

論文 弾性波法による ASR 劣化コンクリートの劣化度評価

森 寛晃^{*1}・久保 善司^{*2}・佐藤 彰^{*3}・小川 彰一^{*4}

要旨：本研究では、ASR 劣化構造物の劣化度評価に衝撃弾性波法を適用することを目的として、小型試験体および劣化の進行した大型円柱体への弾性波入力を行い、ASR による膨張量や外観上のひび割れと検出波形の各種パラメーターとの関係を調べた。その結果、検出波形の最大振幅の相対的な大小を比較することにより、コンクリート表層部の劣化程度を把握できる可能性があることが分かった。さらに実橋台においてシュミットハンマーによる弾性波入力を行い、最大振幅と路肩付近のひびわれ状況やコア強度との対応を検討した結果、入力箇所から 3m 離れた地点までのコンクリート表層部の劣化度評価に使える可能性が示された。

キーワード：アルカリ骨材反応(ASR)、弾性波法、最大振幅、シュミットハンマー

1. はじめに

ASR による損傷を受けた構造物の特徴として、日射や降雨などの環境条件や路面排水などの影響により、同一構造物内でも部位ごとに劣化程度が異なることが挙げられる¹⁾。

現在、ASR 損傷を受けた構造物の調査・診断手法としては、コア採取による方法が一般的である。コアの反応性、現有の強度、残存膨張性などはコンクリートの状態を知る上で重要であるが、サンプリングの箇所や数の問題から構造物全体の性能を把握することは容易ではない。

一方、ASR 損傷を受けたコンクリートの品質を非破壊的に評価する手法として、超音波パルス伝播速度²⁾や超音波スペクトル解析³⁾を用いる手法があり、近年では、同じ超音波法でも弾性波出力を工夫して橋脚梁部のコンクリートの内部劣化を評価したものがある⁴⁾。しかし、超音波法は高周波成分の波を扱うため、鉄筋や骨材の影響を無視できないこと、減衰が大きく透過距離に限界があるなど課題も多い。

これに対して衝撃弾性波法は、低周波成分を主体とする大きなエネルギーの弾性波を入力す

るため、コンクリート中の減衰や散乱が少なく、伝播距離を長くできる特徴がある。したがって、非破壊により簡便に構造物全体の状態を把握できる可能性があるが、過去に ASR 劣化構造物の劣化度評価に適用した事例は見受けられない。

そこで本研究では、ASR 劣化構造物の劣化度評価に衝撃弾性波法を適用することを目的として、まず ASR 劣化を生じた小型試験体により弾性波入力実験を行い、検出波形パラメーターと膨張量との関係を調べた。続いて劣化のかなり進行した大型円柱体により外観上のひびわれと検出波形の最大振幅との対応を検討した。最後に実橋台への本手法の適用を図り、その有用性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 小型供試体による弾性波入力実験

(1) コンクリート配合ならびに促進養生方法

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は非反応性の陸砂、粗骨材には反応性砕石(化学法の結果、無害でない)を用いた。水セメント比は 50%とし、ASR を促進させるため等価アル

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 補修・診断技術グループ 工修 (正会員)

*2 金沢大学 工学部 土木建設工学科 工博 (正会員)

*3 日本道路公団 北陸支社 金沢技術事務所 技術指導課 (非会員)

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 補修・診断技術グループ 薬修 (正会員)

カリ量が2.5%となるようにNaOHを練混ぜ水に添加した。試験体寸法は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ および $\phi 10 \times 40\text{cm}$ である。脱型後は14日間湿布養生を行い、その後、湿度99%、温度 40°C の恒温室にて促進養生を行った。

(2) コンクリートの膨張量測定

供試体にステンレス製のバンドを取付け(評点距離10cm)、所定の材齢に達した段階でコンタクトケージ法により長さ変化を測定した。

(3) 弾性波入力方法と振動検出方法

促進養生前ならびに所定の膨張率に達した時点で弾性波入力を行った。弾性波入力は、アルミ製の飛翔体を空気圧でコンクリート表面に打ち放す方法を用いた。この方法は50kHzまでの周波数帯の波を入力できる特徴がある⁵⁾。

円柱端面に共振周波数80kHzの加速度ピックアップを取付け、反対側から弾性波入力を行った。波形収録にはメモリレコーダーを使用した。計測条件はサンプリング間隔を $1\mu\text{s}$ 、記録長を5msとした。

2.2 劣化収束期の大型円柱体による検討

(1) 試験体の概要

試験体は橋脚を模擬した $\phi 80 \times 150\text{cm}$ の円柱体である。各種補修・補強方法のASR膨張抑制効果を確認する目的で、1997年より金沢大学構内にて暴露されていた。佐々木らの報告⁶⁾によると、試験体は内部の半径方向のひずみが 8000μ (膨張率0.8%)に達したとあり、天端付近には1~2mm幅のひび割れが多数認められた。

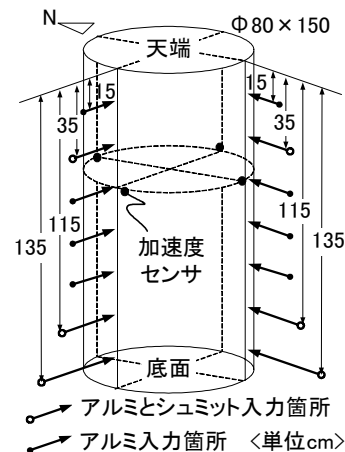
(2) 円柱側面からの高さごとの計測

計測する高さは帯鉄筋を避けるように天端部15cm下から20cmピッチの計7箇所とした(図—1参照)。センサは計測高さの4方角(東西南北)のコンクリート表面に取付け、全ての方角から弾性波を入力した。入力方法は2.1と同じである。このほか入力エネルギーを高める意味からシュミットハンマーによる入力も検討した。

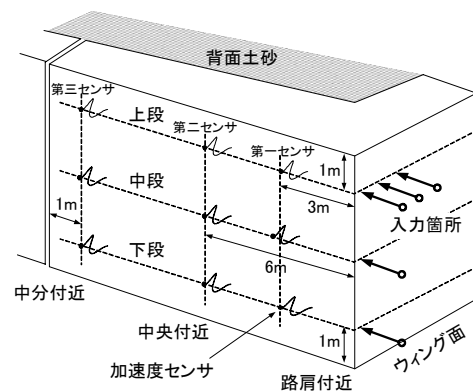
2.3 実橋台への衝撃弾性波法の適用性検討

(1) 対象構造物

対象とした構造物は積雪寒冷地域の4つの橋



図—1 高さごとの測定方法



図—2 橋台での測定方法

台 A~D である。外観観察によると、いずれの橋台も支承付近はひび割れが多く、劣化が進んでいる。また、路面排水が流出する中央分離帯(以下、中分)付近と雨がかりの多い路肩付近の劣化が大きい特徴がある。

(2) 弾性波入力方法と振動検出方法

橋台は片側車線の幅員が15m近くあり、構造物を挟み込んでの計測が困難である。そこで図—2に示すように橋台側面(以下、ウイング面と呼ぶ)からシュミットハンマーにより入力を行い、橋台前面のコンクリート面に取り付けたセンサで検出した。

計測高さは上段(天端から1m下)と下段(地表面から1m上)およびその中間(以下、中段とする)とし、センサ取付け箇所は端部から約3mと6mおよび中分側から1mとした(以下、それぞれ第一、第二、第三センサとする)。入力箇所はウイ

ング面の奥行き方向 5cm の地点としたが、橋台 C では鉄筋以深の劣化状態の検討をするため、入力箇所を奥行き方向 5cm～50cm まで変化させた。計測条件はサンプリング間隔を $1\mu\text{s}$ 、記録長を 10ms とした。

(3) コア供試体の採取

橋台前面を大きく中分付近、中央付近および路肩付近の領域に分け、各エリアで地表から上 1m 付近(下段)のコアを採取した。このうち表層付近のコアを中心に強度試験を実施した。

3. 結果および考察

3.1 小型供試体による弾性波入力

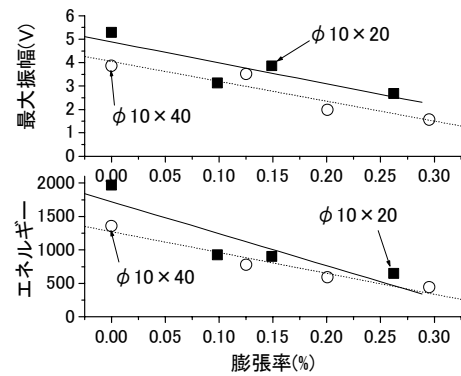
波形パラメーターとして検出波形の最大振幅値および相対的な波の強さを表すエネルギー(波形包絡線の面積)を算出した。図—3 はこれらを膨張率に対してプロットしたものである。

まず検出された波の最大振幅をみると、いずれの試験体の場合にも膨張率が大きくなるほど最大振幅は小さくなり、そのエネルギーも最大振幅の低下に対応して小さくなっている。また $\phi 10 \times 20$ と $\phi 10 \times 40$ を比べると同じ膨張率でも $\phi 10 \times 40$ の方が最大振幅やエネルギーは小さいことが分かる。

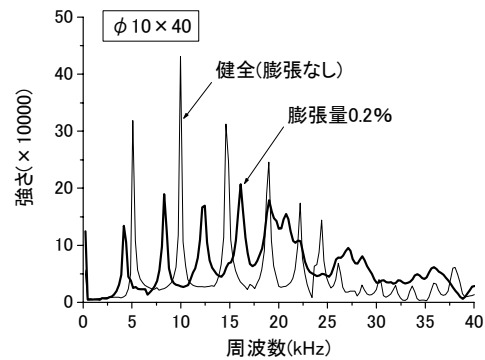
コンクリート中を伝播する弾性波は、伝播距離とともに減衰する。ASR 劣化コンクリートでは、このほか膨張により生じたひび割れ箇所での減衰が加わり、減衰が大きくなったと考えられる。距離の減衰と劣化による減衰を定量的に把握する必要はあるが、同じ伝播距離で評価を行う場合には、膨張に起因する劣化程度を捉えることが可能と考えられた。

図—4 に健全なコンクリート($\phi 10 \times 40$)と膨張率 0.2% のコンクリートで検出された波形の周波数分布を示す。これによると試験体長さを反映した応答周波数ピークが等間隔で出現し、ASR 劣化コンクリートではこれらのピークが健全なものより小さくなり、低周波側にシフトした。

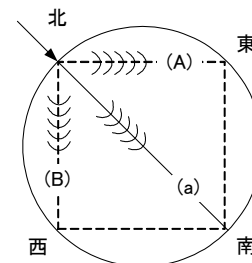
超音波法を用いた既往の検討⁷⁾によると、ASR 劣化コンクリートでは 40～60kHz の高周波成分



図—3 膨張率と最大振幅およびエネルギーの関係



図—4 膨張率と周波数分布の変化



図—5 弾性波入力方向と伝播経路(断面図)

が透過しにくく、さらに劣化が進むと 20kHz までの周波数成分も透過しにくくなると報告されている。図—4 によれば 20kHz 以上の周波数成分の変化により劣化を評価するのは難しく、このためマイクロラックでの波の減衰は捉えられない可能性もある。しかし、検出波形の最大振幅とエネルギーは、ASR 膨張による劣化と対応付けが可能であった。なお、以下の検討では最大振幅を劣化の指標として用いることとした。

3.2 円柱体による弾性波入力

大型円柱体の高さごとの計測における弾性波

入力箇所と検出される波の伝播経路の関係を図—5に示す。例えば、北から弾性波を入力すると南側のセンサでは内部を透過した波が検出される。このときの伝播経路は図—5に示す(a)である。また、北から入力して東側と西側で検出される波の主な伝播経路はそれぞれ(A)と(B)である。

全ての方角から弾性波入力を行っており、経路ごと入力と検出箇所を入れ替えたデータが得られる。同じ経路のデータはほぼ対応していることが確認されたため、片方のデータのみを使用した。例えば、図中で北東とは北で入力し、東で検出したデータを、東西とは東で入力し、西で検出したデータを表している。

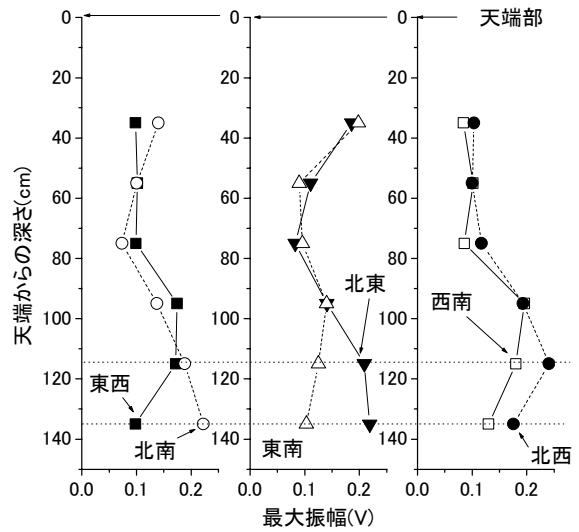
検出された波形から最大振幅値を読み取り、天端からの深さに対してプロットしたものを図—6に示す。なお天端付近の計測では、試験体上部に埋設された吊り上げ鉄筋やひずみ計コード類による反射の影響があると思われたため評価対象からは除いた。

図—6によると、天端から55cmと75cmの最大振幅は相対的に小さいが、115cmと135cmでは大きい。また、115cmと135cmでは伝播経路によって最大振幅に違いが現れており、北東や北西は大きく、東南は小さい。

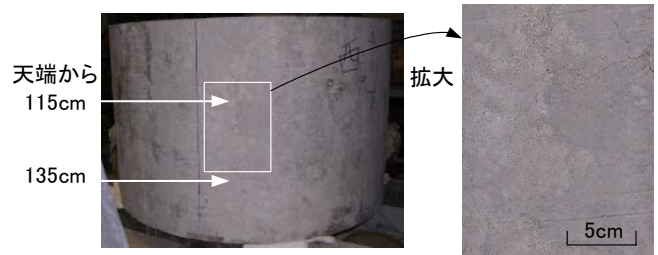
写真—1と写真—2は、それぞれ試験体底部付近の東南側と北西側のコンクリート面を撮影したものである。ひびわれ状況より同じ底部付近でも東南側の方が損傷は大きいことが分かる。

図—5の伝播経路(A)と(B)は、帯鉄筋外側のコンクリートかぶり部分に相当する。各経路を伝播する弾性波はかぶり部分の損傷度に応じて減衰するが、ひびわれの多い箇所を伝播する波はより減衰が大きいと考えられる。各経路の最大振幅の大小は、その経路に対応する方角のひびわれ状況と対応しており、この指標によってコンクリートの劣化度をある程度評価することが可能と考えられる。

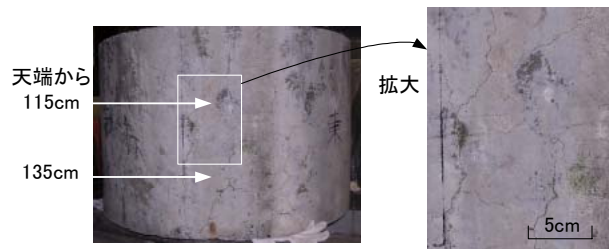
続いて弾性波入力をシュミットハンマーで行った場合の結果を示す。図—7はアルミとシュミットハンマーを用いて同一箇所で行い、



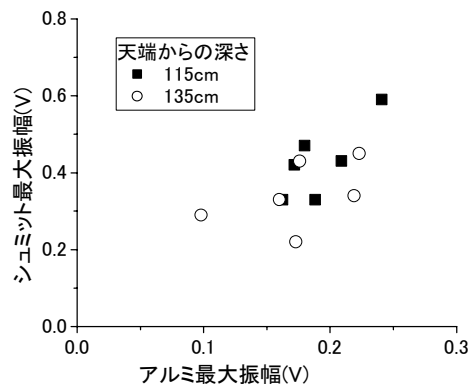
図—6 高さごとの最大振幅(アルミ飛翔体)



写真—1 北西側のひびわれ状況



写真—2 東南側のひびわれ状況



図—7 アルミとシュミットの最大振幅

表—1 橋台各部位の表面劣化状況

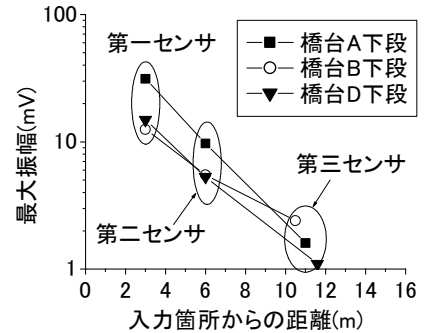
橋台名	高さ×幅 (片側車線)	前面部材 厚さ	高さ方向 の位置	外観ひびわれ状況*			コア強度(N/mm ²)**		
				路肩	中央	中分	路肩	中央	中分
A	約 6×12m	約 60cm	上段	A	C	B	—	—	—
			中段	B	C	C	—	—	—
			下段	B	C	C	26.3	23.5	29.2
B	約 3×12m	約 180cm	上段	A	C	A	—	—	—
			下段	B	C	B	23.7	31.4	30.0
C	約 6×17m	約 140cm	上段	B	B	A	—	—	—
			下段	C	C	C	31.8	28.8	35.2
D	約 6×12m		下段	A	B	B	22.4	27.1	18.6

* A: ひびわれ多い, B: ひびわれややあり, C: ひびわれ少ない, **表層付近の強度, —はデータ無し

表—2 弾性波入力実験結果

計測箇所	奥行き (cm)	検出距離 (m)	最大振幅(mV)		
			第一	第二	第三
A 上段	5	3,6,11	18.9	8.3	1.3
A 中段			26.6	6.3	1.3
A 下段			31.2	9.7	1.6
B 上段	5	3,6,10.5	17.4	9.7	2.0
B 下段			12.5	5.5	2.4
C 上段	5	3,6,15.8	51.3	12.3	1.8
	30		36.0	8.5	0.9
	50		25.7	8.1	0.9
D 下段	5	3,6,11.6	14.9	5.3	1.1

*順に, 第一, 第二および第三センサの検出距離を示す



図—8 距離と最大振幅の関係

検出されたそれぞれの波形の最大振幅を比較したものである。計測は天端から深さ 115cm と 135cm の 2 箇所で行った。

これによるとシュミットハンマーでの最大振幅はアルミ飛翔体入力の場合の約 2 倍であり, 両者の間には正の相関が認められる。

これよりシュミットハンマーではアルミの場合と同様に, 比較的安定して弾性波の入力ができると考えられ, 最大振幅の大小によってある程度まで劣化度の評価が可能と考えられる。シュミットハンマーによる入力は, より高いエネルギーの弾性波を入力できるため, 例えば, 実構造物への適用に際して伝播距離を長くする必要がある場合には有効な方法と考えられる。

3.3 実橋台における適用性検討

橋台各部位の表面ひびわれ状況と代表的な部位で採取したコアの強度試験結果をまとめて表—1 に示す。弾性波入力実験により第一から第三までの各センサで検出された弾性波の最大振幅を表—2 に示す。

表—2 によると, 橋台 A 下段と C 上段では第一センサの最大振幅が大きく, 橋台 B や D では小さくなり, 表—1 に示す路肩付近の外観ひびわれ状況と良く対応している。これらの結果は, 大型円柱体による検討結果を裏付けるものであった。すなわち今回の計測のようにウィング面奥行き 5cm の地点で入力し, 橋台表面で振動を検出する場合, 弾性波は主にコンクリート表層部を伝播するため, コンクリート表面の劣化状況に応じた減衰が生じたと考えられる。以上のことより入力箇所から 3m 離れた地点の最大振幅によって路肩付近のコンクリート表層部の劣化度評価が行える可能性はあると考えられる。

代表的な計測箇所について, 最大振幅の対数をウィングからの距離に対してプロットしたものを図—8 に示す。これによると第一センサと第二センサ間の勾配は 3 箇所ともそれほど違いはないが, 第二センサと第三センサの勾配は橋台 B が最も緩やかで, 橋台 D, 橋台 A の順に減衰が大きい。一方, 表—1 の中分付近のひびわれ状況とコア強度を見ると, 橋台 D は最も損傷が大き

く、橋台 A は B や D よりも損傷は少ないものと考えられる。

第二センサと第三センサ間の勾配は、橋台の中分付近の状態に応じて変化し、減衰が大きいほど損傷は大きいと考えたが、必ずしも外観上の損傷程度とは対応しないことが分かった。橋台 B の部材厚さは橋台 A の約 3 倍であり、また、表—1 には示していないが中央付近の深さ 50cm で採取したコア強度は 41.1N/mm^2 と表層付近よりも高かった。外観ひびわれが生じ、表層部は損傷を受けていても、鉄筋以深のコンクリート状態によっては、波は内部を透過してセンサに到達する可能性もある。検出距離が長いところでこうした影響を受けたものと考えられる。

第二センサ地点で検出される波の周波数成分を調べたところ、橋台 A と B では 15kHz まで、D では 5kHz までの周波数成分しか含まれず、とくに入力箇所から 1m の付近に幅 1~2mm 程度のひびわれが存在した橋台 D では、第一センサ地点ですでに 15kHz 付近の周波数成分が消失していた。各地点での周波数成分の違いはその後の最大振幅の減衰に影響を与えたと考えられる。

奥行き方向に入力位置を変えた橋台 C では、奥行き 5cm で入力した場合の第一センサの最大振幅は大きい、奥行き 30cm と 50cm で入力した場合には小さかった。橋台 C の路肩付近のコア強度は、表層付近が 31.8N/mm^2 、深さ 70cm では 21.2N/mm^2 であり、最大振幅の大小と対応していた。

検出距離の長いところの評価には課題を残しているものの、入力方法を工夫することにより外観からは捉えられない内部の劣化状況を把握できる可能性もあると考えられる。

5. まとめ

シュミットハンマーは高いエネルギーの弾性波を比較的安定して入力できる。このため伝播距離を長くでき、一度に広範囲を調査できる可能性がある。橋台のように検査方法が限定される場合に有利であり、例えば、コアサンプリン

グなど詳細調査実施前の一次調査的な位置付けとしての活用が考えられる。

今回は外観上のひびわれ状況やコア強度との整合性を検討するにとどまり、内部の劣化度を把握するには至っていない。しかし、外観上の劣化程度を数値的に表現できることから、目視観察の結果を裏付ける有用な情報になり得ると考えている。

謝辞

本実験を行うにあたり、金沢大学鳥居和之教授に貴重なご助言を賜りました。ここに謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 久保善司, 鳥居和之: アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化損傷事例と最新の補修・補強技術, コンクリート工学, Vol.40, No.6, pp.3-8, 2002.6
- 2) 尼崎省二: 超音波法によるアルカリシリカ反応の非破壊評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp.751-756, 1990
- 3) 尼崎省二ほか: 超音波スペクトル解析によるコンクリートの品質評価について, セ技術年報, 40, pp.158-161, 1986
- 4) 笹谷輝彦ほか: 弾性波法による ASR 損傷コンクリート橋脚の内部探査, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.115-120, 2003
- 5) 内田昌勝ほか: SIBIE 法による PC グラウトの充てん検査技術, コンクリート工学, Vol.42, No.2, pp.21-26, 2004.2
- 6) 佐々木浩文ほか: ASR 損傷コンクリート橋脚の補修・補強効果の長期確認試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1629-1634, 2002
- 7) 高木宣章ほか: アルカリシリカ反応により損傷したコンクリートの品質評価, 土木学会第 42 回年次学術講演会概要集, pp.424-425, 1986.9