

衝撃弾性波による覆工コンクリートの強度・剥離・ひび割れ深さの測定

Measurement of strength, fault and crack depth of concrete by impact elastic wave

柘植 哲治	土谷組	土谷 勝彦	土谷組
Tetsuharu Tsuge	Tsuchiyagumi	Katsuhiko Tsuchiya	Tsuchiyagumi
秋松 和正	土谷組	極檀 邦夫	アイテックス技術協会
Kazumasa Akimatsu	Tsuchiyagumi	Kunio Gokudan	iTECS Association

約 60 年経過したトンネルを対象として、インパルスハンマーおよび衝撃弾性波法により、浮き剥離、強度指標、ひび割れ深さを測定した。浮き剥離を検出する方法として、軽量のインパルスハンマーで軽打したときのハンマーの接触時間と後半機械インピーダンス ZR とを併用したところ、約 75% の的中率で検出できた。さらに、浮き剥離を衝撃弾性波法の加速度計で得た鋼球接触時間によって判定すると、インパルスハンマーを用いる方法よりも検出能力が優れていた。強度指標は、インパルスハンマーの後半機械インピーダンス ZR が適当であると思われる。

keyword 覆工コンクリート 浮き ひび割れ深さ 接触時間 機械インピーダンス

1. まえがき

1960 年以降、社会基盤施設として多くの土木構造物が建設されてきた。橋長 15 m 以上のコンクリート橋は約 7.5 万である。道路公団の道路構成比によると、橋梁 14.4%、トンネルが 9% を占めている。これらの維持管理費は、今後増加する傾向にあるので、合理的な維持管理が必要となる。維持管理の基本は、非破壊検査による点検であると思われる。今回は、約 60 年経過した古いトンネルを対象として、衝撃弾性波解析による非破壊検査を実施した。

今回、インパルスハンマーを使用して、シュミットハンマーを補完する新しい方法を試みた。シュミットハンマーの反発度は、打撃によって発生するくぼみ（塑性変形）が大きいかほど反発度は小さな値になることが明らかになっている。換言すればくぼみの量に比例して打撃エネルギーが吸収されるとも考えられる。また、点検ハンマーによって剥離・浮きと判断される点でも反発度がほそれほど変わらない。

インパルスハンマーの測定データを用いて、表面の塑性変形を考慮したコンクリートの強度指標を機械インピーダンスから求めること、浮き・剥離を打撃力波形の接触時間と機械インピーダンスとから判定すること、の 2 点について検討した。また、加速度計とインパクターを使用する衝撃弾性波法 (iTECS-4) を用いて、剥離、ひび割れ深さを計測したので報告する。

2. 測定内容について

トンネルの測定状況

測定対象のトンネルは、昭和 20 年前後にダム築造の工事用道路として建設された 1 車線道路の一部である。現在は、県道として供用されている。建設当時は、第 2 次大戦の影響もあり慢性的な建設資材欠乏状態にあった。表面から数 cm の深さをサンプリングした結果、貧配合低強度のコンクリートであろうと推測される。降雨の影響で地山からの雨水がひび割れ面から浸み出ている状態で測定した。

測定範囲は、縦 80 cm、横 170cm として、



写真-1 トンネルの測定状況

10cm 間隔に線を引いて、横のラインは 9 本、縦の線は 18 本、メッシュの交点 162 点を測定した。測定範囲は、事前に点検ハンマーで剥離と判定した場所を選んだ。

インパルスハンマーによる測定について

インパルスハンマーは、ハンマー質量 70 グラムの軽量タイプを用いた。サンプリングクロックは $0.5\mu s$ 、測定長 $10ms$ である。打撃力波形から、接触時間と機械インピーダンスを算出した。質量 M のハンマーが速度 V で、バネ係数 k のコンクリート表面に衝突するときのコンクリートの最大変位を x とする。打撃エネルギーとひずみエネルギーの釣り合いから、 $\sqrt{Mk} = \frac{F_{max}}{V}$ が誘導される。これが機械インピーダンスである。打撃力最大の点（ピーク）の前半は、ハンマーがコンクリートを押し続けている時間、後半はコンクリートが復元して戻る時間である。表面劣化の激しいコンクリートでは、前半の機械インピーダンス Z_A は、劣化の影響を強く受ける。後半の機械インピーダンス Z_R は、コンクリート本来の強度を反映した値となる。

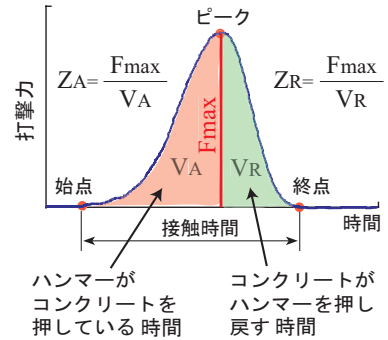


図-1 インパルス打撃波形

衝撃弾性波法 (iTECS-4) の測定について

超音波法に比較すると、衝撃弾性波の波長は長く、周波数は低い。厚さは、厚さ方向の多重反射波の共振周波数と弾性波伝搬速度から推定する。

加速度計を手で押しつけ、近傍をインパクト（鋼球）で軽打する。加速度波形を数値積分し速度波形を得る。共振周波数の周波数解析は、自己回帰モデルによる最大エントロピー法 (MEM) により推定する。測定の注意点は、数回の打撃によって安定した波形を得ること、測定原理に立ち返り波形を解釈することである。



図-2 測定装置 (iTECS4)

3. 実験結果および考察

3-1. インパルスハンマーによる剥離の検出

図-3 に、インパルスハンマーによる接触時間と後半機械インピーダンス Z_R を、点検ハンマーの打音判定による剥離（黒丸）の多い箇所を示した。縦軸は打撃力の大きさを、横軸は時間である。

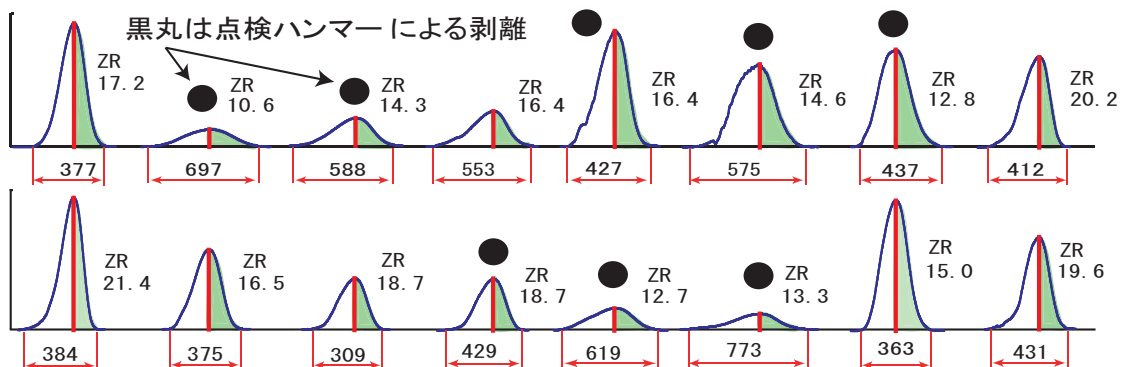


図-3 インパルスハンマーの接触時間と後半機械インピーダンス

打撃力の大きさと後半機械インピーダンス Z_R は単純に比例しない結果となっている。前に述べたように、機械インピーダンスは打撃力と速度の比で取っているので加速度を積分した速度が小さいと大きな値となる。今回の測定では、インパルスハンマーの打点近傍に加速度計を手で押しつけて、ハンマーの打撃力波形と同時に加速度波形を測定している。

剥離している点では、ハンマーの打撃力を通常のとおりにすると、測定レンジを超え飽和するため打撃力を弱くした。剥離点と接触時間ならびに後半機械インピーダンス ZR との関連を調べると、1) 剥離点では接触時間が長くなる傾向が認められる。2) 後半機械インピーダンス ZR は小さい値となる。ことがわかる。

図-4 に測定範囲全体平面に後半機械インピーダンス ZR とハンマーの接触時間の等高線で示した。

後半機械インピーダンス ZR 162 個の標準偏差を計算し、平均的な強度指標範囲として、平均値 \pm 標準偏差の値が約 68% $\approx 15.4 - 20.5$ 、平均よりも ZR が小さい: 強度指標が小さい範囲 16% 15.3 以下、平均よりも ZR が大きい: 強度指標が大きい範囲 16% 20.6 以上に分けた。浮き剥離と強度指標に小さい ZR は $\frac{6}{8} = 75\%$ 一致している。強度指標の大きな区域は健全と判断して良い。

ハンマーの接触時間も標準偏差を求めて、接触時間の長い範囲 16% を等高線で示した。図を見ると、接触時間の長い等高線 16% と浮き剥離の点がほとんど一致していることがわかる。図の下側の連続したものは表面劣化のためと思われる。

後半機械インピーダンス ZR が小さくなること、および接触時間が長くなる理由を考える。浮き剥離点を単位幅で仮想切断して、両端固定の薄い梁と仮定する。薄い梁の曲げ剛性は、浮き剥離していない点に比べると明らかに小さい。曲げ剛性は、ヤング率 E と断面 2 次モーメント I の積 EI である。断面 2 次モーメントはかぶり厚さの 3 乗に比例するので、浮き剥離点での曲げ剛性は小さい。

表面の劣化が進んでいると、塑性変形量が大きくなるので接触時間はかなり長くなるが、内部のコンクリートが正常であれば、後半機械インピーダンス ZR は低下しない。浮き剥離は、ハンマーの接触時間が長く、後半機械インピーダンス ZR が小さいという両者の条件が一致したときは、ほぼ間違いなく判定できると思われる。

浮き剥離点では、打撃によって低振動数のたわみ振動が発生する。しかし、質量が大きなハンマーで強打すると、曲げ剛性が小さい剥離点では、過大打撃力を与えることになり弾性範囲を超える恐れがある。また、ハンマーの固有周波数が剥離浮き点の共振周波数よりも大きいと本来のたわみ振動が生じないと考えられる。

3-2. 衝撃弾性波法 (iTECS-4) による剥離の検出

図-5 にインパクターの速度波形と等高線を示す。速度波形の下側に矢印で各点の接触時間を数値で記入した。鋼球接触時間は、打撃波形の第 1 周期の時間を鋼球がコンクリートと接触していると見なしたものである。波形に黒丸がついているものは、点検ハンマーによって浮き剥離と判定した点である。浮き剥離点では接触時間が長くなることが明確にわかる。浮き剥離では曲げ剛性が小さいので、インパクターの打撃力を弱くしないと加速度計の測定値がオーバースケールする。加速度計の感度がインパルスハンマーに比較して数百倍良いので、打撃力が小さくても測定できる。

右の等高線図は、インパルスハンマーと同様に、接触時間も標準偏差を求めて、接触時間の長い範囲 16% を赤色で示した。図を見ると、接触時間の長い 16% と浮き剥離の点 (X 印) が、一致していることがわかる。浮き剥離を検出方法では、インパルスハンマーのデータを分析する方法よりも衝撃弾性波法 (iTECS-4) の接触時間の方が優れているようである。

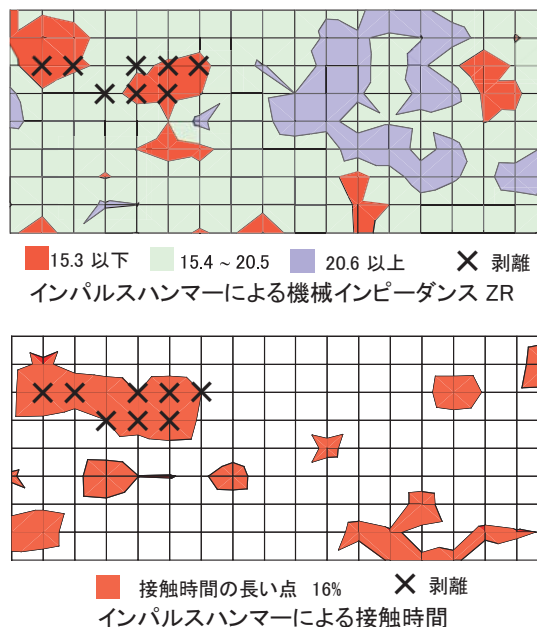


図-4 ZR と接触時間の分布

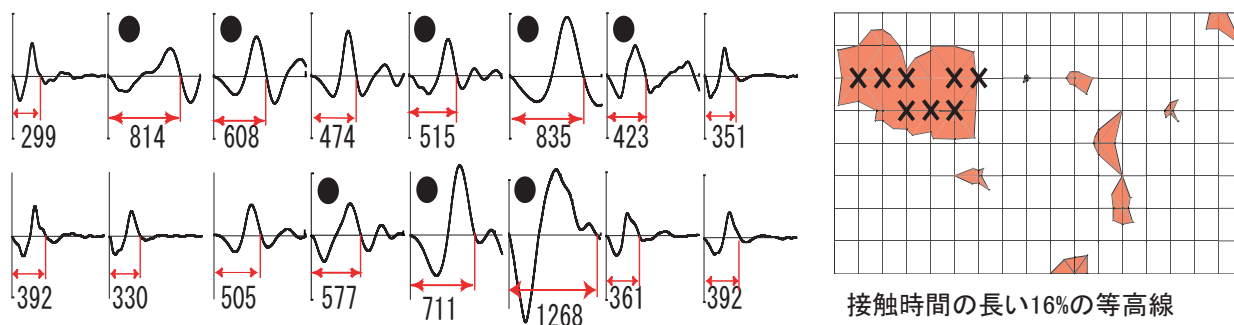


図-5 衝撃弾性波法 (iTECS-4) による速度波形と等高線 インパクト鋼球 30mm

3-3. 衝撃弾性波法 (iTECS-4) によるひび割れ深さの推定

ひび割れは、構造物の健全性の程度と関連があるため、表面に現れたひび割れ幅はクラックゲージで、長さは目視で観察してひび割れ分布図を作成する。しかし、ひび割れで重要なのは、ひび割れ幅よりもコンクリート内部でのひび割れ深さと方向である。

超音波法でひび割れ深さを測定する直角回折法は、ひび割れを迂回してくる初期波形が、ひび割れ先端の角度が直角のとき、下向きの波形 (引張り波) から、上向きの波形 (圧縮波) に変わるとしている。衝撃弾性波法でも同様の考え方が適用できると思われる。

図-6 は、ひび割れ中心から打点と測点を等距離 20mm ずつ増加させたときの結果である。ひび割れから 80mm と 100mm の位置では、弾性波の初期波形は下向きの引張り波である。120mm, 140mm, 160mm での初期波形は上向き圧縮波が到達している。120mm は点接触と推量されるが、明瞭に上向き波形となるのは 140mm である。ひび割れ先端の回折角度が直角とすると、ひび割れ深さは上向き圧縮波が観測される点の水平距離と等しくなるので、このひび割れ深さは 140mm と推定した。

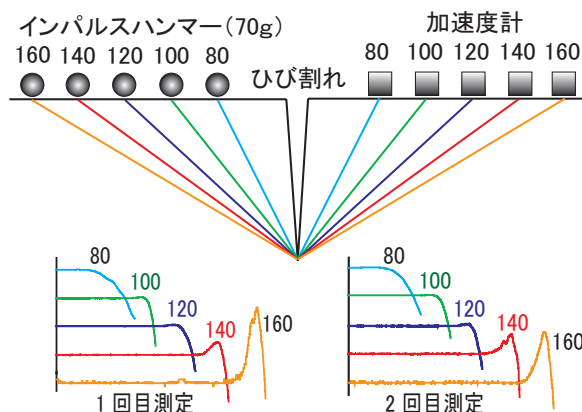


図-6 ひび割れ深さの測定

4. まとめ

約 60 年経過したトンネルを対象として、インパルスハンマーを用いて、コンクリートの浮き剥離を打撃力波形の接触時間と機械インピーダンスとから判定すること、衝撃弾性波法を用いて、剥離、ひび割れ深さを測定した結果をまとめると次のとおりである。

1. 浮き剥離を検出する迅速簡便な新しい方法として、軽量のインパルスハンマーで軽打したときのハンマーの接触時間と後半機械インピーダンス ZR とを併用して判定すると、約 75% の割合で検出できた。
2. インパルスハンマーの後半機械インピーダンス ZR を等高線で表示すると、強度分布の把握が容易であり、特に、浮き剥離などの問題箇所を発見するのに有効であると思われる。
3. 浮き剥離を衝撃弾性波法 (iTECS-4) の加速度計で測定した速度波形の第 1 周期から求める鋼球接触時間は、インパルスハンマーを用いる方法よりも検出能力が優れている。高感度の加速度計の測定感度と浮き部分の小さい曲げ剛性と適合するように手加減して打撃できる点が良いと思われる。
4. 超音波法と同様の直角回折法によるひび割れ深さの測定は、下向き波形と上向き波形との変換点が明瞭であるので容易である。超音波法と異なり、表面の平滑化、塗布剤などの前処理が不要であるので迅速簡便な測定が可能である。