

## 論文 フライアッシュおよび尿素を使用したコンクリートの諸特性

清水 成<sup>\*1</sup>・横井 克則<sup>\*2</sup>・三岩 敬孝<sup>\*3</sup>・堀井 克章<sup>\*4</sup>

**要旨**：近年、コンクリート構造物の長寿命化のためにコンクリート構造物の劣化対策が重要となっている。コンクリートの劣化の要因となるひび割れは、コンクリートに尿素を混入させることで乾燥収縮および水和熱の抑制に対して有効であることが報告されている。その一方、フライアッシュも乾燥収縮および水和熱に対して有効である。本研究では、尿素を用いたコンクリートにフライアッシュの混入率と置換方法を変化させ強度と耐久性に与える影響について検討した。その結果、普通セメント使用時に尿素とフライアッシュを併用することで各種性能の向上がみられた。

**キーワード**：尿素, フライアッシュ, 凍結融解, 乾燥収縮

## 1. はじめに

近年、構造物の長寿命化が求められており、コンクリート構造物の劣化への対策は重要な課題である。コンクリートの劣化要因の一つとして、乾燥による収縮ひび割れや練混ぜ時の水和熱による温度ひび割れなどがある。これらのひび割れによってコンクリート内部の鉄筋が腐食しやすくなり、コンクリート構造物の長寿命化の障害となる。現在、温度ひび割れには水和熱低減のために単位セメント量の低減、収縮ひび割れには収縮低減剤や膨張材などの使用が一般的である。

本研究では、高い水溶性、吸熱性、非揮発性などを有する尿素を使用したコンクリートを基本として検討を実施した。尿素はその高い水溶性から水に容易に溶解し、その水溶液の粘性はほとんど変化しない。また、溶解させる尿素の容積分だけ水溶液の体積が増加するため、既往の研究では尿素を用いる場合、単位水量を尿素の体積分だけ減少させることができると報告されている<sup>1)</sup>。そのため、尿素を用いたコンクリートは単位水量の低減による乾燥収縮の抑制に効果があり、練混ぜ時の吸熱反応によってコンクリートの水和反応による温度上昇を低減できるため、温度ひび割れ低減にも効果が期待できる<sup>2)</sup>。また、収縮低減剤や膨張材を用いる場合よりも比較的安価にひび割れ対策を行えるのが特徴である。尿素をコンクリートに用いる場合は、尿素を練混ぜ水の10%置換することで、無置換のコンクリートと同等の強度および十分な乾燥収縮の低減効果がみられること、尿素を20%容積置換する場合は圧縮強度が若干低下すること、およびフライアッシュをセメントの20%容積置換すると尿素の置換率に関わらず乾燥収縮の低減がみられるが、圧縮強度、中性化および耐凍害性も主にセメント量の減少によって低下することが既往の研究により確認されている<sup>3)</sup>。

一方、フライアッシュは石炭火力発電所から年間1,200万トンを超える量が副産されている石炭灰の大部分を占めており、利用拡大が望まれている。フライアッシュは主にセメント・コンクリート分野で使用されており、割合としては有効利用量の約70%を占めている<sup>4)</sup>。一般的にフライアッシュをコンクリートに使用することで水和熱の抑制、長期強度の増加、乾燥収縮の低減、作業性の向上、アルカリ骨材反応の抑制などが期待できるとされる<sup>5)</sup>。フライアッシュの置換方法は、セメントと置換する方法(以下、内割)、細骨材と置換する方法(以下、外割)および内割や外割に区分せず混和材料として考えてセメントと細骨材の双方と置換して併用する方法(以下、内外割)の3種類がある<sup>6)</sup>。

そこで本研究では、尿素を練混ぜ水の10%を容積置換したものに、フライアッシュを10%、15%で容積置換することで、フライアッシュの置換率および置換方法の違いが尿素を混入したコンクリート(以下、尿素コンクリートと呼ぶ)へ与える影響を明確にすること、および本研究の範囲内で尿素とフライアッシュの適切な配合を検討することを目的とした。また、セメントの種類が尿素コンクリートに与える影響を確認するために、2種類のセメントを使用し、フライアッシュの置換方法は、セメントと置換する内割、細骨材と置換する外割、セメントおよび細骨材双方を置換する内外割の3パターンとした。また、内割の場合はⅡ種、外割では使用量が多いことから経済性を考慮し、Ⅳ種を使用した。実験は、強度、耐久性および性状の確認として、圧縮強度試験、長さ変化試験、促進中性化試験を行った。また、フライアッシュを用いた配合は、空気量が適正でもその特性から耐凍害性が低下することがある<sup>7)</sup>。そのため、上記の実験に加えて凍結融解試験および気泡間隔係数測定試験を行った。

\*1 高知工業高等専門学校 建設工学専攻 (学生会員)

\*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

\*4 阿南工業高等専門学校 創造技術工学科建設コース 教授 博士 (工学) (正会員)

## 2. 使用材料および試験方法

### 2.1 使用材料

セメントは普通セメント(密度 3.15g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 3,330cm<sup>2</sup>/g)と, 高炉セメント B 種(密度 3.04g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 3,940cm<sup>2</sup>/g)を使用した。細骨材(密度 2.58g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.67%)および粗骨材(密度 2.63g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.86%)は高知市春野町産の硬質砂岩砕砂, 砕石を用いた。使用した尿素は工業用の尿素(密度 1.32g/cm<sup>3</sup>, 20℃溶解度 108g/100ml, 溶解熱-15.4kJ/mol, ヘンリー定数(4.4×10<sup>-8</sup>気圧・m<sup>3</sup>/mol) で, 尿素は写真-1 に示すように粒状である。また, 尿素的性質を確認するために予備実験として, 尿素を 50ml, 水を 100ml ビーカーに測り取り, それらを混ぜ合わせることで水溶液の容積がほぼ 150ml になることを確認した。使用したフライアッシュは JIS 規格品のフライアッシュ II 種(密度 2.29g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 3,260cm<sup>2</sup>/g)および IV 種(密度 2.20g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 1,780cm<sup>2</sup>/g)である。混和剤にはリグニンスルホン酸系の AE 減水剤および AE 調整剤(100 倍溶液)を用いた。



写真-1 尿素的の外観

### 2.2 配合設計

コンクリートの配合を表-1 に示す。配合名の N は普通セメント, B は高炉セメント, U は尿素, F はフライアッシュ II 種を示し, 配合名で F の右の数字がフライアッシュの置換率である。W/C は普通セメント, 高炉セメントともに 60%をベースにし, フライアッシュの置換率は内割, 外割ともに 10%および 15%とした。また, 内外割ではそれぞれ 10%ずつのみとした。W/B は水結合材比(W/(C+FAII種+FAIV種))で, 細骨材率は一定とした。また, IN, OUT, INOUT は順に内割, 外割, 内外割を意味する。目標スランブ値は 8±2.5cm, 目標空気量を 5±1.5%とした。

### 2.3 試験方法

#### (1) フレッシュコンクリート試験

スランブ試験は, JIS A 1101「コンクリートのスランブ試験方法」に準じて行った。空気量試験は, 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—空気室圧力方法」<sup>8)</sup>に準じて行った。

#### (2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は, JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。供試体はφ100×200mmの円柱供試体を使用し, 材齢 7, 28, 91, 182 日で試験を実施した。た, 養生に関しては, 所定の材齢になるまで水温 20±2℃の養生槽で水中養生を行った。

#### (3) 長さ変化試験

長さ変化試験は JIS A 1192-2「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法(第 2 部:コンタクトゲージ方法)」に準じて行った。試験に用いた供試体は, 材齢 7 日まで水温 20±2℃の養生槽で水中養生を行った 100×100×400mmの角柱供試体に, 打設面を側面とした裏面にゲージプラグを 300mm 間隔で貼り付け, 所定の材齢まで温度 20±2℃, 相対湿度 60±5%の恒温恒湿室で保存した。ゲージプラグを取り付け, その日を初期値としてコンタクト式マイクロストレインゲージで測定を行い, その後, 材齢 7, 14, 28, 56, 91, 126, 182 日に測定を行

表-1 配合表

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							混和剤(cc/m <sup>3</sup> )												
			水	尿素	セメント		フライアッシュ II 種(内割)	フライアッシュ IV 種(外割)	細骨材 砕砂	粗骨材 砕石	AE減水剤	AE剤										
					普通	高炉B種																
N60	60	48	170	0	283	0	0	0	855	944	708	8.5										
NUF10IN	54		153	22	255		28				76	769	283	14.2								
NUF15IN					241		42				76	769	601	12.0								
NUF10OUT					283		0				114	726	708	21.2								
NUF15OUT	43		255	28	76		769				708	21.2										
NUF10INOUT	43		170	0	0		283				0	851	939	708	8.5							
B60	60					255		28	0	637				10.2								
BUF10IN	54					153		22	0	241				42	76	766	601	12.0				
BUF15IN																	283	0	114	723	708	17.0
BUF10OUT																	43	708	42.5			
BUF15OUT	39																					

った。

#### (4) 促進中性化試験

促進中性化試験は JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じて行った。試験は材齢 28 日まで水温  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  の養生槽で水中養生を行った後、材齢 56 日まで温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $60 \pm 5\%$  の恒温恒湿室で静置した  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  の角柱供試体を使用した。また、材齢 49 日から 56 日の間に打設面とその裏面、 $100 \times 100\text{mm}$  の正方形面 2 面の計 4 面をエポキシ樹脂塗料の下塗り材を 2 回塗布後、防水剤を 2 回塗布した。材齢 56 日まで養生後、温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $60 \pm 5\%$ 、二酸化炭素濃度  $5 \pm 0.2\%$  の促進中性化試験槽に入れ、そこから 1 週、4 週、8 週、13 週、26 週後に角柱供試体を端から 60mm ずつ切断し、フェノールフタレイン液を切断面に吹きかけて中性化深さの測定を行った。

#### (5) 凍結融解試験

凍結融解試験は、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験法」に準じて行った。試験は条件的により厳しいとされる A 法（水中凍結融解試験方法）を適用し、材齢 28 日まで水温  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  の養生槽で水中養生を行い、凍結融解試験を行った。凍結温度は  $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ 、融解温度は  $5 \pm 2^\circ\text{C}$  とし、凍結融解 1 サイクルに要する時間は 3 時間以上 4 時間以内、試験サイクル数は 300 サイクルまで測定を行い、その後試験を終了するものとした。供試体は  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  の角柱供試体を使用し、測定は 30 サイクル毎に JIS A 1127 に準じて質量およびたわみ振動の一次共鳴振動数の測定を行った。また、一次共鳴振動数は 30 サイクル毎に 3 回測定を行い、その平均値で相対動弾性係数を算出しコンクリートの耐凍害性を評価した。また、一次共鳴振動数を測定する際に供試体の質量を測定し、質量減少率を算出した。

#### (6) 気泡間隔係数測定試験

気泡間隔係数の測定をリニアトラバース面積比法に準じて行った。測定に用いる供試体は、耐凍害性を確認するために凍結融解試験で用いた供試体と同じ、材齢 28 日まで水温  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  の養生槽で水中養生を行った  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体を使用した。円柱供試体は中央部分を厚さ 2cm 程度の円形になるようにコンクリートカッターを用いて切断し、表面を研磨剤を用いて研磨する。その後、表面に蛍光塗料を塗布し、再度表面の研磨を行い、気泡部分にのみ塗料が付着した状態とし、気泡間隔係数の測定を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フレッシュ性状および単位容積質量

スランブ、空気量試験の試験結果および材齢 28 日での単位容積質量を表-2 に示す。全ての配合でスランブ

値、空気量の目標値である  $8 \pm 2.5\text{cm}$ 、 $5 \pm 1.5\%$  を満たしているが、外割を行った配合では空気量を確保するための混和剤の量が増加する傾向が見られた。これは外割にすることで粉体量が多くなることや、フライアッシュの未燃カーボンが AE 剤を吸着して空気連行性が低下<sup>6)</sup>したため、無置換のものよりも同一空気量を得るために必要な混和剤の量が増加したと考える。また、尿素の使用によるフレッシュ性状の影響は本実験では確認できなかった。また、材齢 28 日での単位容積質量は N60 や B60 の基本と大きな差がないことを確認した。

#### 3.2 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-1 に示す。圧縮強度は置換方法で比較すると外割、内外割、内割の順に大きくなった。また、尿素を含みフライアッシュを内割した配合では基本配合と比較して 28 日までの初期強度が若干低くなった。これはフライアッシュを内割したコンクリートの初期強度発現がセメント量の減少により低下することに加えて、尿素を水に溶かすことで生じる吸熱反応によってコンクリートの温度が低下し、水和反応が遅延されたこと、尿素を置換することで強度発現に寄与する水が減少すること<sup>7)</sup>などが要因と考えられる。しかし、尿素を使用した場合でもフライアッシュのポゾラン反応により長期強度は増進することが確認された。

91 日強度をみると、外割した配合では高炉セメントを用いた配合が普通セメントを用いた配合よりも 2 割程度小さくなった。これは高炉セメントが普通セメントよりもセメントクリンカー量が少ないため、フライアッシュのポゾラン反応が十分発揮しなかったためと考えられる。

#### 3.3 長さ変化試験

長さ変化試験の結果を図-2 に示す。尿素とフライアッシュを使用した配合の乾燥収縮は、置換方法によらず基本配合と比較し、普通セメントを用いた場合は 20%程度、高炉セメントを用いた場合は 10%程度低減している。これは尿素を置換することで、配合での単位水量を減ら

表-2 フレッシュ性状および単位容積質量

配合名	実測値		
	フレッシュ性状		単位容積質量 ( $\text{t}/\text{m}^3$ )
	スランブ(cm)	空気量(%)	
N60	6.5	4.5	2.30
NUF10IN	8.5	4.5	2.36
NUF15IN	10.0	5.0	2.31
NUF10OUT	7.5	3.5	2.33
NUF15OUT	10.0	4.0	2.32
NUF10INOUT	10.5	4.5	2.31
B60	10	6.5	2.27
BUF10IN	9.5	4.5	2.29
BUF15IN	9.5	4.5	2.29
BUF10OUT	9.5	3.5	2.33
BUF15OUT	10.5	4.0	2.28

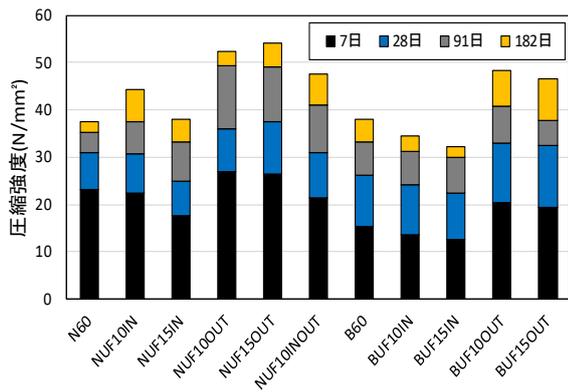


図-1 圧縮強度

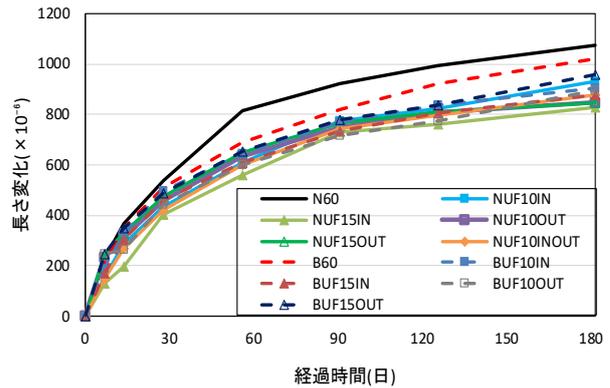


図-2 長さ変化

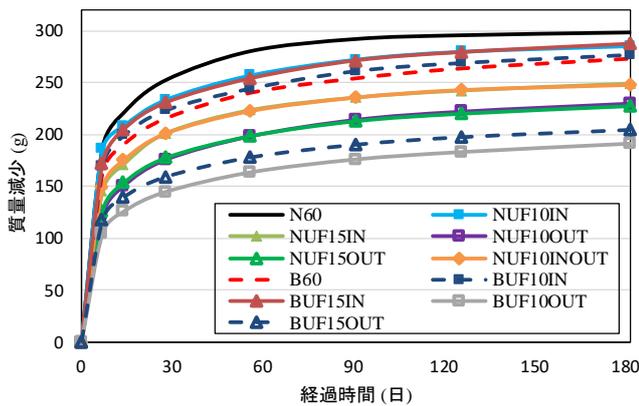


図-3 水分の逸散量

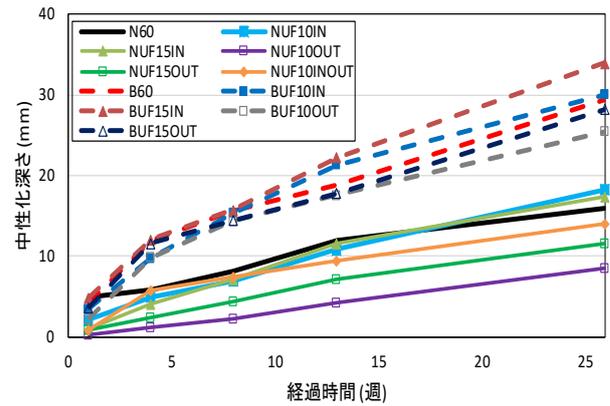


図-4 促進中性化深さ

せること、水に尿素を溶かした尿素水が非揮発性であることによってコンクリート中の水分の逸散が低減されたことにより、乾燥収縮が抑制されたと考えられる<sup>9)</sup>。加えて、フライアッシュを内割で置換することでセメントペースト量が減少することや、フライアッシュの特性から単位水量が低減できたことによる効果が現れたのではないかと考えられる。また、高炉セメント使用時は一般に乾燥収縮量が大きくなる<sup>9)</sup>がそのような傾向もみられなかった。尿素とフライアッシュの効果は互いに阻害することはなく作用すると考えられ、尿素とフライアッシュの併用は乾燥収縮の低減に対して非常に有効であると考えられる。

### 3.4 水分の逸散量

長さ変化試験時に実施した質量測定の結果を図-3に示す。図から、普通セメントに尿素を用いた配合は、尿素未混入の基本配合であるN60よりも質量の減少が小さく、高炉セメントを用いた場合でも同等かそれ以下の質量の減少となった。尿素はヘンリー定数が $4.4 \times 10^{-8}$ 気圧 $\cdot$ m<sup>3</sup>/molであるため、非揮発性であるといえる。この性質により水のみが逸散し、総合的に水分の逸散量が低減した結果、質量減少の低減に貢献したと考えられる<sup>9)</sup>。また、本研究範囲内でのフライアッシュの置換方法別で比較すると、内割よりも外割配合の方が全体的に水分の逸散量は抑制される傾向にあることが確認できた。

### 3.5 促進中性化深さ

促進中性化試験の結果を図-4に示す。中性化深さは無置換の配合と比べて、尿素とフライアッシュを使用した配合は同等かそれ以下となった。これを置換方法で比較すると全体的に内割した配合で大きく、外割した配合では小さくなった。これは外割した配合では内割に比べセメント量が多く、コンクリート中にアルカリ分が十分含まれているためであると考えられる。また、尿素水が非揮発性で水分が逸散しにくく、コンクリート中の含水率が高くなると、コンクリートの表面透気指数が低下したという結果が報告されている<sup>2)</sup>。そのため、コンクリート表面からの二酸化炭素の進入が抑制され、中性化の進行が抑制されたと考えられる。

また、セメントの種類別では高炉セメントを使用した配合が、他配合より中性化深さが大きい値を得た。これは、セメント中に含有されている酸化カルシウム(CaO)の量が少なく、強度発現の遅いセメントほど、中性化速度が早いためと考える。一般に、高炉セメントは普通セメントよりおよそ10%程度酸化カルシウム(CaO)の量が少ない<sup>9)</sup>。

### 3.6 凍結融解抵抗性

凍結融解試験の結果を図-5に示す。300サイクルが終了した配合の相対動弾性係数は60%を上回り、耐凍害性を有しているといえる。また、相対動弾性係数が210

サイクル以降で低下傾向を示した BUF15IN 以外は無置換の配合と同等の耐凍害性を有していることが確認できた。通常はフライアッシュを置換することでフライアッシュの未燃カーボンが AE 剤を吸着して空気連行性が低下<sup>9)</sup>し、それに伴って耐凍害性が低下しやすい。しかし、本実験のように AE 剤の使用量を増やし、フライアッシュの使用量が本実験の配合程度であれば十分に耐凍害性が確保できることが分かった。

質量減少率の結果を図-6 に示す。全ての配合で耐凍害性を有しており、それらの質量減少率は 10%以下の範囲に収まっている。質量減少率は 10%以上までであれば耐凍害性には影響を及ぼさないかと考えられる。次に、フライアッシュの混入方法の影響を比較すると、内割である NUF10IN, NUF15IN, が大きく、次いで内外割および外割という順である。また、フライアッシュ無置換と比較すると、フライアッシュを内割で置換した場合は最大で 2 倍程度、外割の場合は最大で 1.3 倍程度の質量減少率となった。このようなことから、内割よりも外割の方が質量減少率の抑制に有効であると確認できた。

耐久性指数と材齢 28 日目での圧縮強度の関係を図-7 に示す。一般に、耐久性指数は 60 以上の値であれば耐凍害性を有するとされ、以下の式(1)で算出できる。

$$DF=PN/M \quad (1)$$

ここに、DF：耐久性指数、P：N サイクルのときの相対動弾性係数(%), N：相対動弾性係数が 60%になるサイクル数または 300 サイクルのいずれか小さいもの、M：300 サイクルとする。

結果から、28 日強度が 25N/mm<sup>2</sup> より小さくなると耐凍害性が低下している。本研究の範囲内では、20~25N/mm<sup>2</sup> 付近のデータ数が現状では少ないが、耐凍害性を確保するには 28 日時点の圧縮強度を最低でも 25N/mm<sup>2</sup> 以上にする必要があると推測する。

### 3.7 気泡間隔係数

気泡間隔係数と耐久性指数の関係を図-8 に示す。気泡間隔係数とは、コンクリート中の気泡がどの程度の間隔で分布しているかを示す指標で、コンクリート中の空気量が同じであっても、気泡径が小さいほど空気泡の数は多くなり、気泡間隔係数は小さい値になる。よって気泡間隔係数の値が小さければ隣合う気泡間の距離が近く、凍結による膨張圧が大きく緩和される。一般に気泡間隔係数が 200 $\mu$ m から 250 $\mu$ m 以下で耐凍害性が著しく改善されると知られている<sup>10)</sup>。

結果をみると耐久性指数が 80 以上のものは気泡間隔係数がおおよそ 250 $\mu$ m 以下の範囲に収まっており、耐久性指数が若干低下した BUF15IN の気泡間隔係数は 270 $\mu$ m 程度となった。この結果より、耐凍害性は一般的な知見と同様に気泡間隔係数と密接に関係しており、気

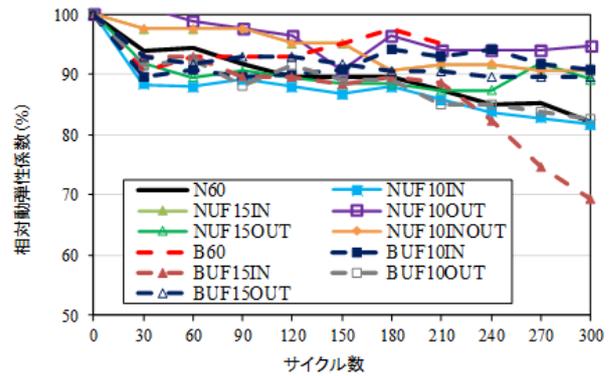


図-5 凍結融解抵抗性

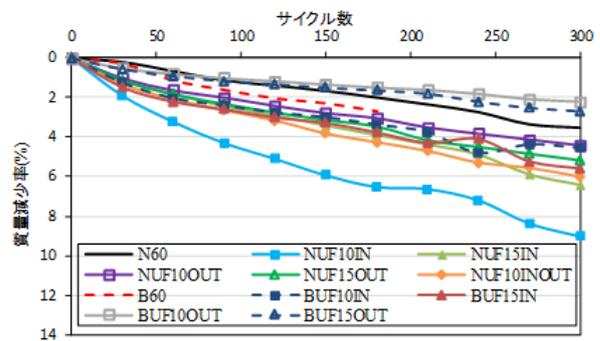


図-6 質量減少率

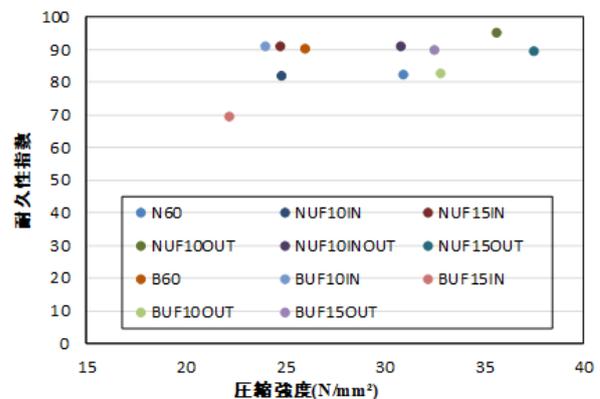


図-7 耐久性指数と圧縮強度の関係

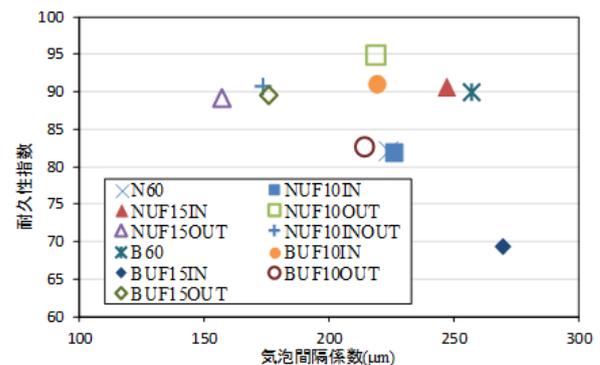


図-8 気泡間隔係数と耐久性指数との関係

泡間隔係数が 250 $\mu\text{m}$  を超えると徐々に耐凍害性が低下していきと予想する。

### 3.8 相対評価

これまでの結果をまとめて、本実験での各種性能評価を表-3 に示す。それぞれ使用したセメントの基本配合の性能を基準(100)として評価した。

普通セメントを使用した配合では、尿素を使用していない N60 より概ね全ての基礎性能が向上し、高炉セメントを使用した配合では性能の向上はあまり期待できない結果となった。圧縮強度は、セメントの種類に関わらず、フライアッシュ内割にすることにより性能が低下する傾向がみられたが、外割および内外割にすることで強度の増進がみられる。特に、普通セメントに尿素を使用し、フライアッシュを外割で 10%置換した NUF10OUT の配合が最も高性能となった。加えて、普通セメントに尿素を使用した場合はフライアッシュの置換方法に関わらず、乾燥収縮に対する抵抗性能が大幅に向上する結果となった。このような結果から、尿素とフライアッシュを併用する場合は普通セメントを用いることが有効であると考えられる。

表-3 各種性能評価

	圧縮強度	乾燥収縮	中性化	耐凍害性
N60	100.0	100.0	100.0	100.0
NUF10IN	99.1	115.5	87.7	99.4
NUF15IN	80.1	129.7	92.2	110.3
NUF10OUT	115.8	126.6	187.1	115.5
NUF15OUT	121.2	126.5	137.3	108.6
NUF10INOUT	99.6	122.1	114.3	110.3
B60	100.0	100.0	100.0	100.0
BUF10IN	92.2	112.7	97.7	100.8
BUF15IN	85.4	116.5	86.5	76.9
BUF10OUT	126.0	113.8	115.3	91.7
BUF15OUT	124.9	106.4	104.1	99.4

### 4. まとめ

本研究では、尿素を練混ぜ水の 10%を容積置換したものに、フライアッシュの置換率(10%, 15%)および置換方法(内割, 外割, 内外割)を変更した配合で比較検討した。また、セメントの種類が尿素コンクリートに与える影響を確認するために、普通セメントおよび高炉セメントを使用し、比較検討した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 尿素を練混ぜ水の 10%置換およびフライアッシュを外割で置換した場合、粉体量の増加に伴って空気量を確保するために多量の混和剤が必要である。
- (2) 尿素を使用してもフライアッシュを併用することで、ポズラン反応により長期強度が増進する。

- (3) 尿素とフライアッシュを併用する場合、乾燥収縮を低減するのに非常に有効である。
- (4) 尿素やフライアッシュを使用しても圧縮強度を 25N/mm<sup>2</sup>以上確保することで凍結融解に対する抵抗性は確保される。また、高炉セメントよりも普通セメントを用いた方が抵抗性は向上する。
- (5) 尿素やフライアッシュを使用しても、フライアッシュを 15%までの範囲で外割置換することで、セメントの種類によらず、基礎性能は基本配合と同等かそれ以上の性能が得られた。
- (6) 普通セメントに尿素を練混ぜ水の 10%, フライアッシュを外割で 10%置換した配合が各種基礎性能で判断すると最も優れていた。

### 参考文献

- 1) 河井徹, 阪田憲次: 尿素を用いたコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.639-644, 2007
- 2) 田中博一, 綾野克紀: 尿素を用いたコンクリートのひび割れ低減技術, コンクリート工学論文集, Vol.52, No.4, pp.303-308, 2014
- 3) 山本修大, 横井克則, 近藤拓也, 三岩敬孝, 堀井克章: 尿素とフライアッシュを混入したコンクリートの基礎的検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, V-438, pp.875-876, 2018
- 4) (財)石炭エネルギーセンター: 石炭灰全国実態調査報告書(平成 30 年度実績), 2020.3
- 5) 田澤栄一他: エースコンクリート工学, 朝倉出版, 2007
- 6) 土木学会四国支部: 四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針, 2016
- 7) 長瀧重義他: フライアッシュを混和したコンクリートの耐凍害性評価, セメントコンクリート論文集, No.41, pp.371-374, 1987
- 8) 三岩敬孝, 堀井克章, 横井克則: 高炉スラグ微粉末および尿素を使用したコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1529-1534, 2019
- 9) 依田彰彦: コンクリート中の鋼材腐食の現状, コンクリート工学, pp.36-38, 1981
- 10) 張友海, 藤原忠司, 小山田哲也, 張英華: 収縮低減剤を用いたコンクリートの耐凍害性を確保する AE 剤の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1111-1116, 2009