振動締固めが凍結融解・スケーリング抵抗性に与える影響 論文

片平 博*1·古賀裕久*2

要旨:コンクリート中の空気量は振動締固めの影響によって低下する。この空気量の低下がコンクリートの 凍結融解抵抗性に与える影響について実験的な検討を行った。本実験の結果では、振動締固めによって空気 量は減少するが、真水に対する凍結融解抵抗性や塩水に対するスケーリング抵抗性に与える影響は小さかっ た。硬化後の気泡分布の測定結果より、振動を与えても0.3mm以下の微細な空気泡の残存率が比較的高く、 凍結融解抵抗性やスケーリング抵抗性はこの微細な領域の空気量と良く対応する結果が得られた。また、凍 結水が真水の場合と塩水の場合での劣化速度、劣化状態の違いについて整理した。

キーワード:振動締固め、気泡分布、塩化物イオン、凍結融解抵抗性、スケーリング抵抗性

1.はじめに

コンクリートの凍結融解抵抗性に関しては、古くから 様々な研究が行われている。その結果、コンクリート中 に4.5%程度の空気量を混入することで高い耐久性が得 られることが分かっており, 適切な配合設計がなされて いる¹⁾。しかしながら近年、沿岸部の構造物や、凍結防 止剤散布箇所の構造物において、コンクリート中に浸透 した塩化物イオンが凍結融解による劣化作用を促進させ, それによるスケーリング劣化が問題となっている。

このスケーリング劣化に対しては、単に混入空気の量 のみならず、気泡の分布形態が大きな影響を及ぼすとい う研究報告²⁾があり、解明が進んでいるが、研究実績と しては必ずしも十分とはいえない状況と考える。

また、コンクリート中の空気量は一般的には JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試 験方法」(以下,圧力法という)によって測定されてい る。この試験方法では、エアメータ内に詰め込んだコン クリートの締固めはスランプが8cm以上の場合には突き 棒によって行うよう定められている。一方で、構造体へ のコンクリートの打ち込みには棒状バイブレータが用い られており、この振動締固めによって構造体中のコンク リートの空気量は圧力法による測定値よりも低下するこ とが知られている³⁾。この空気量の減少が、コンクリー トの凍結融解抵抗性や塩水の凍結によるスケーリング抵 抗性に与える影響についても、いくつかの報告 4がある

が、十分な知見が得られているとは言い難い。

そこで、フレッシュコンクリート中の空気量が異なる 配合を複数設定し、これに振動締固めを与えた条件と与 えない条件とで供試体を作製し、真水と塩水を用いた凍 結融解試験を実施した。また、硬化後の供試体に対して リニアトラバース法による気泡分布の測定を実施した。 これらの結果から、振動締固めによる気泡分布の変化を 把握し、これが、凍結融解抵抗性や塩水の凍結によるス ケーリング抵抗性に与える影響について検討した。また, 凍結水が真水の場合と塩水の場合での劣化速度の違いや 劣化状態の違いについて整理した。

2. 実験方法

2.1 コンクリート配合と供試体の作製概要

コンクリートの配合を表-1に、使用した材料の品質 を表-2に示す。配合2(Air4)が水セメント比 55%で 目標空気量4.5%の一般的な配合であり、これに対して配 合1 (Air6) は空気量を6%程度に増やした配合,配合 3 (Air1) は逆に 1.5%程度に減らした配合である。これ らの配合は空気を除いた配合が等しくなるように設定し, 空気量の調整は表-2に示す混和剤の種類と添加量によ って行った。配合4(W/C85)は配合2に対して水セメ ント比を85%まで大きくした配合である。

表-1に示す各配合について二軸強制練りミキサーに よって練混ぜ、スランプおよび空気量を測定した後に JIS

No.	実験ケース	Gmax	W/C	s/a	目標Air	単位量(kg/m ³)			化学混和剤(ml/m ³)			実測Sl	実測Air (%) ^{***}		
		(%)	(%)	(%)	(%)	W	С	S	G	Ad1	Ad2	Ad3	(cm)	練上り	Vib 10"後
1	Air6 / Air6-V🔆	20	55	45	6.0	170	309	781	1020	772	-	11	15.8	5.8	2.4
2	Air4 / Air4-V🔆	20	55	45	4.5	173	314	794	1007	785	-	6	10.9	4.5	2.1
3	Air1	20	55	45	1.5	178	323	818	1037	-	888	0	7.5	1.3	-
4	W/C85	20	85	50	4.5	173	203	925	965	507	-	7	5.6	3.2	-
※Vは棒状バイブレータにより10秒間の振動締固めを行ったケース ※※骨材修正係数(0.4%)を考慮									(6)を考慮						

表-1 コンクリート配合とフレッシュ性状

*2 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 上席研究員(正会員)

*1 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 主任研究員(正会員)

	密度	吸水率	安定性	岩種						
	(g/cm^3)	(%)	(%)							
粗骨材	2.69	0.50	3.3	硬質砂岩						
細骨材	2.57	1.60	3.5	川砂						
その他 の材料	セメント:普通ポルトランドセメント 水:水道水 化学混和剤:Ad1(AE減水剤) Ad2(非空気連行形減水剤) Ad3(AE助剤)									

表-2 使用材料

A 1132 の方法に従って $100 \times 100 \times 400$ mm 角柱供試体を 作製した。締固めは突き棒によって行った。なお,配合 $1 \ge 2$ については、棒状バイブレータによる振動締固め を 10 秒間行った試料でも角柱供試体を作製した。この詳 細は次節で述べる。角柱供試体の他に圧縮強度試験用供 試体 ($\phi 100 \times 200$ mm) も条件ごとに作製した。

作製した各供試体は翌日に脱枠し,材齢28日まで20 ℃で水中養生を行った。

2.2 振動締固めと空気量の測定方法

前記したように,圧力法による空気量測定では,エア メータ容器内に詰めたコンクリートの締固めは突き棒に よって行われる。一方,構造体へのコンクリートの打ち 込みには棒状バイブレータが用いられており,この振動 締固めの影響について配合1と2で検討した。

フレッシュコンクリートをエアメータ容器に詰め込み, 中央部に棒状バイブレータ(直径 28mm,振幅 1.8mm, 振動数 210~250Hz,出力 460W)を鉛直に挿入し,容器 には触れない状態で振動締固めを行った。エアメータの 容器の大きさであれば、振動締固め時間は 1~2秒程度 で十分であるが,本実験では振動締固めの影響を顕著に 捉えるために,10秒間の締固めを行った。この条件では 過振動となり,試料の上部にはペーストと空気泡の浮上 が見られた。本実験は振動締固めによる空気量の減少の 影響をみるのが目的であることから,上部約 3 cm の試料 は廃棄し,残りの試料を 100×100×400mm 角柱型枠内 に打ち込み,JIS A 1132 に従って突き棒での締固めを行 った(この条件で作製した供試体を「振動あり」その他 の供試体を「振動なし」という)。

棒状バイブレータによる振動後の圧力法による空気量 の測定(圧力法)は、上部3cmの試料を廃棄した後に新 たな試料を容器上縁まで補充した状態(この部分は突き 棒のみで振動は与えていない)で測定した。

また,凍結融解試験用とは別に角柱供試体1本を同じ 条件で作製し,これを切断し,切断面(100×100mm, 2面)に対して,ASTMC457に従ってリニアトラバー ス法による気泡分布の測定を行った。

2.3 凍結融解試験方法

JISA1148 「コンクリートの凍結融解試験方法」A法

(水中凍結融解試験方法)に従って 300 サイクルまで試 験を行った。

塩水の凍結融解作用に対する促進試験方法としては, 主にスケーリング量を測定する方法として,平板供試体 を用いた RILEM CDF 法や ASTM C562 法などがある。し かしながら,今回の検討では,真水と塩水とでの凍結融 解による劣化の違いを比較するため,JIS A 1148 A 法に 使用する試験装置を用い,供試体容器(ゴム容器)内に 入れる水を塩水(3%NaCl溶液)に置き換えた試験を行 った。塩水は測定毎に入れ替えた。スケーリング抵抗性 は質量減少率で評価した。供試体の本数は,試験ケース ごとに2本とした。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ時の空気量測定結果

フレッシュコンクリートの練り上がりの空気量は,**表** -1に示すように概ね目標とする空気量となった。

棒状バイブレータによる 10 秒の振動締固め後の空気 量は練上り直後の1/2以下に低下し,配合 No.1,2 ともに2%前半の値となった。

3.2 硬化後の空気量測定結果

リニアトラバース法から得られた硬化後の空気量を練 り上がり時の空気量(圧力法の結果)と比較して図-1 に示す。練り上がり時に比較して硬化後の空気量は同程 度かやや大きい値を示した。ただし、測定方法が異なる ことやバラツキを考えると有意な差があるとは言えず、









図-4 振動締固めによる空気量の残存率

同程度の空気量の値が得られたと考えられる。

図-2は硬化後の空気量と気泡間隔係数との関係を示 したものである。振動ありの供試体の気泡間隔係数は, 練り上がり時から空気量が小さいコンクリートに比べる と小さい値を示した。

図-3は、リニアトラバース法から得られる気泡径ご との空気量を示したものである。これによれば,配合1, 2,4 (Air6,Air4 および W/C85)では気泡径 0.3mm 以 下の空気量が多い傾向にあった。

また、振動ありの条件では、振動なしに比較して空気 量は低下するものの、やはり気泡径 0.3mm 以下の空気量 が多い傾向であり、Air6-V と Air4-V は類似する気泡分 布となった。1.25mm 以上の粗大な気泡も 0.4%程度見ら れるが、これは、振動をかけたエアメータ容器内から、 試料を取り出して角柱供試体型枠内に詰め込んだために、 その詰め込み作業中に再び粗大な気泡が混入したことも 考えられる。一方、非空気連行型の混和剤を用いた配合 3 (Air1)では 0.3mm 以下の気泡径は少なく、0.3mm 以 上の気泡径の割合が高かった。

図-4は、バイブレータによる振動後に残存する空気 量の割合を示したものである。今回の実験では過剰な振 動を与えているが、Air4-V,Air6-Vともに 0.3mm 以下の 気泡については概ね5割以上の残存率を示した。一方で 0.3mm 以上の気泡については、測定される気泡数自体が



少ないことからばらつきはあるが,概ね2~4割程度の 残存率となり,粗大な気泡よりも微細な気泡のほうが振 動締固めの影響をやや受けにくい傾向が見られた。

3.3 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図-5に示す。Air6→Air4→Air1 と空気量が少なくなるほど圧縮強度は高くなった。また、 振動ありの Air6-V と Air4-V の圧縮強度は振動なしの Air6, Air4 よりも高くなった。W/C85 は水セメント比が 他の配合よりも高いことから、圧縮強度は低くなった。

W/C85 を除いて,硬化後の空気量と圧縮強度の関係を 図-6に示す。振動なしの供試体では,空気量が1%増 加すると圧縮強度は5%程度低下する傾向が見られた。 振動ありの供試体の強度は振動なしの供試体と同程度か やや高い強度を示した。これは,振動締固めによって粗 大な気泡が抜けたことによる影響と考えられる。

3.4 凍結融解試験結果

真水を用いた凍結融解試験結果を図-7に示す。質量 減少率は W/C85 で大きく,また,Airl でもやや大きくな った。Air6 と Air4 の質量減少率は共に小さく,これに比 較して Air6-V と Air4-V の質量減少率は大きくなったが, その差は僅かであった。相対動弾性係数は,Airl の配合 で大きく低下したが,その他の配合では 90%以上の値を 示し,振動締固めの影響は認められなかった。

塩水を用いた凍結融解試験結果を図-8に示す。質量 減少率は,真水を用いた図-7(1)に比較して相当に大き く,塩化物によってコンクリート表面に生じるスケーリ ング劣化の深刻さが伺える。特に W/C85 と Airl の質量



図-7 真水を用いた凍結融解試験結果



図-8 塩水を用いた凍結融解試験結果

減少率が大きかった。Air6 と Air4 の 300 サイクル時点の 質量減少率は共に 12%程度であり, Air6-V と Air4-V の 質量減少率はそれより大きくなったが, その差は僅かで あった。相対動弾性係数は, W/C85 と Air1 で大きく低下 した。Air6 と Air4 の相対動弾性係数は 300 サイクルで共 に 84%程度であった。Air6-V と Air4-V の相対動弾性係 数の低下量はそれに比較して大きくなったが, その差は 僅かであった。

4. 考察

4.1 塩水を用いた凍結融解試験方法の妥当性

今回, JIS A 1148 に準拠しつつ,塩水を用いた試験を 実施したが,その妥当性について考察する。

図-7(1)の真水を用いた場合のグラフを見ると,質量 減少が始まると凍結融解サイクル数にほぼ比例して質量 減少率が増加した。これに対して図-8(1)の塩水を用い た場合の質量減少率は,サイクル数が増えるに従い質量 減少率の増加量が小さくなった。この原因としては,(1) 質量減少率が大きくなると供試体を入れるゴム容器内の 水(塩水)量が多くなり,これによって凍結融解速度が 遅くなり,最高と最低の温度差も小さくなる,(2)粗骨材 が露出することでペーストの露出面積が小さくなり劣化 が抑制される,の2つの要因が考えられる。

現時点で(1)と(2)のどちらが主要因であるかは特定で きないが,(1)の要因に関して,ゴム容器内の水温(供試 体とゴム容器の内面に挟まれた部分の水温)の変化を測 定した。この結果を図-9に示す。これによれば,質量 減少率が10%程度になって容器内の水量が増えると,最 高温度が0℃を上回らず,最低温度もやや高くなった。 質量減少率が概ね5%程度までの範囲であれば,最高温 度がやや低くなるものの,水温の変化量に大きな違いは 無く,また,質量減少率もほぼ直線的に増加しており(図 -8(1)),概ね妥当な試験条件と考えられる。なお,質 量減少率が増加した場合に,試験装置の能力を調整する 方法も考えられるが,試験体ごとに質量減少率が異なる 場合は困難である。

次に相対動弾性係数について考える。

一般に、凍害劣化はコンクリート構造物の表面から深 部に向かって進行する。このため評価方法としてはコン クリート表面の劣化を何らかの指標で評価するのが適切 と考えるが、その評価指標の確立は容易ではない。JIS A 1148 では供試体中心部まで-18℃に凍結させることで、



(3)W/C85 真水300cycle(5.0%)
(4) W/C85 塩水15cycle(7.8%)
図-11 試験体の劣化状況
()内は質量減少率

自然環境下では表面付近にのみに生じる劣化を供試体全 体に生じさせ、その変化を相対動弾性係数で評価する試 験方法であると解釈している。

一方で、今回行った塩水を用いた凍結融解試験では、 供試体表面は塩水で覆われているものの、供試体内部に は塩水が存在しない。劣化の進行に伴って塩水が早期に 供試体内部まで浸入する可能性も考えられたが、図-8 (2)の相対動弾性係数の低下が比較的緩やかであることから考えて、内部への塩水の浸入は少なかったと考えられる。すなわち供試体の表面と内部で条件が一致しておらず、このような条件下で測定される相対動弾性係数に明確な意義が見いだせなかった。

このため、塩水を用いた凍結融解試験の結果としては、 質量減少率に絞って考察を行うこととする。

4.2 真水と塩水の凍結融解抵抗性の関係

塩水を用いた場合の質量減少率は真水を用いた場合に 比較して相当に大きい。図-10は塩水の場合の15サイ クルまでの質量減少率のグラフであるが、この時点です でに図-7(1)に示した真水の300サイクルの質量減少 率と同程度かやや大きい値に達している。すなわち、今 回の試験条件では真水の20倍以上の速度でスケーリン グ劣化が進行したと考えられる。

図-11 は真水の 300 サイクルと塩水の 15 サイクル時 点の供試体側面の写真の例である。真水と塩水とで劣化 速度には大きな違いがあるものの,試験体表面の劣化状 態に,外観上有意な差は見られなかった。

4.3 気泡分布と凍結融解抵抗性の関係

図-7(2)に示す真水を用いた相対動弾性係数の測定 結果から耐久性指数を算出し,空気量や気泡間隔係数と の関連を整理した。その結果を図-12に示す。

図-12(1)では硬化後の全空気量と耐久性指数との関係を示した。図-12(2)では気泡径 0.3mm 以下の空気量と耐久性指数との関係を示した。これは、凍結融解抵抗性に有効とされる気泡径の範囲については諸説^{5)~7)}あるものの、3.2の検討結果から Airl とそれ以外の配合とでは気泡径 0.3mm 以下の空気量に差が認められたためである。図-12(3)では気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示した。気泡間隔係数は微細な空気量が多いものほど小さな数値として評価される指標である。

図-12(1)では、空気量が2%以上の領域では高い耐久 性指数を示し、2%を僅かに下回る Airl (空気量 1.8%) で急激に耐久性指数が低下するグラフとなった。これに 対して図-12(2)(3)では、耐久性指数の高いグループと 耐久性の低いデータとの横軸の間隔が広がり、グラフの 急変が(1)に比較して緩和された。これらの物性と耐久性 指数とが比較的良い対応関係にあるためと考えられる。

凍結融解試験の質量減少率について、空気量や気泡間 隔係数との関連を整理した。この結果を図-13示す。こ こでの質量減少率の値は、真水の試験の場合は300サイ クル時点の値を、塩水の試験では質量減少率があまり大 きくなると凍結融解作用の大きさが異なるおそれがあっ たことから、試験初期の7,15および30サイクル時点の 値を用いた。また、質量減少率は水セメント比によって も大きく異なるため、W/C85の結果は除外した。



図-13 空気量と質量減少率との関係

硬化後の全空気量と質量減少率との関係を示した図-13(1)では、空気量が2%以下となる Airl の配合でのみ、 質量減少率が極端に大きくなった。これに対して気泡径 0.3mm以下の空気量や気泡間隔係数と質量減少率との関 係を示した図-13(2)(3)では、全てのデータが比較的滑 らかな曲線上に並ぶ結果となり、良好な関係が示された。

真水に対する凍結融解抵抗性が微細な空気泡の量や気 泡間隔係数と密接に関連していること^{3),5),6)}は知られて いるが、今回の実験結果では、塩水によるスケーリング 抵抗性に関しても同様の結果が得られた。

5. まとめと課題

本実験の範囲では以下の結果が得られた。

- (1) 振動締固めによって空気量は減少するが、真水に対する凍結融解抵抗性や塩水に対するスケーリング抵抗性に与える影響は小さかった。振動を与えても 0.3mm以下の微細な空気泡の残存率が比較的高く、 凍結融解抵抗性やスケーリング抵抗性はこの微細な 空気量に依存するためと考えられる。
- (2) スケーリング抵抗性の評価について、JIS A 1148 A 法に準拠して、ゴム容器内に塩水を入れて試験を実施した。その結果、凍結融解の条件が大きく変わらない範囲(今回用いた装置では、質量減少率が5% 程度まで)であれば適切な評価が可能と考えられる。
- (3) 塩水を用いた場合のスケーリング劣化は、真水の場合の20倍以上の劣化速度となった。ただし、劣化の形態そのものに有意な差は見られなかった。

今回は,限られた配合条件での検討結果を報告した。今後,試験ケースを増やし,検討を継続するものである。

参考文献

- コンクリート標準示方書[設計編],(公社)土木学会, 2012
- 2) 小山田哲也,羽原俊祐, 齊藤和秀, 早坂洋平:コンク リートのスケーリング抵抗性における連行空気の影響 に関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.36,No.1,pp.1048-1053, 2014.7
- 3) 吉野利幸,鎌田英治,田畑雅幸,桂修:バイブレータ による振動締固めの程度がコンクリートの凍害劣化に およぼす影響,コンクリート構造物の凍害とその対策 一研究の現状と今後の課題一,凍結融解作用を受ける コンクリート小委員会シンポジウム論文集,日本建築 学会,1992.2
- 4) 河野広隆ほか:コンクリートの凍結融解抵抗性の評価 方法に関する研究委員会報告書,(社)日本コンクリー ト工学協会, pp.176-182, 2008.8
- 5) Jochen Stark ほか, (訳)太田利隆ほか: コンクリートの 耐久性, (社) セメント協会, pp.181-184, 2003.8
- 6) 濱幸雄ほか:コンクリートの気泡組織に影響する要因 と耐凍害性に関する研究,日本建築学会構造系論文集, Vol.73, pp.2061-2067, 2008
- 7) 坂田昇ほか: コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察,コンクリート工学論文集,Vol.23, No.1, pp.35-47, 2012.7