論文　ジオポリマーコンクリートの圧縮クリープに関する基礎的研究

南　浩輔[*1]・上原　元樹[*2]・梶田　秀幸[*3]・舟橋　政司[*4]

要旨：本研究では，圧縮強度 70N/mm^2 級のジオポリマーコンクリートに対して，圧縮クリープ試験の適用を図ると共に，供試体表面にシールを施したシール供試体とアンシール供試体を用いて載荷後の乾燥収縮および自己収縮ひずみを計測し，水分の移動がクリープひずみに与える影響を確認した。その結果，載荷後 410 日における基礎クリープひずみは 320×10^{-6} 程度となり，クリープ係数は 0.39 となった。一方，乾燥クリープひずみは 30×10^{-6} 程度となり，水分移動がクリープひずみに与える影響は 10%程度となった。また，構造利用への取り組みとして，得られた実験データを用いて対数関数によるクリープ曲線式を求めた。

キーワード：ジオポリマー，クリープ，乾燥収縮，自己収縮，フライアッシュ，高炉スラグ，CO_2 削減

1. はじめに

ジオポリマー法（以下，ジオポリマーを GP と記す）による硬化体は，フライアッシュ（以下，FA と記す）や高炉スラグ微粉末（以下，BS と記す）などの非晶質粉体とケイ酸アルカリ溶液との反応により，ゼオライト類似の非晶質ポリマーが生じて硬化したものである。GP 硬化体は産業副産物を大量に使用でき，かつ一般的なコンクリートと比較して 80%もの CO_2 削減を可能とする材料として注目されている [1)]。環境保全と共に資源小国である我が国においては，産業副産物の 3R 活動（発生抑制・再利用・再生利用）の推進は極めて重要な課題であるが，石炭火力発電所から排出される石炭灰の有効利用先の大部分がセメント原料となっている今日では，社会資本投資の減少に伴い，その需要は縮小均衡の状態に陥っている。そこで，前述の諸問題を同時に解決する材料として，著者らは，コンクリート分野で培われた多くの知見を GP 硬化体の評価へ活用することで，構造利用を含めた幅広い展開が可能であると考え，研究に取り組んでいる。特に，力学的な性能評価については，コンクリート分野において提案されている実験・評価手法の多くが適用可能だと考えている [2),3),4),5),6)]。近年，配合手法や実用化に向けた研究が各機関で行われているが，研究例の多くは短期的な力学的挙動に関する確認に留まっており，クリープ等に代表される長期的な挙動に関する研究は国内ではほとんど見受けられない [7),8),9),10)]。圧縮クリープ試験に関しても 2010 年に試験法が JIS に制定されたが，GP コンクリートへの適用性は不明である。本稿では，GP コンクリートの圧縮クリープ試験への適用と試験結果について報告するとともに，水分の移動が GP コンクリートのクリープひずみに与える影響について報告する。また，得られた実験データを用いて対数関数によるクリープ曲線式を求めた結果についても報告する。

2. 実験概要

2.1 配合の考え方

GP 硬化体は，非晶質粉体（以下，活性フィラーと記す）とケイ酸アルカリ溶液（以下，ASS と記す）部分に大別される。ここに細骨材を加えたものを GP モルタル，さらに粗骨材を加えたものを GP コンクリートとし，一般的なコンクリートと同様に強制二軸式ミキサなどを用いて練り混ぜることで試料の作製が可能である。

活性フィラーの代表的な構成材料としては，前述した FA や BS がある。一方，ASS の代表的な構成材料としては，水酸化ナトリウム（NaOH）や水酸化カリウム（KOH），珪酸ソーダ（$Na_2O \cdot nSiO_2 \cdot mH_2O$）が挙げられる。ASS はこれらの構成材料を混合することで得られるため，ASS の配合は極めて複雑なものとなる。そこで，著者らは ASS に含まれるアルカリ成分である Na および K の和と H_2O のモル比をアルカリ／水比（以下，AL/W 比と記す）とし，同じく ASS に含まれる Si とアルカリのモル比である Si／アルカリ比（以下，Si/AL 比と記す）を評価軸とすることで統計的な整理を試みている [4),7)]。

2.2 使用材料と配合

表－１に使用材料を示す。本実験では，比較的圧縮強度の高い配合を用いたため，粗骨材は事前に確認を行い所定の強度が得られる硬質砂岩砕石を使用した。また，細骨材および粗骨材に含まれる水が，ASS の AL/W 比や Si/AL 比に影響しないよう，事前に絶乾状態に調整したものを用いた。**表－２**に GP コンクリートの配合を示す。活性フィラーは FA を主材とし BS を内割りで 20vol%置

*1 前田建設工業（株）　技術研究所　工修（正会員）
*2 （公財）鉄道総合技術研究所　材料技術研究部　コンクリート材料　博士（工学）　（正会員）
*3 前田建設工業（株）　技術研究所　材料研究室　（正会員）
*4 前田建設工業（株）　技術研究所　材料研究室　博士（工学）　（正会員）

表－１　使用材料

種別	仕様	物性値
FA	JIS Ⅰ種	密度　:2.40 g/cm^3 比表面積:5,470 cm^2/g
BS	石膏添加:無	密度　:2.89 g/cm^3 比表面積:4,210 cm^2/g
ASS	珪酸ソーダと 水酸化カリウムの混合液	密度　:1.35g/cm^3
細骨材	静岡県産珪砂	絶乾密度:2.60 g/cm^3
粗骨材	千葉県産砕石	絶乾密度:2.70 g/cm^3

表－２　ＧＰコンクリートの配合

配合条件		単位量（kg/m^3）						
AL/W	Si/AL	FA	BS	S	G	ASS	A1	A2
0.15	0.30	335	101	756	892	209	8.72	0.70

S：細骨材，G：粗骨材，A1：流動・遅延剤，A2：空気量調整剤

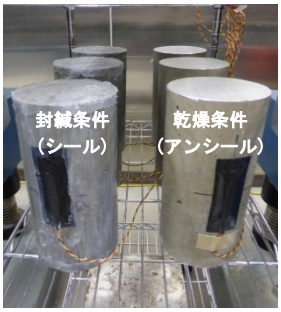
表－３　フレッシュコンクリート試験の結果

ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ (cm)	500mm ﾌﾛｰ到達時間 (sec)	空気量 (%)	練上がり温度 (℃)
69.5×68.5	15.5	4.8	29

表－４　クリープ試験供試体一覧

測定対象	養生条件		数量（本）
	載荷前	載荷開始後	
ε_{ct-u}	水中養生 7 日間 気中養生:21 日間 （20℃，60%RH）	アンシール 載荷(乾燥条件)	3
ε_{ct-s}		シール 載荷(封緘条件)	3
$\varepsilon_d+\varepsilon_a$		アンシール 無載荷(乾燥条件)	3
ε_a		シール 無載荷(封緘条件)	3
圧縮強度 引張強度		アンシール 無載荷(乾燥条件)	各 3

ε_{ct}：クリープひずみ, ε_d：乾燥収縮ひずみ, ε_a：自己収縮ひずみ



写真－１　クリープ試験状況（左：載荷，右：無載荷）

換したものを用いた。目標空気量は 5%とし，空気量調整剤の添加量により調整した。**表-３**にフレッシュコンクリート試験結果を示す。試験は，JIS A 1150「コンクリートのスランプフロー試験」，JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法－空気室圧力方法」に準じて行った。練混ぜには強制二軸式ミキサ（容量 55L）を用い，練上がり後，試料をφ100×200mm のモールドに打ち込み，プログラム式恒温恒湿槽で 80℃，95%RH，12 時間相当の加温を施し供試体を作製した。

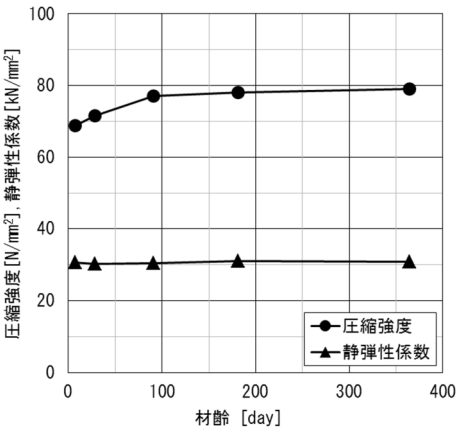
3. 実験概要

3.1 クリープ試験

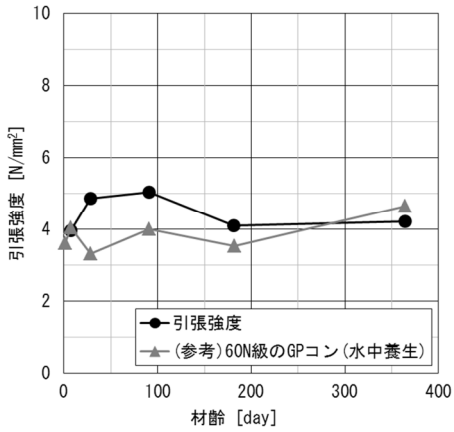
GP コンクリートの圧縮クリープ試験は, JIS A 1157「コンクリートの圧縮クリープ試験方法」ならびに既往の文献を参考に行った[11~19]。

本実験ではスプリング式（スプリング容量：392kN）の試験装置を使用し，養生条件ごとに，供試体を縦に 3 本重ねて設置した（**写真-１**）。荷重の計測は上部に設置したロードセルにより行った。また，供試体のひずみ計測には GP コンクリートからの水分による絶縁低下を防ぐため，ステンレスベースを使用した防水型のひずみゲージを採用し，長期間のひずみ計測に耐えうる仕様とした。ひずみゲージは供試体側面中央部に各 2 枚貼付した。

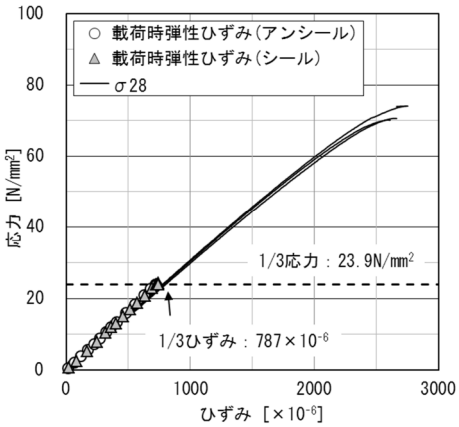
試験は恒温恒湿室内（温度 20±2℃，湿度 60±5%）で実施し，載荷開始材齢は 28 日，載荷応力度は載荷開始時圧縮強度の 1/3 とした。載荷応力の導入に際しては，供試体に荷重が正しく作用していることを確認するため，予備載荷として載荷応力度の 1/2 となる荷重を加え，載荷装置と供試体の馴染みを取り，各測定点におけるひずみ差（最大値－最小値）が，平均値の 10%未満になることを確認したうえで本載荷した。なお，載荷応力度は設定した応力度±2%の範囲を保持するよう調整するとともに，材齢の進行に伴う強度増加を考慮し，材齢 91 日の圧縮強度試験結果を用いて，載荷応力度の再調整を行っている。4.1 節で後述するが, GP 硬化体の特徴の一つに，加温養生による短時間での強度発現が挙げられる[4]。配合にも因るが加温養生後（打設翌日）には概ね所要の強度を得ることが可能である。そのため，載荷以降の材齢による強度の伸びは比較的緩やかではあるが，クリープ試験では載荷期間が長期に渡ることから，安全側の載荷



図－１　圧縮強度と静弾性係数の経時変化



図－２　割裂引張強度の経時変化



図－３　応力-ひずみの関係
（圧縮強度試験結果と載荷導入時の載荷時弾性ひずみ）

応力度の設定として前述の処置を取ったものである。4章で示す試験結果では,この材齢91日における追載荷に伴う載荷弾性ひずみ分は除外せずそのまま記載しているため留意されたい。

本実験では，通常のクリープ試験に加え，水分の移動がクリープの進行に与える影響の確認ならびにクリープ試験開始以降の乾燥収縮および自己収縮ひずみを測定するため，表面をシールした供試体（以下，シール供試体と記す）を準備した。供試体は，加温養生後すべて脱型し，材齢7日まで標準水中養生を行い，材齢7日以降は恒温恒湿室内にて保管した。シール作業は載荷前の材齢26，27日にかけて実施し，シール材にはクリープ変形への追従性を考慮しシリコン樹脂を用いた。なお，無載荷のシールを施していない供試体（以下，アンシール供試体と記す）はクリープ試験に用いた供試体と同じ環境を再現するため，載荷に合わせて上下端面にアルミテープを施している。**表-4**に，クリープ試験に用いた供試体の一覧を示す。

各ひずみは次式によって求め，収縮側のひずみを正とし，各ケースに用いた供試体の平均値（6点／ケースの平均）を用いた。

表－５　載荷応力度と載荷時弾性ひずみ

養生条件	載荷応力度 (N/mm²)	載荷時弾性ひずみ (×10⁻⁶)
アンシール	23.9	724
シール	(材齢91日以降:25.7)	742

$$\varepsilon_{ct-u} = \varepsilon_u - \varepsilon_e - (\varepsilon_d + \varepsilon_a) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ct-s} = \varepsilon_s - \varepsilon_e - \varepsilon_a \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cd} = \varepsilon_{ct-u} - \varepsilon_{ct-s} \quad (3)$$

ここに，

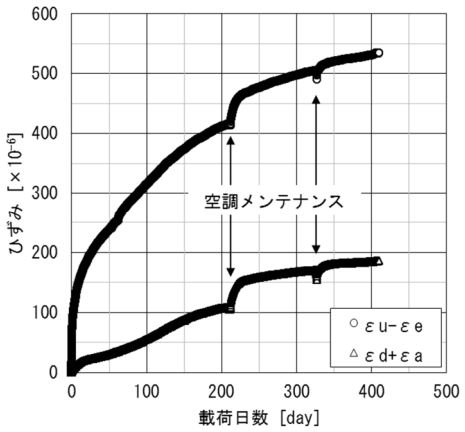
ε_{ct-u} ：アンシール供試体のクリープひずみ
ε_{ct-s} ：シール供試体のクリープひずみ（基礎クリープひずみ）
ε_{cd} ：乾燥クリープひずみ
ε_u ：アンシール供試体の全ひずみ
ε_s ：シール供試体の全ひずみ
ε_e ：載荷時弾性ひずみ
ε_d ：載荷後の乾燥収縮ひずみ
ε_a ：載荷後の自己収縮ひずみ

3.2 強度特性

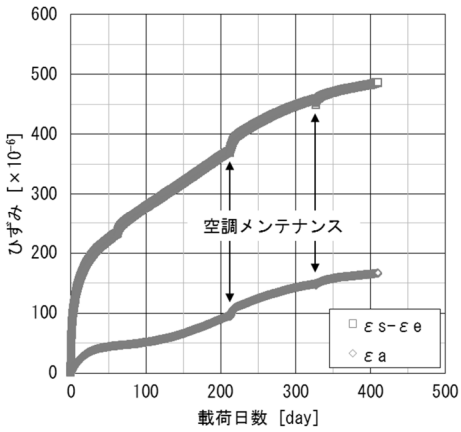
GPコンクリートの強度特性の経時変化を確認するため，圧縮強度および静弾性係数試験ならびに割裂引張強度試験を行った。供試体は，クリープ試験装置のある恒温恒湿室と同じ環境で，乾燥条件（アンシール）および無載荷の状態で保管したものを用いた。試験は，JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」および JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」ならびに JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準じて行った。試験材齢は，7，28，91，181および364日とした。

4. 試験結果

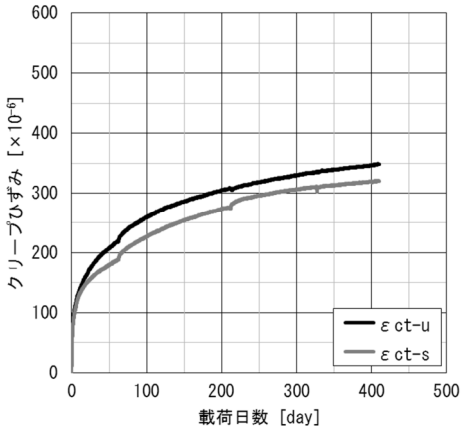
4.1 強度特性



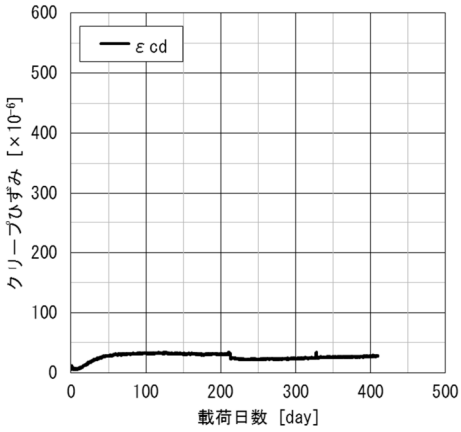
図－４　乾燥条件（アンシール）での
載荷時弾性ひずみを除いた全ひずみ



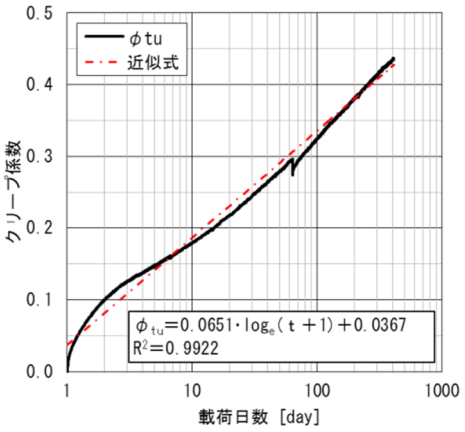
図－５　封緘条件（シール）での
載荷時弾性ひずみを除いた全ひずみ



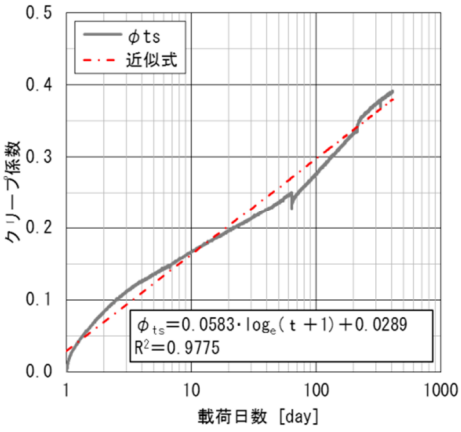
図－６　クリープひずみ



図－７　乾燥クリープひずみ



図－８　乾燥条件（アンシール）でのクリープ係数



図－９　封緘条件（シール）での基礎クリープ係数

図-１，**図-２**に，圧縮強度および静弾性係数ならびに引張強度の経時変化を示す。GP コンクリートは加温養生を行うことで比較的短期間に強度を発現することができる。材齢 7 日から 91 日までの強度の伸びは 10%程度であり，材齢 91 日から 364 日までの強度の伸びは 3%程度と非常に緩やかに増加していることが確認できる。また，静弾性係数は圧縮強度と相関性が高いことが知られており，GP コンクリートにおいても，経時に伴う強度の伸びに従い僅かに増加する結果となった。一方，引張強度は材齢 91 日をピークに 181 日で一旦低下し，364 日で微増する結果となった。一般的に割裂引張試験における引張強度は誤差が大きいため，値自体の評価はやや困難であるが，60N 級の GP コンクリートの引張強度の経時変化と合わせてみると，ある変動幅を持って概ね一定

から微増傾向にあり，こちらも圧縮強度と相関性があると考えられる[4)]。

4.2 クリープ

(1) 載荷応力および載荷時弾性ひずみ

図−３に，載荷時弾性ひずみと材齢 28 日における圧縮強度試験結果（応力ーひずみ関係）を，**表−５**に載荷応力度および各養生条件における載荷時弾性ひずみを示す。同図より，クリープ試験の載荷が弾性範囲内で線形性を保った状態で実施されていることが確認できる。同表からは，乾燥条件下（アンシール）の載荷時弾性ひずみが封緘条件下（シール）に比べ幾分ひずみが大きい結果となったが，載荷日の応力ーひずみ関係から得られた 1/3 応力度におけるひずみが 787×10^{-6} であったことを考慮すると，試験のばらつきや供試体の縦列載荷の影響に伴う差と推察される。

(2) ひずみの経時変化

図−４および**図−５**に，それぞれの載荷時弾性ひずみを除いた後の，乾燥条件（アンシール供試体）および封緘条件（シール供試体）の全ひずみならびに無載荷ひずみを示す。いずれも載荷初期に大きくひずみが発生し，時間経過に従い収束する傾向が認められる。途中，空調設備のメンテナンスに伴い相対湿度が 75%RH 程度まで上昇した結果（2.5 日間），アンシール供試体ではひずみが大きく促進する傾向がみられた。ただし，メンテナンス期間中も室内温度は 20±2℃に保たれている。一方，シール供試体ではひずみの変化は小さく，水分移動によるひずみの進行に差があることが確認された。空調設備のメンテナンス期間にシール供試体においても，ひずみが微増した原因としては，シール材そのものの吸湿ならびにひずみ計測へのシール材の干渉を極力避けるため，ひずみゲージ部にビニル製の保護テープを施しその周囲をシール材にて密封する処置を取ったため，保護テープの周囲のシールが薄くなり湿度変化の影響が出た可能性が考えられる。このことから，今後の長期計測に備え保護テープ上から再度シールを施し，経過観察を行うこととした。

(3) クリープひずみ

図−６にクリープひずみを示す。載荷 410 日におけるクリープひずみ（$\varepsilon_{ct\text{-}u}$）は 350×10^{-6} 程度であり，基礎クリープひずみ（$\varepsilon_{ct\text{-}s}$）は 320×10^{-6} 程度となった。高強度コンクリートに比べ，同程度から小さい結果であり，本試験に用いた GP コンクリートのクリープ性能は概ね高強度コンクリートと同程度と考えられる[15),16),17),18),19)]。クリープは周囲の温度・湿度，断面形状・寸法，配合，骨材の性質など種々の要因の影響を受ける。また，本試験では載荷期間が 1.1 年程度と比較的短いため，今後データの拡充を図ると共に経過を注意深く見守っていきたい。

(4) 乾燥クリープひずみ

図−７に乾燥クリープひずみを示す。乾燥クリープひずみは 30×10^{-6} 程度となり，載荷 50 日以降ほぼ一定の状態を示している。本試験では，水分移動がクリープひずみに与える影響は 10%程度となった。本試験に用いた GP コンクリートの乾燥クリープひずみは高強度コンクリートと同程度と考えられる[17)]。なお，割裂引張試験に用いた供試体の割裂面を観察したところ，載荷当初から内部は比較的乾いた状態であり，標準水中養生後の恒温恒湿室内での養生期間中に表層部分に含まれる水分が蒸発している影響を含め，詳細はさらに検討する必要がある。

(5) クリープ係数

図−８にクリープ係数を，**図−９**に基礎クリープ係数の経時変化を示す。クリープ係数は次式によって求めた。

$$\varphi_t = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_e} \tag{4}$$

ここに，

φ_t ：クリープ係数

ε_{ct} ：クリープひずみ

ε_e ：載荷時弾性ひずみ

同図より載荷 410 日におけるクリープ係数は 0.44，基礎クリープ係数は 0.39 となった。いずれも，高強度コンクリートに比べ，同程度から小さい結果であり，本試験に用いた GP コンクリートのクリープ性能は高強度コンクリートと同程度と考えられる[16),17),19)]。また，対数関数を用いたクリープ曲線式はいずれも実験値と高い相関性を示す結果となった。今後データを蓄積しクリープ曲線式を活用することで，構造物の応答値算定に用いるクリープ係数の設計値の算出も可能と考えられる。

今後の取り組みとして，GP の配合要因の一つである ASS の構成ならびに AL/W 比や Si/AL 比の影響，活性フィラーの組合せと生成物，GP の製造方法を含め，統計的な議論が可能となるようデータの蓄積を図っていく。

5. まとめ

本研究では，圧縮強度 70N/mm^2 級の GP コンクリートに対して，圧縮クリープ試験の適用を図ると共に，載荷後の乾燥収縮および自己収縮ひずみを計測し，水分の移動がクリープひずみに与える影響を確認した。得られた結果を以下に示す。

(1) 材齢の経過と共に圧縮強度や静弾性係数および割裂引張強度は緩やかに増加する傾向を示し，静弾性係数や割裂引張強度は圧縮強度との相関性がみられる。

(2) 載荷 410 日におけるクリープひずみ（$\varepsilon_{ct\text{-}u}$）は 350

×10^{-6}程度，基礎クリープひずみ（$\varepsilon_{ct\text{-}s}$）は320×$10^{-6}$程度となった。高強度コンクリートに比べ，同程度から小さい結果であり，本試験に用いたGPコンクリートのクリープ性能は概ね高強度コンクリートと同程度と考えられる。

(3) 乾燥クリープひずみは30×10^{-6}程度となり，載荷50日以降ほぼ一定の状態を示した。本試験では，水分移動がクリープひずみに与える影響は10%程度となった。

(4) 対数関数を用いたクリープ曲線式はいずれも実験値と高い相関性を示す。今後データを蓄積し，クリープ曲線式を活用することで，構造物の応答値算定に用いるクリープ係数の設計値の算出も可能と考えられる。

参考文献

1) 相原直樹，辻村太郎，上原元樹，土屋広志：鉄道用材料のLCAによる環境評価，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.5-10，2009.6

2) 舟橋政司，松林卓，南浩輔，上原元樹，佐藤隆恒：ジオポリマー硬化体の物性と構造利用に関する基礎的研究 (2)短繊維を混入したジオポリマーモルタルの曲げ破壊性状，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.67，Ⅴ-439，pp.877-878，2012.9

3) 松林卓，南浩輔，舟橋政司，上原元樹，佐藤隆恒：ジオポリマー硬化体の物性と構造利用に関する基礎的研究 (3)鉄筋を配置したジオポリマーモルタルはりの曲げ挙動，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.67，Ⅴ-440，pp.879-880，2012.9

4) 南浩輔，松林卓，舟橋政司：ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1957-1962，2013

5) 南浩輔，松林卓，梶田秀幸，舟橋政司：引抜き試験による各種鉄筋とジオポリマーコンクリートとの付着強度，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.69，Ⅴ-050，pp.99-100，2014.9

6) 松林卓，南浩輔，梶田秀幸，舟橋政司：ジオポリマーコンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりの曲げ挙動，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.69，Ⅴ-051，pp.101-102，2014.9

7) 上原元樹：ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発，鉄道総研報告，Vol.22，No.4，pp.41-46，2008.4

8) 河尻留奈，国枝　稔，上田尚史，中村　光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究，Vol.33，No.1，pp.1943-1948，2011

9) 原田耕司，一宮一夫，津郷俊二，池田攻：ジオポリマーの諸特性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1894-1899，2012

10) 佐藤隆恒，大木信洋，東原実，上原元樹：石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.2023-2028，2013

11) 土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書 規準編

12) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 設計編

13) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書改訂資料 基本原則編・設計編・施工編

14) 阪田憲次，綾野克紀，廣村治：コンクリートのクリープひずみの予測式の提案，コンクリート工学年次論文集，10-2，pp.271-276，1988

15) 尾崎訒，菅田紀之：コンクリートの長期クリープ及び乾燥収縮試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.685-690，1998

16) 後藤和正，小室努，陣内浩，川端一三：高強度コンクリートの圧縮クリープ性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.625-630，2000

17) 寺西浩司，半坂昌広，梶田秀幸，杉山英祐：Fc150N/mm^2クラスの超高強度コンクリートのクリープおよび自己収縮，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.499-504，2005

18) 今本啓一，山本俊彦，大岡督尚：約5年間のクリープ・収縮ひずみ測定データに基づく部材寸法の影響評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.529-534，2005

19) 松田拓，河上浩司，西本好克：載荷条件が超高強度コンクリートの圧縮クリープ特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.109-114，2007