

非破壊試験方法による海水強度の 推定に関する実験的研究

北海道東海大学 泉 例
大成建設(株) 酒井 雅史
北海道大学工学部 小野 敏行
北海道大学工学部 山下 俊彦
北海道大学工学部 佐伯 浩

1、まえがき

水海域に建設される海洋構造物を設計する場合、その水力を算定するに当っては、海水強度の適切な選択が必要となる。しかし現実には、北部オホーツク海や北極海に面する沿岸域においては、遠隔地であることや、気象条件が過酷なこともあって、実際に海水強度を測定することは膨大な費用と労力を必要とする。特に直接強度試験を現地水盤上で行うとなると、その運搬すべき機材の量は多く、その電源等の確保も大変となる。そこで、本研究では、比較的簡単に海水強度を推定できる非破壊試験方法のうち、低強度用シュミットハンマーを用いる方法と超音波により強度を推定する方法について系統的な実験を行ったので報告するものである。

2、非破壊試験方法について

一般に材料の強度試験を行う場合、その目的に合った強度試験(一軸圧縮強度試験、曲げ強度試験等)を直接行うことが望ましい。その理由として、強度試験から弾性諸定数も計測可能であるし、その時の破壊性状も詳しく観察できるからである。しかし、海水盤のように、広大な面積を有するものについては、場所により強度が異なっていたり、氷象についても平坦水、氷丘、氷脈といったように種々の形態がある。また、同一の場所で採取した海水を同一の試験条件で強度試験を行っても、平均値のまわり±35%に分散する。以上のことを考えると、設計に用いる海水強度の決定に際しては、広範囲にデータを集める必要があるし、海水の組成そのものが時間的に変化することから、時経列データも必要となる。直接強度試験ではそのようなデータの取得には無理がある。広大な範囲の海水強度の推定に、電磁波を用いたりモートセンシング技術の開発も行われているが、未だ完成していない。簡単な強度の推定法にコンクリートなどを対象とした非破壊試験方法が開発されているが、それを大別すると①表面硬度法、②音響学的方法、③放射線による方法、それに④電気的方法等が開発されている。①の表面硬度法については、落下式ハンマー、手動式ハンマー、ばね式ハンマー、シュミットハンマーを用いる方法があり、②の音響学的方法では音速方法と共振方法がある。また③の放射線による方法ではX線、 δ 線、中性子を用いる方法があるし、④の電気的方法では誘電、抵抗、それにマイクロ波を用いる方法がある。本研究では表面硬度法の中でも最も普及しているシュミットハンマーを用いる方法と音響学的方法である超音波を用いる方法により、海水の一軸圧縮強度及び圧縮弾性率を推定しようとするものである。

(1) シュミットハンマーによる方法

シュミットハンマーは1948年に、スイスのE・Schmidtによって考案されたもので、バネ式ハンマーの型式で、コンクリートの反発硬度から強度を推定するもので、現在も広く用いられている。氷の強度はコンクリートに比べて非常に弱いため、打撃面が大きく、低強度のコンクリートに用いられているPT型のシュミットハンマー(図-1)を用いた。シュミットハンマーの反発硬度Rに影響を及ぼす因子としては、試験条件が同じである場合、強度や弾性係数のほかに、打撃方向、供試体の容積、供試体の厚さ、供試体打撃面の粗さなどがあげられる。Tsutae等や著者の一人酒井などはPT型シュミットハンマーの海水強度推定のための基礎的実験を行っているが、その結果によると、温度特性に関しては+17°C~-17°Cの範囲で、温度依存性の小さいラワン材を用いて実験を行った結果、その温度範囲では温度の影響を受けないことが明らかとなった。また、打撃面の粗さについては海水供試体の表面を手鋸で切断したもの、水用鋸で切断したもの、それらの表面を鉋で仕上げたものの三種類の実験を行った結果、鉋仕上げの方が反発硬度が安定した値を示すとともに大きめであったことから、本実験では氷供試体表面を鉋仕上げた。また供試体の体積の効果については、コンクリートでは、体積が10ℓ(22~23Kgf)を越えると反発硬度は体積に依存しなくなるが、海水では20ℓ(18Kgf)を越えると反発硬度は体積に関係なく一定となることから、本実験でも20ℓ以上の海水ブロックで実験を行った。また海水供試体の厚さの効果については、一般に氷厚が厚くなるにつれて反発硬度は大きくなるが、20cmを越えると一定となることから、本実験でも基本的には20cm以上となるようにした。また、シュミットハンマーの打撃間隔と必要縁端距離については、氷ブロックそのものが強度が小さいため、縁端距離は7cm以上、打撃間隔は4cm以上とした。

(2) 超音波について

コンクリートのような混合材料においては、コンクリート中を伝播する超音波の音速を速定することにより強度を推定することができる。一般に媒質中を伝わる超音波の縦波(P波)は圧縮波ともいい、媒質粒子の振動が波の進行方向と一致するため利用される。縦波速度は理論的に次式で示される。

$$V = \frac{E_p(1-\mu)}{P(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (1)$$

ここで E_0 が媒質の動弾性係数、 P は密度、 μ はポアソン比である。一般に強度と弾性係数には強い相関があることから、 V が大きい時は E_0 が大きいことを示し、 E_0 が大きいことは、強度も大きいことを表している。超音波が媒質中を伝播する時、その波頭面が拡がるための拡散損失のほか媒質の内部摩擦及び結晶粒界やブライン壁面での散乱のため、一定方向に進む超音波のエネルギーが減衰する。そのエネルギー減少については次式で示される。

$$P_x = P_0 \exp(-\alpha x) \quad (2)$$

ここで、 P_0 は $x=0$ での音圧、 P_x は x なる距離を伝播後の音圧で、 α は減衰定数である。実験装置は超音波伝播時間測定器、シンクロスコープ、発振子それに受信子からなっている。円筒形の海水供試体に発振子から超音波パルス (50Hz、200Hz、400Hz) を発射し、それを受信子で受け、供試体内の伝播時間を超音波伝播時間測定器で測定し音速 V を計算する。また、同時にシンクロスコープを用いて、音圧の変化を読み取り次式により減衰定数を計算する。

$$\alpha = -\ln(P_x/P_0)/x \quad (3)$$

音速及び減衰定数の測定システムを図2に示す。受、発振子と海水供試体の接触をよくするため接触部にグリースを塗り、接触圧 0.21 Kg/cm^2 をかけた。

(3) 強度試験の方法と実験手順

最終的には、シュミットハンマーによる反撥硬度 Rav や超音波試験より得られる音速 V や減衰定数 α と海水強度との関係を求める必要がある。本実験では、海水強度の代表を一軸圧縮強度 σ_c とした。これは海水の一軸圧縮強度と他の強度 (曲げ強度、引張強度それにせん断強度など) の間には一定の関係が得られているためである。この海水の圧縮強度は、供試体の形状、寸法、実験方法によって異なった強度を示すことになるが、本研究では I A H R 水委員会が提案している、直径 10 cm 、高さ 20 cm の円筒供試体を用いた。また強度は歪速度や応力速度に強く依存するが、本実験においては、最大の強度を示す歪速度が $(1 \sim 3) \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ で実験を行った。実験の手順は、長さ 100 cm 幅 30 cm 高さ 30 cm の直方体の海水を、シュミットハンマーの打撃面になる面を鉋で滑らかにけずり、所定の間隔で P T 型シュミットハンマーで約 50 点打撃し、反撥硬度を求める。次に打撃面に垂直に電動コアドリルで供試体を取り出し、打撃面側を最小でも 5 cm 切断する。これはシュミットハンマーによる微小破壊の影響をとり除くためである。この時の供試体の径は 10 cm 、高さは 20 cm である。この供試体を用いて、超音波実験を行い、音速 V と減衰定数 α を求める。この時、最低でも 10 回以上試験しその平均をもって、その供試体の V と α とする。次にこの円筒供試体を用いて一軸圧縮強度試験を行い {この時の歪速度は $(1 \sim 3) \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ } σ_c 及び弾性係数 E を求める。この時、供試体の密度、水温、塩分量も測定することになる。実験は北大開発科学実験所の低温室とオホーツク海に面したサロマ湖で行った。用いた海水の塩分量 S は $1.63 \sim 1.82\%$, $2.51 \sim 3.65\%$, $3.17 \sim 6.01\%$, $6.15 \sim 7.55\%$, $7.89 \sim 8.95\%$, それに淡水水の6種類であり、水温 T は $-2.0 \sim -8.0^\circ \text{C}$ の範囲、密度 ρ は $0.881 \sim 0.920 \text{ g/cm}^3$ である。

3. シュミットハンマーによる海水強度の推定

図3及び図4に一軸圧縮強度 σ_c と反撥硬度 Rav の関係を示す。図3は水の成長方向に直角に打撃した時の Rav とその方向に円筒供試体を取り、一軸圧縮試験をした結果である。図からも明らかなように、一軸圧縮強度 σ_c は Rav の増加とともに直線的に増加している。また、塩分量 S や水温 T それに密度 ρ に関係なく、一本の直線で近似できる。図4は、海水の成長方向に打撃した時の反撥硬度 Rav と同じ方向に採取したコアの一軸圧縮強度との関係を示したものである。この場合も一軸圧縮強度 σ_c と Rav の間には水温、塩分量、密度に関係なく直線の関係がある。図3と図4の直線式はほぼ一致している。このことは、反撥硬度 Rav と一軸圧縮強度 σ_c の関係には、水の成長方向に対する荷重あるいは打撃の方向の関係は影響している。しかし、総体的にみると、成長方向に平行に打撃した時の Rav の方がそれに直角に打撃した時の Rav より大きめの値を示している。この両図より、反撥硬度と一軸圧縮強度の間には次式の関係が得られた。

$$\sigma_c = 0.677 Rav - 24.204 \quad (4)$$

ここで σ_c は (Kg/cm^2) 単位である。また、反撥硬度 Rav と海水の圧縮弾性係数の関係を調べたものの一例が図5である。密度、塩分量それに水温も幅広く変化しているが、圧縮弾性率 E と反撥硬度 Rav の間には直線の関係が得られた。この E と Rav の関係は次式で表わされる。

$$E = 85 Rav - 2600 \quad (5)$$

ここで E は Kg/cm^2 の単位を有する。また、(4)と(5)式より圧縮弾性率 E と一軸圧縮強度 σ_c の関係は $E/\sigma_c = 140 \sim 170$ であるが、この値は、北極海やオホーツク海の海水の場合とほぼ一致している。以上の結果より、決められた条件のもとで試験を実施すれば、海水の塩分量、密度それに水温に関係なく、シュミットハンマーの反撥硬度により一軸圧縮強度及び圧縮弾性率を推定することが可能である。

4. 超音波による海水強度の推定

本実験では、超音波の周波数を 50 KHz 、 200 KHz それに 400 KHz と変化させて実験を行った。同一の供試体であれば、水中の音速 V 、減衰定数 α には周波数による差はほとんどみられなかった。しかし、高周波数になると指向性が高くなり、発振子と受信子の軸を正確に合せないと良い結果が得られなかったし、また減衰定数も小さくなった。

このため高周波数の超音波を用いると計測に時間がかかり、厳寒の水盤上で試験するには適当でないことが明らかとなった。ここでは、50KHzについての結果について述べる。図6に実験結果の一部を示す。Saeki等の研究によると、一軸圧縮強度 σ_c は α をパラメーターとして V で表わされることが示されているが、本実験の結果では、 (σ_c/V) と α の関係で示した方が良い結果が得られた。実験値は平均値のまわりに $\pm 35\%$ 程度の誤差で分散しているものの、 (σ_c/V) は α の減少とともに小さくなり負の相関を示している。また、水温、密度、塩分量に關係なく $0.35 < \alpha < 0.55$ の範囲では一本の直線で近似できる。

5. RavとVを組合わせた強度の推定法

海水の一軸圧縮強度 σ_c は、シュミットハンマーによる反撥硬度Ravによって一義的に求めることが可能であるし、超音波の音速 V と減衰定数からも推定が可能となることが明らかとなったが、ここでは、両試験方法の結果を組合わせて、より高い精度で強度を推定することを考えた。この複合非破壊試験方法による強度の推定法は、コンクリートの強度推定に利用されていて、尾崎・明石らは次式で示している。

$$\frac{V}{\sigma_c} = a \cdot Rav + b \cdot Rav^2 + c \cdot Rav^3 + d \quad (6)$$

この実験定数 a 、 b 、 c それに d はコンクリートの養生方法や骨材の種類によって若干変化するとされている。またWiebengaは、その関係を次式で示した。

$$\log(\sigma_c) = a \cdot Rav + b \cdot V + c \quad (7)$$

本実験結果を両式で整理したが、(7)式では分散が大きく、かえってシュミットハンマーの反撥硬度あるいは音速と減衰定数のみで表した方が精度は良かった。Wiebengaにならって整理した結果が図7である。図からも明らかのように、 (σ_c/V) とRavには相関がみられ、近似的に次式で示される。

$$(\sigma_c/V) \times 10^{-5} = 0.089Rav - 1.069 \quad (8)$$

しかし、この (σ_c/V) の値も平均値のまわりに $\pm 35\%$ 程度の分散があり、単独の非破壊試験方法で推定したものと精度において大差ないことが明らかとなった。

6. まとめ

二種類の非破壊試験方法により、海水強度の推定を試みた。低強度型シュミットハンマーを用いて強度推定する方が、超音波を用いる方法より精度よく強度を推定できることが明らかとなった。また両試験を用いた複合非破壊試験方法による強度の推定は、Ravと V のみでは、それほど精度の良い推定はできないことが明らかとなった。シュミットハンマー試験方法が現地試験に有用なことは明らかとなったが、水厚が2m程度を越える時、20程度の水の採取に問題が残されるし、 -20°C 以下になると、打撃した時飛散する小さな氷片がハンマー内に入り込み、作動しなくなる場合があることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Tsutae, S., K. Izumi, T. Ono and H. Saeki (1983): Determination of Compressive strength of sea ice by Using the Schmidt Test Hammer, Proc. of the 7th POAC.
- 2) 酒井雅史, 五十嵐勝美, 小野敏行, 佐伯浩 (1984): 超音波による海水の強度特性について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第40号
- 3) Saeki, H., K. Izumi, M. Sakai, T. Ono and N. Nakazawa (1984): Determination of Compressive strength of sea Ice by Using an Ultrasonic Pulse, Proc. of the 7th IAHR Symposium on Ice.

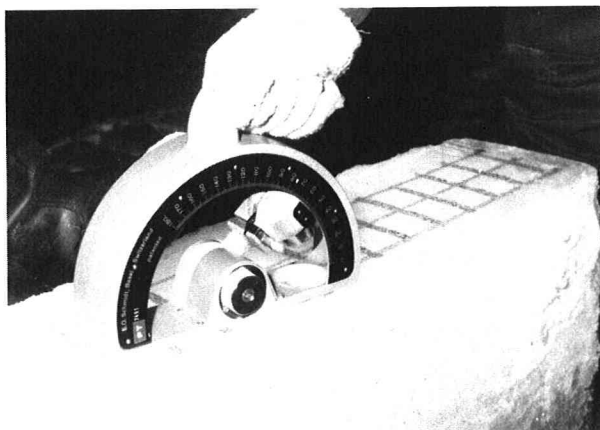


図1 低強度用PT型シュミットハンマー

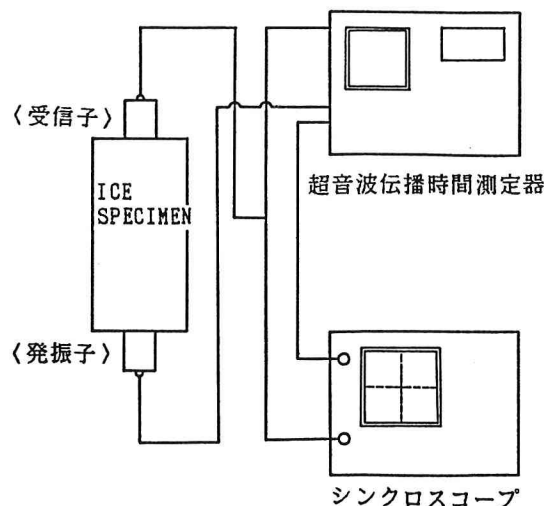


図2 超音波による測定システム

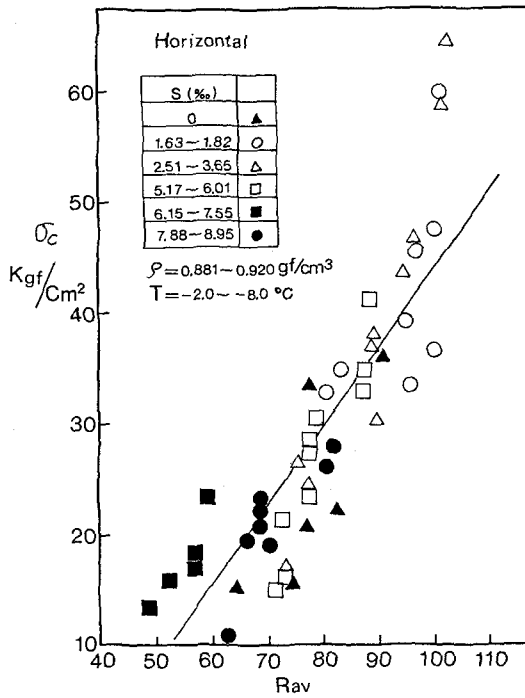


図3 氷の成長方向に直角方向の一軸圧縮強度と R_{av} の関係

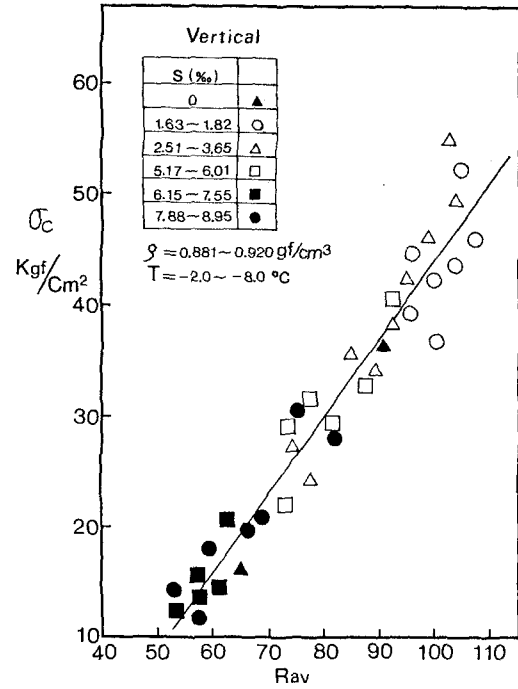


図4 氷の成長方向に平行の一軸圧縮強度と R_{av} の関係

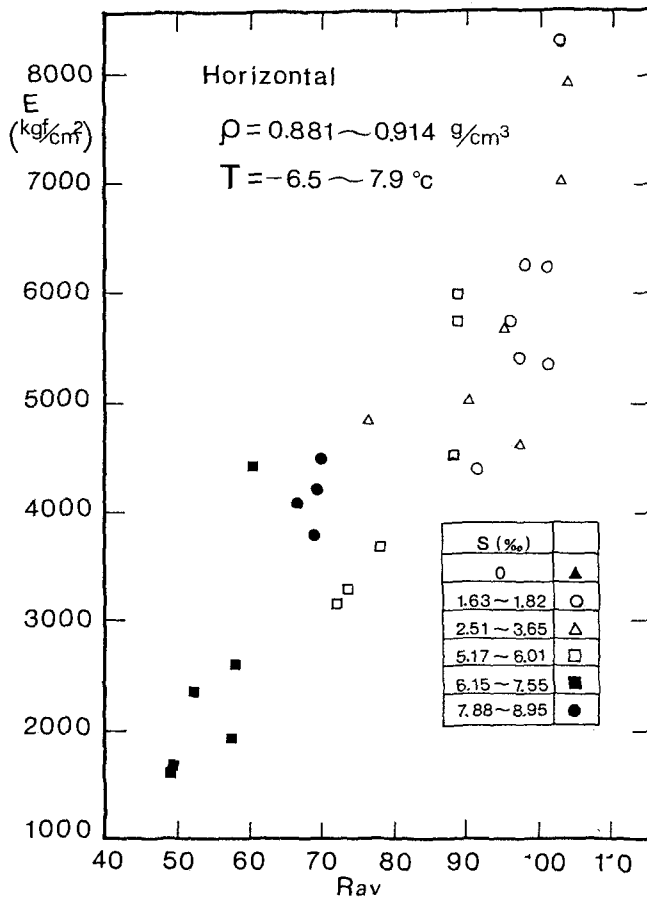


図5 氷の成長方向に直角方向の弾性係数と R_{av} の関係

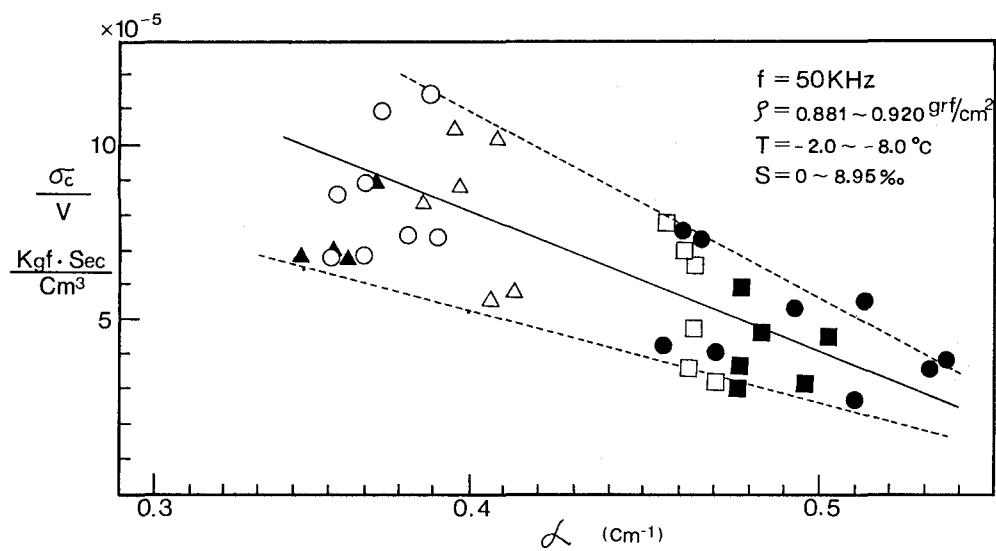


図6 (σ_c/V) と減衰定数 α の関係

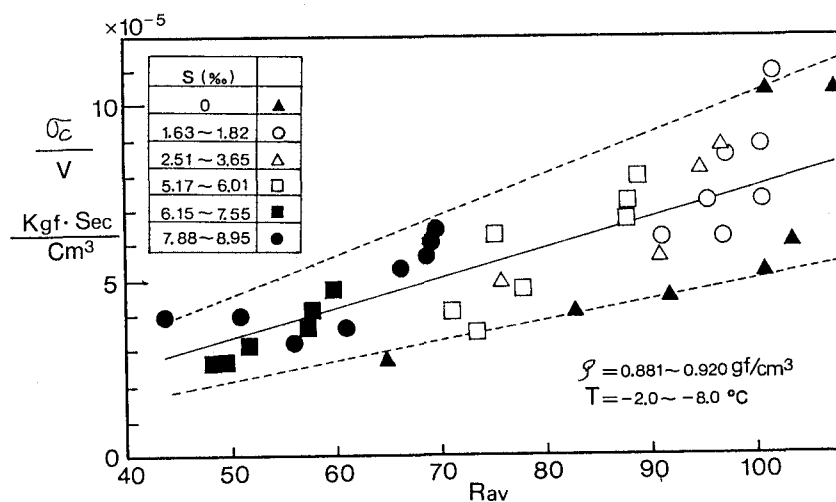


図7 (σ_c/V) と減衰定数 α の関係