

低温下におけるコンクリートのひずみ挙動と劣化

DEFORMATION AND DETERIORATION OF CONCRETE AT LOW TEMPERATURES

三浦 尚*・李 道憲**

By Takashi MIURA and Do Heun LEE

Under low temperature, some concrete structures suffer serious deterioration. This may be due to the ice formation in concrete micropores, which causes microcracking and induces volume changes of concrete. Based on this observation, we investigated deterioration of concrete subjected to cyclic cooling and heating of various temperature ranges. The two major findings are: (1) residual strain of concrete is in good correlation to its relative dynamic modulus of elasticity and (2) there are well-defined temperature ranges which determine the progress of deterioration. Qualitative and quantitative analyses will be made on these observations.

Keywords: deformation, deterioration, cyclic temperature, expansion, contraction

1. はじめに

コンクリート構造物の必要条件の1つは耐久的でなければならないことである。しかし、コンクリートはさまざまな条件によって耐久性を失っていく。そのうちの1つに、構造物が常温と低温の繰り返しを受けて劣化する場合が考えられ、実際、このような環境にさらされる寒冷地での構造物はたくさん存在している。また、寒冷地でない地域においても同様な作用を受ける低温構造物は数多く建設されつつある。

低温構造物の代表的なものとしては、現在われわれの生活になくなくてはならないほど密接な関係をもっている、液化天然ガス (LNG) や液化石油ガス (LPG) の貯蔵タンクおよび輸送キャリア、また、それらの二次的な構造物などが挙げられる。一方では、超伝導に関する研究が活発に進んでおり、液体窒素温度程度の低温で安定した高温超伝導物質が得られるようになってきている。超伝導を利用して電力を貯蔵するためには、超伝導体で作ったコイルを極低温に保つための容器や極低温物質を

貯蔵するための設備などが必要とされ、その材料として、経済的および性質的に適したコンクリートが使用される可能性が高いと考えられる。このような低温構造物は設計上特別な配慮を必要とし、使用材料としてのコンクリートの極低温下における挙動に関する知識や情報はきわめて重要である。

低温におけるコンクリートの物性は、常温のときと比べてかなり異なり、温度が低下するにつれて大きく変化する。このような物性の変化は主にコンクリート中の水が凍結することによって起こる。コンクリートは温度が下がると収縮または膨張の大変複雑な体積変化をし、常温と低温の繰り返しを受けると、凍結時に生じたマイクロクラックによってコンクリートの内部組織が緩んで劣化する。実際の構造物が受ける温度変化の範囲は、寒冷地における気温の変化や低温構造物におけるいろいろな条件によって、広範囲にわたってさまざまであり、そのときの劣化のメカニズムは大変複雑になる。しかし、極低温までの温度の繰り返しを受けたコンクリートの劣化に関する著者らや Rostásy らの研究結果によれば^{1), 2)}、約 -50°C 以下の温度では劣化に関連すると思われるコンクリートの大きな膨張はみられないことから、本研究では主として常温から -70°C の間で繰り返し温度範囲を変えてコンクリートの劣化を調べた。特に、劣化の中

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

** 学生会員 工修 東北大学大学院 工学部土木工学科
(同上)

でも一般の凍害とは異なり、コンクリートに外部から水が供給されない場合の劣化を対象とすることにした。また、今回の研究では第1段階としてこの種の劣化の性状を明らかにすることを主目的としたため、使用したコンクリートは劣化しやすい Non-AE コンクリートとした。さらに、コンクリート構成要素がコンクリート全体の劣化にどのような役割をするかは劣化のメカニズムの把握において重要であると考えられ、コンクリート構成要素それぞれのひずみ挙動を測定し、各要素がコンクリート全体の劣化に及ぼす影響について検討した。

2. 実験材料および実験方法

実験に用いたセメントは早強ポルトランドセメント、細骨材は宮城県白石川産川砂(比重:2.56, FM:2.89),粗骨材は宮城県丸森産砕石(比重:2.86, FM:6.92)である。また、本研究に用いたコンクリートの配合を Table 1 に示すが、モルタル、ペーストはそれぞれコンクリートと同じ配合のものである。Fig. 1 に実験の手順

Table 1 Mix Proportions of Concrete.

Cmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit Content (kg/m ³)			
					W	C	S	G
25	11±1	2±0.5	56	42	194	346	725	1125

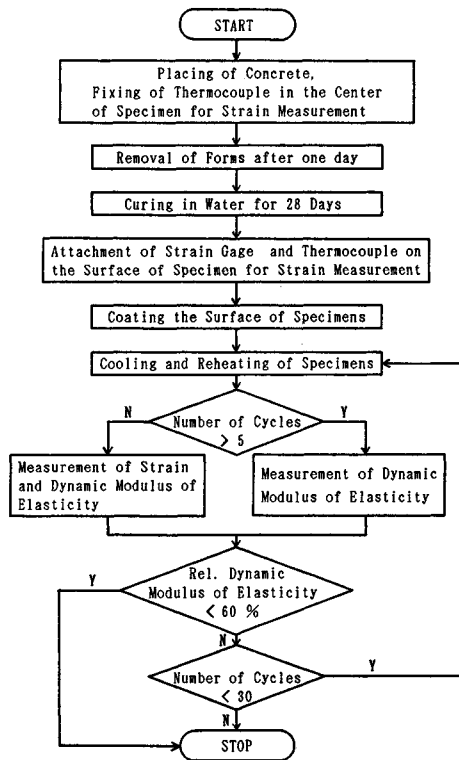


Fig. 1 Flow Chart of Testing Procedure.

を示し、Fig. 2にはコンクリートおよびモルタル、ペーストのひずみ測定用供試体の形状・寸法、また、ひずみゲージおよび熱電対の位置を示す。一方、動弾性係数測定用のコンクリート供試体はひずみ測定用と形状および寸法が同じである。

供試体のひずみ測定は供試体の両側面にひずみゲージを貼り付けてデジタルひずみ測定器を用いて行った。本研究ではかなり低い温度まで測定範囲となっているので、予備実験を行ってひずみゲージが-70°Cまで安定性を保つことを確認するとともに各温度での補正値を求めておき、ひずみの測定値をそれぞれのひずみゲージの温度によって補償した。一方、以下の図中で用いた Average Strain とは供試体の両側面に貼り付けた 2 枚のひずみゲージの平均値である。

本実験では外部から水の供給がない場合のコンクリートの劣化を調べるため、試験中の含水量の損失がないように供試体の表面にコーティングを施した。使用したコーティング剤はゴム系のものであり、しかも供試体にコーティングしたときの厚さは0.3 mm程度に過ぎないので、コーティング剤がコンクリートのひずみに及ぼす影響は無視してよいものと考えられる。一方、一般の液状のコーティング剤は低温下で使用されると固くなり収縮するケースが多く、それによってコーティング剤がひびわれり剥がれたりすることがある。本実験で使用したコーティング剤においても供試体を冷却した際にひびわれり剥がれたりすることがあったが、10サイクルまではほぼそのような損傷は生じなく、それ以降も欠陥が生じた際にその部分を補修することによって試験中の含水量の損失を最低限にした。その結果、30サイクル後の含水量の変化量を養生直後の含水量の約2%以下に抑えることができた。

供試体の冷却および加熱は超低温恒温恒湿器を使用し、空気中で行った。試験時の最大冷却速度は約0.35°C/min、最大加熱速度は約0.90°C/minであった。冷却時における供試体の中心と表面との最大温度差はコ

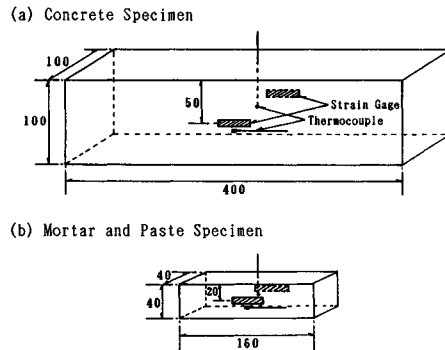


Fig. 2 Prism Specimens for Strain Measurement.

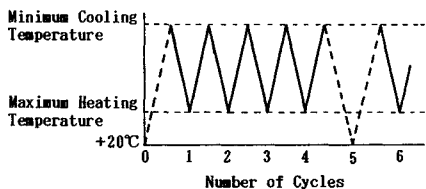


Fig. 3 Temperature Cycle for Specimen.

ンクリート供試体においては約5°C, モルタルおよびペースト供試体においては約2°Cであった。しかし、冷却・加熱によって変化する供試体の温度は表面・中心ともにそれぞれ同じ温度範囲になることを確認した。また、ここで測定した温度ひずみは、供試体の形を考慮して平均温度に対するひずみであると考えることができる。また、コンクリートの平均温度は、供試体中の温度分布を調べた予備実験の結果から、実際の供試体の中心と表面温度を用いて計算によって求められた。

コンクリートの劣化は、養生後表面をコーティングした供試体に Fig. 3 のような所定温度範囲（すなわち、冷却最低温度から加熱最高温度まで）の繰り返しを与え、供試体の中心温度が常温になったところで非破壊試験を行い、動弾性係数を測定することによって調べられた。実験は相対動弾性係数が60%を割るまで行い、60%を割らない供試体については30サイクルまで行った。

3. 実験結果および考察

(1) 概 説

前述したように、コンクリートの凍害は水の凍結による影響が最も大きい。しかし、コンクリート中の細孔水は必ずしも0°Cで凍るのではなく、それよりはるかに低い温度まで水として存在することがある。Tognonは熱量計を用いた実験より、セメントペースト中の自由水の凍結が-4°Cから-90°Cの間で徐々に起こることを確認した³⁾。このような氷点降下の原因は、細孔水がアルカリのような水溶性の物質を含んでいることや、細孔内で起こる水分子と細孔壁との間の表面エネルギーの相互作用などによる⁴⁾。また、氷点降下は細孔径の関数であり、細孔が小さいほど氷点も低い。Zechらはこのような氷点と細孔径との関係を調べた⁵⁾。彼らの計算値を Fig. 4 の上部に示し、下部には本研究で用いたコンクリートの細孔分布の一例を示す。ここで、細孔構造は水銀圧入法で調べたものであり、全細孔量に対する各細孔の量をパーセンテージで表わした。この図より、本研究で用いたコンクリート中には直径1000Å以下の非常に小さい細孔がたくさん含まれており、全細孔量の約80%を占めていることがわかる。また、凍結点が細孔径に関係することから、繰り返し温度範囲の違いによって凍結する量が決定され、劣化の程度にも影響があると考

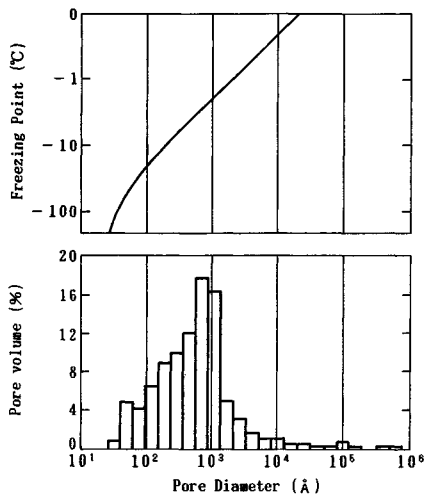


Fig. 4 Relation Between Pore Diameter and Freezing Point.

えられる。ただし、氷点降下と細孔径の関係についてはいろいろな研究者の間で多少の差があり、実験に用いた供試体の性質および成分または実験方法などによってもその値は異なってくるはずである。それに、コンクリート中の水分はある温度までは温度が低下しても凍らないまま水として存在することがあり、このような過冷却によっても凍結点は低下することになる。これらの理由より、あるサイズの細孔の水が必ずしも Fig. 4 に示すような温度で凍ることはないものである。

このようなコンクリート中に含まれているさまざまなサイズの細孔水は凍結によって約9%の体積膨張をし、コンクリートの内部組織を破壊するが、結果としてコンクリート全体の体積膨張を引き起こす。したがって、コンクリートの劣化を把握するのにおいて、ひずみの挙動は重要な情報を与えることになる。Fig. 5はコンクリートを常温から-196°Cまで冷却したときのひずみの挙動を示す¹⁾。この図より、コンクリートは温度の低下とともに収縮または膨張を示し、不可逆的なひずみ挙動を示すが、約-70°C以下では直線的に収縮するだけである。実際には-70°C以下であってもコンクリートを構成す

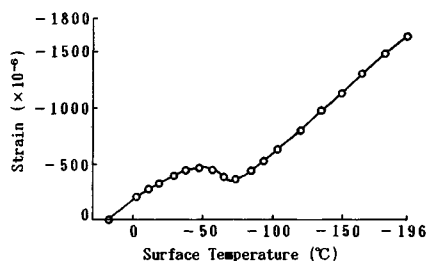


Fig. 5 Typical Relation Between Strain and Surface Temperature.

るそれぞれの成分の線膨張係数が異なるために温度低下に伴い元応力は大きくなると思われるが、ひずみ挙動が本質的に線形的で、また可逆的である^{11,9)}ことからコンクリートの劣化に及ぼす影響はほとんどないものと考えられる。したがって、 -70°C 以下の温度においては、温度が低下することによりコンクリートがさらに劣化することはあまりないと考えられ、本研究では常温から -70°C の間でコンクリートが受ける繰り返し温度範囲の最低温度と最高温度をいろいろ変えてひずみの挙動や劣化を検討することにした。

(2) 最低温度の違いによる影響

コンクリート構造物はいろいろな温度範囲の繰り返しを受けることがあり、その温度範囲の違いによる劣化への影響を研究するためにはコンクリートのひずみ挙動を詳細に知る必要がある。それゆえ Fig. 6(a) のように、常温から -70°C まで5回の繰り返しを与えたときの Non-AE 湿潤コンクリートのひずみ挙動を調べた。この図より、コンクリートは冷却に伴って収縮するが約 -20°C から -50°C の間で急激な膨張を示し、それ以下の温度では再び収縮を示すことがわかる。このときコンクリートの膨張は劣化の原因となると考えられるのでコンクリートの劣化に影響を及ぼす温度範囲は約 -20°C ～ -50°C と推定される。以上のことから、本研究では第一段階として繰り返し温度範囲の最低温度を -20°C から -70°C の間で変え、ひずみ挙動や劣化への影響を調べることにした。まず、Fig. 6(a) のようなコンクリー

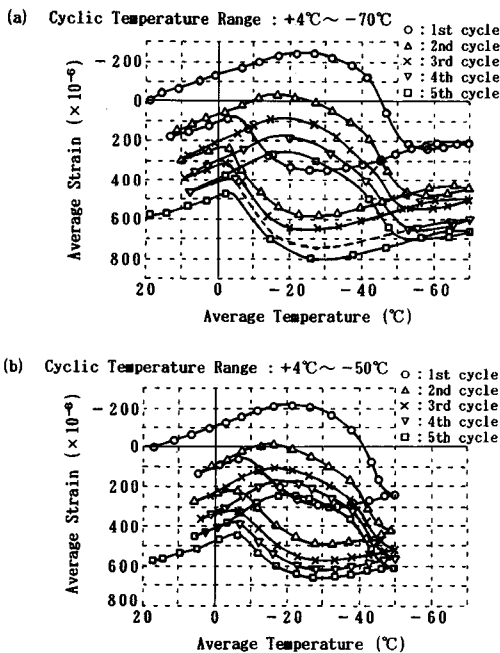


Fig. 6 Relation Between Strain and Temperature for Various Minimum Cooling Temperatures.

トの典型的なひずみ挙動については、すでにいろいろ報告されており^{7),8)}、そのメカニズムについてはまだ論争中であるが、これからの温度範囲の違いによる影響を調べるのに重要であるので、次のようにその特徴的な点を述べる。

a) 冷却時の $+20^{\circ}\text{C}$ から約 -20°C までにおいて、コンクリートはほぼ線形的に収縮する。このように -20°C までも収縮することは、ある程度水は凍ったと思われるが、前述したような氷点降下現象の影響によってまだたくさんの細孔水が凍っていないことを示し、また、水饱和度が100%であってもコンクリート中には水で満ちていない空隙が存在し⁹⁾、その空隙が水から氷へ相変化する際に生じる膨張圧を吸収することにもよると考えられる。

b) 約 -20°C から約 -50°C までは著しい膨張を示す。この温度範囲ではかなり小さい細孔水まで氷に相変化することによって内部圧力が増加し、マイクロクラックが生じ、体積膨張が起こる。このときの膨張量はコンクリートの劣化に大きな影響を与え、単位水量や含水量および W/C が大きいほど大きく、また、冷却速度が速いほど大きい^{7),10)~14)}。

c) 温度が -50°C 以下になるとコンクリートは再び膨張から収縮に転じ、ほぼ線形的な挙動を示す。Stockhausenら¹⁵⁾によると細孔半径 30Å 以下の細孔水は -165°C までも凍らない。供試体の温度が -50°C 以下になるとゲルポアー(寸法のオーダーは $15\sim 20\text{Å}$ ¹⁶⁾)より大きい毛細管空隙まではほとんど凍結し、コンクリートの膨張を引き起こすほどの要因がなくなるものと考えられる。

d) 加熱時のひずみ挙動は水の氷点と融点が変わることによって凍結時とはかなり違う挙動を示し、常温に戻ったときには残留膨張ひずみが生じる。この残留ひずみは明らかにコンクリートの内部組織が緩んだことを示す。

一方、繰り返し温度範囲の最低温度の違いによってコンクリートの劣化度は異なるので、次は最低温度を -20°C ～ -70°C の間で変えたときの結果について述べる。

繰り返し温度範囲が常温から -50°C までのものである Fig. 6(b) は、常温から -70°C までのものとほぼ同様なひずみ挙動を示し、残留ひずみや劣化度 (Fig. 8 参照) もほぼ同じである。このように、コンクリートの膨張は -50°C のときにはほぼみえなくなり、結果的に、最低温度が -70°C の場合とほぼ同程度の膨張量と残留ひずみを示したことになる。したがって、コンクリートのひずみ挙動が完全に直線的な挙動を示す -50°C 以下の温度はコンクリートの劣化にあまり影響しないと考えられる。冷却時の膨張量や残留ひずみを用いて、冷却最低温度の違いによるコンクリートの劣化度を比較してみ

ると、 -70°C や -50°C までのものに比べて、 -40°C までのものはかなり小さく、 -30°C までのものはそれよりさらに小さくなり、 -20°C までのものは両方ともほとんど現われなかった。この結果より、コンクリートの劣化に及ぼす繰返し温度範囲の最低温度を3つの範囲に分けて考えることができる。

- a) 劣化に大きく影響しない -20°C 以上の範囲
- b) 温度が低いほど劣化が大きくなる -20°C ~ -50°C の範囲
- c) 劣化とはあまり関係がない -50°C 以下の範囲

このような結果から最低温度における残留ひずみ（各サイクルでのひずみから1サイクル目のひずみを差し引いた値）とサイクル数との関係を調べたものが Fig. 7 であるが、コンクリートの残留ひずみはサイクル数が増えるにつれて大きくなり、その増分は徐々に小さくなるのがわかる。

コンクリートの劣化を調べるために、以上のひずみ測定試験と同時にを行った非破壊試験の結果を Fig. 8 に示す。この結果より、 $+4^{\circ}\text{C}$ から -70°C と -50°C の間を繰返ししたものの相対動弾性係数はわずか5~10サイクルの間で60%を割ったのに対して、 -40°C までのものは30サイクルで60%近くまで落ち、 -30°C までのものは30サイクルで約80%であり、 -20°C までのものは優れた耐久性を示した。この非破壊試験の結果はコ

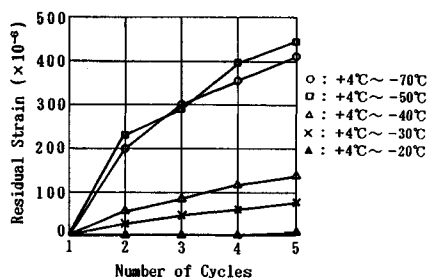


Fig. 7 Relation Between Residual Strain and Number of Cycle.

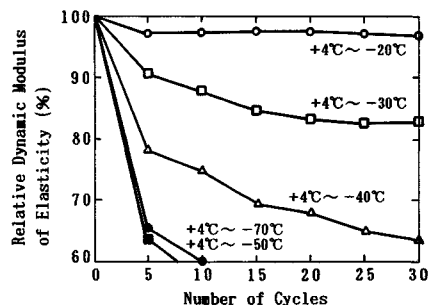


Fig. 8 Deterioration of Concrete Due to Repetition of Cooling with Fixed Maximum Temperature and Various Minimum Temperatures.

ンクリートのひずみ挙動から得られた結果と同様で、最低温度が低いほど劣化度が大きくなり、そして劣化に大きく影響する範囲は約 -20°C から -50°C の間であると考えられる。最低温度が低いほど冷却時の膨張量や劣化度が大きいことは、温度の低下とともにより小さい径の細孔水まで凍り、結果として、内部圧力およびそれによる内部組織の損傷程度が大きくなったためであると考えられる。

(3) 最高温度の違いによる影響

多くの研究者らが凍害に関する研究を行ってきたが、繰返し温度範囲の影響を定量的に調べたことは数少なく、特に最高温度についてはほとんど見当たらない。それゆえ、この節では、繰返し温度範囲の違いがコンクリートの劣化に及ぼす影響を調べる第二段階として、構造物が氷点下での繰返しを受けることを想定して、繰返し温度範囲の最高温度を変えて、一度冷却した後常温に戻さず、氷点下で繰返ししたときの実験結果について述べる。

Fig. 9(a), (b), (c), (d) は繰返し温度範囲の最低温度を -70°C とし、最高温度を -3°C 、 -6°C 、 -10°C 、 -30°C とし繰返ししたときのひずみの挙動を示す。最高温度をこのように決めたのは、Fig. 6(a) より、加熱時のコンクリートのひずみ挙動が約 -30°C までは直線的に膨張し、約 -30°C ~ -10°C までは急激に収縮し、約 -10°C 以上では再び線形的に膨張を示すことに基づく。その結果、最高温度が -3°C の場合はサイクル数が増えるに従ってひずみの挙動が膨張側に平行移動した形で変化し、残留ひずみが増えていくことがわかる。しかし、最高温度が -6°C の場合にはサイクル数が増えてもひずみの挙動はあまり変わらず、 -10°C と -30°C の場合にはサイクル数が増えてもひずみ挙動は同じヒステリシスを示す。したがって、加熱時の最高温度が劣化に影響を及ぼす範囲は約 -10°C から氷がすべて解ける温度である 0°C までであると考えられる。

一方、ひずみ測定試験と同様の結果が動弾性係数試験から得られた。Fig. 10 は繰返し温度範囲の最高温度を変えたときの相対動弾性係数を調べたものである。これらの値は Fig. 3 に示すようなサイクルをかけたため、氷点下での繰返しによる影響だけを調べるためには、Fig. 3 の点線の部分の影響を除かなければならない。そのために $+20^{\circ}\text{C}$ から -70°C まで繰返しした点線部分だけの影響を Fig. 10 において点線で示し、基準線とした。つまり、基準線より下の方にあることは、氷点下だけの温度範囲の繰返しが劣化に影響していることである。この基準を用いると、繰返し温度範囲の最高温度が高いほど劣化しているようであるが、 -30°C 、 -10°C 、 -6°C のものは基準線と比べてほぼ同じであり、 -3°C と

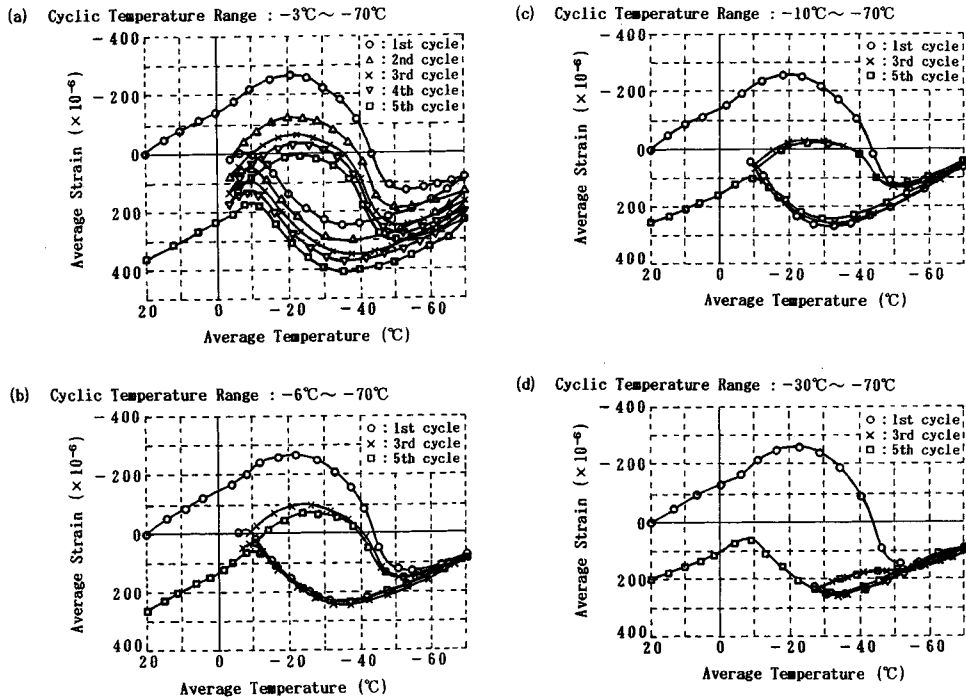


Fig. 9 Relation Between Strain and Temperature for Various Maximum Heating Temperatures.

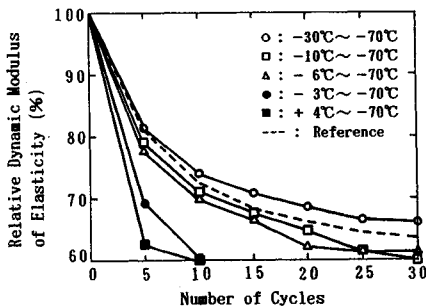


Fig. 10 Deterioration of Concrete Due to Repetition of Cooling with Fixed Maximum Temperature and Various Maximum Temperatures.

+4°C のものは基準線よりかなり低く、著しく劣化していることがわかる。

以上の結果をみると、コンクリートの劣化はコンクリート中の水が凍結時に膨張することによると考えられていたが、必ずしもそれだけではないようである。このことは Fig. 9(b) より明らかである。すなわち、-10°C まで加熱した後再び凍結したときコンクリートは大きく膨張したにもかかわらず、サイクル数が増えてもひずみ挙動は同じで残留ひずみは生じなく、また、劣化も起こらなかった。したがって、本研究の結果からみると、コンクリートの膨張は劣化に影響する場合としない場合があると考えられる。このことは、温度の上昇とともに

より小さい細孔の水から解けていくが、-10°C まで上昇したときには移動するような水はまだ解けていないためではないかと考えられる。すなわち、温度変化を繰り返すに従って高温時ではコンクリートの中で解けた水の移動が起こり、それが冷却時に凍結することによって劣化はさらに進行するものと考えられるのである。

モルタルに対して実験を行った他の研究者らの結果によると^{4), 10)}、 W/C が違ってても収縮から膨張へ、または、膨張から収縮へ転ずる境界点がほとんど同様であったが、その際、当然 W/C が違うことによって細孔分布や孔の量は変わったと考えられる⁹⁾。すなわち、細孔分布や量が変わってもひずみ挙動の境界点はあまり変化しないといえることができる。したがって、劣化に大きく影響を及ぼす繰り返し温度範囲は、本研究で得られた結果がコンクリートの配合によって大きく変わることはあまりないと考えられる。しかし、コンクリートのひずみ変化に影響する氷点降下は細孔径の関数であるので細孔分布や量によって、劣化の程度は大きく異なるものと思われる。

(4) 材料別のひずみ挙動

コンクリートは主に水、セメント、骨材の3つの材料で作られ、コンクリートとしての構成要素は骨材とセメントペーストと2つに分けて考えることができる。これらの構成要素それぞれがコンクリートの劣化にどのように影響するかを調べるためには、まず、構成要素それぞ

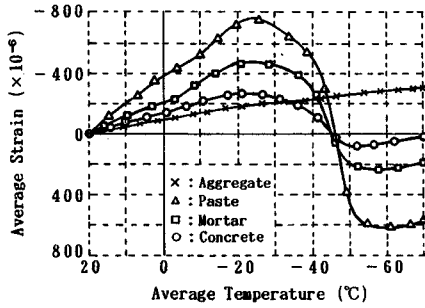


Fig. 11 Relation Between Strain and Temperature of Concrete Constituents.

れの劣化について調べる必要がある。その理由から、ここでは、骨材、および同じ W/C のペースト、モルタル、コンクリートと 4 種類に分けて、湿潤状態のそれぞれのひずみ挙動を調べることによってコンクリートの劣化に及ぼす影響を判断することにした。ただし、ペースト供試体は W/C が高いほど材料分離が起こりやすいのでその影響をなるべく小さくするため、ひずみの測定は、Fig. 2 のように供試体中央部で行い、供試体の平均的な値として用いた。

Fig. 11 はコンクリートを構成しているそれぞれの要素に対する 1 サイクル目の冷却時のひずみ挙動を示す。この図よりモルタルやペーストのひずみ挙動はコンクリートのひずみ挙動と性質的に同じ傾向を示すことがわかる。Fig. 11 から得られた線膨張係数と冷却時の最大膨張量および 5 サイクル後の残留ひずみの結果を Table 2 に示す。Fig. 11 と Table 2 より冷却時の最大膨張量や残留ひずみはコンクリート、モルタル、ペーストの順に大きくなり、骨材はまったく膨張を示さなかった。このことは、コンクリートのひずみ挙動は主にペーストによって左右されることを示し、コンクリート中のペーストの体積割合によってひずみ挙動や劣化度が大きく違ってくると考えられる。

また、骨材とペーストの界面の破壊については、収縮または膨張するときの線膨張係数の違いで知ることができる。本研究で用いた砕石は良質のもので、また、かなり密実な内部構造をしていたため、骨材のひずみ挙動は線形的であり、残留ひずみを示さず、骨材自体の劣化に

Table 2 Properties of Concrete Constituents.

Type of concrete constituent	Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		Maximum expansion ($\times 10^{-6}$)	Residual strain after the 5th cycle ($\times 10^{-6}$)
	-10°C	-45°C		
Aggregate	4.6	3.0	—	0
Paste	17.5	-122.9	1367	908
Mortar	13.0	-66.9	703	582
Concrete	6.9	-25.7	376	445

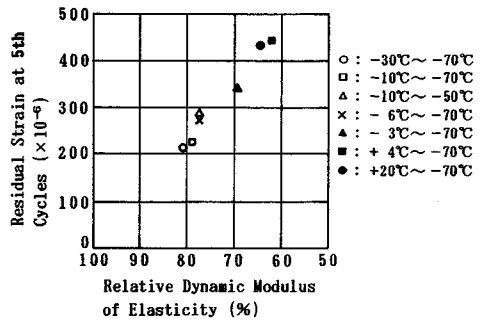


Fig. 12 Correlation Between Residual Strain and Relative Dynamic Modulus of Elasticity.

よるコンクリートの劣化はほとんどないと考えられる。したがって、コンクリートの劣化にはペーストと骨材との界面の影響とペーストの劣化との 2 つが主に影響していると考えられ、ペーストが耐久的であるようにその性質を変える (例えば、W/C の減少、含水量の減少、AE 剤の使用、あるいは乾燥状態を変える¹⁷⁾) ことによってコンクリートの劣化が改善できると考えられる。

(5) 総合的考察

コンクリートのひずみ挙動と劣化とがどのような関係にあるかを調べるために、繰り返し温度範囲の最高温度の違いによる影響を調べた結果を用いて、+20°C における 5 サイクル後の残留ひずみと相対動弾性係数との関係を Fig. 12 に示してみると、両者はほぼ直線関係にあり^{18), 19)} 強い相関関係を示す。このような結果はコンクリートの劣化を調べるのにおいてひずみの挙動は適切なパラメーターであることを示し、供試体の最大膨張と残留膨張は凍害を評価するのによいパラメーターであるという MacInnis らの結果と一致する²⁰⁾。

繰り返し温度範囲の違いによる劣化を次の Fig. 13, 14, 15, 16 に示す。Fig. 13 は +20°C における 5 サイクル後の残留ひずみと繰り返し温度範囲の最低温度との関係を示し、Fig. 14 は各サイクルでの相対動弾性係数と繰り返し温度範囲の最低温度との関係を示す。この 2 つ

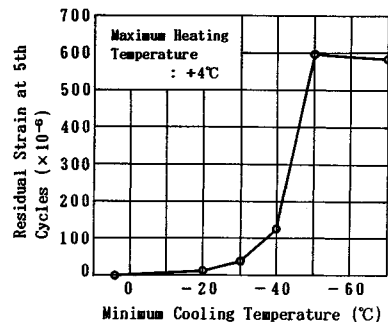


Fig. 13 Relation Between Residual Strain and Minimum Cooling Temperature.

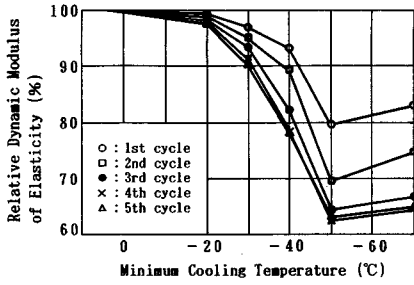


Fig. 14 Relation Between Relative Dynamic Modulus of Elasticity and Minimum Cooling Temperature.

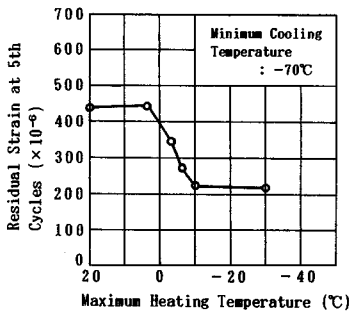


Fig. 15 Relation Between Residual Strain and Maximum Heating Temperature.

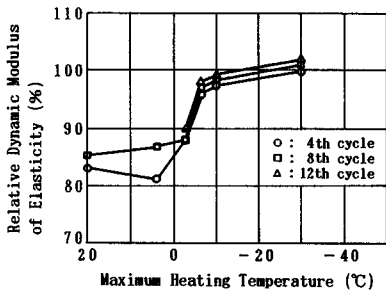
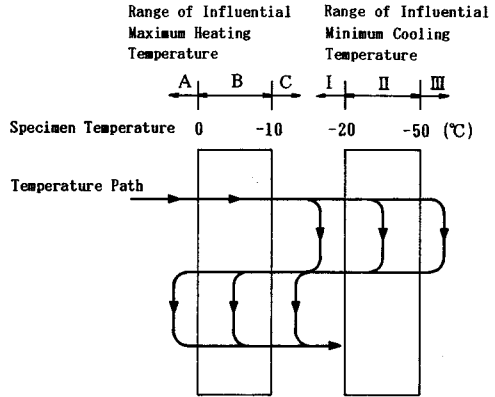


Fig. 16 Relation Between Relative Dynamic Modulus of Elasticity and Maximum Heating Temperature.

の図から温度変化の下限値が劣化に大きく影響する範囲は約 $-20^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ のかなり広い範囲にわたるが、そのうち、 $-40^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ の範囲は注目すべき影響を及ぼしているようである。Fig. 15は $+20^{\circ}\text{C}$ における5サイクル後の残留ひずみと繰り返し温度範囲の最高温度との関係を示す。また、Fig. 16の縦軸は、氷点下での繰り返しだけによる劣化をFig. 10における基準線とそれぞれの相対動弾性係数との差で示し、横軸には繰り返し温度範囲の最高温度を示す。Fig. 15, 16より、温度変化の上限値が劣化に大きく影響する範囲は約 $-10^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ のようであり、かなり狭い範囲となっている。

Fig. 17は、構造物が繰り返し冷却されたときを想定して、コンクリートの劣化に及ぼす繰り返し温度範囲の



Degree of Concrete Deterioration

Range of Maximum Temperature	Range of Minimum Temperature		
	I (over -20°C)	II ($-20^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$)	III (below -50°C)
A (over 0°C)	○	△	×
B ($0^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$)	○	△	△
C (below -10°C)	○	○	○

- : no deterioration
- △ : depend on the temperatures
- × : maximum deterioration

Fig. 17 A Model for Estimating Concrete Deterioration.

影響をモデル化して示したものである。ここでは、最低温度を範囲I, II, III, または、最高温度を範囲A, B, Cと区分してコンクリートの劣化の状態を示した。まず、冷却時の最低温度の影響において、最低温度が -20°C 以上(範囲I)であればコンクリートの大きな劣化は起こらず、最低温度が $-20^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ (範囲II)の中に入るとコンクリートは温度が低いほど劣化しやすくなるが、 -50°C 以下(範囲III)の場合にはいくら温度が低くなくてもさらに劣化が進行することはない。加熱時の最高温度の影響においては、最高温度が -10°C 以下(範囲C)であれば最低温度に関係なく劣化は起こらず、約 $-10^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ (範囲B)の場合には温度が高いほど劣化は激しくなるが、 0°C 以上(範囲A)であれば温度が高くなってもさらに劣化が進行することはない。したがって、最低温度が範囲I, または、最高温度が範囲Cにある場合には大きな劣化は起こらず、最低温度と最高温度が範囲IIとBにある場合には最低温度が低いほど、また、最高温度が高いほど劣化が激しくなり、範囲IIIとAの場合には最も劣化することになる。しかし、コンクリートの劣化に影響する最高温度の範囲はかなり狭く、しかも、その間での劣化度は急激に違ってくるので、現実的には最高温度が -10°C を超えた場合に劣化が起こると判断するのがより妥当ではないかと考えられる。

すなわち、コンクリートの温度が -20°C 以下まで下がらないようにするか、それ以下に下がった場合には再

び -10°C 以上に上がらないようにすれば良いことになるが、そのようなコントロールができない場合には、それぞれの温度範囲に応じて劣化に対する配慮が必要である。

4. ま と め

本研究では、コンクリートが低温にさらされたとき、外部から水が供給されていない場合において常温と低温の繰り返しによって起こる劣化に影響する温度範囲およびコンクリートの各構成要素の影響について検討した。それらの主な結果をまとめると次のようになる。

(1) コンクリートが常温と低温の繰り返しを受けたときに生じる残留ひずみは相対動弾性係数とほぼ直線関係にあり、凍害を評価するのによいパラメーターである。

(2) コンクリート構成要素の中でコンクリートの劣化に最も影響を及ぼすのはペーストの劣化であり、ペーストの品質を改良することによってコンクリートの劣化も改善できると考えられる。ただし、コンクリートの劣化を調べるにあたって、ペーストと骨材の線膨張係数の違いによる界面の劣化も重要な影響を与えることから、界面の問題も含めて考慮すべきであると考えられる。

(3) コンクリートの劣化は繰り返し温度範囲の違いによって大きく違ってくるが、その際、コンクリートの劣化度は繰り返し温度範囲の最低温度と最高温度の両方によって左右される。

a) 冷却時の最低温度が -20°C 以上であるときコンクリートはあまり劣化せず、 -20°C ～ -50°C の場合には温度が低いほど劣化が激しくなる。また、 -50°C 以下の場合には温度の低下によってさらに劣化が激しくなることはなく、事実上劣化がそれ以上進行しない範囲である。

b) 融解時の最高温度がコンクリートの劣化に影響を及ぼす温度範囲は約 -10°C ～ 0°C であり、 -10°C 以下であれば最低温度に関係なく劣化は起こらず、 0°C 以上であれば温度が高くなってさらに劣化することはない。

したがって、実際の構造物において、最低温度が -20°C 以下になりかつ最高温度が -10°C 以上になる場合には、それぞれの温度範囲に応じてここで考えているような種類の劣化に対する配慮が必要である。そしてその具体的な対策については今後研究が行われなければならない。

参 考 文 献

- 1) 三浦 尚：極低温下のコンクリートの物性，コンクリート工学，Vol. 22, No. 3, pp. 21～28, 1984.
- 2) Rostásy, F.S. and Wiedemann, G. : Stress-strain-

behaviour of concrete at extremely low temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 10, No. 4, pp. 565～572, 1980.

- 3) Tognon, G. : Behaviour of mortars and concretes in the temperature range from $+20^{\circ}\text{C}$ to -196°C , Proceedings of The Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, III-24, pp. 229～249, Tokyo, 1968.
- 4) FIP : Cryogenic behaviour of materials for prestressed concrete, Wexham Springs, pp. 84, 1982.
- 5) 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, 22, pp. 125～132, 1989.
- 6) Elices, M., Planas, J. and Corres, H. : Thermal deformation of loaded concrete at low concrete, 2 : Transverse deformation, Cement and Concrete Research, Vol. 16, No. 5, pp. 741～748, 1986.
- 7) Miura, T. and Lee, D.H. : Deterioration of concrete subjected to repetition of cooling to -70°C , Review of the 42nd General Meeting, The Cement Association of Japan, pp. 190～193, 1988.
- 8) Planas, J., Corres, H., Elices, M. and Chueca, R. : Thermal deformation of loaded concrete during thermal cycles from 20°C to -165°C , Cement and Concrete Research, Vol. 14, No. 5, pp. 639～644, 1984.
- 9) Czernin, W. (徳根吉郎訳) : セメント・コンクリート化学，技報堂出版，pp. 216, 1969.
- 10) Rostásy, F.S., Schneider, U. and Wiedemann, G. : Behaviour of mortar and concrete at extremely low temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 9, No. 3, pp. 365～376, 1979.
- 11) Cordon, W.A. : Freezing and thawing of concrete-mechanisms and control, ACI Monograph, No. 3, pp. 99, 1966.
- 12) Powers, T.C. : A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete, Journal of ACI, Vol. 16, No. 4, pp. 245～272, 1945.
- 13) Goto, Y. and Miura, T. : Deterioration of concrete subjected to repetitions of very low temperatures, Transactions of the Japan Concrete Institute, pp. 183～190, 1979.
- 14) Koh, Y. and Kamada, E. : The behavior of concrete subjected to freezing and thawing as a reference for frost resistivity of concrete, Proceedings of The Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, III-99, pp. 300～315, Tokyo, 1968.
- 15) Stockhausen, N., Dorner, H., Zech, B. and Setzer, M.J. : Untersuchung von gefriervorgängen in zementstein mit hilfe der DTA, Cement and Concrete Research, Vol. 9, No. 6, pp. 783～794, 1979.
- 16) 三浦 尚：土木材料学，コロナ社，1986.
- 17) 三浦 尚・藤原正雄：極低温の温度変化を受けるコンクリートの劣化に関する研究，第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp. 57～60, 1982.
- 18) 李 道憲・三浦 尚：低温の繰返しを受けたコンクリー

- トの歪と劣化との関係に関する研究，土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp.180~181, 1988.
- 19) 李 道憲・三浦 尚・児玉浩一：繰り返し冷却されたコンクリートの劣化に及ぼす温度範囲の影響，土木学会第 44 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp.368~369, 1989.
- 20) MacInnis, C. and Whiting, J.D. : The frost resistance of concrete subjected to a deicing agent, *Cement and Concrete Research*, Vol.9, No.3, pp.325~336, 1979. (1990.2.9・受付)
-