

高品質人工軽量骨材が軽量コンクリートの物性改善に及ぼす効果

橋 大介*・木村 薫**・内藤憲一***

本研究は、新しい発想により考案した独立気孔を有する高品質人工軽量骨材の性能とそれを用いたコンクリートの物性に関して実験し、本骨材の使用が軽量コンクリートの物性改善に及ぼす効果について検討したものである。実験結果から、①本骨材はポンプ打ちを想定した加圧下でも吸水せず、低含水状態を保持できる、②圧縮強度の頭打ち現象を改善でき、より高強度のコンクリートを製造できる、③ポンプ圧送負荷を受けても優れた耐凍害性が得られること等が明らかとなった。

Key Words : high-performance artificial lightweight aggregate, lightweight concrete, closed pore, low absorption characteristics, compressive strength, frost resistance

1. まえがき

構造用人工軽量骨材を使用した軽量コンクリートは、自重の低減を図れることから、大型・超高層・大スパン等の構造物へ効果的に適用することができる。しかしながらその一方で、軽量コンクリートは未だ検討すべき技術的な課題を多く抱えている。すなわち、軽量骨材がポーラスであることから、骨材が高吸水性を示すことや高強度コンクリートを製造する際に圧縮強度に頭打ち現象が認められること等である。特に骨材の高吸水性は、コンクリートの施工性および耐凍害性の双方の観点から重要な問題となってくる。軽量コンクリートをポンプ圧送する場合、低含水状態の骨材を用いると、圧送中に骨材が吸水することにより管内閉塞を生じたり、圧送後のスランプ低下により施工性の悪化を引き起こすことがある。このようなことが起こらないように、あらかじめプレウェットングやプレソーキングといった処理を行って含水率25~30%程度の十分吸水したものを使用するのが一般的である。しかしながら、高含水率の軽量骨材を用いたコンクリートを寒冷地で供用すると、暴露条件によっては凍結融解作用の繰返しにより著しく耐久性を損なうことがある。著者らは高強度軽量コンクリートの耐凍害性を向上させる方法をいくつか提案し、実験検討したり。その結果、含水率5%以下の低含水状態の軽量骨材を用いるのが現状では最適な方法であることを指摘したが、この方法を採用すると、コンクリートの打込みはポンプ打ちができなくなりバケット打ちとせざるを得ないのである。

以上述べたように、軽量コンクリートにおいてポンプ

打ちを前提として良好な施工性と優れた耐凍害性を確保するという相反する性能を同時に改善するために、骨材粒中の気孔組織に着目して、新しい高品質人工軽量骨材の製造方法について検討した。国内や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、比較的直径の大きい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多い。このような骨材粒中の気孔を、原料および製造方法を変えることによって独立した(不連続な)小さい直径の気孔にすることができ、これによって軽量コンクリートの技術的な課題の多くを解決できるものと考えた。

本研究は、新しい発想のもとに考案した高品質人工軽量骨材に関して、その製造方法を述べ、試作した軽量骨材の性能とそれを用いたコンクリートの物性、とりわけ耐凍害性に焦点をしばって実験検討し、優れた品質が得られたかを明らかにしたものである。

2. 高品質人工軽量骨材の製造方法

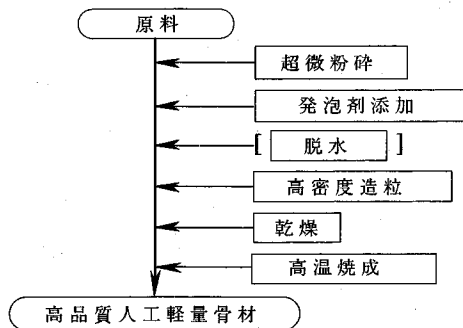
高品質人工軽量骨材(略称 HAL骨材と呼ぶ)の原料は、東京都新島産の抗火石(多孔質黒雲母流紋岩)である。抗火石の化学成分は SiO_2 (78.7%), Al_2O_3 (12.3%), Na_2O (4.0%), K_2O (2.7%), Fe_2O_3 (0.9%)等であり、珪酸およびアルミナ分が大部分を占め、鉄分が少ないのが特徴である。

骨材の製造は、図-1に示す製造フローにしたがって行った。HAL骨材製造上の特徴は、原料の超微粉碎、発泡剤の添加、焼成方法等である。原料はボールミルにより $10\mu\text{m}$ 以下まで超微粉碎された。これにより原料粒子が小さくなりかつ発泡剤を原料中に均一に混合・分散することから、熔融しやすくなり、連行される気孔の微細化や独立性が確保できる。さらに熔融してガラス化しにくい石英結晶等も微小化されることにより、骨材粒中の微小クラックの発生を少なくすることができると考えられる。また、プレス機等を用いて高密度造粒すれば、粒

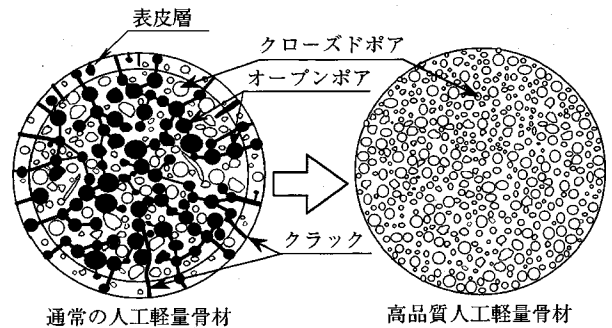
*正会員 工修 清水建設(株)技術研究所 主任研究員
(〒135 江東区越中島3-4-17)

**正会員 新島物産(株)開発部 部長

***正会員 清水建設(株)建築本部



図一 高品質人工軽量骨材の製造方法



図二 人工軽量骨材粒断面の模型図

表一 使用材料

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 C	比重=3.16, 比表面積(ブレーン法)=3250cm ² /g	
混和材	シリカフェーム SF	比重=2.21, 比表面積(BET法)=20.8m ² /g, SiO ₂ 量=90.6%	
粗骨材	高品質人工軽量粗骨材	HAL - A	最大寸法=15mm, 絶乾比重=0.92, 24時間吸水率=1.60%, 粗粒率=6.50
		HAL - B	最大寸法=15mm, 絶乾比重=1.22, 24時間吸水率=0.62%, 粗粒率=6.50
		HAL - C	最大寸法=15mm, 絶乾比重=1.66, 24時間吸水率=0.40%, 粗粒率=6.50
	人工軽量粗骨材	AL-1 (非造粒+造粒)	最大寸法=15mm, 絶乾比重=1.31, 24時間吸水率=8.67%, 粗粒率=6.30
AL-2 (非造粒)		最大寸法=15mm, 絶乾比重=1.26, 24時間吸水率=9.94%, 粗粒率=6.33	
細骨材	陸砂 (小笠産) S	表乾比重=2.59, 吸水率=1.50%, 粗粒率=2.82	
混和剤	高性能AE減水剤	主成分: ポリカルボン酸エーテル系複合体	
	AE助剤	主成分: 変性アルキルカルボン酸化合物	

子間隙をさらに小さくできることから、気孔の独立性をより高めることができる。通常の造粒型人工軽量骨材粒中の気孔は一般に原料粒子間隙と原料鉱物自体の発泡等によって生じたものであるが、HAL骨材は原料鉱物自体の発泡性は小さく、発泡剤(SiC)添加と焼成方法によって発泡のコントロールを行うところが大きく異なる点と言える。すなわち、キルン中を酸化雰囲気として焼成温度をコントロールすることによって自己発泡を抑制し、還元剤であるSiCが発泡剤として機能するのである。このような製造方法によれば、図一2に示すような直径の小さい独立した気孔を有するHAL骨材を製造することができ、骨材の比重も要求品質に合わせて変化させることも可能となる。

3. 実験概要

(1) 使用材料およびコンクリート配合

実験に使用した材料を表一に示す。結合材には、普通ポルトランドセメントと外国産の微粉末(undensified)シリカフェームを使用した。粗骨材は、現在市販されている膨張頁岩を原料とした人工軽量粗骨材2種類(AL-1, AL-2)と前述の製造方法で製造した高品質人工軽量粗骨材3種類(HAL-A, B, C)である。HAL骨材は、発泡の程度を調整することによって、絶乾比重を 0.9 ± 0.1 (HAL-A), 1.2 ± 0.1 (HAL-B), 1.6 ± 0.1 (HAL-C)にしたものであ

る。このような絶乾比重の設定は、市販の人工軽量骨材より著しく軽い、市販品の絶乾比重と同程度、十分プレウエットングした市販品の表乾比重と同程度であるということを目指して製造したことによっている。同骨材は、JISA 5002「構造用軽量コンクリート骨材」の絶乾比重による分類では各々L, M, Hに相当するものであり、他の品質規準にも全て適合するものであった。また、細骨材には陸砂を用いた。混和剤には、高性能AE減水剤とAE助剤を使用した。

コンクリートの配合条件は、表一2に示すとおりである。水結合材比は、本骨材の高品質さを十分活用するために最大値を制限し、21.9, 32.0, 40.0%の3種類とした。シリカフェームの置換率(SF/(C+SF)(%))は、0または10%とした。HAL骨材は、全て24時間以上吸水させたものを表乾状態で使用した。AL-1骨材に関しては、十分プレウエットングしたものと絶乾状態のものを使用した。スランブは、配合により変化させ、18~24cmを目標にした。空気量は、圧力法(JISA 1128)により測定し、練り上がり直後で6%を目標にした。スランブ、空気量、単位容積質量の測定値は、表一2に併記したとおりである。

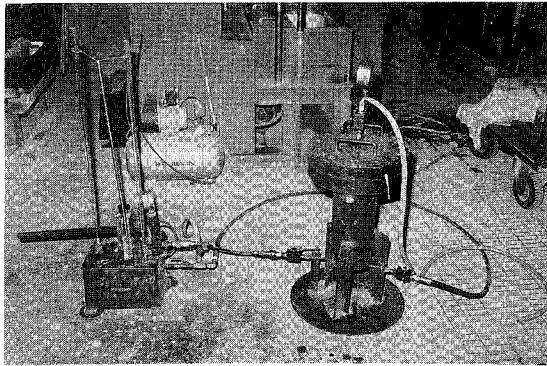
(2) 実験方法

人工軽量骨材の基本性能を明らかにするために、高品質人工軽量骨材と市販の人工軽量骨材を用いて、比重・吸水率試験(JISA 1135)、微粉碎した骨材の真比重試験

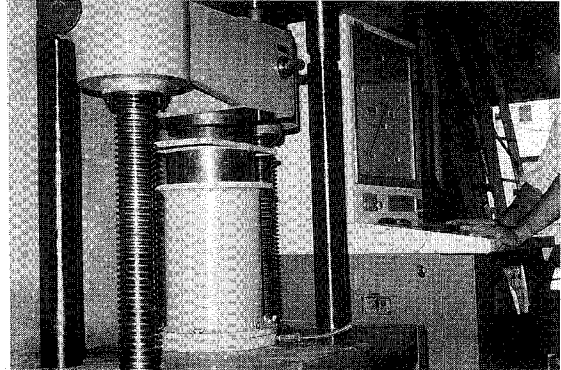
表一 2 コンクリート配合条件とフレッシュコンクリートの物性

配合名	配合条件					フレッシュコンクリートの物性			
	粗骨材の種類	粗骨材の含水率 (%)	水結合材比 W/(C+SF) (%)	細骨材率 s/a (%)	シリカフェーム置換率 SF/(C+SF) (%)	単位水量 W (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)
22AS	HAL-A	1.97	21.9	38	10	150	22.0	7.9	1701
32AS			32.0	41			20.0	6.9	1638
40AN			40.0	43			16.5	6.7	1634
22BS	HAL-B	0.45	21.9	38	10	160	17.5	4.7	1880
32BN			32.0	41	0		18.5	6.3	1790
32BS			32.0	41	10		23.0	6.8	1758
40BN			40.0	43	0		17.0	7.1	1752
40BS			40.0	43	0		18.0	6.4	1738
32CS	HAL-C	0.44	32.0	41	10	150	20.5	7.0	1925
40CN			40.0	43	0		17.0	6.4	1928
40CS			40.0	43	0		18.5	5.9	1922
22LpS	AL-1	26.2	21.9	38	10	150	24.0	5.8	1973
32LpN			32.0	41	0		23.0	5.0	1959
40LdN			40.0	43	0		9.0	4.7	1810

注) 空気量は、骨材修正係数 (HAL-A, B, C: 0.3, 0, 0%, AL-1(プレウェッティング): 1.0%) を差し引いたものである。



写真一 骨材の加圧装置



写真二 フレッシュコンクリートの加圧状況

(JIS R 2205), 骨材の破碎試験 (British Standard. B.S. 812), 骨材の圧力下での吸水試験を行い, 骨材の比重, 24時間吸水率, 骨材組成物の真比重, 骨材粒中の空隙率, オープンポア占有率およびB.S.破碎値を求めた. 骨材の圧力吸水試験では, 写真一に示す圧力容器に絶乾骨材を入れ, 0.98MPaのピッチで0~4.9MPaの水圧を加え, 水圧ポンプに取り付けたメスピペットの水量の減少量から含水率を算出した. なお本論文でいう含水率とは, 表面乾燥状態にある軽量骨材の含水率のことを示し, (24時間) 吸水率とは便宜上区別して表している. 骨材粒中の空隙率は式(1)により求めた. また, 骨材粒中の全空隙に対するオープンポアの占める割合であるオープンポア占有率は, 骨材の圧力吸水特性から判断して, 4.9MPaの最大負荷水圧を作用させた時に飽和含水率に達すると仮定して, 式(2)によって算定することとした.

$$\alpha = (1 - \frac{D_d}{D_a}) \times 100 (\%) \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta = (\frac{Q_s \cdot D_d}{\alpha}) \times 100 (\%) \dots\dots\dots (2)$$

ここに, α :骨材粒中の空隙率(%), D_d :骨材絶乾比重, D_a

:骨材組成物の真比重, β :骨材粒中のオープンポア占有率(%), Q_s :骨材の飽和含水率(%)

さらに, 気孔の大きさ, 独立性, 分布状態を明らかにするために, 走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察および水銀圧入法による細孔容積の測定を行った.

次に, 硬化コンクリートに関しては, 圧縮強度試験 (JISA 1108, 1132) と凍結融解試験を実施した. 凍結融解試験用供試体の作製方法ならびに試験方法は以下に示す手順で行った. 練り上がったコンクリートを $\phi 20 \times 36\text{cm}$ の鋼製円筒容器に深さ32cmまで詰め (約10dm³), 写真二に示すように, 耐圧試験機により1.96MPa/minの載荷速度で最大4.9MPaまで加圧した. ピーク後, 同一の速度で除荷し, 直ちに10×10×40cmの鋼製型枠にコンクリートを打ち込み, 翌日脱型し, 材齢14日まで標準養生を行った. このようなポンプ圧送を模擬した方法で供試体を作製したのは, ポンプ圧送負荷による軽量コンクリートの耐凍害性への影響を評価するためである. 凍結融解試験は, ASTM C 666 A法「水中における急速凍結融解試験方法」に準拠して行った. 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

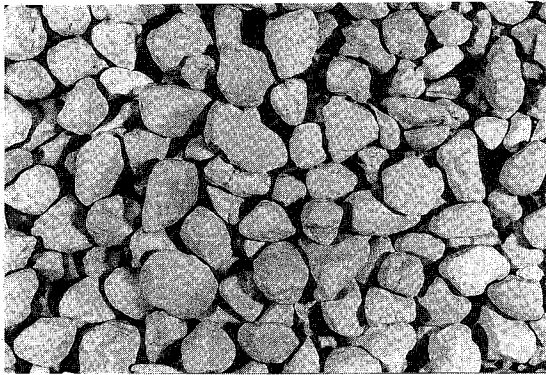


写真-3 高品質人工軽量骨材 (HAL-B) の外観

表-3 人工軽量骨材の基本性能

試験項目	高品質人工軽量骨材			人工軽量骨材	
	HAL-A	HAL-B	HAL-C	AL-1	AL-2
絶乾比重	0.92	1.22	1.66	1.31	1.26
骨材組成物の真比重	2.41			2.51	2.57
骨材粒中の空隙率 (%)	62	49	31	48	51
4.9MPa加圧下での含水率 (%)	3.24	0.73	0.40	28.5	33.2
オープンポア占有率 (%)	4.8	1.8	2.1	78	82
B.S. 破砕値 (%)	35.7	28.6	25.4	36.3	35.4
(10%B.S. 破砕荷重 kN)	(127)	(158)	(197)	(82)	(110)

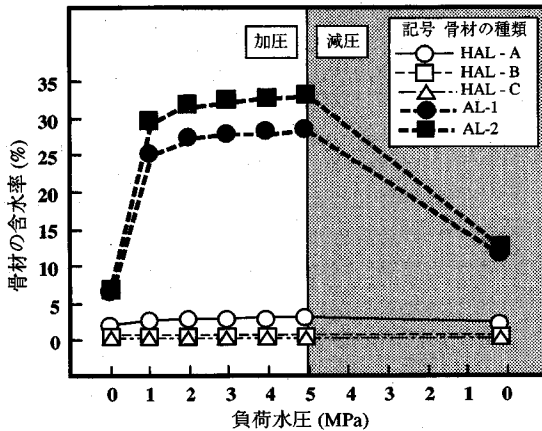


図-3 骨材の圧力吸水試験結果

れる相対動弾性係数、式(3)より算出される耐久性指数および供試体質量の経時変化により評価・判定した。

$$DF = \frac{P \cdot N}{M} \dots \dots \dots (3)$$

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)

また、軽量コンクリートの凍結融解試験とは別に、骨材自体の凍結融解に対する抵抗性も、以下に示す方法で、併せて実験検討した。すなわち、各種軽量骨材 (HAL-A,B,C,AL-1) を炉乾燥して絶乾試料を作製し、か

さ容積がほぼ同等となるように試料を採取して (1試料 500~900g), ASTM C666 A法に準拠して試験を行った。凍結融解のサイクルタイムは5~7時間であり、所定の凍結融解サイクル終了後、適宜試験槽から試料を取り出し、5mmふるいでふるって割れた破片や細粒分を取り除いた後、表乾質量を測定し、炉乾燥して絶乾質量を求めた。軽量骨材の劣化の程度の判定は、含水率変化と質量変化 (試験前後における絶乾骨材の質量の比(%)) によって行った。

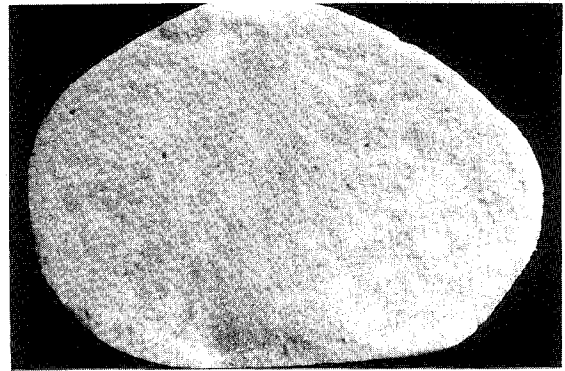
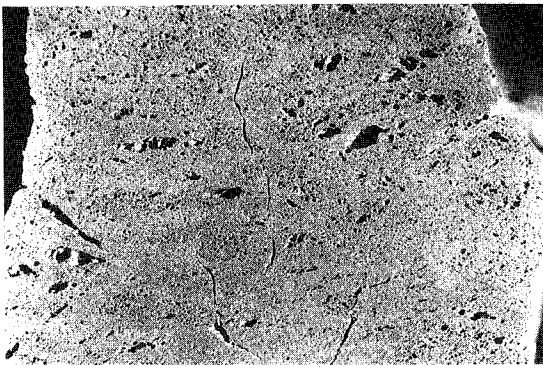
4. 実験結果と考察

(1) 高品質人工軽量骨材の物性

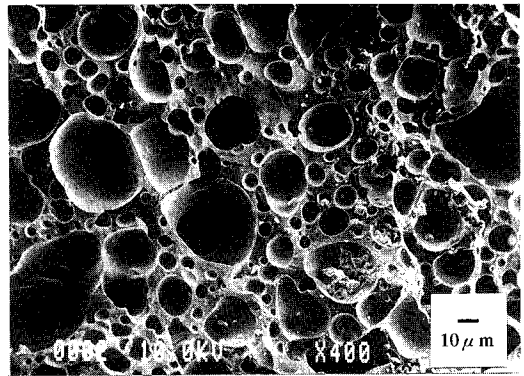
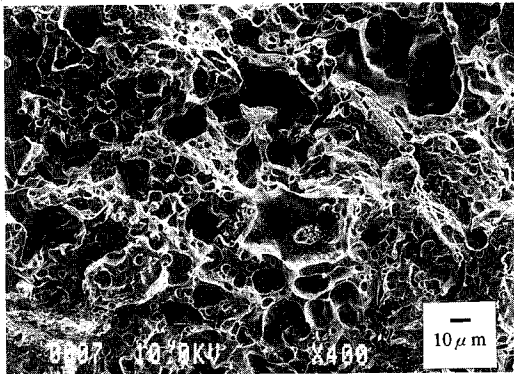
製造した高品質人工軽量骨材HALの外観を写真-3に示す。HAL骨材は灰白色の色調を呈し、骨材表面部には若干の微小空隙が存在するものの、ひび割れ等の大きな欠陥は認められなかった。

軽量骨材の物性試験結果を表-3、図-3に示す。HAL-A, B, C骨材粒中の空隙率は各々62, 49, 31%となり、HAL-Bが市販人工軽量骨材AL-1, AL-2の空隙率と同程度であった。一方、HAL-A, B, C骨材の加圧下での含水率は、4.9MPa水圧下で各々3.24, 0.73, 0.40%となり、AL-1, AL-2骨材の1/9~1/80程度と極めて小さくなった。さらに、AL-1, AL-2骨材は除圧後の被圧水の戻りが多く、含水率が約17~20%低下したが、HAL骨材では被圧水の戻りは著しく少なくなった (含水率が0.0~0.8%低下)。これらの結果からHAL-A, B, C骨材のオープンポア占有率を算出すると、各々4.8, 1.8, 2.1%となり、AL-1, AL-2骨材が既往の研究結果²⁾ とほぼ同程度の80%前後の値になったのに比較して、極めて小さい値となった。また、B.S.破砕試験結果から、AL-1, AL-2骨材に比較して、HAL骨材のB.S.破砕値は小さくなり、10%破砕荷重大きくなった。すなわち、骨材自体の強度がかなり改善されたのであり、空隙率の最も大きいHAL-A骨材においても、AL-1, AL-2骨材と同程度以上の骨材強度が得られていると考えられる。このような物性が得られたのは、骨材粒中の気孔の大きさや分布状態等の相違によるものと考えられる。そこで、骨材粒内部を光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察するとともに、水銀圧入試験により細孔容積の測定を行った。

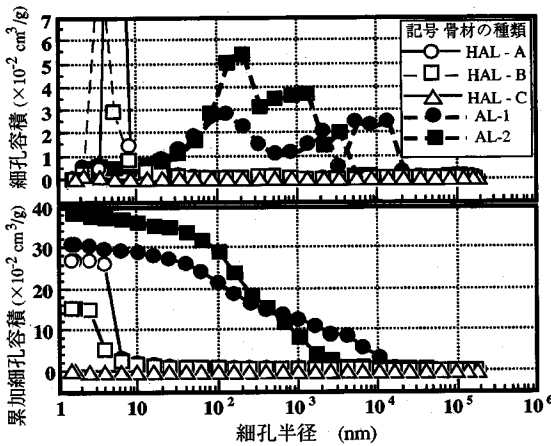
写真-4は、軽量骨材の断面を光学顕微鏡を用いて低倍率 (10倍) で観察したものである。HAL骨材では、直径0.5mm程度の気孔が点在することもあるが、大きな気孔やひび割れは認められず、直径の小さい気孔が骨材粒中に均一に分布しているようであった。また、気孔のでき方に骨材粒間での差はほとんどなく、表面部に不透水性被膜の形成も認められなかった。一方、市販の軽量骨材では、AL-1骨材のように、1~3mm程度の気孔やひび割れが存在する頻度が多いと同時に、気孔等の空隙のでき方



写真—4 軽量骨材の断面 (左: AL-1, 右: HAL-B)



写真—5 SEMによる骨材粒内部の気孔組織 (左: AL-2, 右: HAL-B)



図—4 水銀圧入試験結果

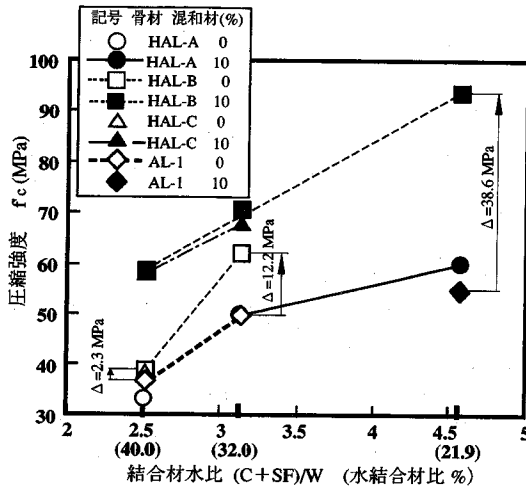
に骨材粒間でばらつきが認められた。

写真—5は、SEMにより骨材粒内部の気孔組織を高倍率(400倍)で観察したものである。HAL-A, B, C骨材では、気孔の最大直径は空隙率が小さくなるほど小さくなり、各々150, 100, 50 μm程度になっていた。またHAL-A, B, C骨材では、直径が各々2~50, 2~40, 2~20 μm程度の球状を呈した気孔の数が卓越しているようであった。一方、市販の軽量骨材では、前述したように1~3mm程度の大きな空隙も存在するが、直径2~100 μm前後の気孔が多

いようであった。AL-2骨材の気孔は、形状が不均一で網状構造を呈しているものもあり、気孔中に気孔が存在するといった状態が観察された。さらに、SEMの倍率を10000倍まで上げて観察したところ、いずれの骨材にも直径数100nm以下の気孔も観察されたが、その数は極めて少なかった。

水銀圧入試験結果を図—4に示す。AL-1, AL-2骨材粒中の細孔の半径はほぼ全域にわたって分布しており、細孔半径100~200nmの気孔が多いようであった。一方、HAL骨材では、細孔半径5nm(水銀圧約130MPa)程度までほとんど水銀が圧入されず、HAL-A, B骨材では細孔半径5nm以下で急激に水銀圧入量が増加した。これはHAL骨材中の気孔の大部分が独立したクローズドポアによって構成されているためであり、水銀圧が高くなり骨材組織が破壊したことにより水銀圧入量が増加したものと考えられる。なお、気孔径に関してSEM観察結果と水銀圧入試験結果との間に若干相反する結果がみられるが、これは軽量骨材がクローズドポアを多く含むこと、インクポトルポアの不正確な評価、高圧下での組織の破壊等によるものと考えられる。

以上述べた結果から、高品質人工軽量骨材は、直径の小さい気孔がほぼ独立した状態で均一に分布していることが明らかとなった。したがって、本骨材はコンクリー



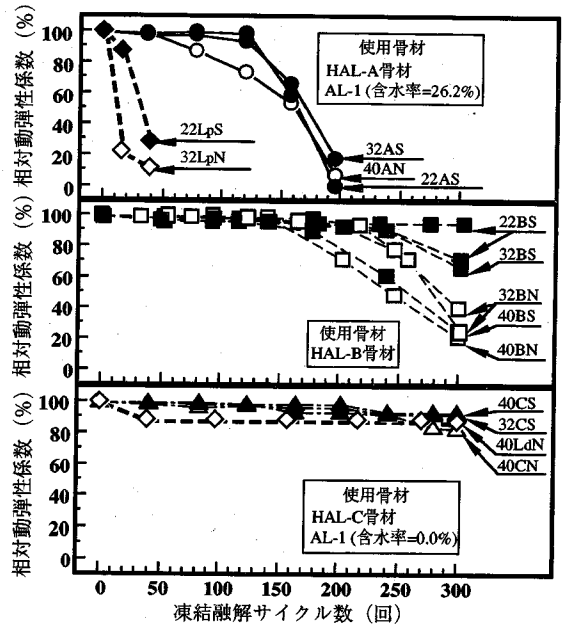
図一 5 材齢28日圧縮強度試験結果

トの練混ぜ・打込み時に骨材粒中への水の出入りがほとんどない低吸水性を確保できることとなり、プレウェッティングやプレソーキングを行う必要もなく、低含水状態のままコンクリートポンプ打ちが可能になると言える。

(2) 圧縮強度試験結果

高品質人工軽量骨材HALと市販軽量骨材AL-1を用いた軽量コンクリートの材齢28日圧縮強度試験結果を図一5に示す。一般に軽量骨材を用いて高強度コンクリートを得ようとする場合、単に水結合材比を低くしても、骨材強度が支配的要因となり、強度に頭打ちの現象がみられる。そのため、軽量コンクリートの軽さを若干犠牲にして、骨材比重を高めた軽量骨材を用いることにより軽量コンクリートのさらなる高強度化を図る場合もある。しかしながら本実験結果では、絶乾比重が最も軽い（空隙率が最も大きい）HAL-A骨材を用いた場合においても、水結合材比40～21.9%の範囲で、AL-1骨材を用いた同一配合コンクリートとほぼ同等の圧縮強度を得ることができた。HAL-B骨材を用いた場合では、絶乾比重および骨材粒中の空隙率がともにAL-1骨材とほぼ同程度であるが、同一水結合材比で強度発現性が改善され、AL-1骨材を用いた場合と比較して23～38.6MPa高い強度が得られた。この傾向は、水結合材比が低くなるほど顕著になった。また、HAL-A骨材およびAL-1骨材を用いた場合、水結合材比を32.0%から21.9%と低水結合材比にすると、圧縮強度の頭打ち現象がみられた。一方、HAL-B骨材になると、圧縮強度と結合材水比との間に良好な相関性が認められ、水結合材比21.9%まで圧縮強度の頭打ち現象はみられなかった。

以上の結果から、直径の小さい独立した気孔が均一に分布している骨材を製造することにより、それを用いたコンクリートの圧縮強度の頭打ち現象を改善できること



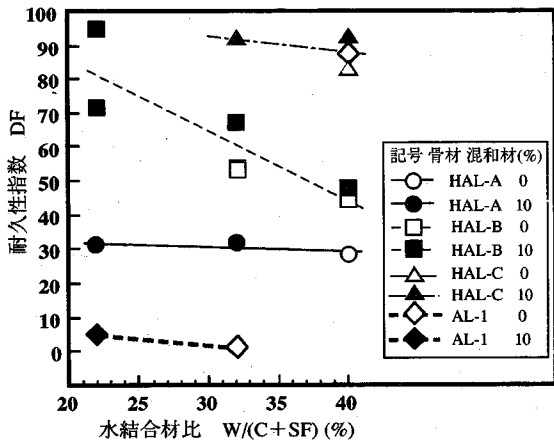
図一 6 相対動弾性係数の経時変化

が明らかとなった。著者らの研究成果によれば³⁾、本骨材は、HAL-C骨材程度の品質であれば、配合選定により、圧縮強度130MPa程度以上の高強度軽量コンクリートを製造できるポテンシャルを有していると言えるのである。なお、コンクリートの引張強度および弾性係数に関しては本論文では割愛したが、著者らによって指摘されているように^{3), 4)}、高強度軽量コンクリートのこれらの物性値は、いずれも普通骨材を用いた場合と比較して小さくなるようである。

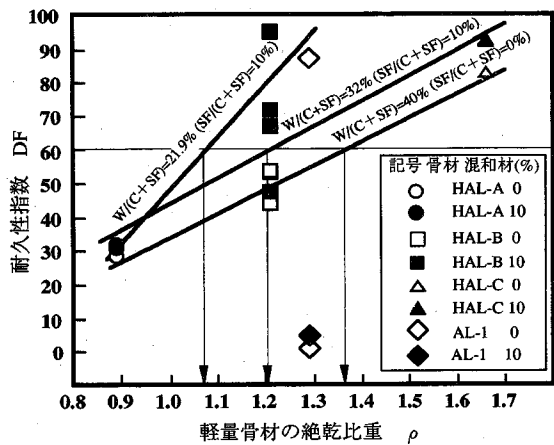
(3) 軽量コンクリートの耐凍害性

高品質人工軽量骨材HALと市販軽量骨材AL-1を用いたコンクリートの凍結融解試験を行った。ポンプ圧送を模擬して加圧したフレッシュコンクリートの物性に関しては、HAL骨材を用いた場合、空気量が練り上がり直後の値から1～3.5%程度低下して3.1～4.8%（平均で約4%）となった。またスランプに関しては、加圧による骨材粒中への吸水が極めて少ないことから、スランプ低下はほとんど認められなかった。

図一6は、凍結融解作用を受けた供試体の相対動弾性係数の経時変化を示したものである。プレウェッティングしたAL-1骨材を用いたコンクリートでは、水結合材比21.9%の富配合低水結合材比コンクリート（配合名22LpS）においても、凍結融解サイクル数39回において相対動弾性係数が28.3%まで低下した。一方、HAL骨材を用いた場合、最も早期に相対動弾性係数が低くなったコンクリート（配合名40AN）でも、凍結融解サイクル数119回において相対動弾性係数73.1%が確保されていた。すなわち、プレウェッティングしたAL-1骨材の代わりにHAL



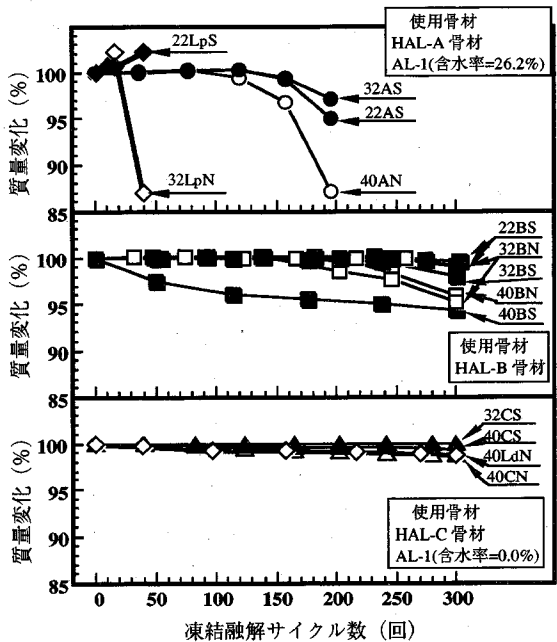
図一 7 耐久性指数と水結合材比の関係



図一 8 耐久性指数と骨材比重の関係

骨材を用いると、凍結融解作用による相対動弾性係数の低下を小さくでき、ポンプ圧送を模擬して加圧した軽量コンクリートの耐凍害性を大幅に改善できることが明らかとなった。また、HAL骨材を用いたコンクリートの耐凍害性は、水結合材比および骨材の種類の影響を受けるようである。すなわち、HAL骨材コンクリートの相対動弾性係数は、水結合材比が低くなるほど、骨材の絶対比重が大きくなるほど低下量が少なくなり、耐凍害性が向上する傾向が認められた。なお、耐凍害性に及ぼすシリカフェーム混和の影響は、無混和のものと比較して、若干向上する傾向が認められるものの、大差のない結果と考えられる。

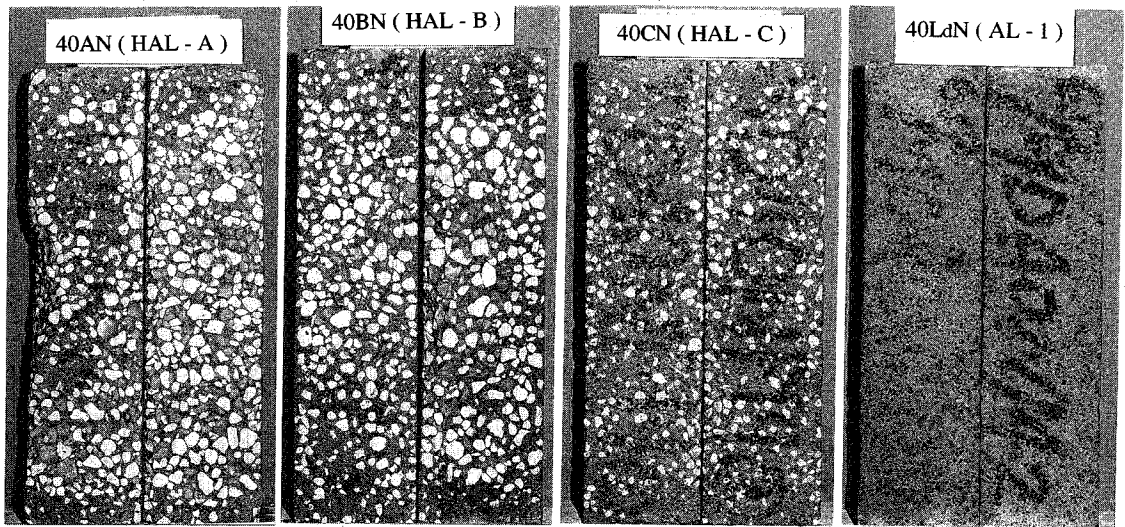
次に耐久性指数と水結合材比の関係を求めると、図一7のようになる。耐久性指数と水結合材比との間には何ら相関性が認められないようであるが、骨材の種類別に分類し一次回帰すると、各骨材で相関性が見いだせる。HAL-B骨材を用いたコンクリートでは、水結合材比が40.0%から21.9%と低くなるのに伴って、耐久性指数が45から95まで顕著に大きくなった。一方、HAL-A, C骨材を



図一 9 供試体質量の経時変化

用いたコンクリートでは、HAL-B骨材を用いた時のような左上がりの直線勾配にはならなかった。HAL-A骨材コンクリートでは水結合材比のいかんにかかわらず耐久性指数が全て30前後の小さい値となり、HAL-C骨材コンクリートではいずれも80以上の大きい耐久性指数が得られた。すなわち、HAL骨材コンクリートの耐凍害性は、既往の研究結果でも指摘されているように、水結合材比の影響も受けるが^{5), 6)}、HAL骨材自体の物性の影響をより顕著に受けるものと考えられる。

図一8は、耐久性指数とHAL骨材の絶対乾比重との関係を示したものである。HAL骨材の絶対乾比重がA, B, Cと順に大きくなるにつれて耐久性指数も大きくなった。これを同一水結合材比コンクリートで分類し一次回帰すると、相関性が見いだせる。すなわち、優れた耐凍害性を有するコンクリートを得るためには、各々の水結合材比でHAL骨材の絶対乾比重を所定の値以上にすればよいことが分かる。仮に耐久性指数60以上の軽量コンクリートを得ようとする場合、水結合材比が21.9, 32.0, 40.0%のコンクリートにおいて、HAL骨材の絶対乾比重を各々1.07, 1.20, 1.36以上にすればよいと考えられる。いずれの水結合材比においても大きな耐久性指数を得ようとする場合は、絶対乾比重が1.5~1.7程度のHAL-Cのようなグレードの骨材を使用することが望ましいとも言える。これは、前述したように、ポンプ圧送を前提とした場合、HAL-C骨材の比重でもプレウェットした市販軽量骨材の比重と大差なく、軽量コンクリートの単位容積質量という観点からは十分競合できるからである。なお、絶対乾状態のAL-1骨材を



写真—6 凍結融解試験終了時の供試体

材を用いたコンクリート（40LaN）の耐久性指数は87.4となり、HAL-C骨材を用いた同一水結合材比コンクリート（40CN）と比較して同程度の耐久性指数が得られた。

次にHAL骨材コンクリートの劣化状況を質量変化の観点から検討した。図-9は、凍結融解作用を受けた供試体の質量変化を示したものである。HAL骨材コンクリートの質量減少は、水結合材比が高いほど、骨材比重が小さいほど大きくなった。HAL-A骨材を用いたコンクリートでは、相対動弾性係数が60%に達すると供試体質量が1～2%程度減少し、さらに凍結融解作用を繰り返すと質量減少量が大幅に増大し、最終的には全ての供試体が凍結融解サイクル数300回に至る前に破断した。HAL-B骨材コンクリートでは凍結融解終了サイクル数300回において供試体質量が0.4～5.7%減少したが、HAL-C骨材コンクリートでは質量減少が著しく少なくなり、0.2～1.4%の範囲の値となった。一般にコンクリートの凍結融解作用による質量減少は、モルタルのスケーリング、骨材のポップアウト、コンクリートのスポーリングによるものであり、水結合材比の比較的高い普通コンクリートではスケーリングにより、軽量コンクリートではスケーリングに加えて骨材のポップアウトにより質量が減少すると言われている。本配合条件のHAL骨材コンクリートの場合、写真-6に示すように、質量減少は主に骨材のポップアウトとスポーリングによるものと言える。骨材のポップアウトやスポーリングは、HAL-A骨材コンクリートで顕著であり、HAL-C骨材コンクリートでは市販の絶乾軽量骨材を用いたコンクリートと同程度に少なくなった。またこの現象は、スケーリングによって骨材表面が露出しやすい打込み面で多く発生しているようであった。したがって、HAL骨材コンクリートの凍結融解による劣化は次の

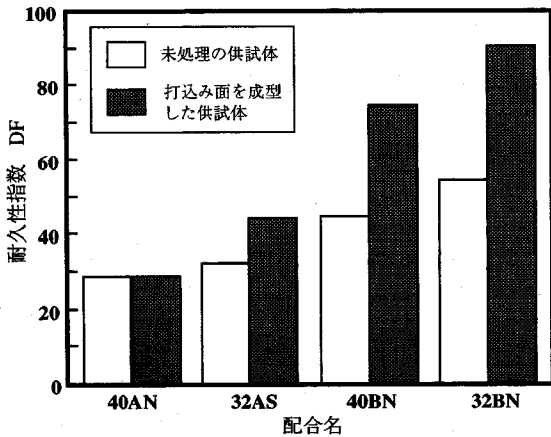
ように説明することができると思われる。すなわち、HAL骨材コンクリートでは、骨材粒中の気孔がほとんど独立した状態で存在することから、凍結融解作用時においてもその独立性が保たれ、普通骨材コンクリートと同程度の耐凍害性を得ることができると考えた。しかしながら、絶乾比重の小さい（空隙率の大きい）HAL骨材では、気孔径が大きく気孔間距離が短くなることから、骨材表面部の気孔が飽水状態になり膨張圧が気孔間の隔壁（殻）の強度を越えると、骨材粒表面部にひび割れが発生する。ひび割れは骨材の吸水による含水率の増加に伴ってさらに骨材粒内部やモルタル部へ進展し、連続したひび割れを形成するため劣化が進行するものと考えられる。

以上の結果から、ポンプ圧送を模擬して加圧した高品質人工軽量骨材コンクリートは、プレウエッティングした市販軽量骨材を用いたコンクリートと比較して、著しく耐凍害性を改善できることが明らかとなった。また、高品質人工軽量骨材コンクリートの耐凍害性は、使用骨材の絶乾比重（骨材粒中の空隙率）と良好な相関性が認められ、骨材の絶乾比重を大きくすると、より優れた耐凍害性を確保できることも明らかとなった。

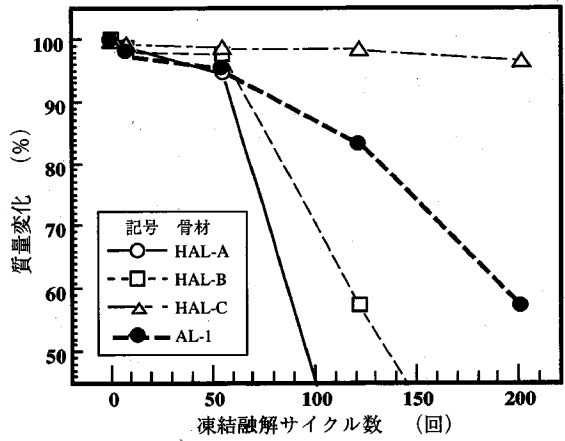
(4) 凍結融解作用による劣化のメカニズムと実構造物への適用時における考慮点

高品質人工軽量骨材コンクリートの凍結融解作用による劣化のメカニズムを明らかにするために2つの追加実験を行い、図-10～12に示す結果を得た。

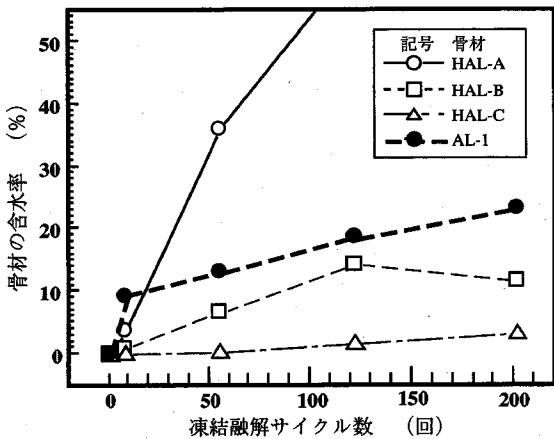
図-10は、骨材の露出しやすい打込み面をウエットスクリーニングしたモルタルで置き換えて（厚さ5～10mm）成型した供試体の凍結融解試験結果である。打込み面をモルタルで成型した供試体では、そのような処理



図一 1 0 凍結融解試験結果



図一 1 2 骨材質量の経時変化



図一 1 1 骨材含水率の経時変化

用の繰返しによって、骨材の割れ等により破片や細粒分が発生し、HAL-A, B骨材では、骨材質量が顕著に減少する結果となった。HAL骨材の場合、絶乾比重が大きい骨材ほど、すなわち空隙率が小さい骨材ほど含水率の増加は少なくなり、質量減少も少なくなった。HAL-C骨材では、凍結融解サイクル数201回の試験終了時において、含水率は3%程度しか増加せず(気孔の独立性が保たれ)、質量減少も3%程度と極めて少なかった。これらのことから、凍結融解作用を受けるHAL骨材コンクリートは、前述したように、骨材粒内部とモルタル部に連続したひび割れを発生することによってポップアウトやスポーリングを引き起こし、劣化が進行していくものと考えられる。なお、市販軽量骨材の場合に関しては、既往の研究結果では骨材自体は極めて抵抗性が大きく損傷を受けないと報告されているが⁷⁾、試験方法や試験回数相違により、本結果ではHAL-A, B骨材と同様に骨材含水率は増加し、骨材質量も大幅に減少した。

次に、HAL骨材コンクリートを凍結融解作用を受ける地域で供用する場合、以下に示すような配慮が必要と考えられる。

ASTM C 666 A法による凍結融解試験は極めて苛酷な試験方法であり、本試験方法と同程度以上の厳しい暴露環境にある構造物は、北極海で供用される石油掘削プラットフォーム等のように、かなり限定されたものになる。このような場合は、水結合材比により、HAL-B, C骨材(絶乾比重1.2~1.7程度)を選定する必要がある。一方、一般の土木・建築構造物の大部分は、部材の暴露条件がかなり緩和されるので、HAL-B骨材程度の品質(絶乾比重1.2前後)のものを用いれば優れた耐凍害性を確保できると考えられる。また、既往の研究結果によれば、市販のプレウエッティング骨材を用いたコンクリートでも、特別に厳しい暴露条件でない限り、実用上十分な耐久性が得られると報告されている^{7), 8)}。したがって、

を行わない通常の供試体と比較して、耐凍害性が向上する傾向が認められた。特にHAL-B骨材コンクリートでは、水結合材比40, 32%において、耐久性指数が各々74.5, 90.4と大きくなると同時に質量減少も少なくなり、優れた耐凍害性が得られたと言える。また、打込み面を成型した供試体では、打込み面からの劣化がほとんどなくなり、側面や底面の骨材が供試体表面に近い部位や供試体表面に存在する気泡等の空隙から劣化(ポップアウトやスポーリング)が進行していくようであった。すなわち、HAL骨材コンクリートの耐凍害性は、骨材表面が十分な水で覆われているかどうかによって結果がかなり異なったものになると考えられる。

図一11, 12は、水中で凍結融解作用を受けたHAL骨材の含水率と質量の経時変化を示したものである。HAL骨材は骨材粒中の気孔が独立した状態で連行されているにもかかわらず、HAL-A, B骨材では、凍結融解サイクル数の増加に伴って骨材の含水率が増加した。特にHAL-A骨材の場合、凍結融解サイクル数55回において含水率が36.1%となった。また、質量変化に関しても、凍結融解作

