

# 海底堆積物を用いたセメント硬化体の強度性状

Mechanical strength characteristics of sea bottom sediment mortar

北見工業大学 ○正員 岡田 包儀, 庄子 仁

(株)グローバル社会経済研究所 能勢 一之

## 1. はじめに

メタンハイドレートは、低温・高圧の一定の条件下で存在する。自然界では海・湖底堆積物、永久凍土地帯中に存在し、今後の新たなエネルギー資源として期待されている。

現在、海底堆積物中のハイドレートを採掘する手段としては数種類提案されているが、この一つに「トンネル工法」が挙げられる。この方法は、陸域部から海底下のメタンハイドレート賦存場所まで、トンネルを施工しメタンハイドレートを採掘する方法である(特許番号 No. 2977196, 発明者: 能勢一之, 1999 年)。この「トンネル工法」によるトンネル施工時の覆工材料及びハイドレート採掘時の海底地盤の崩壊を防ぎ海底地盤を維持・強化する結合材料としてセメントの使用が想定される。この様にトンネル建設時に建設材料としてセメントを使用した場合、経済性の観点等から掘削土砂・海底土砂等の活用も想定され、また、一方、海底地盤安定の面でセメントを地盤改良材として海底地盤等に使用した際の効果の検討も必要となる。

本研究は、トンネル建設時の覆工材料としての現地土砂使用による強度特性及び、地盤改良材として海底地盤強化を目的としてセメントを使用した強度特性を把握するために、メタンハイドレート賦存場所の現地海底堆積物を使用したセメント硬化体の基礎的強度特性について検討した。また、施工時においては、セメント硬化体に空隙の混入が想定されるが、この空隙が導入された強度低下性状も検討した。



図1 試料の採取場所

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

(1) 使用セメント: 早強ポルトランドセメント

(2) 骨材

a) オホーツク海海底堆積物: サハリン北端沖 75km、水深 850m、海底下 0~5m の深さで採取(図1 参照)

・試料の調整

110 で 24 時間乾燥させ、1.2 mm 以下の乾燥土試料

b) 豊浦硅砂

(3) 空隙導入剤(空隙量: 0%以外に使用)

主成分: アルキルエーテル系化合物の複合体

### 2.2 配合条件

(1) 空隙: 0% 配合

供試体: 海底堆積物を使用したセメント硬化体  
硅砂(豊浦産)を使用したモルタル

水セメント比(W/C) = 60、80、100、120、140、160、  
180、200、220%

フロー値: 材料分離を抑え、かつ流動性が確保できる範囲

(2) 空隙: 導入配合

供試体: 海底堆積物を使用したセメント硬化体  
水セメント比(W/C) = 80、120、160、200%

フロー値: 材料分離を抑え、かつ流動性が確保できる範囲

### 2.3 強度試験用供試体

直径 5 cm × 高さ 10 cm の円柱供試体,

1 条件当たり供試体各 4 本作成し試験実施

### 2.4 養生方法: 20 の水中で 7 日間養生

### 2.5 測定項目

(1) 圧縮強度

$$f_c = P / (\pi \times (d/2)^2)$$

$f_c$ : 圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>), P: 最大荷重(N),

d: 供試体直径(mm)

(2) 動弾性係数

動弾性係数は、JIS A1127 の試験法に基づきたて振動より算出した。(写真1 参照)

$$E_d = 0.00400 \times L \times m \times f_2^2 / A$$

$E_d$ : 動弾性係数(縦振動)(N/mm<sup>2</sup>),

L: 供試体長さ(mm), m: 供試体質量(kg)

A: 供試体断面積(mm<sup>2</sup>),

$f_2$ : 縦振動一次共鳴振動数(Hz)



写真1 動弾性係数測定器

(3) 超音波伝播速度

超音波速度は、P 波(縦波)より算出した。

(写真2 参照)

Velocity = L / T

Velocity : 超音波伝播速度(m/s) ,

L : 供試体測定長さ(m) , T : 超音波伝播時間(s)



写真2 超音波速度測定器

### 3. 各種配合結果及び練り上がり性状

海底堆積物を用いた配合及び練り上がり性状、平均密度を表1に示す。

豊浦砂砂を用いた配合及び練り上がり性状、平均密度を表2に示す。

空隙導入剤を混入した配合に関しては、空隙0配合を基本として空隙導入剤を3条件使用し各々練り混ぜた。その後、練り上がった空隙量を求めて各々実配合を算定したものである。なお、空隙量の算出は、JIS A 1116(まだ固まらないコンクリートの単位容積重量試験方法及び空気量の重量による試験方法)によった。

表1 海底堆積物を用いた配合及び練り上がり性状

| 水セメント比<br>% | 空隙量<br>% | 単位水量<br>kg | 単位セメント量<br>kg | 単位堆積物量<br>kg | 空隙導入剤<br>kg | フロー値<br>mm | 平均密度<br>g/cm <sup>3</sup> |
|-------------|----------|------------|---------------|--------------|-------------|------------|---------------------------|
| 60          | 0        | 610        | 1017          | 149          | -           | 253        | 1.83                      |
| 80          | 0        | 610        | 763           | 332          | -           | 172        | 1.75                      |
| 80          | 14.1     | 524        | 655           | 290          | 0.946       | 165        | 1.56                      |
| 80          | 43.3     | 346        | 433           | 192          | 1.249       | 169        | 1.21                      |
| 80          | 61.7     | 234        | 292           | 130          | 2.108       | 173        | 0.65                      |
| 100         | 0        | 640        | 640           | 383          | -           | 160        | 1.68                      |
| 120         | 0        | 652        | 543           | 429          | -           | 165        | 1.63                      |
| 120         | 5.5      | 616        | 513           | 381          | 0.715       | 160        | 1.57                      |
| 120         | 22.0     | 509        | 424           | 314          | 1.181       | 162        | 1.37                      |
| 120         | 51.6     | 316        | 263           | 195          | 2.060       | 197        | 1.15                      |
| 140         | 0        | 667        | 476           | 444          | -           | 175        | 1.60                      |
| 160         | 0        | 680        | 425           | 452          | -           | 189        | 1.57                      |
| 160         | 4.6      | 620        | 387           | 485          | 0.872       | 157        | 1.49                      |
| 160         | 26.6     | 477        | 298           | 373          | 1.342       | 166        | 1.14                      |
| 160         | 56.9     | 280        | 175           | 219          | 1.970       | 176        | 0.67                      |
| 180         | 0        | 683        | 379           | 481          | -           | 149        | 1.55                      |
| 200         | 0        | 691        | 346           | 487          | -           | 150        | 1.52                      |
| 200         | 4.5      | 660        | 330           | 436          | 0.767       | 176        | 1.48                      |
| 200         | 23.3     | 530        | 265           | 351          | 1.232       | 172        | 1.35                      |
| 200         | 44.5     | 384        | 192           | 254          | 1.783       | 192        | 1.03                      |
| 220         | 0        | 699        | 318           | 489          | -           | 175        | 1.51                      |

表2 豊浦砂砂を用いた配合及び練り上がり性状

| 水セメント比<br>% | 空隙量<br>% | 単位水量<br>kg | 単位セメント量<br>kg | 単位細骨材量<br>kg | 空隙導入剤<br>kg | フロー値<br>mm | 平均密度<br>g/cm <sup>3</sup> |
|-------------|----------|------------|---------------|--------------|-------------|------------|---------------------------|
| 60          | 0        | 340        | 567           | 1251         | -           | 212        | 2.13                      |
| 80          | 0        | 330        | 413           | 1405         | -           | 154        | 2.04                      |
| 100         | 0        | 330        | 330           | 1474         | -           | 141        | 1.97                      |
| 120         | 0        | 363        | 303           | 1411         | -           | 160        | 2.08                      |
| 140         | 0        | 367        | 262           | 1434         | -           | 149        | 2.01                      |
| 160         | 0        | 370        | 231           | 1452         | -           | 145        | 2.03                      |
| 180         | 0        | 385        | 214           | 1427         | -           | 142        | 1.98                      |
| 200         | 0        | 397        | 199           | 1408         | -           | 151        | 1.98                      |
| 220         | 0        | 410        | 186           | 1385         | -           | 167        | 1.99                      |

### 4. 実験結果及び考察

#### 4.1 空隙を含まない供試体の試験結果

##### (1) 圧縮強度とセメント水比の関係

水セメント比(W/C)60～220%の条件で、海底堆積物を使用したセメント硬化体及び豊浦砂砂を使用したセメント硬化体の圧縮強度の関係を、図2に示す。試験結果から圧縮強度  $f_c$  とセメント水比  $C/W$  の関係は、一般のコンクリートの圧縮強度とセメント水比  $C/W$  関係同様に一次式が得られた(式1-1～2)。

また、同一のセメント水比において、オホーツク海海底堆積物の方が豊浦砂砂よりも強度が高くなっている。これは、前者が後者と比べて粒径が非常に小さく、一定の練り上がり性状を確保するために単位セメント量が多量となり、強度が高くなったと推察できる。また、一方では、海底堆積物には有機不純物等の混入など水和反応を阻害する要因がほとんどなかったため強度が十分得られていることがいえる。

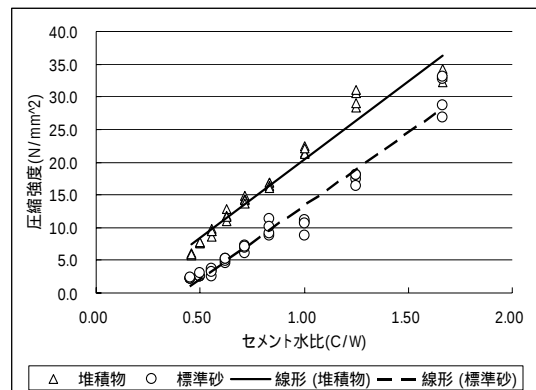


図2 圧縮強度とセメント水比の関係

#### オホーツク海海底堆積物使用

$$f_c = 23.8 \times C/W - 3.43 \quad \text{式 1-1}$$

$$R^2 = 0.962$$

#### 豊浦砂砂使用

$$f_c = 22.4 \times C/W - 9.20 \quad \text{式 1-2}$$

$$R^2 = 0.961$$

但し

$f_c$  : セメント硬化体の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$C/W$  : セメント水比(%)

##### (2) 圧縮強度と動弾性係数の関係

海底堆積物を使用したセメント硬化体及び豊浦砂砂を使用したセメント硬化体の圧縮強度と動弾性係数の関係を図3に示す。圧縮強度と動弾性係数の関係は、海底堆積物の場合一次式が得られ、一方、豊浦砂砂の場合下に凸の曲線式が得られた(図3、式2-1～2)。

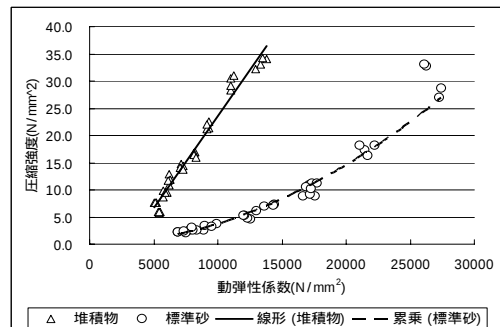


図3 圧縮強度と動弾性係数の関係

#### オホーツク海海底堆積物使用

$$f_c = 0.034 \times E_d - 10.5 \quad \text{式 2-1}$$

$$R^2=0.974$$

豊浦硅砂使用

$$f_c = 6.0 \times 10^{-8} \times Ed^{1.9433} \quad \text{式 2-2}$$

$$R^2=0.976$$

但し

 $f_c$  : セメント硬化体の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

 $E_d$  : セメント硬化体の動弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)

## (3) 圧縮強度と超音波伝播速度の関係

海底堆積物を使用したセメント硬化体及び豊浦硅砂を使用したセメント硬化体の圧縮強度と超音波伝播速度の関係を図4に示す。圧縮強度と超音波伝播速度の関係は、動弾性係数と同様に海底堆積物の場合一次式が得られ、豊浦硅砂の場合下に凸の曲線式が得られた(図4、式3-1~2)。

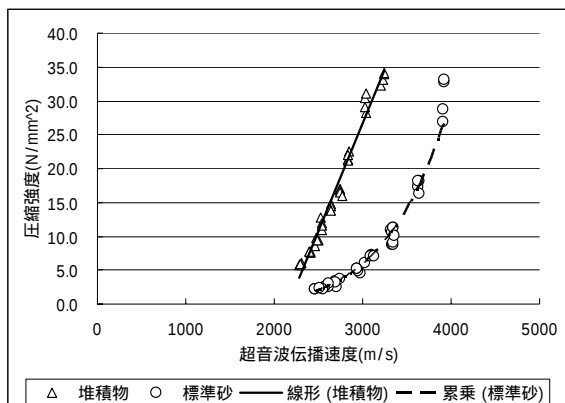


図4 圧縮強度と超音波伝播速度の関係

オホーツク海海底堆積物使用

$$f_c = 0.0317 \times \text{Velocity} - 68.6 \quad \text{式 3-1}$$

$$R^2=0.979$$

豊浦硅砂

$$f_c = 1.0 \times 10^{-19} \times \text{Velocity}^{5.6851} \quad \text{式 3-2}$$

$$R^2=0.983$$

但し

 $f_c$  : セメント硬化体の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

Velocity: セメント硬化体の超音波伝播速度(m/s)

## 4.2 オホーツク海海底堆積物を使用し空隙を導入した供試体の試験結果

## (1) 水セメント比毎の圧縮強度と空隙率の関係

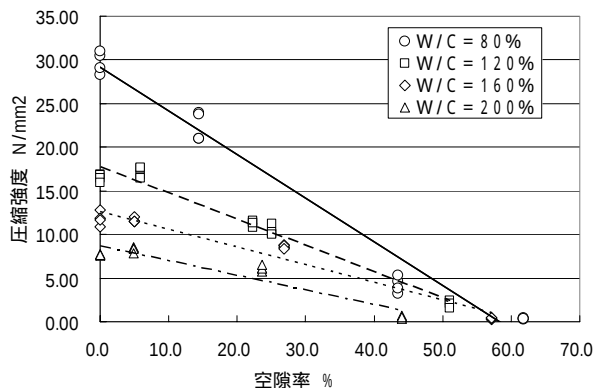


図5 堆積物を使用したセメント硬化体の圧縮強度と空隙率の関係

a) 海底堆積物使用セメント硬化体の各種空隙を導入した水セメント比毎の圧縮強度と各種空隙率の関係を図5

に示す。圧縮強度と空隙率の関係は、式4-1~4に示す一次式が得られた。

水セメント比が小さいほど空隙率に対する圧縮強度の低下量が大きくなり、空隙率が50%を超えると水セメント比に関わらず強度が殆ど発現されないとの結果を得た。

オホーツク海海底堆積物使用

W/C=80%

$$f_c = -0.500 \times \text{Air} + 29.1 \quad \text{式 4-1}$$

$$R^2=0.969$$

W/C=120%

$$f_c = -0.300 \times \text{Air} + 17.8 \quad \text{式 4-2}$$

$$R^2=0.970$$

W/C=160%

$$f_c = -0.202 \times \text{Air} + 12.6 \quad \text{式 4-3}$$

$$R^2=0.958$$

W/C=200%

$$f_c = -0.168 \times \text{Air} + 8.68 \quad \text{式 4-4}$$

$$R^2=0.898$$

但し

 $f_c$  : セメント硬化体の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

Air:空隙率(%)

## b) 2つの説明変数による強度推定式の算定

海底堆積物を使用した各種配合条件の下で水セメント比と空隙率より強度の推定式(式5)を算定した。

$$f_c = W/C \times (-0.1220) + \text{Air} \times (-0.3196) + 34.06 \quad \text{式 5}$$

$$Pr > |t| \quad W/C \cdot \text{Air} \cdot \text{Intercept} < 0.0001$$

但し

 $f_c$  : セメント硬化体の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

W/C:水セメント比

Air:空隙率(%)

## (2) 水セメント比毎の動弾性係数と空隙率の関係

各種空隙を導入した海底堆積物使用セメント硬化体の水セメント比毎の動弾性係数と空隙率の関係を図6に示す。動弾性係数と空隙率の関係式は、式6-1~4に示す一次式が得られた。

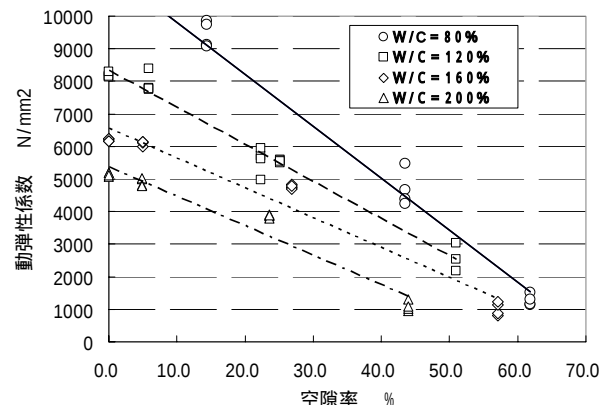


図6 堆積物を使用したセメント硬化体の動弾性係数と空隙率の関係

オホーツク海海底堆積物使用

W/C=80%

$$E_d = -160 \times \text{Air} + 11400 \quad \text{式 6-1}$$

$$R^2=0.988$$

W/C=120%

$$E_d = -113 \times \text{Air} + 8330 \quad \text{式 6-2}$$

$$R^2=0.975$$

W/C=160%

$$E_d = -91.5 \times \text{Air} + 6550 \quad \text{式 6-3}$$

$$R^2=0.960$$

W/C=200%

$$E_d = -90.5 \times \text{Air} + 5390 \quad \text{式 6-4}$$

$$R^2=0.945$$

但し

Ed: セメント硬化体の動弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)

Air: 空隙率(%)

### (3) 水セメント比毎の超音波伝播速度と空隙率の関係

各種空隙を導入した海底堆積物使用セメント硬化体の水セメント比毎の超音波伝播速度と各種空隙率の関係を図 7 に示す。超音波伝播速度と空隙率の関係式は、式 7-1 ~ 4 に示す一次式が得られた。

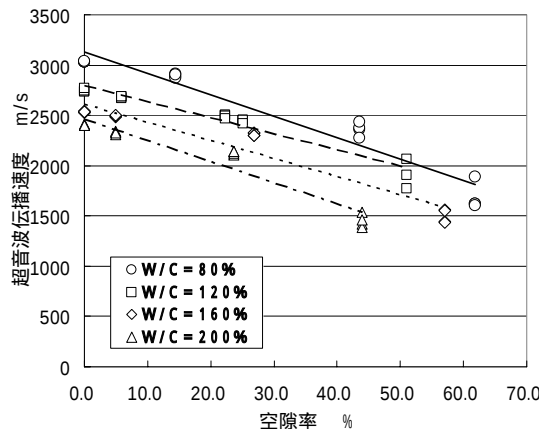


図 7 堆積物を使用したセメント硬化体の超音波伝播速度と空隙率の関係

オホーツク海海底堆積物使用

W/C=80%

$$\text{Velocity} = -21.4 \times \text{Air} + 3130 \quad \text{式 7-1}$$

$$R^2=0.935$$

W/C=120%

$$\text{Velocity} = -16.0 \times \text{Air} + 2790 \quad \text{式 7-2}$$

$$R^2=0.940$$

W/C=160%

$$\text{Velocity} = -18.0 \times \text{Air} + 2610 \quad \text{式 7-3}$$

$$R^2=0.927$$

W/C=200%

$$\text{Velocity} = -20.9 \times \text{Air} + 2460 \quad \text{式 7-4}$$

$$R^2=0.926$$

但し

Velocity: セメント硬化体の超音波伝播速度(m/s)

Air: 空隙率(%)

## 5. まとめ

本研究でオホーツク海海底堆積物を使用したセメント硬化体の基礎的強度性状について以下の点が明らかとなった。

(1) オホーツク海海底堆積物がセメント硬化体の使用材料として強度発現の点から利用可能である。

(2) 豊浦珪砂を使用したモルタルと強度を比較した場合、同一水セメント比では、海底堆積物が何れも上回った。

(3) 圧縮強度とセメント水比の関係性は、海底堆積物

を用いたセメント硬化体、豊浦珪砂を使用したモルタルで何れも一次式が得られた。

圧縮強度と動弾性係数・超音波伝播速度の関係性は、海底堆積物を用いたセメント硬化体では一次式が得られたが、豊浦珪砂を使用したモルタルでは、何れも曲線式が得られた。

(4) 海底堆積物を使用し空隙を導入したセメント硬化体は、水セメント比毎に圧縮強度と空隙率の関係の一次式が得られた。圧縮強度と空隙率との推定式(一次式、重回帰式)を用いて、空隙を含むセメント硬化体の圧縮強度の推定が可能となった。

(5) 海底堆積物を使用し空隙を導入したセメント硬化体の水セメント比毎の動弾性係数・超音波伝播速度と各空隙率には、一次式が得られ非破壊試験の関連性が明らかになった。

応用例としては、今後、設計強度に基づき各種施工に応じた空隙等の導入による、配合設計が可能となる。また、構造物の維持管理においては、強度と非破壊試験値の関係性より非破壊試験による強度推定・劣化の進捗把握等に活用が期待される。

以上、メタンハイドレート賦存場所の現地海底堆積物を使用した空隙を含むセメント硬化体の各種配合条件の下で、圧縮強度、動弾性係数、超音波伝播速度の関連性を定量的に明らかにした。

## 謝辞

本研究を行うにあたり協力いただいた北見工業大学メタンハイドレート研究室卒業生の挟間藍・中島康兵両氏に感謝する。

## 参考文献

- 1) H. Shoji, V. Soloviev, T. Matveeva, L. Mazurenko, H. Minami, A. Hachikubo, H. Sakagami, K. Hyakutake, V. Kaulio, V. Gladysch, E. Logvina, A. Obzhairov, B. Baranov, O. Khlystov, N. Biebow, J. Poort, Y. K. Jin and Y. Kim: Hydrate Bearing Structures in the Sea of Okhotsk, EOS, Transactions, American Geophysical Union, 86(2), 13, 18, 2005. 1
- 2) K. Okada, K. Nose, H. Shoji: Tunnel Construction Approach for Methane Gas Recovery from Submarine Gas Hydrates, In Gas Hydrates for the Future Energy and Environment, ed. H. Tsunemoto, H. Shoji and S. Yamashita, Kitami Institute of Technology, Kitami, Japan, 205-208, 2007. 4