

報告 乾燥収縮レベルの異なる各種コンクリートの圧縮および引張クリープ特性に関する実験検討

小川 亜希子 *1・齊藤 和秀 *2・近藤 慎一 *3・井上 和政 *4

要旨：乾燥収縮レベルが異なる水準のコンクリートを用いて、基本物性の一つであるクリープ性状について比較実験を行った。高性能 AE 減水剤の種類により、およそ狙い通り 3 水準のコンクリートを作製できた。クリープ試験の結果は、圧縮クリープでは乾燥収縮量が小さくなるにつれてクリープも小さくなる傾向が見られた。引張クリープでは、普通コンクリートに対し乾燥収縮量の小さいコンクリートはいずれもクリープがかなり小さい結果となった。

キーワード：乾燥収縮、圧縮クリープ、引張クリープ、高流動コンクリート、高性能 AE 減水剤

1. はじめに

近年、地球環境問題に対する取り組みの中で建物の長期利用が求められており、コンクリート造建築物の長寿命化・高耐久性にさらなる注目が集められている。材料面で高耐久性に影響する要因の一つとしてひび割れ低減が挙げられ、中でも収縮低減剤の使用によりコンクリートの収縮量を小さくすることがひび割れ低減に大きな影響を及ぼすことは過去の研究でも報告されている¹⁾。

一方で、コンクリートのひび割れを制御するために、収縮により建物に生じる応力やひび割れについて設計段階から予測することは建物の長期利用にも効果的であると考えられる。その項目の一つとして、RC 造の設計において、長期荷重による変形増大を想定し部材のたわみ量を割り増すなど材料物性として取込まれているのがクリープである。とりわけ収縮低減剤を用いたコンクリートのクリープ特性についての研究例はまだ少ない²⁾³⁾。また、収縮ひび割れの低減を検討する上で本来調べるべきは、コンクリートの引張応力による引張クリープの影響であるが、実験の困難さなどから既往の研究例は少なく、現状は圧縮クリープ試験による結果を採用しているのが実態である。

また、建物の長期利用には躯体品質の向上、すなわち密実なコンクリートの施工が不可欠であるが、近年の建設労働者減少などの背景から労働の機械化、建設工事の省力化が各工種で進められている中で、コンクリート工事では高流動コンクリートの普及が進められている⁴⁾。建物的高密配筋への対応や、締固め作業にかかる人手の削減など、高流動コンクリートの利用は今後の建設業界に係る課題を解決する上で効果があると考えられるが、最新の高流動化を有する混和剤が開発されている一方で

その混和剤を使用した高流動コンクリートの物性についてはまだ不明な点も多い。

本研究では、持続的に引張荷重が載荷可能な引張クリープ試験機を用いて、収縮低減効果を施した高流動コンクリートにおけるクリープ特性を把握するため、圧縮・引張それぞれのクリープ試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

コンクリートの使用材料を表-1に示す。ここでは化学混和剤として、市販の高性能 AE 減水剤 (SP) と、収縮低減性能と高流動化を可能とする材料分離抵抗性を併せ持ち、収縮低減性能の異なる一液型高性能 AE 減水剤二種類 (SRF1, SRF2)⁵⁾を使用した。

表-1 使用材料

種類	記号	内容
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³)
細骨材	S	君津産山砂(表乾密度2.59g/cm ³ 、吸水率1.98%、粗粒率2.47)
粗骨材	G	秩父産石灰碎石(表乾密度2.70g/cm ³ 、吸水率0.29%、粗粒率6.58)
混和剤	SP	高性能AE減水剤
	SRF1	一液型高性能AE減水剤(収縮低減タイプ)
	SRF2	一液型高性能AE減水剤(収縮低減タイプ)
混和材	EX	膨張材(密度3.16g/cm ³)

2.2 実験の組合せ

実験の組合せを表-2に示す。今回3種類の調合で試験を行った。内容は、SPを用いた普通コンクリート(以下、「普通コンクリート」と表記)、SRF1を用いた低収縮コンクリート(以下、「高流動・低収縮コンクリート」と

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 建設基盤技術研究部 修士(工学) (正会員)

*2 竹本油脂(株) 第三事業部営業技術グループ グループリーダー 博士(工学) (正会員)

*3 竹本油脂(株) 第三事業部九州営業部 マネージャー

*4 (株)竹中工務店 技術研究所 建設基盤技術研究部 主席研究員 博士(工学) (フェロー会員)

表記), SRF2 および膨張材を併用した無収縮タイプコンクリート (以下,「高流動・無収縮タイプコンクリート」と表記) である。なお, SRF1 および SRF2 を用いた調査は高流動コンクリートである。表内には各調査のフレッシュ性状の目標値を示す。

また今回, 乾燥収縮量の異なるコンクリートによる物性比較を行うため, 目標とする乾燥収縮率をそれぞれ, 普通コンクリート: 500μ , 高流動・低収縮コンクリート: 400μ , 高流動・無収縮タイプコンクリート: みかけ 0μ (いずれも乾燥 26 週時点の目標値) とした。高流動・無収縮タイプコンクリートについては, 膨張材による初期の膨張量を 300μ , 乾燥収縮量を 300μ と設定し, 合成値としてのみかけ 0μ である。

表－2 実験の組合せ

No.	調査名	W/C (%)	混和剤種類	膨張材量 (kg/m^3)	スランプ (cm)	空気量 (%)
1	普通	55	SP	—	21 ± 1.5	4.5 ± 1.5
2	高流動・低収縮		SRF1	—	フロー	
3	高流動・無収縮タイプ		SRF2	25	55 ± 7.5	

2.3 コンクリートの調査

コンクリートの調査を表－3 に示す。今回の試験で水セメント比は 55% の一水準で行った。また, 単位セメント量は同一とした。高流動・無収縮タイプコンクリートの膨張材はセメントの外割で使用した。

表－3 コンクリートの調査

No.	調査名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
				W	C	EX	S	G
1	普通	55	47.6	170	310	—	846	972
2	高流動・低収縮		52.8	170	310	—	940	875
3	高流動・無収縮タイプ		52.3	170	310	25	920	875

2.4 試験項目

試験項目および方法を表－4 に示す。

表－4 試験項目

試験項目	試験方法	試験条件・材齢など
スランプ	JIS A 1101 に準拠	練り混ぜ直後
スランプフロー	JIS A 1150 に準拠	
空気量	JIS A 1128 に準拠	
圧縮強度	JIS A 1108 に準拠	標準養生, 材齢 1・4 週 N=2
割裂引張強度	JIS A 1113 に準拠	標準養生, 材齢 4 週 N=2
拘束膨張	JIS A 6202 付属書 B に準拠	材齢 2 週まで測定, N=2
乾燥収縮	JIS A 1129 付属書 A に準拠	乾燥 26 週まで測定, N=2
圧縮クリープ	JIS A 1157 に準拠	4 週水中養生, 4 週強度 確認後載荷開始, N=3
引張クリープ	JIS A 1157 を参考	4 週水中養生, 4 週強度 確認後載荷開始, N=1

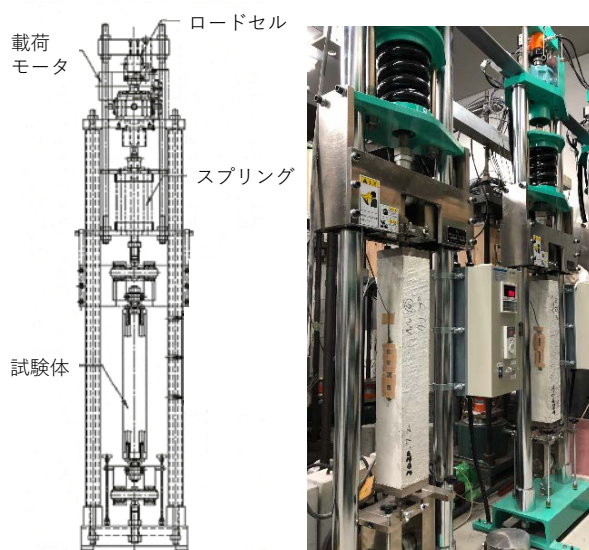
(1) 圧縮クリープ試験

圧縮クリープ試験は JIS A 1157 に準拠し, 20°C , 60%R.H. の恒温恒湿室内で試験を実施した。試験体は $150\phi \times 300\text{mm}$ の円柱試験体を使用した。また, 同一条件で無載荷試験体を作製し, 上下面をシールした状態で無載荷ひずみを測定した。

(2) 引張クリープ試験

今回, クリープ試験として圧縮クリープ試験と引張クリープ試験を実施した。圧縮クリープ試験は JIS 規格にもあるように標準化された試験方法であるが, 引張クリープ試験は 1. で述べた通りまだ試験規格が確立されていない。今回採用した引張クリープ試験は JIS A 1157 の規格を参考に, コンクリート試験体に一定荷重を持続的に載荷可能な試験装置を使用した。試験装置の構成と外観写真を図－1 に示す。試験体 ($10 \times 10 \times 60\text{cm}$) は両端に埋込まれたボルトを介して機器に設置し, 上部の載荷モータにより引張荷重をかけ, スプリングの蓄圧作用によりクリープを測定するものである。荷重はロードセルで測定し, 試験体のひずみは写真に示すように試験体中央部の両側にひずみゲージを貼付けて測定した。引張クリープ試験の無載荷試験体は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱試験体を作製し, 小口面をシールして無載荷ひずみを測定した。また, 引張クリープ試験も圧縮クリープ試験と同様に, 20°C , 60%R.H. の恒温恒湿室内で実施した。

なお, 引張クリープ試験については同時に実施可能な試験体が 3 体であるため N=1 で実施しているが, 今回の実験以前に同一条件での予備実験を約一年間実施しており, その結果も踏まえて考察を行った。



図－1 引張クリープ試験装置

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-5に示す。いずれの調合においても、目標としたスランプ、スランプフローおよび空気量を満足し、ワーカビリティも問題ないコンクリートが得られた。

表-5 フレッシュ性状

No.	調合名	混和剤量 (C×%)	スランプおよび スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(°C)
1	普通	0.9	21.5	3.8	21
2	高流動・低収縮	2.4	56.0	5.0	21
3	高流動・ 無収縮タイプ	3.0	61.5	4.5	21

3.2 圧縮および割裂引張強度

圧縮強度試験結果を図-2に、割裂引張強度試験結果を図-3にそれぞれ示す。普通コンクリートと比較して高流動・低収縮コンクリートおよび高流動・無収縮タイプコンクリートはほぼ同等の強度が得られた。

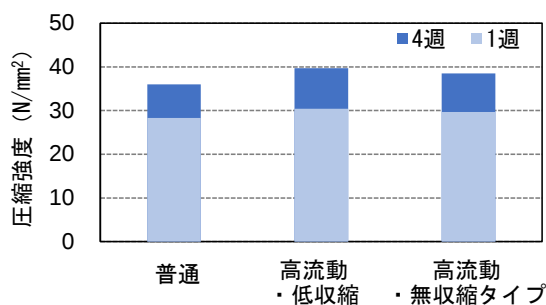


図-2 圧縮強度試験結果

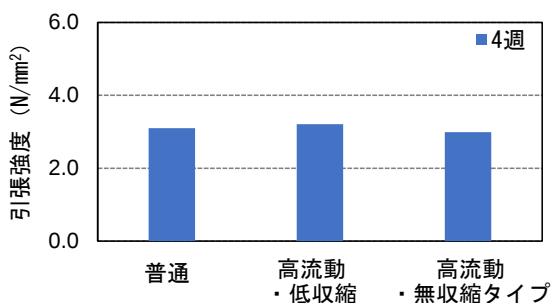


図-3 割裂引張強度試験結果

3.3 拘束膨張および乾燥収縮

高流動・無収縮タイプコンクリートの拘束膨張試験結果を図-4に、JIS A 1129に準拠した乾燥収縮試験結果を図-5にそれぞれ示す。

拘束膨張ひずみは設定値の 300μ を超える値 332μ が得られた。乾燥収縮ひずみは、乾燥26週時の値で、普通

コンクリートは -490μ 、高流動・低収縮コンクリートは -472μ 、高流動・無収縮タイプコンクリートは -375μ となり、目標値をやや収縮側に超える調査もあったものの、普通、低収縮、無収縮タイプの順で乾燥収縮率が小さくなり、ほぼ目標値のコンクリートが得られた。

高流動・無収縮タイプコンクリートについては、材齢2週時の拘束膨張ひずみと乾燥26週時の乾燥収縮ひずみを併せると -43μ (若干収縮側) となり、目標とするほぼ無収縮レベルのコンクリートが作製できた。材齢2週までの拘束膨張ひずみと乾燥収縮ひずみの重ね合わせ結果を図-6に示す。

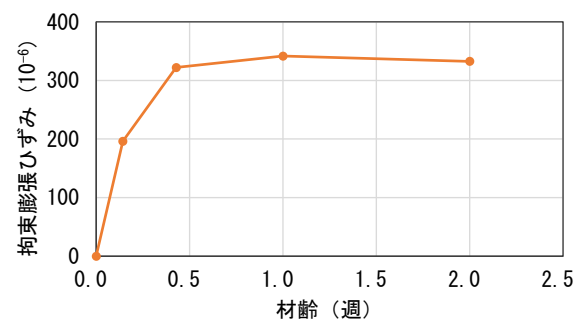


図-4 拘束膨張ひずみ

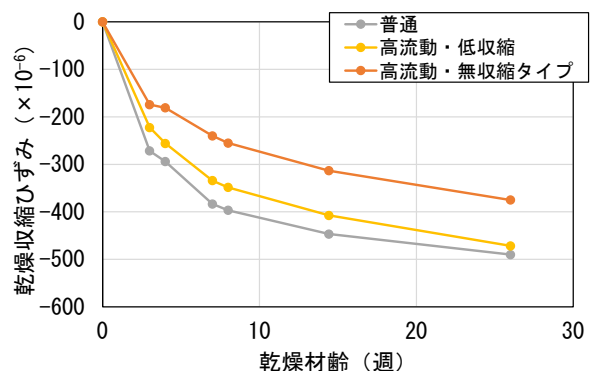


図-5 乾燥収縮ひずみ

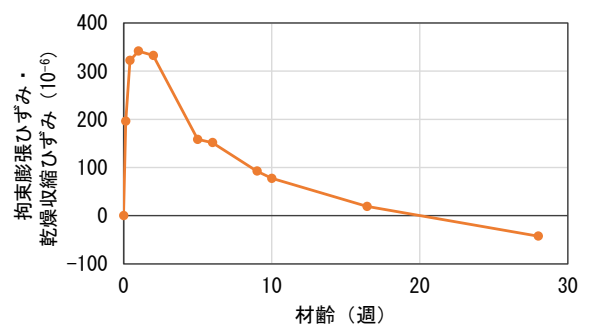


図-6 拘束膨張・乾燥収縮ひずみの重ね合わせ結果

3.4 クリープ性状

クリープ試験における載荷応力度は、標準養生、材齢4週強度の1/3に設定した。圧縮クリープ試験では圧縮強度を、引張クリープ試験では割裂引張強度をそれぞれ採用した。引張クリープ試験の載荷応力度においては過去の研究例の中で様々な実施例があるが⁹⁾、今回は圧縮クリープとの比較を行うことを考慮し、JIS A 1157の圧縮クリープ試験規格に則り1/3強度での載荷とした。

(1) 圧縮クリープ

圧縮クリープ試験結果について、無載荷試験体の測定結果を図-7に、載荷試験体の測定結果を図-8に示す。圧縮クリープ試験はクリープ試験と同養生、同試験環境下での無載荷ひずみも計測した。無載荷試験体のひずみは標準水中養生4週間からの乾燥開始であるが、乾燥収縮と同様に普通コンクリート、高流動・低収縮コンクリート、高流動・無収縮タイプコンクリートの順でひずみが小さくなった。

クリープ試験の載荷試験体も、普通コンクリートに比べて低収縮、無収縮タイプの収縮低減効果のあるコンクリートの方がひずみは小さくなった。

ここで、上記の試験体ひずみおよびコンクリートの弾性ひずみ（クリープ試験開始の際、無載荷状態から既定値の載荷応力度を載荷完了するまでに発生したひずみとした）により、以下の式(1)を用いてクリープひずみを算出した。また、このクリープひずみと弾性ひずみとの比で、コンクリートのクリープ係数を算出した。圧縮クリープ試験におけるクリープひずみとクリープ係数を図-9および図-10に示す。

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_m - \varepsilon_e - \varepsilon_f \quad (1)$$

ここに、 ε_{cr} : クリープひずみ

ε_m : 載荷試験体の総ひずみ

ε_e : コンクリートの弾性ひずみ

ε_f : 無載荷試験体のひずみ

式(1)による計算結果では、クリープ係数は普通コンクリートに対し高流動・低収縮コンクリート、高流動・無収縮タイプコンクリートの順に小さくなる傾向となり、特に高流動・無収縮タイプコンクリートでは載荷1年が経過しているが、普通コンクリートの約6割程度のクリープ係数であった。過去に実施された収縮低減剤および膨張材を併用したコンクリートでのクリープ試験の結果⁷⁾では、無収縮型コンクリートのクリープは普通コンクリートと比較してクリープが小さくなるという結果があり、概ね傾向は一致している。

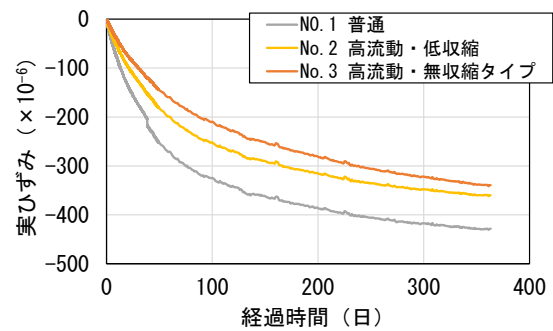


図-7 無載荷試験体の測定結果（圧縮クリープ）

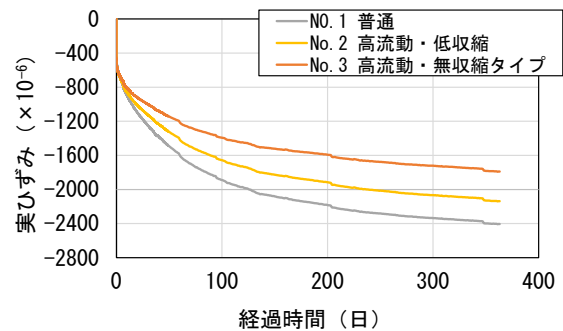


図-8 載荷試験体の測定結果（圧縮クリープ）

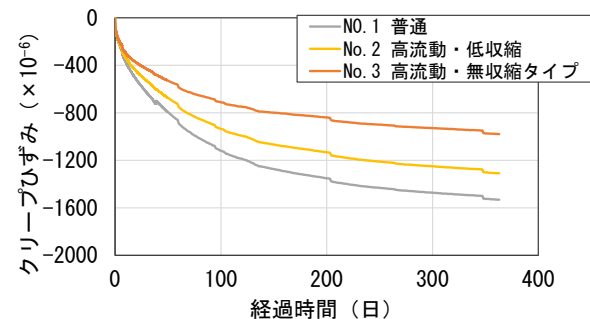


図-9 クリープひずみ（圧縮）

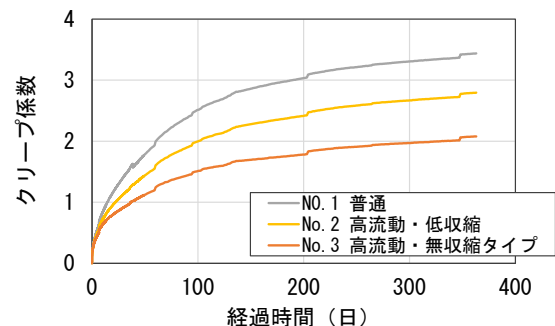


図-10 クリープ係数（圧縮）

(2) 引張クリープ

引張クリープ試験結果について、無載荷試験体の測定結果を図-11に、載荷試験体の測定結果を図-12に

示す。無荷試験体は調査によって普通コンクリート、高流動・低収縮コンクリート、高流動・無収縮コンクリートの順で小さくなっているが、荷試験体の実ひずみは、荷初期は無荷試験体と同様の大小関係で推移していたが荷 100 日ほど経過した時点では調査によらずほぼ同程度であった。

また、(1) の圧縮クリープと同様式(1)により算出したクリープひずみを図-13に、クリープ係数を図-14にそれぞれ示す。荷 1 年ほどの測定結果が得られたが、高性能 AE 減水剤を使用した普通コンクリートと、収縮低減成分が含まれる高性能 AE 減水剤を使用した高流動・低収縮および高流動・無収縮タイプコンクリートで大きな差が見られ、後者ではクリープひずみがとても小さい結果となった。引張クリープについては 2.5 に示した通り事前に同一条件での予備試験を実施しているが、特に高流動・無収縮タイプコンクリートについては今回の試験結果と同様の試験結果が得られており、引張強度の 1/3 という荷応力下ではクリープが小さくなる可能性がある。

普通コンクリートでの圧縮クリープ、引張クリープを比較すると、荷 1 年経過時において圧縮クリープ試験によるクリープ係数が約 3.4 であるのに対し、引張クリープによるクリープ係数は約 5.3 と、60%程度大きく推移する結果となった。

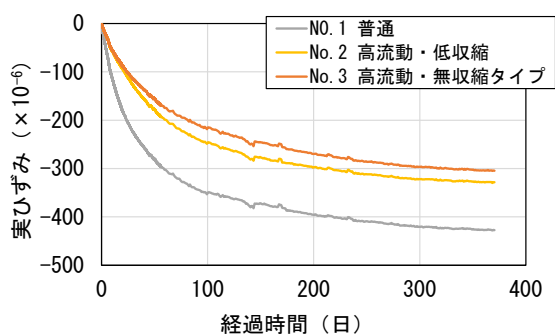


図-11 無荷試験体の測定結果 (引張クリープ)

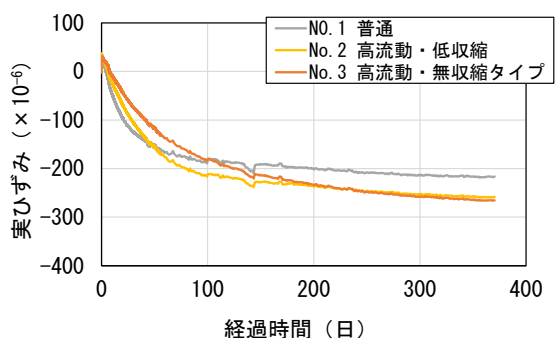


図-12 荷試験体の測定結果 (引張クリープ)

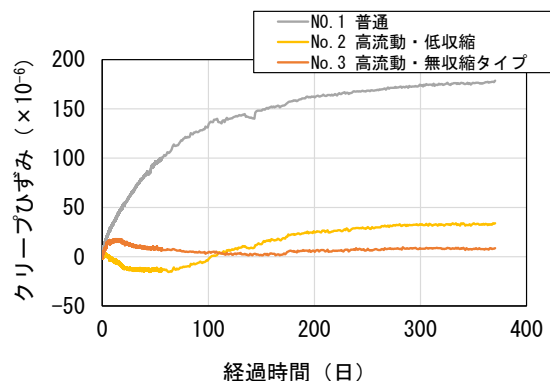


図-13 クリープひずみ (引張)

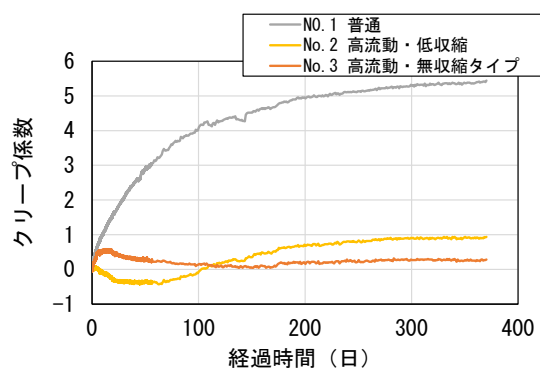


図-14 クリープ係数 (引張)

4. まとめ

各種高性能 AE 減水剤を用いた乾燥収縮レベルの異なるコンクリートの圧縮および引張クリープ試験を行い、クリープ特性について検討を行った。収縮低減性能と高流動化を可能とする材料分離抵抗性を併せもつ一液型高性能 AE 減水剤を混和し、3 段階で乾燥収縮レベルの異なるコンクリートを作製した。また基礎物性の一つとして圧縮および引張クリープ試験を行った。

圧縮クリープ試験では、普通コンクリートと比較して高流動・低収縮および高流動・無収縮タイプコンクリートのクリープ係数が小さくなることが確認された。一方引張クリープ試験では、普通コンクリートのクリープひずみと比較して高流動・低収縮および高流動・無収縮タイプコンクリートのクリープひずみは値がかなり小さくなる結果であった。

今回の実験結果より、収縮低減成分を含むコンクリートでは圧縮および引張クリープが減少する可能性が示された。この結果は、例えば大スパンスラブ構造での長期的なたわみ軽減、ひび割れ低減への展開に繋がる可能性がある。ただし、今回の試験は 1/3 引張強度の持続応力による試験であり限定的であるため、実際の構造物における部材の拘束状態を考慮した条件で今後実験を重ね検討を進めていく必要がある。また、引張クリープ試験の試験方法はまだ一般的に確立されておらずばらつきも大

きいことなどから、試験回数を重ね今回の試験結果についてもより深い検討を行っていきたい。

クリープが小さいことは建物の常時利用の点で、部材たわみが小さくなるという利点がある。しかしながら、コンクリート材料としてクリープが小さいことはひび割れ追従性に乏しいことが考えられる。相反する効果と見られるが、コンクリートの収縮ひび割れ発生がある程度若材齢の段階で決着するのに対し、クリープの影響は長期にわたって影響を及ぼす問題である。実際に、筆者らは過去に同様の新規混和剤を使用したコンクリートを用いて JIS A 1151 に準じた拘束ひび割れ試験を実施しており、高流動・低収縮コンクリートは普通調合のコンクリートと比較してひび割れ発生時期が遅くなる結果が得られている⁸⁾。若材齢から長期材齢へのコンクリートの物性変化等を踏まえ、また今後もクリープ試験を継続し長期的な試験結果から詳細に検討を進めていく予定である。

一方で、膨張材を使用したコンクリートは、初期の膨張によりコンクリート内部にプレストレスを導入する効果があり、その後の引張応力に対して抵抗できることが言われている。様々な面で効果が確認されている混和剤（材）の併用効果についても、今後実験を重ねてより詳細に検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説，2006.2
- 2) 佐藤嘉昭，永松静也，笠井慶八，真鍋宏司：セメン

ト硬化体の乾燥収縮性状およびクリープ性状におよぼす乾燥収縮低減剤の影響：その 2. コンクリートのクリープ，日本建築学会九州支部研究報告，pp.49-52，1985.3

- 3) 下山善秀，富田六郎：収縮低減剤を用いたコンクリート引張諸特性に関する基礎研究，コンクリート工学年次講演会論文集，pp.221-224，1985
- 4) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説，2021.12
- 5) 菅沼勇輝，齊藤和秀，間瀬敦之，岡田和寿，井上和政，小川亜希子，佐藤敏之，岩清水隆ほか：新規一液型高性能 AE 減水剤を用いた高流動低収縮コンクリートの開発 その 1～14，日本建築学会学術講演梗概集，2019.9～2022.9
- 6) 後藤忠弘，上原匠，梅原秀哲：若材齢コンクリートのクリープ挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.1133-1138，1995
- 7) 小林竜平，齊藤和秀，木之下光男，稲垣順司，井上和政，見澤大介，三井健郎：開口部のひび割れを抑制する無収縮型コンクリートの膨張・収縮モデルの検討，日本建築学会学術講演梗概集，pp.471-472，2011.8
- 8) 間瀬敏之，菅沼勇輝，井上和政，小川亜希子：新規一液型高性能 AE 減水剤を用いた高流動低収縮コンクリートの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1031-1036，2020