

機械インピーダンスによるトンネルの剥離・強度の推定

ESTIMATION OF THE FLAW AND STRENGTH OF TUNNEL LINING CONCRETE
BY MECHANICAL IMPEDANCE

日東建設 金田 重夫 久保 元
アブライドリサーチ 境 友昭
iTECS 技術協会 極壇 邦夫

39年経過した旧国鉄トンネルの覆工コンクリートを対象に実験した。インパルスハンマーで打撃して機械インピーダンスおよびハンマー接触時間を算出し、強度の推定ならびに剥離検知の程度を検討した。ハンマー質量を190グラムと65グラムに変えて剥離の検知的中率の相違を調べた。強度の推定は、ハンマー質量190グラムと反発度法を比較し、機械インピーダンスが適していることが分かった。

キーワード 剥離 強度 トンネル 機械インピーダンス ハンマー接触時間

1. まえがき

約39年経過したトンネルの覆工コンクリートの剥離と強度推定をインパルスハンマーを用いて検知する方法を研究した。剥離面積の大きさ、剥離の厚さ、剥離部分の強度などを総合して剥離の危険度の大きいものだけを剥離とするか、明らかに剥離音と認識されるが直ちに剥落崩落すると思われないものも剥離と判定して良いのか、測定する技術者の経験や技能による判断に左右されている。

現在は打音法の適用が多いが、技術の修得には経験の蓄積が必要であること、個人の主観による判定であること、測定記録が残らないことなどの難点がある。将来は、打音をマイクロホンで記録して時間軸波形を解析するか、インパルスハンマーの打撃力波形を解析するなどして、記録データに基づく客観的な判定基準を確立することが望ましい。

これまでの経験で建築構造物のモルタル仕上げ壁の剥離は、100グラム程度の軽量ハンマーの検出能力が優れていた。また、聴覚による打音検査では直径15mm程度の鋼球が微細な剥離も感知するので適しているように思われるが、剥落する危険度の大きい剥離に限定すると、ハンマー質量の選択基準が異なってくると考えられる。実験では、190グラムのハンマーを基本とするが、建築モルタル仕上げ壁の剥離検知率が良かった軽量ハンマーが適している可能性も考えられたので、2種類のハンマーで測定し比較することとした。

2. 測定内容

トンネルは、表面に汚れがかなり付着していたのでブラシで汚れを除去した。さらに表面を補修した形跡があり、打音法で剥離音が聞こえた範囲を選んで剥離測定の対象とした。測定範囲は、縦110cm 横200cmである。横は12本、縦は21本と10cm間隔に線を引いて、メッシュの交点252点を測定した。強度の測定は、トンネル入り口付近、補修した痕跡がある表面軟弱、トンネルを遮断した仕切壁の3箇所を選定した。測定箇所に2cmメッシュを記し、その交点をハンマー質量190グラムのインパルスハンマーとリバウンドハンマーで各25回ずつ測定した。インパルスハンマーは、ハンマーヘッド質量190グラムと65グラムの2つを用いた。サンプリングクロックは、 $0.5\mu\text{s}$ 、サンプリング数2000、加速度計感度 $0.04\text{mV}/\text{m}/\text{s}^2$ である。測定後、直径100mm長さ200mmの円柱供試体を3本ずつ採取して圧縮強度を求めた。

機械インピーダンスについて

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 $\frac{1}{2}kx^2$ を同等と仮定すると、機械インピーダンスは、 $\sqrt{Mk} = \frac{F_{max}}{V}$ により得られる。打撃力最大のピークの前半は、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。機械インピーダンスは前半 ZA と後半 ZR、およびハンマーの接触時間も前半 TA と後半 TR に分けた。

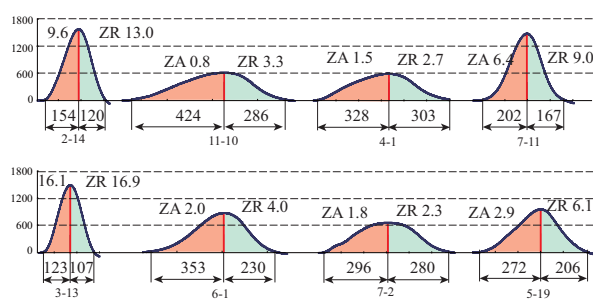
3. 測定結果と検討

3-1. 打撃力波形による剥離の特徴

図-1 に 190 グラムハンマーの打撃力波形、図-2 に 65 グラムハンマーの打撃力波形と、機械インピーダンス ZA, ZR とピーク前半と後半の接触時間 TA, TR を示した。音なし、とは打音法で剥離なし、H なし、とはインパルスハンマーで剥離なしの意味である。

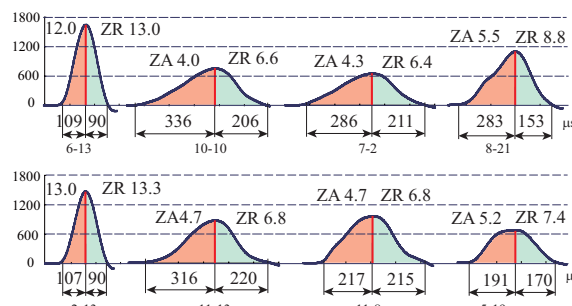
(A) は両者が剥離なし、の健全な測定点である。波形の前半と後半がほぼ左右対称になり前半と後半の接触時間は短く、Fmax も大きいという特徴がある。

(B) は両者が剥離あり、と判定した場合で、前半後半の接触時間が 2 倍以上と長く、ZA, ZR が 1/3 以下となり、最大打撃力 Fmax も半分以下となっている。前半と後半に分離して比較すると特徴の把握が容易である。



(A)音なし Hなし (B)ありあり (C)なしあり (D)ありなし

図-1 190 グラムハンマーの打撃力波形



(A)音なし Hなし (B)ありあり (C)なしあり (D)ありなし

図-2 65 グラムハンマーの打撃力波形

剥離の厚さが薄くなると、機械インピーダンスで説明したバネ係数による反作用と異なり、板のたわみ振動に類似していると考えられる。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)に比例するため、たわみ変形は大きくなり、ハンマー接触時間は増大する。曲げ剛性の低下を反映して、ZA, ZR および反作用としての打撃力も低下すると考えられる。

(C) は、打音が剥離なし、インパルスハンマーが剥離あり、と判定した点である。打音とインパルスハンマーが同一の点を打撃しているわけではないが、剥離ありとほぼ同じようにみえるので、インパルスハンマーの剥離ありの判定が妥当と思われる。

(D) は、打音が剥離あり、インパルスハンマーがなし、と判定した点である。打撃力の大きさ Fmax, 後半接触時間 TR, 後半機械インピーダンス ZR などから判断すると剥離なし、がこの波形の場合は妥当と思われる。

3-2. 機械インピーダンス ZR, 接触時間 TR の等高線分布 (ハンマー質量の比較)

打撃力波形の比較によって、剥離は強度指標の機械インピーダンス ZR が低下すること、変形の指標である後半のハンマー接触時間 TR が長くなることわかった。最終的には、剥離の判定基準を数値で規程することが望ましいが、現地構造物の多様性を勘案すると現段階では難しい。

そこで、強度指標 ZR および変形の指標 TR が正規分布すると仮定して、平均値マイナス標準偏差以下 (16%) を剥離の候補として検討した。また、剥離が集まり剥離面積が大きいときに危険性が高いと考えられるので、面的な測定をおこない、等高線図を描いて判断した。

図-3と図-4は、190グラムハンマーの打撃力弱の結果である。図-3に、機械インピーダンスZRと剥離の関係を等高線で示した。252個のZRの標準偏差を計算し、(平均値 - 標準偏差)以下の16%(強度は弱い)40個を赤で、(平均値 + 標準偏差)以上の16%40個を緑で表示した。

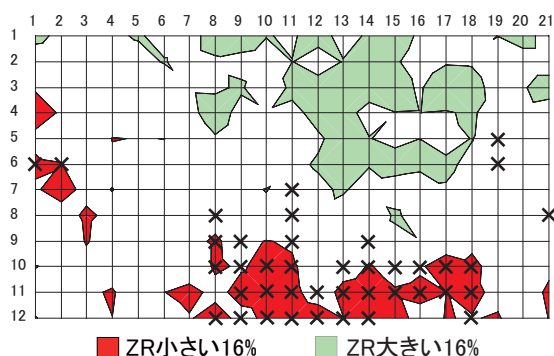


図-3 機械インピーダンスZRと剥離(190g)

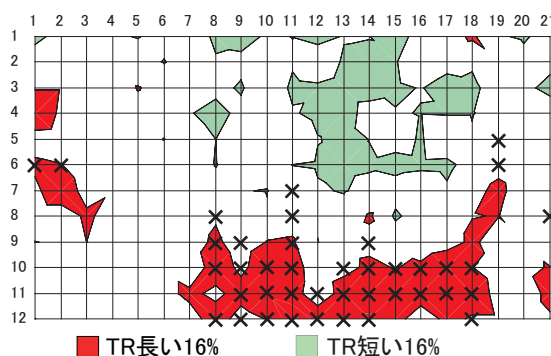


図-4 ハンマー接触時間TRと剥離(190g)

剥離と強度指標が小さいZRは、約6割一致している。後半機械インピーダンスZRの大きな領域には剥離はひとつも存在しないので健全と判断される。

図-4にハンマー接触時間TRと剥離の関係を等高線で示した接触時間の長い16%40個を赤で、短い16%40個を緑で表示した。剥離と接触時間の長いTRは、約6割強一致している。今回のハンマー質量と打撃力では、機械インピーダンスZRよりも、ハンマー接触時間TRの的中率が高い。的中率は約6割であるが、広い面積の剥離はほぼ検知しているので実用的には有用な結果と思われる。

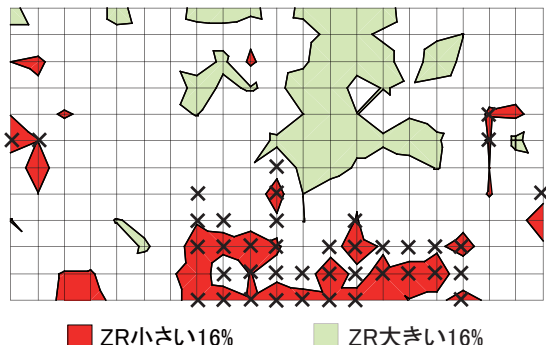


図-5 機械インピーダンスZRと剥離(65g)

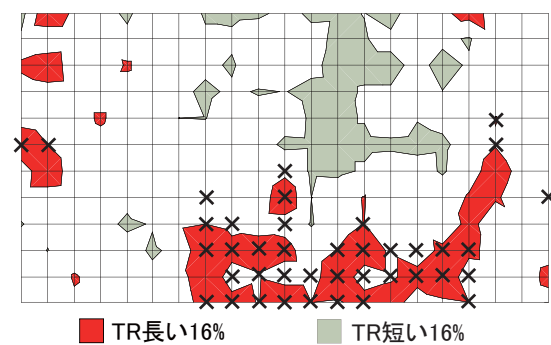


図-6 ハンマー接触時間TRと剥離(65g)

図-5と図-6に65グラムハンマーの打撃力弱の場合を示した。軽量ハンマー65グラムの方が190グラムハンマーよりも剥離検知能力が高いと予想していたが、測定結果は190グラムとほとんど同等の結果となった。建築のモルタル仕上げ壁の材質、母材コンクリートとの接着状況、コンクリート強度、施工法の相違などが影響していると考えられるが、単純にみえる剥離検知も要因を慎重に検討しなければならないことを改めて認識させられた。

図-7は、剥離の実態調査である。明確な剥離音がある場合の内部の状況を目視により確認するため、直径100mmのコアを抜いた断面と打撃力波形と速度波形を示した。

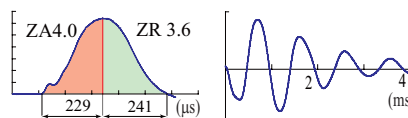


図-7 コアと打撃力波形と速度波形

剥離面は深さ 1cm から 2cm くらい、幅は 0.1mm から 0.4mm 程度であった。打撃力波形は、接触時間 TR が長く、機械インピーダンス ZR が小さいので剥離の特徴と一致した。剥離の速度波形の特徴は、周期が長い、減衰が緩やか、振幅が大きい、である。

3-3. 機械インピーダンスと反発度法による推定強度

機械インピーダンスと反発度法で推定強度を検討するために、普通、表面が軟弱、仕切壁の 3 箇所測定した。190 グラムのインパルスハンマーで打撃力を強に設定して機械インピーダンスから推定強度を求めた。反発度法のリバウンドハンマーでも測定し、材料学会の式で計算した。

図-8 にコアを採取した 3 箇所の打撃力波形を並べた。図の STR は、機械インピーダンス ZA, ZR を校正式に代入した推定強度である。表面が軟弱な場合は、ハンマーがコンクリートに衝突すると、劣化した部分の塑性変形が進行するため、前半の接触時間 TA が長くなり、前半の機械インピーダンス ZA は減少する傾向を示した。しかし、後半機械インピーダンス ZR は、コンクリートの復元力であるので表面軟弱の影響は軽微である。仕切壁は 36.4MPa と他の箇所よりも強度が大きい。

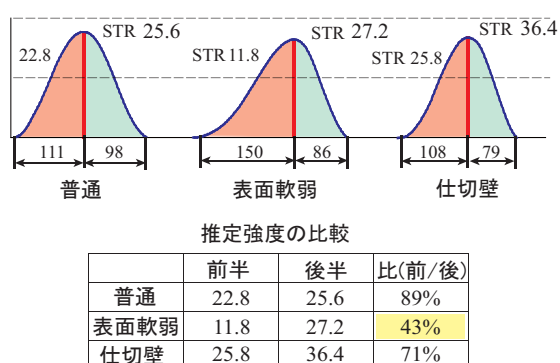


図-8 コア採取 3 箇所の打撃力波形

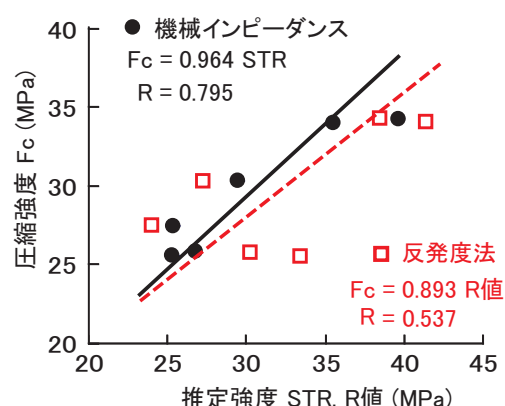


図-9 推定強度と圧縮強度

図-9 に、後半機械インピーダンス ZR から推定した強度と反発度法による推定強度を示した。推定強度と圧縮強度の相関を求めるので、ゼロを通る回帰式を求めた。後半機械インピーダンス ZR からの推定強度 STR と圧縮強度 F_c の回帰式は $F_c = 0.964STR$, $R = 0.795$ を得た。あえて、表面軟弱の箇所を除去しない状態で測定したデータとしてはかなり良好な結果と考えられる。

一方、反発度法は、 $R = 0.537$ となり相関関係はほとんど認められなかった。反発度は、打撃面における骨材の有無、乾湿の状況、コンクリートの材令などによって異なること、表面劣化・表面軟弱が認められる場合は軟弱層を除去して測定せよと指示されている。ところが現場で、表面軟弱の程度を判断するのはなかなか困難である。インパルスハンマーの打撃力波形のように、前半と後半を分離すると表面劣化の程度は推定可能である。今後は、表面劣化の程度を数量化して、補正を加味した機械インピーダンスと推定強度の算出方法を考案したいと考えている。

4. まとめ

トンネル覆工コンクリートの剥離検知と強度推定に機械インピーダンス法を適用した。

1. 剥離の検知には、打撃力波形の後半の機械インピーダンス ZR とハンマーの接触時間 TR を適用すると良い結果を得た。
2. 機械インピーダンス ZR が小さい下位 16% と剥離は約 6 割的中率であった。剥離とハンマー接触時間の長い TR は、約 6 割一致している。広い面積の剥離は、ほとんど検知できることがわかった。
3. 表面処理をしない状態で測定した、機械インピーダンスの推定強度とコア供試体の圧縮強度との相関は、 $F_c = 0.964 \times STR$, $R = 0.795$ と良好な結果を得た。