論文 打込みや締固めを受けたフレッシュコンクリートの空気量および粗 骨材の変動の把握

高橋 駿人*1·鈴木 将充*2·加藤 佳孝*3

要旨:打込みや締固めがフレッシュコンクリートの空気量や材料分離に与える影響を実験的に検討したところ,打込みは高さが1m以下だと空気を巻き込むが,それ以上に高くなると空気量が減少する傾向が見られ, 粗骨材残存率にも影響を与えることが明らかになった。また締固め時の分離程度の違いで,空気の残留程度 に影響を与えることが示唆された。さらに締固めによる材料分離程度を推定する簡易な手法の適用性につい て検討したところ,締め固めた試料の空気量と質量の測定値から推定した粗骨材残存率は,洗い分析による 粗骨材残存率と同程度となり,簡易に把握することが可能であることが示唆された。 キーワード:フレッシュコンクリート,施工,打込み,締固め,空気量,材料分離

1. はじめに

コンクリート構造物に要求される性能を確保するため には、適切な配合設計、製造、運搬、打込み、締固め、 仕上げおよび養生が重要な要素となる。それらが適切に 行われないと、豆板や表面気泡、ひび割れ等の初期欠陥 が生じ、コンクリートの品質は低下する。また、コンク リートの品質低下は目視で確認できないコンクリート内 部で発生する場合がある。既往の研究によると、三浦ら ¹⁾は、凍害を生じたコンクリート構造物の実地調査を行 っており、実構造物から測定された硬化コンクリートの 空気量が、荷卸し時点の目標空気量の範囲より小さい値 を示し、受入れ検査時と硬化までの間、つまり施工中に 空気量が減少したことを示唆している。古川ら²⁾は、締 固めによる残存空気量の減少に関する報告をしている。 寺西ら³は、材料分離によりコンクリート中の粗骨材割 合が変化すると,水和熱による温度上昇や,静弾性係数, 乾燥収縮ひずみが大きく変動することを報告している。 これらの既往の知見に基づくと,施工時に生じる空気量 の変化や材料分離が硬化コンクリートの品質に影響を及 ぼす要因であると考えられる。そのため,コンクリート に要求される品質を確保するためには,施工後の残存空 気量と材料分離程度を定量的に把握することが重要であ る。

最近では、既往の空気量測定法を活用し、振動締固め に伴う空気量の減少量、つまり振動締固め後の残存空気 量の推定が可能であることが示唆されている⁴。また土 木学会⁵⁾では、振動締固めによる粗骨材の沈下量から材 料分離抵抗性を簡易に品質評価する試験について検討さ れている。また著者ら⁶⁾も、鉛直方向の粗骨材分布を洗 い分析で測定することで材料分離が把握できることを報

種類	記号	物性等				
水	W	上水道水 (密度 1.00g/cm ³)				
セメント	С	普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm ³)				
細骨材	S1	多摩産硬質砂岩砕砂 (表乾密度 2.70g/cm³, 粗粒率 2.82)				
	S2	市宿産細目洗砂 (表乾密度 2.57 g/cm³, 粗粒率 1.52)				
粗骨材	G	多摩産硬質砂岩砕石(表乾密度 2.67 g/cm³, 粗粒率 6.59)				
混和剤	Ad ₁	AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体)				
	Ad ₂	一液増粘型高性能 AE 減水剤				
		(ポリカルボン酸系化合物と界面活性剤系特殊増粘剤の複合体)				
	Ad ₃	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系化合物)				
	AE	AE 剤(樹脂酸系界面活性剤)				
	AD	空気量調整剤(ノニオン系界面活性剤)				

表-1 使用材料

*1 東京理科大学 理工学部土木工学科 助教 博士(工学) (正会員)

*2 東急建設(株) 技術研究所 土木材料 G 修士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 理工学部土木工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

記号	W/C	s/a		単位量(kg/m³)				化学混和剤 (C×%)					[SL]SF(cm)		Bq
		(%)	W	С	S	S2	G	Adı	Ad ₂	Ad ₃	AE	AD	目標	実測	(cm^3/cm^2)
SL12		43	167	334	673	113	1038	1.00	-	-	0.006	-	[12.0]	[14.5]	0.49
SF45	50	52	172	344	804	135	864	-	1.05	-	-	0.001	45.0	48.5	0.16
SF45-seg		50 52	177	354	795	134	853	-	-	0.80	0.002	-		45.5	0.24
SF55-seg		51	180	360	789	132	847	-	-	1.20	0.002	-	55.0	49.5	0.67
SF65	35	53	173	500	758	127	782	-	-	1.00	0.002	-	65.0	61.5	0.01

表-2 コンクリートの配合表

告している。

これらの既往の研究で報告されている手法を組み合 わせることにより,施工によるフレッシュコンクリート の空気量の変動と材料分離を包括的に把握する手法が提 案可能であると考えられる。そこで本研究では,その基 礎的な研究の始まりとして打込みと締固めに着目し,フ レッシュコンクリートの打込みおよび締固め後の残存空 気量と材料分離程度を実験的に理解することを目的とし た。さらに,文献5)に記載の粗骨材の沈下量評価試験を 参考にした手法から,振動締固めを受けた場合のフレッ シュコンクリートの空気の残留程度や粗骨材残存量など の変動を把握する手法を検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料,表-2 にコンクリートの配合およ びフレッシュ性状の試験結果を示す。コンクリートの配 合は, 各配合で, 目標スランプ (SL) /スランプフロー (SF) が異なる配合とした。また SF45-seg, SF55-seg ではそれ ぞれ目標 SF45, 55cm のコンクリートで材料分離を引き 起こす狙いで、単位水量の増加と高性能 AE 減水剤への 変更により、コンクリートの粘性を小さくする配合とし た。目標空気量は4.5%とした。コンクリートのフレッシ ュ性状試験は JIS A 1101 コンクリートのスランプ試験方 法, JISA1150 コンクリートのスランプフロー試験方法, JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気室圧力方法に 準拠して行った。また JIS A 1123 コンクリートのブリー ディング試験方法を参考にブリーディング量 $B_a(\text{cm}^3/\text{cm}^2)$ を測定した。SF45-segの B_a はSF45の B_a より も大きくなっている。また SF45-seg, SF55-seg は, スラ ンプフロー時の先端のペーストの走り方や光沢等の目視 観察からも分離していると判断した。

2.2 エアメータを用いた打込み・締固め試験(試験1)

練混ぜ直後のフレッシュコンクリート試料を、エアメ ータの容器を用いて打込み・締固めを加えた場合の空気 量測定および粗骨材の洗い分析をする。表-3 に各配合 の打込み高さ、締固め時間の実験水準を示す。打込みが 空気量に与える影響を把握するため、打込み高さが 0.5、

表-3 試験1の各配合の実験水準

記号	実験水準({打込み高さ}×{締固め時間})
SL12	$\{0,1m\}\times\{0,5,15s\},\ \{0.5m\}\times\{0s\},\ \{2m\}\times\{0s\}$
SF45	$\{0,1m\}\times\{0,3,5,10s\},\ \{0.5m\}\times\{0s\},\ \{2m\}\times\{0s\}$
SF45-seg,	$(0, 1_m) \times (0, 5, 10_m)$
SF55-seg	$\{0,1m\} \land \{0,3,10s\}$
SF65	$\{0,1m\} \times \{0s\}$



図-1 打込み後の空気量測定の概要

1, 2mの場合で空気量 Air_{m1} (%)を測定する。0mの場合 は受け入れ時の品質管理を想定し、JISA 1128 フレッシ ュコンクリートの空気室圧力方法に準拠した空気量を測 定する。打込み高さが0.5, 1, 2mの場合は、図-1に示 すように、円筒パイプを用いて自由落下させた試料をエ アメータに打込み、突き固めは行わずに空気量 Air_{m1} (%) を測定する。これは、0mは受け入れ時の品質管理の空気 量を、0.5, 1, 2mの場合は実施工の打込み時の空気量を それぞれ想定しており、両者の差を比較したかったため である。また同時に試料の質量 W_1 (kg)を測定し、式(2)か ら推定空気量 Air_c (%)を算出する。これは空気量を測定せ ず簡易に空気量の変動を把握できるかを検討するためで ある。

$$Air_{c} = Air_{m1-0} + \frac{W_{1} - W_{d}}{W_{d}} \times 100$$
⁽²⁾

ここに, Air_{m1-0} : 打込み高さ 0m の場合の空気量(%), W_d : 配合上のエアメータ中のコンクリート試料の質量 (kg)である。

締固めが空気量に与える影響を把握するため、打込み 高さが0,1mの場合では締固めを行う。締固めは棒状バ イブレータを用いてエアメータ上部から15cm挿入して、 表-3 に示すように各配合で設定した時間で締固めを行 う。なお SF65 については締固めを行っていない。締固 め後に、注水法により空気量を測定し、測定した空気量 とAirm1の差分から空気量変動量を算出する。さらに、注 水された上層の水を切った上で,上層から1.4Lの試料を 採取し、粗骨材の洗い分析を行い、配合の粗骨材量との 割合から粗骨材残存率X1(%)を算出する。なお打込み高 さ 0m の場合では、洗い分析は実施していない。

2.3 粗骨材の沈下量評価試験(試験2)

(1) 試験方法

文献 5)記載の粗骨材の沈下量評価試験を参考に、後述 する試験を行う。図-2 に試験の概要,表-4 に各配合 の締固め時間の水準を示す。練混ぜ直後のフレッシュコ ンクリートを約 20 リットルの容器に投入し、棒状バイ ブレータを容器上部から 15cm 挿入し,表-4 に示すよ うに各配合で設定した時間で締固めを行う。0, 10, 20s で行う。その後、容器の上部からエアメータ容積分の7L の試料を採取し、空気量Airm2と質量W2(kg)を測定し、粗 骨材の洗い分析を行って,配合の粗骨材量との割合から 粗骨材残存率X₂(%)を算出する。

また、洗い分析ではなく簡易に粗骨材残存率の推定を 検討するため、測定した空気量および試料の質量から、 後述する2つの方法で粗骨材残存率を推定する。1つは モルタルの見掛けの体積から算出(以下,見掛けの体積 法と称する。)し、その2はセメント粒子への水の浸潤に よる容積の減少を考慮したモルタルの単位容積質量から 算出(以下、単位容積質量法と称する。)している。

(2) 見掛けの体積法

試料の質量W2(kg)は式(3)のように表せる。

 $\rho_{mor} - \rho_{agg}$

 $W_2 = \rho_{mor} \times V_{mor} + \rho_{agg} \times (1 - Air_{m2} - V_{mor}) \quad (3)$ ここに, pmor: 配合上のモルタルの密度(kg/m³), Vmor: モルタルの体積(m^3), ρ_{agg} : 粗骨材の密度(kg/m^3)である。 式(3)をVmorについて解くと、式(4)のように表せる。

$$V_{mor} = \frac{W_2 + \rho_{agg} \times (1 - Air_{m2})}{\rho_{agg} - \rho_{agg}}$$
(4)

式(4)から得られた V_{mor} を用いて、粗骨材の質量 $G_E(kg)$ を式(5)から推定し、式(6)から粗骨材残存率X3(%)を算出 する。

$$G_E = \rho_{agg} \times (1 - Air_{m2} - V_{mor}) \tag{5}$$

$$X_3 = \frac{G_E}{C} \times 100 \tag{6}$$

ここに, G: 配合上の粗骨材量(kg)である。

(3) 単位容積質量法

空気量を除いたモルタルの単位容積質量γm (kg/m³)は

表-4 試験2の各配合の実験水準

記号	実験水準{締固め時間}				
SL12, SF45	{0,10,20s}				
SF45-seg, SF55-seg	$\{0,10s\}$				
SF65	{0s}				



式(7)で求められる。

$$\gamma_m = \frac{W + C + S}{W/\rho_w + C/\rho_c + S/\rho_s - 0.01C} \tag{7}$$

ここに, W, C, S:計画配合上の単位水量,単位セメ ント量,単位細骨材量(kg), ρ_w , ρ_c , ρ_s :水,セメント, 細骨材の密度(kg/m³)である。なお、Cに 0.01 を乗じてい るのは、セメントが水に吸水された際に容積が減少する 分の補正である。

配合上の空気量を除いた容積に対する粗骨材容積率 g_1 は式(8)で求められる。

$$g_1 = \frac{G/\rho_g}{1 - 0.01 A i r - 0.00001 C}$$
(8)

ここに、 ρ_a: 粗骨材の密度(kg/m³), Air: 配合上の空気 量(%)である。

エアメータ中に採取されたコンクリート試料の空気を 除いた単位容積質量_{γ2} (kg/m³)は式(9)で求められる。

$$\gamma_2 = \frac{W_2}{V(1 - 0.01 A i r_{m2})} \tag{9}$$

ここに、W2:試料の質量(kg)、V:エアメータの容器の 容積(m³), Airm2: 測定空気量(%)(なお, 骨材修正係数で 補正している)

 $\gamma_2 \epsilon \rho_a \geq \gamma_m \geq 0$ 関係で表すと式(10)になる。

$$\gamma_2 = \rho_g \cdot g_2 + \gamma_m (1 - g_2) \tag{10}$$

ここに、g2:空気量を除く試料中の粗骨材容積率であ

る。

これをg2について解くと以下のようになる。

$$g_2 = \frac{\gamma_2 - \gamma_m}{\rho_g - \gamma_m} \tag{11}$$

粗骨材残存率X₄(%)は以下のように算出される。

$$X_4 = \frac{g_2}{q_1} \times 100$$
 (12)

3. 実験結果

3.1 試験 1

(1) 打込みの影響

図-3 に打込み高さと空気量の関係を示す。なお、これは全て締固め時間 0s の結果である。これによると、 SL12、SF45、SF45-segでは、突き固めを行った 0m の値 と比較して、打込み高さが 1m 以下では空気量は増加す る傾向にあるが、2m だと空気量は減少している。勝畑ら つは 1.5、4.0m の打込み高さで落下させた場合は、配合に かかわらず打込み高さに比例して空気量が減少し、4.0m の場合では空気量の減少率が 20~30%程度減少している ことを報告している。これは打込み高さの増加に伴い、 位置エネルギーによる衝撃が大きくなり空気が抜けやす いが、1m 以下の高さではその衝撃が小さく空気が抜け ずに大きく巻き込みやすいと考えられる。

図-4にAir_cとAir_mの関係を示す。これによると、配合 に関わらず良い相関にあり、試料の質量を測定すること で打込み時の空気量の変化を簡易に把握できると考えら れる。

図-5 に打込み高さと粗骨材残存率の関係を示す。これによると、SL12では打込み高さの増加に伴い粗骨材残存率が高くなっているが、SF45ではその傾向は逆になっている。この理由として、SL12は流動性が低いため打込み高さが小さいと粗骨材間の空間が大きく形成され、打込み高さの増加に伴い空間が充填されて粗骨材残存率が増加したのに対し、SF45は流動性が高いため打込み高さが小さくとも粗骨材間の空間が充填され、落下の衝撃で



(a)打込み高さ 0m



図-3 打込み高さとAir_{m1}(締固め時間 0s)



 $\boxtimes -4$ Air_c \succeq Air_{m1}



図-5 打込み高さと粗骨材残存率



(b)打込み高さ1m

図-6 締固め時間と空気量変動量の関係

粗骨材が沈降したためと推察される。また打込み高さ 1m の場合の SF45-seg, SF55-seg, SF65 でも粗骨材残存率が SL12 と同程度となっていることからも、モルタルが打込 みにより粗骨材間の空間に充填される傾向をとらえてい ると考えられる。

(2) 締固めの影響

図-6 に締固め時間と空気量変動量の関係を,打込み 高さが(a)0m,(b)1mの場合それぞれで示す。図-6(a)に よると,締固め時間の増加に伴い,空気量が減少してい ることがわかる。これは既往の研究⁸と一致している。 またSF45,SF45-segの比較や,SF55-segの結果から,材 料分離している配合では空気量が減少しやすいことがわ かる。また打込み高さが0mと1mの場合で比較すると, SF45-seg,SF55-segの締固めによる空気量変動量は,打 込み高さが0mの場合の方が大きいことがわかる。これ は0mの場合では,突き固めを行ったため粗骨材が沈降 しモルタルが上層に多く,5s程度の締固めを与えても空 気が抜けやすかったためと推察される。以上より,材料 分離しやすい配合では,締固め時の粗骨材の沈降状態が 空気量の減少に影響を与えることが示唆された。

図-7 に打込み高さが 1m の場合の締固め時間と粗骨 材残存率の関係を示す。これによると、粗骨材残存率の 低下の傾きは配合によらず一定であることがわかる。 3.2 試験 2

図-8 に締固め時間と洗い分析による粗骨材残存率 X_2 の関係を示す。これによると、SL12 を除いて締固めをしない場合(0s)で X_2 は100%を下回っていることがわかる。 振動時間の影響を見ると、配合に関わらず10s 与える毎に X_2 が5%程度低下していることがわかる。またSF45,SF45-segで大きな違いは見られなかった。図-7の X_1 と比較すると、SF45-seg、SF55-seg は締固めをしない場合(0s)で X_2 は X_1 を下回っていることがわかる。これは試験1では1m高さの打込みが影響して粗骨材の沈降が生じていないが、試験2では打込みを行っていないため試料の自重により粗骨材が沈降していることが考えられる。

図-9に締固め時間とAir_{m2}の関係を示す。これによる と、SL12、SF45では締固めに伴う空気量の変化に大きな 影響はないが、材料分離が起きているSF45-seg、SF55-seg では空気量が減少していることがわかる。しかしこの結 果は締固めた試料の上層部分のみの結果であり、試料全 体の傾向を正しく把握できていない。この結果の原因が 締固めによる試料中の空気量の変動か、構成割合が変化 したためかを把握するため、式(4)、(5)を用いて、見掛け のモルタルの体積を算出し、モルタル当たりの空気量 Air_{m-mor}に換算して、Air_{m2}に対する比を算出する。その 結果を図-10に示す。これによると、配合に関わらず締 固めを与えるに伴いAir_{m-mor}/Air_{m2}が低下しているこ



















図-11 $X_2 \ge X_3$ の関係

とがわかる。このことから締固めに伴い、粗骨材が沈降 するとともに試料中から空気が抜けていることがわかる。

図-11,図-12にX₂とX₃の関係,X₂とX₄の関係をそれ ぞれ示す。これによると、配合に関わらずX₃はX₂に対し て大きく算出されているのに対して、X₄はX₂に対して同 程度に算出されている。これは、X₄はセメント粒子への 水の浸潤による容積の減少を考慮して算出しているが、 X₃は見掛けの体積で算出しているため大きく算出され たと考えられる。

以上より, 締固めた試料の空気量*Air_{m2}*と質量*W*₂(kg)を 測定して,式(7)~(12)の単位容積質量法を用いることで, 粗骨材残存率を推定することができたため,試験2は空 気量や粗骨材の変動を簡易に把握する手法として適用で きる可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究で得られた知見を次のようにまとめる。打込み 高さが lm 以上であると衝撃により空気が抜けるが, lm より低いと空気を巻き込みやすく,打込みによって粗骨 材残存率にも影響を与えることが示された。また締固め によって空気量は減少するが,材料分離している配合で は,締固め時の材料分離程度が空気量の減少に影響しや すいことが示唆された。また,締固めた試料の空気量と 質量を測定することで空気の残留程度や粗骨材変動を簡 易に把握できる可能性が示唆された。

謝辞:本研究を遂行するにあたり,(国研)土木研究所 片 平博氏にご助言をいただいた。ここに謝意を示す。

参考文献

1) 三浦秀一朗,築嶋大輔,廣田元嗣,菅原寛文:東北

■SL12 ◆SF45 ◇SF45-seg △SF55-seg ●SF65



図-12 $X_2 \ge X_4$ の関係

地区の高架橋における凍害の実態と耐凍害性に関 する分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.813-818, 2018.

- 2) 古川翔太,加藤佳孝,鈴木将充,高橋駿人:振動時間が締固めを必要とする高流動コンクリートの残留空隙に与える影響,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集第20巻,pp.11-16,2020.
- (3) 寺西浩司,丹羽大地:材料分離が構造体コンクリートの各種品質に及ぼす影響,日本建築学会構造系論文集,Vol.83,No.749, pp.923-933, 2018.
- 4) 迫井佑樹, 阿波稔, 松岡智:エアメータ(注水法) を用いた振動締固めを伴う空気量減少量の推定に 関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.971-976, 2020.
- 5) 土木学会:締固めを必要とする高流動コンクリート の配合設計・施工技術研究小委員会 委員会報告書, 2020
- Furukawa, S., Kato, Y., Suzuki, M., and Takahashi,H.: A Basic Study on Segregation Properties of High Fluidity Fresh Concrete, Proceedings of the ConMat'20, pp.450-458, 2020.
- 7) 勝畑敏幸,古賀裕久,渡辺博志,渡邊健治:コンク リートの施工がエントレインドエアに及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, pp.291-298, 2014.
- 8) 笠井英志,清水正弘,牛島栄,坂ノ上宏:コンクリ ート製品の空気量および凍結融解抵抗性に及ぼす 影響(その1)振動機の締固め時間とフレッシュ時 の空気量,土木学会年次学術講演会講演概要集,第 5部,58巻,pp.411-412,2003.