

V—8 凍結融解時に生ずるコンクリート中の内部圧力について

北海道大学工学部	正員	佐伯 昇
北海道大学工学部	正員	高田宣之
北海道大学工学部	正員	藤田嘉夫

1. まえがき

コンクリートが凍害を受ける主因は、水が凍結する時に密度が $0.9179/cm^3$ ($0^\circ C$) となり、体積が約9%膨張することにある。このため、凍害を起さないようにするためには、根本的にはコンクリート中の水分を無くすることである。土木構造物では、一般に露出面が拡大するために、この方法は経済的に難しい。現在用いられている方法は、氷の膨張で生じたコンクリート内部の水圧を気泡間隔係数200 μ 程度のエントレインドエアーで逃がす方法で、AE剤が用いられている。これによって、コンクリート内部組織に生ずる圧力を緩和して、組織の内部破壊を防いでいる。これが現在一般に認められているPowersの水圧理論である。

本論文はコンクリート中に小さな圧力センサーを埋設して、凍結融解作用時に発生する内部圧を測定したもので、温度が下がり凍結する過程における内圧、あるいは凍結から融解に移行する時の内圧について実験したもので、凍害に対するメカニズムを解明するための基礎的な実験および考察を行ったものである。

2. コンクリート内部に生ずる内圧の測定法

コンクリート内に圧力センサーを埋めこみ、打設時からの内部圧力を測定した。凍結融解時では、供試体をビニールで封印して外部からの水分の供給を遮断したものと、その後水中に入れて常に水分の供給がある状態にしたものと、続けて試験を行った。

(1) 供試体 供試体は 10 cm の立方体とし、図-1に示すように打設側面に対して深さ 7 mm の位置に圧力センサーをガラス円柱に接着した状態でセットした。同時に、その位置に熱電対を埋め込み圧力センサー近傍の温度を測定した。圧力センサーの寸法は直径 6 mm 厚さ 0.6 mm の円板形で、その性能は容量 10% 、等価歪は 2000×10^{-6} である。圧力センサーをガラス円柱に取付る方法は、直径 2 mm 厚さ 10 mm のガラス円柱の表面をよく磨き、圧力センサーの受圧面を上にしてガラス円柱上面にPC-12で接着し、またその周囲にも圧力センサーの高さと同じになるように塗り、表面は平らな面とした。ガラス裏面でイヤホンコードと接続し、コーティングセメントで防水し、さらに、このコードをビニール管に入れリード線から水が入るのを防いだ。また、打設時の側面の表面から 7 mm の間隔をとるため、直径 2 mm 、長さ 7 mm のプラスチック棒を4本上面に接着した。

(2) 配合、打設 セメントは、普通ポルトランドセメント ($\sigma 28 = 41.2\%$) を用い、細骨材は錦岡海岸砂 (比重 2.77 、吸水率 0.94% 、単位容積重量 $1876\text{ Kg}/m^3$ 、 $F, M = 2.61$)、粗骨材には八戸産 (比重 2.51 、吸水率 3.85%)、人工軽量骨材ピルトン (比重 1.39 、 7.2 時間吸水したもの) および直径 12 mm のガラス球 (比重 2.50 、吸水率 0%) を用いた。この3種の粗骨材を用いたコンクリートと、粗骨材を入れないモルタルの4種を作製した。配合は、水セメント比 50% 、細骨材率 42% 、目標空気量 5% 、単位水量 $145\text{ Kg}/m^3$ とした。打設は木製型枠を用い、練り混ぜは手練りによった。圧力センサーを接着したガラス円柱

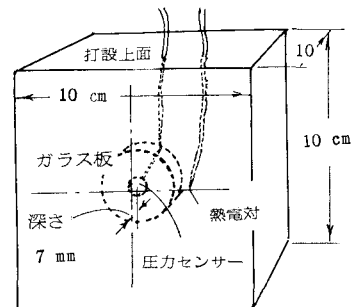


図-1 供試体

はテングスで固定し、コンクリート内に空隙ができないように十分手突きを行って締め固めた。打込み後1日で脱型し、材令2週間まで水中養生を行った。その後、凍結融解試験を開始した。

(3)実験方法 コンクリートの内部圧力測定は、小型万能デジタル測定器を用い、コンクリートの内部温度を同時に測定した。測定は打設時から開始し、打込み時には測定時間間隔を30分、その後安定状態をみて通常測定間隔を1時間とした。凍結融解試験は、1日/サイクルとし、圧力センサー近傍の温度を $+2^{\circ}\text{C}$ ～ -2.2°C 程度に変化させた。

凍結融解時の氷による供試体と容器の拘束を除くため、側圧を吸収する材料を置いた。

3. Powers の水圧理論による凍結融解時のコンクリートの内圧

Powers によると硬化セメントペースト中に生ずる凍結時の水圧 (P) は次式で表わされる。

$$P = f(\tau, s, u, R, K, \phi) \dots\dots (1)$$

τ は水の粘性係数で 0.018 ポアズ、 s は飽水度で飽水状態を考えると $s=1$ とする。 u は単位温度低下に対する凍結水の増加率 ($s=1$ のとき $u=0.09 \sim 0.305/^{\circ}\text{C}$)、 R は温度低下速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{sec}$)、 K はセメントペーストの透水性に関する係数で、 $3550e^{3.6} \times 10^{-17} (\text{cm})$ 、 ϕ はセメントペーストの空隙率 $0.1 \sim 0.35$ 、 $\phi(l) = l^3/rb + 3l^2/2$ で l は気泡間隔係数 (cm)、 rb は気泡の半径 (cm) である。(1)式において、空隙中の水の量が空隙の9/7%以下であれば $P=0$ となり内圧は生じない。また透水性が小さく、凍結速度が早く、気泡間隔係数が大きいほど水圧が大きくなる。 $s=1$ の場合を次の条件で計算すると図-2のようになる。気泡の半径 20μ 、気泡間隔係数を 200μ 、温度の低下速度を1時間 5°C 、 u を $w/c=0.45$ で 0.210 、 $w/c=0.62$ で 0.303 を用いている。 $e=0.2$ で $P=10\%$ 程度の水圧が生じていることになる。

4. 実験結果および考察

(1)打込みから養生時のコンクリートの中の内圧

図-3は打込み時から凍結融解開始前までのコンクリート中の内圧を測定したもので、凍結融解時の内圧と比較するために測定したものである。1日の最大の内圧と最小の内圧をプロットしている。(a)はモルタルの場合で他の供試体に比してセメント量が多いために水和熱が高く、コンクリート表層部による拘束力大きいことなどが考えられる。また、

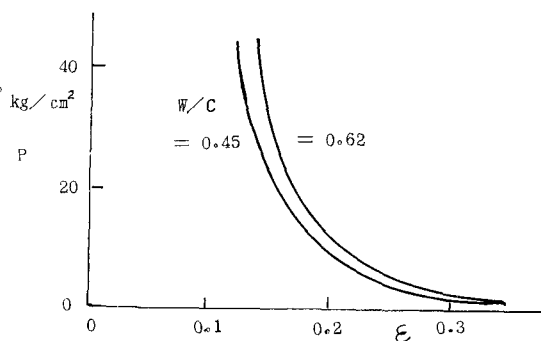
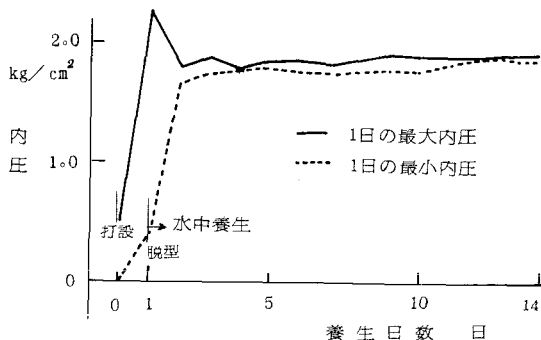
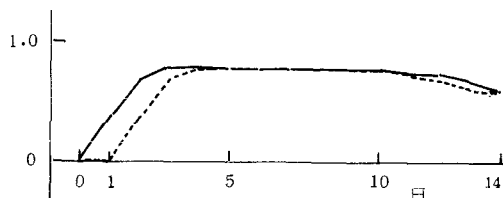


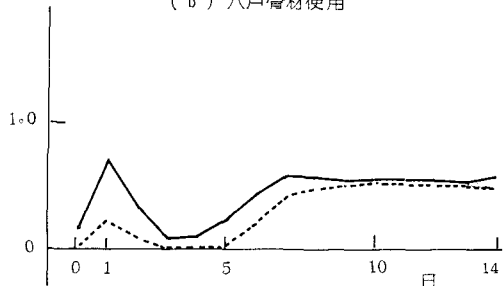
図-2 凍結時の内部水圧



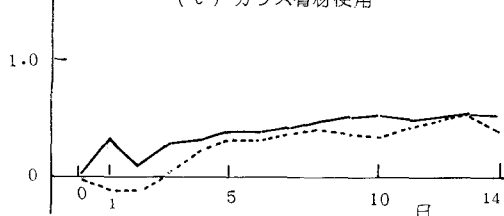
(a) モルタル



(b) 八戸骨材使用



(c) ガラス骨材使用



(d) 人工軽量骨材使用

図-3 打込から養生時のコンクリート中の内圧

圧縮力は圧力センサーの面の向きによるものと考えられる。粗骨材が入ることによって水和熱も抑えられ、内圧はモルタルが1.4%に対して、粗骨材が入る事により0.4~0.6%であり、約 $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ に内圧が抑えられている。また内圧は材令10日以後の変動はほとんどないことがわかる。

(2) 封印凍結融解時と水中凍結融解時のコンクリート中の内圧

図-4はモルタルの場合で養生時に内圧が高かったために、凍結融解時にはむしろ内圧が緩和される方向になり、サイクルをかけても内圧の上昇は見られなかった。また温度降下および上昇過程でもほぼ同じ経路をたどり、モルタル内部での圧力は平常であり、内部組織の劣化はコンクリートに比して緩慢であることがうかがわれる。しかしサイクルが多くなるにつれて凍融過程において差が生じてきている。図-5は八戸の粗骨材を用いた場合で吸水率が4%程度であり、比較的大きな値をもっている。封印凍結融解で数サイクルで最大近くまで内圧が上昇し、それ以後の内圧の増加は少ない。また水中凍結融解しても内圧の増加は封印状態の場合と差はない。 $-1^{\circ}\text{C} \sim -4^{\circ}\text{C}$ で内圧のピークがあり、凍結あるいは融解過程時でそのピークはあまり差がない。36サイクルでピーク値は2%程度であり、最小値は最低温度の時に起り、約1.2%である。モルタルのみの場合の吸水率が3%程度 ($w/c=0.5$, 10cmの立方体)であり、八戸骨材とモルタルの吸水率の差が少ないことが内圧の安定の一因と考えられる。

図-6はガラス骨材を使用した場合で、封印の場合 $-2^{\circ}\text{C} \sim -3^{\circ}\text{C}$ で内圧のピークを示す。マトリックスと骨材との吸水あるいは透水性の差が一

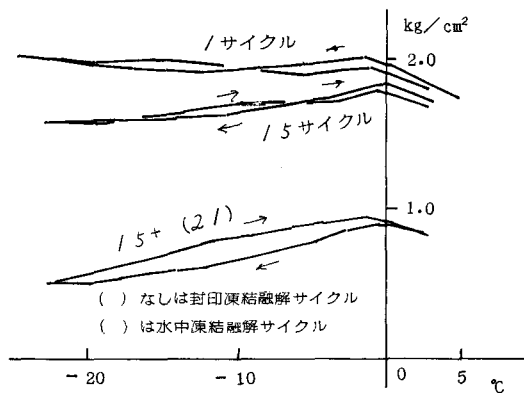


図-4 凍結融解時の内圧 (モルタル)

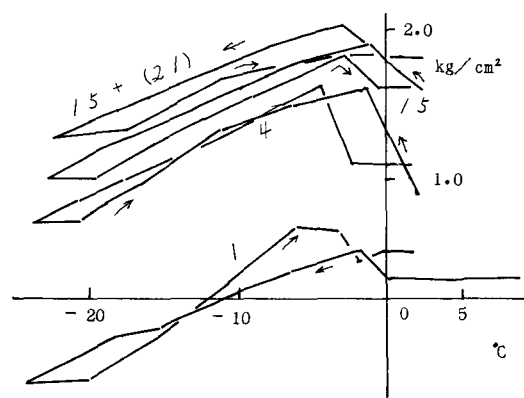


図-5 凍結融解時の内圧 (八戸骨材)

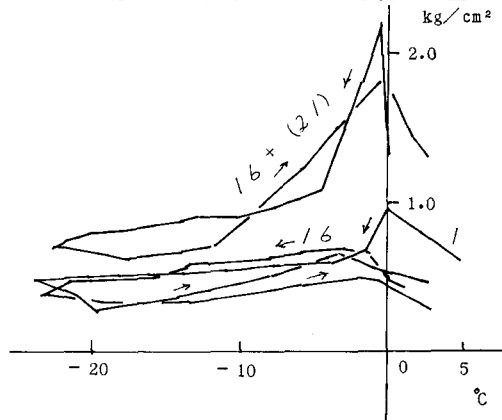


図-7 凍結融解時の内圧 (人工軽量骨材)

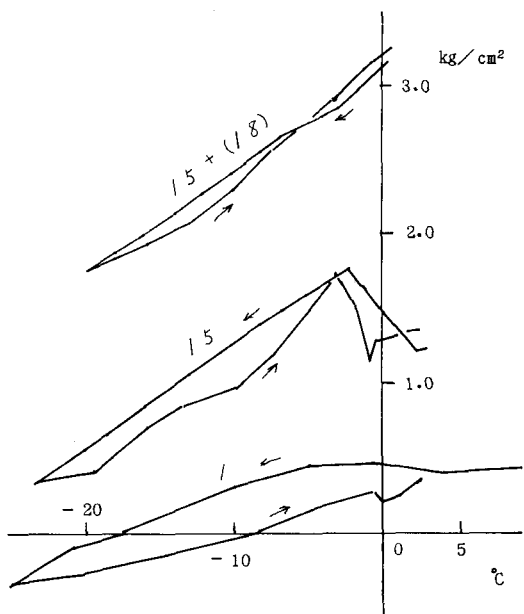


図-6 凍結融解時の内圧 (ガラス骨材)

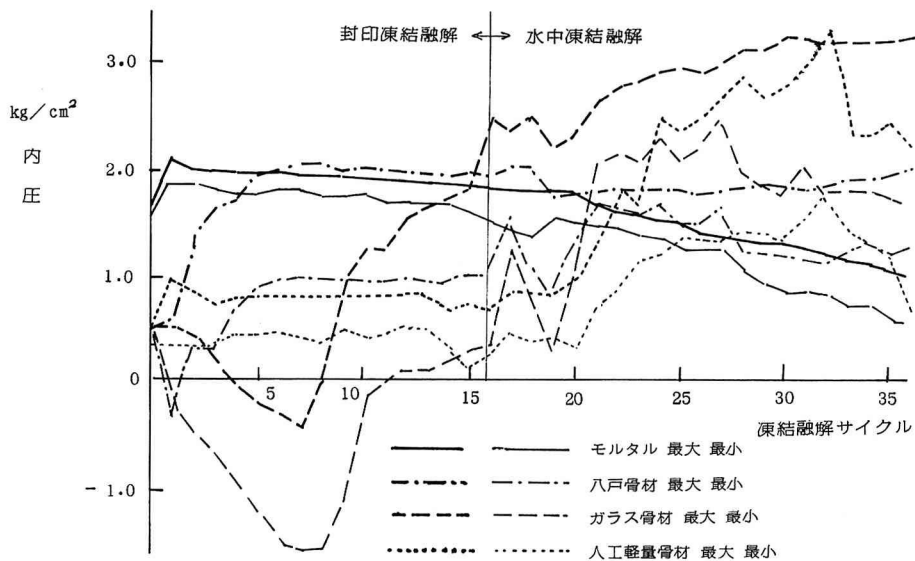


図-8 コンクリート中の最大・最小内圧

因と考えられる。その後温度降下によって、内圧は減少し、その傾きも他に比して大きい。これは粗骨材の膨張係数の影響によることが一因と考えられる。水中凍結融解が繰返されると、前述のピークが生じない挙動を示し、融けている状態でも高い内圧が残っている。

図-7は人工軽量骨材を用いた場合で封印凍結融解では内圧は温度変化に対してほとんど変化なく、また養生時の内圧に比較して多少高くなっているが、安定した内圧を示している。水中凍結融解の場合は -0.5°C ～ -2°C でピークを示し、大きな内圧となる。水の吸収によって内圧の変動が大きくなる。

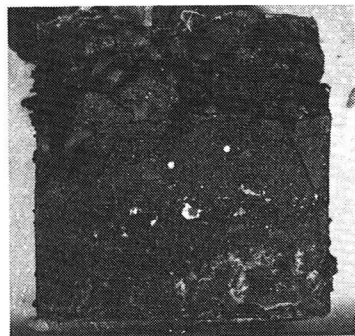


写真-1 破壊状況 (人工軽量骨材)

図-8は1サイクル中の最大内圧と最小内圧をプロットしたもので、モルタルは最大最小の圧力の差は小さく、また凍結融解に対して内圧は減少する傾向を示した。八戸骨材の場合は封印および水中凍結融解との内圧の差はなく、最大内圧が2%程度で一定している。ガラス骨材の場合は封印、水中凍結融解とも内圧は大きく変化し、また人工軽量骨材の場合は水中凍結融解によって大きな内圧が生じ、封印凍結融解では内圧は低く安定していることなどがわかった。写真1は人工軽量骨材を使用した供試体で90サイクル程度受け破損した状況を示したものである。

5. まとめ

- (1) 水中凍結融解時のコンクリート中の内圧は骨材の性質に大きな影響を受け、粗骨材とマトリックスとの吸水性あるいは透水性の差がないほど内圧は小さく、安定している。
- (2) 凍結融解時のコンクリート中の内圧は、水圧、温度変形と骨材とマトリックスの性質の差によってさらに複雑になっている。

参考文献

- 1) T.C.Powers, Proc.Highw.Res.Bd.39, 1949, pp.184～211