

## コンクリートテスターによるトンネルの剥離・強度の推定

日東建設（株）	技術開発部	久保 元樹
日東建設（株）	札幌支店	中野 泰宏
北海道旅客鉄道（株）	札幌構造物検査センター	大高 道夫
北海道旅客鉄道（株）	札幌構造物検査センター	小島 俊一
ITECS 技術協会	理事長	極檀 邦夫

### 1. はじめに

現在、コンクリート構造物の老朽化が大きな問題となっている。コンクリートは従来まで、100年の年月を経ても安心して供用されるほど信頼性が高い材料と言われ、永久構造物を造るのに相応しい材料であると考えられてきた。しかし、1999年のトンネル覆工コンクリート剥落事故を期に、コンクリート構造物の耐久性に関する社会的意識が高まった。

我が国では、高度成長期において社会資本の建設が急激に増加し、現在までに蓄積されたコンクリートの総量はおよそ90億 $m^3$ と推定されている。そのコンクリートが、今後耐久年数を迎えようとしている。

以上のような背景から、いかにコンクリート構造物を安全に長期間使用するかが今後重要になると考えられる。コンクリート構造物に所要の品質を保持させ寿命を延ばすためには、まずコンクリートの現在の状態を正確に把握することが必要である。

コンクリートの状態を知る上で、圧縮強度は重要なパラメーターの1つである。現在では、コンクリートの圧縮強度を非破壊的に推定する方法として、反発度法が広く普及している。しかし、反発度法は器差が大きいことや、表面の劣化層の影響を強く受けること等の問題点がある。剥離検査に関しては、打音検査が主流であるが、評価に客観性が無く、測定者の経験や主観に左右されてしまうなどの問題点があった。

そこで、ハンマーの打撃力波形を測定・解析することによって圧縮強度や表面の劣化度合い、浮き・剥離を検出する装置であるコンクリートテスターに着目し、このコンクリートテスターを使用して、トンネルの覆工コンクリートの剥離がどの程度検知可能であるか、また打音検査の判定結果とどの程度一致するか検討した。

### 2. コンクリートテスター (CTS) の概要

コンクリートテスター（以下CTS）は、写真-1に示すようにハンマーユニットと本体から構成されており、コンクリート表面を軽く打撃することで打撃点直下のコンクリートの情報を得ることができる。ハンマー部には衝撃加速度計が内蔵されており、コンクリート面を打撃したときの打撃力の時間波形を測定・解析することによりコンクリートの圧縮強度の推定、表面の劣化度合いおよび表面近傍の浮き・剥離を測定する装置である。CTSの基本仕様は表-1に示すとおりである。



写真-1 CTS-02 本体

表-1 CTS-02 の基本仕様

測定器名	コンクリートテスター (CTS-02) Concrete Test and Surveyor Type2
本体	108mm×202mm×46mm
ハンマー質量	190g
サンプリング時間	0.5μs
測定時間長	2ms
電源	単三電池 6 本使用 (連続使用時間約 8 時間)
記憶媒体	SDカードにデータ記録、PCに転送 (64MBで1万データ以上記録可能)

### 3. コンクリートテスター (CTS) の測定原理

#### 3.1 基本原理

CTS は、ハンマー内部に衝撃加速度計が内蔵されたインパルスハンマーでコンクリートを打撃し、測定された打撃力波形から機械インピーダンスなどを算出して圧縮強度の推定や表面劣化の評価および浮き・剥離の検知を行う装置である。CTS の基本原理を以下に述べる。

図-1 に示すように、質量  $M$  のハンマーが速度  $V$  でコンクリートに衝突する現象を考える。この時、コンクリートを反無限弾性体と仮定しエネルギーの釣り合いを考える。ハンマーの衝突によるコンクリート表面の変位を  $x$ 、バネ係数を  $K$  とするとエネルギー保存の法則から、

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}Kx_{\max}^2 \quad (1)$$

が成立する。ハンマー打撃によってコンクリートに生じた力は、フックの法則より、

$$F_{\max} = Kx_{\max} \quad (2)$$

である。式(2)を  $x$  について解き、これを式(1)に代入し整理すると、

$$MV^2 = \frac{F_{\max}^2}{K} \quad \sqrt{MK} = \frac{F_{\max}}{V} \quad (3)$$

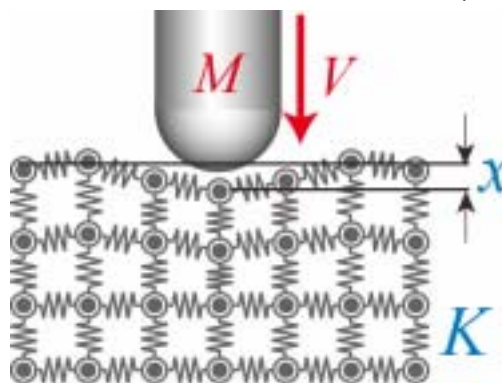


図-1 ハンマーの衝突

が得られる。ここで  $\sqrt{MK}$  は、機械インピーダンス  $Z$  であり、発生した力の最大値をハンマー速度の最大値で除すことによって得られることがわかる。

#### 3.2 測定量からの算出

図-2 に CTS で実際に打撃した際に得られる打撃力波形を示す。CTS の測定量は加速度であるが、図-2 は加速度  $a$  にハンマー質量  $M$  を乗じて打撃力波形としている。この打撃力波形をピークから前半と後半に分離する。波形の前半部分は、ハンマーがコンクリート表面を变形させる過程であり、「アクティブ側」と呼称する。これに対し後半部分は、コンクリート内に蓄積

された弾性変形エネルギーが解放される過程であり、これによってハンマーは押し戻される。よってこの部分を「リアクティブ側」と呼称する。

この打撃力波形から機械インピーダンスを算出するには、

$$Z = \frac{F_{\max}}{V} \quad (4)$$

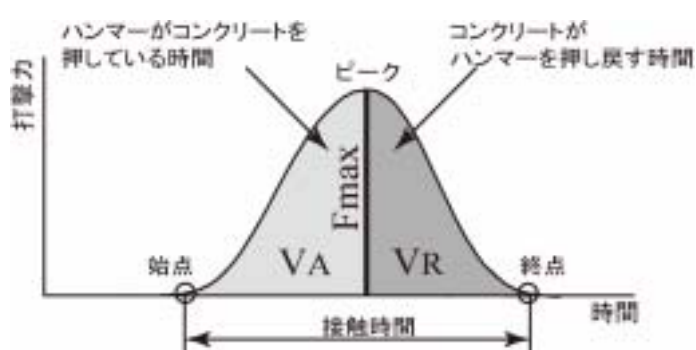


図-2 打撃力波形

となる。ここで  $F_{\max}$  はハンマー質量  $M$  に最大加速度  $a_{\max}$  を乗じたもの、 $V$  は始点から終点までの加速度の数値積分である。コンクリート表面が劣化しているような場合、アクティブ側では、ハンマーが劣化部分を塑性変形させながら貫入する時間が含まれる。すなわち、打撃エネルギーが塑性変形によって消費され、相対的に打撃力が減少し、機械インピーダンスは劣化部分の影響を強く受けてしまう。しかし、リアクティブ側では弾性変形エネルギーのみがハンマーのリバウンドに使用されるため、よりコンクリートの弾性的性質を反映していると考えられる。したがって、機械インピーダンスから圧縮強度を推定する立場では、リアクティブ側に着目し、

$$Z_R = \frac{F_{\max}}{V_R} \quad (5)$$

を指標とする方法を用いている。ここで、 $V_R$  はピークから終点までの加速度の数値積分である。さらに、アクティブ側の機械インピーダンス  $Z_A$  を以下の式により算出でき、 $Z_A$  と  $Z_R$  との比をとることによって表面劣化度合いを指標化できる。

$$Z_A = \frac{F_{\max}}{V_A} \quad (6)$$

ここで、 $V_A$  は始点からピークまでの加速度の数値積分である。

#### 4. 打撃力波形の分類

CTSによって得られる打撃力波形は 図-3 に示すように大きく4つに分類することができる。

Aのようにアクティブ側とリアクティブ側がほぼ左右対称で正規分布に類似している波形が測定された場合、コンクリートは健全であると判断できる。

Bのようにリアクティブ側に比べアクティブ側が大きく、左右非対称な波形が測定された場合は、コンクリート表面が劣化していると判断できる。アクティブ側が大きくなる理由は、コンクリートの表面が劣化しているとハンマーはこの劣化部分を塑性変形させながらコンクリートに貫入する時間が含まれるためである。

C, D は剥離部分の波形である。C は目視では剥離と分からない部分の波形であるが、健全波形と同様に左右対称で正規分布に類似している。しかし、接触時間が健全波形の波形よりも

長くなっている．これは剥離が存在し，打撃点直下の板厚が薄いとたわみ変形をおこすためと考えられる．

D は，剥離が表面に現れているような重度な剥離部分の波形であるが，接触時間が非常に長く， $F_{max}$  も極めて小さい．形状も健全波形にあるような原型を留めていない．これは，ハンマー打撃に対する抵抗力がなく，打撃部分が非弾性体として挙動しているためである．これらの波形の形状や，各指標値がコンクリートの状態を判断する材料となる．

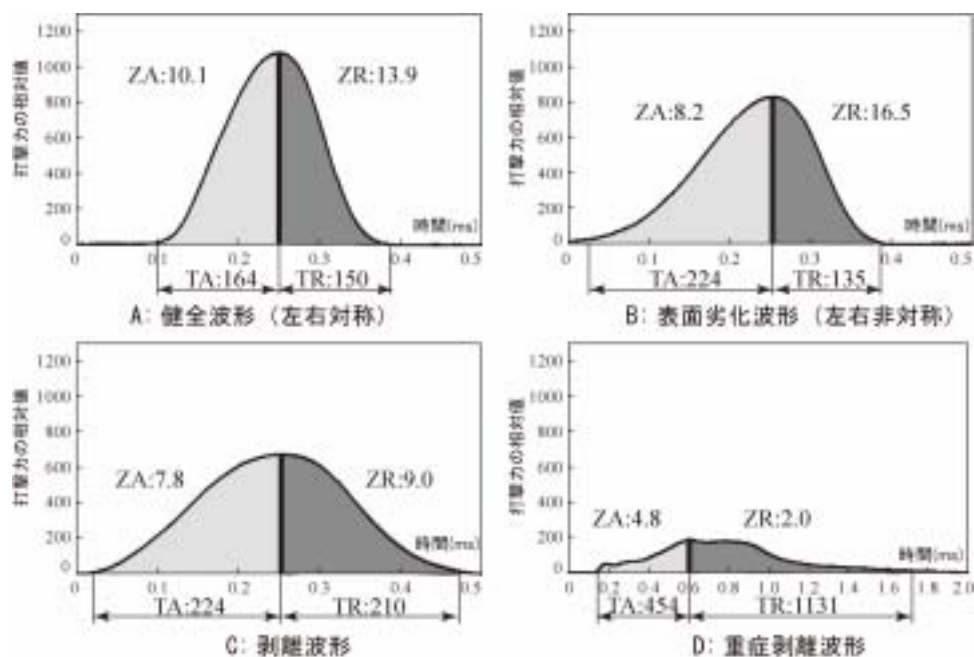


図-3 打撃力波形の分類

## 5.実構造物への適用

実構造物への適用性を確認するため，現在は使用されていない約 39 年経過した旧国鉄トンネル（写真-2）の覆工コンクリートを対象に行った健全性試験の結果について報告する．

試験は，打音検査により剥離音が確認された箇所の一部に CTS の測定面を設け，機械インピーダンスの分布（強度分布）などを測定した．さらに圧縮強度の推定精度を確認するために，トンネルの入り口付近、中間付近および通り抜けできないように仕切られているコンクリートの仕切り壁について CTS とリバウンドハンマーで測定し，その後測定箇所のコア抜きを実施し実際の圧縮強度との相関を調べた．



写真-2 旧国鉄トンネル全景

## 6.測定結果および考察

### 6.1 強度分布測定

トンネル内に設けた測定面を写真-3 に示す．測定面は縦 1100mm × 横 2000mm で 100mm メッシュを印している．測定点数は縦 12 × 横 21 の 252 点である．メッシュの交点を 1 点ずつ CTS で打撃しコンクリートの強度分布などを求めた．写真の × 印は打音検査で剥離音が確認された点である．



写真-3 トンネル内測定面

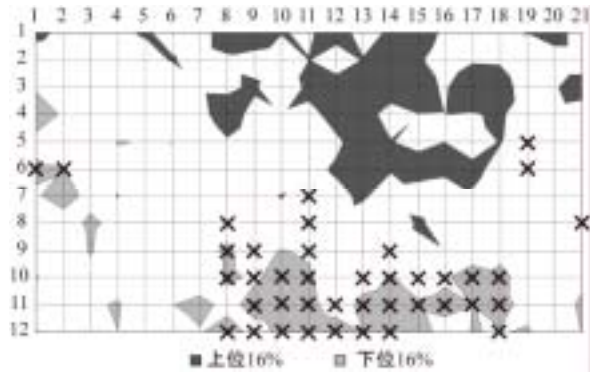


図-4 測定面の機械インピーダンス分布図

図-4 に機械インピーダンス ( $Z_R$ ) の分布図を示す．色の分割は、測定点の全平均と標準偏差を基準に、平均値 - 標準偏差以下 (機械インピーダンスの下位 16% 強度：弱) を薄色、平均値 + 標準偏差以上 (上位 16% 強度：強) を濃色で表している．CTS で強度が弱く測定されている箇所は打音検査で剥離音が確認された点と良く一致しているが、機械インピーダンスが低下する要因としては、コンクリート自体の強度低下も考えられ一概に剥離が原因であるとは言い難い．図-5 に健全部と異常部(機械インピーダンスが低く測定された点)の打撃力波形を示す．

健全部に比べ異常部では  $F_{max}$  が小さく、ハンマーの接触時間も 2 倍以上長くなっているのがわかる．図-5 のように極端に波形が異なる場合、強度低下ではなく剥離などの欠陥が原因であると考えるのが妥当であろう．打音で剥離と判定された点と機械インピーダンスの下位 16% を的中率で表すと、約 60% であるが、実用的には有用な結果であると思われる．写真-4 は打音検査と CTS 共に剥離と判定された箇所をコア抜きした写真であるが、表層近傍の骨材界面で剥離しているのが確認できた．以上のことから、打音検査との比較ではあるが、CTS で面的な測定を行うことによって、浮きや剥離をある程度つかまえられる事が分かった．

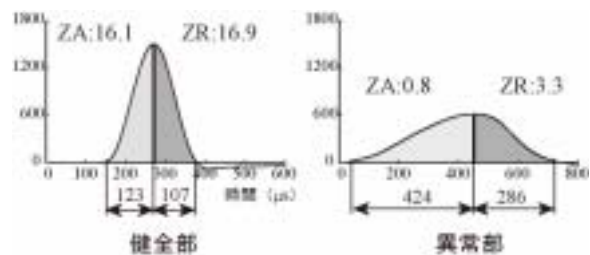


図-5 健全部と異常部の打撃力波形



写真-4 コア抜き断面



## 6.2 圧縮強度の推定

次にコンクリートの圧縮強度推定について述べる。測定箇所は、コンクリートの状態が比較的良好と思われるトンネルの入り口付近の2箇所、表面の状態が悪いトンネル中間付近の2箇所、通り抜けできないように仕切られている比較的新しいコンクリートの仕切り壁の2箇所、計6箇所である。測定結果を図-6に示す。グラフの縦軸は圧縮強度、横軸は指標値から換算した推定強度である。換算式は以下に示す。

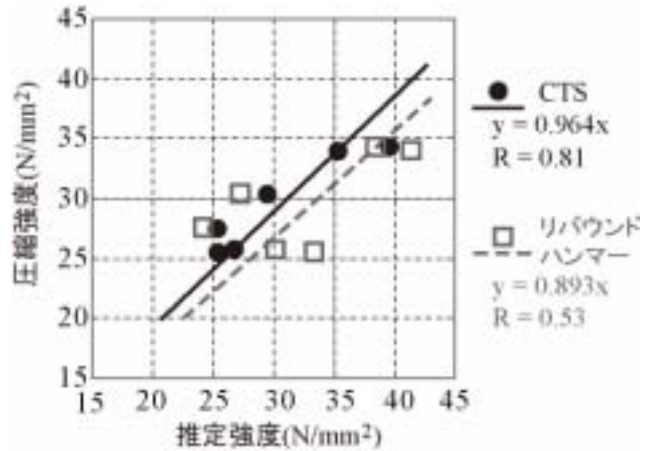


図-6 圧縮強度と推定強度

リバウンドハンマー： $f_c = 1.27 \cdot R_0 - 18.0$  (7)

CTS：ZR が 16.5 未満  $f_c = \frac{Z_R^2}{10}$  (8)      16.5 以上  $f_c = 6.97 \cdot Z_R - 87.7$  (9)

ここに、 $f_c$ ：推定強度 (N/mm<sup>2</sup>)     $R_0$ ：リバウンドハンマーの反発度

$Z_R$ ：リアクティブ側の機械インピーダンス

相関係数は、リバウンドハンマーが R=0.53 に対し、CTS は R=0.81 と良好である。これは、リバウンドハンマーは表面の状態の影響を受け、各測定箇所のバラつきが大きくなっているのに対し、CTS は「3.2 測定量からの算出」で述べたように、表面の状態の影響を軽減でき、精度よく圧縮強度を推定できたものと考えられる。

## 7.まとめ

コンクリートテスター (CTS) を用いてトンネルの覆工コンクリートの剥離検知と強度推定を行った結果以下のことがわかった。

1. 剥離の検知では、実際、打音検査で異常の全てが検知されるわけではないが、測定装置による方法では、打音検査で異常と判定された箇所は異常と判定できることが望ましい。CTS の判定結果と打音検査の判定結果との的中率は約 6 割程度であるが、広い面積を持った剥離はほぼ検知でき、実用的には有用な手法であると考えられる。
2. 圧縮強度の推定では、CTS はリバウンドハンマーに比べ精度良く圧縮強度を推定することができた。

### <参考文献>

- 1) 大高道夫, 小島俊一; 非破壊検査装置を用いたトンネル打音検査への取組み, 日本鉄道施設協会誌 構造物検査特集, Vol.44, pp.111-113, 2006.2
- 2) 金田重夫, 久保元, 境友昭, 極壇邦夫; 機械インピーダンスによるトンネルの剥離・強度の推定, 日本非破壊検査協会シンポジウム コンクリート構造物への非破壊検査の展開, Vol.2, pp.523-526, 2006.8