

論 文

[1119] 転圧コンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究

正会員 ○葛 拓造 (東京都立大学大学院)

原 純二 (五洋建設㈱)

正会員 国府 勝郎 (東京都立大学工学部)

1. はじめに

最近、転圧コンクリート舗装(RCCP)の試験施工が全国各地で行われているが、コンクリートの品質、特に耐久性に関する研究¹⁾はきわめて少ない。RCCPに用いるコンクリートは超硬練りであるために、転圧施工した後にも空隙が残存しやすい。コンクリート中の空隙は強度ばかりでなく、耐凍害性を損なう原因となる。このようなことから、超硬練りコンクリートの空隙構造と凍結融解作用に対する抵抗性との関係を明らかにすることを目的として実験を行った。

この研究では、1)空隙の程度が耐凍害性に及ぼす影響、2)超硬練りコンクリートへの空気連行の可能性、3)超硬練りコンクリートの空気量の測定方法、4)硬化コンクリートの空隙組織などについて検討を行っている。

2. 実験方法

2.1 使用材料

実験に使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、表-1に物理試験結果を示す。細骨材には陸砂を使用し、粗骨材には硬質砂岩碎石を用いた。これらの物理試験結果を表-2に示す。混和剤は、高級アルコール硫酸エステル系化合物を主成分とする起泡剤A、特殊アニオン型活性剤を主成分とする即時脱型コンクリート用AE剤B、および一般のコンクリートに用いられているリグニン系のAE剤Cの3種を用いた。

2.2 配合

実験に用いた超硬練りコンクリートの配合は、粗骨材の空隙容積に対するモルタルの容積比(K_m)を1.6とし、水セメント比を35%、単位水量を105kg/m³の一定値とした。そして、AE剤を用いたコンクリートとして、目標空気量を2%、3%および5%として配合を定めた。これらの示方配合を表-3に示す。混和剤による連行空気量は、セメントベーストの一部として取扱っているので、空気量の増大に伴い細骨材量が減少している。なお、空気の連行によってコンクリートが軟らかくなつたが、本実験では

表-1 セメントの物理試験結果

比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結(h-m)		安定性	圧縮強度(kgf/cm ²)			
		水	始発		3日	7日	28日	
3.14	3220	27.8	2-45	3-49	良	156	275	447

表-2 骨材の物試験

骨材 の 種類	表乾 比重	吸水 率 (%)	単位容 積質量 (kg/l)	実積 率 (%)	粗粒 率	
					細骨材	粗骨材
細骨材	2.60	1.39	1.82	71.0	2.74	
粗骨材	2.65	0.71	1.62	61.6		6.62

表-3 コンクリートの配合

混和 剤の 種類	目標 空気 量 (%)	W/C	s/a	K _p	K _m	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	混和剤 Cx(%)
フレン	-	35	37	1.64	1.6	105	300	778	1320	-
A	3	35	35	2.09	1.6	105	300	700	1320	0.09
	5	35	33	2.43	1.6	105	300	648	1320	0.16
B	2	35	36	1.93	1.6	105	300	726	1320	1.0
C	3	35	35	2.09	1.6	105	300	700	1320	0.8

このコンシスティンシーの変化を無視している。

2.3 練りまぜおよび供試体の作製

練りまぜには50ℓのパン型強制練りミキサーを用い、注水後3分間練りまぜた。コンクリートをミキサーから排出した後に空気量を測定し、目標空気量の連行を確認して供試体の成形を行った。

締固めの程度に起因する供試体の空隙率を所定の値とするために、所定の空隙率に対応するコンクリート質量を秤取り、10×10×40cmの型枠上面まで加圧振動締固めして仕上げた。供試体は翌日に質量を測定し、材令28日まで20°Cの水中養生を行った。

供試体の目標空隙率は、プレーンコンクリートについては0%，3%，5%および7%とし、混和剤を用いたものは0%および3%とした。本文では、空気量と空隙率とを区別しており、空気量は示方配合で考慮した連行空気量（エントラップドエアを含む）を指し、空隙率は示方配合から計算される単位容積質量に対する締固め成形した供試体の単位容積質量の百分率によって充填率を求め、(1-充填率)を空隙率とした。製作した供試体の種類を表-4に示す。

2.4 試験方法

1)フレッシュコンクリートの空気量

空気量の測定はワシントン型エアメータの容器にあらかじめ約2ℓの水を入れ、10kgのコンクリート試料を秤取り、小量ずつ投入し、木づちで容器の側面を軽打してコンクリートの空隙を水で置換することによって、測定値に空隙率が影響しないようにした。そして、容器の上面まで静かに水を満たし、ストレートエッジで上面の泡を取り除いた後、JIS A 1128に準じて空気量を測定した。試料の体積と空気量の読みから、真の空気量を次式によって計算した²⁾³⁾。

$$a = \frac{V T_a \times \frac{a'}{100}}{10 + V T_a \times \frac{a'}{100}}$$

$$\text{ただし、} T_a = \frac{W + C + S + G}{\frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{S}{\rho_s} + \frac{G}{\rho_g}}$$

ここに、 T_a : コンクリートの空気および空隙量をゼロとした配合から計算される単位容積質量(kg/ℓ)、 a : コンクリートの空気量(%)、 a' : エアメータの読み(%)、 V : エアメータ容器の容積(ℓ)、 ρ_w : 水の比重(kg/ℓ)、 ρ_c : セメントの比重(kg/ℓ)、 ρ_s : 細骨材の比重(kg/ℓ)、 ρ_g : 粗骨材の比重(kg/ℓ)

2)凍結融解試験

凍結融解試験方法は土木学会規準に規定する方法によって、最高および最低温度をそれぞれ+5および-18°Cとし、7.5サイクル/日で装置を運転し、所定のサイクルにおいて供試体の質量および動弾性係数を測定した。供試体は3本を一組とし、材令28日で試験を開始した。

3)硬化コンクリートの空気量

凍結融解試験供試体と同時に作成した供試体から、厚さ約1cmの平板を3枚切り出し、入念に研磨した後、修正ポイントカウント法(ASTM C 457)によって空気泡の測定を行った。観測時に

表-4 供試体種類

混和剤	プレ ン	A			B	C
		目標空気量 (%)				
空隙率	-	3	5	2	3	
0(%)	○△	○△	○△	○△	○△	
3(%)	○△	○	○△	○	○	
5(%)	○△		△			
7(%)	○					

○: 凍結融解試験

△: 細孔径分布および

硬化コンクリートの空気量測定試験

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見なした。

4) 細孔径分布

硬化コンクリートの空気量測定用試料を切りだした供試体の残部からモルタルをはり取り、材令28日でアセトンに浸漬して水和を停止した後真空脱氣を行い、水銀圧入法によって細孔径分布を測定した。細孔径分布は、 $7500\sim75\text{Å}$ の範囲を対象として測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 AE剤による空気の連行性

3種類のAE剤を用いた超硬練りコンクリートの、練りませ直後の空気量を表-5に示す。プレーンコンクリートの空気量は0.6%であるのに対して、混和剤Aをセメント量の0.09%使用した場合に3.1%、0.16%使用した場合に4.2%の空気連行が認められた。また、特に後者の場合には、プレーンコンクリートよりも相当に軟らかい性状を示し、締固めに要する時間が短くなったことからも、空気が確実に連行されていると判断された。しかし、即時脱型コンクリート用AE剤Bおよび通常のAE剤Cは、表-3に示すように使用量を相当に増大しても空気量の増加が小さく、いずれも2.4%の空気量しかえられなかつた。

さらに、連行空気の安定性を調べるために、練りませ後30分および60分静置したコンクリートの空気量を測定した。この結果、練りませ後60分の範囲では、混和剤Aの空気量の測定値は0.2%以内の低下にとどまり、混和剤BおよびCは1~2%低下した。

超硬練りコンクリートは、セメントペーストの絶対量が通常のコンクリートよりも少なく、また水量も小さいので、通常使用されているAE剤では空気の連行が困難であるが、起泡力の強いAE剤であれば使用量に応じて空気の連行が可能であることが分かった。

3.2 フレッシュ時の空気量測定方法

フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの空気量の測定結果を図-1に示す。ワシントンエンメータを応用して測定したフレッシュ時の空気量と、修正ポイントカウント法によって求めた硬化コンクリートの空気量は、プレーンおよび混和剤Aを用いたコンクリートの場合には近似した値となっている。しかし、混和剤BおよびCでは、硬化コンクリートの空気量が1.5%程度小さくなっている。これは練りませ後の空気の安定性が小さいこと、および振動締固めによる空気の消失な

表-5 空気量

混 合 剤 の 種 類	目 標 空 気 量 (%)	空気量 (%)		気泡 間隔 係数
		フレッシュ コンクリート	硬化 コンクリート	
P	—	0.6	0.4	516
A	3.0	3.1	2.3	193
	5.0	4.2	3.9	183
B	2.0	2.4	0.9	292
C	3.0	2.4	0.9	275

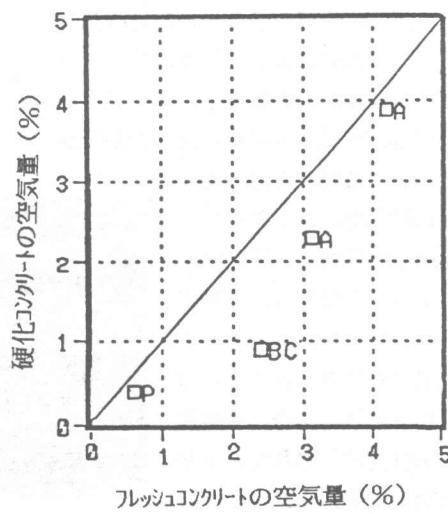


図-1 空気量

どが考えられる。また、顕微鏡観察では一般に気泡の形状が偏平であり、気泡の分布にも偏りがあった。この程度は混和剤A、B、Cの順に著しかった。これらを考慮すれば、超硬練りコンクリートの空隙を水で置き換えることによって、ワシントンエアメータでフレッシュ時の空気量を測定できるものと判断される。

3.3 凍結融解作用に対する抵抗性

空隙率の異なるプレーンコンクリート供試体の凍結融解の繰り返しによる相対動弾性係数の変化を図-2に示す。この結果から求めた耐久性係数と空隙率との関係を図-3に示す。なお、水中養生を行う直前に測定した供試体質量から求めた空隙率は、目標空隙率0%の場合だけが0.9~1.8%であったが、他の供試体はすべて目標から1%以内の差であった。目標空隙率0%の供試体では凍結融解の繰り返しによってほとんど劣化が認められなかつたが、供試体の空隙率が増加するとともに耐久性係数が減少した。耐凍害性に関して耐久性係数60%がひとつの目安とされているが、RCCにおいてこの値を確保するには空隙率を3%程度以下にする必要があることが本実験で示された。

劣化の性状は、モルタルが十分に回っていない部分の粗骨材の脱落、空隙が存在する部分に起因すると思われる割裂などを生じる傾向が認められた。スケーリング等の外観の劣化はほとんど生じていなくても、写真-1に示すような割裂が急激に生じる場合もあった。

混和剤を用いたコンクリートの耐久性係数は、プレーンコンクリートの場合と同様であつて、図-3に示すように空隙率のみに支配された。混和剤Aを用いた場合、目標空気量がほぼ達成されているが、この効果は認められなかつた。このコンクリートの目標空気量5%の場合でも、ポイント

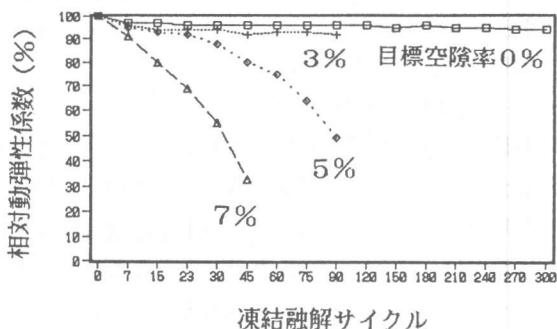


図-2 プレーンコンクリートの耐久性

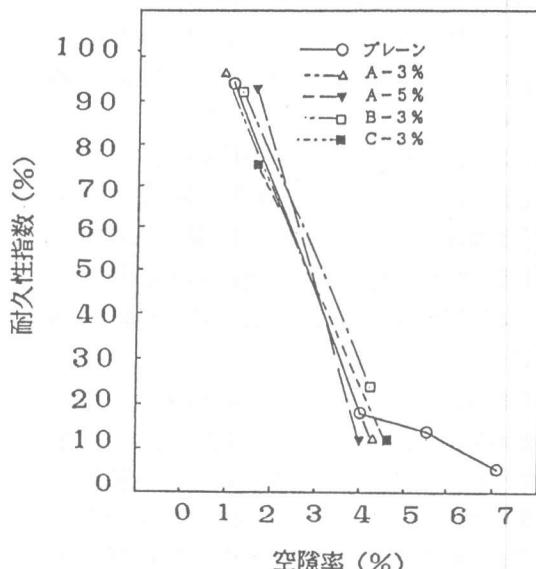


図-3 空隙率と耐久性指数の関係



空隙率 0% 空隙率 3%
写真-1 劣化状況

カウント法による気泡間隔係数は $183\text{ }\mu\text{m}$ であるが、測定ポイント数が少ないと、気泡分布に偏りがあることなどにも問題があり、超硬練りコンクリートの気泡分布の測定は、さらに検討が必要であろう。

転圧コンクリートの耐凍害性を確保するためには、空隙率を3%程度以下としなければならないことが示されたが、水中凍結水中融解を行う急速試験結果は、必ずしも実際の環境での劣化を意味するものではない。しかし、この試験結果はRCCPの施工における十分な締固めの重要性を示唆している。

3.4 コンクリートの空隙組織

成形した供試体は、目標空隙率0%の場合良好な外観であったが、空隙率が大きくなると豆板状の外観を呈しやすくなる。しかし、切断面で観察される内部の充填性状は、側面に比較して密実であった。これは、型枠に接する部分には成形時にモルタルが回りにくくことによると考えられる。

目標空隙率0%のプレーンコンクリートおよびA-Eコンクリート供試体から採取したモルタル部分の細孔径75~7500 \AA の範囲の細孔径分布を図-4に示す。セメントペーストの水セメント比が35%と小さいため、プレーンコンクリートでは750 \AA 以上の細孔がほとんど認められない。一方、混和剤Aにより目標空気量を3%および5%とした場合には、750 \AA 以上の細孔が認められ、空気量の増大によって粗大な細孔量も増大している。一般に連行空気の直径は250~2500 μm 程度と言われているが、

空気の連行によってこれよりもはるかに小さい細孔も形成されていることがわかる。A-E剤の使用によるこのような微細空隙の形成は、図-5に示すスランプを有するコンクリートの場合にも認められる現象である。しかし、転圧コンクリートの加圧振動締固めでは、圧縮性の気泡がセメント粒子間隔を押し広げ、キャビラリーが増大することも考えられる。キャビラリーの成因は明かでないが、この微細空隙は、一般にセメント粒子(平均径: 15~10 μm)よりもはるかに小さく、耐凍害性を向上させる独立気泡の役割は考えにくい。

次に、締固めの程度に起因する充填率の細孔径分布に対する影響を、プレーンおよび混和剤Aで目標空気量5%の場合について試験した。全細孔容積の試験値はA-Eコンクリートとした場合の方が大であることは前述のとおりであったが、空隙率と

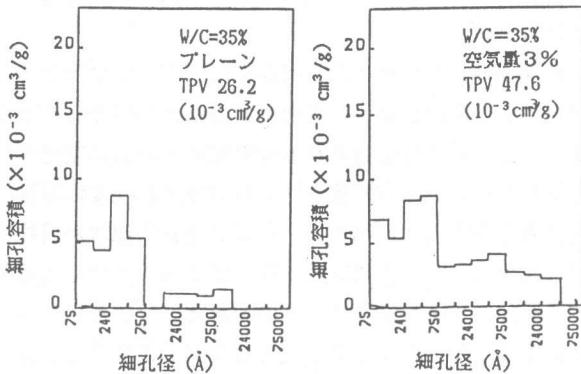


図-4 超硬練りコンクリートの細孔径分布

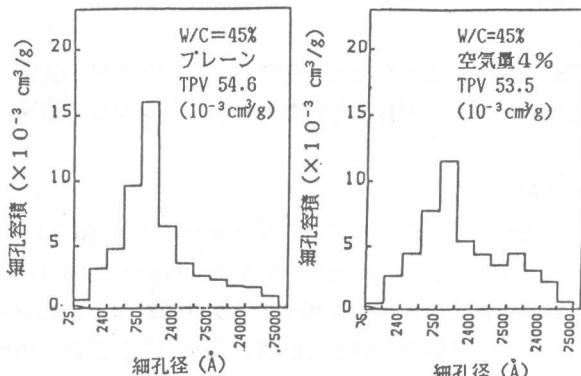


図-5 スランプを有するコンクリートの細孔径分布

の間に定性的な傾向が認められなかつた。そこで、目標空隙率0%、3%および5%の試料の6000 Å以上の細孔容積を除外して累積細孔容積として示したのが図-6である。この結果、充填率の異なるコンクリートの60000 Å以下の細孔径分布はほとんど影響を受けていないと判断される。すなわち、コンクリートの締固めの程度に起因する空隙は、60000 Å以上の粗大な空隙として形成されていると考えることができる。

超硬練りコンクリートの耐凍害性を向上させるためには、気泡の均一な分散、気泡間隔係数の減少、加圧振動締固めにおける気泡の挙動をさらに検討する必要がある。

4.まとめ

RCCPに用いられる超硬練りコンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性について、空隙率の影響、空気の連行による抵抗性の改善、空気量の測定方法などを検討した結果、次のことが分かったと思われる。

- 1)超硬練りコンクリートの耐凍害性は、空隙率がほとんどない場合には良好な性状を示したが、空隙率の増大にしたがって低下することが明瞭に認められた。本室内試験による急速凍結融解試験では、耐久性係数60%を確保するための空隙率は約3%以下となった。
- 2)コンクリートの単位水量が約100kg/m³程度の超硬練りコンクリートであっても、強力な起泡作用を有するAE剤を用いれば、空気の連行が可能である。
- 3)起泡作用の大きな混和剤Aを用いて5%程度の空気量を連行しても、締固めの不十分さに起因する空隙があるコンクリートの耐凍害性は改善されなかった。
- 4)転圧コンクリート舗装の耐凍害性を向上させるためには、締固めが十分でない場合の空隙の構造をさらに検討し、連行空気の分布性状、加圧振動締固めにおける連行空気の挙動などを明らかにしてゆく必要がある。

本研究を行うにあたって、日曹マスタービルダーズ㈱、日本セメント㈱、および(社)セメント協会から、多大な御協力をいただいたことを記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) J.Gomez, C.Scholer:Fatigue Strength of Roller Compacted Concrete, 4th International Conference on Concrete Pavement Design and rehabilitation, Purdue Univ. April, 1989
- 2) 村田二郎・川崎道夫：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、土木学会論文集、第396号/V-9 1988
- 3) (社)全国土木コンクリートブロック協会：土木用コンクリートブロック製造指針、1989
超硬練りコンクリートの空気量試験方法（協会試験方法 CBA-2）

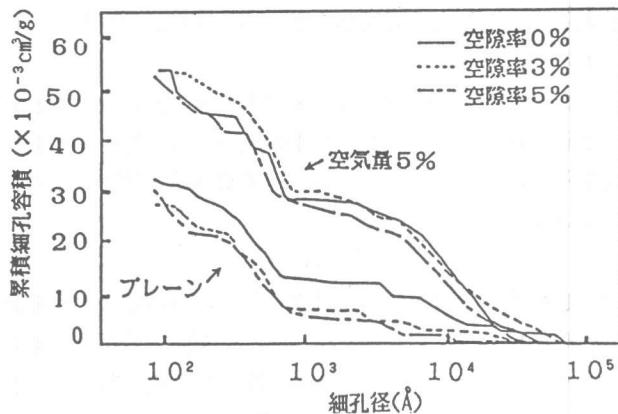


図-6 細孔径分布に対する空隙率の影響