

## V-266 極低温環境下の超高強度コンクリートの圧縮強度と弾性係数

竹中工務店技術研究所 正会員 三井健郎

正会員 井上孝之

同上

正会員 米澤敏男 竹中土木技術本部 山田敏昭

## 1. はじめに

近年の液化天然ガス(LNG)貯蔵タンク等の大規模地下構造物の建設においては、工期短縮や壁厚、掘削土量の低減等の経済的な理由から高強度コンクリートの使用が検討されている。LNGは沸点が $-162^{\circ}\text{C}$ と極めて低いため、コンクリート造LNG貯蔵タンクの設計においては、極低温環境下でのコンクリート部材の挙動を把握する必要がある。極低温環境下のコンクリートの力学特性は、コンクリート中の間隙に存在する水の凍結により、常温の場合と大きく異なることが知られているが、設計基準強度が $60\text{N/mm}^2$ を超えるような超高強度コンクリートについては十分なデータが得られていない。本研究は常温での圧縮強度が $120\text{N/mm}^2$ 程度の超高強度コンクリートの極低温環境下での圧縮強度と弾性係数について検討を行ったものである。

## 2. 実験の概要

## 2.1 使用材料と配合

表-1 にコンクリートの配合を示す。結合材として普通ポルトランドセメント（比重3.16）、粉体シリカフェーム（ $\text{SiO}_2$ :93.1%，比重2.17，比表面積 $20.8\text{m}^2/\text{g}$ ）を用いた。細骨材は大井川産川砂（比重2.61，吸水率1.16%，粗粒率2.81），粗骨材は八王子産硬質砂岩砕石（最大粒径20mm，比重2.67，吸水率0.69%，実積率59.3%，粗粒率6.88）を用いた。

表-1 コンクリートの配合

| 配合<br>No. | 記号      | 水結合<br>材比(%) | 細骨材率<br>(%) | 空気量<br>(%) | 単位重量 ( $\text{kg/m}^3$ ) |      |             |     |      |
|-----------|---------|--------------|-------------|------------|--------------------------|------|-------------|-----|------|
|           |         |              |             |            | 水                        | セメント | シリカ<br>フェーム | 細骨材 | 粗骨材  |
| 1         | WC20-10 | 20           | 47.2        | 3.0        | 130                      | 585  | 65          | 770 | 878  |
| 2         | WC30-10 | 30           | 47.0        | 3.0        | 165                      | 495  | 55          | 765 | 878  |
| 3         | WC30    | 30           | 47.7        | 3.0        | 165                      | 550  | 0           | 786 | 878  |
| 4         | WC55    | 55           | 45.0        | 3.0        | 175                      | 318  | 0           | 814 | 1019 |

## 2.2 実験方法

圧縮強度試験は $\phi 10 \times 20\text{cm}$  供試体を用い試験材齢は91日とした。供試体の養生方法は標準養生及び気乾養生の2種類とした。気乾養生供試体は材齢7日まで $20^{\circ}\text{C}$ 水中養生の後、 $20^{\circ}\text{C}$ ，RH60%の恒温恒湿室中で試験材齢まで養生した。供試体は試験当日に冷却槽内で常温から所定の試験温度となるまで $-2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の速度で冷却した。試験温度は、 $20^{\circ}\text{C}$ ， $-30^{\circ}\text{C}$ ， $-70^{\circ}\text{C}$ ，及び $-162^{\circ}\text{C}$ とした。圧縮強度試験は図-1に示すように加力装置に冷却装置を設置し供試体温度を所定の温度に保持した状態で行い、供試体表面に貼り付けた低温型歪みゲージにより応力歪み関係を求めた。含水率は供試体を $110^{\circ}\text{C}$ の乾燥炉に入れ、乾燥前後の重量変化より求めた。

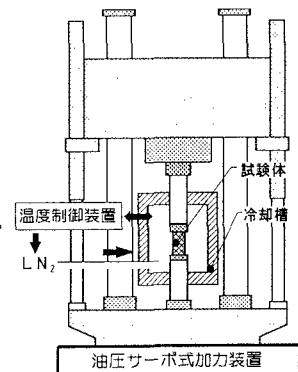


図-1 試験装置

## 3. 実験結果及び考察

## 3.1 温度、含水率と圧縮強度の関係

試験体の含水率の測定結果を表-2に示す。図-2には各配合における圧縮強度と温度の関係を示す。いずれの配合においても常温( $20^{\circ}\text{C}$ )では養生条件による強度の差は小さいが、低温下では含水率の高い標準養生の強度の増加が大きい。

表-2 供試体の含水率

| 配合<br>No. | 記号      | 含水率 (%) |      |
|-----------|---------|---------|------|
|           |         | 標準養生    | 気乾養生 |
| 1         | WC20-10 | 2.77    | 2.55 |
| 2         | WC30-10 | 5.03    | 3.99 |
| 3         | WC30    | 4.59    | 3.55 |
| 4         | WC55    | 6.89    | 3.32 |

図-3には常温における圧縮強度に対する低温下の強度増加量と温度・含水率の関係を示す。一般に低温下の圧縮強度は温度の低下及び含水率の増加にともなって増加するとされ、(1)式<sup>1)</sup>の関係式が提案されている。

$$\Delta f_c = 0.098 \{120 - 1/270(T + 180)^2\} \omega \quad (\text{ただし } \Delta f_c \leq 10.5 \omega) \quad (1)$$

ここに、 $\Delta f_c$ :圧縮強度増加量( $\text{N/mm}^2$ )， $T$ :温度( $^{\circ}\text{C}$ )， $\omega$ :含水率(%)

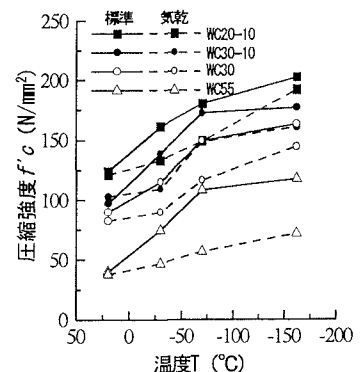


図-2 圧縮強度と温度の関係

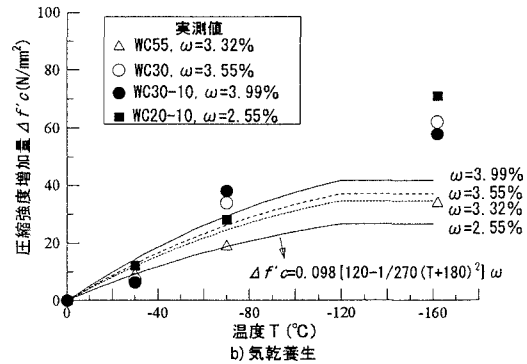
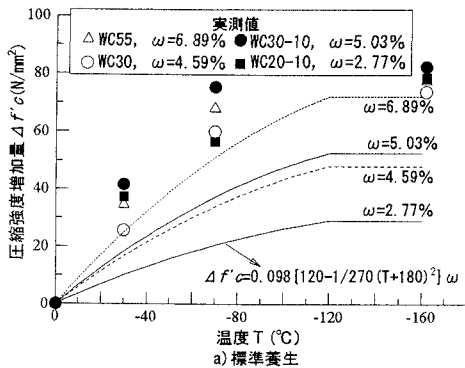


図-3 圧縮強度増加量と温度・含水率の関係

W/C55%の配合では強度増加量は(1)式との差は比較的小さいが、W/C20%および30%の高強度コンクリートでは(1)式より大きい強度増加を示しており、特に-160℃での強度増加が著しい。後藤ら<sup>1)</sup>は-120℃程度以下では圧縮強度の増加量はほぼ一定になると報告しているが、高強度コンクリートの場合、含水率が低い気乾養生でも-162℃での強度増加は非常に大きく、含水率の影響は明確ではない。

### 3.2 圧縮強度と弾性係数の関係

図-4には圧縮強度とヤング係数の関係を示す。温度低下にともなう強度の増大により100N/mm<sup>2</sup>以上でもヤング係数はほぼ直線的な増加傾向を示し、常温での $f'_c$ と $E_c$ の関係と同様な値を示した。ただし-162℃では-70℃以上の場合よりも強度の増加に対してヤング係数は大きくなる傾向にある。

図-5にはW/C20%およびW/C55%の場合の試験体破壊時までの応力歪み曲線を示す。両配合とも温度の低下にともない応力歪み曲線の初期勾配は大きく直線的になる。常温のコンクリートを高強度化した場合も最大応力時の歪みは増大する<sup>2)</sup>が、温度の低下による強度増加の場合は、-160℃の最大歪み量は逆に両配合とも-70℃よりも小さい。-120℃以下での終局歪みの減少傾向はRostacyら<sup>3)</sup>も指摘しているが、含水率の低い高強度コンクリートでも同様な現象が起こるといえる。

一般に極低温下での強度やヤング係数の増加の

原因は、間隙中の自由水の凍結により間隙がより強度の高い固体で充填されるためとされているが、間隙水の少ない高強度コンクリートの場合は、温度の低下にともない含水率に応じて一様に強度が増加するのではなく、-160℃では含水率が低い場合でも強度とヤング係数は増進する。この原因は明確ではないが、氷の結晶構造や物理的性質の違い等により、-70℃以上とは異なるメカニズムが働いている可能性がある。

### 4. まとめ

常温での圧縮強度が120N/mm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートの極低温下での強度とヤング係数は、通常のコンクリートよりも含水率が低いにもかかわらず、大きく増大する結果となった。特に-160℃での強度とヤング係数の増加は著しく、通常のコンクリートとは異なる強度増進の機構が働いていると考えられる。

（参考文献）

1) 後藤、三浦：極低温下における鉄筋コンクリート部材の性質に関する研究、土木学会論文報告集、第285号、1979年

2) 高強度コンクリートの技術の現状、日本建築学会、1991年

3) Rostacy, Wiedemann: Stress-Strain-Behavior of Concrete at Extremely Low Temperature, Cem. and Conc. Res., Vol. 10, No. 4, 1980

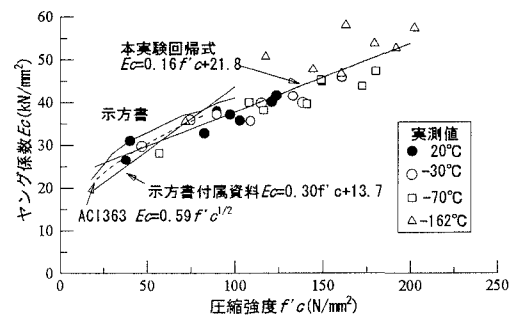


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係

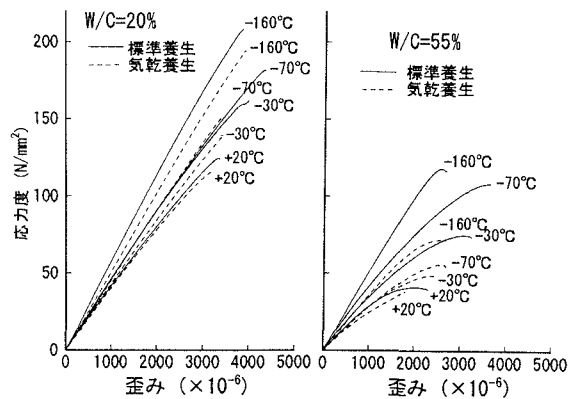


図-5 温度と応力歪み曲線の関係