

# 論文 空気量を増大したコンクリートの各種品質に関する基礎的検討

西澤 彩\*1・桜井 邦昭\*2・伊佐治 優\*1・河合 研至\*3

**要旨：**コンクリート製造時の CO<sub>2</sub> 排出量を低減することを目的として、コンクリート中の空気量を増大して単位セメント量を低減する配合を検討した。空気量を 3%大きくした場合、同一の流動性の確保に必要な単位水量を約 10kg/m<sup>3</sup> 低減できる一方で、同一の圧縮強度を確保するために水セメント比を約 3%小さくする必要があることを確認した。また、一般的な配合の普通コンクリートに比べ、空気量を 3%増やすことで、同一の流動性、強度特性および耐久性を確保しつつ、単位水量およびセメント量を低減でき、CO<sub>2</sub> 排出量および断熱温度上昇量、収縮ひずみを低減できるコンクリートが得られることを示した。

**キーワード：**空気量, 単位セメント量, 単位水量, CO<sub>2</sub> 排出量, 圧縮強度, 流動性

## 1. はじめに

地球温暖化を抑制するために、建設活動においても CO<sub>2</sub> 排出量の削減が求められている。コンクリートの CO<sub>2</sub> 排出量は、その 9 割がセメントに起因しているため、セメント量を低減することが効果的である。その対策として、産業副産物の積極的な利用が進められているが、材料の調達や貯蔵・計量設備の面で課題がある。

そこで、汎用的な設備、材料を用いて CO<sub>2</sub> 排出量を低減することを目的として、コンクリートの空気量に着目した。コンクリート中の空気量を増大すると、一般に次のような性質があるとされる。フレッシュコンクリートにおいては空気泡がボールベアリングの効果を果たすことにより流動性が向上する<sup>2)</sup>。言い換えると、同一の流動性の確保に必要な単位水量を低減できるため、単位セメント量も少なくなる(図-1 左)。一方で、硬化コンクリートではセメントペースト中の空隙が増大するため圧縮強度が低下する<sup>2)</sup>。このため、同一の圧縮強度を確保するには水セメント比を小さくする必要がある(図-1 右)。前者による単位セメント量の減少量が、後者による単位セメント量の増加量より大きければ、一般的な空気量の普通コンクリートと同等の流動性と圧縮強度を有しつつ、単位セメント量を低減し、CO<sub>2</sub> 排出量を低減できるコンクリートを製造できる可能性がある。

そこで、本研究では、次の 3 ステップで実験的検討を行った。第一(2 章)に、空気量とセメント水比を種々に変化させたコンクリートの圧縮強度試験を行い、これらが圧縮強度に及ぼす影響を整理した。

第二(3 章)に、空気量を種々に変化させたコンクリートを練混ぜ、同一スランブの確保に必要な単位水量を検討した。そして、空気量の増分による単位水量の低減効果を把握した。加えて、単位水量および単位セメント

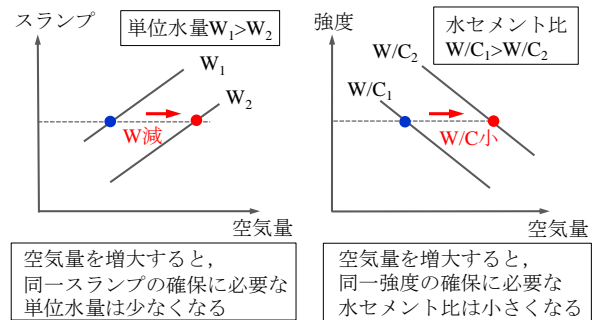


図-1 空気量とスランブおよび強度の関係の概念図

量をさらに低減するために、混和剤を AE 減水剤から減水率の高い高性能 AE 減水剤に変更したコンクリートについても同様の検討を行った。

第三(4 章)に、第一および第二で得られた結果を基に、空気量を増大することで、目標とする圧縮強度とスランブを確保しつつ、単位水量および単位セメント量を低減したコンクリート(以下、空気量増大コンクリートという)の各種品質試験を行い、一般的な空気量のコンクリート(以下、普通コンクリートという)と比較した。

## 2. 圧縮強度に及ぼす空気量およびセメント水比の影響

### 2.1 試験概要

#### (1) 配合と使用材料

配合を表-1 に、使用材料を表-2 に示す。単位水量および単位粗骨材量が一定の配合条件として、空気量を 1.5, 4.5, 7.5, 10.5% の 4 水準、各水準の空気量に対して水セメント比 (W/C) を 45~65% の範囲で 3 水準変化させた合計 12 配合で試験した。空気量の目標値は ±1.0% とし、目標範囲となるよう AE 剤の使用量を調整した。なお、配合 No.10 は、空気量の増大により材料分離が生じたことから単位水量を 155kg/m<sup>3</sup> とした。また、本研究では、一

\*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任 修士(工学)(正会員)

\*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主席技師 博士(工学)(正会員)

\*3 広島大学 大学院先進理工系科学研究科 社会基盤環境工学プログラム 教授 工学博士(正会員)

表-1 配合および品質試験結果（圧縮強度に及ぼす空気量とセメント水比の影響）

配合 No.	設定空気量 (%)	W/C (%)	C/W	s/a (%)	単位ペースト容積 Vp (L/m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤添加量 (C×%)			品質試験結果						
						W	C	S	G	HWR	AE1	AE2	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )			
1	1.5	65.0	1.54	51.1	279	175	269	962	960	0.8	-	0.0015	12.0	25.0	1.9	2358			
2		60.0	1.67	50.6	286		292	942					12.5	25.5	1.5	2378			
3		55.0	1.82	50.0	295		318	920					13.5	27.5	1.8	2363			
4	4.5	65.0	1.54	49.0	309		269	884					0.006	0.0005	18.0	34.0	4.9	2283	
5		60.0	1.67	48.4	316		292	864							18.5	33.0	4.6	2294	
6		55.0	1.82	47.7	325		318	842							19.5	35.0	5.0	2288	
7	7.5	60.0	1.67	46.0	346		292	786			0.015	-			22.0	38.5	8.0	2221	
8		55.0	1.82	45.3	355		318	763							22.0	37.5	7.8	2219	
9		50.0	2.00	44.4	365		350	736							21.5	42.0	7.8	2202	
10	10.5	55.0	1.82	45.5	353		155	282					768	0.015	-	17.0	27.0	10.6	2177
11		50.0	2.00	41.6	395		175	350					658	0.050		22.5	41.5	10.0	2174
12		45.0	2.22	40.4	408		389	624					22.0	37.5		10.0	2182		

一般的な土木構造物に用いる配合のコンクリートを想定し、セメントには高炉セメント B 種を用いた。

(2) 練混ぜ方法と試験体の採取

練混ぜには、強制二軸練りミキサ（公称容量 60L）を用い、1 バッチの練混ぜ量は 30L とした。ミキサに骨材およびセメントを投入して 10 秒練り混ぜたのち、水および混和剤を投入して 60 秒練り混ぜた。練上がり 5 分後に品質試験を行い、JIS A 1132 に準拠して円柱試験体（φ100×200mm）を採取した。なお、練混ぜおよび試験体採取は気温 20℃の室内で行った。

(3) 品質試験方法

フレッシュコンクリートの品質試験は、スランプ（JIS A 1101）、スランプフロー（JIS A1150）、空気量（JIS A 1128）およびコンクリート温度（JIS A1156）を測定した。なお、空気量は 15%まで測定可能なエアメータを用いて圧力法にて測定した。採取した円柱試験体は、打込みの翌日に脱型し、標準養生（20℃水中養生）を行った。材齢 28 日に圧縮強度（JIS A 1108）を測定した。

2.2 試験結果

空気量ごとのセメント水比と圧縮強度の関係を図-2 に示す。いずれの空気量においても、セメント水比の増加に伴い圧縮強度は直線的に増加するが、空気量が多いほどその傾きは緩やかになった。特に、空気量を 10.5%とした場合には傾きが緩やかであり、同一の圧縮強度を得るためには、セメント水比を相当に大きくする必要がある結果が得られた。このため、過度に空気量を大きくすると、必要な単位セメント量が增大する恐れがあると推測され、目標とする圧縮強度に応じて、セメント量を低減できる空気量の範囲は変化するものと考えられる。空気量をどの程度増加させる場合に単位セメント量を最小にできるかについては今後も検討が必要である。

表-2 使用材料

種類	記号	種類, 物性
セメント	C	高炉セメントB種, 密度3.04g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	陸砂, 表乾密度2.61g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.88%, 粗粒率2.72, 実積率69.3%
粗骨材	G	碎石, 最大寸法20mm, 表乾密度2.72g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.57%, 粗粒率6.61, 実積率61.4%
混和剤	HWR	AE減水剤(高機能型), リグニンスルホン酸およびポリカルボン酸系
	AE1	AE剤
	AE2	消泡剤
水	W	上水道水

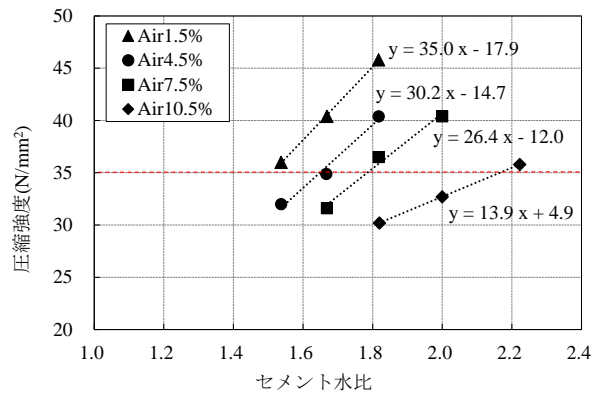


図-2 セメント水比と圧縮強度の関係

今回の試験結果では、仮に、目標とする圧縮強度を 35N/mm<sup>2</sup>（図中の赤点線）として、空気量を 4.5%から 3%増大した場合、セメント水比は 0.1 程度大きく（水セメント比を 3%程度小さく）する必要がある。また、表-1 に示すように、水セメント比が同じコンクリートの場合、スランプは空気量が增大するほど大きくなっている。これは、空気のボールベアリング効果<sup>2)</sup>や、空気量の増大により単位ペースト容積が増大したこと等が影響したと考えられる。

表-3 配合および品質試験結果（スランプに及ぼす空気量と単位水量の影響）

配合 No.	設定空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	モルタル中の細骨材率 s/m (%)	単位ペースト容積 Vp (L/m³)	単位量 (kg/m³)				混和剤添加量 (C×%)				品質試験結果			
						W	C	S	G	SP	HWR	AE1	AE2	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m³)
1	1.5	60.0	49.5	53.4	301	185	308	902	-	0.8	-	0.0015	18.5	31.5	1.6	2355	
2	4.5		48.4	51.2	316	175	292	864			0.006	0.0005	18.5	33.0	4.6	2294	
3	7.5		47.3	48.9	330	165	275	826			0.009	-	20.0	32.0	8.4	2207	
4	10.5		46.1	46.7	345	155	258	788			0.015	-	18.5	29.5	11.0	2162	
5	1.5		51.6	58.2	270	165	275	983	1.00	-	-	0.0015	19.0	35.5	0.8	2388	
6	4.5		50.6	56.0	285	155	258	945			0.003	0.0005	19.0	34.0	5.5	2290	
7	7.5		49.6	53.7	300	145	242	907			0.003	-	20.0	33.5	7.0	2274	
8	10.5		48.5	51.5	314	135	225	869			0.007	-	17.5	29.5	10.6	2189	

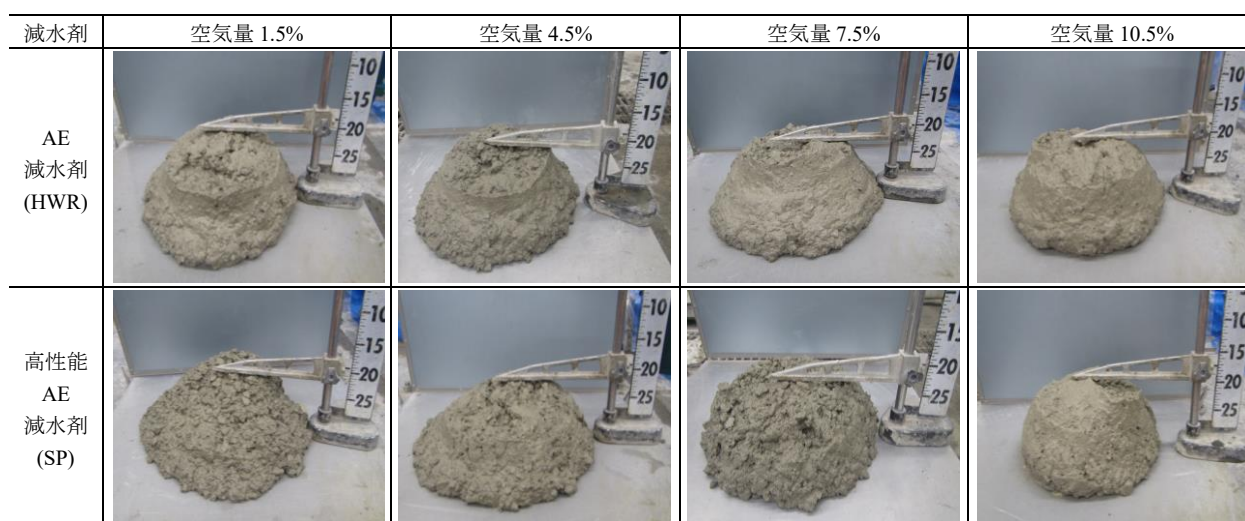


写真-1 スランプ試験状況

### 3. スランプに及ぼす空気量および単位水量の影響

#### 3.1 試験概要

検討配合を表-3 に示す。水セメント比および単位粗骨材量が一定の配合条件として、混和剤に AE 減水剤もしくは高性能 AE 減水剤 (SP) を用いた。それぞれの混和剤において、空気量を 1.5, 4.5, 7.5, 10.5% に変化させたコンクリートで、スランプ 18cm が得られる単位水量を検討した。スランプの目標範囲は±2.0cm、空気量は±1.0%とした。使用材料、練混ぜ方法は2章と同様である。

#### 3.2 試験結果

スランプ 18cm が得られる空気量と単位水量の関係を図-3 に、スランプ試験状況を写真-1 に示す。AE 減水剤および高性能 AE 減水剤のいずれを用いた場合とも、空気量の増大に伴い単位水量は直線的に減少し、空気量を 3%増大するごとに単位水量を約 10kg/m³ 低減できた。一方、スランプが同等であっても、空気量によりスランプ形状は異なり、空気量が小さいと荒々しい状態となり、空気量が大きくなると丸みを帯びた形状となった。このため、同一のスランプであっても施工性や材料分離抵抗性は相違していると推測される。これは、配合中の単位

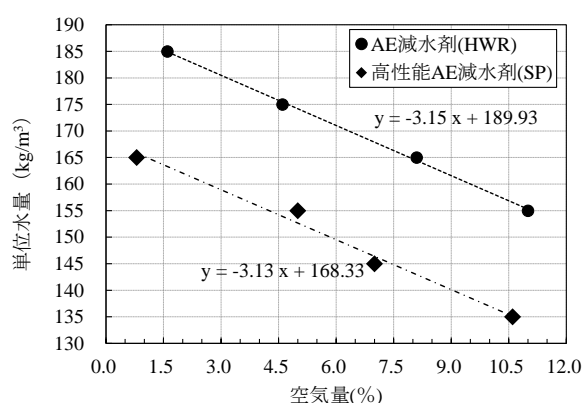


図-3 目標スランプ 18cm の空気量と単位水量の関係

ペースト容積や、モルタル中に占める細骨材率 (s/m) が異なることも影響していると考えられる。今後、各材料の容積比率が、コンクリートの流動性および材料分離抵抗性に及ぼす影響について検討する。

### 4. 空気量を増大したコンクリートの各種品質の検証

本章では、前章までの結果を踏まえ、空気量を増大することで、一般的な空気量の普通コンクリートと同等の

表-4 配合および品質試験結果（空気量増大コンクリートの各種品質の検証）

コンクリート種類	設定空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (C%)					品質試験結果				
				W	C	S	G	SP	HWR	AE1	AE2	Ad	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	コンクリート温度 (°C)
普通コンクリート	4.5	60.0	48.4	175	292	864	960	-	0.80	0.0060	0.0005	-	20.0	33.5	4.7	2286	20
空気量増大コンクリート	7.5	57.0	49.9	140	246	917	960	1.00	-	0.0045	-	0.30	20.5	36.5	8.0	2250	20

表-5 試験方法

試験項目	準拠規格, 方法	試験材齢, 養生	試験体, 寸法
気泡分布(気泡間隔係数・硬化空気量)	面積法 <sup>3)</sup> (1分画4mm)	14日, 標準養生	円柱φ100×200mm 中央断面60×60mm
ブリーディング	JIS A 1123	-	円柱φ250×285mm
凝結時間	JIS A 1147	-	円柱φ170×150mm
圧縮強度	JIS A 1108	18, 20, 24h 28日, 標準養生	円柱φ100×200mm
静弾性係数	JIS A 1149	28日, 標準養生	円柱φ100×200mm
割裂引張強度	JIS A 1113	28日, 標準養生	円柱φ100×200mm
曲げ強度	JIS A 1106	28日, 標準養生	角柱100×100×400mm
引抜きによる付着応力度	JSCE-G503	28日, 標準養生	異形棒鋼'D19 角柱150×150×150mm
断熱温度上昇量	空気循環式 <sup>4)</sup>	打込みから 材齢14日	円柱φ400mm×410mm
乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3	7日まで標準養生後, 気中養生	角柱100×100×400mm
凍結融解試験	JIS A 1148	28日, 標準養生	角柱100×100×400mm
促進中性化試験	JIS A 1153 JIS A 1152	56日(28日標準養生後, 気中養生)	角柱100×100×400mm
塩水浸漬試験	JSCE-G527 NDIS 3437	56日(28日標準養生後, 気中養生)	角柱100×100×400mm



写真-2 スランプ試験状況

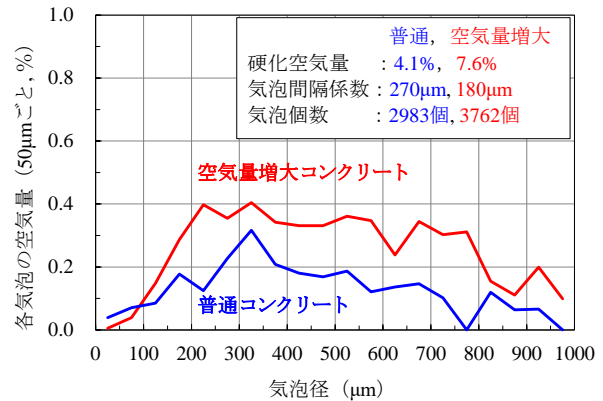


図-4 気泡径ごとの空気量の比較

圧縮強度およびスランプを確保しつつ、単位水量および単位セメント量を低減した空気量増大コンクリートの各種品質試験を行い、普通コンクリートと比較した。

#### 4.1 試験概要

検討した配合を表-4に示す。前章までの結果等を踏まえ、普通コンクリートは空気量を4.5%、水セメント比を60%、単位水量を175kg/m<sup>3</sup>として、減水剤にAE減水剤を用いた。空気量増大コンクリートは、空気量を7.5%、水セメント比を57%、単位水量を140kg/m<sup>3</sup>として、減水剤に高性能AE減水剤を用いた。なお、後者では、予備検討にて、時間に伴うこわばりが生じたことから、スランプ保持性を高めるため、保持剤<sup>5)</sup>(Ad)をコンクリート製造後に後添加した。使用材料および練混ぜ方法は前章と同様である。

フレッシュコンクリートの品質試験は、2章と同様に行った。目標とする品質は、スランプが18±2.5cm、空気量はそれぞれ±1.0%とした。品質試験結果を表-4に、スランプ試験状況を写真-2に示す。硬化過程、硬化後の物性を比較するため、表-5に示す試験を行った。

#### 4.2 試験結果

##### (1) 気泡分布

気泡径50μmごとの空気量を図-4に示す。空気量増大コンクリートは、普通コンクリートに対して、いずれの気泡径も一様に空気量が増大した。また、硬化コンクリート中の空気量は、フレッシュ時と同程度であることを確認できた。気泡間隔係数は、普通コンクリートが270μmに対し、空気量増大コンクリートは180μmであり、3割程度小さくなった。

##### (2) ブリーディング率、凝結時間および若材齢圧縮強度

ブリーディング率、凝結時間および若材齢圧縮強度の試験結果を図-5に示す。空気量増大コンクリートではブリーディングは認められなかった。空気量の増加により単位水量を35kg/m<sup>3</sup>も低減できており、コンクリート中の自由水が少なくなったためと考えられる。空気量増大コンクリートは、沈みひび割れや砂すじの発生抑制に効果的である可能性があることを示すものと考えられる。空気量増大コンクリートの凝結時間は、減水剤に高性能

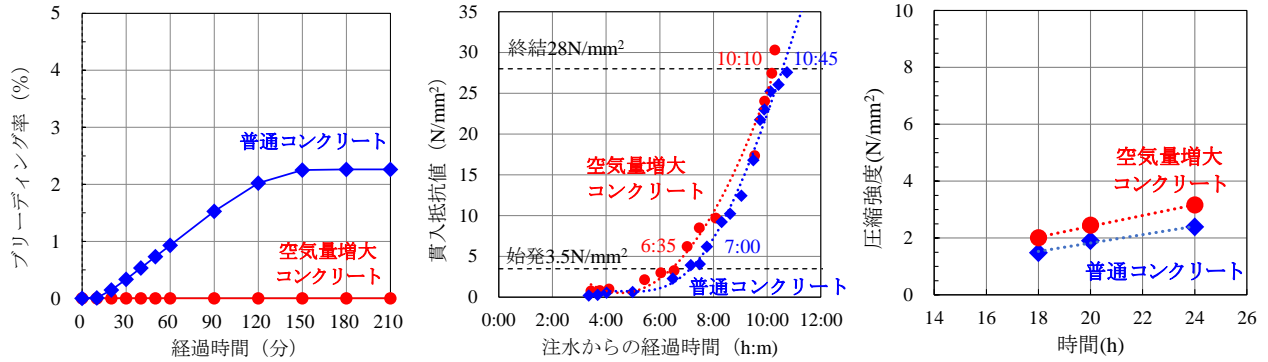


図-5 ブリーディング、凝結時間および若材齢圧縮強度の比較

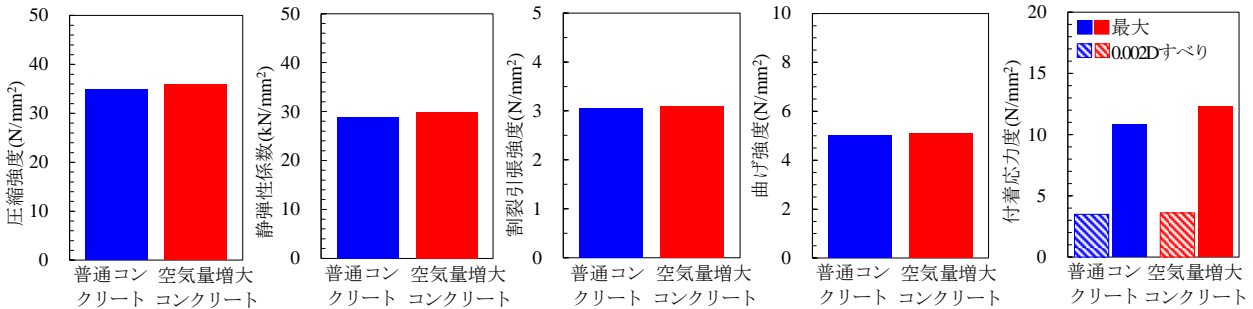


図-6 強度特性（圧縮強度，静弾性係数，割裂引張強度，曲げ強度および付着応力度）の比較

AE 減水剤を用いているものの、普通コンクリートと同等であった。また、若材齢時の強度発現性も普通コンクリートと同等であった。

### (3) 強度特性

圧縮強度および静弾性係数、割裂引張強度、曲げ強度、鉄筋引抜きによる 0.002D すべりおよび最大の付着応力度の比較を図-6 に示す。空気量増大コンクリートの強度特性はいずれも普通コンクリートと同等であった。今後、データの蓄積が必要ではあるが、普通コンクリートと同等の圧縮強度を有する空気量増大コンクリートであれば、他の強度特性も同等として取り扱うことができると考えられる。なお、鉄筋引抜きによる付着強度においては、空気量が多いと付着面積は減少するが、水セメント比が小さいため、同等の付着強度が得られたものと考えられる。

### (4) 断熱温度上昇量

得られた計測値をコンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に示される式で近似し、材齢と断熱温度上昇量の関係を図-7 に示す。空気量増大コンクリートの断熱温度上昇量は、普通コンクリートに比べて 5.3℃低減した。同書ではセメント量 250kg/m<sup>3</sup> 以上の配合における断熱温度上昇量の予測は、単位セメント量で整理されており、おおよそ単位セメント量が 10kg/m<sup>3</sup> 低減すると断熱温度上昇量が 1℃低くなること示されている<sup>9)</sup>。空気量増大コンクリートの単位セメント量は、普通コンクリートと比較して 46kg/m<sup>3</sup> 低減していることから、今回の測定結果はおお

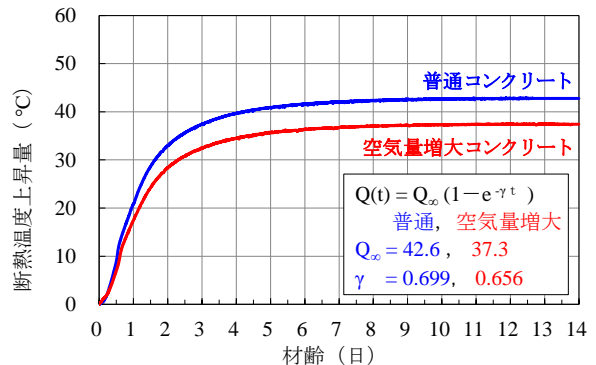


図-7 断熱温度上昇量の比較

むね妥当と判断でき、空気量増大コンクリートは、単位セメント量を低減したことにより、断熱温度上昇量を低減できたと考えられる。また、空気量増大コンクリートは、断熱温度上昇速度の定数  $\alpha$  も小さくなっている。コンクリート中に空隙が多く存在することによる影響とも推測されるが、今後検討が必要である。

### (5) 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみの測定結果について、乾燥材齢と長さ変化率の関係を図-8 に示す。空気量増大コンクリートの長さ変化率は、普通コンクリートと比較して乾燥材齢 91 日時点で 106μ 小さくなった。空気量増大コンクリートの単位水量が小さいため、内部の水の逸散量が少ないことが影響したと考えられる。

### (6) 凍結融解抵抗性

相対動弾性係数の結果を図-8 に示す。空気量増大コ

ンクリートは普通コンクリートと比較して、300 サイクルの相対動弾性係数は 6%大きく、凍結融解抵抗性が向上する傾向にある。空気量増大コンクリートは普通コンクリートと比較して、気泡間隔係数が小さいこと、および凍結する単位水量が少ないことが要因と考えられる。

#### (7) 中性化深さおよび塩分浸透深さ

促進材齢 28 日の中性化深さおよび塩分浸透深さの結果を図-9 に示す。空気量増大コンクリートは普通コンクリートと同等であった。空気量を増大しても水セメント比を低減して圧縮強度を同程度にすることで、物質透過性も同程度になることを示す結果と考えられる。

#### 4.3 製造時 CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果の試算

コンクリート製造時の CO<sub>2</sub> 排出量の大半はセメントに由来するものであるため、その削減量は、単位セメント量を低減した量から試算できる。空気量増大コンクリートは、普通コンクリートに対して単位セメント量を 46kg/m<sup>3</sup> 低減できたことから、高炉セメント B 種 1kg あたりの CO<sub>2</sub> 排出量原単位<sup>7)</sup> 437g-CO<sub>2</sub>/kg を用いると、製造時の CO<sub>2</sub> 排出量を 20kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 削減できる試算となる。

このことから、空気量を増大することにより、特別な材料や設備を用いることなく、従来の普通コンクリートと同等の流動性と強度を確保しつつ、製造時の CO<sub>2</sub> 排出量を削減できるコンクリートが得られることを確認した。

#### 5. まとめ

本研究では、空気量とセメント水比が圧縮強度に及ぼす影響、および空気量と単位水量が流動性に及ぼす影響を実験的に把握した。次に、これらの結果を踏まえ、空気量を増大することで、単位セメント量を低減できる配合を選定し、各種物性を検証した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 空気量の水準によらず、セメント水比と圧縮強度の関係は直線関係にある。ただし、空気量が大きいほど、セメント水比に対する圧縮強度の回帰直線の傾きが小さくなる。
- (2) 空気量が多いほど、同一スランプを得るために必要な単位水量を低減できる。スランプ 18cm の場合、空気量を 3%増大するごとに単位水量を約 10kg/m<sup>3</sup> 低減できる。
- (3) 一般的な空気量の普通コンクリートに対して、空気量を 3%増大させて、高性能 AE 減水剤を併用することで、同等の強度および流動性を有しながら、単位水量を 35kg/m<sup>3</sup>、単位セメント量を 46kg/m<sup>3</sup> 低減したコンクリートが製造できる。これにより、高炉セメント B 種の CO<sub>2</sub> 原単位から算出した CO<sub>2</sub> 排出削減量は 20kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> と試算される。
- (4) 上記の空気量増大コンクリートは、他の強度特性や

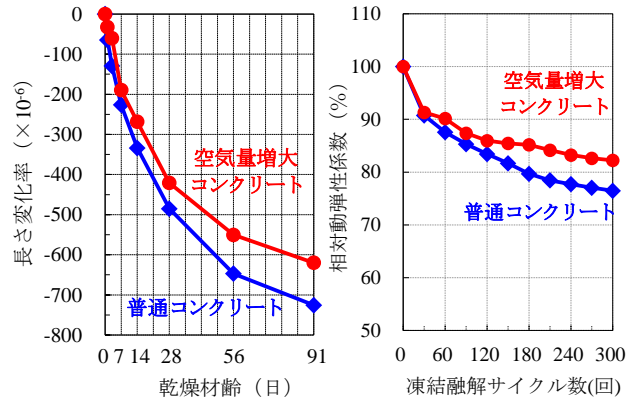


図-8 長さ変化率および凍結融解試験の比較

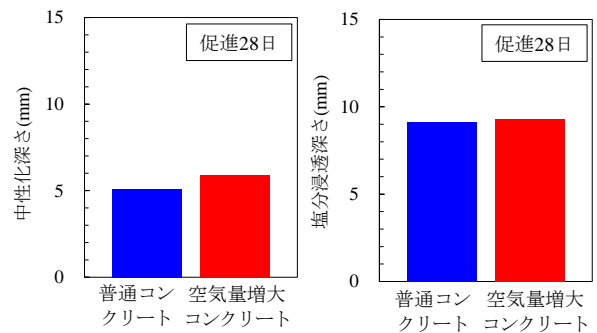


図-9 中性化深さおよび塩分浸透深さの比較

耐久性も普通コンクリートと同等である。また、温度上昇量を約 5℃、長さ変化率を約 100μ 低減できており、ひび割れ抑制にも効果的であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 日本建設業連合会：低炭素型コンクリートの普及に向けて、No.0237, pp.1-6, 2016
- 2) 日本コンクリート工学会：コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告書, 2016.6
- 3) 小長井宣生, 大橋猛, 根本任宏：気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメータ解析理論, 土木試験所月報, No.396, pp.2-8, 1986
- 4) 日本コンクリート工学協会：品質評価試験方法研究委員会報告書「コンクリートの断熱温度上昇試験方法(案)」, 1998.12
- 5) 桜井邦昭, 平田隆祥：生コンの鮮度を保ちコールドジョイントを防止する「フレッシュキープ工法」の開発, セメント・コンクリート, No.829, pp.39-45, 2016.3
- 6) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書設計編, pp.339-348, 2023.3
- 7) セメント協会：セメントの LCI データの概要, p.8, 2024