

論文

[1100] 打撃超音波によるトンネル覆工厚さと背面空隙深さの同時測定

秋鹿為之*¹・佐藤 務*²

1. はじめに

トンネルの覆工部、法面、スラブなど地面と接しているコンクリートは経年と共に境界に隙間を生じ、この深さが次第に進行して表裏の両面共空気に接する所が少なくなる。地盤に接して支持層としている構造物に隙間が生じると強度に大きな悪影響をもつようになる。このため隙間を検知して裏込め補修をして支持層と一体化しておく必要がある。

一方隙間検出の非破壊検査法は電磁波、赤外線、打音などがあるが何れも隙間有無の判断にとどまり深さを求めるまでには至らない。このため隙間の存在が判明してもその程度が不明なため補修工事の緊急性や補修材料の必要量積算ができず、安全上や経済上問題をもつ。そこで隙間の深さを非破壊検知する方法として打撃超音波を利用しトンネル覆工を主に躯体厚さと隙間の深さを求める試みを行なった。

2. 測定法

2. 1 測定法の原理

外力が固体に瞬間的に作用すると固体は衝突現象で反発する。ことに微小面積の瞬発外力は深部方向に体積の圧縮歪が生じ、反動で歪解放の伸張が契機となって深部に密度変化の縦波弾性波が発生する。そして水平方向には固体の表面張力変動に伴う表面波が生じる。深部方向に発生する体積変動は固体の色々な固有振動を一度に刺激するので発生縦波はフーリエ級数に示される広い範囲の周波数帯域波動となる。それで可聴音域の周波数から超音波に至る複合周波となり、伝播波動には振動エネルギーのもっとも大きい基本波に超音波の高次波動が重なって同時に伝わる。

このような現象が安定して発生するのは外力が固体の歪解放前に除かれることが必要で、このための手段としては単純形状のハンマ打撃がもっとも適している。例えばコンクリートに重さ2kg程度のハンマで打撃すると基本波は約1kHzで高次の超音波は数100kHzにおよび、高密度コンクリートでは厚さ1mで約2MHzの波動が充分な感度で受信された例がある。このように打撃で広範囲の超音波が発生できる上、固有振動の波動なので機械的Q値が小さくこのため高次波程波数が少なくなり、50kHz付近では大凡そ5波から7波程度となる。これはダンピング効果のきわめて高い電気音響変換子のような波動になるので反射測定で分解能の高い測定が可能となり、その上機械的打撃なので材質状況に応じて打撃力が変化できるので発生振動エネルギーの加減ができるのも特徴である。そして基本波に高次波が含まれる複合周波はコンクリートのように構成材質が複雑で不均一でも容易に深部に直進し、クラックや剥離などの異常部分では高次波から順次反射する。このように打撃超音波法は電気音響変換する通常の超音波法にはみられない特徴がある。

その上複合周波の波長がコンクリート躯体の厚さと合致するか、厚さよりも長い波動はコンクリートの背面を新しい波源として空隙層に波動が放射すると考えられる。この放射波動は空気の伝播速度で伝わり、地山との境界で全面反射して再び躯体に浸透して表面に到達する。

*1 (有)戸塚電子計測研究所 代表取締役(正会員)

*2 東急建設(株)技術研究所 メカトロ研究部 主任研究員

そこでこの間の所要時間を求めれば空隙の深さを容易に知ることができると考えられる。

一方躯体背面からは厚さに対応した高次波が反射してくるのでこれから厚さが求められる。このような測定を電気音響交換する通常の超音波で行なうのは変換効率などの関係からきわめて困難だが、打撃超音波なら大変簡単にできる。ただ厚さに比べて空隙が浅かったり、面積が著しく小さいと単に隙間の存在だけを知るにとどまる。打撃超音波法はこのような考えによる。〔1〕

2. 2 測定装置の構成

打撃超音波による反射測定は発生する超音波を利用すると共に、波動の発生時刻を精密にとらえることが重要である。打撃の波動発生をとらえる方法として、ハンマが躯体に接する瞬間をとらえるもの、ハンマの柄が変動する瞬間をとらえるもの、表面振動を検出するものなどが地質調査の分野で利用されている。一方コンクリートは地質と違って波動の伝播速度や測定範囲が金属の超音波探傷と殆んど同じである。このため打撃測定でも金属超音波探傷器と同等の精度が必要である。ただコンクリートは金属のような単純素材でなく複合材料なので部分的に構成材質が大きく異なる。このため場所によって打撃に対する反発力や反発反応時間に違いが出る。それで超音波センサで表面振動の開始時刻をとらえるようにしている。超音波センサはショック表面振動には敏感だが、周囲環境雑音の影響は少ない。超音波センサでとらえた表面振動の初動で鋭いトリガパルス波を設定して打撃時刻とする。また反射波の受信も同様形状センサを使用する。どちらも検出波動は可聴域なので通常の超音波法の接触媒質は不要で表面処理もとくに必要ない。

そして反射波はフィルタ回路で所定の超音波信号を取出す電気回路に加える。このように打撃超音波法はトリガとフィルタの二つの電気回路部門と超音波センサの組合せが基本になっていてこの出力電気信号を任意の波形観測装置で観測する。図-1に測定装置一式を示す。左側は観測装置、右側は電気回路部である。図-2は測定例である。

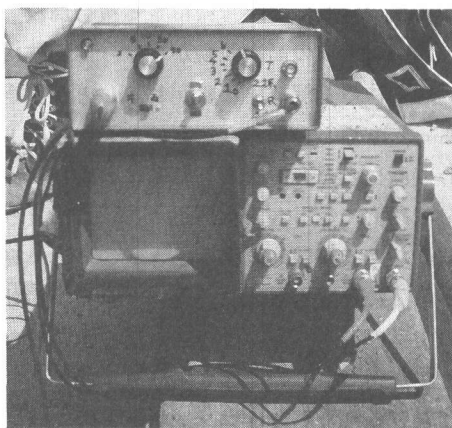


図-1 測定装置一式

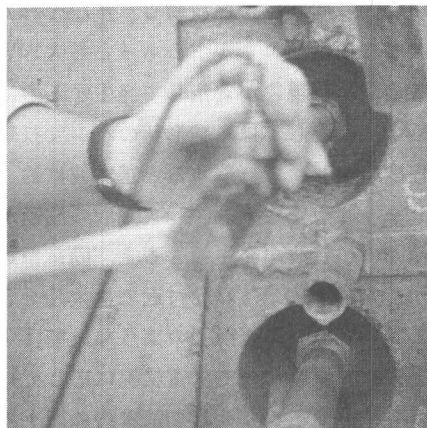


図-2 測定例

3. 測定結果

3. 1 供試体による検討

コンクリートの超音波測定周波数は50kHzがもっとも多く、打撃でも厚さ測定はこの波動を利用している。一方、背面の空隙部に波動を放射させるには厚さに共鳴する周波数が必要で伝播速度が4000m/sの場合1cm当り200kHzが目安となる。一方トンネル覆工部は数10cm以上の厚さを

もっているのが基本周波数は数kHzとなる。ただ数倍の高調波なら充分放射するが、空気中での波長が短かいと減衰が烈しくなるので、せいぜい30kHz以下と考えられる。そこで躯体厚さの反射と背面空隙放射波の状況を把握するため図-3に示す形状の供試体で検討実験をした。供試体は表-1に示す割合によっている。

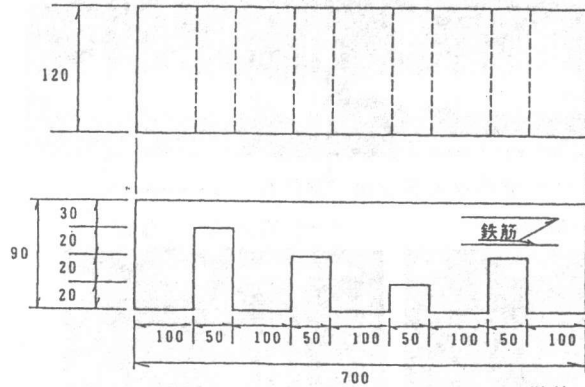


図-3 コンクリート供試体 単位 cm

表-1 供試体割合表

C (kg)	G (kg)	S (kg)	W (kg)
347	1012	809	167

AE減水剤 (kg)	W/C (%)	S/A (%)	スランプ (cm)
3.47	48	44.9	15

表-2 各溝間の伝播速度

測定は各溝の垂直方向と幅方向で躯体速度を、次に空隙60cmの溝部で空隙波を求めた。これは躯体底部から5cmずつ離して受信したが、この結果を表-2と表-3に示す。

厚み cm	30	50	70	100	120
所要時間 μs	100	140	180	240	300
伝播速度 m/s	3000	3600	3900	4200	4000

また図-4は躯体速度測定波形で、立上りを明確にするため方形波とした。図-5は空隙波で周波数の変化をみるため両振れ波とした。

表-3 30cm下空隙深さ変化と伝播速度

受信センサ空隙間隔 cm	5	10	20	30	40	50
表面からの所要時間 μs	280	520	720	1040	1240	1400
逆算空隙間隔 cm	6	14	20.6	31.3	38	43.3

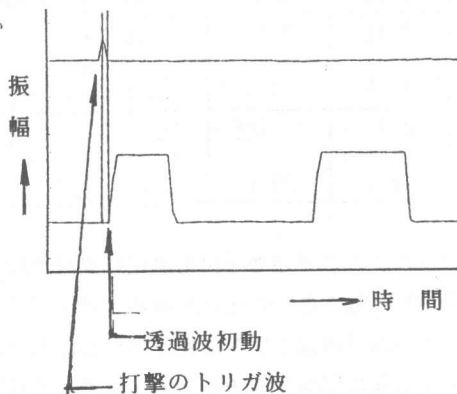


図-4 30cm厚透過波形例

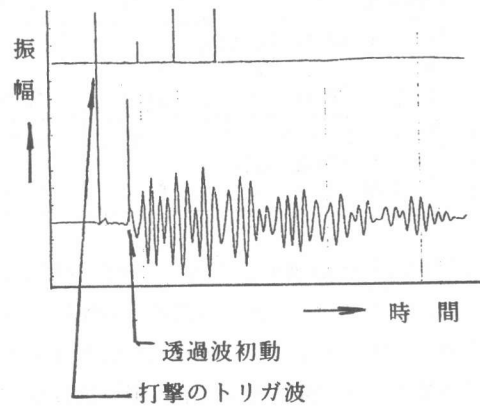


図-5 30cm下空隙50cm透過波形例

透過測定の結果、躯体から空隙部へ放射される空隙波が確認できたので、各溝の上面からの反射測定で躯体の厚さと空隙下の地山の反射を測定した。この測定波形の一部を図-6に示す。図中左カーソルは打撃時刻、右カーソルは躯体および地山の初動反射位置を示す。またこの測定結果を表-4に示す。表-4で空隙深さは空気中速度340m/sと、打撃から地山反射波動までの全時間で求めたものと、躯体の伝播時間を差し引いたもので示した。

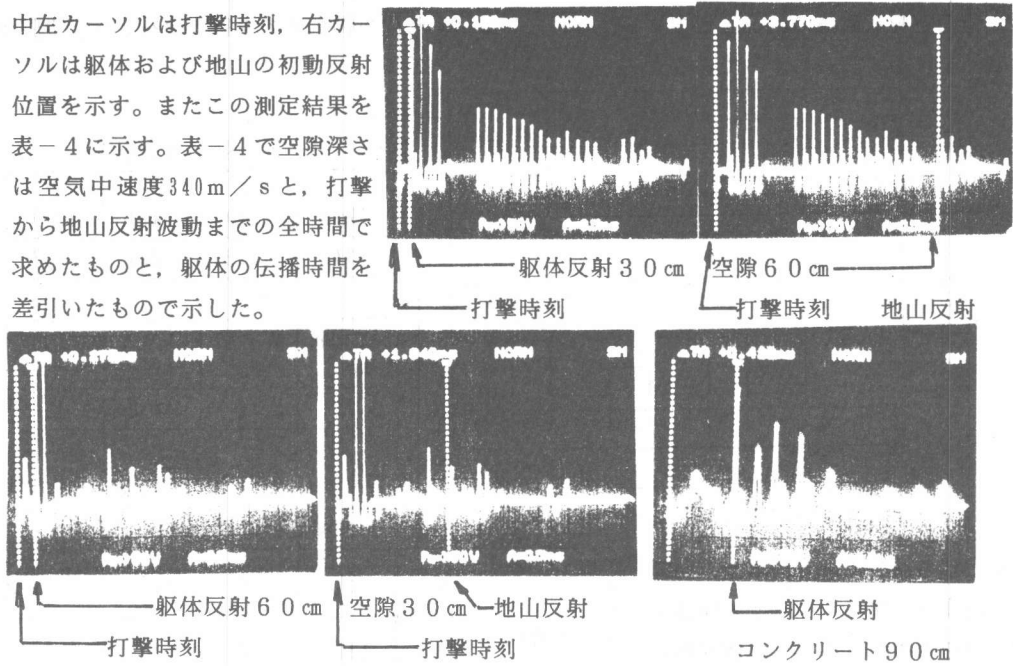


図-6 厚さと空隙の反射波観測例

表-4 供試体の厚さと空隙深さ反射測定結果

供試体	コンクリート厚さ (cm)	30	50	鉄筋入り 50	60	70	90
	空隙深さ (cm)	60	40	40	30	20	0
算出	コンクリート速度 (m/S)	3300	4350	4350	4360	4000	4230
所要	時間 (μs)	0.18	0.23	0.23	0.275	0.35	0.426
算出空隙深さ	全測定時間 (ms)	3.77	2.5	2.53	1.84	1.45	/
	と深さ (cm)	64.1	42.5	43.0	31.3	24.6	
算出空隙深さ	コンクリート差引時間 (ms)	3.59	2.27	2.30	1.565	1.10	/
	深さ (cm)	61.0	38.6	39.1	26.6	18.7	

使用周波数は透過が5KHz、反射を30KHzで行なった。ここで透過と反射測定結果を比較してみると、コンクリート速度は透過より反射の方が平均10%程大きいことと空隙深さは反射の方が平均約5%の変動に対し、透過は14%となった。この原因は透過と反射で使用観測装置と受信周波数が違うことや受信センサを反射ではコンクリート上面に固定できるのに対して透過では溝中で手にもっているため不安定になったことにあると考えられる。しかし両者の測定結果は相関しており信頼性が高い上同一箇所の反復測定でも再現性がよいので充分実用できると判断された。また空隙深さを算出するのに供試体のような良好材質ならばコンクリート厚さの反射波から空隙

反射波が分離できる範囲ならばコンクリート表面からの所要時間で空隙深さを算出しても著しい誤差にはならないと考えられた。ただ使用周波数が低いとき材質によっては躯体厚さの共鳴が長びくことがあるので共鳴終息時点から計時した方がよい場合もある。

3. 2 実構造物への適用例

供試体における実験測定は1箇所5回ずつ反復し再現性の確認をした。再現性の安定はトリガ信号が一定することによるが、測定結果は充分信頼性が得られ現場適用が可能であると判断された。一方空隙深さの定量的測定の必要性が強まり、空隙有無検出に利用していた横波音波共鳴法に並行して打撃法を実構造物に適用して試験測定を行ってきたのでこの例を示す。〔2〕

図-7, 8は建物床版スラブと地面間に生じた空隙を調査した例である。建設当初は地盤に接していた床版が埋立地の沈下で空隙が生じて広い範囲にわたり床版が宙に浮いた形となった

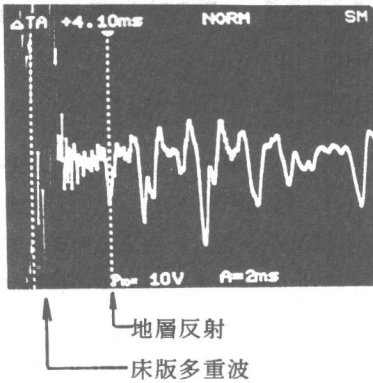


図-7 地盤と密着スラブ

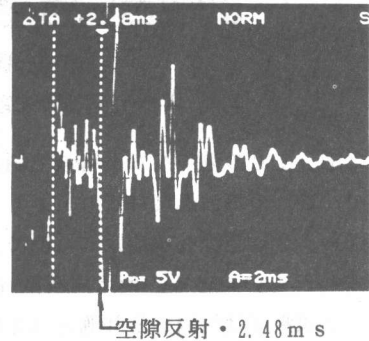


図-8 約42cm地盤沈下とみられた

とみられ、数m毎の測定で空隙測定をした。地盤沈下は地面が殆んど一様に下がり、床版と並行するので空隙反射もかなり鮮明になると考えられた。図-7はほとんど隙間のない所とみられた例で、図-8は空隙部の例である。たまたまこの測点から数m離れた所で目視した所空隙が約38cmとなった場所があり連続してこの程度の沈下ありと判断された。

図-9は経年の浅いトンネルの測定例で覆工厚さは約0.35mの波動と判断され、この左は埋設物とみられた。ここで超音波速度は4000m/sを得たので厚さ70cmと算出、反射波の波数が少なく支持層へ波動吸収された波形から空隙なしと判断された。図-10は経年したトンネルで、こ

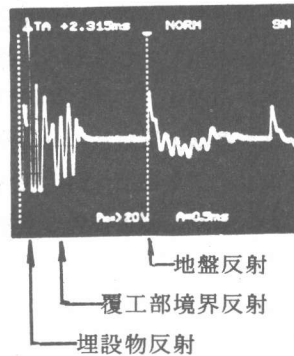


図-9 トンネルの測定-1

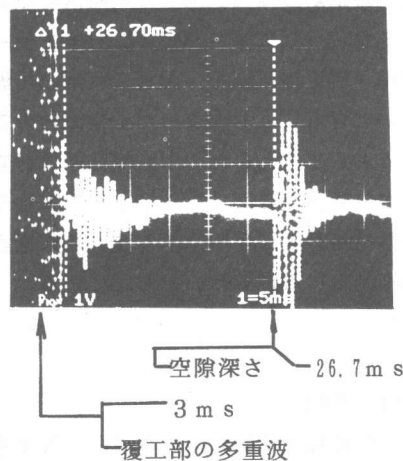


図-10 トンネルの測定-2

こは横波音波共鳴法で数10cm以上の空隙とみられたので打撃で深さを推定した。多重反射が著しくこの終端から地山反射の所要時間を約3msと計時、深さ51cmを算出した。ここで使用した受信周波数は5kHzであ

る。更に空隙の
 拡がりを求める
 試みの一つとし
 て観測したのが
 カーソル表示波
 である。

これが空隙側
 面反射であるこ
 との確認はして
 いないが今後の
 課題としている。
 そして図-11、

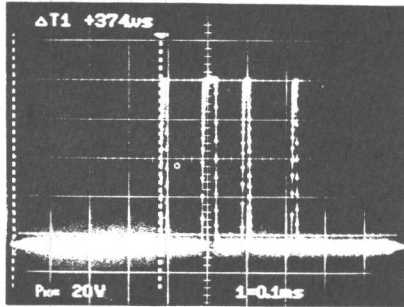


図-11 横波音波厚さ測定例

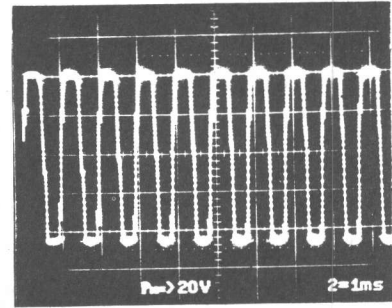


図-12 横波音波共鳴法

12に図-10の測点を横波音波で測定した例を示す。図-11はパルス反射で覆工厚測定したもので、この横波速度は 1600 m/s と求められ、所要時間 0.37 m s から約 30 cm の厚さと算出した。図-12は空隙共鳴測定した例で大きな共鳴波から数 10 cm 以上の空隙と判定し前記打撃で深さを求めたものである。使用周波数は共に 5 KHz にしている。この箇所は後でコア採取し抜取長 31 cm 、空隙深さは約 54 cm と計測されている。

4. むすび

打撃超音波によるトンネル覆工厚と背面空隙深さを同時に求める測定法を目指して行なった実験測定は以上の結果を得た。

当初は躯体から空隙部に波動が出て、地山反射波が再び躯体に入って確実に受信できるか問題だった。そこで供試体実験で確認実験を行ない、透過も、反射も周波数を選べば充分測定できることが確認できた。また打撃力も片手ハンマで比較的小さい力で充分であり、空隙深さの算出も打撃時刻から地山反射までの時間を空気音速で求めてもそれ程著しい誤差とはならないこともわかった。そして厚さ測定でこれまで使っていた周波数より低くとも充分厚さ検知ができる上、空隙深さ測定が可能で、両者の反射波周波数に差異が生じることから、厚さの反射と地山反射の識別ができることも求めた。供試体のこの結果から厚さ、空隙深さの同時測定は基本的に充分可能であると考えられるが、実構造は材質や形態が多様で反射波の解析が困難な場合が少なくない。このため当面は図-11のような方法や電磁波レーダなど別な測定法も併用して空隙存在の裏付けを確認して深さ測定する複合法が適当と考えており、測定結果を集積して信頼性の向上を図り本格測定に対応したいと考えている。

引用文献

- 1) 秋鹿為之・衝撃弾性波法による構造体コンクリートの非破壊検査法, 第4回コンクリート工学年次講演会論文集, P. P 21-24, 1982
- 2) 秋鹿為之・横波超音波による非破壊検査, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, P. P 305 - 308, 1984