

下水処理場の長寿命化に対する弾性波試験法の適用

AN APPLICATION OF ELASTIC WAVE METHOD FOR LONGEVITY OF A SEWAGE DISPOSAL PLANT

オリジナル設計(株) 鈴木 克利
オリジナル設計(株) 坂本 智
オリジナル設計(株) 山崎 一義
iTECS 技術協会 極壇 邦夫

下水処理場施設の長寿命化を図るためには、構造物の適切な健全性試験が不可欠であるが、現状はいろいろな方法が試行されている段階と思われる。これまでの健全性の評価は表面から観測できるものが大半であった。本文は、厚さ1メートルと普通よりも厚い水槽壁面に漏水が見られたので、コンクリート壁内部の基本的な情報を得るため衝撃弾性波法（iTECS 法）を適用したものである。厚さの測定、内部欠陥の分布計測したところ、背面に水が充満した状態でも、iTECS 法により妥当と思われる結果を得た。柱の透過弾性波速度も測定した。

キーワード：下水処理場、長寿命化、iTECS 法、水槽、厚い壁

1. まえがき

コンクリート構造物の健全性は、構造物の許容支持力と許容変形が、目標とする構造物の機能を発揮しうる程度を示すだけでなく、将来における構造物の劣化度合いの予測という面も含んでいる。

通常、コンクリート構造物は、長年にわたるコンクリートの性質の変化を考慮に入れて、所定の試用期間中は充分その機能を果たすように設計および施工されているはずである。しかし、新聞などで報じられているように、コンクリート構造物に予期しない損傷が生じていることも事実である。

今回、下水処理場のコンクリート構造物を対象にして、衝撃弾性波法を適用して健全性評価のための基礎データを採取して検討した。

鉄筋コンクリート造の水槽に漏水が見られた。漏水の原因は多くの種類があり、その位置や原因を直接計測し、解析することは困難を極めることだと考えられている。それよりも漏水している部分のコンクリートの性状が健全なのか、また内部にジャンカなどが形成されていないかというコンクリートの根本的な情報を得て、何が漏水の要因かを知ることが重要と考えて計測した。

厚さ1メートルと普通よりも厚い水槽壁面を対象にした場合、衝撃弾性波法（iTECS 法）によって、厚さ、内部欠陥などを果たして測定可能なのか検討した。背面に水が充満した状態での厚さ、内部欠陥の範囲は概ね妥当と思われる結果を得たので報告する。

2. iTECS 法による厚さと内部欠陥の測定

衝撃弾性波法は、コンクリート表面をインパクト（鋼球など）で打撃し、パルス状の弾性波を発生させ、コンクリート構造物の応答をセンサーで捉えて、解析する方法である。基本理論は、Sansalone M. らによって提唱されたものである。基本的な測定原理は、弾性波が板状のコンクリート構造物の厚さ方向に多重反射する過程で、厚さの2倍を波長とする特定の周波数成分が生成され、この特定の周波数とコンクリートを伝搬する弾性波速度とから厚さを算出されることになっている。また、構造物内部に空洞などの欠陥がある場合には、測定面とその空洞境界面との間で多重反射が成立し、空洞の深さに対応した固有周波数が生成されるとされている。しかし、iTECS 法の研究の進展に伴い、コンピュータを用いた数値計算や実際の測定事例の解析を通して、測定原理自体に適用限界があること、

また、内部欠陥検知では、必ずしも Sanaslone らの説明が妥当ではないのではないかと疑問が提起されている。衝撃弾性波法の基本原理から考察し、特に内部欠陥を検知する場合の測定方法、解析方法の違いが解析結果に与える影響について iTECS 法の解析技術は次のとおりである。

Impact-Echo 法では測定量として変位、iTECS 法では、速度を用いる。インパクトによる入力波長が板の厚さの固有波長よりも長い場合、速度応答をベースとした多重反射波形では固有スペクトルの抽出が可能であるのに対し、変位応答をベースとする多重反射波形では固有スペクトル分析できないことがシミュレーションされている。

すなわち、多重反射によって固有スペクトルが生成されると論文などで説明されてきたが、多重反射によって特定スペクトルが大きくなる条件は、(1) 正負の振幅を持つ入力波形を持つこと、(2) その波長は固有スペクトルの波長よりも長いこと、が成立条件となっていることがわかった。測定した応答波形を周波数分析して「厚さ」の解析を行うという Impact-Echo 法の基本原理は、入力波長の 1/2 程度のとき、最も適用性が高いが、入力波長が短くなることによって高調波成分が生成され、「厚さ」と「内部欠陥」の判別が難しくなる可能性があることがわかった。

iTECS 法では固有スペクトルの波長よりもインパクトによる入力波長が長いことが必要条件であるので質量の大きいインパクトを使用できるが、Impact-Echo 法では 1/2 程度が適しているので質量の小さいインパクトが採用される。1 メートル程度の厚いコンクリート板を多重反射によって測定するには、インパクトの質量を必然的に大きくなるので、調査には iTECS 法を採用した。

コンクリートの厚さ D は式 (1)

$$D = \frac{V_p}{2f} \dots \dots \dots (1)$$

より計算した。 V_p はコンクリートを伝搬する縦弾性波速度、 f は多重反射による固有周波数である。

3. RC 造水槽壁の状況と測定装置

測定対象の RC 造水槽の大きさは、幅 4m 長さ 5m 高さ 6m で、測定位置は底面を基準として 100cm から 280cm までである。図 1 に示すように 2 本のひび割れ線に沿って漏水が見られる。設計厚さは 100cm で、複鉄筋で、設計強度は 21N/mm² である。測定ラインは、縦 6 本、横 6 本、30cm メッシュで、測定位置はラインの交点で、測定数は 36 点である。広い範囲にメッシュを記して測定するのは厚さおよび内部欠陥の空間分布を把握するためである。

衝撃弾性波は、測定装置 iTECS-4 を用いて、コンクリート表面をインパクトで叩き、約 10cm 離れた点に加速度計を手で押し付けて測定した。サンプリングクロック 2μs、サンプリング数 5000/ch である。

厚さおよび内部空洞を計測するときのインパクトは、900 グラム、105 グラム、33 グラムの 3 種類を使用した。インパクトの質量を変えるのは、長波長および短波長の入力波長に対する弾性波応答を計測するためである。



図 1 RC 水槽壁厚 1m の測定

4. RC 造水槽壁内部欠陥の測定結果

鉄筋コンクリートの厚さが 1m であるのでインパクト 900 グラムで打撃した場合について述べる。少量であるが漏水しているためコンクリート表面に汚れが付着しているところは、スクレーパーでゴミを除去した。

図 2 に内部欠陥のあると想定される速度波形とスペクトログラムを示す。実際の速度波形は 10 ミリ

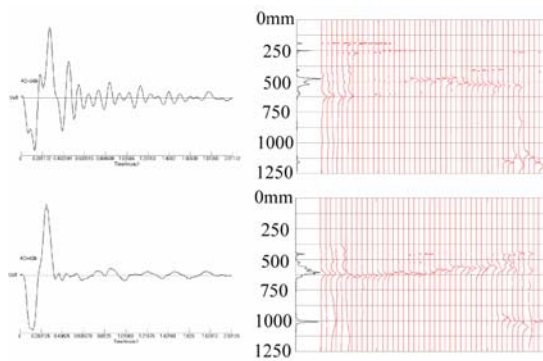


図2 速度波形とスペクトログラム（欠陥あり）

秒測定しているが変化の大きい初期の2ミリ秒を抽出した。スペクトログラムは、時間経過によって時間軸波形がどのように変化するかを調べるもので、建築学ではランニングスペクトルと呼ばれる。図2上部の速度波形を見ると、短い周期と波形の減衰が比較的大きいのが特徴的である。右のスペクトログラムは最初は200mmに強いスペクトルがあるが継続していないことから微小な傷、欠陥と推測される。真ん中付近から500mmのスペクトルが卓越しているの、表面から500mm付近にかなり大きな隙間（内部欠陥）が存在すると推量される。

図2下部の速度波形をみると、打撃力波形（最初の1周期の波形はインパクターの打撃による応答波形）以後は周期が一定のように見える。スペクトログラムは、ほぼ620mmに一貫して継続し

ているのでこの部分に音響境界面が存在することは確実である。したがって、部材厚さ1mのコンクリートの620mm付近に空隙が存在すると推測される。

図3は、内部欠陥が無いと考えられる場合である。速度波形から2ミリ秒の波数を数えると約4である。周波数に換算すると2000Hzとなるので、 V_p を4000m/sとすると、式(1)に代入すると $D=1m$ と算出される。波形に小さいギザギザが見られがこれは高調波が乗っているためである。スペクトログラムによると、厚さ1000mmにスペクトルが集中している。このような場合は、内部に欠陥は存在しないと判断される。

図4は、全部の測点のスペクトルを連結して擬似的な弾性波レーダ画像として表示した。縦軸に厚さ、横軸に測定線ごと（ひとつの測定線に6個の測点がある）のスペクトルを示した。各測定線ごとの弾性波レーダ図に共通して左側が500mmから800mmくらいまでばらつくが、右側は1000mm付近に集約する傾向がわかる。内部欠陥がある範囲に集中して集まり、広い欠陥面積を形成するときはコンクリート構造物として応力変形など慎重に検討しなければならない。

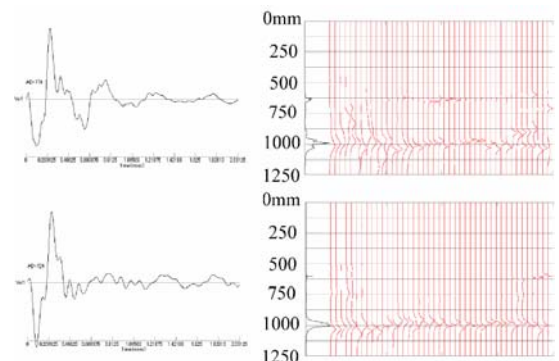


図3 速度波形とスペクトログラム（欠陥なし）

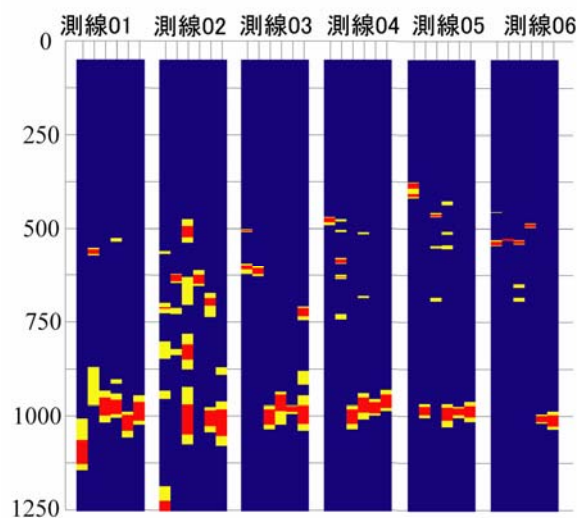


図4 壁内部の弾性波レーダ

1131	564	989	972	1000	995
456	696	1016	637	1005	1015
603	611	1005	995	977	1001
476	585	996	972	992	970
412	621	465	994	989	988
541	530	537	492	1008	1015

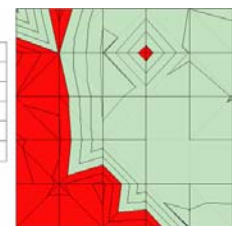


図5 内部欠陥の分布

図5に、厚さあるいは内部欠陥の厚さをまとめて示した。弾性波が最も強く反射するスペクトルの距離が表面からの厚さを示すとして、表と等高線で表示した。

構造物の設計図から、左側2列は柱面を計測していると推測されるが、この柱は1200mm×1200mmの正方形であり、計測面には、D25が9本並ぶ密な配筋がされている。柱主筋の内側にはさらに壁の横筋D22@200が並んでおり、計測面直下の配筋は、かなり密になっていると判断される。

柱の背面には柱がついている場合、この部分を計測すると波動の戻りがなく、減衰の大きな波形えられると考えられるが波形によると、むしろ右側の4列より大きく振幅している。このようなことから、計測点直下にはコンクリート周りが悪く内部の空隙（剥離）があると推量される。



図6 ジャンカのある柱

5. ジャンカのある柱の透過速度

iTECS法では、周波数スペクトルを定めるとき縦弾性波の厚さ方向への多重反射を利用するが、縦弾性波は厚さ方向のみでなく、幅・長さ方向に対して十分な大きさでなければ、幅方向で多重反射する縦弾性波が観測され、平板のように正確な周波数を測定することが困難となる。すなわち、柱のように四角な断面を有するものは多重反射によって厚さを計測することは実際には無理である。そこで、ジャンカのある柱を測定対象にして、多重反射に代わりに透過速度を測定した。図6に柱の状況を、図7に透過速度の測定例を示した。ジャンカのある柱の厚さは800mmで、表面側に部分的にジャンカがある。金具を取り付けるための穿孔作業によって、内部のジャンカの状況を目視によって確認している。

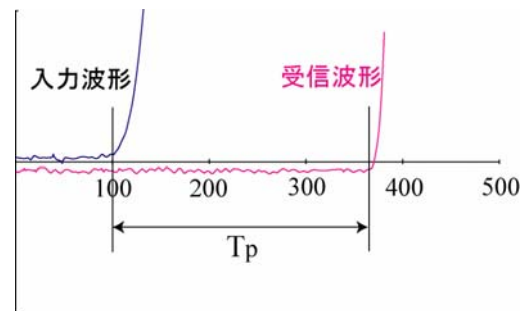


図7 透過速度の測定結果

図8に透過法による弾性波速度の測定結果を示した。ジャンカがない部分は、弾性波速度が3900m/sから4000m/sであるが、ジャンカがある測点区間では、約3500m/sと明らかに弾性波速度が低下している。したがって、多重反射では困難な柱の内部欠陥（ジャンカ、ひび割れ等）を計測する方法として透過速度を測定する方法は有効であると考えられる。

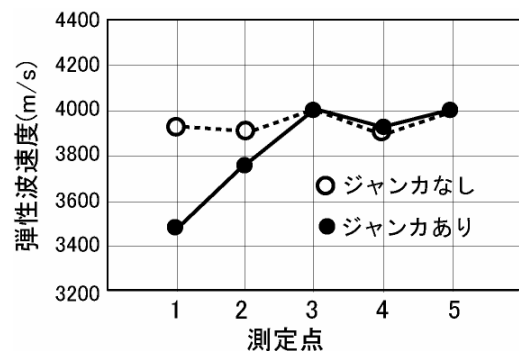


図8 透過速度の比較

6. まとめ

厚さ1mのRC水槽の壁に漏水が見られたので、その内部状況を iTECS法で計測した。また、柱の透過速度も測定した。

- (1) インパクトによる入力波形が測定対象のコンクリートの固有スペクトルよりも大きいインパクトを使用したところ、RC壁1mの厚さおよび内部欠陥までの深さ、ならびに内部欠陥の広がり分布を測定できた。
- (2) 柱の透過速度を測定して、ジャンカがない部分は3900m/sから4000m/s、ジャンカがある区間では、約3500m/sと弾性波速度低下の変化する状況を分布図で表示した。