

水中にあるコンクリートの非破壊検査に関する実験的研究

渡邊晋也*1・迫田恵三*2・鉄 芳松*3・武内昭人*4

Experimental study for the Non-destructive testing of the concrete in water

Shinya WATANABE, Shigemi SAKODA, Yoshimatsu TETSU and Akihito TAKEUCHI

Abstract

In Japan, modern engineering structures have begun to be built since the Meiji era. Concrete or iron and steel are used in these structures mainly. Although such concrete structures are a few, they are rather in use. However, it is known that the concrete may deteriorate when it is exposed to water. Therefore, that the concrete is exposed to deteriorate in long term under water environment. As a result appropriate repair and reinforcement actions must be implemented in order to prolong the serve life of structures and to sustain their sapid the in safety. It is necessary to understand the state of the concrete before repair and reinforcement. Many nondestructive testing methods are developed, and, the techniques for, investigation and check it are used for land concrete structures. However, the conventional techniques are not suitable for structures under the water. Therefore we attempted to diagnosis the a nondestructive testing method for the concrete in the water in this study. The method we developed is a combination of rebound value and supersonic wave velocity. As a result, it was clarified that it is possible to estimate compressive strength of the concrete by waterproofness and pressure tightness to nondestructive testing device of the concrete under water-environment.

1. はじめに

水中とは、大別して淡水と海水の2環境に分けられる。これらの環境には多くのコンクリート構造物が建設されている。例えば、淡水にはダム、河川堤防、水路、橋脚、海水には防波堤、離岸堤、港湾構造物などが挙げられる。これらのコンクリート構造物は、淡水や海水の化学的、物理的作用により劣化を起すことが知られている(迫田, 1991; 竹田, 1999; 濱田ほか, 2005)。一般に、コンクリート構造物の劣化程度を測定するには、各種非破壊検査や構造物からコアを採取し圧縮強度などの物理的性質を測定する方法が行われている。しかしながら、水中に存在するコンクリートの劣化程度を測定するには現在の手法では非破壊、破壊検査ともに困難を極める。現在行われている水中コンクリート構造物の点検、検査は、潜水士による目視検

査、その後、劣化具合によりコアを採取して物理的性質を測定する方法が一般的である(沿岸開発技術研究センター, 1999)。しかし、目視検査は、潜水士の個人差が存在し、客観的な判断を行うことが難しい。また、コンクリートコアを採取するには、多大な費用と労力が必要となり、検査範囲、検査対象構造物が限定されることが考えられる。そこで、本研究は従来、困難とされていた水中でのコンクリート構造物の非破壊検査手法について検討を行った。

既往の研究で(渡邊ほか, 2006)、水中反発度法から得られる水中反発度は圧縮強度と相関性があり、水中のコンクリートの圧縮強度を推定できることを指摘している。しかしながら、水中反発度法は、コンクリートの表面数mmの情報しか得られないことが考えられる。この欠点を補うために、反発度法よりも内部の情報が得られる超音波法と組み合わせた複合法を行うことが望ましいと考えら

2008年1月17日受理

*1 東海大学連合大学院理工学研究科総合理工学専攻 (TOKAI UNIVERSITY UNIFIED GRADUATE SCHOOL, Science and Technology.)

*2 東海大学海洋学部海洋建設工学科 (TOKAI UNIVERSITY, Dept. of Marine Civil Engineering, School of Marine Science and Technology.)

*3 株式会社 鉄組潜水工業所 代表取締役 (TETUGUMISENSUIKOUGYOUSYO CO., LTD., President-Director.)

*4 株式会社 鉄組潜水工業所 工事部 (TETUGUMISENSUIKOUGYOUSYO CO., LTD., Construction department.)

れる。陸上のコンクリート構造物では、反発度法と超音波法による複合法について検討を行っている。その結果、単体の非破壊試験より複合法の方が圧縮強度の推定精度は向上することが報告されている（十代田ほか，1991；野崎ほか，1993；野崎ほか，1994）。

本研究では、水中にあるコンクリートの非破壊検査方法として、比較的広い範囲でコンクリートの圧縮強度に関する情報を入手しやすい反発度法とコンクリートの内部について情報が得られる超音波法について検討を行った。

本論文では、水中反発度法と水中超音波法の複合法を用いた水中にあるコンクリートの圧縮強度推定について検討した結果について述べる。

2. 水中非破壊試験の概要

2.1 各測定器の概要

(1) 水中反発度法

本研究で製作した水中リバンドハンマー試験機を Photo 1 に示す。水中リバンドハンマーは水中において透明度が低下した時、水深、対象物の異なる水中での測定を考慮し確実に測定を行えるよう記録式の NR 型リバウンドハンマー試験機を用いた。本研究では、市販の NR 型リバウンドハンマーに防水性・耐圧性を付与させる為に、専用のハウジングケースを製作した。ハウジングケースの材質は耐食アルミニウムで耐圧水深は 60m である。ハウジングケースの寸法は縦 27cm、横 25cm、奥行き 13cm である。陸上での重量は 4.1kg、水中での重量は 1.1kg となっている。潜水士一人でも簡易に取り扱え、水中での反力を必要としないのが特徴である。また、市販の NR 型リバンドハンマーには特に改良を加えていない。

(2) 水中超音波法

本研究で製作した水中超音波試験機を Photo 2 に示す。

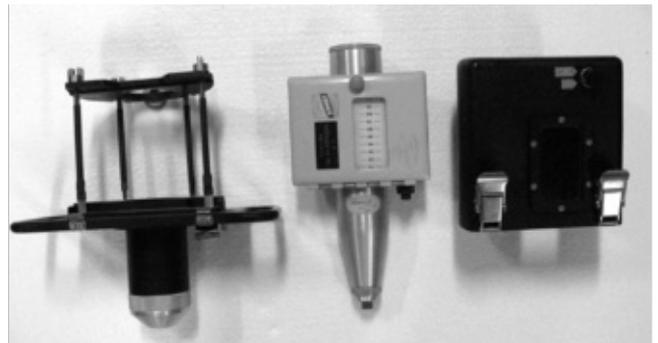


Photo 1 Underwater rebound hammer

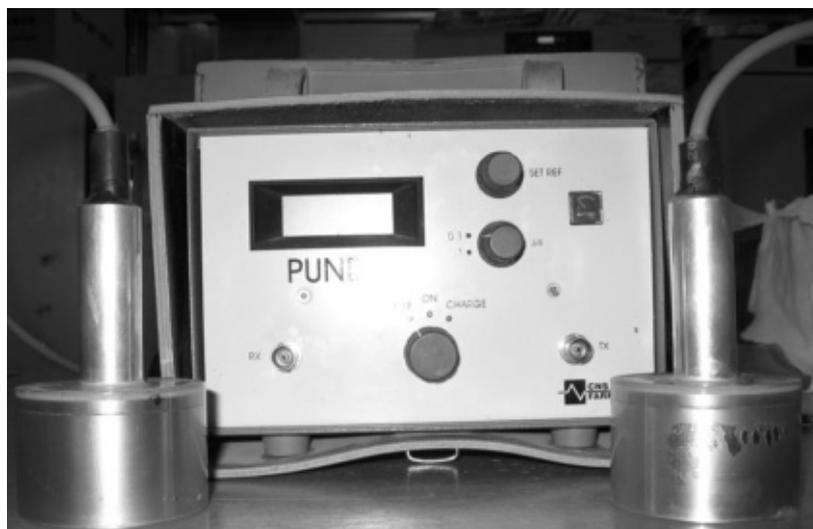
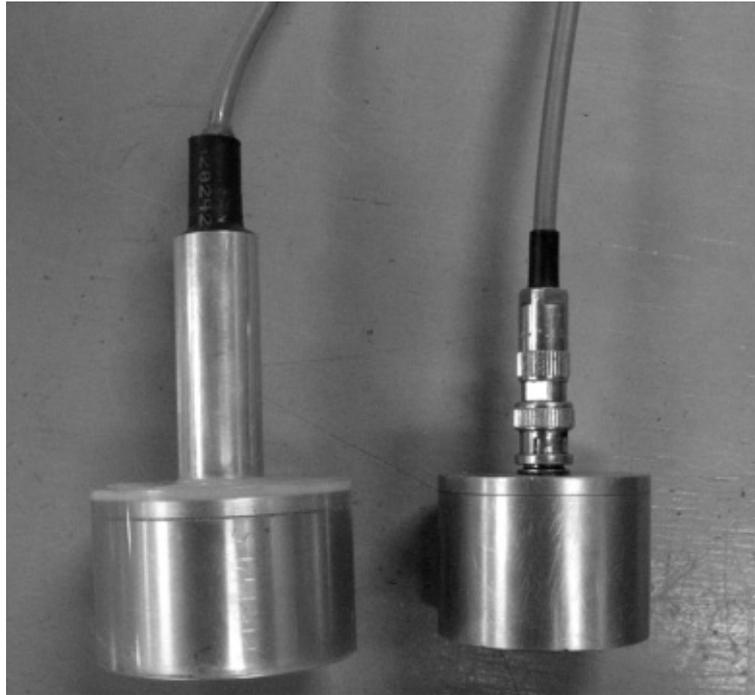


Photo 2 Underwater supersonic wave measurement device



Underwater Transducer

Ordinary Transducer

Photo 3 Transducer

市販の超音波試験機を用いて、発振子および受振子とケーブルの接続場所に Photo 3 に示す様に樹脂を用いて防水加工を施した。本研究で使用した発振子はジルコン酸チタン酸鉛セラミックで 54KHZ の超音波を発生させることが可能である。水中超音波試験機の計測方法は、発振子および受振子のみを水中に入れる方法を採用した。したがって、計測する際、コンクリートに発振子および受振子を当てる潜水士と超波伝播時間を陸上および船上で記録する記録係の 2 人 1 組で行う。超音波試験機は、電気信号の減衰などを考慮して、ケーブルの長さを 10m としている。

2.3 水中非破壊試験機の測定方法について

(1) 水中反発度法

水中反発度の測定方法は、陸上の反発度法で規定されている JIS A 1155「コンクリートの反発度の測定法」に準拠している。本研究では、打撃方向をコンクリート測定面に対して水平にして行った。

(2) 水中超音波法

陸上の超音波試験には、受振子と振動子が共用された振動子を用いる一探触子法と受振子と振動子を 2 個用いた二探触子法がある。本研究では、二探触子法を用いることにした。二探触子法における振動子および受振子の配置には、コンクリートの相対する面に振動・受振子を対向させて配置する対称法（直接法）、振動・受振子を斜めに設置する斜角法（半直接法）、および振動・受振子を同一面上に配置する表面法（間接法）などがある。測定方法は、橋

脚などの小さい部材の場合は対称法で測定を行えるが、岸壁、ダム、水路、ケーソンなど対称側に受振子を設置できないコンクリート構造物も多々ある。このことから、本研究では、表面波法を用いてコンクリートの品質を調査する方法について検討を行った。表面波法の測定方法は、両端子を同時に離していく方法で測定を行っている。表面波法の測定方法を Fig.1 に示す。測定距離は対象コンクリートの中心から両端子の中心から 50mm, 100mm と 50mm 間隔で 1000mm まで縦波伝播時間を計測した。また、陸上の超音波測定には測定端子面とコンクリート面に空隙が生じないように両者を十分に密着させなくてはならない。通常、グリース等を用いるが、水中超音波測定試験の場合、水が両者の間に生じる空隙を埋める役割があることから、特にグリース等の接触媒体を使用しなくてもよいと考えられる。

3. 水中にあるコンクリートの複合法による非破壊試験法の検討

3.1 実験概要

本章では、水中反発度法と水中超音波法の複合法によるコンクリートの圧縮強度の推定について検討を行った。水中リバウンドハンマー試験機と水中超音波測定試験機を用いて、水中反発度と水中縦波伝播速度からコンクリートの推定圧縮強度を算出した。

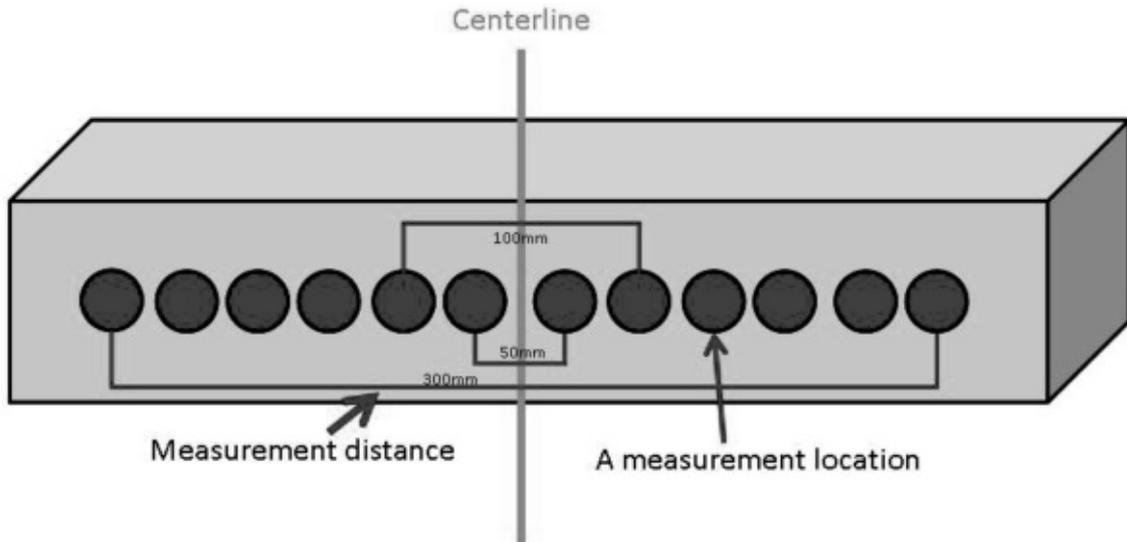


Fig. 1 Measurement locations

(1) 使用材料

本研究で用いたセメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）を用いた。細骨材に早川産川砂（密度 2.63g/cm³，粗粒率 2.90）粗骨材に早川産川砂利（密度 2.65g/cm³，粗粒率 6.80）を使用した。混和剤として高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）を使用した。

(2) 配合および供試体寸法

本研究で使用した配合を Table 1 に示す。水セメント比を 30，50，70 および 90% の 4 種類とした。全ての配合について、単位水量は 163kg/m³ とし、空気量は 4 ± 1% とした。水中超音波試験用の供試体寸法は、縦 20cm × 横 20cm × 長さ 60cm の直方体とした。また、コンクリート品質管理用供試体は、直径 10cm × 高さ 20cm の円柱供試体を用いた。コンクリートは打設 1 日後に脱型、その後 20 ± 2 °C で所定の材齢まで水中養生を行った。

Table 1 Mixture proportions of concrete

| W/C | S/A | W | C | S | G | Ad |
|-----|-----|----------------------|-----|-----|------|-------|
| (%) | (%) | (kg/m ³) | | | | (C×%) |
| 30 | 42 | 163 | 543 | 690 | 961 | 0.6 |
| 50 | 43 | 163 | 326 | 785 | 1048 | 0.6 |
| 70 | 45 | 163 | 233 | 856 | 1054 | 0.4 |
| 90 | 47 | 163 | 181 | 914 | 1039 | 0.4 |

Ad : High-range water-reducing and air entraining admixture

(3) 試験項目および試験方法

水中超音波試験機を用いた見掛け上の縦波伝搬速度の測定、水中リバウンドハンマー試験機を用いて水中反発度の測定は室内の水槽（縦 85cm，横 63cm，深さ 38cm，容量 204L）を用いて試験を行った。コンクリート直方体供試

体は、水槽内では固定をしていないが、水中リバウンドハンマー試験機で衝撃を与えた時、動かないことを確認している。測定水深は 15cm から 30cm の間で測定を行っている。また、コンクリートの力学的性質を検討するため、水中超音波および水中反発度を測定した後、コアマシンを用いて直径 10cm × 高さ 20cm のコア供試体を採取した。その後、コア供試体とコンクリート品質管理用の供試体を用いて非破壊・破壊試験を行った。試験項目および測定方法を Table 2 に示す。試験材齢は、3 日，7 日，14 日および 28 日とした。水中におけるコンクリートの非破壊試験の測定は、水中超音波の伝搬時間から求めるため、測定距離 50mm，100mm，150mm と 50mm 間隔で 11 点測定を行った。水中超音波の測定距離による補正値は 1.05（実験値）を用いている。その後、水中リバウンドハンマー試験機を用いて水中反発度を各試験体 30 点測定した。また、計測で用いたコンクリートの測定面は側面を用いて行っている。

Table 2 Measurement items and methods

| Items | Method |
|-------------------------------|--------------------|
| Unit mass of concrete | Mass/Volume |
| Longitudinal wave velocity | JCI Recommendation |
| Dynamic modulus of elasticity | JIS A 1127 |
| Compressive strength | JIS A 1108 |
| Elastic modulus of elasticity | JIS A 1149 |

3.2 実験結果および考察

(1) 水中超音波速度

水中にあるコンクリートの見掛け上の縦波伝搬速度の結果を Fig. 2 に示す。見掛け上の縦波伝播速度とは、距離と伝播時間の関係から、原点を通る直線回帰をした時の傾

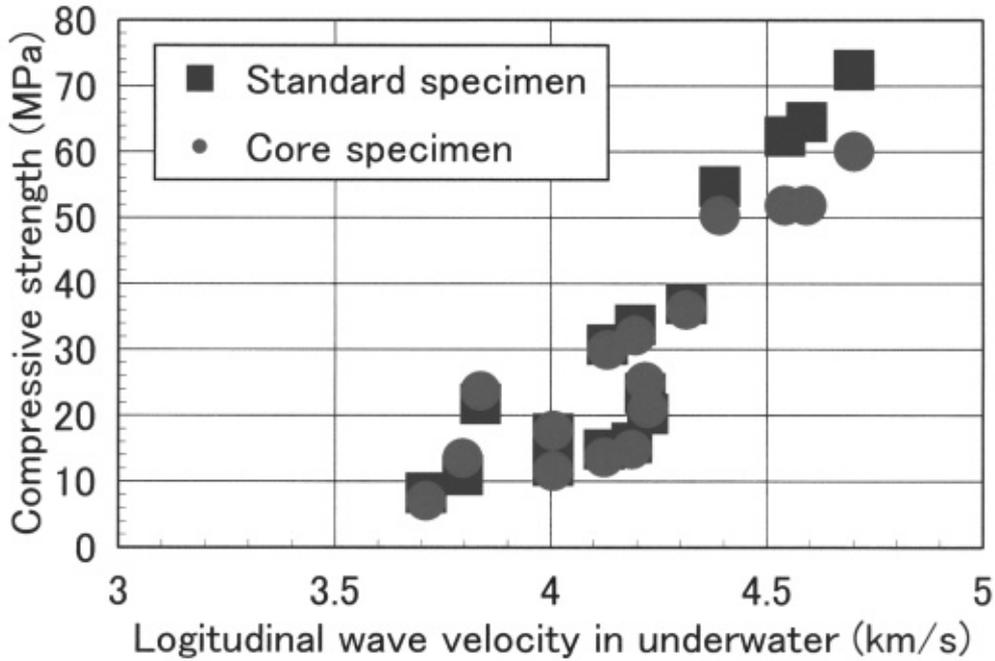


Fig. 2 Relationship between compressive strength and longitudinal wave velocity in underwater

きである。この傾きは、距離と伝播時間の関係より求めていることから本研究では、見掛け上の縦波伝播速度（記号： V_a 、単位： km/s ）と定義している。水中超音波試験の場合、見掛け上の縦波伝播速度を評価基準とした。本研究で用いたコンクリートの圧縮強度は、標準供試体で $8.3\sim 72.5\text{MPa}$ 、コア供試体で $7.1\sim 60.1\text{MPa}$ の範囲にあるコンクリートを用いた。水中縦波伝搬試験機を用いて測定したコンクリートの見掛け上の縦波伝搬速度は、 $3.1\sim 4.70\text{km/s}$ の範囲で測定された。この縦波伝搬速度

を、陸上で使用されているコンクリートとの品質と縦波伝搬速度の関係から良から優のコンクリートであることがわかる。測定の結果、水中超音波縦波速度とコンクリートの圧縮強度には相関はあるものの、水中超音波縦波速度のみでコンクリートの圧縮強度を推定するには推定精度が低いことが分かった。しかしながら、コンクリートの表面の劣化を測定するには超音波法を用いることにより推定することは可能であると推測される。

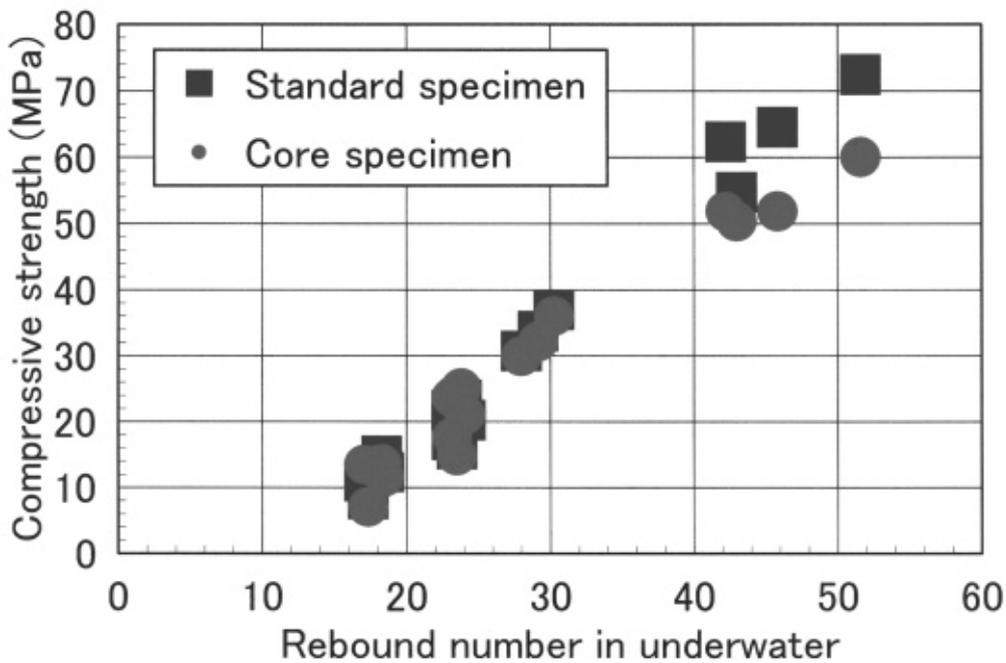


Fig. 3 Relationship between compressive strength and rebound number in underwater

(2) 水中反発度

水中超音波試験を測定した後、同一コンクリート供試体の同一面を用いて水中リバウンドハンマー試験機により水中反発度を測定した結果を Fig. 3 に示す。水中リバウンドハンマー試験機を用いて測定した水中反発度は、17.1～51.6 の結果が得られた。図からも明らかのように水中反発度とコンクリートの圧縮強度には比例関係が見られる。また、両者の直線回帰における相関係数は、標準供試体で 0.98、コア供試体で 0.96 と高い相関がみられる。また、水中リバウンドハンマー試験によるコンクリートの圧縮強度を推定する場合の推定精度は、±25% 程度なので、圧縮強度推定精度は良い。しかしながら、表面の劣化深さによる反発度の対応は超音波法より劣ると推測される。

3.3 複合法による水中非破壊試験結果と圧縮強度の関係

水中反発度法と水中超音波法の複合法によるコンクリートの水中非破壊試験について検討を行った。複合法は、反発度法を用いた場合、圧縮強度と反発度の関係は相関が高いという長所と超音波法を用いた場合の表層部分のコンクリートの品質を診断するのに適しているという長所を合わせ持たした方法である。複合法は、反発度法のデメリット部分を超音波法で補い、また超音波法のデメリット部分を反発度法で補うことから、推定精度も向上することが期待

できる。複合法では、見掛け上の縦波伝搬速度と水中反発度の結果を回帰分析した。回帰分析に用いたデータを Table 3 に示す。このデータを用いて回帰分析をした結果を以下に示す。なお、標準供試体の圧縮強度とコア供試体の圧縮強度の 2 通りについて分析した。ここで、F：推定圧縮強度 (MPa)、Va：見掛け上の縦波伝搬速度 (km/s)、R：水中反発度を示している。標準供試体の圧縮強度を用いて解析した結果を式(1)に示す。

$$F = -35.3 + 3.5 Va + 1.81R \quad (1)$$

この結果、相関係数は 0.98 となり、高い相関がみられた。次に、コア供試体の圧縮強度を用いて解析した結果を式(2)に示す。

$$F = -18.55 + 1.27 Va + 1.47R \quad (2)$$

この結果、相関係数は 0.96 となり、標準供試体の圧縮強度を用いた場合に比べ若干相関係数は低いが、コア供試体の圧縮強度を用いた場合でも高い相関係数が得られた。

両式を用いることで、水中超音波法および水中反発度法から水中にあるコンクリートの圧縮強度を推定することが可能である。圧縮強度の実測値と両式を用いて推定した推定圧縮強度の関係を Fig. 4 に示す。その結果、圧縮強度と推定圧縮強度は 1：1 の関係である。また、相関係数は、両供試体ともに 0.99 であることが判った。複合法の推定精度は、低強度域では低いものの -24.1～38.6% 程度であった。

Table 3 Each measurement data

| No. | Appearance longitudinal wave velocity (km/s) | Underwater rebound number (-) | Compressive strength of the core specimen (MPa) | Compressive strength of the standard (MPa) |
|-----|--|-------------------------------|---|--|
| 1 | 3.84 | 23.1 | 23.7 | 21.8 |
| 2 | 3.80 | 17.1 | 13.5 | 11.0 |
| 3 | 4.39 | 42.9 | 50.4 | 54.8 |
| 4 | 3.71 | 17.3 | 7.1 | 8.3 |
| 5 | 4.13 | 28.0 | 30.0 | 30.8 |
| 6 | 4.00 | 23.2 | 17.7 | 17.3 |
| 7 | 4.54 | 42.2 | 51.9 | 62.4 |
| 8 | 4.00 | 18.4 | 11.6 | 12.4 |
| 9 | 4.19 | 29.1 | 32.2 | 33.8 |
| 10 | 4.22 | 24.1 | 21.1 | 20.3 |
| 11 | 4.59 | 45.8 | 51.9 | 64.6 |
| 12 | 4.12 | 18.3 | 13.7 | 14.9 |
| 13 | 4.31 | 30.2 | 36.1 | 37.0 |
| 14 | 4.22 | 23.8 | 25.1 | 23.4 |
| 15 | 4.70 | 51.6 | 60.1 | 72.5 |
| 16 | 4.19 | 23.5 | 14.9 | 15.9 |

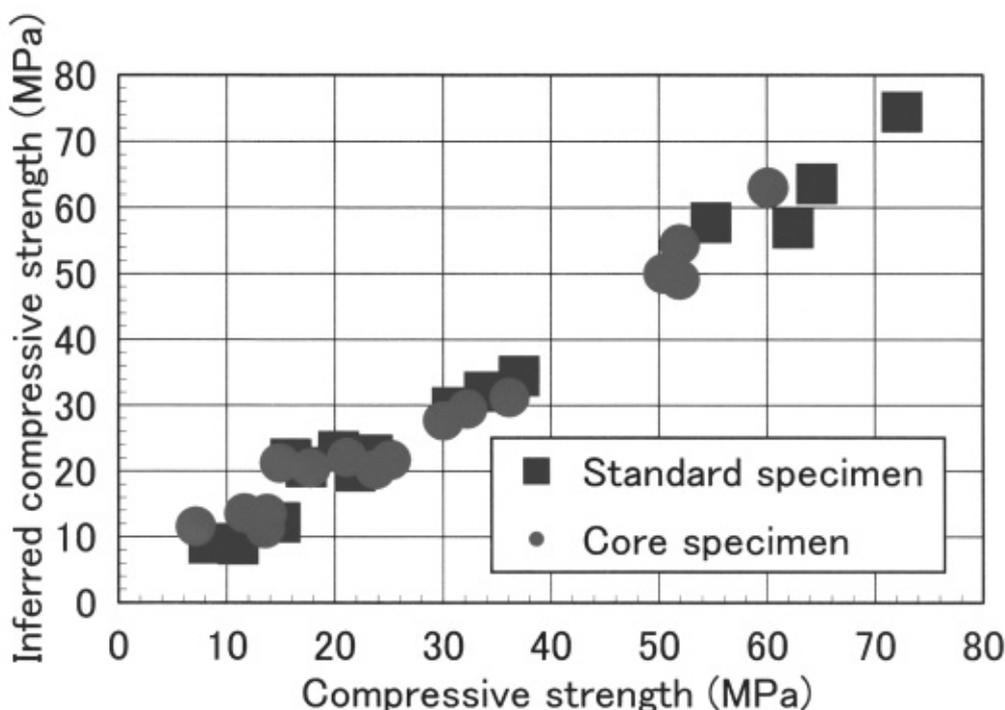


Fig. 4 Relationship between compressive strength and inferred compressive strength

4. 複合法を用いてコンクリートの劣化深さを模擬したコンクリートの圧縮強度推定に関する研究

4.1 実験概要

常時水中にあるコンクリートは表層部から劣化することが推測される。本実験では、表層部から劣化を起したコンクリートの水中非破壊検査について検討を行った。水中非破壊検査の評価方法は、水中超音波試験と水中リバウンドハンマー試験の複合法で評価を行った。本節では、複合法を用いてコンクリートの劣化深さを模擬したコンクリートの圧縮強度推定について検討を行った結果について述べる。

(1) 使用材料

本研究で用いたセメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）を用いた。細骨材に早川産川砂（密度 2.63g/cm³，粗粒率 2.90）粗骨材に早川産川砂利（密度 2.65g/cm³，粗粒率 6.80）を使用した。混和剤として高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）を使用した。

(2) 配合および供試体寸法

本研究で使用した配合を Table 4 に示す。水セメント比を 30 および 90% の 2 層供試体とした。供試体寸法は、縦 20cm × 横 20cm × 長さ 60cm の直方体とした。劣化深さを模擬した試験体は、劣化部を水セメント比 90%、健全部を水セメント比 30% と仮定して、水セメント比 90% と水セメント比 30% のコンクリートの比率を変えて劣化深さを調整している。劣化深さは、0 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm,

Table 4 Mixture proportions of concrete

| W/C | S/A | W | C | S | G | Ad |
|-----|-----|----------------------|-----|-----|------|-------|
| (%) | (%) | (kg/m ³) | | | | (C×%) |
| 30 | 42 | 163 | 543 | 690 | 961 | 0.7 |
| 90 | 47 | 163 | 181 | 914 | 1039 | 0.7 |

Ad : High-range water-reducing and air entraining admixture

7 cm, 10cm, 15cm および 20cm の 8 試験体作製した。コンクリートは打設 1 日後に脱型、その後 20 ± 2 °C で 28 日間水中養生を行った。

(3) 試験項目および試験方法

水中非破壊検査を室内の水槽（縦 85cm, 横 63cm, 深さ 38cm, 容量 204L）を用いて試験を行った。水中超音波試験および水中リバウンドハンマー試験を行った後に、コアマシンを用いて直径 10cm × 高さ 20cm のコア供試体を採取した。その後、コア供試体を用いて非破壊・破壊試験を行った。試験項目および測定方法を Table 5 に示す。

Table 5 Measurement items and methods

| Items | Method |
|-------------------------------|--------------------|
| Unit mass of concrete | Mass/Volume |
| Longitudinal wave velocity | JCI Recommendation |
| Dynamic modulus of elasticity | JIS A 1127 |
| Compressive strength | JIS A 1108 |
| Elastic modulus of elasticity | JIS A 1149 |

試験材齢は28日とした。水中超音波の伝搬時間は、測定距離 50mm, 100mm と 50mm 間隔で11点測定を行った。水中超音波の測定距離による補正値は 1.05 (実験値) を用いている。また、水中リバウンドハンマー試験は各30点測定している。また、測定水深は 15cm から 30cm の間で測定を行っている。ここでは、水中超音波試験、水中反発度およびコア供試体による圧縮強度について述べる。

4.2 実験結果および考察

(1) 水中超音波試験

水中超音波試験機を用いて、コンクリートの表面波を測定し、見掛け上の縦波伝搬速度を算出した。見掛け上の縦波伝播速度の結果を Fig. 5 に示す。本研究で用いたコンクリートは、下部面を用いて計測を行っていることから、補正値を考慮している。その結果、見掛け上の縦波伝搬速度は、劣化深さ 5 cm まで深さが増すにつれ速度は遅くなっている。しかしながら、5 cm 以深になると、見掛け上の縦波伝搬速度には差は見受けられなかった。表面波法でコンクリートの品質を測定できる限界は、5 cm 以内の深さに限定されることが考えられる。したがって、劣化深さが 5 cm 以深になった場合、水中縦波伝搬速度試験機では

コンクリートの品質を評価することは困難であると考えられる。

(2) 水中リバウンドハンマー試験

水中リバウンドハンマー試験機を用いて、水中反発度を測定した結果を Fig. 6 に示す。水中反発度は、水中超音波試験同様にコンクリート試験体の下部面を測定していることから、補正値を考慮している。水中反発度の結果、水中縦波伝搬速度とは違い、劣化深さに関わらずほぼ一定の値を示した。水中超音波試験では深さ 5 cm までのコンクリートの品質を評価することが可能であるが、水中反発度では、表層 (1 cm 未満) のコンクリートの性状しか評価できないことが考えられる。水中反発度と圧縮強度には非常に高い相関があるが、コンクリートが徐々に劣化した場合、水中反発度のみの評価は難しいことが推測できる。

(3) コア供試体による圧縮強度

20cm×20cm×60cm の直方供試体からコアを採取し圧縮強度を行った結果を Fig. 7 に示す。劣化を想定していないコンクリートの圧縮強度は 70.7MPa であった。劣化深さを深くするごとに圧縮強度は低下する傾向を示した。Fig. 8 にコンクリートの劣化割合におけるコンクリートの圧縮強度低下率の関係を示す。コンクリート供試体の 5%

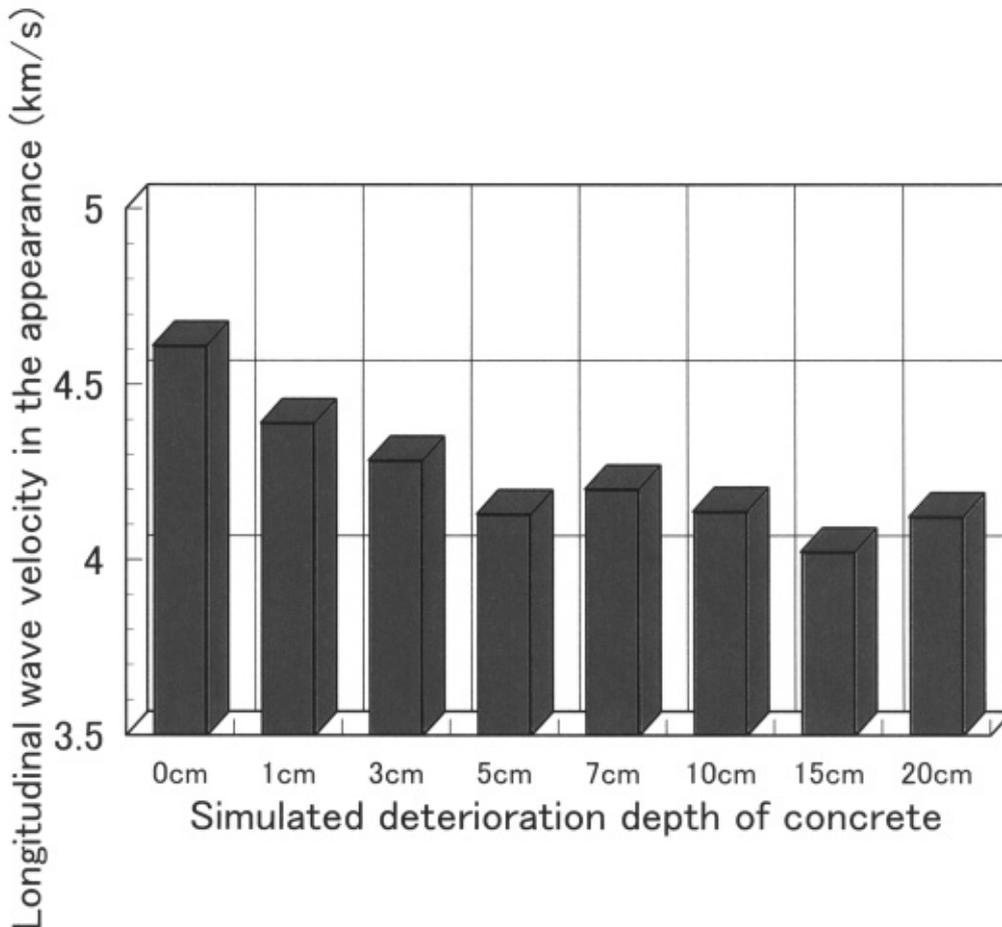


Fig. 5 Longitudinal wave velocity in underwater

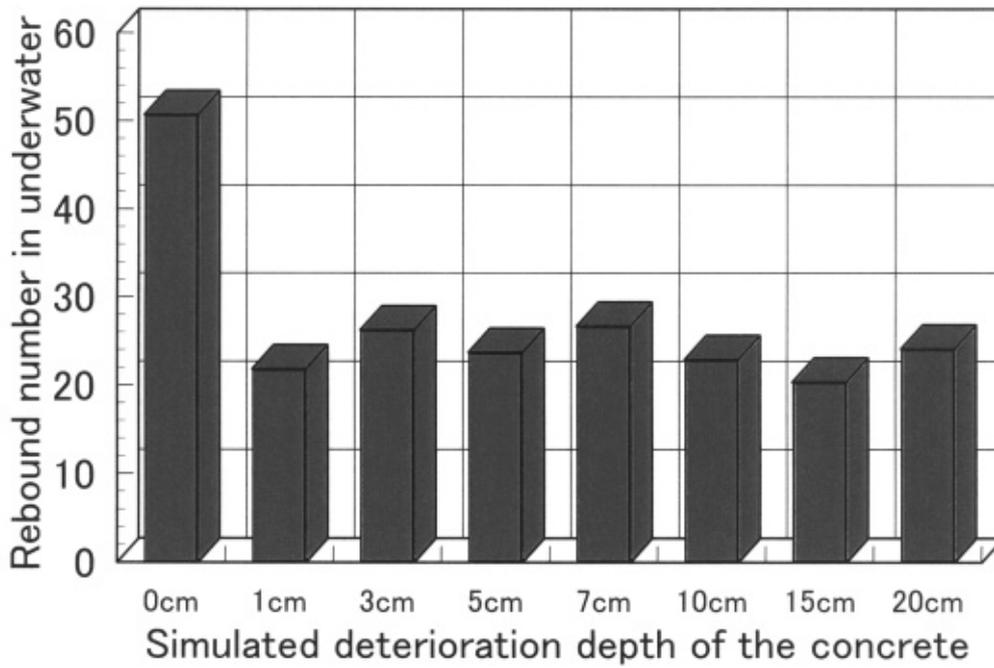


Fig. 6 Rebound number in underwater

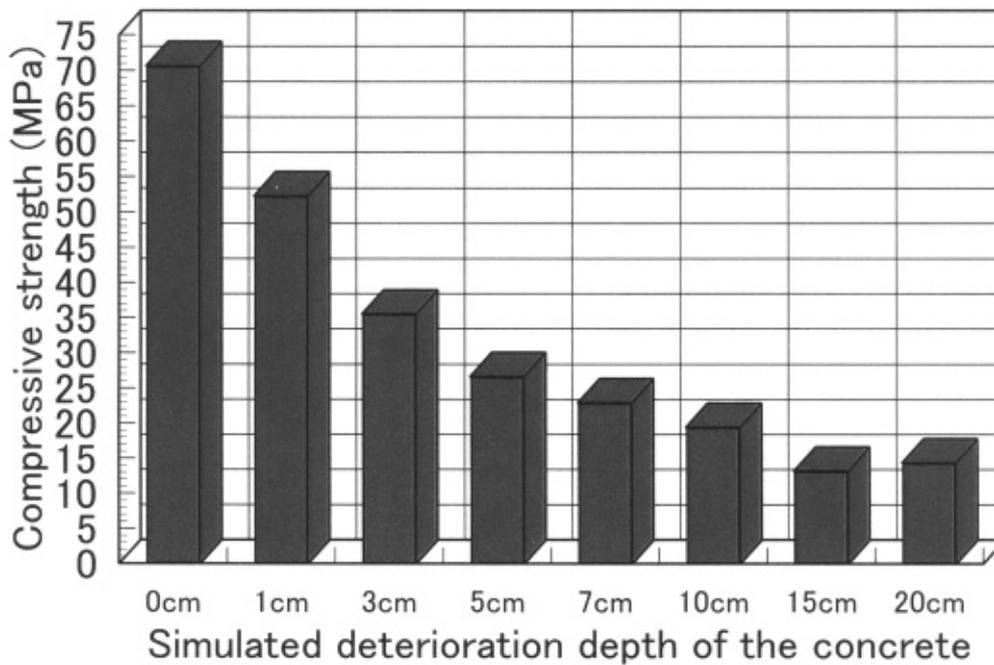


Fig. 7 Compressive strength of core specimen

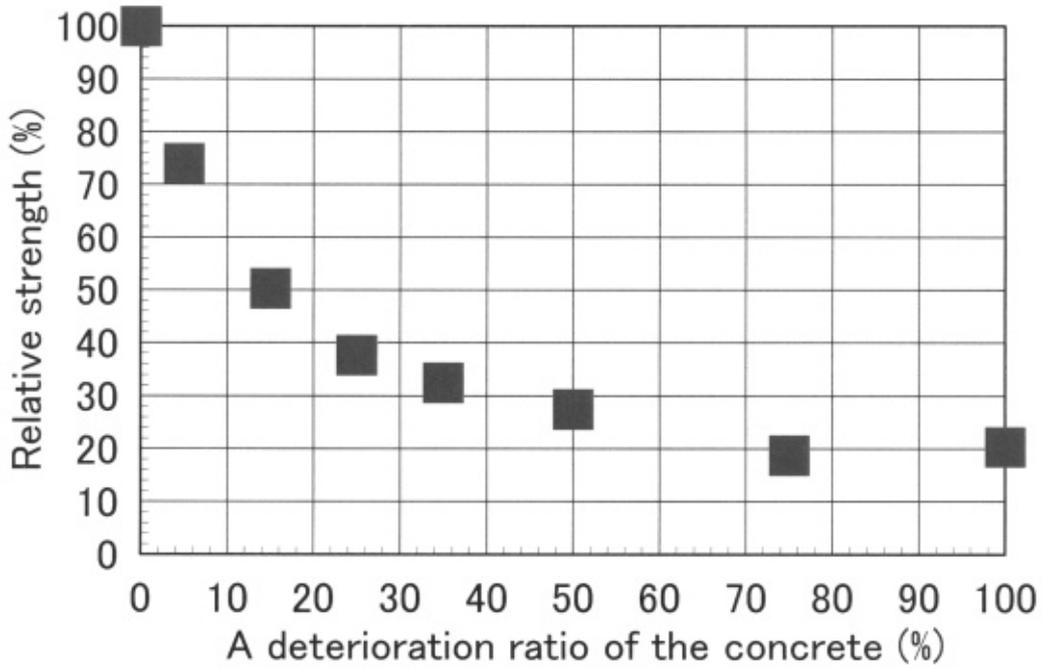


Fig. 8 Relationship between a deterioration ratio of the concrete and relative strength

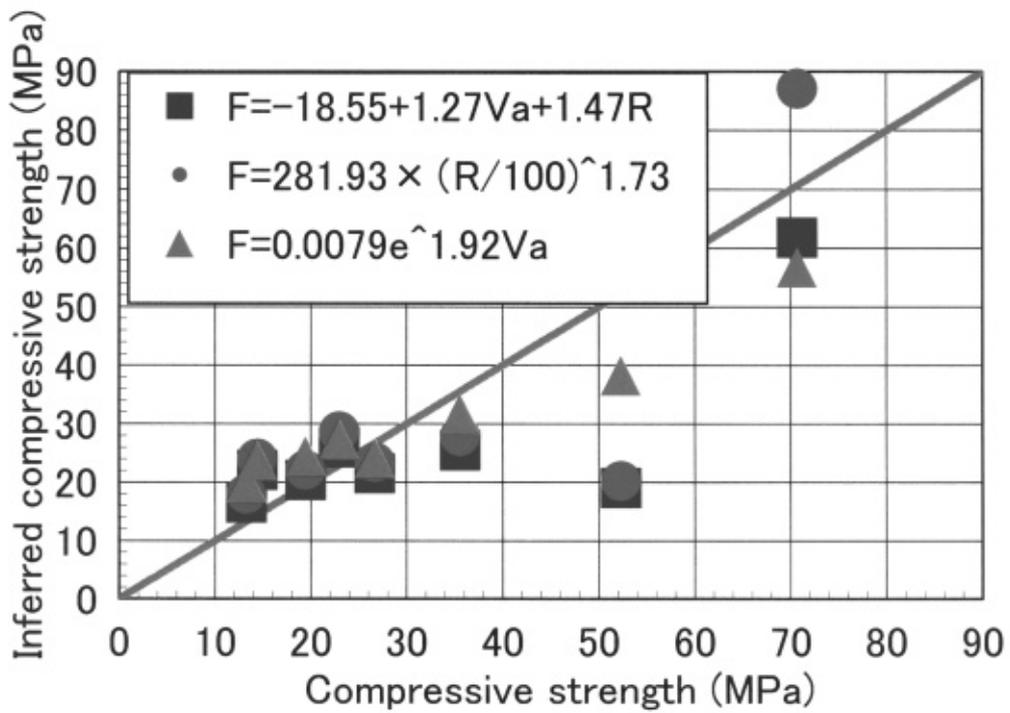


Fig. 9 Comparison of the inferred compressive strength from different empirical relations

程度の劣化割合では健全なコンクリートの約74%の耐力になる。また、コンクリート供試体の25%の劣化までは急激に耐力は低下するが、その後低下の割合は少なくなる傾向を示した。この傾向は、水中超音波の結果と類似した。

4.3 各推定手法による推定圧縮強度

水中超音波法および水中反発度法の結果を用いて劣化深さを模擬したコンクリートの圧縮強度の推定を試みた結果について述べる。推定手法は、筆者らが検討を行った手法(未発表)を用いて3項目から検討を行った。①水中超音波法で得られた見掛け上の縦波伝搬速度から式(3)を用いて推定圧縮強度の算出。②水中反発度から式(4)より算出。③水中超音波法の見掛け上の縦波伝搬速度と水中反発度法の水反発度を用いた複合法より式(2)を用いて算出。以下に使用した式を記載する。ここで、F：推定圧縮強度(MPa)、Va：見掛け上の縦波伝搬速度(km/s)、R：水中反発度を示している。

$$F = -18.55 + 1.27 Va + 1.47 R \quad (2)$$

$$F = 281.93 \times \left(\frac{R}{100} \right)^{1.73} \quad (3)$$

$$F = 0.0079 e^{1.92 Va} \quad (4)$$

Fig. 9に各手法より算出された推定圧縮強度を示す。その結果、低強度域では全ての推定式はコア供試体の圧縮強度に近似する結果が得られた。また、推定式の中でも特に複合法である式(2)が精度良くコンクリートの性状を捉えていると考えられる。他方、高強度域では、圧縮強度の推定が困難であると考えられる。その理由として、劣化部の層が1 cmあり、その劣化部の強度を捉えている可能性が考えられる。しかしながら、超音波法である式(3)は、コンクリートの品質を捉えている。この結果から、水中超音波法で、コンクリートの品質を確認し、複合法により推定圧縮強度を求めることが望ましいのではないかと考えられる。

7.4 まとめ

水中にあるコンクリートの非破壊検査手法として水中超音波法と水中反発度法を用いた複合法について検討をした結果以下の知見が得られた。

- (1) 複合法は、両試験方法の長所と短所を補い合うことにより単体でコンクリートの圧縮強度を推定するよりも精度の良いコンクリートの品質調査を行える。
- (2) 複合法による圧縮強度推定式を検討した結果、以下の式を用いることで、圧縮強度の推定が出来ることが判った。

標準供試体の圧縮強度を求める場合

$$F = -35.3 + 3.5 Va + 1.81 R$$

コア供試体の圧縮強度を求める場合

$$F = -18.55 + 1.2 Va + 1.47 R$$

ここで、F：推定圧縮強度(MPa)、Va：見掛け上の縦波伝搬速度(km/s)、R：水中反発度

- (3) 劣化深さの異なるコンクリートを水中超音波法で測定した結果、劣化深さ5 cmまではコンクリートの品質を測定することが可能であることが判った。しかしながら、劣化深さ5 cm以深では、測定結果に顕著な違いが見受けられなかった。
- (4) 水中反発度法で測定をした結果、劣化深さ1 cmからコンクリート表面のみの性状を得ることしかできなかった。
- (5) 今まで提案した各種推定式を用いて推定圧縮強度を算出した結果、低強度域では、複合法がコア圧縮強度と近似する結果が得られたが、劣化部が浅いコンクリートは、超音波法でコンクリートの品質を判断することが重要であることが判った。

水中においてもコンクリートの非破壊検査は可能であることが判った。したがって、従来の水中構造物の点検項目である目視検査だけではなく、水中超音波法や水中反発度法などを用いて客観的な評価を行わなければならないと考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり東海大学海洋学部海洋土木工学科高浪裕貴氏、那須文彰氏に御協力を頂いた。また、本研究は科研費(19560463)の助成を受けたものである。ここに付記し感謝の意を表します。

参考文献

- 沿岸開発技術研究センター(1999)：港湾構造物の維持・補修マニュアル、沿岸開発ライブラリー、6、89-111。
 濱田秀則、Tarek Uddin Mohammed、山路 徹(2005)：30年間常時海水中に暴露されたコンクリートの諸性質について、材料、58(8)、842-849。
 野崎喜嗣、十代田知三、小林幸一(1993)：超音波法、反発度法および複合法の既存建物への適用 非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定法 その2、日本建築学会構造系論文報告集、444、1-6。
 野崎喜嗣、十代田知三、小林幸一(1994)：超音波法、反発度法および複合法による強度推定式の提案とその有効性の検証 非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定法(その3)、日本建築学会構造系論文報告集、458、1-9。
 迫田恵三(1991)：低品質骨材の使用がコンクリートの諸性状に及ぼす影響、東海大学博士論文、139。
 十代田知三、野崎喜嗣、小林幸一(1991)：実大モデルによ

る超音波法,反発度法および複合法の検討 非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定法, 日本建築学会構造系論文報告集, 428, 25-33.

竹田宣典 (1999): 海洋環境下における鉄筋コンクリート部材の耐久性評価に関する研究, 九州工業大学博士論文,

196.

渡邊晋也, 迫田恵三, 鉄 芳松 (2006): 水中リバウンドハンマーを用いた水中コンクリート構造物の非破壊検査について, コンクリート構造物への非破壊検査の展開, 2, 377-382.

要 旨

我が国では, 明治時代以降, 近代的な土木構造物が建設され始めた。これらの構造物は主にコンクリートや鉄鋼などが用いられている。当時, 建設されたコンクリート構造物は, 現在でも使命を全うしている構造物も少なくない。しかしながら, コンクリートは, 水に曝されることにより劣化を起こすことが知られている。したがって, 長期間水に曝される環境にあるコンクリートは劣化を起こしていることが推測される。そこで, 構造物の延命や安全性を得るためには, 適切な補修・補強を行わなければならない。補修・補強を行うには, コンクリートの現状を把握する必要がある。その手法として, 陸上のコンクリート構造物の場合, 多くの非破壊試験方法が開発され調査・点検が行われている。しかしながら, 従来の手法は, 水中にあるコンクリートには適応していない。そこで, 本研究では, 水中にあるコンクリートの非破壊試験による診断方法を確立する目的で行った。検討した手法は, 反発度法と超音波法を組み合わせた複合法である。その結果, 水中においても, コンクリートの非破壊試験機に防水性, 耐圧性を付加することで, コンクリートの圧縮強度を推定することができることが判明した。