

# 論文 超高強度コンクリートの極低温環境下での力学特性に関する研究

三井健郎\*1・米澤敏男\*2・井上孝之\*3

要旨：低水結合材比の超高強度コンクリートの常温から-160℃までの極低温環境下での圧縮強度、応力ひずみ関係について実験的検討を行った。普通コンクリートでは温度の低下にともない、含水率に比例して強度およびヤング係数は増加した。しかし超高強度コンクリートでは含水率が少ないにもかかわらず大きな強度の増加が見られた。これは、超高強度コンクリートでは、極低温下では、コンクリート中の水の凍結によっても力学的均質性が高く、コンクリート自体の強度も低温条件により強固になるためと考えられる。

キーワード：高強度コンクリート、低温、圧縮強度、含水率、ヤング係数、ポアソン比

## 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℃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では、温度の降下にともない、コンクリート中に存在する水が凍結し、固体(粘弾性物質)である氷に変化することにより、力学特性や熱的性質は常温の場合とは大きく異なることが知られている[1]。超高強度コンクリートは普通コンクリートに比べ、水結合材比が小さく、組織が緻密であり、力学特性も異なることから、極低温下での特性も異なることが予想される。しかし、既往の研究では設計基準強度が60N/mm<sup>2</sup>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120N/mm<sup>2</sup>級の超高強度コンクリートの極低温環境下での力学特性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

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(SiO<sub>2</sub>:93.1%、比重:2.17、比表面積:20.8m<sup>2</sup>/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)を用いた。粗骨材は硬質砂岩碎石(最大粒径20mm、比重:2.67、吸水率:0.69%、

表-1 コンクリートの配合

配合 No.	記号	水結合材比(%)	細骨材率(%)	空気量(%)	単位重量(kg/m <sup>3</sup> )				
					水	セメント	シリカフェーム	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

\*1(株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部副主任研究員、工修(正会員)

\*2(株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部主任研究員、Ph.,D(正会員)

\*3(株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部、工修(正会員)

実積率 59.3%, 粗粒率:6.88) を用いた。表-1 にコンクリートの配合を示す。

## 2. 2 実験方法

圧縮強度試験は $\phi 10 \times 20\text{cm}$  円柱試験体を用い、試験材齢は 91 日とした。試験体の養生方法は標準養生、 $20^\circ\text{C}$  封緘養生及び  $20^\circ\text{C}$  気乾養生の 3 種類とした。気乾養生供試体は材齢 28 日まで  $20^\circ\text{C}$  水中養生の後、 $20^\circ\text{C}$ , R.H.60% の恒温恒湿室中で試験材齢まで養生した。試験体は、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  $-2.0^\circ\text{C}/\text{min}$  の速度で冷却し、所定の温度で 30 分以上保持した後、試験を行った。試験温度は、 $20^\circ\text{C}$ ,  $-30^\circ\text{C}$ ,  $-70^\circ\text{C}$ ,  $-120^\circ\text{C}$  及び  $-160^\circ\text{C}$  とした。圧縮強度試験は図-1 に示すように、油圧サーボ型の載荷試験装置に冷却装置を設置し、試験体温度を所定の温度に保持した状態で行い、変位速度一定条件で載荷した。試験体のひずみは、試験体表面に貼り付けた低温型ひずみゲージにより測定し、縦及び横方向の応力ひずみ関係を求めた。試験体の含水率は、供試体を  $110^\circ\text{C}$  の乾燥炉に入れ、一定重量となるまで乾燥させた前後の重量変化より求めた。

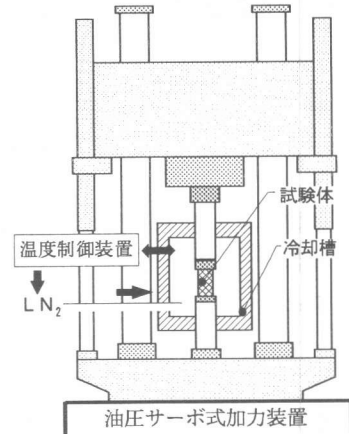


図-1 試験装置

## 3. 実験結果及び考察

### 3. 1 圧縮強度に及ぼす極低温条件の影響

図-2 には  $+20^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$  の条件下での圧縮強度と温度の関係を示す。いずれの配合のコンクリートにおいても圧縮強度は温度の低下にともなって著しく増加している。特に水結合材比 20% の配合では、常温で  $123.8\text{N}/\text{mm}^2$  の強度が、 $-160^\circ\text{C}$  で  $202.4\text{N}/\text{mm}^2$  となり、常温での骨材原石の圧縮強度[2] に匹敵するような高い強度が得られている。いずれの配合においても常温では養生条件による強度の差は  $2.2 \sim 7.3\text{N}/\text{mm}^2$  と小さいが、極低温下では含水率の高い養生条件の試験体の強度の増加が大きく、 $-162^\circ\text{C}$  では、含水率の差が最も大きい水結合材比 55% では標準養生と気乾養生の強度差は  $45.8\text{N}/\text{mm}^2$  に達している。

常温時の強度に対する極低温下での強度増加量と温度・含水率との関係は、三浦ら[3]により、(1) 式で示される実験式が提案されている。

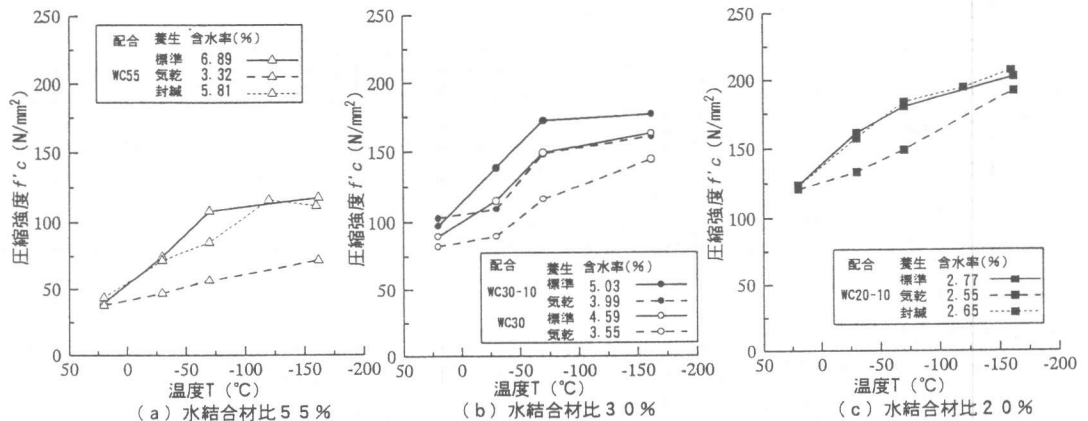


図-2 圧縮強度と温度の関係

$$\Delta f_c = 0.098 \{120 - 1/270(T+180)^2\} \omega$$

$$\text{(ただし } \Delta f_c \leq 10.5 \omega \text{)} \quad (1)$$

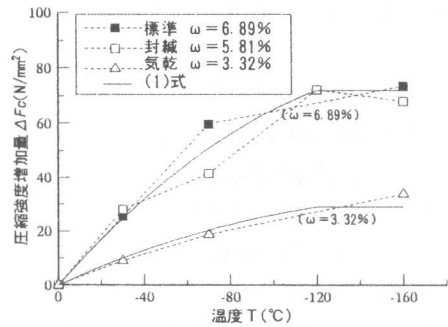
ここに、 $\Delta f_c$ :圧縮強度増加量(N/mm<sup>2</sup>), T:温度(°C),  $\omega$ :含水率(%)

図-3には本実験結果での圧縮強度増加量 $\Delta f_c$ と温度の関係を示す。水結合材比55%の配合では、本実験値は(1)式との整合性は高い。水結合材比20%および30%では、本実験結果の $\Delta f_c$ は(1)式より大きい値を示しており高強度コンクリートでは含水率が低くとも極低温下の強度増加が大きい。

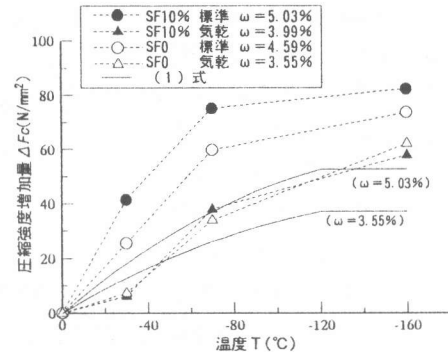
図-4には含水率と強度増加量の関係を各温度条件別に示す。圧縮強度の増加量 $\Delta f_c$ は、三浦ら[4]が指摘するように、各温度においては含水率の増加にともない $\Delta f_c$ は増加する傾向が見られる。ただし、含水率に対する $\Delta f_c$ の増加の勾配は水結合材比により異なり、水結合材比30%では水結合材比55%に比べ含水率の増分に対する強度増加量が大きい。また水結合材比20%では含水率の絶対値が非常に低いにもかかわらず強度増加が大きい。

### 3. 2 低温条件下での応力ひずみ関係

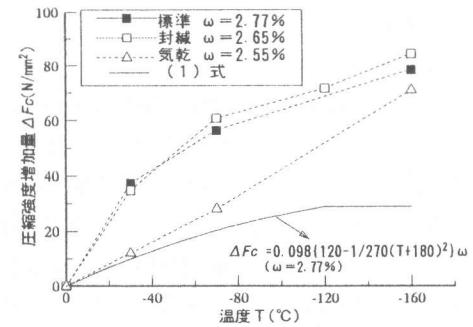
図-5には水結合材比20%および55%の場合の、試験体破壊時までの典型的な試験体の応力ひずみ曲線を示す。両配合とも、含水率の高い封緘養生の方が気乾養生に比べ応力ひずみ曲線の初期勾配は大きく、また温度低下にともない応力上昇域の形状は直線的になり勾配が増加している。また最大応力時のひずみは、最大応力の増加にともない、-70°Cまでは増加傾向にあるが、-160°Cの最大応



(c) 水結合材比55%



(b) 水結合材比30%



(a) 水結合材比20%

図-3 圧縮強度増加量と温度の関係

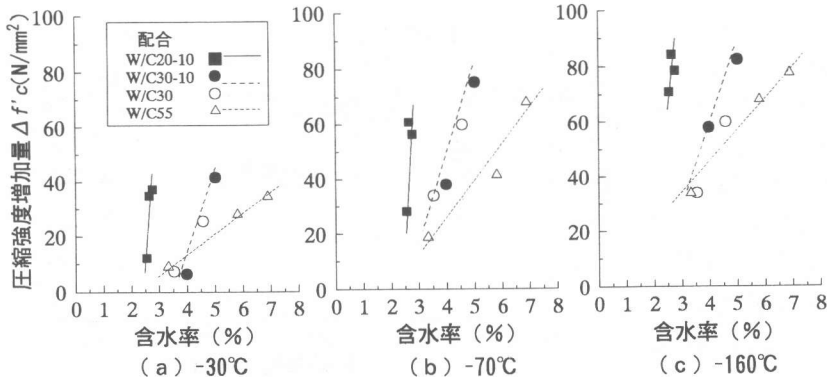


図-4 強度増加量と含水率の関係

力時のひずみは応力が高いにもかかわらず-70℃よりも小さい。この傾向は水結合材比55%の配合で特に顕著に見られる。同様な傾向はRostacyら[5]の実験結果でも示されており、最大応力時のひずみは-40~-60℃で最大となる結果が得られている。

この理由は明確ではないが、骨材とマトリックスでは剛性や含水状態が異なると考えられることから、温度低下による剛性の増大の度合いが骨材とマトリックスで異なり、塑性領域の大きい水結合材比55%では、両者の差は-70℃程度で最小となり力学的に均質に近い構造となるため、高応力状態まで弾性的な挙動を示し、最大応力時のひずみが増大すると考えられる。

### 3. 3 ヤング係数

図-6には応力ひずみ曲線より求めた最大応力の1/3の点での割線弾性係数(ヤング係数)と温度の関係を示す。ヤング係数も圧縮強度と同様に温度の低下に伴い増加している。水結合材比55%のうち、含水率の高い標準養生および封緘養生のヤング係数の増加の傾向は大きく、-160℃では水結合材比20%の常温でのヤング係数より大きな値を示している。

図-7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ており、温度、含水率に関らず、常温での高強度コンクリートのf<sub>c</sub>とE<sub>c</sub>の関係とほぼ同様である。ただし-

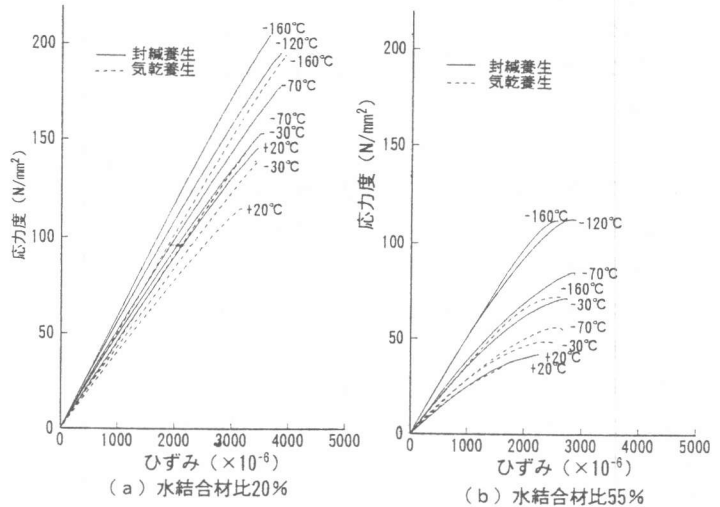


図-5 応力ひずみ曲線

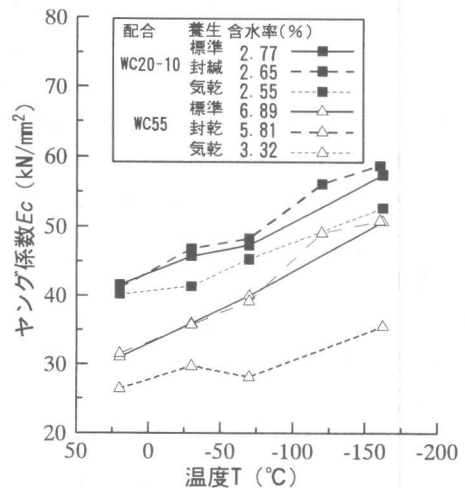


図-6 温度とヤング係数の関係

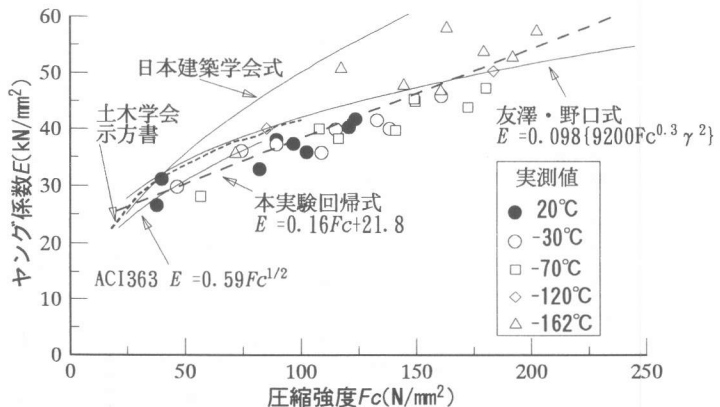


図-7 圧縮強度とヤング係数の関係

162°Cでは-70°C以上の場合よりも強度の増加に対してヤング係数はやや大きくなる傾向にある。

### 3. 4 ポアソン比

図-8には最大応力の1/3の点でのポアソン比と温度の関係を示す。低温下のコンクリートのポアソン比は常温から-160°C程度まで変化しないとする研究結果[6]があるが、本実験結果では、ポアソン比は常温に比べ低温下では温度の低下にともない増加傾向にある。

### 3. 5 高強度コンクリートの低温による強度増加のメカニズムの考察

極低温下のコンクリートの強度増加のメカニズムは十分には明らかになっていないが、一般に、コンクリート中の自由水や吸着水の凍結により、コンクリート中の間隙が強度を持つ固体である水で充填され、氷がセメントの結晶の膠結物質として作用し結合力を高めるされる。常温のセメント硬化体の強度は、空隙量が少なく、平均空隙径が小さいほど高強度であることは良く知られているが、極低温下では、間隙中の水の凍結により空隙率が減少し強度が向上するとされている。Helmuth[7]が示したように、セメントペースト中の細孔溶液の氷点温度は、細孔径の減少にともなって降下するため、微細な空隙ほど低温で凍結することになる。また、氷自身の一軸圧縮強度も、図-9に示す稲田ら[8]の実験結果より、強度の絶対値は小さいもの

温度の降下とともに増加し、-160°Cでは20°Cの約2.7倍に増大している。このような理由から、温度低下に伴いコンクリート強度が増加すると考えられ、含水率の大きいコンクリートでは低温下の強度の増加が大きいといえる。

水結合材比30%及び20%の高強度コンクリートの強度増加量も含水率の影響を受けるが、水結合材比55%の普通コンクリートに比較して、含水率が小さいにもかかわらず強度増加は大きい。この理由は明確ではないが、以下のように推定される。

高強度コンクリートでは、図-5に示したように常温でも応力ひずみ曲線の上昇域は直線的であり骨材とマトリックスの力学的均

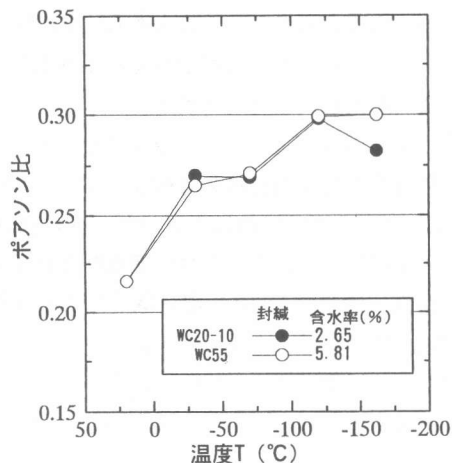


図-8 ポアソン比と温度の関係

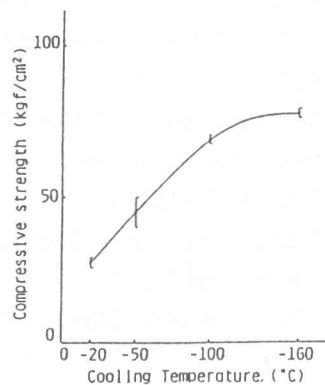


図-9 氷の圧縮強度と温度の関係<sup>[8]</sup>

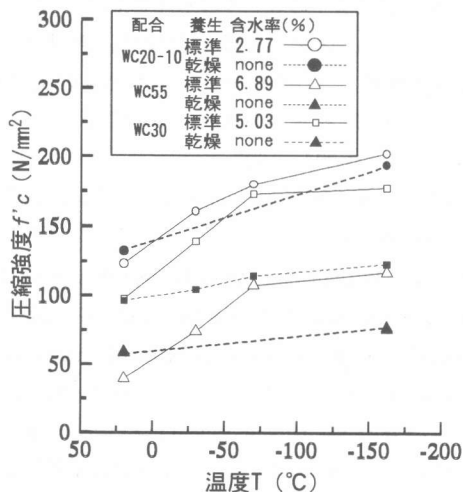


図-10 乾燥状態の試験体の圧縮強度と温度の関係

質性が高い構造と考えられることから、極低温下でのコンクリート中の水の凍結によっても骨材とマトリックスの変形の差異が小さく、応力集中が生じにくく、ひびわれ等の損傷が発生し難いため強度の増加が大きいと考えられる。

一方、図-10には、110℃で炉乾燥させ含水率を0%にした状態の試験体と標準養生試験体の常温および極低温下で圧縮強度の比較を示す。乾燥状態の試験体の強度は、水結合材比55%では常温から-160℃での強度の増加は小さいが、水結合材比20%の試験体では、乾燥状態でも常温時より強度が大きく増加している。これは低水結合材比のコンクリートでは、空隙径が小さく水和生成物の結合力が高い構造をとり[9]、温度低下による収縮により水和生成物や未水和物間の凝集力が高まり強度が増大するためと考えられる。

したがって、低水結合材比の高強度コンクリートの極低温下での強度増加は、コンクリート中の水の凍結による効果ばかりでなくコンクリート自体が強固な構造になるためと考えられる。

#### 4. まとめ

常温から -160℃までの極低温環境下の高強度コンクリートの力学特性について実験的検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 極低温下での圧縮強度及びヤング係数は、水結合材比にかかわらず、温度の低下とともに増加し、常温に対する強度の増加量は、含水率が高いほど大きい。
- (2) 極低温での強度増加量に対する含水率の効果は、水結合材比により異なり、水結合材比20%および30%の高強度コンクリートでは含水率は非常に低いが、高い強度増加を示す。
- (3) 極低温下の応力ひずみ曲線は、温度の低下にともない応力上昇域は直線的になり、高応力状態まで弾性的な挙動を示す。
- (4) 低水結合材比の高強度コンクリートの極低温下での強度増加は、コンクリート中の水の凍結による効果ばかりでなくコンクリート自体が強固な構造になるためと考えられる。

#### (参考文献)

- [1]三浦：極低温下のコンクリートの物性、コンクリート工学, Vol.22, No.3, pp21-28, 1984
- [2]三井、小島、米澤：初期材齢での高温養生条件における超高強度コンクリートの強度発現に及ぼす骨材品質の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.1, 1995, pp1025-1030
- [3]三浦、阿部、神永：極低温下におけるコンクリートの性質について、土木学会東北支部研究発表会講演概要、pp223-224、1977
- [4]後藤、三浦、阿部：極低温下におけるコンクリートの性質について、土木学会年次学術講演梗概集、V, pp165-166, 1975
- [5]Rostacy, Wiedemann: Stress-Strain-Behavior of Concrete at Extremely Low Temperature, Cement and Concrete. Research., Vol.10, No.4, pp565-572, 1980
- [6]Monfore, Lentz: Physical properties of concrete at very low temperatures, Journal of the PCA, pp33-39, 1962
- [7]Helmuth: Capillary size restrictions on Ice formation in hardened Portland cement paste, Proc. of the 4th Int. Symp. on the Chemistry of cement, pp855-869, 1960
- [8]稲田、甲村：極低温下における氷の力学的挙動、第10回西日本岩盤工学シンポジウム論文集、pp47-53、1989
- [9]Jamber, RILEM/IUPAC Int. Symp. Pore Structure and Properties of Materials, Prague, Vol.2, pp389-400, 1976