法

健全な試験体1から各側線において約1.5cm間隔で40点の測定データ（合計200点）を取得し，オートエンコーダ

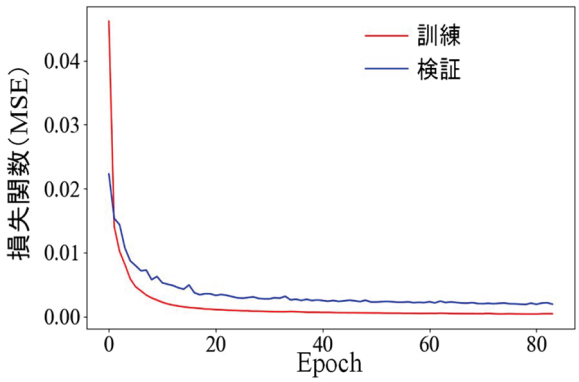


図-6　オートエンコーダ学習における損失関数

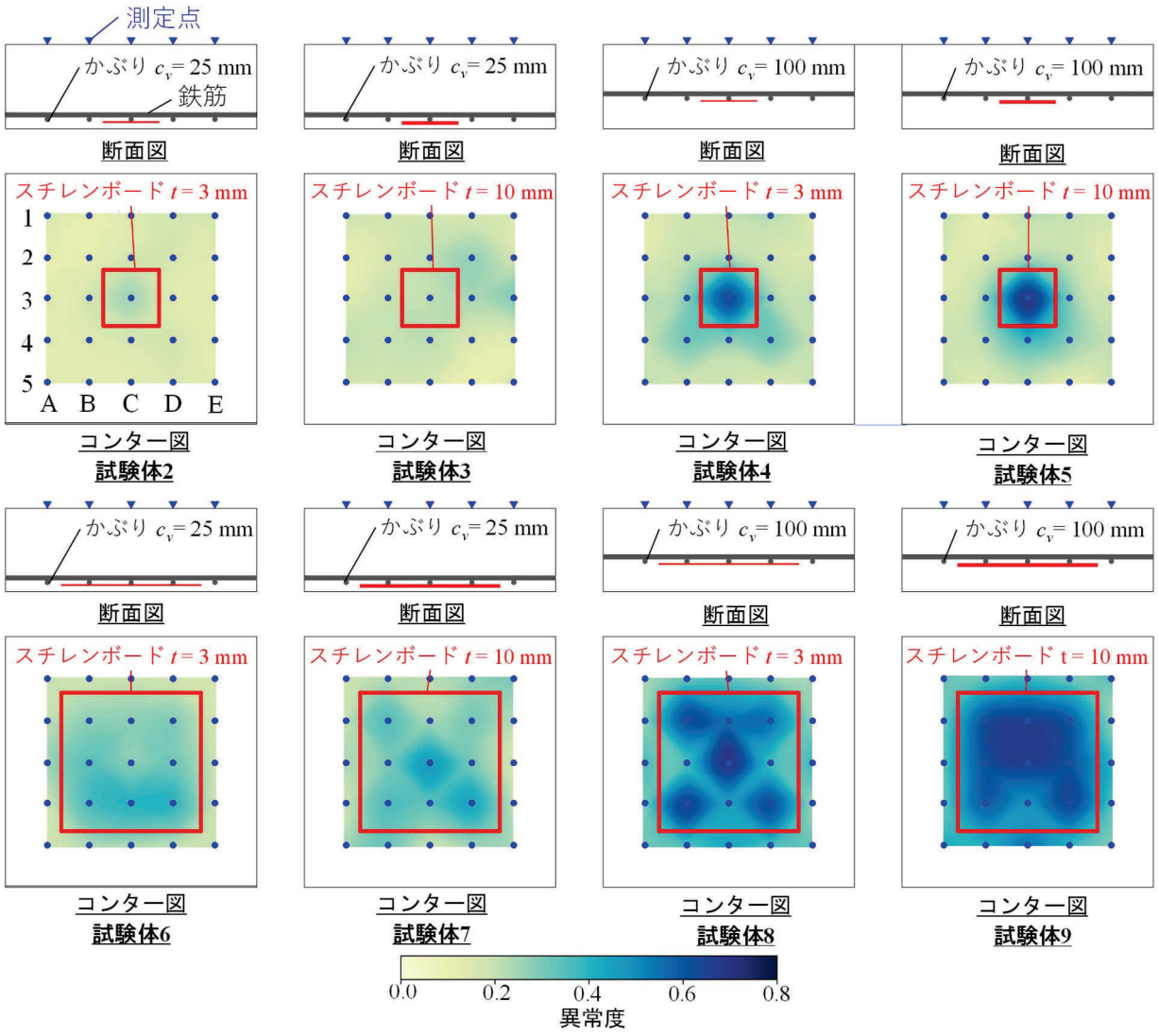


図-7　試験体の異常度分布

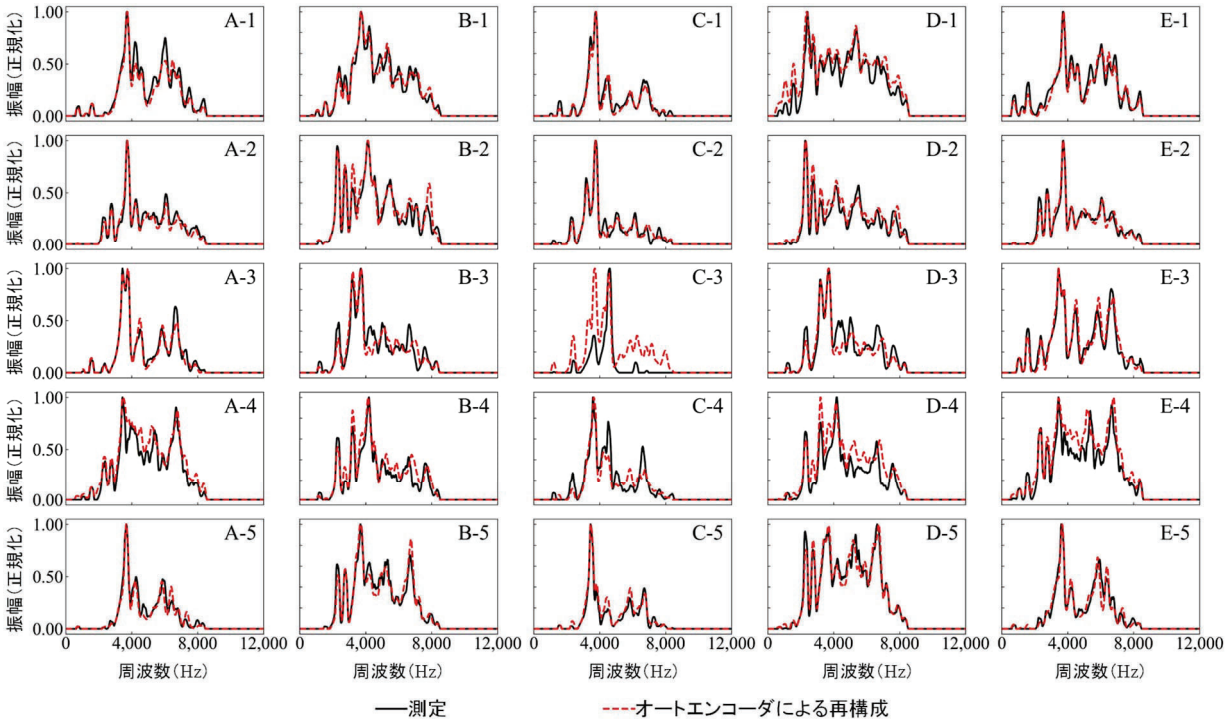


図-8　再構成された周波数応答関数の比較（試験体5）

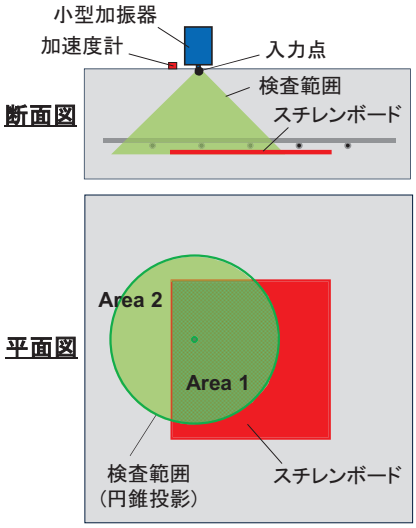


図-9　検査範囲のイメージ

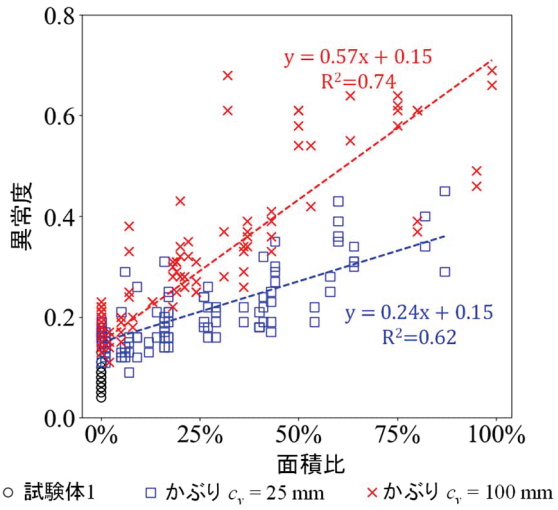


図-10　面積比と異常度の関係

を構築した．損失関数（平均二乗誤差MSE）の推移を図-6に示すが，概ねエポック80で損失関数が十分小さく収束しており，過学習の傾向は見られない．

試験体上面を25点，グリッド状に局所振動試験法による測定を行い，上述の学習済みオートエンコーダを用いて式(2)より各試験体の異常度eを評価した．その分布を図-7に示す．図-7より，異常度の分布は概ね浮きの位置を捉えており，本手法によって浮き（下面）の反対側（上面）から検査しても検知できる可能性が示された．一方，試験体2および3のように浮きの範囲が狭く，かつかぶりが比較的小さい場合は，正確な識別は難しい結果となった．

一例として試験体5に着目し，オートエンコーダによる機械学習モデルで再構成された周波数応答関数を測定データと比較して図-8に示す．異常度の低い測定点（例えば，浮きから最も離れているA-1点）では，測定データと再構成データは概ね整合しており，オートエンコーダによって測定データを再構成できている．一方，異常度の高い測定点（例えば，浮きの直上にあるC-3点）は，測定データを再構成できないため，測定データとの誤差が大きくなり異常度が高く評価される．

4.　機械学習モデルの考察

コンクリートが均質な弾性体であれば，局所振動試験法は入力点を頂点とし，その点から厚さ方向におおよそ

45度の角度で広がる円錐状の検査範囲を持つものと仮定できる．検査範囲のイメージを**図-9**に示す．その場合，RC試験体の測定点がスチレンボードの直上にない場合でも，この円錐状の検査範囲内にスチレンボードの一部が含まれていれば，異常検知が可能となる．

そこで, 検査範囲内のスチレンボードの面積比（以下，面積比）と，機械学習モデルによる異常度との関係を**図-10**に示す．ここで，面積比は，スチレンボードがその平面で検査範囲の円錐と重なる部分の面積（*Area* 1）を，検査範囲の円錐底面の面積（*Area* 1+*Area* 2）で除した値として定義した. オートエンコーダは健全な試験体1の測定データを用いて学習するため, 試験体1での測定点は全体的に低い異常度を示す．スチレンボードを埋め込んでいる試験体2～9について，面積比=0の場合の異常度平均（=0.15）を切片とし，決定係数（R^2）と一次係数を求めた．その結果，かぶり100 mmは25 mmと比較して，決定係数および一次係数ともに高く，より強い相関が認められた．一次係数に着目すると，かぶり25 mmは100 mmの場合よりも，同一の面積比で異常度の上昇が比較的小さいことが分かる．これは，かぶりが小さい場合は，浮きの体積（下面の断面欠損）が小さく，健全状態の応答に近い挙動を示すためと推察される．そのため，今後は機械学習モデルを用いた浮き検知に関する適用限界についての詳細な検討が必要である．

5. おわりに

本研究では, 模擬的に浮きを設けたRC試験体を対象に, 局所振動試験を実施した．測定は浮きを設けた面と反対側の面から行った．また，検知手法については，従来法と機械学習モデルによる浮き検知の適用性を検討した．本研究で得られた主な知見を以下に示す．

1) 従来法は，部材の境界や内部損傷からの反射の影響により周波数応答関数に複数のピークが存在する場合には，共振周波数といった単一の指標のみに基づくRC部材内部の異常検知は難しい．
2) オートエンコーダを用いた機械学習モデルは，かぶりコンクリートの浮きを異常度として検知できることを確認した．異常度の分布は，概ね浮きの平面位置を捉えており，浮きと反対側（上面）から検査しても検知できる可能性が示された．
3) 異常度は，浮きの位置と寸法に依存し，検査範囲のスチレンボード面積比と異常度の間には相関が認められた．ただし，かぶりが小さい場合には，機械学習モデルによる浮き検知の適用が難しいと考えられ，浮き検知に関する適用限界についての詳細な検討が必要である．

本研究により，オートエンコーダを用いた機械学習モデルが, RC部材の浮き検知に有効な手法の一つであることを確認した．しかし，本研究における検証は，スチレンボードを埋め込んだ試験体のみであり，更なる検証が必要である. また, 機械学習モデルを実構造物に適用し，部材を構成する境界条件や材料特性の影響，および様々な劣化状態に対する適用性を検証し，より実務的な手法へと改良する予定である．その際，実構造物における学習データは，新設構造物では施工完了後に健全データを取得することができるが，既設構造物の場合，事前かつ大量に健全データを入手することができない. そのため, 今後は学習アプローチに関する検討も合せて実施する予定である．

NOTES

注1) 国土交通省：社会資本の老朽化対策情報ポータルサイト，「社会資本の老朽化の現状と将来」https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html（参照 2025. 3. 18）

REFERENCES

1) 小牟禮 建一, 濱田 秀則, 横田 弘, 山路 徹：RC 桟橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発，コンクリート工学論文集，15 巻，1 号，p. 13-22，2044. [Komure, K., Hamada, H., Yokota, H. and Yamaji, T.: A model expressing deterioration progress of RC wharves damaged by chloride attack, *Journal of Concrete Engineering*, Vol. 15, Issue 1, pp. 13-22, 2004.]
2) Katam, R., Kumar, V. D. and Kalapatapu, P.: A review on structural health monitoring: past to present, *Innovative Infrastructure Solutions*, Vol. 8, Art. Numb. 243, 2023.
3) Graybeal, B. A., Rolander, D. D., Phares, B. M., Moore, M. E. and Washer, G. A.: Reliability and Accuracy of In-Depth Inspection of Highway Bridges, *Transportation Research Record*, Vol. 1749, Issue 1, 2001.
4) 内藤英樹, 小林珠祐, 土屋祐貴, 杉山涼亮, 山口恭平, 早坂洋平, 安川義行, 鈴木基行：局所振動試験に基づく道路橋 RC 床版の内部損傷評価, 土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）, 73 巻, 2 号, pp. 133-149, 2017. [Naito, H., Kobayashi, S., Tsuchiya, Y., Sugiyama, R., Yamaguchi, K., Hayasaka, Y., Yasukawa, Y. and Suzuki, M.: Damage identification for RC bridge deck based on local vibration test, *Journal of JSCE E2*, Vol. 73, Issue 2, pp. 133-149, 2017.]
5) Naito, H., Sugiyama, R. and Bolander, J. E.: Local Vibration Testing and Damage Evaluation for RC Bridge Decks. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 146, Issue 9, 2020.
6) 内藤英樹, 木本智幸, 藤岡光, 藤倉修一, 運上茂樹：振動測定とオートエンコーダによる RC 部材の地震時損傷の検知, AI・データサイエンス論文集, Vol.3, No.J2, pp.134-144, 2022. [Naito, H., Kimoto, T., Fujioka, H., Fujikura, H. and Unjoh, S.: Seismic damage detection method for concrete structures using vibration measurement and autoencoder, *Journal of AI and Data Science JSCE*, Vol. 3, No. 2, pp. 134-144, 2022.].
7) 大即信明, 原茂雅光, 浜田秀則：桟橋コンクリート上

部工劣化実態概略調査報告，港湾技術研究所報告 No.617， pp. 1-29, 1988. [Otsuki, N., Haramo, M. and Hamada, H.: Survey on the deterioration of concrete superstructures of wharves in Japan, *Technical note of the Port and Airport Research Institute Ministry of Transport Japan*, No. 617, 1988.].

8) 藤井敦, 佐藤徹, 坂田憲治, 山路徹, 加藤絵万 : 港湾の施設の点検診断および補修技術等に関する技術資料，国土技術政策総合研究所資料 No. 933，2016. [Fujii, A., Sato, T., Sakata, K., Yamaji, T. and Kato, E.: Technical node on strategic maintenance of port and harbor facilities – Evaluation of inspection and repair techniques, *Technical note of National Institute for Land and Infrastructure Management*, No. 933, 2016.].

9) バルガスルベン, 池野勝哉, 前島拓, 岩城一郎 : 接合界面形状の違いに着目したプレキャスト PC 床版の耐疲労性試験，コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.2, pp.811-816, 2024. [Vargas, R., Ikeno K., Maeshima, T. and Iwaki, I.: Fatigue resistance tests of precast PC-slabs focusing on the difference of the joint interface geometry, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol. 46, No. 2, pp. 811-816, 2024.]

(Received February 4, 2025)
(Accepted May 15, 2025)

NON-DESTRUCTIVE DETECTION OF CONCRETE COVER DELAMINATION IN REINFORCED CONCRETE MEMBERS USING LOCALIZED VIBRATION TESTING AND MACHINE LEARNING

Ruben VARGAS, Katsuya IKENO, Hideki NAITO and Tomoyuki KIMOTO

Delamination of concrete cover has a significant impact on the safety and durability of reinforced concrete (RC) structures, making early detection and appropriate repair essential. This study experimentally investigates the applicability of the localized vibration testing method, combined with a machine learning model using an autoencoder, for detecting delamination in RC members. Experiments on RC specimens with simulated delamination confirmed that the machine learning model can overall capture the location of the delamination, demonstrating the effectiveness of this method as a viable technique for detecting delamination in RC members. It was also suggested that detection is possible even when inspecting from the surface opposite to the delamination, however, accurate detection for cases in which the cover depth is small was found challenging.