

正会員 ○三浦 尚 (東北大学)

正会員 後藤幸正 (東北大学)

正会員 小島 宏 (東北大学)

1. まえがき

近年、公害の少ないエネルギーとして天然ガスの使用が増え、それに伴ない液化天然ガスの貯蔵用タンク、あるいは運搬用船舶を経済的に作る技術が必要とされている。液化天然ガスは、温度が -162°C と大変低いため、今日まではそれらを作る材料としては鋼材が多く用いられていたが、経済性の点から鉄筋コンクリート、あるいはプレストレストコンクリート製のものが使われるようになった。コンクリートをこのような分野で使用するためにはいろいろ問題となることがあるが、その一つは、液化天然ガスを出し入れするためにコンクリートに急激な温度変化のくり返しが生じ、場合によってはコンクリートが劣化するということが考えられる点である。この問題は、液化天然ガスの貯蔵用タンク、あるいは運搬用タンク等の主構造物にだけ生じるのではなく、例えばタンクの外側に設けられる非常時のための防液堤、輸送パイプを保護する鉄筋コンクリート溝等の二次的な構造物においても考慮されねはならないものである。

一方この分野における従来の研究は、極低温下におけるコンクリートの性質に関するものが主であり、極低温の繰返しによる劣化に関するものは少ない。さらに若干行なわれている劣化に関する研究も、ある一定の条件のもとに行なわれたものが主であり、条件によっては問題がありそうであるということのみしか判定できない程度のものである。したがって、この分野のより深い研究が必要であると思われる。

本報告は、以上のことから、筆者らが行なっている、繰返し冷熱衝撃を受けたコンクリートの性状に関する研究の内から、主に、コンクリートの配合や含水量の偉いがコンクリートの劣化の進み方に与える影響、およびコンクリートが急冷された時の長さ変化に与えるコンクリートの配合や冷却速度の影響、について取りまとめたものである。

2. 実験材料およびコンクリートの配合

実験に使用したセメントは、早強ポルトランドセメント、細骨材は川砂（比重 2.52 、吸水量 2.50% ）、粗骨材は碎石（比重 2.86 、吸水量 0.76% ）。使用した混和剤は、ホリアルキルアリルスルホン酸塩を主成分とする減水剤、および天然樹脂酸塩を主成分とするAE剤である。

使用したコンクリートの配合は、表-1に示すように、水セメント比が 26% ～ 56% まで4種類、空気量は 2% と 6% との2種類とした。

3. 実験方法

表-1 使用したコンクリートの配合一覧表

(1) 繰返し冷熱衝撃試験

繰返し冷熱衝撃試験では、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の角柱供試体を使用し、これを液体窒素（ -196°C ）を満たした容器の中に漬けて急激に冷却して熱衝撃を与えた。供試体の中心温度が -196°C になった後、取り出して

配合 No.	粗骨材 の 最大寸法 (mm)	スランパ の 範囲 (cm)	空気量 の 範囲 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)									
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗 骨 材 G				混 和 剤		
									20mm 25mm	15mm 20mm	10mm 15mm	5mm 10mm	減水剤	A E 剤	
1	25	11±1	2±0.5	56	42	194	346	710	224	415	168	318	-	-	
2	25	11±1	6±0.5	56	40	170	304	678	231	427	173	324	-	0.152	
3	25	11±1	2±0.5	46	40	165	359	706	240	444	180	356	21.5	-	
4	25	11±1	6±0.5	46	38	154	355	650	241	445	181	337	20.1	0.235	
5	25	11±1	2±0.5	36	37	155	431	641	247	458	186	346	51.7	-	
6	25	11±1	6±0.5	36	35	135	375	604	255	471	191	356	45.0	0.375	
7	25	11±1	2±0.5	26	35	156	600	557	235	435	176	329	9.00	-	
8	25	11±1	6±0.5	26	33	137	527	527	243	450	182	340	7.91	0.791	

水中または空気中で常温にもどした。このように供試体を冷却して常温にもどすのを冷熱衝撃の1サイクルとし、1日1サイクルの割合で繰返し衝撃を与え、劣化の進みぐあいを測定した。なおこの場合、供試体を -19.6°C まで冷却するのに約30分を要し、その後 0°C にもどるのに、 20°C の水中では約35分、 20°C の空気中では約6時間を要した。そしてこの関係は、コンクリートの配合や含水量にかかわらず、いずれの供試体でもほぼ一定であった。

劣化の程度の判定は、供試体の動弾性係数を測定することによって行なった。測定は冷熱衝撃1サイクルごとに供試体中心温度が常温にもどった後に行ない、冷熱衝撃を受ける前の値に対する相対動弾性係数で示した。結果は3本の供試体の平均値で表わした。実験は冷熱衝撃30サイクルまで続け、その前に相対動弾性係数が60%を割る場合には、その時点で打ち切ることにした。なお、あらかじめ、冷熱衝撃を受けた角柱供試体の動弾性係数と円柱供試体の圧縮強度とを比較し、ほぼ同様の傾向を示すことが確かめられている。

コンクリートの配合と劣化との関係を求める測定では、表-1に示す8種類の供試体を28日間水中養生した後、そのまま上記の方法で熱衝撃を与え、常温にもどすのは水中に放置して行なった。

含水量と劣化との関係を求める測定は、表-1の供試体No.1、5、7の3種類について行ない、28日間水中養生後、 110°C の乾燥炉でその乾燥時間に差をつけることによって含水量を変化させた。含水量は水中養生のままのものを含めて、W/Cが56%の供試体では5段階に、他は4段階に、それぞれ変化させた。そしてこれらの供試体は熱衝撃を与えた後、水中養生のままのものは水中に、他のものは空気中に放置して常温にもどした。この際、空気中に放置した供試体では、試験中の含水量の変動を防ぐため冷却後直ちに供試体全体をアルミ箔で包み、霜の付着および水分の蒸発を防止した。この結果、試験中における含水量の変動はほとんど無視できるほど小さく抑えることができた。試験終了後、すべての供試体を乾燥炉で乾燥させ、含水量を求めた。なお冷却後常温にもどす場合、水中であつても空気中であつてもコンクリートの劣化にはほとんど影響が無いことはあらかじめ調べてある。

(2) 歪測定試験

歪測定試験では、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の角柱供試体を使用し、急冷した時のコンクリートの歪変化を低温用歪ゲージで測定した。供試体には、歪ゲージの他、中心および表面に温度計を埋設しておき、歪と同時に温度も連続的に記録して、測定歪の温度補正に用いた。

以上のような方法で、水セメント比や含水量の異なる供試体によって歪変化の様子を調べる外、供試体に断熱材を巻くことによって、冷熱衝撃を緩和した（冷却速度を遅くした）時の影響についても求めた。

4. 実験結果および考察

(1) 繰返し熱衝撃試験

コンクリートの配合と冷熱衝撃による劣化状況との関係を図-1に示す。

これは、いずれもコンクリートが湿潤状態にある場合のものであり横軸には加えた冷熱衝撃のサイクル数を、縦軸には相対動弾性係数を表わしている。また図中の点線は、空気量が約6%のAEコンクリートを、実線はNon-AEコンクリートを示す。

これを見ると、コンクリートは

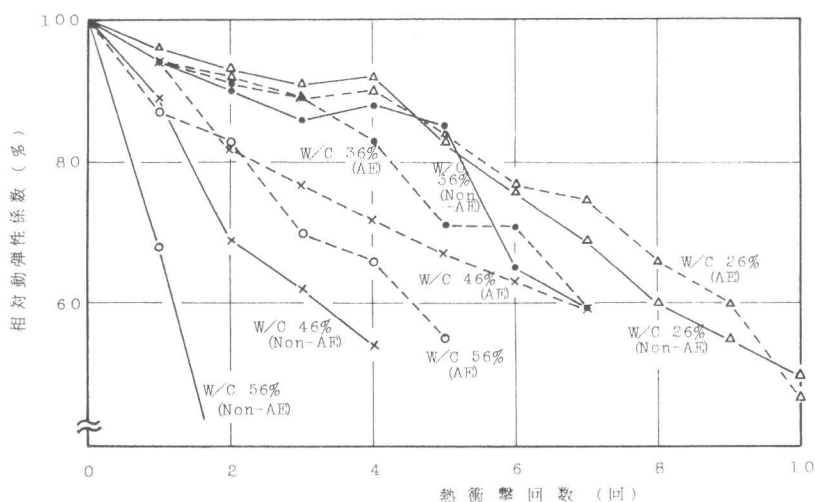


図-1 冷熱衝撃による劣化状況と配合との関係

極低温の熱衝撃を受けると、弱いものでは数回繰り返された程度で劣化し、特に、水セメント比が5.6%程度のものであれば、Non-AEコンクリートの場合、1回の熱衝撃でもかなりのダメージを受けることがわかる。

一般的な傾向としては、水セメント比が小さくなるにしたがつて劣化が進みにくくなり、また、同じ水セメント比の場合にはAEコンクリートにした方が耐久性が上がるのがわかる。しかし、AEコンクリートにすることによる耐久性の増加の程度は、普通の凍害に対する増加の場合に比べてずっと小さく、特に水セメント比が3.6%より小さい供試体では効果は小さくなる。

図-2～4には、各水セメント比のコンクリートにおいて、含水量を変化させた時の冷熱衝撃による劣化状況を示す。

これによると、一般的に言って、含水量が少なくなるにしたがつてコンクリートは劣化しにくくなり、またその様子は、湿潤状態から1%程度含水量が減少しただけで冷熱衝撃に対する耐久性は飛躍的に増大するのに対し、それ以上含水量が減少しても最初の1%の場合と比べて耐久性に与える影響は大きくない。

図-2～4の結果と図-1の結果

とを比較してみると、冷熱衝撃を受けるコンクリートの劣化の進みぐあいは、コンクリートの水セメント比、空気量、等によってもかなり影響を受けるが、コンクリート中の含水量による影響はそれらに比べてずっと大きいことがわかる。

以上のことから、冷熱衝撃を受けるコンクリート構造物の設計を行なう際には、その構造物が受ける熱衝撃の程度によつて水セメント比を決め、場合によつてはAEコンクリートとする等の注意が必要であるが、一番大切なことは、その構造物が湿潤状態にあるのか乾燥状態にあるのかを正しく判断して、それに対する配慮をすることであるということがわかる。

特に冷熱衝撃を受ける可能性のある二次的な構造部材、例えば液化天然ガスタンクの防液堤や輸送パイプが通る鉄筋コンクリート製の溝、等の設計においては、特別な断熱材は用いられないことも多く、コンクリートの水セメント比も比較的小さいと考えられるので、この点について十分注意しなければならない。

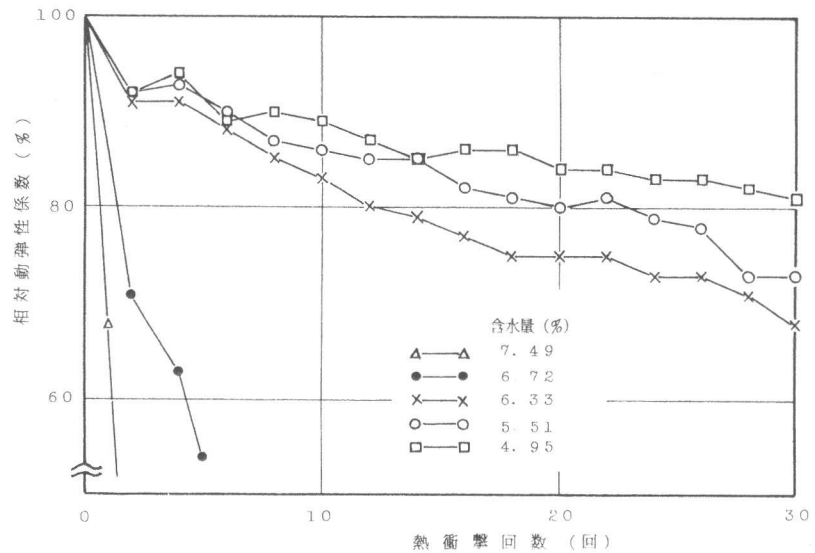


図-2 冷熱衝撃による劣化状態 (W/C 5.6%, 配合率1)

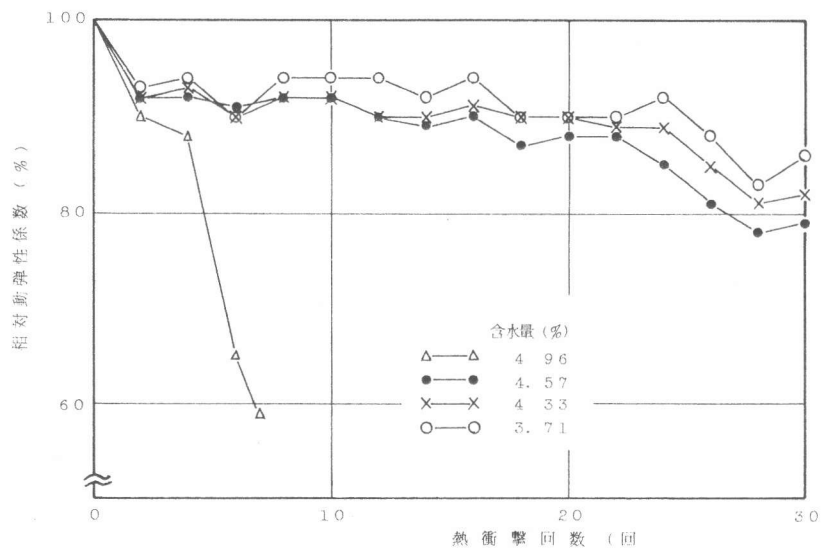


図-3 冷熱衝撃による劣化状態 (W/C 3.6%, 配合率5)

(2) 歪測定試験

冷熱衝撃を受けたコンクリートの歪の変化の測定結果を図-5に示す。温度が変化するコンクリート供試体の歪を求めるためには、歪ゲージ自体の温度特性の影響を除くため、低温用歪ゲージによって得られた歪の測定値をその時その時のゲージの温度を用いて補正してやる必要がある。したがって、図中の縦軸は、補正した後のコンクリートの収縮歪である。横軸には、本来ならば供試体の平均温度を示すのがよいのではあるが簡単のため、ここでは供試体表面の温度を示した。

また、一部の供試体には冷却速度を遅くするために、表面に2mmの発泡ポリエチレンを巻いて実験を行なったが、その際供試体中心温度が -196°C になるのに約4時間を要した。

この結果から、コンクリートは冷却されるにしたがって収縮するが、零下数十度で一度膨脹して再び収縮することがわかる。これは含水量を減少させた供

試体ではこの膨脹は現われていないことから、その付近の温度でコンクリート中の水分が凍結膨脹するためであろうと思われる。そして、この膨脹の一部は、常温にもどした時に残留膨脹として残り、これが耐久性にも関係すると思われる。含水量を減少させた供試体では、 -196°C の時の収縮量が大きくなるが、これは上記の膨脹が少ないためであろうと思われる。W/Cの小さいものでも -196°C の収縮量は大きくなっているが、これもW/Cの小さいコンクリートの強度が大きいため上記の膨脹量が小さかったためと思われる。断熱材がある供試体では、冷却速度が遅くなるため、コンクリートの組織を破壊するような急激な膨脹は小さくなり、そのため -196°C での収縮量が大きくなって耐久性も上るものと思われる。¹⁾

なお、この研究は文部省科学研究補助金を受けて実施されたものである。

参考文献1)：三浦尚，小島宏，渡部直人：繰返し極低温にさらされたコンクリートの劣化に関する研究，セメント技術年報32，1978。

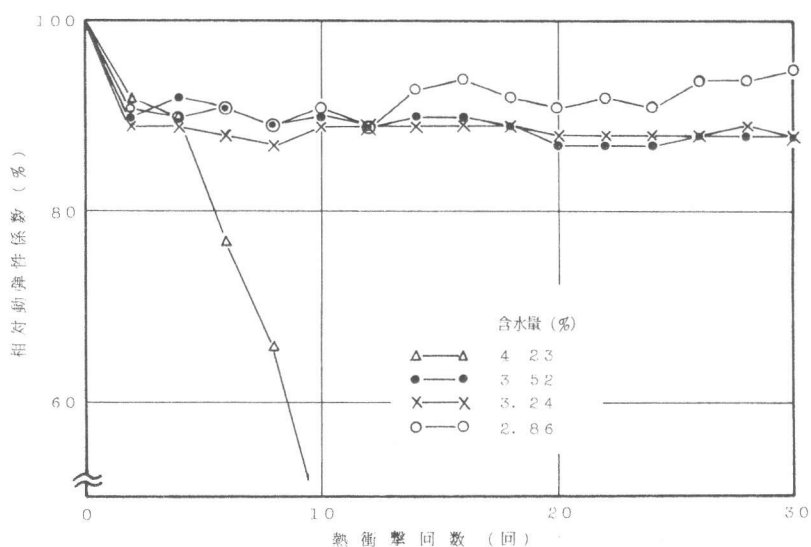


図-4 冷熱衝撃による劣化状態 (W/C 2.6%, 配合系7)

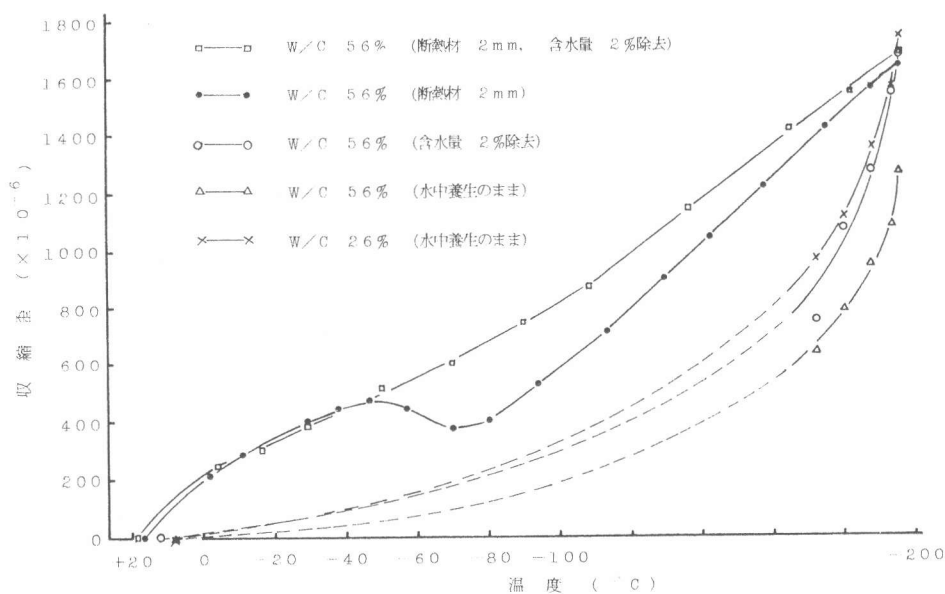


図-5 歪測定試験の結果 (水セメント比 含水量、冷却速度の影響)