

LNG 地下貯蔵槽に関する基礎的研究 (第 4 報)

—コンクリートの低温特性—

内藤和章 十河茂幸
(本社技術本部土木技術部)
上野孝之 久木田英彰

Study on Underground Storage Tank for Liquefied Natural Gas (Part 4) —Cryogenic Qualities of Concrete—

Kazuaki Naito Shigeyuki Sogo
Takayuki Ueno Hideaki Kukita

Abstract

In order to be able to construct underground storage tanks for liquefied natural gas, the properties of concrete at cryogenic temperatures should be investigated furthermore. Although compressive strengths, Young's modulus and coefficient of thermal expansion of concretes at cryogenic temperatures were reported in Parts 1 and 3, the result had some problems such as accuracy of the instrument and method. In this test, improved testing equipments are applied and both results are compared. Further, tensile strength test is also added.

The results of the tests have been ascertained as follows. (1) On moist curing of w/c 55%, at a temperature of -120°C both compressive and tensile strength were about four times and on a condition of oven-dry about two times those at normal temperature. (2) On moist curing of w/c 56.6%, Young's modulus and coefficient of thermal expansion agreed roughly with those of the previous tests.

概 要

LNG (液化天然ガス) を内蔵する鉄筋コンクリート製の地下貯蔵槽を建設するには、コンクリートの低温特性を十分究明する必要がある。第 1 報、3 報で低温領域でのコンクリートの圧縮強度、静弾性係数、線膨張係数について報告しているが、試験装置等に若干の問題があったため今回試験装置を整え、補正実験を行ない前回の結果と比較した。さらにコンクリート中の含水量が引張強度、圧縮強度に及ぼす影響について調べた。

実験により次の結果が確かめられた。(1)W/C 55%で標準水中養生のとき、圧縮強度比、引張強度比とも -120°C で常温の約 4 倍、絶乾状態では約 2 倍となった。(2)W/C 55.6%、標準水中養生での静弾性係数、線膨張係数は、前回の実験結果強度とほぼ一致した。

1. まえがき

第 1¹⁾、3 報²⁾ でコンクリートの低温領域における諸特性について報告したが、これらの試験結果は次のような問題を有していた。

(1) 圧縮強度試験において、供試体温度が -40°C ~ -60°C 以下になると $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体を用いたとき圧縮強度が装置の載荷能力 (50ton) を越えるために、供試体を断熱材 (グラスウール) で包み、低温槽から

取り出し、常温の雰囲気のもとで、200ton アムスラー式万能試験機を用いて試験を行なった。

(2) 静弾性係数を求めるために、常温用ゲージを用いてひずみを測定したが、低温でひずみを正確に測定することができたかどうか。

(3) 線膨張係数の測定において、カールソン型ひずみ計を用いてコンクリートの収縮量を測定したが、低温領域でひずみを正確に測定することができたかどうか。

これらの問題を明らかにするために、試験装置を改良し、圧縮強度、静弾性係数および線膨張係数に関する補正実験を行なった。本報告は先に行なった実験結果と補正実験結果の比較を行なうと共に、前回扱わなかったコンクリートの引張強度および圧縮強度の含水量の影響に関する実験結果を述べたものである。

2. 試験方法

2.1. 試験装置

試験装置は、常温から -160°C の範囲を $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ で制限する液体窒素噴射方式の大型冷却槽、およびこの大型冷却槽と同じ機能を持ち、かつ 200ton の載荷能力をもつアムスラー式万能試験機に取付けた小型冷却槽から成っている。

なお写真-1 に万能試験機に取付けた小型冷却槽の外観を示す。

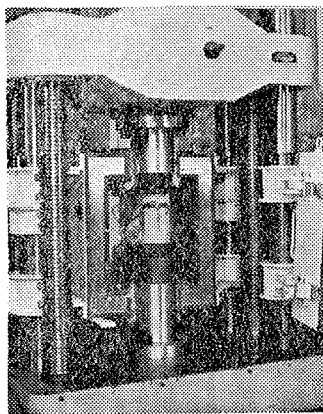


写真-1 低温圧縮試験装置

2.2. 供試体

2.2.1. 配合 使用材料およびコンクリートの配合を表-1, 2 に示す。

	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
圧縮強度試験	普通ポル	渡良瀬川	利根川産川砂利 と秩父産砕石を 重量比1:1で調合	ポゾリス No.5
線膨張試験	トランド	産川砂	最大 粒 径 25mm 荒川産砂利	
引張強度試験 (圧縮強度試験)	セメント	F・M2.86		

表-1 使用材料

	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混和剤 (g)
			水 W(kg)	セメント C(kg)	細骨材 S(kg)	粗骨材 G(kg)	
圧縮強度試験 線膨張試験	56.6	42.9	184	325	762	1026	813
引張強度試験 (圧縮強度試験)	65	44.3	184	283	800	1012	708
	55	42.3	184	335	744	1026	892
	45	40.3	184	409	684	1023	1022

表-2 コンクリートの配合

2.2.2. 材令と養生 供試体はすべて標準水中養生とし、材令は28日で試験を行なった。

但し、水セメント比55%の供試体に関しては、含水量の影響をみるために養生終了後、供試体を絶乾、半乾の状態にし標準水中養生との比較を行なった。絶乾、半乾状態は、48時間、8時間それぞれ炉乾燥させて作成し、試験直前での含水率は絶乾状態に対し、半乾状態は51.6%、標準水中養生では97.9%であった。

2.2.3. 形状寸法 圧縮強度試験および引張強度試験の供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱形とし、各設定温度で3本ずつ線膨張試験は、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の円柱供試体とし、5本作成した。

2.3. 試験の手順

2.3.1. 圧縮強度試験 圧縮強度と静弾性係数の試験は、同一の供試体で行ない、図-1 に示すように常温用ひずみゲージと低温用ひずみゲージを供試体中心軸に対称な位置に2枚ずつ貼着け、両者の値の比較を行なった。

また供試体の温度と圧縮ひずみを測定するためにダミーの供試体を作成し、熱電対2本を埋設し低温用、常温用ひずみゲージを2枚ずつ貼着けた。

供試体を大型冷却槽に入れ、槽内温度と供試体中心温度差が 20°C 以上にならないように冷却速度を操作した。供試体の温度が設定温度になった時点で供試体およびダミーを1本ずつ取出し、小型冷却槽に入れ、供試体が設定温度になってから圧縮試験を行なった。

荷重速度は、毎秒 $2 \sim 3\text{kg/cm}^2$ で $2 \sim 5\text{ton}$ ごとにひずみを読み取った。

設定温度は、常温、 0°C 、 -30°C 、 -60°C 、 -90°C 、 -120°C の6段階とした。

2.3.2. 線膨張試験 カールソン型ひずみ計と熱電対を埋設した円柱供試体を大型冷却槽に入れ、冷却槽内を徐冷し、供試体温度が設定温度になった時点で、ひずみと温度を測定した。設定温度は、常温、 0°C 、 -20°C 、 -40°C 、 -60°C 、 -80°C の6段階とした。

またコンクリートの収縮ひずみを測定するのに先だって、カールソン型ひずみ計の低温較正を行なった。これは、図-2 に示すようにインバール製の拘束治具にひずみ計を拘束して、常温から -80°C の温度範囲で較正を行ない、温度補正係数を求めたものである。

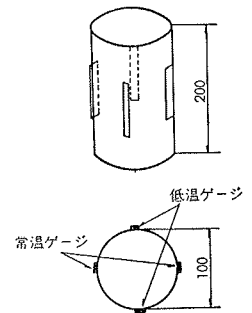


図-1 コンクリート供試体

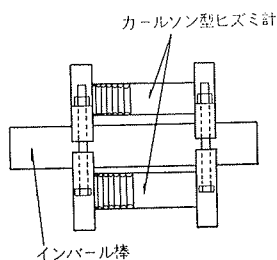


図-2 カールソン型ヒズミ計拘束治具

2.3.3. 引張強度試験 引張強度試験は、円柱形試体を加圧板の間に挟んで軸直角方向に加圧する割裂試験で行なった。載荷速度は、毎分4~5 kg/cm²で、設定温度は、常温、0°C、-20°C、-40°C、-60°C、-90°C、-120°Cの7段階とした。

冷却方法およびその手順は、2・3・1で述べた圧縮強度試験と同様である。供試体は、水セメント比を45%、55%、65%とし、このうち水セメント比55%については、含水状態を絶乾、半乾、湿潤の状態にして試験を行なった。

3. 試験結果および考察

3.1. 圧縮強度

水セメント比56.6%、標準水中養生の供試体の圧縮強度比（常温時に対する低温時の圧縮強度比）と温度の関係は、図-3に示すように0°C以下になると温度が低下するにつれて、圧縮強度が放物線的に増加し、-120°Cでは平均値で約1050 kg/cm²であり、圧縮強度比は約4倍となっている。

また先に行なった圧縮強度試験（普通ポルトランドセメント、水セメント比56.6%、標準水中養生）の結果を図-3に載せ、今回の試験結果と比較すると、前回は供試体温度が-40°C以下のものについては、常温の雰囲気で行なったため、今回の冷却槽内で行なった試験結果より10~20%圧縮強度比は小さくなっており、供試体の温度上昇により圧縮強度が多少減

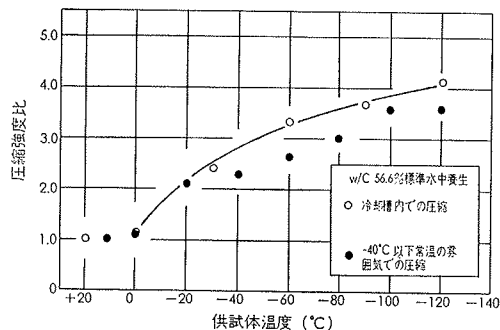


図-3 圧縮強度比~供試体温度

少することが分る。

3.2. 静弾性係数

常温用ひずみゲージと低温用ひずみゲージから得られた静弾性係数（1/3割線弾性係数）と供試体温度の関係は、図-4に示す結果となった。

同図より、静弾性係数は温度の低下と共にほぼ直線的に増加し、-120°Cでは静弾性係数は、5.5×10.5 kg/cm²で常温時の約2倍となっており、常温用ひずみゲージおよび低温用ひずみゲージで測定した静弾性係数は、ほぼ同じ値を示している。これらの結果は、先に行なった試験の静弾性係数の信頼性を裏づけていると考えられる。

なお使用した低温ゲージのゲージ率の変化は、温度低下と共に直線的に増加し、-196°Cで約8%の増加がある。またみかけひずみは、SUS-304に接着した場合³⁾-196°Cで-3100~-3500×10⁻⁶のひずみを示し、そのばらつきは400×10⁻⁶である特性を有している。

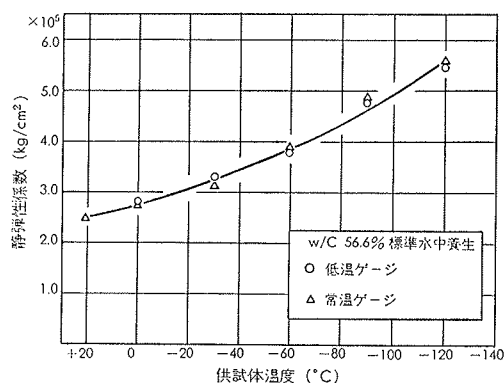


図-4 静弾性係数~供試体温度

3.3. 線膨張試験

カールソン型ひずみ計を用いて温度変化による長さ変化量を測定する場合、ひずみは

$$\epsilon = f\Delta z + b\Delta t$$

但し、 ϵ ：ひずみ f ：較正係数(×10⁻⁶ kg/0.01%)

Δz ：抵抗比変化量 (0.01%)

b ：温度補正係数 (×10⁻⁶/°C)

Δt ：温度変化量 (°C)

で示されるが、低温でしかも温度変化が大きくなると f は一定値でなく、また温度補正項は、 $b\Delta t + c\Delta t^2 + \dots$ とする必要がある。

そこで試験前に行なったひずみ計の較正から得られた f および温度補正係数（一例を表-3に示す）を用いて補正したコンクリートの温度変化に伴うひずみは、図-5のようになった。

この図より分るように、温度の低下にともなってコ

ンクリートは一様に収縮するのではなく、二つの屈曲点が現われる。この屈曲点の間を直線とみなして直線の勾配を線膨張係数と定義すると、表-4 のようになる。このように屈曲点が現われるのは、ほぼ0°Cでコンクリート中の自由水が凍結しはじめ、また-20°C附近ではこの自由水がほぼ完全に凍結することに対応するものと考えられる。

また図-5に前回の試験結果と今回の試験結果の両者を示したが、前回の結果では屈曲点が-30°C附近で現われまたひずみは全体的に大きくなっている。しかし、常温~-20°Cの範囲で線膨張係数は $14.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、今回の試験結果とほぼ一致する。

温度 (°C)	校正係数 f ($\times 10^{-4}/0.01\%$)	温度補正值 b ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	温度補正值 c ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
20	6.47	9.7	0.025
0	6.52	"	"
-20	6.57	"	"
-40	6.62	"	"
-60	6.66	"	"
-80	6.71	"	"

温度 (°C)	線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	
13.3~0.5	0.5	8.13
0.5~-18.8	18.8	13.83
-18.8~-79.5	79.5	4.98

表-4 コンクリートの線膨張係数

表-3 ひずみ計の校正値

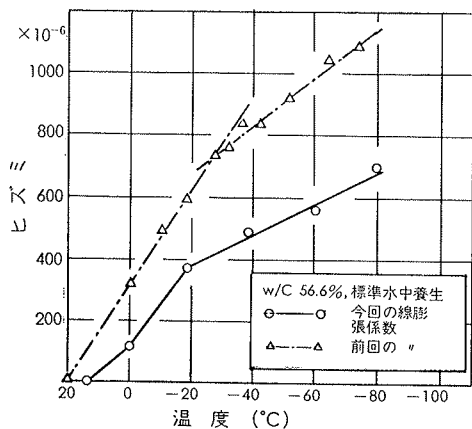


図-5 コンクリートの温度と収縮ひずみ

3.4. 引張強度

図-6は水セメント比をパラメータにとり、温度と引張強度比(低温時の引張強度/常温時の引張強度)との関係を示したものである。引張強度比は低温になるにつれ増加しており、-40°Cまでの伸びは大きい、以後の増加は小さく、-120°Cでは逆に引張強度比は横ばいがあるいは若干減少する傾向が見られる。

また水セメント比が大きいものほど温度低下に伴って引張強度比が増大する傾向にあり、その値は-120°CでW/Cが65%、55%、45%それぞれ3.9、3.5、2.3となっている。

つぎに、引張強度と圧縮強度との比と温度との関係は図-7に示すように強度比は-20°Cまでは増加し、以後温度の低下と共に減少している。また、水セメント比の差による強度比の差異はあまり認められない。

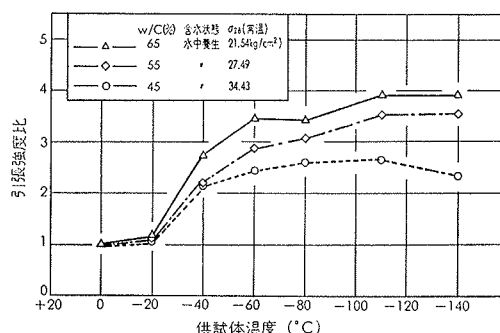


図-6 温度~引張強度比

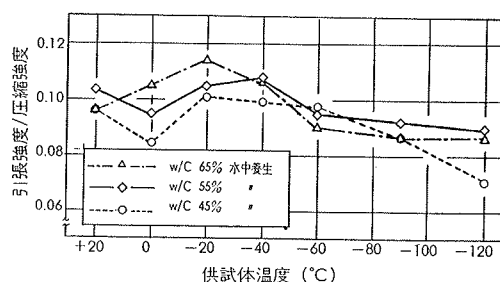


図-7 温度~引張強度/圧縮強度

3.5. コンクリート強度に及ぼす含水量の影響

図-8に水セメント比が55%の供試体について含水状態を変えた場合の圧縮強度比と温度の関係を示しているが、絶乾状態では低温になってもほとんど強度の増加が認められないのに対して湿潤状態では温度の低下と共に強度が増加する傾向が顕著である。また半乾状態では湿潤と絶乾の中間の傾向にある。

つぎに引張強度比と温度との関係は図-9に示すように含水状態に対応して圧縮強度比と同様の傾向にあることが認められる。

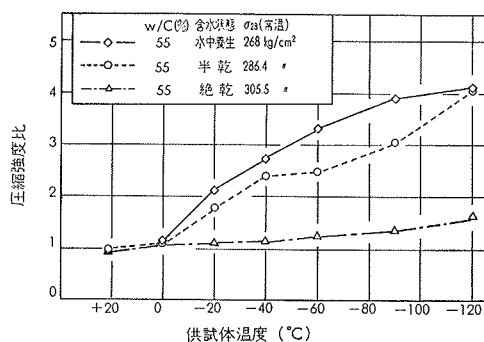


図-8 供試体温度~圧縮強度比

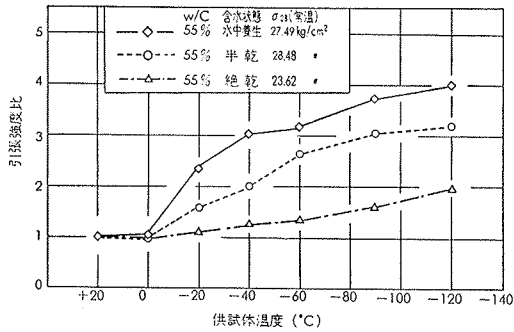


図-9 供試体温度～引張強度比

引張強度／圧縮強度と温度と温度の関係は図-10に示すように絶乾状態では温度の低下と共に若干増加する傾向にあるのに対して、湿潤および半乾状態では横ばいか若干減少する傾向にある。

以上のことからコンクリートの強度は含水状態に相当大きく影響されることがわかる。

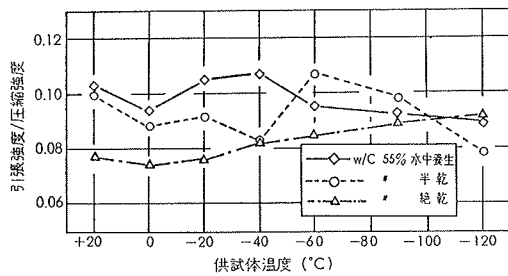


図-10 供試体温度～引張強度/圧縮強度

4. あとがき

本実験結果と先に行なった実験結果を比較することによってつぎのような結果が得られた。

(1) 圧縮強度は0°C以下になると温度の低下と共に放物線的に増加し、W/Cが56.6%では-120°Cで

常温時の約4倍となる。また、常温の雰囲気で行なった試験結果は低温の雰囲気で行なった試験結果よりも10～20%小さい値である。

(2) 一定温度で圧縮ひずみ測定する場合、常温用、低温用いずれのひずみゲージを用いてもほぼ同じ値が得られ、W/Cが56.6%の場合、静弾性係数は温度の低下と共にほぼ直線的に増大し、-120°Cで常温時の約2倍となる。

(3) カールソン型ひずみ計を埋設してコンクリートの線膨張係数を測定する場合、ひずみ計の較正值が使用温度範囲で一定でないため、低温較正する必要があり、低温較正を行なったひずみ計で測定した線膨張係数はほぼ信頼できる値と考えられる。しかし、今回の実験と先に行なった実験の両者の結果を比較すると同様の傾向にあることがわかる。

つぎに引張強度および強度に及ぼす含水量の影響についてはつぎのような結果が得られた。

(4) 引張強度は0°C以下になると圧縮強度と同様に放物線的に増加し、W/Cが55%、水中養生の場合、-120°Cで常温時の約4倍となり、圧縮強度の約1/10値となる。

(5) 含水量の大小により温度の低下に伴う強度増加の割合は顕著な差が生ずる。

参考文献

- 1) 斎藤, 内藤, 上野: LNG 地下貯蔵タンクに関する基礎的研究 (第1報), 大林組技術研究所報, No. 7, (1973)
- 2) 斎藤, 内藤, 上野, 土屋: LNG 地下貯蔵タンクに関する基礎的研究 (第3報), 大林組技術研究所報, No. 10, (1975)
- 3) 山浦義郎: 極低温におけるコンクリート, 木材用ひずみゲージ, 共和技報, MAR. (1975)