

論文 極低温下における温度保持がコンクリートの劣化に与える影響

韓 相黙^{*1}・岩城一郎^{*2}・三浦 尚^{*3}

要旨：コンクリートは、常温から極低温まで繰り返し冷却されると劣化する。その劣化に影響を与える原因は様々であり、その一つに冷却中の温度保持が挙げられる。したがって、本研究では極低温下における温度保持がコンクリートの劣化に与える影響について検討した。その結果、極低温下における温度保持はコンクリートの劣化に影響を及ぼすことが分かった。また、その影響はW/Cが高い方が、また空気量が少ない方が顕著に現われた。さらに、温度を保持する時間がある程度以上長くなると、保持時間の長さはコンクリートの劣化にそれほど影響を及ぼさないことも明らかになった。

キーワード：極低温、温度保持、劣化、相対動弾性係数、ひずみ挙動

1. はじめに

コンクリートは一般的に極低温下で十分な性能を発揮できる材料であることが知られており、近年、極低温にさらされる構造物の主要な建設材料として用いられている。このような環境にさらされる構造物として極寒地に建設されるものが挙げられるが、極寒地以外でも同様な環境にさらされる構造物が数多く建設されつつある。

その代表的な構造物として、LNGの貯蔵タンク等が挙げられる。LNGは豊富な埋蔵量、低公害等の利点から、石油の代替エネルギーとして注目されており、今後LNG貯蔵タンク及びその二次的構造物の建設が増加すると考えられる。

さらに、将来超電導技術が実用化されれば、超電導を応用した電力貯蔵システムの関連施設等に、経済的及び耐久性に優れたコンクリートが使用される可能性が高い。従って、このような極低温にさらされるコンクリートの物性及び挙動を調べることは極めて重要である。

極低温におけるコンクリートの物性は、常温のときと比べかなり異なり、温度が低下するにつれて大きく変化する。このような変化は主にコンクリート中の水分が凍結することによって起こる。

一方、コンクリートは温度が下がると収縮または膨張の体積変化をし、常温と極低温の繰り返しを受けると内部水分の凍結時に生じたクラックによって劣化する。三浦ら¹⁾やRostasyら²⁾の研究結果によると、コンクリートは冷却される際、劣化に最も関連すると思われる大きな膨張は、約 -20°C から -50°C の温度範囲にかけて起こる。さらに、コンクリートの大きな膨張がみられなかった -70°C においては保持の影響が観察されなかった³⁾。

本研究では冷却による劣化の影響が最も現われると予想される -40°C 及び -50°C で一定時間温度保持し、その影響を調べた。実験にあたっては水セメント比や空気量の異なる様々な配合を対象として、各配合の温度保持の影響を調査した。

*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

*3 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

実験に使用したセメントは早強ポルトランドセメント(比重3.13, 比表面積4,540 cm²/g), 細骨材は宮城県大和町鶴巣産山砂(比重2.53, 吸水率2.64%, 粗粒率2.71%), 粗骨材は宮城県丸森町産碎石(比重2.85, 吸水率0.98%, 最大寸法25 mm)である. コンクリートの配合を表-1に示す.

実験に使用した供試体の寸法は10×10×40cmの角柱供試体であり, コンクリートの打設時に温度測定用の供試体には熱電対を埋設して, 全供試体を28日間水中養生した.

その後, ひずみ測定用供試体には, 表面にひずみゲージを貼付し, ひずみゲージに防湿効果も兼ねた外気からの断熱処理を施した.

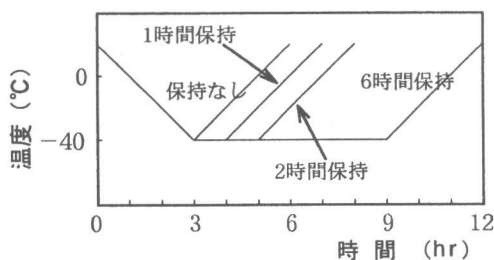
2.2 冷却及び測定方法

まず, 極低温恒温恒湿器内に供試体を收容し, 図-1に示すように, 供試体を常温から冷却最低温度である-40℃及び-50℃まで冷却し, その最低温度に達すると直ちに所定の時間供試体温度を一定に保持した後, 常温まで戻した. これを1サイクルとし, 40サイクルまで行った.

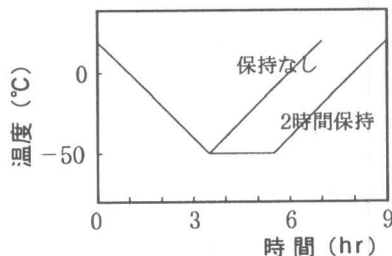
5サイクルごとに一次共鳴振動数から算出した相対動弾性係数を劣化の指標とし, また, 初期5サイクルまでひずみ挙動を測定した. 供試体の冷却加熱は全て空気中で行ったものであり, 平均冷却速度は約0.33℃/min, 平均加熱速度を約0.29℃/minとした. 0℃以上における極低温恒温恒湿器内の湿度を98%に設定し, 各サイクル毎に水分を供給した.

表-1 コンクリートの配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混和剤 (g/m ³)	
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤	空気量調整剤
25	11±1	2±0.5	46	38	180	391	654	1194	978	—
25	11±1	4±0.5	46	38	171	372	670	1185	930	26.04
25	11±1	2±0.5	56	40	180	321	711	1194	803	—
25	11±1	4±0.5	56	40	171	305	705	1181	763	21.35
25	11±1	6±0.5	56	40	160	286	697	1179	286	45.76
25	11±1	2±0.5	66	45	180	273	818	1116	546	—
25	11±1	4±0.5	66	45	171	259	810	1106	518	12.95
25	11±1	6±0.5	66	45	160	242	800	1100	363	24.20



(a) -40℃での温度保持



(b) -50℃での温度保持

図-1 冷却加熱条件ごとの温度履歴

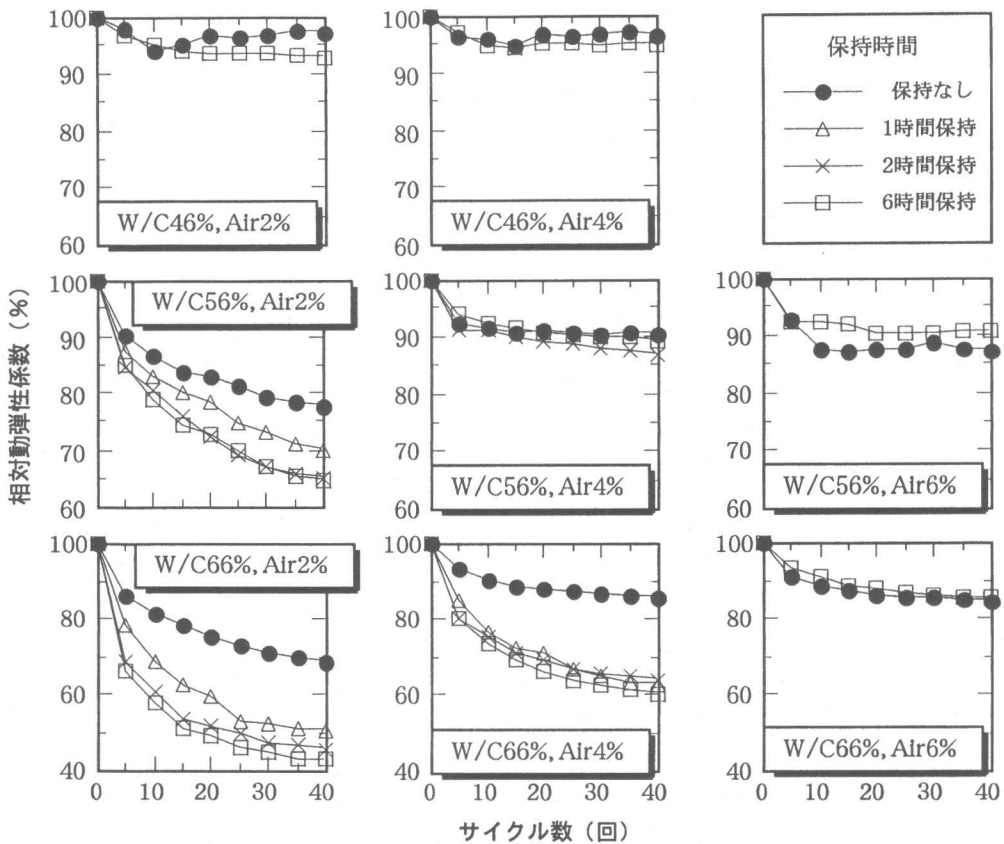


図-2 各配合における相対動弾性係数

3. 実験結果及び考察

3.1 -40℃における温度保持の影響

実験に用いた8種類の配合に関する各保持時間における相対動弾性係数の変化を図-2に示す。これらの温度履歴は図-1(a)に示された-40℃にて保持を行ったものである。グラフ上の1点は、供試体3個の平均値である。サイクルを繰り返すに従って全体的に相対動弾性係数が低下した。W/C46%の配合や空気量6%の配合のコンクリートではその低下が小さいのに対し、W/C56%空気量2%とW/C66%空気量2, 4%ではより大きく低下した。また、W/C56%空気量2%とW/C66%空気量2, 4%のコンクリートは温度保持を行うことによりその低下の傾向は非常に激しくなっていることが分かる。つまり、温度保持の影響はW/C

が高く、また空気量が少ないほどより顕著に現われる。さらに、W/C56%及びW/C66%の空気量2%に注目すると2時間温度保持した場合と6時間保持した場合の相対動弾性係数の低下の傾向がほとんど変わっていない。

保持時間の長さによる劣化の程度を比較するため、横軸を保持時間の長さ、縦軸を40サイクル終了時における相対動弾性係数の値として比較したのが図-3である。この図より注目すべきことは、W/C56%空気量2%及びW/C66%空気量2, 4%の配合に対して温度保持を行うと相対動弾性係数の低下が非常に激しく、わずか1時間で温度保持の影響が明確に現われる点である。また、保持する時間を6時間にしても相対動弾性係数の低下は2時間保持したものと同様横ばいになっていることから、-40

℃での温度保持は2時間ぐらいで劣化の増加量が頭打ちになるであろうと考えられる。しかし、W/C46%の各配合、W/C56%空気量4、6%及びW/C66%空気量6%の場合は、相対動弾性係数が温度保持の有無にかかわらずほぼ等しくなっているため、保持の影響は無視できる程度まで小さくなるといえる。さらに、相対動弾性係数は85%を上回る非常に高い値を示している。また、W/Cが一番低い46%の場合は、空気量にかかわらず非常に高い耐久性を示し、それらの相対動弾性係数の値がほぼ同じであり、6時間保持を行ってもその値の変化はみられなかった。従って、本実験の条件下ではW/C46%の配合について、温度保持の影響が小さいと考えられたため、6時間以外

の保持の影響は調べなかった。

図-4は相対動弾性係数の測定結果から最も劣化したW/C66%に対し、保持なしと6時間保持したものの1サイクル目と5サイクル目のひずみ挙動の比較を示したものである。

空気量2%について、保持なし及び6時間保持の1サイクル目のコンクリートのひずみ挙動を比較してみると、冷却過程において、どちらも-40℃までの冷却に伴ってほぼ同様に収縮し、約-40℃で膨張に転じている。しかし、5サイクル目のひずみ挙動を見てみると、保持なしの場合は1サイクル目とほぼ同じ形をしているが、温度保持を行った場合、より高い温度(約-20℃)で膨張に転じている。また、その膨張量もより大きくなっていることが確認できる。

これらの現象は、温度の保持によって劣化が進行している影響であると思われる。しかしながら、空気量6%のものに対しては、サイクルを繰り返しても温度を保持する間に起こる膨張はほとんど観察されなかった。

以上の実験結果から、今回の実験で用いられた供試体のうち-40℃で温度保持の影響が観察されたのは、W/C56%空気量2%及びW/C66%空気量2、4%であった。また、温度保持が2時間までの間に劣化の増加量は頭打ちになるであろうと考えられる。

W/C46%の場合や空気量6%のものに対しては温度保持の影響がほとんどみられなかった。この理由としては、W/C46%の場合には自由水の量が極端に少ないため、このように温度保持を行っても保持の影響が現われなかったためと考えられる。また、空気量6%の場合は十分なエントレインドエアが連行されたことにより、温度保持の間に発生する圧力が緩和されたと推察される。

温度保持が劣化に与える影響としては以下のように考えられる。極低温下におけるコンクリートの劣化は一般に空隙中の水分の凍結

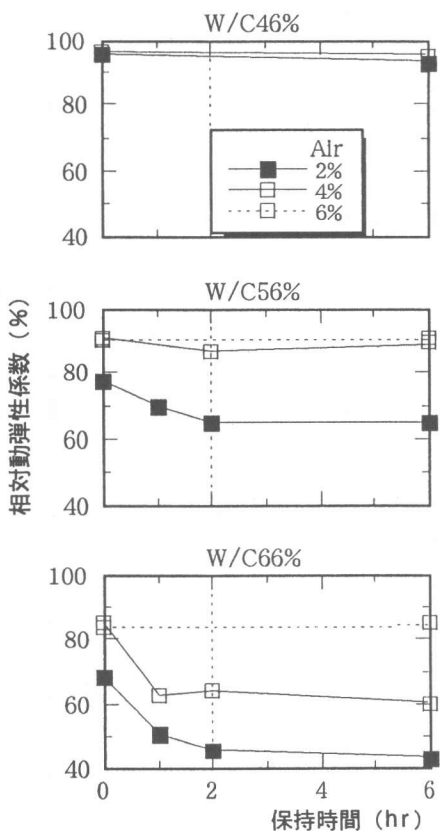
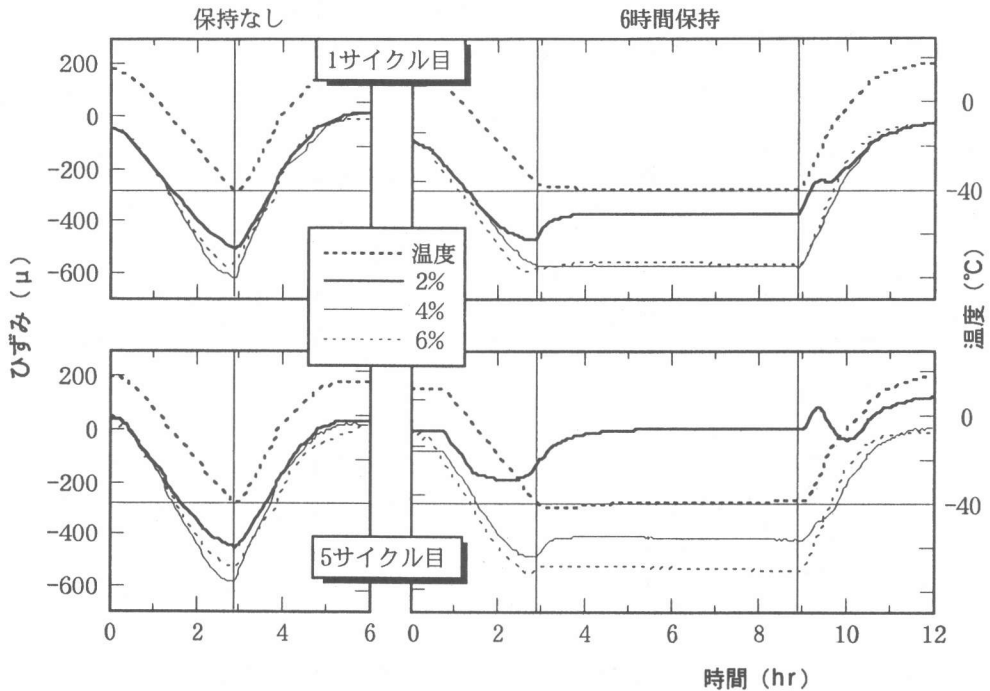


図-3 相対動弾性係数と保持時間との関係 (40サイクル目)



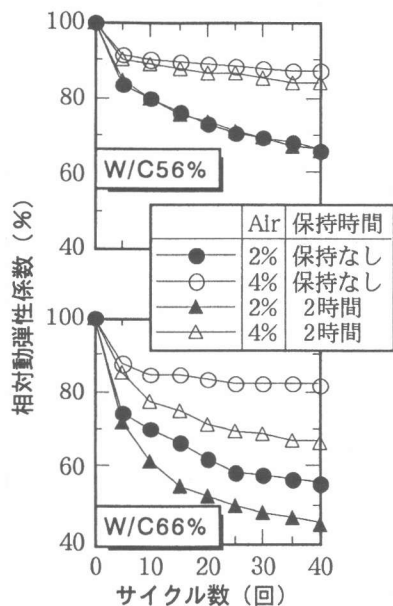
図—4 時間の経過に伴う温度とひずみとの関係 (W/C66%)
左：保持なし 右：6時間保持

によって発生する⁴⁾。一方、コンクリート中の水分が凍結し、膨脹するとその際に発生する圧力を緩和する方向に自由水が移動すると考えられている⁵⁾。このような解釈から、水分の凍結が生じる温度範囲では、時間の経過に伴う過冷却水の移動が考えられる⁶⁾。従って、この温度範囲で温度を保持すると、熱力学的に不安定な微細な水分は安定した空隙、あるいは氷晶に向けて移動する。この移動水分が凍結可能な位置まで到達すると、内部膨張応力が発生し、コンクリートが劣化する。また、凍結可能な位置に到達しなくても移動中における内部応力の変化により過冷却水が凍結すると考えられる⁷⁾。その凍結する氷点は細孔径の関数であり、細孔径が小さいほど氷点も低い⁸⁾。つまり、ある温度で凍結可能なコンクリート中の過冷却水分量には限界があるため、温度保持の影響はいずれ頭打ちになることが予想される。

3. 2 -50°Cにおける温度保持の影響

-50°Cでの温度保持による影響を調べるため、-40°Cにおいて保持の影響が確認されたW/C56%、66%それぞれについて空気量2%、4%の計4種類の配合を用意した。これらの配合に対し、保持なし、2時間保持の温度条件を加え、保持時間の長さとの関係の劣化との関係を調査した。その結果を図—5に示す。

まず、W/C56%を見てみると空気量2%の相対動弾性係数の低下は2時間保持しても保持なしと差がみられない。空気量4%では2時間保持した場合に比べ若干低下しているが、その差は40サイクル目でわずか3%であり、ばらつきを考えると保持の影響だと言い難い。一方、W/C66%においては空気量にかかわらず保持の影響が見られる。-40°Cで保持を行った図—2と比較すると保持による相対動弾性係数の低下量は-40°Cの場合と比べ-50°Cの方が小



図—5 -50℃での相対動弾性係数

さい。

今後、-50℃においても保持時間の長さによってコンクリートの劣化が変化してくる場合も予想されるため、他の保持時間についても調査する必要があると考えられる。また、-40℃より高い温度範囲についてもさらなる研究により、温度保持の影響を確認する必要がある。

4. 結論

本研究では、極低温まで冷却されるコンクリートを温度保持し、温度の保持がコンクリートの劣化に与える影響を検討した。得られた結果は以下の通りである。

1) 極低温下における繰り返し冷却過程において、-40℃でコンクリートの温度保持を行った場合、温度保持を行わなかった場合に比べ、コンクリートはより激しく劣化する。また、この現象はW/Cが高く、空気量が少ないコンクリートの方がより顕著に現われる。

- 2) 本研究の実験範囲において、-40℃での温度保持は2時間ぐらいで劣化の増加量が頭打ちになるであろうと考えられる。
- 3) -50℃の温度保持の場合、-40℃より保持の影響が少なかった。

[参考文献]

- 1) 三浦尚, 李道憲: 低温下におけるコンクリートのひずみ挙動と劣化, 土木学会論文報告集, 第420号, V-13, pp.191~200, 1990. 8
- 2) Rostasy, F. S., Scheneider, U., and Widemann, G.: Behaviour of mortar and concrete at extremely low temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 9, No.3, pp.365~376, 1979
- 3) 川島恵介, 三浦尚, 韓相黙: 極低温下におけるコンクリートの冷却過程と劣化との関係, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, V-26, pp.566~567, 1996. 3
- 4) 小林正几: コンクリートの凍結作用による劣化に関する2, 3の考察, コンクリート・ジャーナル, Vol.7, No.9, pp.125~132, 1969
- 5) Powers, T. C.: A working hypothesis of further studies of frost resistance of concrete, Journal of ACI, Vol. 16, No. 4, pp.245~272, 1945
- 6) 栗山寛, 吉岡丹, 平井和喜: 凍結融解作用における水分移動について(その2), 日本建築学会論文報告集, 第63号, 1959
- 7) Wiedemann, G.: Zum Einflubtiefer Temperaturen auf Festigkeit und Ferormung von Beton, Dissertation Technische Universitat Braunschweig, p.149, 1982
- 8) Zech, B. and Setzer, M.J.: The dynamic modulus of hardened cement paste. Part 2: Ice formation, drying and pore size distribution, Materials and Structures, Vol. 22, pp.125~132, 1989