

正会員 今井 実（清水建設㈱）

1. はじめに コンクリートが低温領域で温度変化をうけると、温度収縮、さらに水の凍結現象などによる変化が加わり、複雑な長さ変化が生ずる。したがって低温下でのコンクリートの長さ変化の性状を把握しておくことは低温構造物の設計上重要である。しかしながら低温下でのコンクリートの長さ変化、線膨張係数などを測定する場合、統一された測定方法がないため、既往の研究報告によると、各々の測定方法、計器の違いによって線膨張係数などの値は広い範囲に分散した傾向を示している。さらに測定温度範囲を広く扱っているため、低温下におけるコンクリートの長さ変化などの性状についてはいまだ十分な資料が得られているとはいえない。

本研究は、測定温度範囲を細分化し、より狭い温度範囲での長さ変化の性状を明確にするとともに、(1)冷却方法の違い、(2)新らたな測定装置を加えた3種類の測定方法の違い、(3)コンクリートの含水状態の違いが低温下コンクリートの長さ変化の性状にいかに影響を及ぼすかを実験によって検討した結果を報告したものである。

2. 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（日本セメント社製）を使用した。骨材は、富士川産で最大骨材寸法25 mmの川砂利（比重2.61）と川砂（比重2.61, F.M. 3.10）を使用した。混和剤は、ボゾリスNo.8を使用した。水セメント比は、58%, 54%, 49%, 38%である。

3. 試験方法

冷却は、液体窒素を冷媒とした低温槽内（図-3参照）で行った。温度は、低温槽内および供試体に埋込んだC-C熱電対（中心部とコンクリート表面から1 cmの位置）によって測定した。冷却方法は、図-2に示すように、温度降下時で低温槽内温度とコンクリート表面から1 cmの位置の温度との温度差を10°C以内に保持しつつ、所定の温度（たとえば0, -10, -20……-160°C）まで冷却し、以後図-2に示すように、(1)は供試体全体が所定の温度に達し、そのままの状態を数時間保持した場合（以下定常状態）(2)は-160°Cまで連続に冷却し供試体内部に温度公配がある場合（以下連続した冷却）の2種類とした。供試体および埋込ケージ、ケージ端子の埋込み位置を図-1に示す。

測定方法は、JIS A1129（モルタル及コンクリートの長さ変化試験方法）、図-3に示すような長さ変化測定装置および埋込型ゲージを採用した。

JIS A1129の場合、供試体が所定の温度に達した後に低温槽内から取り出してから、受け台に乗せ測定するため、その間の温度上昇を防ぐため供試体全体についてスポンジを包った。その結果測定の温度上昇はない。

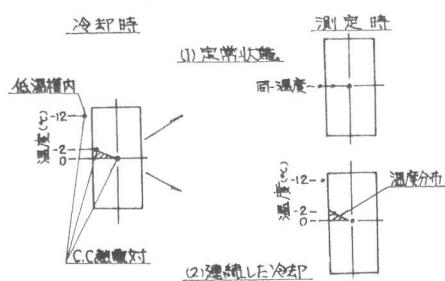


図-2 冷却方法による供試体の温度分布

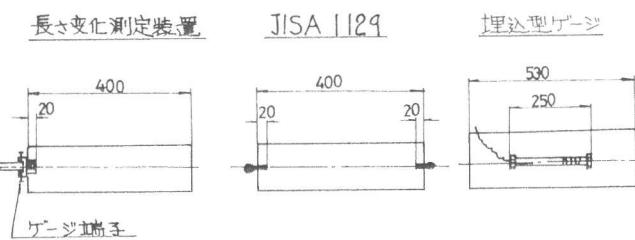


図-1 供試体及びケージ、端子の埋込み位置

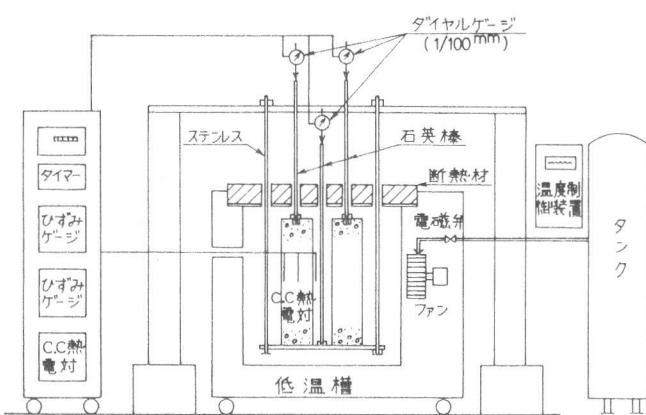


図-3 長さ変化測定装置

図-3に示す長さ変化測定装置は、供試体の片端に2cm程度に埋込んだ端子に石英ガラス棒をネジによって固定し、石英棒の一方を低温槽外まで取り出し、電気式ダイヤルゲージによって長さ変化を測定した。また供試体を設置している受け台の温度変化を考慮するため、受け台にも石英ガラス棒を取り付け変位を測定した。

埋込型ケージは、測定長25cmで線膨張係数 $11 \times 10^{-6}/\text{°C}$ の鋼材からなっている。歪測定方法は、ゲージを接着しているため、接着剤の厚さ、接着方法などによって計器自体がもつ温度ひずみを考慮して計算を実施しなければならないため、ゲージを埋込むまえに計器自体の温度ひずみを計測した。

コンクリートの含水状態は、湿潤、気乾、絶乾状態の3種類とした。湿潤状態は材令28日迄水中養生とした場合、気乾状態は材令28日以後20°C, 60%RHの養生室で約1ヶ月の乾燥養生をした場合、絶乾状態は、材令28日以後110°Cの乾燥炉で約7日間乾燥させた場合である。

4. 試験結果

4.1 冷却方法による影響

コンクリートが表面から冷却をうける場合、コンクリート内部には温度分布が生ずる。特に湿潤状態のコンクリートの場合には、コンクリート中に含まれる水が凍結することによって約9%の体積膨張を生ずることから、冷却方法によってはコンクリートの長さ変化の性状に大きく影響を及ぼすことが考えられる。図-4は、図-3の長さ変化測定装置によって、常温時から-160°Cまで間を図-2に示した冷却方法による形態で行った結果を示したものである。定常状態の場合、供試体中心部の温度が常温から0±1°Cまでに下降するに要する時間は約4~5時間である。この間においてはまた膨張現象は見られないが、さらに1~2時間経過後から膨張し始め、約10時間後には完了する。この間の膨張量は 200×10^{-6} の値を示し、常温時の長さまで回復した形となる。さらに温度が-10~-20°Cに低下すると、長さ変化量は著しい収縮を示し、約280~500×10⁻⁶の値を示す-100°C以下になると収縮量は小さくなり-120°C近傍で変曲点があらわれ、さらに収縮量は小さくなる傾向を示した。-30, -70, -130°Cにおいて長時間同一温度に保持しても、0°C近傍の変化と異なり、値は一定を示し変化は見られない。

一方、図-4に示したように連続した冷却の場合の長さ変化の性状は、定常状態の性状と異なる形態を示している。すなわち、温度0°C近傍において、全く膨張傾向が見られず、-120°Cまでほぼ直線的に収縮傾向を示す。しかし-120°C近傍になると、収縮量が小さくなることは定常状態に似ている。

同一温度に対する長さ変化量を双方で比較してみると、定常状態の方が連続に冷却した場合にくらべ、温度0°C近傍を除いて大きめかあるいはほぼ同じ値を示している。たとえば-20°C~-50°Cにおいては、 $50 \sim 500 \times 10^{-6}$ 程度定常状態の方が大きく、-100°Cとなるとほぼ同じ値 1200×10^{-6} である。

このように双方が異なる値を示す原因是、定常状態の場合、供試体全体が同一温度に保たれているため、氷の凍結機構がほぼ同一であること、供試体全体にわたってコンクリート機構が均一化されるものと考えられる。一方連続した冷却の場合には、図-2に示すように、コンクリート表面部と中心部とでは、2~3°Cの温度差があるため、コンクリート内部には、温度収縮ひずみが生じ、表面になるほど大きな値を示す。しかしコンクリート表面部の温度が0°C近傍になれば、表面部だけ氷の凍結現象が生じ、凍結膨張によって温度収縮ひずみを打消す方向になる。これらの作用が連続してコンクリート内部に進行していくため、高い温度範囲では収縮量が小さくなっていると考えられる。低い温度範囲になると氷の性質、線膨張係数の値が安定したものになるため冷却方法による影響は少ない。

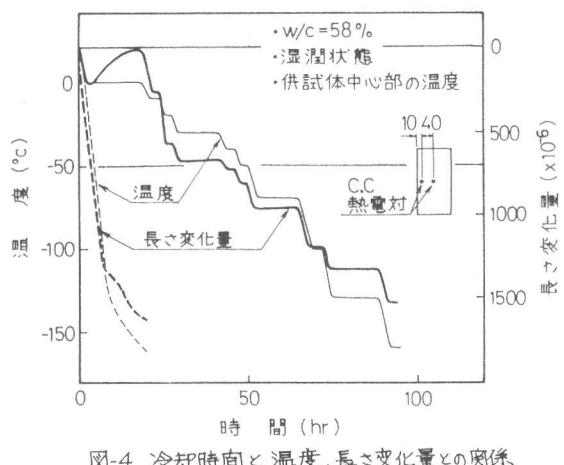


図-4 冷却時間と温度、長さ変化量との関係

4.2 測定方法による影響

JIS A1129, 図-3に示す長さ測定装置および埋込型ゲージを用いて、水セメント比 58 %, 湿潤状態のコンクリートの 20 °C から各測定温度までの長さ変化を図-5に示す。長さ変化量の値は、定常状態としたときのものである。結果によれば、いずれの測定方法を用いても、長さ変化量は温度の低下とともに収縮傾向を示す。また 20 から各温度までの長さ変化量の値は、測定方法、計器によっていくぶんか異なり、温度 -10 ~ -50 °C の範囲内がよりはっきりした形となって表われている。

図-6は、図-5の長さ変化量を温度差で除した値、すなわち平均線膨張係数を表わしたものである。これらの数値を表-1に示す。平均線膨張係数は、温度領域によって著しく異なる値を示すことが認められる。温度が常温から 0, -10, -20 °C と低下するにしたがって大きくなり、-20~-30 °C 近傍において最大となり、さらに温度が低下していくにつれ値は小さくなる。たとえば、常温~0 °C で $8.5 \sim 9.5 \times 10^{-6}/\text{°C}$, -20~-30 °C で $12.5 \sim 13.5 \times 10^{-6}/\text{°C}$ と最大となり、-70 °C で約 $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$ と設計などに用いられる一般的な値とほぼ同じになる。さらに温度が低下すると、-100 °C で約 $9.5 \times 10^{-6}/\text{°C}$, -130 °C で約 $9.0 \times 10^{-6}/\text{°C}$, -160 °C となると $8.5 \times 10^{-6}/\text{°C}$ になる。これら温度領域によって大きく異なる原因是、コンクリート中に含まれている氷の膨張率が温度範囲によってかなり異なり、0 °C 近傍が大きく、温度が低下するにつれ小さくなることが影響しているためと考えられる。測定方法によると、長さ変化測定装置と JIS A1129 では比較的似かよった傾向を示し、埋込型ゲージとは多少異なることが認められる。

図-7は、既往の学会などによって発表されている線膨張係数と本実験の結果を取りまとめて見たものである。試験方法、供試体寸法、使用材料、冷却方法など各々によって異なるため一概に比較論ずる事は出来ないが、測定方法によってかなり異なる値を示していることがわかる。

表-1 平均線膨張係数 ($\times 10^{-6}/\text{°C}$)

温度範囲	長さ変化測定装置	JIS A1129	埋込型ゲージ
20 ~ 0 °C	9.0	9.7	8.7
20 ~ -10	9.7	12.7	9.5
20 ~ -20	12.5	13.7	10.4
20 ~ -30	12.3	12.2	10.6
20 ~ -40	11.4	11.0	—
20 ~ -50	11.2	10.5	9.9
20 ~ -70	10.4	9.7	9.5
20 ~ -100	9.8	9.0	9.5
20 ~ -130	8.8	9.1	—
20 ~ -160	8.5	8.9	—

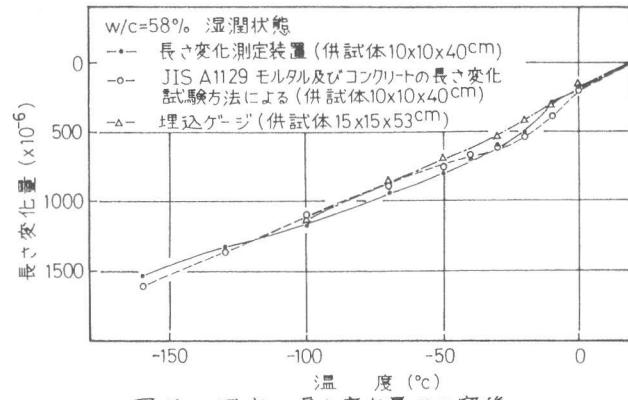


図-5 温度と長さ変化量との関係

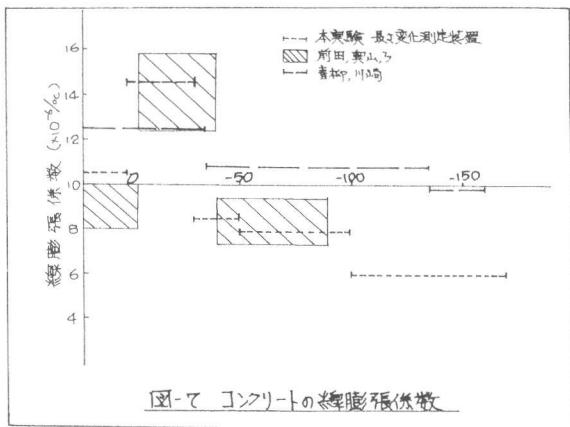


図-4 コンクリートの線膨張係数

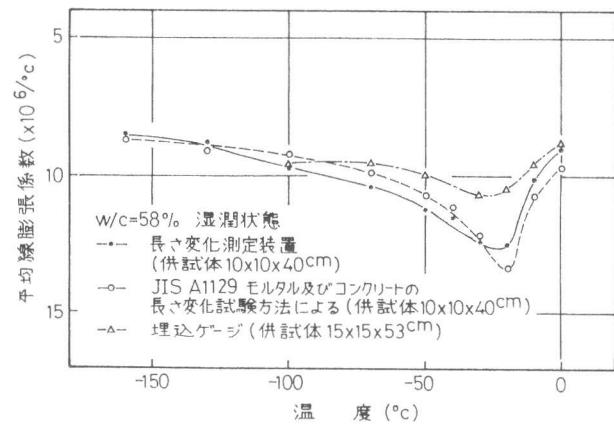


図-6 20°Cから各温度までの平均線膨張係数

4.3 コンクリートの含水状態による影響 (JIS A1129の測定方法による)

湿潤状態のコンクリートが温度 0°C 以下になると、長さ変化量は温度範囲によって異なる値を示すことを前述したが、これらはコンクリート中の水が凍結しコンクリート内部機構が変化するためである。したがってコンクリート中の含水状態によって影響されることが考えられる。図-8は、水セメント比 49% のコンクリートについて含水状態を湿潤、気乾、絶乾状態にし、定常状態で測定したときの長さ変化量を表わしたものである。図-9は、図-8の長さ変化量を温度差を除した値、すなわち平均線膨張係数を表わしたものである。長さ変化量および線膨張係数ともコンクリートの含水状態によって異なり、湿潤状態、気乾状態、絶乾状態の順に大きな値を示す。線膨張係数によると絶乾状態の場合、いくぶんか変動は見られるが、ほぼ温度の低下に伴い小さくなる。気乾状態の場合、 -20°C 近傍でいくぶんか大きくなる傾向を示す。

図-10は、水セメント比 38%, 49%, 54% のコンクリートの含水状態を変えたときの、温度と平均線膨張係数との関係を示したものである。結果によれば、含水状態によって値は異なるが、水セメント比間による違いは、 -20°C 近傍において多少見られるが、他の温度範囲においては、大きな違いはない。長さ変化、線膨張係数が乾温の条件によって影響をうける温度範囲は $0 \sim -50^{\circ}\text{C}$ で -50°C 以下になると大きな影響をうけない。 -160°C における線膨張係数の値を見ると湿潤の場合、 $9.10 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ 気乾の場合、約 $8.5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ 、絶乾の場合、約 $7.3 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ である。

5. 結論

コンクリートの長さ変化、平均線膨張係数について実験結果を要約すると次の通りである。

- (1) 冷却方法によってコンクリートの長さ変化は影響をうける。同一温度における長さ変化量は、定常状態の方が連続的に冷却した場合より大きい。
- (2) 長さ変化量、線膨張係数とも測定方法によって異なる値を示すが、JIS A1129、長さ測定装置のように供試体全体の長さ変化を測定する方式がよい。
- (3) 平均線膨張係数は、温度範囲によって異なる値を示し、温度 -20°C 近傍で最も大きな値を示す。
- (4) コンクリートの含水状態によって長さ変化、線膨張係数は異なる。絶乾、気乾状態は、湿潤状態にくらべ温度範囲によって値の変動は少ない。

最後に、この研究の実施に当たり、測定などにたずさわっていただいた中谷君に心から感謝をいたします。

参考文献

- (1) 共立出版 「氷の化学物理」
- (2) 前田ら 「極低温下におけるコンクリートの温度膨張係数に関する一実験」 第29回土木学会概要集
- (3) 青柳ら 「極低温におけるコンクリートの諸性質に関する実験的考察」 第30回土木学会概要集

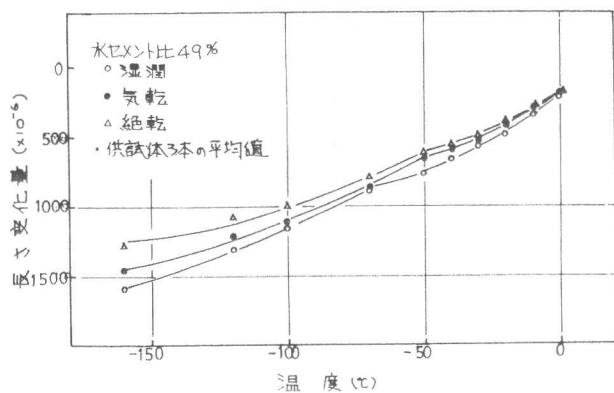


図-8 温度と長さ変化量との関係

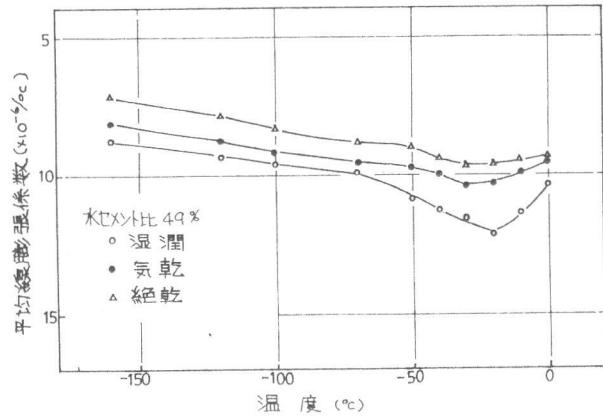


図-9 温度と平均線膨張係数との関係

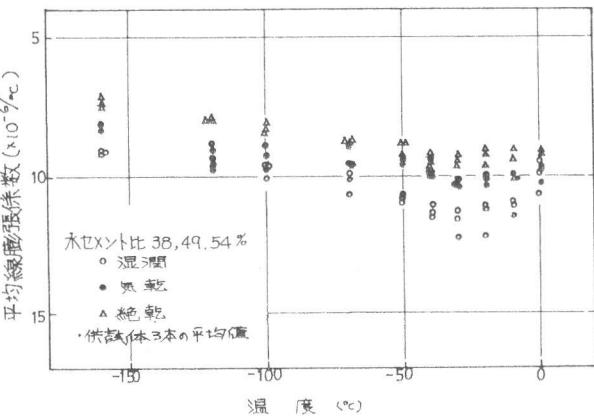


図-10 温度と平均線膨張係数との関係