

論文 異常検知による打音検査手法の実物大試験体での適用性検討

新保 弘^{*1}・溝渕 利明^{*2}・尾関 智子^{*3}・野嶋 潤一郎^{*4}

要旨：打音検査の定量化・高度化は点検の自動化に必須の技術である。異常検知手法による汎化的な打音データの健全度評価手法について、既往検討では内部確認が難しい実構造物のデータによりその適用性評価を行ってきた。ここでは実物大の模型試験体の内部鉄筋を腐食膨張させながら提案手法による内部診断評価を行い、その結果をマイクロコアによる内部状態の確認結果と比較することにより、本手法の定量評価の検証を行った。その結果、本手法により評価される打音の異常度と内部ひび割れの状態には良好な相関関係が認められ、本手法によればコンクリート構造物の欠陥度を打音データにより定量的に評価できる可能性がある。

キーワード：打音検査, スカログラム, CNN, 異常検知, マハラノビス距離, 実物大モデル

1. はじめに

1.1 研究の目的

打音検査はコンクリート構造物の調査点検の基本技術であるが、その精度は打音技師の技量に依存する。さらに昨今の少子高齢化に伴う点検技術者の減少からも、打音検査を機械化・自動化するニーズは高い。打音検査を自動化するためには、まずその定量評価が必須である。ここでは筆者らが提案している機械学習に基づく異常検知手法を用いた打音データの定量評価手法について、実構造物を模擬した実物大試験体を製作し、内部鉄筋を腐食膨張させることで試験体内に徐々にひび割れを生じさせ、実構造物の劣化状態を模擬した上でその進行過程の打音データと最終状態での内部観察を行った。これに基づいて、現地構造物では困難な内部の損傷状態と本評価手法による評価を比較することにより、本手法によるコンクリート構造物の健全性評価方法の妥当性について、証を行う。

1.2 既往研究

打音検査の定量評価に関する研究は 1980 年代から着手されており、打音特性として共振周波数に着目した方法¹⁾、最大振幅値と周波数分布に着目した方法²⁾などが提案されてきた。

近年進展している機械学習の適用手法として、江本ら³⁾はスペクトル分布を特徴量として複数の機械学習アルゴリズムを比較し、ニューラルネットワークの精度が相対的に高いことを示した。竹谷ら⁴⁾は打音について様々な特徴量を提案し、それらの有効性を比較した。

教師データが限られる機械学習で打音データを直接評価する場合には、打音が欠陥だけでなくサイト環境の影響も受けることに留意が必要である。これに対して、オンライン学習を用いてモデルを更新することでサイト

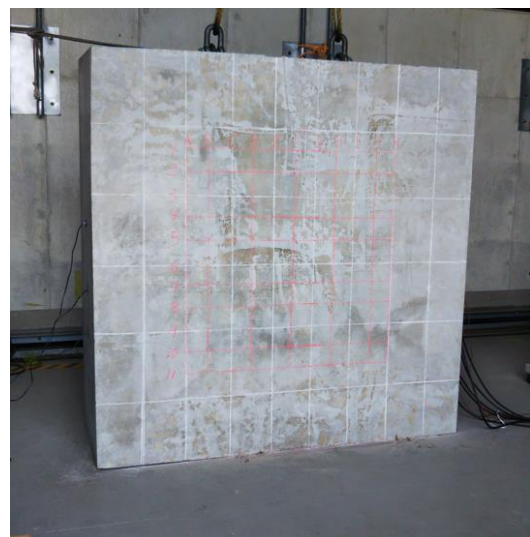
影響を補正する方法も提案されている⁵⁾。

著者らは打音をウェーブレット変換により画像化することで、周波数特性だけでなく時間特性も反映したデータとした。多数の教師打音画像から CNN による特徴抽出機を作成し、リファレンスとなるサイトの健全打音とテスト打音の特徴ベクトルの違いを、マハラノビス距離を用いて評価する方法を提案しており、これまで多サイトでの比較を行いその評価性能を検証した⁶⁾。ここでは実物大試験体を用いて本手法による評価と構造物内部の状態の比較を行うことにより、本手法の適用性について検証を行う。

2. 試験体

2.1 試験体製作

試験体は実在の海上 RC 栈橋の諸元を再現した縮尺 1:1 相当の部材厚と配筋を設定した実物大の鉄筋コンクリー



図－1 試験体の外観

*1 リテックエンジニアリング 技術本部 博士 (工学) (正会員)

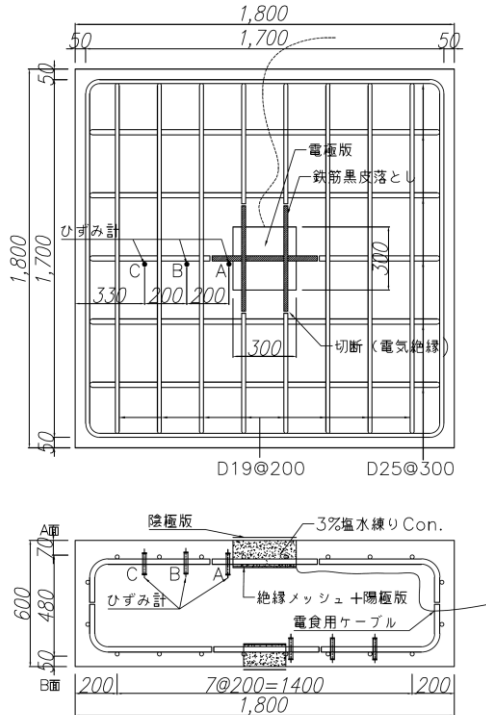
*2 法政大学大学院 都市環境デザイン工学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東海大学 情報理工学部 教授 博士 (理学)

*4 J-POWER 設計コンサルタント 茅ヶ崎技術事業本部 博士 (工学) (正会員)

表－１ 試験体の諸元

寸法	1.7m×1.7m×0.6m
重量	43kN
鉄筋	外側（帯筋相当）：SD345 D19ctc200mm 内側（主筋相当）：SD345 D25ctc300mm
コンクリート	設計基準強度 $f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 普通ポルトランドセメント $G_{\text{max}}=20\text{mm}$



図－２ 試験体の構造と配筋

ト部材を作製した。試験体の外観を図－１に、試験体の諸元を表－１に、試験体の構造と配筋を図－２に示す。

2.2 内部鉄筋の腐食促進

試験体の電気腐食にはできるだけ実物の腐食挙動を再現できるよう、電気泳動法による電気腐食を採用した。泳動電食は鉄筋そのものを電極とする直接電食に比べ、塩化物イオンが浸透してくる側の鉄筋表面で腐食が卓越する状況を再現できるため、実現象に近い腐食状態となる⁷⁾。既往の実験⁸⁾を参考に、泳動電流は 1A/m^2 を基本として設定し、電流制御の可能な安定化電源を使用した。

電気泳動を行うための電極は試験体内部に陽極側の電極を設置し、試験体表面にはアクリル板で製作した貯水槽を設置して濃度 10% の塩水で満たし、陰極側の電極を水没設置した。貯水槽と電極設置状況を図－３に示す。電極は、そのものが腐食して通電が妨げられる懸念があるため、耐食性の高いチタン製とした。埋設する陽極側の電極は鉄筋と接触しないように、鉄筋との間に絶縁材としてプラスチックメッシュを設置した。なお、泳動電食がうまくいかなかった場合に実験途中から直接電食に切り替えることを想定し、直接電食でも腐食エリアを限



図－３ 電気泳動による通电状況

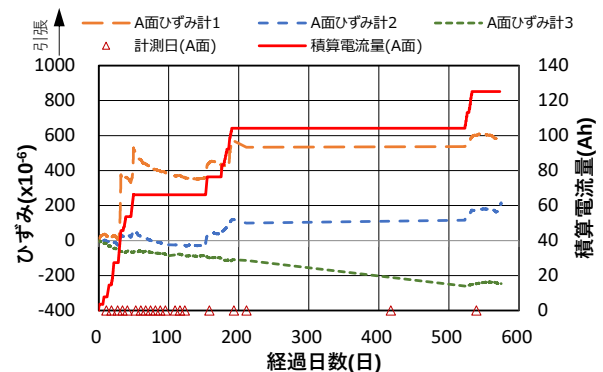


図－４ 試験体中央部の電極と配筋状況

定できるように、鉄筋は腐食エリア境界で切断・絶縁した。試験体中央部の電極と配筋状況を図－４に示す。オレンジ色のプラスチックメッシュの内側にチタン電極版が設置されている。電極付近の鉄筋はプラスチック製のジョイントで支持され、周囲の鉄筋と電氣的に絶縁されている。

試験体 A 面の鉄筋の純かぶりは 70mm とし、腐食を促進するため、通電エリアのコンクリートは 10% の塩水で練り混ぜを行った。

鉄筋腐食に伴いコンクリートに生じる引張ひずみの発生をモニタリングするため、試験体表面付近に鉄筋を跨ぐように、試験体表面直角方向にコンクリートひずみ



図－５ 積算電流量とコンクリートひずみの変化

ゲージを埋設した。電気腐食のための電流が計測値に影響することが予想されるため、ゲージには特に絶縁抵抗の高いもの（東京測器 KM-100B）を採用した。通電はひずみの状況を観察しながら、随時貯水槽を撤去し、試験体の表面を十分に乾燥させてから打撃を行った。

図-5に A 面に設置したひずみゲージのひずみ値と電流量の経時変化を示す。試験体の電気腐食は断続的に都合 100 日間程度実施した。データにはひび割れが発生したと思われるひずみの急増が複数箇所を確認できるが、その前後で打音に明確な変化は現れなかった。実験場の制約のため 530 日以降は電食を中止し、静置状態で内部鉄筋の腐食進行に伴うひび割れの発生を待つこととした。

3. 打音データの取得と評価

3.1 打音データの取得

試験体には 100mm ピッチで格子状に測線を設定し、測線の交点で打音を収録した。打撃は 1 箇所あたり 16 回、データ採取者は片手で打音ハンマによる打撃を行い、もう一方の手に手持ちした市販のデジタルレコーダ（ZOOM 社製 H6）を用い、付属ステレオマイクrophonにより打音データを取得した。データは左右 2ch をサンプリング周波数 44.1kHz、量子化ビット数 16 ビットで採取し、wav フォーマットで波形を記録した。



図-6 試験体の打音検査状況

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	1	1	1	1	1	2	2	0	0
5	0	0	1	1	1	1	2	2	2	0	0
6	0	0	1	1	1	1	2	2	2	0	0
7	0	0	1	1	1	1	2	2	2	0	0
8	0	0	1	1	1	1	2	2	2	0	0
9	0	0	0	1	1	1	2	2	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

凡例 0:健全 1:欠陥 2:著しい欠陥

図-7 熟練技師による打音検査結果のまとめ

ここでは試験体端部が解放されていることによる打音への影響を避けるため、試験体の打音データ取得範囲は試験体中央部 1m 四方に限定した。なお本稿では A 面の打音データのみを対象とする。

3.2 熟練技師による打音検査結果

熟練技師による打音診検査状況を図-6に示す。ここでは欠陥が認められる領域を白チョークで囲んでマークした。通常の打音検査では補修のためのハツリ範囲として欠陥部分よりも広めにマークするが、ここでは欠陥が認められる範囲のみにマークを記入している。この検査結果をもとに熟練技師による打音検査結果のまとめを図-7に整理した。検査エリアの中央部やや右下部分は特に剥離が進行している著しい欠陥があると判定された。

3.3 異常検知による打音の評価

(1) 打音の前処理方法

打音データは初期 5ms を amor 波形によるウェーブレット変換で 28pixel×28pixel の画像に変換した。本試験体で 4 年経過後に得られた打音波形と変換画像の一例を図-8に示す。サンプル波形は 5ms の波形を、ウェーブレット変換後の画像は 5ms の時間一周波数関係を示し、黄色の部分が大きなエネルギーを持つことを示す。健全部 (A4) の打音画像は高い周波数領域で比較的短い時間に大きなエネルギーがあるが、欠陥部 (H7) の打音画像では相対的に低い周波数領域で長い時間に大きなエネルギーがあることがわかる。これは既往の検討⁹⁾と同様の傾向である。なお、ここでは視認性のため変換画像をカラーコンターで表示しているが、実際にはグレースケールで 700 バイト程度以下の極めて小さなデータである。

(2) 打音評価手法

異常検知による打音評価手法の手順を以下に示す。

1. 健全・欠陥がラベル付された教師打音データを画像化し、これを用いて CNN による機械学習を行い、打

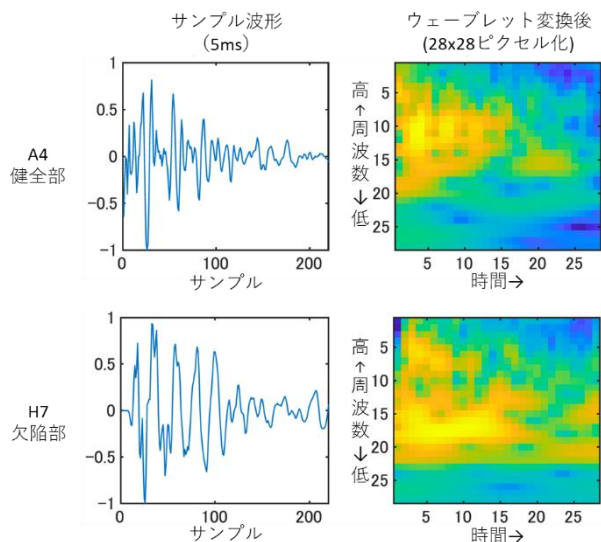


図-8 波形とウェーブレット変換画像の一例

音画像の特徴抽出機を作成する。

2. リファレンスとして試験対象の健全部分の打音を採取し、CNN 特徴抽出器により健全打音の多次元ガウス分布を作成する。
3. 試験対象のテスト打音を CNN 特徴抽出器に与え、得られた特徴ベクトルの健全打音の多次元ガウス分布に対するマハラノビス距離を算出する。

本手法の評価フローを図-9に示す。ここで用いるマハラノビス距離はデータの相関関係に基づいて既知データの統計的傾向に対する距離を表すものである。

一般に n 次元のベクトル $m = (m_1, m_2, m_3, \dots, m_n)^T$ が成す集団 M について、その次元ごとの平均を $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n)^T$ 、次元間の分散共分散行列を Σ とした時、ある点 $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ の集団 M に対するマハラノビス距離 $D_m(x)$ は式(1)で表される。

$$D_m(x) = \sqrt{(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)} \quad (1)$$

ここに Σ^{-1} は逆共分散行列である。

今回の検討では、既往検討で複数サイトの教師データで作成した 16 次元の CNN 特徴抽出器を用いる。

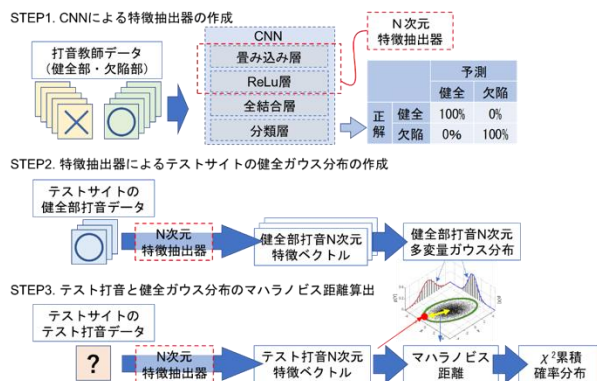


図-9 異常検知による打音評価フロー

本手法では基本的には対象構造物の健全データに対するテストデータの傾向（特徴量）の違いを算定するため、対象構造物の健全データが取得できることが前提となる。

3.4 打音評価結果

前述の手法により試験体製作直後から4年間の打音の評価結果を打撃箇所ごとに採取した32打音（16回の打撃を左右2chで録音したデータ）のマハラノビス距離の打撃箇所ごとの平均と分散の分布図を図-10に示す。ここに打音採取を行った位置は白線の交点である。また4.0年目の分布図には鉄筋位置（赤線）とコア抜き位置（白丸）を追記した。ここでは4.0年目で健全と考えられるA4点を基準として、毎回A4位置の打音をリファレンスの健全打音としてA4の特徴量に対するマハラノビス距離を算出している。

マハラノビス距離の打撃位置ごとの平均値を見ると、初期から1.5年までは青から黄緑へ全体的に値が大きくなる傾向は認められるが、とくに局所的に大きな値を示す部分はなく、試験体が緩やかに劣化している傾向を示していると考えられる。4.0年目には中央付近にマハラノビス距離が特に大きい領域が現れ、ここでは健全打音とは異なる特徴量を持った打音を得られたことがわかる。

一方、マハラノビス距離の打撃位置ごとの分散についても、時間が経つに連れて分散が大きくなる位置が徐々に増加している傾向にある。また、その位置は平均が大きい場所と概ね一致していることがわかる。

3.5 コアによる内部観察結果

実験開始から4.0年後の打音採取とほぼ同時期に、試験体から直径10mmのマイクロコア採取を行った。コア採取の位置は熟練技師による打音検査結果と異常検知手法によるマハラノビス距離を勘案して、試験体のテスト範囲内の6ヶ所から採取した。コア採取の後、内部を十分に乾燥させた後に内部の写真を撮影した。

表-2に各コア抜き取り位置でのコア内部の展開写真

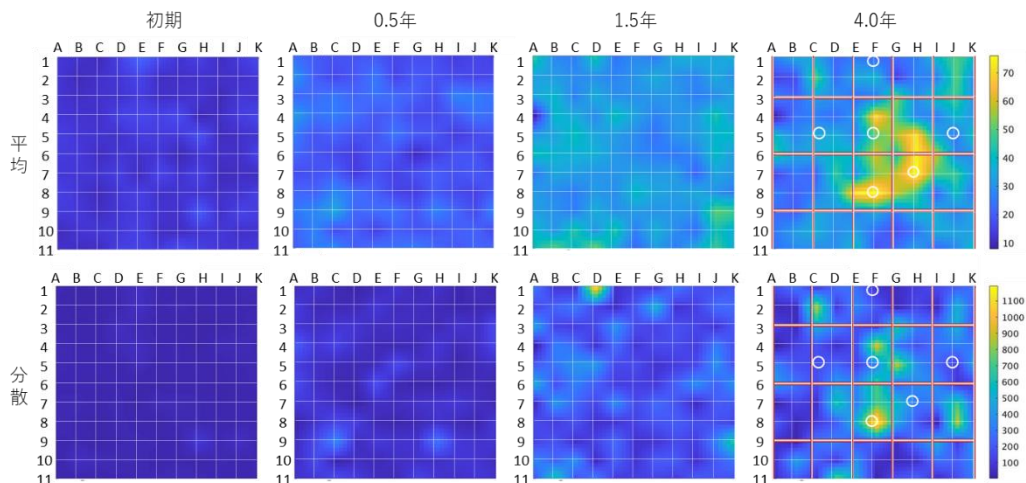
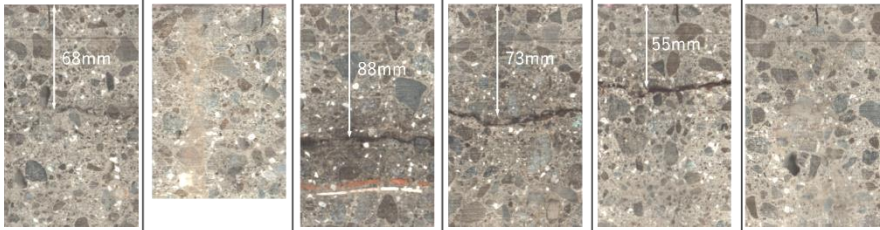


図-10 異常検知手法によるマハラノビス距離の打撃箇所ごとの平均と分散の分布

表－２ コア抜き位置の打音評価とコア内部写真

コア抜き位置		C5	F1	F5	F8	H7	J5
熟練技師による評価		欠陥	健全	欠陥	欠陥	著しい欠陥	健全
マハラノビス距離	平均	35	23	50	76	76	25
	分散	156	76	335	1,192	287	114
ひび割れ状況		全周の25%	なし	コア全周	コア全周	全周の80%	なし
コア内部写真		試験体表面→ 純かぶり70mm D19 D25 					

と合わせて、熟練技師による評価、マハラノビス距離の平均と分散、写真から確認できるひび割れの状況を整理した。タイトル列には配置鉄筋の位置をオンスケールで表示している。

まず、マハラノビス距離の平均・分散、熟練技師による評価とコアのひび割れ状況の傾向は概ね整合している。

また、F1、J5にはひび割れはなく、C5には幅0.2mm程度のひび割れが一部見られる。H7には表面から比較的浅い位置にコアをほぼ横断する幅1~2mm程度の大きなひび割れ、F5、F8には鉄筋位置付近の比較的深い位置にコアを完全に横断する幅1~2mm程度の大きなひび割れが生じていることがわかる。

4. 考察

4.1 欠陥の進展とマハラノビス距離による評価

図-10でマハラノビス距離の平均の推移を見ると、全体的に時間の経過につれてマハラノビス距離が増加しており、これから内部に微細ひび割れなどが生じることで全体的に一体性を失っている傾向が表れていると見ることもできる。1.5年時点で抜き出したコアには極めて微細な内部ひび割れを確認している。この時点では熟練技師によっても打音から内部欠陥を明らかに認識できる状態ではなかったことから、提案手法によれば熟練技師以上の感度で内部欠陥を検知できるものと考えられ、構造物表面に変状が見られない潜伏期・進展期の内部欠陥の検知に適用可能性があると考えられる。

表-2に示すように、H7は熟練技師が著しい欠陥と評価している背景には、ひび割れが浅く面積が大きいため、打撃により大きなたわみ振動による打音が生じていると推定できる。F5、F8はH7と同程度のひび割れ幅であるが、H7に比べると深いため、打音に対するたわみ振動の寄与が小さく、打音検査において欠陥のレベルがやや小さく評価されているものと考えられる。いずれもマハラノビス距離は50~76と、健全部に比べると非常に大きく、

欠陥レベルの指標となり得る値の差を示している。

今回マハラノビス距離を算定するにあたっては4.0年目においても健全と考えられたA4位置を毎回採取する健全打音の基準とした。したがって、A4位置にも多少の内部欠陥等による打音の変化が生じていたとすれば、基準打音にも変化が生じていることになるが、ここではその影響は僅少と考え、全期間を通じて同一位置の打音を基準とした。

一方、マハラノビス距離そのものは基準となる健全打音の特徴量分布からの距離であるため、健全打音の設定に影響を受けるが、その分散については基準の影響を受けない。図-10を見ると分散の傾向も平均と同様に時間経過と共に増加する傾向にある。分散の大きさは同じ箇所を打撃した場合の応答のばらつきと考えられる。これは内部欠陥がある場合、叩き方の違いで応答が異なることに起因していると考えられるため、打撃の強さや方向、わずかな位置変化などを与えることで、より明確に内部欠陥を検出することができる可能性がある。

4.2 異常検知の評価値と内部欠陥の状況

今回の試験の範囲では、ひび割れの発生はマハラノビス距離の平均で25~35の間に閾値があるように見える。マハラノビス距離は各次元（ここでは16次元）の特徴量が正規分布に従うことを前提としているため、マハラノビス距離は自由度16のカイ二乗分布に従う。そこで、図-11に示すように、自由度16のカイ二乗相補累積確率分布に4.0年目の内部観察結果である健全部・欠陥部をプロットすると、健全部（J5）と欠陥部（C4）の閾値となるマハラノビス距離25から35の区間は相補累積確率分布で7.0%から0.4%の範囲にあり、累積確率分布としては低く、全体からかなり乖離した状態で初めて明確な欠陥が生じている。つまり本手法はマハラノビス距離が比較的小さい、相対的に健全な領域でも広範な値を取ることから、初期のわずかな打音変化に対しても高い感度を持っている可能性があると考えられる。この傾向はマハラノビス

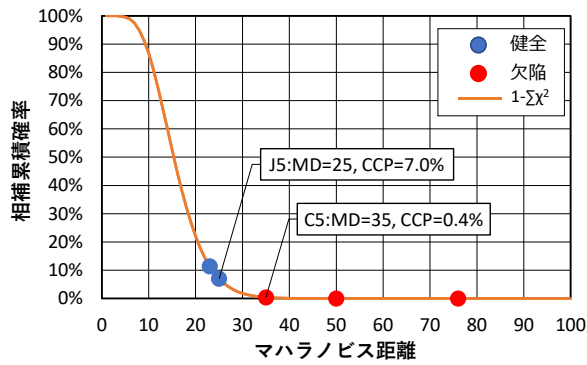


図-11 自由度 16 のカイ二乗相補累積確率分布

距離が初期の段階から内部欠陥の予兆を捉えているとみることの妥当性を補強しているといえるが、打音データのマハラノビス距離分布が明らかでないため今後の検討による必要がある。また、カイ二乗相補累積確率の絶対値（例えばここでは1%など）を普遍的な閾値として捉えられるかどうかに関しては、今後データの蓄積と検討が必要である。

4.3 打撃回数

今回の試験では前述のように16回の打撃音を左右2chで録音し、1箇所あたり32の打音データを採取した。実際に熟練技師が打音検査を行う場合、状態が比較的わかりやすい位置では少数回の打撃で判定できるが、判断が難しい位置では何回も繰り返し打撃をおこなって欠陥の有無を判別することになる。今回の試験では32打音を採取してデータ処理を行ったが、実用には多過ぎる嫌いもある。

ここで統計的な妥当性を考えた場合、母集団の分布が不明な場合でも6~10データあれば良いと考えられる⁹⁾。一方、今回算出しているサンプルデータの特徴量（特徴ベクトル）のばらつきを見るといずれの次元でもほぼ正規分布をしており、マハラノビス距離を適用することは妥当であるといえる。正規分布を前提とするのであれば、サンプル数は最小限で問題ないと思われるが、打撃回数の影響については打撃方法のバラツキの影響も含めて今後の検討課題としたい。

5. まとめ

本稿では実物大の鉄筋コンクリート試験体について、鉄筋腐食により内部欠陥を漸増的に作成し、欠陥の成長過程での打音データを取得し、これに異常検知手法を適用することで欠陥の状態を定量評価する方法の適用性を検証した。その結果、以下の知見が得られた。

1. 異常検知手法によれば、鉄筋腐食に伴う潜伏期・進展期レベルのコンクリート内部の欠陥の変化を打音データから定量的に評価できることを示した。

2. 潜伏期の打音の変化を定量化できていることや累積確率分布でひび割れ発生前の状態を幅広く評価できることから、本手法によれば鉄筋コンクリート構造物の内部欠陥の発生を熟練技師よりも高い感度で検知できる可能性がある。
3. 得られたマハラノビス距離とコアにより確認した内部ひび割れの状態は良く整合しており、マハラノビス距離を健全度の指標として適用可能であることを示した。

ここでは限られた試験データであるが、鉄筋腐食の進行に伴う打音データの変化を捉えることができた。今後は、打音回数の削減の影響、また特徴量の分散に着目して基準健全打音なしで評価する手法、またこれに向け、打撃に意図的にばらつきを加えた場合の特徴量の傾向と実作業への適用性などについて検討する。

参考文献

- 1) 伊東良浩, 魚本健人: ひび割れを有する鉄筋コンクリート梁の打撃音, 土木学会論文集 No. 564/V-35, pp169-176, 1997.
- 2) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝稔, 六郷恵哲: コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用, 土木学会論文集 No.704, V-55, pp.65-79, 2002.5
- 3) 江本久雄, 馬場那仰, 浅野寛元, 長瀬大和: AI 手法による打音検査の浮き判定の検討, AI・データサイエンス論文集, Vol. 1, No. J1, 2020
- 4) 竹谷晃一, 佐々木栄一, 范書舒, 伊藤裕一: 時間・周波数領域の特徴量評価とニューラルネットワークを用いた打音法の感度向上と効率化, AI・データサイエンス論文集, 2 巻, J2 号, p. 721-732, 2021.11
- 5) Jiaxing Y., Kobayashi,T., Iwata,M., Tsuda,H.. and Murakawa,M.: Computerized Hammer Sounding Interpretation for Concrete Assessment with Online Machine Learning, Sensors,18, no.3:833, 2018
- 6) 新保弘, 尾関智子, 溝渕利明, 野嶋潤一郎, 機械学習による打音検査の汎化手法について, AI・データサイエンス論文集, 2023, 4 巻, 3 号, p. 337-343, 2023.1
- 7) 戸田勝哉, 上野敦, 宇治公隆: ひび割れ発生時におけるコンクリート中の鉄筋腐食量に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 21 巻, 第 3 号, 2010.9
- 8) 鈴木三馨, 堀口賢一, 福浦尚之, 丸屋剛: 鉄筋の腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 第 31 巻, 第 1 号, 2009.6
- 9) 統計に必要なサンプルサイズ (サンプル数) の決め方・計算方法: <https://hatsudy.com/jp/samples.html> (閲覧日 2025 年 1 月 8 日)