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い。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なう表面波が生じる。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2 kg程度のハンマで打撃すると基本波は約1KH1で高次の超音波は数100KH1におよび、高密度コン クリートでは厚さ1mで約2MH1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、50KH1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尖鋭なト 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

11

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

もっているので基本周波数は数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に示す調合によっている。



表-1 供試体調合表

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

AE减水剤	₩⁄C	S / A	スランプ
(kg)	(%)	(%)	(cm)
3. 47	48	44.9	15



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。

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

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

表-2 各溝間の伝播速度

表-3 30 m 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 ca	6	14	20.6	31.3	38	43.3





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



図-6 厚さと空隙の反射波観測例

供試	コンクリート 厚 さ cm	30	50	鉄筋入り 50	60	70	90
体	空隙深さ ㎝	60	40	40	30	20	0
算出] 所要問	レクリート速度 (m/S) 寺間 (μs)	3300 0.18	4350 0.23	4350 0.23	4360 0.275	4000 0.35	4230 0.426
算出	全 測 定 時 間 (mS)	3.77	2.5	2.53	1.84	1.45	
空险	と深さ (cm)	64.1	42.5	43.0	31.3	24.6	
^原 深 さ	コンクリート 美引時間 (ms)	3.59	2.27	2.30	1.565	1.10	
	迎 深 さ(cm)	61.0	38.6	39.1	26.6	18.7	

表-4 供試体の厚さと空隙深さ反射測定結果

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なってきたのでこの例を示す。〔2〕



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38 cm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0.35msの 波動と判断され,この 左は型設物とみられた。 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 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



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、ここの横波速度は1600m/sと求められ、所要時間0.37msから約30cm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10cm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5KH2にしている。この箇所は後でコア採取し抜取長 31cm、空隙深さは約54cm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まった。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