論文 小型打撃試験装置を用いた道路橋遊間部の欠陥領域評価

志田 爲御*1·高橋 知也*2·池田 富士雄*3·村上 祐貴*4

要旨:本研究では,道路橋遊間部を対象とする打撃試験装置の開発および自己組織化マップを用いた欠陥領 域評価手法の確立を目的としている。既往の研究ではマイクロフォンで測定した打撃音を指標に欠陥領域評 価を行っていたが,遊間部における音の反響や車両の走行音といったノイズ因子の除去が課題であった。こ の問題を解消するため,打撃によって生じる弾性波を直接測定する探触子を開発し,それを新たに打撃試験 装置に搭載した。人工欠陥を埋設した試験体で遊間部を模擬し,改良した打撃試験装置を用いて欠陥領域評 価を行った結果,埋設深さが 50mm,直径 200mmの欠陥領域まで検知可能であった。 キーワード:遊間部,打撃試験装置,自己組織化マップ,弾性波,打音点検

1. はじめに

積雪寒冷地域では,路面凍結を防ぐ目的で,凍結防止 剤が冬季に散布される。伸縮装置が設置される道路橋遊 間部においては,止水材が脱落,損傷することにより凍 結防止剤を含む路面水が流れ込み,上部構造の桁端部や, 橋台,橋脚に鉄筋腐食が生じる場合のあることが問題と なっている¹⁾。遊間部は幅が20~100mm程度と非常に狭 小であり,目視点検や打音点検の実施は困難である。現 状では,CCDカメラの挿入による外観変状調査が行われ ているが,外観変状から第三者被害に繋がるかぶりコン クリートの浮きや剥離部を特定することは困難である。

このような背景のもと、著者らは、狭小な道路橋遊間 部で打撃試験を可能とする打撃試験装置の開発と欠陥 領域評価手法の検討を行ってきた²⁾。既往の研究で製作 した打撃試験装置は、打撃によって生じる音をマイクロ フォンで収録する機構であり、収録した打撃音の周波数 スペクトルを指標として欠陥領域評価を行っていた。し かしながら、遊間部においては打撃音が反響し、欠陥領 域検知精度に影響を及ぼすことが明らかとなった。人工 欠陥を埋設した試験体では、深さ30mmに埋設した直径 300mmの人工欠陥の検知にとどまった。また、実構造物 でも試験を行ったが、測定音に車両の走行音等のノイズ が包含されることも課題として残された。

そこで本研究では,遊間部において打撃によって生じ た弾性波をコンクリート表面で測定可能な打撃試験装 置を開発し,人工欠陥を埋設した試験体で模擬した遊間 部において欠陥領域検知精度について検討した。

2. 打撃試験装置の概要

×	て接続し,		
*1	長岡工業高等専門学校	環境都市工学専攻 (学生会員)	
*2	長岡工業高等専門学校	電子機械システム工学専攻	
*3	長岡工業高等専門学校	機械工学科教授 博(工)	
*4	長岡工業高等専門学校	環境都市工学科准教授 博(工)	(正会員)



先端にローラーを有する可動式アームを外枠フレーム に取り付けた移動・突っ張り機構、および動力源である ソレノイドとハンマー部から成る打撃機構ユニットの2 つで構成されている。移動・突っ張り機構においては, アーム先端に取り付けたローラーにより遊間部におけ る円滑な移動が可能となり、アームの付け根部分にねじ りばねを配することで、打撃面と向かい合う壁面から打 撃試験装置を押さえる力を得ている。また、打撃機構ユ ニットは、通電することによりソレノイドに発生する吸 引力を、リンクによってハンマー部に伝達し、ハンマー 部を振り下ろすことで打撃を行う機構となっている。ハ ンマー部は、フォースセンサー(最大使用荷重:2224N) と金属チップ(打撃面の直径:5mm)で構成されている。 打撃機構ユニットは外枠フレームと完全に一体化して おらず,図-1(b)に示す位置に支点を設け,それを介し て接続し、引っ張りばねによって打撃面に押し付けてい



表-1 コンクリートの示方配合(小型試験体)

粗骨材の	1日 村の水セメ 支大寸法 ント比 (mm) (%)	細骨 材率 (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				
最大寸法 (mm)				水	セント	細骨 材	粗骨 材	AE 減水剤
25	55	42	4.5	155	282	785	1093	2.82

る。これにより打撃機構が独立して可動し,壁面の凹凸 に追従するため,打撃面に不陸が生じている場合でも, 打撃面とハンマー部先端を一定の距離に保つことが可 能となり,打撃の空振りを大幅に低減することができる。

道路橋遊間幅は20mm~100mm程度であり、試験者が 立ち入り,加速度センサーを設置することは難しい。そ こで本研究では、図-2に示すような回転体中心部に加 速度センサーを取り付けた探触子を開発した。この探触 子は、図-2(b)に示すようにベアリング、取付用部品お よび加速度センサー(測定周波数範囲:0.3~20×10³Hz) で構成されている。ベアリングは、直径が打撃試験装置 の高さを超えない範囲で,加速度センサーと測定面まで の距離Dが極力短くなる深溝玉軸受(内径17mm,外径 26mm)を用いた。取付用部品は加速度センサーを固定す るためのネジを有し、ベアリング内輪部に挿入すること で加速度センサーとベアリングを一体化する。本探触子 の内輪部は2つのピンで打撃試験装置の外側フレームと 一体化し、打撃試験装置の移動時に外輪部のみが回転す ることになる。これにより加速度センサーが打撃面およ び打撃位置と一定の距離を保ちながら、打撃試験を行う ことができる。探触子は図-1に示す位置に取り付け,





(b) 試験体設置方法図-4 試験体概要(大型試験体)

このとき探触子と図-1(b)に示す前後のローラーの三点 で壁面に接触することでベアリングが確実に打撃面に 接触するようにしている。

3. 実験概要

3.1 試験体概要

(1) 小型試験体

打撃音を欠陥領域判定の指標とする既往の打撃試験 装置では、遊間幅によっては音の反響の影響を受けて打 撃応答特性が変化し、欠陥領域検知精度が低下すること が確認された。そこで、本研究で提案する打撃試験装置 における音の反響の影響を確認した。図-3 に試験体概 要を示す。試験体内部には、厚さ 5mm のスチレンボード を直径 300mm の円盤状に成形した人工欠陥を,深さ 30mm の位置に埋設した。比較のため、人工欠陥を有し ない試験体も作製した。人工欠陥の配置および試験体の 支持方法は図-3 に示す通りである。ここで、人工欠陥 を有する試験体を小型欠陥試験体、人工欠陥を有しない 試験体を小型健全試験体と称することとする。コンクリ ートの示方配合は表-1 に示す通りであり、セメントに は早強ポルトランドセメントを使用した。試験体は打設 後7日間湿布養生を行い、その後は気中養生とした。

(2) 大型試験体

図-4 に示す試験体を用いて打撃試験装置の欠陥領

表-2 コンクリートの示方配合(大型試験体)

粗骨材の	骨材の 水セメ	細骨	空気 量 (%)	单位量(kg/m ³)				
最大寸法 (mm)	ジャビント比 (%)	□ 單 本 (%)		水	ゼン	細骨材	粗骨 材	AE 減水剤
25	44	40.4	4.5	149	339	733	1123	3.61

域検知精度を評価した。試験体内部には、厚さ 5mm のス チレンボードを成形した円盤状人工欠陥を埋設した。人 工欠陥の埋設深さは、20mm、30mm、40mm および 50mm とし、直径は 100mm、200mm、300mm および 400mm と した。欠陥配置および支持方法は図-4(a)に示す通りで あり、人工欠陥を有するこれらの試験体を欠陥試験体と 称することとした。また、比較のため人工欠陥を有しな い健全試験体も作製した。コンクリートの示方配合は表 -2 に示す通りであり、セメントには早強ポルトランド セメントを使用した。試験体は打設後7日間湿布養生を 行い、その後は気中養生とした。

3.2 実験方法

(1) 小型試験体

小型欠陥試験体および小型健全試験体を,互いの表面 を向かい合わせるように設置し、遊間部を模擬した。遊 間部における打撃試験装置の位置の保持には、次項で述 べる可動式ワイヤーを用いた。いずれの試験体も測定面 中心部を打撃し、マイクロフォン(測定周波数範囲 10~ 20×10³Hz)および回転式探触子で打撃応答の測定を行 った。各打撃点は図-3に示す座標で称することとし、 例えば試験体中心の打撃点の名称は D4 となる。なお、 遊間幅は, 5mm ピッチで 50mm から 70mm まで変化さ せた5水準とした。また、比較のため同一支持条件で遊 間を構成しない状態(非遊間状態)においてインパルス ハンマー(加振周波数範囲:0~8000Hz,最大使用荷重 2200N, 打撃面の直径:5mm) で打撃し, 加速度センサー を図-3に示す位置に厚さ0.4mmの粘着テープを用いて 直接貼り付けて測定を行った。このとき同時にマイクロ フォンを測定者が手に持ち,打撃点からおよそ 30mm 離 れた位置で測定を行った。

サンプリング周波数,測定範囲,およびデータ数は, それぞれ25.6×10³Hz,0~10×10³Hz,2048とし,3回 の打撃の平均値を測定値とした。また,フォースセンサ ーで取得した時刻歴入力波形と,マイクロフォンおよび 加速度センサーで取得した時刻歴応答波形を高速フー リエ変換し,周波数応答関数(伝達関数)を算出した。 周波数応答関数の定義式は式(1)であるが,本研究では測 定ノイズの影響を低減させるため式(2)より算出した。

$$H(f) = \frac{B(f)}{A(f)} \tag{1}$$

$$=\frac{B(f)A(f)^{*}}{A(f)A(f)^{*}}=\frac{C_{AB}(f)}{P_{AA}(f)}$$
(2)



ここで, H(f):周波数応答関数, A(f):入力の周波数 スペクトル, B(f):応答の周波数スペクトル, $A(f)^*$:入 力の周波数スペクトルの複素共役, $C_{AB}(f)$:入力と応答 のクロススペクトル, $P_{AA}(f)$:入力のパワースペクトル である。

(2) 大型試験体

図-4(b)に示すように2つの試験体を支持し,遊間部 を模擬した。遊間幅を50mm および70mmの2水準と し、図-4(a)に示す50mm 間隔のメッシュの交点を打撃 した。ただし、最外縁の打撃点は打撃試験装置の構造上 打撃できないため打撃は行っていない。なお、サンプリ ング周波数等の測定条件は小型試験体に準ずるものと した。遊間部における打撃試験装置の移動には、可動式 ワイヤーを用いた。遊間部の両端外部に支柱を立て、支 柱上にワイヤーを設置する。ワイヤー設置部を回転駆動 させることにより奥行き方向、上下移動させることによ り上下方向の移動が可能となり、遊間部全面を打撃する ことができる。

4. 遊間幅が打撃応答特性に及ぼす影響

図-5 に各遊間幅において小型試験体中心部 D4 を打 撃し、本研究で提案する回転式探触子を用いて打撃応答 を測定した場合に得られた周波数応答関数を示す。また、 図-6 に同条件でマイクロフォンを用いた場合の測定結 果を示す。各図には、参考として同一支持条件の非遊間 状態でインパルスハンマーを用いて打撃し、加速度セン サーを表面に直接貼り付けて測定した際に得られた周 波数応答関数(以下、参考値と称する)を併せて示す。 まず、小型欠陥試験体の結果に着目すると、回転式探



触子の場合はいずれの遊間幅においても、参考値の卓越 周波数に近い周波数に卓越周波数が現れている。しかし ながら、マイクロフォンの場合は、遊間幅 70mm の場合 を除き、参考値とは異なる周波数に卓越周波数が現れて いる。この現象は、既往の研究においても確認されてお り、遊間部における音の反響により、特定の周波数の波 が増幅・減衰することによるものであると考えられる²。 また、8000Hz 以上に卓越周波数が現れる小型健全試験体 において、マイクロフォンの場合は参考値と異なり、本 来卓越周波数の現れない 3000Hz 付近に周波数ピークが 現れているが、回転式探触子の場合は参考値と同様に特 徴的な周波数ピークが現れていない。

以上より、本研究で提案する探触子を用いることで、 マイクロフォンで打撃応答を取得する際の打撃音の反 響の問題を解消できると考えられる。

5. 自己組織化マップを用いた欠陥領域評価

5.1 自己組織化マップを用いた検討

野内らは打撃時の卓越周波数や最大振幅は同一欠陥 上で一様ではないため、欠陥領域を同定する閾値の設定 が難しく、特定の物理量に着目した欠陥領域評価が困難 であることを指摘している³⁾。野内らは教師なし学習の 一種である自己組織化マップ(Self-Organizing Maps,以 下 SOM)を用い、各打撃点における周波数応答関数(入 力:インパルスハンマー、出力:加速度センサー)の波 形全体に対してパターン認識を行うことで、欠陥領域評 価を試みた。その結果、コンクリート内部に埋設した欠 陥領域を、深さは 90mm、直径は 200mm まで検知できる ことを報告している。

5.2 入力パラメータおよび解析条件

SOM に入力するデータには,野内らと同様,周波数応 答面積を用いた。周波数応答面積の積分範囲は 0~ 8000Hz,積分間隔は 100Hz とし,1 打撃点につき 80 次 元の入力データを作成した。SOM によるクラスタリング マップの作成には Viscovery SOMine 7.0 を使用し,ノー ド数 2000,近傍半径 0.5,クラスタ数 20,クラスタ手法 は凝集性のあるクラスタを算出する SOM-Ward に設定し た。なお,解析対象は,3.1節2項に示す全ての大型試験 体の遊間幅 50mm および 70mm の打撃試験結果である。

SOM によるクラスタの分類結果に基づく各打撃点の 健全部・欠陥部の判定は,健全試験体の打撃点の分類結 果をもとに行う。健全試験体の各打撃点が分類されたク ラスタを健全部と見なし,各欠陥試験体において,打撃 点が健全試験体と同じクラスタに分類された場合はそ の打撃点を健全部,異なるクラスタに分類された場合は 欠陥部であると判定することとした。

5.3 打撃試験装置を用いた欠陥領域検知

図-7 に、回転式探触子を用いた欠陥領域評価の結果 を示す。各図は, SOM による解析で欠陥部に分類された 打撃点を色付けして示したマップ(以下,欠陥領域評価 マップと称する)である。後述するが本解析では2段階 で SOM による解析を行っており、図中の紺色の領域は 解析1回目,赤色は解析2回目,および白色の領域は解 析1回目と2回目ともに欠陥部に分類された打撃点を示 し, 灰色は両解析においても健全部に分類された打撃点 を示す。図中の破線の円は欠陥領域、赤字は欠陥検知率 を示し、図のキャプションは"幅"が遊間幅、"深"が欠陥 埋設深さを示す。直径 100mm の欠陥領域については、検 討対象とする0~8000Hzの周波数域に特徴的なピーク周 波数が現れないことからここでは欠陥領域として扱わ ないものとしたため、図中には示していない。なお、欠 陥検知率とは、欠陥領域ごとに欠陥部に分類された打撃 点数を,その欠陥領域上の総打撃点数で除し,百分率で 表したものである。2回目の解析を終えた段階で得られ る欠陥検知率を欠陥領域ごとに整理したものを表-3に 示す。

まず,解析1回目においては,埋設深さ20mmの欠陥 試験体の各欠陥領域を,いずれの遊間幅においても67% 以上検知できた。また,埋設深さ30mmと50mmの欠陥 試験体の,直径300mmと400mmの欠陥領域についても, 中心部近傍が検知できている。しかしながら,それら欠 陥の外縁部や直径200mmの欠陥領域は検知できていな い。さらに,埋設深さ40mmの欠陥試験体においては, いずれの欠陥領域も検知できていない。これは,以下の ようなSOMの特性によるものであると考えられる。

SOM によるクラスタリングは入力データの各属性(本



研究においては各周波数応答面積)の偏差をもとに行わ れている。本研究においては、検討対象とする周波数範 囲を0~8000Hzとしており、健全部は特徴的な周波数ピ ークをこの周波数範囲に有しない。一方、欠陥部につい ては,健全試験体とは異なりこの周波数範囲に特徴的な 波形を示す(図-5参照)。この特徴量は欠陥領域上での 打撃位置、欠陥の存在する深さや大きさによって変化す る。この際、分類データの中に例えばごく表層付近の欠 陥上を打撃した際に得られるような極めて特徴量が大 きいデータ群が含まれている場合、それらデータ群の中 でクラスタが細分化され,相対的に特徴量の小さい欠陥 領域の分類がなされない問題がある。そこで、本研究で はこの問題を回避するため、全打撃試験データを対象と する1回目の解析後,全クラスタ平均に対する各クラス タの偏差(プロファイル)を確認し、特に偏差の大きい クラスタを除外して2回目の解析を行った。その結果, 図-7 に示すように、1 回目の解析では検知できなかっ た他の欠陥領域についても検知できた。

全体的な傾向としては、埋設深さ 40mm の欠陥試験体 の直径 200mm および 300mm の欠陥領域を除けば、全て の試験体において、各欠陥領域を 6 割以上検知できてお り、遊間幅によって各欠陥領域の検知率が大きく異なる ことは確認されない。これは、前述したように、本研究 で提案した探触子を用いた場合には反響音のスペクト ルが打撃応答スペクトルに包含されないためであると 考えられる。また、埋設深さ 20mm と 50mm の場合では 欠陥検知率の大きな差は確認されず、埋設深さが 50mm

表一3 欠陥検知率							
欠陥埋設深さ	遊間幅 [mm]	欠陥検知率 [%]					
[mm]		¢200mm欠陥	¢300mm欠陥	ϕ 400mm欠陥			
20	50	67	76	67			
20	70	67	72	69			
20	50	100	60	67			
30	70	78	60	62			
40	50	44	64	60			
40	70	33	16	67			
50	50	67	68	76			
50	70	67	56	71			

程度の欠陥領域までであれば表層部の欠陥領域と同等 の精度で検知できると考えられる。また、欠陥領域の外 縁部に着目すると、検知できていない部分が多くみられ る。これは、ベアリングを介することによってピーク周 波数の振幅に多少の減衰が生じることが原因として考 えられ、今後ベアリングの材料や種類についても検討が 必要であると考えられる。

ここで,埋設深さ 40mm の欠陥試験体の結果に着目す る。同試験体の直径 400mm の欠陥領域については,他の 試験体と同等の精度で検知できているが, 直径 200mm の欠陥領域は他の試験体に比べ低く,直径 300mm の欠 陥領域については遊間幅によって欠陥検知率が大きく 異なっている。いずれの欠陥領域においても施工不良な どが疑われるが,詳細については現在検討中である。

次に埋設深さ 20mm の欠陥試験体に着目すると,1回 目の解析では欠陥部と健全部を分類できているが,2回 目の解析においては誤判定が数多く確認できる。埋設深 さ20mmの欠陥試験体は打撃面が打ち込み面であるのに 対し,他の欠陥試験体は型枠底板面であった。埋設深さ 20mm の欠陥試験体の健全部と他の試験体の健全部を比 較すると、わずかではあるが全体的に周波数スペクトル の振幅が大きいことが確認された。したがって、埋設深 さ20mmの欠陥試験体を除き他の健全部は比較的一様な 打撃応答特性となり、周波数応答関数に冗長性が少ない ことから、2回目の解析で特徴量の大きい欠陥領域を大 量に除外したことによって、表面性状が他と異なる埋設 深さ20mmの健全試験体の健全部が欠陥判定になったと 考えられる。この問題に対しては、表面性状の異なる健 全部の打撃データを増やし、冗長性を増すことで回避で きると考えているが、これは今後の課題である。

6. 実構造物への適用方法の検討

SOM は教師なし学習であり,各クラスタに対する欠陥 情報の関連付けは解析者が行う必要がある。本研究では, SOM による実構造物の欠陥領域評価は,実構造物データ と欠陥領域が既知である試験体データを入力データと して同時に分類を行うことで各クラスタに欠陥情報を 関連付ける。すなわち,試験体の欠陥部データと同じク ラスタに分類された実構造物の打撃点は欠陥部,健全部 データと同じクラスタに分類された実構造物の打撃点 は健全部と判定する。

前述の大型試験体を用いた欠陥領域評価では,同一寸 法・支持条件の試験体を対象に打撃試験を行ったが,実 構造物においてはその規模や,支持条件は大きく異なる。 そのため,得られる周波数応答関数が試験体とは大きく 異なり,うまく分類されない可能性があることが懸念さ れた。そこで本研究では,支持条件や寸法の異なる試験 体を対象に打撃試験を行い,大型試験体のデータととも に SOM による分類を行った。

試験体は、内部に人工欠陥を有する長さ 2000mm、高 さ 1800mm、厚さ 280mm の鉄筋コンクリート壁型試験体 であり、接地して支持している。打撃試験は試験体健全 部の任意の 10 点、および欠陥部 3 点を対象に行い、打 撃試験装置のアームを試験体に対して手で押し付ける ようにして打撃を行った。対象とした欠陥部はいずれも 正方形で、辺長 300mm 深さ 20mm および 30mm、辺長 400mm 深さ 50mm であり、打撃点は欠陥中心部とした。 なお、解析条件は 5.2 節と同様であり、SOM による解析 は 1 回のみ行った。

図-8 に、上記の解析で得られたクラスタリングマッ プを示す。図中のラベルは、黒色の破線の円内にあるデ ータが壁型試験体健全部、赤色の破線の円内にあるのが 壁型試験体欠陥部、その他が遊間幅 50mm および 70mm 時の健全試験体のデータである。大型試験体の健全部の データはマップ右側に集まっている。図中には示してい ないが、欠陥部の打撃点はマップ左側に集まっている。 まず、壁型試験体健全部のデータに着目すると、いずれ



図-8 クラスタリングマップ

もマップの右側に集まっており,健全部として分類され ていることが分かる。次に,壁型試験体欠陥部のデータ に着目すると,辺長 300mm 深さ 20mm および 30mm の 欠陥部はマップ上で健全データから離れたクラスタに あり,欠陥部と判定されたが,辺長 400mm 深さ 50mm の 欠陥部は健全試験体の打撃点と同じクラスタに分類さ れた。辺長 400mm 深さ 50mm の中心部打撃時の周波数 応答関数には特徴的な周波数ピークが現れていたが,分 類結果は健全部となった。この原因としては,入力した 欠陥のデータが少なく,適切にクラスタが形成されなか ったためであると考えられ,欠陥データを増やすことで, 精度が向上すると考えられる。

7. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究で提案する回転式探触子を搭載した打撃試験装置を用いた欠陥領域評価手法では,既往の研究の課題であった音の反響といった遊間部特有の問題はみられず,得られる打撃応答特性や欠陥検知率が遊間幅によって大きく異なることはない。
- (2) 既往の研究で提案した打撃試験装置では、埋設深さ 30mm, 直径 300mmの欠陥領域までの検知にとどま ったが、本研究で提案した打撃試験装置では、埋設 深さ 50mm, 直径 200mmの欠陥領域まで検知する ことが可能であった。

謝辞 本研究を実施するに際し,株式会社ネクスコ・メン テナンス新潟に協力頂いた。ここに記して謝辞を表する。

参考文献

- 石川裕一:凍結防止剤の影響を受ける既設道路橋の 耐久性向上に関する研究,博士論文,2013
- 志田為御ら:打音点検装置を用いた道路橋遊間部の 打音点検法、コンクリート工学年次論文集、Vol.40、 pp.1891-1896、2018.7
- 野内彩可ら:周波数応答関数を入力値として自己組 織化マップに適用したコンクリート内部の欠陥領 域評価,コンクリート工学論文集,29巻,pp.87-100, 2018