

## 老朽化コンクリートの強度推定における新技術開発 —コンクリートテスター (CTS - 02) による圧縮強度推定—

久保元<sup>1</sup> 中野泰宏<sup>2</sup> 金田重夫<sup>3</sup> 久保元樹<sup>4</sup>

### 1. はじめに

コンクリート構造物の非破壊検査には様々な技術があるが、費用や簡便性の問題から、いまだに打音検査とリバウンドハンマー（シュミットハンマー）が主流である。本稿では、この分野における挑戦として新たに開発された簡易コンクリート診断装置「コンクリートテスター (CTS - 02)」(以下 CTS) の開発経緯と測定原理および実際の現場におけるリバウンドハンマーと CTS の比較結果を紹介し、リバウンドハンマーを使用する際の留意点と CTS の優位性を明らかにしたい。

### 2. 開発の経緯

#### 2. 1 開発の背景

コンクリートの圧縮強度は、その品質を確認する上で重要なパラメータの1つである。現在、非破壊で簡易的に圧縮強度を推定する方法として、反発硬度法「リバウンドハンマー法」が広く普及している。リバウンドハンマーは日本に導入されて50年以上の歴史があり、測定装置および測定方法については JIS 基準<sup>1)</sup> が定められている。しかし、リバウンドハンマーはコンクリートの表面状態の影響を強く受けてしまうことや、器差が大きいなど測定精度に関して問題点が指摘されている。精度の高い測定方法としては、超音波法や衝撃弾性波法があるが、専門的な知識が必要であり簡易的とは言えない。非破壊試験に対する需要は、コンクリート構造物の老朽化に伴い、今後爆発的に増加すると容易に想像でき、簡便かつ安価にコ

ンクリートの圧縮強度などを測定できる装置が必要であると考えた。

開発目標としては、リバウンドハンマーと打音法の問題点を解決し、これに替わる簡易的な測定装置の開発である。具体的には、①測定が打音検査と同程度の手軽さで行えること。②現場での機動性を確保するために装置は小型かつ軽量であること。③圧縮強度推定のみならず、表面劣化度の検知や剥離検知も可能な多機能型であること。以上の3点を目標にあげ、新装置の開発を行った。

#### 2. 2 事業実施の取り組み

事業取組みの流れを下記に示す。

- ① 2003年7月北海道経済産業局「創造技術研究開発事業補助金」採択。  
従来技術に替わる新装置の開発開始。新装置の名称は、「コンクリートテスター CTS (Concrete Test and Surveyor)」に決定。
- ② 2004年3月コンクリートテスター (CTS - 01) プロトタイプ完成。
- ③ 2005年4月 CTS - 01 の改良を重ね、CTS - 02 (写真-1) が完成。  
全国販売を開始。
- ④ 2005年6月診断方法の特許取得。  
特許第3691477号
- ⑤ 2006年4月 CTS-02 の改良を重ね、CTS - 02Ver.2 が完成。全国販売実施中。
- ⑥ 2006年9月 NETIS 登録
- ⑦ 2006年11月 ARIC 登録

1. 日東建設(株) 代表取締役 2. 日東建設(株) 取締役札幌支店長 3. 日東建設(株) 技術開発部調査課課長  
4. 日東建設(株) 技術開発部技術開発課課長

## 2. 3 成果品

完成したCTSを写真-1に示す。CTSは測定器本体とハンマユニットから構成されている。ハンマ内部に衝撃加速度計が内蔵されており、ハンマ打撃からコンクリートの弾性的性質である機械インピーダンスを測定することにより、圧縮強度を推定するものである。一方、リバウンドハンマーは打撃によりコンクリート表面を塑性変形させ、その塑性変形によって打撃エネルギーが吸収されることを測定原理としている。両者はハンマ打撃という類似の測定方法を採用しているが、測定原理の違いから、全く異なる測定装置であると言える。



写真-1 コンクリートテスター (CTS-02)

CTSは、打音検査のように任意の力でコンクリート表面を打撃する簡易な測定方法を採用している。測定器のサイズと重量は、本体がH202×W108×D46 (mm) 約750gで、ハンマヘッド重量は190gであり、合計でも約1kgと測定装置としては非常に小型かつ軽量である。記憶媒体にSDカードを採用し、PCの専用プログラムを介すことで、瞬時に測定結果を出力することが可能である。測定の原理や測定精度の詳細については次章で論じる。

## 3. 機械インピーダンスについて

### 3. 1 基本原理

コンクリートを完全弾性体と仮定し、質量  $M$  のハンマが任意の速度  $V$  でコンクリート表面に衝突する現象を考える (図-1)。

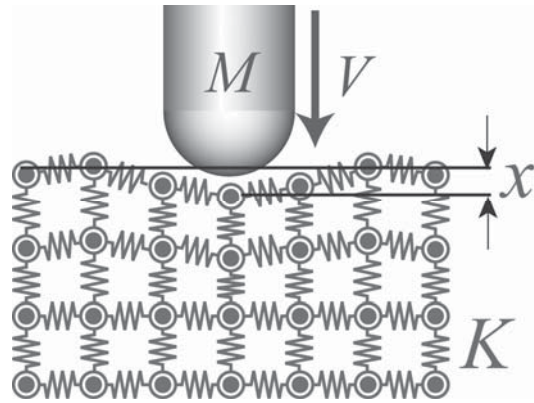


図-1 ハンマの衝突

ハンマの衝突によってコンクリートに弾性変形が生じる。この時のエネルギーの釣り合いについて考えると、コンクリートの弾性変形は、ハンマの運動エネルギーによってもたらされ、エネルギー保存の法則から、

$$\frac{1}{2} MV_{\max}^2 = \frac{1}{2} Kx_{\max}^2 \dots\dots\dots (1)$$

と表すことができる。

なお、 $K$ はコンクリートのバネ係数、 $x$ はハンマの衝突によって生じたコンクリートの変位である。また、力  $F$ は、フックの法則より、

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

である。式(2)を  $x_{\max}$  について解き、これを式(1)に代入して整理すると、

$$\sqrt{MK} = \frac{F_{\max}}{V_{\max}} \dots\dots\dots (3)$$

が得られる。ここで、 $\sqrt{MK}$ は、機械インピーダンスであり、発生した力の最大値をハンマ速度の最大値(衝突時の初速度)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

機械インピーダンスは、発生した力の最大値をハンマの衝突速度の最大値で除することによって得られることは上述した通りであるが、ここでは実際の打撃力波形からの算出方法を示す。

CTSの測定量は加速度であるが、力および速度の最大値は、ハンマの加速度を計測することによって測定することができる。

図-2に実際にコンクリートを打撃して得られる打撃力波形を示す。

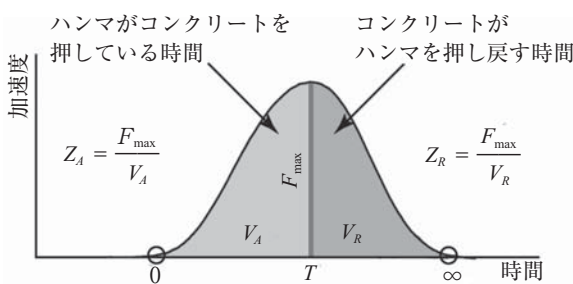


図-2 打撃力波形

ハンマがコンクリート表面に衝突したときに生じる加速度は、実際はハンマの速度を減速させる方向に作用する減速加速度であり、速度が0となる時刻、つまり、加速度が最大となるまでの時間積分によって衝突初速度が得られる。また慣性の法則から、ハンマ質量と最大加速度の積によって最大打撃力が得られる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} F_{\max} &= MA_{\max} \\ V_{A\max} &= \int_0^T A(t) dt \\ V_{R\max} &= \int_T^{\infty} A(t) dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

である。ここで、 $A$ は加速度、 $T$ は加速度が最大となる時刻である。

波形の前半部分は、ハンマがコンクリート表面に変形を与える過程であり、この部分をアクティブ側と称する。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ハンマの速度エネルギーに変換される過程であり、こ

れによってハンマはコンクリート表面から押し戻されることになり、この部分をリアクティブ側と呼ぶ。コンクリート表面が塑性化しているような場合、アクティブ側ではハンマ打撃によってコンクリート表面が塑性変形し、次いで弾性変形する。リアクティブ側では、弾性変形エネルギーのみがハンマのリバウンドに使われる。すなわち、塑性変形が生じると、その分だけアクティブ側と比較してリアクティブ側の速度が減少することになる。コンクリートの弾性的性質から圧縮強度を推定しようとする立場では、リアクティブ側のみに着目し、機械インピーダンスに対しては、

$$Z_R = \frac{F_{\max}}{V_R^{1.2}} \dots\dots\dots (5)$$

を指標とする方法を用いる。ここで速度のべき乗値は、打撃速度の補正項である。アクティブ側には、コンクリート表面の塑性化など、弾性的性質を測定する上では好ましくない影響があるからである。また、アクティブ側の速度  $V_A$  とリアクティブ側の速度  $V_R$  の比を求めることで、表面の劣化度合いを知ることできる。

### 3. 3 圧縮強度と機械インピーダンスの関係

圧縮強度と機械インピーダンスの関係を求めるために、 $\phi 150\text{mm} \times \text{H}300\text{mm}$ の円柱供試体を作製し、CTSにて測定を行った。各種試験方法との比較を行うために、リバウンドハンマーによる試験および弾性波速度の測定も行った。供試体作製に使用したセメントは普通セメント、高炉B種および早強セメントの3種類とし、設計強度は  $15\text{N/mm}^2$  から  $36\text{N/mm}^2$  まで  $3\text{N/mm}^2$  ずつ増加させ8段階とした。供試体の作成本数は、1条件につき5本とし、全部で120本の円柱供試体を作成した。

図-3に圧縮強度と弾性波速度の関係を示す。圧縮強度との相関関係は相関係数  $R = 0.90$  と非常に良好である。回帰直線は切片を持っている。本来であれば圧縮強度と弾性波速度は指数的に近似するものと考えられるが、今回の実験範囲(圧縮強度範囲)では直線近似で差し支えないと判断

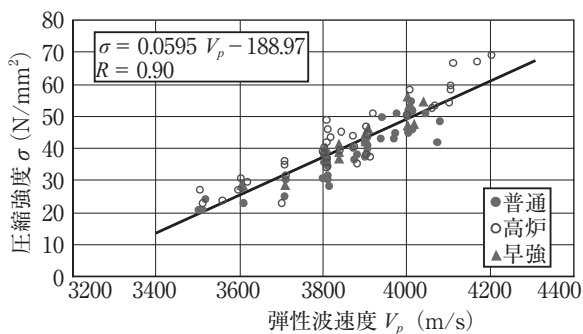


図-3 圧縮強度と弾性波速度

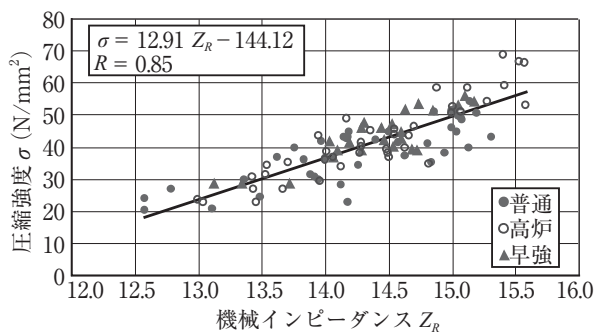


図-4 圧縮強度と機械インピーダンス (CTS)

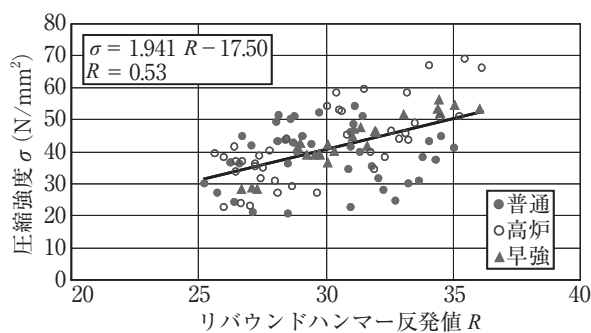


図-5 圧縮強度と反発値

し、直線近似としている。

図-4は圧縮強度と機械インピーダンスの関係である。弾性波速度と圧縮強度の関係に比べ、全体的にバラつきが大きく相関係数も  $R = 0.85$  とやや劣るが良好である。機械インピーダンスと弾性波速度はコンクリートの弾性係数に関する指標値であり、機械インピーダンスと弾性波速度の結果にバラつきが出る原因は、測定方法の違いによるものと考えられる。弾性波速度は、円柱供試体の内部を数十回往復した多重反射振動から算出しているため、供試体全体の平均的な物性を反映した指標であるのに対し、機械インピーダンスはコンクリート表面を打撃して算出するため、供試体全体ではなく表面近傍の物性を反映した指標であると考えられる。

圧縮強度とリバウンドハンマーの反発値  $R$  の関係を図-5に示す。相関関係はあるものの、バラつきは弾性波速度や機械インピーダンスに比べて大きく、相関係数も  $R = 0.53$  と低い。リバウンドハンマーは、コンクリート表面に打撃用の重錘を一定速度で衝突させ、その反発率から強度を推定する方法であるが、コンクリート表面状態の

影響を強く受けるとされており、測定値がバラつく原因の一つであると推測できる。一方、機械インピーダンスは表面状態の影響を強く受けるアクティブ側ではなく、コンクリートがハンマを押し戻すリアクティブ側で指標値を算出するため、表面状態の影響が軽減されている。

## 4. 現地比較調査

### 4.1 調査目的

既設の水路構造物は、流水の作用によって、コンクリート表面のモルタル分の磨耗、またはカルシウム分の流出が進み、陸上のコンクリート構造物に比べ表面の劣化が著しいという特徴がある。このような構造物をリバウンドハンマーで測定すると、表面状態の影響を強く受け、強度を過小評価してしまう。JIS規格によると、コンクリート表面に劣化が認められる場合、表面の劣化層を削り落としてから測定するよう定められているが、水路構造物のように長大なコンクリート構造物では、多大な時間と労力を要する。一方、CTSは、コンクリートがハンマを押し戻すリアクティブ側から強度指標を算出するため、ある程度の表面劣化であれば、そのまま測定を実施することが可能である。

本調査は、表面劣化が進んでいる水路構造物を対象に、リバウンドハンマーおよびCTSを用いて測定を実施し、CTSの有効性に関して検討したものである。

#### 4. 2 対象構造物および測定方法

測定は、無筋コンクリートの水路構造物（写真－2）を対象とし、この水路構造物をNo.2と呼称している。なお、この水路構造物は昭和47年に北海道網走郡美幌町で造成された用水施設で、測定時まで35年を経過している。

測定範囲は、縦0.4m×横3.0mの測定面を2箇所確保し、図－6に示すように、メッシュを印しその交点を測定箇所とした。なお、測定点数は42点である。

#### 4. 3 リバウンドハンマーの測定結果

表－1は、表面処理前と表面処理後にリバウンドハンマーで測定した結果である。下表には、「4.2対象構造物および測定方法」で示した測定箇所の内、物理試験を行った箇所のみ掲載した。

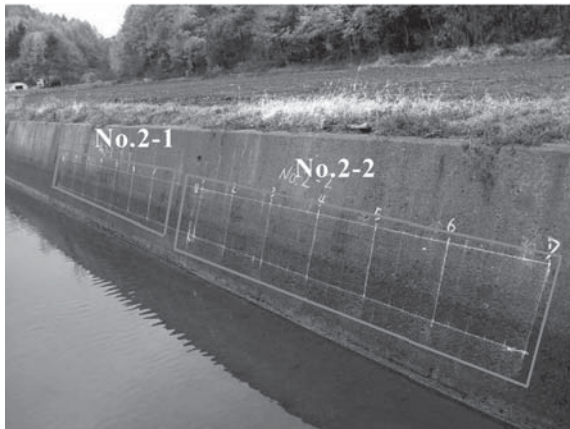
推定強度は、得られたR値から以下の材料学会の式により推定している。

$$f_c = (1.27 \times R_0 - 18) \times 0.63 \dots\dots (6)$$

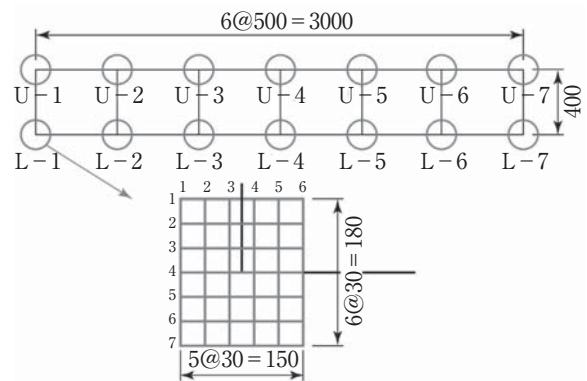
ここに  $f_c$ : 圧縮強度  $R_0$ : 反発値 0.63: 材齢補正係数 である。

なお、データの整理方法は、表面処理前および表面処理後共に、42点の全平均から偏差が±20%以上異なる測定値を除去し、再度平均を求めている。

表面処理前のR値( $R_1$ )から求めた推定強度 $\sigma_1$ は、処理後のR値( $R_2$ )から求めた推定強度 $\sigma_2$ に比べて大きく低下しているのがわかる。処理後の $\sigma_2$ を真値とした場合の比率( $\sigma_1/\sigma_2$ )は、4箇所の平均で45.2%にとどまり、表面劣化の影響を強く受けている。また、 $\sigma_1$ と圧縮強度試験値 $\sigma$ の比率( $\sigma_1/\sigma$ )は、4箇所平均で39.4%となり、大きく過小評価している。処理後では、若干推定強度が低めであるが、概ね良い結果が得られた。



写真－2 No.2 構造物



図－6 測定区画

表－1 リバウンドハンマー測定結果

測定面	測定箇所	研磨前		研磨後		圧縮強度 $\sigma$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_1/\sigma_2$ %	$\sigma_1/\sigma$ %
		R 値 ( $R_1$ )	推定強度 $\sigma_1$	R 値 ( $R_2$ )	推定強度 $\sigma_2$			
			N/mm <sup>2</sup>		N/mm <sup>2</sup>			
No.2 - 1	L - 3	25.8	9.3	41.6	21.9	23.2	42.5	40.1
	L - 7	27.6	10.7	42.8	22.9	25.8	46.7	41.5
No.2 - 2	L - 1	27.0	10.2	44.2	24.0	27.2	42.5	37.5
	L - 7	27.4	10.6	41.2	21.6	27.4	49.1	38.7
平均		26.9	10.2	42.4	22.6	25.9	45.2	39.4

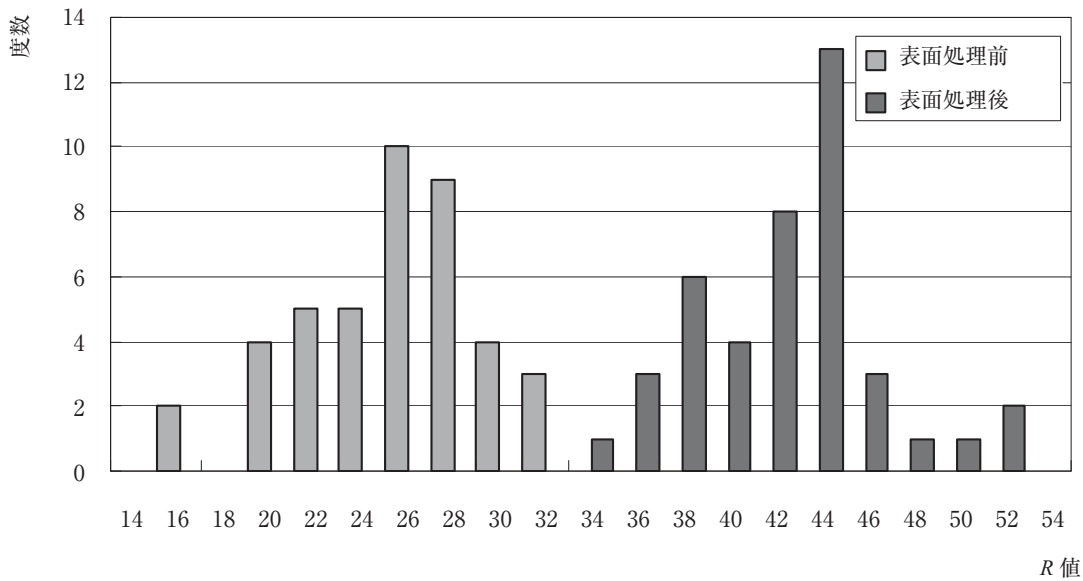


図-7 No.2-1-L-3 ヒストグラム (リバウンドハンマー)

図-7にNo.2-1-L-3測定箇所の測定データのヒストグラムを示す。表面処理前と処理後共に正規分布しているが、処理前と処理後で完全に独立した2つの山を形成しているため、表面処理なしでは、測定が困難であることがわかる。表面処理をせずに測定を実施するには、補正係数を乗じる方法も考えられるが、表面劣化の程度によって測定値が変動するため、現実的ではない。

#### 4.4 コンクリートテスター (CTS) の測定結果

リバウンドハンマーの場合、得られる情報が反発値のみであり、データ整理方法の検討は出来ない。しかし、CTSの場合には、測定した波形データが全て記録されており、強度指標値と合わせて様々な情報を得ることが出来る。図-8に本調査で得られた代表的な波形例を示す。波形は、A:健全波形、B:波形前半にローカルピーク発生、C:波形後半にローカルピーク発生、D:波形前後半にピーク発生の大きく4つに分類することが出来る。

波形前半にローカルピークが出現する場合 (B) は、セメントペースト融解などによる表面骨材剥離 (軽傷) の可能性があるかと判断する。ハンマの打撃エネルギーがコンクリートに伝達される過程で骨材等の破壊が起こり、力の伝達が不安定な状

態である。しかし、波形後半にローカルピークは見られず、反力はしっかりと形成されており、強度推定用のデータとして採用することが出来る。次に、波形の後半にローカルピークが出現する場合 (C, D) は、凍結融解などによる骨材剥離・浮き (重傷) の可能性があるかと判断する。骨材等が緩んでおり、反力形成が不安定な状態であるため強度推定用のデータとして採用することが出来ない。

上記を踏まえ、CTSでは2通りのデータ整理方法を採用した。

- ① ローカルピークの出現に関わらず、リバウンドハンマーの場合と同様に測定したデータの全平均から偏差が±20%以上異なる測定値を除去し、再度平均を求める。
- ② 波形後半にローカルピークが出現したデータを除外し、残ったデータの中央値を求める。

表-2にCTSの測定結果を示す。表中のSTR1は、データ整理方法①を採用した場合。STR2は、データ整理方法②を採用した場合である。STR3は表面処理後の測定であるため、ローカルピークの出現はなく、データ整理方法は①とした。

STR1とSTR2では、STR2の方が強度を高めに推定しているのがわかる。

図-9にNo.2-2-L-1測定箇所の測定デ

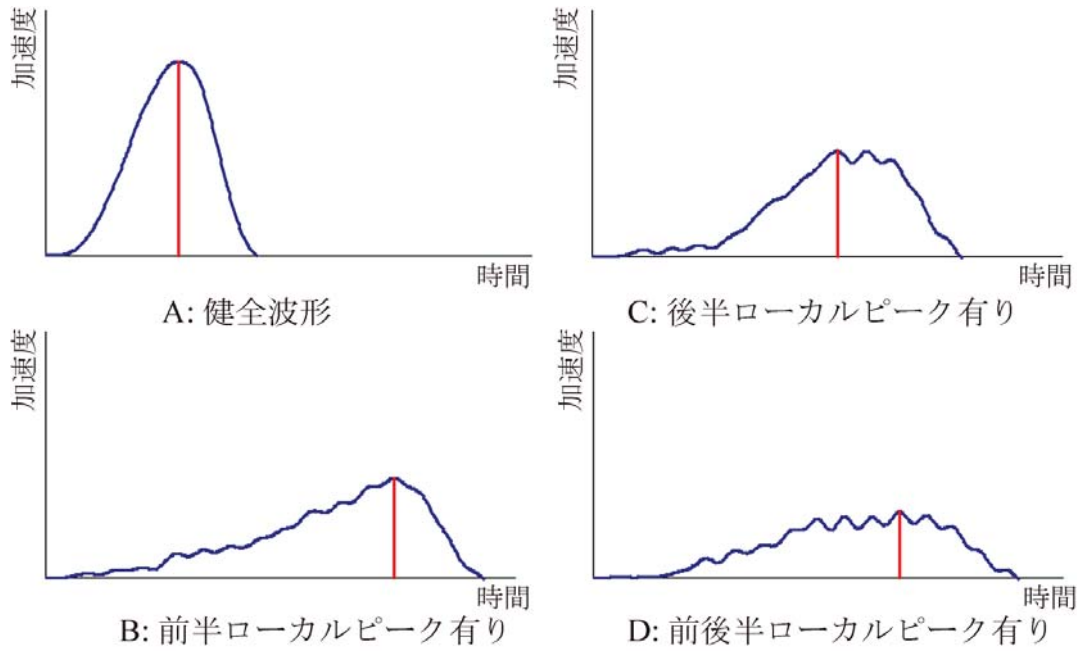


図-8 波形パターン

表-2 CTS測定結果

測定面	測定箇所	研磨前		研磨後	圧縮強度 $\sigma$	STR2/STR3	STR2/ $\sigma$
		STR1	STR2	STR3			
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	%
No.2 - 1	L - 3	15.4	17.9	21.6	23.2	82.9	77.2
	L - 7	20.3	21.5	22.6	25.8	95.1	83.3
No.2 - 2	L - 1	19.0	22.5	23.7	27.2	94.9	82.7
	L - 7	19.4	20.8	22.1	27.4	94.1	75.9
平均		18.5	20.7	22.5	25.9	91.8	79.8

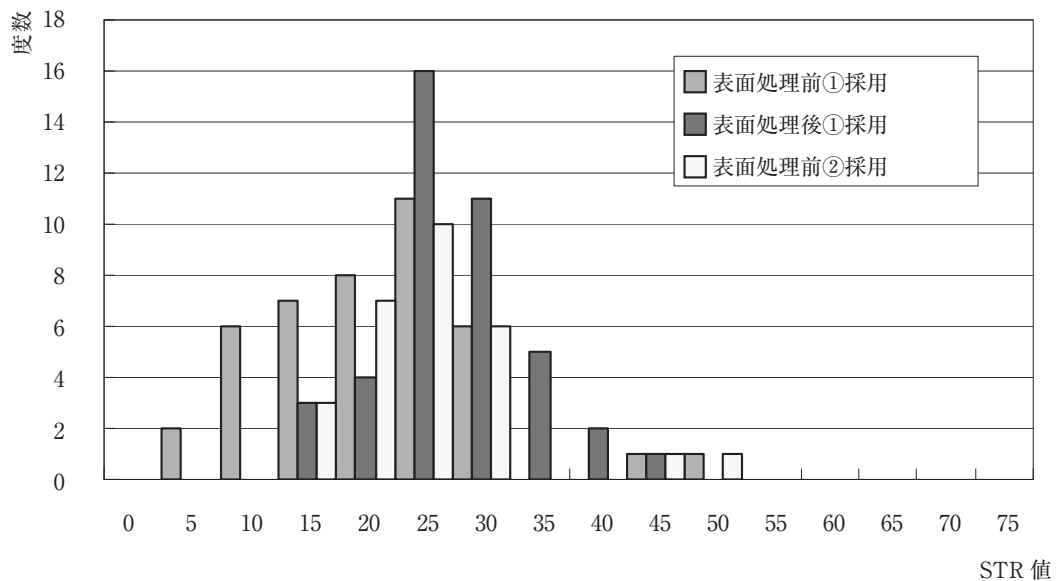


図-9 No.2-2・L-1 ヒストグラム (CTS)

ータのヒストグラムを示す。表面処理前では、表面劣化の影響から処理後に比べて全体的に低めに推移しており、平均値も低くなる。一方、波形後半にローカルピークが出現したものを除外すると、データ数は少なくなるものの、処理後とほぼ同等の分布を形成し、処理後と大差ない強度推定が可能であることがわかる。

数値で見ると、処理後のSTR3を真値とした場合、STR2とSTR3の比率（STR2/STR3）は、4箇所平均で91.8%となり、多少の低下は避けられないが、表面状態を軽減した指標値の算出が可能である。なお、STR2と圧縮強度試験値 $\sigma$ との比率（STR2/ $\sigma$ ）は約80%であり、実用的に有効に活用できると考えられる。

## 5. まとめ

(1) リバウンドハンマーの場合、表面処理前の推定強度 $\sigma_1$ は、処理後の推定強度 $\sigma_2$ に比べて約45%低下した。また、実際の圧縮強度試験値の約40%しか評価することができず、大きく過小評価する結果となった。一方CTSは、波形後半にローカルピーク数が出現したものを除外し、残ったデータの中央値を求めることで、表面処理前でも処理後と大差ない精度で測定することがわかった。推定強度に関しては、実際の圧縮強度試験値の約80%の評価ができ実用的に有用である。

(2) リバウンドハンマーは、反発係数を測定するため、表面の劣化層の塑性変形により打撃エネルギーが大きく消失し、表面処理前では推定強度が低くなったものと考えられる。

一方CTSでは、コンクリートがハンマーを押し戻す後半部分の打撃力波形から強度指標値を算出するため、表面劣化層の影響を軽減できると考えられる。また、波形データが全て記録されており、強度指標値以外の情報も入手することが可能であり、客観的なデータの選別ができるという利点がある。

(3) 表面処理後のリバウンドハンマーとCTSの推定強度の精度はほぼ同等であった。

(4) 本論では、表面劣化を起こした構造物の測定に際し、測定方法や測定機器の機構を、通常のコンクリートの測定と同様にして得られたデータの整理方法について検討を行ったものである。今後は、表面劣化構造物での圧縮強度の推定精度を向上させるべく、ハンマーの重量を重くするなど、測定方法や測定機器の機構を変えて検討を重ねていく所存である。

## 参考文献

- 1) JIS A 1155 - 2003 コンクリートの反発度の測定方法

