

LNG 地下貯蔵槽に関する基礎的研究 (第3報)

—低温領域におけるコンクリートの特性—

齋藤二郎 上野孝之
内藤和章 土屋幸三郎

Study on Underground Storage Tank for Liquefied Natural Gas

—Properties of Concrete at Cryogenic Temperatures—

Jiro Saito Takayuki Ueno
Kazuaki Naito Kozaburo Tsuchiya

Abstract

For the purpose of examination of safety of underground storage tanks for liquefied natural gas, tests with test pieces of $\phi 10 \times 20$ cm to clarify the properties of rigid concrete at cryogenic temperatures were performed. From tests on compressive strength, Young's modulus, durability against thermal shock, and durability against freezing and thawing, the following results were obtained:

- i) At a temperature of -120°C , compressive strength was four times and initial Young's modulus was two times higher than that at normal temperature.
- ii) Regarding durability against thermal shock, compressive strength was down to near fifty percent through ten heat cycles, but at one cycle there was almost no strength reduction.
- iii) There was no tendency recognized of lowering of strength through cycles of freezing and thawing in the atmosphere.

概要

鉄筋コンクリート造のLNG（液化天然ガス）地下貯蔵槽の安全性を検討する目的で、硬化したコンクリートの低温領域における性質について、 $\phi 10 \times 20$ cm の供試体を用いて実験をおこなった。

圧縮強度、ヤング係数、熱衝撃に対する耐久性、凍結融解に対する耐久性に関する一連の実験からつぎの結果を得た。

- i) 圧縮強度は -120°C 程度で、常温時に比べて約4倍に、また初期ヤング係数は約2倍に達する。
- ii) 熱衝撃に対する耐久性は10回の繰返しによって50%近く強度が低下するが、1回の熱衝撃ではほとんど強度低下が認められない。
- iii) 大気中での凍結融解の繰返しでは強度低下の傾向は全く認められない。

1. まえがき

寒冷地等で経験する -20°C ~ -40°C 程度の温度のもとでの硬化コンクリートの性質については、凍結融解に対する耐久性ということに関してこれまで多くの研究例があるが、これ以下の温度領域での性質についてはまだ十分な資料は収集されていない。

このような低温にさらされる建設材料の安全性を確かめる目的で、硬化したコンクリートについて一連の実験をおこなった。

一般に鉄筋コンクリート用コンクリートとして必要な諸性質は材料、配合、練り混ぜ、養生条件から決ま

るが低温領域におけるコンクリートの性質はコンクリート中に含まれる自由水がほとんど支配的であると考

えられている。
ここではその他の影響パラメーターとして温度、水セメント比、セメントを選び、これらの条件を組合わせて、円柱供試体 ($\phi 10 \times 20$ cm) を用いて圧縮強度、熱衝撃に対する耐久性、凍結融解に対する耐久性に関する試験をおこなった。

2. 試験方法

2.1. 使用材料

セメントは普通ポルトランド、早強ポルトランド、

およびB種高炉の三種類を用いた。

細骨材は鬼怒川産の川砂 ($M_s=2.5\text{mm}$, F. M. = 1.69) を, 粗骨材は最大寸法が 25mm で利根川産の川砂利と秩父産の碎石を混合したものを使用した。

混和剤は凝結遅延, 減水剤としてポゾリス No. 8 を用いた。

2.2. 配合

コンクリートの配合は表-1 に示しており, スランブが $18\pm 1\text{cm}$, 空気量が $4\pm 1\%$ になるよう傾胴式ミキサーを用いて練混ぜた。なお, 表中の試験番号 A, B, C は圧縮強度試験に, D は熱衝撃試験に, E は凍結融解試験に供したものである。

セメントの種類	試験番号	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	水 W (kg)	セメント C (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 G (kg)	混和剤 (g)
普通セメント	ADE-1	65	44.3	184	283.1	793.2	997.5	707.8
	ADE-2	56.6	42.9	184	325.0	762.0	1026.0	812.5
	ADE-3	45	40.3	184	408.9	679.1	1007.2	1022.3
早強セメント	B-1	65	43.3	186	286.2	738.0	966.0	715.5
	B-2	56.6	41.9	186	328.6	699.0	969.0	821.5
	B-3	45	39.3	186	413.3	628.0	969.0	1033.3
高炉セメント	C-1	65	44.3	181	278.5	761.0	956.0	905.2
	C-2	56.6	42.9	181	319.8	721.0	960.0	1039.4
	C-3	45	40.3	181	402.2	649.0	961.0	1307.2

表-1 コンクリートの配合

2.3. 供試体

$\phi 10\times 20\text{cm}$ の円柱形供試体とし, 同一条件の試験で3本作成した。また温度と圧縮ヒズミを測定するために, ダミーの供試体を作成し, 図-1 に示す位置に温度計 (C_u-C_0 熱電対) とヒズミゲージを設置した。

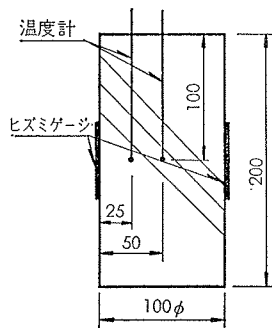


図-1 供試体

2.4. 材令と養生

圧縮強度および熱衝撃試験用供試体については標準水中養生とし, 材齢28日で試験をおこない, 凍結融解試験用供試体については湿砂養生とし, 材齢90日で試験をおこなった。これは試験の期間が長くなることを考慮したものである。

2.5. 試験装置

試験装置は常温から -160°C の範囲で $\pm 2^\circ\text{C}$ の精度をもって制御できる低温槽と, 載荷能力が 60ton の圧縮装置から構成されており, 低温の雰囲気中で圧縮試験

ができるという特徴を持っている。

なお, 装置の外観は写真-1 に見られるようなものである。

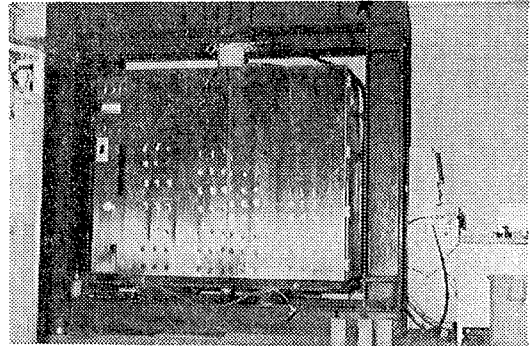


写真-1 試験装置

2.6. 試験内容と手順

2.6.1. 圧縮強度試験 圧縮試験は常温, 0°C , -20°C , -40°C , -60°C , -80°C , -100°C , -120°C の各温度でおこなった。

供試体の冷却は液化窒素を冷媒とする低温槽内でおこない, 埋設した温度計によって所定の温度になったことが確認できた時点で試験した。また冷却速度は供試体内外の温度差が常に 20°C 以上にならないように操作した。

なお, $-40^\circ\text{C}\sim -60^\circ\text{C}$ 以下の温度になると圧縮強度が装置の載荷能力 (60ton) をうわまわるものができたので, この場合には供試体を低温槽から取出して断熱材 (グラスウール) で包み, アムスラー (200ton) で試験した。

2.6.2. 熱衝撃試験 急激かつ大きな温度変化をつぎの方法で与えた。すなわち, 供試体を液化窒素に浸液し, 温度計によって供試体内温度が -190°C 付近でほぼ一様となったことを確認した後取出し, 直ちに水槽内に入れ水温 (常温) と等しくなるまで放置する。これを熱衝撃の1サイクルとし, サイクル数は 1, 2, 3, 5, 7, 10回とした。

所定回数の凍結融解が終了した時点でクラックの観察と圧縮試験をおこなった。

2.6.3. 凍結融解繰返し試験 凍結融解に対する耐久性の試験は一般に相対動弾性係数を測定する方法がとられているが, ここでは圧縮強度によって耐久性を論ずる方法をとった。また凍結融解サイクルについては現実の問題として, それほど多くの繰返しを受けることは予想されず, むしろ緩速の冷却速度で大きな温度幅の繰返しに主眼を置くことが妥当と考えられる。

そこで, 凍結融解は低温槽内で常温と -40 , -80 ,

-120°C の3種類の範囲でおこない、くり返し回数はそれぞれ1, 5, 10回とした。

3. 試験結果とその考察

供試体は配合条件の異なったものを数回にわたって作成しているが、コンクリートは打込時の諸条件によって品質が異なることが考えられるため、供試体の良否を判定する意味で水セメント比と28日強度の関係を比較してみた。両者の関係は図-2に示すようにほぼ直線関係にあり、セメントの種類、水セメント比、温度をパラメータとして比較検討することの意義が認められる。

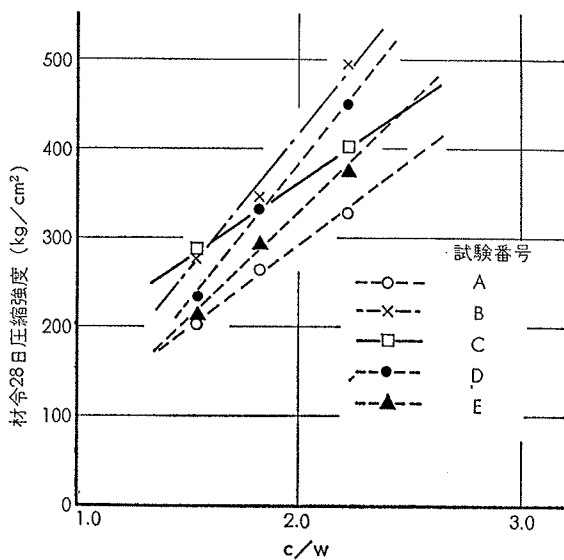


図-2 C/W $\sim\sigma_{28}$ の関係

3.1. 圧縮強度

供試体の冷却は図-3に示すような速度でおこなった。全供試体についてほぼ同様の条件で冷却しており、

また供試体表面と中心部との温度差を20°C以内に保っているため、温度応力による引張キレツはなく、圧縮強度に及ぼす影響はないものと考えられる。

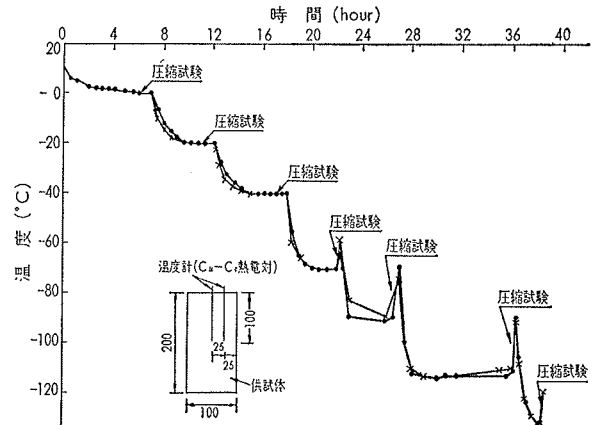


図-3 供試体冷却速度

試験の結果は常温時の圧縮強度に対する低温時の圧縮強度の比を圧縮強度比と称し、この圧縮強度比で整理した。図-4に各種セメントについて水セメント比をパラメーターにとり、圧縮強度比と温度の関係を示した。供試体温度が低下するに従って圧縮強度比は増加し、増加のし方は放物線的で、圧縮強度比は2.0~4.0の値に漸近している。

つぎに水セメント比の差による圧縮強度比への影響は、試験A(普通セメント)ではW/C=65, 56.6%の両者でほとんど差がなく-120°Cでの圧縮強度比は約4.0でありW/C=45%の場合には圧縮強度比の増加率は小さく、-120°Cの値は約2.0である。

試験B(早強セメント)では水セメント比の差の影響はほとんど表われていない。

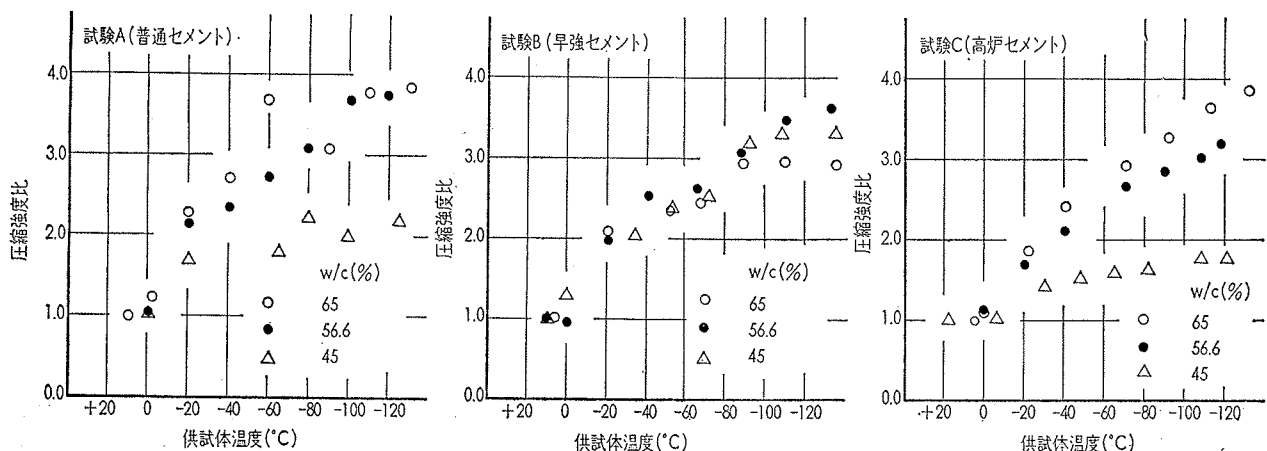


図-4 供試体温度 \sim 圧縮強度比

試験C（高炉セメント）では水セメント比の差の影響が圧縮強度比の増加率にはっきり表われており、水セメント比が大きいほど増加率は大きい。

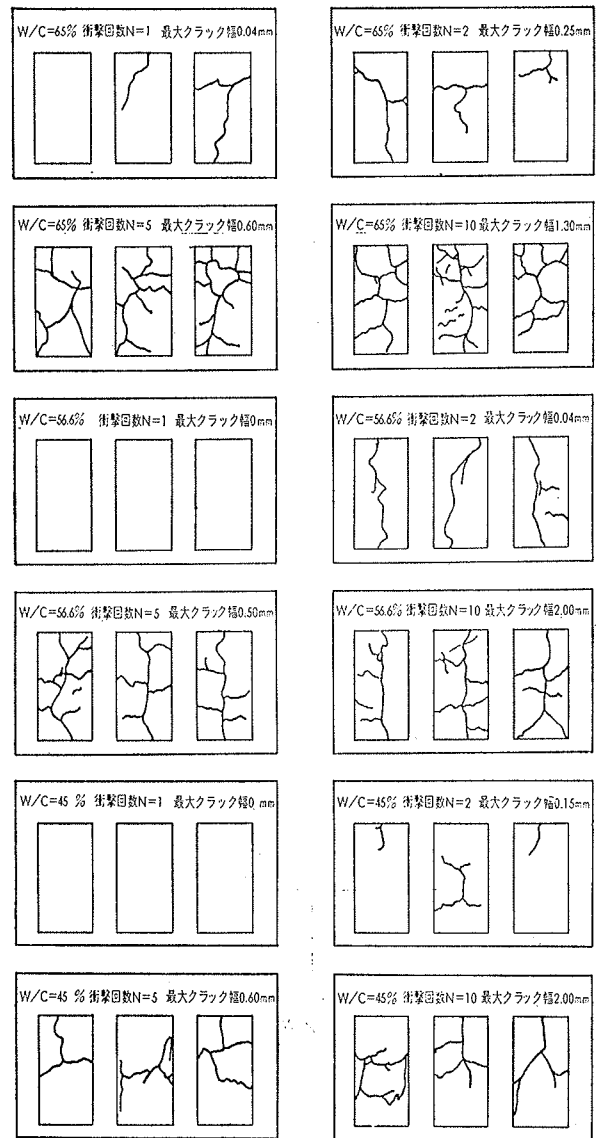
また、セメントの種類による圧縮強度比の差異はほとんどなく、1.0～4.0の間にある。

したがって圧縮強度比の差異が生ずる要因としては、単位水量をほぼ一定としているので、配合のうち細骨材料、セメント量などが考えられる。この実験ではセメント量が少ないほど、また細骨材率が小さいほど凍結したコンクリートの温度低下に伴う圧縮強度の増加割合が大きいという結果が得られた。

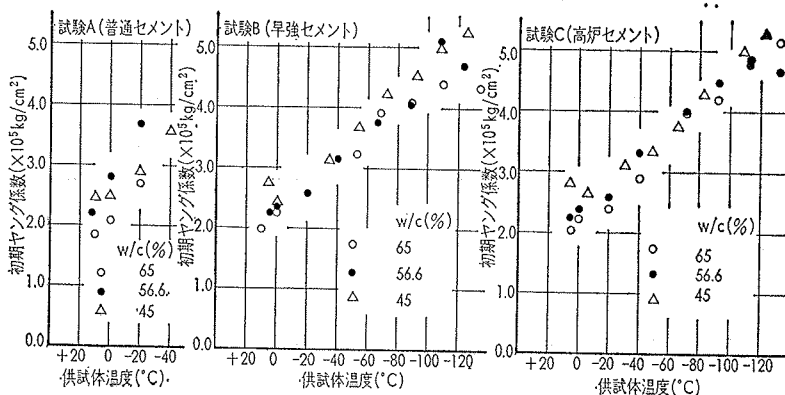
図一5は縦軸に初期ヤング係数を、横軸に温度をとったものであるが、セメントの種類に無関係に初期ヤング係数は温度の低下に伴ってほぼ直線的に増加し、 -120°C 程度で常温の約2倍となっている。また水セメント比の差が温度変化に対応するヤング係数の差にほとんど影響を与えないことがわかる。

3.2. 熱衝撃に対する耐久性

衝撃試験が終了した時点での供試体表面に発生したクラックの状況は図一6に示すように、衝撃回数が増加するにつれてクラックの数と幅が増大し、劣化が進行していく過程がよくわかる。この試料について圧縮試験をおこなった結果は図一7に示すように、熱衝撃の繰返し回数が多くなるに従って圧縮強度比は減少する傾向を示し、水セメント比が65, 55.6%の場合にはほぼ直線的に減少しており、衝撃回数 $N=10$ で圧縮強度比は約0.4になっている。これに対して水セメント比が45%の場合には衝撃回数が多くなるに従って圧縮強度比は減少するが、減少のし方は前2者と異なり $N=10$ で圧縮強度比は0.75と減少率は小さい。水セメント比と圧縮強度比の関係は明らかでないが、少なくとも高強度のものほど、すなわち水セメント比の小さいものほど熱衝撃に対する耐久性にすぐれていると



図一6 試験後の供試体の状態



図一5 供試体温度～初期ヤング係数

いえる。また1回の熱衝撃ではコンクリートの耐久性にほとんど影響を与えないようであるが、ここでは円筒状供試体でかつ無拘束の状態での熱衝撃であり、拘束がある場合には異なった結果が得られることが予想される。

ただし、熱衝撃に対する耐久性の評価を圧縮強度でおこなうことが妥当かどうかは問題はあるが、少なくとも短期間の構造物の安定性を圧縮強度で議論することの意義はあると思われる。

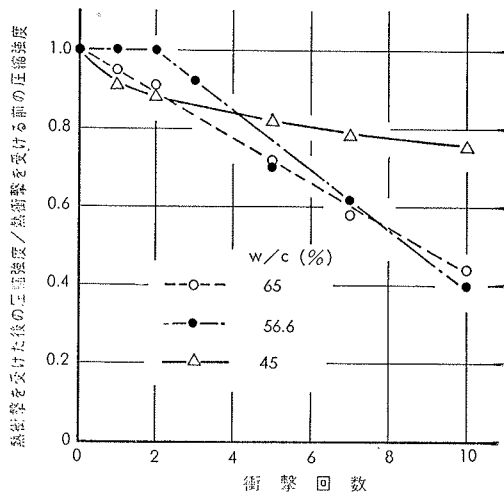


図-7 熱衝撃に対する耐久性

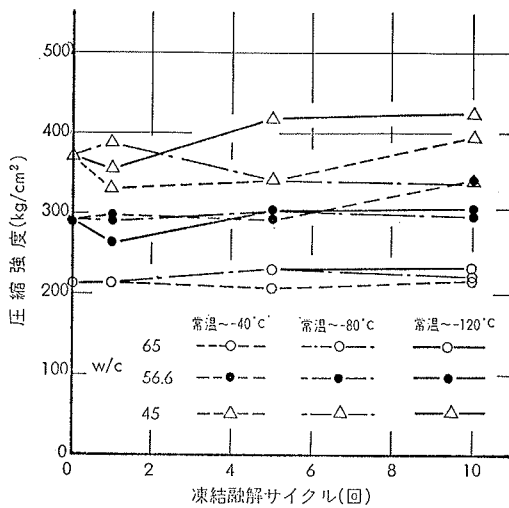


図-8 凍結融解に対する耐久性

3.3 凍結融解試験

試験の結果を図-8に示した。この図は凍結融解のくり返し回数と圧縮強度との関係を表わしており、どの温度範囲の凍結融解サイクルにおいても強度が低下する傾向は全く認められない。また水セメント比の差による耐久性の差異も全く認められない。

凍結融解作用によるコンクリート劣化の主要因は外部から浸透する自由水にあり、コンクリート自体が保持している自由水のみによってはその劣化はあまり影響されない⁽¹⁾、という結果と一致する。

また凍結融解の速度にも影響を受けることが予想されるが、この実験では供試体内外の温度差を常に20°C程度に保って徐冷したことも劣化傾向が認められない一つの要因と考えられる。

4. あとがき

凍結したコンクリートの性質はほとんど含水量が支配的であるといわれており、本実験においても同様の傾向が得られたが、ここでは含水量以外の要因、すなわちセメント量、セメントの種類に着目し、この要因が凍結したコンクリートの性質に及ぼす影響を調べた。

その結果これらの要因による差は認められたが、影響ファクターのすべてについて調べていないので、これが実用上どの程度の工学的意味をもつかは明らかでない。

しかし、従来からいわれている低温にさらされる構造物材料にコンクリートを用いることの不都合さはないと考えられる。

参考文献

- 1) 永倉正：コンクリートの配合条件が凍結抵抗性におよぼす影響に関する基礎的研究，土木学会論文集，第98号，昭和38年10月