U.D.C 624.041.6

コンクリートの乾燥収縮および圧縮クリープに及ぼす空気量の影響

早川　健司*　　鈴木　将充*　　前原　　聡*

要　約：　コンクリートの耐凍害性を確保する目的で，東北地方においては空気量を 6% としたコンクリートの使用が奨励されつつある。橋梁上部工などの設計上クリープ特性に配慮すべき構造物に対しては，空気量の影響を慎重に検討すべきと考えられるが，クリープ特性に及ぼす空気量の影響を定量的に検討した事例は少ない。このため，既報[1] では水セメント比を一定とした条件において空気量が大きくなると，単位応力当たりのクリープひずみが大きくなることを示した。ただし，空気量を大きくすると圧縮強度は低下するため，実務上は，圧縮強度を同一とした条件での空気量の影響把握が必要となる。そこで，本研究では，圧縮強度を同等とした条件において，乾燥収縮および圧縮クリープに及ぼす空気量の影響を検討し，PC 上部工に用いられるようなコンクリートでは空気量が大きくなると単位クリープひずみが大きくなる場合があること等を示した。

ｷｰﾜｰﾄﾞ：　圧縮クリープ，単位クリープひずみ，空気量，耐凍害性

目　次：

1. はじめに
2. 実験概要
3. 実験結果および考察
4. まとめ

1. はじめに

凍結融解作用を受けるコンクリートの凍害を抑制するためには，微細な気泡をコンクリート中に連行し，氷晶の生成にともなう不凍結水の移動圧を緩和する機構を形成することが重要となる。空気量の規定について，JIS A 5308 では荷下ろし時における一般的な空気量の目標値は 4.5% であるが，その後の打込み，締固めといった施工過程において空気量が減少することが指摘されている。土木学会コンクリート標準示方書におけるコンクリートの空気量は 4～7% を標準とし，2012 年度制定版[2] の解説には，寒冷地等で長期的に凍結融解作用を受ける場合には，所要の強度が得られることを確認した上で，6% 程度の空気量とするのがよいことが追記されている。また，長期的に凍結融解作用を受ける地域がある東北地方においては，特に厳しい凍害環境において，目標空気量 6.0%（5.0～6.9%）および水結合材比 45% 以下，あるいは目標空気量 7% が奨励されつつある[3) 4)]。

一方，コンクリートの空気量はコンクリートの力学的性質に影響を及ぼし，コンクリートの圧縮強度は，空気量 1% の増加に対して 4～6% 低下することが認識されている[5]。同様に，コンクリートの圧縮クリープひずみは，空気量の増加に対して大きくなる傾向があると言われており，例えば橋梁上部工などの設計上クリープ特性に配慮すべき構造物に対しては，空気量の上限を慎重に検討すべきと考えられるが，この影響を定量的に示した研究事例はほとんどないのが現状である。そこで，既報[1] では，空気量が圧縮クリープに及ぼす影響の定量評価を目的に，特に厳しい凍害環境での使用や橋梁上部工等を想定した W/C＝40%，一般的な RC 構造物での使用を想定した W/C＝55% のコンクリートを対象として検討[1] した。この結果，空気量が大きくなると，単位応力当たりのクリープひずみが大きくなることが示された。ただし，空気量を大きくすると圧縮強度は低下するため，実務上は圧縮強度を同等とした条件における圧縮クリープに対する空気量の影響を把握する必要がある。

そこで，本検討では，既報と同様に目標空気量 4.5，6.0，8.0% とし，水セメント比の調整により圧縮強度を同等としたコンクリートを対象として圧縮クリープ試験を実施した。本論は，これら一連の実験結果について取りまとめたものである。

2. 実験概要

2.1　使用材料および配合

表 1 にコンクリートの使用材料，表 2 にコンクリートの配合をそれぞれ示す。セメントは，早強ポルトランドセメントならびに高炉セメント B 種，骨材には東北地方で使用されている一般的な骨材を使用した。早強ポルトランドセメント使用のコンクリートは，PC 上部工に使用されることの多い設計基準強度 40 N/mm^2 程度，高炉セメント B 種は一般的な RC 構造物への使用を想定した W/C＝55% 程度の配合とした。コンクリートの空気量は，これまで一般的に使用されている 4.5%，寒冷地での使用が推奨されている 6.0%，比較として 8.0% の 3 水準とした。コンクリートの配合は，単位水量を一定とし，基準となる空気量 4.5% と圧縮強度が同等となるように，空気量に応じて水セメント比を調整した。

＊技術研究所　土木材料グループ

表 2　コンクリートの配合

記号	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				C×wt%		
				W	C	S	G	Ad.1	Ad.2	Ad.3
H-4.5	4.5	38.0	43.1	170	447	706	988	1.10	-	0.008
H-6.0	6.0	36.0	43.4		472	686	948	1.15	-	0.026
H-8.0	8.0	34.0	43.1		500	650	907	1.15	-	0.300
BB-4.5	4.5	55.0	43.7	165	300	770	1050	-	0.80	0.004
BB-6.0	6.0	53.0	43.7		311	752	1021	-	0.75	0.011
BB-8.0	8.0	50.0	43.7		330	722	980	-	0.65	0.040

表 3 に，フレッシュ試験および圧縮強度の試験結果を示す。早強ポルトランドセメント使用の圧縮強度は 50 N/mm² 程度（材齢 7 日），高炉セメント B 種使用では 30 N/mm² 程度（材齢 28 日）であった。ただし，目標空気量 8.0% の圧縮強度は，早強および高炉セメント B 種使用とも 4.5%，6% より若干小さい結果であった。

2.2　供試体の作製方法および試験条件

コンクリートの練混ぜは容量 50 リットルの強制練りミキサを用い，20℃の室内で実施した。フレッシュ試験を実施後，φ10×20 cm の供試体を作製し，供試体は翌日脱型した。

早強ポルトランドセメントを使用したコンクリートは材齢 3 日まで標準水中養生，材齢 7 日まで湿布養生した。高炉セメント B 種を用いたケースは材齢 7 日まで水中養生，その後，28 日まで 20℃，60% R.H. の恒温恒湿室に静置した。クリープ試験は JIS A 1157 に準拠して実施し，早強ポルトランドセメント使用のコンクリートは材齢 7 日，高炉セメント使用は材齢 28 日で圧縮強度試験を実施し，20℃，60% R.H. の恒温恒湿室でクリープ試験を開始した。載荷応力度は載荷時圧縮強度の 1/3 とし，乾燥開始した材齢 7 日より，無載荷試験体の長さ変化ならびに質量変化を測定した。

表 1　コンクリートの使用材料

記号	種類	諸元
W	水	上水道水
C	セメント	高炉セメント B 種，密度 3.04g/cm³ 早強ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ，密度 3.13g/cm³
S	細骨材	宮城県鶴巣産山砂 表乾密度 2.55g/cm³，吸水率 2.54%
G	粗骨材	宮城県津山産砕石 2005 表乾密度 2.70 g/cm³，吸水率 0.77%
Ad.1	混和剤	高性能 AE 減水剤，ポリカルボン酸系
Ad.2		AE 減水剤（高機能タイプ），リグニンスルホン酸系
Ad.3		AE 剤，高アルキルカルボン酸系

表 3　フレッシュ試験，圧縮強度結果

No.	Slump (cm)	Air (%)	圧縮強度※ (N/mm²)
H-4.5	14.5	4.1	50.5
H-6.0	17.0	5.9	49.5
H-8.0	20.0	8.4	46.3
BB-4.5	13.5	5.1	30.5
BB-6.0	13.5	6.6	30.1
BB-8.0	14.0	8.8	27.5

※H：材齢 7 日，BB：材齢 28 日

3.　実験結果および考察

3.1　乾燥収縮

図 2 に，乾燥材齢と長さ変化率の関係，図 3 に，乾燥材齢と質量変化率の関係を示す。早強ポルトランドセメントを使用した場合，空気量が大きいほど，長さ変化率，質量変化率ともに小さくなる傾向を示した。一方，高炉セメント B 種を使用した場合，長さ変化率，質量変化率は目標空気量 4.5% が最も小さくなり，6.0%，8.0% はこれより大きくなった。

セメントの種類やコンクリートの水セメント比等がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響について検討した既往の研究[6] によれば，水セメント比と乾燥収縮の関係は早強ポルトランドセメントで顕著であり，水セメント比の低減に伴って乾燥収縮が低減することが示されている。一方，普通，中庸熱，低熱，高炉セメント B 種では乾燥収縮に及ぼす水セメント比の影響は顕著でなく，高炉セメント B 種の水セメント比 45% と 55% の乾燥収縮は同等か若干 45% ほうが大きくなるような結果が示されている。今回の検討では，圧縮強度を同等とした配合で検討するため，

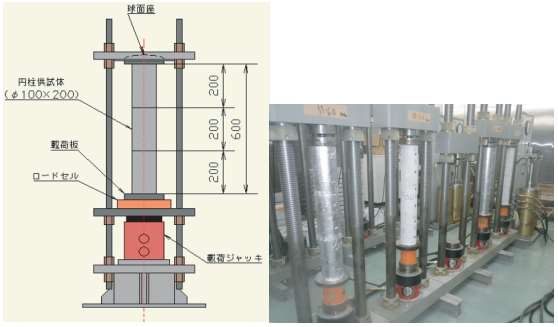

図 1　クリープ試験装置，状況

空気量が大きいほど水セメント比は小さくなっている。水セメント比の範囲は 4～5% 程度であるが，既往の研究と同様に早強ポルトランドセメントでは水セメント比の低減に伴い乾燥収縮が低減しているものと考えられる。高炉セメントＢ種では水セメント比の影響を受けにくいことに加え，空気量が大きいほうが質量変化は大きい，すなわち乾燥しやすい条件となったことで，目標空気量 4.5% より，6.0，8.0% の乾燥収縮が大きくなったものと推察される。

3.2　圧縮クリープ

図 4 に，載荷材齢とクリープひずみの関係，図 5 に，載荷材齢と単位クリープひずみの関係を示す。早強ポルトランドセメントを用いた場合のクリープひずみ，単位クリープひずみは，目標空気量 4.5%，6.0%，8.0% の順に大きくなった。本検討におけるクリープひずみは，JIS A 1157 に準拠して実施した試験結果，すなわち載荷過程の全ひずみから載荷時弾性ひずみと無載荷ひずみを差し引いて求めたものである。本ケースの全ひずみは空気量によらずほぼ一定であり，3.1 で示したように無載荷ひずみ（乾燥ひずみ）は空気量が大きいほど小さいため，算出したクリープひずみは空気量が大きい場合に大きくなっている。一方，高炉セメントＢ種を用いた場合，クリープひずみは，目標空気量 4.5% が最も大きく，8.0%，6.0% の順に小さく，単位クリープひずみは目標空気量 4.5% と 8.0% が同等，6.0% がそれらより小さくなった。

図 6 に単位応力当たりのクリープひずみの予測値と実測値の関係を示す。予測値の算定は，2017 年度制定土木学会コンクリート標準示方書［設計編］の算定式[7] により求めたものである。図中には，予測値 ± 40% の範囲を併せて示している。既往の研究によれば，予測値と実測値の差異は概ね ± 40% の範囲に分布することが示されており[8]，今回の実験結果は予測値より実測値が大きくなる傾向にあるもののこの範囲であった。ここで，予測式は，単位水量，相対湿度，載荷時のコンクリートの圧縮強度および材齢の関数であり，コンクリートの圧縮強度には実測値，すなわち空気量の増加に伴い圧縮強度が低下した結果を使用している。水セメント比から予測する場合には空気量の影響を適切に考慮することが必要と考えらえる。

一般に，セメントペースト量が大きいほど，水セメント比が大きいほど，コンクリートのクリープは大きくなる。圧縮強度を同等とするため，本検討では，空気量が大きい

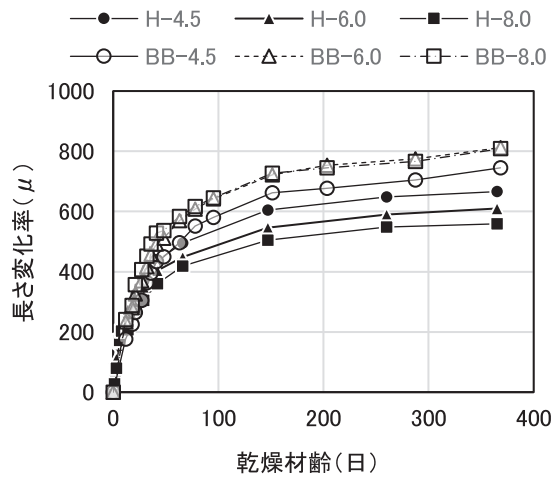

図 2　乾燥材齢と乾燥収縮ひずみの関係

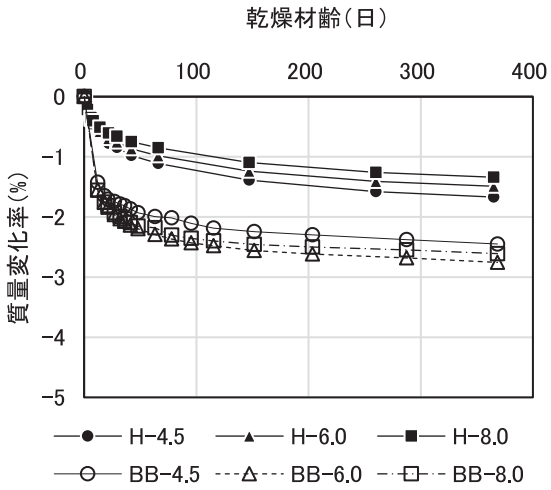

図 3　乾燥材齢と質量変化率の関係

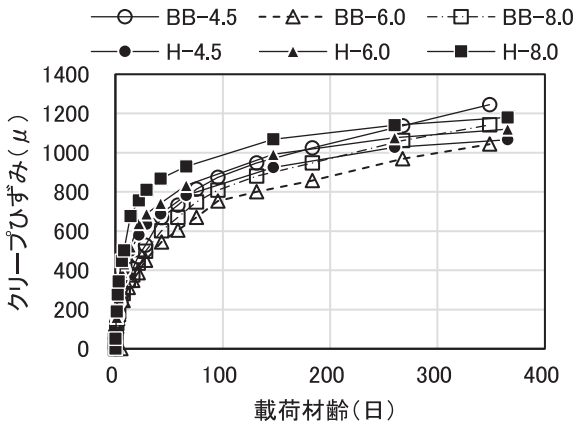

図 4　載荷材齢とクリープひずみの関係

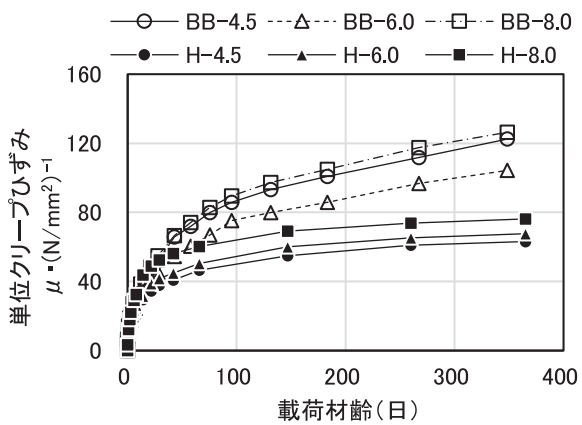

図 5　載荷材齢と単位応力当たりのクリープひずみ

ほど水セメント比を小さくし，単位水量を一定としたためセメントペーストは多くなっている。クリープ試験結果はこれらの影響の大小関係や空気量の増加に伴う細孔径分布，量の変化等の影響によるものと考えられ，一概に空気量とクリープひずみの関係を示すことは難しいが，PC 上部工に用いられるようなコンクリートでは空気量が大きくなると単位クリープひずみが大きくなる場合があることが示された。本検討では単位水量を一定とした条件で配合修正したが，空気量を大きくすると単位水量は一般に低減できるため，単位水量の低減効果を考慮して配合設計をすれば，標準的な空気量 4.5% のコンクリートと同等のクリープひずみを有するコンクリートを合理的に得られる可能性が示唆される。

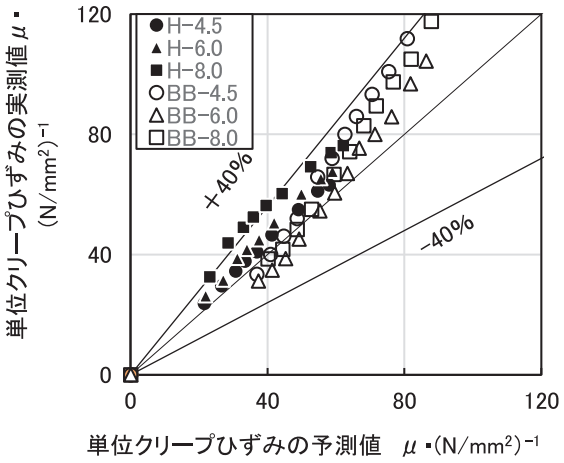

図 6　単位応力当たりのクリープひずみの予測値と実測値の関係

4. まとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

（1） 早強ポルトランドセメントを使用した場合，空気量の増加に伴い乾燥収縮ひずみは，材齢約 1 年で 60～110μ 程度小さく，単位クリープひずみは 5～10μ 程度大きくなった。

（2） 高炉セメントを用いた W/C 55% 程度のコンクリートでは，空気量と乾燥収縮ひずみ，単位クリープひずみに一定の関係はなく，材齢約 1 年における乾燥収縮ひずみは 70μ 程度，単位クリープひずみは 20μ 程度の範囲にあった。

謝　辞

本研究は，東北学院大学工学部環境建設工学科石川雅美教授との共同研究として実施したものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1）早川健司他：コンクリートの圧縮クリープ特性に及ぼす空気量の影響，東急建設技術研究所報 No. 45，2020 年 1 月
2）土木学会：2012 年度制定コンクリート標準示方書施工編，pp 399-409，2013 年 3 月
3）国土交通省　東北地方整備局：東北地方における凍害対策に関する参考資料（案），2017 年 3 月
4）東北コンクリート耐久性向上委員会：東北地方におけるコンクリート構造物設計・施工ガイドライン（案），2009 年 3 月
5）公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点 '16，p. 66
6）社団法人セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F55，各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究（コンクリートの乾燥収縮に関する実験結果），2011 年 3 月
7）土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書設計編，pp 107-110，2018 年 3 月
8）土木学会：コンクリートライブラリー 108，2002　年版コンクリート標準示方書改訂資料，pp 16-18，2002 年 3 月

EFFECT OF AIR CONTENT ON DRYING SHRINKAGE AND COMPRESSION CREEP CHARACTERISTICS OF CONCRETE

K. Hayakawa, M. Suzuki, and S. Maehara

The use of concrete with an air content of 6% is being encouraged in the Tohoku region in order to ensure the frost resistance of concrete. Generally, the creep coefficient of concrete with a large amount of air is considered to be large, but there is little data to be examined. In this study, we aimed to quantitatively understand the influence of air quantity on drying shrinkage and compression creep characteristics. The experiment was carried out using high-early-strength Portland cement and blast furnace cement type B under the same conditions of compressive strength. As a result, in the case of high-early-strength Portland cement, it was shown that the drying shrinkage was small and the creep strain per unit stress increased as the amount of air increased.