

[12] オートクレーブ養生した高強度コンクリートの耐凍結融解性

正会員 長滝重義(東京工業大学 工学部)

正会員 坂井悦郎(東京工業大学 工学部)

正会員 ○中村武夫(東京工業大学 大学院)

正会員 金 生彬(東国大学校 工科大学)

1. まえがき

高性能減水剤を使用し、水セメント比を小さくして製造した高強度コンクリートは、その耐凍結融解性が通常の水セメント比のコンクリートに比較して異なった挙動を示すことが指摘されている。例えば、水セメント比35%以下の高強度コンクリートの凍結融解に対する抵抗性は、AE剤を用いなくとも極めて大きく、これは高強度コンクリートの組織が密実であるためとする報告¹⁾、水セメント比35%以下では気泡間隔係数が800~1000 μ mでも十分な耐久性を示すとする報告²⁾、また、厳しい条件下ではAE剤が必要であり、AE剤の選定には留意する必要があるとする報告³⁾、等がある。上述のごとく、高性能減水剤を用いて水セメント比を小さくした高強度コンクリートは、通常の水セメント比のコンクリートに比べ一般的には耐凍結融解性にすぐれていると考えられるが、これらはいずれも水中養生を行なった高強度コンクリートについての結果であり、蒸気養生やオートクレーブ養生した高強度コンクリートに関しては全く検討が加えられていない。現在、オートクレーブ養生した高強度コンクリートはパイルなどとして実用されているが、地中にあるとの理由から耐凍結融解性はほとんど問題がないとされている。しかし、地表・海面付近や基礎杭のみならず構造物として利用する際には、これらに関して詳細な検討が望まれる。本研究では、特にオートクレーブ養生した高強度コンクリートの耐凍結融解性に関して、管供試体(遠心成形と振動締固めを含む)および角柱供試体を用い、供試体の寸法や成形法の影響およびコンクリートのモルタル部分の細孔構造や空気量および気泡間隔係数の効果について、さらにはオートクレーブ養生中にコンクリートが受ける熱履歴の影響について検討を加えた。

2. 実験概要

- (1) 使用材料：セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、混和材としてケイ石粉(SiO_2 96.88%)とフライアッシュ(SiO_2 53.7%)を用いた。細骨材としては富士川産川砂(比重 2.62)を、粗骨材としては西多摩産碎石(比重 2.65, 最大寸法20mm)を用い、高性能減水剤としてはナフタレン系のものを、AE剤としてはピンソールを使用した。
- (2) 配合：単位セメント量 450 Kg/m^3 、高性能減水剤添加量 0.5%とし、スランプ $8 \pm 1 \text{ cm}$ 、目標空気量が 1.5, 2, 3%となるよう配合を定めたが、この際の水セメント比は34%となった。また、ケイ石粉やフライアッシュを併用した場合の置換率は、それぞれ30%と40%とし、フライアッシュを混和した際には水セメント比は31.8%となった。
- (3) 養生条件：水中養生(20°C)28日間および蒸気養生(65°C, 3h)後水中養生(20°C)14日間とし、オートクレーブ養生(蒸気養生65°C, 3h後180°C, 6h)では、終了後7日間水中に浸した後以下の試験を実施した。
- (4) 試験方法：凍結融解試験はASTMC666の水中凍結水中融解法に従い、凍結サイクルは1日5サイクルとした。10×10×40cmの角柱供試体では共振法および超音波速度法により動弾性係数を測定し、重量変化および長さ変化も測定した。管供試体においては、寸法に合わせて試作したゴム製容器と網袋を使用し同様の試験を行ない、超音波速度法により動弾性係数を測定した。なお、供試体寸法は $\phi 20 \times 30 \text{ cm}$ とし、厚さは4cmと6cmとした。また、管供試体の動弾性係数は超音波法により求めているが、角柱供試体において測定した一次共鳴振動数より求めた動弾性係数(E_D)と超音波速度より求めた動弾性係数(E_D')の間には図-1に示すごとく、直線関係があ

り、通常の試験に用いられている一次共鳴振動より求めた動弾性係数と充分対応するものと思われる。圧縮強度は $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 、引張強度は $\phi 15 \times 20 \text{ cm}$ 、曲げ強度は $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の供試体より求めた。さらに硬化コンクリート中の気泡間隔係数および細孔径分布を測定した。オートクレーブ養生中のコンクリートの膨張ひずみは埋込型ひずみゲージ（東京測器 KM-100 HT）により測定した。

3. 結果と考察

(1) 養生条件がコンクリートの耐凍結融解性におよぼす影響

図-2は、各種養生方法により製造した遠心成形管供試体と角柱供試体の凍結融解試験の結果である。このとき、空気量は2%としたが、角柱供試体の方が遠心成形

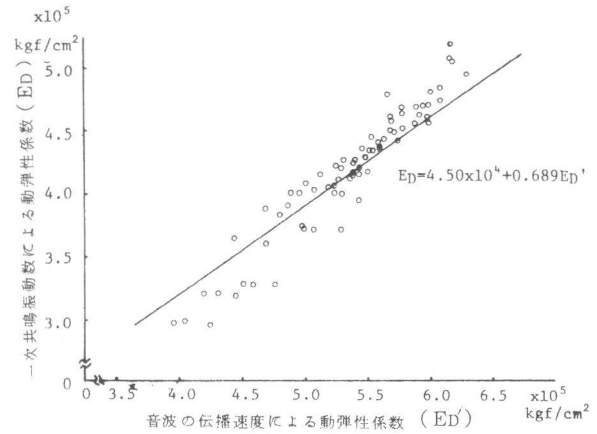


図-1 共鳴法より求めた動弾性係数と超音波速度法により求めた動弾性係数の関係

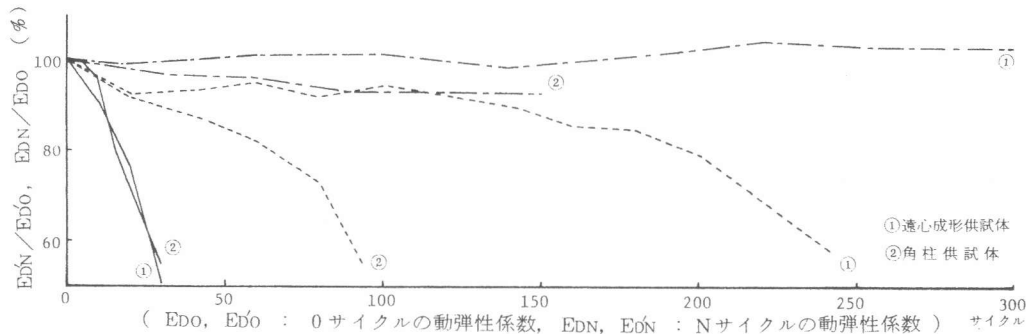


図-2 凍結融解試験結果

管供試体に比べて ED_N/ED_0 比の低下するサイクルが小さい値となっており、角柱供試体で判断すれば管供試体については安全側の評価をするものと思われる。

各種養生条件により製造した遠心成形管供試体の耐久性係数を表-1に示した。水中養生したものに比べて、蒸気養生、オートクレーブ養生したものの耐久性係数は低い値を示しており、特にオートクレーブ養生では圧縮強度が高いにもかかわらず耐凍結融解性の著しく劣っている点が注目される。水中養生に比べてオートクレーブ養生では曲げ強度と引張強度が1割程度低下しているが、蒸気養生をしたものの方が、さらに低くなっているにもかかわらず耐久性係数が大きいことより、養生方法の差異による曲げ・引張強度の低下が、耐久性の劣る原因とは考えられない。

(2) 成形法および肉厚の影響

表-2はオートクレーブ養生した管供試体の耐久性係数におよぼす成形法や肉厚および圧縮強度の影響を示し

表-1 遠心成形管供試体の耐久性指数（空気量2%）

養生方法	耐久性係数 (300サイクル)	相対動弾性係数 (200サイクル, %)	圧縮強度 (kgf/cm^2)
オートクレーブ養生	5.4	—	765
蒸気養生	48.0	79	523
水中養生	103.0	103	710

表-2 オートクレーブ養生した管供試体の耐久性指数におよぼす各種要因の影響（空気量2%）

肉厚	成形法	耐久性係数	終了サイクル	圧縮強度
4 cm	振動締固め	18 *	0.9	763
	遠心力締固め	5.4 *	2.6	765
		8.4 *	42.0	1042
6 cm	振動締固め	3.6 *	18.0	1024
	遠心力締固め	5.4 *	27.0	1013

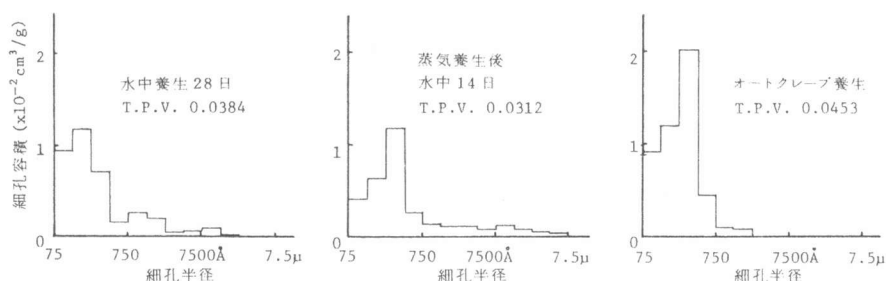
(*普通ポルトランドセメント, *ケイ石粉混和)

たものである。肉厚 4 cm, 6 cm において振動と遠心成形との間にはわずかの差しか見られず、さらに肉厚を厚くしても、また圧縮強度を大きくしてもオートクレーブ養生したコンクリートの耐凍結融解性は改善されていない。

(3) 細孔構造の影響

コンクリートの耐凍結融解性が水銀圧入法により測定した細孔径分布と関連するという報告がなされており、^{4), 5)}次にこの点に関して検討を加えた。図-3 は各種養生方法で製造したコンクリートのモルタル部分の細孔径分布である。オートクレーブ養生したものの全細孔容積は他の養生に比べて大きな値を示している。しかし、大きな細孔は水中養生の方が多くなっており、大きな細孔と耐凍結融解性が関連するという結果とは矛盾する。さらにシリカ質のものを混和す

ると、水熱反応により、細孔径分布は図-4のごとくかなり小さな細孔が増加し、全細孔容積も減少する。しかし、このときの遠心成形供試体の耐久性係数は表-2 に示し



たが、角柱供試体におい

図-3 コンクリートのモルタル部分の細孔径分布におよぼす養生条件の影響

てもシリカを混和したもので 2.0、フライアッシュを混和したもので 3.7 と極めて低い値となっている。このように、通常の水セメント比においてコンクリートの耐凍結融解性と関連のあるとされている細孔構造はオートクレーブ養生したコンクリートの耐凍結融解性に余り影響を与えない。従って、オートクレーブ養生したコンクリートにおいては細孔構造を変化させ組織を密実にし高強度化しても耐凍結融解性は改善されない。

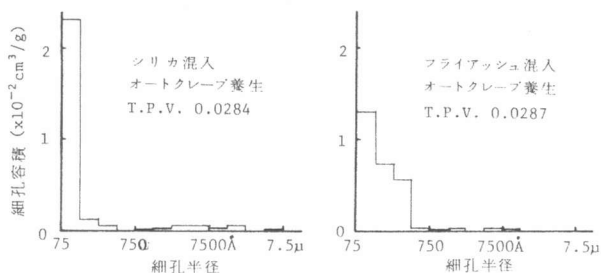


図-4 シリカ質添加による細孔径分布の変化

(4) オートクレーブ養生中の加熱の影響

図-5 は、各種養生条件における弾性係数と圧縮強度の関係である。なお、圧縮強度を広範囲に変化させるため、前述の配合においてフライアッシュの置換率を 0 ~ 60 % まで変化させた。同一圧縮強度において、静・動弾性係数はオートクレーブ養生したものが、水中養生・蒸気養生したものに比べて、かなり低い値となっている。また、ケイ石粉を混和して圧縮強度を増大しても、無混和のものと静・動弾性係数は、ほとんど変わらない。これは、オートクレーブ養生中のカルシウムシリケート水和物の結晶が成長している以外にオートクレーブ養生中の加熱の影響により微小き裂が生ずるため⁶⁾と考えられる。実際、オートクレーブ養生中のコンクリートのひずみを測定すると温度とともに膨張し、しかも、上昇と降温時においてヒステリシスを生じている。セラミックスにおいて、膨張係数の異なる多結晶集合体や混合物の加熱の際に、膨張係数が異なるため微小応力が生じ、それにより微小き裂を生じるとされており、その結果熱膨張にヒステリシスを生ずるとされている⁷⁾。コンクリートも熱膨張

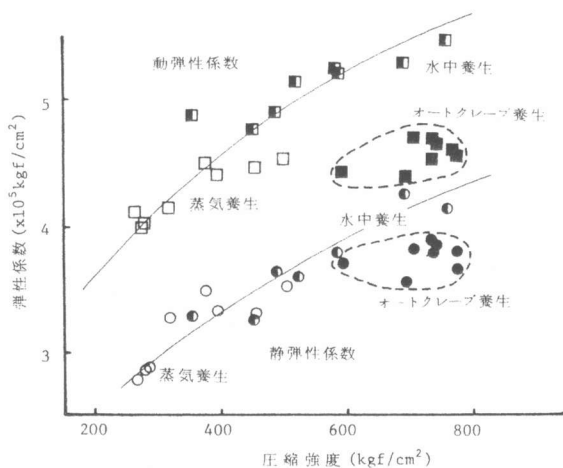


図-5 圧縮強度と静・動弾性係数の関係

図-5 は、各種養生条件における弾性係数と圧縮強度の関係である。なお、圧縮強度を広範囲に変化させるため、前述の配合においてフライアッシュの置換率を 0 ~ 60 % まで変化させた。同一圧縮強度において、静・動弾性係数はオートクレーブ養生したものが、水中養生・蒸気養生したものに比べて、かなり低い値となっている。また、ケイ石粉を混和して圧縮強度を増大しても、無混和のものと静・動弾性係数は、ほとんど変わらない。これは、オートクレーブ養生中のカルシウムシリケート水和物の結晶が成長している以外にオートクレーブ養生中の加熱の影響により微小き裂が生ずるため⁶⁾と考えられる。実際、オートクレーブ養生中のコンクリートのひずみを測定すると温度とともに膨張し、しかも、上昇と降温時においてヒステリシスを生じている。セラミックスにおいて、膨張係数の異なる多結晶集合体や混合物の加熱の際に、膨張係数が異なるため微小応力が生じ、それにより微小き裂を生じるとされており、その結果熱膨張にヒステリシスを生ずるとされている⁷⁾。コンクリートも熱膨張

係数が異なるものより構成されている多相材料であることから、同様の微小き裂が発生しているものと思われる。また、降温時において供試体内部とオートクレーブ養生槽内の温度との間には約25℃程度の温度差を生じており、コンクリートに影響をおよぼすのに十分な温度応力も生じていると考えられる。従って、オートクレーブ養生中の熱変形や降温の際生じていると思われる温度応力により、膨張率の異なる骨材とセメントペーストの結合が破壊したり、マトリックス中に微小き裂が生じ、見掛けの強度特性は改善されているにもかかわらず、静・動弾性係数が低下しており、そのことがオートクレーブ養生した高強度コンクリートの耐凍結融解性が低下する主要因と思われる。それ故、オートクレーブ養生する際には、高強度にもかかわらず通常の水セメント比のコンクリートと同様凍結水圧を緩和するための気泡を連行してやる必要がある。なお、蒸気養生においては、加熱の影響よりも、むしろ強度特性が劣ることが耐凍結融解性の低い主要因と考えられる。

(5) 空気量と気泡間隔係数の影響

図-6は角柱供試体において空気量を変化させた際の凍結融解試験の結果である。残留膨張率と相対動弾性係数はほぼ同様の傾向を示しているが、いずれにしても空気量の増加とともにコンクリートの耐凍結融解性が改善されている。オートクレーブ養生、蒸気養生とも3%程度の空気量により耐久性は著しく改善される。なお、空気量1.5%、2%、3%における気泡間隔係数は、それぞれ約1200 μm 、600 μm 、400 μm 程度となっている。通常の水セメント比のコンクリートにおいて耐久性を示すとされている気泡間隔係数は

250⁸⁾ μm であるが、服部²⁾によると、水中養生した高強度コンクリートはW/Cが35%以下では800~1000 μm であっても十分な耐久性を示すとされている。しかし、オートクレーブ養生した高強度コンクリートでは600 μm でも耐久性は著しく劣り、高強度コンクリートにもかかわらず微小ひびわれを含むためと考えられ、400 μm 程度の気泡間隔係数が必要となっている。なお、遠心成形法の場合の気泡の影響についてはさらに詳しい検討が必要であろう。

4. まとめ

オートクレーブ養生した高強度コンクリートは、高強度であるにもかかわらず著しく耐凍結融解性が劣る。これは、細孔構造の影響ではなく、むしろオートクレーブ養生中にコンクリートに生ずる熱変形により微小き裂が生じたためと考えられる。この改善のためには空気を連行させるが必要があり、その際の気泡間隔係数は水中養生した高強度コンクリートの際に必要な値と通常の水セメント比のコンクリートの際に要求される値の間にあり、400 μm 程度となった。

—参考文献—

- 1) 齊藤, 大塩, 後藤, 大森, セメント技年, 29, 232 (1975)
- 2) 服部, 岡田, 飛坂, 柳, セメント技年, 34, 329 (1980)
- 3) 後藤, 三浦, 鈴木, セメント技年, 34, 326 (1980)
- 4) J.V.Chekhovskiy etc, RILEM/IUPAC, Part 1, B51 (1973)
- 5) 鎌田, 大内, 吉野, セメント技年, 30, 292 (1976)
- 6) ミロノフ, マリナ, 「コンクリートの硬化促進」
- 7) W.D.Kingery etc., 「Introduction to Ceramics」
- 8) 小林, コンクリートジャーナル, 7, 13 (1969)

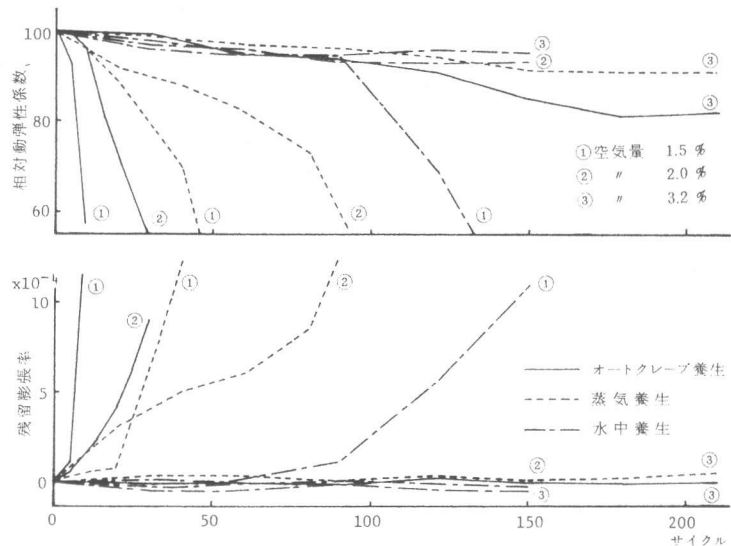


図-6 空気量を変化させたコンクリートの凍結融解試験結果