

高強度軽量コンクリートの耐凍害性改善方法について

橘 大介*・今井 實**

本研究は、優れた耐凍害性を有する高強度軽量コンクリートの製造方法に関して検討したものである。実験結果から、①低含水状態の軽量骨材を使用する、②乾燥によりコンクリートの飽水度を低減する、③骨材を樹脂コーティングする、④骨材に不凍結剤を含浸させる、⑤コンクリートを鋼殻内に打ち込んだ合成構造にすることにより、耐凍害性を改善できることが明らかとなった。これらの耐凍害性改善方法を総合的に評価すると、低含水骨材を使用するのが最適な方法と考えられる。

Key Words : high-strength lightweight concrete, frost resistance, initial moisture content of lightweight aggregate

1. まえがき

近年の構造物の大型化、超高層化、大スパン化等への要請に応えるために、自重の軽減や部材断面寸法の縮小を目的として、軽量でかつ高強度のコンクリートを構造用部材として適用することがある。高強度軽量コンクリートは、構造用人工軽量骨材（以下軽量骨材という）を使用し、配合を富配合低水結合材比とすることで製造できるが、普通骨材を使用したコンクリートと比較して製造上配慮すべき点が多い。その中で特に問題となるものの一つに耐凍害性がある。国内および海外で生産されている膨張頁岩や膨張粘土等を焼成して得られる軽量骨材は、骨材内部が多孔質であり、各々の気孔がクローズドポアでなくオープンポアとして連結して存在する割合が高いため高吸水性を示す^{1)・2)}。その結果、軽量コンクリートを寒冷地で構造部材として供用すると、著しく耐凍害性を損なう場合がある。

軽量コンクリートの耐凍害性に関する研究は、1960年代に日本で軽量骨材の製造・販売が開始される前後から盛んに行なわれるようになった^{3)~5)}。また、最近では高強度軽量コンクリートの耐凍害性に関して実験検討した例も見受けられるようになった^{6)・7)}。これらの研究成果等によれば、低含水状態の軽量骨材を使用すること、軽量コンクリートを乾燥させること、エポキシ樹脂等で被覆した軽量骨材を使用することにより、軽量コンクリートの耐凍害性を向上させることができると指摘されている。これらの結果は、凍結融解の繰返し回数が少なかったり、ASTM C 666 B法「急速気中凍結水中融解に対するコンクリートの抵抗性に関する試験方法」（旧ASTM C 291）に準じて行った結果であり、必ずしも十

分な耐凍害性が確保できたとはいえないが、一般の実構造物の暴露条件を考慮すると実用上耐久的なコンクリートが得られたとも考えられる。しかしながら、一方で北極海のような苛酷な暴露条件下で高強度軽量コンクリートを供用する場合もあり、このようなケースでは極めて厳しい性能が要求されることもある⁸⁾。

本研究は、このような状況に鑑み、圧縮強度43~62MPa（438~635kgf/cm²）、単位容積質量1760~1990kg/m³の高強度軽量コンクリートに関して急速水中凍結融解試験（ASTM C 666 A法）を実施し、良質な普通骨材を使用したコンクリートに匹敵する優れた耐凍害性を有する高強度軽量コンクリートの製造方法に関して実験的に検討したものである。

2. 耐凍害性の改善方法

凍結融解作用による硬化コンクリートの劣化は、コンクリート内部の空隙に含まれる水分が凍結し、膨張することによって生ずる。一般に、コンクリートの耐凍害性確保のための方策は、空気連行剤を使用して適量のエントレインドエアを連行したAEコンクリートとすることである。しかしながら、軽量コンクリートではAEコンクリートにしても十分な耐凍害性を得られない場合が多い。これは、骨材または粗骨材とモルタルの境界面近傍に含まれる水分が普通骨材コンクリートと比較して多くなることによるものと考えられる。したがって、軽量コンクリートに普通骨材コンクリートに匹敵する耐凍害性を求めるならば、AEコンクリートにするだけでは不十分であり、骨材中またはコンクリート中の水分の低減や骨材自体の改良等が必要になってくると考えられる。

軽量コンクリートの耐凍害性の改善方法としては、①低含水状態の軽量骨材を使用する、②軽量コンクリートを乾燥させる、③軽量骨材を樹脂材料で被覆する等の二

*正会員 工修 清水建設（株）技術研究所 構造技術研究部主任研究員（〒135 江東区越中島3-4-17）

**正会員 清水建設（株）技術本部 技術開発センター 主査

表—1 使用材料一覧表

使用材料	種類	物性 / 成分
セメント	普通ポルトランドセメント	比重=3.16, 比表面積(ブレーン法)=3120 cm ² /g
混和材	シリカフェューム(1)	比重=2.19, 比表面積(BET法)=22.7 m ² /g, SiO ₂ 量=92%
	シリカフェューム(2)	比重=2.23, 比表面積(BET法)=19.8 m ² /g, SiO ₂ 量=90%
	フライアッシュ	比重=2.28, 比表面積(ブレーン法)=3720 cm ² /g
粗骨材	造粒型軽量粗骨材	最大寸法=15mm, 絶乾比重=1.28, 24時間吸水率=5.7%, 粗粒率=6.46
	非造粒型軽量粗骨材	最大寸法=15mm, 絶乾比重=1.27, 24時間吸水率=11.6%, 粗粒率=6.33
細骨材	川砂(備田川・木曾川混合砂)	表乾比重=2.57, 吸水率=1.99%, 粗粒率=2.69
	川砂(鬼怒川産)	表乾比重=2.58, 吸水率=2.48%, 粗粒率=2.69
混和剤	高性能減水剤	主成分: ポリアルキルアリルスルホン酸塩
	AE剤	主成分: 天然樹脂酸塩
	流動化剤	主成分: ポリアルキルアリルスルホン酸塩
軽量粗骨材の	コーティング剤	フェノール樹脂
二次処理材料	不凍結剤	無機系窒素化合物
鋼材	一般構造用鋼管および鋼板	f _y =245 N/mm ² (2500 kgf/cm ²)相当

表—2 配合条件と諸物性

項目	範囲	
水結合材比(%)	24.7 ~ 28.8	[28.0]
細骨材率(%)	30.0 ~ 46.0	[38.0]
単位水量(kg/m ³)	150 ~ 165	[160]
混和材混和率(内割%)	0, 9.1, 13.0	[9.1]
軽量粗骨材の含水率(%)	0.0 ~ 31.8	-
スランプ(cm)	1.0 ~ 23.0	[20.0]
空気量(%)	1.2 ~ 9.5	[5.0]
単位容積質量(kg/m ³)	1761 ~ 1985	-
材齢28日圧縮強度(MPa)	43.0 ~ 62.3 (438 ~ 635 kgf/cm ²)	-

(注) []内の数値は、各項目で最も頻度の多かった値を示している。

次処理を施す, ④鋼殻内に軽量コンクリートを打ち込んだ合成構造とする, ⑤軽量骨材中の気孔を独立気孔(クローズドポア)とする等がある。低含水状態の軽量骨材を使用すると骨材中の飽水度が低下して凍結時の膨張を緩和でき, また, コンクリートを乾燥させる場合も同様のことが期待できる。軽量骨材に二次処理を施す方法としては, 次に示す2方法が考えられる。すなわち, 骨材内部または表面を樹脂材料等で含浸・被覆することによって普通骨材と比較しても遜色のない程度まで吸水性能を改善する方法である。もう1つの方法として, 骨材中に不凍結剤を十分含浸させる方法である。このような処理を施せば, 骨材内部の凍結や水分移動を阻止でき, コンクリートの膨張を緩和できると考えられる。次に, 鋼殻内に軽量コンクリートを打ち込んだ合成構造にすると, 鋼殻内コンクリートへの浸水が遮断され, かつコンクリートの膨張が鋼板により抑制緩和されることにより耐凍害性が向上すると考えられる。また, 軽量骨材中の気孔を独立気孔にすると, 表面部にあるわずかな気孔には吸水するものの, 内部への吸水は阻止でき, 吸水率を普通骨材程度まで大幅に低減できるものと考えられる。著者らは, このような独立気孔を有する新しいタイプの高品質軽量骨材を既に試作し, 耐凍害性を含め各種試験を実施している⁹⁾。

以上述べた軽量コンクリートの耐凍害性改善方法の全てに関して一連の実験研究を実施してきたが^{10)~14)}, 本論文では, ①~④に示した改善方法の実験結果について考察し, 各方法を総合的に評価した。なお, ⑤の方法に関しては別の論文で詳細に報告することとした。

3. 実験概要

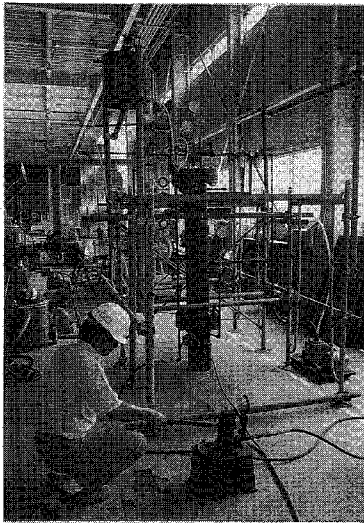
優れた耐凍害性を有する高強度軽量コンクリートの製造方法を明らかにするために, 以下に示す(1)~(4)の実験を実施した。本実験で対象としたコンクリートは軽量粗骨材と普通細骨材を組み合わせた軽量1種コンクリートであり, 軽量粗骨材は造粒および非造粒の2種類を選定し

て使用した。使用材料および配合条件と諸物性は表—1, 2に示すとおりである。なお, 高強度軽量コンクリートの耐凍害性は, 共振装置を用いたたわみ振動方法より測定・算出される相対動弾性係数, 下式(1)より算出される耐久性指数, 供試体の質量変化(試験開始時の供試体質量に対する試験終了時の供試体質量の比)および強度試験結果から評価・判定した。

$$DF = \frac{P \cdot N}{M} \dots \dots \dots (1)$$

ここに, DF: 耐久性指数, P: 凍結融解Nサイクルにおける相対動弾性係数(%), N: Pが特定の値(60%)となるまでのサイクル数あるいは試験を終了した時のサイクル数(回), M: 試験を終わらせる特定のサイクル数(300回)

(1) 低含水軽量骨材コンクリートの凍結融解試験
練混ぜ前の軽量骨材の含水率がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響に関して実験検討した。軽量骨材の含水率の調節は, プレウェットング軽量骨材を炉乾燥して絶乾状態とした後, 水中に浸漬し, 浸漬時間を変化させることにより含水率を調節する方法とした。また, 含水率の大きいものに関しては, プレウェットングした状態のままのものを使用した。絶乾からプレウェットング状態(軽量粗骨材の含水率0.0~30.1%)までの軽量骨材を使用してコンクリートを練り混ぜ, 角柱供試体(10×10×40cm)を作製した。凍結融解試験は, 供試体を材齢14日まで標準養生した後, ASTM C666A法により実施



写真一 加圧装置

した。また、耐凍害性と空気量および気泡間隔係数との関係を検討するために、硬化コンクリートの気泡組織の測定をASTMC457「リニアトラバース法」で行った。なお本論文では、表乾状態にある軽量骨材の含水率を単に含水率と呼ぶこととした。

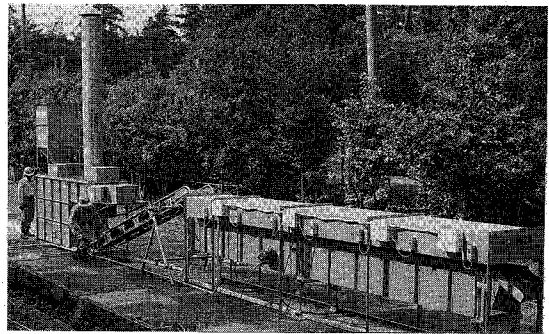
(2) 乾燥させた軽量コンクリートの凍結融解試験
十分プレウェットした軽量骨材を使用した高強度軽量コンクリートの耐凍害性に及ぼす気中乾燥の影響に関して実験検討した。練混ぜ前の含水率が27.4~30.4%の造粒および非造粒型軽量骨材を使用してコンクリートを練り混ぜ、角柱供試体(10×10×40cm)を作製した。供試体は14日標準養生(一部の供試体は7日湿布養生)後に恒温恒湿室(温度20±1℃,湿度60±5%R.H.)に移し、0~78日の乾燥期間を経過した供試体を2時間水中浸漬させた後、適宜凍結融解試験(ASTM C 666 A法)に供した。なお、試験材齢の相違による耐凍害性への影響は、十分プレウェットした軽量骨材を使用したコンクリートでは標準養生日数を14日以上に増やしても耐久性指数が全く増加しないという予備実験結果から、これを考慮しなかった。

試験結果は耐久性指数とコンクリートの飽水度との関係で評価した。凍結融解試験開始時のコンクリートの飽水度は、式(2)により算出した。

$$DS = \frac{W/t}{W_{sat}} \times 100 (\%) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、DS:コンクリートの飽水度(%), W_{sat} :飽水状態の供試体に含まれる水量(g), W/t :試験開始時の供試体に含まれる水量(g)

試験開始時の供試体に含まれる水量は、凍結融解試験開始直前における飽水度測定用供試体の質量とこの供試体を110℃で炉乾燥して得られる絶乾質量との差から求め



写真二 コーティング骨材製造ミニプラント

た。飽水状態の供試体に含まれる水量は、絶乾にした供試体を写真一に示す加圧装置槽内に入れて真空ポンプ(真空度1.33Pa)で2時間脱気した後、手動ポンプで3.92MPa(40kgf/cm²)の水圧を加え1日吸水させて飽水質量を求め、絶乾質量との差から算出した。

また、長さの異なる供試体のある期間乾燥させた場合、式(3)により乾燥表面からの距離と残留水量(%)の関係が求められる¹⁵⁾。この考え方にしたがってある期間乾燥させたコンクリートの表面からの深さと飽水度との関係を長さの異なる供試体(断面10×10cm,長さL= 8, 16, 24, 32, 40cm)の質量変化から測定・算出した。

$$C_i(X_i, t) = \left\{ 1 - \frac{(W_i - W_{i-1})}{W_0 \cdot (L_i - L_{i-1}) \cdot S} \right\} \times 100 (\%) \dots (3)$$

ここに、 $C_i(X_i, t)$:ある時間tにおける乾燥表面からの深さ X_i の点の残留水量(%), L_i :供試体の長さ(cm), W_i :長さ L_i の供試体の時間tにおける逸散水量(g), W_0 :110℃の炉乾燥より求める単位容積当りの可能逸散水量(kg/l), S :乾燥表面の断面積(100cm²)

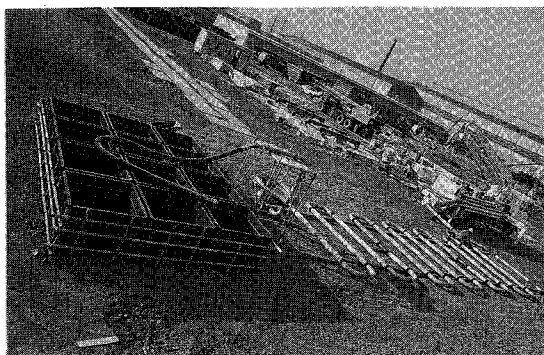
上述した供試体は、材齢14日まで標準養生し、恒温恒湿室で乾燥を開始する前に乾燥表面である両端面を残し、他の4側面はエポキシ樹脂で被覆し、水分逸散が1次元方向となるように配慮した。

これら2つの実験結果から、実際の構造部材の耐凍害性に関して検討した。

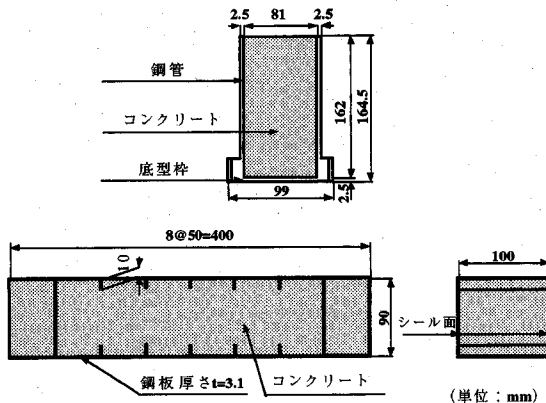
(3) 二次処理軽量骨材コンクリートの凍結融解試験

優れた耐凍害性を有し、かつポンプ施工が可能な高強度軽量コンクリートを製造するために、二次処理を行った軽量骨材を使用した軽量コンクリートの耐凍害性に関して実験検討した。二次処理の方法は、軽量骨材を樹脂で含浸・被覆するコーティング方法と骨材中に不凍結剤を十分含浸させる方法の2方法とした。

軽量骨材のコーティング方法は、以下のとおりである。ケトン類の溶媒に溶かした耐アルカリ性の高いフェノール樹脂溶液中に絶乾状態の造粒型軽量骨材を浸漬して含浸させた。骨材排出・液切り・溶媒の熱風処理後、80~180℃の温度で加熱硬化させてコーティング骨材とし



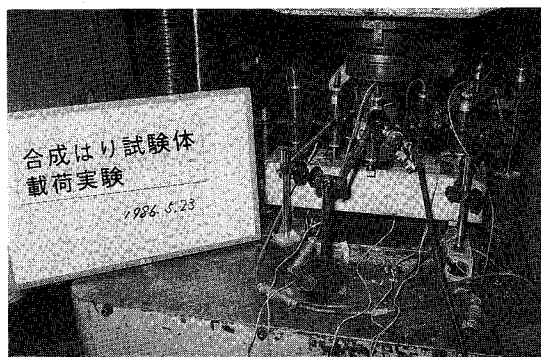
写真一三 ポンプ圧送実験配管状況



図一 円柱供試体と合成はり試験体

た、この一連の工程を写真一2に示す試作ミニプラントで行った。骨材質量に対するコーティングしたフェノール樹脂質量の割合を樹脂コート量(%)と定義し、樹脂コート量はフェノール樹脂溶液濃度およびコーティング処理回数を変化させることで調整した。樹脂コート量の異なるコーティング骨材を使用して、骨材の加圧下での吸水試験、ポンプ圧送前後のコンクリートの凍結融解試験 (ASTMC666A法) を実施した。骨材の加圧は、各試料を金網かごに詰めした後、前述した加圧装置槽内に入れ、3.92MPa (40kgf/cm²) の水圧を10分間加える方法とした。また、コンクリートのポンプ圧送は写真一3に示す配管状況 (水平換算配管長約185m) で実施し、凍結融解試験用供試体 (10×10×40cm) はポンプの筒先から試料を採取して作製した。

無機系窒素化合物を主成分とする不凍結剤 (比重1.32) を含ませた軽量骨材は、以下の方法で作製した。原液または水で70, 50, 40, 30, 20%に希釈した不凍結剤を用意し、500℃に加熱した絶乾状態の非造粒型軽量骨材を各溶液中に2~3分間浸漬し、その後30日間各溶液をスプリンクラー散水することで試験用骨材を作製した。これら6種類の骨材を使用してコンクリートを練り混ぜた。コンクリートの加圧および凍結融解試験は、コーティング骨材



写真一四 合成はり載荷試験状況

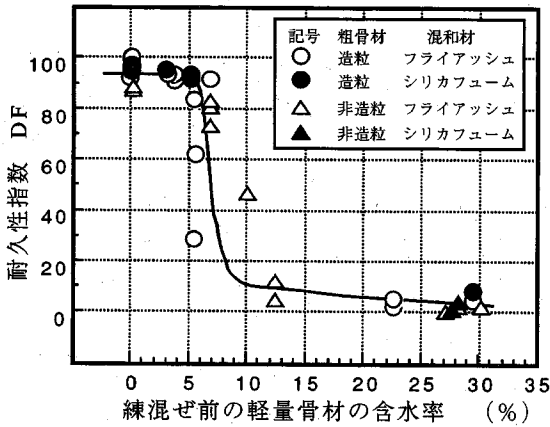
コンクリートの場合と同様の方法で行った。ただし、コンクリートの加圧は、試料をゴム製容器に詰め、密閉した後行った。

(4) 鋼/軽量コンクリート・合成構造部材の凍結融解試験

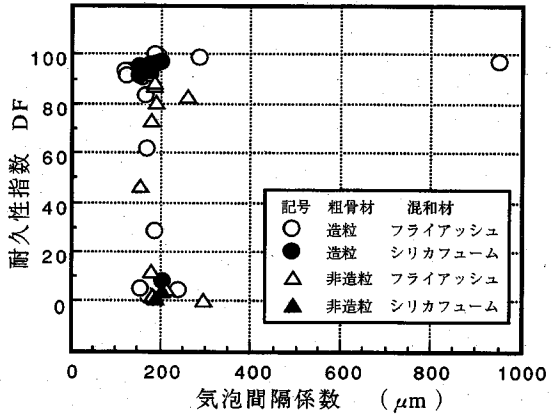
鋼殻内に軽量コンクリートを打ち込んだ合成構造部材の耐凍害性に関して実験検討した。実験は、図一1に示す鋼管で周方向を拘束した (2軸拘束) 円柱供試体と合成はり試験体を用いて行った。円柱供試体の試験では、拘束供試体と拘束なしの供試体を用いて水中凍結融解試験 (ASTMC666A法) および気中凍結融解試験を2回 (シリーズ1,2) に分けて行い、供試体の圧縮強度に及ぼす浸水遮断の効果と拘束の効果に関して検討した。拘束鋼管の厚さは2.5mm (鋼材比3.0%) とし、300回の凍結融解サイクル終了後に鋼管を切断しコンクリートを取り出して圧縮強度試験を行った。引張鋼材比3.5%の合成はりの試験 (シリーズ2) では、同じく300回の気中凍結融解サイクル終了後にせん断強度試験を行った。載荷方法は写真一4に示すように、2等分点載荷 (せん断スパン150mm, 載荷板の幅15mm) とした。なお、実験に使用したプレウエット型軽量骨材の含水率は23.1%であり、気中凍結融解試験を行った供試体および試験体は標準養生後にコンクリート表面をシリコンゴムで被覆し包装用ラップフィルム (主成分: ポリ塩化ビニリデン) で全面を覆う方法でシールし水分逸散を防止した。

4. 実験結果と考察

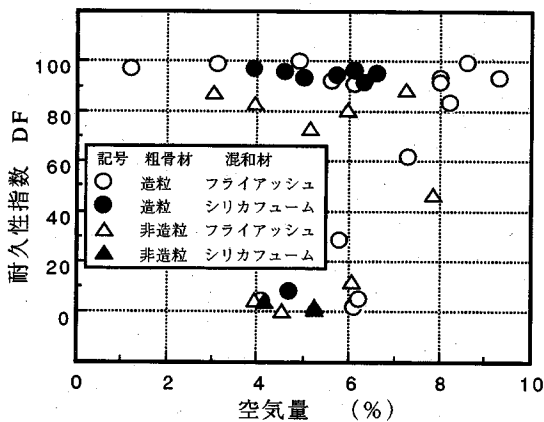
(1) 軽量骨材の含水率が耐凍害性に及ぼす影響
 軽量骨材の練混ぜ前の含水率と耐久性指数の関係を図一2に示す。同図によれば、粗骨材や混和材の種類にかかわらず、含水率が0~5%の範囲では90程度以上の耐久性指数が得られたのに対して、含水率が5%を越えると急激な耐久性指数の低下を示し、含水率が12%以上となると耐久性指数は10程度以下となった。一方、硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数と耐久性指数



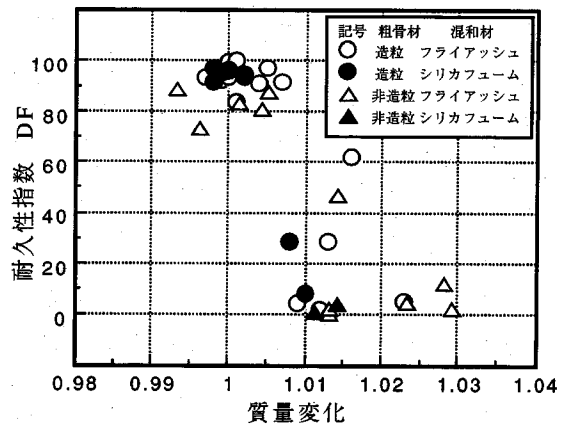
図一 2 軽量骨材の含水率と耐久性指数



図一 4 気泡間隔係数と耐久性指数



図一 3 空気量と耐久性指数



図一 5 質量変化と耐久性指数

との関係を示すと図一3, 4のようになる。空気量5%以上、気泡間隔係数 $200\mu\text{m}$ 以下のAEコンクリートでも優れた耐凍害性を確保できない場合があり、逆に空気量1.2%、気泡間隔係数 $952\mu\text{m}$ のNon-AEコンクリートでも優れた耐凍害性が得られるという結果になった。富配合の高強度軽量コンクリートでは、普通骨材コンクリートでも指摘されているように^{16), 17)}、空気量や気泡間隔係数は必ずしも耐凍害性を決定する主要因にはならないのであり、軽量骨材の含水率が耐凍害性に極めて大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。含水率の高い軽量骨材を用いたコンクリートでは、凍結融解作用により骨材中の水分が硬化ペースト中に放出されることや骨材自体の膨張により劣化が進むのであるが、特に前者の影響が大きいと考えられる。本実験結果は、飽水状態の軽量骨材の含水率を考慮すると、かなり低い含水率で急激な耐久性指数の低下を示していると言える。これは、軽量骨材の吸水特性から判断して、かなり低い含水率であっても水中浸漬により含水率を調整して練混ぜに供した軽量骨材の表面部近傍は、飽水状態に近くなるためと考えられる。

供試体の質量変化と耐久性指数の関係を図一5に示す。本研究で対象とした富配合コンクリートのうち、耐久性指数の大きいものは、組織が密実であり、かつフリーディング等の材料分離が少ないことから、スケール、ポップアウト、スポーリングによる質量減少は1%以下と少なく、質量減少に対する抵抗性も大きい結果となった。また、耐久性指数の小さいコンクリートに関しては、コンクリート表面および内部に発生したひび割れへの吸水により、1%以上の質量増加が認められた。

含水率0~5%の軽量骨材を使用することにより、優れた耐凍害性を有する高強度軽量コンクリートが得られたが、配慮すべき点として、①低吸水性を有する(24時間吸水率の小さい)軽量骨材を選定する、②軽量骨材は絶乾状態で貯蔵・使用する、③練混ぜ水を補正する(軽量骨材の吸水水量を考慮)等が挙げられる。これらのことは、軽量骨材の含水率管理の容易さや練混ぜから打込みに至るまでのワーカビリティの変化を極力抑さえて所定の水結合材比コンクリートを製造する上で重要なポイントとなる。

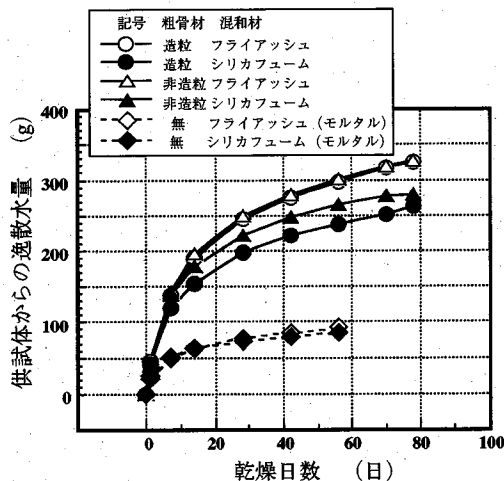


図-6 乾燥による逸散水量の経時変化

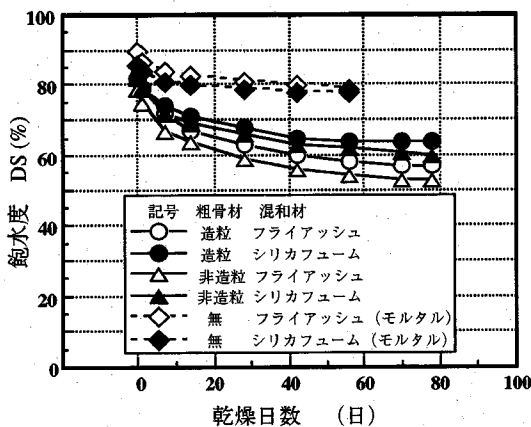


図-7 乾燥による飽水度の経時変化

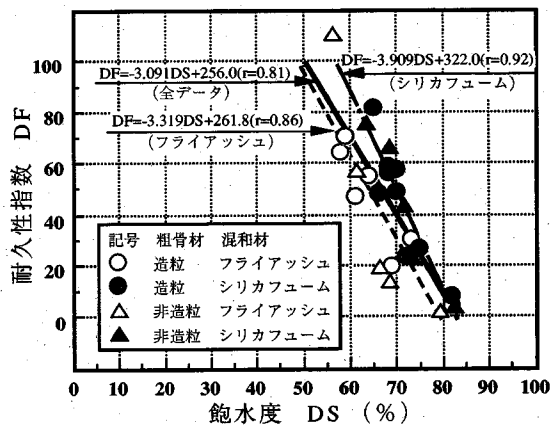


図-8 飽水度と耐久性指数

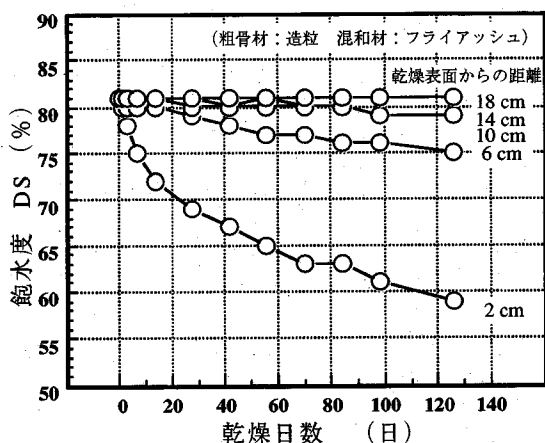


図-9 乾燥表面からの距離の相違による飽水度の経時変化

(2) 乾燥が軽量コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響

乾燥による供試体 (10×10×40cm) の逸散水量と飽水度の経時変化をあらかじめ求めた結果、図-6,7に示すおりになった。これらのコンクリートは粗骨材 (プレウエッティング) および混和材の種類を除けばほぼ同一配合のコンクリートであるが、供試体からの逸散水量は乾燥日数56日で238~301g (コンクリート1m³当り約60~75kg) となった。一方、この配合から粗骨材を除いて作製したモルタル供試体 (10×10×40cm) の逸散水量は、同一乾燥日数で84, 92g (モルタル1m³当り約 21, 23kg) となった。このことは、プレウエッティング骨材中の水分が急激に蒸発減少していることを示している。このように0~78日気中乾燥することで、プレウエッティング骨材を用いたコンクリートの飽水度は乾燥前の80%前後の値から、53~64%まで低下した。この結果を踏まえて、0~78日気中乾燥した供試体を用いて凍結融解試験を行い、飽水度と耐久性指数の関係を求めると図-8に示すおりになる。飽水度と耐久性指数との間にはよい相関性が認め

られ、十分にプレウエッティングした軽量骨材を用いた場合でも、乾燥によりコンクリートの飽水度を低減することで顕著に耐久性指数が増加する結果となった。本配合のコンクリートの場合、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5鉄筋コンクリート工事で耐凍害性の目安としている耐久性指数60以上を確保するためには、乾燥によりコンクリートの飽水度を60%程度以下にする必要があると考えられる。

気中乾燥後の供試体中の軽量骨材の含水率は、供試体が一様に乾燥し、乾燥以外での水分移動が起こらないと仮定すると、式(4)に示す範囲にあると推定できる。

$$\frac{W_w - (W_{cc} - W_{em}(1 - V_g))}{W_g} \times 100 > Q_g > \frac{W_w - W_{cc}}{W_g} \times 100 \dots (4)$$

ここに、 Q_g : 気中乾燥後における供試体中の軽量骨材の含水率(%), W_w : 乾燥開始前における供試体中のプレウエッティング骨材に含まれる水量(g), W_{cc} : コンクリート供試体からの逸散水量(g), W_{em} : モルタル供試体からの逸散水量(g), W_g : コンクリート供試体中の軽量骨材の絶対乾質量(g), V_g : コンクリート中に占める軽量骨材の容積比率

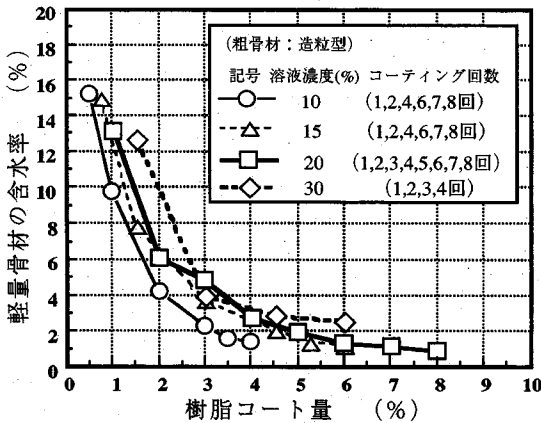


図-10 樹脂コート量と含水率の関係

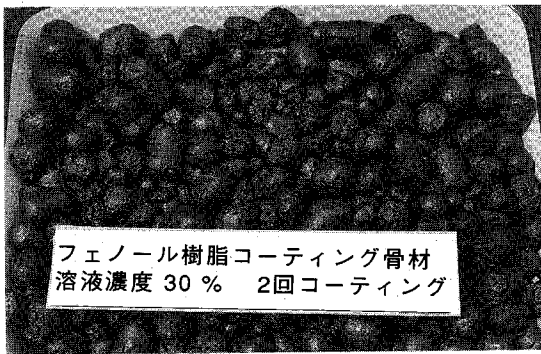


写真-5 コーティング骨材

仮に、図-6,7に示す非造粒型軽量骨材（練混ぜ前の含水率28.1%）とフライアッシュを用いた配合の供試体で乾燥日数56日（飽水度54%）における供試体中の軽量骨材の含水率を試算すると、 $15.3\% > Q_g > 12.3\%$ になる。この含水率で耐久性指数60以上が確保できることから、前節で得られた練混ぜ前の軽量骨材の含水率と耐久性指数との関係と比較すると、かなり高い含水率で大きな耐久性指数が得られていると言える。このような結果になったのは、コンクリート中の水分分布状態の相違によるものであり、軽量骨材とモルタルとの境界面近傍の含水率が乾燥により顕著に低下したためと考えられる。

図-9に乾燥表面からある距離にあるコンクリートの飽水度の経時変化を示す。高強度軽量コンクリートの乾燥は、表層部では顕著であるが内部では極めて緩慢であるという結果となり、普通コンクリートを対象にして行った既往の研究結果¹⁵⁾と同様な結果が得られた。乾燥日数126日における飽水度は、乾燥表面からの距離2cmのところでは59%、18cmのところでは乾燥開始前の飽水度と変化なく81%であった。

以上の結果から、プレウェットング軽量骨材を使用した高強度軽量コンクリートの耐凍害性は、コンクリートを気中乾燥することで向上させることができる。乾燥

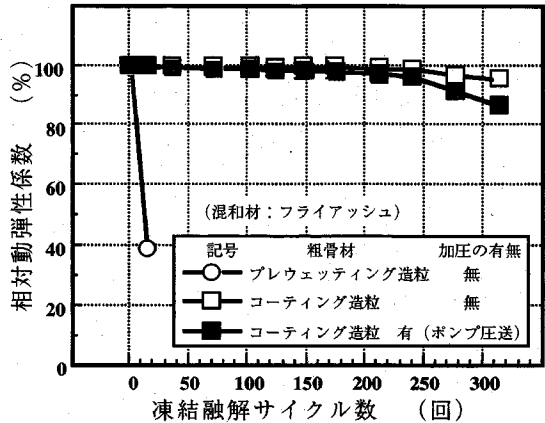


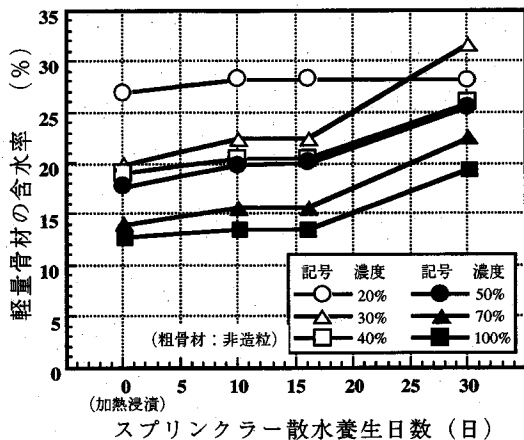
図-11 相対動弾性係数の経時変化

によりコンクリートの飽水度を60%程度以下に低減することでJASS5で耐凍害性の目安としている耐久性指数60以上を確保できると考えられる。しかしながら、乾燥による飽水度の低減は表層部では顕著であるが内部では緩慢であるため、部材厚が薄く乾燥が促進される環境では優れた耐凍害性を確保できるが、部材厚が厚く積雪や降雨の影響を受ける屋外の部材等の場合は必ずしも優れた耐凍害性を確保できるとは言えないと考えられる。

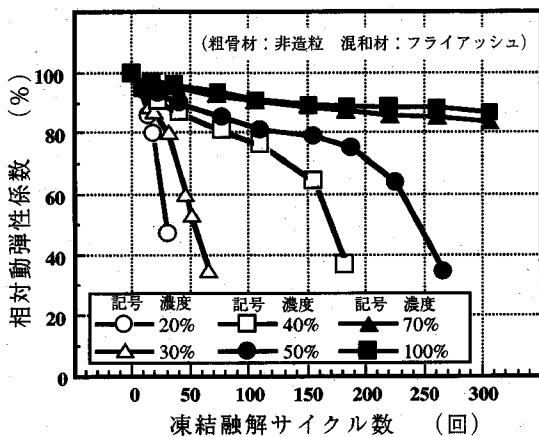
(3) 軽量骨材の二次処理が耐凍害性に及ぼす影響
フェノール樹脂コート量と加圧下におけるコーティング骨材の含水率の関係を図-10に示す。同図によれば、1回のコーティングでは含水率を大幅に低減することができず、数回のコーティング処理が必要であることが分かる。また、溶液濃度の薄いものの方が濃いものに比較して、コーティング回数は多くなるとはいうものの、同一樹脂コート量における含水率が小さくなった。このことは、熱硬化処理時に主に溶媒が蒸発したことにより欠陥（空隙）を生じたためと考えられる。したがって、溶液濃度を薄くしてコーティング回数を多くした方が樹脂コート量が少ない状態で低吸水性を確保できるのであるが、製造能率やコストを考慮すると必ずしも実用的であるとは言い難い。そこでポンプ圧送実験に用いるコーティング骨材は、加圧下での含水率を4~5%程度以下にできる溶液濃度とコーティング回数の中から選択し、溶液濃度30%の樹脂で2回コーティング処理する方法を採用した（樹脂コート量3%）。実験に用いたコーティング骨材は、写真-5に示すとおりであり、24時間吸水率が0.7%、加圧下での含水率が4.0%であった。

コーティング骨材を用いてポンプ圧送した結果（最大負荷圧約4.4 MPa、最大吐出量約21 m³/h）、コンクリート中の骨材が約2%吸水したため、ポンプ圧送は可能であったが、スランブが約10cm低下し、施工性がかなり悪化した。

図-11にポンプ圧送前後に採取したコンクリートの凍



図一 1 2 不凍結剤含浸による含水率の経時変化

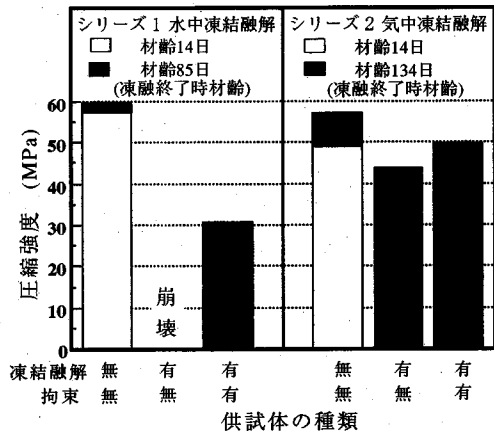


図一 1 3 相対動弾性係数の経時変化

結融試験結果を示す。コーティング骨材を用いたコンクリートは、ポンプ圧送した場合においても優れた耐凍害性を確保できることが明らかとなった。なお、コーティング骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、プレウエット骨材を用いた同一配合のコンクリートと比較してほぼ同等であった。

軽量骨材の吸水防止方法に関しては、微粉末、水溶性石油樹脂、瀝青材料等といったものを用いて研究が行われているが^(4)・18)~21)、ポンプ施工を対象とした検討はほとんどなされていない。著者らの行った予備実験によれば、アスファルト、水溶性ポリマー、セメント系微粉末等を用いてコーティングした軽量骨材の吸水特性は、常圧下では改善されるものの、加圧下では未処理のものほとんど変わらない結果となった。本研究では、これらの結果を考慮して、比較的ローコストで加圧下での低吸水性を確保できるフェノール樹脂を選定して実験を行った結果、加圧下での低吸水性を確保し、優れた耐凍害性を有する軽量コンクリートを製造できることが明らかとなった。

次に不凍結剤を含浸させた軽量骨材に関しては以下の



図一 1 4 円柱供試体の圧縮強度試験結果

とおりとなった。

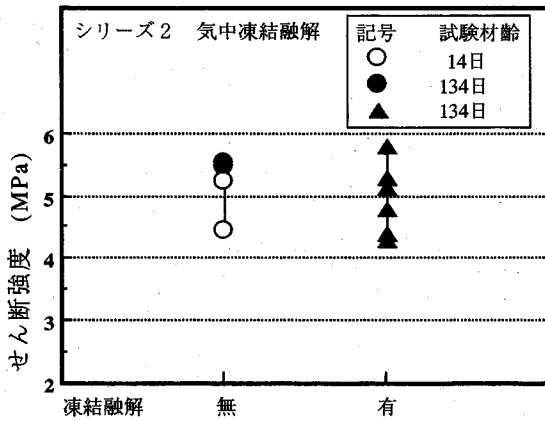
不凍結剤含浸による軽量骨材の含水率の経時変化を図一12に示す。原液、70、50、40、30、20%濃度の不凍結剤を含浸させた軽量骨材の含水率は、散水養生日数の増加に伴い増加し、散水養生日数30日で各々19.5、22.0、25.6、26.0、31.8、28.2%となった。高濃度の不凍結剤を含浸させる場合、乾燥しない溶質を骨材中に多く取り込むことや溶液自体が吸水されにくくなることにより含水率が小さくなる傾向を示した。

加圧したコンクリートの凍結融解試験結果を図一13に示す。濃度70%以上の不凍結剤を用いた場合は耐久性指数で80以上の優れた耐凍害性が得られたが、濃度50%以下の場合は耐久性指数が50以下となった。

不凍結剤を水で希釈して使用すれば、経済性および高含水率を確保するという観点から有利となるが、本実験に使用した不凍結剤の場合、濃度70%以上のものを使用しなくては優れた耐凍害性を確保することができなかった。

(4) 合成構造部材の耐凍害性

円柱供試体の圧縮強度試験結果を図一14に示す。凍結融解作用を受けるコンクリートの凍結融解試験中の強度増進は考慮しないものとして実験結果を検討・評価すると、以下のとおりになる。水中凍結融解作用を受けた拘束のない供試体が70サイクルで崩壊に至ったのに対して、鋼管で拘束した供試体の圧縮強度は30.6MPa (312kgf/cm²) となり、凍結融解作用を受けていない供試体の材齢14日圧縮強度に対する比率で示すと53%になった。また、気中凍結融解作用を受けた拘束のない供試体の圧縮強度は43.9MPa (448kgf/cm²)、さらに鋼管で拘束した供試体では49.6MPa (506kgf/cm²) になり、凍結融解作用を受けていない供試体の材齢14日圧縮強度に対して各々89、101%の比率となった。したがって合成構造型式にした場合、凍結融解作用時に微細なひび割れ幅の拡幅を助長する水が補給されないことおよびコンクリート凍結時の膨張を



図一 15 合成はり試験体のせん断強度試験結果

表一 3 耐凍害性改善方法の比較・評価

改良方法 評価項目	① 低含水骨材	② 乾燥	③-1 コーティング	③-2 不凍結剤	④ 合成構造
耐凍害性	◎	○	○	○	○
施工性	△	◎	○	○	○
骨材製造の容易さ	○	○	×	×	○
コスト	○	○	×	×	○
構造物適用時の制約	◎	×	○	○	△
総合評価	◎	○	△	△	○

(◎非常に優れている ○優れている △劣る ×かなり劣る)

鋼管が拘束することの相乗効果により、コンクリートの圧縮強度はほとんど低下することなしに優れた耐凍害性を確保できることが明らかとなった。

合成はり試験体は、全てせん断破壊し、試験結果は図一15に示すとおりになった。凍結融解作用を受けた合成はり試験体のせん断強度は4.31~5.81 MPa (44.0~59.2kgf/cm²)の範囲となり、若干強度の変動は大きくなるもの(変動係数10.4%)、凍結融解作用を受けていない試験体の材齢14日せん断強度と同程度の値が得られたと言える。

以上の結果から、プレウェッティング軽量骨材を使用する場合においても、コンクリートを鋼殻内に打ち込んだ合成構造にすることにより、凍結融解作用を受けても部材耐力が低下せず、優れた耐凍害性が得られることが明らかとなった。

(5) 耐凍害性改善方法の評価

優れた耐凍害性を有する高強度軽量コンクリートを得るために、耐凍害性の改善方法について実験検討した結果、各種方法は表一3のように評価できる。

低含水状態(絶乾状態)の軽量骨材を使用した場合、ポンプ圧送できないことから施工性は劣るものの、骨材の製造・管理の容易さおよびコスト面ではプレウェッティング軽量骨材と比較して遜色なく、かつ構造物適用時に何ら制約を受けることもなく、容易に優れた耐凍害性を得ることができる。

プレウェッティング軽量骨材を用いたコンクリートを乾燥して飽水度を所定の値まで低減する方法は、施工性も良好となるが、部材寸法や暴露される環境を考慮すると、優れた耐凍害性が得られるまで飽水度を低減することは困難な場合が多いと考えられる。また、強制乾燥により飽水度を低減するとひび割れを発生しやすくなり、逆に耐凍害性が低下する傾向も認められた。

プレウェッティング軽量骨材を用いたコンクリートを鋼殻内に打ち込んだ合成構造にする方法に関しては、充填性への配慮が必要とはいうものの比較的施工性は良好であり、鋼殻内への浸水が確実に遮断できれば優れた耐凍害性を得ることができる。しかしながら、合成構造は構造設計上の有利性や工期短縮等の目的から採用される構造型式であり、耐凍害性向上の目的のみで採用されるものではないし、またその設計法も今後確立されていくものである。

コーティングまたは不凍結剤含浸によって二次処理した軽量骨材に関しては、各々所要の品質を確保すれば優れた耐凍害性が得られるが、骨材製造に高度な技術が要求されるのと同時に煩雑さを伴う。また、これら軽量骨材の二次処理にかかるコスト(材料費、動力光熱費、設備費等)は、新しい材料の出現や異なった処理方法の採用によって大きく変化するものと考えられるが、現状では軽量骨材単価の2~3倍程度以上となり、大幅なコストアップを余儀なくされるのである。

以上の結果から耐凍害性の改善方法を総合的に評価すると、低含水状態の軽量骨材を使用するのが現状では最適な方法であると考えられる。著者らは、前述した使用上の配慮すべき点を十分検討した上で、この方法を用いて北極海向け石油掘削プラットフォーム建造に9000m³を超える軽量コンクリートを初めて施工した^{(23), (22)}、近年、ヨーロッパ諸国においても石油掘削プラットフォームや橋りょうの建設に本方法が採用されるようになってきた^{(23), (24)}。

5. まとめ

高強度軽量コンクリートの耐凍害性改善方法に関して実験検討した結果、

- 1) 低含水状態の軽量骨材を使用する、
- 2) プレウェッティング軽量骨材を使用する場合は、乾燥によりコンクリートの飽水度を低減する、
- 3) 軽量骨材をフェノール樹脂でコーティングする、
- 4) 軽量骨材に無機系窒素化合物を主成分とする不凍結剤を十分含浸される、
- 5) プレウェッティング軽量骨材を用いたコンクリートを鋼殻内に打ち込んだ合成構造とすることによって耐凍害性を大幅に改善できることが明らかとなった。これらの改善方法を総合的に評価すると、優れた耐凍害性を有する高強度軽量コンクリートを製造するには、含水率5%以下の低含水

状態の軽量骨材を使用するのが現状では最適な方法であると考えられる。

参考文献

- 1) 人工軽量骨材 (ALA) 協会編：ALAおよびALA Con (構造用人工軽量骨材および構造用人工軽量骨材コンクリート) , p.12, 1980年.
- 2) Zhang, M. H. and Gjorv, O. E. : Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete, *ACI Materials Journal*, Vol.88, No.2, pp.150~158, March-April 1991.
- 3) 國分正胤：軽量骨材を用いるコンクリートの問題点, 構造用軽量骨材シンポジウム, コンクリートライブラリー 第10号, pp.1~13, 1964年5月.
- 4) 國分正胤・小林正凡・岡村甫・山本泰彦：軽量骨材コンクリートにおける問題点について, 第2回構造用軽量骨材シンポジウム, コンクリートライブラリー 第24号, pp.1~13, 1969年10月.
- 5) 西林新蔵・湯本徹男：人工軽量骨材の吸水特性とコンクリートの性質, 第2回構造用軽量骨材シンポジウム, コンクリートライブラリー 第24号, pp.24~29, 1969年10月.
- 6) 児玉和巳・中川脩・林俊彦・佐藤敬司・奥紀仁：高強度軽量コンクリートの諸性質について, *セメント技術年報*, 31, pp.354~357, 1977年.
- 7) Malhotra, V.M. : Mechanical properties and durability of superplasticized semi-lightweight concrete, *Developments in the use of superplasticizers*, *ACI, Publication SP-68*, pp.283~305, June 1981.
- 8) 大野義郎・鈴木智郎・丹羽元和・井畔瑞人：北極海向け移動式石油掘削人工島の建設 - コンクリート構造部に関して -, *土木学会論文集*, 第354号, V-2, pp.43~52, 1985年2月.
- 9) Tachibana, D., Kishitani, K., Kimura, K., Shinozaki, A. and Omori, Y. : High-strength lightweight concrete using high-performance artificial lightweight aggregate, *Proceedings of the third international symposium on utilization of high-strength concrete*, Vol.2, pp.972~979, June 1993.
- 10) 橋大介・大野義郎・黒木一美・岡田武二：高強度軽量コンクリートの耐凍結融解性に関する研究, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.237~240, 1984年.
- 11) 橋大介・今井実・岡田武二：乾燥が高強度軽量コンクリートの耐凍結融解性に与える影響, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.73~76, 1985年.
- 12) Tachibana, D., Imai, M. and Okada, T. : Qualities of high-strength

- lightweight concrete used for construction of arctic offshore platform, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Transactions of the ASME*, Vol.112, pp.27~34, February 1990.
- 13) 橋大介・今井実・岡田武二：高強度軽量コンクリートの凍結融解特性について, *コンクリート工学年次論文報告集*, 第9巻, 第1号, pp.537~542, 1987年.
- 14) 橋大介・塩屋俊幸・太田隆義：鋼/軽量コンクリート・コンポジット部材の耐凍害性について, *土木学会 第43回 年次 学術講演会講演概要集*, 第5部, pp.174~175, 1988年10月.
- 15) 阪田憲次・蔵本修：乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, *土木学会論文報告集*, 第316号, pp.145~152, 1981年12月.
- 16) 小林正凡・田中弘：高強度コンクリートの凍結融解に対する抵抗性について, *セメント技術年報*, 28, pp.295~297, 1974年.
- 17) 服部健一・岡田英三郎・飛坂基夫・柳啓：高性能減水剤を使用した高強度コンクリートの耐凍結融解性, *セメント技術年報*, 34, pp.329~332, 1980年.
- 18) 平賀謙一・篠沢和久：軽量骨材の改良に関する研究, *日本建築学会論文報告集*, 第60号, pp.33~36, 1958年10月.
- 19) 阿久津兼二：石油樹脂を利用した改良骨材に関する研究, *セメント技術年報*, 21, pp.336~341, 1967年.
- 20) 神田衛：人工軽量骨材の耐吸水処理方法に関する提案, *セメントコンクリート*, No.257, pp.10~16, 1968年7月.
- 21) 後藤幸正・外門正直・杉山嘉徳・小林茂樹：軽量骨材コンクリートの加圧によるコンシステンシーの急変とその防止策, 第2回構造用軽量骨材シンポジウム, コンクリートライブラリー 第24号, pp.34~39, 1969年10月.
- 22) 橋大介：シリカフェウムを用いた高強度軽量コンクリートの石油掘削プラットフォームへの適用, 「シリカフェウムを用いたコンクリート」に関するシンポジウム講演論文報告集, *コンクリート技術シリーズ No.4*, pp.167~172, 1993年11月.
- 23) Haug, A.K. and Fjeld, S. : A floating concrete platform hull made of lightweight aggregate concrete, *Proceedings of the third international symposium on utilization of high-strength concrete*, Vol.1, pp.494~503, June 1993.
- 24) Laamanen, P-H. : High-strength LWA concrete for bridge construction - the new Sundbru bridge in Eidsvoll, Norway, *Proceedings of the third international symposium on utilization of high-strength concrete*, Vol.1, pp.517~525, June 1993.

(1993. 9. 20 受付)

IMPROVING TECHNIQUES FOR FROST RESISTANCE OF HIGH-STRENGTH LIGHTWEIGHT CONCRETE

Daisuke TACHIBANA and Minoru IMAI

Generally speaking, lightweight concrete, using artificial lightweight aggregate, has lower resistance to freezing and thawing, and this presents a serious problem. This study reported here was carried out on the frost resistance of high-strength lightweight concrete. We proposed five methods of manufacturing high-strength lightweight concrete possessing superior durability. They are to use lightweight aggregate with low initial moisture content, to decrease a degree of saturation of concrete due to drying, to use coated aggregate or aggregate absorbed with non-freezing agent, and to cast concrete into a steel enclosure. Evaluating synthetically these improving techniques, the best one is so far to use lightweight aggregate with low initial moisture content.