



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	コンクリートの初期凍害防止に対する空気量の効果
Author(s)	洪, 悦郎
Citation	北海道大學工學部研究報告, 92, 43-50
Issue Date	1979-01-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41544
Type	departmental bulletin paper
File Information	92_43-50.pdf



コンクリートの初期凍害防止に対する空気量の効果

洪 悦郎*

(昭和 53 年 7 月 10 日受理)

Effect of Entrained Air on the Prevention of Frost Damage of Concrete at Early Ages

Yoshiro KOH

(Received July 10, 1978)

Abstract

This paper presents an outline of experimental studies on winter concreting to prevent frost damage of concrete at early ages.

The drop of the measured data of concrete damaged by frost action at early ages from a curve showing the relationship between the tensile strength and the dynamic modulus of elasticity of sound concrete is remarkably large. However, the data after 28 days of curing are plotted on the curve by healing of the concrete, although the values of tensile strength are not so high compared with that of sound concrete. Therefore, it is desirable to measure the dynamic modulus of elasticity combined with the tensile strength for the evaluation of properties of concrete against frost action. In the case of using ordinary coarse aggregate with a maximum size of 20 mm, it is necessary to secure 4 % of the entrained air and more than $40^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$ of maturity for the prevention of frost damage at early ages.

1. まえがき

寒中コンクリートにおいては、初期凍害の防止はその主要目標である。特に凍結融解作用での温度要因は、他の諸要因と比べて重要な要因である。

本論文においては、凍結温度要因の影響と、初期凍害を防止する手段としての適正空気量の重要性に関する最近の研究について述べ、今後解明を要する問題点を指摘しようとするものである。

2. 研究の基盤¹⁾

札幌で戦後最初の鉄筋コンクリートアパートが 1949 年 10 月から寒中に施工されたときから、著者は寒中コンクリートの施工研究を開始した。その頃、コンクリートの蒸気養生について、英国の Nurse が $^{\circ}\text{C} \cdot \text{hr}$ による積算温度の適用を提唱し、Saul が発表した研究論文脚注に寒中コンクリートには -10°C からの積算温度を用いるのが良いとの意見が示された。これに着目して -10°C からの積算温度で初期養生の効果に関する実験データを、1953 年にスウェーデンの S.G. Bergström が整理した論文を発表した。この方式の簡便さを認めて、わが国におけるセメント強度

*) 建築工学科 建築材料科学講座

に基いて所要コンクリート強度を得るための水セメント比を求める浜田稔による計算式と積算温度を組合せた強度推定方式を著者は 1959 年に発表し、積算温度方式または $^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 方式と呼んで 1965 年から日本建築学会の標準仕様書（略称 JASS 5）に採り入れた。

1957 年に著者は初期凍害の防止について必要な初期養生の限界を論じた論文を発表した。初期材令において数回の凍結融解に耐えるための必要条件として、コンクリートの引張強度が凍結融解回数以上となるべきだとしている。

北海道における日最高気温と日最低気温の組合せから、凍結融解回数を求めると、 -10°C 以下の最低気温になり且つ融解する回数はおおよそ 5 回とすれば安全だと考えて、引張強度 5 kg/cm^2 を得ることを必要条件にし、若干の安全を見込んだ圧縮強度 50 kg/cm^2 を得る初期養生を要求することとしたのである。図 1 に動弾性係数低下率 60%とした場合の所要引張強度についての線を当時の設定条件²⁾として示している。

仕様書中に寒中コンクリートについて著者の方法を採用された 1965 年時点では、特に明確な根拠となる実験データは少なかったが、AE 剤の使用を推奨し、水セメント比も 60%以下とする規定を設けたのである。

研究室の設備の関係で凍結融解繰返し作用の実験が十分に行なえなかったため、初期凍害防止のためのエントレインドエアの効果についての実験データを出すことができるようになったのは 1975 年以降の実験研究である。諸外国においても 1956 年以降は特に目新しい実験研究はないといってよい。

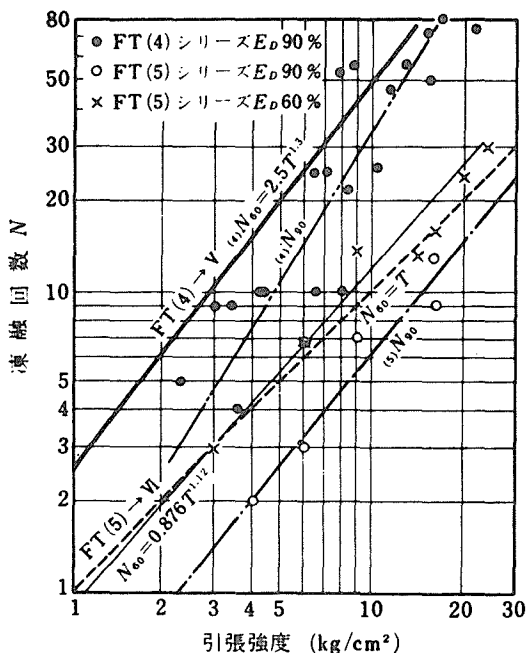


図 1 動弾性係数が初めの 60%および 90%になる凍結融解回数と引張強度の関係

3. 1975～1978 年の初期凍害に関する実験研究

1975 年～77 年の初期凍害防止に対する空気量の効果に関する研究は、人工軽量骨材コンクリートを対象として文部省科学研究費・一般研究(B) (昭和 50～51 年度) を得て、普通コンクリートと比較して行なったものである。1977 年の研究はその前提条件ともいえるべき凍結融解の温度要因を対象として、初期凍害でのコンクリートの膨脹挙動の面からとらえた実験研究である。

これらの実験研究は横山隆、金武漢、野越聖一らによって行われ、日本建築学会論文報告集に既に発表³⁾された。

3. 1 凍結温度要因の初期凍害に及ぼす影響に関する実験

この実験研究は 1977 年に金武漢と野越聖一を中心に進められたもので、硬化したコンクリートに対する長谷川寿夫の凍結温度要因に関する諸実験の成果を基盤にして、初期凍害ではどういふ影響が出るかを追究したものである。

これはセメント、骨材、コンクリートの調合を限定した実験で、初期凍害ではどの温度要因が最も影響するかを求めようとしたものである。したがって今後も広範囲に実験データを整備す

る必要があるが、JASS 5 での常用限界内についての性状を温度要因に関して概観できるものと考えている。

3. 1. 1 研究計画の概要

実験シリーズは3つあり、凍結融解試験での最低温度に関する I シリーズ、凍結速度に関する II シリーズ、凍結時の最低温度の保持時間に関する III シリーズから成っている。

I シリーズの最低温度は -5 、 -10 、 -20 、 -30°C の4種で、いわゆる急速気中凍結水中融解法により1日6サイクルとしたもので、30回の凍結融解までの初期材令コンクリートの挙動を明らかにしたものである。コンクリートの条件は、広島山砂利・山砂を用いた強度上の水セメント比60%、スランプ18cmに限定し、AE剤を入れないもの、セメント重量に対しAE剤を0.01%の不十分な添加、推奨されている0.03%として空気量の影響を加味し、積算温度で表現される20、40、 $60^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ の3種の試験開始時までの初期養生の程度の要因を加えたものとしている。低温であるほど温度影響は激しくなることは、十分硬化したコンクリートについては既に認められていたが、初期凍害でも更に明確な差が確認できるかを究めるためのものである。

II シリーズは、凍結速度の影響であるが、実験設備の制約から、1日6サイクル、3サイクルおよび1サイクルの3種とし、プログラムコントロールによって凍結速度を変え、凍結時の最低温度は -20°C に一定して30サイクルまで実験を行なっている。融解は水中融解のため急速法と同様となっている。コンクリートの条件はIシリーズと同様にAE剤混入量と試験開始時の積算温度をそれぞれ3種づつ選んでいる。

III シリーズは、凍結時の最低温度の保持時間の差を見るためのものであり、Iシリーズの1日6サイクルの急速凍結における冷却と融解の速度は変えないで、 -20°C の最低温度での保持時間を0、4、20時間の3種としたものである。コンクリートの条件はI、IIシリーズと同様にしている。

3. 1. 2 実験結果からの結論

1) I シリーズにより、凍結時の最低温度が低い程、凍害劣化の指標として測定した凍伸度が大となり、劣化が激しいことを示した。AE剤を用いなかったり、添加量が不十分であると、僅かな凍結融解回数で極めて大きな凍伸度を示し、 -10°C 以下の温度の差は余り見られなくなる。しかしAE剤を適正に用いると、初期養生が $20^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ の場合には最低温度が低い程劣化が激しくなることが明示されるが、 $40^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 以上の初期養生をすれば劣化は30サイクルの凍結融解を行なっても完全に防止されている。

2) II シリーズから、凍結速度は早いほど劣化指標の凍伸度が大きくなる。AE剤を使用しないか、添加量が不足な場合には空気量が3%程度以下では凍結速度の差は明瞭であるが、初期養生の増加により劣化は減少する。AE剤を適正使用量とすると、初期養生が不十分な $20^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ の場合で急速凍結の場合のみ劣化が大きいほかは凍伸度に表示される劣化は皆無となる。

3) III シリーズの凍結時の最低温度の保持時間については、必ずしもその時間が長い方が劣化が激しい結果にはならなかった。保持時間4時間の場合に劣化が少ない傾向はこの実験だけでは説明がむづかしく、今後検討を要する点であろう。

4) 劣化指標として用いた凍伸度は、凍結融解後材令28日迄養生した後の引張強度の比率による劣化とも相関が良く、初期凍害指標として十分使用ができる。

5) 目視で認められるひびわれの発生は凍伸度がおよそ $3,000\times 10^{-6}$ になったときに認められた。

以上から初期凍害についても、十分硬化したコンクリートでの凍結温度要因の影響はおよそ

同傾向にあることが明確となったが、本実験は水セメント比とスランブが1種に限定されているので今後調査条件その他を変えた実験によって初期凍害の全貌を明らかにする必要がある。

3. 2 初期凍害に対する空気量の効果に関する実験

この実験は1975～77年に横山隆、金武漢を中心に進められたもので、8シリーズから成り、I, II, IVシリーズは普通コンクリート、III, V～VIIIシリーズは1種人工軽量骨材コンクリートについて行なったものである。AE剤の添加量と初期養生を変化させ、凍結温度は -18°C を主流にして -10°C の緩いものも含み、凍結融解は5回を主とし10回のシリーズも含んでいる。水セメント比は60%を主体としているが、40～70%の範囲で変えたシリーズも含んでいる。人工軽量骨材の種類についても検討し、更に減水剤およびAE減水剤に関するシリーズも含んでいる。

3. 2. 1 研究計画の概要

I, II, IIIシリーズは初期材令、つまり凍結融解開始時の引張強度、空気量、凍結時の最低温度、凍結融解回数、コンクリートの種別の諸要因を検討したものである。強度上の水セメント比は60%、練り上り温度 15°C 、目標とするスランブ18cmに一定し、凍結融解開始は積算温度20, 30, 40, 50, $60^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ の5種、空気量は0, 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04%のAE剤混入率6種とし、凍結融解は5回または10回の2種である。凍結時の最低温度はI, IIIシリーズでは -18°C 、IIシリーズは緩い条件として -10°C とした。またIIIシリーズは上記のように1種人工軽量骨材コンクリートである。

IVシリーズは水セメント比とスランブの影響をみるために、強度上の水セメント比40%に対してはスランブ18cm、60%では8, 18cmのコンクリートについて積算温度4種、AE剤混入率4種について凍結融解5回とした実験シリーズである。

なお、Iシリーズでは凍結融解後28日間湿空または水中養生をした後の引張強度と動弾性係数の測定を行い、凍害影響がどの程度修復されるかを検討している。また、IVシリーズでは硬化後の気泡の顕微鏡による測定、水銀圧入法による細孔径分布状況の測定も行なった。

Vシリーズは造粒型人工軽量骨材による1種軽量コンクリートで水セメント比の影響を水セメント比40, 50, 60, 70%について検討するもので、スランブは18cmに限定して、AE剤混入率を4種、凍結融解開始時の圧縮強度を35, 50 kg/cm^2 の2種、凍結時の最低温度を -10 , -18°C の2種として5回の凍結融解を行なっている。

VIシリーズは単位水量を変えるためにスランブを8, 12, 15, 18, 21cmの5種を主体とし、他の条件はVシリーズを若干省略した形で行なっている。

VIIシリーズはスランブ8, 18cmの2種にして、人工軽量骨材4種を比較するシリーズで、 50 kg/cm^2 が得られた時から -18°C の最低温度で凍結融解5回を行なっている。

VIIIシリーズはスランブ8, 12, 18cmの3種について、減水剤およびAE減水剤10種を比較するもので、他の条件はVシリーズと同様としたものである。このシリーズでは気泡の状況、とくに気泡間隔係数を顕微鏡測定し、減水剤とAE減水剤の差を明らかにしようとしたものである。

3. 2. 2 実験結果からの結論

1) AE剤による空気量はコンクリートの初期凍害防止にきわめて顕著な効果があり、普通コンクリートでは図2に示すように少なくとも打込み時に4%の空気量が確保されなければ推定引張強度比80%を確保できない。

2) 人工軽量骨材コンクリートに対しても、一般に用いられるフレウェッチングでの吸水量である25%程度までの範囲では、1種軽量コンクリートについて打込み時に5%の空気量が確保されていれば、推定引張強度比80%が保証できる。

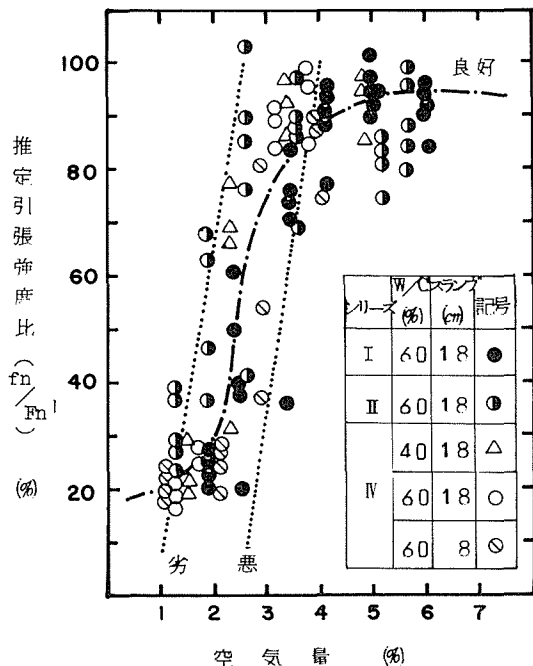


図2 空気量と推定引張強度比の相関関係
(普通コンクリート)

3) 空気量の影響に比べると、他の要因例えば凍結時の最低温度や凍結融解繰返し回数などの影響はそれほど明確ではない。

4) 水セメント比を小さく選ぶことは同一強度の条件ではある程度効果がある。

5) 単位水量と骨材吸水率は影響がみられるが、空気量に比べるとその程度は少ない。

4. 空気量の効果に関する考察

上記のように引張強度の面から初期凍害に対する空気量の効果が明確に示されているが、3. 2のIシリーズの実験では動弾性係数を測定した結果がある。

図1は1971年にセメント協会のコンクリートブックス No. 20「寒中コンクリートと暑中コンクリート」執筆に際し、1957年の図に加えて動弾性係数が始の90%となる凍融回数と引張強度の関係を書き入れたものである。その理由は硬化したコンクリートについての鎌田による凍伸度と動弾性係数の相関関係の良好なことからみて、動弾性係数が始の60%になると500~1000×10⁻⁶の膨張が生じていることを意味し、き裂の発生が十分予想できるために、1957年

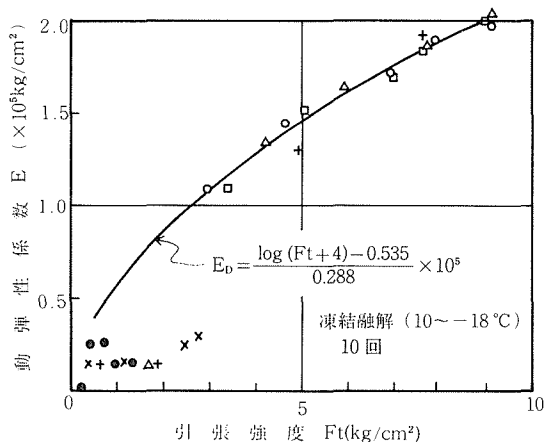
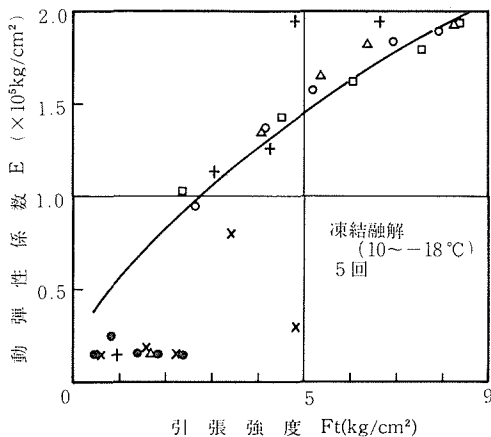
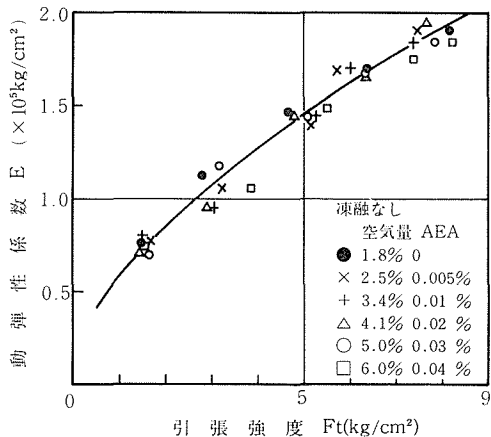


図3 初期材令での引張強度と動弾性係数

提案に修正を要すると考えたからである。しかも当時の実験は AE 剤を用いないコンクリートだけであり、凍結条件は -15°C 以下で一定ではなく、水中での融解時間の間の癒着現象によるひびわれの修復作用も考えられる。したがって図 1 の動弾性係数 60% または 90% となる線を AE 剤または AE 減水剤を用いたコンクリートにもそのまま適用することには疑問をもち始めたのである。一方、初期材令での僅かな乾燥がコンクリートの耐凍害性にも可成り影響することが田畑の実験⁴⁾で示されたために、養生限度として提案した 50 kg/cm^2 の圧縮強度を得るまでの養生を短縮することは避けるべきだとの考えもある。

この観点から強度上の水セメント比 60%, スランフ 18 cm に限定されているが、動弾性係数と引張強度の関係を整理してみると、図 3 にみられるように凍結融解により引張強度の著しい低下をみたものは引張強度も小さく動弾性係数も低下して、被害のないコンクリートにおける引張強度と動弾性係数の関係を示す線から著しく離れた結果を示していることが明らかとなった。この実験シリーズにおいては、凍結融解を 5 または 10 回行った後に湿空または水中において 28 日間養生を行なって強度および動弾性係数がどの程度まで増進するかの実験も行なっている。その結果を凍結融解をしないで湿空または水中で 28 日間養生を行なったものと比較して示したのが図 4 である。

図 3 のデータの平均的な引張強度と動弾性係数の関係を示す曲線は図 4 の曲線と完全に一致している。この曲線が対数曲線に近いので、半対数紙上に移すと上に凹の平滑な曲線となるので、図上にて直線化して求めた式が次式となる。

$$E_D = \frac{\log(F_t + 4) - 0.535}{0.288} \times 10^5 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

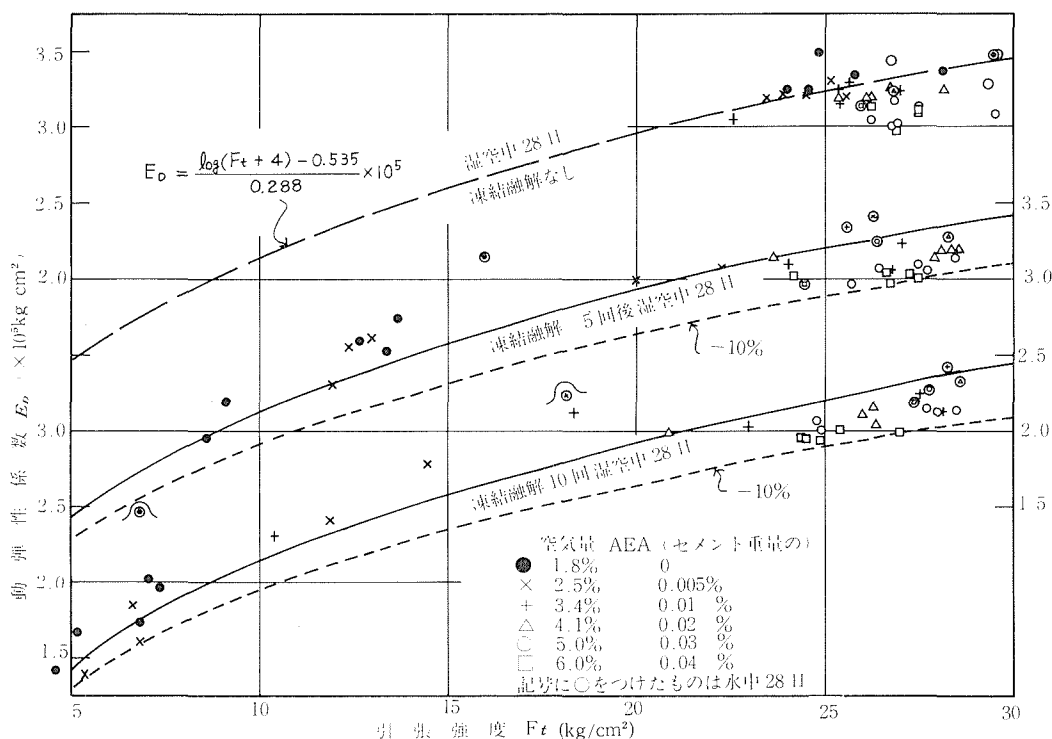


図 4 湿空 28 日養生と所定凍結融解後湿空 28 日養生をした場合の引張強度と動弾性係数

ここに E_D : 動弾性係数 (kg/cm^2)

F_t : 引張強度 (kg/cm^2)

凍結融解を受けないものの湿空 28 日の引張強度は、空気量 3.5% 程度までのものは $25.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ で、動弾性係数はこの曲線上にある。しかし強度上の水セメント比を 60% にしてあるもので空気量 4% 以上のものは実際上の水セメント比が 56~52% となっており、引張強度はや、高くなっているが、空気量が多くなるために動弾性係数は曲線よりも低い目になっており、また偏差 10% 以内に概ね入っている。

凍結融解を受けたものは、その回数に拘らず適正な空気量の入っているものは引張強度の低下もなく、また動弾性係数の値も凍結融解をしなかった場合とほとんど差がなく、凍害の影響がないと判断できる。

これに対し、図 3 においてこの曲線から著しく離れた結果を示したものは、湿空 28 日の養生によって総てこの曲線上ののってきにはいるが引張強度は著しく低下していることがわかる。このことは湿空養生によって凍害による内部のひびわれに水和物が生成されて癒着し、ある程度強度の回復をしたと解することができよう。水中養生したものは動弾性係数の増大が大きいことも図 4 から見る事ができる。図 4 の破線は動弾性係数 10% 減の線であり、データの全部がこの線より上にあることは、養生がひびわれの癒着に十分効果があったということを示唆するものであろう。

図 5 は積算温度と動弾性係数の関係を

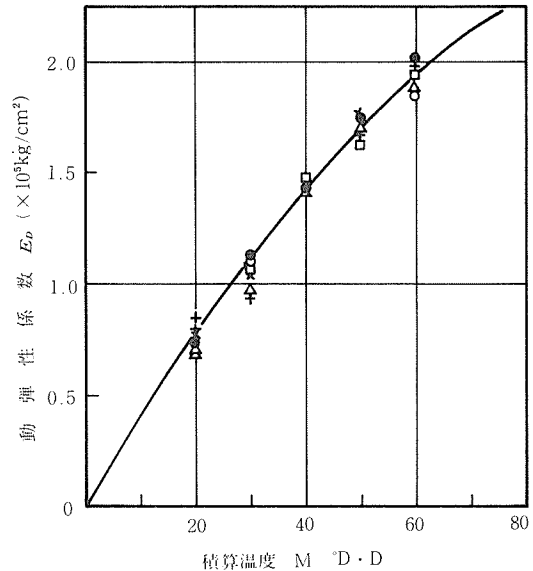


図 5 積算温度と動弾性係数の増加

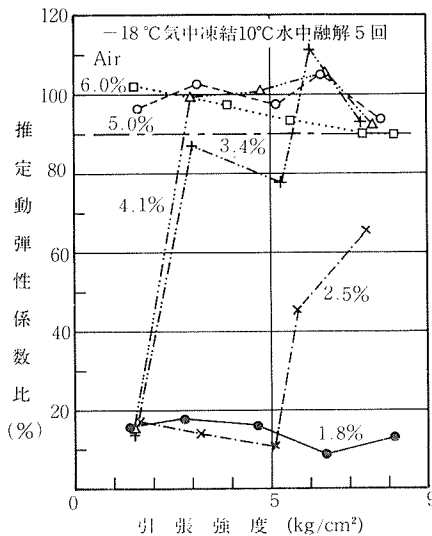


図 6 凍結融解 5 回後の推定動弾性係数比

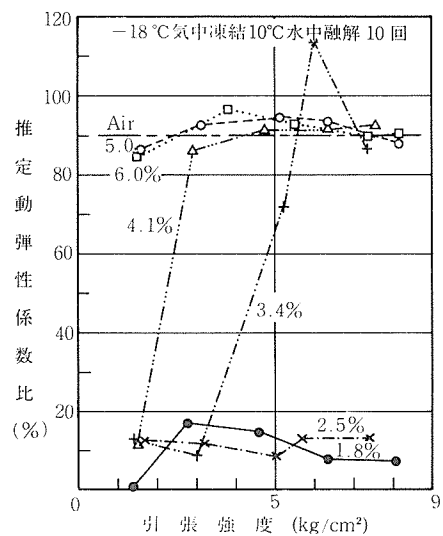


図 7 凍結融解 10 回後の推定動弾性係数比

示している。横山と金は、凍結融解の融解時の養生条件を温度記録から、凍結融解 5 回の場合に $74^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ として到達すべき引張強度を積算温度と引張強度の関係から推定し、その値に対して凍結融解による強度の低下率を求めて推定引張強度比とし、その低下が 20%以内の場合には凍害に耐力を示したものととして実験結果の考察を行なった。

これと同様に図 5 から凍結融解 5 回または 10 回後には積算温度が 7.5 または $15^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 増大するものとしてそれぞれ動弾性係数の到達すべき値を推定し、その値に対する凍結融解後の弾性係数測定値の比を求めて推定動弾性係数比として、凍結融解開始時の引張強度との関係を示したのが図 6 および図 7 である。

この実験は 1 日 6 サイクルの気中凍結水中融解で、図 1 の 1 日 1 サイクルの気中凍結水中融解、あるいは自然気象条件の 1 日 1 回の凍結融解よりきびしい条件であることは明らかである。しかし、融解時の養生による強度増進の極めて少ない場合には、AE 剤を用いないかまたは不十分な AE 剤添加量で空気量が不足する場合には、初期材令での凍結融解に対しては無力であるが、適切な緩和機構である空気泡が入っていれば、引張強度が低くても凍結融解作用に耐えられることを示している。この点は前論文³⁾において引張強度比のみで示した結果でも明らかにされたところではあるが、引張強度と動弾性係数を合せて判断する方がより合理的であると考えられる。すなわち、普通コンクリートにおいて 20 mm の砂利使用の場合、初期養生の積算温度が $40^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 以上で、空気量 4.0%以上確保された AE コンクリートならば、通常考えられる初期材令における凍結融解には十分に耐えられ、且つ硬化したコンクリートの耐凍害性も十分確保できるといえる。前述の動弾性係数比が 90%を認める意味は、引張強度 $3\sim 10\text{ kg/cm}^2$ の若材令コンクリートでは 86~88%、材令 28 日の引張強度 25 kg/cm^2 の場合でも 77%の推定引張強度比に相当する。

6. む す び

今回の実験は $10\phi\times 20\text{ cm}$ の供試体を用いたため、動弾性係数を縦振動法で凍結融解 5 または 10 回後に特定シリーズでのみ測定した。これは測定がや、難かしいためであったが、この種実験を水セメント比およびスランプなどの組合せで広範に行なうには、測定の比較的容易な撓み振動法で動弾性係数を凍結融解毎に測定し、図 1 と同様の整理をすることが結果の汎用性をもたらすことを示唆するものと考えられる。とくに自然作用と類似の凍結融解過程によるこの種実験結果の必要性を感じるものである。

参 考 文 献

- 1) 洪 悦郎, 長島弘, 寒中コンクリート, 技術書院, 1968, p.13~16, p.229~231.
- 2) 洪 悦郎, セメント技術年報, X II, 1958, p.273~278.
- 3) 金武漢, 野越聖一, 横山隆他, 日本建築学会論文報告集 265, 266, 267, 昭 53. 3, p.1~10, 昭 53. 4, p.1~10, 昭 53. 5, p.165~172.
- 4) 田畑雅幸, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 49, 1978. 3. p.175~178.