

空気量を増大したコンクリートの各種品質と施工性に関する基礎的検討

西澤 彩 桜井 邦昭
伊佐治 優

Fundamental Study on Various Qualities and Workability of Concrete with Increased Air Content

Aya Nishizawa Kuniaki Sakurai
Yu Isaji

Abstract

This study aims to reduce CO₂ emissions in concrete production by increasing air content to lower cement usage. Laboratory tests showed that a 3% increase in air content enabled a 3% reduction in the water-cement ratio, while maintaining workability, strength, and durability. Concrete was produced at a ready-mixed concrete plant, and the tests confirmed a stable quality over time and minimal air loss during pumping and placement. A mock-casting experiment also verified that the increased air content did not significantly decrease during compaction. Overall, this method reduced the cement use and CO₂ emissions by approximately one-tenth, demonstrating its practical feasibility for sustainable concrete production.

概要

コンクリート製造時の CO₂ 排出量の低減を目的として、空気量を増大させることで単位セメント量を低減したコンクリートの技術成立性について検討した。まず、空気量を増大することによる単位水量および単位セメント量の低減効果や、空気量を増大したコンクリートの各種品質を調べた。次に、空気量を増大したコンクリートをレディーミクストコンクリート工場で製造し、製造からの時間経過に伴う品質変化を確認するとともに、模擬部材への打込み実験を行い、圧送および打込みによる品質への影響を確認した。その結果、空気量を従来に対し3%大きくした場合、水セメント比を3%小さくすることで、普通コンクリートと同等の流動性、強度特性および耐久性を確保しつつ、単位セメント量が低減でき、CO₂ 排出量を削減できた。また、空気量を増大したコンクリートは、圧送や締固めを行っても空気量の顕著な減少は認められないこと等を示した。

1. はじめに

地球温暖化の抑制に向けて、建設業界においても CO₂ 排出量の削減に関する研究開発が盛んに行われている。コンクリートの製造時の CO₂ 排出量の抑制には、セメント量を低減することが効果的であるため、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の産業副産物を多量に用いて、セメントに置換する検討が進められている。しかし、これらを用いたコンクリートを製造するには、材料の調達、専用の貯蔵・計量設備の整備などが課題となる。

そこで、汎用的な設備、材料を用いて CO₂ 排出量を低減できる新たな手法を確立することを目的として、コンクリート中の空気量を増大させ、単位セメント量を低減することを検討した。

コンクリートの空気量は、コンクリート標準示方書¹⁾では4~7%が標準とされ、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートでは、特に指定がない場合には4.5%（許容差±1.5%）が標準となっている。

空気量を増大すると、フレッシュコンクリートにおいては空気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が、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ことが既に明らかにされている²⁾。言い換えると、空気量を増やすことは、①同等の流動性の確保に必要な単位水量が低減され、単位セメント量を低減できる可能性がある一方で、②同等の強度を確保するために水セメント比を小さくする必要があり、単位セメント量が増加する可能性もある。前者と後者の単位セメント量の変化は、増加させる空気量の大きさ、要求される圧縮強度や必要な流動性により相違すると考えられる。

そこで、本研究では、まず、空気量を増大させることが、コンクリートの流動性や圧縮強度に与える影響を把握した。そして、空気量4.5%の普通コンクリートと同等の品質（流動性、強度特性および耐久性）を有しつつ、単位セメント量を低減し、CO₂ 排出量を削減できるコンクリートが技術的に成立するかどうかを検討した。次に、空気量を増大したコンクリートの実工事への適用を想定して、施工現場までの運搬、圧送および打込みによる品質の変化を検討するとともに、実物大の模擬部材を製作し、硬化後の品質を検証した。

Table 1 配合および品質試験結果（空気量と水セメント比が圧縮強度に及ぼす影響）

Mix Proportions and Quality Test Results: Effects of Air Content and Water-Cement Ratio on Compressive Strength															
設定 空気量 (%)	W/C	C/W	s/a	単位 ペースト 容積 Vp (L/m ³)	単位量 (kg/m ³)				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 ³)
1.5	65	1.54	51.1	279	175	269	962	960	0.8	-	0.0015	12.0	25.0	1.9	2358
	60	1.67	50.6	286		292	942					12.5	25.5	1.5	2378
	55	1.82	50.0	295		318	920					13.5	27.5	1.8	2363
4.5	65	1.54	49.0	309		269	884			0.006	0.0005	18.0	34.0	4.9	2283
	60	1.67	48.4	316		292	864					18.5	33.0	4.6	2294
	55	1.82	47.7	325		318	842					19.5	35.0	5.0	2288
7.5	60	1.67	46.0	346		292	786			0.015	-	22.0	38.5	8.0	2221
	55	1.82	45.3	355		318	763					22.0	37.5	7.8	2219
	50	2.00	44.4	365		350	736					21.5	42.0	7.8	2202
10.5	55	1.82	45.5	353	155	282	768			0.015	-	17.0	27.0	10.6	2177
	50	2.00	41.6	395	175	350	658			0.050		22.5	41.5	10.0	2174
	45	2.22	40.4	408		389	624			0.030		22.0	37.5	10.0	2182

2. 空気量と水セメント比が圧縮強度に及ぼす影響

本章では、空気量と水セメント比を種々に変化させたコンクリートの圧縮強度を把握し、空気量が圧縮強度に及ぼす影響を整理した。

2.1 試験概要

2.1.1 配合と使用材料 検討した配合を Table 1 に、使用材料を Table 2 に示す。配合は、単位水量および単位粗骨材量を一定として、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% の範囲で変化させた。空気量の目標範囲は上記の値に対し±1.0%とし、目標範囲となるよう AE 剤の添加量を調整した。単位水量を 175kg/m³としたが、空気量 10.5%、W/C55% の配合では材料分離が生じたため、単位水量を 155kg/m³とした。セメントには高炉セメント B 種を用いた。

2.1.2 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。練混ぜおよび試験体採取は気温20℃の室内で行った。

2.1.3 試験項目 フレッシュコンクリートの品質試験として、スランプ(JIS A 1101)、スランプフロー(JIS A 1150)、空気量(JIS A 1128)およびコンクリート温度(JIS A 1156)を行った。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。試験体は、翌日に脱型して、標準養生（20℃養生）を行い、材齢28日に圧縮強度(JIS A 1108)を測定した。

Table 2 使用材料

Materials of Concrete

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 ³
細骨材	S	陸砂、表乾密度2.61g/cm ³ 、吸水率1.88%、粗粒率2.72、実積率69.3%
粗骨材	G	砕石、最大寸法20mm、表乾密度2.72g/cm ³ 、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

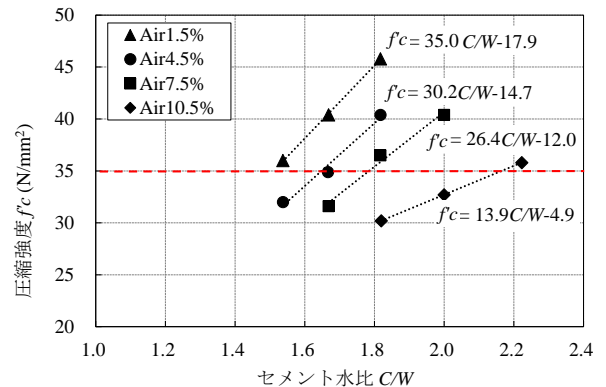


Fig. 1 セメント水比と圧縮強度の関係
Relationship between Cement- Water Ratio and Compressive Strength

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 Fig. 1 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

Table 3 配合および品質試験結果（空気量と単位水量がスランプに及ぼす影響）
Mix Proportions and Quality Test Results: Effects of Air Content and Water Content on Slump

混和剤 種類	目標 空気量 (%)	目標ス ランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位 ペースト 容積 Vp (L/m ³)	単位量(kg/m ³)				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/m ³)
AE 減水剤	1.5	18	60	49.5	301	185	308	902	960	-	0.8	-	0.0015	18.5	31.5	1.6	2355
	4.5			48.4	316	175	292	864				0.006	0.0005	18.5	33.0	4.6	2294
	7.5			47.3	330	165	275	826				0.009	-	20.0	32.0	8.4	2207
	10.5			46.1	345	155	258	788				0.015	-	18.5	29.5	11.0	2162
高性能 AE 減水剤	1.5			51.6	270	165	275	983		1.0	-	-	0.0015	19.0	35.5	0.8	2388
	4.5			50.6	285	155	258	945				0.003	0.0005	19.0	34.0	5.5	2290
	7.5			49.6	300	145	242	907				0.003	-	20.0	33.5	7.0	2274
	10.5			48.5	314	135	225	869				0.007	-	17.5	29.5	10.6	2189

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増大すると推測され、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異なるものと考えられる。単位セメント量を最小するために最適な空気量の大きさについて、今後検討していく必要がある。

今回の試験結果によると、目標とする圧縮強度を仮に 35N/mm²（図中赤点線）とした場合、空気量を 4.5% から 7.5% に、3% 増大すると、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。

なお、Table 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、空気量が増大するほどスランプが大きくなっている。これは、空気のボールベアリング効果や、空気量の増大により単位ペースト容積（表中 Vp）が増大したためと考えられる。

3. 空気量と単位水量がスランプに及ぼす影響

本章では、空気量を増大することが所定の流動性の確保に必要な単位水量の低減効果を把握することを目的に、空気量を種々に変化させたコンクリートの試験練りを行い、同一スランプの確保に必要な単位水量を検討した。

3.1 試験概要

検討した配合を Table 3 に示す。水セメント比および単位粗骨材量を一定とし、空気量を 1.5, 4.5, 7.5, 10.5% に変化させ、目標スランプ(18cm)が得られる単位水量を検討した。混和剤には、AE 減水剤(HWR)およびポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤(SP)を用い、混和剤の種類による影響も検討した。スランプおよび空気量の目標範囲は、目標値に対してそれぞれ±2.0cm, ±1.0% とした。高性能 AE 減水剤(SP)以外の使用材料および練混ぜ方法は 2 章と同様である。

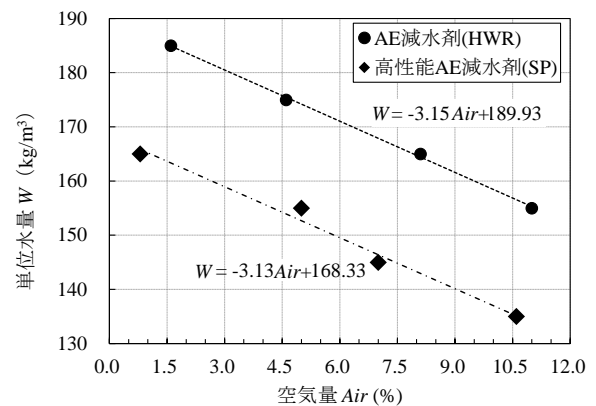


Fig. 2 目標スランプ 18cm の空気量と単位水量の関係
Relationship between Air Content and Unit Water Volume
for Target Slump of 18 cm

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 Fig. 2 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。空気量の増大による単位水量の削減効果は、混和剤の種類による違いはないが、高性能 AE 減水剤を使用し、かつ空気量を増大することにより、より単位水量を削減できる。なお、スランプが同等であっても、スランプの形状は異なり、空気量が大きいほど丸みを帯びた形状となった。これは、空気量の増大により単位ペースト容積（表中 Vp）が増大したこと等が影響したと考えられる。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異なる可能性もある。

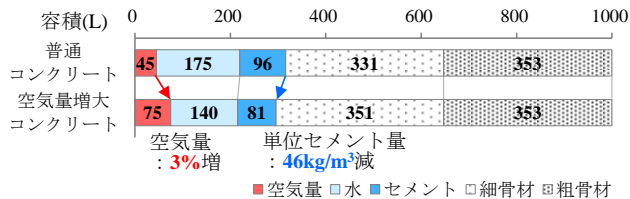
4. 空気量を増大したコンクリートの各種品質

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、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配合を選定し、各種品質試験を行い、空気量 4.5% の普通コンクリートと比較した。

Table 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）

Mix Proportions and Quality Test Results: Verification of Various Qualities of Concrete with Increased Air Content

コンクリート 種類	目標ス ランブ	目標 空気量 (%)	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)				品質試験結果				
					W	C	S	G	SP	HWR	AE1	AE2	スラン ブ (cm)	スラン ブ フロー (cm)	空気量 (%)	単位容 積質量 (kg/m ³)	コン クリート 温度 (°C)
普通 コンクリート	18	4.5	60	48.4	175	292	864	960	-	0.8	0.0060	0.0005	20.0	33.5	4.7	2286	20
空気量増大 コンクリート	18	7.5	57	49.9	140	246	917	960	1.0	-	0.0045	-	20.5	36.5	8.0	2250	20

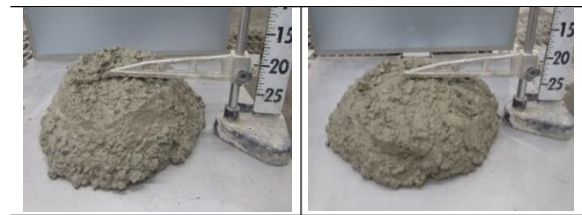
Fig. 3 コンクリート 1m³ 中の各材料の容積
Volume of Each Material in 1m³ of Concrete

4.1 試験概要

選定した配合を Table 4 に、コンクリート 1m³ 中の各材料の容積を Fig. 3 に示す。比較用の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/m³ として、混和剤に AE 減水剤を用いた。空気量増大コンクリートの空気量は 7.5% とした。2 章の結果を踏まえ、普通コンクリートと同等の圧縮強度を得るために水セメント比は 57% とした。3 章の結果を踏まえ、単位水量およびセメント量を大きく低減することを意図し、混和剤に高性能 AE 減水剤を用いた。結果として、単位水量を 35kg/m³、単位セメント量を 46kg/m³ 低減した配合が得られた。使用材料および練混ぜ方法は前章と同様である。目標スランブは 18±2.5cm とし、空気量の範囲は目標値に対し±1.0% とした。

品質試験結果を Table 4 に、スランブ試験状況の比較を Photo 1 に示す。硬化過程および硬化後の物性を比較するため、Table 5 に示す試験を行った。

なお、コンクリート製造時の CO₂ 排出量の大半はセメントに由来するため、その削減量は、単位セメント量の差から試算できる。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/m³ 低減できたことから、CO₂ 排出量を約 16% 低減できることになる。なお、文献³⁾に示される高炉セメント B 種の CO₂ 排出量原単位(437g-CO₂/kg)を用いると、コンクリート 1m³ 当たり CO₂ 排出量を 20kg-CO₂ 削減できる試算となる。また、普通ポルトランドセメント (CO₂ 排出量原単位 775g-CO₂/kg) を用いた空気量 4.5% の普通コンクリートを基準の CO₂ 排出量として試算した場合は、普通ポルトランドセメントを高炉セメント B 種に変更し、さらに空気量を 7.5% に増大して単位セメント量を 1 割削減することで、コンクリート 1m³ 当たり CO₂ 排出量を 119kg-CO₂ 削減 (52.5% 削減) できる試算となる。



普通コンクリート 空気量増大コンクリート

Photo 1 スランブ試験状況

Slump Test Conditions

Table 5 各種品質の試験方法

Testing Methods for Various Qualities

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 ⁴⁾ (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 ⁵⁾	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

4.2 試験結果

4.2.1 気泡分布 気泡径ごとの空気量を Fig. 4 に示す。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り、空気量を増大した場合でも、硬化に伴う空気量の変化は小さいことを確認できた。また、空気量増大コンクリートは、普通コンクリートに対して、いずれの気泡径においても一様に空気量が増大しており、気泡間隔係数は 100μm 程度小さくなっていた。凍害に対する

耐久性は、気泡間隔係数が小さいほど高くなるため⁶⁾、空気量増大コンクリートは、凍害に対して有効となる。

4.2.2 硬化過程および強度発現 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Fig. 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。空気量の増加と高性能AE減水剤の併用により単位水量を35kg/m³低減しており、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、沈降ひび割れや砂すじの発生抑制に効果的と考えられる。空気量増大コンクリートの凝結時間や若材齢時の強度発現性は、普通コンクリートと同等以上であり、空気を増加することが、これらの品質に影響を及ぼさないことを確認できた。

4.2.3 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Fig. 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、空気量を増大しても、水セメント比の調整により普通コンクリートと同等の圧縮強度を有していれば、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。

4.2.4 断熱温度上昇量 断熱温度上昇量の測定結果をFig. 7に示す。また、得られた計測値からコンクリート標準示方書⁷⁾の近似式を用いて求めた、終局断熱温度上

昇量 Q_{∞} 、温度上昇速度に関する定数 γ を図中に示す。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℃(約12%)低減した。同書では、単位セメント量が約10kg/m³低減すると断熱温度上昇量が1℃低減することが示されている⁷⁾。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/m³低減していることから、今回の測定結果はおお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。

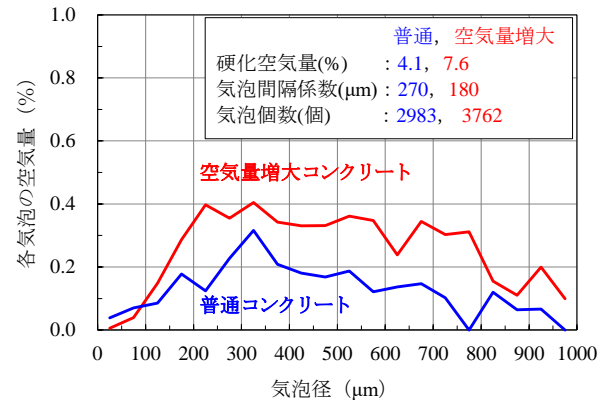


Fig. 4 気泡径ごとの空気量の比較
Comparison of Air Content by Bubble Diameter

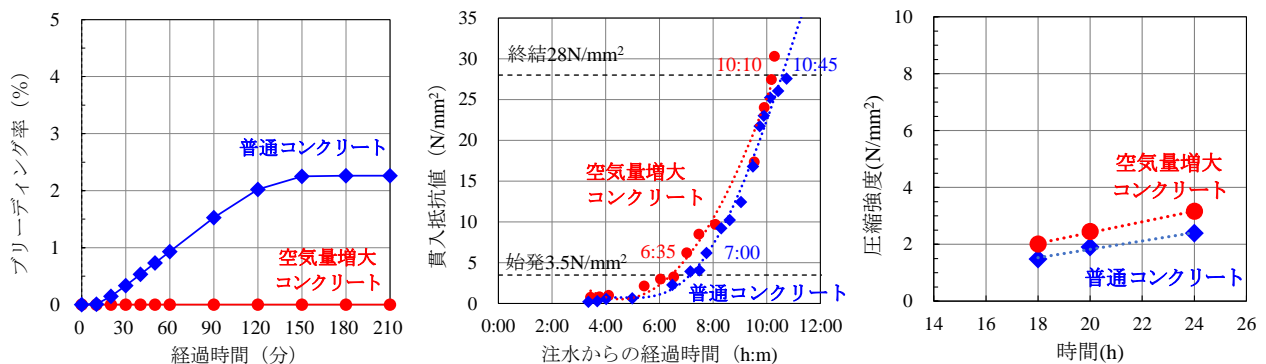


Fig. 5 ブリーディング、凝結時間および若材齢圧縮強度の比較
Comparison of Bleeding, Setting Time, and Compressive Strength of Young Age Materials

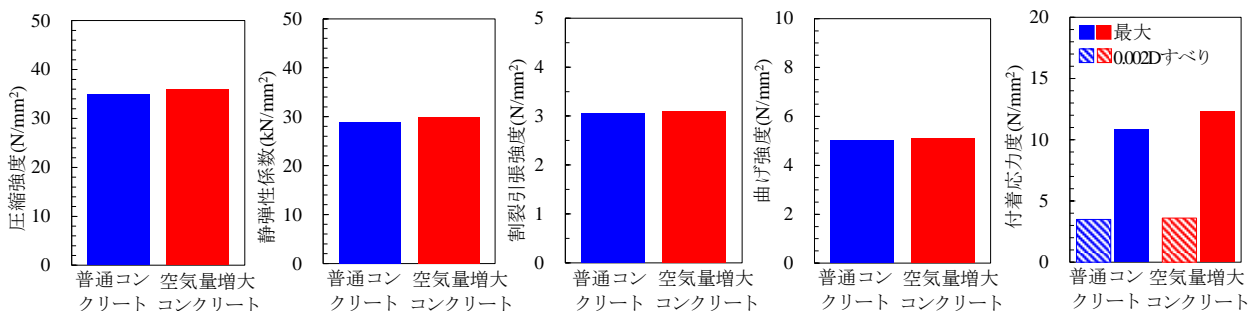


Fig. 6 強度特性 (圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度、曲げ強度および付着応力度) の比較

Comparison of Strength Properties

(Compressive Strength, Static Elastic Modulus, Tensile Strength, Flexural Strength, and Adhesion Stress)

4.2.5 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Fig. 8 (左) 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182日で 110×10^{-6} 小さくなった（低減率約14%）。空気量増大コンクリートの単位水量が小さいため、水の逸散量が少ないことが影響したと考えられる。乾燥収縮によるひび割れに対しても有効であると考えられる。

4.2.6 凍結融解抵抗性 凍結融解試験結果をFig. 8 (右) に示す。空気量増大コンクリートの凍結融解300サイクル後の相対動弾性係数は、普通コンクリートに対して6%大きく、凍結融解抵抗性が向上していた。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が要因と考えられる。

4.2.7 中性化深さおよび塩分浸透深さ 中性化深さおよび塩分浸透深さの結果をFig. 9に示す。いずれも、空気量増大コンクリートと普通コンクリートは同等の値が得られた。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とすれば、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。

5. 運搬の時間経過に伴う品質への影響

本章では、レディーミクストコンクリート工場の実機ミキサで空気量増大コンクリートを製造し、トラックアジテータに積載して、運搬を模擬した時間経過に伴う品質の変化を調べた。

5.1 試験概要

5.1.1 配合と使用材料 配合をTable 6に、使用材料をTable 7に示す。比較する普通コンクリートには、レディーミクストコンクリート工場の21-18-20BBを用いた。なお、空気量は4.5%であり、混和剤にはAE減水剤およびAE剤を用いた。空気量増大コンクリートは、目標とする空気量を7.5%として、普通コンクリートと同じAE剤を用いて調整した。普通コンクリートと同等の圧縮強度を得るため、水セメント比は57%に設定した。単位粗骨材量は普通コンクリートと同一として、目標スランブ18cmが得られる単位水量を検討した。また、混和剤には工場で常備する高性能AE減水剤を用いた。

試し練りの結果、普通コンクリートに対し、空気量増大コンクリートは、単位水量を 30kg/m^3 、単位セメント量を 37kg/m^3 低減する配合に決定した。セメント量の低減から試算すると、空気量増大コンクリートの CO_2 排出量は、普通コンクリートに対し約 12%低減できた。

5.1.2 製造方法 レディーミクストコンクリート工場の実機ミキサ（容量 2.75m^3 ）を用い、1バッチの練混ぜ量は 2m^3 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普通コンクリートは25秒間練り混ぜ、高性能AE減水剤を用いた空気量増大コンクリートは40秒間練り混ぜた。コンク

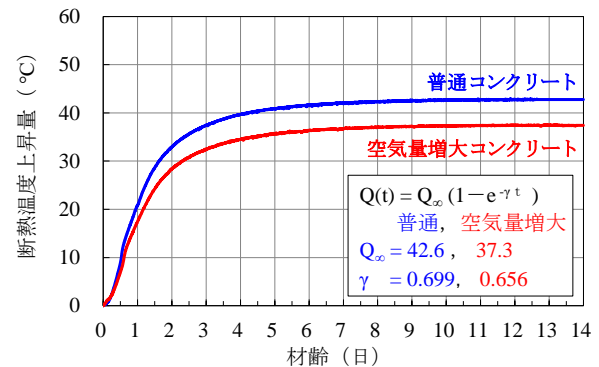


Fig. 7 断熱温度上昇量の比較
Comparison of Adiabatic Temperature Rise

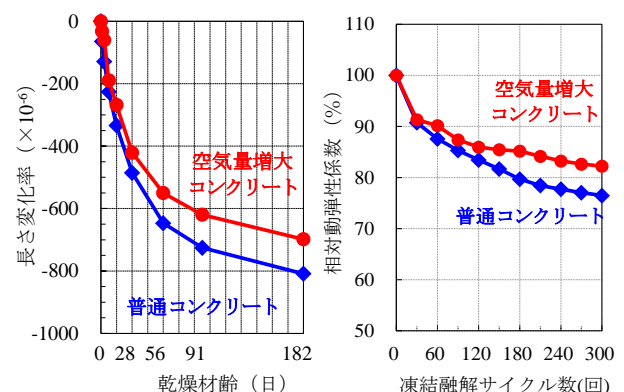


Fig. 8 長さ変化率および凍結融解試験結果の比較
Comparison of Length Change Ratio and Freeze-Thaw Test

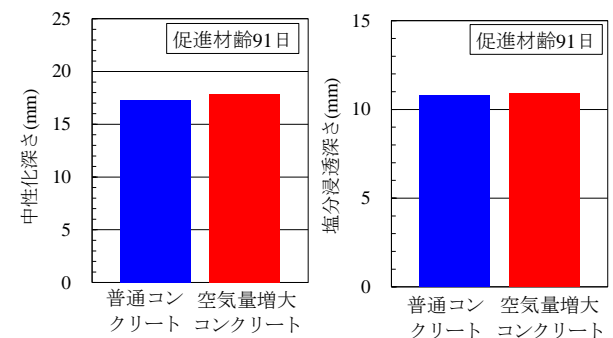


Fig. 9 中性化深さおよび塩分浸透深さの比較
Comparison of Carbonation Depth and Chloride Penetration Depth

リートは、2バッチ製造してトラックアジテータに積載した。空気量増大コンクリートは、トラックアジテータに「フレッシュキープ工法」のスランブ保持剤⁸⁾を後添加し、120秒間の高速攪拌を行った。

5.1.3 時間経過に伴う品質変化の試験方法 現場への運搬および荷卸しを模擬して、トラックアジテータを低速で攪拌（アジテート）し、製造から10, 30, 60, 90, 120分後に品質試験を行うとともに、30分以降では円柱供試体($\phi 100 \times 200\text{mm}$)を採取した(JIS A 1132)。なお、空気

Table 6 配合（レディーミクストコンクリート工場）
Mix Proportions (Ready-Mixed Concrete Plant)

コンクリート 種類	目標 スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							混和剤添加量 (C×%)		
					W	C	S1	S2	S3	G1	G2	SP	HWR	AE
普通 コンクリート	18	4.5	60	48.2	180	300	432	235	256	466	466	-	1.10	0.0045
空気量増大 コンクリート	18	7.5	57	49.2	150	263	449	245	266	466	466	0.85	-	0.0045

Table 7 使用材料
Materials of Concrete

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 ³
細骨材	S1	砕砂, 表乾密度2.65g/cm ³ , 絶乾密度2.64g/cm ³ , 粗粒率2.70, 微粒分量3.0±2.0%
	S2	電気炉酸化スラグ, 表乾密度3.61g/cm ³ , 絶乾密度3.57g/cm ³ , 粗粒率3.20, 微粒分量0.1%
	S3	川砂, 表乾密度2.62g/cm ³ , 絶乾密度2.59g/cm ³ , 粗粒率2.90, 微粒分量3.0%以下
粗骨材	G1	碎石1505, 表乾密度 2.66g/cm ³ , 絶乾密度2.64g/cm ³ , 粗粒率6.40, 微粒分量0.5±0.5%
	G2	碎石2010, 表乾密度 2.66g/cm ³ , 絶乾密度2.64g/cm ³ , 粗粒率7.00, 微粒分量0.5±0.5%
混和剤	SP	高性能AE減水剤, ポリカルボン酸系
	HWR	AE減水剤(高機能型), リグニンスルホン酸及びポリカルボン酸系
	AE	AE剤
水	W	地下水, 上澄み水

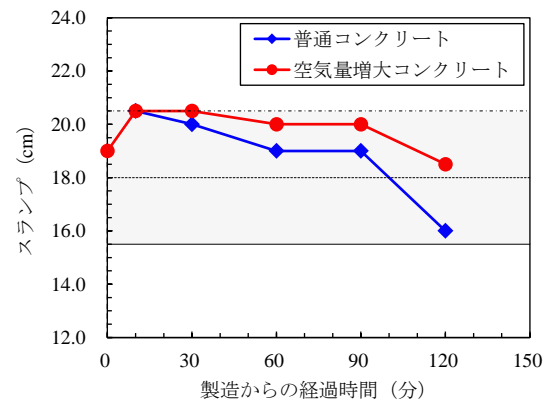
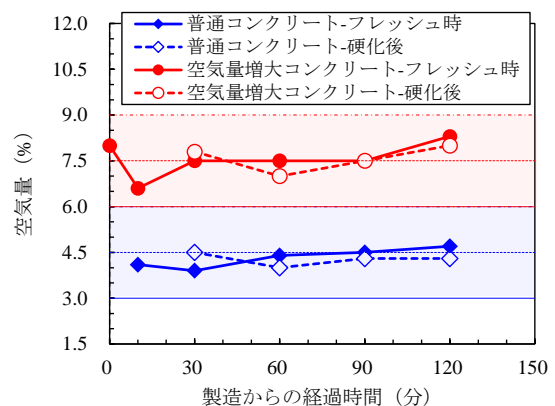
量増大コンクリートは、スランプ保持剤添加前の品質も確認した（製造0分時点とする）。

フレッシュコンクリートの品質試験として、スランプ(JIS A 1101), スランプフロー(JIS A 1150), 空気量(JIS A 1128)およびコンクリート温度(JIS A 1156)を測定した。目標とする品質は、製造から30分後にスランプが18±2.5cm以内、空気量がそれぞれの目標値に対して±1.5%以内とした。なお、実験は9月下旬に屋外で行い、外気温は25～28℃であった。

採取した円柱供試体は、翌日から標準養生（20℃水中養生）を行った。材齢28日に圧縮強度試験(JIS A 1108)を行った。また、4章と同様に、円柱供試体の中央部を切断し、4断面60×60mmの領域を面積法（1分画4mm）により、硬化後の空気量を確認した。

5.2 試験結果

スランプの経時変化をFig. 10に、フレッシュ時と硬化後の空気量の経時変化をFig. 11に示す。スランプは、経時90分までは普通コンクリートおよび空気量増大コンクリートともに安定していた。120分後に若干低下したものの、目標範囲は確保できていた。フレッシュ時の空気量

Fig. 10 スランプの経時変化
Temporal Changes in SlumpFig. 11 フレッシュおよび硬化後の空気量の経時変化
Temporal Changes in Air Content
at Fresh and Hardened Stages

は、経時120分まで、普通コンクリートおよび空気量増大コンクリートともに安定しており、変化はほとんど認められなかった。また、各時間に採取した供試体にて測定した硬化後の空気量は、フレッシュ時の空気量とほぼ同等であった。また、空気量増大コンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートと同等であることを確認した。

以上の結果から、空気量増大コンクリートは、市中のレディーミクストコンクリート工場で容易に製造でき、時間経過に伴うスランプや空気量の顕著な変化は生じないことを確認した。

6. 圧送および打込みによる品質への影響

本章では、空気量増大コンクリートの実施工への適用を意図し、実際に圧送して柱状およびハンチ状の模擬部材に打ち込んだ。圧送、打込みおよび締固めの各段階におけるコンクリート中の空気量の変化を確認するとともに、硬化過程における試験体内部の温度を測定し、空気量増大コンクリートの適用による温度低減効果を調べた。脱型後は、表面気泡の発生状況を調べ、仕上がりを確認するとともに、コア供試体採取して打ち込んだコンクリートの硬化後の品質を調べた。

6.1 試験概要

6.1.1 製造および圧送方法 5章と同じレディーミクストコンクリート工場にてTable 6の普通コンクリートおよび空気量増大コンクリートの2配合を製造した。製造方法も5章と同様である。コンクリートポンプには、吐出量160m³/h、吐出圧力8.5MPa、ブーム長23.8mの機種を用いた。コンクリートを製造して30分後に、目標品質が得られたことを確認した後、コンクリートポンプに荷卸しを行い、後述する2種類の型枠に圧送して打ち込んだ。なお、実験は11月上旬に屋外で行い、外気温は21～23℃であった。

6.1.2 試験体の概要および温度の測定方法 型枠の概要をFig. 12に、打込み状況をPhoto 2に示す。型枠は、柱状とハンチ状の2種類を用いた。柱状の型枠は、1層の打込み高さを450mmとして4層に分けて打ち込んだ。各層の打込み後、φ50mmの高周波バイブレータを用いて、隅角部4か所と中央部1か所の計5か所に各5秒間の締固めを行った。

ハンチ部を模擬した型枠には、中心部と表層部に熱電対を設置して、内外温度差および温度上昇量を測定した。コンクリートは2層に分けて打込み、柱状試験体と同様にバイブレータによる締固めを行った。熱電対による温度の測定期間は脱型するまでの5日間とし、合板型枠を存置して養生した。試験体の外部の外気温も併せて計測した。いずれの試験体も材齢5日に脱型し、屋外で暴露した。

6.1.3 圧送および打込みによる品質試験方法 製造30分後の圧送前の品質試験結果に対する圧送および打込みによる品質の変化を確認するため、圧送後に筒先から採取した試料および圧送後にバイブレータで締固めを行った試料の品質試験結果を比較した。各品質試験時に、円柱供試体(φ100×200mm)を採取し、2章と同様に圧縮強度および硬化後の空気量の測定を行った。

6.1.4 表面気泡面積率の測定方法 材齢5日で脱型し、仕上がり状況を確認した。柱状試験体の側面とハンチ状試験体のハンチ部の表面気泡面積率を、撮影した画像の二値化処理により算出した。

6.1.5 コア採取および試験方法 Fig. 13 (左) に示すように柱状試験体の側面上部、中央部、下部から直径100mm×長さ850mmのコア供試体採取し、Fig. 13 (右)

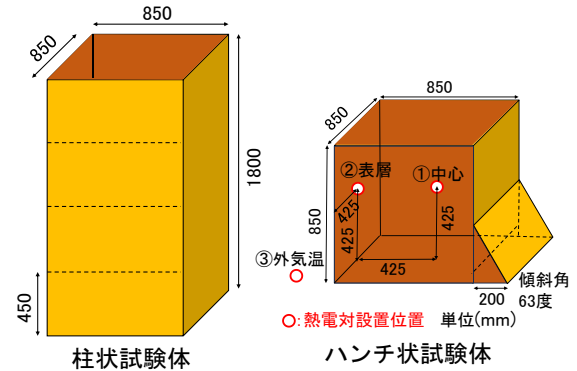


Fig. 12 型枠の概要
Overview of Formwork



Photo 2 打込み状況 (空気量増大コンクリート)
Placement Conditions (Concrete with Increased Air Content)

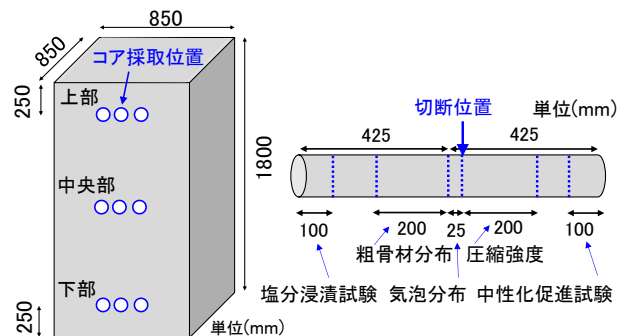


Fig. 13 コア供試体採取の位置と概要
Overview and Locations of Core Sample Collection

に示すようにコア中央部の断面の気泡分布(4章と同様の面積法)、粗骨材面積率(範囲:100×200mm)、圧縮強度(φ100×200mm)を測定した。また、コアの両端部は、それぞれ促進中性化試験(JIS A 1153)および塩水浸漬試験(JSCE-G527)を材齢28日から開始した。促進材齢91日に中性化深さ(JIS A 1152)および塩分浸透深さ(NDIS 3437)を測定した。

6.2 試験結果

6.2.1 圧送および打込みによる品質の変化 圧送前、圧送後、および締固めを実施した後のスランプおよび空気量の測定結果をFig. 14に示す。スランプは、圧送および締固めによる大きな低下は認められなかった。空気量は、空気量増大コンクリートと普通コンクリートのいずれにおいても、圧送および締固めにより若干減少する傾

向は認められるものの、空気量を大きくしたことによる顕著な違いは認められなかった。

6.2.2 試験体の温度上昇量 ハンチ状試験体における中心部および表層部のコンクリート温度の推移を外気温と合わせてFig. 15に示す。躯体中心部における温度上昇量は、普通コンクリートが16.4℃であるのに対し、空気量増大コンクリートが13.8℃であり、約2.6℃低減した。また、内外温度差は、普通コンクリートが5.6℃に対し空気量増大コンクリートが4.5℃であり、約1℃低減できた。空気量を大きくして単位セメント量を低減することは、CO₂排出量の低減のみならず、温度ひび割れの抑制にも

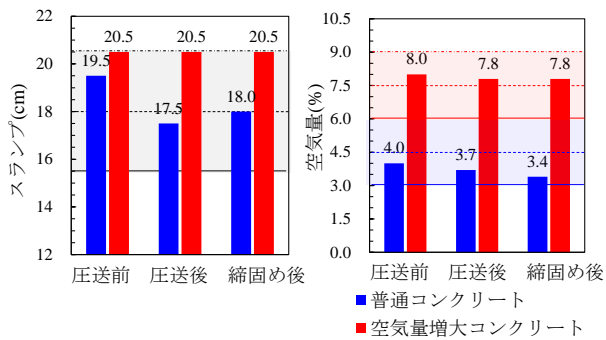


Fig. 14 圧送・締固め後のスランプおよび空気量
Slump and Air Content After Pumping and Compaction

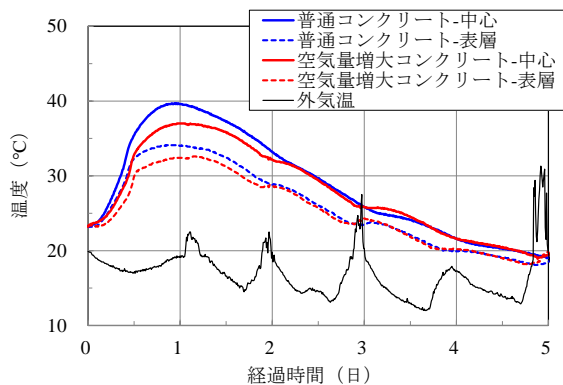


Fig. 15 中心部、表層部および外気温の温度変化
Temperature Variation of the Center, Surface, and Ambient Air of the Specimen

効果的であることを示す結果と考えられる。

6.2.3 試験体表面の仕上がり状況 脱型後の試験体をPhoto 3に示す。空気量増大コンクリートの柱状試験体の側面部の表面気泡面積率は0.7%であり、普通コンクリートの表面気泡面積率1.0%と同程度であった。ハンチ部の表面気泡面積率は、空気量増大コンクリートが2.2%で、普通コンクリートが1.4%であり、若干多い傾向にあるが、顕著な違いは認められなかった。今回実験した程度の空気量であれば、空気量を増大しても、仕上がり面の美観に大きな影響は及ぼさないと考えられる。

6.2.4 コア試験体の品質 柱状試験体より採取したコア供試体の硬化後の空気量、粗骨材面積率および圧縮強度の測定結果をFig. 16に、中性化深さおよび塩分浸透深さの結果をFig. 17に示す。空気量増大コンクリートの硬化後の空気量および粗骨材面積率は、採取した高さ方向の位置によらず、違いは認められなかった。コアの硬化後の空気量は、圧送前に採取した試験体と同等の空気

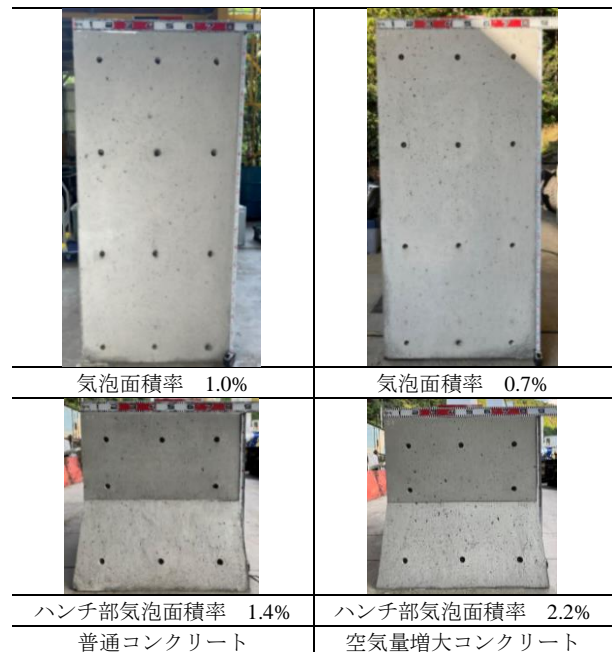


Photo 3 柱およびハンチ状試験体の脱型後の写真
Photographs of Column and Hunch Specimens

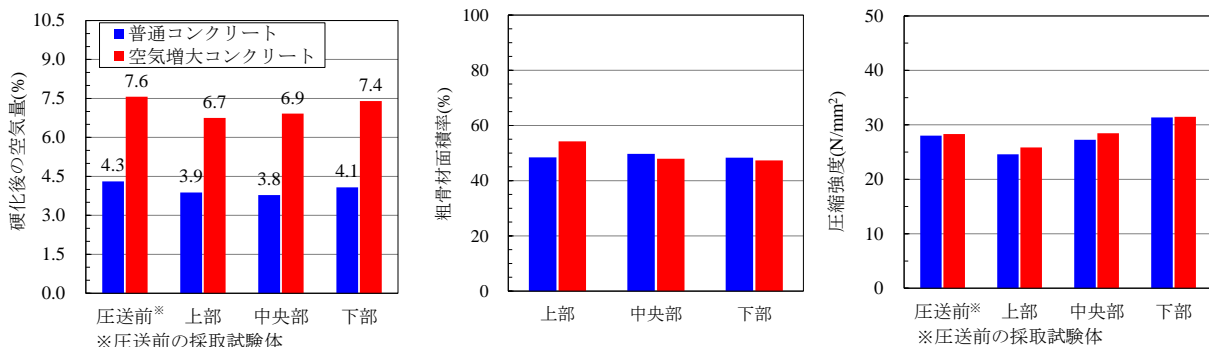


Fig. 16 コア供試体の空気量、粗骨材面積率および圧縮強度
Air Content, Coarse Aggregate Area Ratio, and Compressive Strength of Cured Core Specimens

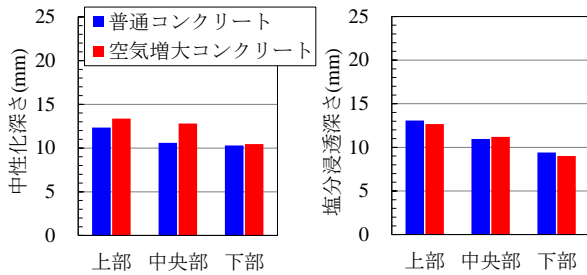


Fig. 17 中性化深さおよび塩分浸透深さ

Depth of Carbonation and Depth of Chloride Penetration

量であった。打込み後の粗骨材の沈降や気泡の上昇等の材料分離が生じていないことを裏付ける結果である。

圧縮強度は、上部ほど強度が低下する傾向が認められるが、空気量増大コンクリートは普通コンクリートと同様の傾向であった。柱状試験体の圧縮強度は、圧送前に採取した試験体と同等の圧縮強度が得られた。

中性化深さは、空気量増大コンクリートの方が若干大きい傾向が認められるものの大差がない結果であった。塩分浸透深さは普通コンクリートと同等であった。上下方向の違いも、圧縮強度と同様の傾向を示し、上部のほうが下部よりも浸透深さが若干大きい。普通コンクリートと同等であった。空気量を増大しても、同等の圧縮強度を確保することで、概ね同程度の耐久性を確保できることを示す結果と考えられる。

以上の結果から、空気量増大コンクリートは、普通コンクリートと同様の施工方法および手順で圧送、打込みおよび締固めを行うことが可能であり、同等の品質が得られることを確認した。

7. まとめ

コンクリート製造時のCO₂排出量を低減する新たな手法を確立するため、空気量を増大させて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を室内実験により確認した。次に、空気量増大コンクリートをレディーミクストコンクリート工場の実機ミキサで製造し、練上がりからの時間経過に伴う品質変化を調べるとともに、圧送および模擬部材への打込み実験を行うことで、実工事への適用性について検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 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。圧縮強度が35N/mm²程度では、空気量を3%大きくした場合、水セメント比を3%小さくすることで、同等の圧縮強度が確保できる。
- 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/m³低減できる。
- 3) 空気量を7.5%に増大することで、空気量4.5%のコン

クリートに対して、同等のスランプと圧縮強度を確保しつつ、単位セメント量を46kg/m³低減し、CO₂排出量を約16%低減できた。普通ポルトランドセメントを高炉セメントB種に変更し、さらに空気量を7.5%に増大した場合のCO₂排出量を試算すると、52.5%削減となる。

- 4) 普通コンクリートと圧縮強度が同等の場合、空気量増大コンクリートの他の強度特性や耐久性も普通コンクリートと同等である。一方、空気量を増やして単位水量および単位セメント量を低減する効果により、長さ変化率が約110×10⁻⁶ (約14%)、温度上昇量が約5℃ (約12%) 低減できており、ひび割れ抑制に効果的である。
- 5) 空気量増大コンクリートは、市中のレディーミクストコンクリート工場で容易に製造できる。また、練上がりからの時間経過、圧送および締固めに伴うスランプや空気量の変化は、普通コンクリートと同程度に小さい。
- 6) 空気量増大コンクリートを打ち込んだ柱部材の高さ方向における空気量や粗骨材量の変化は、普通コンクリートと同等であり、空気量を増やすことによる悪影響は認められない。

今回の結果を踏まえると、空気量を従来に対し3%程度増やしたコンクリートをレディーミクストコンクリート工場で製造し、コンクリート工事に適用することは技術的には可能と考えられる。今後、さらに空気量を増大した場合の各種品質や施工性に与える影響なども検討する。

参考文献

- 1) 土木学会：2023年制定コンクリート標準示方書施工編，pp.48-58，2023.9
- 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) セメント協会：セメントのLCIデータの概要，p.8，2024
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'23，p.69，2023
- 7) 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
- 8) 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