

高炉スラグ細骨材およびエントレインドエアによる超硬練り コンクリートの凍結融解抵抗性の改善

STUDY ON RESISTANCE TO FREEZING AND THAWING OF EXTREMELY STIFF-CONSISTENCY CONCRETE

村田二郎*・川崎道夫**

By Jiro MURATA and Michio KAWASAKI

Studies were made on cases of using blast-furnace slag sand and of using air entrainment as methods of improving freezethaw resistance of extremely stiff-consistency concrete for instant stripping. The results show that there is considerable variation in resistance depending on the variety of slag sand, while stable resistance is obtained with air-entrained concrete. A method of measuring entrained air out of the air content of concrete was studied for extremely stiff-consistency air-entrained concrete, the reliability of the method was ascertained, and the conditions for selecting air-entraining agents suitable for extremely stiff-consistency concrete were examined.

Keywords: extremely stiff-consistency concrete, instant stripping, resistance to freezing and thawing, slag sand, air-entrained concrete

1. 緒 言

近年、東北、北海道地区において、超硬練りコンクリートを用い、即時脱型方式によって製造したコンクリートブロックに凍害が発生し、その対策が急がれている。

コンクリートの凍結融解抵抗性を改善するにはAEコンクリートとすることが一般に行われているが、超硬練りコンクリートの場合には、通常のAE剤を用いて適当な空気量とすることが甚だ困難であること、また、製品の的外観、寸法精度の保持のために即時脱型性および脱型直後の変形抵抗性がきわめて重要であって、エントレインドエアの導入はこれらの性質をむしろ低下させる傾向があること等から、従来、AE剤の使用はほとんど試みられていない。

一方、既往の研究^{1),2)}によれば、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は、川砂使用に比べて大となる場合が多いことが報告されている。そこで本研究においても、まず、AE剤を用いずに高炉スラグ細骨材の使用による超硬練りコンクリートの凍結融解抵

抗性の改善度について検討し、その有効性を確かめた。しかし、その効果は高炉スラグ細骨材の品質によりかなり相違し、高炉スラグ細骨材の品質は製造方法や製造時期によって変化すること、利用できる地域が限定されること等から、安定的に超硬練りコンクリート製品の耐凍害性を確保するためには、エントレインドエアの導入が必要であることが認められた。

しかし、超硬練りAEコンクリートを製造するには、①適切なAE剤を選定すること、②練りませ時に導入されたエントレインドエア、エントラップトエアおよび充填時に混入した空隙を区別して測定できる空気量試験方法を確立すること、③超硬練りAEコンクリートの即時脱型性および変形抵抗性を確かめること等の問題点がある。本文はこれらのうち主として①と②を検討し、所要の強度その他の性質を有する超硬練りAEコンクリートの製造方法について述べたものである。

なお、凍結融解試験の実施にあたっては、日本大学生産工学部 河合紘茲講師ならびに東京都土木研究所 川島力氏にお世話になりました。記して謝意を表します。

* 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科
(〒158 世田谷区深沢 2-1-1)

** 正会員 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科
(同上)

2. 高炉スラグ細骨材を用いた超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントで、その物理試験成績および化学成分を表—1に示す。

細骨材は高炉スラグ細骨材7種および川砂、砕砂各1種である。高炉スラグ細骨材のうち水砕砂は工場別に6種、風砕砂は一種であって、風砕砂は球状の製品を破碎し、粒度調整したものである。川砂は富士川産の良質のもの、砕砂は美山産のものである。細骨材の物理試験結果は表—2のようであって、川砂はコンクリート標準示方書の骨材の条項に、高炉スラグ細骨材はJIS A 5012「コンクリート用高炉スラグ細骨材」に、砕砂はJIS A 5004「コンクリート用砕砂」にそれぞれ適合する。

粗骨材は美山産砕石2005であって、その物理的性質は表—3に示すようであり、JIS A 5005「コンクリート用砕石」に適合する。

表—1 セメントの物理試験成績および化学成分

物 理 試 験 成 績									
比重	ブレン比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	フロー値	圧縮強さ (kgf/cm ²)		
		水量 (%)	始発 (時-分)	終結 (時-分)			3日	7日	28日
3.15	3270	28.5	2-16	3-47	良	264	165	267	415
化 学 成 分 (%)									
強熱減量	不溶残渣分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	合計	
0.7	0.1	21.5	5.1	2.8	65.2	1.8	2.1	98.5	

表—2 細骨材の物理試験結果

種 類	産地又は製造会社	比 重		吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/ℓ)	実積率 (%)	粗粒率 F.M.	
		納乾	表乾					
川 砂	A 富士川産	2.61	2.64	1.18	1.82	70	3.07	
砕 砂	B 美山産	2.54	2.58	1.78	1.78	70	2.74	
高炉スラグ細骨材	水 砕 砂	C SN社	2.66	2.69	1.37	1.58	60	2.45
		D SN社	2.78	2.81	1.24	1.79	64	2.48
		E SN社	2.60	2.64	1.58	1.63	63	2.71
		F S社	2.75	2.82	1.01	1.54	55	2.57
		G S社	2.71	2.81	0.85	1.79	64	2.57
		H K社	2.80	2.83	0.93	1.78	63	2.50
		I SN社	2.77	2.80	1.21	1.89	68	2.61
風砕砂								

表—3 砕石の物理試験結果

産地および種類	比重	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/ℓ)	実積率 (%)	洗い試験 (%)	粗粒率 F.M.
美山産砕石2005	2.58	1.19	1.55	59.6	0.7	6.57

(2) コンクリートの配合

超硬練りコンクリートの配合設計法については空隙率や細骨材率の選定など、なお不明な点が残されており、確立されているとはいいがたい。そこで、本実験ではとりあえず次のようにして配合を決定した。

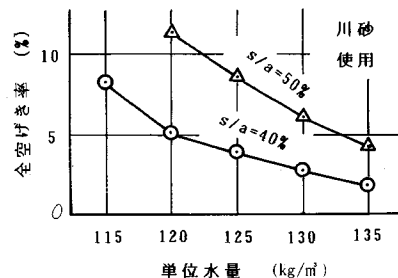
高炉スラグ細骨材7種、川砂、砕砂各1種を用い、単位セメント量を約240 kg/m³とし、全空隙率を約2%および5%とした。ここに、超硬練りコンクリートにおける空隙は、練りませ時におけるエントラップトエア(AEコンクリートの場合はエントレインドエアとエントラップトエアの和であって、空気量といわれている)と充填時に混入する空隙率から成っており、本文ではこれらの合計量を全空隙率とよぶこととした。

空隙率は超硬練りコンクリートの強度、耐久性、水密性等の硬化後の性質に支配的な影響を与える³⁾ばかりでなく、即時脱型の容易さや脱型直後の変形に対する抵抗性等のフレッシュコンクリートの特性にも著しい影響を与える。これは一定の振動締固め条件下で製造したコンクリートの空隙率が、そのコンクリートの締固め性の指標を表わすことから、締固め性が小となるほど(硬練りになるほど)即時脱型性や変形抵抗性などの性質が一般に良好となるためである⁴⁾。しかし、空隙率からある寸法の製品の即時脱型性および変形抵抗性を定量化できるまでに至っていないので、全空隙率を5%程度までの範囲で実験を行うこととした。

単位水量は前記のように空隙率が締固め性の指標を表わすから⁵⁾、所定の全空隙率が得られるよう試的に定めた。

すなわち、単位水量を数種に変化させた超硬練りコンクリートを振動数75 Hz、加速度6.3 gの振動台上で10秒間(後半の5秒間は1 kgf/cm²の加圧を併用)締固め、単位水量と全空隙率との関係を求めておき(図—1参照)、この関係曲線から所要の全空隙率となる単位水量を決定した。

細骨材率は全空隙率を2%とした場合は、所定の振動条件で空隙率が最小となる細骨材率、すなわち、最小振動仕事量における細骨材率として40%を定め、全空隙



図—1 単位水量と全空隙率との関係

表-4 コンクリートの配合

細骨材	目標全空率 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
				水	セメント	細骨材				
						粗	骨 材			
				20~10mm	10~5mm					
川 砂	2.0	54	40	132	245	813	596	596		
砕 砂						127	831	600	600	
高炉スラグ細骨材						C	132	810	596	596
						D	132	875	596	596
						E	127	831	600	600
						F	152	856	581	581
						G	127	874	600	600
						H	137	863	592	592
						I	132	943	596	596
						川 砂	5.0	56	50	238
砕 砂	128	963	482	482						
高炉スラグ細骨材	C	138	959	476	476					
	D	119	1062	488	488					
	E	133	995	479	479					
	F	157	998	469	469					
	G	128	1049	482	482					
	H	131	1050	480	480					
	I	114	1065	491	491					
	川 砂	3.0	40	50	124	310				
6.0		120			301	917	672	288		
9.0		116			291	887	651	278		

率を5%とした場合は慣用的に用いられている値として50%とした。

このほか、特に空隙率の影響を検討することを目的として川砂を用い、全空隙率を約3%、6%および9%とした配合も定めた。ただし、この場合は簡単のため各材料の配合比を一定とし、振動締め時間を変化させ、全空隙率が所定の値となるよう調整した。すなわち、水セメント比を40%、細骨材比を50%、空隙を無視して計算した単位水量を128 kg/m³とした。所定の全空隙率としたコンクリートの単位水量は116~124 kg/m³となった。コンクリートの配合を表-4に示す。

(3) 試験方法

a) 練りませおよび供試体の製造方法

1バッチの量を45 lとし、容量50 lのパン型強制練りミキサーを用い、空練り1分、注水後3分間練りませた。供試体の製造方法は、ホッパーを装着した10×10×40 cm型枠を振動台(振動数75 Hz、加速度6.3 g)に固定し、コンクリートを1層に詰め、10秒間締め固めた。ただし、後半の5秒間は1 kgf/cm²の加圧を併用した。上面をならして成型したのち質量を測定し、JIS A 1116に準じ、全空隙率を求めた。供試体は材令1日で脱型し、材令14日まで20±2°Cの水中で養生した。

なお、振動台は偏心重錘が一方方向に回転して振動を発生する形式のものである。

b) 凍結融解試験方法

凍結融解試験方法はASTM C 666 A法(水中急速凍結融解試験方法)に従い、材令14日から開始し、約15サイクルごとに相対動弾性係数および質量を測定した。試験値は供試体3個の試験値の平均値とした。

c) 顕微鏡による硬化コンクリートの空気量および気泡組織の試験方法

10×10×40 cm供試体から厚さ約2 cmの平板を切り出し、入念に研磨仕上げしたのち、ASTM C 457のリニアトラバース法により空気量、平均孔径および間隔係数を測定した。走査線の長さは2400 mm、走査線の間隔は3 mmとした。

本来、この試験はエントレインドエアのような微細球形気泡に適用するものであるが、本実験では便宜上粗大な不整形気泡にも適用し、超硬練りコンクリートの空隙組織の大体の目安を得ることとしたのである。したがって、空気量、平均孔径、間隔係数等の算定にはすべて球形気泡に適用する計算式を用いている。

d) 細骨材の細孔径分布試験方法

圧力範囲0.07~3000 kgf/cm²(細孔半径の測定範囲88.4 μm~21 Å)の水銀圧入式ポロシメータを用いた。細骨材試料は3 gとし、80°Cで定重量となるまで乾燥したのち試験に供した。

(4) 実験結果および考察

a) 超硬練りコンクリートの全空隙率が凍結融解抵抗性に及ぼす影響

川砂を用い、全空隙率を約3%、6%および9%とし

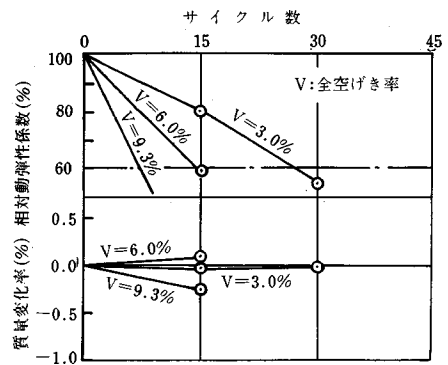


図-2 相対動弾性係数および質量変化率の推移

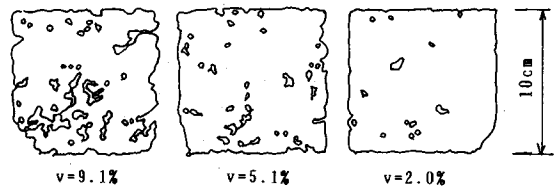


図-3 超硬練りコンクリート中の粗大空隙(スケッチ)

た超硬練りコンクリートの凍結融解試験結果を図—2に示す。

従来、超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性は包含する空隙によりむしろ改善されるとの説もみられるが⁶⁾、図—2に示すように、凍結融解抵抗性はかなり小さく、全空隙率3~9%で耐久性指数は2~5に過ぎない。

図—3は各空隙率の供試体のうち各1個を取り出し切断し、その断面の空隙の状態をスケッチしたものである。空隙はいずれも不整形で、連続した構造のものがかなり認められ、この傾向は全空隙率が大きいほど顕著である。したがって、超硬練りコンクリートにおいては、外部から空隙内への水の侵入が容易であり、侵入した多量の水は凍結時に過大な圧力を発生し、早期にコンクリートを劣化させるものと思われる。

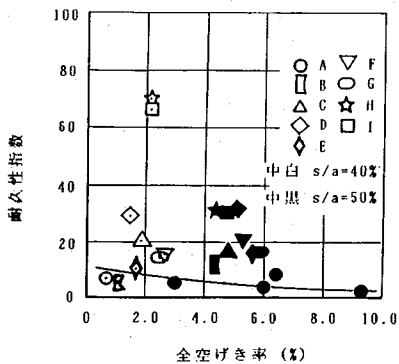
相対動弾性係数が60%に低下するときの凍結融解サイクル数はわずか7~28回であって、図—2に示すように、この間に供試体の質量変化はほとんどなく、外観も変化していない。このことは劣化が孔隙水の圧力に起因することを示しており、超硬練りコンクリートの充填時に混入する粗大な孔隙は凍結融解抵抗性に悪影響を与えることが確かめられた。

なお、表—5は顕微鏡法により硬化コンクリートの空隙組織を試験した結果である。表—5において空気量はフレッシュコンクリートの全空隙率と近似している。また、全空隙率が増すほど気泡間隔係数は減少しているが、

表—5 硬化コンクリート中の空隙組織

フレッシュコンクリートの全空隙率 (%)	平均孔径 ϕ^* (mm)	気泡数 n (個/mm)	空気量 A (%)	間隔係数 L (μm)
3.0	1.10	0.068	4.8	811
6.0	1.05	0.091	6.4	598
9.3	1.34	0.091	8.0	562

* $\phi = 2(3/4 \text{ } \varrho) = 1.5 \varrho$ 、 ϱ : 平均弦長(mm)



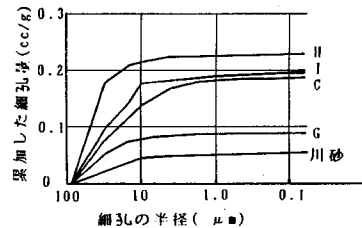
図—4 全空隙率と耐久性指数との関係

これは全空隙率の変化にかかわらず気泡個数があまり変化しないことから考えて全空隙率が増すほど個々の気泡の大きさが拡大し、これが全空隙率の増加に伴い劣化が著しくなる一因と考えられる。平均孔径は全空隙率3~9%に対し、1.10~1.34 mmであった。

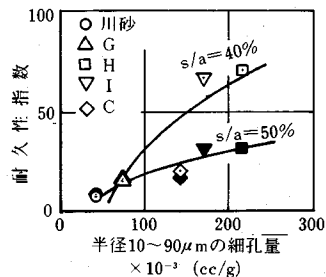
b) 高炉スラグ細骨材の使用が超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響

図—4に7種の高炉スラグ細骨材を用いた超硬練りコンクリートの全空隙率と耐久性指数との関係を示す。図—4において、高炉スラグ細骨材を用いた超硬練りコンクリートの耐久性指数はいずれも川砂または砕砂を用いた場合より大となっている。しかし、その程度は使用した高炉スラグ細骨材の種類およびコンクリートの全空隙率によってかなりの差異が認められる。すなわち、全空隙率を約2%としたコンクリートにおいて、川砂および砕砂を用いた場合の耐久性指数が5~7であるのに対し、高炉スラグ細骨材HおよびIを用いた場合はそれぞれ69および61と飛躍的に増大している。しかし、高炉スラグ細骨材C、D、E、FおよびGを用いた場合は10~29となっている。また、全空隙率を約5%とした場合は前記の約2%とした場合に比べて抵抗性は劣るもの的高炉スラグ細骨材D、HおよびIを用いた場合の耐久性指数は約30、高炉スラグ細骨材C、E、FおよびGを用いた場合は15~20で、いずれも川砂、砕砂を用いた場合より大きい。

このように、高炉スラグ細骨材の使用により、超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性が改善される機構を検討するため、水銀圧入式ポロシメータを用い、高炉スラ



図—5 細骨材の細孔径分布



図—6 全細孔量と耐久性指数との関係

グ細骨材中の細孔径分布を測定した。試料は高炉スラグ細骨材 C, G, H および I ならびに比較のための川砂であって、細孔径分布の測定結果の例を図—5 に示す。図—6 は半径 10~90 μm の細孔量とコンクリートの耐久性指数との関係を示したものでこれらの間によい相関が認められ、細孔量が多いほど耐久性指数は大となっている。これはこの寸法の細孔が通常のエントレインドエアの寸法と類似していることから、これらがコンクリート中でエントレインドエアと同様な機能を果たし、コンクリートの凍結融解抵抗性を改善するものと推察される。なお、同一工場で製造時期を異にする高炉スラグ細骨材 (H) 6 試料の半径 10~90 μm の細孔量は 0.104~0.240 cc/g であって、製造時期による変動が認められる。

以上の検討から、適当な品質の高炉スラグ細骨材の使用は AE 剤を用いない超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性の改善に有効であることが認められたが、高炉スラグ細骨材の品質、特に含有する細孔量は製造工場、製造時期等によって変化するので、超硬練りコンクリート製品の耐凍害性を安定的に確保するためには、エントレインドエアの導入が必要と考えられる。

3. 超硬練り AE コンクリートの空気量測定方法

超硬練り AE コンクリートにおいては、練りませ時に導入される空気量、すなわちエントレインドエアおよびエントラップトエアと充填時に混入する空隙率を区別して測定できる試験方法が必要である。練りませ直後の空気量の測定法として修正圧力法について検討した。

(1) 修正圧力法

修正圧力法は JIS A 1128 の空気室圧力方法の一部を修正したもので、測定の手順は次のとおりである。

① 容器内に約 2 l の水を入れたのち、コンクリート試料 10 kg をほぐすようにして静かに投入し、全試料投入後容器側面を木槌で 10 回程度軽打する。

② 容器上縁まで水を満たし、浮上した気泡を除去したのち蓋を装着し、以後は JIS A 1128 に従って空気量の日盛を読み取る。

③ 空気量は式 (1) から計算する。

$$A = \frac{7W_0A_0}{10 + 0.07W_0A_0} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、A：空気量（%）、A₀：エアメータの空気量日盛の読み（%）、W₀：空気を無視して計算したコンクリートの単位容積質量（kg/l）

超硬練りコンクリートにおけるエントラップトエアおよび空隙率は式 (1) で求めたプレーンコンクリートまたは AE コンクリートの空気量と充填時に重量法で求めた全空隙率から式 (2)、(3) および (4) により計算

する。

$$A_p = \frac{A_1(100 - A_3)}{100 - A_1} \dots\dots\dots(2)$$

$$A_e = \frac{100(A_2 - A_1)(100 - A_3)}{(100 - A_1)(100 - A_2)} \dots\dots\dots(3)$$

$$A_v = \frac{100(A_3 - A_2)}{100 - A_2} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、A_p：エントラップトエア（%）、A_e：エントレインドエア（%）、A_v：空隙率（%）、A₁：式 (1) で求めたプレーンコンクリートの空気量（%）、A₂：式 (1) で求めた AE コンクリートの空気量（%）、A₃：重量法で求めた全空隙率（%）

(2) 空気量試験結果

川砂、高炉スラグ細骨材 C および E を用いた超硬練りコンクリートについて、練りませ直後および充填後の空気量を比較し、修正圧力法の信頼性等を検討した。

AE 剤を用いない超硬練りコンクリートについて、修正圧力法によって練りませ直後に求めた空気量 (A₁) は、川砂を用いた場合、配合にかかわらず 0.7~1.2%、高炉スラグ細骨材 C および E を用いた場合は 1.3~2.0% であった。

次に、超硬練り AE コンクリートについて式 (3) によってエントレインドエアを求め、硬化後顕微鏡法によって求めたエントレインドエアと比較した。顕微鏡法では、測定時に気泡の形状も観察し、円形と認められるものをエントレインドエアとみなした。

実験に用いたコンクリート試料のエントレインドエアの目標値を 2~5%、エントラップトエアと空隙率の和の目標値を 3~9% とした。試験結果を表—6 に示す。

表—6 において、川砂を用いた場合、式 (3) によって求めたエントレインドエアは 2.9~3.1% および 4.0~4.3% であって、これに対応する顕微鏡試験結果はそれぞれ 2.9~3.4%、および 3.8~4.4% で、両者の差は 0.5% 以下ではほぼ一致している。高炉スラグ細骨材を用いた場合も大体同様であって、修正圧力法と顕微鏡法で求めたエントレインドエアの差は一部を除き、0.7% 以下となっている。

以上の実験結果から、修正圧力法と重量法を組み合わせることにより、超硬練り AE コンクリートのエントレインドエア、エントラップトエアおよび空隙率を区別して満足に測定できることが確かめられた。

4. 超硬練り AE コンクリートの凍結融解抵抗性

(1) AE 剤の選定

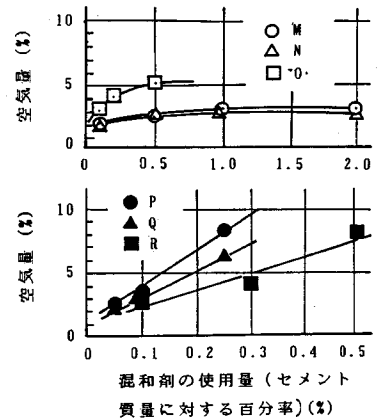
超硬練り AE コンクリートにおいては、一般にセメントペーストの粘度が高く、その含有量も少ないので、所要のエントレインドエアを導入するためには、起泡力

表—6 空気量試験結果

細骨材の種類	目標空気量 (%)		フレッシュコンクリートの空気量 (%)		硬化コンクリートの空気量 (%)		①-② (%)
	A _e	A _p +A _v	①A _e	A _p +A _v	②A _e	A _e +A _v	
川	—	3 6 9	—	3.0 6.1 8.4	—	3.5 5.9 8.0	—
	3	3 6 9	3.1 3.0 2.9	3.7 6.4 9.4	2.9 2.8 3.4	3.3 5.0 8.9	0.2 0.2 -0.5
	5	3 6 9	4.3 4.2 4.0	5.7 8.4 11.9	4.4 4.0 3.8	4.4 7.7 8.0	-0.1 0.2 0.2
高炉スラグ細骨材 C	—	3 6 9	—	3.2 6.3 9.2	—	5.3 6.9 8.1	—
	2	3 6 9	1.0 0.9 0.9	4.4 7.3 10.3	1.7 1.4 1.0	3.3 7.7 9.9	-0.7 -0.5 -0.1
	3.5	3 6 9	2.5 2.4 2.3	3.8 6.9 10.2	2.3 2.1 2.1	4.4 6.6 11.2	0.2 0.3 0.2
	5	3 6 9	3.3 3.2 3.1	4.1 7.6 9.8	3.2 3.1 2.5	5.0 8.3 6.9	0.1 0.1 0.6
高炉スラグ細骨材 E	—	3 6 9	—	3.0 6.0 8.9	—	5.7 5.9 7.5	—
	2	3 6 9	0.8 0.8 0.7	4.4 7.0 10.5	0.9 1.4 1.2	2.5 4.0 7.3	-0.1 -0.6 -0.5
	3.5	3 6 9	1.4 1.4 1.3	4.9 8.0 11.1	2.1 2.1 2.2	3.4 7.6 7.6	-0.7 -0.7 -0.9
	5	3 6 9	3.2 3.1 3.0	4.8 8.0 10.6	4.9 4.4 3.2	4.6 4.1 4.5	-1.7 -1.4 -0.2

表—7 混和剤の種類

記号	種類	主成分
M	AE剤	ビス 酸ナフ
N	AE剤	高炉スラグ微粉酸
O	AE減水剤	リタマリン 酸塩 高炉スラグ微粉酸
P	即時脱型剤	高級アルコール 硫酸 エタノール アミン/アミド
Q	起泡剤	高級アルコール 硫酸 エタノール
R	起泡剤	アクリルエーテル ポリエーテルアクリルエーテル



図—7 混和剤の使用量と空気量との関係

が大きく、気泡の安定度が良好で、かつ十分細かい径の気泡を生成する AE 剤を選定する必要がある。

界面活性剤の起泡力およびその安定度を試験するには JIS K 3362「合成洗剤試験方法」が規定されているので、この方法に準じ、蒸留水および高アルカリ溶液中の定濃度の界面活性剤の起泡力および安定度について検討した。しかし、これらの結果をそのまま超硬練りコンクリート中の AE 剤の特性評価に適用することは難しいので、超硬練り AE コンクリートを練りませ、修正圧力法によって空気量を測定し、使用する AE 剤の適性を評価することにした。すなわち、川砂を用い、水セメント比 40%、細骨材率 50%、単位水量約 95 kg/m³としたコンクリートにおいて、表—7 に示す AE 剤 2 種 (M, N)、AE 減水剤 1 種 (O)、即時脱型剤 1 種 (P) および起泡剤 2 種 (Q, R) をそれぞれ用い、混和剤の使用量と空気量との関係を試験した。試験の結果を図—7 に示す。図—7 において、試験結果は明らかに 2 群に分かれ、混和剤 M, N および O を用いた場合は空気量に上限が認められ、その値は起泡剤により 3~5% となっている。これに対し、混和剤 P, Q および R を用いた場合は使用量にほぼ比例して空気量が増大した。混和剤 P, Q および R は硫酸エステル塩を主成分とするいわゆる起泡剤であって、起泡力は大きい、気泡の大きさがやや大きいといわれている。そこで、混和剤 Q および R,

比較のために通常の減水剤 O を用いてモルタルを造り、硬化後顕微鏡法によって気泡の平均孔径を求め、それらを比較した。混和剤 Q および R によって生成された気泡の平均孔径はそれぞれ 0.18 mm および 0.20 mm であって、混和剤 O を用いた場合の 0.14 mm に比べ若干大であった。しかし、従来凍結融解作用に対して有効な気泡径は 0.2~0.3 mm 程度以下とされていることも考慮し、混和剤 Q, R を超硬練りコンクリート用の AE 剤として採用することとし、以下の実験では平均孔径が比較的小さい混和剤 Q を使用した。

(2) 使用材料およびコンクリートの配合

a) 使用材料

セメント、川砂および砕石は 2. の実験に用いたものと同様である。高炉スラグ細骨材は凍結融解抵抗性に及ぼすエントレインドエアの影響がなるべく明瞭に現われるよう細孔量が比較的小さい E (半径 10~90 μm の細孔量 0.054 cc/g) を用いた。使用した混和剤は前記のように起泡剤 Q である。

b) コンクリートの配合

コンクリートの配合は、水セメント比 40%、細骨材率を 50% とし、目標空気量を次のように定め、単位水

量は試的に決定した。

目標空気量はエントレインドエアを0% (プレーン)、2% (AE I とよぶ) および4% (AE II とよぶ) とし、充填時の空隙率を即時脱型性、変形抵抗性等を考慮して1%、2.5% および5% とした。エントラップトエアは川砂および高炉スラグ細骨材Eを用いた場合それぞれ約1% および2% であったので、プレーンコンクリートの空隙率は川砂を用いた場合2%、3.5% および6%、高炉スラグ細骨材Eを用いた場合は3%、4.5% および7% となる。AE コンクリートの全空隙率はこれらにエントレインドエア2% または4% を加算したものとなる。

単位水量は川砂使用のプレーンコンクリートの場合約115 kg/m³ とし、コンクリートを10×10×40 cm 型枠に詰め、振動数3250 rpm、加速度5gの振動台上で締固め、振動時間と全空隙率との関係曲線を描き、図上で所定の全空隙率を得るための振動締固め時間を決定した。振動締固め時間は全空隙率2%、3.5% および6% に対し、それぞれ108秒、52秒および22秒であった。

次に、川砂使用のAE I およびAE II コンクリートならびに高炉スラグ細骨材使用のプレーン、AE I およびAE II コンクリートについて、上記の振動締固め時間で所定の全空隙率が得られるよう単位水量を試的に定めた。これは、同じ振動締固め条件下で同じ充填時空隙率となり、細骨材の種類やエントレインドエアの量にか

かわらずコンシステンシーが同等となるよう配慮したものである。コンクリートの配合を表—8に示す。

なお、圧縮強度試験の試料は、配合は表—8のとおりであるが、φ10×20 cm 型枠を用いているので、所定の全空隙率を得るための振動締固め時間は凍結融解試験供試体の場合と若干相違し、充填時の空隙率1%、2.5% および5% に対し、所要の振動締固め時間は120秒、54秒および26秒であった。

(3) 試験方法

表—8に示した配合のコンクリートを練りませ、修正圧力法および重量法によって空気量および空隙率を測定し、凍結融解試験および圧縮強度試験供試体を作成した。供試体の養生は20±2°C の水中とし、凍結融解試験開始時の材令および圧縮強度試験の材令はいずれも14日とした。

コンクリートの練りませ方法、凍結融解試験方法、顕微鏡による硬化コンクリートの空気量および気泡組織の試験方法等は2.(3)に述べたと同様である。

圧縮強度はJIS A 1108によって試験した。

(4) 試験結果および考察

a) 凍結融解に対する抵抗性

凍結融解試験の結果を図—8に示す。図—8において、超硬練りコンクリートの場合もAE コンクリートとすることによって凍結融解抵抗性は大幅に改善されること、しかし、空隙率の影響を大きく受けること、また、

表—8 コンクリートの配合、空気量および耐久性指数

細骨材の種類	コンクリートの種類	コンクリートの配合										空気量の測定値 (%)		耐久性指数
		目標空気量 (%)		水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)						A _c	A _p +A _v	
		A _p	A _p +A _v			水 W	セメント c	細骨材 s	粗骨材 G		混和剤 Q (cc/m ³)			
					20-10mm	10-5mm								
川	プレーン	—	2	40	50	118	294	992	711	305	—	—	1.2	23
		—	3.5			116	290	977	700	300	—	—	2.5	13
		—	6.0			113	282	951	682	292	—	—	5.0	6
砂	AE I	2	2	40	50	106	264	994	712	305	132	1.6	2.1	85
		2	3.5			104	260	978	701	301	130	2.0	3.3	78
		2	6.0			101	253	952	683	293	127	1.9	5.1	39
砂	AE II	4	2	40	50	94	235	995	713	305	235-517	4.5	1.8	90
		4	3.5			93	231	980	701	301	231-508	4.0	3.8	85
		4	6.0			90	225	953	682	292	225-495	4.2	6.0	37
高炉スラグ細骨材E	プレーン	—	3	40	50	131	328	970	684	293	—	—	2.8	46
		—	4.5			129	323	955	674	289	—	—	4.2	31
		—	7			126	314	930	656	281	—	—	7.5	14
高炉スラグ細骨材E	AE I	2	3	40	50	119	297	973	686	294	59-89	1.8	3.5	97
		2	4.5			117	293	957	675	289	59-88	1.8	4.9	82
		2	7			114	285	932	657	282	57-86	1.8	7.5	57
高炉スラグ細骨材E	AE II	4	3	40	50	112	279	963	680	291	98	4.4	2.6	96
		4	4.5			110	275	948	669	287	96	3.7	5.1	97
		4	7			107	267	922	650	279	93	3.6	7.3	71

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは川砂使用に比べ抵抗性が大きいこと等が認められる。すなわち、川砂を用い、充填時の空隙率を1~5%（全空隙率2~6%）としたフレッシュコンクリートの耐久性指数が6~23であるのに対し、同じ空隙率のAEⅠコンクリートでは39~85、AEⅡコンクリートでは37~90に増大しており、また、空隙率が3%程度以下であれば、2~4%のエントレインドエアの導入により300回の厳しい凍結融解の繰返しに対し健全であることが示されている。一方、高炉スラグ細骨材を用い、同様な空隙率としたプレーンコンクリートの耐久性指数は14~46、AEⅠコンクリートでは57~97、AEⅡコンクリートでは71~96となり、空隙率を5%としても、4%のエントレインドエアの導入により300回の凍結融解の繰返しに対し、健全であることが認められた。このように、超硬練りAEコンクリートにおいては、エントレインドエアが凍結融解抵抗性の改善に寄与するとともに、エントラップトエアと充填時の空隙率は抵抗性を低下させる要因となっている。

表一8にエントレインドエア、エントラップトエアと空隙率の和および耐久性指数を併記した。図一9は、エントラップトエアと空隙率の和と耐久性指数との関係を示したもので、これらの関係を数式化すれば式(5)および式(6)で表わされる。

川砂を用いた場合

$$DF = 149 A_e^{0.07} (A_p + A_e)^{-0.74} \dots \dots \dots (5)$$

高炉スラグ細骨材を用いた場合

$$DF = 105 A_e^{0.17} (A_p + A_e)^{-0.25} \dots \dots \dots (6)$$

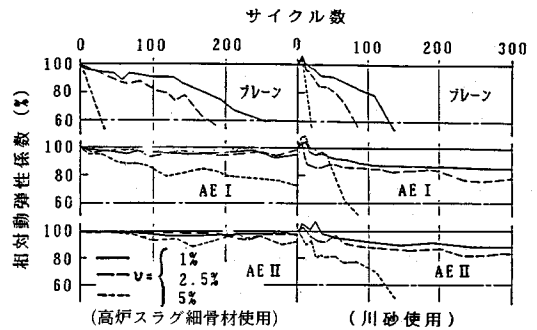
ここに、DF：耐久性指数（%）

式(5)または式(6)において、即時脱型性および変形抵抗性を満足する範囲で A_e を定めれば、所要の耐久性指数を得るための A_e の目安を得ることができる。この場合 A_e は川砂使用の場合は1%程度としてよいが、高炉スラグ細骨材を用いる場合は使用砂により相当に変化する場合があるので実測値を用いるのがよい。また、式(6)は細孔の含有量が比較的小さい高炉スラグ細骨材を用いて行った試験結果に基づく関係式であるから、一般の高炉スラグ細骨材に適用して安全側の結果が得られるものと思われる。

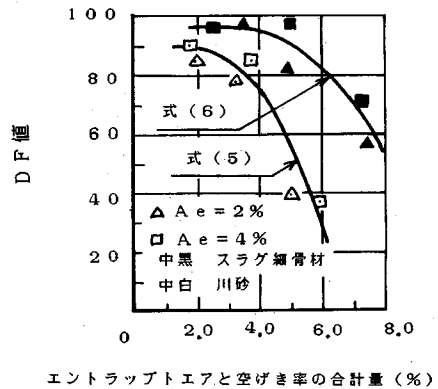
前記のように、即時脱型性あるいは変形抵抗性はある振動締め条件下における空隙率に支配されるという一般的傾向は明らかとなっているが、空隙率の適値は製品の形状、寸法、質量、脱型直後の運搬中に受ける不規則振動等によって相違し、目下その数式化について検討を重ねているので稿を改めて報告する。

b) 圧縮強度

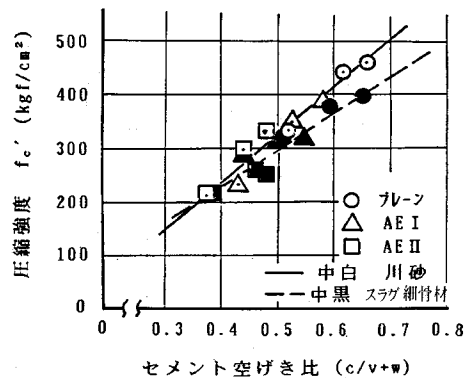
川砂および高炉スラグ細骨材を用いたプレーン、AEⅠおよびAEⅡコンクリートのセメント空隙比と材令



図一8 相対動弾性係数の推移



図一9 エントラップトエアと空隙率の合計量と耐久性指数との関係



図一10 セメント空隙比と圧縮強度との関係

14日の圧縮強度との関係を図一10に示す。図一10において、セメント空隙比と圧縮強度との関係は従来いわれているように⁷⁾、直線関係が認められ、その関係は次式で表わされる。

川砂を用いた場合

$$f'_c = -12 + 872 \frac{c}{w+v} \dots \dots \dots (7)$$

高炉スラグ細骨材を用いた場合

$$f'_c = -41 + 675 \frac{c}{w+v} \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 f'_c ：材令14日の圧縮強度 (kgf/cm²)、 c ：単位セメント量 (l/m³)、 w ：単位水量 (l/m³)、 v ：単位全空隙量 (l/m³)

300回の凍結融解の繰返しに対し、健全と認められたコンクリートのうち圧縮強度が最小のものは高炉スラグ細骨材を用い、空隙率を5%としたAEⅡコンクリート(全空隙率11%)であって、その強度は212 kgf/cm²である。JIS A 5323「コンクリート積みブロック」によれば、圧縮強度の下限規格値は180 kgf/cm²と規定されている。積みブロック工場における圧縮強度の月間変動は変動係数で5%程度とされている⁸⁾。したがって、積みブロック用コンクリートに要求される平均強度は式(9)より約212 kgf/cm²となり、実験結果はこれをほぼ満足している。

$$f'_{cr} = \frac{S_L}{1-tV} \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 f'_{cr} ：所要強度 (kgf/cm²)、 S_L ：下限規格値 ($S_L=180$ kgf/cm²)、 t ：正規偏差 ($t=3.0$)、 V ：変動係数 ($V=5\%$)

5. 結 論

即時脱型用超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性の改善方法について検討した。この実験の範囲内で得られた成果を要約すれば以下のとおりである。

(1) 超硬練りコンクリートの充填時に混入する空隙は粗大で、凍結融解抵抗性を低下させる要因となる。たとえば、川砂を用い、全空隙率を3~9%としたプレーンコンクリートの耐久性指数は2~5であった。

(2) 細骨材として高炉スラグ細骨材を用いれば、一般にコンクリートの凍結融解抵抗性を改善できる。7種の高炉スラグ細骨材を用い、全空隙率を約2%とした超硬練りコンクリートの耐久性指数は10~69であって、これは高炉スラグ細骨材に含まれる細孔がエントレインドエアと同様な機能を果たすためと考えられる。しかし、含有する細孔量は製造工場、製造時期等によって相違するので、安定した抵抗性を有するコンクリートを造るためにはAEコンクリートとするのがよい。

(3) 超硬練りAEコンクリートには、練りませ時に導入される空気泡と充填時に混入する空隙とが混在し、これらを区別して測定することが必要である。練り

ませ直後の空気量は修正圧力法により、充填時の空隙率は重量法を併用することにより測定できることが確かめられた。

(4) 超硬練りAEコンクリートの製造には、起泡力および気泡の安定度に優れ、かつ微細気泡を生成するAE剤を用いることが重要であって、硫酸エステル塩を主成分とする起泡剤が有効であった。

(5) エントレインドエアを約2%および4%、充填時の空隙率を1~5%とした高炉スラグ細骨材使用の超硬練りAEコンクリートの耐久性指数は57~97となり、AE剤を用いない場合に比べ抵抗性は著しく改善された。川砂を使用したAEコンクリートも高炉スラグ細骨材を用いた場合より劣るが、空気量、空隙率が上記と同様な条件で耐久性指数は37~90となった。

これらの実験結果から、エントレインドエア、エントラップトエアおよび空隙率と耐久性指数との大体的関係が得られたので、即時脱型性、脱型直後の変形抵抗性等からブロック製造装置の能力に対応する空隙率を定めれば、この関係式から所望の耐久性指数を得るためのエントレインドエアの所要量の目安を得ることができる。

参 考 文 献

- 1) 藤井健太郎：シート・パイルに関する実用試験、コンクリート用高炉スラグ細骨材標準化に関する研究報告書(その1) I-D, 1980.5.
- 2) 山本 実：高炉スラグ細骨材を用いた土木用積みブロックの品質特性と細骨材としての適応性について、コンクリート用高炉スラグ細骨材標準化に関する研究報告書(その2) IV-E, 1980.5.
- 3) 村田二郎：即脱式コンクリートブロックの空げき率について、土木コンクリートブロック, No.140, 1983.11.
- 4) 村田二郎：即脱式コンクリートブロックの空げき率について(フレッシュコンクリートの場合)、土木コンクリートブロック, No.141, 1984.1.
- 5) 川崎道夫：即時脱型用超硬練りコンクリートに関する研究、土木学会第37回年次学術講演会講演概要集, 第5部, 1982.10.
- 6) Bergerhof, W. : Einfusse der beton-technologischen und rutteltechnischen Parameter auf die Betondruckfestigkeit, Betonwerk Fertigteil-Tech, Vol.43, No.2, 1977.
- 7) 神田 衛・石渡章介：コンクリート強度の早期推定に関する一研究、土木学会論文報告集, No.209, 1973.1.
- 8) (社)全国土木コンクリートブロック協会：コンクリート積みブロック製造指針, 第4章, 27節解説.

(1987.11.4・受付)