

I-91 超音波によるコンクリート構造物の欠陥検出手法に関する研究

北見工大 正 員 三上修一
北見工大 正 員 山崎智之

北見工大 フェロー 大島俊之
㈱島田建設 正 員 斉藤隆行
㈱ナオック 正 員 水元尚也

1. はじめに

コンクリート構造物中に発生する様々な欠陥は健全度診断や残存寿命評価を行う上で、現場検査でのより高精度な診断の解析方法が必要である。コンクリート構造物の非破壊検査において超音波による欠陥診断や劣化度診断などは詳細な内部損傷評価に使われる。コンクリート構造物が不均一であるため減衰の少ない周波数を選択する必要がある。また大規模構造物が多いことから、伝播距離が長く大きなエネルギーを必要とする。このため減衰の少ない数〜数十kHzの周波数を使用してきた。コンクリートの非破壊検査の対象となる欠陥にはひび割れ深さ、内部の空洞、鉄筋位置など広範囲でありこれらをすべて統一した測定規格はない。コンクリートの欠陥のうちでひび割れ検出方法についてはASTM、BS などには各種規格があるが、我が国では試験装置の統一規格や測定方法の規格などはまだない。これらの方法のうち音速法は超音波の到達時間を精度良く測定することによって、コンクリート表面から深さ方向に伸びたひび割れを測定する方法である。また、鎌田らはコンクリートの裏面クラックの検出に超音波の受信最大振幅を用いた成果を発表している²⁾。一方、超音波による欠陥評価において不均一なコンクリート中を伝播する時の超音波の減衰の影響を知ることが必要である³⁾。

本論文ではコンクリート表面に発生するクラックをモデル化してその深さの測定を行いその検出と測定精度に及ぼす要因について検討を行う。また、これまで著者らはコンクリート中を伝播する超音波の逸散、散乱、材料減衰に影響する因子について検討を行ってきた³⁾。ここでは影響因子の内から骨材の全境界表面積を測定し、これをパラメータとした供試体を作製し減衰特性を実験的に検討する。また実構造物に対してひび割れ深さの測定結果を示す。

2. ひび割れ深さ検出実験方法

測定方法には電氣的外力によって超音波を入力しその反射波や到達波から欠陥の大きさを評価する超音波法、打撃による外力によって衝撃波を入力してその反射波や到達波から欠陥の大きさを評価する衝撃弾性波法などがある。このほかに超音波の応答スペクトルを解析して卓越スペクトルの特性より欠陥サイズを評価する超音波スペクトロスコーピー法による研究が行われている。

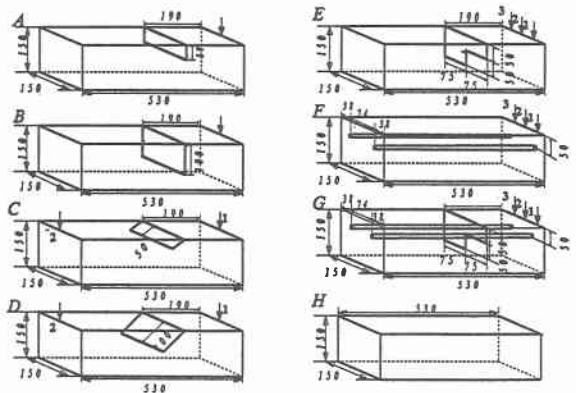


図1 ひび割れ深さ測定用供試体

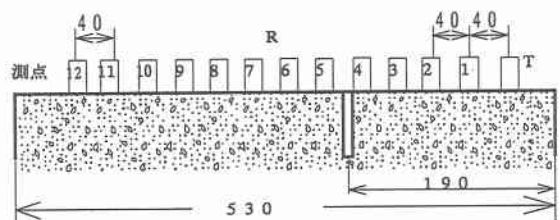


図2 センサー配置と測点

Study on the Defect Detection Method for a Concrete Structure by Ultrasonic Wave.
By Shuichi MIKAMI, Toshiyuki OSHIMA, Tomoyuki YAMAZAKI, Takayuki SAITO and Takaya MIZUMOTO.

本研究では超音波伝播過程でひび割れの影響を含む波形を測定し速度法と波形解析から欠陥検出手法について検討する。実験の供試体は、図 1 に示すような寸法 15×15×53cm の曲げ試験用コンクリート供試体に各種スリット欠陥をもうけている。供試体 A、B は垂直なひび割れの深さを変えたもので、供試体 C、D はスリットを斜め 45 度に傾けた欠陥である。供試体 E は欠陥深さが途中で変わるもので、供試体 F はコンクリート中にかぶり 5cm、鉄筋間隔 7.4cm、鉄筋径 19mm の丸鋼を内包しており鉄筋による影響を調べる。供試体 G は供試体 E の欠陥と供試体 F の鉄筋の影響をあわ

せた供試体である。コンクリートは水セメント比 50%、セメントは普通ポルトランドセメント、骨材には札内川産川砂利と川砂を使用し（粗骨材最大粒径 25mm）、4 週間の水中養生経過後実験を行った。スリットは 1mm 厚の亚克力板を欠陥の形状に製作して打設時に所定の位置に固定し、脱型時に抜き取って作製した。実験方法は図 2 に示すような超音波センサーを用いて入射センサー(T)を固定し、受信センサー (R) を測点 1～12 まで移動して波形を記録した。測定システムは超音波の増幅回路と高速メモリー、波形データの記録部分で構成される。高速メモリー部分には最小サンプリング間隔 25ns のウェーブメモリーを使用している。測定時間は入射点からの距離によってサンプリング個数で調整している。入射センサーには AE センサー(共振周波数 50kHz)を使用し、受信センサーには AE901S(共振周波数 150kHz)と AE901WB(高帯域センサー:50kHz～1.5MHz)を使用した。入射電圧は 10V で継続時間 10 μ s である。測定の再現性を保つため供試体とセンサーの密着度が得られるように配慮した。

3. ひび割れ深さ検出精度の検討

ひび割れ深さの検出には前述したように各種方法がありここでは走時曲線（伝播距離－時間曲線）を用いた速度法による解析とその測定精度について検討する。ひび割れ位置での超音波の到達時間は近似直線により推定することにした。つまり測定結果より求めた走時曲線をもちいてひび割れ位置より後ろの測点で測定した到達時間より直後の 3 点を選んでこの到達時間を最小二乗法による近似直線の関数を求めている。表 1 にセンサー AE901S の場合のひび割れ深さとひび割れの傾きによる測定結果をまとめている（表中長さの単位は mm、角度は度である）。また図 3(a)は欠陥の長さや傾きに関する定義を、図 3(b)は供試体 E、G における測線の配置を示している。供試体 A、B は解析結果よりひび割れ深さが約 16mm 程大きく求められていることがわかる。供試体 C、D はひび割れが傾いているため測線 1（入射センサーの位置に対して 135°の傾きになるような方向に設置して受信センサーを移動して測定）と測線 2（入射センサーを反対側に移動して同様に測定）で測定を行っている。この結果、測線 1 の結果はほぼ欠陥の長さとも一致しているがひび割れ深さとは一致していない。このことはひび割れの傾きに対して鈍角に傾いた側からの探傷を行うと測定結果はひび割れの長さに近いことを表している。

次にひび割れの深さが途中で変化する場合にひび割れ深さが測定に与える影響は、超音波の三次元的な伝播経路から最短距離を考える必要があり、波線理論による解析が可能である。供試体 E の測定は三つの測

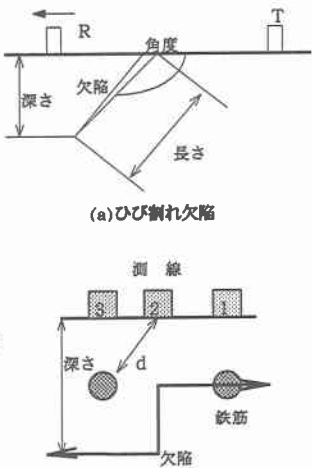
表 1 ひび割れサイズと解析結果

供試体	欠陥形状			欠陥サイズ	
	測線	長さ	角度	深さ	解析
A		50	90	50	66
B		100	90	100	117
C	1	50	135	35.4	55
	2	50	45	35.4	23
D	1	100	135	70.7	98
	2	100	45	70.7	51
E	1	50	90	50	54
	2	50/100	90	50	87
	3	100	90	100	102
H		—	—	—	2

表 2 鉄筋配置によるひび割れサイズの影響

供試体名	欠陥長さ		鉄筋位置	
	測線	深さ	解析	d
F	1	0	5	50
	2	0	5	61.6
G	1	50	48	50
	2	50/100	71	61.6
	3	100	54	50
H		—	2	—

(単位:長さ=mm、角度=度)



(a) ひび割れ欠陥
(b) 測線配置と鉄筋配置
図 3 ひび割れの形状と測定

線について行った。ひび割れ深さ 50mm 上で測定した場合を測線 1、ひび割れ深さ 100mm 上で測定した場合を測線 3、ひび割れ深さが変化したところの測定を測線 2 としている。測線 1 と測線 3 の結果はひび割れ深さを精度良く表しているが、測線 2 の結果は深いひび割れ部分からの影響かコンクリート内部の骨材による減衰で大きな値となったと考えられる。波線理論から考えると測線 3 の測定結果にも浅いひび割れ部分からの超音波が早く到達することが予想できる。ひび割れ深さの変化率によってもその影響が変わるので理論的な検討とあわせて実験による測定を重ねる必要がある。表 2 にはコンクリート内部の鉄筋位置による影響の結果を示す。またセンサーの違いによる影響についても検討しているがここでは説明を省略する。

4. コンクリート中の骨材量と減衰特性

コンクリート中の骨材量と減衰定数の関係について、明石 ⁴⁾ は散乱減衰定数に関する関係式を示している。骨材とモルタルの境界面積はコンクリート中の骨材の表面積を測定することに帰着するが、複雑な形状をする骨材の表面積を一つ一つ測定できる簡便な手法は今のところ見つかっていない。ここでコンクリート中の骨材

の表面積を簡便な方法で打設前の骨材を使ってこの関係を測定することにする。そこで骨材をあらかじめふるい分けし粒径を整え骨材の写真を撮り適当な画像処理を用いて平面的面積を求める。その面積を骨材の個数で割ると骨材一つあたりの平面的面積と粒径が得られる。骨材を球体と仮定してこの直径より骨材一つあたりの表面積を計算する。この表面積は、骨材を扁平楕円体と仮定した場合の平均表面積に近い結果であった。その結果より得られた表面積が表 3 の全境界表面積である。ここで細骨材についてはこれまでどうり骨材粒径をふるい分けにより整えて骨材を球体と仮定して全境界表面積を算出している。

供試体は 5×5×40cm の角柱供試体中に表 3 のような 10 種類の骨材を入れて作製した。この供試体の一端を固定して片持ちばりとして自由振動させ、はり先端の加速度を測定した。振動試験は加振力の入力方法によって単純な曲げ振動とねじり振動の 2 種類についてそれぞれの振動方向に加速度計の振動方向を一致させることによって測定を行った。それぞれの自由振動波形を自由振動法によって解析を行いまとめたのが表 3 の減衰定数 (h) である。減衰定数ごとに減衰振動波形の振動数 (f) も一緒に示している。曲げ振動による h は 4.4% から 7.3% で、ねじり振動による h は 3.7% から 9.4% となった。粗骨材の全境界表面積と減衰定数の関係を表 3 から抜き出して作図したのが図 4 で実線が曲げ、破線がねじりである。粗骨材量の増加に伴い減衰定数が減少傾向が見られる。しかし、骨材量が少ないときに曲げとねじりでは差が大きくなる。これらの減衰定数の結果には供試体質量、等価剛性による振動数依存性等も考慮しなければならない。

表 3 供試体による骨材の全境界表面積と減衰定数

供試体	全境界表面積 (cm ²)	粒径範囲 D(cm)	曲げ振動		ねじり振動	
			h(%)	f(Hz)	h(%)	f(Hz)
P J	0.0	.0<D≤0.06	5.55	19.7	7.34	13.2
P A	515.2	1.0<D≤1.5	5.53	18.1	9.41	22.5
P B	996.7	0.5<D≤1.0	7.25	23.0	6.22	23.1
P C	1328.6	0.5<D≤1.0	6.28	20.3	5.50	20.8
P G	1727.9	.12<D≤.25	6.87	16.8	6.20	11.3
P E	2159.8	.25<D≤.5	4.25	36.6	5.77	29.8
P F	3455.9	.12<D≤.25	5.37	15.9	7.04	12.5
P D	4319.9	.12<D≤.25	4.39	27.8	3.69	30.4
P H	5428.7	.25<D≤.5	6.34	19.4	6.44	12.1
P I	11104.1	.06<D≤.12	6.30	20.4	6.75	12.8

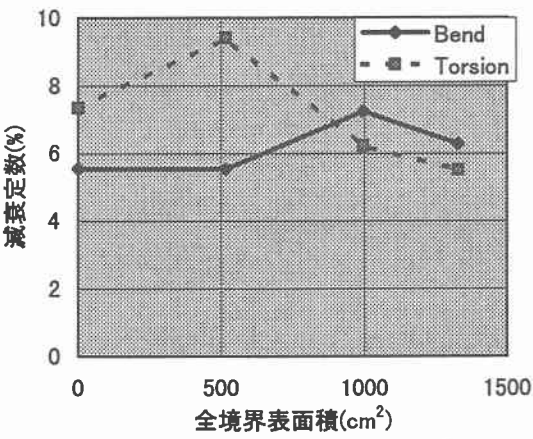


図 4 粗骨材の全境界表面積と減衰定数

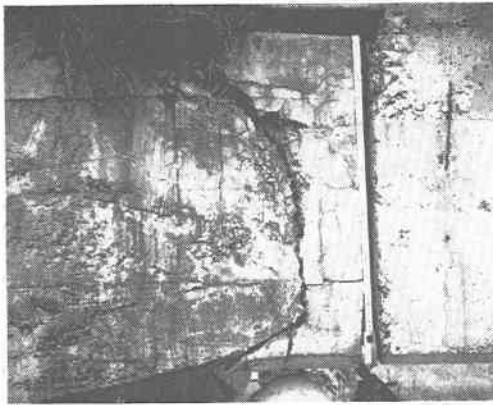


写真1 ゲルバーヒンジ部分の損傷状況

5. 実構造物のひび割れ深さ検出試験

1995 年に取り壊された北見市内に架かる連続ゲルバー桁橋は写真1のようにひび割れによる損傷が顕著であった。このゲルバーヒンジ部のひび割れ深さを超音波による非破壊検査手法で測定した。測定方法はひび割れが写真のようにゲルバー桁の上下方向に貫通した部分を含むことから超音波法による測定が不可能であった。このため比較的容易に高いエネルギーを得ることができる衝撃弾性波法による試験を選択した。測定はゲルバーヒンジ部下側の幅 5m を 20cm 間隔で 23 点の測線を設けた。各測線ごとに図5に示すようにひび割れを挟むようにひび割れ手前 40cm の位置を打撃点とし打撃点から 20cm を A 点とし、ここから 5cm 間隔で 8 点の測点を設け測点 A から各測点までの弾性波の到達時間を求めた。この結果から走時曲線を求めひび割れ位置でのひび割れ深さを求めた。この結果ゲルバーヒンジ部のひび割れ分布が図6のように求めることが出来た。ゲルバーヒンジのけた高が 75cm であるのに対して測定結果が約 90cm であったのはこのひび割れが斜めに傾いているためであると考えられる。このひび割れがゲルバー部の鉄筋を貫いている場合には測定結果には鉄筋の影響が含まれるが、この場合ゲルバー部の損傷形状からひび割れは鉄筋を貫通していなかったことが確認出来たので測定結果に与える影響は少ないと考えられる。

6. まとめ

コンクリート構造物の損傷をより定量的に測定する技術の開発は、本論文のように開口クラックが単独で分布する場合に関する測定結果を示した。実際のクラック先端部は完全に離れているわけではない。また、鉄筋による影響や空洞などの影響、クラックが複数に分かれている場合など実用に向けての問題点があげられる。また、コンクリート中の骨材の全境界表面積の簡易測定方法を用いて全境界面積と曲げ・ねじり振動試験から求めた減衰特性の関係を検討した。減衰を考慮した波形解析による欠陥評価の確立が必要となる

本論文の実験・解析を行った北見工大土木開発工学科構造研究室の角、中村両君に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の非破壊試験法、養賢堂、1994.12。
- 2) 鎌田、岩波、長滝、大即：超音波によるコンクリートのひび割れ高さ推定法に関する一提案、土木学会論文集 No.538/V-31, pp.81-93、1996.5。
- 3) 三上、大島、山崎、ほか：コンクリート部材の振動逸散減衰特性、土木学会北海道支部論文報告集、第52号(A)、pp.494-497、1996.2。
- 4) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験に関する研究、土木学会論文集、第390号/V8、pp.1-22、1988.2。

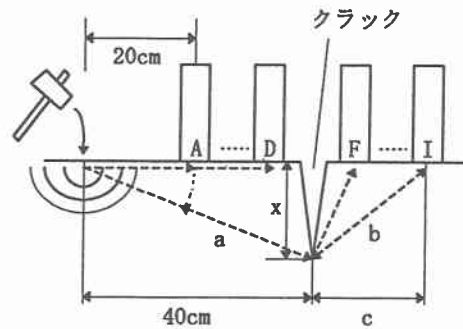


図5 衝撃弾性波試験によるひび割れ測定原理

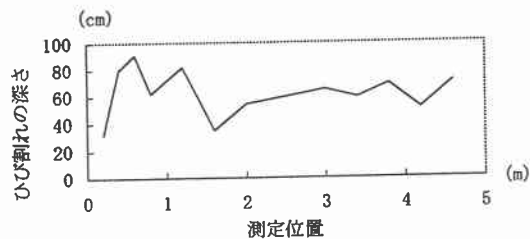


図6 解析結果