

コンクリートテスターの研究開発

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF CONCRETE TESTER

久保 元 中野 泰宏 金田 重夫 久保 元樹
HAJIME KUBO YASUHIRO NAKANO SHIGEO KANEDA GENKI KUBO

日東建設株式会社
Nitto Construction

概 要

コンクリート構造物の老朽化は、大きな問題になっている。非破壊検査は、コンクリート構造物の品質を確認する技術として大きな注目を集めている。現在では様々な非破壊検査技術があるが、費用や簡便性の問題から、未だに打音検査とリバウンドハンマーが主流である。そこで当社は、簡易的にコンクリートの健全性を診断する装置「コンクリートテスター」を開発した。本論では、開発経緯や基本原理および用法などについて述べる。

キーワード:非破壊検査,コンクリートテスター,機械インピーダンス,

1.はじめに

コンクリート構造物は、現代のインフラストラクチャーを支える重要な役割を担っている。コンクリート構造物はかつて、メンテナンスフリーで永久構造部とまで言われていた。しかし、1999年のトンネルコンクリート剥落事故をきっかけに、現在ではコンクリートの品質についての意識が大きく変化しており、最近では建築耐震強度偽装問題など人為的な欠陥をもったコンクリートも問題となった。さらに、戦後の高度経済成長を背景にインフラの整備が急ピッチで進められたが、今後これらの膨大な財産は一斉に寿命を迎えようとしている。今、これらコンクリート構造物の品質の確認（健全性診断）や施工不良を抑制するツールとして、非破壊検査技術への需要が高まっている。著者らはハンマー打撃によるコンクリートの圧縮強度推定などにつて研究を行ってきた¹⁾。

本論では当社が開発した多機能型非破壊検査装置「コンクリートテスター」の開発経緯や、測定原理および用法などを論じる。

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ーの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²⁾が定められている。しかし、リバウンドハンマーは打撃角度による測定データの補正やコンクリート表面の状態の影響を強く受けてしまうこと、器差が大きいなど測定精度に関して問題点がある。また、劣化や浮きを判定する打音法は、判定に関して客観性に欠けるとともに、測定データの記録が残らないなどの問題がある。精度の高い測定方法としては、衝撃弾性波法や超音波法があるが、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へた。

2.2 開発目標

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、測定が打音検査と同程度の手軽さで行えること。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。圧縮強度推定のみならず、表面劣化度合い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、軸に新装置の開発を行った。

2.3 事業実施の取り組み

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。

2004年3月コンクリートテスター (CTS-01) プロトタイプ完成。

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。

2005年6月診断方法の特許取得。

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。

2006年9月NETIS登録

2.4 成果品

完成したコンクリートテスター (CTS-02) を写真-1 に示す。CTS は測定器本体とハンマーユニットから構成されている。ハンマー内部に衝撃加速度計が内蔵されており、ハンマー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。CTS とリバウンドハンマーは類似の測定技術と思われがちだが、その実全く異なる測定装置である。



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 H202×W108×D46 (mm) 約 750g で、ハンマーヘッド重量は 190g である。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

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 ,

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

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 ,

$$F = Kx \quad (2)$$

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 ,

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

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 測量量からの算出

図-2 に CTS で実際に打撃した際に得られる時系列波形を示す . CTS の測量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で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変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 ,

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

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ことがわかる .

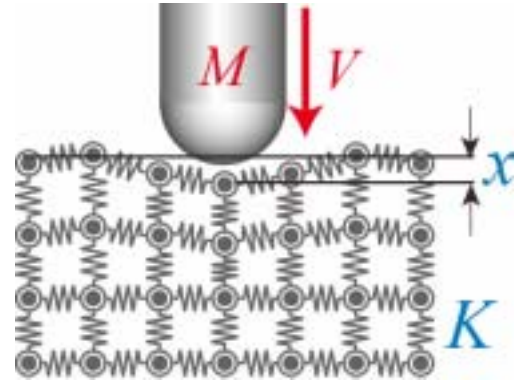


図-1 ハンマーの衝突

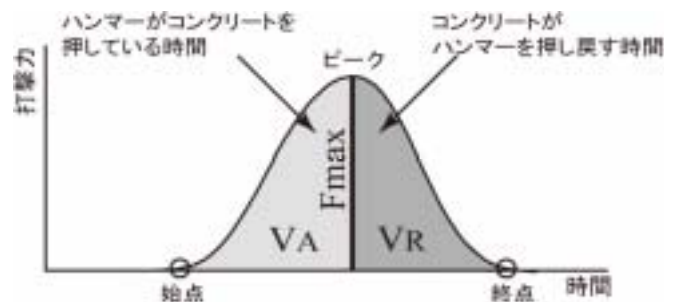


図-2 打撃力波形

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

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。

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 (CTS) の関係を求めるために、150mm × H300mm 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試験、弾性波速度測定も行った。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 15N/mm² から 36N/mm² まで 3N/mm² ずつ増加させ 8 段階とした。

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し、直線近似としている。

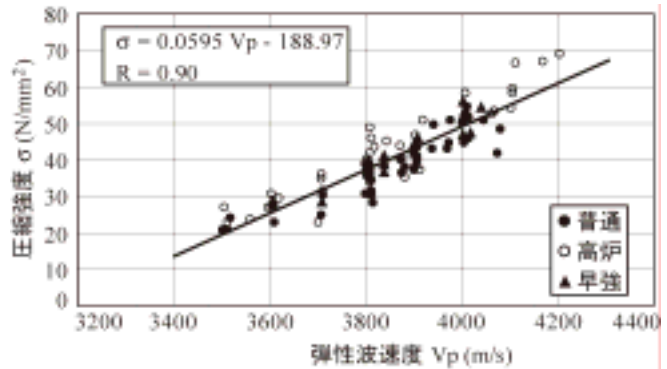


図-3 圧縮強度と弾性波速度

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。

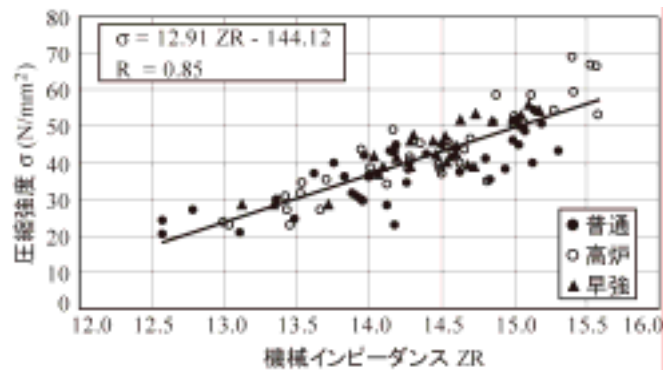


図-4 圧縮強度と機械インピーダンス (CTS)

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。

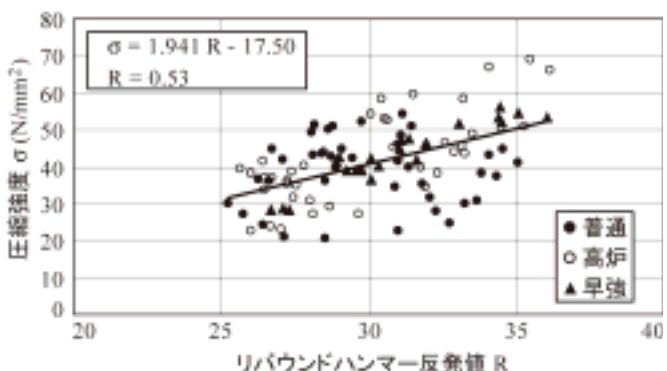


図-5 圧縮強度と反発値

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言われており、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ー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. コンクリートテスターの用法

コンクリートテスターには2種類の使用方法がある。リバウンドハンマーと同様にコンクリート構造物のある特定点を打撃し、圧縮強度を推定する POINT モード。打音検査のように全体を打撃し、コンクリート構造物全体の状況を把握する AREA モードの2種類である。次項で両モードについて論じる。

4.1 POINT モード

POINT モードはリバウンドハンマーのように使用するモードである。測定方法などはリバウンドハンマーとほぼ同様である。リバウンドハンマーとの相違点は、

「3.1 基本原理」で述べたように、打撃力波形のリアクティブ側を使用することにより表面状態の影響を軽減できるためコンクリート表面の特別な処理は必要ないこと(極度に劣化が認められる場合は必要)。

JIS規格でリバウンドハンマーの有効データ数は9点となっているが、CTSは20点以上必要。CTSは20点データを採取した段階で、20点の平均値と平均値 \pm 20%のレンジを設定し、これから外れるデータを自動的に削除するので異常値除去の必要がない。

上記の3点である。

CTSで圧縮強度を推定する際に有効データ数が20点以上必要な理由は、1点に対するデータの質の問題である。コンクリートは複合材料であり、1点1点の測定値のバラつきが大きいためである。図-6はコンクリートを50回打撃した時の1点ごとの測定値のバラつきをパーセンテージで示したものである。50回の平均値を真値(0)としている。最大で \pm 19%の誤差があることがわかる。これは測定器のバラつきではなく、コンクリートに起因するバラつきであり、誤差を除去するには多数点測定するほか方法はない。

図-7は50回打撃したときの全平均(真値)から、打撃毎の累加平均の差(偏差)をパーセンテージで示したものである。データ数が増加すると累加平均が真値に

収束する様子が明確に確認できる。測定値の誤差を1%以内にするには25回程度の打撃回数が必要であり、最低でも20回の打撃が必要であるのがわかる。

4.2 AREA モード

AREA モードは、打音検査のように構造物を広範囲に打撃し健全性を評価するモードである。測定は、写真-2に示すように、コンクリートの測定面に必要に応じて10cm~50cmメッシュを設けてその交点を1点ずつ打撃して行う。CTSは、1点の測定に要する時間が2秒程度で測定

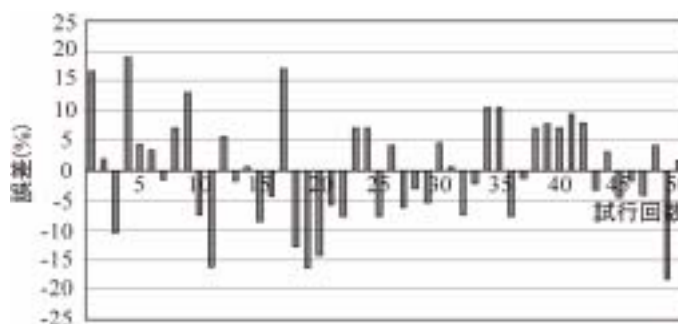


図-6 測定データのバラつき

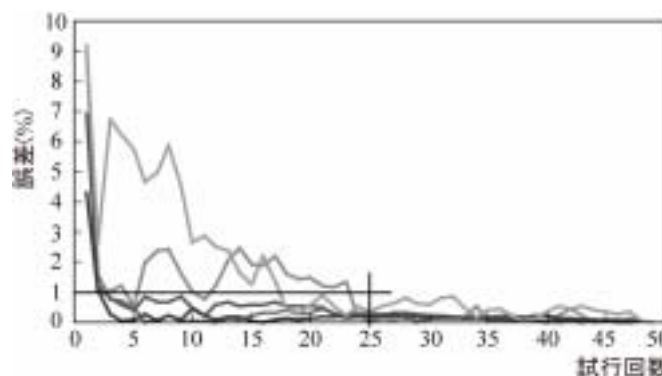


図-7 打撃回数と誤差

が迅速であるという利点があり、1日約8000点の測定が可能である。これは、例えば50cmメッシュを印した場合では約1000m²もの面積を測定できることになる。現在、接触型の非破壊検査装置でこれだけの広範囲を測定できる装置は皆無であり、CTSは簡易的にコンクリート構造物全体の状態を把握することに非常に適した装置であると言える。測定できる項目は、圧縮強度、表面劣化度合いおよび浮き・剥離の3項目である。測定したデータは表計算ソフト等で図化することにより、視覚的に表すことができるため(図-8)、健全な部分や劣化の進んでいる部分の把握が容易に行うことができる。

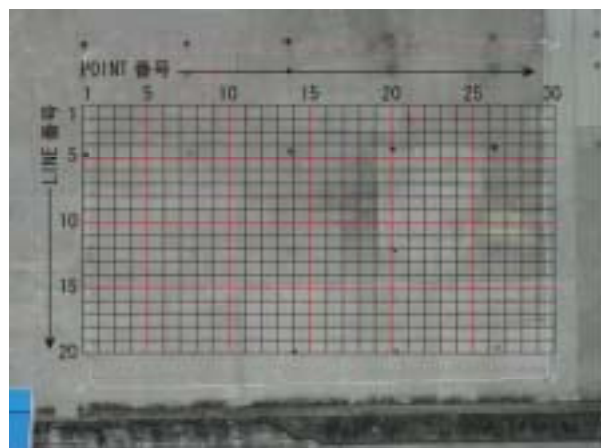


写真-2 AREAモード測定例

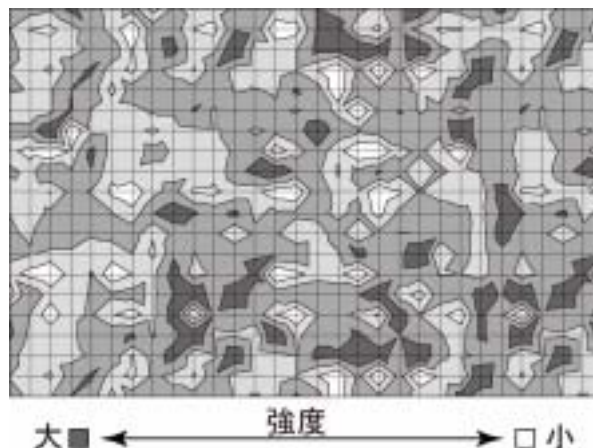


図-8 強度分布図

4.3 コンクリートテスターの活用

CTSは「4.2 AREAモード」でも述べたように、構造物全体の状態の把握に適している。活用場としては、中間検査、完成検査でのコンクリートの健全性試験や補修・補強工事の着工前と完成後の状態確認、構造物全体調査からの詳細調査箇所の絞込みおよび災害時などの一斉緊急点検などである。

コンクリート構造物の内部欠陥などを広範囲に調べる方法としては、非接触型の非破壊検査技術があるが、非接触型の非破壊検査装置でコンクリートの物性を把握するのは難しい。コンクリートの健全性を診断する際にコンクリートの圧縮強度というパラメータは非常に重要であるが、コンクリートは複合材料であるため品質のバラつきが大きく、立地条件によっては同一構造物であっても劣化の進行が極端に違う場合もあり、特定点の情報でコンクリート構造物を評価することは非常に難しいと考えている。現在一般的に行われているリバウンドハンマーでの圧縮強度推定は、構造物の特定点での情報であると同時に推定精度も問題視されている。推定精度の高い方法としては、超音波法や衝撃弾性波法があるが、やはり構造物の特定点の情報であることに変わりはない。健全性診断としては、ある程度広い範囲でコンクリートの状態を把握することが重要である。CTSのような簡易的な測定装置で面的にコンクリートの状態を把握し、異常が認められる箇所がある場合に、より詳細な検査を行うことが維持管理の面からもコストの面からも最良であると考えている。

5. 実構造物での使用例

実際の供用中の構造物は、コア抜きなどの許可がとれず、測定結果の確認ができないため、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-3)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。

5.1 測定概要

トンネルの覆工コンクリートは、打音検査により剥離音が確認されている。覆工コンクリートの一部に測定面を設け、CTS によって覆工コンクリートの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比較的新しい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-3 旧国鉄トンネル全景

5.2 強度分布測定

トンネル内に設けた測定面を写真-4 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-4 トンネル内測定面

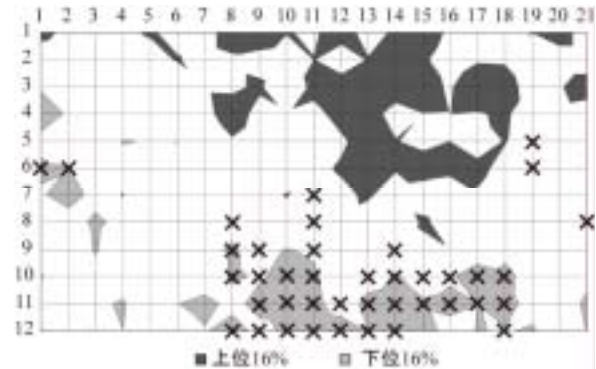


図-9 測定面の機械インピーダンス分布図

図-9 に機械インピーダンス (Z_R) の分布図を示す。機械インピーダンスの下位 16% (強度：弱) を薄色，上位 16% (強度：強) を濃色で表している。CTS-02 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。図-10 は健全部と剥離部の打撃力波形である。健全部に比べ剥離部では 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。写真-5 は打音検査で剥離と判定された箇所をコア抜きした写真であるが、表層近傍で骨材界面から剥離しているのが確認できた。以上のことから、剥離があると機械インピーダンスが低下することがわかる。機械インピーダンスの低下の要因としては、コンクリート自体の強度低下も考えられるが、図-10 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。

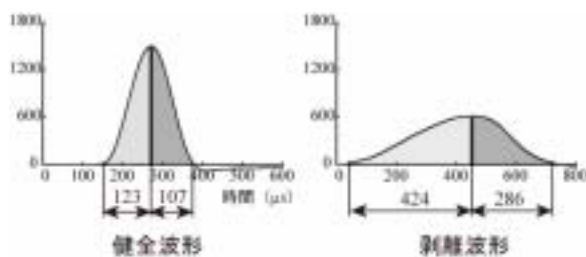


図-10 健全部と剥離部の打撃力波形



写真-5 コア抜き断面

5.3 圧縮強度の推定

次にトンネル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、表面が劣化している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-11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。相関係数はリバウンドハンマーがR=0.66であるのに対し、CTSはR=0.94とリバウンドハンマーに比べ良好である。これは、リバウンドハンマーは表面が劣化している箇所でバラつきが大きいのに対し、CTSはコンクリートがハンマーを押し戻すリアクティブ側で強度推定を行うため、表面が劣化している箇所でも精度よく圧縮強度を推定できたものと考えられる。

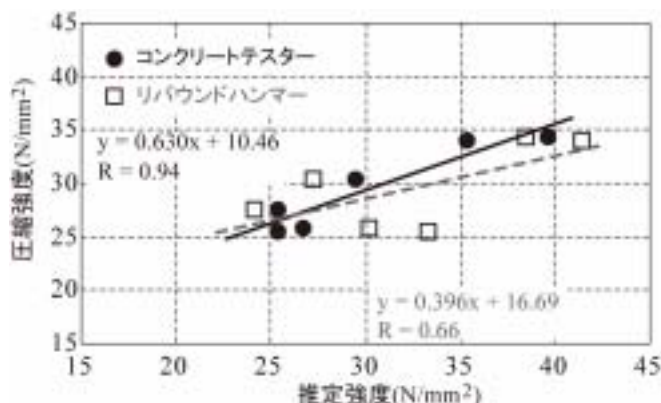


図-11 圧縮強度と推定強度

6.装置の普及状況

CTSは全国の都道府県に販売代理店を設け、平成17年4月の販売開始から現在(平成18年8月31日現在)までに109台を販売している。職種別販売状況を図-12に地域別販売状況を図-13に示す。職種別ではコンサルが27%を占めている。CTSは北海道発の技術であり、地域別販売状況では北海道が役4割を占めている。今後、コンクリート構造物の維持管理の必要性から、簡易的なコンクリートの健全性試験装置として全国に普及していくものと考えている。

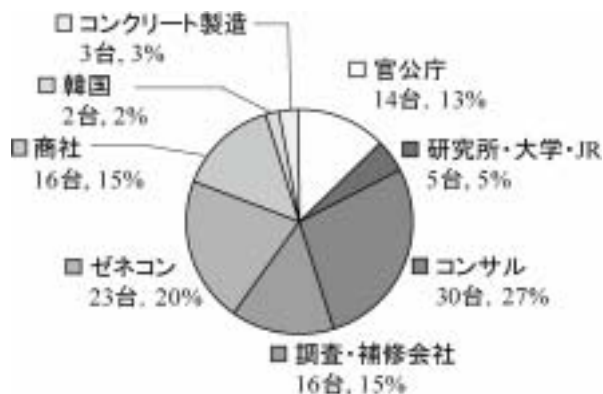


図-12 職種別販売状況

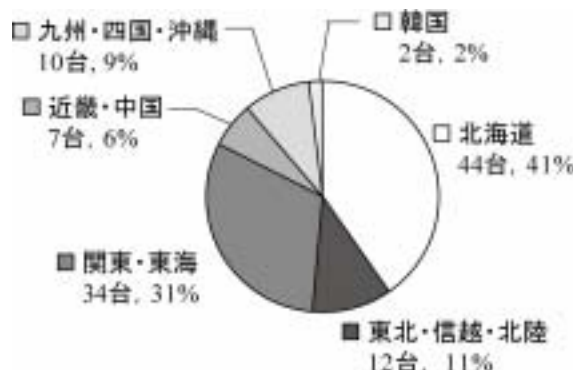


図-13 地域別販売状況

7. 今後の展望

コンクリートテスターは、コンクリート構造物の健全性診断のみならず、鋼材とコンクリートの付着の診断やボルトの締め付け度合いの診断などに応用できる可能性がある。

インフラストラクチャーの有効活用や維持管理の重要性が叫ばれるなか、構造物の安全性確保や信頼性の向上に少しでも貢献すべく、今後も研究・開発に取り組んでいこうと考えている。

参考文献

- 久保元樹ほか：円柱供試体の圧縮強度と弾性波速度，機械インピーダンスおよび弾性係数の相関関係，土木学会第60回年次学術講演大会，pp1207～1208，2005.9
- JIS A 1155-2003 コンクリートの反発度の測定方法