

論文

[1120] 載荷時に -70°C まで繰り返し冷却されたコンクリートの歪と劣化に関する研究

正会員 三浦 尚 (東北大学工学部)

Kova'cs Ferenc (東北大学工学部)

李 道憲 (東北大学大学院)

正会員○小野 雅毅 (東北大学大学院)

1. はじめに

極低温にさらされるコンクリートは、従来よりLNGタンクの本体や障壁等に数多く使用されてきている。また、近年、液体窒素温度(-196°C)で超伝導を示す物質が発見されており、その冷却容器としてコンクリートが使用されることが予想され、これまでよりもコンクリートが極低温下で使用されることがさらに多くなると思われる。これらの構造物は、場合によっては大きな温度変化を受けて劣化することが考えられるため、これまでも荷重が載荷されない状態でのコンクリートを繰り返し冷却し、その歪の挙動や劣化の進行が調べられている。しかし、実際の構造物のような載荷した状態でのコンクリートに関する研究はあまり行われていない。一方、過去の研究から、このようなコンクリートの劣化に影響する温度範囲は常温から -70°C 以上の範囲であると言われている^{1,2)}。本研究では、以上のことから荷重を受けているコンクリートが極低温の繰り返しを受けた場合の劣化を調べるため、湿潤状態と乾燥状態のコンクリート供試体に載荷条件や冷却サイクル数を変えて、 -70°C まで繰り返し冷却を行い、歪と動弾性係数の測定を行った。

2. 実験

2. 1 実験材料

本実験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。セメントは市販の早強ポルトランドセメント(比重3.13)を使用し、細骨材は宮城県白石川産川砂(比重2.56)粗骨材は宮城県丸森産砕石(比重2.87)を使用した。なお、コンクリートの圧縮強度は $365(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 、引張強度は $28.3(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 、含水量は6.49%であった。

表-1 コンクリートの配合表

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m^3)			
			W	C	S	G
25	56	42	194	346	726	1124

2. 2 供試体

(1) 湿潤状態の供試体

コンクリート供試体は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を使用した。供試体は28日間水中養生を行い、その後、供試体表面に歪ゲージと熱電対を貼付し、湿潤状態を保つためにコーティングを施した。

(2) 乾燥状態の供試体

湿潤状態の供試体同様、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を使用した。供試体は28日間水中養生した後、重量変化が無視できるようになるまで、 $+110^{\circ}\text{C}$ でオーブンドライし、その後、供試体表面に歪ゲージと熱電対を貼付し、乾燥状態を保つためにコーティングを施した。

2. 3 実験方法

コンクリート供試体への載荷及び冷却は、図-1のように行った。すなわち、供試体を低温槽の中に設置した後、鋼製フレームをボルト締めすることにより載荷し、クリープが無視できるよ

うになるまで荷重を維持した。その後、液体窒素を噴射することにより -70°C まで冷却し、連続して歪を測定するとともに、動弾性係数を測定した。なお、冷却速度は $0.33^{\circ}\text{C}/\text{min}$ である。この冷却速度は表面と中心の間の大きな温度差を避けるのに十分遅いものと思われる。また実験に際して熱電対を供試体中心に埋設したダミー供試体を同時に冷却したが、側面と中心との温度差は 2°C 未満であった。

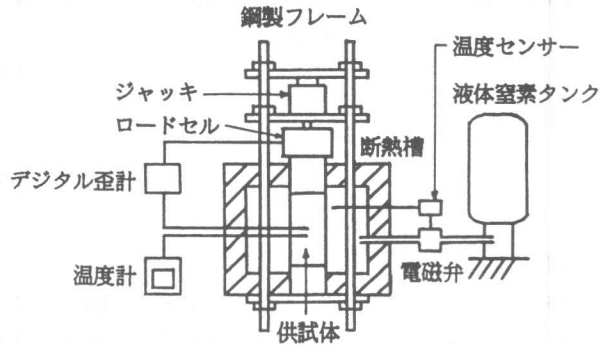


図-1 実験装置の概略図

3. 実験結果と考察

(1) 湿潤状態のコンクリート

図-2～図-4は、荷重条件の異なる湿潤状態のコンクリートの1サイクル目の温度と歪との関係を示している。図-2より、コンクリートは無荷状態の時は、歪挙動は縦方向、横方向ともに同様な履歴を示す。図-3は、圧縮強度の20%荷重したもの、図-4は、40%荷重したものの温度と歪との関係を示している。コンクリートは、荷重状態では、縦方向歪と横方向歪は明かに違う挙動を示す。荷重したものは、無荷のものに比べて縦方向の膨張が抑えられていることがわかる。その傾向は荷重が大きくなるほど顕著である。一方、横方向歪の挙動は、その履歴曲線の概形は無荷のものとはほぼ一緒である。

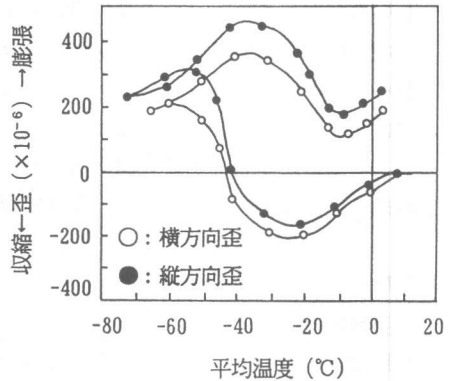


図-2 歪と温度との関係
(0%荷重)

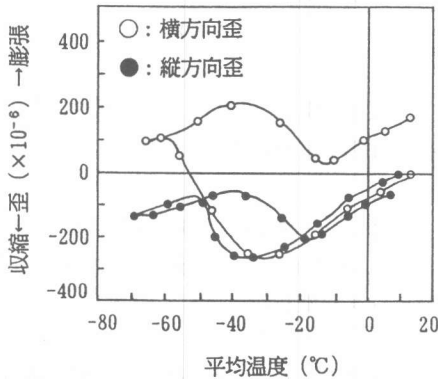


図-3 歪と温度との関係
(20%荷重)

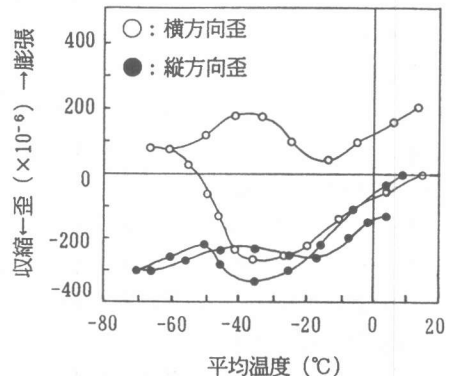


図-4 歪と温度との関係
(40%荷重)

図-5は、サイクル数と縦方向残留歪との関係を示している。ここでも、無载荷のものと同载荷したものでは明かな違いがある。縦方向残留歪に関しては、無载荷のものはサイクルの増加にともなって膨張側に残留する。しかしながらその増加量は、はじめの1サイクル目の残留歪量を最大として減少する傾向にある。一方、载荷したものの縦方向残留歪は、サイクル数と荷重の増加にともなって収縮側に増加する。これはサイクル数によらず同様の傾向を示している。

図-6は、サイクル数と横方向残留歪との関係を示している。横方向残留歪に関しては、その歪挙動にばらつきはあるものの、サイクル数と荷重の増加にともなって増加する傾向にある。

これは、縦方向に関しては荷重によって常に圧縮力を受けている状態であり、横方向に対しては、荷重によって常に引張力が働き広がりやすい状態になっている。そこへ凍結融解作用による組織の緩みが生じて塑性変形したものとされる。よって、荷重の増加にともなって横方向にはより膨張側に、縦方向にはより収縮側に变形する傾向にある。

図-7は、サイクル数と残留体積歪との関係を示している。残留体積歪に関しては、ばらつきはあるものの、载荷しているものと、していないものでは明かな差があり、結果としては、载荷していないものが最も膨張していることがわかる。これは、荷重によって荷重方向の膨張は抑えられ、それによる影響が直接全部荷重方向と直角の方向に反応するわけではないことを示している。

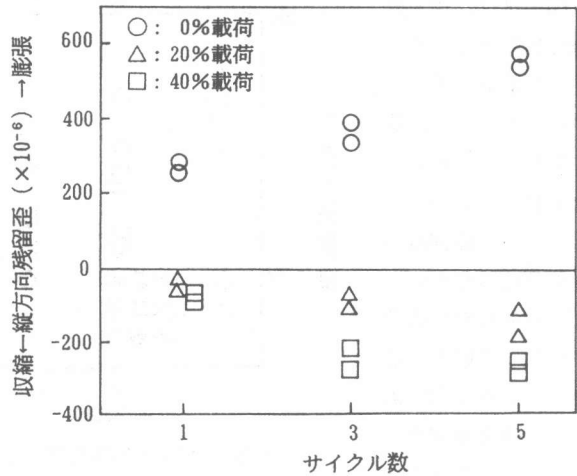


図-5 縦方向残留歪とサイクル数との関係

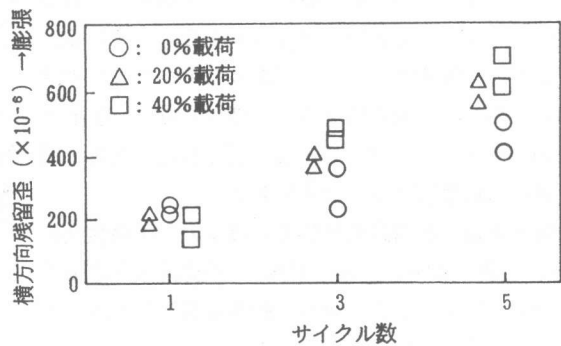


図-6 横方向残留歪とサイクル数との関係

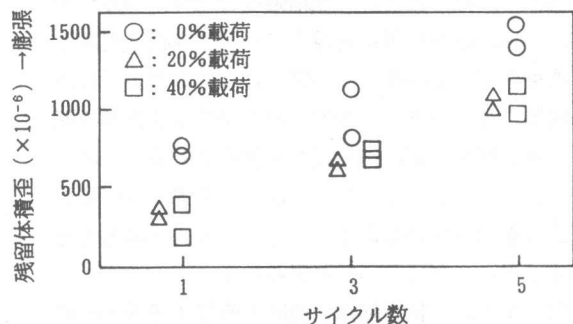


図-7 残留体積歪とサイクル数との関係

図-8は、相対動弾性係数とサイクル数との関係を示している。これより、最も劣化しているものは無荷荷のもの、次いで、圧縮強度の40%荷荷したもの、20%荷荷したものの順になっている。これはサイクル数によらず同様な傾向を示している。これより、全く荷重をかけない

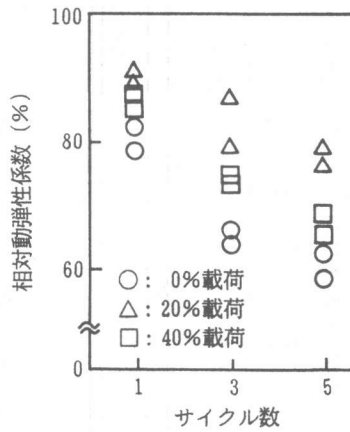


図-8 相対動弾性係数とサイクル数との関係

よりは、ある程度かけたほうがコンクリートは劣化しにくいことを示している。そして、40%と言う荷荷量は荷重によるよい影響のピークを越えて、むしろ荷重によって劣化が大きくなることを示している。そこで、20%がそのピークであったのかどうかを調べるために、荷荷の値をさらに細かく分け、圧縮強度の10%と30%で調べてみることにした。なお、繰り返し冷却数は3サイクルである。

図-9は、相対動弾性係数と種々の（圧縮強度の0%、10%、20%、30%、40%）荷荷荷重との関係を示している。この図から、荷荷荷重20%がコンクリートの劣化を抑えるピークであることがわかる。これは、マイクロクラックの発生に対する荷荷の影響が最も効果的に働いて、全体として発生するマイクロクラックの量が最小になったためと思われる。

図-10は、種々の（圧縮強度の0%、10%、20%、30%、40%）荷荷荷重下での縦方向歪と温度との関係を示している。この図から、その荷重ごとの歪履歴を見ても、20%という荷荷は縦方向の残留歪が膨張から収縮へと転ずる荷荷であることがわかる。このことから、ここでは、荷荷方向の残留歪が膨張を示さない荷荷量が、コンクリートの劣化を抑えるピークではないかと思われる。

図-11は、相対動弾性係数と残留体積歪との関係を示している。この図から、相対動弾性係数と残留体積歪は相関があることがわかる。

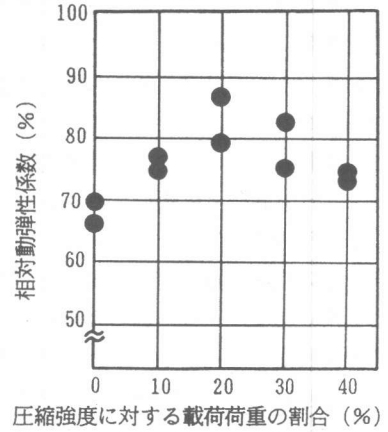


図-9 相対動弾性係数と荷荷荷重との関係

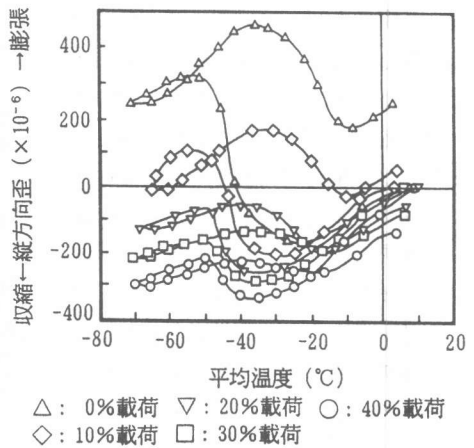


図-10 種々の荷荷下での縦方向歪と温度との関係

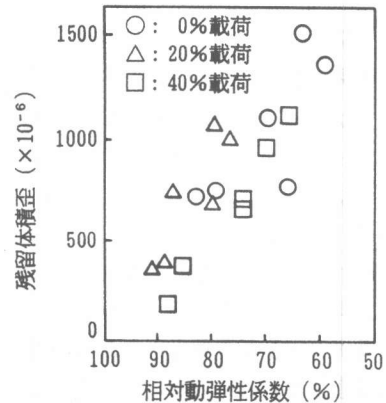


図-11 残留体積歪と相対動弾性係数との関係

(2) 乾燥状態のコンクリート

図-12~15より、乾燥状態のコンクリートは無載荷のもの、と、載荷したものでは、その歪履歴(縦方向歪・横方向歪)の概形に関してはほとんど差はなく、全体として線形的で等方で可逆的な挙動を示すことがわかる。

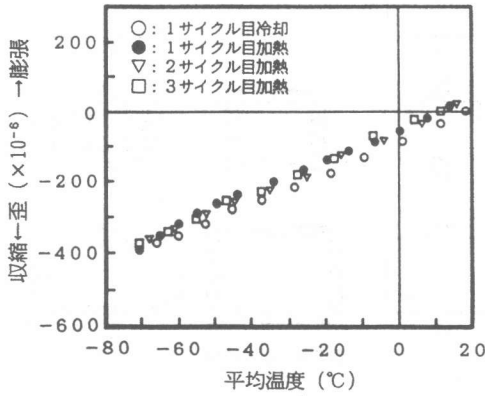


図-12 縦方向歪と温度との関係
(乾燥状態・0%載荷)

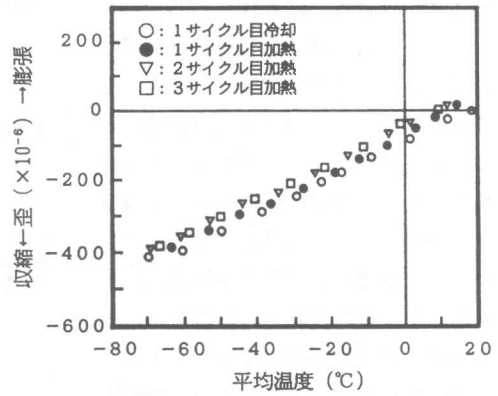


図-13 横方向歪と温度との関係
(乾燥状態・0%載荷)

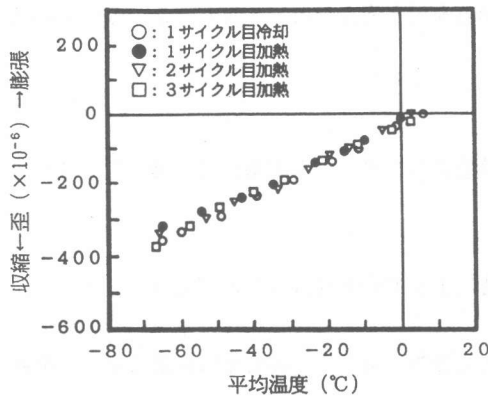


図-14 縦方向歪と温度との関係
(乾燥状態・40%載荷)

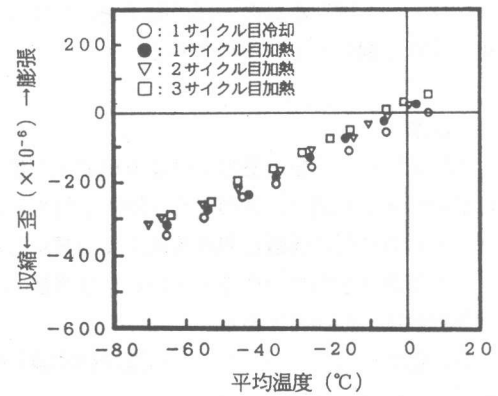


図-15 横方向歪と温度との関係
(乾燥状態・40%載荷)

乾燥状態のコンクリートを繰り返し3サイクル冷却・加熱した時の相対動弾性係数は、無載荷のものは約94%、載荷したもの(圧縮強度の40%)は約90%程度であった。このことから、乾燥状態のコンクリートは繰り返し冷却によってあまり劣化せず、また、荷重の影響も少ないことがわかる。また、乾燥状態のコンクリートを繰り返し冷却することなしに、載荷のみを行いその前後で動弾性係数を測定したところ、5%程度の減少が見られることから、無載荷のものと載荷したものの相対動弾性係数の4%程度の差は、載荷した時に起こったものであることがわかる。

以上の湿潤および乾燥状態のコンクリートに対する実験結果から、凍結によるコンクリートの変形挙動とそれともなう劣化を図-16のように考えることができる。水を含んでいないコンクリートは、荷重の有無によらず、温度の低下とともに収縮し、常温にもどすと膨張して元の寸法にもどる。ところが、コンクリートが水を含んでいる場合には、温度の低下によってコンクリート中の水分が凍結膨張し、コンクリート組織にある種の塑性変形を引き起こす。荷重されている場合には、さらに水分の凍結時の膨張圧と荷重による外力とが加算されるため、塑性変形は荷重と直角方向に大きく生じる。

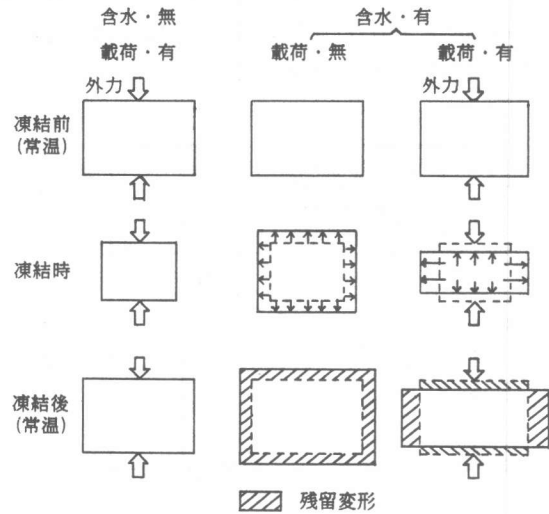


図-16 コンクリートの凍結による変形の模式図

外力がさらに大きい時には、塑性変形が生じる時には外力方向はむしろ収縮されるような変形となる。そして、これらの塑性変形は、再び常温にもどっても残留することになる。また、実験によって、冷却前後の細孔径分布に変化があることが確かめられていることから、この塑性変形は、コンクリート内部組織の一部の破壊をともなっているものと考えられ、これがコンクリートの劣化に大きく関係しているのである。

4. 結論

本研究では、荷重を受けている湿潤および乾燥状態のコンクリートが極低温の繰り返しを受けた場合の劣化を調べ、次のような結論が得られた。

- (1) 相対動弾性係数と残留体積歪は相関がある。
- (2) 湿潤状態のコンクリートの劣化は荷重の割合によって抑制されることがあり、そのピークは圧縮強度の約20%である。
- (3) 乾燥状態のコンクリートの歪挙動は線形的・可逆的であり、その劣化は荷重によって影響されず、ほとんど劣化しない。

<謝辞>

本研究に際して、東北大学工学部土木工学科4年開 進一君に終始御協力を頂いた。

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.3，1984，pp.21-28
- 2) Rostásy, F. S., and Wiedmann, G.: Stress-Strain-Behaviour of Concrete at Extremely Low Temperatures, Cement and Concrete Research, Vol.10, No.4, 1980, pp.565-572