論文　粗骨材の吸水性状がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響

二宮　祐希[*1]・千歩　修[*2]・長谷川　拓哉[*3]

要旨：各種粗骨材の吸水性状とこれらの粗骨材を用いたコンクリートの耐凍害性の関係および乾湿繰返しの影響について検討した。この結果，乾湿繰返しによるコンクリートの 14 日体積含水率の変化と耐久性指数の変化とが関連深いことが示された。また，初期吸水速度と 14 日体積含水率の比が大きい粗骨材は高い耐久性指数を示すことが示された。

キーワード：粗骨材，吸水性状，凍害，乾湿繰返し

1．はじめに

コンクリートは骨材とセメントマトリクスから構成され，一般にその約 7 割を骨材が占めている。したがって，コンクリートの耐凍害性に及ぼす骨材の影響は比較的大きいと考えられている。既往の研究によれば，コンクリートの耐凍害性は細骨材よりも粗骨材の影響が大きいことが指摘されており[1), 2)]，主として粗骨材の吸水率を指標として，耐凍害性は検討されてきた。

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[3)]。筆者らの研究では，粗骨材の吸水性状とコンクリートの乾湿繰返しによる耐凍害性の変化が関係深いことを示しており[4)]，自然環境におけるコンクリートの耐凍害性におよぼす粗骨材の影響について，さらなる検討が必要と考えられる。さらに，乾湿繰返しを受けることによるコンクリートの吸水性状の変化は，微細ひび割れの発生や細孔構造の変化等によるものと考えられ，自然環境下におけるコンクリートの性状変化についても検討する必要があると考えられる。

本研究では，粗骨材の吸水性状を把握し，これらの粗骨材を用いたコンクリートの吸水性状および耐凍害性との関係，さらに乾湿繰返しの影響について検討した。

2．実験概要

本研究の実験計画を**表－1** に示す。ここでは，粗骨材の吸水性状として水中浸漬時の見掛けの質量を連続的に測定し，これらの砕石を用いた水セメント比 50%の non-AE コンクリート試験体を作製し，乾湿繰返しの条件を加えたコンクリートの浸漬吸水試験および凍結融解試験を行った。コンクリートの調合を**表－2** に示す。なお，粗骨材の粒度分布は，JIS A 5308 を満足するものとしたが，浸漬吸水試験に用いた試験体は，粗骨材の粒径を 10-15mm とした。浸漬吸水試験および凍結融解試験の試験開始条件は，標準(2 週水中養生)および乾湿繰返し(2 週水中養生後に乾湿繰返しを加えたもの)の 2 種類とした。粗骨材の吸水試験より，**図－1** に示すように横軸を時間(h)の平方根として，縦軸を体積含水率とする吸水曲線を得ることができる。本研究では測定開始から 1 時間の間の測定値を直線近似して得た直線の傾きを初期吸水速度，測定開始から 14 日目の体積含水率を 14 日体積含

表－1　実験計画

試験体種類	試験種類	試験方法	試験開始条件**
粗骨材	吸水試験	1000gを水中に浸漬し， 水中における見掛けの質量を連続的に計測 [試験期間14日]	絶乾状態
コンクリート*	凍結融解試験	JIS A 1148 A法「コンクリートの凍結融解試験方法」 (7.5×7.5×40cm)	・標準(s) 2週水中養生 ・乾湿繰返し(d) 2週水中養生後、乾湿繰返し***
	浸漬吸水試験	試験体を水中に浸漬し， 水中における見掛けの質量を連続的に計測 [試験期間14日]　(10×10×3cm)	
	圧縮試験	JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」 (10φ×20cm)	4週水中養生

*試験体記号　モルタル　M-[W/C]-[養生条件]　例　M50s(モルタル、W/C50%、標準)
　　コンクリート　[骨材種類]-[W/C]-[養生条件]　例　TK50s(骨材種別、W/C50%、標準)
**コンクリートの2週および4週水中養生，乾湿繰返し時の水中養生，吸水試験に用いた水は全ては20℃
***40℃乾燥42h、水中養生6hを1サイクルとして7サイクル

*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院空間性能システム部門　教授・工博　（正会員）
*3 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門　准教授・博（工）　（正会員）

水率とした。なお，体積含水率は式(1)で求めた。

$$U = (Q_t - Q_d)/(V \times \rho) \times 100 \quad (1)$$

U　:体積含水率（%）

Q_t　:ある時点での気中質量（g）

Q_d:絶乾状態での試験体の質量（g）

V　:供試体体積（cm^3）

ρ　:水の密度（g/cm^3）(=0.998g/cm^3(20℃とした))

また，粗骨材のヤング係数は，圧縮試験よりコンクリートおよびモルタルのヤング係数を求め，式(2)を用いて算定した。

$$E_a = (V_a \times E_c \times E_m)/(E_m - E_c \times V_m) \quad (2)$$

E:ヤング係数（N/mm^2）　V:体積割合

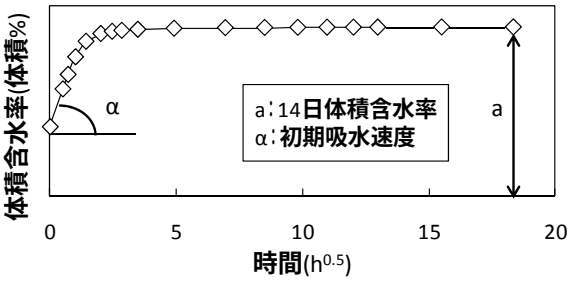
添字：　a:粗骨材　c:コンクリート　m:モルタル

粗骨材の安定性試験の損失質量は JIS A 1122 に従い，簡易凍結融解試験の損失質量は片平ら[5]によって提案された方法に従い行った。コンクリートの凍結融解試験は，JIS A 1148 A 法に基づいて凍結融解試験を行った。なお，コンクリートの浸漬吸水試験では，初期吸水速度，14 日体積含水率を粗骨材と同様に式(1)を用いて算出した。これらの試験で得られた結果として，**表－3** に粗骨材の基礎性状を，**表－4** にコンクリートの基礎性状をそれぞれ示す。

3．実験結果

3.1 凍結融解試験結果

図－2 に凍結融解試験結果を示す。相対動弾性係数をみると，試験開始条件が標準のものは試験体により相対動弾性係数の変化に差が出たが，乾湿繰返しを加えたものは相対動弾性係数の低下が小さくなる傾向を示し，試験体による差が小さくなる結果となった。これは，乾湿繰返しを行うことによって，粗骨材とモルタルの界面を含め全体に微細なひび割れが入ることで，凍結融解時の温度変化による粗骨材の拘束によって発生する応力を緩和したことや，毛細管やひび割れが乾燥することによって気泡の役割を果たしたこと[6]が考えられる。また，ES50 は乾湿繰返しを行うことによって耐凍害性が向上



図－1　吸水曲線の概要

表－2　コンクリートの調合

試験体種別(記号)	W/C (%)	絶対容積 (l/m^3)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
TK50	50	175	111	344	360
KT50					
MT50					
ES50					
SR50					
M50		280	180	530	0

セメント:普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm^3)
細骨材:勇払産陸砂(密度2.66g/cm^3 ,吸水率1.50%)

表－3　粗骨材の基礎性状

試験体種別(記号)	岩種	表乾密度 (g/cm^3)	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	ヤング係数 (GPa)	初期吸水速度 (体積%/$h^{0.5}$)	14日体積含水率 (体積%)	安定性試験の損失質量 (%)	簡易凍結融解試験の損失質量 (%)	粗粒率
TK	安山岩	2.65	2.59	2.60	23.0	2.17	6.31	0.26	1.68	6.70
KT		2.89	2.85	1.28	29.9	0.83	2.33	2.04	2.07	6.69
MT		2.58	2.52	2.41	37.2	0.98	4.59	0.13	1.71	6.70
ES		2.58	2.53	2.01	45.2	2.11	3.81	1.09	7.68	6.70
SR		2.64	2.58	2.46	27.7	2.36	4.12	0.27	3.52	6.70

表－4　コンクリートの基礎性状

試験体種別(記号)	実測空気量 (%)	実測スランプ (cm)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	初期吸水速度 (体積%/$h^{0.5}$)		14日体積含水率 (体積%)	
					標準	乾湿繰返し	標準	乾湿繰返し
TK50	2.8	16.0	38.6	27.7	4.0	4.8	17.8	13.9
KT50	2.6	16.0	39.6	30.8	3.4	4.5	17.0	12.6
MT50	2.7	16.0	37.5	33.2	3.6	5.1	16.7	14.1
ES50	2.9	16.5	35.1	35.2	3.6	4.5	15.2	13.5
SR50	2.6	16.0	42.4	29.9	2.9	4.6	15.1	13.7
M50	3.5	210×210*	30.3	31.3	4.3	6.7	22.2	19.9

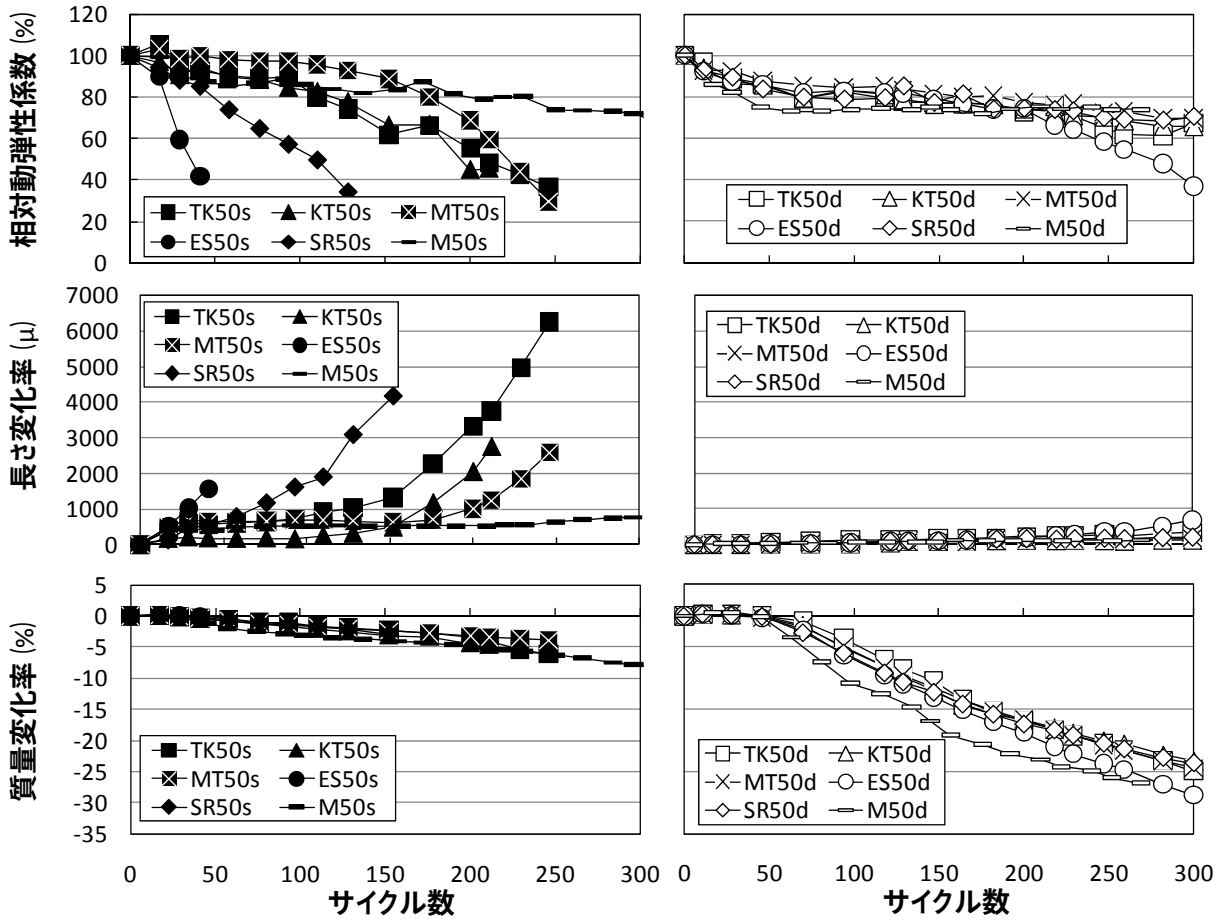
*モルタルはフロー試験(mm)

したが，ほかのものに比べて低い耐凍害性を示した。これは，**表－3** に示すように ES の安定性試験及び簡易凍結融解試験の損失質量の値がほかの粗骨材に比べて高く，粗骨材自身の耐凍害性が低いと考えられる。次に長さ変化率についてみると，相対動弾性係数と同様に，標準の条件で試験体による差が認められるが，乾湿繰返しの条件ではどの試験体の膨張も小さく，試験体による差がほとんど認められない。質量変化率についてみると，標準の試験体に比べて乾湿繰返しの試験体は質量変化が大きくなった。これは乾湿繰返しで発生した表面の組織の変化，微細ひび割れの発生などが原因でスケーリング量が増加したためと考えられる。

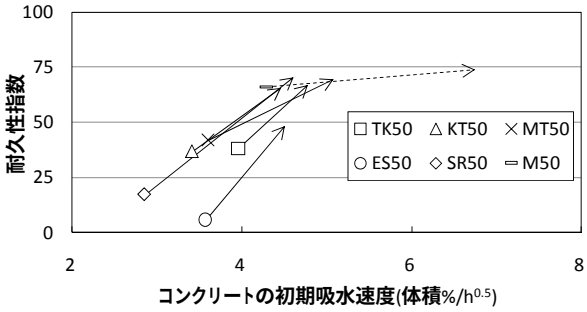
図－3 に初期吸水速度と耐久性指数の関係を，**図－4** に 14 日体積含水率と耐久性指数の関係を示す。また，**図－3**，**図－4** ともに矢印の始点を標準，矢印の終点を乾湿繰返しを行ったものの値とした。これらの図から乾湿繰返しを行うことによってコンクリートの初期吸水速度が大きくなり，14 日体積含水率が小さくなり，耐凍害性が向上していることがわかる。これは，乾湿繰返しによって微細なひび割れが生ずること等によって吸水速度が大きくなるが，吸水させても水が満たされない空隙ができ，この空隙が気泡の役割を果たしているものと考えられる。

3.2 乾湿繰返しがコンクリートに及ぼす影響

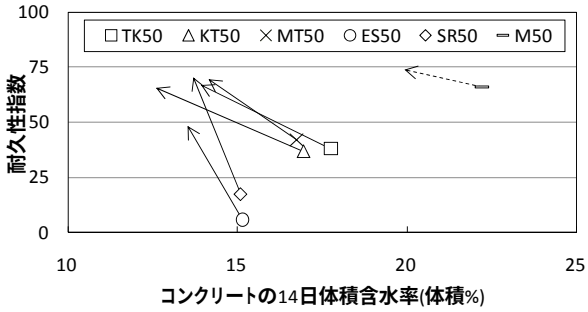
図－5 に乾湿繰返し時の長さ変化率および質量変化率



図－2　凍結融解試験結果



図－3　コンクリートの初期吸水速度と耐久性指数の関係



図－4　コンクリートの 14 日体積含水率と耐久性指数の関係

を，**表－5** に乾湿繰返し時の長さ変化率と質量変化率の最大値と最小値，および最大振れ幅(最大値-最小値)を示す。**図－5(上図)**をみると TK50d と KT50d は一度乾燥して収縮すると，その後水分の供給があってもほかの試験体に比べて膨張量が小さくなっている。また，**図－5(下図)**の乾湿繰返し時の質量変化率では，粗骨材種別による大きな差はみられなかった。

図－6 に粗骨材と乾湿繰返し時の長さ変化率の最大振れ幅の関係を示す。ES を除くと，粗骨材の吸水率，および表乾密度と乾湿繰返し時の長さ変化率の最大振れ幅の間には相関がみられ，乾湿繰返し時の長さ変化率の最大振れ幅には吸水率・表乾密度と関連深いことが考えられる。

図－7 に乾湿繰返し時の長さ変化率と質量変化率の最大振れ幅と粗骨材による内部応力と耐久性指数の関係を示す。なお，粗骨材による内部応力は式(3)を用いて得た。

$$\sigma_m = (\epsilon_m - \epsilon_c) \times E_m \times 10^{-3} \quad (3)$$

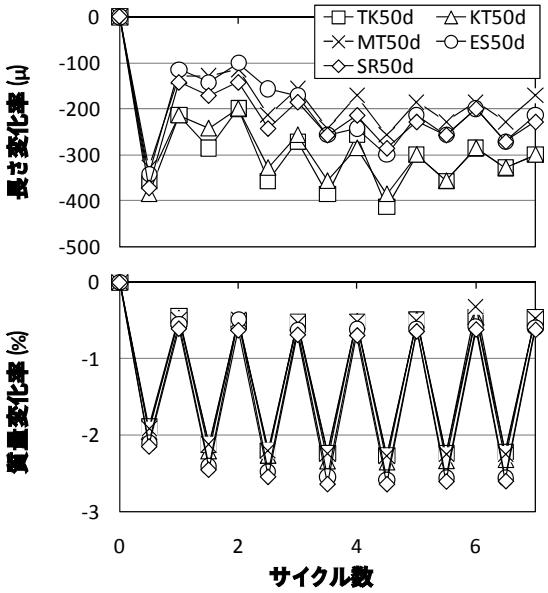
σ_m: モルタル部分に発生する応力(N/mm^2)

ϵ_m: モルタルのひずみ($\times 10^{-6}$)

ϵ_c: コンクリートのひずみ($\times 10^{-6}$)

E_m: モルタルのヤング係数(kN/mm^2)

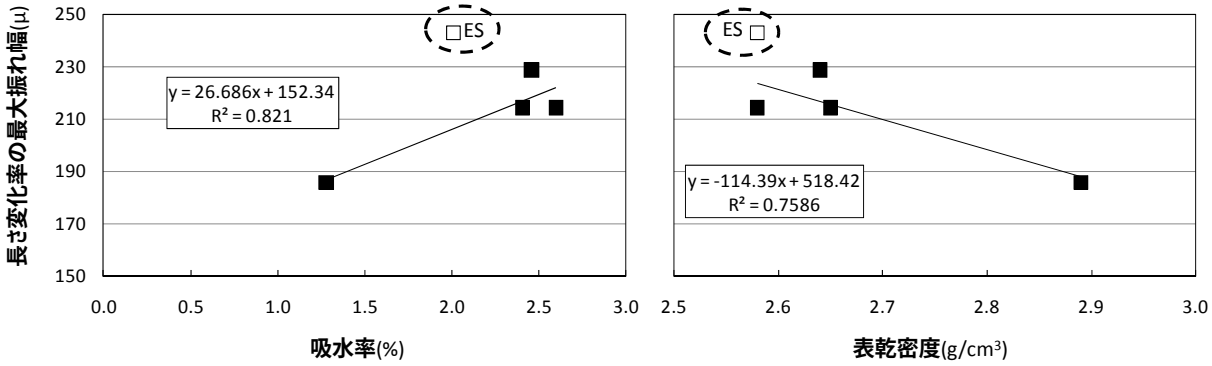
図－7 より ES を除くと長さ変化率の最大振れ幅が大きいほど，質量変化率の最大振れ幅が大きいほど，粗骨材による内部応力が小さいほど，耐久性指数が大きくなる傾向を示した。また，ES が他と異なる傾向を示した理由としては，ほかの粗骨材に比べて，粗骨材自体が凍結融解作用に対して弱いことが要因と考えられる。**表－3** に示す通り，ES は吸水率，表乾密度ともに，一般的な骨



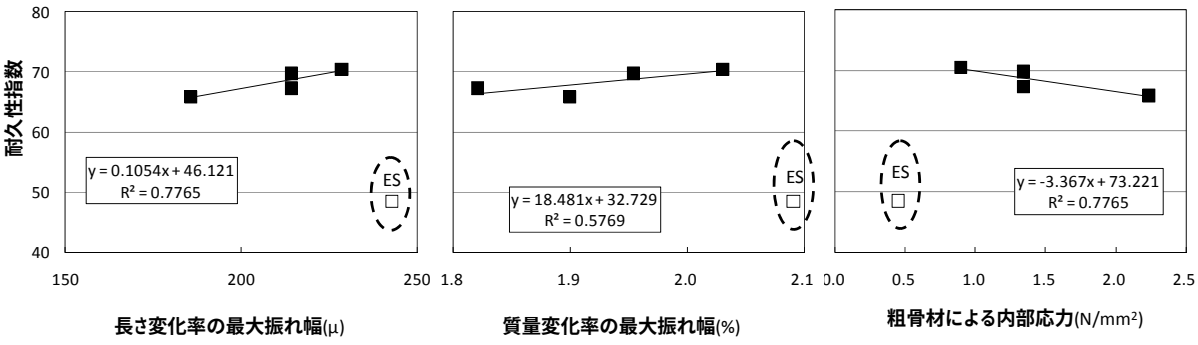
図－5　乾湿繰返し時の長さ・質量変化率

表－5　乾湿繰返し結果

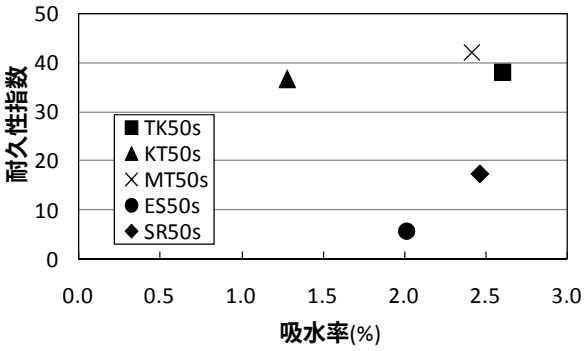
	長さ変化率(μ)			質量変化率(%)		
	最小	最大	最大振れ幅	最小	最大	最大振れ幅
TK50d	-414.3	-200.0	214.3	-2.3	-0.4	1.8
KT50d	-385.7	-200.0	185.7	-2.3	-0.4	1.9
MT50d	-328.6	-114.3	214.3	-2.3	-0.3	2.0
ES50d	-342.9	-100.0	242.9	-2.6	-0.5	2.1
SR50d	-371.4	-142.9	228.6	-2.6	-0.6	2.0
M50d	-514.3	-257.1	257.1	-6.3	-1.5	4.8



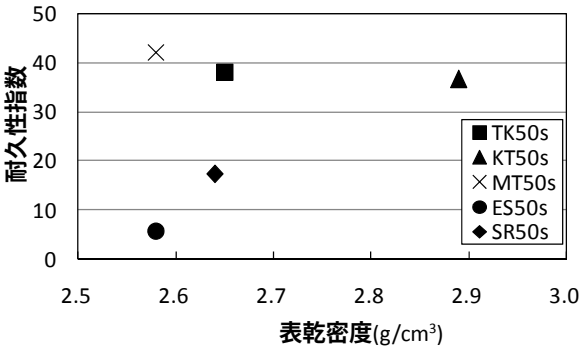
図－6　粗骨材と乾湿繰返し時の長さ変化率の最大振れ幅の関係



図－7　乾湿繰返し時の各種変化量と耐久性指数の関係



図－8　粗骨材の吸水率と耐久性指数の関係



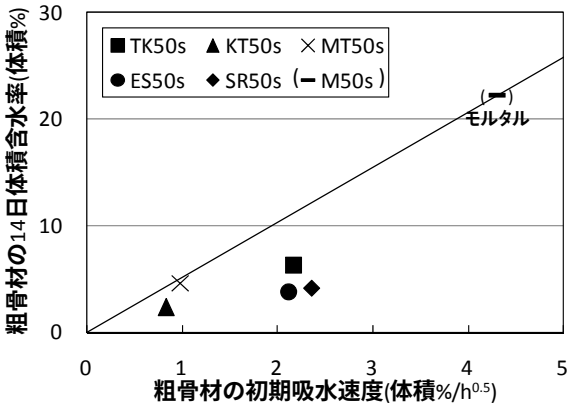
図－9　粗骨材の表乾密度と耐久性指数の関係

材と違いは見られないものであったが，安定性試験及び簡易凍結融解試験の損失質量はほかの粗骨材に比べて大きな値となっている。このことから，粗骨材の耐凍害性に関する評価は，吸水率や表乾密度など一般的に測定されている性状だけでは評価できないことが考えられる。

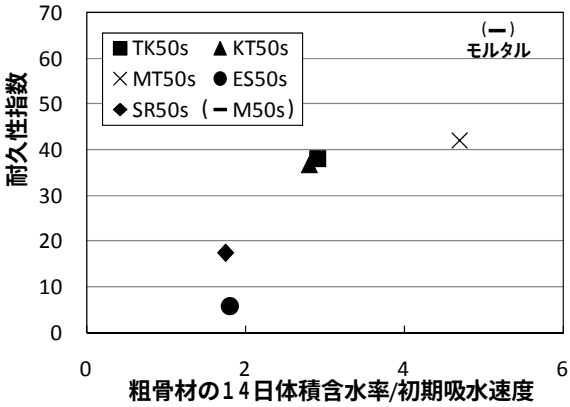
3.3 粗骨材の吸水性状がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響

図－8 に吸水率と耐久性指数の関係を，**図－9** に表乾密度と耐久性指数の関係を示す。一般にコンクリートの耐凍害性と相関があると考えられている粗骨材の吸水率や表乾密度と耐久性指数の間には明確な関係がみられなかった。

図－10 に粗骨材の初期吸水速度と 14 日体積含水率の関係を示す。なお，参考にモルタルの値を示している。粗骨材の初期吸水速度・14 日体積含水率は，モルタルの値よりも小さな値となっている。このことは，骨材はモルタルよりも空隙量が少ないことを示している。また，骨材のデータはモルタルのデータと原点を結ぶ線よりも下に位置している。このことは，骨材はモルタルよりも短時間で飽水状態になることが考えられる。飽水に近い状態までの時間に対応するものとして「14 日体積含水率/初期吸水速度」が考えられる。このため，**図－11** に粗骨材およびモルタルの「14 日体積含水率/初期吸水速度」と耐久性指数の関係を示す。この図から「14 日体積含水率/初期吸水速度」の値が小さいものほど耐久性指数が小さくなる傾向が認められる。この値が小さいものは，早期に骨材中の水分が高まるものと考えられ，これらの粗骨材を用いたコンクリートの飽水度も早期に高まり劣化が生ずることが考えられる。



図－10　粗骨材の初期吸水速度と 14 日体積含水率の関係



図－11　粗骨材の 14 日体積含水率/初期吸水速度と耐久性指数の関係

4.まとめ

本研究において以下の知見を得た。

(1) 乾湿繰返しを加えたコンクリートの吸水速度や 14 日体積含水率の変化と耐久性指数の間には関係がある。

(2) 乾湿繰返しを行っている時の長さ変化率は，粗骨材の吸水率や密度と相関があり，耐久性指数に影響を与える。

(3) 乾湿繰返しを行わない場合，「14 日体積含水率/初期吸水速度」が大きい粗骨材を用いたコンクリートは耐久性指数が大きくなる傾向を示す。

参考文献

1) 日本コンクリート工学協会：骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告書，2007 年
2) 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
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) 二宮祐希ほか：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，(社)日本コンクリート工学協会年次論文集，Vol.31，No.1，pp1189-1194，2009
5) 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
6) 田畑雅幸ほか：コンクリートの耐凍害性におよぼす乾燥の影響(コンクリートの凍害における夏季条件の想定とその検討)，セメント・コンクリート，No.383，1979 年