

鋼球接触時間および機械インピーダンスによるトンネル剥離の検知

土谷組 正会員 ○齋藤 晃史
土谷組 正会員 土谷 勝彦
iTECS 技術協会 正会員 極壇 邦夫

1. まえがき

約 60 年経過した古いトンネルの剥離検知を目的として、衝撃弾性波の鋼球接触時間による方法とインパルスハンマーから得られる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方法の 2 点について検討した。

浮き剥離の検知は、現在でも打音法の適用が多いが、主観による判定は経験の蓄積が必要である。身体感覚に基づいた熟練は長い時間を要するが、熟練者の育成は困難になりつつある。人の主観ではなく、インパルスハンマーや加速度計で得られるデータからの判定結果が、打音法とどの程度一致するかを検討したので報告する。

2. 測定内容

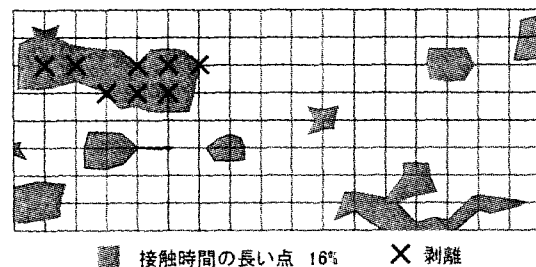
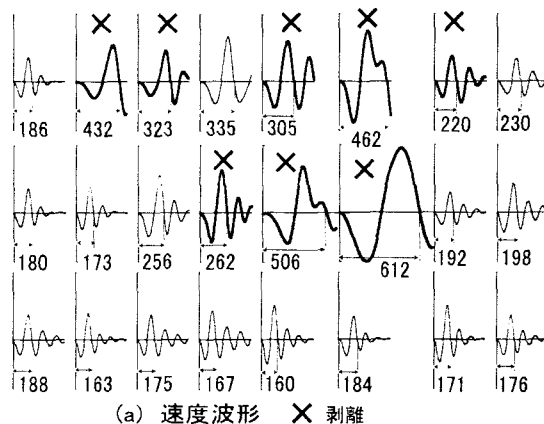
測定対象は、物資が不足していた昭和 20 年前後に工食用道路として建設された 1 車線道路の貧配合コンクリートトンネルである。測定範囲は、縦 80cm、横 170cm として、10cm 間隔に線を引いて、横のラインは 9 本、縦の線は 18 本、メッシュの交点 162 点を測定した。測定範囲は、事前に点検ハンマーで剥離があると判定した場所を選んだ。

衝撃弾性波は、コンクリート表面を鋼球 30mm(110 グラム)で叩き、約 5cm 離れた点に加速度計を手で押しつけて測定した。測定器は、2ch 仕様で、サンプリングクロック $2\mu\text{s}$ 、サンプリング数 5000/ch を使用した。インパルスハンマーは、ハンマーヘッド質量 190 グラム、サンプリングクロック $0.5\mu\text{s}$ 、サンプリング数 2000、感度 $0.01\text{mv}/\text{m}/\text{s}^2$ を使用した。インパルスハンマーは、所要範囲の打撃強さで測定するようにトリガーを設定した。さらに、範囲内の打撃強さを標準化するためプログラムを組み込み補正した。

3. 加速度計の鋼球接触時間による剥離検知

図-1 に速度波形の鋼球接触時間を示す。速度波形の下側に各点の鋼球接触時間を数値(単位 μs)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 X 印がついているのは、打音法によって浮き・剥離と判定した点である。

鋼球接触時間の等高線図は、鋼球接触時間の標準偏差を求めて、鋼球接触時間の長い 16% を赤色で示し



(b) 加速度計による鋼球接触時間の等高線
図-1 速度波形と鋼球接触時間

た。浮き剥離点では、厚さが薄いのでたわみが生じて鋼球接触時間が長くなると考えられる。等高線図を見ると、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一目瞭然である。1 点あるいは 2 点の接触時間の長い箇所は、局部的なものなので構造的には軽症と思われる。

4. インパルスハンマーによる測定について

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 $\frac{1}{2}MV^2$ とひずみエネルギー $\frac{1}{2}kx^2$ の釣り合いから、 $\sqrt{Mk} = \frac{F_{\max}}{V}$ が誘導される。 $\sqrt{Mk}$ が機械インピーダンスと呼ばれている。

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、ピーク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、塑性変形が進行するので前半の機械インピーダンス ZA は、劣化の影響を強く受ける。

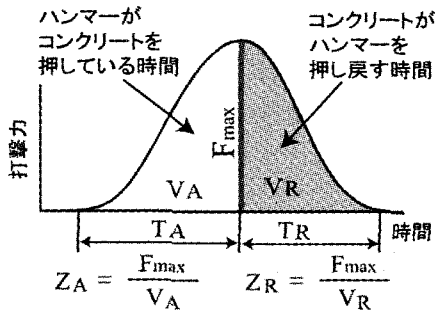
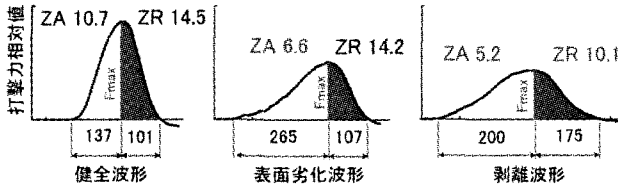


図-2 打撃波形と機械インピーダンス

塑性変形が終了してから復元する後半の機械インピーダンス Z_R は、内部のコンクリート強度を反映した値となると考えられる。

5. 機械インピーダンスによる剥離検知

表面劣化の場合について述べる。ハンマーがコンクリートに衝突すると、表面の劣化した部分の塑性変形が進行する。ハンマーの初期速度が一定であっても、ハンマー衝突による打撃力（運動エネルギー）は吸収されて減衰する。表面劣化コンクリートの前半の機械インピーダンス Z_A は、表面の影響を強く受けた値となる。また、塑性変形が進行するとハンマーが接触している時間が長くなる。図-3の表でも、始点から最大打撃力のピークまでの前半接触時間 T_A は、健全なところと比較すると 193%と長くなっているが、後半接触時間 T_R は 101%である。表面劣化の塑性変形のために前半機械インピーダンス Z_A は 61%と大きく減少しているが、後半機械インピーダンス Z_R は 97%と減少の程度は小さい。



	前半 T_A	後半 T_R	前半 Z_A	後半 Z_R
健全	137 100%	101 100%	10.7 100%	14.5 100%
表面劣化	265 193%	107 101%	6.6 61%	14.2 97%
剥離	274 200%	175 168%	5.2 49%	10.1 72%

図-3 健全、表面劣化、剥離波形

剥離の場合、コンクリート表面の浮き・剥離の厚さは数 cm のときが多いといわれているので、板のたわみと類似した現象が起こると考えられる。薄い板のたわみは、打撃力が一定のとき、曲げ剛性（コンクリートのヤング率 E と断面 2 次モーメント I の積）に比例する。剥離箇所では、ヤング率の低下もあるだろうが、厚さの 3 乗に比例する断面 2 次モーメントの影響が大きいと思われる。ハンマー接触時間が T_A 200%、 T_R 168%と長くなると共に、機械インピーダンスも Z_A 49%、 Z_R 72%と減少している。接触時間と機

械インピーダンスの両者が平均より劣るのは、曲げ剛性低下によるたわみ変形が生じるため、剥離と推量される。

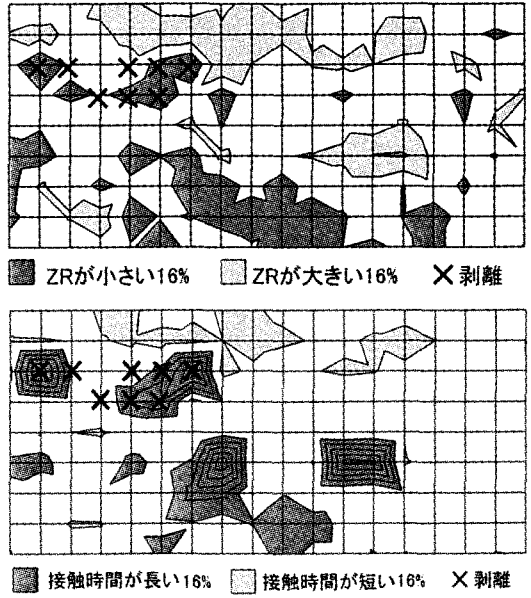


図-4 Z_R とハンマー接触時間の等高線

図-4に後半機械インピーダンス Z_R 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 Z_R 162 個の標準偏差を計算し、平均的な強度指標として、平均値 ± 標準偏差の値が約 68% ≈ 12.1 - 15.4、平均よりも Z_R が小さい範囲 16% 12.0 以下、平均よりも Z_R が大きい範囲 16% 15.5 以上に分けた。浮き剥離と強度指標に小さい Z_R は、約 6 割一致している。後半機械インピーダンス Z_R 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。下の図を見ると、ハンマー接触時間の長い領域 16% と、浮き剥離の点が約 6 割一致していることがわかる。

6. まとめ

約 60 年経過したトンネル覆工コンクリートの剥離を加速度計で測定した鋼球接触時間と、インパルスハンマーの機械インピーダンスを用いる検知を試みた。

1. 高感度の加速度計で測定した衝撃弾性波から鋼球接触時間を計算し、接触時間の長い 16% の領域の等高線は、打音法の剥離点とほとんど一致した。
2. ハンマーの接触時間と機械インピーダンス Z_A 、 Z_R を指標にすると剥離を約 6 割検知することができた。
3. インパルスハンマーの打撃力波形から前半機械インピーダンス Z_R とハンマーの前半接触時間を指標にすると、表面劣化の影響の程度を知ることができる。