

# 論文 粗骨材の基礎性状がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響

二宮 祐希<sup>\*1</sup>・千歩 修<sup>\*2</sup>・長谷川 拓哉<sup>\*3</sup>

要旨：粗骨材の基礎性状（吸水性状、吸水膨張性状、熱膨張係数等）と各種粗骨材を用いて乾湿繰返しを考慮したコンクリートの吸水性状および耐凍害性の関係について検討した。この結果、今回の実験の範囲において乾湿繰返しによるコンクリートの耐凍害性の変化には、W/C25%のコンクリートでは粗骨材種別の影響は少なかったが、W/C50%では粗骨材種別が影響し、粗骨材の吸水率・空隙率およびコンクリートの14日体積含水率の乾湿繰返しによる変化と関連深いことが示された。

キーワード：耐凍害性 粗骨材 乾湿繰返し 凍結融解 吸水性状

## 1. はじめに

粗骨材は、コンクリートの耐凍害性に大きく影響するが、粗骨材の品質がJIS A 5308などの規定を満足しているものを使用しても耐凍害性に劣る場合や、逆に規定を満足していなくても優れた耐凍害性を示す場合もあり、粗骨材が耐凍害性に及ぼす影響については明確になっていない。粗骨材がコンクリートの凍害劣化におよぼすメカニズムとして、コンクリートの凍結過程で骨材中の水分が周囲のペースト部分に排出されてペースト部分の飽和度が高まることによりペースト部分が崩壊、骨材内部の細孔中の水分の凍結圧により骨材自身が崩壊、コンクリートの温度変化に対してペースト部分と骨材部分の熱膨張係数の相違により崩壊などが考えられる<sup>1)</sup>。また、コンクリートが乾湿繰返しを受けると粗骨材種別によって耐凍害性が変化するものがあることが報告されている<sup>2),3)</sup>。これらのメカニズムを検討するためには、粗骨材の様々な性状を把握

する必要がある。

本研究では、粗骨材の一般的な基礎性状に加え、粗骨材の吸水性状、吸水膨張性状および熱膨張係数、さらに各種粗骨材を用いたコンクリートの吸水性状を把握し、粗骨材の基礎性状と乾湿繰返しを行ったコンクリートの耐凍害性について検討することを目的とする。

## 2. 実験概要

実験計画を表-1に示す。ここでは、5種類の粗骨材の各種基礎性状を測定し、そのうち砕石（3種類）については水セメント比50%および25%のコンクリートを作製し、乾湿繰返しの有無の条件を加えて下面吸水試験および凍結融解試験を行ったものである。コンクリートの調査を表-2に、コンクリートの基礎性状を表-3にそれぞれ示す。なお、コンクリートの水セメント比は、50%および25%とし、粗骨材の影響を明確にするためにnon-AEコンクリートとした。粗骨材

表-1 実験計画

試験体種類	粗骨材種別 <sup>1)</sup>					試験条件	試験方法
	TK	AK	KM	SZ	RE		
粗骨材						絶乾状態 <sup>2)</sup>	・吸水性状試験 ・空隙率の測定 ・安定性試験 ・簡易凍結融解試験 ・熱膨張係数の測定 ・吸水膨張試験
コンクリート (モルタル)						調査 W/C 50%,25% 空気量1.0% 養生条件 標準s 乾湿繰返しd <sup>3)</sup>	・凍結融解試験 (7.5x7.5x40cm) ・下面吸水性状試験 <sup>4)</sup> (4x4x16cm) ・圧縮試験 (10 x20cm)

<sup>1)</sup> TK:常盤産(安山岩・砕石) AK:厚岸産(安山岩・砕石) KM:上磯産(石灰岩・砕石)

SZ:静内産(川砂利) RE:再生骨材(元骨材 川砂利)

<sup>2)</sup> 吸水試験は気乾状態及び絶乾状態から開始

<sup>3)</sup> 40 乾燥42h、水中6hを1cとして7c

<sup>4)</sup> モルタルは下面吸水性状試験のみ

[注] 試験体記号

モルタル M-[W/C] 例 M25

コンクリート [骨材種類]-[W/C]-[養生条件] 例TK50s(常盤産 W/C50% 標準)

表-2 使用したコンクリートなどの調査

試験体種別 (記号)	W/C (%)	目標 空気量 (%)	細骨材率 (%)	絶対容積 (l/m <sup>3</sup> )			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
TK AK KM	25	1.0	39.3	175	222	233	360
	50			175	111	344	360
M	25	1.0	-	280	350	370	0
	50			280	180	540	0

セメント:普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm<sup>3</sup>)

細骨材:勇払産陸砂(密度2.58g/cm<sup>3</sup>)

表-3 使用したコンクリートの基礎性状

試験体	実測 空気量 (%)	実測 スランプ (cm)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
TK25	1.1	68.0 × 66.0 <sup>*1</sup>	88.0	3.5
AK25	1.7	74.0 × 74.0 <sup>*1</sup>	68.7	4.2
KM25	1.7	72.0 × 73.0 <sup>*1</sup>	73.4	3.8
TK50	2.0	18.0	38.4	2.8
AK50	2.6	16.5	39.2	3.5
KM50	1.4	20.0	32.0	3.1

\*1 スランプフローで測定

\*1 北海道大学 大学院工学研究科空間性能システム専攻 (正会員)

\*2 北海道大学 大学院工学研究科空間性能システム専攻 教授・工博 (正会員)

\*3 北海道大学 大学院工学研究科空間性能システム専攻 准教授・博(工) (正会員)

の吸水性状試験は、気乾状態の粗骨材（室温 20℃、湿度 60% に保たれた恒温室に質量が一定になるまで静置）および絶乾状態の粗骨材（105℃ のオーブンの中で質量が一定になるまで静置）、それぞれ 1000g を水に浸漬させ、水中質量の変化を連続的に測定するものである。この結果は、図 - 1 に示すように横軸を時間の平方根とした吸水曲線を 2 本の直線で近似し、初期の直線の勾配である初期吸水速度および、7 日体積含水率（U）を求めた。なお、体積含水率は式（1）で求めた。

$$U = \frac{Q_t - Q_d}{V} \times 100 \text{ (体積\%)} \quad (1)$$

$Q_t$  : ある時間の気中質量

$Q_d$  : 絶乾状態での試験体の質量

$V$  : 供試体体積

粗骨材の空隙率（体積%）は、粗骨材を真空吸水させて飽水状態の質量を測定し、絶乾状態の質量、体積を用いて空隙率を求めた。安定性試験は JIS A 1122（硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験の方法）に基づいて行った。簡易凍結融解試験は片平らによって提案された方法<sup>4)</sup>に基づいて行った。熱膨張係数の測定は、橋らの研究<sup>5)</sup>を参考とし、粗骨材の一面を研磨し、ひずみゲージを貼付け、骨材を 60℃ から 20℃ に低下させ

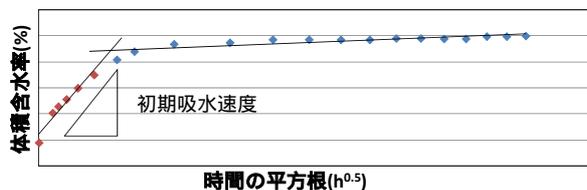


図 - 1 粗骨材の吸水性状試験における初期吸水速度

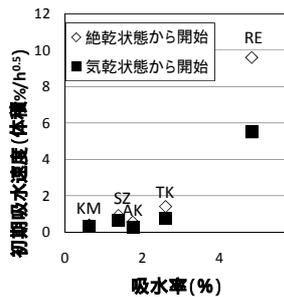


図 - 2 粗骨材の初期吸水速度と粗骨材の吸水率の関係

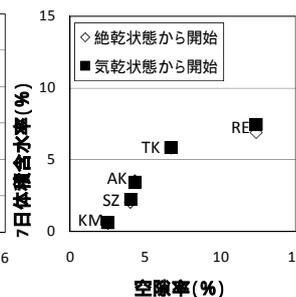


図 - 3 粗骨材の 7 日体積含水率と粗骨材の空隙率の関係

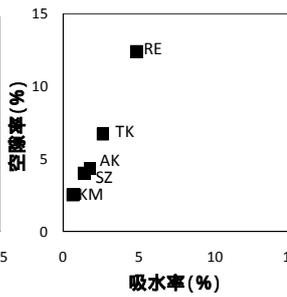


図 - 4 粗骨材の空隙率と粗骨材の吸水率の関係

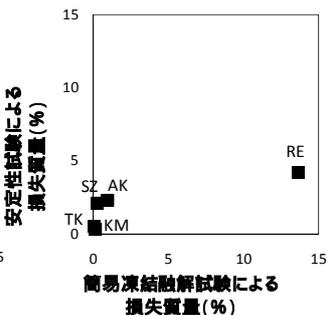


図 - 5 粗骨材の簡易凍結融解試験による損失質量と粗骨材の安定性試験による損失質量の関係

たときのひずみの変化から熱膨張係数を算出した。なお、ダミーとして熱膨張係数が既知である石英ガラスのひずみを同時に測定して、接着剤やひずみゲージの影響をキャンセルした。また、吸水膨張試験では、熱膨張係数の測定に用いた粗骨材を吸水させてひずみを連続的に測定し、粗骨材の吸水性状試験と同様の方法で初期吸水膨張速度および最大の変化量から吸水膨張率を求めた。

コンクリートの下面吸水性状試験は、3種類の砕石を用いて骨材の粒径を 10-15mm、骨材体積を一定としたコンクリート試験体を作製し、RILEM CDC3<sup>6)</sup>に基づいて下面吸水による質量変化を測定した。なお、初期吸水速度などは粗骨材と同様の方法で求めた。コンクリートの凍結融解試験は、この3種類の砕石（標準的な粒度分布）を用いたコンクリート試験体を作製し、JIS A 1148 A 法に基づいて凍結融解試験を行った。なお、下面吸水試験および凍結融解試験の養生条件は、標準（2週水中養生）および乾湿繰返し（2週水中養生後、40℃ 42時間・水中浸漬6時間を7サイクル）とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 粗骨材試験結果

表 - 4 に粗骨材試験結果の概要を示す。図 - 2 に粗骨材の初期吸水速度と粗骨材の吸水率の関係を示す。JIS A 5308 で規定されている吸水率を満たしていない再生骨材はほかに比べて大きく異なる傾向を示した。ほかの粗骨材は吸水率が増加するにつれて初期吸水速度も

表 - 4 粗骨材試験結果

粗骨材	吸水試験結果				空隙率	吸水率 (%)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	線膨張係数 (× 10 <sup>-6</sup> /°C)	吸水膨張		安定性試験による損失質量 (%)	簡易凍結融解試験による損失質量 (%)
	絶乾状態から開始		気乾状態から開始							初期吸水膨張速度 <sup>*1</sup> (× 10 <sup>-6</sup> /h)	吸水膨張率 <sup>*2</sup> (× 10 <sup>-6</sup> )		
	初期吸水速度 <sup>*1</sup> (体積%/h <sup>0.5</sup> )	7日体積含水率 <sup>*2</sup> (%)	初期吸水速度 <sup>*1</sup> (体積%/h <sup>0.5</sup> )	7日体積含水率 <sup>*2</sup> (%)									
TK	1.41	5.80	0.79	5.82	6.7	2.60	2.59	2.65	5.6	46.7	137.7	2.1	0.22
AK	0.56	3.51	0.28	3.40	4.3	1.75	2.61	2.65	5.8	41.7	72.1	0.5	0.02
KM	0.41	0.53	0.32	0.60	2.5	0.62	2.68	2.70	3.7	50.5	84.6	0.3	0.12
SZ	0.92	2.01	0.67	2.20	4.0	1.38	2.75	2.79	-	-	-	2.3	0.94
RE	9.59	6.89	5.52	7.44	12.4	4.83	2.21	2.39	-	-	-	4.2	13.65

\*1吸水曲線または、吸水膨張曲線の初期の傾きを初期吸水速度あるいは初期吸水膨張速度とした

\*2吸水曲線または吸水膨張曲線の最大値とした

増加する傾向が見られたが、明確な傾向といえるものではなかった。

図 - 3 に粗骨材の 7 日体積含水率と粗骨材の空隙率の関係を示す。7 日体積含水率は空隙率よりも小さな値となっており、7 日間の吸水の条件でも内部の空隙が満たされないことがわかる。特に、上磯産粗骨材は、吸水で満たされない空隙が多く、吸水されない空隙の比率が多いことがわかる。また、図 - 4 に粗骨材の空隙率と粗骨材の吸水率の関係を示す。吸水率と空隙率の間には相関が見られた。

図 - 5 に安定性試験による損失質量と簡易凍結融解試験による損失質量の関係を示す。両者は骨材自身の耐凍害性を評価する方法であるが、これらの評価方法は対応していないことがわかる。

図 - 6 および図 - 7 に測定開始条件を気乾および絶乾とした吸水性状試験における粗骨材の体積含水率の変化を示す。測定開始条件によって初期吸水速度が大きく変わることがわかる。

図 - 8 に吸水膨張試験における粗骨材の膨張率の変化を示す。粗骨材によって吸水曲線、吸水膨張性曲線が大きく異なっていることがわかる。

### 3.2 粗骨材がコンクリートの吸水性状に及ぼす影響

コンクリートの下面吸水性状試験結果を表 - 5 に示す。図 - 9 に粗骨材吸水率と W/C50% のコンクリートの 14 日体積含水率の関係を示す。図 - 10 に粗骨材の熱膨張係数と乾湿繰返しによるコンクリートの体積含水率の増加率の関係を示す。コンクリートの体積含水率の増加率は式 (2) で求めた。

$$14 \text{ 日体積含水率増加率} = \frac{14 \text{ 日体積含水率}(d-s)}{14 \text{ 日体積含水率}(s)} \times 100 \quad (2)$$

この図を見ると W/C25% では熱膨張係数が小さいほど乾湿繰返しによる体積含水率の増加率が大きくなる傾向が認められ、モルタルとの熱膨張率差が大きくなると温度変化によって微細なひび割れが発生していることが考えられる。また、安山岩を用いて水セメント

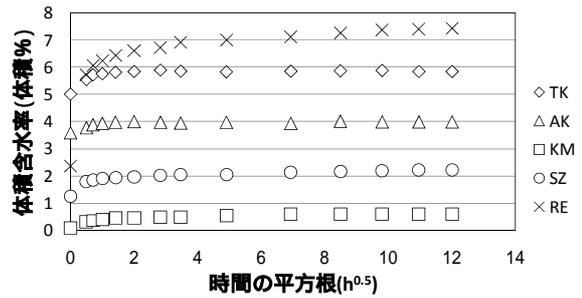


図 - 6 各種粗骨材の吸水性状測定結果 (測定開始条件：気乾状態)

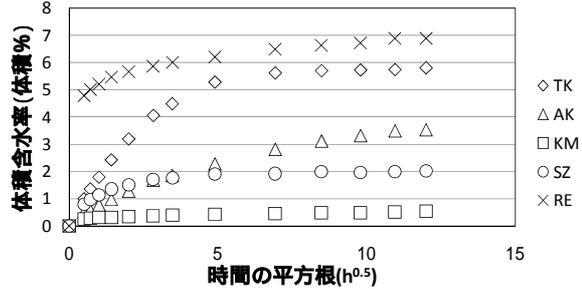


図 - 7 各種粗骨材の吸水性状測定結果 (測定開始条件：絶乾状態)

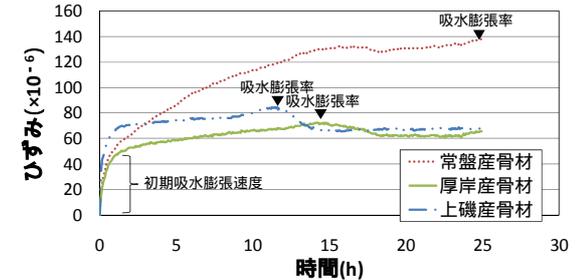


図 - 8 粗骨材の吸水膨張曲線

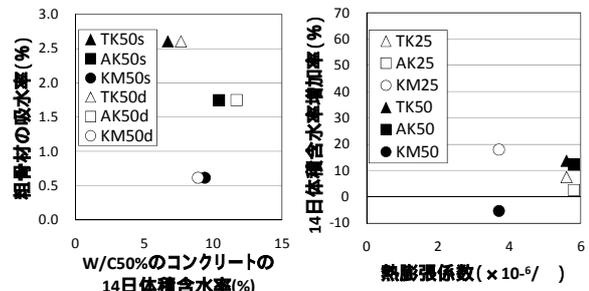


図 - 9 粗骨材吸水率と 図 - 10 熱膨張係数と 14 日体積含水率の関係

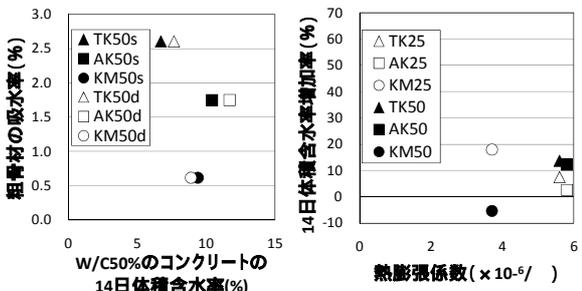


表 - 5 コンクリートの下面吸水性状試験結果

試験体	試験開始条件							
	標準				乾湿繰返し			
	14日体積含水率(体積%)	初期吸水速度(体積%/h <sup>0.5</sup> )	14日質量含水率(質量%)	初期吸水速度(質量%/h <sup>0.5</sup> )	14日体積含水率(体積%)	初期吸水速度(体積%/h <sup>0.5</sup> )	14日質量含水率(質量%)	初期吸水速度(質量%/h <sup>0.5</sup> )
TK25	6.89	0.85	2.87	0.35	7.41	1.27	3.09	0.70
TK50	6.73	0.82	4.44	0.77	7.65	1.57	5.00	1.24
AK25	9.62	0.91	2.79	0.34	9.86	1.54	3.16	0.65
AK50	10.44	1.53	4.52	0.71	11.71	2.91	5.05	1.18
KM25	6.06	0.68	2.59	0.36	7.15	0.57	2.86	0.24
KM50	9.40	1.18	4.04	0.71	8.90	1.16	3.80	0.49
M25	10.66	1.40	4.22	0.40	11.89	2.77	4.42	0.84
M50	17.20	1.62	8.05	1.02	17.79	4.01	8.28	1.87

比が大きいものは、14日体積含水率の増加が大きくなっており、W/C25%に比べて、ひび割れが発生している。しかしながら、上磯産粗骨材（石灰岩）は逆の傾向を示している。これは、図-3で示したように、乾湿繰返しによって乾燥すると吸水されにくい空隙が存在するためと考えられる。

### 3.3 凍結融解試験結果

図-11および図-12に凍結融解試験における相対動弾性係数および質量変化率の変化を示す。粗骨材種別および乾湿繰返しの有無によって、相対動弾性係数が大きく異なる結果を示している。なお、水セメント比25%の場合は、粗骨材の影響は小さくなっている。図-13に耐久性指数に及ぼす乾湿繰返しの影響を示す。乾湿繰返しを行ったコンクリートは、乾湿繰返し

を行わないコンクリートに比べて凍結融解試験後に、W/C25%で耐凍害性は低くなり、W/C50%で耐凍害性は高くなっている。W/C25%のコンクリートでは微細なひび割れ等の組織の変化が発生し、W/C50%のコンクリートは毛細管が乾燥することにより気泡の役割をしていることなどが考えられる。また、乾湿繰返しを行ったものの耐久性指数をみると、W/C25%では耐久性指数に粗骨材種別による差はほとんど見られないが、W/C50%では、上磯産骨材、厚岸産骨材、常盤産骨材を用いたコンクリートの順に耐久性指数が小さくなっており、水セメント比によってコンクリートの耐凍害性におよぼす粗骨材の影響が異なることが考えられる。

図-14にコンクリートの初期吸水速度と耐久性指数の関係を示す。安山岩である常盤産粗骨材および厚

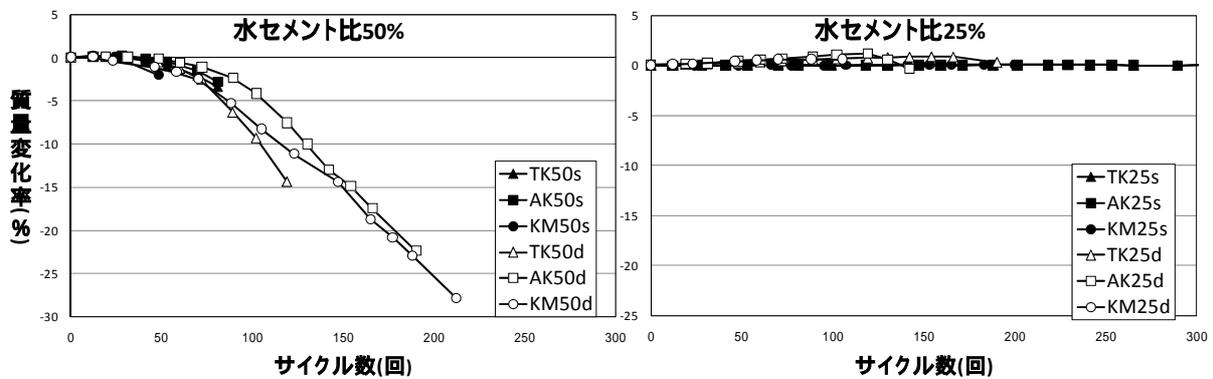


図-11 凍結融解試験結果（水セメント比別の質量変化率）

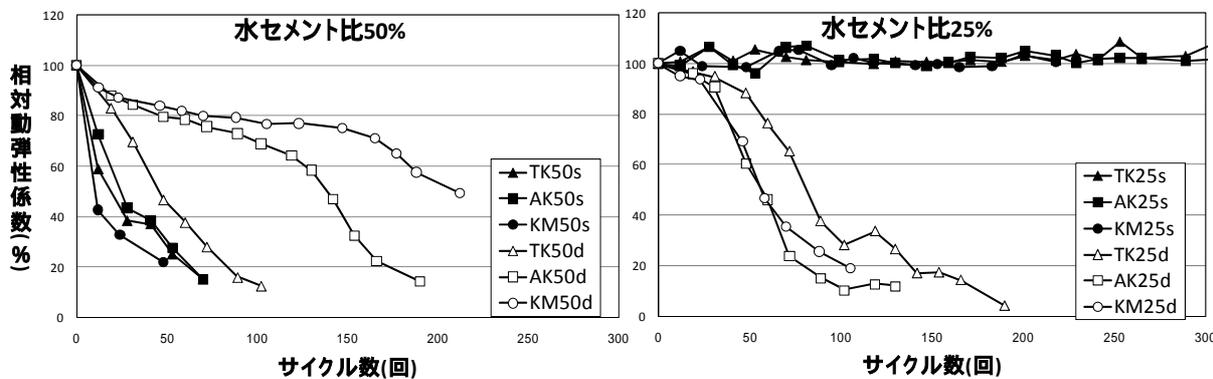


図-12 凍結融解試験結果（水セメント比別の相対動弾性係数）

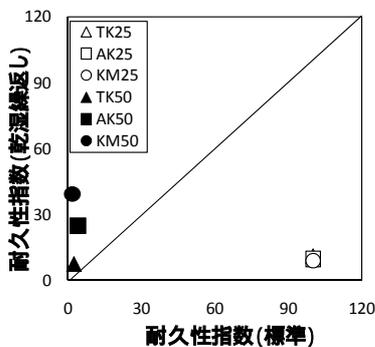


図-13 耐久性指数に及ぼす乾湿繰返しの影響

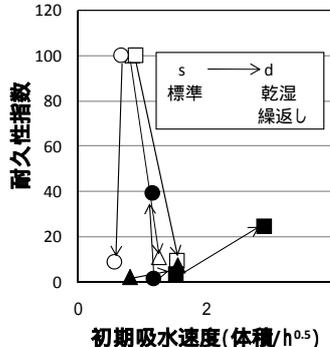


図-14 コンクリートの初期吸水速度と耐久性指数の関係

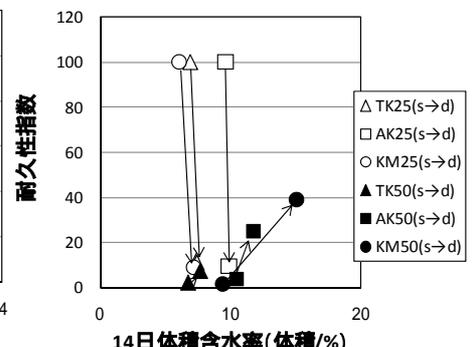


図-15 コンクリートの体積含水率と耐久性指数の関係

岸産粗骨材を用いたコンクリートは乾湿繰返しによって初期吸水速度が大きくなる傾向があり、この値が大きくなると、W/C50%では耐久性指数が大きくなり、W/C25%ではこれとは逆に耐久性指数が小さくなる結果となっている。

図 - 15 にコンクリートの 14 日体積含水率と耐久性指数の関係を示す。コンクリートの 14 日体積含水率は、W/C50%では乾湿繰返しによって大きくなる傾向があり、この増加率が大きいほど耐久性指数が大きくなる傾向がある。W/C25%では、乾湿繰返しによる 14 日体積含水率の変化は小さいが、乾湿繰返しによって耐久性指数が大きく低下する結果となっている。なお、粗骨材の吸水率は、常盤産粗骨材>厚岸産粗骨材>上磯産粗骨材となっており、吸水率が小さいほど、乾湿繰返しを行った W/C50%のコンクリートの耐久性指数が大きくなる結果となった。吸水率の小さい粗骨材を用いたコンクリートほど乾湿繰返しによる 14 日体積含水率の上昇が大きくなっており、内部にひび割れが生じていることが考えられ、W/C50%のコンクリートの場合、このひび割れが耐凍害性の向上に影響していることが考えられる。

図 - 16 に空隙率と耐久性指数の関係を示す。図 - 17 に吸水率と耐久性指数の関係を示す。W/C25%では明確な

傾向は見られなかったが、W/C50%では乾湿繰返しを受けたコンクリートは吸水率が小さくなるにつれて耐久性指数が大きくなる傾向が見られた。骨材内部には一度乾燥すると吸水されない空隙が存在し、乾湿繰返しを受けることによってその空隙が気泡の役割を果たして耐凍害性を向上させているものと考えられる。図 - 18 に安定性試験による損失質量と耐久性指数の関係を示す。空隙率、吸水率同様に W/C25%では明確な傾向は見られなかったが、W/C50%では空隙率、吸水率と同様に安定性試験による損失質量が小さいほど耐久性指数が大きくなる傾向が見られた。

#### 4. まとめ

- (1) 各種の基礎性状試験を行い、粗骨材の初期吸水速度・空隙率・熱膨張係数・吸水膨張係数等の基礎性状を把握した。
- (2) 今回の実験の範囲では、乾湿繰返しによる耐凍害性の変化は、W/C50%のコンクリートでは粗骨材種別が影響するが、W/C25%では粗骨材の影響は小さかった。
- (3) 今回の実験の範囲で、W/C50%のコンクリートは、粗骨材の空隙率や吸水率が小さいものほど、また、コンクリートの吸水性状試験で乾湿繰返しによって

図 - 16 から図 - 18 の左図は TK50s AK50s KM50s TK50d AK50d KM50d を示す  
 図 - 16 から図 - 18 の右図は TK25s AK25s KM25s TK25d AK25d KM25d を示す

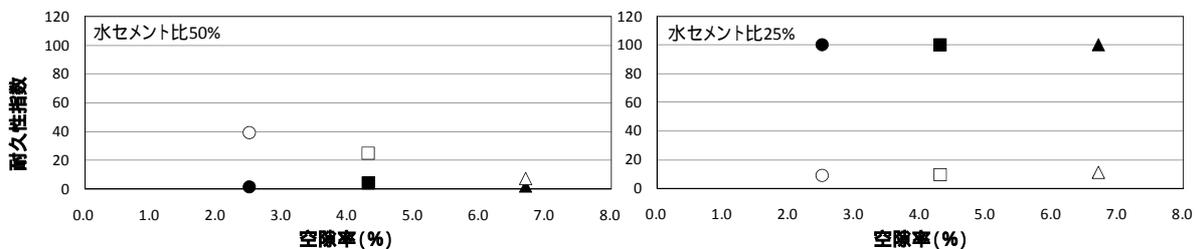


図 - 16 空隙率と耐久性指数の関係

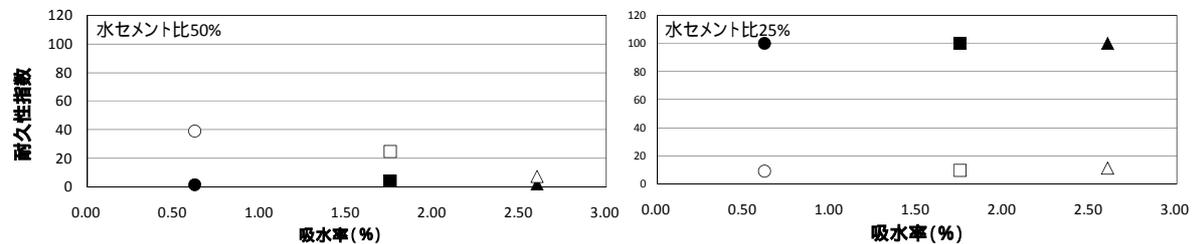


図 - 17 吸水率と耐久性指数の関係

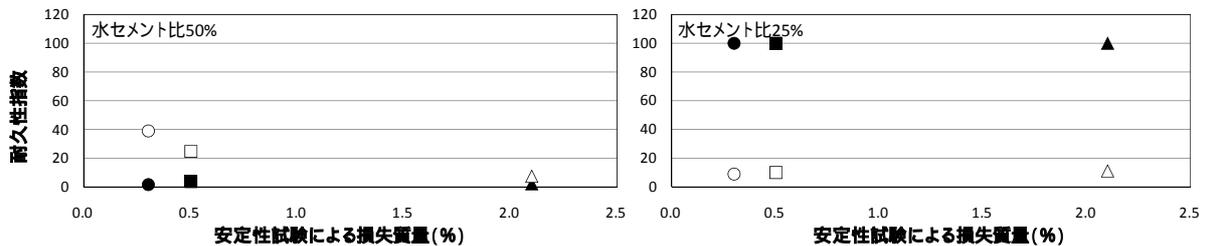


図 - 18 安定性試験による損失質量と耐久性指数の関係

14 日体積含水率が大きくなるものほど,乾湿繰返しを受けると耐凍害性が大きくなる傾向を示した。

#### 参考文献

- 1) 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, pp.128-137,(社)日本コンクリート工学協会,2008.8
- 2) 田畑雅幸ほか:コンクリートの耐凍害性に及ぼす乾燥の影響,セメント技術年報 32, pp.365-368 1978.5
- 3) 木村信孝ほか:暴露条件・粗骨材種が高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響,日本建築学会大会学術講演会梗概集(近畿), pp.745-750 2005.9
- 4) 片平博ほか:再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案,コンクリート工学年次論文集,Vol.27, No.1, pp.1351-1356 2005
- 5) 橘伸太郎ほか:粗骨材がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響(骨材とモルタルの熱膨張・吸水膨張差の影響),日本建築学会大会学術講演会梗概集(近畿), pp.333-334 1996.9
- 6) RILEM TC:CDC3 The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete,1977,RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials, 1994